第五篇

现代矿山充填采矿技术

第一章　充填工艺与设备选择

第一节　充填材料

充填材料分为干式、水砂及胶结充填材料三种。

一、干式充填材料

采用干式充填采矿法，充填材料一般可利用井下巷道掘时的废石，但来源有限，满足不了充填的需要。为此或在井下开辟专用采场开采废石，或在地面设置露天采石场满足充填的需要量。

充填材料应是惰性材料，不含挥发有害气体，含硫不应超过 5～8%，以防产生高温和二氧化硫，恶化井下大气或酿成井下火灾。

干式充填材料的块度根据充填设备而定：使用重力充填时，最大块度的直径一般不超过 200～300mm；使用抛掷机充填时，最大块度直径小于 70～80mm；使用风力输送时，最大粒径要小于管径的三分之一，一般不大于 50mm。

二、水砂充填材料

常见的水砂充填材料有：尾砂、河砂、山砂、破碎砂及水淬炉炉渣等。在我国采用尾砂充填的矿山占有较大的比重。

1. 渗透性能。水砂充填材料除对化学性质稳定及颗粒本身要有一定强度要求外，对渗透性能有较严格的要求，以期及时脱水便于进行回采作业。

在国外一般要求 20℃条件下的渗透系数 K_{20} 为 10cm/h，我国水工规范规定，渗透系数是以 10℃为标准。$K_{20}=10\text{cm/h}$，折算到 10℃时，$K_{10}=7.7\text{cm/h}$。从我国生产矿山的实际渗透系数来看 $K_{10}=4\sim19\text{cm/h}$，变化较大。某些矿山如凡口铅锌矿及铜绿山铜矿 $K_{10}=4\sim6\text{cm/h}$，即 $K_{10}>5\text{cm/h}$ 时可用于生产，从而可以认为充填料渗透系数应不低于 5～7cm/h。我国部分生产矿山实际渗透系数如下：

矿山名称	K_{10}(cm/h)
凤凰山铜矿	15
牟定铜矿	6
锡矿山锑矿	9.72
凡口铅锌矿	4～5.7
黄砂坪铅锌矿	14
招远金矿灵山分矿	10.6
红透山铜矿	19
东乡铜矿	13.5
铜绿山铜矿	4～6
招远金矿	8～10

2. 尾砂。全尾砂中细泥含量过多，很难使渗透系数达到 5～7cm/h，为此需采用水力旋流脱泥。尾砂充填矿山脱泥界线可为 0.02mm，一般充填用沉砂中 0.02mm 以下的细粒级含量约占 10～15%。尾砂的渗透性能除与粒级组成(主要是细泥含量)有关外，还与尾砂矿物的物化性质有关。新设计尾砂充填的矿山，需作渗透试验，按 $K_{10}>5\sim7\text{cm/h}$ 确定 -0.02mm 的含量。

现将我国生产矿山脱泥后沉砂的粒级组成列入表 5-1-1。

表 5-1-1　国内矿山尾砂充填料的粒级组成

矿山名称	粒级组成 粒级(mm)/含量(%)										
焦家金矿	0.355 0.12	0.154 12.09	0.1 46.00	0.071 16.30	0.056 10.56	0.05 5.98	0.04 1.00	-0.04 7.95			
东乡铜矿	0.5 0.15	0.3 1.08	0.217 3.82	0.15 11.37	0.121 12.21	0.104 3.72	0.077 14.43	0.05 20.73	0.04 10.14	0.03 9.79	-0.03 8.52
凡口铅锌矿	0.2 4.28	0.13 30.41	0.077 24.2	0.05 16.92	0.037 9.36	0.02 12.26	0.01 1.48	-0.01 1.27			
黄砂坪铅锌矿	0.2 4.77	0.147 12.89	0.074 32.79	0.043 43.15	-0.043 6.2						
铜绿山铜矿	0.053 77.6	0.038 14.9	0.027 3.6	0.017 1.7	0.01 0.6						

矿山名称	粒级组成 粒级(mm)/含量(%)										
凤凰山铜矿	0.053 92.16	0.038 6.29	0.027 0.99	0.019 0.16	-0.019 0.40						
招远金矿	0.180 410	0.150 13.5	0.125 8.0	0.090 17.5	0.075 4.3	0.063 4.8	0.053 2.0	0.044 1.0	-0.044 0.0		

3. 山砂、河砂、破碎砂及水淬炉渣。这类充填材料的粒径较尾砂要大得多。在输送时最大粒径要小于管径的三分之一,且接近管径三分之一的颗粒不宜超过 15%。表 5-1-2 列举了国内某些矿山使用这类充填材料的粒级组成及使用的管径。

表 5-1-2　国内矿山水砂充填料与其粒级组成及充填管径

矿山名称	充填材料	粒级组成 粒级(mm)/含量(%)						充填管径(mm)
凡口铅锌矿	碎石	>40 16.3	20 45.3	10 31.41	5 5.77	<5 1.22		178
凡口铅锌矿	卵石	40 23.4	20 66.0	10 9.61	5 0.88	<5 0.11		178
铜绿山铜矿	水淬煤渣	>10 3.1	10~5 15.45	5~0.99 57.57	0.99~0.066 23.54	<0.068 0.32		152~102
湘潭锰矿	碎石	50~40 0.5	40~20 7.4	20~10 16.6	10~3 26.9	3~1 29	1~0 19.6	152

水砂充填的充填体的沉降率是随孔隙率的减少而降低的。为了降低孔隙率,改善充填体的力学性质,可在粗砂中加入一定数量的细砂。如对抚顺煤矿的充填材料进行试验得知 在破碎后的页岩中加入 35~40%的河砂,充填体的孔隙率由 39%降到 31.5%,从而降低了沉降率。

三、胶结充填材料

A. 胶结充填体强度

一些矿山的胶结充填体强度资料汇总于表 5-1-3 中。

表 5-1-3　生产矿山胶结充填体实际强度资料

矿山名称	采矿方法	充填材料	灰砂比	充填体强度(MPa)
凡口铅锌矿	上向分层充填法	尾砂胶结充填	1:5~1:8	2~4
焦家金矿	同　上	同　上	1:10	0.8~1

矿山名称	采矿方法	充填材料	灰砂比	充填体强度(MPa)
铜绿山铜矿	上向分层充填法	尾砂充填,胶结尾砂铺面	1:5~1:6	3~4
大茶园矿	同　上	干式充填,胶结铺面	300kg/m³	5
斯特拉细康拉(加拿大)	同　上	尾砂胶结充填	1:30	0.35~0.4
金川镍矿二矿区	下向分层充填法	-3m 棒磨砂胶结充填	1:4 1:8	3~4 1.2~1.6
招远金矿灵山分矿	同　上	河砂胶结充填	1:6~1:8	2.45
加彭贝里矿(瑞典)	同　上	尾砂胶结充填	1:4 1:10~1:12	4.5 1.5~2.0

B. 胶凝材料

(1)水泥。水泥是胶结充填中主要胶结材料。常用 325~425 号水泥,其物理指标如表 5-1-4。

表 5-1-4　常用水泥的体重与容重

指标	水泥种类		
	普通水泥	矿渣水泥	火山灰水泥
体重(t/m³)	3.0~3.15	2.85~30	2.85~3.0
容重(t/m³)	1.0~1.6	1.0~1.2	0.8~1.15

(2)火山灰类。包括粉煤灰、高炉炉渣、反射炉渣等。矿渣需经磨碎,一般要求其粒度为 -0.074mm 的不低于 40~50%。这类物质视其火山灰活性程度来确定能否部分代替水泥,作为胶凝物质,即取决于二氧化硅及氧化钙的含量。使用火山灰类物质前需进行实验室实验来确定其效果及加入量。

在我国使用这类材料仅有实验资料,尚未用于工业生产。从国外资料来看,是可以代替水泥和减少水泥用量,提高强度,降低成本。图 5-1-1 为水泥含量的 8%时,加入不同量磨细的铜反射炉炉渣后的充填体强度与固化时间的关系曲线。

苏联的五一(Первый Май)矿用湿磨炉渣全部代替水泥取得了良好效果。炉渣的化学成分为:$SiO_2$30%;CaO47.3%;MgO3.4%;$Al_2O_3$7.23%。活性率$\left(\frac{Al_2O_3}{SiO_2}\right)$为 0.2。磨后炉渣的粒级组成如下:

粒级(mm)	+3.15	0.315~0.15	0.15~0.75	-0.074
含量(%)	10~15	20~25	15~18	42~50

每立方米充填体中加入1200kg砂子、400kg湿磨高炉渣、20kg石膏及350~380L水。6个月后的强度为12MPa。

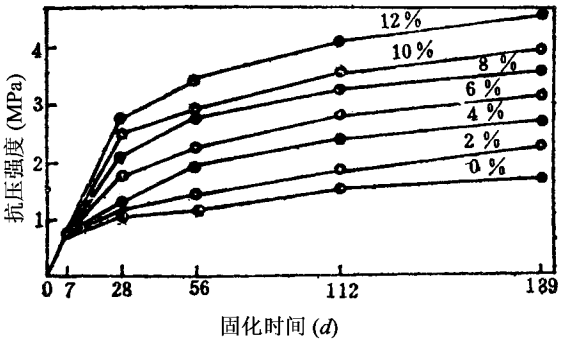


图5-1-1　炉渣对充填体强度的作用曲线

(0,2,4,6,8,10,12%为炉渣含量)

C. 尾砂胶结充填料

尾砂胶结充填在国内外均得到了广泛应用,影响尾砂充填体强度的主要因素有:水泥含量及其浓度。

在我国实际生产矿山中,用灰量较高,灰砂比多为1:8~1:10。在国外可见水泥含量低的尾砂胶结充填,灰砂比达1:20~1:30。为提高顶底柱的回收率,在矿块底部经常采用1:4~1:6的灰砂比。水泥含量及养护时间对充填体强度的影响可见图5-1-2。胶结充填的浓度对充填体积强度影响较大,浓度较低时,产生严重水泥离析,使充分填体强度大为下降。充填浓度超过68~70%时,水泥离析基本消失。浓度、水泥含量与充填体强度的关系,见图5-1-3。凡口铅锌矿的资料列于表5-1-5中。

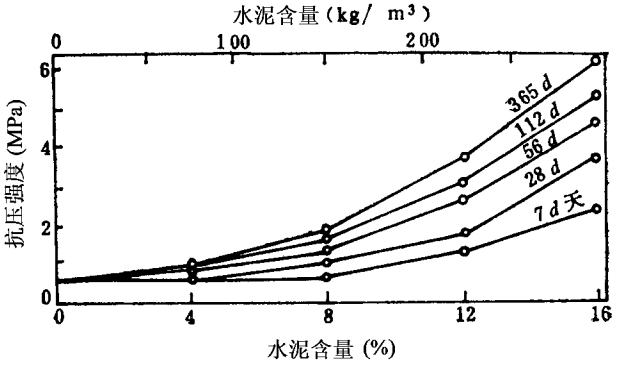


图5-1-2　水泥含量,养护时间对强度的影响

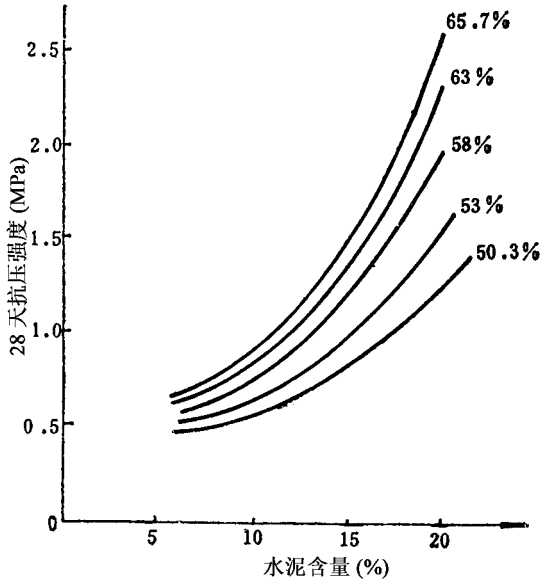


图 5－1－3　充填体强度与浓度的关系

表 5－1－5　凡口矿尾砂胶结充填体的水灰比与强度资料

水泥与尾砂比	输送重要浓度(%)	抗压强度 R_{28}(MPa)
1:3	79	12.4
1:3	70	6.96
1:3	65	6.00
1:4	75	8.50
1:4	73	7.53
1:4	70	7.00
1:4	60	5.53
1:5	75	4.40
1:5	73	3.30
1:5	70	3.00
1:5	65	3.00

在胶结充填中应力争浓度达到及超过 68～70%，以解决水泥离析，提高充填体强度。在受条件限制(如必须泵送，而目前国内胶泵额定输送浓度最高为 65%)浓度低于 65%时，可以加入絮凝剂，如每 100g 水泥砂浆中投放 0.4‰聚丙乙烯酰胺 1mg，即可达到降低水泥离析的效果。表 5－1－6 为焦家金矿充填采场中取样在井下养生的实际资料，其中离析指数是指两点取样中水泥含量差与平均值的比值。

表 5－1－6　焦家金矿充填体强度实际资料

采　场	灰　砂　比	输送浓度（%）	抗压强度（MPa）		离析指数	备　注
			7　天	28　天		
306	1∶10	62	0.55	0.97	2.62	
304	1∶10	50.7	0.41	0.69	7.24	加絮凝剂
306	1∶10	62	1.3	1.86	0.75	

D. 细砂胶结充填料

细砂系指山砂、河砂及棒磨砂等。我国许多矿山，如金川、凡口、铜绿山等矿均应用过细砂胶结充填，其中金川的经验及资料最为丰富。含列举金川生产及试验研究资料。山砂的粒级组成如下：

粒径（mm）	＋0.63	0.63～0.355	0.355～1.152	0.196～0.152
含量（%）	0.72	6.92	35.46	14.52
粒径（mm）	0.152～0.121	0.121～0.101	0.101～0.080	
含量（%）	25.19	9.48	6.48	
粒径（mm）	0.080～0.066	－0.066		
含量（%）	0.04	1.24		

充填料配比与充填体强度见表 5－1－7。

表 5－1－7　山砂胶结充填体配比及强度

浓度（%）	水泥细砂　比	水泥用量（kg/m^3）	水灰比	试块抗压强度（MPa）					
				1　天	3　天	7　天	28　天	60　天	120 天
65	1∶2	550	1.61	0.410	1.10	1.333	2.933	0.47	6.10
65	1∶4	326	2.69	0.203	0.523	0.747	1.25	2.85	2.375
65	1∶5	269	3.23	0.090	0.297	0.387	0.95	1.965	1.516
65	1∶6	226	3.77	0.087	0.227	0.353	0.658	1.700	1.560
65	1∶8	147	4.85	0.053	0.130	0.207	0.373	1.20	0.935
65	1∶10	142	5.92		0.170	0.177	0.330	0.830	
70	1∶2	578	1.28	0.630	3.767	7.183	11.00	9.830	11.15
70	1∶4	334	2.14	0.150	0.617	0.813	2.950	3.683	3.95
70	1∶5	273	2.57	0.150	0.410	0.583	1.500	2.266	2.35
70	1∶6	230	3.40	0.050	0.250	0.373	1.360	1.600	1.675
70	1∶8	176	3.86	0.040	0.200	0.273	0.750	1.033	1.075
70	1∶10	143	4.71	0.033	0.116	0.197	0.410	0.876	0.73
70	1∶20	74	9.00	0.015	0.050	0.063	0.200	0.150	0.150
75	1∶2	578	1.00		6.030	7.557	13.833	11.400	16.40

浓度（%）	水泥细砂　比	水泥用量（kg/m³）	水灰比	试块抗压强度（MPa）					
				1　天	3　天	7　天	28　天	60　天	120 天
75	1∶4	335	1.66	0.226	1.066	1.537	4.030	5.25	5.35
75	1∶5	271	2.00	0.133	0.723	0.967	3.416	3.933	
75	1∶6	231	2.33	0.096	0.463	0.583	1.916	2.260	2.025
75	1∶8	179	3.00	0.066	0.327	0.430	1.600	1.816	1.785
75	1∶10	144	3.66		0.250	0.283	0.957	1.150	0.90
75	1∶20	74.5	7.58		0.083	0.117	0.557	0.330	0.20

棒磨砂粒组成如下：

－3mm 棒磨砂粒组成

粒径（mm）	＋2.5	2.5～1.2	1.5～0.6	0.6～0.3	0.3～0.15
含量（%）	3.72	7.75	21.40	26.21	23.85
粒径（mm）	0.15～0.074		0.074～0.044		－0.044
含量（%）	10.72		2.47		3.89

棒磨砂浆收缩率及抗压强度见表 5－1－8。

表 5－1－8　**－3mm 棒磨砂浆收缩率及抗压强度**

灰砂比	浓　度		物料用量（kg/m³）			砂　浆	渗水率	收缩率	抗压强度（MPa）		
	重　量 kg（%）	容　积 C_v	水	水　泥	砂	比　重	（mm/h）	（%）	R_{28}	R_{40}	R_{120}
1∶4	70	0.4601	540.0	250.0	1008.0	1.8	40.40	20.54	4.010	4.900	6.432
1∶4	75	0.5230	477.3	286.4	1145.4	1.907	49.20	13.02	5.200	7.500	9.400
1∶4	80	0.5937	406.4	325.1	1300.5	2.022	12.02	5.43	7.260	9.070	11.160
1∶6	70	0.4623	537.9	179.3	1075.8	1.793	26.30	22.92	1.580	3.000	3.966
1∶6	75	0.5249	475.0	203.5	1221.5	1.9	53.00	12.05	2.480	2.834	4.350
1∶6	80	0.5957	404.0	231.1	1386.5	2.022	31.63	4.82	3.730	5.330	5.800
1∶8	70	0.4633	536.7	139.2	1113.1	1.789	33.49	21.51	1.200	1.600	1.600
1∶8	75	0.5262	474.0	158.0	1264.0	1.896	82.80	12.46	1.350	2.200	2.300
1∶8	80	0.5968	403.2	179.2	1433.6	2.016	68.80	6.92	1.630	2.530	2.950
1∶10	70	0.4640	535.8	113.7	1136.5	1.789	26.05	20.54	0.570	0.933	1.246
1∶10	75	0.5268	473.3	129.1	1190.6	1.893	72.00	11.90	0.760	1.120	1.400
1∶10	80	0.5975	402.6	146.4	1464.0	2.023	62.00	5.43	1.700	2.083	2.412

E. **充填用混凝土**

充填用混凝土的水泥量及水灰比是影响充填体强度及输出性能的主要因素。小水灰比流动性能差，需要矿车、电耙等方式运送，但在相同水泥含量条件下，可以达到较大的强度。

管路自流输送及泵送混凝土在一定的水泥含量时，从流动性出发有个最佳水灰比，使其塌落度满足于输送的要求。加大水灰比，因存在有粗骨料，反而会使流动性能变坏。由于矿山充填往往需要输送较长的距离，在确定水泥含量及水灰比时，应与输送方式及充填体强度综合考虑加以解决。表 5－1－9 为我国某些矿山充填用混凝土资料。

表 5－1－9　国内各矿山充填用混凝土配比

矿山名称	配比				水灰比	28 天抗压强度 (MPa)	输送方式
	碎石 (m^3/m^3)	河砂 (m^3/m^3)	尾砂 (m^3/m^3)	水泥 (kg/m^3)			
凡口铅锌矿	0.97	0.39		244	1.23	4.17	自流
凡口铅锌矿	0.98	0.39		246	1.22	1.0～4.0	浇注机
凡口铅锌矿	0.7～0.8		0.3～0.4	250～350	1	2.0～4.0	自流
锡矿山锑矿	1248(kg/m^3)		624(kg/m^3)	208	1.5	6.6	浇注机
金川镍矿	2180(kg/m^3)（戈壁积料）			200	1	10.0	电耙
金川镍矿	2150（戈壁积料）			200	1.2	5.0	电耙
托里铬矿	1			70～100			电耙
柏坊铜矿	0.8	0.5		170～240	0.75		矿车
711 矿	1130(kg/m^3)	6.25(kg/m^3)		250	0.77	11.0	浇注机
黄砂坪铅锌矿	水泥：河砂：碎石 = 1：1.7：29					15.0	矿车

金川公司拟用管路输送细石混凝土，曾在实验室试验水泥含量为 180～250kg/m^3，碎石（－15mm）含量 550～660kg/cm^3，粗砂（－5mm）含量 760～870kg/cm^3，棒磨砂（－3mm）含量 190～218kg/cm^3，水含量 300～333kg/cm^3 的细石混凝土。28 天强度为 2.5～5.5MPa，塌落度为 7.7～10cm。

第二节　充填工艺

一、充填材料的输送方法

充填料的输送方法有 水力输送、风力输送和机械输送。

水力输送。在地面充填制备站，经过充填管路利用倍线自重输送或用泵浆水砂充填或胶结充填材料送往井下采场进行充填。

风力输送。一般是在井下设置充填站，制备胶结充填或干式充填材料，再通过管路，用压气输入采场进行充填。

机械充填。干式充填材料经常是通过充填井下井，再转运到采场，通过电耙或抛掷机进行充填。充填用混凝土或通过地表搅拌，经垂直管路下井或在井下设制备站制备，然后送到采场，再用电耙或抛掷机充填。

目前国内外均是以水力充填为主。无论是风力充填还是机械充填，均有辅助的输送充填料下井问题，环节多，工艺较复杂。但风力充填机和抛掷机充填有充填密度大、接顶好的优点。在某些采矿方法，如上向及下向进路充填法中，可充分显示出其优越性。

除充填采矿法外，空场采矿法的采空区亦常用水力充填或干式自重充填等工艺进行嗣后充填。用水力充填采空区时，对脱水速度要求不严，允许在一定时间内将水脱出，对充填体含水量要求亦不严格，但必需设置脱水设施，防止充填体长期处于饱和或准饱和状态。

二、水力充填工艺

1. 流体类型的确定。从流变学角度出发，水力输送可分为牛顿流的非均质流及非牛顿流的均质流。在非牛顿流的均质流中，经常见到的有与时间因素无关的宾汉流、伪塑性流和屈服伪塑性流以及与时间有关的能变流等。

与时间因素无关的浆体类型可见切应力(τ)随速度梯度$\left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}\right)$的变化曲线(图 5－1－4)。

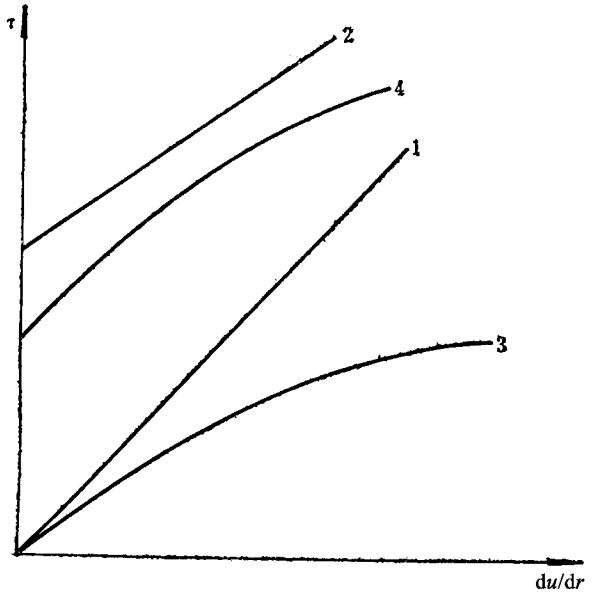


图 5－1－4　浆体的 $\tau-\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}$ 曲线

1—牛顿流；2—宾汉流；3—伪塑性流；4—屈服伪塑性流

如在距离半径为 R 的充填浆体输送管道 L 长的两点 a、b 上，测出其压差 ΔP 及管内平均流速 u_P（见图 5－1－5），即可按下列方法确定流体类型。

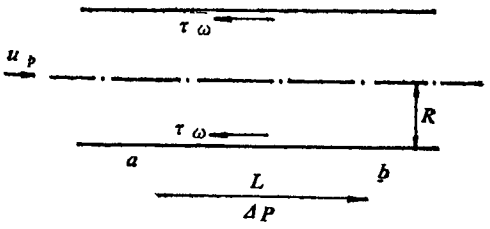


图 5－1－5　参数测定示意图

$$\tau_\omega = \frac{R\Delta P}{2L} \tag{1-1}$$

表现流动度，ϕ_a：

$$\phi_a = \frac{8u_P L}{R^2 \Delta P} \tag{1-2}$$

设管壁处的速度梯度为 $F_{(\tau\omega)}$，则有：

$$F_{(\tau\omega)} = \tau_\omega \left(\phi_a + \frac{\mathrm{d}\phi_a}{4\mathrm{d}\ln\tau_\omega} \right) \tag{1-3}$$

当流速变化时，测得 ΔP 后，求出不同速度条件下的 τ_ω 及 ϕ_a 值。作 $\phi_a - \ln\tau_\omega$ 曲线，找出该曲线斜率，即 $\mathrm{d}\phi_a/\ln\tau_\omega$。从而按式（1－3）计算出不同速度条件下的 $F_{(\tau\omega)}$，并作出 $F_{(\tau\omega)} - \tau_\omega$ 曲线，即作出管壁处的速度梯度与切应力曲线。再与典型的图 5－1－4 的 $\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r} - \tau$ 曲线的线形相比后，来确定流体的类型。

在一定的输送物料（体重、粒度）条件下，浓度是决定浆体是属于牛顿流非均质流或非牛顿流的均质流的主要因素。

2. 输送牛顿流非均质流充填料。目前我国绝大部分矿山的水力输送水砂充填材料和胶结充填材料均为非均质流。尾砂充填时，尾砂体重为 $2.7\mathrm{g/cm^3}$，重量浓度小于 67～69%（视粒度级配）为非均质流。粗砂的水砂充填均为非均质流，这类低浓度的非均质流输送水砂充填，要求充填料有较好的渗透系数，在采场内安装良好的脱水设施，使之及时脱水。

输送非均质流的胶结充填材料，因其含水量大，易产生水泥离析现象，充填体强度低。采场脱水以溢流为主。为减少水平方向的水泥离析，在充填过程中尽可能及时移动采场内的充填软管。

输送非均质流充填料，其含水量大，在脱出的水中，经常含有较多的细粒级固体物

料，需及时沉淀处理，应尽量不使之进入水仓。推荐在阶段中设采区沉淀池，固体物料在沉淀池沉淀后，可及时清除，清水流入水仓。

3. 输送非牛顿流均质流充填料。输送浆体的浓度提高到一定程度后形成均质流，均质流输送主要用于输送尾砂充填料、尾砂胶结充填料及细砂胶结充填料。其优点在于可防止管路堵塞，有利于减轻管路磨损及减少井下排水及污染；对胶结充填料来讲，更为主要的优点是可以大为提高充填体的强度。

我国金川镍矿 -3mm 棒磨砂胶结充填料的浓度可达 80%以上，呈似宾汉流。

目前国产的各类砂泵，长期输送高浓度(70%以上)的充填料是有一定困难的，均质流输送主要是利用倍线自重输送。

三、全尾砂充填工艺

1. 全尾砂充填的特点。国内的尾砂充填均用沉砂，经常出现沉砂量不足，溢流尾砂不能筑坝，需采石筑坝，费用较高，细粒级溢流尾砂对环境污染。采用全尾砂充填可以避免和改善上述问题。红透山铜矿曾利用全尾砂充填采空区，取得良好的效果。全尾砂充填的难度在于细粒级尾砂的沉降与脱水，理想条件是在地面制成高浓度的均质流输送井下，而不在井下脱水。目前主要是用于采空区的嗣后充填。

2. 全尾的触变流输送实例。苏联的阿奇塞(Ачисайский)铅锌矿使用高浓度触变流全尾砂胶结充填材料输送，全尾砂中 -0.074mm 粒级含量为 70~100%，重量固液比为 80:20~83:17。每立方米充填料中含水泥 100~140kg，全尾砂 1550~1600kg，水 400~420L。搅拌后充填料的塌落度为 10~20cm，具有良好的输送性能。充填倍线为 5~7，用直径为 140mm 的管路送往井下，生产能力为 12m^3/h。用这种方法输送充填料不需脱水，从而采矿方法的结构及回采工艺均可简化。并可在充填体强度不变的条件下大量节约水泥，由原非均质流输送时水泥消耗量的 200kg/m^3；下降到 120kg/m^3。

四、块石胶结充填工艺

苏联和澳大利亚等国自 70 年代以来，在采用空场法回采矿房后，用块石充填，再向块石中压注水泥砂浆形成了块石混凝土；或将碎石倒入采空区的同时，用管路输送水泥砂浆，形成块石混凝土。再进行矿柱回采。

苏联的捷格佳尔斯克(Дгтярский)铜矿用阶段矿房法开采，矿房宽度为 10~20m，矿柱宽为 20~22m。矿房采完后，用碎石充填采空区，碎石充填料占空间的 45~55%。然后密闭采空区，以 0.5~0.6MPa 的压力压入水泥浆(水泥：炉渣：水 = 1:1.6:2.6~1:3:3.5)。视采矿方法的结构，在矿房高度上设 2 个或 6 个密闭点压注水泥浆

(见图 5－1－6)。其充填体强度可达 2.4～2.6MPa,而填成本仅为同样强度混凝土的 50%左右。

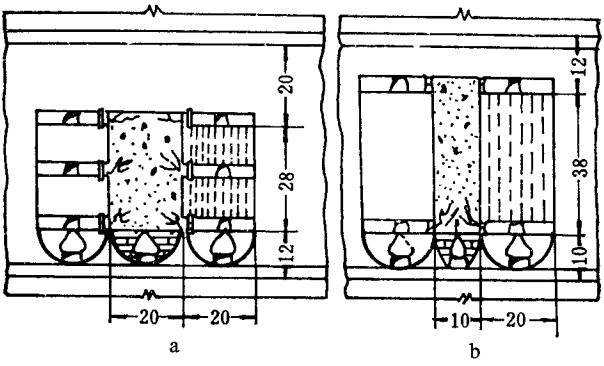


图 5－1－6　块石胶结充填示意图

a—6 点注浆;b—2 点注浆

澳大利亚蒙特－艾萨矿,采用碎石与水泥砂浆同时充填采场的方法,所得到的充填体与普通胶结体的力学指标的比较如表 5－1－10。

表 5－1－10　块石胶结充填与胶结充填力学性质比较

指　　标	胶　结　充　填　体	块石胶结充填体
密　　度(kg/m^3)	1800	2500
内聚力(MPa)	0.21	0.50
抗压强度(MPa)	0.81	2.0
内摩擦角(°)	35	35～41
峰值处割线弹性模量(MPa)	150	280

五、压气助吹混凝土自流输送

自流输送混凝土时,在水平段上可能输送的距离相对来讲是不太长的。为了解决长距离管道输送混凝土的问题,可在水平段内采用压气助吹。

为此在充填管道水平末端,每隔 50～60m,按 30°角安装一个直径为 18～25mm 的压气喷嘴。压气喷嘴带有上止逆阀,其结构如图 5－1－7。在安装压气喷嘴段(L_2),混凝土被压气间隔成段,如图 5－1－8 所示。用压气推动混凝土的各段总长为 $L=\sum l$;它应满足式(1－4)的关系:

$$P-\Delta PL=0 \tag{1-4}$$

式中　P——压气的压力,MPa;

ΔP——压气输送段内的单位运行阻力,MPa。

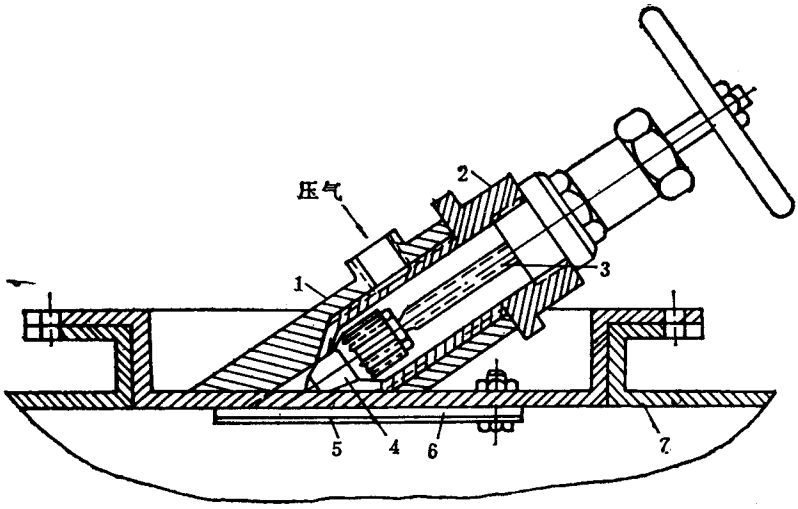


图 5－1－7　带有简单止逆阀的压气喷嘴

1—短管；2—喷嘴外壳；3—螺杆；

4—阀心；5—钢片；6—胶垫；7—管道

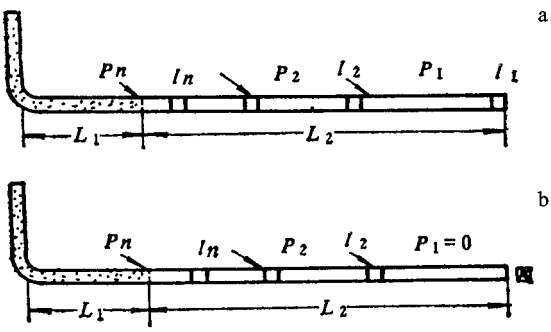


图 5－1－8　压气助吹示意图

a—混凝土被吹出前；b—吹出后

在水平管道中，从垂直段起到第一个喷嘴处的距离（L_1），应小于可能自流输送的长度。

根据苏联资料，压气压力为 0.6MPa，混凝土的原始切应力 $\tau_0 = 1.8$MPa 时，输出的生产能力与管径、输出速度及输送距离的实际资料列入表 5－1－11。从表中可以看出，在一定的生产能力条件下，欲提高输送距离，可加大管径和提高输送速度。但输送速度超过 10m/s 后，管道的磨损急剧增大。

表 5－1－11　压气输送距离、管径、速度与输送能力(m^3/h)的关系

管　径 (mm)	输送速度 (m/s)	压气输送距离(m)						
		30	50	70	90	120	150	200
150	6	454	181	129	101			
	8	604	365	259	201			
	10	756	453	324	252			
200	6	1075	650	460	358	269		
	8	1430	860	641	477	356		
	10	1970	1080	766	353	448		
250	6		1260	900	700	525	420	315
	8		1680	1200	935	700	560	420
	10		2100	1500	1164	875	700	525
300	6			1550	1210	910	726	545
	8			2230	1740	1300	1040	784
	10			2600	2020	1515	1210	910
350	6				1920	1440	1150	865
	8				2560	1920	1540	1164
	10				3200	2400	1920	1440

第三节　充填系统

一、干式充填系统和水力充填系统

1. 干式充填系统。使用干式充填时，多在地面设露天采石场，将采下岩石破碎到所需的块度，经充填井下放到井下，再转运到需充填的采场上部回风巷道。通过充填天井借自重放入采场。用方框图表示的干式充填系统如下：

采石场或废石场 → 破　碎 → 地面运输 → 充填井 → 井下运输 → 采场充填天井 → 采场内运搬、铺平

2. 水力充填系统。水力充填系统是由贮砂、制浆及输送三部分组成。水力充填系统可分为水砂充填系统与胶结充填系统。两者主要的差别在于胶结充填系统中配有水泥供给系统及制浆部分。水砂充填系统对制浆的浓度要求不严，而胶结充填要求制备出满足充填体强度需要的水泥砂浆的浓度。图 5－1－9 为水砂充填系统的示意图。

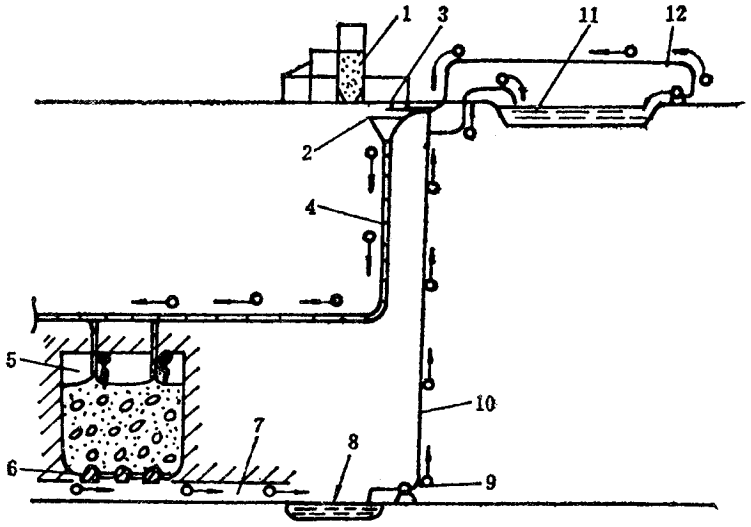


图 5－1－9　水砂充填系统示意图

1—砂仓；2—混合沟；3—水仓；4—充填管路；5—采空区；6—滤水墙；
7—设排水沟的巷道；8—沉淀池；9—水泵；10—水管；11—地面沉淀池；12—后水仓供水的管路

二、砂仓

金属矿山常见的砂仓有下列几种形式：砂盆、圆形砂仓、矩形砂仓、卧式砂仓及立式饱和砂仓(见图 5－1－10)。

前三种砂仓主要是用于水砂充填时贮存山砂、破碎砂、炉渣等粒径较大的充填料，后两种主要是贮存尾砂及细粒级破碎砂时采用。

前三种砂仓的共同缺点是放砂浓度低且不稳定。

砂盆结构简单，施工快，投资少。但容积小，死角大，有效容积仅为 65%左右。

圆形砂仓一般为地下结构，直径为 7～12m，深度超过 20m，容积为 600～2000m^3。圆形砂仓结构稳定，使用方便，维修费用少，砂仓有效利用率可达 80～85%。

矩形砂仓容积较大，一般为 2000～4000m^3，多为钢筋混凝结构。其优点在于卸车线长，出砂口多，放砂能力大；缺点为结构复杂，施工较复杂，投资较高。

卧式砂仓结构简单，造价低、易调节充填浓度，可保证高浓度输送的需要。但经常是用电耙不连续供砂，故尚需另设一个中间砂仓和连续输送机(带式输送机或螺旋输送机)。

立式砂仓是指贮存饱和砂的立式砂仓，这种砂仓能连续地均匀地放出较高浓度的砂浆(重量浓度为 60～70%)，便于实现自动控制，砂仓有效容积大，有效利用率可达 70～80%。但其结构较复杂，造价较高，检修造浆喷嘴时，需将砂放空，放砂浓度波动，满仓时浓度高，后期浓度降低。

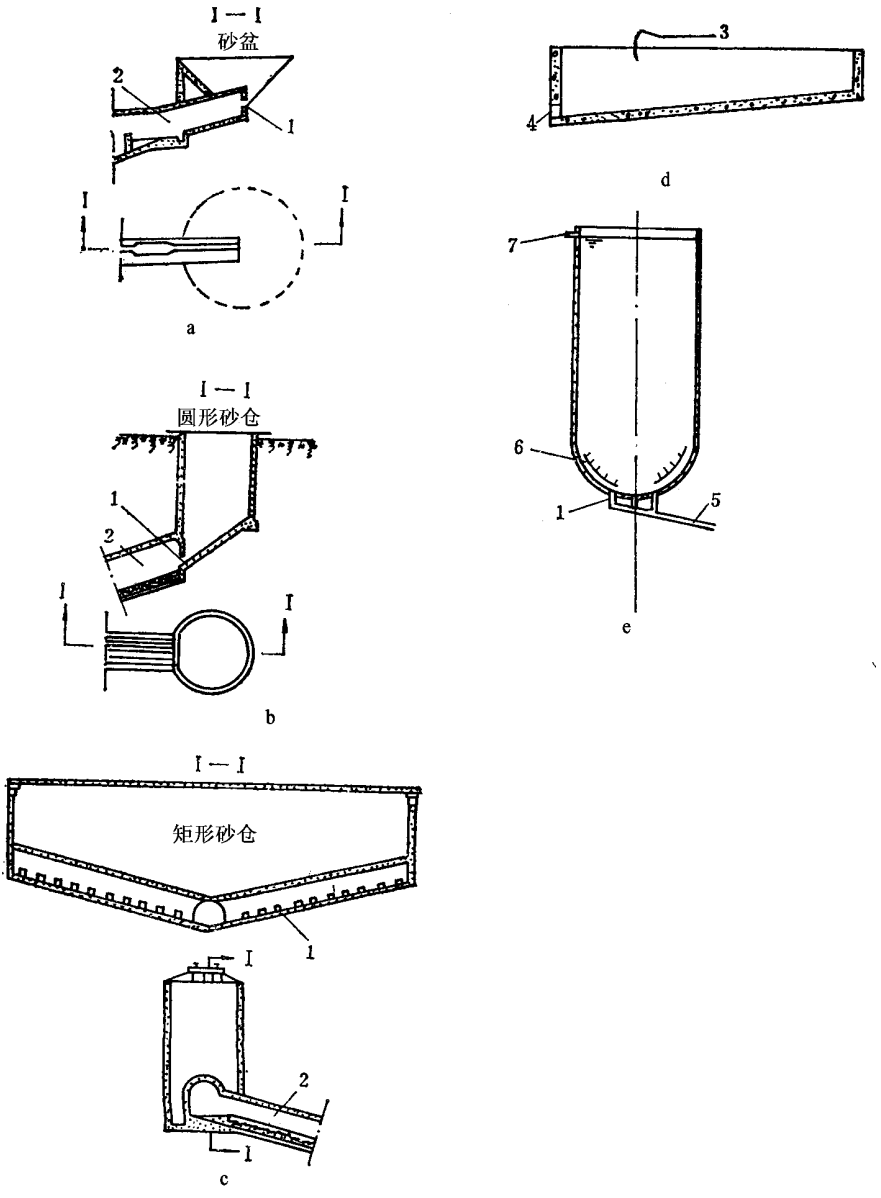


图 5－1－10　各种砂仓示意图

a—砂盆；b—圆形砂仓；c—矩形砂仓；d—卧式砂仓；e—立式砂仓；
1—放砂口；2—注砂室；3—电耙；4—滤水口；5—夹管阀；6—风口喷嘴；7—溢流管

三、充填料制备

充填料的制备可分为自重制备和机械制备

A. **不设独立制浆系统**

在某些矿山的尾砂充填系统中，不设砂仓，直接将旋流后的沉砂，经尾砂浆池向井下

输送，或旋流后即送往井下。

采用立式砂仓尾砂（细砂）充填时，在放砂过程中，在立式砂仓放砂口处用高压水喷嘴造浆，自重送往井下。

B. 混合沟造浆

采用砂盆、圆形砂仓及矩形砂仓贮砂时，经常用水枪射流放砂，用注砂室的混合沟制浆。这样制浆方式在水砂充填中，尤其是制备较粗的充填料时，应用较为广泛。水砂充填对浓度要求不严格，且这种制浆方式不需动力，是得到广泛应用的原因。由于浓度不稳定，不宜用于胶结充填系统中。

注砂室的结构如图 5－1－11 所示。它是由头道混合沟、沉铁窝、二道箅子、二道合沟、喇叭沟口组成。

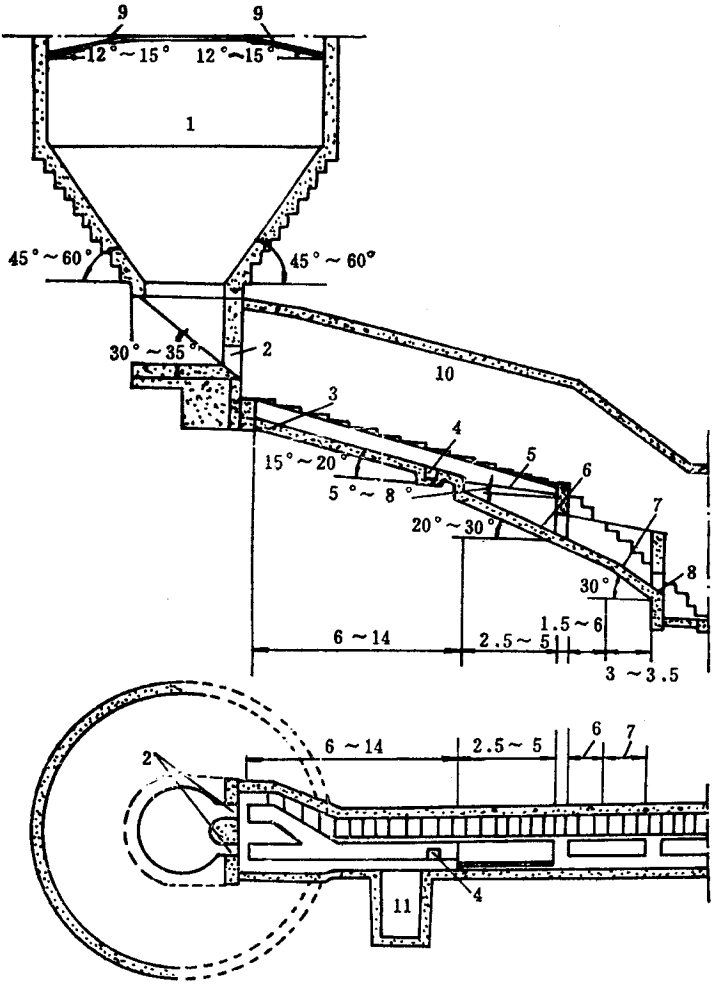


图 5－1－11　带圆形砂仓的注砂室

1—砂仓；2—大砂口；3—头道混合沟；4—沉铁窝；5—二道箅子；6—二道混合沟；7、8—喇叭沟；9—头道箅子；10—注砂室；11—人行天井

头道混合沟的坡度以 15°～20°为宜，充填料粒径大时，采用较大的坡度，常见的头道混合沟的规格见表 5－1－12。

表 5－1－12　头道混合沟规格

技术规格		砂仓型式		
		矩　形	圆　形	砂　盆
长　度(m)		8～14	6～10	4～7
坡　度(°)		15～20	15～20	15～20
混合沟条数(条)		1～4	1～2	1
混合沟断面形状		卵形或半圆形	卵形或半圆形	卵形或半圆形
断面尺寸(mm)	沟　宽	600～800	600～800	400～500
	沟　深	700～1000	700～1000	500～600

沉铁窝设在混合沟末端，一般规格为：长 400～800mm，宽 350～600mm，深 300～600mm。

二道箅子的常见规格如表 5－1－13。

表 5－1－13　二道箅子规格

充填料最大粒径(mm)	长　度(mm)	宽　度(mm)	坡　度(°)	篦孔尺寸(mm)
60	3000～5000	1400～1600	5～8	80×100
50	2500～4000	1000～1400	5～8	70×90
河　砂	2000～3000	800～1000	5	60×70

二道混合沟规格一般为宽 600mm，深 700mm，长 3.5～11m，采用耐磨材料砌成，坡度为 20°～30°。

喇叭沟一般坡度为 30°，长 3～3.5m，下端与喇叭口相接。喇叭口多为铸铁制成截锥状，下部与管道相连接。

注砂室的宽度(B)可近(1－5)计算：

$$B = nb_1 + 0.2(n-1) + b_2 + b_3, \text{m} \qquad (1-5)$$

式中　n——混合沟条数；

b_1——二道箅子宽度，m；

b_2——箅子与外缘拱壁间距，$b_2 = 0.1 \sim 0.25$m；

b_3——人行道宽度，$b_3 > 0.6$m；

0.2——箅子与箅子的间距。

C. 机械制备

用机械制备尾砂或细砂充填料系将尾砂(细砂)自砂仓放入搅拌筒内，加水搅拌制成

砂浆，如牟定铜矿（见图 5－1－13）。

尾砂（细砂）胶结充填料的制备，系将尾砂（细砂）水泥及水放入双叶片的高浓度搅拌筒内制浆（如铜绿山铜矿的充填系统，见图 5－1－14）或它单独制成水泥浆，再将水泥浆与尾砂（细砂）共同放入搅拌筒内制浆（如凡口铅锌矿的尾砂胶结充填系统，见图 5－1－15）。

充填用混凝土的制备或城地面用连续搅拌机制成混凝土后运往井下（如柏坊铜矿，见图 5－1－17）或先制成水泥浆与砂、石同时运往井下，在充填地段再用搅拌机制成混凝土。

四、充填系统实例

实例 1　湘潭锰矿破碎砂充填系统

充填料为破碎页岩，粒径为 0～40mm。采用砂盆贮砂，用 1.5m³ 底卸式箕斗卸砂。砂盆尺寸：直径 10m，深 7m。仓底为正圆锥形，仓底坡度为 45°，矿仓容积 240m³，采用电动圆筒筛。一条混合沟段长 6m，注砂室长 15m，混合沟段长度不足，见图 5－1－12。

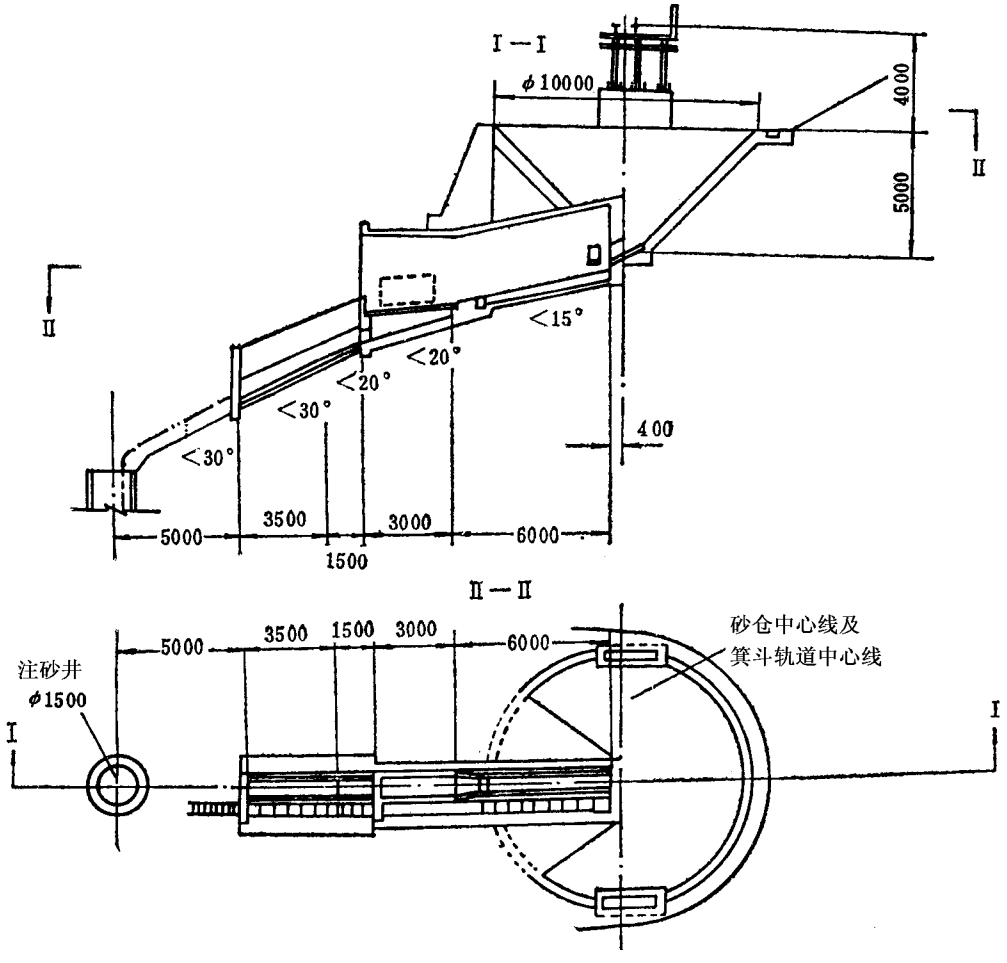


图 5－1－12　潭锰矿前进井砂盆

实例 2　牟定铜矿尾砂水力充填系统

牟定铜矿尾砂水力充填系统见图 5－1－13。牟定铜矿的尾矿用 ϕ125mm 及 ϕ300mm 旋流器分级，沉砂中 －0.037mm 颗粒的含量为 25%。砂仓中用水枪造浆，造浆浓度为 50～60%，进入搅拌筒后，用倍线自流输往井下，输送管道地面为 ϕ163×7mm，风井内为 ϕ159×12mm。

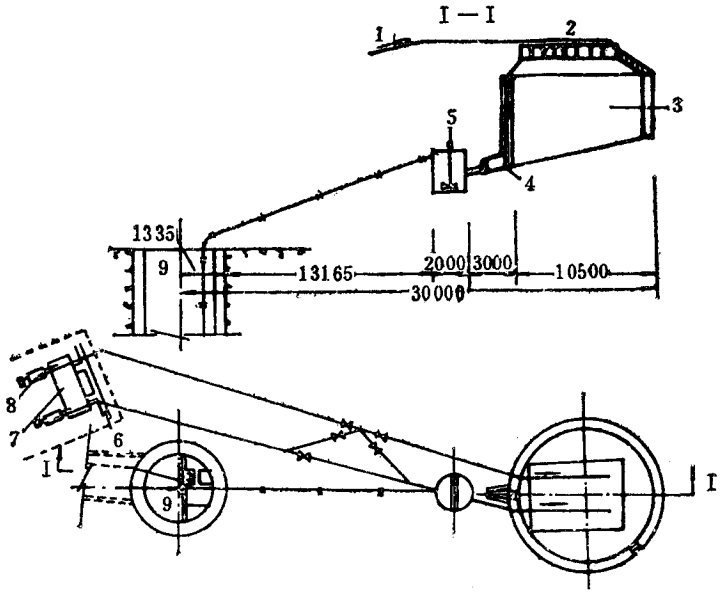


图 5－1－13　牟定铜矿尾砂水力充填设施示意图

1—进砂管；2—旋流器（ϕ125mm2 组）；

3—贮砂池（用 25mm 水二次造浆，浓度 50～60%）；

4—闸门挡板；5—搅拌槽；6—尾砂沟；

7—砂池；8—6PHA 型砂泵站；9—出风井

实例 3　铜绿山铜矿尾砂—炉渣水力充填系统

尾砂仓为半球底立式砂仓、砂仓直径 7m，由 14mm 厚的钢板制成。仓内用喷嘴松动造浆，在直径约为 1.3m 范围内产生局部流化区，经吸出管送至搅拌桶中，与散装水泥搅拌匀制成胶结料浆送往井下。浆体浓度为 75～77%，最大 80%。采用国产测试调节仪表和单参数定值调节系统对充填过程进行检测控制（见图 5－1－14）。

炉渣仓直径 7m，底部斜截面坡度 35°。炉渣径坡度为 20°，衬有辉绿石铸石，直径 300mm 的混合沟，送到各采场。

实例 4　凡口铅锌矿尾砂胶结充填系统

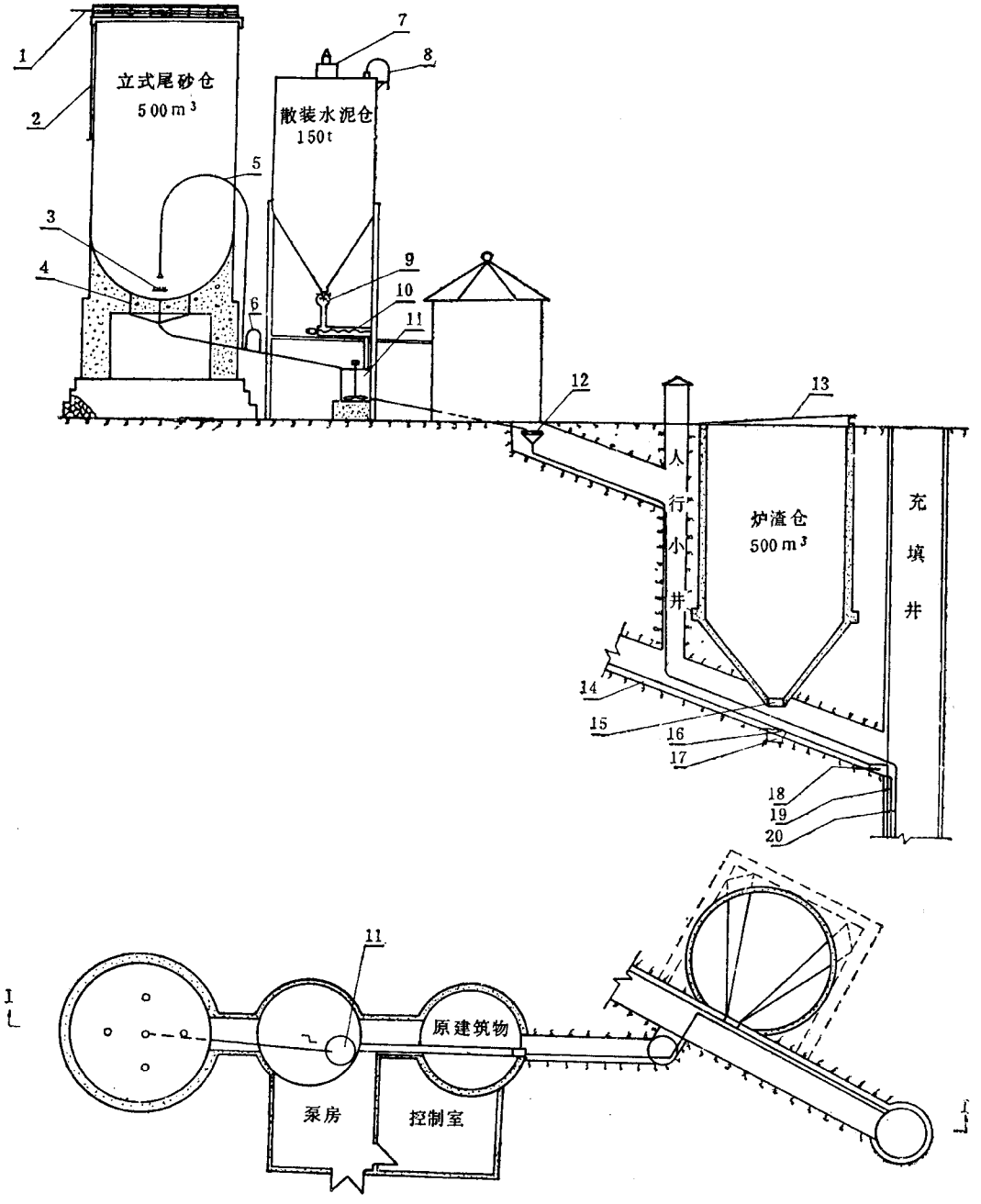


图 5－1－14　铜绿山铜矿充填系统示意图

1—进砂管；2—溢流管；3—弹力紧固止逆喷嘴；4—四孔等阻力底卸式放砂口；5—单管吸出式放砂口；6—检测仪器用管；7—袋式扑尘器；8—散装水泥进料口；9—弹性叶轮给料机；10—螺旋电子秤；11—ϕ1.5m 搅拌筒；12—漏斗格筛；13—仓面格筛；14—混合沟；15—齿条闸门；16—二道格筛；17—沉铁窝；18—混合池；19—150mm 水砂充填管；20—100mm 胶结充填管

凡口铅锌矿尾砂胶结充填示意图 5－1－15。该系统的尾砂经 ϕ500mm 的旋流器脱泥后，进入容积为 450m^3 的卧式砂仓，再由电耙运到螺旋输送机制成 70% 浓度的砂浆。水泥由 120t 的水泥库中，经 ϕ150mm 的单管螺旋输送机送到 ϕ300mm 的螺旋输送机中，并制成浓度为 50～60% 的水泥浆。砂浆及水泥浆送入 ϕ1600mm 的高浓度搅拌筒中，经搅拌，再通过充填钻孔用倍线流到井下。系统的生产能力为 60～70m^3/h 水泥砂浆。

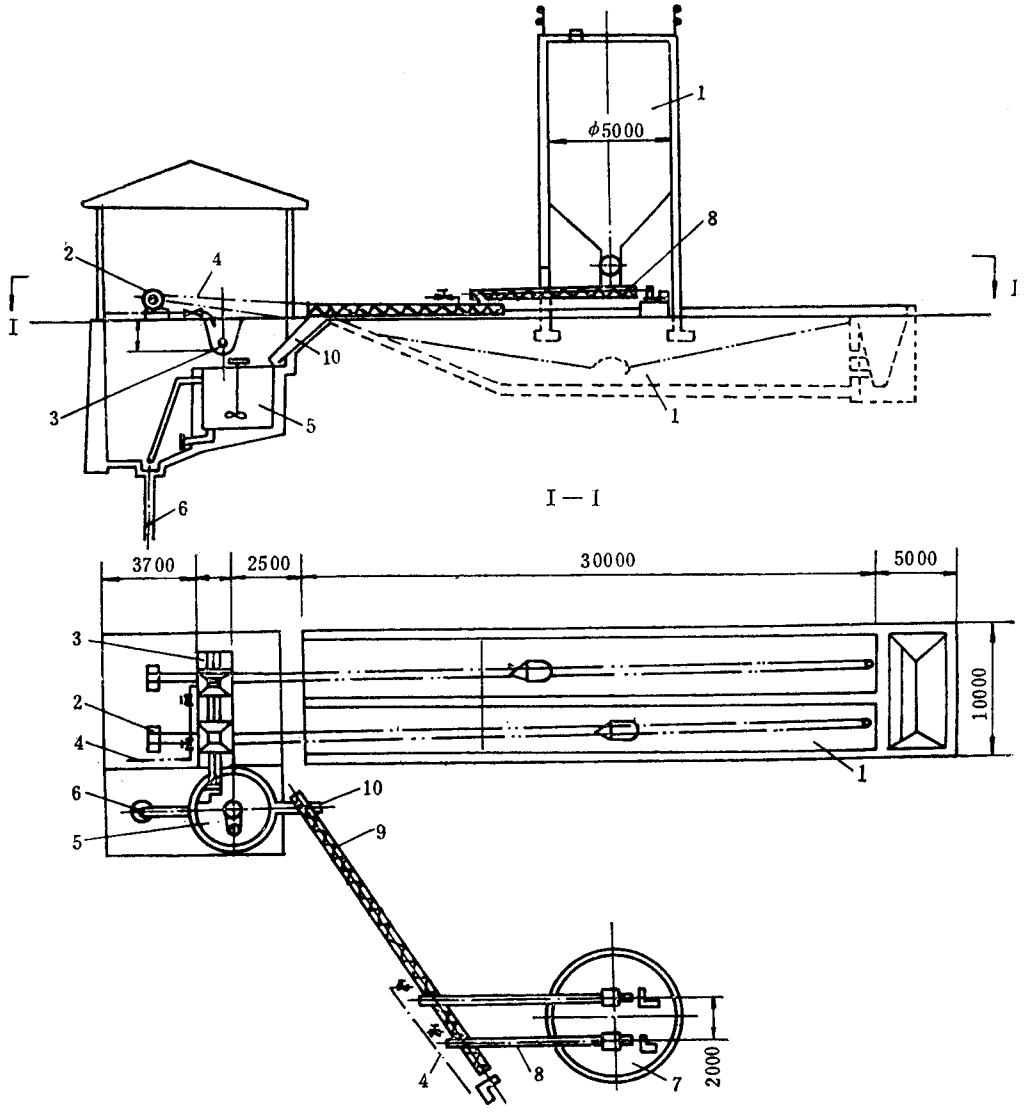


图 5－1－15　凡口矿尾砂胶结充填制备设施

1—450m^3 尾砂仓；2—28kW 电耙绞车；3—ϕ300 螺旋输送机；4—制浆供水管；5—搅拌筒(ϕ1600)；6—充填钻孔；7—120t 水泥库；8—ϕ150 单管螺旋输送机；5kW 直流调速电机驱动；9—ϕ300 螺旋输送机；10—溜槽

实例 5　金川二矿东部充填系统

东部搅拌站设有容积为 800t 的 -3mm 的棒磨砂砂仓，砂仓上部设抓斗吊，通过皮带输送到 2000×2100mm 双叶片强力搅拌筒，其电机功率为 40kW。设 150t 散装水泥库两个，通过 300×300mm 叶轮给料机，定量供给稳料仓，再用同型号的给料机供入搅拌筒，搅拌成 78~80%浓度的充填浆体流入 300mm 直径的充填钻孔进入井下。钻孔深 428~378m。整个充填系统由控制室控制，精度可达 ±1%，确保浓度和配比。见图 5-1-16。

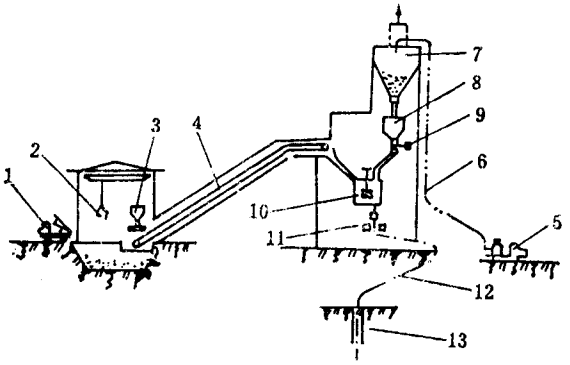


图 5-1-16　金川二矿区东部充填系统示意图

1—自卸汽车；2—5t 抓斗；3—贮砂漏斗；4—宽 500mm 皮带；
5—水泥罐车；6—吹灰管；7—水泥仓；8—稳料仓；
9—叶轮给料机；10—搅拌桶；11—流量计及浓度计；
12—充填管路；13—充填钻孔

实例 6　柏坊铜矿混凝土充填系统

柏坊铜矿混凝土系统见图 5-1-17。搅拌站为半地下式。210m^3 容积的碎石仓及 110m^3 的河砂仓均由地表用矿车向其中卸料，再由底部皮带机(宽 B=500m，4.5kW)运到 1760×1150×1130 的连续搅拌机中。水泥仓为 32m^3，水泥由螺旋喂料机(ϕ180，L=6000mm)送往连续搅拌机中，搅拌后的混凝土经 ϕ288mm 的充填管自流输送井下，再用矿车运往充填采场。生产能力为 150m^3/h。

实例 7　苏联五一矿充填系统

五一矿系用湿磨炉渣作为胶凝材料，其充填系统见图 5-1-18。该系统采用两个卧式砂仓贮存炉渣及砂子。炉渣经电耙和带式输送机进入球磨机，球磨机的生产能力为 18~20t/h。砂亦经电耙和带式输送机与磨后的炉渣浆进入连续搅拌机，搅拌后的砂浆经充填管路输送到井下。生产能力为 50m^3/h。

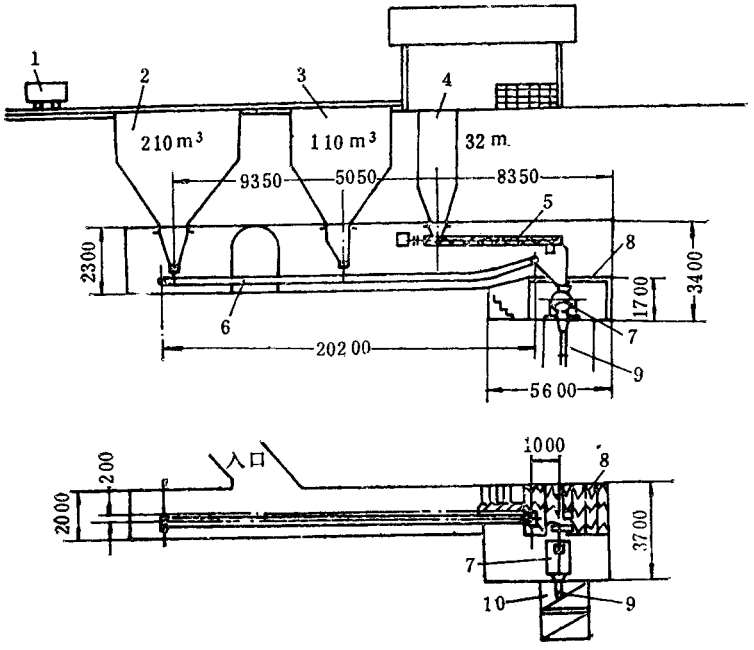


图 5－1－17　柏坊铜矿搅拌站

1—运碎石的底卸式矿车；2—碎石仓；3—河砂仓；4—水泥仓；5—螺旋喂料机(φ180，L = 6000，2.8kW)；6—带式输送机；7—连续搅拌机(1760×1150×1130，10kW)；8—操作台；9—φ288 充填管；10—充填天井

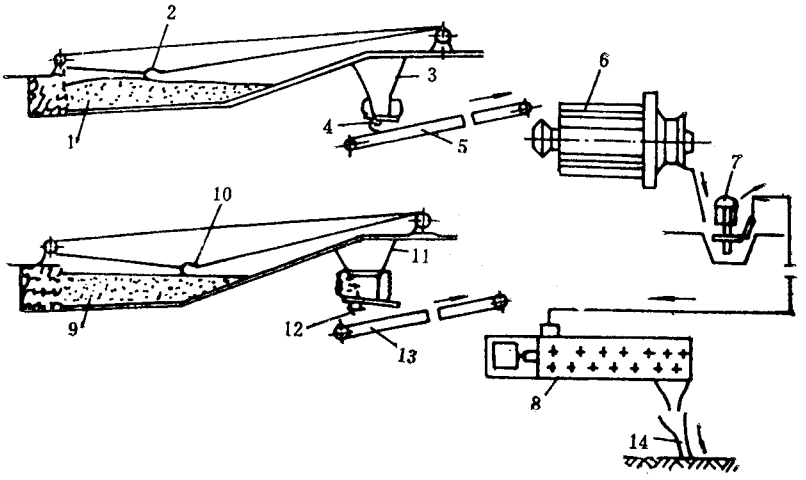


图 5－1－18　五一矿胶结充填系统示意图

1—炉渣仓；2—电耙；3—中间炉渣仓；4—电震机；5—带式输送机；6—球磨机；7—砂泵；8—直接搅拌机；9—砂仓；10—电耙；11—中间砂仓；12—电震机；13—带式输送机；14—充填管路

第四节　水力计算

一、固体颗粒的沉降米速

由于固体颗粒的重率和粒径不同，在静止的流体中沉降所产生的雷诺数（Re）亦不同，从而计算米速（不力粗度）的公式有下列四个：

$Re \leqslant 1$ 时，用斯托克斯公式：

$$W_o = 54.5 d^2 \frac{\rho_k - \rho_0}{\mu}, \text{cm/s} \tag{1-6}$$

$Re = 1 \sim 25$ 时，用阿连公式：

$$W_o = 19.5 d^{1.1} \left(\frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0}\right)^{0.7} \left(\frac{\rho_0}{\mu}\right)^{0.4}, \text{cm/s} \tag{1-7}$$

$Re = 25 \sim 500$ 时，用阿连公式：

$$W_o = 25.8 d \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0}\right)^2} \sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\mu}}, \text{cm/s} \tag{1-8}$$

$Re = 500 \sim 10^5$ 时，用牛顿－雷廷格公式：

$$W_o = 51.1 \sqrt{d\left(\frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0}\right)}, \text{cm/s} \tag{1-9}$$

式中　W_o——圆球的沉降米速，cm/h；

d——圆球直径，cm；

μ——流体的动力粘性系数，10^{-1} Pa·s；

ρ_k——固体的密度，g/cm^3；

ρ_0——流体的密度，g/cm^3。

在计算沉降米速时，需按公式计算出速度后，再按式（1－10）验算雷诺数：

$$Re = \frac{\rho_0 W_o d}{\mu} \tag{1-10}$$

上述公式用于圆形固体颗粒，非圆形时，则需乘以形状系数（x），即 $W = xW_o$，x 值如下：

颗粒形状	椭圆形	多角形	长方形	平扁形
系数 x	0.8～0.9	0.7～0.8	0.6～0.7	0.4～0.6

水的粘性动力系数与温度的关系如下：

温度，℃	0	5	10	12	15	20	30	40	50
μ，10^{-1}Pa·s	0.0178	0.0152	0.0331	0.0124	0.0114	0.0101	0.0081	0.0066	0.0055

固体物料体重为 $2.7g/cm^3$，在 20℃水（$\mu = 0.01 \times 10^{-1}$ Pa·s）中沉降时，计算 W_o 公式的适应粒径范围如下：

粒径范围（cm）	<0.02	0.02～0.07	0.07～0.32	0.32～10.95
适应公式	公式（1－6）	公式（1－7）	公式（1－8）	公式（1－9）

二、非均质流水力计算

1. 非均质流阻力计算。非均质流阻力计算理论体系及经验公式较多，但国内外均以杜兰公式为基础，对不同物料、粒径进行试验得出经验公式。

（1）杜兰公式

杜兰（R. Durand）认为可用式（1－11）来计算两相流浆体的水力坡度（i_f）

$$i_f = i_o(1 + \phi C_v)，mH_2O/m \tag{1-11}$$

式中　C_v——浆体的体积浓度；

ϕ——压务损失系数，为弗劳德数（F_r）的函数；

i_o——清水的阻力，mH_2O/m；

$$i_o = \lambda \frac{u^2}{2gD}，mH_2O/m \tag{1-12}$$

式中　λ——管道的摩擦阻力系数；

u——输送速度，m/s；

g——重力加速度，$9.81m/s^2$；

D——管径，m。

杜兰是在物料体重为 $2.6g/cm^3$ 条件下开始作实验的，计算不同重率物料时，杜兰建议在弗劳德数中加入 $\frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0}$ 项，并在管径 19.1～584.2mm、粒径 0.1～25.4mm、流速 0.61～6m/s 条件下进行了试验，得出了经验公式（1－13）及曲线（图 5－1－19）。

$$i_j = i_o\left[1 + K\left(\frac{gD}{u^2} \times \frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0} \times \frac{1}{\sqrt{C}}\right)^{3/2} \cdot C_v\right]，mH_2O/m \tag{1-13}$$

式中　K——常数，$K = 80 \sim 150$；

ρ_k——固体物料的密度，t/m；

ρ_0——水的密度，t/m；

C——颗粒沉降系数。

$$C = \frac{4}{3} \times \frac{d_g(\rho_c + \rho_0)}{\rho_0 u_0^2} \tag{1-14}$$

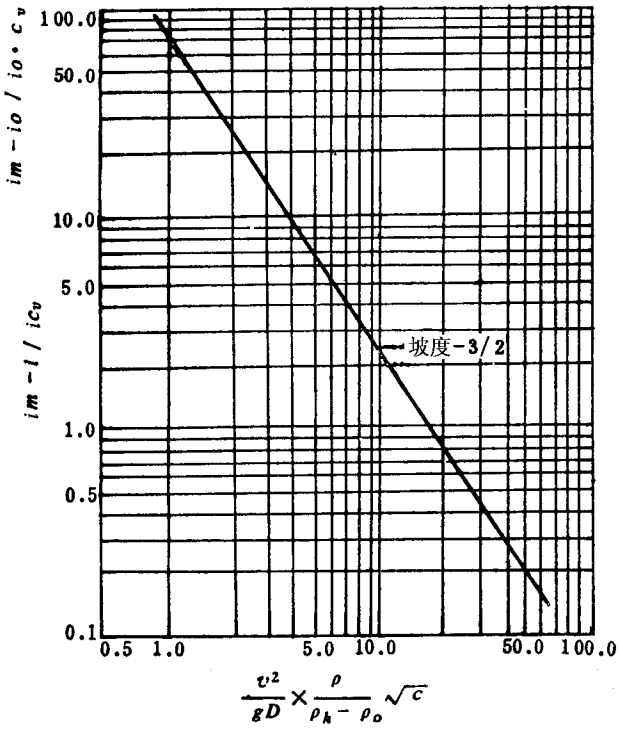


图 5-1-19　杜兰公式阻力计算曲线

(2)金川公式

我国金川公式(1-15)是金川有色金属公司研究所、长沙矿山研究院及北京有色设计研究总院共同实验并得出的,推荐在细粒物料非均质流输送时用该式计算阻力。

$$i_j = i_o \left\{ l + 108 C_v^{3.96} \left[\frac{gD(\gamma_k - 1)}{u^2 \sqrt{C}} \right]^{1.12} \right\}, \mathrm{mH_2O/m} \tag{1-15}$$

式中　γ_k——固体物料的体重,t/m^3;

其他符号同式(1-11)与式(1-12)。

2. 非均质流的水力计算步骤。经常是已知固体物料的粒径(d),体重(γ_k),浓度(C_v 或 C_g),流量(Q_j,按所需的充填能力及浓度计算)充填管路系统(长度 L 及弯管、阀门等)、充填站及进下采场标高(Z_1、Z_2)所需管径(D),计算水力坡度(i_j),泵送时,选择泵及计算泵的电机功率,其步骤如下:

(1)计算临界流速(u_1)

可用下列经验数据求临界流速:

输送粗颗粒　$u_L = (3 \sim 4)\ W_o$，m/s

输送细颗粒　$u_L = (5 \sim 10)\ W_o$，m/s

其中　W_o——颗粒的沉降米速，m/s。

亦可按其他有关临界流速的公式计算，或参考表 5－1－14 选取工作流速。

表 5－1－14　有压管内砂浆流速 m/s 值

砂浆重量浓度（%）	比重≤2.7 的尾砂（或细砂），平均粒径（mm）				
	≤0.074	0.074～0.15	0.15～0.4	0.4～1.5	1.5～3.0
1～20	1.00	1.0～1.2	1.2～1.4	1.8～1.6	1.6～2.2
20～40	1.0～1.2	1.2～1.4	1.4～1.6	1.6～2.1	2.2～2.3
40～60	1.2～1.4	1.4～1.6	1.6～1.8	1.8～2.2	2.2～2.5
60～70	1.6	1.6～1.8	1.8～2.0	2.0～2.5	

说明：当体重 $\gamma_k \geqslant 2.7$ 时需乘以校正系数 β_1 或 β_2。

当平均粒径 $d_p \leqslant 1.5$mm 时，$\beta_1 = \dfrac{\gamma_k - 1}{1.7}$

当平均粒径 $d_p > 1.5$mm 时，$\beta_2 = \sqrt{\dfrac{\gamma_k - 1}{1.7}}$

（2）求管径（D）。可按流量（Q_j）来求出临界管径（D_L）：

$$Q_j = \frac{\pi}{4} D_L^2 u_L, \text{m}^3/\text{s}$$

然后按 D_L 选取略小于标准管径（D）。

在选择管径的同时，要确定管料及内衬。这可从磨损及造价两个方面综合考虑。管材磨损情况可参考表 5－1－15。

表 5－1－15　部分金属矿山充填管材磨损情况

矿山名称	充填材料			充填用管材			管材磨损情况			
	名　称	体　重（t/m³）	最大粒径（mm）	材　质	管　径（mm）	壁　厚（mm）	换管时通过的总充填量（10^4 m³）			
							水平管	倾斜管	垂直管	弯　管
锡矿山锑矿	尾　砂	2.45	<0.3	无缝钢管	180	6～7	15～20	10		
	干碎石	2.65	<60	铸铁管	124、151	12		45		
	碎　石		<60	无缝钢管	219	8～10			3	1.15～0.5
	胶　结			无缝钢管	159～180	5～12	1～2			<0.1
红透山铜矿	尾　砂			焊接钢管	75	4	5～5		1～1.5	0.5～0.7
	胶　结		<0.4	橡胶管	76	10			>5～7	
	料			岩石钻机	100		>10			

矿山名称	充填材料			充填用管材			管材磨损情况			
	名　称	体　重 (t/m^3)	最大粒径 (mm)	材　质	管　径 (mm)	壁　厚 (mm)	换管时通过的总充填量($10^4 m^3$)			
							水平管	倾斜管	垂直管	弯　管
凤凰山铜矿	尾　砂	3.1～3.3	<0.3	无缝钢管	114	7	9～18			
				焊接钢管	108	4	3～4			
				燃料管	110	10	>25			
铜绿山铜矿	水　淬			无缝钢管	150	5			1.5～2	
		3.3	<40	无缝钢管	100	4	<1			0.02
	炉　渣			铸铁管	100	10～15	>2			0.15
霍姆斯特克(Homestake)金矿	尾　砂	3.04	<0.3	衬胶钢管	150		160			
同　上	尾　砂	3.04	<0.3	衬胶管	125		230			
同　上	尾　砂	3.04	<0.3	碳素钢管	100		37.3			

(3)选择管路摩阻系数(λ)

摩阻系数 λ,可根据表 5－1－16 查出绝对粗糙度(ε),然后按表 5－1－17 来选择。或可先计算相对粗糙度$\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$后,按紊流查图 5－1－16 选取。图中 f 为范宁摩阻系数,按 $\lambda = 4f$ 计算。

表 5－1－16　各种管道的绝对粗糙度 ε 值

管　道　种　类	ε(mm)
新的无缝钢管,镀锌管	0.05～0.2
稍有侵蚀的钢管和无缝钢管	0.2～0.3
新生铁管	0.3～0.5
旧钢管,浸蚀显著的无缝钢管	0.5 以上
旧生铁管	0.86～1.0

表 5－1－17　按尼古拉兹公式计算的 λ 值

ε(mm)	管　径　(m)									
	0.075	0.10	0.125	0.150	0.175	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50
0.2	0.0253	0.0234	0.0221	0.0211	0.0202	0.0196	0.0136	0.0178	0.0167	0.0150
0.5	0.0332	0.0304	0.0284	0.0270	0.0258	0.0249	0.0234	0.0223	0.0207	0.019
1.0	0.0418	0.0380	0.0352	0.0332	0.0316	0.0304	0.0284	0.0270	0.0249	0.023

(4)求流速(u)。按 $j=\frac{\pi}{4}D^2u$,求 u 值。

(5)求水力坡度(i_j)。可按金川公式或参考杜兰的公式及曲线。

(6)求局部阻力($\sum h_{ju}$)。局部阻力可按式(1－16)计算：

$$h_{ju}=\xi\frac{u^2}{2g}, \tag{1-16}$$

式中　ξ——局部阻力系数,可查表 5－1－18 及 5－1－19 或按表 5－1－20 的折算长度,计入总长度。

表 5－1－18　缓慢转弯阻力系数(ξ)

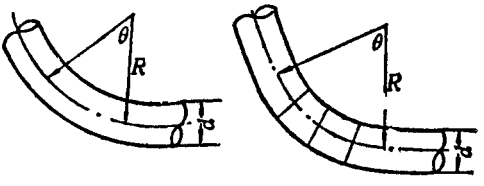
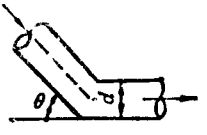
$\frac{R}{d}$	n	θ							
		15°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
1.0	1.0	0.256	0.440	0.560	0.650	0.800	0.904	0.992	1.064
	1.5	0.384	0.660	0.840	0.984	1.200	1.350	1.488	1.596
1.5	1.0	0.192	0.330	0.420	0.492	0.600	0.678	0.744	0.798
		0.288	495	0.630	0.738	0.900	1.017	1.116	1.197
2.0	1.0	0.154	0.265	0.336	0.394	0.480	0.542	0.595	0.638
	1.5	0.230	0.396	0.504	0.590	0.720	0.812	0.893	0.958
3.0	1.0	0.115	0.198	0.252	0.295	0.360	0.407	0.456	0.479
	1.5	0.173	0.297	0.378	0.443	0.54	0.610	6.670	0.718
备　注		 n=1　　n=1.5							

表 5－1－19　急转弯阻力系数

θ	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	
ξ	0.2	0.3	0.4	0.55	0.7	0.9	1.1	

(7)求总水头(H)。可按公式(1－17)求总水头：

$$H=\frac{\gamma_j}{\gamma_o}(Z_2-Z_1)+i_jL+\sum h_{ju}\times\frac{\gamma_f}{\gamma_o},\text{mH}_2\text{O} \tag{1-17}$$

式中　γ_j——浆体的体重，t/m^3；

γ_o——水的体重，t/m^3。

表 5－1－20　各种管件折合长度(单位：m)

名　称	管　径　(mm)							
	50	63	76	100	125	150	200	250
弯头(90°)	3.3	4.0	5.0	6.5	8.5	11.0	15.0	19.0
普通接头	1.5	2.0	2.5	3.5	4.5	5.5	7.5	9.5
全开闸门	0.5	0.7	0.8	1.1	1.4	1.8	2.5	3.2
三　通	4.5	5.5	6.5	8.0	10.0	12.0	15.0	18.0
逆止阀	4.0	5.5	6.5	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0

(8)选泵及求泵的电机功率。目前有六种砂泵可以供选择，它们的使用条件如下：PS 型砂泵，用以输送尾砂浆，最大输送浓度为 60～70%；PH 型灰渣泵，用以输送颗粒小于 2.5m 的砂石混合浆体；PN 型泥浆泵，可输送含砂浆体，浓度不大于 60%；M、AH、HH、L 型渣浆泵，为带金属和橡胶内衬，前三种输送高浓度渣浆；PN_j 型衬胶砂泵，可输送尾砂及含砂浆体，输送浓度不大于 65%，油隔离泵(马尔斯泵)，输送固体粒径不超过 1mm、浓度不大于 60%的浆体。

近年来在国外使用管道泵输送浆体。这种管道泵投资较大，但寿命长，能力大。在日本使用的几条管道泵系统的流量为 0.5～1300m^2/h，压力为 5.0～8.5MPa，输送固体物料最大直径达 54mm。目前我国已研制出样机。长距离输送在国外还广泛应用隔膜泵及柱塞泵。

泵的型号是按流量及总压头选出的。电机的功率按流量及总压头求出：

$$N = \frac{\gamma_o Q_j H}{\eta} \times 10^{-3}, \text{kW} \tag{1-18}$$

式中　γ_o——水的重率，$\gamma_o = 9810 N/m^3$；

Q_j——流量，m^3/s；

H——总水头，mH_2O；

η——综合效率。

3. 非均质流的自流输送。自流输送时，需按式(1－19)计算充填倍线 N：

$$N = \frac{L}{H} \tag{1-19}$$

式中　L——充填管道总长，m；

H——充填管道入口及出口垂直高差，m。

当充填倍线满足下列要求时，可用自流输送：$N_{max} < 10 \sim 12$（水砂自流输送）；$N_{max} < 5 \sim 8$（尾砂及细砂胶结充填自流输送）。

在管线设计时，可计算出总阻力与实际高差所产生的压差，来验算能否利用充填倍线自流输送。

三、非牛顿流充填浆体输送阻力计算

1. 临界雷诺数。均质流与非均质流在阻力计算上有较大的差异，不象非均质流那样，在 $u - i$ 曲线上有临界流速的凹点。此时需求出临界雷诺数，工业上按过渡流速输送。此时既可靠阻力又小。

由于高浓度充填体的输送近似宾汉体，以下按宾汉体计算。

如已知管道直径（D，m）及用粘度计找出原始切应力（τ_0，Pa）及刚度系数（η，Pa·s，即高速度梯度时的粘度系数，μ_∞）等宾汉流体的流变学参数以及浆体的密度（ρ，kg/m^3）后，可按式（1－20）求出无量纲的赫德斯托姆数（N_{He}），再根据赫德斯托姆数按图 5－1－20 的曲线查出临界雷诺数（Re）$_L$

$$N_{He} = \frac{\tau_0 \rho D^2}{\eta^2} \qquad (1-20)$$

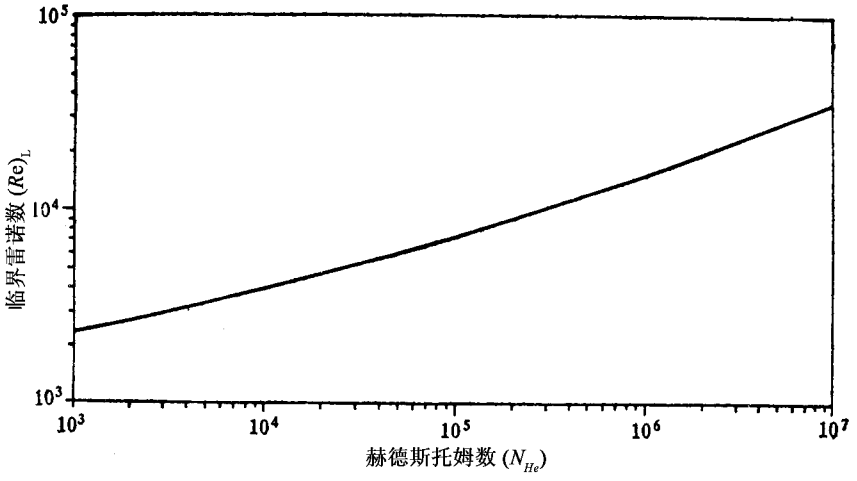


图 5－1－20　宾汉体管流的（Re）$_L$ 随 N_{He} 的变化

过度流速（u_T）可按式（1－21）计算 $u_T = (Re)_L \frac{\eta}{D\rho}$，m/s　　（1－21）

2. 摩阻力系数宾汉流体摩阻力系数与清水的摩阻系数近似，在层流区接近于 $f = \frac{16}{\sqrt{Re}}$ 在紊流区接近于尼古拉兹方程：

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0\lg\left(Re\frac{}{\sqrt{f}}\right) - 0.4 \qquad (1-22)$$

式中　f——范宁摩阻系数。

以上计算均是以刚度系数(η)定义雷诺数的。在工程上可以用清水摩阻系数计算宾汉流体的阻力。可按相对粗糙度$\frac{\varepsilon}{D}$(ε——绝对粗糙度,见表 5－1－21;D——管径)及雷诺数,查图 5－1－21 求出范宁摩阻系数(f)。

表 5－1－21　充填机的规格性能

型　　号	FCH－1 (国产)	MARKHAM (英国)	KZS150 (联邦德国)	KZS－250 (联帮德国)	KZ－80 (联帮德国)	KZ－350 (联帮德国)	MF2B (苏联)	SWF10 (联帮德国)
类　　型	风力充填机	风力充填机	风力充填机	风力充填机	风力充填机	风力充填机	抛掷机	抛掷机
生产能力(m^3/h)	100	60	150	250	80	350	320(t/h)	70
滚筒转数(r/min)	40	40						
皮带(抛掷)速度(m/s)								
管　径　(mm)			125	150	100	200		
电机容量(kW)	22	17	30	40	20	40	110	102 (柴油机)

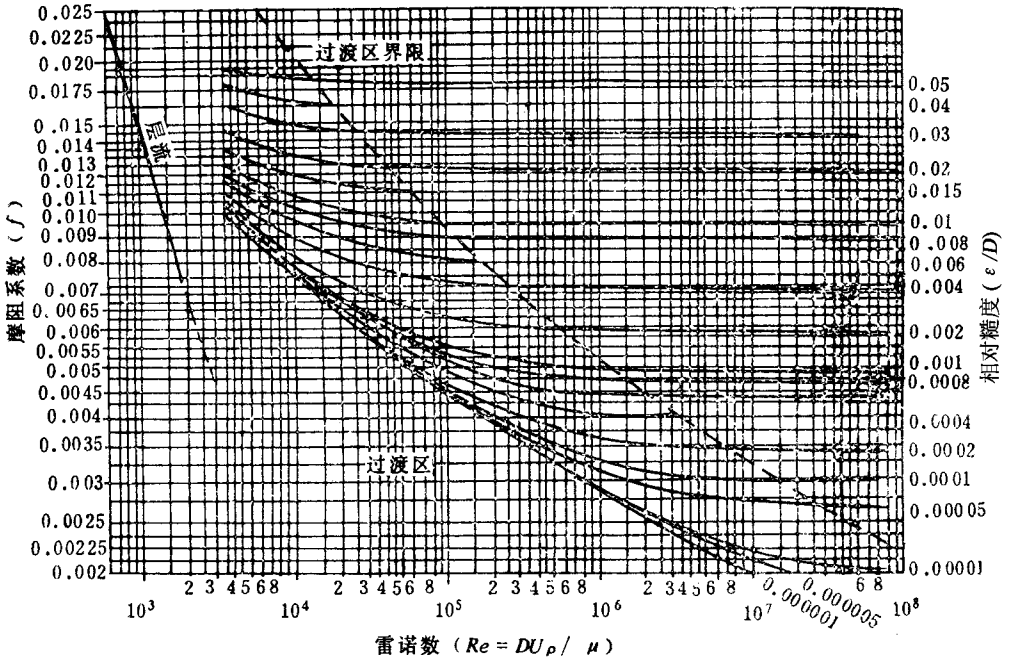


图 5－1－21　管道紊流的摩阻系数

3. 阻力计算。阻力可按达西公式(1－12)进行计算。但 λ 值按所求得的范宁摩阻系数(f)的 4 倍,即 $\lambda = 4f$ 代入。从而得:

$$i_j = \frac{4fu^2}{2gD} = 2f\frac{u^2}{gD}, \text{mH}_2\text{O/m} \qquad (1-23)$$

4. 计算步骤。在宾汉流的阻力计算中,需在已知管径的条件下,求出赫德斯托姆数,再找出临界雷诺数。按临界雷诺数找出阻力系数和求出过渡流速。为此,在计算过程中,可按所给出的流量估计几个管径,再进行计算,分别求出阻力和流速。最后选出技术经济上最佳的管径及输送参数。

流变学参数(η,τ_0)则可用旋转粘度计实验得出,或做小型环管实验求得。

第五节　充填设备

一、充填机

一些常见的风力充填机及抛掷机列入表 5－1－21 中。

二、旋流器

常见旋流器规格如表 5－1－22 所示。

表 5－1－22　常用水力旋流器规格型号

旋流器直径 ϕ (mm)	给料口尺寸 (mm)	溢流口直径 ϕ (mm)	沉砂口直径 ϕ (mm)	锥角 (°)	锥体高度 (mm)	圆柱筒高度 (mm)	溢流管深度 (mm)	溢流粒径 (mm)	料浆浓度 (%)	处理能力 (m^3/h)	入口压力 (MPa)	设备重量 (kg)	备注
100	30×5 30×7 30×10	14,18,26	11	20	275	60		0.025～0.25	50～60	1.5～9	0.5～0.3	17	
125	25×10	50	16～30	20	255	110		0.025～0.25	50～60	24～15	0.5～0.3	57	
150	40×8 40×10 40×12	20,30,40	15	20	326	100		0.025～0.25	50～60	4.8～54	0.05～0.3	110	
200	56×24 56×20 56×16	30,36,50	21	20	454	156		0.025～0.25	50～60	4.8～54	0.05～0.3	200	
250	50×20	125	35	20	595	170		0.025～0.25	50～60	6.5～61.2	0.05～0.3	210	

旋流器直径 ϕ (mm)	给料口尺寸 (mm)	溢流口直径 ϕ (mm)	沉砂口直径 ϕ (mm)	锥角 (°)	锥体高度 (mm)	圆柱筒高度 (mm)	溢流管深度 (mm)	溢流粒径 (mm)	料浆浓度 (%)	处理能力 (m^3/h)	入口压力 (MPa)	设备重量 (kg)	备注
300	75	125	50	20	800	200 210	200 210	0.025～0.25	50～60	24～60	0.05～0.3	243	
350	80×35	40,50,60	25	20	865	180	155	0.025～0.25	50～60	24～90	0.05～0.3	280	
150	40×10 40×20	40	12 17	20	221	200	130	0.025～0.25	50～60	4.8～54	0.05～0.3	380	内衬灰绿岩
500	40×20	110	68～17	20	1090	380	300	0.025～0.25	50～60	24～108	0.05～0.3	640	内衬灰绿岩

三、搅拌筒

常见搅拌筒规格如表 5－1－23 所示。

表 5－1－23　搅拌筒规格

名称及规格	有效面积 (m^3)	转速 (r/min)	电动机		设备重量 (kg)
			型号	功率(kW)	
搅拌筒 ϕ1500×1500	22	320	jO_2－51－6	5.5	861
搅拌筒 ϕ2000×2000	5.46	230	jO_2－52－6	7.5	1240
搅拌筒 ϕ2500×2500	10.0	230	jO_2－62－6	13	1240
搅拌筒 ϕ3000×3000	21.0	210	jO_2－72－6	17	426
高浓度搅拌筒 ϕ1500×1500	225	280	jO_8－1808	18.5	
高浓度搅拌筒 ϕ2000×2000	5.5	260	jO_2－72－6	22	2730

四、砂泵

PS 型砂泵、PH 型灰渣、PN 型泥浆及 PNJ 型衬胶砂泵的规格列入表 5－1－24。

表 5－1－24　PS、PH、PN、PN_j 型泵性能

水泵名称	型号规格	联接形式	配带功率(kW)	性能	
				流量(m^3/h)	扬程(m)
砂泵	$2\frac{1}{2}$PS	直	Y160L－4 15	30 50 70	13.5 50 21

水泵名称	型号规格	联接形式	配带功率(kW)	性能	
				流量(m^3/h)	扬程(m)
砂泵	$2\frac{1}{2}$PS	间	Y180L－4 22	30 50 70	35 34.5 33
砂泵	4PS	间	Y200L－4 30	90 120 160	25 24 21
砂泵	4PS	直	Y250M－4 55	90 120 160	37 36.5 35.5
砂泵	5PS	直	Y280M－6 55	180 240 320	29 28 25
砂泵	5PS	间	Y280S－4 75	180 240 320	36 35 31
灰渣泵	4PH	直	Y225M－4 45	100 150 200	43 39 37
灰渣泵	4PH－60	直	Y280S－4 75	140 180 220	61 60 59
灰渣泵	6PH	直	JS111－4 115	330 100 480	18 47 49
灰渣泵	6PH	直	JS116－4 155	350 450 550	62 58 54
灰渣泵	8PH(1)	直	JS127－6 185	450 550 600	65 63 62
灰渣泵	10PH(1)	直	JS148－3 $\frac{6}{240}$	358 770 960	51 19 47.5
灰渣泵	10PH(1)	直	JSQ158－6 $\frac{6}{550}$	768 1030 1290	91.8 88 85

水泵名称	型号规格	联接形式	配带功率(kW)	性　能	
				流量(m^3/h)	扬　程(m)
泥浆泵	1PN	直	Y100L2－43	7.3 12 16	14 13 12
泥浆泵	2PN	直	Y160M－4 11	30 47 58	22 19 17
泥浆泵	3PN	直	Y180L－4 22	54 108 151	26 21 15
泥浆泵	4PN	直	Y250M－4 55	100 150 200	41 39 37
泥浆泵	4PN	直	Y250M－4 55	41.5 80 111	51 50 49
泥浆泵	4PN	直	Y280S－4 75	52 100 138	51 50 49
泥浆泵	8PN(1)	直	JS128－6 215	450 550 600	65 63 62
泥浆泵	10PN(2)	直	JSQ1512－6 $\frac{6}{780}$	780 1030 1290	91.8 88 85
胶　泵	25PNJ	直	$Y100L_2-4$	12 15 13	14 13 11.5
胶　泵	2PNJB	直	Y160M－4 11	27 40 50	22 21 19
胶　泵	2PNJB	间	Y180M－4 18.5	27 40 50	40 38 36
胶　泵	4PNJA	间	Y200M－4 30	80 110 136	30.5 28.5 28

水泵名称	型号规格	联接形式	配带功率(kW)	性　能	
				流量(m^3/h)	扬　程(m)
胶　泵	4PNJA	直	Y250M－4 55	95 130 160	43 41 40
胶　泵	6PNJB	直	Y315S－6 75	250 300 400	38 37 33
胶　泵	8PSJ	间	Y315S－6 75	530	25
胶　泵	8PSJ	间	JS117－6 115	450 594 704	35 30 28
胶　泵	10PSJ	直	JSQ148－6 $\frac{6}{310}$	700 1000 1250	43 40 35

新型渣浆泵规格列入表 5－1－25 中，其中 L 型为低浓度泵，M、AH、HH 型为高浓度泵；M、AH 为耐磨金属内衬或橡胶内衬；HH 型为耐磨金属内衬。

表 5－1－25　渣浆泵规格性能

型号规格	出水口径 (mm)	转　速 (r/min)	最大配带功率 (kW)	性　能		最佳效 (%)
				流　量 (m^3/h)	表　程 (m)	
20A－L	20	1800～2890	7.5	3.34～11.9	31.8～10	10
50B－L	50	1420～2800	15	16.2～80.3	45.8～9	62
75C－L	75	900～2400	30	25.2～166	46～52	57
100D－L	100	800～1800	55	39.6～270	46.8～6.5	60
1½1C－HH	25	1400～2000	30	8.2～30.0	75～34.7	30
3/2C－AH	50	1300～2700	30	20.9～86.4	62.6～12	56
3/2D－HH	50	850～1350	55	33.1～121	76～26.5	47
4/33C－AH	75	1000～2000	30	56～176	41～8	63
4/3D－AH	75	1800～2300	55	66.6～205	54.2～27	6
6/4D－AH	100	800～130	55	79.2～310	41.5～12.5	68
6/4E－AH	100	1000～1600	226	97.2～382	62.5～19.5	68
6S－H	150	500～980	460	321.3～903.6	91.2～20	65
8/6E－AH	150	500～1100	115	119～720	58～10	72
8/6R－AH	150	900～1140	300	205～738	62～32	72
10/8E－M	200	580～900	115	288～1080	42～15	73
10/8ST－AH	200	580～730	320	335～1058	47～25	71
12/10ST－AH	250	580～730	380	504～1584	54～28	80
14/12ST－AH	300	490～585	480	821～1962	60.8～36	77

油水隔离泵规格列入表 5－1－26 中。

表 5－1－26　油隔离泵规格性能

型　号	出口压力 (MPa)	流　量 (m^3/h)	冲　次 (S^{-1})	缸　径 (mm)	活塞行程 (mm)	管　径(mm)	
						进　口	出　口
YNB－80/20	20	80	43	180	350	200	120
YNB－100/20		100	43	200			
YNB－125/20		125	41	200	450	250	150
YNB－160/20		160	46	200			
YNB－200/20		200	46	250			
YNB－80/40	40	80	45	180	350	200	135
YNB－100/40		100	46	200			
YNB－125/40		125	47	220			
YNB－160/40		160	48	220	450	200	150
YNB－200/40		200	45	250			
YNB－80/80	8.0	80	48	180	350	200	135
YNB－100/80		100	48	200			
YNB－125/80		125	49	220			
YNB－160/80		160	50	220	450	250	150
YNB－200/80		200	47	250			

电　动　机				空压机型号	外形尺寸(mm)	总重量
型　号	功　率 (kW)	转　速 (r/min)	电　压 (V)		长×宽×高	(t)
$JS_2355M－10$	75	586	380	CZ－20/30	9050×3000×2300	12.5
$JS_2355M－10$	95	586				12.5
$JS_2400S－10$	112	589				12.8
$JS_2400M－10$	132	589				18.5
$JS_2400M－10$	160	589				18.5
$JS_2400M－10$	132	589		1－0.663/60	8400×2500×2000	18
$JS_2400M－10$	100	589				18
JS1410－10	200	590	600			20
JS157－10	200	585				26.5
JS158－10	310	592				27
JS157－10	260			CZ－0.41/150	9060×2600×2000	2.7
JS158－10	310					27.7
JS－1510－10	400					28.5
JS－15－10	500					38.5
JS－15－10	630					38.5

五、混凝土泵

将国内常见的混凝土泵列入表 5－1－27 中。

表 5－1－27　混凝土输送泵的主要技术规格

型　　号		HB－30	HB－60	HB－8A(B)	HB－15	IPF85B	DC－115S
最大排量(m^3/h)		30	60	8	15	85	70
最大输送距离(m)	水　平	350	400	200	250	310～750	270～530
	垂　直	60	65	30	35	80～125	70～110
最大骨架直径(cm)		卵石 50 碎石 40	卵石 50 碎石 40	卵石 50 碎石 40		30～50	卵石 30～50 碎石 25～40
主电机功率(kW)		45	55	22	30		
塌落度(cm)				3～12		5～23	5～22 (常用 10～15)
管道直径(mm)				150	150	100～150	100～150
清洗方式		压气吹压	压气吹压	压气吹压	压气吹压		水洗
制造厂家		夹江水工机械厂	夹江水工机械厂	沈阳振动机器厂	沈阳振动机器厂	湖北建筑机械厂	日本三菱 上海宝钢引进

第二章　胶结充填采矿新技术

第一节　膏体充填料的配比选择

一、膏体充填的基本概念

将一种或多种充填材料与水进行优化组合，配制成具有良好稳定性、流动性和可塑性的牙膏状胶结体，在重力或外加力（泵压）作用下以柱塞流的形态输送到采空区完成充填作业的过程叫做膏体充填。作者认为膏体充填料是非牛顿流体，其流变模型近似于宾汉姆体，其流动状态为结构柱塞流，其流变参数的获得只能靠实测或经验公式计算，不存在临界流速。

膏体充填料的可泵性是反映膏体充填料是否可泵送的一个综合指标，体现为膏体充填料通过弯管部位、锥形管和管接头等管件的能力，是膏体充填料稳定性、可塑性和流动性在泵送过程中的具体体现，在生产中可用膏体充填料的塌落度、分层度和黏度等指标表示。膏体充填料的三大特性是指稳定性、可塑性和流动性。

稳定性是指它具有抵抗分层和抵抗离析的能力，体现在实践中是膏体在密闭的管道中停留数小时不沉淀、不分层、不离析，能顺利地进行输送。可塑性是指膏体充填料在克服屈服应力后产生非可逆变形的能力，通俗地讲是指膏体在管道输送过程中其断面上的颗粒结构有抵抗错位的能力，即抵抗变形的能力，在实践中体现为膏体在通过弯管后，尽管其形状发生了变化，但其结构基本不变。流动性是指它能流动，产生的实质是膏体的物料构成中有 15% 以上的 $-20\mu m$ 细粒级含量，这部分细粒级有很强的饱水能力，使水量

能够填满膏体微细颗粒之间的空隙，从而保证有足够的胶结用水形成膏体的流动性，在实践中流动性体现为在其重力或其他压力的作用下能在管道中或采空区中顺利流动。膏体充填料的流变性是指膏体充填料的结构应力和在输送过程中产生的阻力损失，具体可用膏体充填料的动力粘性系数和动切应力表示。金川镍矿膏体泵送系统的膏体料浆如图 5－2－1 所示。



图 5－2－1　金川膏体泵送系统所生产的膏体料浆

二、膏体充填料的配合比选择

1. 配制膏体料浆的原则

要配制好满足工业条件的膏体，必须搞清楚膏体充填料的构成原理和工业生产对膏体充填料可泵性和流动性的具体要求。膏体充填料的构成是与组成膏体充填物料的粒度分布密切相关的，在组成膏体的物料中，必须有足够的细粒级含量和具有一定饱水作用的超细粒级含量。细粒级含量用来填满粗颗粒之间的空隙，超细粒级含量比表面积大，有足够的饱水性，与水分子结合后均匀分布于粗颗粒之间，从而保证了膏体充填料的和易性和结构面上固体颗粒之间的相对稳定，保证了膏体充填料在静止时具有足够的塑性保持其三维结构。国内外试验研究结果公认膏体的配料中 $-20\mu m$ 的含量必须大于 15%，这是一个必要条件。金川有色金属公司膏体充填系统中的非胶结膏体料浆（不加水泥的膏体），配料中超细粒级的含量是通过添加干粉煤灰的方式来获得的。从物料粒度对膏体性能特征的影响程度来看，影响膏体性能的主要因素是粗粒度物料含量和超细粒度物料含量。由于粗粒度物料的吸水率小，它消耗的水分就少，粗粒度物料含量增加，就可以相对提高膏体的浓度；同时由于粗粒度物料的比表面积小，它需要或消耗的胶结材料少，在其他参数不变的情况下，若增大粗粒度物料的质量，可以提高膏体的稳定性。具有胶结作用的超细粒度物料主要起胶结作用和润滑作用，一旦它的含量增加，膏体的分层度就会减少，即膏体的稳定性就变好，膏体的可泵性亦变好。但由于超细粒度物料

的比表面积大、孔隙率大、吸水率大，它消耗的水量自然也大；它的含量增加，会降低膏体的浓度，同时也会增大膏体的黏性系数，使管道阻力损失加大。

由于膏体充填料可以在一定的浓度范围内和塌落度范围内变化，在这个范围内都是膏体，但这个范围内的膏体其流动性和可泵性往往相差较大，所以，对于工业生产中的膏体配合比选择，必须与工业生产实际相结合，与矿山采用的充填工艺相结合。这个工艺包括管路的长度，弯头的个数、管道的直径、采空区的规模（长宽）及充填管的布置位置等。

严格地讲，膏体充填料不分层，其分层度值应该为零。但在工业生产中往往由于种种原因，配制出的膏体充填料，其分层度往往不为零，即不能保证百分之百的不分层。根据金川有色金属公司技术中心的试验研究数据可以总结出：对于采用泵压进行输送的膏体充填料，只要其分层度小于 2.0cm，就完全可以满足长距离泵送的条件，并且在管道中静置一段时间后也可以顺利启动泵输送。因此，对膏体充填料的配合比选择，可以提出一个原则和一些具体的技术指标范围。

配合比选择原则：

（1）具有良好的稳定性和流动性；

（2）形成的充填体的强度满足设计要求；

（3）膏体充填料具有可泵性；

（4）膏体充填料的流动性满足充填巷道的流动要求。

具体的技术参数范围：

（1）配料的最大粒径与输送管管径之比不宜大于 1∶5；

（2）配料中 $-20\mu m$ 的超细粒级含量不宜小于 15%，对稳定性要求较高时 $-20\mu m$ 细粒级含量不宜小于 25%；

（3）在采空区自然平场的情况下膏体的坍落度不宜小于 18cm；

（4）对于可能在管道中停留时间较长的膏体，其分层度不宜大于 2.0cm；

（5）膏体的动力黏性系数不宜过大。

2. 金川镍矿的几种膏体料浆配合比

金川镍钴研究设计院与北京有色冶金设计研究院共同合作，对不同物料搭配、不同物料级配的膏体料浆进行了全面的配合比试验研究。其中“全尾砂 + 水泥”、“全尾砂 + 粉煤灰 + 水泥”、“全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥”、“全尾砂 + 棒磨砂 + 粉煤灰 + 水泥”、“全尾砂 + 细石 + 水泥”、“全尾砂 + 细石 + 粉煤灰 + 水泥”等物料搭配方案的膏体配合比试验是在 1989 ~ 1991 年期间完成的；“分级尾砂 + 棒磨砂 + 粉煤灰 + 水泥”物料搭配方案的膏体配合比试验是在进行生产试车阶段的 1997 ~ 1999 年期间进行的，也是最终用于生产实践的物料搭配方案。在整个膏体料浆的试验研究过程中，获得了大量的试验数据，为

金川镍矿膏体充填系统的建设和投产奠定了坚实的理论技术基础。对应的配合比数据见表 5－2－1～表 5－2－7。

表 5－2－1 “全尾砂＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	水泥耗量/kg·m^{-3}	各龄期强度/MPa		
		R_3	R_7	R_{28}
73	127	0.285	0.531	1.146
75	134	0.351	0.629	1.539
76	137	0.473	0.779	1.802
73	155	0.323	0.608	1.346
75	164	0.428	0.671	1.679
76	168	0.486	0.783	2.010
73	280	0.632	0.984	3.114
75	296	0.716	1.044	3.688
76	303	0.797	1.195	4.185

表 5－2－2 “全尾砂＋粉煤灰＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	水泥耗量/kg·m^{-3}	水泥:粉煤灰	各龄期强度/MPa		
			R_3	R_7	R_{28}
73	172	1:1	0.483	0.954	2.884
74	176	1:1	0.498	1.123	2.947
73	231	1:0.5	0.501	1.192	3.313
74	237	1:0.5	0.635	1.462	3.798
73	267	1:0.3	0.648	1.499	4.29
74	274	1:0.3	0.783	1.674	4.521

表 5－2－3 “全尾砂＋棒磨砂＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	水泥耗量/kg·m^{-3}	全尾砂:棒磨砂	各龄期强度/MPa		
			R_3	R_7	R_{28}
76	214	1:0.5	0.362	0.612	2.284
77	219	1:0.5	0.536	0.959	3.066
78	236	1:0.5	0.857	1.561	4.406
76	213	1:0.75	0.301	0.562	2.171
77	219	1:0.75	0.5	0.918	2.745
78	236	1:0.75	0.757	1.397	4.382
76	213	1:1	0.335	0.582	2.201
77	218	1:1	0.454	0.884	2.538
78	236	1:1	0.953	1.616	4.504

表 5－2－4 “全尾砂＋棒磨砂＋粉煤灰＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	水泥耗量/kg·m⁻³	水泥:粉煤灰	全尾砂:棒磨砂	各龄期强度/MPa		
				R_3	R_7	R_{28}
75	241	1:0.5	1:0.5	0.599	1.562	4.585
	239	1:0.5	1:1	0.51	1.404	4.226
	179	1:1	1:0.5	0.531	1.049	3.503
	178	1:1	1:1	0.355	0.981	3.087
76	247	1:0.5	1:0.5	0.765	1.817	5.018
	246	1:0.5	1:1	0.747	1.655	4.874
	183	1:1	1:0.5	0.383	0.912	3.405
	183	1:1	1:1	0.384	0.961	3.472

表 5－2－5 “全尾砂＋细石＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	全尾砂耗量/kg·m⁻³	细石耗量/kg·m⁻³	水泥耗量/kg·m⁻³	塌落度/cm	扩散度/cm	各龄期强度/MPa		
						R_3	R_7	R_{28}
80	884	589	184	10.3	43	1.108	1.64	3.10
81	907	605	189	9.3	30.1	1.125	1.66	3.4
81	753.2	753.2	188.4	21.4	52.8	1.162	1.48	3.71
82	931	621	194	5.1	—	1.183	1.7	3.78
82	773.2	773.2	193.3	11.0	43.0	1.342	1.84	4.34
82	616.5	924.7	192.6	19.5	48.5	1.28	1.79	3.81
83	794	794	198	5.2	39	1.543	2.13	4.34
83	632.6	948.9	197.7	16.6	47.6	1.483	1.9	4.19
84	649.0	973.5	202.8	8.4	38.8	1.642	2.203	4.56

表 5－2－6 “全尾砂＋细石＋粉煤灰＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	灰砂比	水泥耗量/kg·m⁻³	粉煤灰耗量/kg·m⁻³	金属砂:细石	塌落度/cm	扩散度/cm	各龄期强度/MPa		
							R_3	R_7	R_{28}
78	1:6	207	104	1:1	21.5		1.316	2.21	5.53
	1:6	192	192	1:1	12.0	45	1.513	2.56	6.54
	1:8	163	82	1:1	25.0	33	0.693	1.14	3.17
	1:8	154	154	1:1	13.0	53	1.15	1.84	4.69
80	1:6	218	109	1:1	8.5	37.5	1.45	2.39	6.10
	1:6	211	148	1:1	7.3	33	1.59	2.85	7.01
	1:8	172	86	1:1	12.5	28	1.04	1.72	4.35
	1:8	168	118	1:1	7.3	37.5	0.96	1.6	4.2

表 5－2－7 “分级尾砂＋棒磨砂＋粉煤灰＋水泥”膏体的配合比参数

质量浓度/%	水泥耗量/kg·m^{-3}	粉煤灰耗量/kg·m^{-3}	分级尾砂:棒磨砂	各龄期强度/MPa		
				R_3	R_7	R_{28}
75.47	220	247.65	1:1	1.1	1.78	4.0
76.32	220	247.65	1:1	1.2	1.95	4.18
77.17	220	247.65	1:1	1.3	2.1	4.31
78.02	220	247.65	1:1	1.47	2.2	4.9
78.88	220	247.65	1:1	1.61	2.35	5.2

三、膏体充填料的检测与判别

膏体是由浆体过渡而来的，但并不是说所有的浆体都能过渡成膏体，只有当构成浆体的物料级配满足一定条件时，属于两相流的浆体才能通过浓度转变成属于结构流的膏体，浆体是否已经转变成为膏体，其具体标志就体现在膏体的稳定性、可塑性和流动性这三大特性上。因此，对浆体是否已经转变成了膏体的检测和判别，实质上是对膏体充填料三大特性的检测和判别。世界上提出的对膏体充填料性能特征的检测方法和判别指标有很多种，如加拿大的工程技术人员用浓度、塌落度和饱和度指标，德国的工程技术人员用工作度（黏度、屈服应力）、稠度和结构指数指标；澳大利亚的工程技术人员用细粒级含量、浓度和塌落度指标，北美的工程技术人员用浓度和稠度指标，教科书《充填理论基础》中用雷诺数指标来判定结构流等等。所有这些都是以混凝土学为基础，在特定条件下总结出来的经验，应该说应用到特定的物料条件和工程条件下都是非常正确的。

分层度是建筑学中用来表征水泥砂浆离析程度的技术指标，把它引用到膏体充填领域，用于膏体充填料的检测，是 1999 年金川有色金属公司技术中心提出的。其主要理由是：膏体充填料之所以分层，是因为构成膏体充填料的固体颗粒之间产生了相对运动，导致了固体颗粒在垂直断面上分布不均匀所致。因此，要考察膏体充填料的抗分层性就必须搞清楚膏体充填料的内部结构变化，搞清楚内部颗粒之间的相对运动情况和相对运动后产生的结果。稠度又叫流动度，它不仅可以表达料浆体以胶质体的形态流动，还可以表达料浆体内部固体颗粒之间的相对运动。因此，可以用稠度指标来做试验，如果通过稠度指标能检测出膏体充填料内部固体颗粒之间相对运动的结果，也就能检测出膏体充填料的抗分层性。于是，金川有色金属公司技术中心的工程技术人员在通过了大量的试验研究基础上提出了在膏体充填领域运用分层度指标，用分层度指标来检测和判定膏体充填料稳定性。检测分层度要用两台设备，一台是砂浆稠度仪，另一台是砂浆分层度仪（见图 5－2－2）。

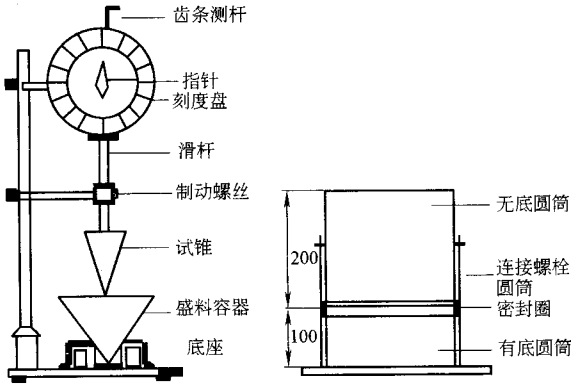


图 5－2－2　膏体充填料分层度的检测仪器

检测方法分三个步骤，第一步是检测膏体充填料的稠度 C_1；第二步是将膏体充填料搅拌均匀后装入分层度桶中并静止 30min，让膏体分层离析；第三步将分层度桶中上部的膏体去除，取其下部膏体，搅拌均匀后再测其稠度 C_2；C_1 与 C_2 之差就是分层度。

对膏体充填料的工程检测和判别，能不能提出一种综合的、通用的方法或标准呢？作者认为以“塌落度＋分层度”为主、以“浓度＋黏度”为辅的检测和判别方法是行得通的。首先是塌落度指标和分层度指标具有通用性，它们都不受构成膏体充填料的物料粒级组成的限制；其次是这两个指标的检测操作方法都简单，不受环境限制，在工业现场具有很强的可操作性；第三是浓度和黏度作为特定条件下的技术指标可以与特定的物料条件和工业条件相结合。所以，在物料不确定或物料级配发生较大变化的情况下采用以“塌落度＋分层度”为主、以“浓度＋黏度”为辅的检测和判别方法是全面的；在物料确定或物料级配不发生较大变化的情况下，采用“塌落度＋分层度＋浓度”的检测和判定方法是可靠的；在工业现场的常规检测或质量控制中采用“塌落度＋分层度”的检测和判别办法是行之有效的。膏体料浆塌落度和黏度的检测仪器见图 5－2－3。

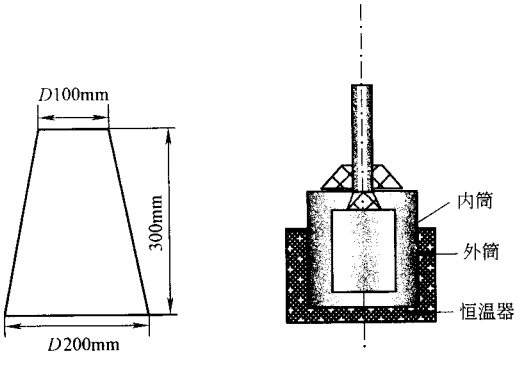


图 5－2－3　膏体充填料塌落度、粘度的检测仪器

四、影响膏体强度的相关因素

配制充填膏体的骨料必须满足两个条件，一是骨料有合理的级配，具备形成充填膏体的必要条件，即混合物料中粒度小于 20μm 的颗粒的总量必须大于 15%；二是其形成的充填体的强度要高，而消耗的水泥等胶凝材料要少。当选用粒度很细的物料做骨料时，有利于充填膏体的形成，但不利于充填膏体的管道输送和充填膏体的强度。因为物料粒度细，其形成的充填膏体的黏度就大，管道输送的阻力损失就大；因为物料粒度细，其表面积就大，消耗的胶凝材料就多，在相同水泥耗量的条件下，其强度就低。因此，影响膏体强度的因素除了膏体的浓度、水泥的添加量以外，还有构成膏体的物料级配。

1. 浓度对膏体强度的影响

对于低浓度的浆体胶结料浆来说，增大其浓度必然要提高其强度，这是因为低浓度胶结料浆的水灰比通常都大于 1.5，提高了浓度，实质上是降低了水灰比，所以可以提高其强度。对于膏体料浆来说，其浓度比浆体料浆要高，但由于膏体料浆必须满足采场进路充填的需要，要有足够的流动性，这就使得膏体料浆的水灰比在 1.0 左右，与混凝土学中的饱和水灰比还有一定的距离，所以，提高膏体料浆的浓度，也可以提高其强度。全尾砂膏体和“分级尾砂 + 棒磨砂”膏体浓度与强度的关系见图 5－2－4 和图 5－2－5。

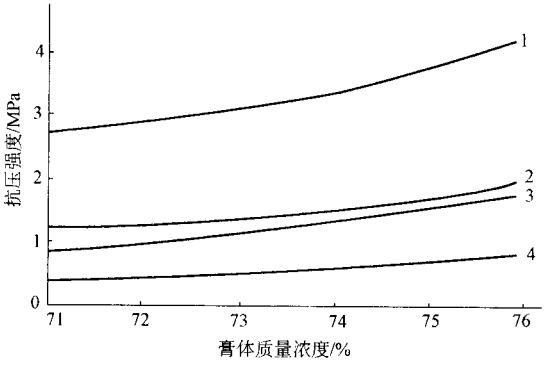


图 5－2－4　全尾砂膏体浓度与 R_{28} 强度关系曲线

1—灰砂比为 1∶4；2—灰砂比为 1∶8；

3—灰砂比为 1∶10；4—灰砂比为 1∶15

2. 水泥含量对膏体强度的影响

膏体充填的目的是为了满足采矿工艺的要求，其强度必须满足设计值。水泥耗量大，其强度必然高，但水泥的添加量是构成充填成本的主要因素，因此，工程中必须通过

试验来确定水泥的最佳添加量，以保证既满足生产需要，又能使充填成本最低。图 5－2－6 为全尾砂膏体水泥耗量与强度的关系。

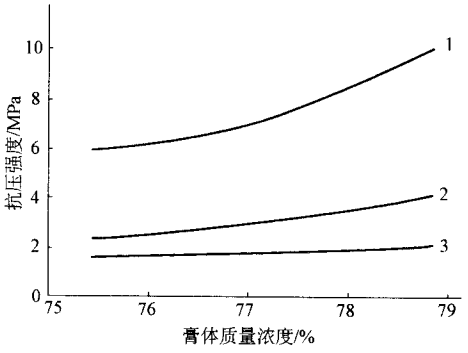


图 5－2－5 “分级尾砂＋棒磨砂＋粉煤灰”膏体浓度与 R_{28} 强度关系曲线

1—R_{28}；2—R_7；3—R_3

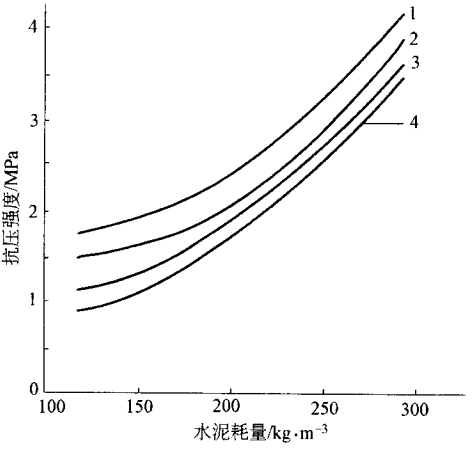


图 5－2－6　全尾砂膏体水泥耗量与 R_{28} 强度关系曲线

1—质量浓度为 76%；2—质量浓度为 75%；

3—质量浓度为 73%；4—质量浓度为 71%

3．骨料粒度对膏体强度的影响

A．全尾砂与分级尾砂的比较

利用全尾砂作骨料的胶结膏体强度随着浓度和灰砂比的增加而提高，但与分级粗尾砂比，在相同浓度条件下，达到同一强度所需的水泥耗量大约增加 30%～40%。例如金川有色金属公司尾矿库的自然分级粗尾砂胶结膏体，当质量浓度为 70%、28d 抗压强度

为 2.3MPa 时的水泥耗量为 180kg/m³，而全尾砂胶结料浆在相同浓度下达到相同强度的水泥耗量为 250kg/m³。要使全尾砂胶结膏体 28d 强度达到 2.3MPa 的水泥耗量降低到 180kg/m³，全尾砂胶结膏体的质量浓度必须达到 75% ~ 76%，要使全尾砂胶结膏体的抗压强度达到 4.0MPa 以上，水泥耗量不得低于 300kg/m³。

B. 添加细石的情况

在形成膏体的前提下，在全尾砂中加入 50% 的细石后，达到 4MPa 强度的水泥耗量可以降低到 150 ~ 180kg/m³ 加入 50% 的棒磨砂（-3mm），达到 4MPa 强度的水泥耗量可以降低到 180 ~ 200kg/m³。这是因为粗细颗粒搭配，细粒料填充粗粒料的空隙，提高了料浆的密度和浓度，从而使强度明显提高，相对降低了水泥耗量。图 5-2-7 为添加细石后的全尾砂膏体浓度与强度的关系。

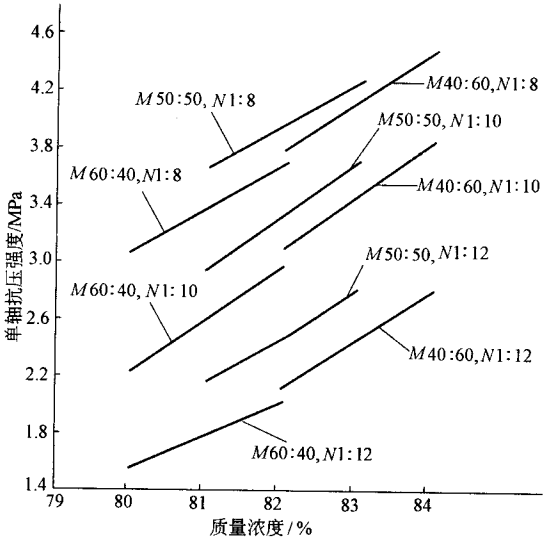


图 5-2-7　全尾砂膏体中添加细石后强度与质量浓度的关系

M—全尾砂:细石；*N*—灰砂比

4. 添加粉煤灰对膏体强度的影响

由于粉煤灰的火山灰质特性，具有一定的钙质活性。在膏体料浆中加入一定量的粉煤灰，可以提高充填体的强度，特别是后期强度，但增大了膏体料浆的黏度，从而增大了膏体料浆的屈服应力和管道摩擦阻力损失。因此，对于膏体料浆的配制，在满足膏体配制（细粒级含量）的基本条件下，若要通过添加粉煤灰来提高充填体的强度，粉煤灰代替水泥的量不宜超过水泥耗量的 30% ~ 50%；若添加超量的粉煤灰，多余的粉煤灰在膏体料浆中起调节其流变性的作用。

五、部分矿山充填膏体的级配构成

1. 南非约翰内斯堡输料公司

南非约翰内斯堡输料公司 R.D. 马考斯(Marcus)根据当地矿山的具体情况提出的任何条件下可泵送和不可泵送的两种尾砂膏体的粒度分布见图 5－2－8。图中级配 1、级配 2 是可泵送的膏体配料曲线,级配 3 是不可泵送的配料曲线。

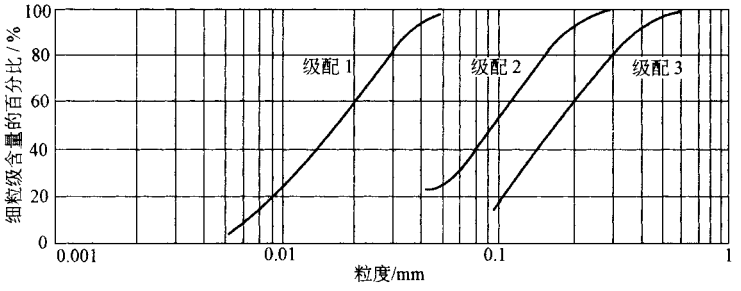


图 5－2－8　可泵送和不可泵送尾砂膏体的粒度分布

2. 金川有色金属公司

金川有色金属公司二矿区的膏体配料情况见图 5－2－9。分级尾砂中 $-20\mu m$ 的含量为 18.3%。金川有色金属公司试验期间加粗骨料(细石)的膏体配料曲线图见图 5－2－10。

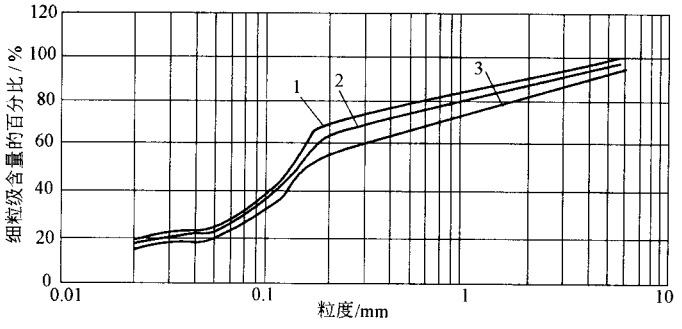


图 5－2－9　金川公司二矿区尾砂膏体的级配组成

1—分级尾砂:棒磨砂 = 3:2;

2—分级尾砂:棒磨砂 = 1:1;

3—分级尾砂:棒磨砂 = 2:3

3. 铜录山铜矿和德国 PREUSSAG 金属公司

铜录山铜矿和德国 PREUSSAG 金属公司泵送膏体的级配曲线图如图 5－2－11 所示。

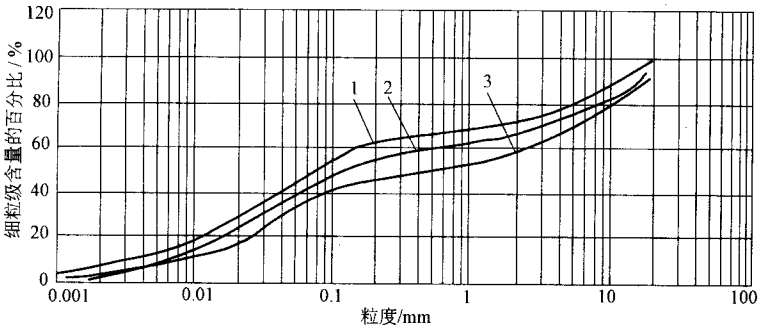


图 5－2－10　金川全尾砂＋细石膏体级配曲线图

1—全尾砂:细石＝3:2；2—全尾砂:细石＝1:1；3—全尾砂:细石＝2:3

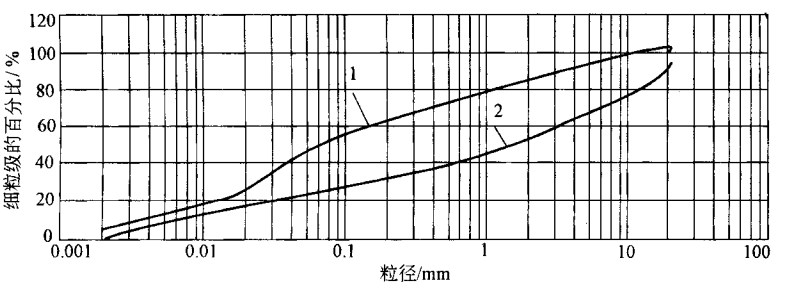


图 5－2－11　铜录山铜矿和德国 PREUSSAG 金属公司泵送膏体的级配曲线

1—铜录山；2—德国 PREUSSAG 金属公司

六、国内外部分矿山的膏体料浆的性能特征

世界范围内采用膏体充填工艺的矿山有很多，不同的矿山有不同物料条件和不同的充填工艺技术参数。由于物料的不同和充填系统技术参数（充填倍线、管径、采场规模等）的不同，对膏体料浆的要求也不同，因此，不同的膏体充填系统所需要的膏体料浆的性能特征也不尽相同。国内外部分矿山膏体料浆的性能特征见表 5－2－8。

表 5－2－8　国内外部分矿山膏体充填料的配料特征

国别及矿山	充填材料	质量浓度/%	坍落度/cm	充填体强度/MPa
德国格隆德矿	重介质细石和浮选尾砂	85～88	扩散度 40～52	1.5～2.0
加拿大多姆金矿	全尾砂	77～82		0.43
南非西德里方丹金矿	全尾砂	78		
加拿大国际镍公司	天然砂和全尾砂	81—86	9～12 英寸	1.63
苏联阿奇塞铅锌矿	全尾砂（添加胶凝剂）	80～83	10～12	
中国金川二矿区	分级尾砂，粉煤灰，棒磨砂	78～80	18～22	

国别及矿山	充填材料	质量浓度/%	坍落度/cm	充填体强度/MPa
中国金川二矿区	分级尾砂、粉煤灰、棒磨砂、425 号水泥	77 ~ 79	20 ~ 24	> 4.0
中国铜录山铜矿	全尾砂，炉渣	87	16 ~ 20	
中国铜录山铜矿	全尾砂，炉渣，水泥	84	15 ~ 18	> 3.0

第二节　膏体泵压输送阻力测量结果及分析

一、环管试验结果

根据膏体泵送环管试验阻力实测管径 124mm 的水平直管摩擦阻力损失（MPa/100m）结果，实测表明，直径 ϕ124mm、曲率半径 1.2m 的 90°弯管，当流量由 15m³/h 增加到 55m³/h 时，其阻力损失由 0.05MPa 变化到 0.12MPa。

表 5 - 2 - 9　水平直管摩擦阻力损失

序	物料名称及配比	料浆容量 /kg·m⁻³	料浆塌落度 /%	料浆质量浓度 /%	料浆体积浓度 /%	料浆平均流速 /m·s⁻¹	阻力损失 /MPa·(100m)⁻¹
1	全尾砂	2059	3.0	78.9	56.6	1.186 1.030 0.960 0.759 0.636 0.583 0.451	3.250 3.092 3.000 2.834 2.722 2.661 2.603
1.1	全尾砂	1976	14.0	75.8	52.2	1.495 1.228 1.077 0.960 0.647 0.601 0.489	1.982 1.829 1.722 1.636 1.444 1.398 1.331
1.2	全尾砂	1890	27.0	72.2	47.5	0.498 0.562 0.759 0.960 1.147 1.375	0.694 0.750 0.833 0889 0.955 1.028

序	物料名称及配比	料浆容量 /kg·m^{-3}	料浆塌落度 /%	料浆质量浓度 /%	料浆体积浓度 /%	料浆平均流速 /m·s^{-1}	阻力损失 /MPa·(100m)$^{-1}$
2	全尾砂、水泥 m_2 = 1∶4	2052	3.5	78.1	55.0	0.464 0.751 0.900 1.030 1.273 1.495	0.951 1.055 1.149 1.194 1.272 1.333
3	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2046	25.0	79.9	59.0	0.444 0.626 0.837 0.960 1.129 1.322 1.528	0.500 0.611 0.722 0.777 0.833 0.916 0.972
3.1	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2051	12.5	30.5	59.8	0.469 0.653 0.857 0.947 1.147 1.273 1.689	0.97 1.124 1.610 1.428 1.595 1.727 2.056
3.2	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2076	8.5	81.0	60.6	0.483 0.715 0.857 0.987 1.129 1.403 1.563	1.222 1.472 1.611 1.750 1.917 2.159 2.333
4	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2051	22.5	80.4	59.8	0.441 0.570 0.751 0.923 1.147 1.322 1.564	0.564 0.626 0.809 0.982 1.003 1.166 1.278
4.1	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 50∶50 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2071	7.0	81.1	60.9	0.495 0.631 0.715 0.935 1.111 1.297 1.680	1.083 1.250 1.333 1.528 1.722 1.917 2.222

序	物料名称及配比	料浆容量 /kg·m^{-3}	料浆塌落度 /%	料浆质量浓度 /%	料浆体积浓度 /%	料浆平均流速 /m·s^{-1}	阻力损失 /MPa·(100m)$^{-1}$
4.2	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 50∶50 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2100	5.0	82.5	62.6	0.441 0.631 0.759 0.935 1.094 1.375 1.528	1.722 2.028 2.278 2.333 2.445 2.889 3.078
5.0	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 40∶60 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2067	25.5	81.3	61.3	0.419 0.570 0.800 1.015 1.186 1.348 1.767	0.383 0.455 0.549 0.665 0.722 0.750 0.969
5.1	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 40∶60 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2076	19.0	81.6	61.79	0.486 0.647 0.818 0.973 1.111 1.250 1.495	0.599 0.666 0.722 0.865 0.964 1.024 1.190
6.0	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2100	14.5	81.9	62.0	0.492 0.621 0.847 0.987 1.094 1.297 1.639	1.000 1.139 1.278 1.500 1.611 1.682 1.833
6.1	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2130	5.0	82.9	63.6	0.464 0.583 0.500 0.900 1.077 1.129 1.463	1.583 1.694 1.944 2.056 2.256 2.377 2.603
6.2	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 60∶40 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2040	25	79.7	58.6	0.475 0.583 0.809 0.947 1.077 1.403 1.767	0.569 0.642 0.722 0.777 0.839 0.941 1.056

序	物料名称及配比	料浆容量 /kg·m^{-3}	料浆塌落度 /%	料浆质量浓度 /%	料浆体积浓度 /%	料浆平均流速 /m·s^{-1}	阻力损失 /MPa·(100m)$^{-1}$
7.0	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 50∶50 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	1946	27	76.5	53.8	0.434 0.554 0.818 0.987 1.111 1.322 1.699	0.222 0.277 0.333 0.388 0.416 0.444 0.500
7.1	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 50∶50 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2123	12.5	83.0	63.9	0.446 0.570 0.828 0.911 1.045 1.186 1.564	0.805 0.889 1.083 1.250 1.389 1.500 1.722
7.2	全尾砂、棒磨砂 水泥、粉煤灰 m_1 = 50∶50 m_2 = 1∶8 m_3 = 1∶0.5	2140	6.0	83.6	64.9	0.417 0.579 0.792 0.935 1.077 1.228 1.564	1.194 1.333 1.500 1.611 1.778 1.972 2.250

注：m_1—全尾砂∶棒磨砂(细石)；m_2—水泥∶砂子；m_3—水泥∶粉煤灰。

二、影响管道阻力损失的主要因素

1. 流速对管道阻力损失的影响

膏体输送的压力损失随着流速增大而成直线增长，但随不同浓度有所区别，浓度越高，压力损失随流速增长越快。见图 5－2－12 所示。

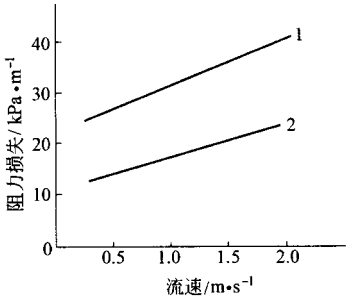


图 5－2－12　全尾砂膏体阻力损失与流速的关系

1－v = 2.259kg/m^3，S = 3cm，C_W = 78.9%；

2－v = 1.975kg/m^3，S = 14cm，C_W = 75.8%

2. 浓度对阻力损失的影响

浓度对阻力损失的影响十分敏感，膏体浓度相差 1%，管道阻力损失可能会相差 50% ~ 100%。见图 5 - 2 - 13 所示。

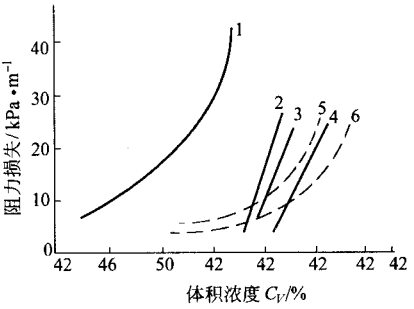


图 5 - 2 - 13　压力损失与体积浓度的关系

1—全尾砂；2—全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤(60:40)；

3—全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰(50:50)；

4—全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰(40:60)；

5—全尾砂 + 细石 + 水泥 + 粉煤灰(60:40)；

6—全尾砂 + 细石 + 水泥 + 粉煤灰(50:50)；

(括号内为全尾砂与棒磨砂(细石)之比)

3. 物料粒度对压力损失的影响

在保证膏体充填料中 - 20μm 含量不低于 15% 的条件下，在全尾砂中添加不同比例的棒磨砂或细石制备的膏体，与相同浓度的全尾砂相比较，压力损失显著降低，并且随着粗颗粒加入量的增加，降低的幅度也随着增加。见图 5 - 2 - 14 ~ 图 5 - 2 - 16。

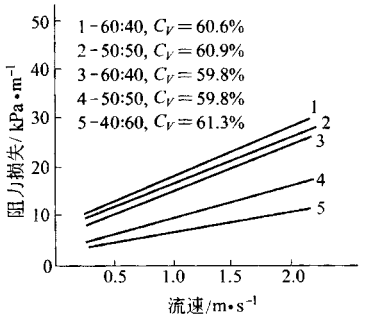


图 5 - 2 - 14　添加不同比例棒磨砂时压力损失比较

膏体充填料的粒级组成直接影响到可泵送膏体的最高浓度、最低浓度和最佳浓度。根据金川 3 种管径的试验资料确定，全尾砂输送的最高浓度为 79%，而全尾砂加棒磨砂(50:50)或全尾砂 + 细石(50:50)的最高输送浓度分别达到 84%。

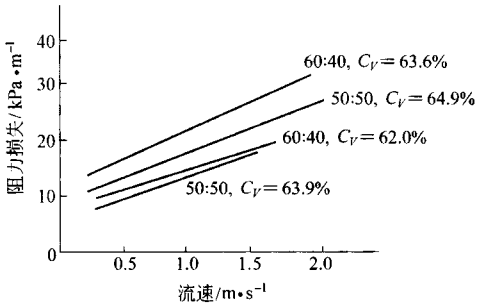


图 5－2－15　添加不同比例细石时压力损失比较

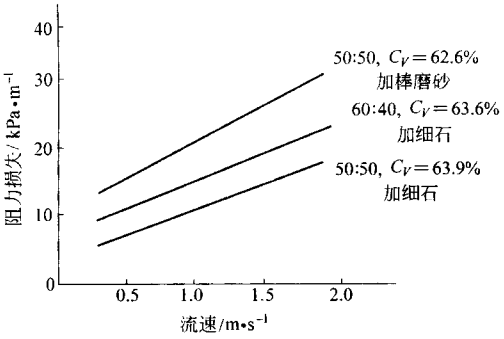


图 5－2－16　添加不同比例细石、棒磨砂时压力损失比较

有关文献介绍，南非将 d_{50} 作为膏体混合料粒度组成的判别准则，来判别泵送膏体压力损失的大小。试验结果表明，d_{50} 的微弱变化确实会引起膏体压力损失的急剧变化。

4. 加水泥对压力损失的影响

在膏体中添加水泥不仅是满足充填体强度要求，也对膏体输送的可泵性条件起到良好作用。水泥浆可以包裹骨料表面，填补骨料间隙，润滑管壁，保证膏体流动的稳定，并降低摩擦阻力。见图 5－2－17 所示。但是，水泥添加量过多，会使膏体黏度增加，从而使摩擦阻力损失增大。金川环管试验中，超组粒级的胶结剂约占 10%，其中水泥约占 6%，粉煤灰约占 4%。

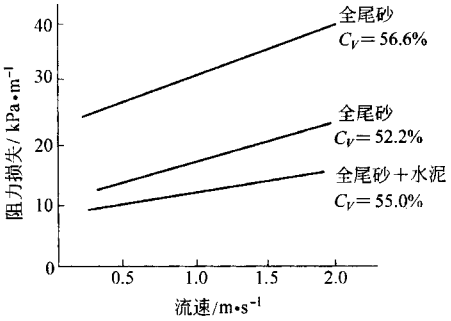


图 5－2－17　加水泥或不加水泥时，压力损失的比较

5. 管径对压力损失的影响

在相同流量下，压力损失随管径增大而减小，反之亦然。因物料配比、浓度、流速等条件变化略有区别。见图 5－2－18 所示。

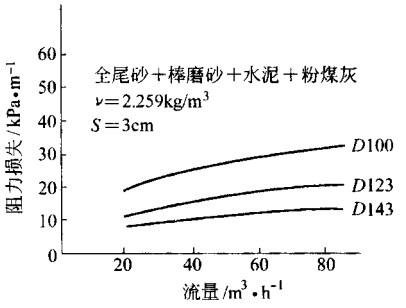


图 5－2－18　不同管径的阻力损失与流量的关系

三、管道输送膏体充填料的基本要求

要保证膏体充填料在管道中顺利输送，必须满足以下条件：

1. 有良好的流动性，与管壁摩擦阻力小；

2. 在管道内形成‘栓流’运动，并在拐弯处、接口处，其‘栓流’状态不被破坏；

3. 在泵压输送过程中不产生离析，保持良好的稳定性。

满足以上条件主要从塌落度判断，并从稳定性（不离析、不失浆、不泌水）考察。

塌落度的力学含义是膏体料因自重而流动、因内部阻力而停止的最终变形量。因此，塌落度的大小直接反映了膏体料浆流动性的好坏与流动阻力的大小。不同配比、不同浓度的塌落度见表 5－2－10 由此可知，当塌落度小于 15～17cm 时，压力损失随塌落度的降低而快速增大。见图 5－2－19 所示。因此，任何配料的膏体在工程实用时，其塌落度应保持在 15～20cm，或略大于此值。

表 5－2－10　不同配比、不同浓度膏体的塌落度

序号	配　比	料浆容量 /kg·m⁻³	质量浓度 C_W /%	体积浓度 C_V /%	塌落度 S /cm
1	全尾砂＋水泥	2052	78.1	55	3.5
2	全尾砂＋棒磨砂＋水泥＋粉煤灰＋水 全尾砂：棒磨砂＝60：40 灰砂比 1：8，水泥：粉煤灰＝1：0.5	2046	79.9	59.0	25.0
3	全尾砂＋棒磨砂＋水泥＋粉煤灰＋水 全尾砂：棒磨砂＝60：40 灰砂比 1：8，水泥：粉煤灰＝1：0.5	2051	80.5	59.8	12.5

序号	配　　比	料浆容量 /kg·m^{-3}	质量浓度 C_W /%	体积浓度 C_V /%	塌落度 S /cm
4	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 60:40 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2076	81.0	60.0	8.5
5	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 50:50 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2051	80.4	59.8	22.5
6	全尾砂:棒磨砂 = 50:50 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2071	81.1	60.9	7.0
7	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 50:50 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2100	82.2	62.9	5.0
8	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 40:60 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2067	81.3	61.3	25.5
9	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 40:60 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2076	81.6	61.79	19.0
10	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 60:40 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2100	81.9	62.0	14.5
11	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 60:40 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2180	82.9	63.9	5.0
12	全尾砂 + 棒磨砂 + 水泥 + 粉煤灰 + 水 全尾砂:棒磨砂 = 60:40 灰砂比 1:8,水泥:粉煤灰 = 1:0.5	2040	79.7	58.6	25.0
13	全尾砂:细石 = 50:50,其他同上	1946	76.5	53.8	27.0
14	全尾砂:细石 = 50:50,其他同上	2123	83.0	63.9	12.5
15	全尾砂:细石 = 50:50,其他同上	2140	83.6	64.9	6.0

环管试验中考察了屈服应力和塑性黏度这两项主要的流变参数对可泵性的影响,并建立了塌落度和屈服应力、塑性黏度之间的变化关系见图 5 – 2 – 20 和图 5 – 2 – 21。由此可知,屈服应力随塌落度增大而呈曲线下降,而塑性黏度随塌落度增大呈直线下降。

同时，物料的粒级组成不同，对屈服应力 τ_0 和塑料黏度 η 的影响也不同。例如在相同塌落度条件下，全尾砂与粗骨料之比为 60∶40 的屈服应力大于 50∶50 的屈服应力，而 60∶40 的塑性黏度都小于 50∶50 的塑性黏度。

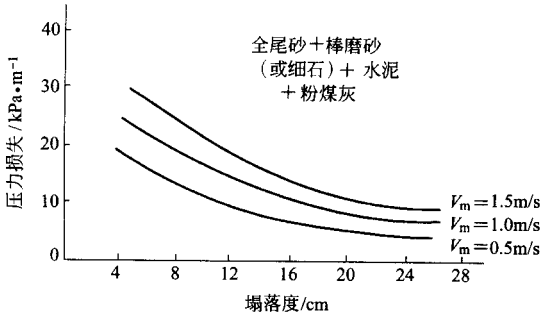


图 5－2－19　压力损失与塌落度的关系

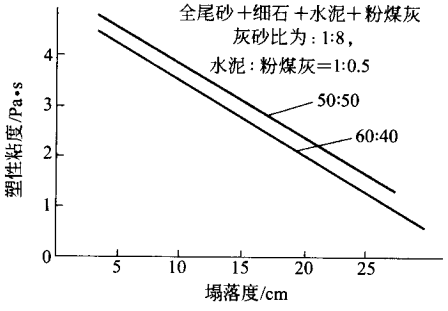


图 5－2－20　塑性黏度与塌落度的关系

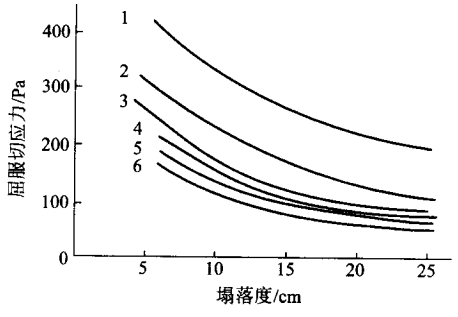


图 5－2－21　屈服应力与塌落度的关系

1—全尾砂(1∶4)；2—全尾砂＋细石(60∶40)；

3—全尾砂＋棒磨砂(60∶40)；4—全尾砂＋细石(50∶50)；

5—全尾砂＋棒磨砂(50∶50)；6—全尾砂＋棒磨砂(40∶60)

四、膏体充填料管流阻力计算

膏体料浆的流变特性很复杂，用通用的理论计算公式计算出的管道输送阻力损失误差较大，通常是根据实际情况推导出满足特定条件下的经验公式来计算。金川有色金属公司在多年的膏体管道输送试验中，推导出了使用于金川膏体物料级配条件下的非胶结膏体和胶结膏体的水平管道沿程阻力计算经验公式。

表 5－2－11　金川加细石的全尾砂膏体充填料配比

全尾砂与细石的质量比		60:40				50:50				40:60			
总浓度	C_W	79	80	81	82	80	81	82	83	81	82	83	84
/%	C_V	57.5	59.0	60.6	62.4	59.2	60.7	62.3	63.39	60.85	62.42	64.03	65.68
充填料浆材料消耗 /kg·m^{-3}	水　泥	168	173	176	182	172	176	181	186	176	180	185	190
	粉煤灰	84	86	88	91	86	88	90	98	88	90	93	95
	全尾砂	807	828	849	872	688	705	724	742	562	571	592	607
	细　石	538	552	566	581	688	705	724	742	843	865	887	910
	水	425	409	394	379	406	393	377	361	391	376	369	343
各组分质量百分数 /%	水　泥	8.32	8.42	8.53	8.63	8.42	8.53	8.63	8.74	8.53	8.63	8.74	8.84
	粉煤灰	4.16	4.21	4.26	4.32	4.21	4.26	4.32	4.37	4.26	4.32	4.37	4.42
	全尾砂	39.9	40.42	40.93	41.43	33.68	34.11	34.53	34.95	27.28	27.62	27.96	28.29
	细　石	26.61	26.95	27.29	27.62	33.68	34.11	34.53	34.95	40.93	41.43	41.94	42.44
	水	21.0	20.0	19.0	18.0	20.2	19.0	18.0	17.0	19.0	18.0	17.0	16.0
各组分体积百分数/%	水泥	5.42	5.56	5.71	5.86	5.64	5.69	5.84	5.99	5.67	5.81	5.96	6.12
	粉煤灰	3.84	3.94	4.04	4.15	3.92	4.03	4.13	4.24	4.01	4.11	4.22	4.33
	全尾砂	28.12	28.85	29.60	30.37	23.96	24.58	25.21	25.86	19.59	20.09	20.61	21.14
	细　石	20.15	20.68	21.21	21.76	25.75	26.42	27.1	27.8	31.58	32.40	33.23	34.09
	水	42.46	40.97	39.44	37.87	40.82	39.29	37.72	36.11	39.15	37.58	35.97	34.32
全尾砂＋水泥＋粉煤灰的浓度/%	质　量	71.39	72.62	73.87	75.13	69.84	71.17	72.51	73.87	67.84	69.27	70.72	72.20
	体　积	46.82	48.35	49.94	51.60	45.02	48.60	48.25	49.99	42.78	44.41	46.13	47.93
细粒的比例/%	质　量	93.68				42.1				50.5			
	体　积	35.04				43.5				51.9			
细粒级的比例/%	质　量	66.32				57.9				49.5			
	体　积	64.96				56.5				48.1			
料浆容量/kg·m^{-3}		2022	2049	2076	2104	2041	2068	2124	2096	2060	2068	2116	2145
水灰比		2.53	2.38	2.34	2.08	2.36	2.23	2.03	1.94	2.22	2.09	1.95	1.81

1. 理论公式计算

A. 用流变方程计算

膏体充填料可近似的视为宾汉黏塑性体，适用于管流的流变方程可用布金汉方程描述：

$$\tau_W = \frac{4}{3}\tau_0 + \eta\left(\frac{8v_m}{D}\right)$$

在层流状态下，水平直管的阻力损失用 j_m 下式计算：

$$j_m = \frac{16}{3D}\tau_0 + \eta\frac{32v_m}{D}$$

式中　D——直管内径；

v_m——流速；

初始切应力 τ_0 和黏度系数 η 值可根据试验数据选取。

B. 用阻力公式计算

水平直管的沿程阻力 j_m 公式也可用达西公式计算：

$$j_m = \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{v_m^2}{2g}\cdot\gamma_m$$

在层流状态下，阻力系数 λ 用下式计算：

$$\lambda = \frac{64}{Re_m}$$

式中　Re_m 为有效黏度 μ_e 定义的雷诺数

$$Re_m = \frac{\rho_m v_m D}{\mu_e}$$

$$\mu_e = \eta + \frac{\tau_0 \cdot D}{6v_m}$$

式中　ρ_m——膏体密度；

γ_m——膏体容重，kg/m^3；

v_m——膏体在管内的平均流速，m/s；

D——直管内径，m。

2. 金川有色金属公司的经验公式计算

金川有色金属非胶结膏体和胶结膏体的阻力计算经验公式，是在膏体物料级配确定的条件下推导出来的，推导的方法是检测出同种物料级配膏体在不同浓度条件下的黏度系数，回归出浓度与动力黏性系数值之间的函数关系式，再根据相关的基础理论计算公式代换得出。

A. 非胶结膏体管流阻力经验公式

(1)尾砂:棒磨砂 = 3:2 时：

$$j_m = \frac{2.98138 \times v_m \times L}{10^6 \times D^2} e^{0.21666} \times C_W$$

(2)尾砂:棒磨砂 = 1:1 时：

$$j_m = \frac{5.7823888 \times v_m \times L}{10^7 \times D^2} e^{0.23545} \times C_W$$

(3)尾砂:棒磨砂 = 2:3 时：

$$j_m = \frac{2.816148 \times v_m \times L}{10^7 \times D^2} e^{0.24254} \times C_W$$

式中　C_W 为非胶结膏体质量浓度。

B. 胶结膏体管流阻力经验公式

(1)尾砂:棒磨砂 = 3:2 时：

$$j_m = \frac{9.496928 v_m \times L}{10^6 \times D^2} e^{0.202} \times C_W$$

(2)尾砂:棒磨砂 = 1:1 时：

$$j_m = \frac{2.1294 v_m \times L}{10^7 \times D^2} e^{0.2488} \times C_W$$

(3)尾砂:棒磨砂 = 2:3 时：

$$j_m = \frac{4.08 v_m \times L}{10^8 \times D^2} e^{0.2972} \times C_W$$

第三节　膏体泵送工艺

膏体泵送充填对矿业界还是新技术,研究与应用还不多,经验还较少,特别是缺少素质较高的经过专门培训的专业队伍。而且矿山膏体充填比泵送混凝土施工技术无论从充填料制备、管网布置与分配、向下泵送操作和管理等要复杂得多。是一项技术含量很高的新工艺、新技术,和传统的充填作业、操作程序和管理方法有很大的差别,要想在矿山获得成功的应用,必须首先培训一支素质较高的精干的专业队伍,这是世界各国在学习、试验研究和推广应用过程中一致强调的基本经验。

主要工艺流程包括物料准备、定量搅拌制备膏体、泵压管道输送、采场充填作业几部分。金川有色金属公司二矿区西部第二搅拌站膏体制备系统工艺流程图见图 5 - 2 - 22。

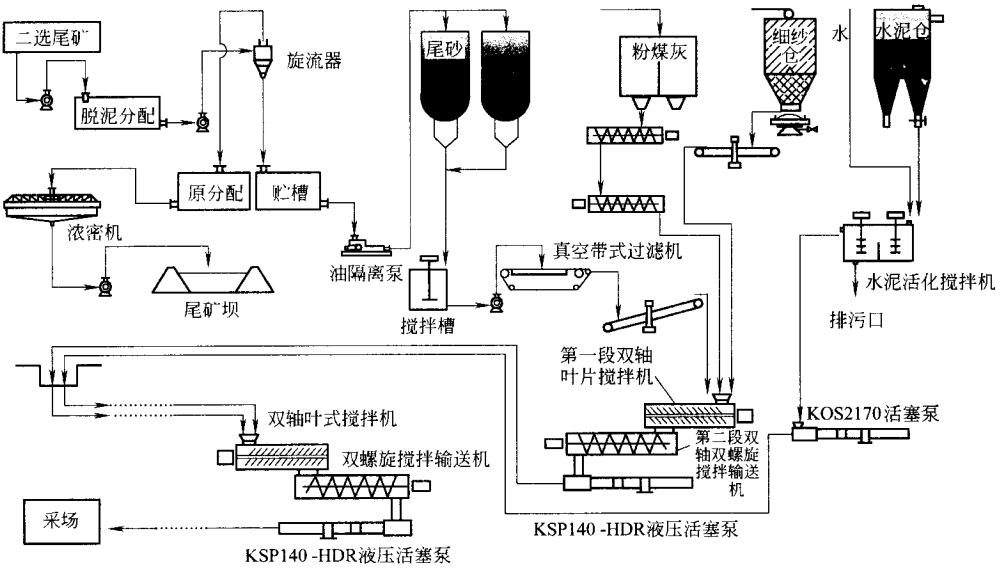


图 5－2－22　金川有色金属公司二矿区西部第二搅拌站膏体泵送充填系统工艺流程示意图

一、物料准备

1. **尾砂准备**：无论是全尾砂或分级尾砂，尾砂的准备是最重要的，也是流程最长，环节最多，技术最复杂的。以金川尾砂系统为例可以说明系统的特点：

金川铜镍硫化矿在选矿厂要经过三段再磨再选，故尾砂粒度很细，平均粒径仅为 30μm。尾砂以 20%浓度排放到 7km 以远的戈壁滩上堆筑的尾矿库中存放。

充填用尾砂是将 ϕ100m 浓密机底流泵至尾砂分级处理车间，经 64 × ϕ250mm（设计的）和 ϕ500mm（生产添加的）水力旋流器处理后，－37μm 细泥返回浓密池，＋37μm 粗尾砂排至 2 个 ϕ10m × 10.5m 大型搅拌槽贮存待用。矿山充填时，尾砂用 4 台 2DYH－140/50 油隔离泵，经 3 × ϕ80mm、长 3100m 管道，上行输送至矿山搅拌站 6 × 520m^3 尾砂仓中备用。在尾砂浆入仓过程中加入絮凝剂以加速尾砂沉降。

2. －3mm 棒磨砂（－25mm 碎石集料）准备：由砂石场电铲采集→二段破碎→棒磨成砂→火车运输→砂仓→抓斗皮带上料→圆盘定量给料→皮带→搅拌机。

3. **粉煤灰准备**：金川热电站电收尘飞灰→贮仓→专用汽车→风力输送入仓→螺旋给料→皮带→入搅拌机。

4. **散装水泥准备**：水泥厂→60t 水泥罐车→风力输送入仓→螺旋给料入双体活化搅拌机制浆→KOS2170 型双缸液压活塞泵送→ϕ100mm 管道输送至 1250m 井下泵站混合。

充填时，由尾砂仓造浆以 60% 左右浓度放到中间稳料搅拌槽，搅拌均匀后再泵至 DU30/1800 型固定室水平带式真空过滤机脱水处理成含水 22% ~ 24% 的滤饼，滤饼由皮带机送到 ATDⅢ－600 型双轴叶片式搅拌机。

二、定量给料搅拌制备膏体

众所周知，混凝土搅拌站制备混凝土是砂、石、水泥分别定量计量，批量搅拌装入混凝土搅拌运输车送到工地。

矿山膏体制备基本上是连续作业，虽然一段搅拌也可选用二台混凝土搅拌机双机配合间断作业，但二段必须是连续搅拌、供料。要制备合格膏体，不仅在于控制膏体的浓度、流量、压力，更重要的是对各种物料要能准确控制给料量和计量，才有可能制备出控制误差在 ±0.5% 质量浓度的合格膏体。由于物料粒径、水分经常变化，特别是尾砂的粒级组成和放砂浓度变化大、控制难，因此对仪表自动控制提出了较高的要求。这将在充填仪表与自动控制一章详细讨论。

不合格膏体进入管道不仅影响工程质量，极有可能造成管道堵塞。因此，世界各国都在研究如何控制不合格膏体进入管道的方法，目前改进的方法是一段搅拌由连续搅拌改为间断搅拌，分批供料，因为整个工艺流程中只有间断搅拌这一环节可以控制和调节。连续作业中的闭环控制往往滞后，难以达到目的。

搅拌站的设计必须考虑适用多种膏体配方的要求，因为在生产过程中有不同的工程要求，也可能物料变化或暂时短缺等。

定量给料搅拌制备膏体还必须考虑环境影响，例如防尘措施。砂石、飞灰、水泥等干粉物料在输送、配料和搅拌过程中都会产生扬尘，必须有可靠的除尘装置。又如排污系统必须畅通、完善，制备膏体过程中临时故障处理、槽、泵及管道清洗会产生大量污水，既要排放又要考虑回收—污水沉淀固体物料再用。

三、泵压管道输送

由于引进设备昂贵，系统复杂，泵的运转和操作要特别重视专人、专业、专责培训。泵送准备与操作要点：

(1)正式泵送膏体前，用清水或低浓度水泥浆(有条件时可用膨润土浆)湿润搅拌槽和管道，以免失水和减小塌落度损失并形成管壁预润滑层；

(2)按操作程序先慢速动作将管道充满，观察泵送压力及各部分运转情况，给料搅拌及泵正常运转后方可加速正常泵送；

(3)泵启动运行后要保持连续运转，不可轻率停泵。如遇一般故障如供料不足等可

放慢泵速，争取时间处理；

(4)在任何情况下料斗不得放空，料面要保持 500m 以上，否则管道会吸入空气造成故障；

(5)泵的操作并不复杂，但在运行中应有专人操作和监管，注意油温、润滑、冷却、泵压变化等，随时可执行加速、减速、反抽、停泵等操作。

(6)停泵清洗前应进行反抽 2～3 次，以消除管内剩余压力。泵缸和管道每一循环都要认真检查和清洗。

泵压输送中的几个技术问题：

(1)满管泵压输送问题。由地表向井下泵压输送膏体，不同于地表向高层建筑上行压送混凝土始终保持满管状态，也不同于高浓度重力自流输送可以维持半管状态(一定高度的料浆柱)，泵送要求全线路必须处于满流状态才能正常运转。因此，泵送开始必须使管道充满。

方法有两种 :国外资料介绍，先将管道上的截止阀(一般位于竖井底部以远或井下钻孔底部以远处)关闭，截止阀为电动液压操纵，可在地面泵站远距离控制。开始向钻孔和管道内注水充满，然后放入至少 2 个海绵橡胶球，再开始慢速向充填管中压送膏体，此时截止阀慢慢打开，使泵送膏体流量等于或略大于清水排出量，直到截止阀或出口处放出海绵橡胶球后，方能开始正常泵送。

上述方法操作复杂不易掌握。金川采用了自流直通式充满管道方法，即电动液压截止阀处于打开状态，开始将浓度较低且不含粗骨料的浆体缓慢泵入钻孔及管道，逐步提高泵送流量，直到采场见到料浆后，再提高泵送浓度并添加粗骨料，实践证明这种方法是可行的。

在深井工作条件下，发现不满管情况应采取提高浓度、加大流量和钻孔装置放气阀。仍不能解决问题时，要考虑减小输送管径。

(2)向下泵送问题。开始向下泵送膏体充填料，自重下落时，会在钻孔中形成真空负压段，同时，管路在全封闭状态下，也会形成气垫，使膏体难以压入管道，因此，多在地表管路由水平转入垂直下向钻孔或垂直管的管道拐弯处，设开口放气垂直短管或专门设计的放气阀才可使膏体较快地充满钻孔和管路，为下向满管正常泵送创造条件。

(3)在充填倍线不大的情况下出现的剩余压头问题，即垂直高度大，水平管路短时，垂直管段不能充满，膏体充填料在泵压下断续下落，在钻孔中下部和拐弯处会产生真空段，使物料不能保持连续输送，此时，可在拐弯处设气门，必要时打开通气，使管内压力平衡。国外一些矿山，特别是加拿大的一些矿山，在充填倍线小于 3 的条件下尽量采用膏体自流输送而不是泵送，并且认为膏体在垂直管内重力自流产生的摩擦阻力远远小于泵

压输送同等条件下的摩擦阻力(前者仅为后者的 2/3),这是真空负压产生文氏效应的结果。金川公司龙首矿东部新充填系统属于充填倍线小的条件,对采用膏体自流输送工艺流程,进行了可行性论证。

(4)管路上截止阀的结构与作用 :截止阀(门阀)分电动液压截止阀和手动截止阀见图 5 – 2 – 23。



a　　b

图 5 – 2 – 23　截止阀

a—电动液压截止阀 ;b—手动截止阀

电动液压截止阀由电机(4 ~ 7kW)、小型油箱及油泵、阀门组成,要打混凝土基础固定,操作灵活可靠、密封性好、系统可远传由地面泵站控制。手动门阀结构简单,但闸板板面加工精度较高(△△△7),方能保持在高压下无泄漏,需由人工用大锤开关。

一套泵送系统至少要配置一套截止阀(开泵打开,关泵关闭),一般安装位置是钻孔底部弯管后的水平管段。主要作用是:

①开始泵送前关闭,使钻孔满管后再慢慢打开,为膏体满流创造条件;

②系统出现故障临时停泵或停止作业时,关闭门阀以保持满管状态;

③清洗管路时关闭门阀,防止水流入采场。门阀前段管路上设放砂口,可放出清洗污水并引入排水系统。

(5)管路的清洗。膏体泵送管路的清洗是件重要的工作,因为矿山充填管线长,井下管网、管件较复杂,低劣的清洗质量会使管壁结垢,将会迅速缩小管道断面而使管道报废,这是不允许的浪费。

要采用正确的清洗方法才能得到良好效果,如简单地搬用自流输送大量清水冲洗未必能达到目的,因为膏体黏度大、透水性差,在管壁特别是在管接头和弯管处易产生弧形黏结。常用的清洗方法是:

①在泵出口的管道中放入(人工塞入或机械压入)海绵橡胶球(德国人将球分为软

的、中等硬度的和硬的三类，并有不同直径的大小球），也可用专门设计的锥形橡胶柱，将后加的清水和管道中的膏体隔开，以免在泵送高压下使膏体产生离析并因此而堵管。排料口设清洗球回收装置。清洗用具见图 5－2－24。如果是黏度特别大的膏体，应采用表面带钢刷的特制锥形清洗柱。

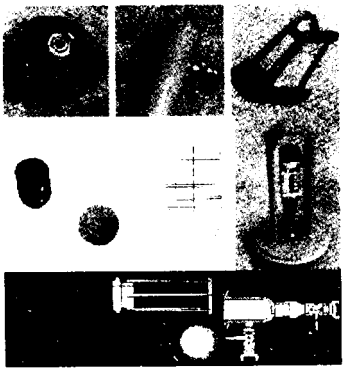


图 5－2－24　清洗用具

②压缩空气加少量清水清洗。由于上述清洗方法在没有安装加球机时手工操作复杂，费工费时，金川和国外一些应用膏体泵送的矿山，在无粗骨料的情况下，生产中还是采用泵入小量清水（3～5m^3 左右），加压气分段助吹的清洗方法。如多用水冲洗，应关闭进入采场前段的手动门阀或电动门阀，利用设置在管道上的排砂口放水为宜。

③利用非胶结膏体清除管道中的胶结膏体。金川采用下向进路胶结充填采矿法，4m 高的进路要求分三次充填接顶，第一次充填 2m 高的打底层（大于 4MPa）即可保证安全作业。因此，可先用加水泥的膏体充填形成硬顶板，其上特别是接顶前停止在膏体中添加水泥，以非胶结膏体继续泵送直到停止作业，因为非胶结膏体可在管道中存留 48h 后，再次启动使用。

④德国埃森 DMT 公司研究了一种小型液压变径活塞清除井下工作面短管膏体的机械，存有膏体的短管好比一个输送缸，变径活塞由均等的三瓣组成，可按不同管径调节大小，液压活塞从短管一端推向另一端即可将管中膏体全部清除。DMT 还研究了一种清洗球在管道中运动的位置指示器。

清洗必须注意的一个问题是，不仅要认真清洗管道，还要及时清洗泵缸和搅拌槽、贮料斗，一方面是为了避免黏结，另一方面是防止已黏结成块的物料混在膏体中进入输送管道，这会造成管道堵塞。

由于膏体中添加水泥每一作业循环必须及时清洗，增加了清洗的繁重，因此对水泥添加方式和添加部位成为世界各国膏体技术研究的重要内容，将在另节详述。

(6)膏体充填管径与管网。膏体在管道中呈结构流流动,一般流速小于 1m/s。流速过大会显著增大摩擦阻力损失,增大磨损和能耗,流速过小则充填能力不能满足生产需要。因此,膏体充填泵送能力、管径和流速三者之间应有平衡关系。合理选择范围如下:

管内膏体流速	0.6～1.0m/s
管内径	120～150mm
泵送能力	30～60m^3/h

管网中的管径可适当变化,但不能变径太大,如管径由 150mm 变为 100mm,这会造成过大阻力,使泵难以平稳工作,并为清洗造成困难。此外,管道走向要保持顺坡,避免忽高忽低;管线最低处和分段(200～300m)设放砂口;管路尽量走直线,管接头要保持好同心度并且要有良好的密封,任何泄漏将会造成管路卸压而发生管路堵塞。拐弯时曲率半径应大于 1.2m 等等。

(7)管道堵塞的原因与处理。物料配比合理的优质膏体在正常泵压操作时是不会发生堵管的,因为没有添加水泥的优质膏体可以在密闭的管路中停留 48h 后仍能重新顺利启动和流动(金川膏体泵送工业试验曾停留 19h 后恢复流动)。但是,实际运行中仍然多次发生堵管事故,主要原因是:

①输送管路系统特别是钻孔泄漏造成堵管。金川工程地质条件复杂,不良岩层断裂破碎较多,现有棒磨砂开路自流输送对充填钻孔磨损快,钻孔中的套管经常磨穿破壁,管壁卷曲和破碎岩石进入钻孔造成堵塞。在膏体泵送中利用了上述破壁的旧钻孔必然会泄压而堵管;

②管道中有较多、较厚残留物未清除或异物(固结的膏体块、检修用破布等)不慎进入输送管道中也是常见的堵管原因之一;

③粗骨料的膏体泵送结束后,清洗方法不当造成膏体离析,粗骨料沉积特别是在弯管或接头处沉积也会造成堵管;

④钞质量低劣膏体(超细物料过少,带棱角石块过多以及搅拌不匀等)勉强泵送极易造成堵管;

⑤操作不当管道吸入大量空气,没有正确使用反抽等造成堵管。

处理膏体在管道中的堵塞比处理自流输送浆体造成的堵塞要困难得多。特别是添加水泥的膏体管道堵塞后,首先要弄清堵塞部位,然后有组织地迅速展开行动,任何犹豫和拖延将拿使管路甚至钻孔报废。如果膏体中添加了水泥并且管路系统中有钻孔或竖管,则应先行处理钻孔或竖管,因钻孔投资大、施工周期长,是井下充填系统的瓶颈。一般处理方法是尽快从钻孔底部事故处理阀或放砂口放出全部膏体,然后由近而远分段拆开管子逐段排除膏体,排除方法一是放入清洗球后加清水缓慢泵压挤出;另一方法是先关闭门阀,然后钻孔注满清水,再迅速打开门阀,利用清水压力将膏体挤出。

四、采场充填方法

采场充填作业包括挡墙的设置、管道的架设和配料选择几部分。

1. 挡墙的设置。膏体充填无需脱水且流动缓慢，因此对充填挡墙要求不高，只需在封口处打立柱或横撑，以木条构成简易栅栏，在栅栏上钉上铁丝网即可，不必像浆体充填那样要严密坚固封口并设滤水设施。金川用过木撑挡墙，也用炉渣空心砖砌筑挡墙。

2. 管道架设。国外一些矿山工作面充填用 4mm 薄壁短管，用锚杆在顶板悬吊，后退式随充随拆。见图 5－2－25。



图 5－2－25　格隆德矿的膏体充填工作面

3. 金川工作面充填采用 ϕ125mm 耐压塑料管与 ϕ125mm 或 ϕ150mm 膏体输送钢管相接，并悬挂在顶板上，进路充填后切断塑料管见图 5－2－26。



图 5－2－26　金川膏体充填工作面

4. 配料选择。只要熟练掌握膏体技术，可选用添加水泥或不加水泥，加粗骨料或粗砂。在金川下向进路胶结充填条件下，只要确保进路有 2m 厚大于 4MPa 强度的配料构

成硬顶板(水泥单耗 220kg/m³),其上可添加少量水泥(160kg/m³)即可。同时坍落度也可根据充填工作面的远近和工艺需要进行调节,小塌落度 12～15cm,大塌落度 20～25cm 均可应用。

第四节　膏体管道输送减阻方法

减阻是物料管道输送中稳定通畅、节约能源的一个重要问题,各国学者开展了许多理论研究和工程试验。20 世纪 80 年代初,中国科学院化学研究所、长沙矿山研究院等对全尾砂输送与减阻问题开展了研究。我国较早地对矿山高浓度、高黏度全尾砂浆体的减阻问题进行研究的是清华大学韩文亮和北京矿冶研究总院杨焕文,研制出一套减阻试验系统,随后金川有色金属公司和北京有色冶金设计研究总院与中国科学院成都分院合作,对减阻理论问题和实用技术进行了更多的试验研究。

理论上,管道输送中的减阻方法有以下几种:

(1)在输送的浆体中加入高分子添加剂,改变浆体的流变性质达到减阻;

(2)在输送的浆体中加入纤维材料,改变浆体的流动结构达到减阻;

(3)在高黏度浆体中充气减阻;

(4)在浆体中加入少量的细颗粒,细颗粒可以抑制浆体的紊动,减小浆体在输送中的紊动能耗;

(5)以低黏度的流体局部置换高黏度的流体,改变浆体的局部剪切变形性能实现减阻。

一、减阻试验及结果分析

1. 实验室减阻试验

中国科学院成都分院非牛顿流体实验室韩式方、王毓宾二位研究员,采用一种天然资源——魔芋水溶液作为高分子聚合物的代用品,对金川有色金属公司尾矿浆的减阻力学进行了实验室试验研究,并为此设计了一套以高压空气作动力,并对尾砂浆进行空气搅拌的'暂冲式'管道减阻试验装置。从实验结果看出,魔芋水溶液作为添加剂,可以降低尾矿浆输送时的阻力,并在输送压力高时,减阻效果较为明显。

研究报告认为,从输送管壁面加减阻剂的方法,将是解决高浓度矿浆管道输送时减阻途径之一。并认为在尾砂膏体中添加水泥、粉煤灰,均可使剪切应力、表观黏度和阻力

系数下降，有利于改善管道输送条件。

2. 环管减阻试验

为探索金川膏体充填料管道输送减阻效果，在北京有色冶金设计研究总院水力管道试验室选用了3种减阻剂进行减阻试验。试验管路由内径35mm，长13.5m的环形管路组成。为使料浆在输送中保持恒温，在环管周围安装了ZX－2型冷却装置控制的冷却水套。由于受砂泵限制，全尾砂料浆的质量浓度 $C_W = 63\%$，灰砂比为1∶4，管内流速为0.4～2m/s。3种减阻剂的添加量分别为：

(1)天津YNB型泵送剂的添加量分别为水泥质量的1%、1.5%、2%；

(2)中国科学院成都分院1号减阻剂的添加量分别为水泥质量的1%、1.5%；

(3)六偏磷酸钠$(NaPO_3)_6$的添加量为水泥质量的0.5%。

3种不同减阻剂的试验结果，分别见表5－2－12～表5－2－14。

表5－2－12　天津YNB型减阻剂减阻效果

项　目	平均流速 $v/m\cdot s^{-1}$							备　注
	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
不加减阻剂的阻力损失 j_m	1.22	1.27	1.31	1.35	1.382	1.405	1.430	
加1%减阻剂的阻力损失 j_{m1}	1.115	1.165	1.20	1.24	1.27	1.295	1.32	
比较 $j_{m1}/j_m \times 100(\%)$	91.4	91.7	91.6	91.9	91.9	92.2	92.3	平均91.9
加1.5%减阻剂的阻力损失 j_{m2}	0.81	0.82	0.83	0.837	0.847	0.857	0.867	
比较 $j_{m2}/j_m \times 100(\%)$	66.4	64.6	63.4	62.0	61.3	61.0	60.6	平均62.8
加2%减阻剂的阻力损失 j_{m3}	0.88	0.89	0.90	0.915	0.925	0.942	0.965	
比较 $j_{m3}/j_m \times 100(\%)$	72.1	70.1	68.7	67.8	66.9	67.0	67.5	平均68.6

表5－2－13　中国科学院成都分院1号减阻剂减阻效果

项　目	平均流速 $v/m\cdot s^{-1}$							备　注
	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
不加减阻剂的阻力损失 j_m	1.22	1.27	1.31	1.35	1.382	1.405	1.430	
加1%减阻剂的阻力损失 j_{m1}	1.145	1.182	1.22	1.245	1.27	1.297	1.32	
比较 $j_{m1}/j_m \times 100(\%)$	93.9	93.1	93.1	92.2	91.9	92.3	92.3	平均92.7
加1.5%减阻剂的阻力损失 j_{m2}	0.965	1.01	1.053	1.095	1.13	1.165	1.197	
比较 $j_{m2}/j_m \times 100(\%)$	79.1	79.5	80.4	81.1	81.8	82.9	83.7	平均81.2

表 5－2－14　六偏磷酸钠的减阻效果

项　目	平均流速 $v/m\cdot s^{-1}$							备　注
	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
不加减阻剂的阻力损失 j_m	1.22	1.27	1.31	1.35	1.382	1.405	1.430	
加 0.5%减阻剂的阻力损失 j_{ml}	1.14	1.175	1.20	1.225	1.248	1265	1.280	
比较 $j_{ml}/j_m\times100(\%)$	93.4	92.5	91.6	90.7	90.3	90.0	89.5	平均 91.9

以上试验证明，已经试验的 3 种减阻剂，以天津 YNB 型泵送剂效果最为显著，其中添加量为 1.5%时，效果最好。此外，根据以上试验结果，对添加天津 YNB 型泵送剂的膏体塌落度进行了检测和比较，结果如表 5－2－15 所示。

表 5－2－15　添加 YNB 型减阻剂之后膏体塌落度的变化

添加量(水泥质量的百分数)/%	全尾砂＋水泥＋粉煤灰，$C_W=73\%$ 灰砂比 1:4，水泥:粉煤灰 = 1:0.5		全尾砂＋细石＋水泥＋粉煤灰，灰砂比 = 1:8，尾砂:细石 = 50:50，水泥:粉煤灰 = 1:0.5	
	塌落 S/cm	比较 S/S	塌落 S/cm	比较 S/S
0	10.5	1	8.0	1
0.5	10.5	1	9.2	1.15
1.0	11.0	1.05	12.5	1.56
1.5	17.0	1.62	15.0	1.88
2.0	15.0	1.43	18.0	2.25
2.5	24.5	2.35	17.0	2.13

国内外还有多种减阻剂可供选用，例如 PONIMEN、膨润土、水玻璃等。在膏体充填工业生产中应用减阻剂需增加一套减阻剂制备与定量给入装置，如同选矿厂药剂定量给入装置一样，才能收到预期的效果。

二、其他减阻方法

注入法减阻装置。沿管线装设减阻环，通过环形喷嘴均匀的将微量清水或减阻剂喷入管道内壁，形成一层极薄的润滑膜，以降低边界层的剪切应力，有很好的效果。为使减阻剂连续、自动、定量给入，需要 1 台带剂量泵的制备装置。剂量泵从一个容器中将高分子聚合物和水的混合物吸出，根据泥浆泵的输送压力将减阻剂注入输送管道。这样添加方法在国内还是一大难题，因为给入液体的压力必须大于泵送膏体管道内的压力，而膏体输送泵是高压泵，必然要超高压泵才能实现注液任务。所以有待进一步考察和研究。

国外利用专门的润滑剂，可将管道压力损失降低至出口原始压力的 2%，润滑剂注入量为泵送物料量的 0.1% ~ 1%，润滑剂以 1∶50 的比例用水稀释。见图 5 - 2 - 27。

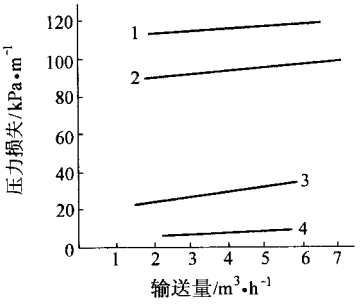


图 5 - 2 - 27　注入法的减阻效果

1—未注入任何减阻剂；2—注入水(64L/h)；

3—絮凝剂(128L/h)；4—减阻剂(128L/h)

第三章　尾矿在充填采矿法中的应用

第一节　概　　述

近十多年来，我国应用充填采矿法的金属矿山日益增多，在充填料制备、输送技术、充填材料开发和充填回采工艺技术等方面均取得了长足的发展，加之井下无轨自行设备的广泛应用，充填采矿现已成为我国一种高效的开采方法。随着现有探明的矿产资源的不断消耗，采矿向深部发展，地温地压的增加，环保要求的日趋严格，充填采矿法在 21 世纪将会得到更大的发展。

一、充填采矿技术发展简介

我国金属矿山地下开采充填采矿技术，概括地说，大致经历 3 个发展阶段。

(一)第一阶段(20 世纪 60～70 年代)

我国金属矿山使用浅孔留矿法的鼎盛时期是 20 世纪 60 年代初，当时东北、内蒙古、山东、河北等 60 年代以前开发的矿山，几乎清一色使用此法开采，但到 60 年代末期出现充填采矿法。内蒙古红花沟金矿 60 年代初建矿，60 年代末期，留矿采矿法采矿量只占矿山的一半，其余则为削壁与干式充填采矿法生产。该矿改变采矿法的原因是：由于围岩不稳固而使上盘及顶板经常冒落，造成大量贫化；矿体沿走向及倾向脉幅变化大，混采留矿采矿法出矿品位低；大放矿时围岩冒落堵塞漏斗，采下矿石不能放出而损失；回采过程中采场不安全，曾发生两起死亡事故。当时内蒙古 4 大岩金矿还有金厂沟、撰山子、东风金矿，各矿也于 70 年代初期开始使用干式充填采矿法。

招远金矿灵山分矿开采 5 号脉，矿脉最大厚度 16m，平均品位 15.94g/t，倾角 55°。矿体和围岩节理发育，不稳固易冒落。上部中段使用浅孔留矿法，回采时损失、贫化严重，采空区陷落造成地表塌陷破坏农田，雨季洪水涌入井下。为解决此问题，于 1967 年试验并应用分级尾砂充填采矿法，这是我国岩金矿山最早使用的水力充填技术。

（二）第二阶段（20 世纪 80 年代）

典型蚀变岩中厚矿床开采的焦家、新城金矿均于 1980 年投产。由于储量大、品位高、矿岩不稳固及地表不许陷落，所以利用上向水平分级尾砂充填法生产。这是我国岩金矿山首次应用立式砂仓自流输送充填技术，使充填技术提高到一个新水平。此技术有利于控制地压活动，防止地表大面积陷落；选厂分级尾砂得到充分利用，减少尾矿工程投资；使不稳固的蚀变岩矿体回采成为可能，并使矿山取得很大经济效益。

由此而带动一大批矿山使用尾砂或尾砂胶结充填采矿法。比如，仓上、金城、河东、河西、尹格庄、岭南等金矿均采用此法。在此期间，灵山分矿、大水清金矿试验成功下向胶结充填采矿法，东坪金矿试验成功上向块石胶结充填采矿法，使回采工艺适应矿床开采条件，充填技术更具多样性。20 世纪 80 年代初期统计，岩金地采矿山空场采矿比例仅占 67%，充填采矿法已高达 31%。

（三）第三阶段（20 世纪 90 年代）

这是岩金矿山充填采矿技术提高与创新阶段。其主要特点是矿山自觉使用充填法并开发出一种新型充填材料。

20 世纪 80 年代末期，我国开发出一种新型工程材料——高水速凝材料（简称高水材料）。它由甲、乙两种固体粉料组成；甲料包括铝酸盐或硫铝酸盐、缓凝剂及调整剂；乙料由石膏、石灰、黏土配以促凝剂组成。甲、乙料分别加入一定量的水制成灰浆，按 1∶1 混合后，30min 即可凝结成固体。其强度增长极快：1h 强度达 0.5～1.0MPa；1 天为 3.0～4.0MPa；2 天终凝强度 5.0～8.0MPa。此种新型材料首次在焦家金矿应用，并开展高水固结尾砂充填采矿新工艺研究，进行上向与下向进路回采试验并取得成功。在此基础上，又开发成功由生石灰、石膏、矾土和适量添加剂组成的一种固体粉料单管输送的新材料，并在鸡冠嘴等金矿进行充填采矿法试验研究。

二、尾砂充填技术

（一）采场隔墙技术

开采蚀变岩型中厚且矿岩较稳固矿床一般用分级尾砂充填采矿法。矿体平均厚度较大，采场垂直矿体走向布置，采场之间间隔回采，所以，采场之间须有足够强度的隔墙。其目的有三：一是使相邻采场回采成为可能，并减少矿石损失；二是尽可能提高后采采场

作业的安全性；三是减少后采采场充填尾砂混入，降低矿石贫化，提高出矿品位。我国岩金矿山先后使用过下述几种隔墙技术。

1. 袋装尾砂隔墙技术。蚀变岩型矿床早期开采时，是用干式充填采矿法，其隔墙用块石与水泥砂浆构筑。当使用分级尾砂充填法时，是用尼龙编织袋来装尾砂垛筑隔墙。当采场充填一定高度时，清出需筑隔墙处尾砂，并装袋垛高，再充填，再垛高，直达设计要求。此种方式构筑简单，但需大量人力，并费时，也不能抗爆破矿石冲击。

2. 胶结充填隔墙技术。针对上述隔墙技术的缺点，有的矿山为了降低充填成本，在继续使用尾砂充填技术基础上，于先采采场每充填一定高（如 1.0～1.5m）并脱水后，工人进入采场在采场两侧用铁锹挖出 1.0～1.5m 宽、深度以见到底板（或胶结充填体）为止，再用 1∶10 水泥尾砂胶结充填至原尾砂高度，如此循环，直到满足要求时，使采场分级尾砂包裹在高强度的胶结充填体中，形成隔墙。

3. 柔性隔墙技术。柔性隔墙是一种技术创新，在尹格庄、望儿山等金矿应用。此种隔墙在采场两侧帮，用直径 6.5mm 钢筋编织成 0.25m×0.25m～0.3m×0.3m 的网格，再挂上 1～2 层苇箔，若采场长度过大，中间还需用直径 50mm 钢筋作立柱，网格在上下帮用锚杆固定。钢筋横竖拉紧，并用电焊焊牢。此技术简化施工工序，有利采场脱水，且成本低，质量有保证，苇箔使用寿命达 1 年以上。

（二）泄水构筑物

分级尾砂充填，其质量分数最高仅 65%，所以有大量水需从采场渗滤出去，采场必须有泄水构筑物。最早使用钢板围成直径 1.0m 圆筒，里面焊上角钢或圆钢，外面钻孔，并包裹麻袋片，当作采场泄水井并兼作行入通风井。此外，有的矿山用方木架设方形泄水井。

由于钢质圆筒泄水井成本高，泄水速度慢，效果差，尹格庄金矿研制成功增强塑料泄水桶外缠 2 层土工布，并在 2 层土工布之间包一层苇箔。这样，既增大泄水面积，又提高了泄水效果。其原材料成本仅是钢质成本的 1/9，经济效益显著，申请了实用新型发明专利。该种泄水井，材质轻便，利于安装，角度可调，机动灵活。

（三）负压脱水技术

分级尾砂充填采场使用负压脱水，可大大加快脱水速度，减少密闭墙静水压力，提高充填能力和尾砂利用率。

此技术其原理是利用水射流过程，由于改变管径而形成负压，从而带动采场多余的水快速流出。负压脱水装置包括负压器、负压箱、渗滤管、水泵、供水管、压风管、排水管等。用水泵向负压器供水时，所形成的负压带动负压箱、渗滤管加速采场脱水；当停止供水，向负压器供高压风时，可把负压器与渗滤管吹洗干净，不因细泥堵塞而降低脱水速度。故此，该装置有 3 个功能：一是自然脱水；二是负压脱水；三是过滤材料清理。

此装置由长春黄金研究院研制，并在五龙金矿四道沟分矿应用。该装置具体应用介绍如下：来自选厂的质量分数 20% 左右的尾砂，经分级、浓缩并补充一定水量后，直接用管路输送到采空区。充填系统不设尾砂仓，原则上与选厂同步运行。采空区走向长度 58m，宽度 38m，高度 20m，倾角 50°左右。在采空区设置了负压强制脱水系统以后，在充填初期，1～2 天开动一次，每次 1.5h 左右，充填料充填到一定高度以后，可以数天开动一次，每次 1～2h。一般情况下，在自然脱水状态下，脱水量为 7.88～11.27m^3/h。为监测充填过程中充填料对空区底部和密闭墙的压力，考核脱水效果，试验中在采空区底部和密闭墙分别安装了压力监测仪器。压力监测结果表明，由于脱水效果好，空区底部和密闭墙的压力值分别为 41.4kPa 和 2.91kPa，远远低于密闭墙设计的最大承压能力（100kPa）。由此结果表明，最大脱水量可达 41.7～59.8m^3/h，为自然脱水量的 3.7～7.6 倍，并申请了国家发明专利。

（四）压缩空气清洗充填管道技术

高浓度砂浆自流输送充填在每次开始或停止充填作业时，都要注入大量的水进行引流和刷洗充填管道，以保证充填管道的畅通。通常这些水都被注入到充填采场中，这样削弱了高浓度充填的意义。多数矿山充填过程中非正常停充次数频繁。根据部分矿山统计，平均不足 3h 停 1 次。为从根本上解决充填工艺中存在的问题，提高充填体的质量，金川二矿区研制了压风喷射器。该装置串联于充填管上，利用射流原理，使高压风以一定的方向作用于充填砂浆，在压风强有力的冲击下，砂浆获得动力而向前移动，使之达到引流和清刷充填管道的目的。喷射器主要由单向逆止阀、喷嘴、喷射管组成，其特点是：作用线路长，在乎直水平管路上，每个喷射器的有效工作距离可达 200m 左右；工作风压小，一般为 3×10^5 Pa 以上，启动风压仅为 0.8×10^5 Pa；结构简单，工作安全可靠，可有效防止返浆；操作简单，喷射器间隔安装在充填管道上，只需开启总阀门便可使喷射器自动地顺序启动，检查维修方便。金川二矿区东部和西部充填管上安装了喷射器，在引流和刷管上取得了良好的效果，在处理充填堵管和砂浆助推方面也获得了满意的效果。

（五）充填搅拌站造浆控制技术

近十多年来，计算机技术在充填搅拌站得到了广泛的应用。金川二矿区西部充填搅拌站采用了先进的计算机集散控制系统。该系统以计算机为主体、以智能化仪器仪表为骨干，操作人员通过 SCC－CRT 操作站上的键盘和显示器可对搅拌过程中的砂量、水量、灰量、制浆浓度、料浆流量、搅拌桶液位等工艺参数进行集中监视和控制，可根据生产工艺要求，对搅拌过程中的各参数进行调整。该系统除自动控制外，还配备有手动控制和用于事故处理的强制执行功能，并在表盘、操作站上分别配有声光报警系统，提高了搅拌系统运行的可靠性。

三、充填材料

20 世纪 80 年代末，我国开始研制与开发用于矿山充填的新型胶结材料，其中在高水材料、高炉矿渣、赤泥和灰煤等胶凝材料的研究与应用方面取得了较大的进展。

（一）高水速凝全尾砂胶结充填材料

高水速凝固化胶结充填的最大优点是能以很小的体积固液比（$c_v = 0.1 \sim 0.5$）在较短时间内凝固、硬化，最终形成一种有一定强度的高含水固体。我国从 1986 年开始试验研究高水充填材料及其充填工艺，试验获得成功后，在煤炭矿山广泛推广应用。其充填工艺为：用甲料（高铝水泥、缓凝剂）和乙料（膨润土、二水石膏、生石灰、速凝剂）分别加水制成胶结料浆，经双活塞往复式充填泵以 1∶1 等量分别输送，在管道出口处，由多孔板混合器混合进行袋式充填。招远金矿 1989 年率先采用高水充填技术进行高水速凝全尾砂充填试验。该矿在高水充填中加入全尾砂，其工艺流程为：在选厂到尾砂库的输砂管上引出一根内径为 30mm 的尾砂分流管，将质量分数为 30% 左右的尾砂浆输送到井下充填站的贮砂池中。充填时由 2PNL 渣浆泵将贮砂池中砂浆供给 ϕ1400mm × 1400mm 单层叶轮式制浆桶，分别加入甲、乙两种高水固化材料搅拌制浆，由双活塞泵等量压送到采场充填。根据 1992 年玲珑金矿的充填试验，当全尾砂浆质量分数为 25%、固化剂掺量为 250kg/m^3、充填料浆的质量分数为 39% 时，2h 后充填体强度达 0.35MPa，8h 后的强度达到 1.7MPa。充填成本为 20.76 元/t。高水充填料浆浓度低、输送方便，采场不脱水，不污染井下作业环境。

（二）高炉矿渣胶凝材料

1994 年，济南钢铁公司张马屯铁矿为降低充填成本，进行了高炉矿渣取代水泥作胶凝材料的胶结充填试验研究。试验结果表明，采用尾砂∶水泥 + 炉渣为 7∶1 的配比，用磨细的高炉矿渣替代胶结充填料中的部分水泥，充填体强度不仅不会降低，反而随着炉渣替代水泥量的增加，充填体强度提高。张马屯铁矿现已建立了高炉矿渣充填系统。目前，铜陵公司安庆铜矿和南京铅锌银矿推广应用了该技术。安庆铜矿采用以矿渣胶结剂全面取代水泥的胶结充填技术。矿渣胶结剂由磨细的矿渣和石灰组成。矿渣研磨粒度为 + 0.074mm，所占比例不超过 12%，矿渣胶结剂中的石灰作为激化剂，矿渣与石灰的最优配比为 0.825∶0.175。安庆铜矿室内试验表明，矿渣胶结剂与尾砂结合能力强，在相同条件下，矿渣胶结剂与分级尾砂形成的试块强度是水泥的 1.5 ~ 2.5 倍。表 5 - 3 - 1 是用矿渣胶结剂与用水泥形成的充填体试块的强度对比。安庆铜矿高炉渣细磨采用工艺简单的湿磨方案。充填工艺：先用矿渣、尾砂、石灰 3 种组分各自造浆（造浆比例分别为：矿渣 72%，尾砂 68%，石灰 25%），然后按设计配比（料浆流量分别为：矿渣 5.83m^3/h、尾砂 58.8m^3/h、石灰 5.37m^3/h）连续向搅拌桶给料浆，3 种料浆在搅拌桶内搅拌均匀后，浓

度达 66% ~ 70%，流量 70m³/h，然后通过充填钻孔及井下管道输向采场充填。

表 5 - 3 - 1　矿渣胶结剂与水泥充填体试块强度对比表

充填材料	灰　砂　比	质量分数/%	单轴抗压强度/MPa	
			R_{28}	R_{60}
矿渣胶结剂 + 分级尾砂	1:4	72	7.02	9
	1:8	72	3.80	4.07
水泥 + 分级尾砂	1:4	72	2.68	4.50
	1:8	72	1.08	1.54

四、应用实例分析

(一)概况

三山岛金矿井下采用的主要采矿方法有点柱法、分层充填法、进路法和混合法四种。其中，进路法包括盘区进路法、分区进路法和单条进路法。各种采矿方法采场的充填均采用尾砂水力充填和尾砂胶结充填系统。采场的回采和充填，由下向上按水平分层进行，采场分层回采结束后，进行分层充填。分层充填高度一般为 3.0m，其中，底部 2.6m 高，采用废石和尾砂充填，即先用井下开拓和采准工程的废石回窿充填至 1.5m 左右，再用尾砂充填，并找平；表层 0.4m 高，采用灰砂比为 1:4 的胶结充填，充填后形成采场下一分层的作业底板。点柱法和分层充填法采场充填后留有 1.0 ~ 1.5m 的爆破补偿空间；进路法采场接顶充填，其中，盘区进路法采场中先施工的进路，其底部 2.6m 高，采用灰砂比为 1:10 的胶结充填。

1991 年，北京有色冶金设计研究总院与三山岛金矿合作，进行了点柱式机械化分层充填采矿法充填工艺试验研究。在试验研究成果的基础上，经多年实践，尾砂水力充填和尾砂胶结充填系统在三山岛金矿得到了改进与完善，从而满足了充填要求。

(二)充填系统

尾砂水力充填和尾砂胶结充填系统包括地面充填料制备站系统和井下充填系统。地面充填料制备站系统集中在地面，进行充填料的制备和输送。该系统主要由尾砂的贮存和放出、水泥的输送和给定、灰砂浆的制备与输送及供水供风系统四部分组成。

(1)尾砂的贮存和放出。选矿厂的质量分数为 25% 左右的分级尾砂送到制备站吸砂池，经 4PNUA 型衬胶砂泵分别扬入 2 个半球形底的立式砂仓内贮存，并沉淀成饱和尾砂。饱和尾砂经过再造浆，通过砂仓底部 4 个放砂口等阻力放砂汇集于缓冲漏斗，经总放砂管放入高浓度搅拌筒内。另外，砂仓上部均布有 8 个溢流口汇集至溢流槽，经溢流管溢流出砂仓中多余的水。

(2)水泥的输送与给定。散装水泥罐车运来的散装水泥,用风力输送到 2 个水泥仓内。水泥经水泥仓底部的单向螺旋闸门及弹性叶轮给料机,按所需量将水泥经螺旋输送机送到 1.5t 稳料仓,然后,再经单向螺旋闸门及弹性叶轮给料机按给定数送到高浓度搅拌筒。

(3)灰砂浆的制备与输送。符合浓度要求的尾砂浆与按灰砂比 1∶4 配比要求的水泥,直接在高浓度搅拌筒内混合,搅拌均匀,制成所需的灰砂浆。

(4)供水供风系统。砂仓环形喷管的喷嘴和造浆喷嘴的压力水、搅拌筒用水和充填管道冲洗及其他用水,均由 2 台离心式清水泵并联供给,根据用水需要可以单台工作或 2 台同时工作。水泥用风力输送和水泥仓顶脉冲喷吹袖袋除尘器及水泥仓仓底吹松管回风,均由矿山空气压缩机站通过气水分离器经减压阀供给。在地表搅拌站高浓度搅拌筒内将制好的尾砂浆或灰砂浆,先经充填钻孔下放至 -70m 中段,由 -70m 平巷到服务井,再到各生产分段巷道和采场联络道口,用增强聚乙烯软管从采场联络道引进采场内,进行充填。尾砂浆及灰砂浆浓度和流量由安装在总放砂管中的 U 形管上和高浓度搅拌筒出口的管道上的 γ 射线浓度计和电磁流量计进行测定。水泥加入量通过安装在稳料仓下的弹性叶轮给料机与高浓度搅拌筒之间冲击式流量计来进行测定。

(三)采场充填工序

采场充填工序主要包括废石回窿充填、采场安全检查、泄水墙的架设、泄水笼的安装、渗水坝的堆筑、充填管路的铺设、尾砂充填和胶结充填及污水处理等工序。

(1)废石回窿充填。采场分层回采结束后,先用井下开拓和采准工程的废石进行充填,充填高度约 1.5m,为废石回窿充填。废石回窿充填提供了采场尾砂充填和胶结充填的筑坝材料。这是因为废石充填渗水条件好,也能增加尾砂充填体的强度。

(2)采场的安全检查。尾砂充填和胶结充填前,必须对采场顶板和上盘进行检查,发现隐患,及时处理,以确保充填期间的安全。

(3)泄水墙的架设。在采场两翼通风泄水小巷上,一般采用方木支撑,并迎砂面敷设金属网和尼龙编织布的方法架设泄水隔墙。泄水墙的架设一方面便于充填料泄水;另一方面防止充填时充填料的流失。

(4)泄水笼的安装。为加强采场充填泄水,一般在采场两翼通风泄水井附近、采场联络道口附近或采场内面积较大的区域,安装预制泄水笼。泄水笼是用废旧锚杆焊接而成的,直径 1.0m,高 2.4m。泄水笼中的充填料泄水,一般采用钻孔或泄水管泄至采场两翼的通风泄水井内或采场联络道中。

(5)渗水坝的堆筑。在采场联络道口,一般采用废石堆坝,并迎砂面敷设尼龙编织布,以利于充填泄水。

(6)充填管路的敷设。采场联络道及采场内均使用 100mm 增强聚乙烯管,在采场联

络道口处与分段巷道中,充填主干管用三通法兰盘连接;在进路法采场进行接顶充填时,还要将充填管吊挂在采场顶板上。

(7)尾砂充填和胶结充填。打开采场联络道口的三通法兰盘,放清水冲洗管路,清水直接排到分段巷道水沟中,看到充填料浆时,立即关闭排水口,料浆即从充填管进入采场。采场充填一般采用从采场联络道口向两翼前进式充填,在宽度方向上从下盘向上盘充填。3m 高的分层一般分 3 次充填。第一次用废石和尾砂充填至 1.5m 高左右;第二次用尾砂充填至 2.8m 高,然后,进行平场找平;最后进行胶结充填,胶结充填厚度为 0.4m。每次充填结束后,用清水冲洗充填管路,冲洗水直接排到分段巷道水沟中。

(8)污水处理。充填过程中脱出的含泥污水,一部分经采场两翼泄水隔墙渗滤到通风泄水井,流到下部中段风井联络道内,最后流到下部中段巷道水沟中;一部分经采场联络道渗水坝渗滤到本分段巷道水沟中,最后流到下部中段巷道水沟中。下部中段巷道内设置有沉淀池处理充填污水。

五、尾矿充填采矿技术发展方向

(一)创造新型采矿工艺

充填采矿技术要结合矿山特点,矿床开采技术条件,发明与创造一些与其他采矿技术相结合的新型采矿方法。

削壁留矿采矿法是针对 0.4~0.7m 厚急倾斜石英脉型矿床,在撰山子金矿研究成功的一种采矿方法。当时矿山需要扩大生产能力,又要降低采矿成本来提高企业经济效益。而该矿开采均为平均厚度 0.2~0.5m 矿床,为降低采矿成本只有使用留矿采矿法,而极薄矿脉开采只能使用削壁法。为此,在二者之间各取其特点而发明削壁留矿采矿法,即把掏槽落矿暂留在采场中作为继续上采工作台,而使工作面具有足够作业宽度,需削下部分围岩从采场中运搬出去,采场采完放净矿石后,空区用废石或尾砂充填。此法试验成功后经技术查新认为,属国内首创,达到国际水平,并申请了国家发明专利。

对于缓倾斜极薄矿脉开采,可用矿岩分掘,废石抛掷充填空区,即削壁充填与爆力运矿相结合的采矿法。对于厚大而矿岩较稳固矿体,可用浅孔或中深孔空场采矿法开采,采后空区用尾砂胶结、块石胶结或高水材料充填,即阶段连续回采快速充填采矿工艺,既降低成本,又增大效率,也做到空区及时处理。

(二)加强高水材料长期性能研究

高水材料是一种新型支护材料,其质量水固比达 2.5~3.0∶1,体积含水率 90%,并具有短时间内凝固、早期强度高等特点。高水材料除在采矿工艺应用外,还可在楼房基础注浆加固、堵漏防渗、巷旁充填支护等工程中应用。

然而，这种新材料目前未能广泛应用。其原因如下：一是由于是专利产品，不能大批量生产，材料成本高；二是此种固结材料，形成人工面也好，或含有大量钙矾石、水化硅酸钙和水化氧化铝凝胶体也好，在地表应用极易风化，脱水后其强度有所降低；三是在矿山或其他工程应用中，没有长期稳固性证明其具有抵抗爆破震动性与冲击性，抵抗各种性质渗滤水腐蚀性，以及抵抗地应力作用变形破坏与地热作用、冰冻作用等特性。为此，需要加强高水材料长期性能研究，以求更广泛应用，推进采矿技术进步。

（三）提高机械化作业水平及效率

在干式充填采矿法中，虽然进行过机械化开采试验研究并取得成功，但由于各种原因而未能继续使用。因此，今后在薄矿脉开采矿山有条件者，使用国产机械或微型无轨设备进行机械化作业研究，提高生产能力，促进技术进步。

在蚀变岩型矿体开采矿山中，除新城、焦家、三山岛金矿使用进口设备组织生产外，其他一些大型或特大型矿山机械化作业水平也较低；即使是上述矿山，其设备效能也未能充分发挥。同样为无轨设备生产，国外一个矿山全部雇员 610 人，日采矿石 6000t，年产金 13.581t，人均年出矿量 3770t；而我国某金矿有职工 2400 人，日采矿石只有 1400t，人均年出矿量仅 160～180t，两者相差 20 多倍。除各种客观因素外，说明我国无轨充填采矿机械化作业效率仍可进一步发挥。

（四）深部充填采矿技术

我国金属矿山石嘴子铜矿，从上部 25m 阶段到闭坑深达 950m，始终使用浅孔留矿采矿法。该采矿方法在中等深度（530m 以上）开采中，可获较好效果，但采深增加时，矿区压力大，作业条件日渐困难，相应改变矿块结构参数，由上部大矿房小间柱，到中部小矿房大间柱，再到深部大顶柱均未能很好地解决回采困难，造成大量矿石损失。这是一种不成功采矿法，因此，深部矿体开采不能使用空场采矿法。

为此，借鉴国外深部矿体开采经验，充填法是惟一可行的回采工艺。然而，充填采矿法多种多样，充填技术五花八门，采用何种回采方法及充填工艺，是今后应根据具体矿床开采条件而开展研究的主要课题。

第二节　全尾砂胶结充填技术

全尾砂胶结充填技术有全尾砂和高浓度两大特点。在浆体管道的输送过程中，充填料浆‘高浓度’是指大于临界流态浓度而小于极限可输送浓度。随着料浆浓度的提高，充

填料浆的流态特性将逐渐发生变化：当料浆浓度达到临界流态浓度时，料浆的水力坡度随流速的增大而从 $n>1$ 的指数函数关系逐步变为 $n=1$ 或 $n<1$ 的指数函数关系。究其实质，是因为料浆浓度较低时，传统的水力充填是非均质的两相流动，固体颗粒与流体之间将发生相对运动，或沿管壁滑动、滚动、作不连续的跳跃，或呈悬浮状态，增大了管道的输送阻力。而全尾砂高浓度充填料浆呈满管低速流动，为似均质的结构流体，并且，在管道横截面上沿径向由外向里形成三个层次：水膜层、薄浆层和膏状充填料浆芯柱，水膜和薄浆层在管道周壁形成了阻力很小的润滑层，确保芯柱处于“柱塞流”状态，使料浆管道输送阻力明显降低。

当然，随着充填料浆浓度的提高，料浆的黏性系数必然增加，且当高浓度的充填料浆浓度超过某一限值（极限可输送浓度）时，料浆的黏性系数将急剧增加，致使管道输送阻力大幅度增加。因此，全尾砂高浓度充填料浆输送时应低于该浓度极限值。根据我国试验测定，该极限浓度值略高于临界流态浓度 3%～5%。

其次，良好的充填料须能最大限度地占据空间，并具有较小的孔隙率和沉缩率，以便最大限度地发挥充填体的承载作用，这样就要求充填料中必须具有一定的细粒级组成。从充填料粒级级配来看，充填材料按 0.25mm 划分为粗粒级和细粒级，小于 0.25mm 的细粒级与水混合后形成浆体粘附在粗粒级表面，并填充其空隙，尤其 $-25\mu m$ 的微细粒级，在高浓度浆体的输送过程中却发挥着更加重要的作用：一方面微细粒级在浆体管道的输送过程中，极易趋向于管道周壁，形成润滑层，并阻止粗颗粒下沉或堆积，从而确保高浓度浆体形成“柱塞流”，极大地降低管道输送阻力，减小管道磨损；另一方面微细粒级使高浓度充填料浆具有触变性能，即静止时浆体的内聚力和粘性加大，运动时则减小，这样确保高浓度料浆具有良好的保水性能，使充填料浆尤其粗颗粒不至于在输送过程中，特别是停泵时造成大量水泌出，产出沉淀、离析而导致堵管，因而微细粒级促使高浓度充填料浆具有良好的稳定性。因此，从理论上讲，传统的分级尾砂充填由于去掉 $-20\mu m$ 或 $-37\mu m$ 的微细粒级部分，同时削弱了高浓度输送润滑层的形成，恶化了高浓度输送的必要条件；而全尾砂高浓度胶结充填是切实可行的。

不同粒级组成的充填料具有不同的高浓度值，进而得到不同的高浓度充填料浆的输送性能（流动性、可塑性、稳定性）和流变特性。目前我国多采用可泵性作为衡量全尾砂高浓度充填料浆输送性能的一个综合指标，并借用混凝土输送经验中坍落度和泌水率两个概念来表示。而全尾砂高浓度充填料浆是否具有良好的可泵性和流变特性决定着全尾砂高浓度胶结充填能否顺利进行。根据我国全尾砂高浓度胶结充填试验，适宜泵送的料浆坍落度值：全尾砂膏体为 12～20cm，全尾砂细石膏体为 10～20cm；在满足充填料浆稳定性条件下，充填料浆的泌水率一般应小于 3%，压力相对泌水率应小于 30%。为了

改善全尾砂高浓度料浆的可泵性及流变特性，并降低胶结充填成本，目前多采用在全尾砂充填料中加入一定的粗骨料和胶对剂代用品。由于粗骨料的加入，充填材料粗细搭配，充填料浆密度和高浓度值明显提高，并且，充填料浆的坍落度值逐渐增加，泌水率逐渐降低。因此，在全尾砂充填料中粗骨料的加入量必然存在一最优值。根据我国金川公司等的试验，全尾砂∶细石的质量比 50∶50 为最优。

一、全尾砂胶结充填系统

根据全尾砂高浓度胶结充填特点，全尾砂高浓度胶结充填系统通常包括脱水系统、搅拌系统、检测系统和管路系统；其中脱水系统和搅拌系统是全尾砂高浓度胶结充填成功应用的关键。图 5－3－1 为金川公司全尾砂胶结充填工业试验流程图。

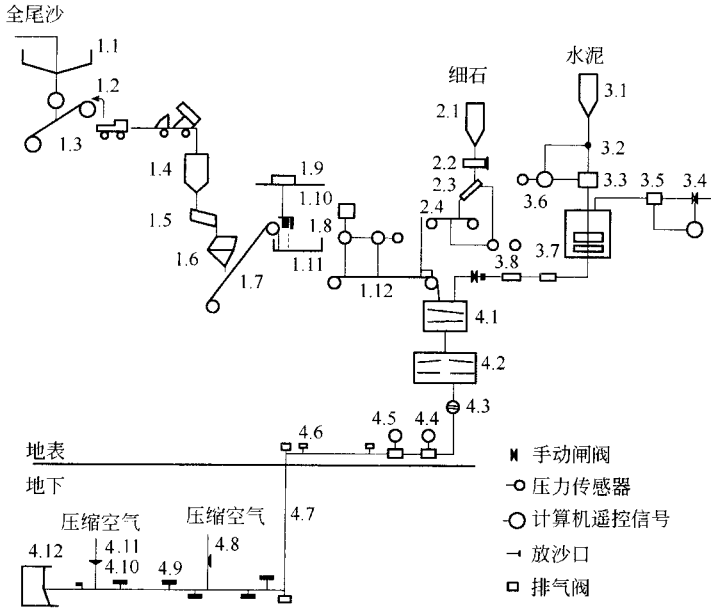


图 5－3－1　金川公司全尾砂胶结充填工业试验流程图

1.1—浓缩机；1.2—圆盘过滤机；1.3—皮带机；1.4—全尾砂仓；
1.5—振动给矿机；1.6—振动筛；1.7—皮带机；1.8—全尾砂仓；
1.9—抓斗起重机；1.10—小砂仓；1.11—圆盘给料机；1.12—计量皮带机；
2.1—砂石仓；2.2—手动平板闸门；2.3—电磁振动给料机；2.4—计量皮带机；
3.1—水泥仓；3.2—叶轮给矿机；3.3—冲板式流量计；3.4—控制阀；
3.5—流量计；3.6—强力搅拌槽；3.7—浓度计；3.8—流量计；
4.1—双轴式叶片搅拌机；4.2—双轴螺旋输送机；4.3—PM 双缸活塞泵；
4.4—浓度计；4.5—流量计；4.6—充填管；4.7—充填钻孔；4.8—电动液压闸阀；
4.9—压气清洗装置；4.10—充填管；4.11—夺气助吹装置；4.12—手动闸阀

(一)脱水系统

为了制备全尾砂高浓度料浆,一般全尾砂采用二段脱水工艺,即先将选矿厂来的20%左右浓度的尾矿浓缩到50%左右,然后再进行过滤,这样不仅可保证过滤时的回水质量,还可提高尾矿过滤效率。

高效浓缩机是近年来发展起来的新设备,广泛用于尾矿的第一段脱水;它借助于高分子聚合物絮凝剂的作用,并采用下部给矿(絮凝层下方)方式,大大提高了浓缩机效率。真空过滤机是目前常用的尾矿浓缩设备,广泛用于尾矿的第二段脱水。

(二)搅拌系统

普通搅拌很难破坏微细颗粒固体和水产生的聚凝集合体,因此,一般的搅拌设备要使微细颗粒的尾砂和水泥混合均匀是非常困难的。为了实现全尾砂高浓度胶结充填搅拌机理,前苏联诺斯克矿采用ДКПЛ-1型活化搅拌机使微细分散材料能较好地混合均匀,从而开创了固体颗粒活化搅拌先例。

全尾砂高浓度胶结充填料浆通常采用二段搅拌流程以提高搅拌质量。长沙矿山研究院等设计制造了多种活化搅拌机,现场试验都取得了良好的搅拌效果。在金川公司全尾砂膏体泵压充填新工艺试验中,为了与引进的德国PM公司生产的KOS-2170型充填泵的膏体物料制备方式和生产能力相匹配,制造了二段专用的搅拌机:第一段搅拌机为ATD-Ⅱ型双轴叶片式,主要用于打碎大泥块并初步将几种物料混合成膏体。第二段搅拌机为ATD-Ⅰ型双螺旋输送搅拌机,主要用于膏体的贮存、搅拌和输送。

(三)检测系统

高浓度料浆具有良好的性能,并且料浆浓度的变化对充填料浆特性的影响极为敏感,为了确保全尾砂高浓度胶结充填正常,全尾砂高浓度胶结充填系统必须能够对制备的胶结充填料浆浓度、流量及各种物料配比等进行监测和控制,建立一套可靠、完善的充填监控系统。

凡口铅锌矿和金川公司的全尾砂高浓度胶结充填系统的自动检测和控制仪表都是在目前生产系统的自动仪表设计基础上经过局部改造而建成的,实现了仪表自动检测和计算机综合处理,并完全实行了自动控制。当然,由于高浓度料浆所具有的特性如浓度高、流速低、管内压力高等,给选择适用的检测控制仪表也带来一定的困难。

(四)管路系统

全尾砂高浓度胶结充填料浆,由于细粒级含量高、浓度高,在管路内呈稳定的均质流,而且其流速处于层流区域内;对于膏体泵压充填,为节约能源,降低泵压,输送流速应选择0.5~1.0m/s,因此,全尾砂高浓度胶结充填必须依照高浓度料浆的流变特性设计其管路系统。

根据充填管路的布置原则，井下管路大多采用阶梯形布置，其中任一梯段的管网倍线均不能大于总倍线。值得说明的是，对于高浓度自流输送的充填倍线，除计算正常输送时的充填倍线外，还应该考虑清洗管道时的充填倍线，因为当冲洗管道时，高浓度料浆所形成的垂直段自然压头被水柱取代后，由于高浓度料浆密度通常要比水的大 1.8～1.9 倍，造成同样输送条件下，充填倍线要降低很多。如凡口铅锌矿生产充填时正常输送的充填倍线为 8～6.4，而当清洗管道时，充填倍线降低为 4～3.2。

其次，管路系统的管径主要根据充填能力、流速和充填料的组成确定。在同等流量下，压力损失随管径增大而显著减小，工程中应尽量采用大管径。凡口铅锌矿和金川公司选用管径多在 0.1～0.15m 之间。对于掺有粗骨料（－25mm）的膏体充填，一般选取管径 0.15m 并且为了降低阻力，增大水平输送距离，消除垂直管内的空气，垂直部分的管径可适当加大。

再次，全尾砂高浓度胶结充填料浆管内的压力较大，充填管路系统中开始段和垂直向下段的压力都有可能超过 6～10MPa，必须采用快速接头，耐压须达到 12MPa，并且接头内壁必须平滑等径，弯头曲率半径应大于 0.7～1.2m。泵压充填时，还必须考虑泵往复冲程产生的振动，在下向满管泵送段设置排气装置和电动液压阀等，采取减震措施。

二、国内外全尾砂胶结充填技术的应用现状

20 世纪 80 年代，全尾砂胶结充填技术首先在德国、南非取得成功，随后在原苏联、美国和加拿大等国得到应用。80 年代末期，我国开始在广东凡口铅锌矿和金川有色金属公司进行试验研究，并用于工业生产。

由于各矿山的开拓和采矿工艺的要求不同，故所采用的料浆制备、输送工艺、充填方法及设备等方面各有差异。下面仅对几个有代表性的典型矿山进行介绍。

（一）原苏联阿奇赛公司全尾砂胶结充填自流输送工艺

阿奇赛公司使用积存于尾矿库中的全尾砂作充填料。尾砂中 －43μm 粒级占 70%。每 1m^3 充填料浆的成分为：干尾砂 1550～1600kg，400 号水泥 80～140kg，水 400～420kg。充填系统如图 5－3－2 所示。汽车将尾砂卸入受料堑沟，用 2JC－100C 电耙将尾砂耙运到受料漏斗，然后经给料器、胶带运输机和皮带秤给入双轴混合机。25t 筒仓内的水泥利用仓底气泵转移到配料仓，由可调式螺旋给料机和自动皮带秤送入搅拌筒内与水混合制成水泥浆，并自流到双轴混合机。充填料浆在双轴混合机一次搅拌后自流入旋流活化搅拌器进行二次强力搅拌，然后由垂直钻孔和水平管路（ϕ150mm）自流输送到充填采场。充填站控制室内安装有手动和自动两套控制系统，用圆盘记录仪记录尾砂、水泥和水的用量。

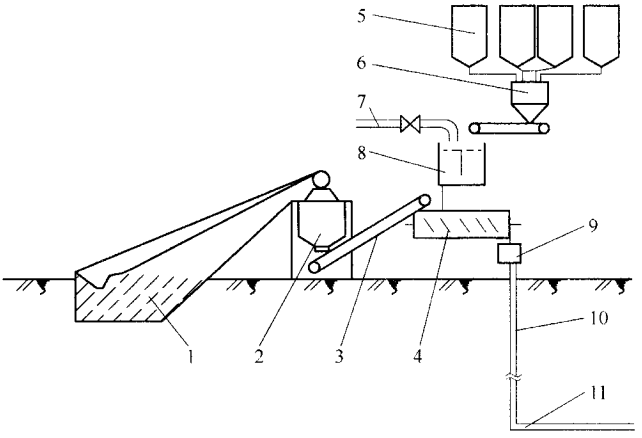


图 5－3－2　阿奇赛公司充填系统图

1—受料堑沟；2—受料漏斗；3—胶带运输机；4—双轴混合器；

5—水泥仓；6—配料器；7—电动夹管阀；8—搅拌筒；

9—旋流搅拌器；10—充填钻孔；11—充填管道

矿山充填倍线一般为 6～7，最大达到 9。充填能力为 120m³/h。充填体 28 天龄期的单轴抗压强度为 1～1.5MPa，沉缩率为 0～1.5%。

（二）凡口铅锌矿高浓度全尾砂胶结充填自流输送工艺

由凡口铅锌矿、长沙矿山研究院和长沙有色冶金设计研究院共同合作，于 1991 年完成了高浓度全尾砂胶结充填新工艺和装备的研究。

凡口铅锌矿充填系统见图 5－3－3。来自选厂的尾矿浆（质量分数 15%～20%），经 ϕ9000mm 高效浓密机一段脱水，沉砂（质量分数约 50%）进入圆盘真空过滤机二段脱水，含水率约 20%的滤饼由皮带机运至卧式砂仓。湿尾砂由 55kW 电耙间断耙运到中间贮料仓，经带破拱架的振动放料机、计量皮带运输机给入双轴桨叶式搅拌机。水泥经水泥筒仓、双轴螺旋喂料机、冲量流量计进入搅拌机，与尾砂和水混合搅拌。充填料浆再自流入高效强力搅拌机进行二次强力活化搅拌后，经垂直钻孔和充填管路（ϕ125mm）自流到井下充填采场。

由检测仪表、中央控制台和微机组成的自动检测与综合处理系统检测尾砂的含水率、水泥添加量、加水量及充填料浆的质量分数和灰砂比。

该矿全尾砂中 －74μm 粒级的含量占 62%～84%。充填料浆质量分数为 70%～76%，水泥耗量 214kg/m³，充填能力为 48～54m³/h。充填体 28 天龄期单轴抗压强度为 3MPa 左右。

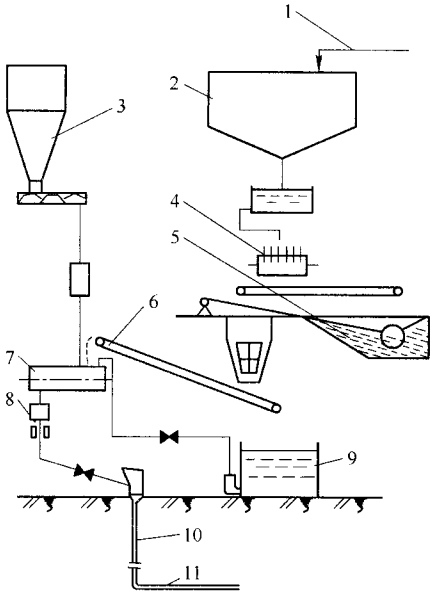


图 5－3－3　凡口铅锌矿充填系统

1—选厂尾砂管道；2—高效浓密机；3—水泥仓；
4—真空过滤机；5—卧式砂仓；6—计量皮带运输机；
7—双轴搅拌机；8—高效搅拌机；9—水池；
10—充填钻孔；11—充填管路

(三)德国格隆德(Bad Ground)铅锌矿全尾砂泵送胶结充填工艺

格隆德铅锌矿的充填材料选用重选尾砂(粒度 0.8～30mm)和浮选全尾砂(粒度－0.5mm,其中－60μm 占 50%),分别脱水后按比例(50∶50)再加入少量的水搅拌成高浓度砂浆,用给料机喂入 160kW 的双活塞泵加压,通过管路(φ152mm)经竖井送入井下。东采区水平距离短,不需要再加压,西采区输送距离长,需要用中继给料机和 160kW 双活塞泵再加压一次。水泥贮存在地表一个 100m³ 的水泥仓中,充填时,借助压风管中的压缩空气将干水泥输送到距充填管出口约 30m 处,通过一个水泥喷射装置,将干水泥喷入充填管路中与全尾砂充填料浆混合,进入到充填采场。充填系统示意图参见图 5－3－4。

该充填工艺充填料浆的质量分数高达 85%左右,在水泥添加量为 60～100kg/m³ 时,便可达到该矿下向胶结充填所要求的充填体 28 天龄期单轴抗压强度大于 2MPa 的数值。

20 世纪 80 年代末期,德国 P.M 公司在某金矿采用了全部不分级尾砂作充填料,经浓缩、过滤成固体含量达 76%～78%滤饼进入螺旋搅拌输送机,与水泥、粉煤灰混合后,经双活塞泵加压,通过管路向坑内输送,进行采场充填。该系统的使用取得了良好的经济效益和社会效益。

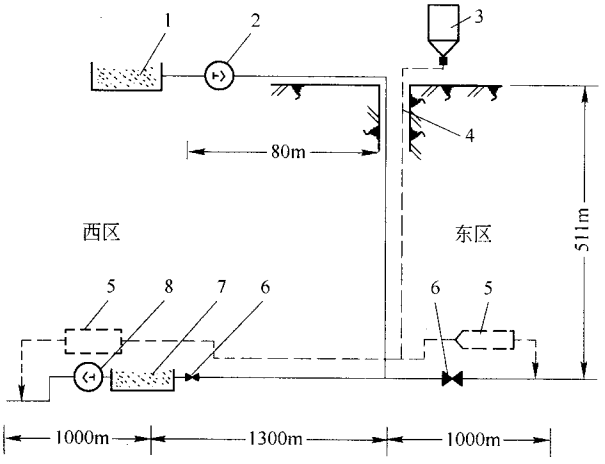


图 5－3－4　格隆德铅锌矿充填系统示意图

1—给料机；2—双活塞泵；3—水泥仓；4—竖井；

5—小水泥仓；6—遥控闸门；7—中继给料机；8—双活塞泵

(四)奥地利布莱堡(Bleiberg)铅锌矿全尾砂、碎石泵送胶结充填工艺

布莱堡铅锌矿借鉴格隆德矿的经验，建成了具有自己特色的全尾砂加碎石的泵送充填系统，参见图 5－3－5。

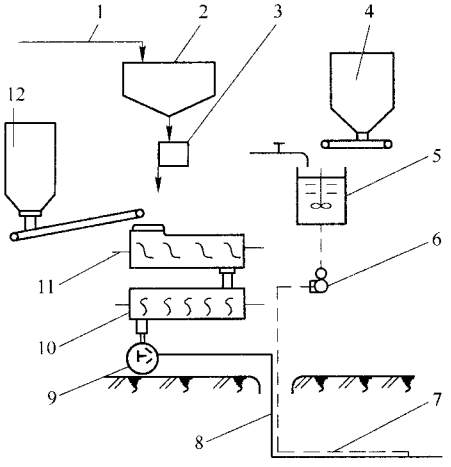


图 5－3－5　布莱堡铅锌矿充填系统图

1—选厂尾砂管；2—浓缩机；3—压滤机；4—水泥仓；5—搅拌筒；

6—水泥浆泵；7—水泥浆管道；8—充填料管道；

9—双活塞泵；10—供料槽；11—搅拌槽；12—碎石仓

浮选尾砂经浓缩、压滤两段脱水后，形成含水 18.2% 的滤饼，直接进入 BHS700 ×

2600 双轮螺旋叶片式搅拌机。同时 -30mm 的碎石经皮带运输机进入搅拌机(浮选尾砂与碎石的比例为 6:4),并添加少量减阻细灰以降低输送阻力。搅拌后的料浆进入 5m³ 供料槽,经再次搅拌后送入 KOS-2160 双活塞泵,加压后经充填管路(ϕ140mm)输送到井下。充填料浆中水泥的添加是采用地表制浆,用独立的水泥浆系统送到井下,在充填料进入采场前,将水泥浆压入充填管路中与充填料混合,进行采场充填。

主要技术参数为:充填料体重 1.5~1.8t/m³,混合料水灰比 4,水泥耗量 60~80kg/m³,流量 4~7m³/min,100m 管路压力损失 0.4MPa,充填体强度 1.5~2MPa。

(五)金川公司全尾砂泵送充填系统

金川有色金属公司与北京有色冶金设计研究总院合作,于 1987~1991 年在金川二矿区进行了全尾砂下向胶结充填技术及设备的研究。

试验研究使用的选厂全尾砂经 ϕ18m 浓缩机和 20m³ 的鼓式折带过滤机过滤后,用汽车运至搅拌站并转载到砂仓内。全尾砂经砂仓下部盘式给料、计量皮带运输机进入第一段双轴叶片式搅拌机。-25mm 碎石经仓下电振给料机、核子秤、皮带机转载至运送全尾砂的主皮带机上,与全尾砂同时进入搅拌机,水泥按配比制浆后流入搅拌机。全尾砂、碎石和水泥经第一段搅拌混合后,自流到第二段双轴螺旋搅拌输送机,经喂料口给入 PM 双缸液压活塞泵($Q=70m^3/h$、$p=60MPa$)加压,通过 ϕ139mm 钻孔和井下 ϕ123mm 管路将充填料浆送至采场。

工业试验共充填了 1615m³。其中,全尾砂胶结充填 1100m³,全尾砂加碎石胶结充填 515m³。在满足该矿下向充填采矿法要求 $R_{28}\geqslant 4MPa$ 的条件下,采用全尾砂充填时,选用灰砂比为 1:4,水泥耗量 280~310kg/m³,料浆的质量分数为 74%~76%,100m 管道阻力损失 1.0~1.2MPa;采用全尾砂加碎石胶结充填时(配比为 50:50),水泥耗量 180~200kg/m³,质量分数为 81%~84%,100m 管道阻力损失为 0.8~1MPa。试验中还对全尾砂胶结充填材料的物理力学性质、料浆流变特性、脱水、搅拌设备、泵送工艺等方面进行了研究。

三、全尾砂胶结充填技术改进及发展方向

全尾砂充填提高了尾砂的利用率及充填材料的选择范围,另一方面高浓度充填降低了充填料浆的水灰比,从而大大改善了充填特性:充填强度提高,充填料沉缩率降低。这些对于充分发挥充填体承载作用,满足待定生产技术条件下的采矿要求以及提高矿石的回收率等都具有非常重要的作用,促进了全尾砂高浓度胶结充填技术的迅猛发展。目前,除凡口铅锌矿和金川公司获得了全尾砂高浓度(膏体)胶结充填的成功应用外,焦家金矿、武山铜矿、铜泉山铜铁矿等正积极与有关单位合作,拟进行全尾砂高浓度(育体)胶

结充填试验研究。

当然,由于全尾砂高浓度胶结充填系统中,尾矿浓缩脱水及充填料浆的搅拌工艺都采用了先进的专用设备,其关键设备仍依赖进口,加之自动检测控制仪表等,一次性投资费用较大,大大限制了全尾砂高浓度充填技术的发展和在中小型矿山或地方矿山的推广应用。为了全面发展全尾砂高浓度胶结充填,必须大力研制和改进全尾砂高浓度胶结充填系统中专用设备,实行专用设备国产化。

全尾砂高浓度(膏体)浆体管道输送有其固有的特点,必须进一步研究减阻措施,降低矿山能源消耗。根据浆体的滑移特性,目前广泛开展了在充填料浆中加入一定量减阻剂或在长距离管线中每隔一定距离设置减阻环定量加入清水或减阻剂的研究,促进输送管道环形管壁处低粘度层的形成,上述方向的研究必将有利于充填料特别是粗颗粒骨料的顺利输送,减少管道磨损,无疑对全尾砂高浓度(膏体)胶结充填获得实际应用具有重要的指导意义。

全尾砂胶结充填技术的研究和应用,经过十几年不断地探索,在充填料浆的制备、充填系统、输送工艺及设备和理论研究诸方面都取得了较大的发展。根据该项技术在国内外的应用状况及存在的问题,就其改进和发展方向进行初浅的探讨。

(一)充填材料的选择

提高充填采矿法经济效益的一个重要途径就是降低充填成本。而降低充填成本的关键在于降低充填料浆中水泥的消耗和选用廉价的充填材料。使用全尾砂和水泥作充填材料已经获得了明显的经济效益和社会效益,为进一步降低充填成本,可从以下几方面予以改进。

(1)添加粉煤灰。在全尾砂充填料浆中添加适量的粉煤炭可取代部分水泥。添加粉煤灰后,在保持原有坍落度的情况下,可提高料浆浓度;在不改变浓度的情况下,可改善料浆的和易性、减少泌不性,防止离析;降低干缩率 5% 左右,提高弹性模量约 5% ~ 10%。粉煤灰的添加可提高充填体的强度,如按 1∶0.5(水泥∶粉煤灰)添加,在相同强度下,可降低水泥用量的 20% 左右。粉煤灰可改善充填料浆的流变特性,更适合泵送充填工艺。粉煤灰适宜的添加量一般为水泥用量的 20% ~ 50%。

(2)添加粗粒级骨料。用全尾砂制备充填料浆时,由于含有大量的细粒级尾砂,则需要更多的水泥浆吸附在颗粒表面,为了满足强度的要求,必然会增加水泥的耗量,使充填成本提高。建议有条件的矿山,在全尾砂中添加河砂、海砂、棒磨砂等粗粒级骨料配制料浆。当采用泵压输送时,在保证细粒级含量(一般 $-20\mu m > 20\%$)的条件下,添加一定比例 -30mm 的粗粒级碎石。由于料浆粒度分布均匀,骨料加粗,孔隙率减小,可明显提高料浆密度,从而提高充填体的强度,降低水泥的消耗量。

充填材料选择范围的扩大，也解决了部分矿山充填材料不足和井下废石处理等问题。

(3)其他添加材料。近几年，研制出一些添加于充填料浆中的特种水泥、吸水剂、高水速凝固化剂等新型材料，为进行不脱水全尾砂充填在技术上提供了可能性。在料浆中添加流动剂、减阻剂等会有效地改善全尾砂的泵送性能，从而提高充填料浆的输送浓度。

(二)输送工艺

全尾砂胶结充填料浆的输送有自流和泵送两种。高浓度料浆的自流输送在理论上已不同于传统的水砂充填，流体中固体颗粒受惯性力约束影响已很小，而进入似均质非牛顿流范畴，近似于宾汉姆体，可在较低流速下的层流状态运行，甚至短时间在管道内停留也不沉淀。当料浆浓度进一步提高到牙膏状时，其塑性黏度与屈服应力均很大，因此，必须采取泵压输送。

由于自流输送工艺简单，基建投资不大，充填成本适宜，且许多矿山已建有分级尾砂自流充填系统，因此，建议在充填倍线小，选用全尾砂或添加粗骨料粒径在 -5mm 时，优先采用自流输送工艺。

为了提高充填料浆自流输送时的浓度，应增设高速强力活化搅拌环节。充填料浆的活化搅拌是以物理化学和胶体化学的理论为基础，料浆经过高速强力搅拌，颗粒之间的内聚力急剧减小，固相与液相间相互作用形成的聚凝体破坏，而形成胶体，从而可制备出流动性好，浓度高的均质充填料浆。同时，搅拌强化了水泥的水化作用，提高了充填体的强度。

哈萨克斯坦工业大学等单位在试验中处理未脱泥的细粒级尾砂(-43μm 占 70%～100%)，使之形成浓度为 80%～83%具有触变性的标准分散系浆体，自流输送到井下充填采场。凡口铅锌矿在料浆浓度为 72%～76%，充填倍线为 3 时，仍获得了良好的自流输送性能。

在充填倍线较大，充填料浆中含有粗粒级骨料或要求浓度较高时，则应采用泵压输送工艺。

(三)水泥的添加方式

往充填料中添加水泥是为了满足对充填体强度的要求。添加方式的不同会影响到水泥的用量、强度的变化及工艺的繁简。

(1)根据水泥添加的地点和添加水泥的特点，大致有以下几种方式：1)地表添加干水泥；2)地表添加水泥浆；3)坑内添加干水泥；4)坑内添加水泥浆(地表制浆)；5)坑内添加水泥浆(坑内制浆)。各种方式各有优缺点，在地表添加水泥可省去水泥输送系统和添加装置，但充填结束后需认真清洗管路，而且冲洗水容易流入充填采场；添加干水泥可提高

料浆浓度，从而提高充填体的强度，但水泥难以和其他材料充分搅拌和混合 ;坑内添加水泥浆又降低了充填料浆的浓度。

(2)当采用自流输送工艺时，推荐采用地表添加水泥浆的方式。这种方式制浆简单、不需要水泥输送系统，水泥和其他材料混合充分，但在清洗管路时，应防止冲洗水进入充填采场。

当采用泵压输送工艺时，推荐采用坑内添加干水泥的方式。在充填管道出口前 30 ~ 50m 处往管道中添加干水泥，可使进入采场的料浆浓度提高 1% ~ 2%，又不至于增加管道输送阻力而提高充填体的强度。每次充填后仅需清洗加水泥后的一段短管，而将充填料存留在长距离的输送管路中，下次充填时可继续泵送，而不至于“凝固”。水泥喷射装置是使水泥和其他充填料均匀混合的关键设备，目前国内有关资料很少，尚需开展引进、研究和试验工作。

全尾砂胶结充填作为一项新技术，在理论和试验研究方面仍需进一步地探索，朝着改善充填体的质量、降低采矿成本、减少环境污染和生态破坏等方向努力，进一步扩大全尾砂胶结充填技术的应用范围，以便提高企业的经济效益和社会效益。

第三节　高水固结尾砂充填技术

一、高水固结充填采矿研究现状

高水固结充填采矿新工艺是金属矿山胶结充填采矿工艺的一项重大技术革新。其实质是在金属矿山尾砂胶结充填工艺中，不使用水泥而使用“高水速凝固化材料”(以下简称高水材料)作胶凝材料，使用矿山选厂全尾砂作充填骨料，按一定配比加水混合后，形成高水固结充填料浆。根据工艺设备条件和现场技术要求，充填料浆浓度可在 30% ~ 70%之间变化。高水固结充填料浆充入采场后不用脱水便可以凝结为固态充填体。

从 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始，国内外矿业界人士在全尾砂作充填骨料方面的研究，主要集中在提高充填料浆的浓度上，因而在全尾砂高浓度胶结充填工艺和全尾砂膏体泵压胶结充填工艺上，取得了令世人瞩目，颇有价值的技术成果。但是，上述工艺技术在充填料浆的制备和输送方面还尚未取得令人满意的结果，又加之其技术设备昂贵、工艺流程复杂，运营维修不便，故大量推广应用尚存在一定的困难。高水固结充填新工艺，在改革金属矿山胶结充填工艺及使用胶凝材料方面另辟新径。由于高水材料的应

用，该工艺可以达到输送中低浓度料浆充填而井下不用脱水之目的。

（一）高水材料

高水材料是由高铝水泥为主料，配以膨润土等多种无机原料和外加剂，像制造水泥那样经磨细、均化等工艺，而制成的甲、乙两种固体粉料，使用时，加水制成甲、乙两种浆液。英国曾采用具有该种性能的材料与水混合用于煤矿支护，目前推广应用的‘特九派克’高水材料，由‘特克本’和‘特克西姆’两种料组成，其充填施工工艺是先将两种按水固比为 2.5∶1 的比例分别加水制成 A、B 浆液，然后通过两条管路分别将 A、B 浆液按 1∶1 的比例输送到充填地点混合。但英国所用材料相对来说价格昂贵，配料中某些材料在我国也难找到，且未开在金属矿山应用之先例。我国学者所研制的高水材料的原材料在中国有着丰富的储量，分布范围广，所研制的高水材料具有一系列优良特性。

高水材料在中国已实现了工厂化生产。自 1990 年开始，已在中国煤炭系统沿空留巷开采中进行了巷旁支护实际工程应用。实践证明，这种材料用于巷旁支护，简化了支护施工工艺，减轻了工人劳动强度，降低了成本，同时加快了施工速度，提高了施工的安全性。而当高水材料用于金属矿山采场充填时，则在料浆制备，充填能力，充填方式，充填体体积及强度等方面均与煤炭中使用时有所不同。

（二）高水固结充填

金属矿山采场胶结充填中要用尾砂等作充填骨料，料浆浓度较煤矿使用的高。1989 年 9 月，山东省招远金矿对使用高水材料添加全尾砂浆，配制成不脱水的高水固结充填材料进行了评议。随后，在煤炭开采中作为沿空留巷采煤法的巷旁支护材料进行了工业试验并取得了满意的结果。1991 年 6 月至 1992 年 6 月，在招远金矿进行了高水固结充填采矿的工业应用试验研究。通过实验塞研究，评议和现场试验，可以得出如下结论。

1. 高水固结充填材料特性

高水固结充填材料有以下特性：

（1）充填料浆的自然沉降性。将甲、乙料分别与全尾砂混合后配制成两种充填料浆，静置同样的时间，沉降层浓度比未加高水材料的全尾砂浆沉降层浓度小得多 沉降层浓度随时间增加得变化不大。这说明加入高水材料后，能减缓尾砂沉降，改善充填料浆的悬浮性和流动性。

（2）充填料浆的凝结时间，要根据采矿生产（满足凝固快、早期强度高、生产能力大）和充填工艺（如果料浆凝结速度过快，就易造成堵管，充填体强度不均，平场效果不好等；过慢则会影响采矿生产）两方面的要求，综合考虑和选则充填料浆的凝结时间。在招远金矿试验时，将初凝时间调整在 30 ~ 60min 范围内。

（3）充填浆的可泵性，充填料浆的视黏度和动切应力比没有添加高水材料的充填料

浆的视黏度和切应力要小。从生产实际的角度看，黏度小、动切应为小的浆液更容易输送。因此，添加高水材料有助充填料浆的可泵送工艺。

(4)高水固结充填体的强度特性。强度的大小是充填材料的一个重要技术参数。影响充填体强度的主要因素是灰浆比(或高水材料添加比例)，其次是尾砂浆浓度，最后是甲、乙料配比。高水材料的含量越高，充填体的强度越高；在灰浆比一定的条件下，尾砂浆浓度越大，配制出的充填料浆浓度越高，充填体的强度越大；配比中，甲料含量越大，充填体强度越大。

(5)水的酸碱度、尾砂成分对高水充填材料强度的影响。酸性越强，影响程度越大；尾砂成分对高水充填材料也有影响，如尾砂中硫含量大于 10%时，就会对充填体的后期强度影响较大。

(6)环境温度对充填体强度的影响。高水材料与水的反应是一种放热反应，要求在一定的温度范围内完成。随着环境温度的降低，初凝时间相应延长，早期强度也随之降低。反之初凝时间相应缩短，凝结速度变快，早期强度也随之提高。在正常作业条件下，无论环境温度是降低还是升高，都不会影响充填体的后期强度。

(7)高水固结充填体的强度及其他性能。在湿养护条件下要比干养护条件好。

(8)高水材料的成本。影响充填材料直接成本的主要因素是水灰比，其次是甲、乙料的配比，最后是尾砂浆的浓度。

2. 高水固结充填采矿工艺

高水固结充填材料对充填工艺有如下要求：由于高水甲料、乙料加水混合后具有速凝性，这就要求用两套独立的系统分别完成甲、乙两种充填浆液的制备及输送。甲、乙两种充填浆液经独立输送系统输送到充填采场附近，经专用混合器混合后注入采空区。进入采空区的充填浆液不需脱水，而能自流到采空区各个充填部位，形成一个整体的作业面，并能迅速凝固。

招远金矿全尾砂全水固化胶结充填采矿新工艺工业性试验，选用了较简单的制浆输送设备，以求投资少、见效快。充填料制备站布置在坑内，将原有老巷道改造为充填搅拌站硐室。充填系统如图 5-3-6 所示。该充填制备系统是：从选厂到尾矿库的输砂管引出一个内径 30mm 的尾砂分流管，将浓度为 30%左右的全尾砂浆输送到井下充填料制备站储砂池中。放砂时，测得分流管入端压力为 1.8~2.0MPa，分流砂浆流量为 5.1~5.6m^3/h。浓度为 30%左右的尾砂浆采用静止沉淀上层排水方式调整浓度。沿砂池 10m 长的范围内布置 3 台功率为 7.5kW 的搅拌机，每台搅动范围约 2.5~3.0m。沿砂池两侧各安装 4 组压风喷管，每组喷管安装 3 支喷嘴。通过搅拌机搅拌和压风喷嘴的吹气搅动，保证池内砂浆处于均匀悬浮状态。再用 2PNL 渣浆泵向制浆系

统供砂浆。选用了 6 个 ϕ1400mm × 1400mm 单层叶轮式搅拌筒，电动机功率 3kW，转速 320r/min，6 个搅拌筒分 3 组，每两个为一组，分别制备甲、乙两种充填料浆，3 组分别依次进行注砂 - 加高水材料 - 搅拌 - 放浆四道工序，循环往复，以实现连续制浆。搅拌好的甲、乙充填料浆，分别通过 2PN 渣浆泵输送到井下，再通过混合器将两种料浆混合后充入采场。

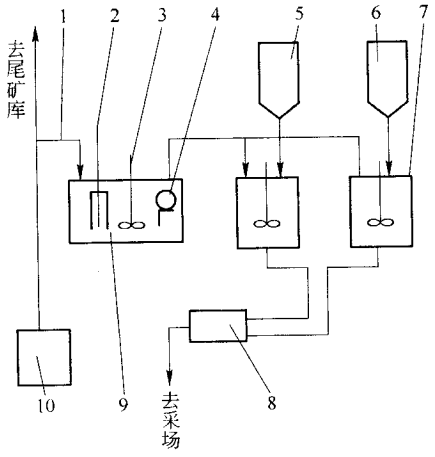


图 5 - 3 - 6　招远金矿高水固结充填系统

1—分流管；2—压风；3—搅拌器；4—渣浆泵；5—甲料；
6—乙料；7—搅拌筒；8—混合器；9—储砂仓；10—尾砂泵站

20 世纪 80 年代以来，高水固结充填采矿已在山东省焦家金矿、招远金矿灵山分矿，安徽新桥硫铁矿，广西大厂矿务局，甘肃小铁山铅锌矿、金川龙首矿、湖北铜录山铜矿、鸡冠山金矿、辽宁红旗岭镍矿等矿山进行了工业化应用或工业试验，并取得了可贵的经验。利用矿山全尾砂砂浆，加上高水材料料浆制成充填料浆，实现全尾砂充填料浆低浓度、大能力输送，充填料井下不脱水，充填体快速凝固，充填接顶效果好，改善了井下的工作环境。对于尾砂产率高的矿山，使用部分全尾砂，既可省去尾砂分级工艺，又可以延长尾砂库的服务年限，缓解了细粒尾砂筑坝难的问题；在尾砂产率低的矿山，又可以以水代砂，从而节省了补充磨破的费用。高水固结充填在用于上向分层充填采矿法铺面和接顶，下向分层充填法构筑人工假顶以及全尾砂胶结充填等方面已经有了丰富的实践经验。为了适应资源环境，作业条件对工艺的要求，为了矿业可持续发展，这一技术必将在地下充填采矿领域推广应用。

二、高水固结充填采矿工艺

高水固结充填采矿工艺是使用高水材料做固化剂，掺加尾砂和水，混合成浆充入采

场后不用脱水便可以凝结为固态充填体的一种新的充填采矿工艺。该工艺的主要特点是：(1)可将高比例水凝结为固态结晶体，从而使高水固结尾砂充填料浆在一般浓度条件下不脱水而变成固体。利用新的固结材料的特性，可使全尾砂、分级尾砂，其他充填集料(如江砂，海砂等)产生固结。(2)高水固结充填料浆在 30% ~ 70% 的浓度范围内输送，甲、乙高水固结充填料浆在采空区混合后快速凝结。充填体早期强度高，采场不用脱水，从而可大幅度地缩短回采作业周期，提高采矿生产率，改善井下作业环境。(3)高水材料具有良好的悬浮性能，加入高水材料后，所形成的充填料浆中的尾砂沉降减缓，使充填料浆的悬浮性和流动性得到了改善，因而充填料浆便可以利用国产普通泥浆泵实现长距离输送，并有利于克服管道水力输送中易堵管、磨损快、投资大、能耗高等技术难题。(4)高水固结充填料浆具有良好的流变特性，其充填体具有再生强度特性，因而充填料浆流动性好，利于采场充填接顶，利于采场地压管理，利于矿产资源的充分回收。(5)高水固结充填采矿工艺在充分地利用原有的采准布置、回采方式、回采工艺及采掘设备的基础上，配以高水固结充填材料，高水固结充填工艺及简单易行的充填料浆制备系统，因而可以广泛地用于各种采矿方法及采空区处理。

(一)上向过路高水固结尾砂充填采矿法

1. 方法特点

(1)采用下盘脉外采区斜坡道，阶段运输水平穿脉沿脉的采准布置方式。

(2)采用上向过路式回采。回采进路垂直矿体走向布置(矿厚大于 10m)，回采进路成水平布置。

(3)采用浅孔钻机凿岩，实行控制爆破，顶板采用锚杆紧跟工作面支护。

(4)用高水固结尾砂充填。先用配比 5% ~ 6% 充填料浆充填进路高度的(2/3 ~ 4/5)，充填体强度为 0.5 ~ 1.0MPa；进路其余部分再用配比为 9% ~ 10% 的高水固结充填料浆充填，其充填体强度达到 1 ~ 2MPa。

(5)阶段高 40m，分段高 9m，每个分段控制 3 个分层，分层高 3m，进路宽 3m。

(6)上向进路式回采适用于矿体厚度大于 5 ~ 6m，矿石中等稳固到不稳固的倾斜、急倾斜矿体。

2. 采准

阶段在垂直高度上划分为 3 个分段，各分段巷道之间用分段联络道与分段巷道联系起来，各回采分层通过分层联络与分段巷道联系起来，每个分层布置的回采进路与下盘沿脉分层道巷道联通。在下盘脉外分段联络道的一侧掘进溜矿井，随着分层的上采，在矿体内用钢板卷成 ϕ2m 的圆筒，顺路向上接高。在分段联络道的另一侧布置人行充填井，井内安装有梯子和充填管道，并兼做人行安全出口和回风之用。采准布置见图 5 - 3 - 7。

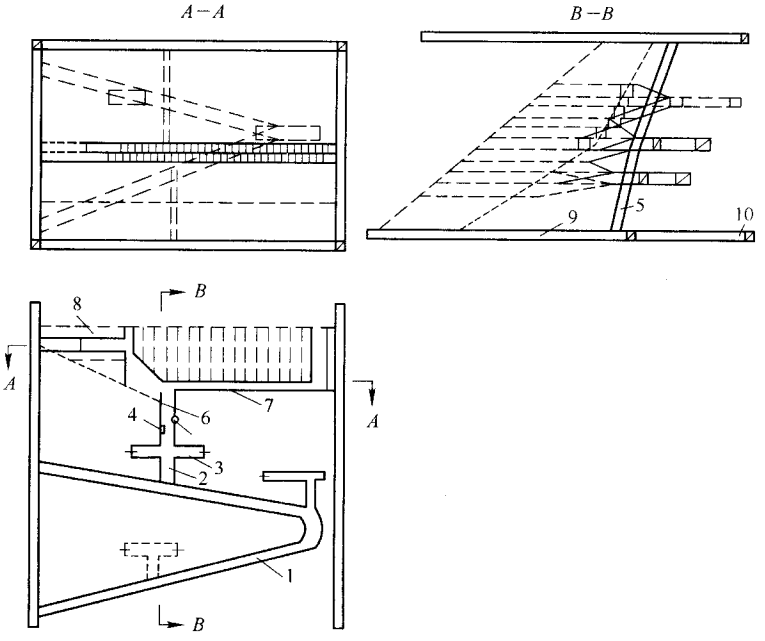


图 5－3－7　上向进路高水固结充填采矿法

1—斜坡道；2—分段联络道；3—分段巷道；4—通风充填井；5—矿石溜井；6—分层巷道；7—下盘沿脉巷；8—回采进路；9—穿脉巷道；10—阶段运输巷道

3. 回采顺序及方式

各分层间采用自下而上的回采顺序，在同一分层采场之间采用前进式回采；各采场的回采进路从采场的一侧向另一侧回采。整个分层回采进路充填完毕后，便可采用后退式（从里向分段（层）联络道方向）分段充填沿脉分层巷道。

4. 回采工作

凿岩用 7655 钻机，钻杆长 2.0m，柱齿形或一字形针头，针头直径 38mm，进路工作面一般布置 15 个炮孔。爆破用 2 号岩石炸药，柱状药包，直径 32mm，药包长 200mm，人工装药。采用非电导爆管，毫秒电雷管起爆，毫秒间隔 50ms。大块在工作面采用覆岩爆破二次破碎或浅眼爆破二次破碎。铲运机装运矿石，溜矿井放矿，穿脉运输巷装车。进路顶板采用管缝式锚杆支护，网度 1 根/m^2。局部破碎冒落地段采用加密锚杆，木垛支护等措施。

（二）下向进路高水固结充填采矿法

1. 方法特点

（1）采用高水固结尾砂充填。高水固结充填料浆的质量分数为 65% ~ 74%，其中高水材料的质量分数为 6% ~ 13%，尾砂为 56% ~ 61%，水 31% ~ 33%。充填体 1 天的强度为 1.0 ~ 2.5MPa，7 天的终强度达到 2.5 ~ 4.5MPa。

(2)用下向进路式回采。进路沿矿体走向水平布置(原采用倾角 6°～8°的倾斜进路)。

(3)高水固结尾砂充填体的结构见表 5－3－2。

表 5－3－2　高水固结尾砂充填体的结构

顶板条件	人工假顶层				充　填　层			
	首采层后/m	各分层厚/m	高水材料掺量/%	设计强度/MPa	首采层后/m	各分层厚/m	高水材料掺量/%	设计强度/MPa
较稳定	1.0	0.8	10～13	4.0	2.0	2.2	6～8	1～2
破　碎	1.2	1.0	10～13	4.0	1.8	2.0	6～8	1～2

(4)采用浅孔凿岩,实行控制爆破,复式起爆,顶板采用管缝式锚杆或木棚(垛)与锚杆联合支护。

(5)采用脉外人行溜矿井或脉外斜坡道。溜矿井采准,阶段运输水平穿脉沿脉的采准布置方式。

(6)阶段高度 40m,采场长 50m(采用电耙运搬)或 90m(采用铲运机运搬),分层高 3～4m,矿体厚大于 5～6m,矿体倾角大于 40°。

2. 采准

采用铲运机采场运搬时,阶段垂高上划分分段,分段高为 12～13m,脉外布置采区斜坡道,人员、设备、新鲜风流经斜坡道、分段联络道、分段平巷、分层联络道进入矿房。在采场两翼布置溜。矿井和充填井。充填井兼做人行安全出口和回风之用,见图 5－3－8。

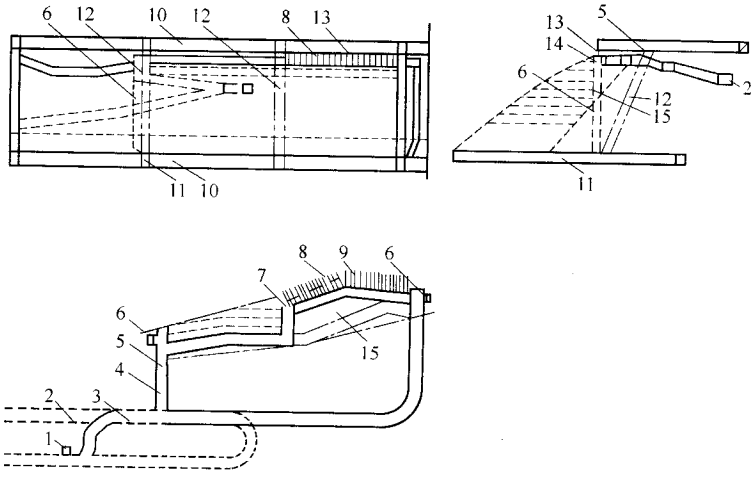


图 5－3－8　焦家金矿下向进路高水固结充填采矿法

1—废石溜井;2—斜坡道;3—分段联络道;4—分层联络道;5—充填井;6—矿石溜井;7—板墙;8—钢筋网;9—边帮锚杆;10—阶段巷道;11—运输巷道;12—探矿井;13—顶部锚杆;14—悬吊锚杆;15—夹石

当采场运搬用电耗时。阶段在垂直上划分分层，利用脉外探矿井作人行溜矿井用，开采分层以上敷设梯子、水、电、风、充填等管线，作为人行通风之用；开采分层以下部分作溜矿井用。从人行溜矿井向矿体方向开掘分层联络道，用它与沿矿体走向布置的进路相联通。

3. 回采顺序及方式

自上而下地顺序回采各分层。同一分层从分层联络道开始向采场两翼回采，各回采进路采用向人行溜矿井退采的顺序进行，或采用间隔回采的顺序。当顶板破碎时，先在进路设计断面的一侧先掘 2m × 2m 的小断面，然后挑顶刷帮至设计断面规格；当顶板较稳定时，则全断面开挖。

4. 回采工作

工序与上向进路高水固结充填法基本相同，不再赘述。

(三)高水固结尾砂充镇工艺

1. 充填前的准备工作

采场充填前的准备工作包括：(1)提交待充进路的实测平面图和纵剖面图、待充进路实测体积等资料；(2)研究制订充填方案，确定配比、充填量、排气管和充填管悬挂位置等工作参数；(3)检查充填管路，放空溜矿井矿石，平整底板，铺平碎矿石垫层，铺人工假顶钢筋网、铁丝网、挂吊筋、架设充填管和排气管、构筑充填板墙等。在上向分层回采时，充填准备工作中所不同的是不留碎矿石垫层，不构筑人工假顶，不挂吊筋等。

2. 人工假顶的铺设

与上向进路高水固结尾砂充填法不同的是，下向进路充填法需构筑人工假顶。在进路底板上耙平厚为 0.2 ~ 0.3m 的碎矿石垫层。碎矿石垫层上敷设筋网，主筋采用 Q235A，ϕ14mm 的钢筋，网度为 1.5m × 2.0m，副筋采用 Q235A，ϕ6.5mm 钢筋，网度为 0.5m × 0.5m，钢筋相交处用铁丝绑牢。在钢筋网上再铺设网孔为 80mm × 80mm 的铁丝网，钢筋网与铁丝网，铁丝网与铁丝网之间均用铁丝扎牢，并用 ϕ14mm 钢筋或 ϕ6.5mm 双股钢筋将其与顶板和两帮锚杆相连接，随后便可充填含高水材料 10% ~ 13% 的充填料浆，直至充填达到设计要求的人工假顶层厚。

3. 采场充填管路布置

甲、乙料浆充填管道一般在采场分层联络道口处进行混合，混合器由三通和三通阀组成，其作用有二：一将甲、乙料浆混合；二控制充填前管路系统试水和充填后冲洗管路的废水排入分层联络道水沟内。三通的出水口要稍向上抬起，以防堵管。充填管进入待充进路和排气管在进路空区内均要吊挂在顶板最高处，一般情况下要使排气管略高于充填管，且两管之间要离开一定的距离，以防充填料浆流入排气管后造成堵管，使进路空区

内的空气无法排出,引起待充进路内气压增高,增加对板墙的压力,影响正常的充填工作。在待充进路顶板超高时,在板墙以外难以观察到充填情况,则需设置报警器。

4. 充填板墙构筑

板墙架设在待亢进路入口处的适当位置。板墙中间要留出可供一人通过的观察口,并预留出排气管、充填管通过板墙的位置。援墙靠四周岩壁处,要用麻袋片填塞,然后用水泥砂浆密封严实。同时,还要在板墙靠进路空区的一面,将塑料薄膜钉挂上,以防漏水或跑浆。

5. 采场充填

开始充填前要先试水,证明管路畅通方可放砂充填;充填完毕后,要及时放水冲洗管路。充填试水及冲洗废水要通过三通将其排至待充进路外,以保证充填质量。

当进路长度大于 20～25m 时,必须实行分段充填,以确保充填体的质量。由于上向进路充填体起支撑围岩及工作地板的作用,并且相邻进路回采时,还要求充填体具有一定的自立性和抗爆破冲击,这就要求充填体必须具有一定的强度,按照《采矿设计手册》的要求,上向分层充填采矿法中,充填体要满足自行设备正常运行,表面强度达到 1.0～2.0MPa,其他部分达到 0.5～1.0MPa。根据上述强度要求,在实验室进行了大量试验。试验中所用的尾矿砂浆的质量分数为 30%～70%,高水材料的掺量范围是 6%～19%,按不同养护期对试块进行了单轴抗压强度试验,结果表明,高水材料配比的合理范围是 5%～10%,在此范围内可完全满足上向进路高水固结充填采矿法的要求。因此,某矿在尾矿砂浆的质量分数为 65%时,进路下部 2.0～2.4m 厚的充填体,高水材料配比为 5%～6%,上部 0.6～1.0m 厚的表层,高水材料配比为 9%～10%。

在用下向进路回采时,充填层部分起人工矿柱的作用,同时要求当相邻进路回采时,充填体不致垮落,故其所需强度相对要求不高,充填时为保证料浆不致泌水,又使充填体能充分接顶,设计高水材料配比为 6%～8%;而人工假顶层起'梁'的作用,应具有较高的承载能力和抗爆破冲击力,设计高水材料配比为 10%～13%。

三、高水固结充填系统应用实例

高水固结充填系统已有不少金属矿山进行应用。由于各个矿山条件不同,系统各异。这里介绍两个比较典型的系统,用以说明高水固结充填料制备及充填的工艺流程。

(一)焦家金矿高水固结充填系统

焦家金矿高水固结充填系统是在原有尾砂水泥胶结充填系统的基础上改扩建而成。原尾砂胶结充填材料制备站,采用地面集中搅拌方式。它由立式砂仓($900m^3$1 座、$455m^3$2 座)、水泥仓(容量 150t1 座)、搅拌桶($\phi 1.5 \times 1.5$m2 台)、砂泵及管路、辅助设施

等五部分组成。充填能力为 40 ~ 70m³/h。由于高水充填材料为甲、乙两种粉料，需要分别与尾砂浆混合搅拌。搅拌好的甲、乙两种高水固结充填料浆输送至靠近充填工作面进行混合后，再充填入采后空区。因此，新增了一套高水材料仓和给料、搅拌、泵送、管路和除尘系统。新增的这套系统与原有的 900m³ 半球形底立式砂仓系统的组合构成为高水固结尾砂充填搅拌站制备系统。充填能力可达 60 ~ 100m³/h。图 5 - 3 - 9 所示为水泥胶结充填与高水固结充填两用的充填料制备站示意图。为了实现水泥胶结充填与高水固结充填兼用，新建的高水材料仓断面为方形，外形尺寸是 4m × 4m × 7m(长 × 宽 × 高)，其有效容积可装料 150t，钢筋混凝土结构，料仓从中间隔开，分为两相，每格均可装料 75t，分别贮存甲、乙两种粉料。分格后的高水料仓底部受料漏斗，均接刚性叶轮给料机、冲量流量计，由电磁调速电动机控制甲、乙高水材料的给料量。

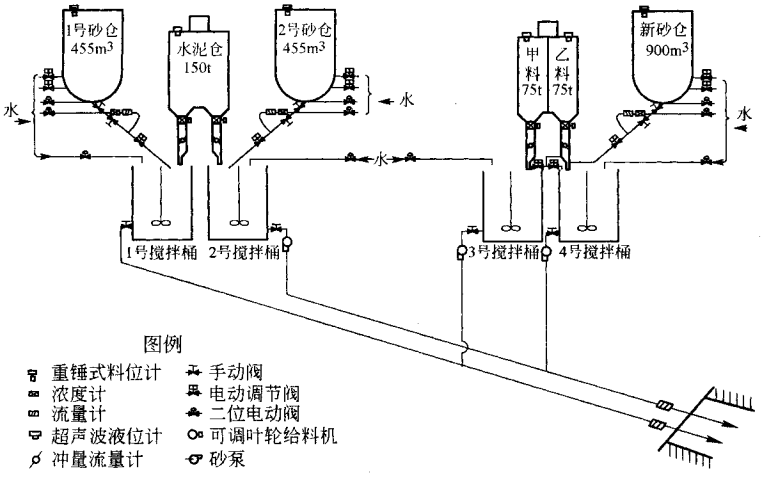


图 5 - 3 - 9　焦家金矿高水固结充填材料制备站示意图

焦家金矿水泥胶结充填料制备站的水泥仓顶采用手动振打收尘器，用其对 0.5μm 以上的颗粒进行捕捉，其收尘效率可达 95% ~ 99%。因此，新建的高水材料仓仓顶仍选用手动振打收尘器两台。DMC60 - Ⅰ型脉冲袋式除尘器用于搅拌站的收尘，经水泥胶结充填多年使用，证明其收尘效率甚高，故高水固结搅拌站收尘选用了改进的 MC60 - Ⅱ型脉冲袋式除尘器，该产品质量较 DMC60 - Ⅰ型有进一步的提高。

高水固结充填料制备的工艺流程如下：选厂浓度为 25% ~ 35% 的全尾砂浆，由 0 号砂泵站将其输送到充填搅拌站的吸砂池，经搅拌站 4PNL 型衬胶砂泵将全尾砂分别打入容积为 455m³ × 2、900m³ × 1 的 3 个半球形底立式砂仓仓顶的 φ0.5m 水力放流器。经一段分级脱泥，水力旋流器上部的溢流管将分级后细泥浆溢流到马尔斯泵站，用马尔斯泵站将溢流细泥浆输送至尾矿库；脱泥后的粗粒尾砂贮存于半球形底的立式砂仓中，作为

充填骨料(对高水固结充填来说,骨料可以不脱泥,即用全尾砂。但焦家金矿的高水固结充填系统是在原水泥胶结充填的基础上改扩建而成,且高水固结充填与水泥胶结充填兼用,因此供砂系统沿用原有工艺设施)。充填时,仓中已分级的粗粒尾砂先要造浆,造浆用水由2台(其中1台工作,1台备用)离心式清水泵供给,水泵来水经电动水阀调节流量后进到砂仓底部的两层环形管上的喷嘴喷水进行造浆。两层环形管,下层为主造浆管,上层为辅助造浆管。通过选浆,使砂浆浓度控制在65%左右,此尾砂浆由砂仓底部经ϕ6m放砂管再经分叉后流入2个ϕ1.5m×1.5m搅拌桶。放砂管上安设的γ射线浓度计及电动调节管夹阀,前者用来检测砂浆浓度,据此调节给水量使砂浆浓度保持为定值;后者用来调节搅拌桶液位,液位太高,容易溢流跑浆,液位过低,不仅高水料扬灰厉害,而且高水材料容易搅拌不均匀,影响充填质量,因此对高度为1.5m的搅拌桶来说,使液位保持在1.3m上下较好。为此在搅拌桶上方安设有超声波液位计。高水材料有散装和袋装两种,散装料可利用运料罐直接将料由压缩空气吹入料仓。袋装料需拆装后倒入料仓内,料仓进料口安设有筛网,以防止料内杂物及袋装碎片进入料仓,影响输送。焦家金矿因自己生产高水材料,用的是散料。充填加料时,甲、乙两种高水材料通过高水材料仓仓底0.3m×0.3m单向螺旋闸门放入ϕ0.3m×0.3m刚性叶轮给料机,通过冲量流量计按配比要求定量分别向对应的搅拌桶投放,控制给料量可通过调节叶轮结料机的电磁调速电动机的转速实现,在搅拌桶内高水材料与尾砂浆混合搅拌成甲、乙高水固结尾砂充填料浆后,通过各自的ϕ0.07m输送管路输到待充填采场附近,由混合器将甲、乙高水固结尾砂充填料浆均匀混合后进入采空区进行充填。在搅拌桶出口附近输送料浆管路上,安设有电磁流量计,用以计量料浆流量、累计充填体积和推算添加高水材料的量值。焦家金矿的高水固结充填系统采用了微机自动控制。

(二)某硫铁矿高水固结充填系统

某硫铁矿高水固结充填系统是在原有江砂水泥胶结充填系统的基础上改扩建而成。图5-3-10所示为系统示意图。充填采用江砂做骨料。江砂供砂系统建有五个容积为250m^{3}的卧式砂仓,仓底安设有手控放砂门。充填时,从五个砂仓中任选一个放砂,放下来的砂经1号胶带机输送至振动筛,经筛除杂质和大块石块后的砂通过2号、3号胶带机卸至安设有隔板的分料漏斗及导料筒,将砂分成大致相等的两份,分别导入甲、乙料浆搅拌桶。在2号胶带上安设有电子皮带秤,监测供砂量,人工调节放砂口开度,以控制供砂量。设计充填用砂量为100~150t/h,折合松散体积约60~100m^3/h。充填制浆用水量为80~100m^3/h,甲、乙料制浆用水各半,在充填站附近山坡上建有一个容积为2000m^{3}的水池,采用自流供水,由水池引一条ϕ0.1m的主管路到充填站,再分成两条ϕ0.08m的支管路将水输到甲、乙料浆搅拌桶,在支管路上安设有电动调节阀和电磁流量计,以检测和调

节供水量，满足充填料装配比要求。系统新建了两座直径为 3m、高为 8.43m 的高水材料仓，可分别贮存甲、乙料 54t。高水材料利用运料罐直接将料由压缩空气吹入料仓。料仓放料口下部安设配有电磁调速电动机的螺旋给料机，其最大给料能力为 20t/h 左右，螺旋给料机的出口安设有冲量流量计，用以检测下料量，通过调节电磁调速电动机的转速来控制给料量符合配比要求。甲、乙料浆制浆使用了 2 个 $\phi 2.0m \times 2.0m$ 搅拌桶，其计算容积为 $6.3m^3$，按有效利用系数为 0.65 考虑，有效容积为 $4m^3$，在要求甲、乙料浆制浆能力为 $60m^3/h$ 条件下，料浆在搅拌桶内停留搅拌时间为 4～5min，满足充填料浆搅拌时间 2～5min 的要求。搅拌桶中的搅拌器为双叶轮结构，以上叶轮左旋压浆，下叶轮右旋提浆，轴承受力均衡，功率消耗较低。制浆主轴转速为 260r/min，在料浆浓度为 60%～70%的情况下，采用 22kW 电动机可满足功率要求。料浆的输送采用 $\phi 0.1m$ 内径的无缝钢管，平行铺设两条，当甲、乙料浆流量各为 $60m^3/h$ 情况下，料浆在管道中的流速为 2.12m/s，大于临界沉降流速。料浆在距充填采场 30m 处，甲、乙料浆通过一个混合三通均匀混合后，经一条 $\phi 0.14m$ 钢管输入采空区。

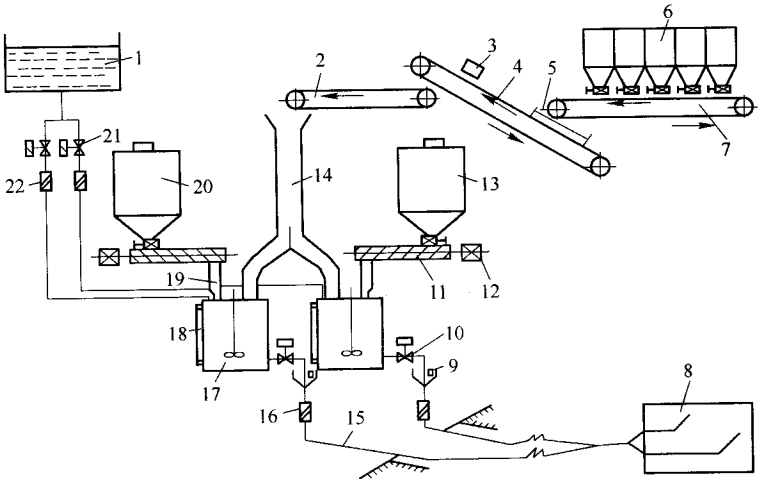


图 5－3－10　某硫铁矿高水固结充填材料制备站示意图

1—水池；2—3 号胶带机；3—电子皮带秤；4—2 号胶带机；5—振动筛；6—卧式砂仓；7—1 号胶带机；8—充填工作面；9—超声波浓度计；10—电动管夹阀；11—螺旋给料机；12—电磁调整电动机；13—乙料仓；14—放砂管；15—输浆管；16、22—电磁流量计；17—搅拌桶；18—液位计；19—冲量流量计；20—甲料仓；21—电动水阀

（三）武山铜矿全尾砂高水固结下向充填采矿法

武山铜矿矿区内包括南北两大矿带，设计生产能力 3000t/d，南北带各为 1500t/d。

北矿带矿体距地表较浅，矿石品位高，矿岩均较破碎、松软、不稳固，随着采矿深度的加深及采矿条件的变化，采矿方法由最初的整体钢筋混凝土假顶分层崩落法逐步过渡为下向进路式水砂充填采矿法。根据原设计，北矿带拟用分级尾矿、碎石和水泥，利用超高压泵进行高浓度泵压充填，受矿山建设速度和发展影响，矿山尾矿分级系统尚未形成，因此北矿带下向过路水砂充填法中一直沿用江砂充填料，由于江砂粒级组成较粗，胶结充填时强度低且水泥离析严重，因此下向进路式水砂充填法中改用纯江砂充填，分层底部必须构筑钢筋混凝土假顶。受矿山目前条件限制，钢筋混凝土主要靠人工铺设，工人劳动强度大，作业时间长，且施工质量很难保证，因此对采矿方法的正常回采造成很大影响。近年来研制的高水固化材料（甲、乙料）具有吸附大量水分子的优异性能，对于解决北矿带下向进路水砂充填采矿法存在问题很有帮助，为此从 1994 年 10 月至 1996 年 1 月在北矿带进行全尾砂高水固化材料下向充填采矿方法试验研究并获成功，在北矿带推广应用。充填时采用两类全尾高水固化材料充填：假底充填采用料浆的质量分数为 65% ~ 70%，水灰比 2.1∶1 ~ 2.5∶1，充填高度 1m，充填体强度可达到 4 ~ 5MPa；上部采用料浆的质量分数为 65% ~ 70%，水灰比 4∶1 ~ 6∶1，充填高度 2m，强度可达到 1 ~ 2MPa。

1. 充填材料

全尾高水固化充填材料由全尾砂、水和高水固化材料（分为甲、乙两种材料）组成。充填尾砂直接来自选厂未分级脱泥的尾砂。充填用水为武山铜矿工业用水，取自长江或矿区地表南洋河水，$pH = 7$，为中性水。

高水固化材料采用江西省萍乡市华强特种水泥有限公司生产的高水固化材料，包括甲料乙料两种成分。甲料为凝结硬化成分，主要由硫铝酸盐水泥及缓凝剂等外加剂组成；乙料为速凝剂组分，主要由石膏、石灰、速凝剂、解凝剂、平衡剂、悬浮剂等外加剂组成。

2. 充填系统

高水固化充填材料是一种新型的胶凝材料，通常包括甲料、乙料两种组分，二料浆单独输运时反应缓慢，不沉淀，不结底，一旦混合后即迅速反应。因此，全尾高水固化充填系统必须包括两套独立的制浆系统，邻近充填区域时，利用三通管将两套管道的甲、乙料浆混合进行充填。全尾砂高水固化材料水灰比及料浆浓度对充填强度影响很大，且甲乙料配比值对充填体强度也有较大影响。当甲乙料配比相同时，充填体强度最大，为了控制计量准确，甲乙料浆制备系统尽量采用同型号的仪表和设备。其充填系统如图 5 - 3 - 11 所示。

乙料浆制备系统是在原江砂充填系统基础上建成的。由于工业场地的限制，尾砂采

用螺旋供料方式，然后由原江砂充填的皮带运输机输送进入搅拌桶。

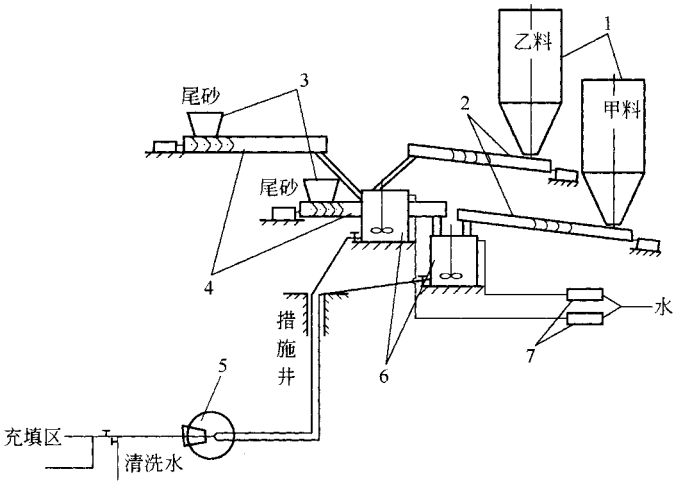


图 5－3－11　武山铜矿全尾砂高水固结充填系统图

1—甲、乙料仓；2—甲、乙料螺旋给料机；3—甲、乙尾砂料斗；

4—甲、乙尾砂螺旋给料机；5—甲、乙料浆混合器；

6—甲、乙料搅拌桶；7—靶式水力流量计

甲料浆制备系统是利用矿山现有设备和仪器建成的一套系统。为了与乙料系统平衡供料，甲料浆制备系统同样采用同型号的尾砂螺旋供料方式。

3. 充填效果

根据采矿试验研究和现场实践，甲乙料配比相同时，充填强度最大，甲乙料配比不等时，充填强度均有所下降，配比不等值相差愈大，充填强度降低愈多。在水灰比一定条件下，随着料浆浓度的提高，充填体强度明显增强，所以在现场充填时管道输送许可条件下，应尽量提高充填料浆浓度。

参照《采矿设计手册》各种不同采矿方法的充填体强度要求达到 4～5MPa，其他充填体强度 1～2MPa，根据实验室试验结果和现场情况，当料浆的质量分数达 65%～70%，水灰比 2.1∶1～2.5∶1 时，高水固化充填体强度可达 4～5MPa 能满足充填假底要求；当料浆的质量分数 65%～70%，水灰比 4∶1～6∶1 时，高水固化充填体强度可达 1～2MPa，满足假顶上部充填要求。

(四)灵山金矿高水固结充填采矿方法

1. 灵山金矿基本状况

灵山金矿位于胶东半岛西北部，属招掖金矿带。矿区内断裂构造极其发育，矿床属中低温热液蚀变岩型，矿体和围岩破碎，开采十分困难。该矿年产规模 6 万 t 矿石，采区

已从浅部转向深部，采深已达到 400m，地压活动日趋严重，原采用水泥胶结河砂充填采矿，90%为水平分层下向进路式回采，地面建有集中制浆系统。

由于生产条件的变化，原水泥河砂充填采矿中存在许多难以解决的问题。为此，采用该矿散体全尾砂，试验研究了新的高水充填系统及工艺。

2. 高水充填制浆系统

在井下主要开采区附近地表新建高水充填制备站，根据矿井生产要求，设计制备能力 $50m^3/h$，其建设原则：系统简单，投资少，工期短，见效快。高水充填系统见图 5－3－12。

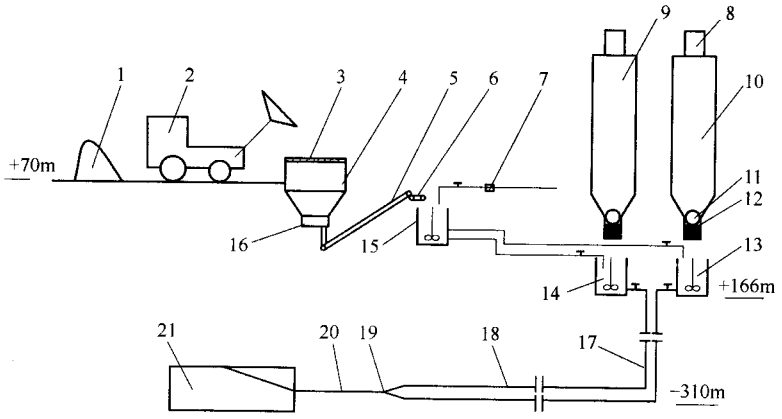


图 5－3－12　灵山金矿高水固结充填系统图

1—尾砂场；2—铲斗车；3—振动筛；4—砂仓；

5—皮带机；6—皮带秤；7—电磁流量计；8—袋式除尘器；

9—甲料仓；10—乙料仓；11—叶轮给料机；12—冲板流量计；

13—乙料浆搅拌桶；14—甲料搅拌桶；15—砂浆搅拌桶；

16—圆盘给料机；17—钻孔；18—水平管路；19—混合器；

20—混合塑料管；21—充填进路

(1)供砂系统：供砂需解决尾砂堆放、大块筛分和定量供砂等问题。地面尾砂库有效面积 $150m^2$，可存放 1000t 尾砂，满足 3 条进路充填用砂。砂仓为混凝土结构，容积 $16m^3$，缓冲时间 20min，仓上装备重型振动筛筛分大块，网孔 20mm × 20mm，$1.7m^3$ 铲斗车供砂；仓下用 ϕ1.6m 圆盘给料机定量供砂给 TD650 转载皮带机，供砂量由机头前皮带秤监测。

(2)供料系统：甲、乙高水材料单独运储、制浆和输送。甲、乙料仓为钢制圆形结构，规格 3000mm × 8340mm，每座净容积 $48m^3$，可储存 110t 料，储备富裕时间 15 天，散装粉料由罐车通过自带气力输送装置直接吹入仓内。粉料流动性：甲料小于水泥、小于乙料，

甲料安息角 41°，乙料 36°，仓下料斗斜角 60°，能保证仓内粉料整体下降。仓下安装 YG200mm×300mm 叶轮给料机定量供料。

(3)供水系统：矿井水从 2km 外排水站经 ϕ60mm 管路引入制备站，砂浆搅拌桶前设闸阀和电磁流量计控制和监测水流量。为保证水压稳定，专设一台供水泵。

(4)制浆系统：为保证浆体质量，采用二级制浆。圆盘给料机定量供给 ϕ2.0m 砂浆搅拌桶尾砂，按浓度和流量定量加水搅拌制成 60%～65%浓度的砂浆，砂浆等量流入 ϕ1.6m 甲、乙料浆搅拌桶，按井下充填要求由叶轮给料机定量加入甲、乙粉料，混合搅拌制成的料浆放入 2 个充填钻孔明槽内。

井下采用下向进路式开采，差别充填。进路下部 1.0～1.2m 厚为承载层，高水材料配比 13%，其余为充填层，配比 6%～8%，因此，充填中需改变水流量和配比。

(5)监测控制系统：高水充填料浆对浓度、流量和配比要求严格。由于国产控制监测设备工作性能稳定性差，系统采用自动监测人工控制方式，见表 5－3－3。

表 5－3－3　监测控制设备及方式

参　量	监　测	控　制
尾砂流量	皮 带 秤	圆盘给科机
水 流 量	电磁流量计	手动闸阀
料 流 量	冲板流量计	调速电机自控
搅拌桶液位	人　工	手动夹管阀
设　备	人　工	集中控制

实际流量 30～35m^3/h。具体操作：保持砂流量定值，按浓度和配比要求调节水流量和料流量。

3. 浆体输送系统

地表到－310m 中段高差 380m，采用钻孔自流双管道输送，充填倍线 1.66～2.32，变化不大，能保证充填能力和流量的相对稳定。

4. 试验效果分析

试验取得了圆满成功，达到了比预期更好的效果，解决了原水泥胶结河砂充填中长期存在的技术难题。主要表现为：(1)实际充填能力提高了 130%，满足了生产需要；(2)充填系统性能稳定，制浆工艺达到了设计要求；(3)井下充填体凝固、强度和完整性超过了设计指标，揭露良好，保证了回采安全；(4)管道输送系统简化了采场布置，充填岩石工程量降低了 95%，并保证了输浆质量；(5)简化了充填回采工艺，大幅度降低了充填成本，综合效益显著。

第四章　全砂土似膏体胶结充填新工艺技术

在前面的章节中,介绍了传统的低浓度细砂胶结充填技术、高浓度和膏体充填胶结技术。膏体胶结充填的特点是充填体强度高、井下不需脱水,但制备及输送十分困难、设备投资大;而水力充填虽然制备及输送方便,但存在充填体强度低、井下需脱水及井下环境污染等问题。寻求一种既具有水力充填料浆那样的流动性好、输送方便,又具有膏体充填体强度高、井下不脱水、保护环境等优点的充填方法,是矿山企业和采矿科技工作者努力的一个方向和目标。作者领导的课题组也正是瞄准这一目标,从影响充填材料物理力学特性的主要因素入手,发明了新的胶凝材料——全砂土固结材料,以这种材料做胶凝材料,矿山尾砂或河砂等作惰性材料,惰性材料中配以 15% ~ 30% 的细粒级砂(-37μm),制成真实质量浓度为 72% ~ 78%,外观近似膏体一样的浆体,称之为"似膏体",由此而提出"全砂土似膏体充填(简称"似膏体充填")"模式。

本章将着重展现在似膏体充填技术方面的部分研究成果。

第一节　充填材料物理力学特性主要影响因素

充填材料的物理力学特性主要指胶结充填体的强度和充填料浆的流动性,此外还有浆体的沉降特性、脱水率等。影响充填材料物理力学特性主要有六大因素:胶凝材料、惰性材料、细粒级、料浆浓度、养护温度和化学特性。

一、胶凝材料

什么样的胶凝材料适合作为充填胶凝材料?一般来说,合适的充填胶凝材料应具有

以下几个特点：(1)要有较高的早期强度和最终强度；(2)充填材料的成本低；(3)环境污染小。水泥是传统的充填胶凝材料，在尾砂胶结充填和膏体充填中应用广泛。20 世纪 90 年代初，采用高水速凝材料作为胶凝材料的高水速凝尾砂胶结充填工艺，首先在我国有色金属与黄金矿山得到发展和应用，充填效果良好，较好地解决了全尾砂充填和采场脱水问题。但由于其材料的成本偏高、甲乙两种材料带来的管输系统较复杂等原因，而未能得到广泛推广。近年来，中国矿业大学(北京校区)高水材料所研制成功一种新的胶凝材料——全砂土固结材料，它是选用工业废渣，如沸腾炉渣、钢渣、粉煤灰等作主料，再加入适量天然矿物及化学激发剂，经磨细、均化等工艺，制成的一种粉状物料，成本较低；该材料对含粘土量高的砂土及工业垃圾(如矿山尾砂等)有很强的固结能力。

与传统的水泥相比，全砂土固结材料用作充填胶凝材料，其性能如何？为此，我们进行了相应的实验研究。部分实验数据如表 5－4－1 和图 5－4－1。

表 5－4－1　不同胶凝材料的抗压强度

浓　度	惰性材料	龄　期 /d	抗压强度/MPa		
			普通水泥	9:1 矿渣水泥	全砂土固结材料
70%	焦家金矿分级尾砂	3	0.06	0.08	0.22
		7	0.1	0.24	0.36
		28	0.2	0.52	0.7
	焦家金矿全尾砂	3	0.06	0.12	0.34
		7	0.12	0.30	0.74
		28	0.22	0.72	1.1
75%	焦家金矿分级尾砂	3	0.08	0.1	0.29
		7	0.14	0.26	0.4
		28	0.22	0.6	0.8
	焦家金矿全尾砂	3	0.06	0.12	0.34
		7	0.12	0.30	0.74
		28	0.22	0.72	1.16
80%	中　砂(含土 10%)	3	0.02	0.04	0.5
		7	0.12	0.07	1.01
		28	0.2	1.2	1.6
	细　砂(含土 10%)	3	0.1	0.04	0.72
		7	0.16	0.06	1.12
		28	0.24	0.94	1.8
备　注	胶凝材料含量为 3%，养护温度 20℃，中砂的细度模数为 2.9，细砂的细度模数为 1.66				

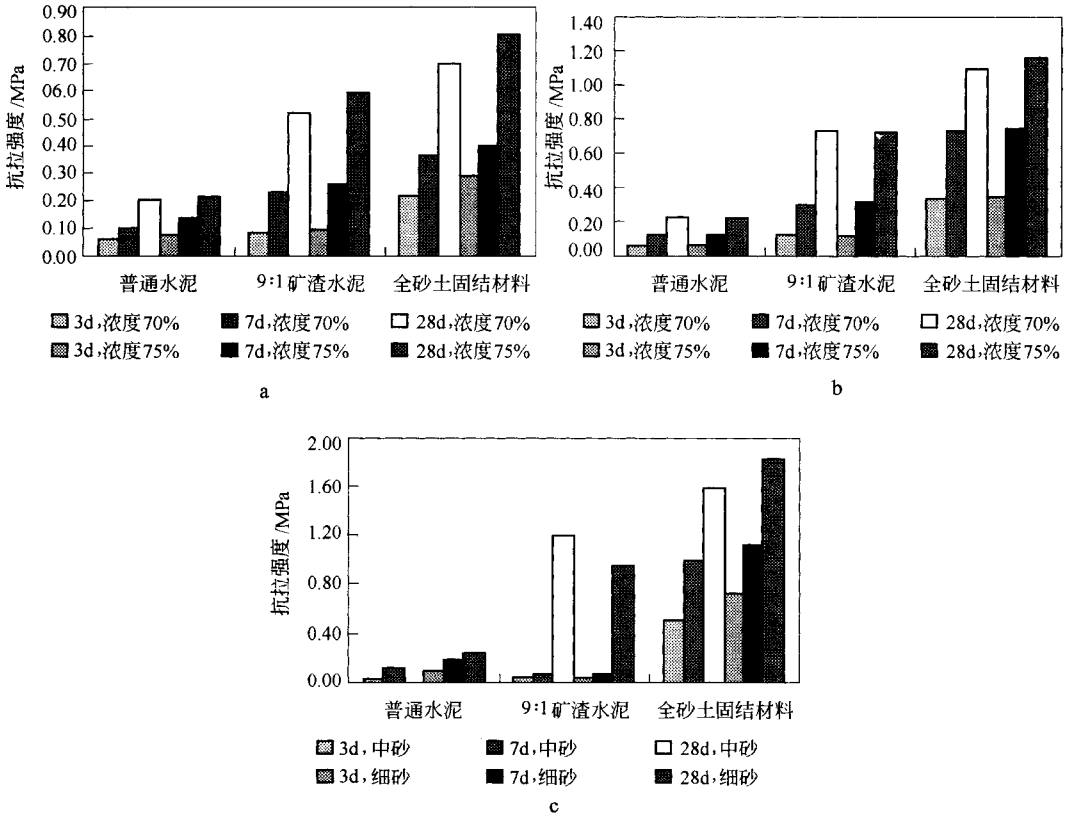


图 5－4－1　不同胶凝材料固结中、细砂的强度

a—分级尾砂作惰性材料；b—全尾砂作惰性材料；c—中、细砂作惰性材料

从表 5－4－1 和图 5－4－1 可以看出：

(1)不论是全尾砂还是分级尾砂或是河砂作惰性材料，全砂土固结材料和 9∶1 矿渣水泥作胶凝材料的充填体 3d、7d 和 28d 的抗压强度都要比普通水泥高得多；

(2)在三种胶凝材料中，全砂土固结材料的 3d、7d 和 28d 的抗压强度最高；

(3)普通水泥的早期强度和最终强度相对较低。

因此，矿渣基胶凝材料适合作胶凝材料，尤其是全砂土固结材料最适合作充填胶凝材料，它具有较高的早期强度和最终强度。

二、不同惰性材料或填料的影响

不同充填惰性材料在物理化学特性方面千差万别，这种差别对充填体的强度影响如何？如何通过优化惰性材料来实现好的效果？为此，我们通过实验从以下两方面进行了研究：(1)不同的砂子对充填体强度的影响；(2)同种砂子不同级配对充填体强度的影响。

实验结果参见表 5－4－1，并作出图 5－4－2(不同充填惰性材料的强度比较)。

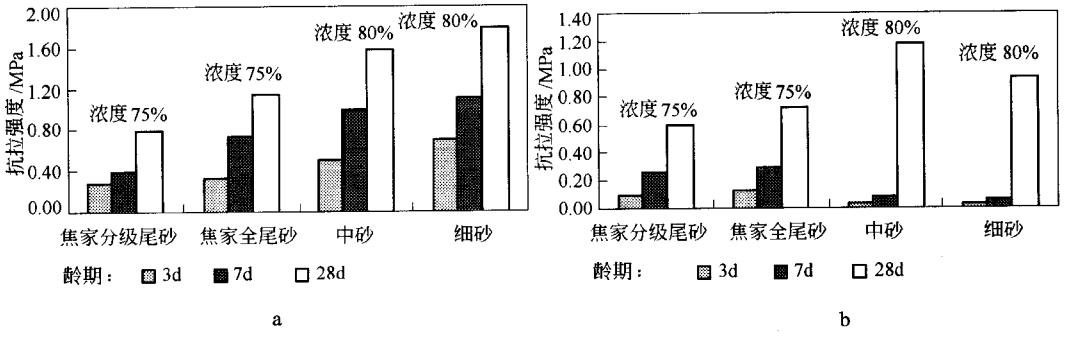


图 5－4－2　不同充填惰性材料的强度比较

a—全砂土固结材料作胶凝材料；b—9∶1 矿渣水泥作胶凝材料

不同类型的充填惰性材料对充填体的强度影响较大。实验结果表明，不同的砂或尾砂对强度的影响明显。同样浓度条件下，总体来说，全尾砂作惰性材料的试块强度高于分级尾砂作惰性材料的试块强度，而细砂作惰性材料的试块强度高于中砂作惰性材料的试块强度。

三、不同细粒级添加量对充填体强度和料浆流动性的影响

惰性材料中的粒级组成对充填体强度和料浆流动性的影响如何？为此，我们实验研究了在惰性材料中变化细粒级含量，对充填体强度和料浆流动性的影响。研究结果表明，适量的细粒级对强度和流动性有显著的作用。为了优化充填质量，实现低成本、易操作，实验中考虑了几个主要因素，如：胶凝材料的种类，惰性材料的种类，细粒级的颗粒尺寸，细粒级的添加量和养护温度。

(一)细粒级对强度的影响

1. 溢流尾砂作细粒级，分级尾砂作惰性材料，全砂土固结材料作胶凝材料

为了分析溢流尾砂作细粒级对充填体强度的影响，我们进行了一系列的相关实验研究。研究发现，在分级尾砂中添加适量的溢流尾砂会获得更高的强度，并且不同条件下的实验结果差别较大。以焦家分级尾砂作惰性材料，全砂土固结材料含量 3%，充填料浆真实质量浓度 75.7%，养护温度 12～30℃条件下的实验结果列于表 5－4－2 和图 5－4－3。

从以上的实验结果可以看出：

(1)充填材料中的细粒级含量对充填体强度起着重要的作用；

(2)全砂土固结材料对细粒级具有很强的固结能力，特别是分级尾砂作为惰性材料；

表 5－4－2　细粒级添加量对充填体抗压强度的影响

尾砂中含溢流尾砂/%	12℃时的抗压强度/MPa				20℃时的抗压强度/MPa				25℃时的抗压强度/MPa				30℃时的抗压强度/MPa			
	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
0	0.1	0.18	0.22	0.4	0.10	0.18	0.34	0.48	0.2	0.28	0.46	0.52	0.22	0.32	0.53	0.6
10	0.12	0.24	0.3	0.48	0.14	0.34	0.64	1.02	0.23	0.46	0.64	0.86	0.24	0.5	0.72	0.72
15	0.15	0.2	0.34	0.52	0.20	0.36	0.68	1.08	0.26	0.44	0.72	0.92	0.26	0.54	0.84	0.80
20	0.15	0.24	0.32	0.56	0.16	0.41	0.80	1.12	0.30	0.50	0.76	1.0	0.30	0.56	0.90	0.92
25	0.12	0.24	0.3	0.60	0.19	0.41	0.82	1.12	0.25	0.50	0.76	0.94	0.26	0.66	0.82	1.02
30	0.1	0.22	0.26	0.64	0.18	0.40	0.64	1.0	0.24	0.54	0.76	0.88	0.3	0.72	0.94	1.20
35	0.1	0.2	0.24	0.62	0.20	0.42	0.74	1.10	0.16	0.60	0.72	0.88	0.3	0.72	0.92	1.10
40	0.1	0.18	0.22	0.62	0.14	0.40	0.66	1.0	0.16	0.60	0.72	0.88	0.24	0.68	0.94	1.08
45	0.1	0.18	0.2	0.58	0.16	0.38	0.70	0.94	0.18	0.54	0.72	0.82	0.22	0.60	0.86	1.12

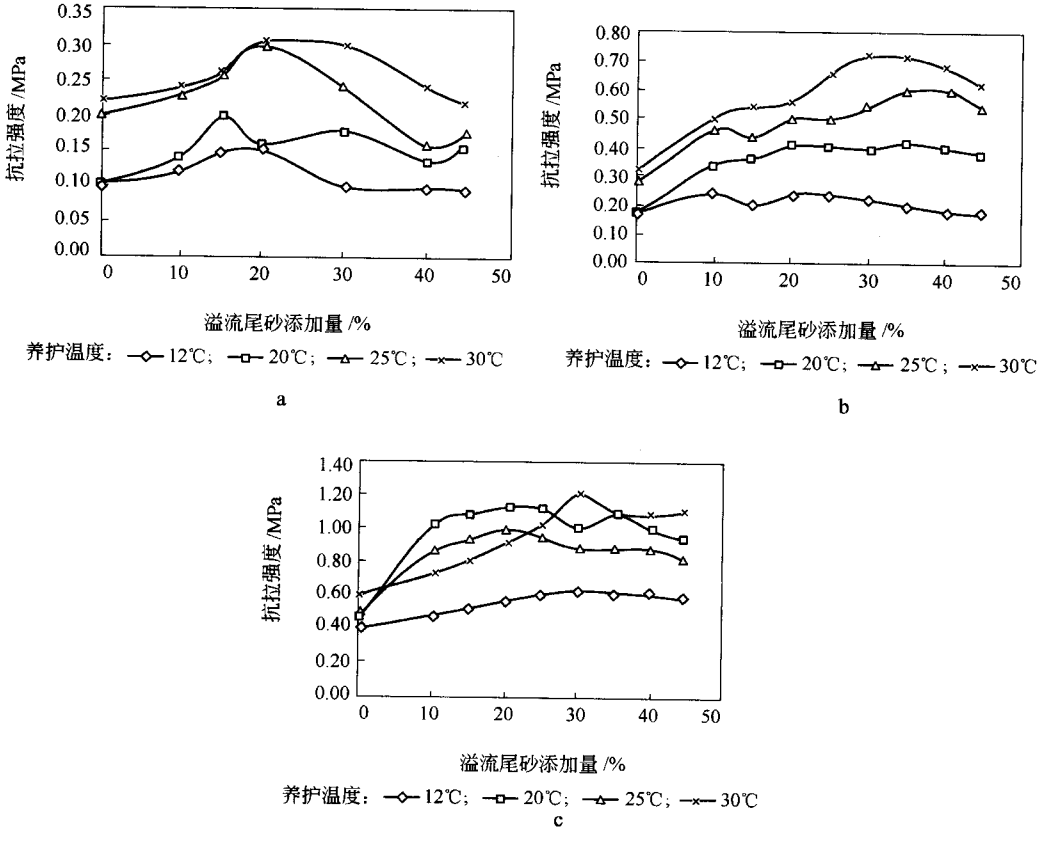


图 5－4－3　充填体抗压强度与细粒级添加量之间的关系

a—养护龄期 1d；b—养护龄期 3d；c—养护龄期 28d

(3)随着相关因素的变化存在一个合适的溢流尾砂含量范围,在这个范围内试块有较高的早期强度和最终强度。单从强度来看,在以焦家分级尾砂作惰性材料,全砂土固结材料含量 3%,充填料浆浓度 75.7%,养护温度 12～30℃条件下,溢流尾砂的合适添加量为 10%～45%。

2. 普通水泥、全砂土固结材料固结中砂

为了进一步研究不同的细粒级对充填体强度和料浆流动性的影响,我们进行了另外一系列的实验。采用粘土作为细粒级,细度模数为 2.9 的中砂做惰性材料,分别使用普通水泥和全砂土固结材料作为胶凝材料,进行全砂土固结材料和普通水泥固结细粒级的强度比较实验。部分实验数据列于表 5－4－3,养护温度为 20℃。

表 5－4－3　全砂土固结材料和 425 号水泥固结中砂的抗压强度比较

砂中含粘土/%	水泥胶结充填体抗压强度/MPa			全砂土胶结充填体抗压强度/MPa		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
0	0.04	0.08	0.14	0.42	0.62	1.02
5	0.06	0.08	0.11	0.58	1	1.6
10	0.08	0.1	0.18	0.6	1.28	2.1
15	0.1	0.12	0.21	0.72	1.5	2.4
20	0.14	0.2	0.34	0.74	1.6	2.6
30	0.16	0.25	0.36	0.7	1.48	2.1
40	0.2	0.28	0.44	0.58	1.3	2
50	0.24	0.33	0.51	0.6	1.16	1.7
备　注	料浆浓度为 80%　胶凝材料含量为 3%					

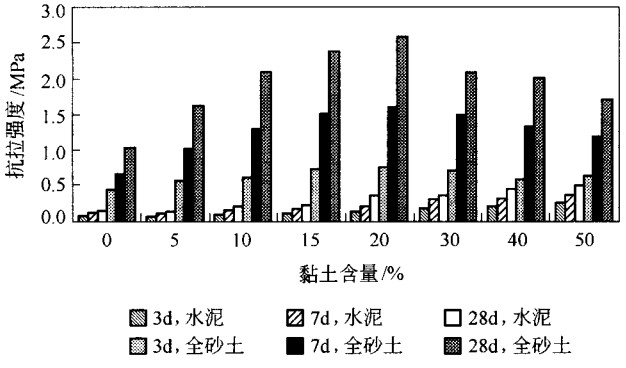


图 5－4－4　全砂土固结材料和 425 号水泥固结中砂的充填体抗压强度比较

从表 5－4－3 和图 5－4－4 可以看出:

(1)充填料浆中,细粒级含量对充填体强度具有明显的影响。在一定条件下,存在一

个最佳的细粒级含量，使充填体的早期强度和最终强度达到最高。例如，在以中粒级河砂作惰性材料、胶凝材料含量 3%、浓度 80% 条件下，细粒级添加量在 20% 左右时，全砂土胶结充填体的强度最高；

(2)相比之下，合适的细粒级添加量对提高全砂土胶结充填体强度效果要比水泥胶结充填体显著；

(3)在本试验条件下，全砂土胶结充填体各龄期的抗压强度是水泥胶结充填体强度的 3～4 倍。

实验结果说明：

(1)如果采用合适的胶凝材料，细粒级对于提高充填体强度具有重要的作用；

(2)存在一个最佳的细粒级含量，使充填体强度最高；

(3)全砂土固结材料具有很强的固结细粒级特性，而普通水泥不具有此特性。

3. 加拿大 9∶1 矿渣水泥固结河砂实验

以上我们研究了细粒级对全砂土胶结充填体和水泥胶结充填体强度的影响。那么，细粒级对 9∶1 矿渣水泥胶结充填体强度的影响又如何呢？表 5－4－4 是我们对此的一部分实验数据。

表 5－4－4　不同种类的细粒级对 9∶1 矿渣水泥胶结河砂强度影响

序号	砂中含粘土/%	砂中含溢流尾砂/%	抗压强度/MPa		
			3d	7d	28d
1	0		0.16	0.31	0.8
2	5		0.18	0.36	1.1
3	10		0.3	0.54	1.5
4	15		0.3	0.62	1.56
5	20		0.3	0.6	1.82
6	25		0.26	0.6	1.82
7	30		0.18	0.42	1.56
8	40		0.18	0.4	1.42
9		0	0.2	0.36	0.86
10		5	0.18	0.36	1.22
11		10	0.34	0.52	1.48
12		20	0.38	0.76	1.66
13		30	0.38	0.70	1.80
14		40	0.4	0.72	1.7
备　注	料浆浓度为 80%，胶凝材料含量为 3%，养护温度为 20℃				

从表 5－4－4 和图 5－4－5 可以看出：

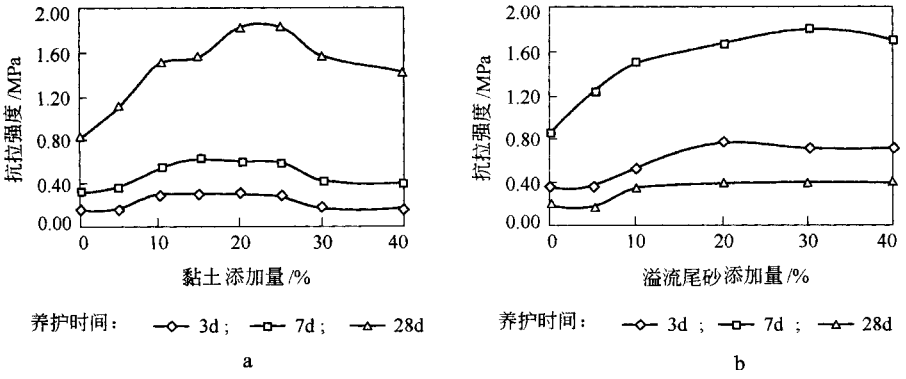


图 5－4－5　不同种类的细粒级对 9∶1 矿渣水泥胶结河砂强度的影响

a—粘土作为细粒级；b—溢流尾砂作为细粒级

(1)9∶1 矿渣水泥固结河砂，以粘土做细粒级，在浓度 80% 时，细粒级添加量的变化对充填体的强度有明显的作用。在细粒级添加量为 10% ~ 25% 范围内前期和中期强度最高。考虑到后期强度，则细粒级添加量在 20% 左右时效果最好；

(2)9∶1 矿渣水泥固结河砂，以溢流尾砂作细粒级，在浓度 80% 时，细粒级添加量达到 10% 以上至 40% 前期和中期强度最高；

(3)相比而言，掺加溢流尾砂的前期和中期最佳强度都要高于掺加粘土相应强度；

(4)溢流尾砂可作为一种合适的细粒级。

(二)细粒级对浆体流动性的影响

在这部分中，我们将主要研究在变化其它相关影响因素的条件下，细粒级对于充填料浆流动性的影响。

1. 全砂土固结材料为胶凝材料，掺土量对浆体流动性的影响

A　河砂作为惰性材料

试验所用的惰性材料为河砂，细度模数 $M = 2.9$ 属中砂，其粒级分布如表 5－4－5 所示。胶凝材料为全砂土固结材料，实验温度为 20℃。我们用塌落度和扩散直径来粗略地表征料浆的流动性。一般来说，塌落度和扩散直径越大，料浆的流动性越好。

表 5－4－5　实验所用河砂的粒级分布

筛孔直径/mm	5 ~ 2.5	2.5 ~ 1.25	1.25 ~ 0.63	0.63 ~ 0.31	0.31 ~ 0.16	< 0.16
累计含量/%	7.8	33.6	68.9	85.1	95.7	100

从表 5－4－6 和图 5－4－6 可以看出，塌落度随着掺土量的增加，开始逐渐增大，当掺土量为 20% ~ 40% 时比较稳定，在这之后出现下降趋势。这就是说，存在一个最佳的细粒级含量范围，使充填料浆的流动性最好。在掺土量为 20% 时，扩散直径最大。

表 5－4－6　河砂中的掺土量对料浆流动性的影响

浓　度 /%	砂中掺土量 /%	425 号水泥		全砂土固结材料	
		扩散直径/cm	塌落度/cm	扩散直径/cm	塌落度/cm
84	0	38	19	36	15
	5	48	21	42	19
	10	67	26.5	56	26
	15	73	27	66	26.5
	20	82	27	67	26.5
	30	69	26.5	53	25.5
	40	46	24.5	42	23.5
	50	32	14	25	11
备　注	塌落度桶：上口为 ϕ100mm、下口为 ϕ200mm，高为 300mm；胶凝材料含量为 3%				

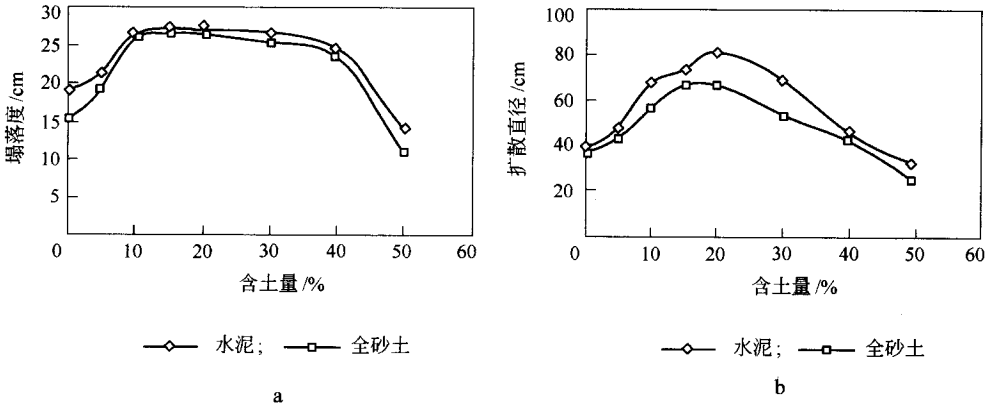


图 5－4－6　掺土量对浆体流动性的影响

a—掺土量与塌落度的关系曲线；b—掺土量与扩散直径的关系曲线

B　焦家金矿分级尾砂作惰性材料

为了进一步研究细粒级添加量对尾砂浆体的影响，实验中采用了焦家分级尾砂作惰性材料，焦家溢流尾砂作为细粒级。表 5－4－7 和图 5－4－7 是其中的一组有代表性的实验结果。

表 5－4－7　分级尾砂中溢流尾砂的添加量对浆体塌落度的影响

溢流尾砂添加量/%		5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5
塌落度 /cmn	70%浓度	4.7	4.9	5.05	5.1	5.05	5	4.8	4.65
	72%浓度	4.05	4.7	4.75	4.95	4.7	4.6	4.55	4.2
	75%浓度	2.45	2.5	3.2	3.7	3.4	3.2	3.2	2.3
备　注	塌落度桶为小型自制：上直径 ϕ36mm，下直径 ϕ64mm，高 60mm；胶凝材料：全砂土固结材料；实验温度为 20℃								

图 5－4－7 表明，随着细粒级添加量的变化，塌落度曲线出现一个较宽的平台。这说明，在一定的料浆浓度条件下，有一合适的细粒级范围，使得料浆具有较好的流动性。在以上的具体条件下，尾砂浓度为 70%～75%时，溢流尾砂添加量在 10%～20%之间浆体具有较好的流动特性。显然，条件变化，细粒级的合适添加量也将变化。

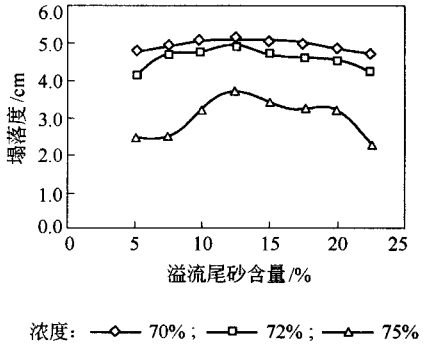


图 5－4－7　尾砂中溢流尾砂添加量与塌落度的关系曲线

2.9:1 矿渣水泥作胶凝材料，掺土量对浆体流动性的影响

掺土量对以 9:1 矿渣水泥为胶结料浆体流动性影响的实验数据见表 5－4－8、表 5－4－9。实验中惰性材料为河砂，实验温度为 20℃。

表 5－4－8　河砂中的掺土量对浆体塌落度的影响

料浆浓度/%	砂中掺土量/%	塌落度/cm	备　注
80	10	15.5	胶凝材料含量为 3%； 塌落度桶：上口为 ϕ100mm； 下口为 ϕ200mm； 高 300mm
	15	14.5	
	20	15	
	25	14	
	30	12.3	

表 5－4－9　河砂中的掺土量对浆体扩散直径的影响

料浆浓度/%	胶凝材料含量/%	砂中掺土量/%	扩散直径/cm
80	3	5	10.4
		10	14.2
		15	15.4
		20	14.7
		25	15.4
		30	13.4
		35	12.6
		40	9.4
备　注	塌落度桶为小型自制：上直径 ϕ36mm，下直径 ϕ64mm，高 60mm		

表 5－4－8、表 5－4－9 及图 5－4－8、图 5－4－9 表明，浓度为 80%，河砂中掺土量范围在 15%～25%之间时，浆体有较好的流动性。

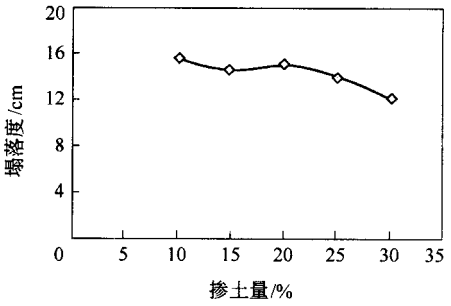


图 5－4－8　掺土量与浆体塌落度的关系曲线

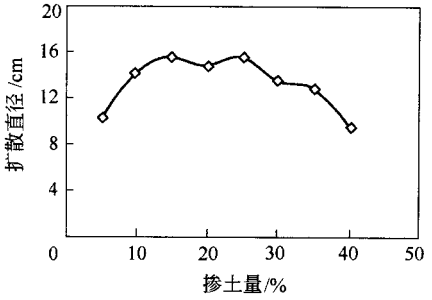


图 5－4－9　掺土量与浆体扩散直径的关系曲线

以上的分析结果表明：

(1)合适的细粒级对于提高矿渣基胶凝材料的充填体强度有明显的效果。合适的细粒级添加量对提高全砂土胶结充填体的早期和最终强度效果最为显著，9∶1 矿渣水泥次之，而对提高水泥胶结充填体的早期和终期强度效果最小；

(2)从充填体强度考虑，全砂土固结材料是第一选择，9∶1 矿渣水泥次之，而普通水泥最差；

(3)合适的细粒级含量能有效地提高充填体强度和浆体流动性；

(4)综合考虑充填体强度和浆体流动性，对于全砂土固结材料固结尾砂料，浓度在 75%左右时合适的细粒级添加量为 15%～25%；对于 9∶1 矿渣水泥固结河砂浆，浓度在 80%时合适的细粒级添加量为 20%～25%。

四、温度对充填体强度和料浆流动性的影响

(一)温度对充填体强度的影响

研究表明，养护温度对于充填体特别是早期强度有显著影响。以下在考虑其他相关因素的条件下，就养护温度对充填体强度的影响进行了一系列的实验。实验采用全砂土

固结材料胶结焦家分级尾砂，料浆浓度为 75.7%，溢流尾砂作为细粒级，在不同养护温度条件下测定试件的抗压强度。实验数据见表 5－4－10 和图 5－4－10。

表 5－4－10　养护温度对充填体抗压强度的影响

尾砂中含溢流尾砂/%	12℃时的抗压强度/Mpa				20℃时的抗压强度/MPa				25℃时的抗压强度/MPa				30℃时的抗压强度/MPa			
	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
0	0.1	0.18	0.22	0.4	0.10	0.18	0.34	0.48	0.2	0.28	0.46	0.52	0.22	0.32	0.53	0.6
10	0.12	0.24	0.3	0.48	0.14	0.34	0.64	1.02	0.23	0.46	0.64	0.86	0.24	0.5	0.72	0.72
15	0.15	0.2	0.34	0.52	0.20	0.36	0.68	1.08	0.26	0.44	0.72	0.92	0.26	0.54	0.84	0.80
20	0.15	0.24	0.32	0.56	0.16	0.41	0.80	1.12	0.30	0.50	0.76	1.0	0.30	0.56	0.90	0.92
25	0.12	0.24	0.3	0.60	0.19	0.41	0.82	1.12	0.25	0.50	0.76	0.94	0.26	0.66	0.82	1.02
30	0.1	0.22	0.26	0.64	0.18	0.40	0.64	1.0	0.24	0.54	0.76	0.88	0.3	0.72	0.94	1.20
35	0.1	0.2	0.24	0.62	0.20	0.42	0.74	1.10	0.16	0.60	0.72	0.88	0.3	0.72	0.92	1.10
40	0.1	0.18	0.22	0.62	0.14	0.40	0.66	1.0	0.16	0.60	0.72	0.88	0.24	0.68	0.94	1.08
45	0.1	0.18	0.2	0.58	0.16	0.38	0.70	0.94	0.18	0.54	0.72	0.82	0.22	0.60	0.86	1.12

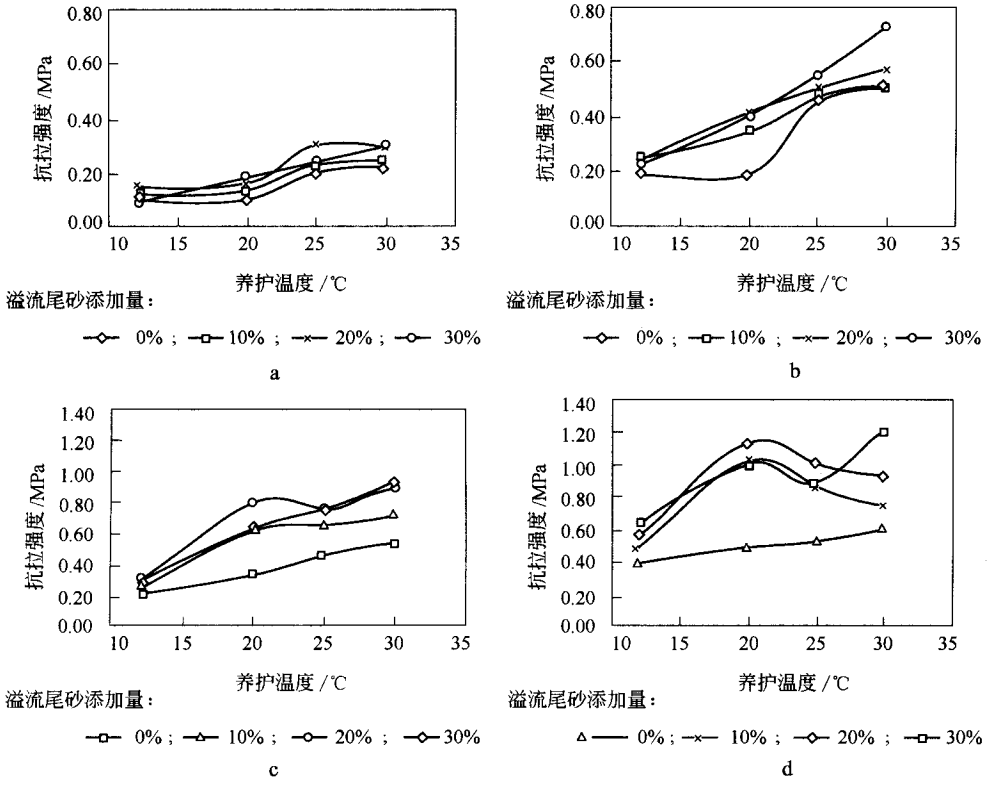


图 5－4－10　养护温度对抗压强度的影响

a—1d 抗压强度；b—3d 抗压强度；c—7d 抗压强度；d—28d 抗压强度

从表 5－4－10 和图 5－4－10 可以看出：

(1)随着养护温度的升高，充填体的强度迅速提高。例如，20℃条件下的充填体强度约是 12℃条件下的 2 倍。从强度和成本来考虑，达到同样的效果，在低温条件下加温是最经济的方法；

(2)如果加入适量的细粒级，温度对于充填早期强度和终期强度具有明显的促进作用；

(3)不同的条件下，养护温度的最佳范围有所不同。在以上的特定条件下，养护温度的最佳的养护温度约为 20℃。

(二)温度对料浆流动性的影响

分析了养护温度对抗压强度的影响，那么温度对料浆流动性的影响又如何呢？表 5－4－11 是对此的实验数据。

表 5－4－11　温度对料浆流动性影响

胶凝材料类型	掺土量/%	温度/℃	中砂	细砂
			扩散直径/cm	扩散直径/cm
全砂土固结材料	0	20	6.5	6.6
		30	6.5	7.0
	20	20	15.7	7.5
		30	15.7	7
9:1 矿渣水泥	0	20	7.5	6.7
		30	7.5	7.0
	20	20	16.4	5.9
		30	16.4	7.5
425 号水泥	0	20	7	7.5
		30	7	6.7
	20	20	15.8	8
		30	15.8	7.5
备注	料浆浓度为 80%，胶凝材料含量为 3%			

从实验结果表明，温度从 20℃变化到 30℃对料浆流动性的影响比较小。可见，温度对充填料浆的流动性影响不大。

五、浓度对充填体强度和料浆流动性影响

(一)浓度对充填体强度的影响

研究表明，料浆浓度是影响充填质量的重要因素之一。下面，我们主要研究料浆浓度对充填体强度的影响。实验中，9:1 矿渣水泥用作胶凝材料，焦家金矿分级尾砂用作惰

性材料。实验温度为 20℃。实验结果如表 5－4－12、图 5－4－11。

表 5－4－12　加拿大 9:1 矿渣水泥胶结充填体强度与料浆浓度的关系

尾砂浓度/%	胶凝材料含量/%	扩散直径/cm	塌落度/cm	抗压强度/MPa			
				1d	3d	7d	28d
70	3	16	5.0	0.13	0.30	0.32	0.60
72		16	5.0	0.15	0.25	0.32	0.60
74		11	3.5	0.18	0.35	0.50	0.80
76		7.6	2.0	0.25	0.40	0.62	0.80
78		7.3	1.5	0.30	0.56	0.81	1.30
备　注	塌落度桶为小型自制：上直径 ϕ36mm，下直径 ϕ64mm，高 60mm						

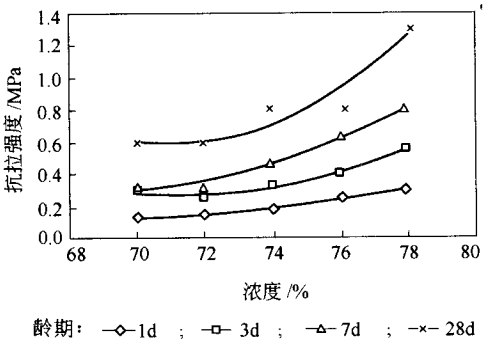


图 5－4－11　料浆浓度对充填体抗压强度的影响

实验结果表明，充填体抗压强度随充填料浆浓度的提高而增加，在高浓度时尤为明显。众所周知，提高料浆浓度不仅可以提高充填浓度，而且会相应地降低脱水量，因而会减少由脱水引起的胶凝材料损失，从而改善井下作业环境。另外，高浓度浆体堆积率高，沉降小，大大增加了充填的接顶率。因此，在满足输送能力的条件下应尽量提高料浆浓度。

(二)料浆浓度对浆体流动性的影响

1. 分级尾砂作惰性材料

实验中，用塌落度和扩散直径来表征充填料浆的流动能力。塌落度和扩散直径越大，料浆的流动能力越高；反之，塌落度和扩散直径越小，料浆的流动能力越小。从表 5－4－13 和图 5－4－12 可以看出，随着浓度的增加，塌落度和扩散直径减小，表明料浆的流动能力减小。

2. 分级尾砂加细粒级作惰性材料

为了进一步揭示料浆浓度对流动性的影响，我们进行了另一系列实验。采用分级尾砂加溢流尾砂作惰性材料。实验结果，变化溢流尾砂添加量条件下，料浆浓度和塌落度

之间的关系见表 5－4－13 和图 5－4－13。

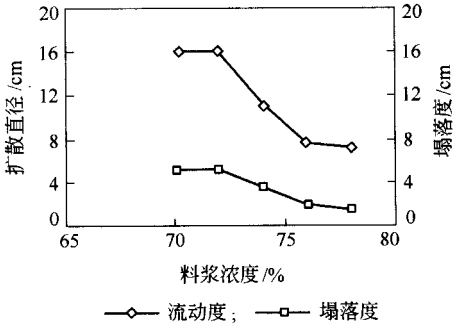


图 5－4－12　料浆浓度对浆体流动性的影响

表 5－4－13　料浆浓度对流动性的影响

浓度/%	72	74	75	76	77	78	79	备　注
塌落度/cm	2.5	1.65	1.12	0.6				溢流尾砂添加量为 0%
		3.8	2.9	2.3	2	1.65		溢流尾砂添加量为 7%
		4	3.6	3.8	2.7	1.6	1.4	溢流尾砂添加量为 14%
		4.3	3.8	3.4	2.8	2.3	2.1	溢流尾砂添加量为 20%
备　注	塌落度桶为小型自制：上直径 ϕ36mm，下直径 ϕ64mm，高 60mm							

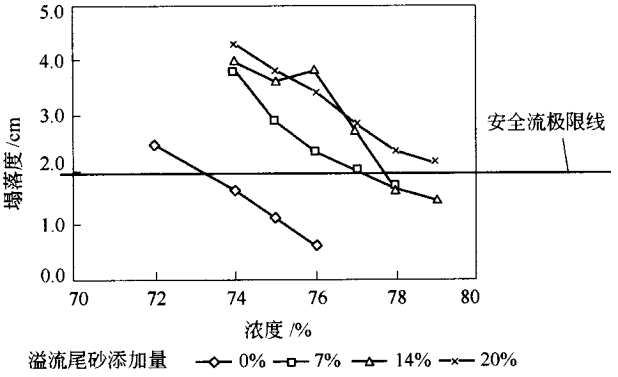


图 5－4－13　不同溢流尾砂添加量条件下浆体浓度与塌落度的关系曲线

这里，我们给了一个新的定义称作安全流，它表征在一定条件下的料浆流动能力。安全流意味着充填料浆像一定浓度条件下的水力充填料浆一样安全流动。如图 5－4－13 中的“安全流极限线”。在此线之上充填料浆安全流动；在此线之下料浆不安全流动。从图 5－4－13 可以看出：

(1)随着料浆浓度的提高，料浆流动能力降低；

(2)细料级能有效地提高充填料浆流动能力。就是说,在安全流条件下通过添加适量的细粒级料浆浓度可以大大提高。例如,溢流尾砂添加量为 0%时,安全流条件下的料浆浓度约 73%;溢流尾砂添加量为 7%时,安全流条件下的料浆浓度约 77%;溢流尾砂添加量为 14%时,安全流条件下的料浆浓度约 78%;溢流尾砂添加量为 20%时,安全流条件下的料浆浓度约 79%。

结果表明,在不降低流动能力条件下,可以通过添加适量细粒级来提高浓度,从而减少脱水,增加充填体强度。考虑到充填体强度、井下脱水和料浆流动能力,合适的料浆浓度应是 74%~78%,细粒级添加量 15%~25%。

六、灰砂比对充填体强度及料浆流动性的影响

(一)胶凝材料含量对强度的影响

为了分析胶凝材料及含量对充填体强度和料浆流动能力的影响,我们进行了一系列的相关实验。试验结果如表 5-4-14 和图 5-4-14。

表 5-4-14　胶凝材料含量对充填体抗压强度的影响

胶凝材料类型	胶凝材料含量/%	分级尾砂胶结充填抗压强度/MPa			全尾砂胶结充填抗压强度/MPa		
		3d	7d	28d	3d	7d	28d
普通 425 号水泥	3	0.06	0.1	0,2	0.06	0.1	0.24
	5	0.08	0.1	0.25	0.08	0.16	0.3
	8	0.12	0.2	0.6	0.12	0.3	0.68
	10	0.14	0.32	0.8	0.14	0.5	0.84
9:1 矿渣水泥	3	0.1	0.3	0.7	0.08	0.66	1.45
	5	0.14	0.84	1.84	0.22	1.36	2.66
	8	0.34	1.6	3.44	0.44	3	4.3
	10	0.8	2.92	5	0.78	3.5	6.7
全砂土固结材料	3	0.22	0.36	0.7	0.34	0.74	1.1
	5	0.8	1.4	2.5	0.66	1.28	1.82
	8	1	1.7	3	1.24	2.28	3.24
	10	1.35	2.66	3.6	2	3.8	5
备　注	实验料浆浓度为 70%,焦家金矿尾砂作惰性材料,养护温度 20℃						

实验结果表明,随着胶凝材料含量的增加,充填体的强度上升明显。众所周知,不考虑经济因素,通过增加胶凝材料的添加量来提高充填体强度是一个很简单的手段。事实上,有六大因素(胶凝材料、惰性材料、细粒级、料浆浓度、养护温度和化学特性)影响充填质量。显然,要取得很好的充填效果,要优化六大因素。

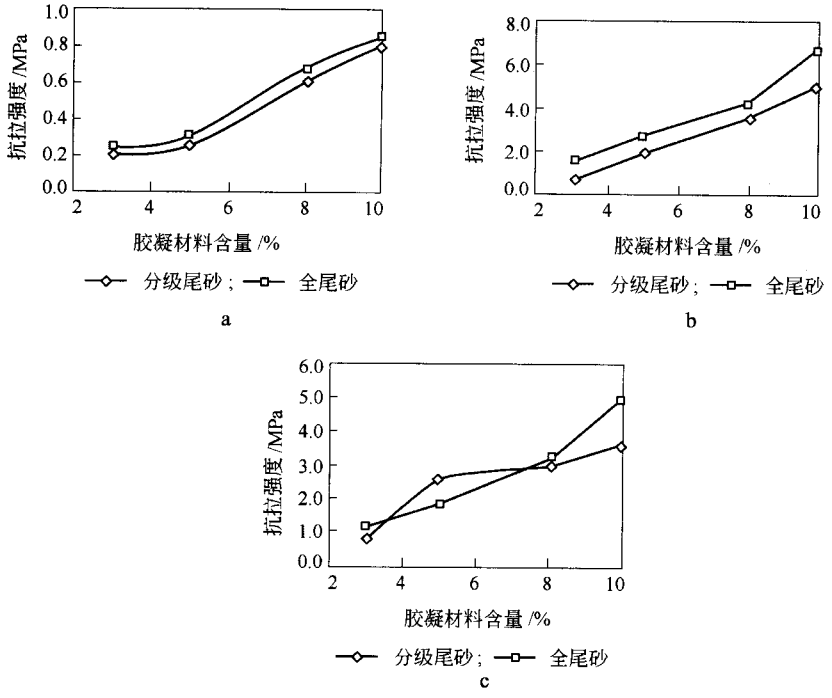


图 5－4－14　充填体 28d 抗压强度与胶凝材料含量的关系曲线

a—胶凝材料为水泥；b—胶凝材料为 9∶1 矿渣水泥；c—胶凝材料为全砂土固结材料

（二）灰砂比对浆体流动性的影响

为了研究不同的灰砂比对充填流动能力的影响，我们进行了一系列的试验，分别采用新城金矿分级尾砂和全尾砂作惰性材料。实验结果如表 5－4－15。

表 5－4－15　灰砂比对料浆流动性的影响

浓度/%	灰砂比	分级尾砂为充填惰性材料				全尾砂为充填惰性材料			
		425 号水泥		全砂土固结材料		425 号水泥		全砂土固结材料	
		扩散直径/cm	塌落度/cm	扩散直径/cm	塌落度/cm	扩散直径/cm	塌落度/cm	扩散直径/cm	塌落度/cm
75	1∶24	38	19	40	20	49	23	64	24
	1∶20	50	23	42	21	57	23	65	24
	1∶10	51	23	65	27	59	24	65	27.5
	1∶8	63	26	76	27	69	26	65	27.5
	1∶6	76	27	82	29	72	27	80	28
	1∶4	88	28	92	29	82	27	80	29
备　注	塌落度桶为：上直径 ϕ100mm，下直径 ϕ200mm，高 300mm								

从表 5－4－15 可以看出，随着胶凝材料含量的增加，浆体的塌落度均呈缓慢上升趋

势。灰砂比量在一定范围内的提高有助于提高浆体的流动性。

七、化学特性对充填体强度和料浆流动性的影响

(一)化学特性对充填体强度的影响

研究表明,在某些条件下化学特性对充填体强度有很大的影响。典型的是充填料浆的 pH 值对充填体强度有显著的影响。例如,当金川尾砂用作惰性材料,全砂土固结材料用作胶凝材料,充填体试块几乎无强度甚至不凝固。实验分析表明,金川尾砂的弱酸性影响了全砂土固结材料的正常水化。金川尾砂的花学组成列于表 5 – 4 – 16。

表 5 – 4 – 16　金川尾砂的化学组成

化学组成	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	∑
含量/%	26.7	3.13	5.28	13.6	35.4	98.61

然而,通过添加适量的由我们研制的化学添加剂来调节料浆的 pH 值,充填体强度得到明显提高。见表 5 – 4 – 17,图 5 – 4 – 15 和图 5 – 4 – 16。

表 5 – 4 – 17　金川尾砂作惰性材料条件下化学添加剂 A 对充填体强度的影响

料浆浓度/%	胶凝材料含量/%	化学添加剂 A 的含量/%	金川分级尾砂作惰性材料					金川全尾砂作惰性材料				
			塌落度/cm	抗压强度/mPa				塌落度/cm	抗压强度/MPa			
				1d	3d	7d	28d		1d	3d	7d	28d
72	3	0	3.5	0	0	0	0.20	1.0	0	0	0	0.20
		0.3	3.5	0.2	0.42	0.68	1.22	1.0	0.03	0.12	0.50	0.66
		0.4	3.2	0.2	0.40	0.70	1.08	1.0	0.05	0.24	0.50	0.86
		0.5	3.8	0.22	0.40	0.64	1.10	1.0	0.08	0.34	0.64	0.90
		0.6	3.7	0.26	0.38	0.56	0.96	1.0	0.14	0.46	0.68	0.98
		0.7	3.7	0.18	0.36	0.60	1.0	1.0	0.20	0.62	0.70	0.90
		0.8	3.6	0.18	0.32	0.58	0.92	1.0	0.16	0.58	0.76	0.92
		0.9	3.3	0.2	0.36	0.62	0.98	1.0	0.14	0.62	0.80	0.94
		1.0	3.5	0.16	0.40	0.54	1.16	1.0	0.1	0.50	0.66	0.90
备　注		全砂土固结材料作胶凝材料,养护温度为 20℃ 塌落度桶 顶面直径 3.6cm,底面直径 6.4cm,高 6.0cm										

从图 5 – 4 – 15 和图 5 – 4 – 16 可以看出:

当金川尾砂用作惰性材料,全砂土固结材料作胶凝材料,充填试块无早期强度,很小的最终强度 然而,通过加入适量的由我们研制的化学添加剂 A 到充填料浆,充填的早期强度和最终强度得到明显提高 ;金川分级尾砂用作惰性材料,化学添加剂的合适添加量是 0.3% ~ 0.9%。

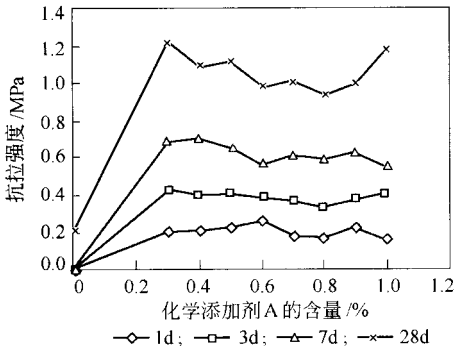


图 5－4－15　金川分级尾砂作惰性材料条件下化学添加剂 A 对充填体强度的影响

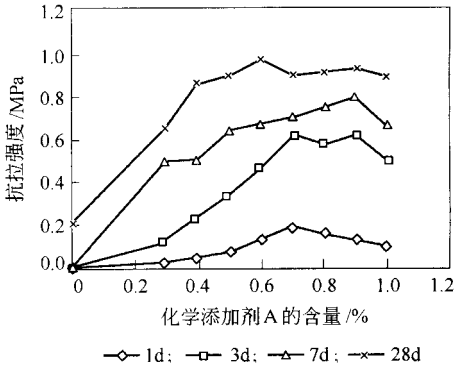


图 5－4－16　金川全尾砂作惰性材料条件下化学添加剂 A 对充填体强度的影响

(二)化学添加剂对料浆流动性的影响

从表 5－4－17 可以得到下图 5－4－17 和图 5－4－18。

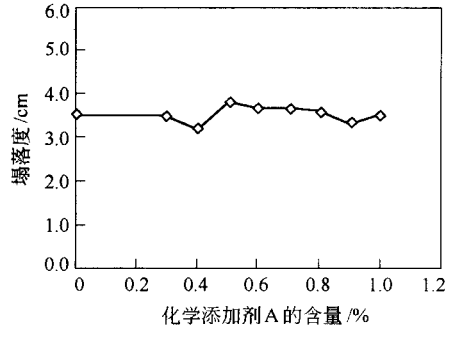


图 5－4－17　金川分级尾砂作惰性材料条件下化学添加剂 A 对塌落度的影响

图 5－4－17 和图 5－4－18 表明,化学添加剂 A 对料浆的塌落度几乎无影响。

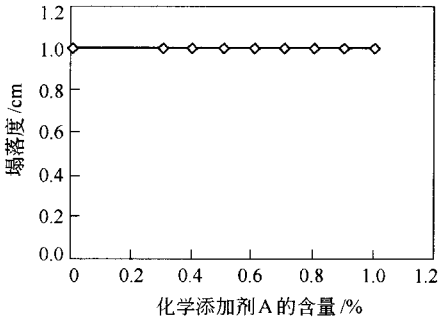


图 5－4－18　金川全尾砂作惰性材料条件下化学添加剂 A 对塌落度的影响

第二节　似膏体充填工艺技术

一、似膏体充填模式

针对膏体充填和水力充填中存在的问题，提出了集两者优点的“似膏体充填”新模式：其充填体强度接近于膏体充填的强度，远高于水力充填的强度；料浆流动能力相当或略小于水力充填，远高于膏体充填；不加细粒级充填料时，其浓度接近于水力充填的上限，加入一定量的细粒级充填料时，料浆看上去像膏体，浓度接近于膏体充填的浓度；井下不需脱水或少量脱水。这种兼有水力充填和膏体充填两者的技术优点的模式我们称之为“似膏体充填”。

单从料浆浓度来看，“似膏体充填”和“高浓度胶结充填”似乎没有什么不同。实质上“似膏体充填”和“高浓度胶结充填”有着质的区别：

(1)胶凝材料。高浓度胶结充填中的胶凝材料为水泥。

似膏体充填所用胶凝材料为全砂土固结材料，其水化反应的产物中有一部分钙矾石晶体，钙矾石晶体中含有大量的结晶水，并且具有早强性能，这为充填体获得较高的早期强度和少脱水或不脱水提供了物质基础。

(2)惰性材料。高浓度胶结充填需井下脱水，因此用尾砂作充填惰性材料时，必须控制 $-20\mu m$ 细粒级含量；而似膏体充填不需脱水或很少量的脱水，且所用胶凝材料全砂土固结材料对细粒级具有较强的固结能力。因此，可以用加入一定量的细粒级的尾砂或河砂等作惰性材料，这就为在保证安全输送条件下提高料浆浓度创造了有利条件，进而可改善充填体的效果。

(3)效果。强度:由于似膏体充填几乎不需要脱水,且全砂土固结材料水化反应产物中有部分钙矾石晶体,强度发展较快,使其充填体强度是高浓度胶结充填的 3 ~ 4 倍,特别是早期强度更为明显。表 5 – 4 – 18 是一组似膏体充填和高浓度胶结充填的强度比较实验数据。

表 5 – 4 – 18　似膏体充填和高浓度胶结充填的强度比较实验数据

	胶凝材料类型	料浆浓度/%	胶凝材料含量/%	分级尾砂作惰性材料(添加 15%的溢流尾砂)			全尾砂		
				抗压强度/MPa			抗压强度/MPa		
似膏体充填				3d	7d	28d	3d	7d	28d
	全砂土固结材料	75	3	0.29	0.4	0.8	0.34	0.74	1.1
			5	0.8	1.4	2.5	0.66	1.28	1.82
			8	1	1.7	3	1.24	2.28	3.24
			10	1.35	2.66	3.6	2	3.8	5
	胶凝材料类型	料浆浓度/%	胶凝材料含量/%	分级尾砂 抗压强度/MPa					
高浓度胶结充填				3d	7d	28d			
	普通 425 号水泥	75	3	0.08	0.14	0.22			
			5	0.10	0.18	0.30			
			8	0.14	0.32	0.8			
			10	0.22	0.54	1.2			
注:	尾砂取自焦家金矿,养护温度 20℃								

流动性:由于似膏体充填允许含量 15% ~ 30%的细粒级。其细粒级的悬浮、润滑作用和良好的级配,使得在和高浓度胶结充填同样的浓度条件下,料浆流动性更好。

表 5 – 4 – 19 是似膏体充填与传统的胶结充填、高浓度胶结充填、膏体充填工艺技术特征的比较。

表 5 – 4 – 19　胶结充填工艺技术特征比较

技术特征	似膏体充填	传统的胶结充填	高浓度胶结充填	膏体充填
1. 胶结材料	矿渣基胶凝材料,如全砂土固结材料、9:1矿渣水泥	普通水泥、9:1 矿渣水泥、磨细的水淬炉渣、熟石灰、石膏、粉煤灰等	普通水泥	普通水泥
2. 惰性材料	全尾砂、含有适量细粒级的分级尾砂或河砂等	河砂、山砂、风砂、戈壁集料、分级尾砂等	全尾砂自然级配,–3mm 磨砂、河砂、海砂等	全尾砂、河砂、山砂、海砂、风砂、棒磨砂等、–20mm粗粒惰性材料,粗细惰性材料比 1:1

技术特征	似膏体充填	传统的胶结充填	高浓度胶结充填	膏体充填
3. 浆体重量浓度	72% ~ 78%	60% ~（68% ~ 70%）	（68% ~ 70%）~ 75%	75% ~ 82%，加粗粒级可达 81% ~ 88%
4. 流型流态	流态：非牛顿体似均质流 流型： $\tau=\tau_0+\eta\frac{du}{dr}$	流态：牛顿体非均质流 流型： $\tau=\mu\frac{du}{dr}$	流态：非牛顿体似均质流 流型： $\tau=\tau_0+\mu_{HB}\left(\frac{du}{dr}\right)^n$	流态：非牛顿体似均质流 流型： $\tau=\tau_0+\mu_B\frac{du}{dr}$
5. 流动性	流动性好	流动性好	流动性较好，似粘塑性体流动	流动性差，似固体状整体移动，即类似“柱塞”的形式流动
6. 脱水性	脱水率低至中等 3% ~ 25%	脱水率最高，大于 30%	脱水率高，一般小于 30%	脱水率低，小于 3%
7. 强度特性	强度较高	强度低	强度中等	强度高

二、提高强度和流动性的几个措施或方案

影响充填体强度和充填料浆流动性的六大因素是：胶凝材料、惰性材料、细粒级、料浆浓度、养护温度和化学特性等。下面着重围绕这几个主要因素探讨如何提高充填体强度和增强充填料浆流动性。

（一）胶凝材料

何种胶凝材料适合似膏体充填？

前文提到，胶凝材料的类型主要有：全砂土固结材料、9∶1 矿渣水泥和普通水泥等。全砂土固结材料和 9∶1 矿渣水泥是良好的充填胶凝材料，全砂土固结材料对河砂和尾砂的固结能力最强，特别是在合适细粒级含量条件下，充填体的早期强度和长期强度及料浆的流动能力都有很大提高。9∶1 矿渣水泥对尾砂有很强的固结能力，对河砂的固结能力相对较弱。所以，似膏体充填胶凝材料首选是全砂土固结材料，其次是 9∶1 矿渣水泥。

（二）料浆浓度

在保证流动能力的条件下提高充填料浆的浓度。

目前的充填技术，随着充填料浆浓度的提高充填体强度增加，采场脱水减少，而充填料浆的流动性又随着浓度的提高而降低；因此，为了保证充填质量，充填料浆浓度应控制在合理范围内。由此，充填站的自动控制系统必不可少，它是料浆配料准确、实验数据可靠、操作方便的有力保证，从而使充填料浆浓度保持在最大允许范围内，最终保证充填体强度。

（三）细粒级

要保证料浆有良好流动性条件下提高充填料浆的浓度，最简便有效的方法就是向充

填料浆中添加适量的细粒级。料浆中合适的细粒级可起到以下作用：增强充填料浆的流动能力从而可提高输送浓度、提高充填体的强度和减少脱水。为此，我们研究提出了添加细粒级的几个方案。

细粒级料有两种来源：一种是人工细粒级，如全尾砂分级产生的溢流尾砂，或者直接来自全尾砂；另一种是自然形成的细粒级料，如淤泥、膨润土等。对于不同的细粒级料，可采用不同的细粒级添加方法来制成似膏体充填料浆。

1. 直接从细粒级仓向料浆搅拌桶添加干的细粒级

干的细粒级存放于细粒级仓，使用时经细粒级仓底部的放料口按合适的添加比例放料，然后通过皮带运输机送入搅拌桶制备似膏体充填料浆，如图 5－4－19 和表 5－4－20 所示。

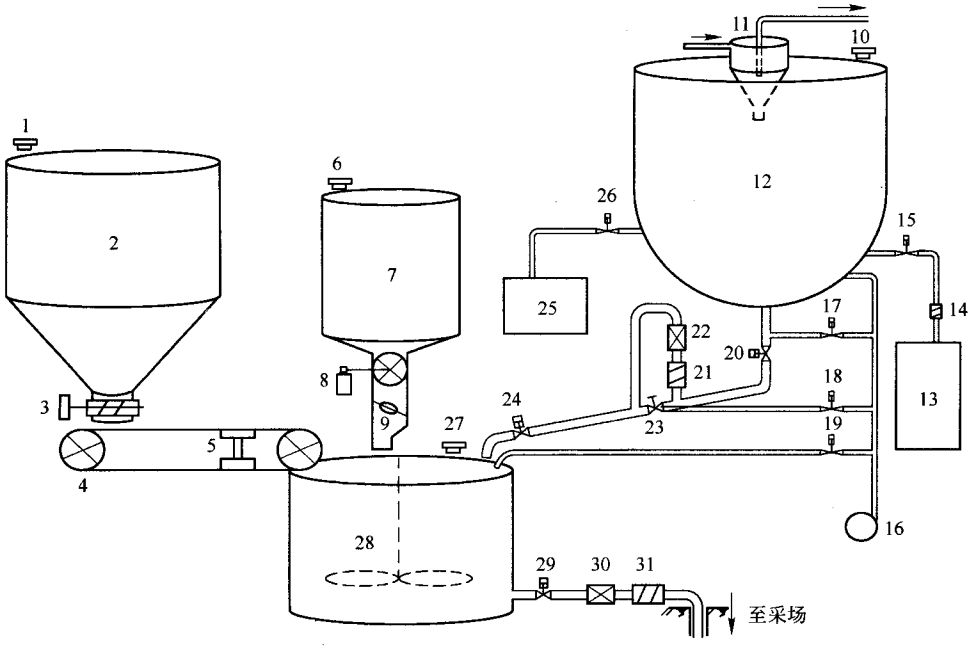


图 5－4－19　直接添加细粒级

表 5－4－20　直接添加细粒级系统组成

标　号	名　称	标　号	名　称	标　号	名　称	标　号	名　称
1,6,10,27	超声波料位计	7	胶凝材料仓	13	蒸汽锅炉	22,30	γ 射线浓度计
2	细粒级砂仓	8	叶轮给料机	14,21,31	电磁流量计	23	手动胶管阀
3	气动闸阀	9	冲量流量计	15,17,18,19,26	气动水阀	25	空气压缩机
4	皮带输送机	11	旋流器	16	水　泵	28	搅拌桶
5	电子秤	12	分级尾砂仓	20,24,29	气动胶管阀		

2. 溢流尾砂经浓缩后添加到料浆搅拌桶

首先将旋流器分级出的溢流尾砂浆送入浓密池进行浓缩，然后将浓缩后的溢流尾砂浆泵送入溢流尾砂仓进行沉淀以进一步浓缩。最后通过压缩空气或与高压水联合作用使其流态化，通过溢流尾砂仓下部的放砂管按合适的添加比例放入搅拌桶，和来自料仓的胶凝材料以及来自分级尾砂仓的分级尾砂浆混合造浆，如图 5－4－20 和表 5－4－21。

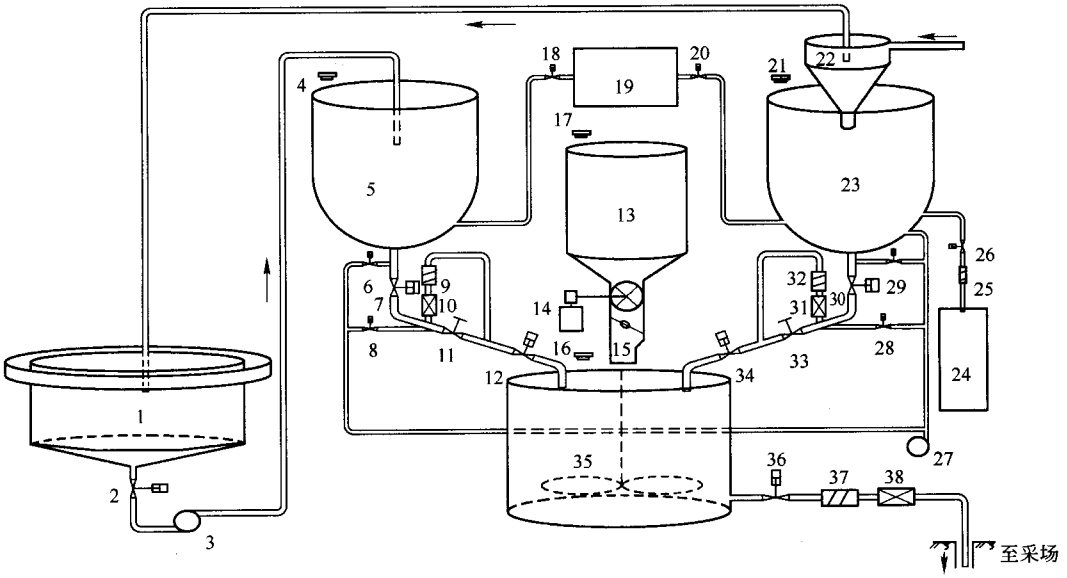


图 5－4－20　添加浓缩溢流尾砂

表 5－4－21　添加浓缩溢流尾砂系统组成

标　号	名　称	标　号	名　称	标　号	名　称	标　号	名　称
1	浓缩机	5	溢流尾砂仓	11,33	手动胶管阀	22	旋流器
2,7,12,30,34,36	气动胶管阀	6,8,18,20,26,28,29	气动水阀	13	胶凝材料仓	23	分级尾砂仓
				14	叶轮给料机	24	蒸汽锅炉
3	泥浆泵	9,25,32,37	电磁流量计	15	冲量流量计	27	水　泵
4,16,17,21	超声波料位计	10,31,38	γ 射线浓度计	19	空气压缩机	35	搅拌桶

3. 混合于一起的细粒级与胶凝材料加入搅拌桶

为了使系统简易化，可以直接将干细粒级（如膨润土）与胶凝材料按一定比例混合，然后送入胶凝材料仓，通过叶轮给料机将干细粒级与胶凝材料的混合物放入搅拌桶进行造浆，如图 5－4－21 和表 5－4－22 所示。

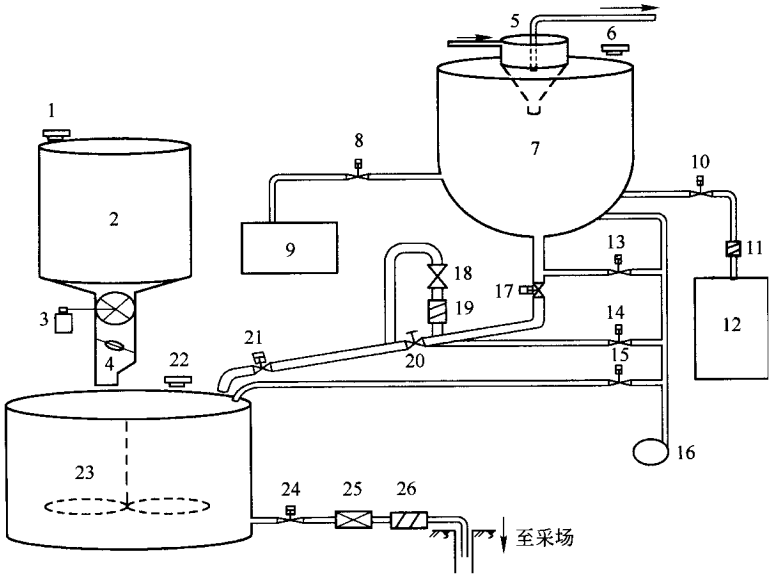


图 5－4－21　采用干细粒级与胶凝材料混合于胶凝材料仓添加细粒级

表 5－4－22　采用干细粒级与胶凝材料混合于胶凝材料仓添加细粒级系统组成

标　号	名　称	标　号	名　称	标　号	名　称	标　号	名　称
1,6,22	超声波料位计	4	冲量流量计	12	蒸汽锅炉	9	空压机
		5	旋流器	16	水　泵	23	搅拌桶
2	细粒级砂和胶凝材料仓	7	分级尾砂仓	17,21,24	气动胶管阀		
		8,10,13,14,15	气动水阀	18,25	γ射线浓度计		
3	叶轮给料机	11,19,26	电磁流量计	20	手动胶管阀		

4. 改变用于水力旋流器的工作参数以增加细粒级含量

通过调整对全尾砂浆进行分级的水力旋流器尺寸及其工作参数，以获得含更多细粒级的分级尾砂。如选用较小直径的水力旋流器，可使溢流粒度减小。增加全尾砂浆在旋流器入口处的压力则颗粒所受离心力增大使更细的颗粒抛向器壁，就会有更多更细的颗粒成为分级尾砂。此外，还可通过加大排矿口直径的方法。这些都可使分级尾砂仓中细粒级含量增加，见图 5－4－22 所示。

5. 将一定比例的全尾砂浆加入分级尾砂仓以增加细粒级的含量

由于全尾砂中含大约 25%～40%的细粒级，因此可以利用其中的细粒级。首先将部分全尾砂浆在尾砂池自然沉淀浓缩形成浓度大约 40%～50%的尾砂浆。然后通过砂浆泵按一定比例将全尾砂浆送入分级尾砂仓和分级尾砂浆进行混合，形成含有一定细粒级的分级尾砂浆。通过压缩空气和高压水使其流态化，经放砂管送入搅拌桶以制备似膏体充填料浆，如图 5－4－23 所示。

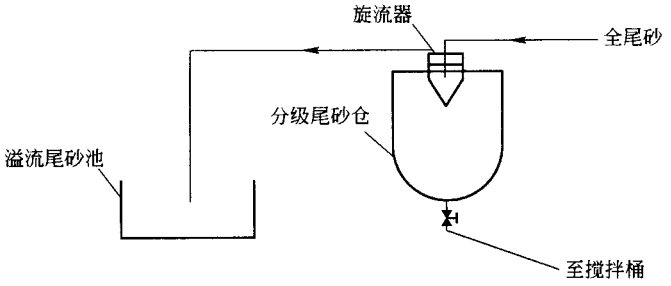


图 5－4－22　改变旋流器参数实现细粒级的添加示意图

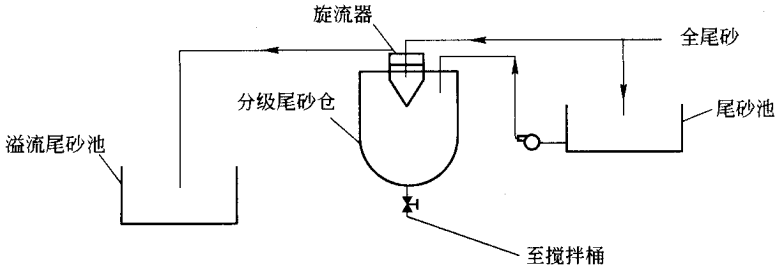


图 5－4－23　向分级尾砂仓添加全尾砂示意图

要得到合适的细粒级含量，全尾砂浆按怎样的比例和分级尾砂浆混合？下面就此进行分析。

在混合前，设全尾砂浆的浓度为 c_1，全尾砂中的细粒级含量为 p_1，分级尾砂浆的浓度为 c_2，混合后全尾砂浆占混合砂浆的比例为 t，尾砂中的细粒级含量为 s，那么可以得出下式：

$$\frac{c_1 p_1 t}{c_1 t + c_2 (1 - t)} = s$$

或者

$$t = \frac{c_2 s}{c_1 p_1 - s(c_1 - c_2)}$$

根据上式，可以很方便地得到 t，s，p_1，c_1 和 c_2 之间的关系。其中的部分计算结果如表 5－4－23、图 5－4－24。

表 5－4－23　t，s，p_1，c_1 和 c_2 参数之间的关系

s \ c_1	30%	35%	40%	45%	50%
5%	28.6%	25.5%	23.1%	21.1%	19.4%
10%	50.0%	46.2%	42.9%	40.0%	37.5%
15%	66.7%	63.2%	60.0%	57.1%	54.5%
备　注	设 $p_1 = 30\%$、$c_2 = 60\%$				

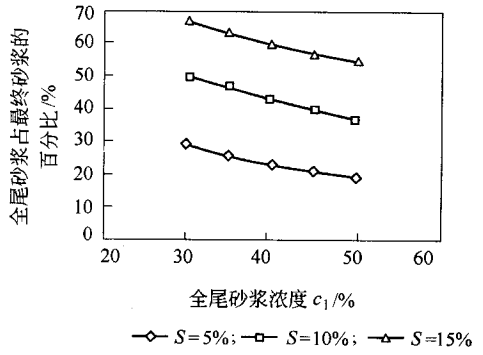


图 5－4－24　t，s，p_1，c_1 和 c_2 之间的关系

6. 溢流尾砂浆从分级尾砂仓底部喷入以增加细粒级含量

分级出的溢流尾砂浆先经浓缩机浓缩，浓度提高至 30% 左右，然后通过泥浆泵送至分级尾砂仓底部经喷嘴喷入与分级尾砂浆进行混合，形成含有适量细粒级的分级尾砂浆，见图 5－4－25 所示。

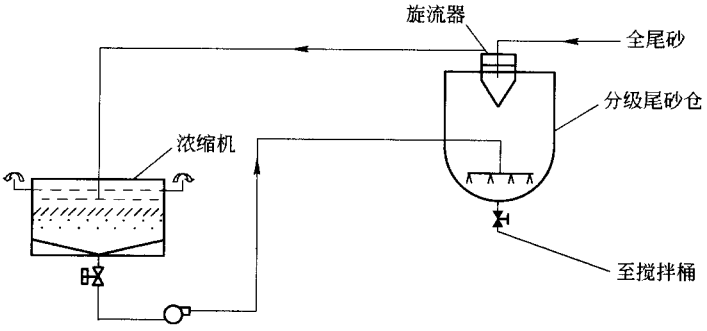


图 5－4－25　浓缩溢流尾砂浆喷入分级尾砂仓示意图

(四)惰性材料

不同充填惰性材料的物理化学特性不同，其对充填料浆的流动性和充填体强度的影响也不一样。从经济效果和环境效益来说，选用尾砂作为充填惰性材料最合适，这不仅利用了尾砂废料，而且减少了尾砂地表堆放造成的环境污染。但浓缩全尾砂在技术和经济方面都存在不少问题。而分级尾砂的浓缩比较容易，可以连续地获得惰性材料，这也是目前水力充填采用分级尾砂作惰性材料的一个重要原因。选用分级尾砂作为充填惰性材料的传统胶结充填存在井下需脱水、充填体强度低等问题。如果用全尾砂作惰性材料，由于渗透性差以致难以在井下脱水，从而带来安全隐患，并且要延长采矿周期。然而，采用全尾砂作惰性材料的膏体充填解决了井下脱水和充填体强度低的问题，但其设备投资大，膏体制备和输送又十分困难。针对传统胶结充填和膏体充填的优势和不足，

似膏体充填采用含一定量细粒级的尾砂作惰性材料，可兼有两者的优点，且综合成本低。

（五）砂浆的活化工艺技术

为了实现分级尾砂仓的连续放砂，需要对分级尾砂仓中的尾砂进行活化。活化的作用是使沉砂颗粒间能松动或松散以防板结提高流动性，使放砂流量和浓度容易控制。活化工艺如下：

首先，在分级尾砂仓中应设置虹吸排水系统，活化前将砂仓上层多余的水排除。

其次，在砂仓中设置平行于水环管的风环管并布置喷嘴。在充填之前大约 1h，先向分级尾砂仓通压缩空气。供给的压缩空气应具有足够的压力和适宜的流量，因为只有当气压能顶动沉砂的荷重和气流速度达到某一数值时，沉砂颗粒才能开始松动、松散，在小气泡的裹携和夹带下，颗粒在气流浮力作用下湍动升浮，呈活化状态。

然后用高压水与压缩空气相结合造浆放砂。

（六）控制充填料浆温度以提高充填体强度

由于以尾砂为惰性材料的充填料浆在 20℃以上时其充填体强度特性比较好，而且大于 20℃时充填体强度特性与 20℃时基本相当，因此充填料浆温度应控制在 20℃以上，当气候条件造成料浆温度低于 20℃时需对其进行加温。加温的方法可以有多种，如可对料浆的各个组分分别进行加温，或对制备后的料浆进行加温，也可对料浆中的某一主要成分超过设定温度（20℃）进行加温，然后与其它成分混合使温度均匀化而达到设定温度。考虑到分级尾砂浆是似膏体充填料浆中的最主要成分，采用超过设定温度（20℃）加热分级尾砂浆，搅拌混合后使料浆最终温度达到设定温度的方法比较容易实现，故宜采用此方法加温。

具体的加温方法为：向分级尾砂仓通过环管和喷嘴通以具有一定压力（如 5×10^5 Pa）的水蒸气（该水蒸气可以取代活化砂浆用的压缩空气，即活化砂浆时只要用水蒸气和压缩空气两者中的一种即可满足要求，向砂仓送水蒸气和压缩空气的管路也可合用），水蒸气在砂仓中向温度较低的尾砂和含在尾砂中的水先是放出汽化潜热，凝结成饱和水，饱和水温为 151.85℃，然后再降温放热至高于设定温度（20℃）的某一温度（此温度与分级尾砂对细粒级的配比及当时环境温度等因素有关），由此放出的热量与尾砂和原先含在尾砂中的水吸热相平衡，即可使分级尾砂浆的温度上升。为了用水蒸气加热分级尾砂浆，充填系统需设一台燃天然气的水管锅炉。

1. 分级尾砂浆的加热系统

用水蒸气加热分级尾砂浆系统示意图如图 5－4－26 所示。加热系统由一台燃天然气的水管锅炉、一台给水泵、一台引风机以及汽水管路等组成。给水由给水泵送至水管锅炉，锅炉将加压的水加热变成具有一定压力的水蒸气，水蒸气通过蒸汽管路输至分级

尾砂仓内的一圈集管，再经带单向阀的蒸汽喷嘴喷出，用以加热尾砂浆（尾砂制浆尚需向尾砂仓内打入压力水，水蒸气的凝结水可以作为制浆用水的其中一部分）。砂浆通过放砂管排至搅拌桶。锅炉燃烧产生的烟气通过引风机排至大气。

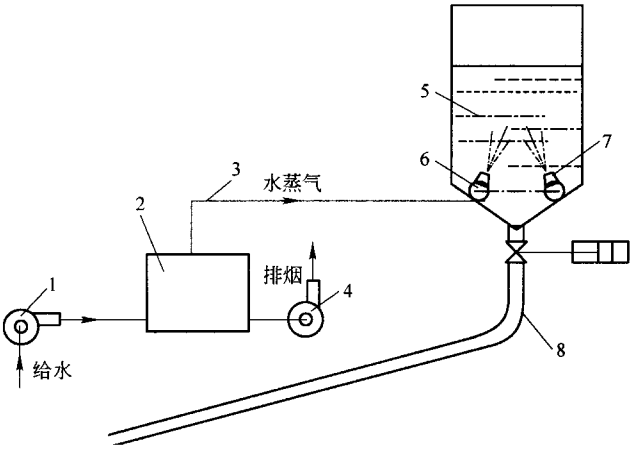


图 5－4－26　水蒸气加热分级尾砂浆系统示意图

1—给水泵；2—水管锅炉；3—蒸气管路；4—引风机；

5—分级尾砂仓；6—蒸气集管；7—带单向阀的蒸气喷嘴；8—放砂管

为防止锅炉水管结水垢，锅炉给水需进行水处理。水处理分炉外处理和炉内处理两种。小型锅炉可以采用炉内加药水处理。利用加入炉内的碱性药剂，使炉水维持一定的碱度，而使给水中所有结垢盐类由于和碱性药剂互起作用而转化成泥渣 $CaCO_3$、$Mg(OH)_2$ 等而沉积出来，再借助锅炉排污放水，将沉渣排出锅炉之外。

2. 热平衡、水蒸气消耗量和天然气消耗量计算

A　热平衡计算

(1) 1kg 水加热成饱和水蒸气吸收热量

$$q_{w吸} = C_w(t_w - t_{w0}) + \gamma \tag{4-1}$$

式中　$q_{w吸}$ ——1kg 水加热变成饱和水蒸气吸收的总热量，kJ/kg；

C_w ——水的平均比热；

t_w ——水在给定压力下的饱和温度，℃；

t_{w0} ——加热前水的温度，℃；

γ ——汽化潜热，kJ/kg，水蒸气的平均汽化潜热 $\gamma = 2258.2$kJ/kg。

(2) 1kg 饱和水蒸气变成某一温度热水放出热量

$$q_{w放} = \gamma + C_w(t_w - t_{w1}) \tag{4-2}$$

式中　$q_{w放}$——1kg 饱和水蒸气变成某一温度 t_{w1} 热水放出的总热量，kJ/kg；

t_{w1}——水的最终温度，℃。

(3)制备 1kg 分级尾砂浆吸收热量

$$q_s = x_1 C_s (t_s - t_{s0}) + (1 - x_1 - g_w) C_w (t_s - t_{s0}) \tag{4-3}$$

式中　q_s——制备 lkg 分级尾砂浆吸收热量，kJ/kg；

g_w——制备 1kg 分级尾砂浆所需的饱和蒸气量，kg，见式(4-4)；

x_1——分级尾砂浆浓度；

C_s——尾砂的比热，$C_s = 0.9\text{kJ/(kg·K)}$；

t_s——尾砂的最终温度，℃；

t_{s0}——尾砂的初始温度，℃。

(4)制备 1kg 分级尾砂浆所需的饱和水蒸气量

设加热 1kg 分级尾砂浆所需的饱和水蒸气量为 g_w，根据饱和水蒸气放出热量等于分级尾砂浆吸收热量的原则，可列出如下热平衡方程式：

$$g_w q_{w放} = q_s$$

即　$g_w[\gamma + C_w(t_w - t_s)] = x_1 C_s (t_s - t_{s0}) + (1 - x_1 - g_w) C_w (t_s - t_{s0})$

可得

$$g_w = \frac{x_1 C_s (t_s - t_{s0}) + (1 - x_1) C_w (t_s - t_{s0})}{\gamma + C_w (t_w - t_s) + C_w (t_s - t_{s0})} \tag{4-4}$$

(5)加热分级尾砂浆最终温度 t_s 的确定

设由分级尾砂浆和溢流尾砂浆组成的混合砂浆最终温度定为 20℃，分级尾砂浆在混合砂浆中所占的比例为 k。

1kg 分级尾砂浆由温度 t_s 降至 20℃放出的热量为

$$q_{s1} = x_1 C_s (t_s - 20) + (1 - x_1) C_w (t_s - 20) \tag{4-5}$$

1kg 溢流尾砂浆由温度 t_{s0} 升至 20℃吸收的热量为

$$q_{s2} = x_2 C_s (20 - t_{s0}) + (1 - x_2) C_w (20 - t_{s0}) \tag{4-6}$$

式中　x_2——溢流尾砂浆浓度。

配比为 k 的分级尾砂浆最终温度 t_s 的确定。根据分级尾砂浆放出的热量等于溢流尾砂浆吸收的热量这一原则，可列出下列热平衡方程式

$$kq_{s1} = (1 - k) q_{s2}$$

即

$$k[x_1 C_s (t_s - 20) + (1 - x_1) C_w (t_s - 20)]$$
$$= (1 - k)[x_2 C_s (20 - t_{s0}) + (1 - x_2) C_w (20 - t_{s0})]$$

可得

$$t_s = 25 + \frac{(1-k)[x_2 C_s(20-t_{s0}) + (1-x_2) C_w(20-t_{s0})]}{k[x_1 C_s + (1-x_1) C_w]} \tag{4-7}$$

B　水蒸气消耗量计算

由于在混合砂浆中分级尾砂浆所占的比例为 k，故制备 1kg 砂浆所需的饱和蒸气量 g_{w1} 为

$$g_{w1} = kg_w \tag{4-8}$$

设混合砂浆流量为 Q_s，则水蒸气消耗总量 G_w 为

$$G_w = Q_s g_{w1} \tag{4-9}$$

C　天然气消耗量

根据式(4-1)可得加热饱和水蒸气吸收总热量 $Q_{w吸}$ 为

$$Q_{w吸} = G_w[C_w(t_w - t_{w0}) + \gamma] \tag{4-10}$$

天然气消耗量 V_g 为

$$V_g = \frac{Q_{w吸}}{Q^y_{dw} \cdot \eta} = \frac{G_w[C_w(t_w - t_{w0}) + \gamma]}{Q^y_{dw} \cdot \eta} \tag{4-11}$$

式中　Q^y_{dw}——天然气的低发热量，取 $Q^y_{dw} = 35600 kJ/m^3$；

η——水管锅炉的热效率，取 $\eta = 0.9$。

D　综合参数表和图

设分级尾砂浆和溢流尾砂浆加热前的初始温度 t_{s0} 为 7℃、11℃和 15℃三种情况。混合砂浆的流量 Q_s 为 200t/h、250t/h 和 300t/h 三种情况。根据上述式(4-1)～式(4-11)有关计算公式，可得表 5-4-24 所示综合参数表。

表 5-4-24　综合参数表

分级尾砂浆			溢流尾砂浆			混合砂浆			水蒸气（温度 151.85℃）消耗量	天然气消耗量
浓度/%	比例/%	温度/℃	浓度/%	比例/%	温度/℃	浓度/%	温度/℃	流量/t·h^{-1}	/t·h^{-1}	/Nm^3·h^{-1}
72	95	20.96	50	5	7	71	20	200/250/300	1.68/2.1/2.52	150/188/226
	90	21.71	62	10						
	86	22.38	65	14						
	80	23.54	67	20						
	75	24.65	68	25						
	67	26.75	69	33						
	95	20.66	50	5	11				1.17/1.47/1.76	104/130/156
	90	21.18	62	10						
	86	21.65	65	14						

分级尾砂浆			溢流尾砂浆			混合砂浆			水蒸气（温度 151.85℃）消耗量 /t·h⁻¹	天然气消耗量 /Nm³·h⁻¹
浓度 /%	比例 /%	温度 /℃	浓度 /%	比例 /%	温度 /℃	浓度 /%	温度 /℃	流量 /t·h⁻¹		
72	80	22.45	67	20	11	71	20	200/250/300	1.17/1.47/1.76	104/130/156
	75	23.22	68	25						
	67	24.67	69	33						
	95	20.37	50	5	15				0.66/0.82/0.98	58/72/87
	90	20.66	62	10						
	86	20.92	65	14						
	80	21.36	67	20						
	75	21.79	68	25						
	67	22.60	69	33						
74	95	20.94	54	5	7	73	20	200/250/300	1.62/2.03/2.43	145/181/218
	90	21.72	64	10						
	86	22.39	67	14						
	80	23.55	69	20						
	75	24.66	70	25						
	95	20.65	54	5	11				1.13/1.41/1.69	100/126/151
	90	21.19	64	10						
	86	21.66	67	14						
	80	22.46	69	20						
	75	23.22	70	25						
	95	20.36	54	5	15				0.63/0.79/0.95	56/70/84
	90	20.66	64	10						
	86	20.92	67	14						
	80	21.37	69	20						
	75	21.79	70	25						
76	95	20.98	54	5	7	75	20	200/250/300	1.56/1.95/2.34	140/175/210
	93	21.25	62	7						
	91	21.56	65	9						
	89	21.89	67	11						
	86	22.40	69	14						
	83	22.97	70	17						
	95	20.68	54	5	11				1.09/1.36/1.63	97/121/145
	93	20.86	62	7						
	91	21.08	65	9						
	89	21.31	67	11						

分级尾砂浆			溢流尾砂浆			混合砂浆			水蒸气（温度 151.85℃）消耗量 /t·h⁻¹	天然气消耗量 /Nm³·h⁻¹
浓度 /%	比例 /%	温度 /℃	浓度 /%	比例 /%	温度 /℃	浓度 /%	温度 /℃	流量 /t·h⁻¹		
76	86	21.66	69	14	11	75	20	200/250/300	1.09/1.36/1.63	97/121/145
	83	22.06	70	17						
	95	20.38	54	5	15				0.61/0.76/0.91	54/67/81
	93	20.48	62	7						
	91	20.60	65	9						
	89	20.73	67	11						
	86	20.92	69	14						
	83	21.14	70	17						

由表 5－4－24 可以看出，加热分级尾砂浆所需的水蒸气消耗量及天然气消耗量受分级尾砂浆的初始温度影响很大，图 5－4－26 为天然气消耗量与尾砂浆初始温度的关系（分级尾砂浆浓度为 76%时）。

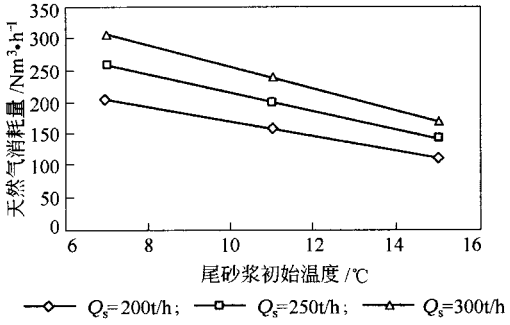


图 5－4－27　天然气消耗量与尾砂浆初始温度关系

三、管输参数及能力的计算

（一）似膏体充填料管输流变特性

1. 似膏体的流型

为了分析似膏体的流型，采用 Haake 型旋转粘度计对似膏体的流变特性进行了测试。图 5－4－28 是浓度为 75%、胶凝材料含量为 3%、惰性材料为焦家金矿全尾砂的似膏体流变特性曲线。从图可以看出，似膏体的流型属于宾汉塑性流体。

2. 似膏体充填料管输阻力系数

通过对似膏体流变特性的试验表明似膏体的流型为宾汉体，对于宾汉体其悬液在管中的流速分布如图 5－4－29 所示。

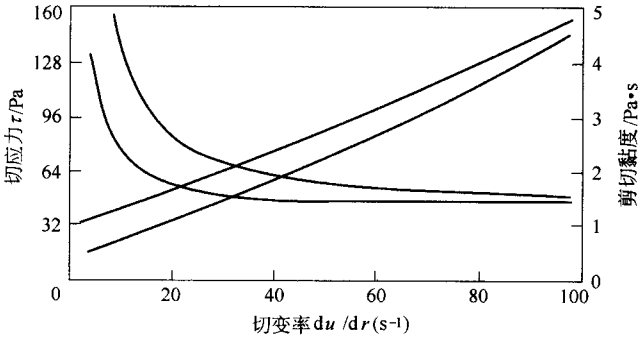


图 5 – 4 – 28　**用** Haake **粘度计测定** 75% **浓度时似膏体的流变特性**

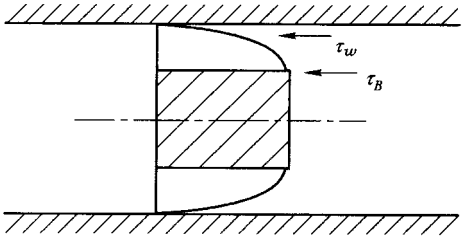


图 5 – 4 – 29　**宾汉体层流流速分布**

在管壁处的切应力 τ_w **为**

$$\tau_w = \eta\left(\frac{8u}{D}\right) + \frac{4}{3}\tau_B \tag{4-12}$$

式中　τ_w **——管壁处的切应力,**Pa**;**

τ_B **——浆体的屈服应力,**Pa**;**

η **——浆体的塑性粘度,**Pa·s**;**

D **——管道内径,**m**;**

u **——浆体的平均流速,**m/s**。**

在管道输送中,摩擦阻力系数

$$f = \frac{4}{D}\tau_w = \frac{16}{3D}\tau_B + \eta\frac{32u}{D^2} \tag{4-13}$$

(二)似膏体充填管输系统平衡计算

1. **似膏体充填料管道输送模型**

似膏体的管输模型如图 5 – 4 – 30 **所示。**

在正常工作阶段,可以近似地认为似膏体的运动属于稳定流(即速度、压力及浓度等运动要素不随时间变化),因此则可按照均质流体导出伯努利方程:

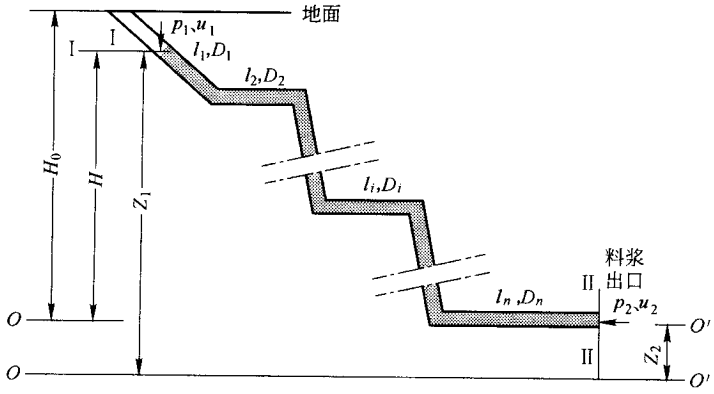


图 5－4－30　似膏体充填料管道输送模型

H_0—从地面到井下 $O-O$ 水平的管道垂直高度，m；H—似膏体充填料在管道中的垂直高度，m；D_1、D_2、D_i、D_n—第 1、2、i、n 种管道的直径，m；l_1、l_2、l_i、l_n—第 1、2、i、n 种管道的长度，m；p_1—管道中似膏体Ⅰ－Ⅰ断面上的表面压力，Pa；u_1—管道中似膏体Ⅰ－Ⅰ断面上料浆的平均流速，m/s；p_2—管道出口处似膏体Ⅱ－Ⅱ断面上的表面压力，Pa；u_2—管道出口处似膏体Ⅱ－Ⅱ断面上料浆的平均流速，m/s

$$\rho g\left(Z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{u_1^2}{2g}\right)=\rho g\left(Z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{u_2^2}{2g}\right)+h_w \tag{4-14}$$

式中　Z_1、Z_2——Ⅰ及Ⅱ两断面形心对基准面 $O'-O'$ 的几何高度；

h_w——由断面Ⅰ到断面Ⅱ的似膏体的能量损失，MPa；

ρ——似膏体的密度，kg/m^3；

g——重力加速度，$9.8m/s^2$。

在式中，可以近似地认为 $p_1=p_2$，则(4－14)简化为

$$\rho g\left\{(Z_1-Z_2)+\frac{1}{2g}(u_1^2-u_2^2)\right\}=h_w \tag{4-15}$$

一般 $0<u<2.0m$，因此，$\left|\frac{1}{2g}(u_1^2-u_2^2)\right|<0.204m$。而 Z_1-Z_2 一般达到 100～1000m。因此与 Z_1-Z_2 相比，$\frac{1}{2g}(u_1^2-u_2^2)$ 可忽略不计。因此，式(4－15)可以简化为

$$\rho g(Z_1-Z_2)=h_w \tag{4-16}$$

从图中的 Z_1 和 Z_2 的定义，可以得到，$Z_1-Z_2=H$。由式(4－16)得到

$$\rho gH=h_w \tag{4-17}$$

此外，h_w 主要由管路的沿程阻力损失 h_y 和局部阻力损失 h_j 两部分组成，即

$$h_w = h_y + h_j \tag{4-18}$$

式中　h_y——管道的沿程阻力损失，Pa；

$$h_y = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot l_i \tag{4-19}$$

式中　l_i——管径为 D_i 的管道长度，m；

f_i——管径为 D_i 的管道摩擦阻力系数，Pa/m；

h_j——管路局部阻力损失，一般 $h_j = (0.05 \sim 0.15) h_y$，这里取 $h_j = 0.1 h_y$。

因此，$h_w = 1.1 \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot l_i$，代入式(4-34)可以得到

$$\rho g H = 1.1 \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot l_i \tag{4-20}$$

$$f_i = \frac{16\tau_B}{3D_i} + \frac{32\eta}{D_i^2} u_i \tag{4-21}$$

$u_i = \frac{4Q}{\pi D_i^2}$ 代入公式(4-21)得到

$$f_i = \frac{16\tau_B}{3D_i} + \frac{128\eta}{\pi \cdot D_i^4} Q \tag{4-22}$$

若要保证满管流，则 $H = H_0$，式(4-20)为

$$\rho g H_0 = 1.1 \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot l_i \tag{4-23}$$

式(4-21)代入式(4-23)，得到

$$Q = \frac{0.022\rho g H_0 - 0.131\tau_B \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{D_i}}{\eta \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{D_i^4}} \tag{4-24}$$

式中　Q——似膏体体积流量，m^3/s；

D_i——第 i 种管道内径，m。

2. 系统参数设计

国外某矿充填管路系统如图 5-4-31。充填管路参数见表 5-4-25 和表 5-4-26。

表 5-4-25　充填系统管路铺设明细表

管　段	垂直高度 /in	长　度 /in	管内径 /in
AB	1420	2320	6.0
BC	0	1027	6.0
CD	2351	2910	3.875

管　段	垂直高度 /in	长　度 /in	管内径 /in
DE	0	281	6.0
EF	1231	1645	3.875
FG	15	1269	6.0
GH	364	364	4.0
HI	15	215	6.0
IJ	174	226	3.875
JK	15	45	5.0
KM	172	179	3.875
MN	15	37	5.0
NO	174	181	3.875
OP	0	2040	4.0

注：1in = 25.4mm，下同。

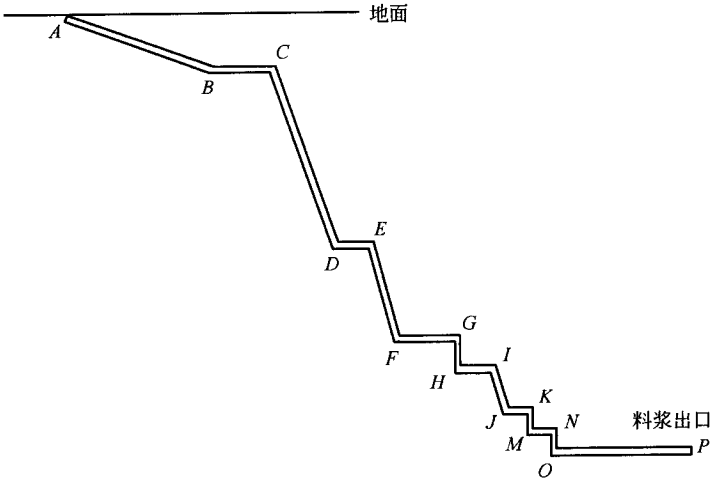


图 5 – 4 – 31　**国外某矿充填系统图**

表 5 – 4 – 26　**充填管路参数**

管型/in	$D_1 = 3.875$	$D_2 = 4$	$D_3 = 5$	$D_4 = 6.065$
对应管型的管道长度/in	$l_1 = 5141$(1567m)	$l_2 = 2404$(732.7m)	$l_3 = 82$(25m)	$l_4 = 4112$(1558.1m)
备注	$\rho = 1850 kg/m^3$，$H_0 = 5946$(1812.3m)			

根据该矿充填管路参数、实验室测得的似膏体粘性参数(见表 5 – 4 – 27**)和式(**5 – 4 – 24**)，可得到在不同具体条件下流量随似膏体浓度的变化关系(见表** 5 – 4 – 28**、图** 5 – 4 – 32**)。**

表 5－4－27　似膏体的粘性参数

料浆浓度	73%	74%	75%	料浆浓度	73%	74%	75%
浆体的屈服应力 τ_B /$\times 10^4$ Ps	6.49	9.412	11.07	浆体的塑性粘度 η /$\times 10^4$ Pa·s	0.496	0.65	0.821

表 5－4－28　似膏体流量随浓度的变化

料浆浓度	73%	74%	75%
管路料浆流量/t·h^{-1}	341.1	261.3	210.1
管路固料流量/t·h^{-1}	249.0	193.3	157.6
备　注	全砂土固结材料含量 3%，惰性材料为某矿分级尾砂，其中溢流尾砂含量 10%，养护温度 25℃		

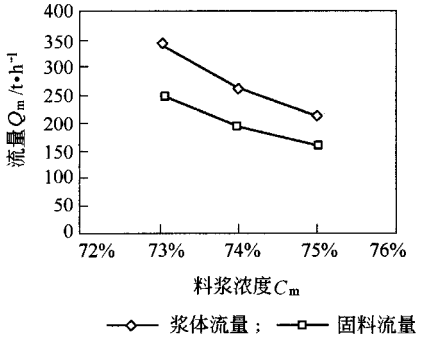


图 5－4－32　流量随似膏体浓度的变化关系

该矿采用传统胶结充填的料浆流量随浓度变化关系如表 5－4－29。从表 5－4－29 和表 5－4－28 的对比，我们可以看出，在不大于 72%浓度的条件下，传统胶结充填的流量还是相当大，当达到 73%的浓度时，流量急剧下降到 167t/h。但对于似膏体充填，73%浓度的料浆，似膏体的流量仍保持在 341.1t/h，是前者的近 2 倍。

表 5－4－29　传统胶结充填流量随浓度的变化

料浆浓度	70%	72%	73%	料浆浓度	70%	72%	73%
管路料浆流量/t·h^{-1}	381	347	167	管路固料流量/t·h^{-1}	267	250	122
备　注	水泥含量 3%，惰性材料为某矿分级尾砂，不含溢流尾砂，养护温度 25℃						

第五章　其他常用充填采矿新技术

第一节　单层充填采矿法

单层充填采矿法的矿块结构如图 5－5－1 所示。这种采矿方法用于缓倾斜薄矿体中，用矿块倾斜全长的壁式回采面沿走向方向、依次按矿体全厚回采，随着工作面的推进，有计划地用水力或胶结充填采空区，以控制顶板崩落。由于采用壁式工作面回采，也称为壁式充填法。

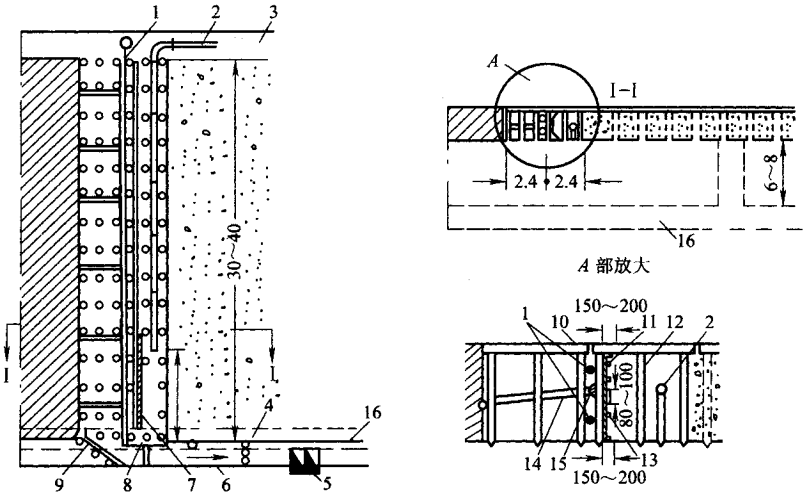


图 5－5－1　单层充填采矿法

1—钢绳；2—充填管；3—上阶段脉内巷道；4—半截门子；5—矿石溜井；6—切割平巷；7—帮门子；8—堵头门子；9—半截门子；10—木梁；11—木条；12—立柱；13—砂门子；14—横梁；15—半圆木；16—脉外巷道

我国湖南湘潭锰矿是采用这种采矿法回采的一个典型例子。该矿床为缓倾斜为主的似层状薄矿体。走向长2500m，倾斜延深200～600m，倾角30°～70°，厚度0.8～3m；矿石稳固，有少量夹石层；顶板为黑色页岩，厚3～70m，不透水，含黄铁矿，易氧化自燃，且不稳固；其上部为富含水的砂页岩，厚70～200m，不允许崩落；底板为砂岩，坚硬稳固。

一、结构和参数

矿块斜长30～40m，沿走向长60～80m。控顶距2.4m，充填距2.4m，悬顶距4.8m，矿块间不留矿柱，一个步骤回采。

二、采准和切割

由于底板起伏较大，顶板岩石有自燃性，阶段运输巷道掘在底板岩石中，距底板8～10m。在矿体内布置切割平巷，作为崩矿的自由面，同时可用于行人、通风和排水等。上山多布置在矿块边界处。沿走向每隔15～20m掘矿石溜井，联通切割平巷与脉外运输巷道。不放矿时，矿石溜井可作为通风与行人的通道。

三、回采

长壁工作面沿走向一次推进2.4m，沿倾斜每次的崩矿量根据顶板的允许暴露面积决定，一般为2m左右。用浅孔凿岩，孔深1m左右。崩下的矿石用2JP－13型电耙运搬，先将矿石运至切割平巷，再倒运至矿石溜井。台班效率25～30t。

由于顶板易冒落，要求边出矿边架木棚，其上铺背板和竹帘。当工作面沿走向推进4.8m时，应充填2.4m。充填前应做好准备工作，包括清理场地，架设充填管道，打砂门子和挂砂帘子等。砂门子分帮门子、堵头门子、和半截门子等，其主要作用是滤水和拦截充填料，使充填料堆积在预定的充填地点。

水力充填是逆倾斜由下而上间断进行，即由下向上分段拆除支柱和进行充填。每一分段的长度和拆除支柱的数量根据顶板稳固情况而定。也可以不分段一次完成充填，但支柱回收率很低。

采用胶结充填时，一般用采矿巷道回采矿石，其矿壁起模板的作用。

四、评价

当开采水平或缓倾斜薄矿体时，在顶板岩层不允许崩落的复杂条件下，单层充填法是惟一可用的采矿方法。这种采矿法矿石回采率较高（94%左右），贫化率较低（7%左右），但采矿工效较低（4t/工班），坑木消耗量大（19.2m^3/kt）。

第二节　上向水平分层充填采矿法

这种方法一般将矿块划分为矿房和矿柱，第一步回采矿房，第二步回采矿柱。回采矿房时，自下向上水平分层进行，随工作面向上推进，逐步充填采空区，并留出继续上采的工作空间。充填体维护两帮围岩，并作为上采的工作平台。崩落的矿石落在充填体的表面上，用机械方法将矿石运至溜井中。矿房回采到最上面分层时，进行接顶充填。矿柱则在采完若干矿房或全阶段采完后，再进行回采。回采矿房的充填方法，可用干式充填、水力充填或胶结充填。干式充填方法目前应用很少。

一、水力充填

1. 矿块结构和参数

矿体厚度不超过 10～15m 时，矿房的长度沿走向布置；超过 10～15m 时，矿房垂直走向布置。矿房沿走向布置的长度，一般为 30～60m，有时达 100m 或更大。垂直走向布置矿房的长度，一般控制在 50m 以内，此时矿房宽度为 8～10m。

阶段高度一般为 30～60m。如果矿体倾角大，倾角和厚度变化较小，矿体形态规整，则可采用较大的阶段高度。

间柱的宽度取决于矿石和围岩的稳固性以及间柱的回采方法。用充填法回采间柱时，其宽度为 6～8m，矿岩稳固性较差时取大值。阶段运输巷道布置在脉内时，一般需留顶柱和底柱。顶柱厚 4～5m，底柱高 5m。为减少矿石损失和贫化，也有用混凝土假巷，以代替矿石矿柱。

2. 采准和切割工作

在薄和中厚矿体中，掘进脉内运输巷道；在厚矿体中，掘进脉外沿脉巷道和穿脉巷道，或上、下盘沿脉巷道和穿脉巷道(图 5－5－2)。

在每个矿房中至少布置两个溜矿井、一个顺路人行天井(兼作滤水井)和一个充填天井。溜矿井用混凝土浇灌，壁厚 300mm，圆形内径为 1.5m。人行滤水井用预制钢筋混凝土构件砌筑(图 5－5－3)，或浇灌混凝土(预留泄水小孔)。充填天井断面为 2m×2.4m，内设充填管路和人行梯子等，是矿房的安全出口，其倾角为 80°～90°。

在底柱上面掘进拉底巷道，并以此为自由面扩大至矿房边界，形成拉底空间，再向上挑顶 2.5～3m，并将崩下的矿石经溜矿井放出，形成 4.5～5m 高的拉底空间后，即可浇灌

钢筋混凝土底板。底板厚 0.8～1.2m，配备双层钢筋，间距 700mm。其结构如图 5－5－4 所示。

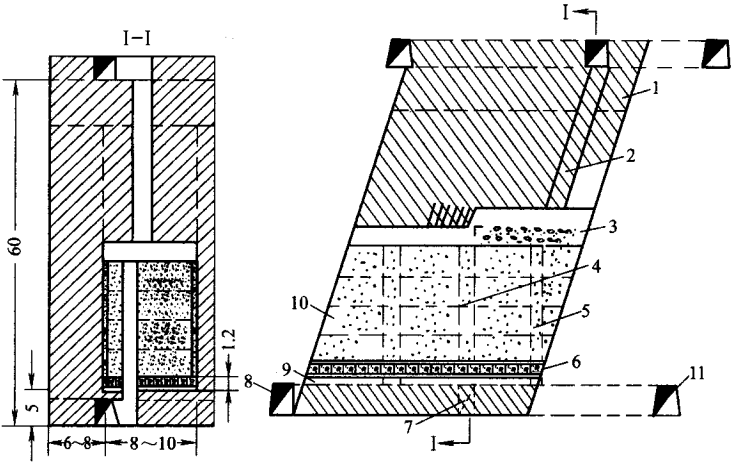


图 5－5－2　上向水平分层水力充填采矿法

1—顶柱；2—充填天井；3—矿石堆；4—人行滤水井；5—放矿溜井；6—主副钢筋；7—人行滤水井通道；8—上盘运输巷道；9—穿脉巷道；10—充填体；11—下盘运输巷道

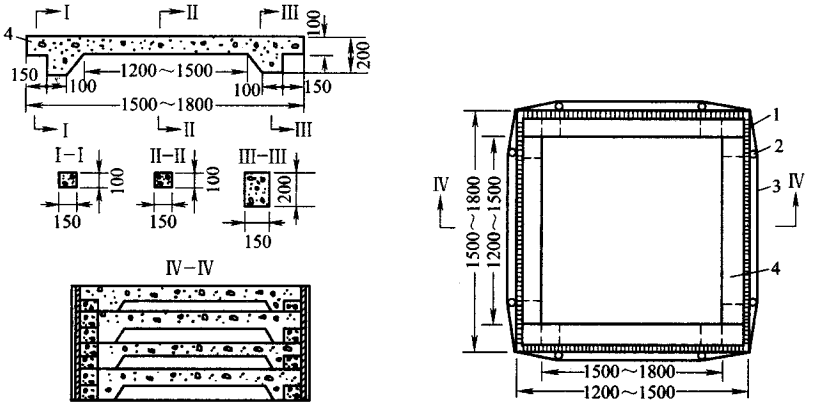


图 5－5－3　钢筋混凝土预制件结构的人行滤水井

1—草袋；2—固定木条；3—箍紧铁丝；4—混凝土预制件

3. 回采工作

用浅孔落矿，回采分层高为 2～3m。当矿石和围岩很稳固时，可以增加分层高度（达 4.5～5m），用上向孔和水平孔两次崩矿，或者打上向中深孔一次崩矿，形成的采空区可高达 7～8m。

崩落的矿石，一般用电耙出矿。近年来，国内外广泛使用装运机或铲运机装运矿石。

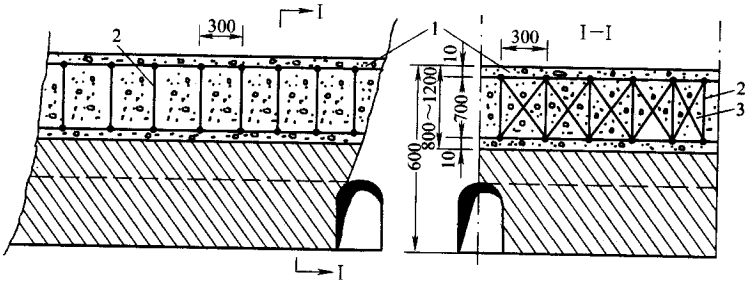


图 5－5－4　钢筋混凝土底板结构图

1—主钢筋(ø12mm)；2、3—副钢筋(ø8mm)

矿石出完后，清理底板上的矿粉，然后进行充填。充填前要进行浇灌溜矿井、砌筑(或浇灌)人行滤水井和浇灌混凝土隔墙等工作。先用预制的混凝土砖(规格为 300mm × 200mm × 500mm)砌筑隔墙的外层，然后浇灌 0.5m 厚的混凝土，形成隔墙的内层，其总厚度为 0.8m。混凝土隔墙的作用，主要是为第二步骤回采间柱创造良好的回采条件，以保证作业安全和减少矿石损失与贫化。

目前广泛使用选矿厂脱泥尾砂或冶炼厂的炉渣，沿直径 100mm 的管道水力输送到工作面，充填采空区。充填料中的水渗透后经滤水井流出采场，充填料沉积在采场内，形成较密实的充填体。

为防止崩落的矿粉渗入充填料以及为出矿创造良好的条件，在每层充填体的表面铺设 0.15～0.2m 厚的混凝土底板。1 天后即可在其上凿岩，2～3 天后即可进行落矿或行走自行设备。

二、胶结充填

由于水力充填回采工艺较为复杂(需砌筑溜矿井和人行滤水井、构筑混凝土隔墙、铺设混凝土底板等)，从采场排除的泥水污染巷道，水沟和水仓清理工作量大，以及回采矿柱的安全问题和充填体的压缩沉降问题等，均未得到很好解决，因而不能根本防止岩石移动。

为了简化回采工艺，防止井下污染和减少清理工作量，较好地保护地表及上覆岩层，近年来国内外金属矿山推广应用胶结充填采矿法(图 5－5－5)。

从图 5－5－5 可以看出，胶结充填方案的矿块采准、切割和回采等与水力充填方案基本相同，区别仅在于顺路行人天井不需要按滤水条件构筑，溜矿井和行人天井在充填时只需立模板就可形成，因为胶结充填不必构筑隔墙、铺设分层底板和砌筑人工底柱。

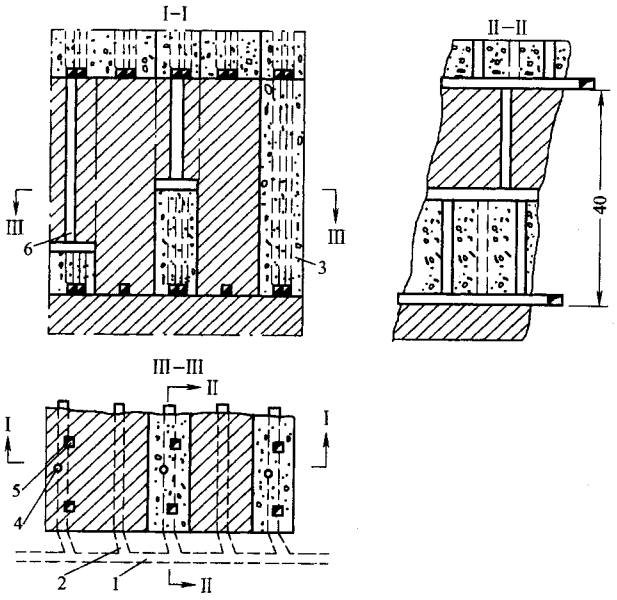


图 5－5－5　胶结充填法的典型方案

1—运输巷道；2—穿脉巷道；3—胶结充填体；4—溜矿井；5—行人天井；16—充填天井

由于胶结充填成本很高，第一步回采应取较小尺寸，但所形成的人工矿柱必须保证第二步回采的安全；第二步可以采用水力充填回采，故可选取较大的尺寸。

为了较好地保护地表和上覆岩层不移动，必须很好解决胶结充填接顶问题。常用的接顶方法有人工接顶和砂浆加压接顶。人工接顶就是将最上部一个充填分层，分为 1.5m 宽的分条，逐条浇注。浇注前先立 1m 多高的模板，随充填体的加高逐渐加高模板。当充填体距顶板 0.5m 时，用石块或混凝土砖加砂浆砌筑接顶，使残余空间完全充满。这种方法接顶可靠，但劳动强度大，效率低，木材消耗也大。

砂浆加压接顶是用液压泵将砂浆沿管路压入接顶空间，使接顶空间填满。在充填前必须做好接顶空间的封闭，包括堵塞顶板和围岩中的裂缝，以防砂浆流失。体积较大的空间（大于 30～100m^3），如有打垂直钻孔的条件，可采用垂直管道加压接顶；反之，则采用水平管道加压接顶。

此外，我国还做过混凝土泵和混凝土浇注机风力接顶的试验，接顶效果良好。在日本采用喷射式接顶充填，将充填管道铺设在接顶空间的底板上，适当加大管道中砂浆流的残余压力，使排除的砂浆具有一定的压力和速度，以形成向上的砂浆流，使充填料填满接顶空间。

三、评价

充填采矿法最突出的优点是矿石损失贫化小，但效率低，劳动强度大。应用水力充

填和胶结充填技术，以及回采工作使用无轨自行设备，使普通充填采矿法提高到机械化充填采矿法的新水平，进入高效率采矿方法行列，其使用范围不断扩大，而且有进一步发展的趋势。

回采工作使用自行设备（凿岩台车、铲运机等），要求开掘斜坡道，能使这些设备进入回采分层，这就改变了过去充填法的采准方式，增大了沿走向布置的矿块长度（达 150～600m 或更大）或采用垂直走向布置矿房和矿柱的采区开采形式，使采场结构发生较大的变化。

胶结充填虽然克服了水力充填的某些缺点，但还存在以下问题：

（1）充填成本高。据统计，水力充填费用占采矿直接成本的 15%～25%，而胶结充填则占 35%～50%。成本高的原因是采用价格较贵的水泥和采用压气输送胶结充填料。因此，应寻求廉价的水泥代用品或采用较小灰砂比（1∶25～1∶32），以及采用胶结材料输送新方法。

（2）充填系统复杂。我国一般先用胶结充填回采矿房，然后用水力充填回采间柱，这就使充填系统和生产管理复杂化。如果两个步骤都用胶结充填，成本就要增高。应进行技术经济分析和研究，求得合理的技术经济效果。

（3）阶段间矿柱回采困难。水力或胶结充填都为间柱回采创造了安全和方便条件，但顶底柱回采仍很困难。我国使用充填法的矿山都积压了大量的顶底柱未采。提高人工底柱建造速度，以人工底柱代替矿石底柱，是解决这个问题的有效途径。

第三节　上向倾斜分层充填采矿法

此法与上向水平分层充填采矿法的区别是，用倾斜分层（倾角近 40°）回采，在采场内矿石和充填料的运输主要靠重力。这种采矿方法只能用于干式充填。

过去，这种采矿方法以矿块回采（图 5－5－6）。充填料自充填井溜至倾斜工作面，自重铺撒。铺设垫板后进行落矿，崩落的矿石靠自重溜入溜矿井，经漏口闸门装入矿车。在矿车内，回采分为三个阶段，首先回采三角形底部，以形成斜工作面，然后进行正常倾斜工作面的回采，最后采出三角形顶部矿石。

应用自行设备后，倾斜分层充填采矿法改为沿全阶段连续回采（图 5－5－7）。最初只需掘进一个切割天井，形成倾斜工作面后，沿走向连续推进。崩下的矿石沿倾斜面自重溜下，用自行装运设备运出。充填料从回风水平用自行设备运至倾斜面靠自重溜下。

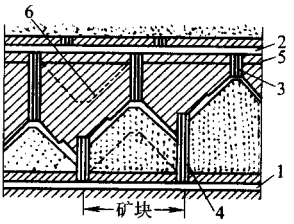


图 5－5－6　矿块回采倾斜分层充填法

1—运输巷道；2—回风巷道；3—充填天井；4—行人、溜矿井；5—顶柱；6—倾斜回采工作面上部边界

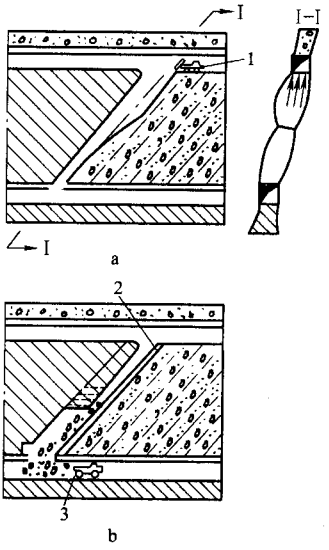


图 5－5－7　连续回采倾斜分层充填采矿法

a—充填阶段；b—落矿阶段

1—自行矿车；2—垫板；3—自行装运设备

随着上向水平分层充填采矿法的机械化程度的提高，利用重力运搬矿石和充填料的优越性越来越不突出。倾斜分层回采的使用条件较严格（如，要求矿体形态规整；中厚以下矿体，倾角应大于 60°～70°等），铺设垫板很不方便，以及不能使用水力和胶结充填等，矿块回采的倾斜分层充填采矿法，将被上向水平分层充填采矿法所代替。连续回采倾斜分层方案，可能还会采用。

第四节　下向分层充填采矿法

下向分层充填采矿法用于开采矿石很不稳固或矿石和围岩均很不稳固、矿石品

位很高或价值很高的有色金属或稀有金属矿体。这种采矿方法的实质是：从上往下分层回采和逐层充填，每一分层的回采工作是在上一分层人工假顶的保护下进行。回采分层为水平的或与水平成 4°～10°（胶结充填）或 10°～15°（水力充填）倾斜。倾斜分层主要是为了充填接顶，同时也有利于矿石运搬，但凿岩与支护作业不如水平分层方便。

下向分层充填法按充填材料可划分为水力充填和胶结充填两种方案，但不能用干式充填。两种方案均以矿块式一个步骤回采。

一、水力充填

1. 矿块结构和参数

矿块结构如图 5－5－8 所示：阶段高度为 30～50m，矿块长度为 30～50m，宽度等于矿体的水平厚度，不留顶柱、底柱和间柱。

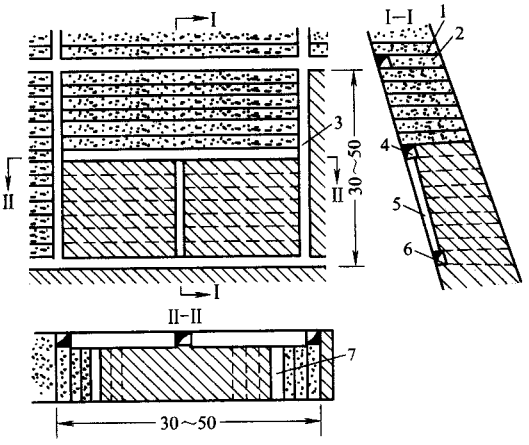


图 5－5－8　下向分层水力充填采矿法

1—人工假顶；2—尾砂充填体；3—矿块溜井；4—分层切割平巷；5—溜矿井；6—运输巷道；7—分层采矿巷道

2. 采准和切割

运输巷道布置在下盘接触线处或下盘岩石中。天井布置在矿块两侧的下盘接触带，矿块中间布置一个溜矿井。随回采分层的下降，行人天井逐渐为建筑在充填料中的混凝土天井所代替，而溜矿井从上往下逐层消失。

回采每一分层前，先沿下盘接触带掘进切割巷道。当矿体形状不规则或厚度较大时，切割巷道也可布置在矿体的中间。

3. 回采工作

回采方式分为巷道回采和分区壁式回采两种。当矿体厚度小于 6m 时，采矿巷道垂直或斜交切割巷道，且采取间隔回采。

分区壁式回采是将每一分层按回采顺序划分为区段，以壁式工作面沿区段全长推进。回采工作面以溜井为中心按扇形布置，每一分区的面积控制在 $100m^2$ 以内（图 5－5－9）。

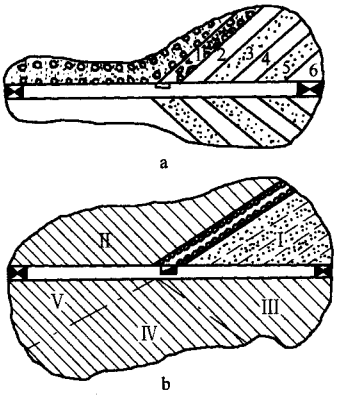


图 5－5－9　黄砂坪 5 号矿体下向尾砂充填法

a—巷道回采（1、2、3、4、5、6 为回采顺序）；

b—扇形壁式工作面回采（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ为分区回采顺序）

如果上下分层矿体长度和厚度相同，用壁式工作面回采较为合理；反之，则用巷道回采。

回采分层高度一般为 2～2.5～3m，回采巷道的宽度为 2～2.4～3m。用浅孔落矿，孔深 1.6～2m。我国多用 7kW 或 14kW 电耙出矿，国外也有用装运机或输送机的。巷道多用木棚支护，间距 0.8～1.2m。壁式工作面则用带长梁的成排立柱支护，排距 2m，间距 0.8m。

充填前要做好下列工作：清理底板，铺设钢筋混凝土底板，钉隔离层及构筑脱水砂门等。铺设钢筋混凝土底板一般采用直径 10～12mm 的主筋和直径 6mm 的副筋，网度为 200mm×200mm～250mm×250mm。巷道回采时，主筋应垂直巷道布置，其端部做成弯钩，以便和相邻巷道的主筋连成整体。采用水泥∶砂∶石为 1∶17∶19 的混凝土体积配比，达到 100～150 标号就足以保证下分层回采作业的安全。

钉隔离层是将准备充填的巷道或分区与未采部分隔开，预防充填体的坍陷。每隔 0.7m 架一根立柱，柱上钉一层网度为 20mm×20mm～25mm×25mm 的铁丝网，再钉一层草垫或粗麻布，在底板处留出 200mm 长的余量并弯向充填区，用水泥砂浆严密封住以防漏砂。其结构如图 5－5－10 所示。

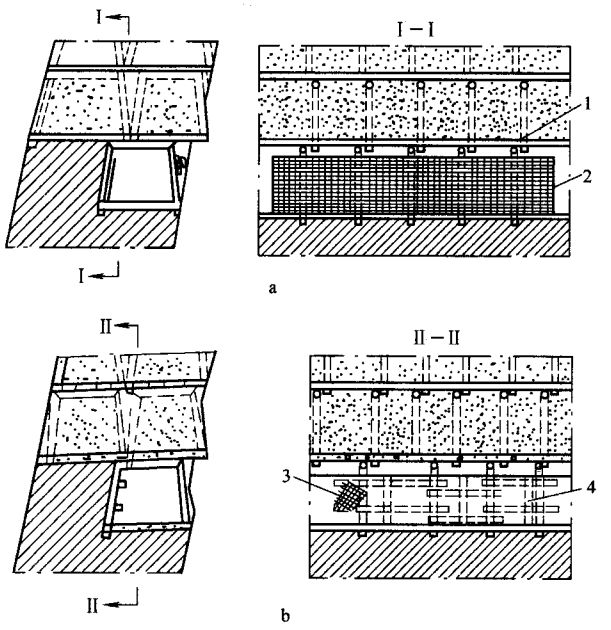


图 5－5－10　隔离层构筑

a—金属网隔离层；b—竹席隔离层

1—钢筋混凝土底板；2—铁丝网；3—竹席；4—板条

脱水砂门是一种设在切割巷道中靠待充填巷道或分区边界上，用混凝土砖或红砖砌筑的墙，墙中埋设若干短竹筒或钢管，一般每隔 0.5m 高设一排，每排 2～3 根(图 5－5－11)。脱水砂门开始只砌 1.2～1.5m 高，随充填料的加高逐步加砌直到接顶。若回采巷道长度大于 50m，应设两道脱水砂门，以利于提高充填质量。

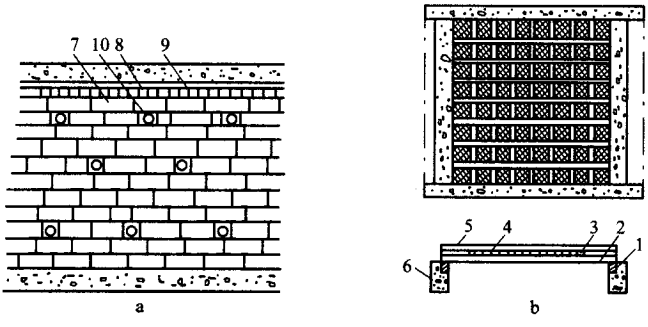


图 5－5－11　脱水砂门结构

a—砖砌的脱水砂门；b—预制混凝土构件的脱水砂门

1—50mm×50mm 的条木；2—50mm×20mm 的条木；3—30mm×15mm 的条木；4—旧麻布袋；5—30mm×15mm 的条木；6—混凝土墙；7—混凝土预制砖；8—红砖；9—充填管；10—泄水管

上述工作完成后，即可进行充填。充填工作面的布置如图 5－5－12 所示。充填管紧贴顶梁，于巷道中央并向上仰斜 5°架设，以利充填接顶，其出口距充填地点不宜大于 5m。如巷道很长或分区很大，应分段进行充填。若下砂方向与泄水方向相反，可采用由远而近的后退式充填。整个分层巷道或分区充填结束后，再在切割巷道底板上铺设钢筋混凝土底板和构筑脱水砂门，然后充填。切割巷道充填完毕，再作好闭层工作，即可进行下一层的切割、回采工作。

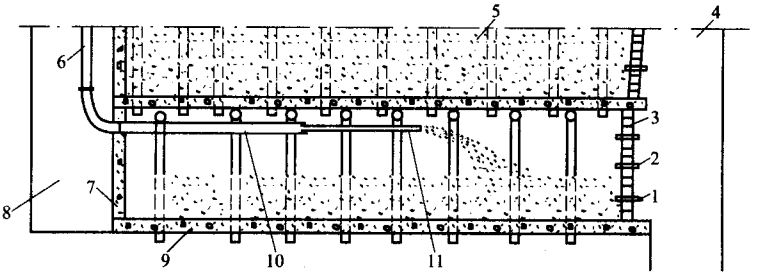


图 5－5－12　充填工作面布置示意图

1—木塞；2—竹筒；3—脱水砂门；4—矿块天井；5—尾砂充填体；6—充填管；7—混凝土墙；8—人行材料天井；9—钢筋混凝土底板；10—软胶管；11—楠竹

二、胶结充填

胶结充填与下向水力充填采矿法的区别仅在于充填料的不同，从而取消了钢筋混凝土底板和隔离层，只需在回采巷道两端构筑混凝土模板，这样就大大简化了回采工艺。矿块结构、采准及回采工艺，与前述采矿法基本相同。

一般采用巷道回采，其高度为 3～4m，宽度为 3.5～4m 甚至可达 7m，主要取决于充填体的强度。巷道的倾斜度（4°～10°）应略大于充填混合物的漫流角。回采巷道间隔开采（图 5－5－13），逆倾斜掘进，便于运搬矿石；顺倾斜充填，利于接顶。上下相邻分层的回采巷道应相互交错布置，防止下部采空时上部胶结充填体脱落。

回采使用浅孔落矿，轻型自行凿岩台车凿岩，自行装运设备运搬矿石。自行设备可沿斜坡道进入矿体各分层。

从上分层充填巷道，沿管路将充填混合物送入充填巷道，以便将其充填至接顶为止。充填尽可能连续进行，有利于获得整体的充填体。在充填体的侧部（相邻回采巷道）经 5～6 昼夜便可开始回采作业，而其下部（下一分层）至少要经过两周才能回采。

对于深部矿体（500～1000m 甚至更大）或地压较大的矿体，充填前应在巷道底板上铺设钢轨或圆木，在其上面铺设金属网，并用钢绳把底梁固定在上一分层的底梁上，充填后形成钢筋混凝土结构，可增加充填体的强度。

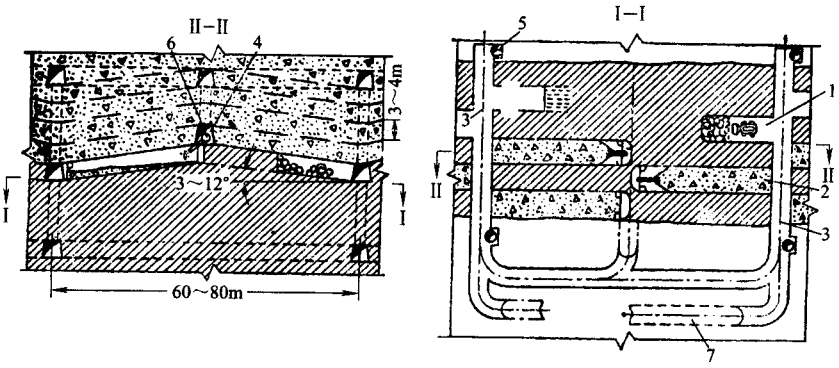


图 5－5－13　下向分层胶结充填采矿法

1—巷道回采；2—进行充填的巷道；3—分层运输巷道；4—分层充填巷道；5—矿石溜井；6—充填管路；7—斜坡道

选择合理的回采巷道断面形状对控制地压意义重大。在我国金川龙首矿，矿岩极为破碎，地压大，采用六角形回采巷道，取得良好效果。六角形巷道的布置形式是，相邻巷道在垂直高度上交错半层布置。回采时，隔一采一（图 5－5－14）。据分析，六角形断面与正方形断面相比，应力集中系数大大降低，巷道周边的受力状态得以改善，从而稳定性大为提高。

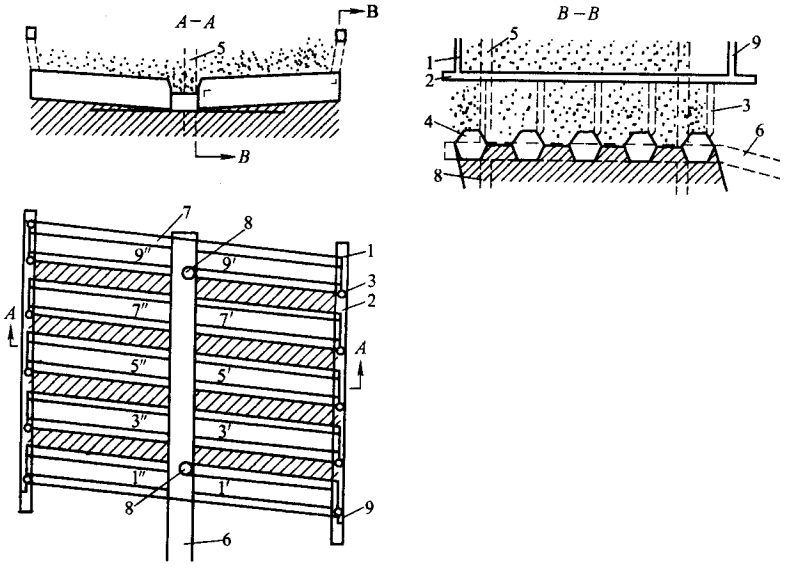


图 5－5－14　龙首矿六角形巷道下向倾斜分层胶结充填采矿法

1—充填井；2—充填巷道；3—回采巷道充填小井；4—已采空的回采巷道；5—回风井；6—分层联络巷道；7—分层巷道；8—溜井；9—充填巷道人行天井

三、评价

下向分层充填采矿法适用于复杂的矿山开采条件，如围岩很不稳固、围岩与矿石很不稳固以及地表和上覆岩层需保护等。此法目前应用虽不广泛，但实践表明，用它代替分层崩落法，可取得良好的技术经济效果。

下向分层水力充填法结构和工艺较复杂，保护围岩和地表的可靠性不如下向胶结充填方案。在特殊复杂的条件下，矿石价值又很贵重，采用下向胶结充填法应该是合理的。它突出的优点是矿石损失很小(3%～5%)；一个步骤开采，简化了结构；采用自行设备进行凿岩和装运时，矿块的技术经济指标可以达到较高的水平。

随着矿床开采深度的增加和地压加大，下向分层胶结充填采矿法具有广阔的应用前景。

第五节　分采充填采矿法

当矿脉厚度小于 0.3～0.4m 时，若只采矿石，工人无法在其中工作，必须分别回采矿石和围岩，使其采空区达到允许工作的最小厚度(0.8～0.9m)。采下的矿石运出采场，而采掘的围岩充填采空区，为继续上采创造条件。这种采矿法称为分采充填法(也叫削壁充填法)。

这种采矿法常用来开掘急倾斜极薄矿脉，矿块尺寸不大(段高 30～50m，天井间距 50～60m)，掘进采准巷道便于更好地探清矿脉。运输巷道一般切下盘岩石掘进。为了缩短运搬距离，常在矿块中间设顺路天井(图 5－5－15)。

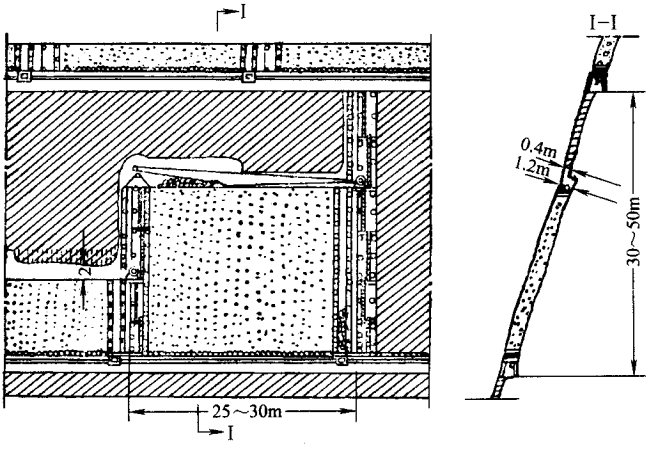


图 5－5－15　分采充填采矿法

自下向上水平分层回采时，可根据具体条件决定先采矿石或先采围岩。当矿石易于采掘，有用矿物又易被震落，则先采矿石；反之，先采围岩（一般采下盘围岩）。在落矿之前，应铺设垫板（木板、铁板、废运输带等），以防粉矿落入充填料中。采用小直径炮孔，间隔装药，进行松动爆破。

开掘的围岩最好正够采场充填。因此，根据采场充填条件，确定合适的开掘厚度是这种采矿法回采中的重要问题。要使崩落下的围岩刚好充满采空区，则必须符合下列条件：

$$M_y K_y = (M_a + M_y) k$$

即

$$M_y = M_a \frac{k}{K_y - k} \tag{5-1}$$

式中　M_y——采掘围岩的厚度，m；

M_a——矿脉厚度，m；

K_y——围岩崩落后的松散系数（1.4～1.5）；

k——采空区需要充填的系数（0.75～0.8）。

由于矿脉很薄，开掘的围岩往往多于采空区所需充填的废石，此时应设废石溜井将多余废石运出采场。当采幅宽度较大（1.0～1.3）时，可采用耙斗为 0.15m3 的小型电耙运搬矿石和耙平充填料。70 年代以来，应用分采充填法的矿山，为回采工作面创造机械化条件，有增大采幅宽度的趋势（达 1.2～1.3m）。

用分采充填法开采缓倾斜极薄矿脉时，一般逆倾斜作业。回采工艺和急倾斜极薄矿脉相似，但充填采空区常用人工堆砌，体力劳动繁重，效率更低。可用电耙和板式输送机在采场内运搬矿石，采幅宽度一般比急倾斜矿脉要大。

这种采矿法在铺垫板质量达不到要求时，矿石损失较大（7%～15%）；矿脉很薄落矿时，不可避免地带下废石混入矿石中，贫化率较高（15%～50%）。因此，铺设垫板的质量好坏是决定分采充填法成败的关键。

尽管这种方法存在工艺复杂、效率低、劳动强度大等缺点，但对开采极薄的贵重金属矿脉，在经济上仍比混采留矿法优越。今后应研制适合于窄工作面条件下作业的小型机械设备，并研究有效的铺垫材料和工艺。

第六节　方框支架充填采矿法

过去多采用横撑支柱或木棚支架采矿法开采薄矿脉，但由于坑木消耗很大、工艺复

杂、效率很低，目前我国已很少应用，而被其他采矿法所取代。在矿体厚度较大（中厚以上），矿石和围岩极不稳固，矿体形态极其复杂（厚度、倾角和形状变化很大），矿石贵重等条件下，方框支架充填采矿法还是一种有效的采矿方法。

这种采矿法系统地采用方框支架配合充填支护采空区。每次回采的矿石等于方框支架大小的分间，每分间矿石采出后立即架设方框并把它楔紧，然后进行充填（一般为干式充填）。沿走向布置矿块的方框支架充填采矿法示于图 5－5－16。

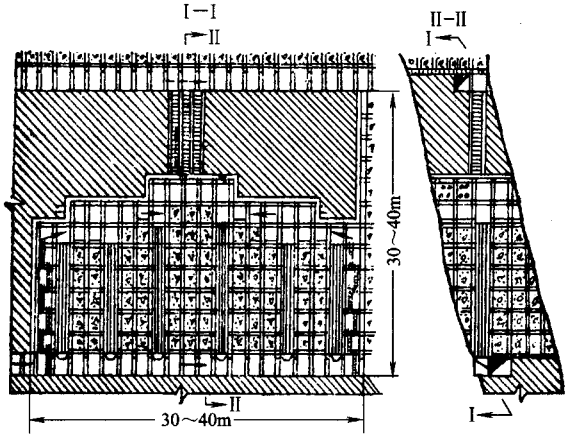


图 5－5－16　方框支架充填采矿法

回采工作可以从阶段水平底板开始，或者从顶板开始，留底柱情况很少见。第一分层回采时，方框要架设在地梁上（2 个方框的长度），在其上部铺木板作为方框支架的基础，为下阶段回采创造有利条件。溜矿井和行人天井均布置在方框支架中（间隔 4～6 个方框），用木板与充填料隔开。最上一层方框进行落矿作业，第二层进行矿石运搬（一般为人力运搬）在每一作业层方框上铺设木板作为工作台。

当矿体厚度大于 12m 时，垂直走向布置矿块，以垂直分条或短矿块进行回采。由于存在支架和充填劳动强度很大，劳动生产率很低，坑木消耗很大，不便实行机械化开采，回采成本很高等严重缺点，这种采矿法只在极其不利的矿山地质条件下采用。

第七节　矿柱回采

用两步骤回采的充填法（主要是上向分层充填法），在矿房回采后，矿房已为充填材料所充满，就为回采矿柱创造了良好的条件。在矿块单体设计时，必须统一考虑矿房和

矿柱的回采方法及回采顺序。一般情况下，采完矿房后应当及时回采矿柱，否则矿山后期的产量将会急剧下降，而且矿柱回采的条件也将变坏（矿柱变形或破坏，巷道需要维修等），增加矿石损失。

矿柱回采方法的选择除了考虑矿岩地质条件外，主要根据矿房充填状态及围岩或地表是否允许崩落而定。

一、胶结充填矿房的间柱回采

矿房内的充填料形成一定强度的整体。此时，间柱的回采方法有：上向水平分层充填法、下向分层充填法、留矿法和房柱法。

当矿岩较稳固时，用上向水平分层充填法或留矿法随后充填回采间柱（图 5－5－17 和图 5－5－18）。为减少下阶段回采顶底柱的矿石损失和贫化，间柱底部 5～6m 高，需用胶结充填，其上部用水砂充填。当必须保护地表时，间柱回采用胶结充填；否则，可用水砂充填。

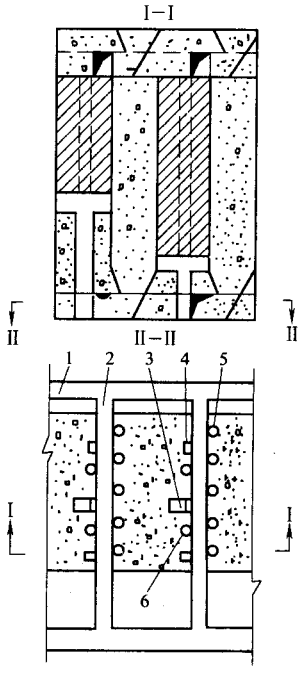


图 5－5－17　上向水平分层充填法回采矿柱

1—运输巷道；2—穿脉巷道；3—充填天井；4—人行泄水井；5—放矿漏斗；6—溜矿井

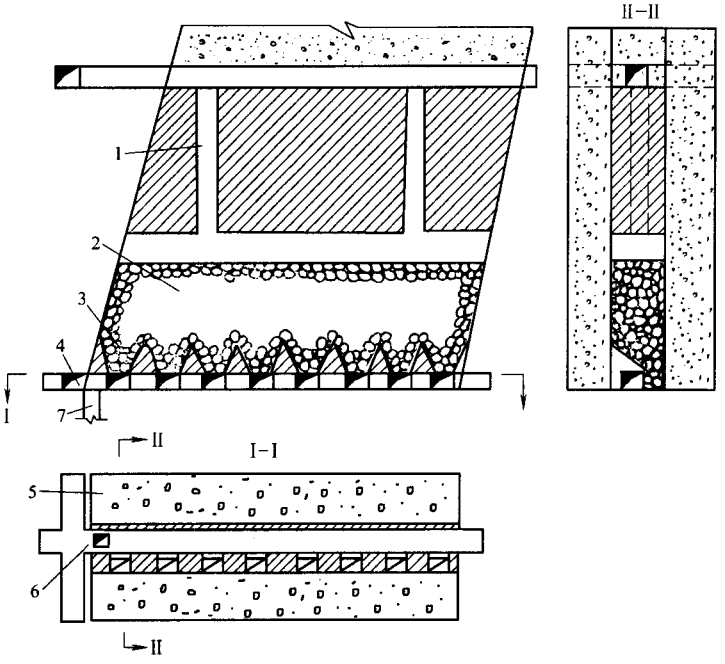


图 5-5-18　用留矿法回采间柱

1—天井；2—采下矿石；3—漏斗；4—运输巷道；5—充填体；6—电耙巷道；7—溜矿井

留矿法随后充填采空区回采矿柱，可用于具备适合留矿法的开采条件之处。由于做人工漏斗费工费时，一般都在矿石底柱中开掘漏斗。充填采空区前，在漏斗上存留一层矿石，将漏斗填满后，再在其上部进行胶结充填，然后再用水砂或废石充填。

在顶板稳固的缓倾斜或倾斜矿体中，当矿房胶结充填体形成后，可用房柱法回采矿柱(图 5-5-19)。在矿房充填时，应架设模板，将回采矿柱用的上山、切割巷道和回风巷道等预留出来，为回采矿柱提供完整的采准系统。

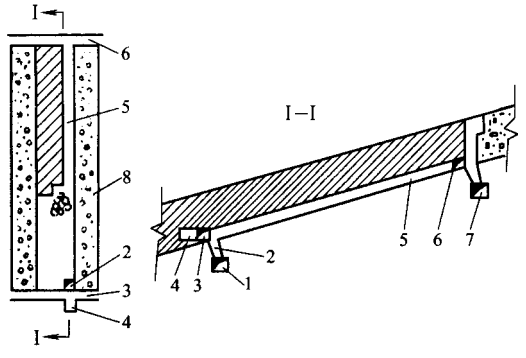


图 5-5-19　房柱法回采矿柱

1—运输巷道；2—溜矿井；3—切割巷道；4—电耙硐室；5—切割上山；6—回风巷道；7—阶段回风巷道；8—胶结充填体

当矿石和围岩不稳固或胶结充填体强度不高(294.3～588.6kPa)时,应采用下向分层充填法回采间柱(图 5－5－20)。

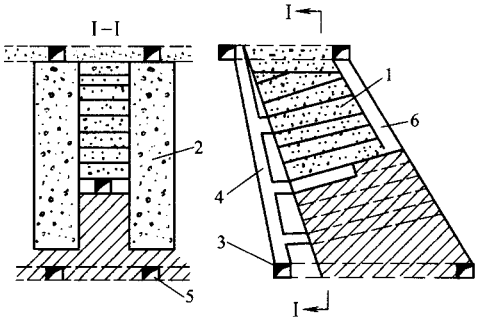


图 5－5－20　下向分层充填法回采间柱

1—间柱的充填体;2—矿房的充填体;3—运输巷道;4—脉外天井;5—穿脉巷道;6—充填天井

胶结充填矿房的间柱回采劳动生产率高,与用同类采矿方法回采矿房基本相同。由于部分充填体可能破坏,矿石贫化率为 5%～10%。

二、松散充填矿房的间柱回采

在矿房用水砂充填或干式充填法回采,或者用空场法回采随后充填(干式或水砂充填)的条件下,如用充填法回采间柱,须在其两侧留 1～2m 矿石,以防矿房中的松散充填料流入间柱工作面。如地表允许崩落,矿石价值又不高,可用分段崩落法回采间柱。间柱回采的第一分段,应能控制两侧矿房上部顶底柱的一半,这样,顶底柱和间柱可同时回采(图 5－5－21);否则,顶底柱与间柱分别回采。

回采前将第一分段漏斗控制范围内的充填料放出。间柱用上向中深孔、顶底柱用水平深孔落矿。第一分段回采结束后,第二分段用上向垂直中深孔挤压爆破回采。

这种采矿方法回采间柱的劳动生产率和回采效率均较高,但矿石损失和贫化较大。因此,在实际中应用较少。

三、顶底柱回采

如果回采上阶段矿房和间柱时构筑了人工假底,则在其下部回采顶底柱时,只需控制好顶板暴露面积,用上向水平分层充填法就可顺利地完成回采工作。

当上覆岩层不允许崩落时,应力求接顶密实,以减少围岩下沉。如上覆岩层允许崩落时,用上向水平分层充填法上采到上阶段水平后,再用无底柱分段崩落法回采上阶段底柱(图 5－5－22)。

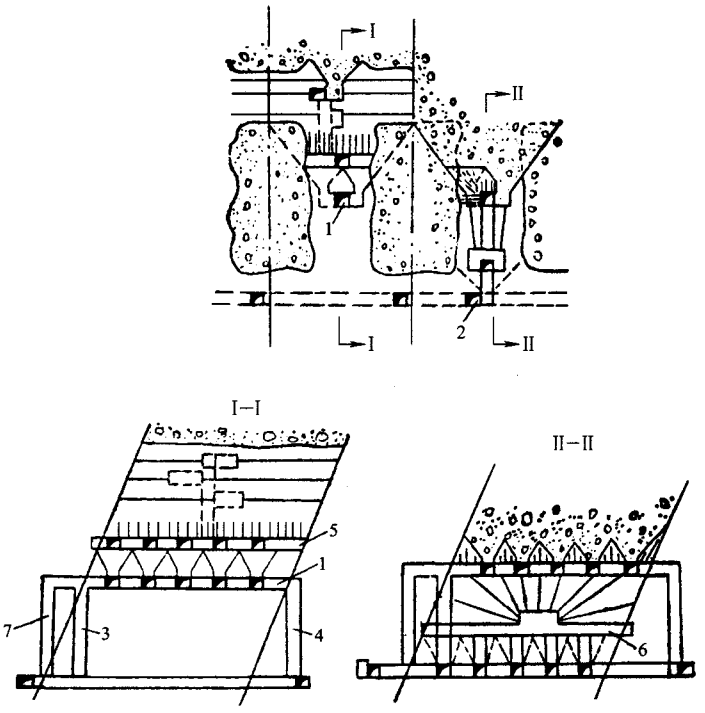


图 5－5－21　有底柱分段崩落法回采间柱

1—第一分段电耙巷道；2—第二分段电耙巷道；3—溜矿井；4—回风天井；5—第一分段拉底巷道；6—第二分段拉底巷道；7—行人天井

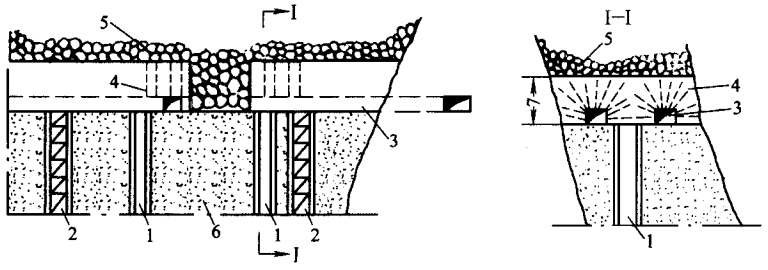


图 5－5－22　无底柱分段崩落法回采底柱

1—溜矿井；2—行人天井；3—上阶段运输巷道；4—炮孔；5—崩落岩石；6—充填体

由于采准工程量小且回采工作简单，无底柱分段崩落法回采底柱的优越性更为突出，但单分层回采不能形成菱形布置采矿巷道，其一侧或两侧的三角矿柱无法回收。因此，矿石损失贫化较大。