

喷射混凝土

中冶集团建筑研究总院 程良奎

目录

- 1、喷射混凝土的特点
- 2、喷射混凝土技术的历史沿革与新进展
- 3、喷射混凝土的应用领域
- 4、各类工程喷射混凝土结构的作用与设计
- 5、喷射混凝土的原材料及其配合比
- 6、喷射混凝土的性能
- 7、干拌法与湿拌法喷射混凝土
- 8、喷射钢纤维混凝土
- 9、喷射合成纤维混凝土

1、喷射混凝土的特点

借助喷射机械、利用压缩空气或其他动力，将按一定比例的拌合料（水泥、骨料、水组成）通过管道以高速喷射到受喷面（岩石、土层、建筑结构物或模板）上凝结硬化而成的一种砼。

特点

- 在高速喷射时，由水泥与骨料的连续撞击而使砼压密，并可采用较小的水灰比**0.4~0.45**；
- 与岩石、混凝土、砖石、钢材有高粘结强度，能在结合面上传递拉应力和剪应力；
- 在拌合料中加入外加剂或外掺料，大大改善喷射砼性能；
- 将砼运输、浇注和捣固结合为一道工序，不要或只要单面模板；
- 通过输料管在高空、深坑或狭小工作区间向任意方位施作薄壁或复杂造型的结构。

2、喷射混凝土技术的历史沿革与新进展

2.1 历史沿革

- 1914年，美国在矿山和土木工程中首先使用喷射水泥砂浆；
- 1942年，瑞士阿利瓦(Aliva)公司研制成转子式混凝土喷射机，能喷射骨料最大粒径为25mm的喷射混凝土；
- 1947年，德国BSM公司研制成双罐式喷射机；
- 1948年至1953年间兴建的奥地利卡普隆水电站的米尔隧道最早使用。

- 上世纪50年代初，奥地利 **Rabcewicz** 创立了以最大限度发挥岩石自支承能力为理论基础的新奥法 (**New Austrian Tunneling Method**);
- 上世纪50年代，地质条件十分恶劣的奥地利陶恩 (**Taurus**)公路隧道和巴基斯坦贝拉水道工程（宽**21m**×高**24m**）等大断面隧道采用喷锚支护相继获得成功；

- 1965年11月，冶金部建筑研究总院在多年研究工作的基础上，在鞍钢张岭铁矿157平洞成功地应用了喷射混凝土支护；



- 1966年，冶金部建筑研究总院先后在本钢南芬尾矿坝泄水洞（长2km）及攀钢专用铁路隧道中应用喷锚支护；
- 1966年，铁道部科学研究总院西南所在成昆铁路隧道中应用喷锚支护；

- 1974年，辽宁回龙山水电站主厂房（宽17.2m×高37m）应用单一的锚喷支护取得良好的稳定效果；
- 1980年~至今，喷锚支护在我国（矿山、交通、水电）隧道和各类地下洞室工程中获得了广泛的应用及蓬勃的发展。

- 在大跨度**30m**左右，高边墙（**70m**）洞群相互交叉的水电站洞室中，采用单一的喷锚支护，被认为是一种经济有效，能永久保持工程稳定的支护方法。中国隧道与地下洞室中的喷锚支护用量已达世界之首。

2.2 新进展

- 新型外加剂、外掺料的开发利用，显著改善了喷射混凝土的性能；
- 喷射纤维混凝土的研究与应用成效显著；
- 湿拌法喷射混凝土技术有新的提升和发展；
- 城市土体开挖工程喷射砼应用技术取得新进展；
- 在薄壳、圆顶建筑及充水结构等新建工程中应用日益广泛。

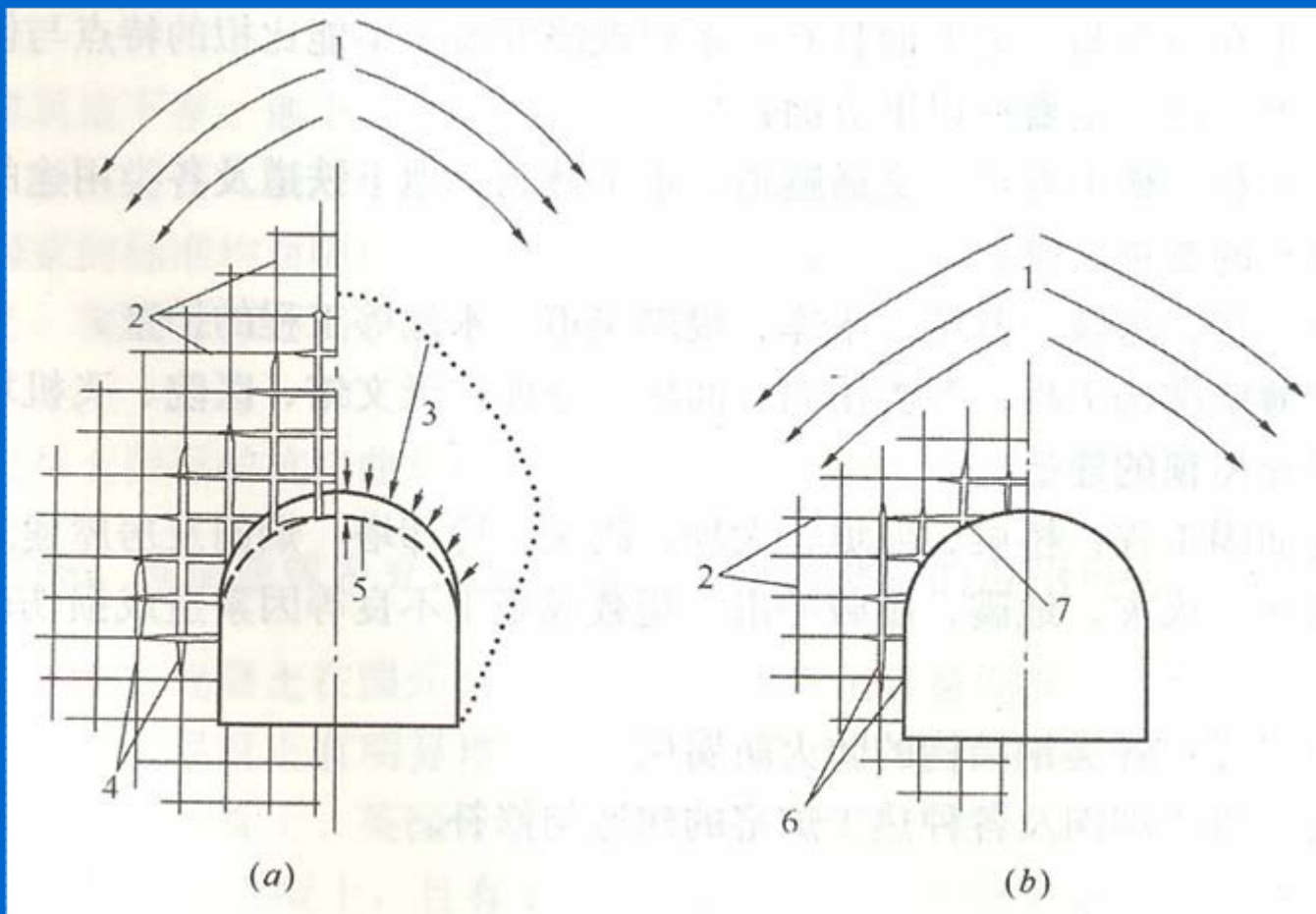
3、应用领域

- 地下工程
- 岩土工程
- 异型薄壁结构工程
- 结构修复加固工程
- 防护工程
- 烟囱及各种热工炉窑的修补

4、各类工程喷射混凝土结构的作用与设计

4.1 地下工程喷射混凝土的作用

通过喷射混凝土的及时效应、整合效应、粘结效应和柔效应有效发挥围岩的自承作用，以最小的支护抗力，取得最大的稳定效果。



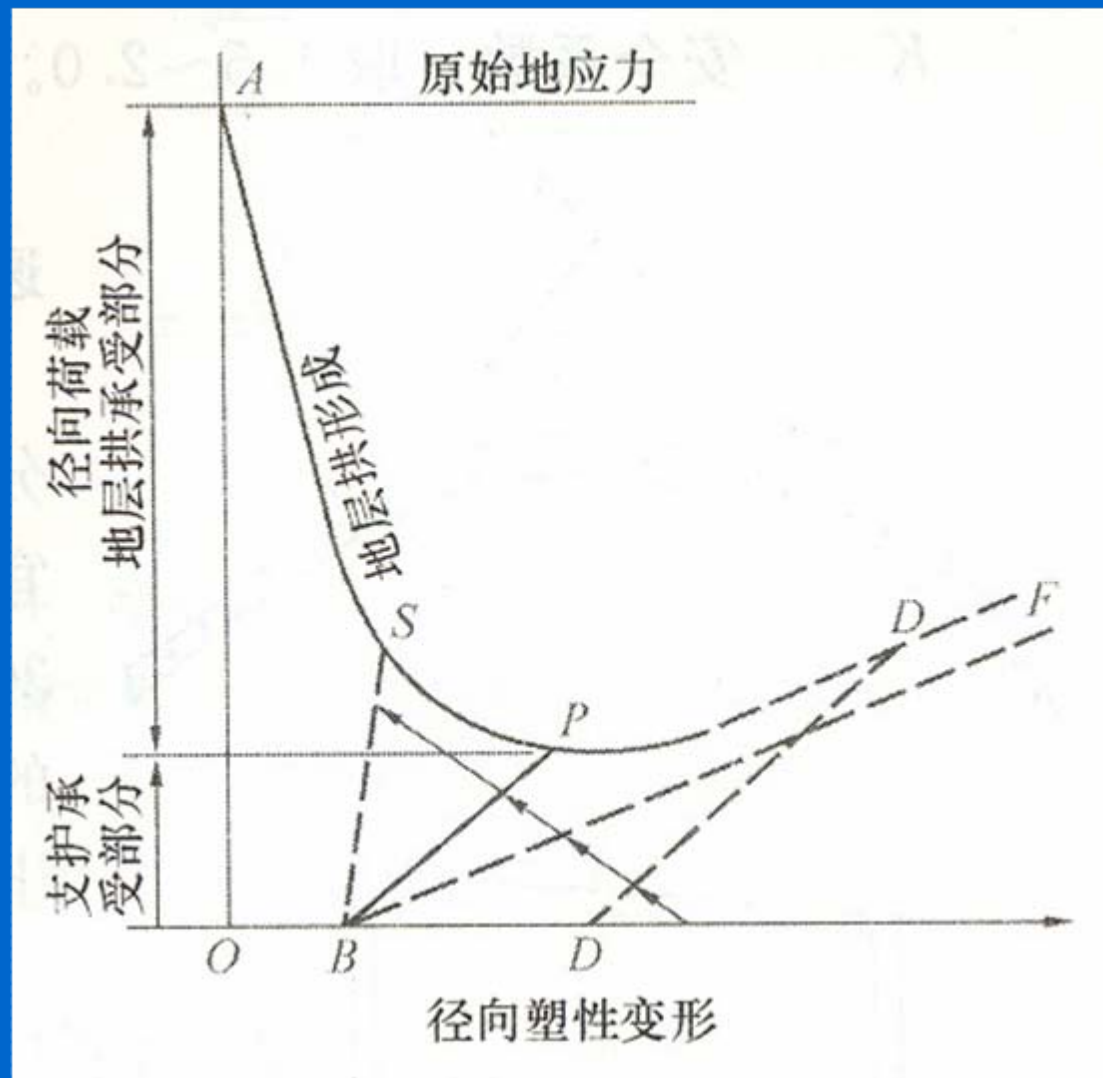
喷射混凝土阻止松动控制变形而使岩层稳定

(a)岩层强度由于过渡沉降而降低；

(b)用薄层喷射混凝土支护控制过渡的沉陷保持岩层强度

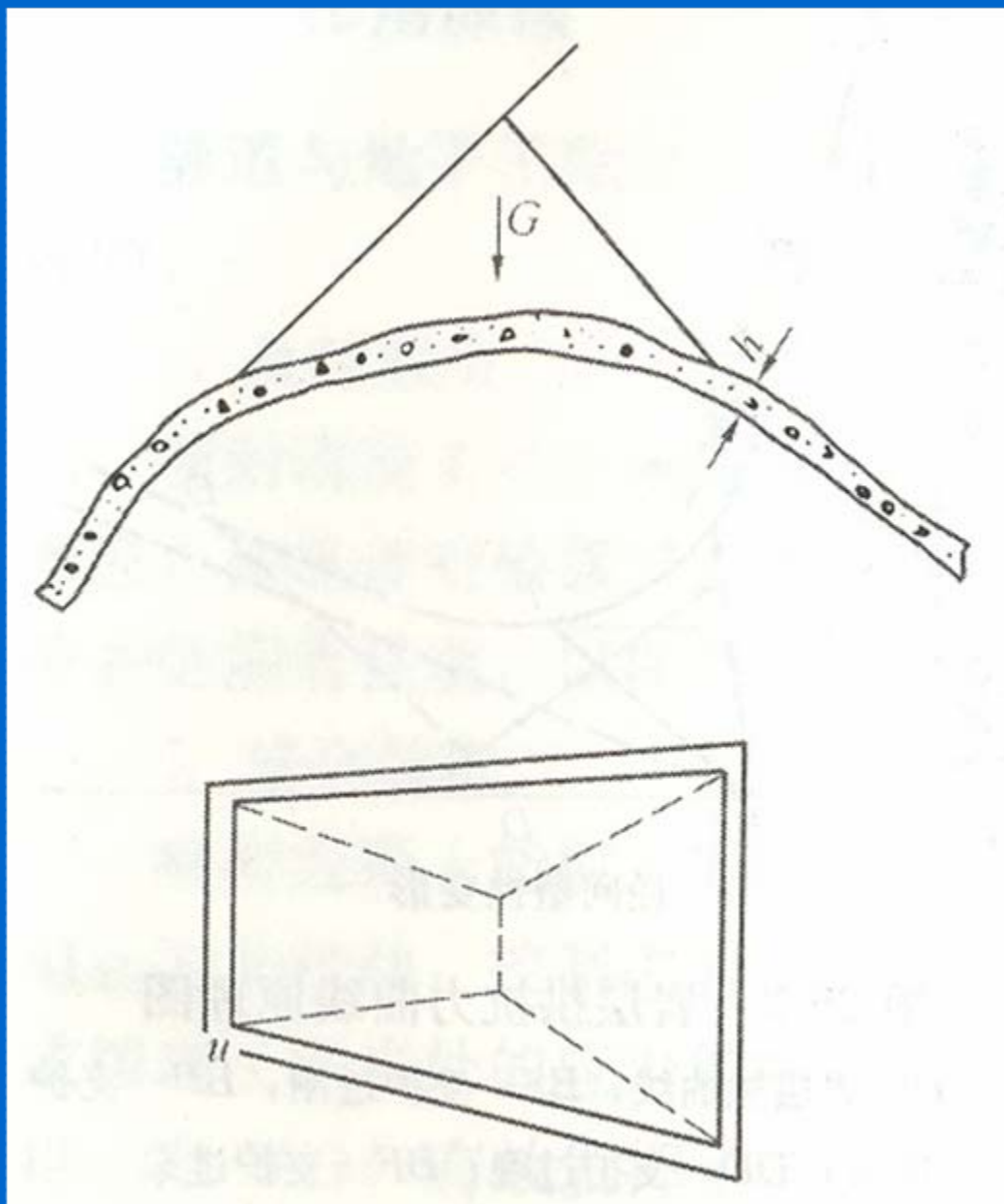
1—岩层拱；2—岩层节理；3—支护上的荷载；

4—节理张开；5—沉陷；6—节理轻微张开；7—喷射混凝土



岩层拱抗力曲线原理图

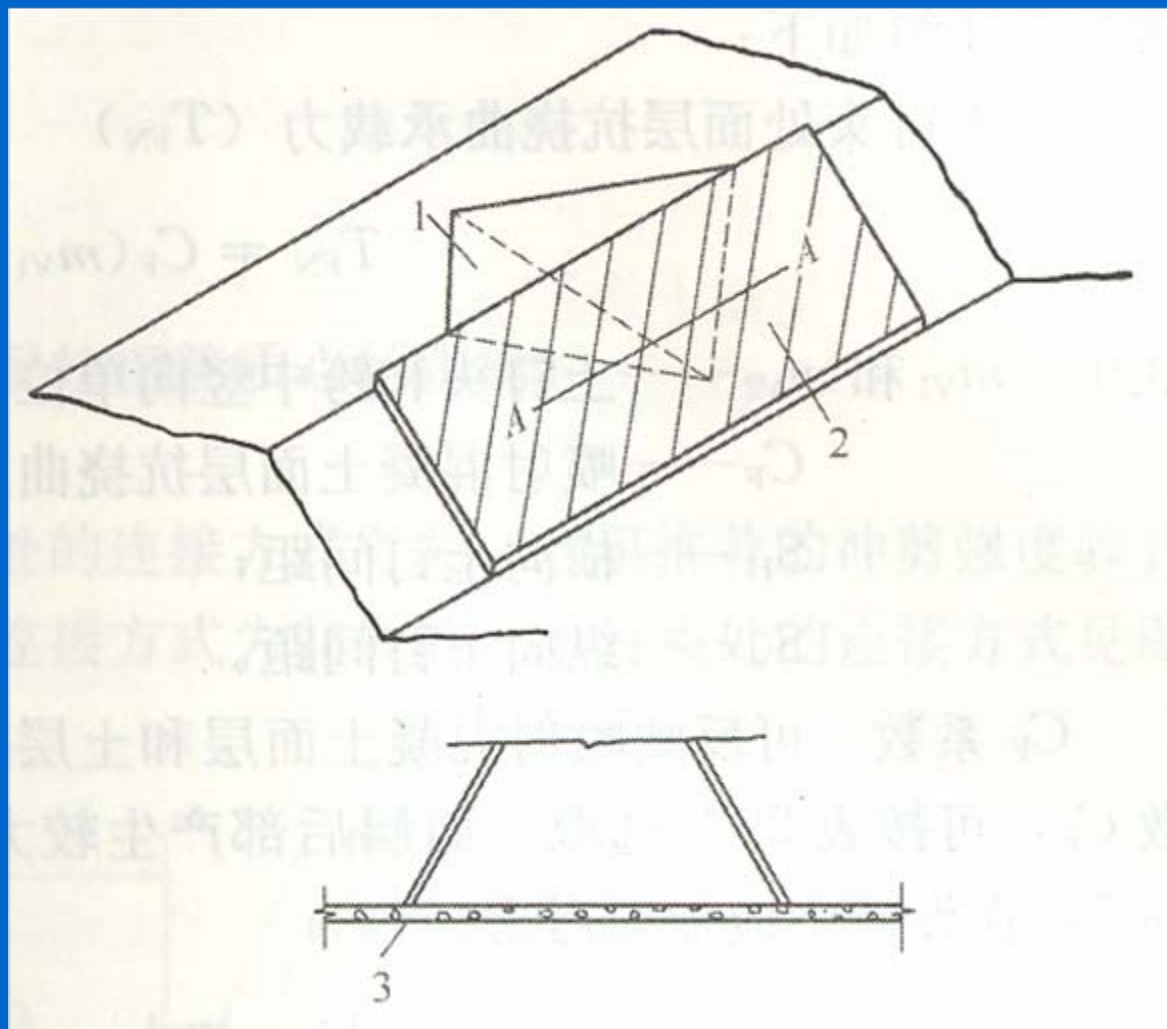
ASPD—岩层拱曲线；**BS**—支护过刚；**BP**—支护适宜；
DD—支护过晚；**BF**—支护过柔



喷射混凝土层抗冲切承载力计算图示

4.2 边坡工程喷射混凝土层的作用

- 预防风化及雨水对岩石的侵蚀损伤和工程地质条件的恶化；
- 提供对局部不稳定块体的抗滑作用。

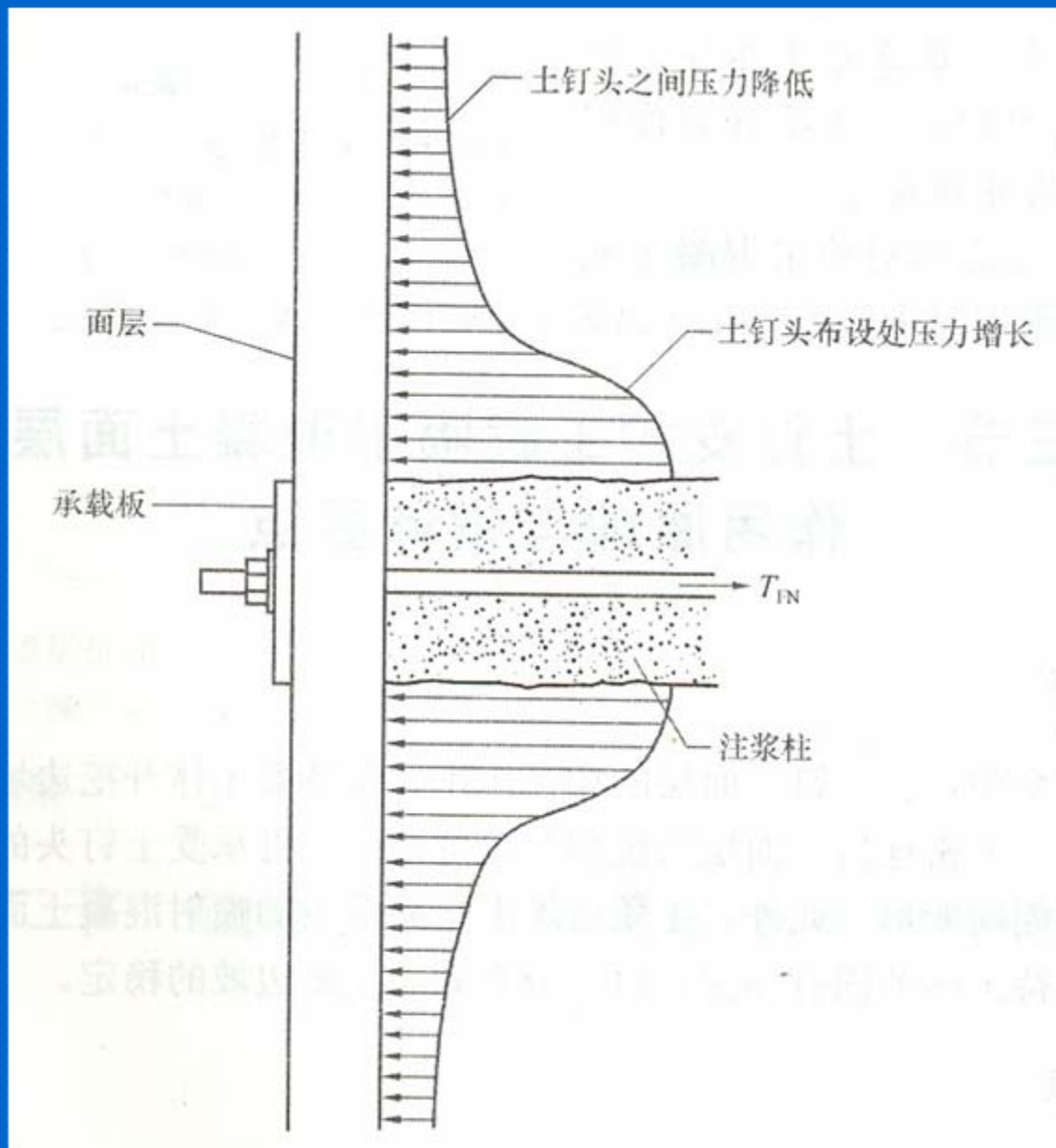


喷射混凝土用以加固楔形不稳定块体

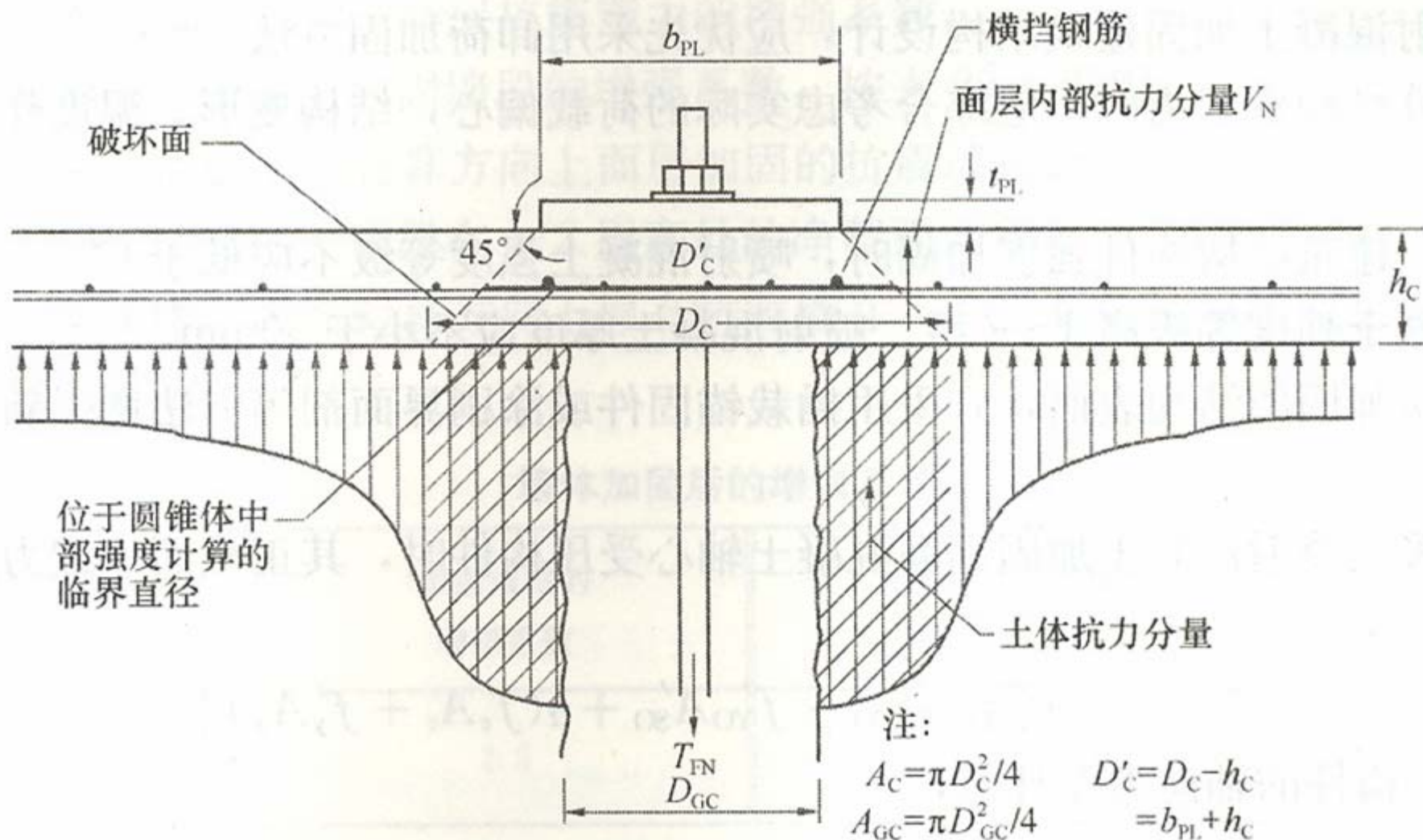
- 1—楔形不稳定块体；2—喷射混凝土；
3—喷射混凝土加固楔形不稳定块体

4.3 土钉支护工程喷射混凝土面层的作用

- 面层的抗剪抗弯能力，可承受土钉头的工作荷载；
- 面层刚度可限制侧向变形；
- 全面覆盖的喷层，可防止雨水冲刷与渗入，保持土体固有强度，十分有利。



喷射混凝土面层的压力分布



土钉头连接处的冲剪力

土钉抗冲剪强度

$$T_{FN} = V_N \left[\frac{1}{1 - C_s (A_C - A_{GC}) / (S_V g S_H - A_{GC})} \right]$$

式中： T_{FN} — 土钉头抗冲剪强度；

V_N — 喷射混凝土面层内部抗冲剪强度；

C_s — 面层的剪切压力系数；

S_V 、 S_H — 竖向及横向土钉间距；

A_V 、 A_{GC} — 见上图。

5、喷射混凝土外加剂、外掺料与水灰比

5.1 外加剂

(1) 低碱与无碱系列速凝剂。这类速凝剂含碱量分别小于0.5%和0.3%，加入喷射砼中具有凝结快、早期强度高，28d强度损失率小或不损失等特点。郑州兰瑞公司生产的SWJY速凝剂就是一种性能良好的无碱速凝剂。

低碱和无碱液体速凝剂性能检验

低碱与无碱液体速凝剂性能检验											表 30-3	
速凝剂 品种	凝结时间		1d 抗压 强度 (MPa)	28d 抗压 强度比 (%)	固体含量 (%)	密度 (g/ml)	Na ₂ SO ₄ 含量 (%)	碱含量 (%)	还原糖 含量 (%)	表面 张力	Cl ⁻ 含量 (%)	pH
	初凝	终凝										
SDJY 低碱液体	2'02"	4'14"	10.1	79.7	62.28	1.510	0.06	16.86	1.64	96.66	0.64	13.09
SWJY 无碱液体	2'45"	4'56"	8.2	102.5	53.45	1.436	39.41	0.09	2.28	56.91	0.003	2.44

5.2 外掺料—硅粉

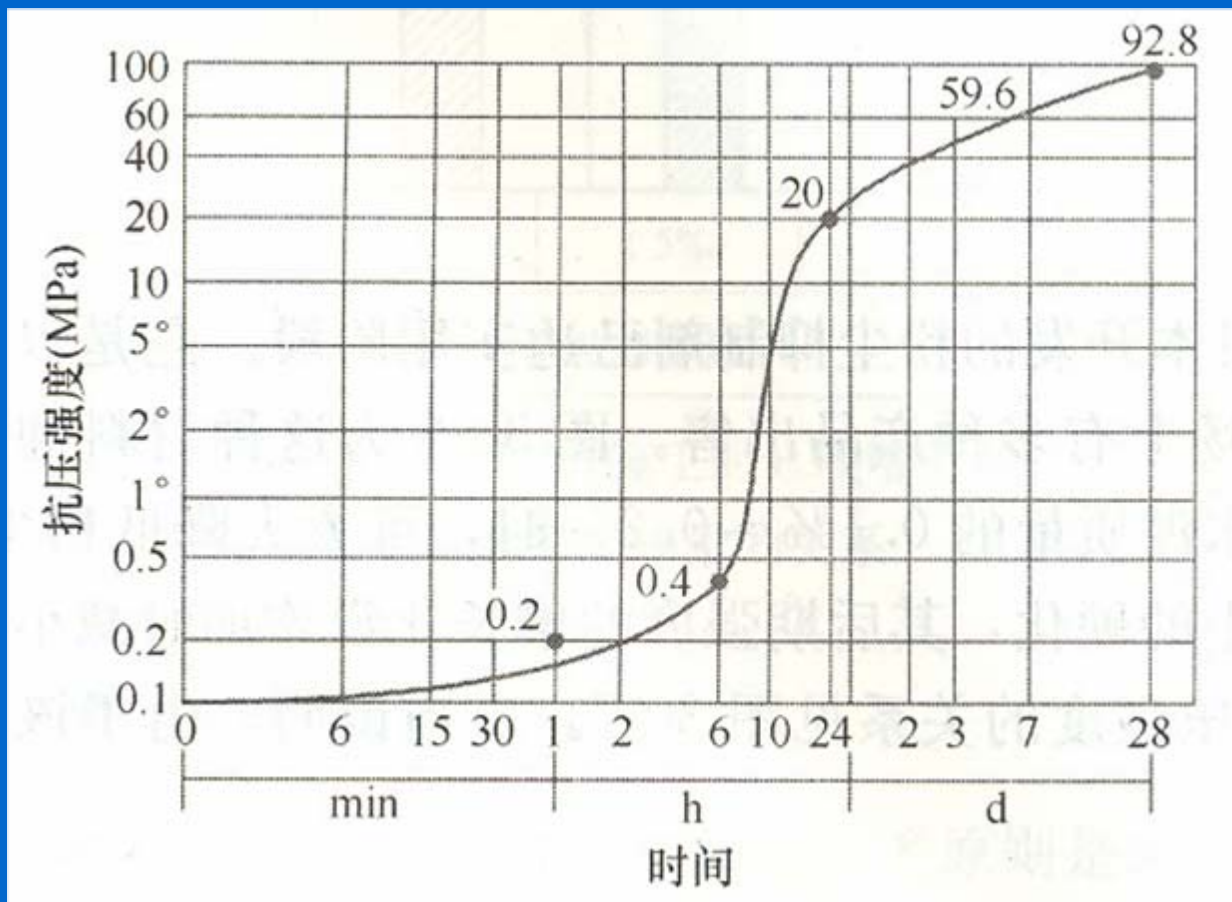
硅粉是制造硅铁金属的一种副产品。将高纯度石英和煤在电弧炉内还原，从过滤炉排除的气体中可得到硅粉。其微粒尺寸为水泥颗粒的 $1/60$ ，具有很高的活性，掺量一般为水泥质量的 10% 。

优点：

- 提高抗压强度，增强结构密实性，提高抗化学侵蚀和机械破坏的能力；
- 增强喷射混凝土与其他介质的粘结效应；
- 减少回弹；
- 大大减少粉尘。

(1) 掺入硅粉的喷射混凝土强度

德国因斯布鲁克大学建材研究所测定结果:



掺硅粉的喷射混凝土的抗压强度

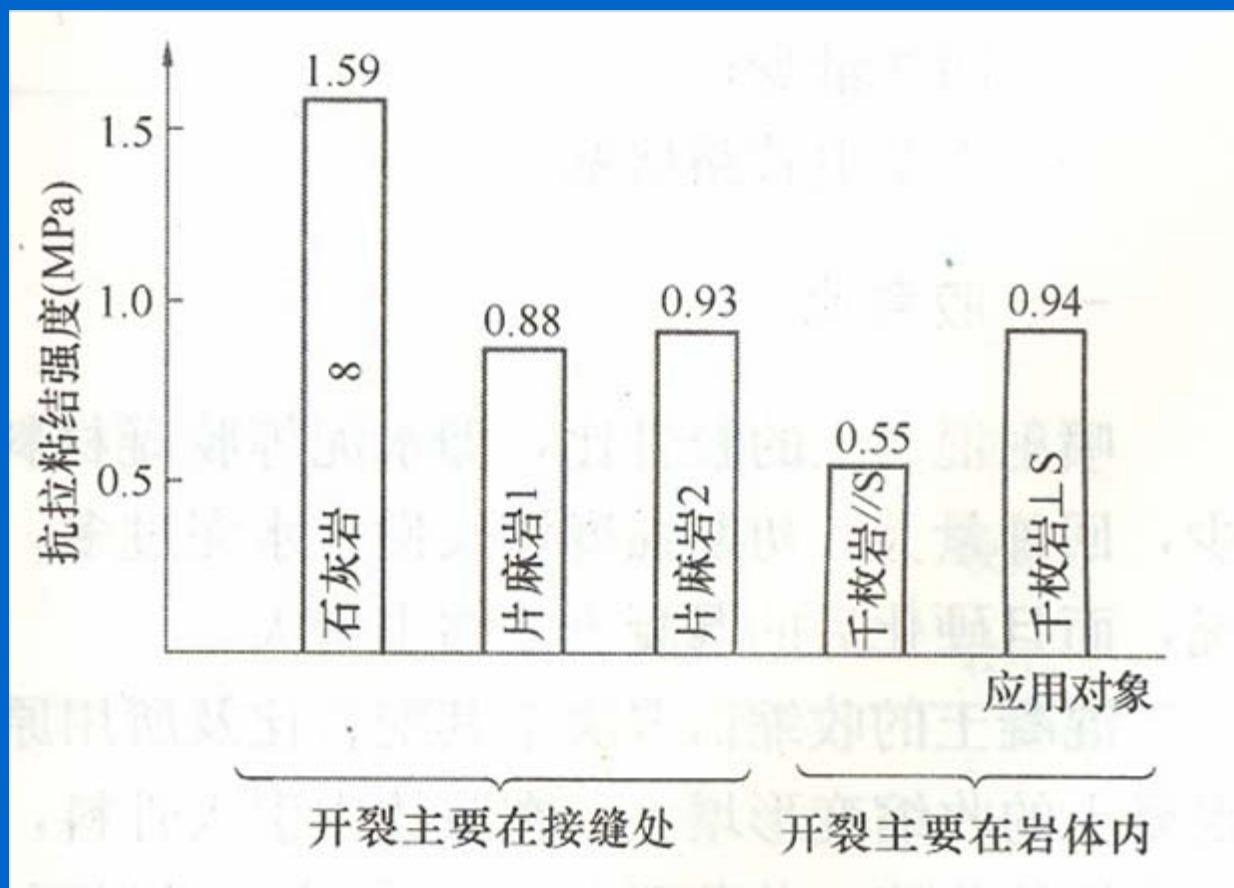
中铁西南研究院测得的结果

湿拌喷射混凝土的抗压强度

硅粉的掺量水泥质量 (%)	不同龄期的抗压强度 (MPa)		
	1d	7d	28d
5	19.9	28.5	44.3
7.5	18.4	30.5	53.5
10	20.0	30.0	50.4

(2) 掺入硅粉的喷射混凝土粘结强度

德国因斯布鲁克大学建材研究所测得的结果：



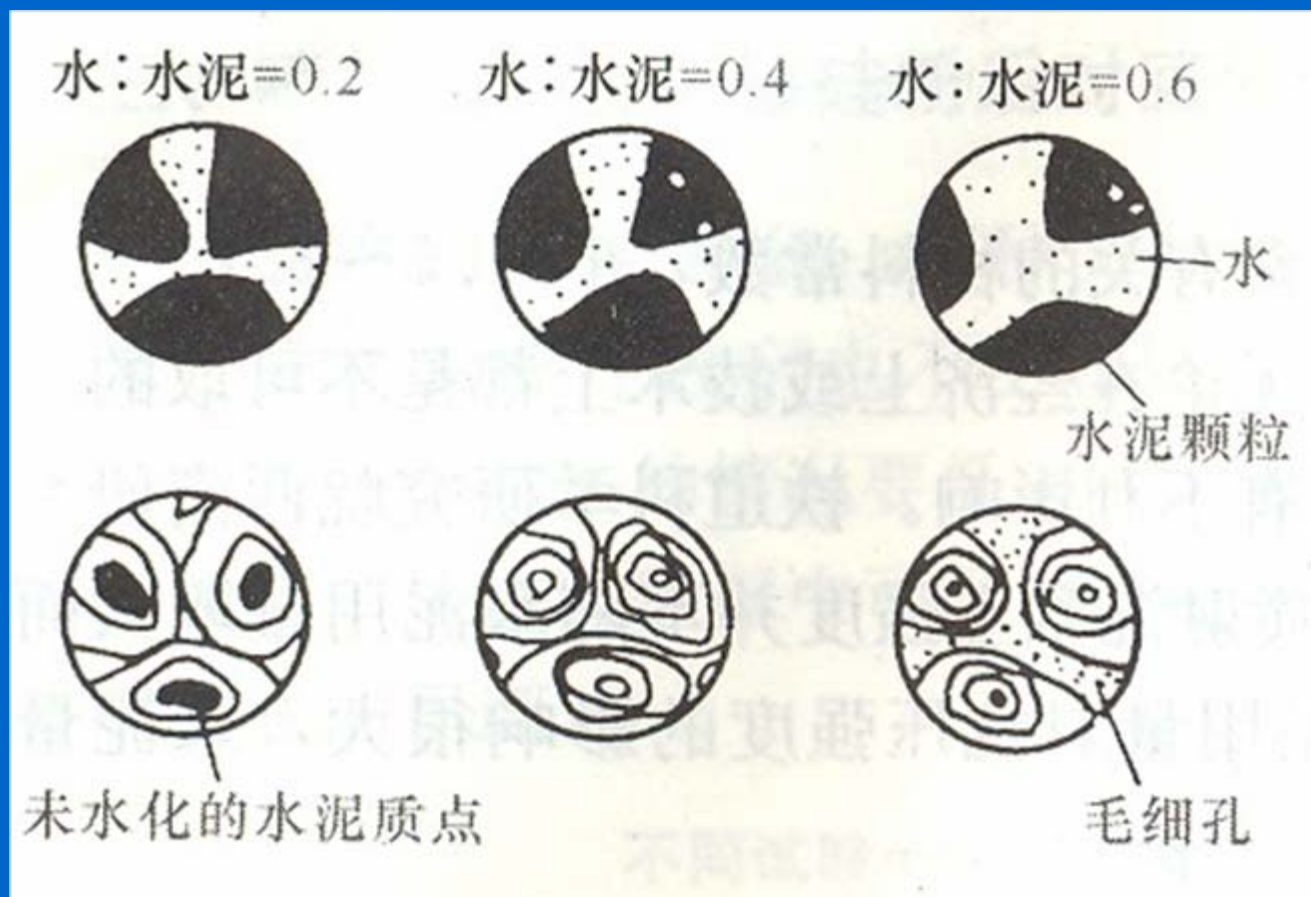
掺入硅粉的喷射混凝土的抗拉粘结强度

(3) 掺入硅粉对回弹的影响

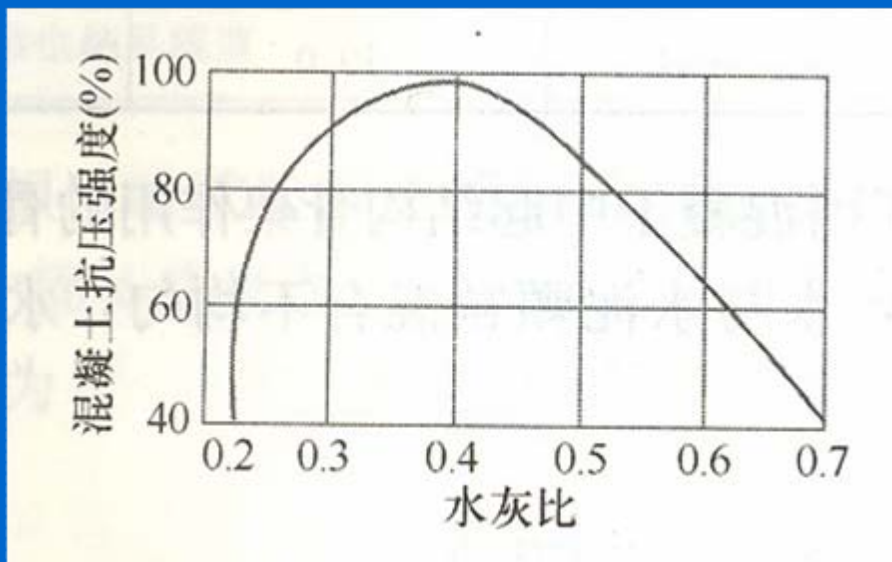
哈根巴哈试验隧道，曾测得掺入硅粉为水泥质量7.5%的喷射混凝土回弹率8%，比不掺硅粉的喷射混凝土约减少回弹60%。

5.3 水灰比

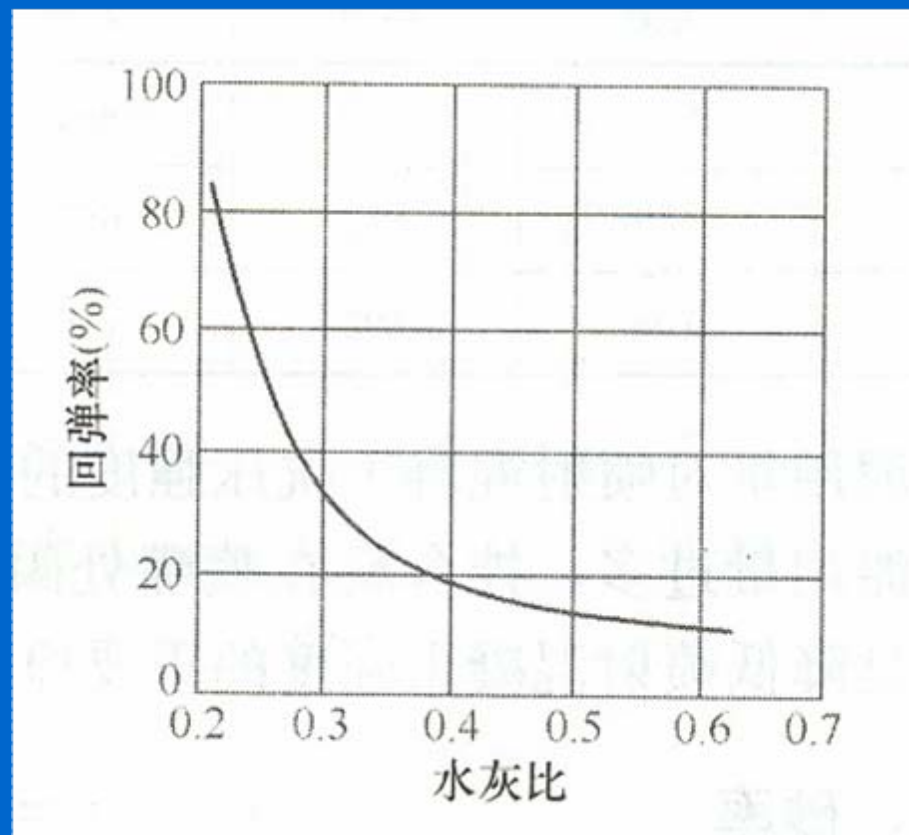
水灰比对喷射混凝土强度有重要影响



不同水灰比对水泥结构的影响



水灰比对强度的影响



水灰比对回弹率的影响

适宜的水灰比:

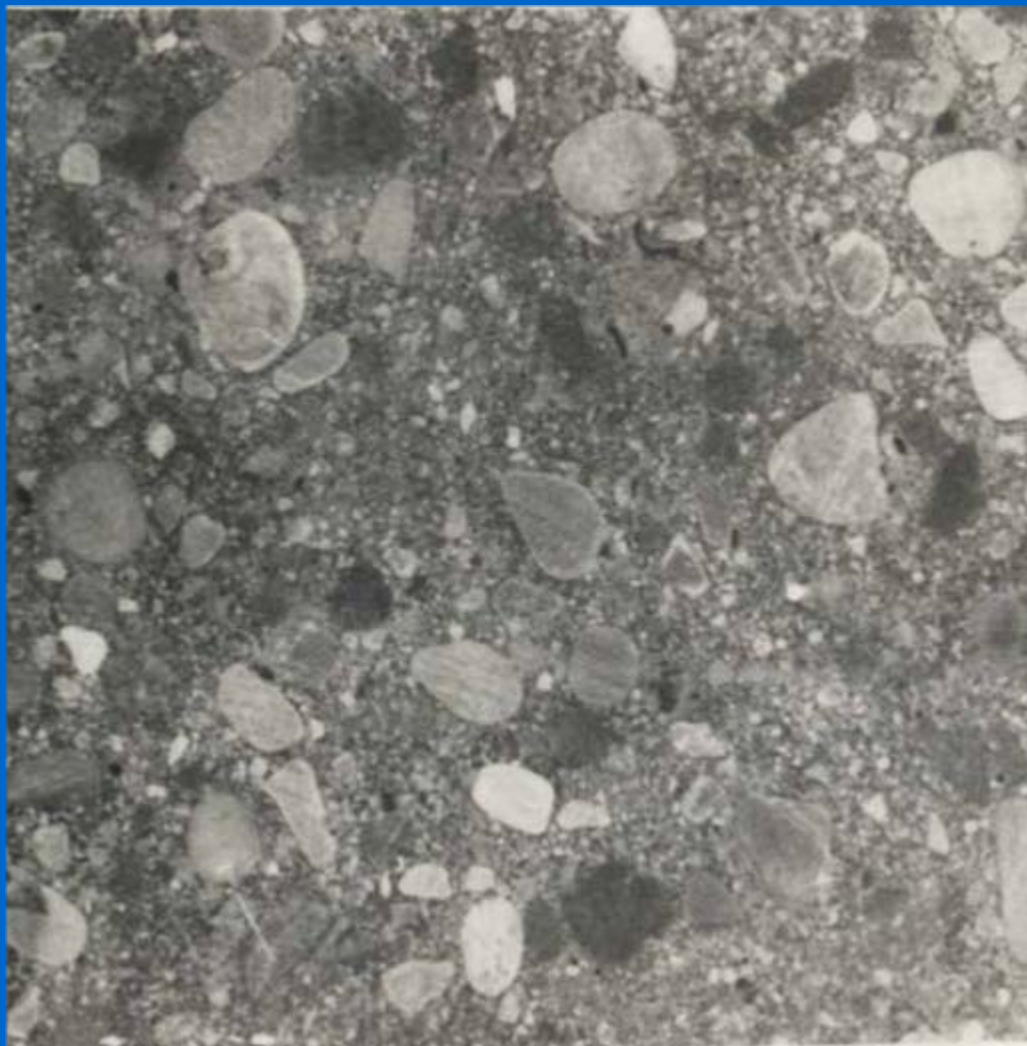
$0.4 \sim 0.45$

干拌法喷射混凝土适宜水灰比的外观特征:

- 水灰比太大，混凝土表面出现流淌、滑移、拉裂现象；
- 水灰比太小，表面出现干斑，粉尘大，回弹多；
- 水灰比适宜，表面平整，呈水亮光泽，粉尘、回弹较小。

6、喷射混凝土性能

6.1 抗压强度



喷射混凝土剖面图
(干喷, 1965年)

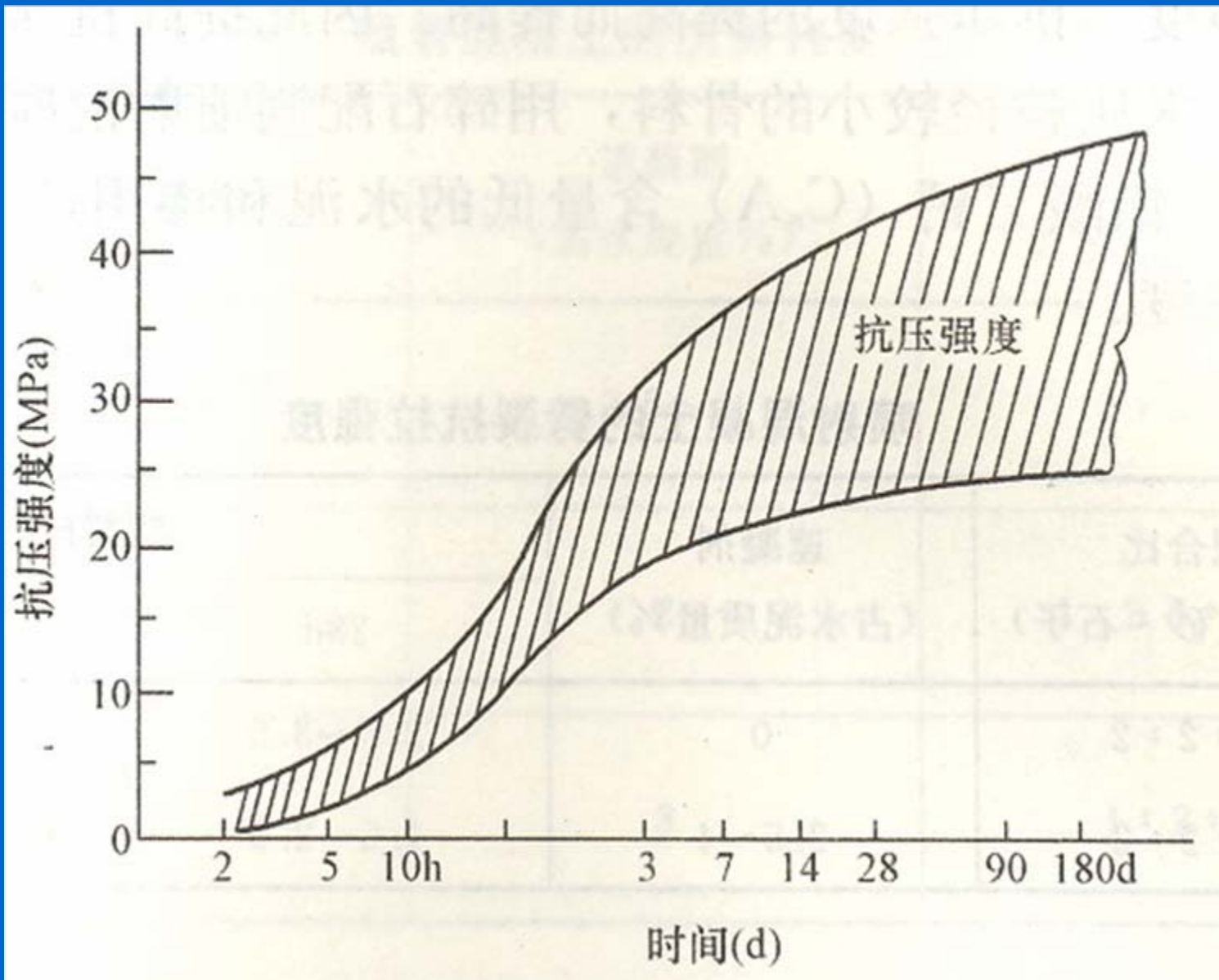
各类干拌法喷射混凝土抗压强度统计资料

工程名称	水泥品种和 强度等级	配合比 (水泥:砂:石)	速凝剂掺量 (占水泥重%)	抗压强度 (MPa)	测定单位
碧鸡关隧道	P. O32.5	1:2:2	2.8	26.7	铁道部昆明铁路局
灰峪隧道	P. O32.5	1:2:2	3.0	25.2	铁道部第三工程局
梅山铁矿地下洞室	P. O32.5	1:2:2	4.0	24.7	冶金部建筑研究院
冯家山水库	P. O32.5	1:2:2	4.0	22.4	西北水利科学研究所
焕子溪一级电站	P. O32.5	1:2:2	3.5	23.2	
石头河水库	P. O32.5	1:2:2	3.0	28.9	西北农学院
舞阳钢铁公司主电室修复工程	P. O32.5	1:2:2	3	30	冶金部建筑研究院
石景山饭店建筑结构补强工程	P. O42.5	1:2:1	0	53	冶金部建筑研究院

工程名称	水泥品种和 强度等级	配合比 (水泥 : 砂 : 石)	速凝剂掺量 (占水泥重%)	抗压强度 (MPa)	测定单位
薄壳工程	P. O42.5	1 : 1.77 : 3.59	0	33~53	北京市第三建筑工程公司
昌平水池工程	P. O42.5	1 : 2 : 2	0	34	冶金部建筑研究院
北京房山供电局住宅补强工程	P. O32.5	1 : 2 : 2	0	28.5	冶金部建筑研究院
怀柔水库桥墩加固	P. O42.5	1 : 2 : 2	0	33~39	冶金部建筑研究总院
玉渊潭二号住宅楼剪力墙加固	P. O42.5	1 : 2.5 : 1.5	0	33~39	冶金部建筑研究总院

抗压强度：最小 22.4~24.7 MPa；最大 39.0~53 MPa

注：R=53 MP为1:2:1



加速凝剂的喷射混凝土强度与龄期的关系

6.2 抗拉强度

喷射混凝土的劈裂抗拉强度

水泥	配合比 (水泥: 砂: 石子)	速凝剂 (占水泥 质量%)	劈裂抗拉强度(Mpa)		
			28d	60d	180d
原P.O32.5	1:2:2	0	2.5~3.5	2.7~3.7	3.0~4.0
原P.O32.5	1:2:2	2.5~4	1.5~2.0	—	2.2~3.0

6.3 抗弯强度

喷射砼抗弯强度变化范围

龄期	8h	3~8d	28d
抗弯强度(Mpa)	0.27~1.76	0.99~6.16	2.82~10.6

$$f_f = \frac{PL}{bh^2}$$

6.4 抗剪强度

喷射混凝土的抗剪强度

测定单位与现场	水泥品种	速凝剂（占水泥重%）	配合比（水泥：砂：石子）	抗剪强度（Mpa）
冶金部建筑研究总院 （梅山铁矿巷道）	原P.O32.5	2.5~4	1:2:2	3~4
铁道部第四工程局 （牛角山隧道）	原P.O32.5	2	1:2.5:1.5	3.7
铁道部第三工程局 （灰峪隧道）	原P.O32.5	3	1:2:2	3.7

国外博茨等人的测定：

7d 抗剪强度 4~4.65MPa

28d 抗剪强度 4.7~6.5MPa

6.5 粘结强度

喷射混凝土粘结强度

综合类型	水泥品种	配合比 (水泥:砂:石)	速凝剂(占水泥重的%)	粘结强度 (MPa)
与岩石粘结	P.O32.5	1:2:2	0	1.0~2.0
与岩石粘结	P.O32.5	1:2:2	2.5~4	0.7~1.5
与混凝土粘结	P.O32.5	1:2:2	0	1.5~2.5
与混凝土粘结	P.O32.5	1:2:2	2.5~4	1.0~1.8

6.6 弹性模量

国外喷射混凝土弹性模量的典型范围

龄期(d)	1	3~8	28
弹性模量(Mpa)	$(1.3\sim2.9)\times 10^4$	$(1.8\sim3.4)\times 10^4$	$(1.8\sim3.7)\times 10^4$

国内喷射混凝土弹性模量的典型范围

抗压强度等级	弹性模量	抗压强度等级	弹性模量
C20	$(2.0\sim2.3)\times 10^4$	C30	$(2.5\sim2.7)\times 10^4$
C25	$(2.3\sim2.5)\times 10^4$	C35	$(2.7\sim3.0)\times 10^4$

6.7 喷射混凝土的变形性能

(略)

6.8 喷射混凝土的渗透性和抗冻性

(1) 抗渗性

干拌法喷射砼的抗渗性

测定单位	抗渗等级	测定单位	抗渗等级
水电部第一工程局	P8~P15	铁道部三局四处	P15~P32
水电部第十二工程局	P10~P20	第十五冶金建设公司	P22
西北水利科学研究所	P7	山西中条有色公司	P10
冶金部建筑研究总院	P5~P20		

(2) 抗冻性

冶金建筑研究总院测定结果：

干拌法喷射混凝土的抗冻性

冻融循环次数 (F)	冻融状态	速凝剂	冻融后试块强度 (MPa)	检验试块强度 (MPa)	冻融后强度变化率 (%)
150	饱和吸水	无	29.4	27.1	+8
		有	23.5	24.0	-2
	半浸水	无	32.4	33.3	-3
		有	18.9	19.4	-3
200	饱和吸水	无	28.8	32.2	-11
		有	22.2	21.0	+6
	半浸水	无	30.2	33.5	-10
		有	20.8	19.0	+9

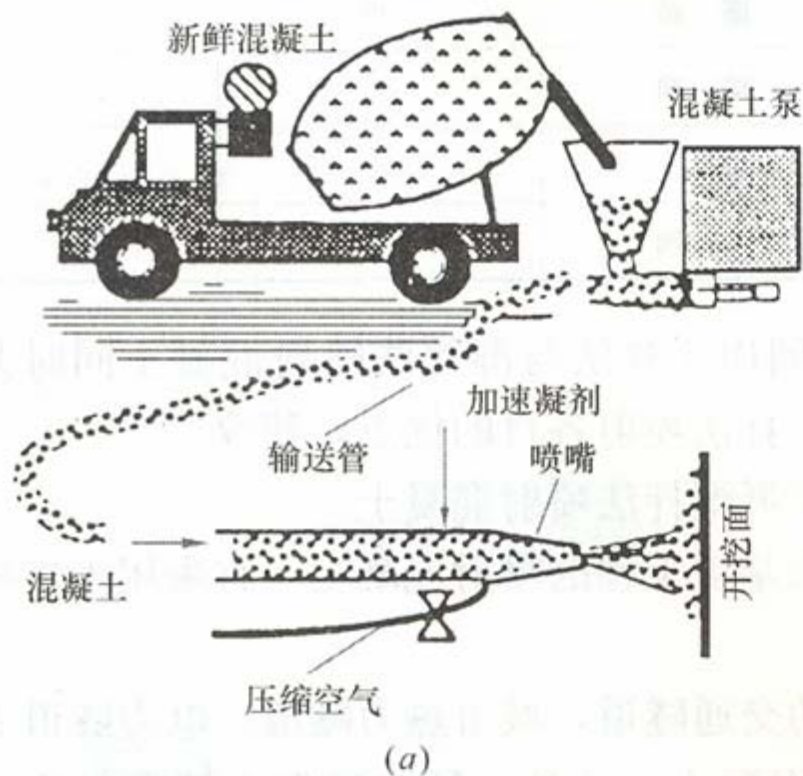
美国进行的冻融资料表明，有80%试件经受300次冻融循环后，没有明显的影响，也无质量损失和弹模的减小。

6.9 喷射混凝土的动力特性

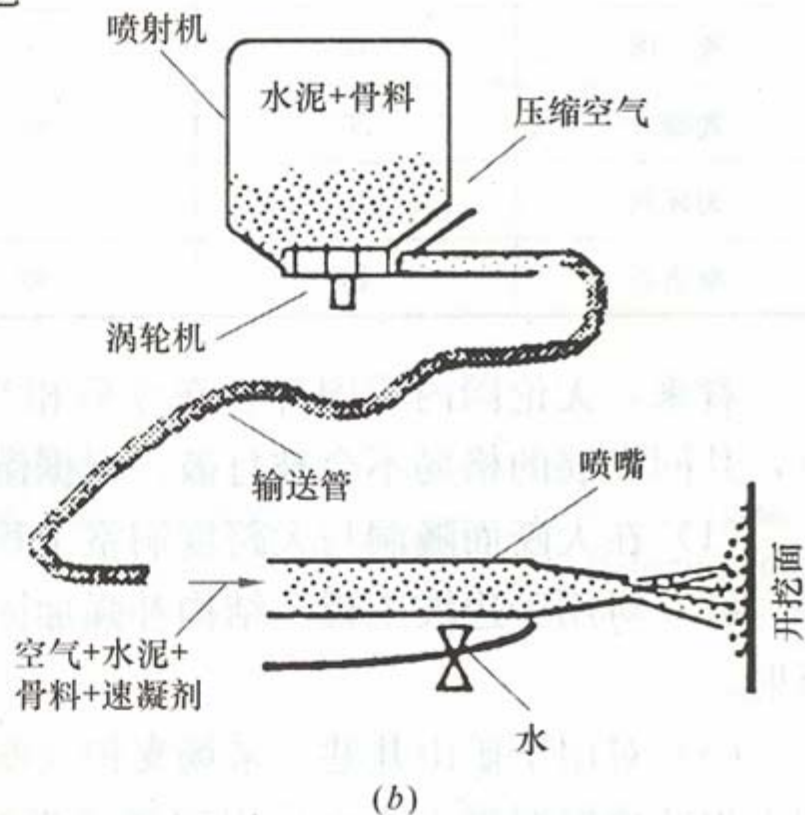
(略)

7、干拌法与湿拌法喷射混凝土

湿拌工艺



干拌工艺



干拌法与湿拌法喷射工艺简图

(a)湿拌法喷射;

(b)干拌法喷射

湿拌法喷射混凝土的优点：

- 施工效率高，特别是泵送型湿拌法喷射混凝土 $6\sim 8\text{m}^3/\text{h}$ ，甚至可高达 $20\text{m}^3/\text{h}$ ，而干拌法喷射混凝土一般为 $3\sim 4\text{m}^3/\text{h}$ ；
- 回弹率低，湿拌法喷射拱墙平均回弹率约为 $5\%\sim 10\%$ ，而干拌法喷射拱墙平均回弹率约为 $15\%\sim 20\%$ ；
- 喷射区粉尘量小；
- 由于减轻了对喷射手技艺的依赖，喷射混凝土的匀质性好。

湿拌法的不足之处：

- 对潮湿或含水地层适应性差；
- 对难以进出的区域施工，由于机械较庞大也颇不方便，对使用量较少的工程也欠灵活性。

干拌法的某些性能比湿拌法差，但仍有湿拌法不及的优越之处：

- 可及时调整水灰比与粉状速凝剂，以适应潮湿、含水地层施工；
- 喷射设施能快速到达和转移，混合料在输料管内可作长距离输送；
- 工作面不大的区域能在开挖面暴露后迅速覆盖。

世界各国干拌和湿拌法喷射砼的应用比例

使用干拌法为主			使用湿拌法为主		
国别	湿拌法 (%)	干拌法 (%)	国别	湿拌法 (%)	干拌法 (%)
奥地利	5	95	法国	60	40
加拿大	5	95	意大利	90	10
德国	15	85	日本	80	20
美国	10	90	挪威	99	1
葡萄牙	20	80	瑞典	80	20
匈牙利	10	90	瑞士	65	35
摩洛哥	10	90	美国	60	40

喷射混凝土机械



HPZ—5型干拌喷射机



HPZ—6型干拌喷射机



CP—5型干拌喷射机



中国TK—500型湿拌
混凝土喷射机



瑞士Sika—PM500P
湿拌混凝土喷射机



瑞士MEYCO potenza
湿拌混凝土喷射机

湿拌法喷射机械



国外：泵送型湿喷机。稠密流；效率高（可达 $20\text{m}^3/\text{h}$ ）。

国内：风动型(TK—500)湿喷机。稀薄流；效率较低



建议:

- 对大断面隧道和大跨度洞室的工程，应积极发展湿拌法喷射混凝土；
- 对边坡、深基坑和结构补强工程，宜采用干拌法喷射混凝土；
- 对于矿山巷井、采场支护和断面较小的城市热力、电力隧道工程，可视情况选用湿拌法喷射或潮拌（半湿拌）法喷射。

8、喷射钢纤维混凝土

这是一种典型的复合材料。

根据“纤维阻裂”理论和“多相复合材料复合”理论、大量的试验研究和工程实践资料，显示了这种复合材料主要有以下三种作用：

- 提高材料抗拉强度；
- 阻止基材中原有缺陷（微裂缝）的扩展并延缓新裂缝的出现；
- 提高基材的抗变能力并从而改善其韧性和抗冲击性。

8.1 钢纤维

- 常用的钢纤维直径为0.25~0.4mm，长20~30mm，长径比一般为60~100；
- 不同品种的钢纤维具有不同功能：

碳素钢纤维 — 用于常温下工作的喷射混凝土；

不锈钢纤维 — 用于高温下工作的喷射混凝土；

端头带弯钩的钢纤维 — 具有较高的抗拔强度；

粘结成排的端钩型钢纤维 — 可满足在混凝土中分散均匀的要求，极易搅拌，杜绝结团现象，从而进一步改善喷射混凝土的性能。

8.2 喷射钢纤维混凝土的配合比

国内干拌法喷射时：

水泥:砂:石=1:2:1.5，钢纤维掺量约为80～
100kg/m³。

国外常用的配合比:

干拌法喷射钢纤维混凝土施工配合比

粗骨料最大粒径 (mm)	细骨料比率 (%)	水灰比	单位水泥用量 (kg/m ³)	钢纤维掺入率 (%)	钢纤维的形状尺寸 (mm)
15	70	0.5	350	1.5	0.5×0.5×20
10	70	0.48	380	1.0	0.5×0.5×20
5	100	0.48	380	1.0	0.3×0.3×25

湿拌法喷射钢纤维混凝土施工配合比

粗骨料最大粒径 (mm)	细骨料比率 (%)	水灰比	单位水泥用量 (kg/m ³)	钢纤维掺入率 (%)	钢纤维的形状尺寸 (mm)
15	70	0.42	510	0.9	0.25×0.25×30
5	100	0.54~0.61	448~500	1.0	0.25×0.25×25
10	70	0.50	380	1.5	0.5×0.5×30
10	70	0.55	350	1.0	0.5×0.3×20

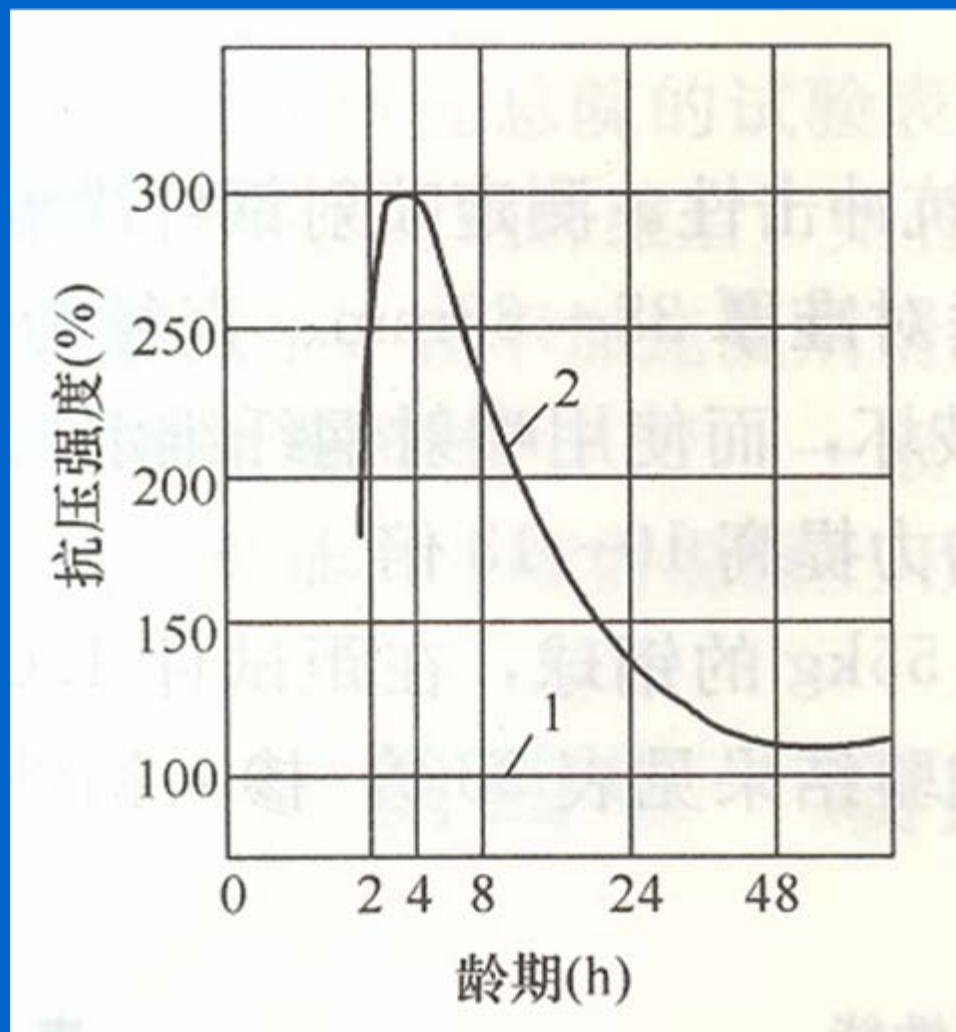
8.3 喷射钢纤维混凝土的主要性能

(1) 抗压强度

喷射钢纤维混凝土的抗压强度

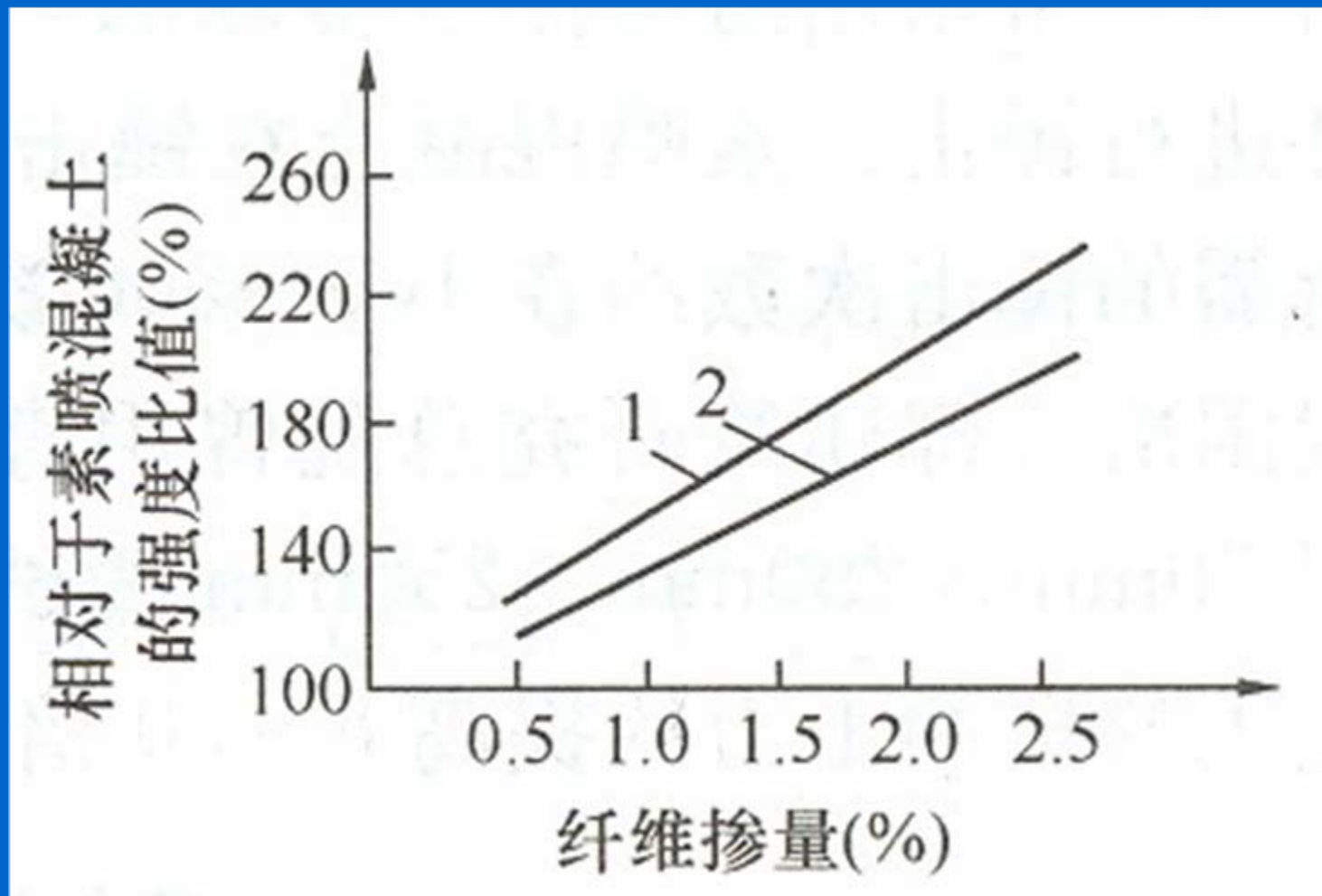
实测单位		中国冶金部建筑研究总院		美国混凝土学会		美国陆军工程兵部队	
水泥：骨料（质量比）		1：4		1：4		1：4	
钢纤维尺寸（mm）		—	$d=0.3 \quad L=25$	—	$d=0.3 \quad L=30$	—	$d=0.25 \quad L=25$
钢纤维掺量（体积百分率）		0	1.20	0	1~1.5	0	1.3~1.5
抗压强度	测定值（MPa）	28.0	36.0~46.0	36.0	48.1~58.8	25.4	41.2
	相对值（%）	100	135~150	100	134~163	100	162

(2) 48h以内的抗压强度



喷射钢纤维的早期相对强度
1—喷射钢纤维砼； 2—喷射混凝土

(3) 抗拉强度



喷射钢纤维混凝土的抗拉强度与钢纤维掺量的关系

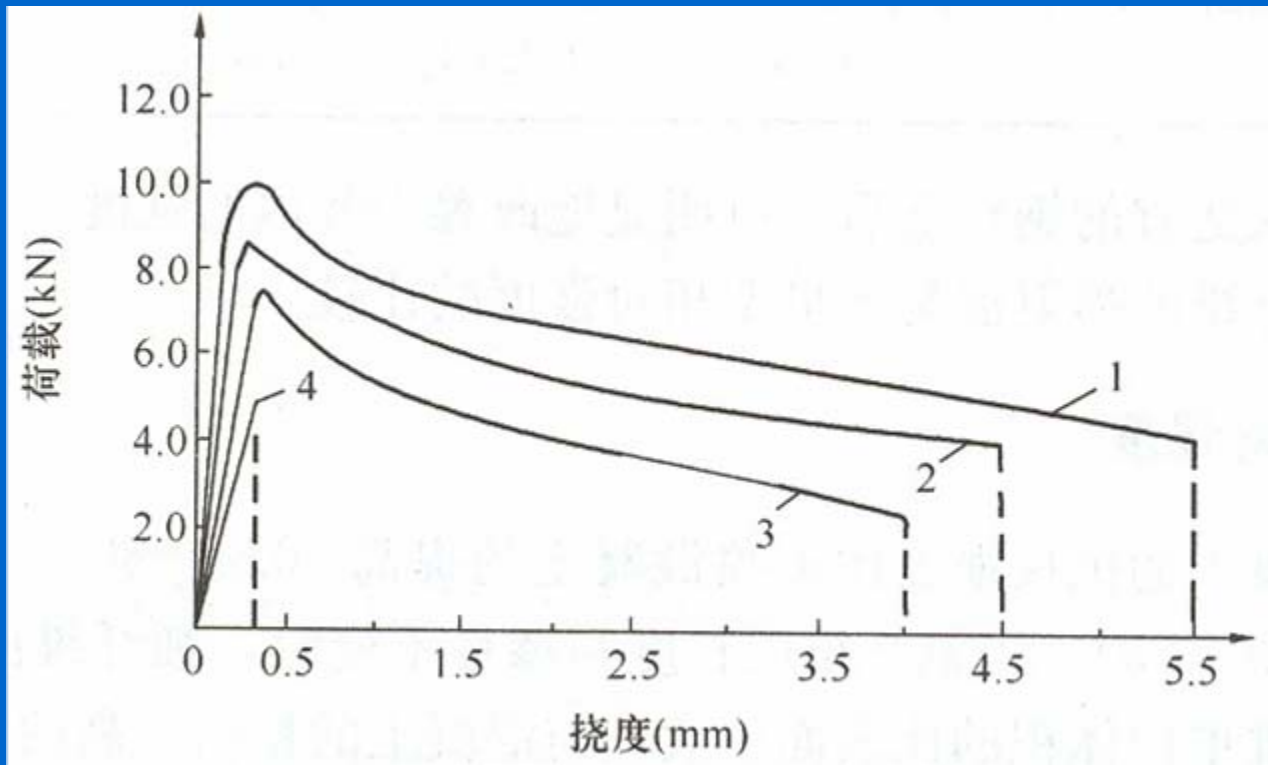
1—抗拉强度； 2—抗弯强度

(4) 抗弯强度

喷射钢纤维混凝土抗弯强度

实测单位		中国冶金部建筑研究总院		美国混凝土学会		美国矿山局	
钢纤维尺寸 (mm)		$d=0.3 \quad L=25$		$d=0.3 \quad L=30$		$d=0.4 \quad L=25$	
钢纤维掺量 (体积百分率)		0	1~2.0	0	2.0	0	2.0
抗弯	实测值 (MPa)	6.3	8.6~10.8	5.6	7.5	—	—
强度	相对值 (%)	100	143~170	100	140	100	200

(5) 韧性



喷射钢纤维混凝土小梁荷载—挠度曲线

1—钢纤维直径0.3mm，长25mm，掺量2%；

2—钢纤维直径0.4mm，长25mm，掺量2%；

3—钢纤维直径0.4mm，长25mm，掺量1.5%； 4—素混凝土

(6) 抗冲击性

用直径35mm，重2.55kg钢球，在距试件1.0m高的上方对70mm×250mm×250mm试件进行撞击。结果表明，掺入钢纤维后喷射混凝土的抗冲击力约提高8~30倍。

喷射钢纤维混凝土的抗冲击性

试件名称	钢纤维掺量 (%)	初 裂		破 坏	
		裂纹条数	冲击次数	裂纹条数	冲击次数
素喷混凝土	0	1	3~6	1	4~7
喷射钢纤维混凝土	1	1~3	4~7	3~4	30~46
喷射钢纤维混凝土	1.5	1~3	8~10	3~4	69~95
喷射钢纤维混凝土	2.0	1	15~24	3~4	195~416

(7) 拔出强度

14天锚杆从喷射钢纤维混凝土中的拔出强度

混合物	抗拔强度 (MPa)
喷射混凝土	7
喷射钢纤维混凝土	12.6

(8) 收缩

收缩显著减小，一般减小30%~40%。

8.4 喷射钢纤维混凝土的应用实例

地 名	用 途	喷层厚度 (cm)	施工方法
美国蛇河	岸坡稳定	6.3	干法
瑞典勃洛夫乔顿	岸坡稳定	3.0	干法
美 国	桥梁与隧洞维修	5~15	干法
瑞典波立登矿	矿山竖井加固	10~15	干法
日本宫下隧道	隧道衬砌	8	湿法
日本板谷隧道	隧道衬砌	10	湿法
日本东名高速公路日本坂隧洞	隧道衬砌		干法
中国湖北金山店铁矿	采矿进路	10	干法
中国江苏梅山铁矿	溜井、采场进路、贮矿仓	10~20	干法
中国河南舞阳钢厂	主电室烧伤梁板的补强	5~7	干法
中国河北秦皇岛	刚构立交桥补强	5	干法
美 国	半球形掩体	5	干法
美 国	引水隧道支护	7.5	干法
中国小浪底水利工程	边坡加固	6.0	干法
中国龙滩水电站	主厂房衬砌	20	干法
中国彭水水电站	主厂房衬砌	15	湿法
中国清江水布垭电站	主厂房衬砌	20	湿法

9、喷射合成纤维砼

9.1 合成纤维材料

单丝合成纤维的几何特征及主要性能

纤维品种 主要参数和性能	聚丙烯腈纤维	聚丙烯纤维	聚酰胺纤维	改性聚酯纤维
直径 (μm)	13	18~65	23	2~15
长度 (mm)	6~25	4~19	19	6~20
截面形状	肾形或圆形	圆形	圆形	三角形
密度 (g/cm^3)	1.18	0.91	1.16	0.9~1.35
抗拉强度 (N/mm^2)	500~910	276~650	600~970	400~1100
弹性模量 (N/mm^2)	$7.5 \times 10^3 \sim 21 \times 10^3$	3.79×10^3	$4 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3$	$1.4 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^4$
极限伸长率 (%)	11~20	15~18	15~20	16~35
安全性	无毒材料	无毒材料	无毒材料	无毒材料
熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	240	176	220	250
吸水性	<2%	<0.1%	<4%	<0.4%

9.2 喷射合成纤维混凝土的性能

- 提高喷射混凝土抗拉强度；
- 提高韧性指数和抗疲劳强度；
- 减少收缩和提高抗裂性能；
- 增大一次喷层厚度，能降低回弹。

用深圳海川公司的路威聚丙烯腈纤维，掺量为 $1\sim 2\text{kg/m}^3$ ，则抗拉强度提高 $6\%\sim 19\%$ ，韧性指数提高 $4.25\sim 11.73$ 倍，抗疲劳强度提高 11.7% ，此外由于能增大一次喷层厚度，可降低回弹 15% 左右。

9.3 工程应用

美国、菲律宾及香港等地用于隧道初期支护、泄洪渠加固、边坡支护等领域，成效显著。

中国龙滩、三峡电站隧道和地下洞室工程，深圳、厦门等地各类工程中应用均取得良好效果。