

# 膏体充填材料强度影响因素分析

赵才智, 周华强, 柏建彪, 强 辉

(中国矿业大学 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 针对影响膏体充填材料强度的因素, 通过大量的试验, 揭示了以河砂为骨料的膏体充填材料强度与各影响因素间的关系。试验结果表明, 影响膏体充填材料强度的主要因素有质量分数、粉煤灰掺量种类以及养护龄期等。相同条件下, 膏体充填材料强度与料浆质量分数、粉煤灰掺量和养护龄期成正比关系。这些结论将为煤矿膏体充填不迁村采煤技术的实施提供一些参考。

**关键词:** 膏体充填; 强度; 粉煤灰; 养护龄期

中图分类号: U 270

文献标识码: A

## Influence factor analysis of paste filling material strength

ZHAO Cai-zhi, ZHOU Hua-qiang, BAI Jian-biao, QIANG Hui

(School of Energy Source and Safety Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Aiming at the factors affecting the strength of paste filling material, the relation between affecting factors and strength of paste filling material is revealed on the basis of a lot of experiments in the lab, in which the river sand was used as skeletal material. The tests show that the strength is mainly affected by the slurry density, type and dosage of fly ash and curing age. There are direct proportion relation between the strength and affecting factors. The conclusions can provide some references for the practice of none-village-relocation coal extraction in the mine.

**Key words:** paste filling; strength; fly ash; curing age

## 0 引 言

膏体充填技术是1979年在德国的格伦德铅锌矿首先发展起来的, 由于膏体充填具有料浆质量分数高、充填效率高、成本较低等优点, 这项技术试验成功以后在金属矿山得到较快的发展, 在包括中国在内的许多国家得到应用。膏体充填技术在德国Wallsum、Monopol等数个煤矿薄煤层开采中也曾得到应用, 其使用的膏体充填材料是非胶结性的, 没有胶结料, 充填的主要目的是处理固体废物。中国东部地区村庄压煤多数是厚煤层和中厚煤层, 沿用德国煤矿非胶结膏体充填不能够达到不迁村采煤的要求。所以, 必须发展固体废物胶结性膏体充填。但是, 在中国煤炭系统, 固体废物膏体充填技术目前还处于研究阶段, 煤矿不迁村膏体充填与金属矿山膏体充填相比, 在充填材料、充填目的和充填要求等方面均不相同<sup>[1-2]</sup>。

膏体充填技术的核心是膏体充填材料, 膏体充填材料的强度对膏体充填的效果起决定作用。因此, 分析膏体充填材料强度的影响因素十分必要。

## 1 膏体充填材料的组成及性质<sup>[2]</sup>

为满足济宁太平煤矿厚煤层不迁村分层膏体充填开采技术的需要, 结合当地具体情况, 膏体充填材料主要由膏体胶结料与粉煤灰、泗河砂与水合理配制而成。膏体胶结料是一类以普通硅酸盐水泥为基材(占50%左右), 与石膏、石灰和多种外加剂等科学配制的复合材料。此材料加水混合后, 凝结的初期快速水化生成适当量的高结晶水水化物—钙矾石, 其分子式为 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , 结晶水分子容积高达81.16%, 从而达到速凝、早强的效果; 凝结的中期和后期, 又能够正常水化生成硅酸钙凝胶等胶凝物质, 如 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ,  $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等, 具有后期强度持续增长的特点, 保证了后期强度的需要。由于泗河穿过太平煤矿膏体充填试验区, 泗河砂又是当地建筑一般不用的特细砂, 来源丰富, 所以选泗河砂为基本集料。泗河砂密度 $2.63 \text{ t/m}^3$ , 平均粒径

收稿日期: 2005-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574089)

作者简介: 赵才智(1978-)男, 山西孝义人, 博士研究生, 主要从事充填材料方面的研究, E-mail: zhaocaizhi@163.com。本文编校: 焦 丽

0.275 mm ,含泥量3.5 % ,细度模数1.36 ,为特细砂。

2 膏体充填材料强度实验

影响膏体充填材料强度的因素很多，如浆体的质量分数、养护龄期、养护条件（温度、湿度）、细集料和胶结料的化学组成及用量、骨料级配等等。结合实际情况，本文考虑了如下几个因素：浆体质量分数、养护龄期、细集料种类及用量。为此，在实验室进行了系列实验，分析研究了质量分数及粉煤灰种类、用量对膏体充填材料强度的影响。膏体胶结料用量50 kg/m<sup>3</sup>，质量分数变化范围我为：81 %~83 %；粉煤灰用量区间为250 ~500 kg/m<sup>3</sup>，分别选取山东里彦电厂的一级、二级粉煤灰和邹县电厂的一级粉煤灰，均系电厂干排灰。选用7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm试模，对1 d、3 d、7 d这三个龄期进行强度实验，实验在WDW-E50D 电子万能试验机上进行。试验结果见表1~表3。

表 1 浆体质量分数为 81 % 粉煤灰与充填体强度关系( MPa )  
Tab.1 relationship between fly ash and filling body strength

when mass percent is eighty one(MPa)							
龄期	种类	粉煤灰单位体积用量/( kg·m <sup>-3</sup> )					
		250	300	350	400	450	500
1d	里彦一级	0.09	0.12	0.23	0.16	0.32	0.27
	里彦二级	0.07	0.11	0.12	0.20	0.21	0.25
	邹县一级	0.13	0.21	0.24	0.28	0.26	0.36
3d	里彦一级	0.13	0.16	0.26	0.26	0.38	0.30
	里彦二级	0.13	0.14	0.16	0.22	0.24	0.28
	邹县一级	0.20	0.28	0.36	0.40	0.44	0.52
7d	里彦一级	0.13	0.19	0.47	0.35	0.57	0.46
	里彦二级	0.12	0.16	0.16	0.25	0.26	0.30
	邹县一级	0.20	0.32	0.38	0.48	0.64	0.77

表 2 浆体质量分数为 82 % 粉煤灰与充填体强度关系( MPa )  
Tab.2 relationship between fly ash and filling body strength

when mass percent is eighty two (MPa)							
龄期	种类	粉煤灰单位体积用量/( kg·m <sup>-3</sup> )					
		250	300	350	400	450	500
1d	里彦一级	0.15	0.18	0.14	0.16	0.27	0.37
	里彦二级	0.15	0.18	0.20	0.21	0.27	0.25
	邹县一级	0.12	0.17	0.20	0.23	0.36	0.40
3d	里彦一级	0.18	0.25	0.18	0.19	0.39	0.36
	里彦二级	0.16	0.16	0.21	0.27	0.30	0.29
	邹县一级	0.18	0.25	0.30	0.29	0.50	0.52
7d	里彦一级	0.24	0.29	0.25	0.37	0.59	0.55

里彦二级	0.18	0.18	0.29	0.32	0.30	0.35
邹县一级	0.21	0.32	0.38	0.37	0.83	0.81

表 3 浆体质量分数为 83 % 粉煤灰与充填体强度关系( MPa )  
Tab.3 relationship between fly ash and filling body strength

when mass percent is eighty three(MPa)							
龄期	种类	粉煤灰单位体积用量 /( kg·m <sup>-3</sup> )					
		250	300	350	400	450	500
1d	里彦一级	0.10	0.14	0.17	0.16	0.21	0.31
	里彦二级	0.09	0.11	0.13	0.14	0.22	0.23
	邹县一级	0.10	0.14	0.18	0.25	0.31	0.30
3d	里彦一级	0.18	0.16	0.20	0.20	0.23	0.34
	里彦二级	0.12	0.16	0.16	0.13	0.28	0.30
	邹县一级	0.15	0.17	0.25	0.38	0.46	0.50
7d	里彦一级	0.17	0.16	0.21	0.21	0.25	0.56
	里彦二级	0.18	0.17	0.19	0.18	0.28	0.30
	邹县一级	0.16	0.21	0.32	0.70	0.83	0.92

3 强度影响因素分析

试验结果表明，膏体充填材料质量分数、粉煤灰种类及用量、养护龄期等因素对充填体的强度都很大的影响。

3.1 浆体质量分数影响

图1为浆体质量分数与充填体强度关系曲线，图中强度为粉煤灰用量为500 kg/m<sup>3</sup>时的平均强度。

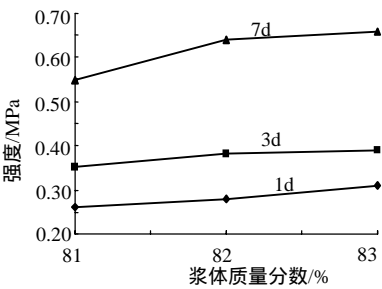


图1 浆体质量分数与充填体强度的关系  
Fig.1 the relation between slurry density and filling body strength

从图1可以看出，相同条件下，随着膏体质量分数的提高，充填体的强度明显增加。在实践中，可根据这一特性在满足流动条件下，调整膏体充填料浆的质量分数，通过增加浆体质量分数来提高充填体的强度，继而减少膏体胶结料用量，从而达到降低充填成本的目的。

### 3.2 粉煤灰影响<sup>[3-6]</sup>

#### 3.2.1 粉煤灰用量

图2为浆体质量分数为81%，胶结料用量为50 kg/m<sup>3</sup>，粉煤灰用量与膏体充填体强度的关系，龄期为3 d。

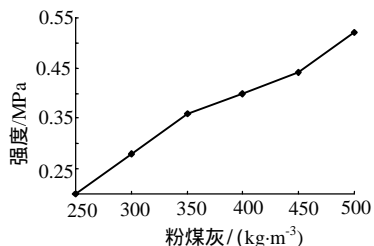


图2 粉煤灰用量与充填体强度的关系

Fig.2 relation between filling body strength and fly ash use consumption

由图2来看，相同条件下随着粉煤灰用量的增加，充填体强度也随之提高，即两者成正比之关系。利用这一特点，可以在膏体料浆配制过程中，适当增加粉煤灰用量，一来可以提高充填体强度，二来可以改善料浆的流动性。另一方面粉煤灰在膏体配比中的大量使用可以减少由粉煤灰排放给环境造成的污染，从而更好地保护环境。

#### 3.2.2 粉煤灰种类

从实验结果分析发现，相同条件下除粉煤灰用量外，粉煤灰种类对充填体强度也有一定影响。不同的粉煤灰在不同龄期，对膏体强度的影响不尽相同。这主要取决于粉煤灰的矿物组成及微观特征。

从现有的研究成果来看，粉煤灰在充填料浆中主要起两方面作用：充填致密和活性胶凝作用。充填密实又分物理和化学充填两方面：物理充填主要是微细的粉煤灰颗粒填充了尾砂胶结充填体中的孔隙，置换了孔隙中的空气，增加了尾砂胶结充填体的密实程度；化学充填主要指粉煤灰活性颗粒的水化反应，使粉煤灰玻璃微珠周围形成了水化凝胶网络(实际是微珠表面的水化层和凝胶沉淀层共同组成的“双膜层”)，胶合了粉煤灰颗粒与水泥浆体及骨料颗粒的界面，提高了集料界面的粘结强度，使浆体和集料界面起致密作用。对于粉煤灰的活性胶凝作用主要表现在后期，前期不很明显。

### 3.3 养护龄期

在质量分数、粉煤灰用量一定的条件下，养护龄期对充填体强度的影响见图3，图中强度为粉煤

灰用量为500 kg/m<sup>3</sup>时的平均强度。

图3表明抗压强度受龄期影响很大，强度随着养护龄期的增长而增大。此外实验室对膏体料浆凝结时间的观察表明，充填体养护8 h之后，已具有一定的强度，脱模后可以达到自稳。这一特点非常有利于矿山充填，有利于缩短采充循环周期，提高采场综合生产能力，完全可以满足膏体充填开采的现场工艺要求。

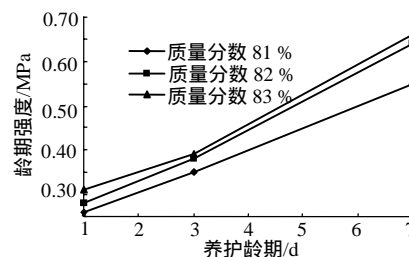


图3 膏体强度与养护龄期关系

Fig.3 age strength relation of paste filling body

## 4 结 论

以上实验数据的分析表明，膏体质量分数、粉煤灰用量及种类和养护龄期对充填体强度都有不同程度的影响：

(1) 相同条件下，随着膏体质量分数的增加，充填体随之不断提高。

(2) 粉煤灰对膏体充填体强度的贡献主要是在于其充填致密和活性胶凝作用。不同的粉煤灰，由于其化学、矿物成分及微观形态的差异，对充填体强度的影响各异。相同条件下，随着粉煤灰用量的增加，其强度呈上升趋势。

(3) 在质量分数、粉煤灰用量一定的条件下，充填体强度随养护龄期不断增长。

(4) 实践中，可以利用粉煤灰增强减水作用，大掺量使用，提高膏体质量分数，减少膏体胶结料用量，降低充填成本，提高充填体强度。

### 参考文献:

- [1] 周华强,侯朝炯. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):154-158.
- [2] 赵才智,周华强. 膏体充填材料力学性能的初步实验[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):159-161.
- [3] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [4] 饶运章. 尾砂胶结充填应用粉煤灰的机理及试验研究[J]. 南方冶金学院学报,2003,24(2):1-5.
- [5] 胡家国,古德生. 粉煤灰作为水泥替代品用于胶结充填的试验研究[J]. 矿业研究与开发,2002,22(5):5-8.
- [6] 王新民,胡家国,王泽群. 粉煤灰细砂胶结充填应用技术的试验研究[J]. 矿业研究与开发,2001,21(3): 4-6.