

doi: 10.11799/ce201812028

# 水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料强度 影响因素试验研究

连会青<sup>1</sup>, 杨俊文<sup>1</sup>, 雷玉娟<sup>2</sup>

(1. 华北科技学院, 河北 三河 065201; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为研究不同配比水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料结石体抗压强度的变化规律, 在正交实验设计原则指导下, 确定了影响浆液性能的水固比、粉煤灰掺量、水玻璃添加比例三个因素以及各因素的水平, 设计了正交实验方案, 测试了结石体抗压强度。通过极差和方差分析了各因素对抗压强度的影响规律, 最终得出水固比 0.8 : 1、粉煤灰掺量 20%、水玻璃添加比 1% 的浆液结石体强度性能最好。采用多元非线性回归法建立结石体 28d 强度与三因素之间定量关系的基础上, 分析浆液固化过程和结石体 SEM 图像, 阐明了三因素对结石体强度的影响机理, 认为粉煤灰掺量超过 20% 会减少氢氧化钙(CH)六方晶体的析出, 水固比的增大会稀释浆液, 直接导致浆液凝结速度变缓, 水玻璃添加比过大一方面会导致浆液凝结过快, 其他物料不能充分反应, 另一方面会抑制氢氧化钙(CH)的生成, 导致强度降低。

**关键词:** 粉煤灰; 水玻璃; 注浆材料; 正交试验; 抗压强度

**中图分类号:** TD265.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2018)12-0107-06

## Experimental study on the influence factors of strength of cement-fly ash-water-glass grouting material

LIAN Hui-qing<sup>1</sup>, YANG Jun-wen<sup>1</sup>, LEI Yu-juan<sup>2</sup>

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 065201, China;

2. China university of geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the changing rules of compressive strength of stone with different proportions of cement-fly ash-water glass grouting material, the water-solid ratio, the fly ash content, the proportion of sodium silicate and the level of each factor which affect the performance of slurry were determined in this paper based on the principles of orthogonal experimental design. Moreover, the orthogonal experimental scheme was designed and the compressive strength of the stone body was tested. It is concluded that the strength performance of slurry stone body with a water-solid ratio of 0.8 : 1 and a fly ash content of 20% and a sodium silicate content of 1% is the best by analyzing the influence of various factors on compressive strength. Based on establishing the quantitative relationship between 28d strength of stone body and three factors using multivariate nonlinear regression method, the slurry curing process and SEM images of stone bodies was studied and the three factors the influence mechanism of the strength of stone body was illustrated. It is shown through the study that when the fly ash content is more than 20% will decrease that precipitation of calcium hydroxide (CH) hexagonal crystals, and the increasing of water-solid ratio will dilute the slurry, resulting the slurry coagulation speed becomes slow directly. On the one hand, excessive addition ratio of sodium silicate will lead to excessive slurry condensation and insufficient reaction of other material; on the other hand, the formation of calcium hydroxide (CH) is inhibited, resulting in a decrease in strength.

**Keywords:** fly ash; sodium silicate; grouting material; orthogonal experiment; compressive strength

**收稿日期:** 2018-10-18

**基金项目:** “十三五”国家重大研发计划项目(2017YFC0804108); 国家自然科学基金资助(51774136); 河北省自然科学基金重点项目(D2017508099); 教育部“创新团队发展计划”滚动支持计划(IRT\_17R37); 中央高校科研业务费(3142014018)

**作者简介:** 连会青(1975—), 女, 山西忻州人, 教授, 现从事矿井水害防治方面的研究工作, E-mail: 2366884370@qq.com。

**引用格式:** 连会青, 杨俊文, 雷玉娟. 水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料强度影响因素试验研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 107-112.

当前煤矿防治水、采空区处理、地下工程的极速发展都离不开注浆技术和注浆材料的发展<sup>[1-4]</sup>。在煤炭开采中,华北型煤田老矿井逐步进入下组煤开采过程,下伏奥陶系灰岩含水层水通过导水裂隙、断层、陷落柱等垂向导水构造对煤层开采造成威胁,通过大规模水平分支造孔等技术进行底板注浆改造工程,已经是多个矿区常用的技术手段。此类注浆工程耗浆量巨大,研究开发成本低、性能好的浆液可提高生产效率、节约生产成本,对解决不同水文地质条件下的堵水加固问题和注浆技术的发展有着积极的作用<sup>[5]</sup>。水泥浆液具有结石体抗压强度高,原材料丰富、操作简单、流动性差的特点,化学浆液流动性好但强度低。为了改善浆液性能,在水泥浆的基础上,添加容易获取的粉煤灰和水玻璃,形成水玻璃-粉煤灰-水泥混合浆液。粉煤灰可增大浆液泵送性能,降低浆液强度,但后期强度增进率大;水玻璃能减小流动性、缩短凝固时间,合适的掺入量可提高结石体强度<sup>[6]</sup>,整体混合浆液性能将随水固比、粉煤灰掺量、水玻璃添加比例改变而改变。

由于多数注浆工程对浆液提出的首要性能参数是抗压强度,所以学者们对水泥-粉煤灰-水玻璃这种复合注浆材料的抗压强度影响因素和发展规律进行深入的研究<sup>[7,8]</sup>。国内外已有较多人员开展了粉煤灰注浆材料的相关研究,童立元等<sup>[9]</sup>对粉煤灰注浆材料进行了试验研究,得出水泥粉煤灰浆液凝结时间较长,且随粉煤灰掺量增加而延长,加入适量水玻璃可以达到速凝的效果;浆液结石体前期强度低,后期强度增长较快。邹友平<sup>[10]</sup>在研究中做过不同配比固相比为3:7、水固比1:1.2~1:1.5、水玻璃占水泥含量2%和3%的室内试验,得出粉煤灰水泥注浆材料最佳水固比为1:1.2~1:1.5,水玻璃掺量为水泥质量的2%~

3%。李永鑫<sup>[11]</sup>提出粉煤灰水泥浆液最终的强度与分形维数有关,分形维数越大,浆液的抗压强度越低。蒋林华等<sup>[12]</sup>利用TMS-GC, DTA, SEM等方法研究了高掺量粉煤灰水泥材料水化性能的影响,结果表明:高掺量粉煤灰水泥的水化速度前期较慢,后期较快的基本特点,激发剂显著提高了水化速度。对于水泥-粉煤灰-水玻璃复合注浆材料,前人还没有做过同时把水固比、粉煤灰掺量和水玻璃添加比这三个因素都做为变量,且参数变化范围较大的室内试验来研究与结石体抗压强度的关系和规律。

## 1 试验设计

### 1.1 试验目的

通过室内试验探索水固比、粉煤灰掺量、水玻璃添加比例三因素对浆液结石体抗压强度的影响,分析变化规律,优选出一种强度满足要求且性能最好的配比方案。

### 1.2 试验材料

以水泥、粉煤灰作为主剂,水作溶剂,水玻璃作速凝剂的混合浆液,能克服纯水泥浆液凝结时间短、流动性差的缺点,可得到具有一定强度、可注性强、渗透率低、凝结时间满足实际需求的浆液。本次实验采用以下三种原材料:425普通硅酸盐水泥、I级粉煤灰(粉煤灰粒度60%以上小于0.04mm,密度为1.15g/cm<sup>3</sup>)、水玻璃(密度为1.354g/mL,波美度为37.9°Bé)。

### 1.3 试验方案

根据原材料种类和性质,影响浆液性能的有水固比(A)、固相粉煤灰掺量(B)、水玻璃添加比例(C)三个因素。从文献数据统计<sup>[4,9,10,13]</sup>可得,A、B、C三个因素的水平及其相应材料主要性能见表1。

表1 粉煤灰基浆液三个因素及各因素水平统计

因素	水平	主要性能
水固比	<1 0.4:1、0.5:1、0.6:1、0.7:1、 0.75:1、0.8:1、1:1.2、1: 1.3、1:1.4、1:1.5	粘度大,流动性较差,在添加外加剂时甚至出现滴流以至于无法测量粘度,凝结时间短,不易泵送,但结石体强度高
	≥1 1:1、1:0.8、1:0.6、2:1、3: 1、4:1	结石体强度相对较低,但粘度变小,流动性增强
粉煤灰掺量	0%、10%、15%、20%、25%、30%、 35%、40%、50%、60%、70%、80%	随粉煤灰掺量增加,浆液早期强度较低,而且粉煤灰的活性不能得到充分发挥,强度打不到预期要求,凝结时间延长,但加入适量粉煤灰,有利于促进活性反应,降低浆液制作成本。不同粉煤灰掺量的浆液随水固比变化,浆液最优粉煤灰掺量变化
水玻璃 添加比例	0%、1%、2%、3%、4%、5%	加入适量的水玻璃,可改善浆液强度、凝固时间等性能。只有在某个水平或一定范围内才能最大限度的发挥水玻璃的优势

本次试验采用正交试验方法<sup>[14]</sup>,设计三个因素,每个因素设4个水平,具体为:水固比设0.8:1、1:1、2:1、3:1四个水平;粉煤灰掺量设10%、20%、30%、40%四个水平;水玻璃添加比例设1%、2%、3%、5%四个水平,

共设计了16组配比。

### 1.4 样品制作与强度测试

制样采用规格为70.7mm×70.7mm×70.7mm的铁铸盒子模具,将浆液制作成规格为70.7mm×70.7mm×70.7mm

的试块, 每组配比制作 12 个, 共 192 个试块, 浆液固结后脱模, 16 组不同配比的试块编号依次为  $S_1 \sim S_{16}$ 。脱模后样品在室温条件下分别养护至 3d、7d、14d、28d 期龄。

样品抗压强度测试采用 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机, 试验过程控制压缩速率为  $1\text{mm}/\text{min}$ 。测定各期龄试块的抗压强度时, 每个期龄在每组配比的 12 个试块中取 3 个试块进行测试, 并取其平均值, 每一个得到

的平均值记为一个有效数据。

## 2 正交试验结果与数据分析

### 2.1 抗压强度测试结果

本次实验共获得 64 个有效数据, 数据见表 2, 并统计了各组配比方案的 4 个龄期强度的柱状图, 如图 1 所示。

表 2 抗压强度测试结果

期龄	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$	$S_{16}$
3d	6.72	4.57	2.12	1.17	3.34	3.37	1.05	1.39	0.66	0.34	2.80	1.04	0.22	0.38	0.75	1.26
7d	7.25	7.69	4.44	2.29	5.71	5.21	2.15	2.96	1.58	0.82	4.32	2.06	0.78	0.79	1.79	3.02
14d	8.65	8.48	5.51	2.12	5.03	8.36	3.08	3.92	2.92	1.36	3.72	5.38	1.08	1.40	3.56	4.16
28d	12.24	10.9	5.21	2.13	10.82	14.10	2.62	2.48	2.70	1.85	9.68	3.43	1.18	1.32	4.11	8.31

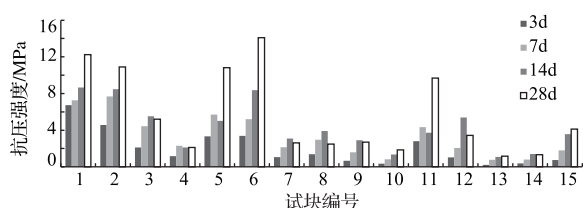


图 1 正交试验结果图

由图 1 可直观的看出, 后期 28d 抗压强度基本上均高于早期和中期, 3d 抗压强度中  $S_1$  最高,  $S_2$  较高; 7d 抗压强度中,  $S_2$  最高,  $S_1$  较高; 7d 抗压强度中,  $S_1$  最高,  $S_2$  和  $S_6$  较高; 28d 抗压强度中,  $S_6$  最高,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_5$  较高。 $S_{13}$ 、 $S_{14}$  各个期龄强度最低。

### 2.2 极差分析

记  $t_{ij}$  为第  $j$  列各水平对应的试验结果的平均值,  $R_j$  为第  $j$  列各  $t_{ij}$  的最大值与最小值的差, 如式(1)、式(2)。

$$t_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{ij} \quad (1)$$

$$R_j = m_{ij}(\max) - m_{ij}(\min) \quad (2)$$

采用极差分析研究 3 因素对注浆材料抗压强度影响程度的大小。极差  $R$  反应各因素的水平变动时, 实验指标的变动幅度,  $R$  越大的因素对指标的影响程度越大, 反之越小。

正交试验抗压强度极差分析结果如图 2 所示。图 2 显示, 在设计的因素水平范围内, 三个因素对结石体 3d 和 7d 的抗压强度的影响程度从大到小依次为水固比、粉煤灰掺量和水玻璃添加比例; 三个因素对结石体 14d 和 28d 的抗压强度的影响程度从大到小依次为水玻璃添加比例、水固比、粉煤灰掺量。

以各因素不同水平为横坐标,  $t_{ij}$  值为纵坐标, 根据各水平的  $t_{ij}$  值绘制出各因素水平的影响曲线, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 三个因素与抗压强度均呈负相关。水固比与抗压强度呈负相关, 随水固比增大, 结石体抗压强度减小。随粉煤灰掺量增加, 结石体抗压强度总体为减小趋势,

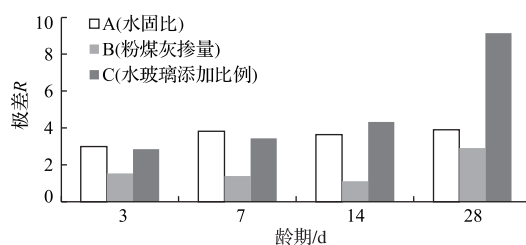


图 2 正交试验极差分析

在 3d 和 7d 为负相关, 在中后期 14d 和 28d 粉煤灰掺量为 20% 时, 强度有一个明显的提高, 说明加入适当的粉煤灰掺量时, 粉煤灰的活性反应充分, 在中后期起了明显作用。随水玻璃添加比例增大, 结石体抗压强度减小, 且呈现一个由缓变急的过程, 表明水玻璃对抗压强度的影响随时间会逐渐增大。

综合评价, 以 28d 抗压强度为考核指标, 水泥-粉煤灰-水玻璃的最优组合为  $A_1B_2C_1$ , 即水固比 0.8 : 1、粉煤灰掺量 20%、水玻璃添加比 1%。

### 2.3 方差分析

采用方差分析研究三因素对注浆材料抗压强度影响的显著程度。对 3d、7d、14d 和 28d 的抗压强度进行方差分析, 运用式(3)分别求出各因素组间、组内的方差, 再根据式(4)求出  $F$  值, 最后查表比较  $F$  与  $F_{\alpha}$  的大小, 若  $F > F_{\alpha}$ , 则该因素显著, 否则不显著(选择临界值  $\alpha = 0.05$  时为高度显著、 $\alpha = 0.10$  时为一般显著)。

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3)$$

$$F = \frac{\sigma_{\text{组内}}}{\sigma_{\text{组间}}} \quad (4)$$

不同期龄各因素的  $F$  值如图 4 所示, 从图 4 显示的  $F$  检验分析结果可看出: 水固比对 3d、7d、14d 抗压强度影响显著, 对 28d 抗压强度影响不显著。粉煤灰掺量对 3d 抗压强度影响显著, 对 7d、14d、28d 抗压强度影响不显著;

水玻璃添加比对 3d、28d 抗压强度影响一般，对 7d、14d 抗压强度不显著。

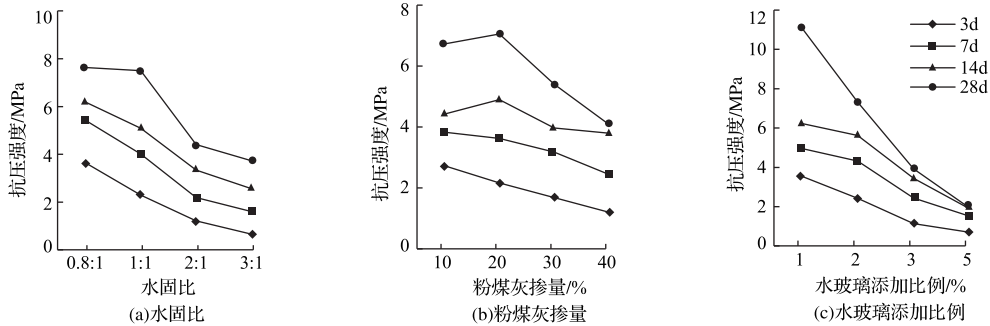


图3 各因素对抗压强度的影响趋势图

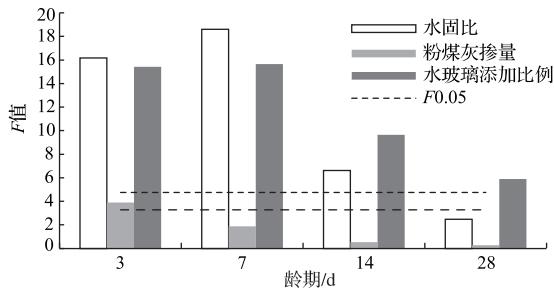


图4 不同期龄各因素的 F 值

2.4 回归分析

在工程实际中往往关注的是注浆材料后期的抗压强度，因此利用式(5)的回归模型对试块的 28d 抗压强度进行多元非线性回归分析，见式(6)。

$$y = a + \sum b_i x_i + \sum_{j < i} c_{ij} x_j x_i + \sum_{i=1}^n d_i x_i^2 \quad (5)$$

$$y = 22.041 - 6.895x_1 + 19.116x_2 - 511.598x_3 + 1.842x_1x_2 - 510.286x_2x_3 - 25.844x_1x_3 - 1.182x_1^2 - 40.458x_2^2 - 7608.814x_3^2 \quad (6)$$

回归分析结果显示  $R^2 = 0.968$ ，说明该模型对实验数据的回归效果较好。从表 3 中可以看出， $x_2$ 、 $x_1x_2$ 、 $x_1x_3$  三项的显著性值大于 0.25，说明这三项对强度的影响不显著，其余项均显著。

表3 回归方程系数检验

因子	系数	t 值	显著性(p)
$x_1$	-6.895	-2.02	0.0888
$x_2$	19.116	0.95	0.3781
$x_3$	-511.598	-2.96	0.0251
$x_1x_2$	1.842	0.29	0.7771
$x_2x_3$	-510.286	-1.45	0.1956
$x_1x_3$	-25.844	-0.50	0.6289
$x_1^2$	-1.182	1.77	0.1256
$x_2^2$	-40.458	-1.31	0.2383
$x_3^2$	-7608.814	4.11	0.0062

式(6)中  $x_1$ 、 $x_3$  系数为负，表明单独增加水固比、水玻璃添加比会有减小结石体强度的作用， $x_2$  系数为正表明单独增加粉煤灰增量对抗压强度有增加作用。交叉项  $x_1x_2$

的系数为 1.842 ( $t = 0.29$ ,  $p > 0.25$ ，不显著)，说明水固比和粉煤灰掺量的交互作用对强度有微弱的正效应； $x_2x_3$  的系数为 -510.286 ( $t = -1.45$ ,  $p < 0.25$ ，显著)，说明粉煤灰掺量和水玻璃添加比的交互作用对强度有显著的负效应； $x_1x_3$  的系数为 -25.844 ( $t = -0.5$ ,  $p > 0.25$ ，不显著)，说明水固比和水玻璃添加比的交互作用对强度有微弱的负效应。二次项系数均为负，说明过量增加三因素中任意一个因素，都会减小结石体的强度。对比  $x_2$  的系数和  $x_2^2$  的系数，发现  $x_2$  系数为正， $x_2^2$  的系数为负，说明适当增加粉煤灰掺量可增加结石体强度，而过量加入粉煤灰会不利于提高结石体强度。这一规律符合极差分析中粉煤灰掺量为 20% 时、强度达到峰值的现象。

3 结石体微观结构分析

通过扫描电镜可以观察试块表面微观结构，以便于从微观上了解和分析不同配比的浆液形成的结石体的强度与三个因素的关系。本文选取了水固比不变，粉煤灰掺量和水玻璃添加比分别变化的  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  四组样品进行扫描电镜观察实验。样品  $S_1 \sim S_4$  的 28d 结石体 SEM 图像如图 5 所示。

$S_1$  样品多为水泥水化反应的产物，C-S-H 凝胶已近似形成一个体系，结构紧密，CH 晶体结晶形态差，粉煤灰颗粒表面有水化产物析出，从上述现象可知结石体已有较高的强度；裂隙很少，孔隙中已充填凝胶体，有少部分未被充填，表明强度能力好。 $S_2$  样品大致与  $S_1$  相似，C-S-H 凝胶结构紧密，析出大量紧密排列的 CH 晶体，且晶体形态较好，说明  $S_2$  强度高且孔隙裂隙少，强度性能好。

$S_3$  和  $S_4$  样品 C-S-H 凝胶颗粒和 CH 晶体明显少于前者，凝胶结构较为疏松，也看不到六方晶体致密排列的现象，且一些 CH 六方晶体的发育程度不好，呈现片状。此外， $S_3$  和  $S_4$  两组样品在电镜下都可以看到完好的未反应的粉煤灰圆形颗粒，说明增大水玻璃添加比会导致浆液凝结时间过快，部分物料来不及反应。

4 强度形成机理

混合浆液的配制完成后，由液体转变为固体的过程是

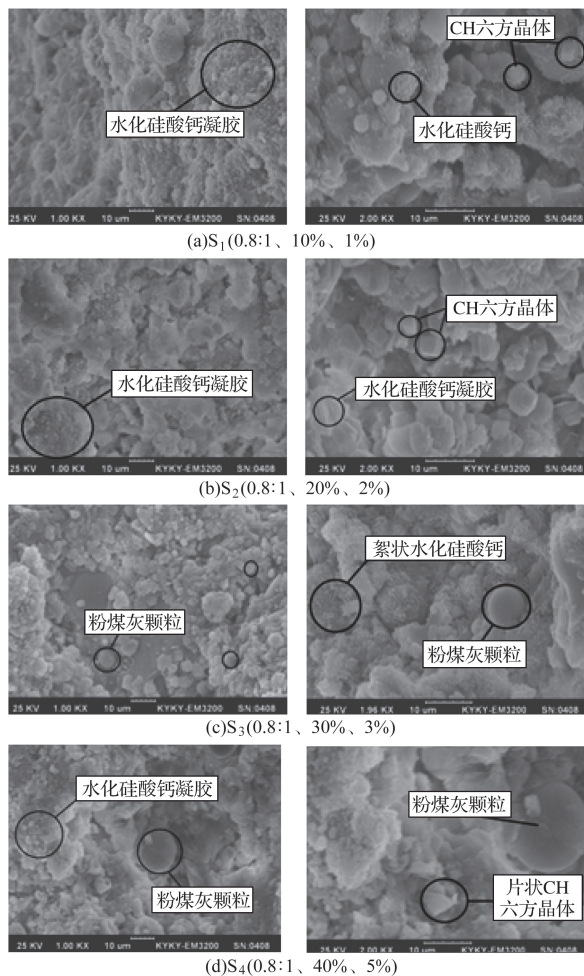
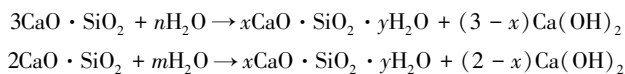


图5 28d 结石体微观结构电镜扫描图  
(左:放大1000倍;右:放大2000倍)

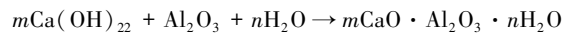
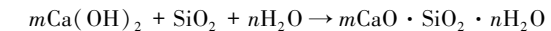
一系列复杂的物理化学反应的结果,结合相关文献和实验研究,水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料的固化过程并形成强度的机理可以从以下3个方面分析<sup>[15,16]</sup>。

1) 硅酸盐水泥的水化作用。常温下,水泥中主要矿物硅酸三钙( $C_3S$ )迅速发生水化,生成水化硅酸钙(简称为C-S-H)和氢氧化钙(简称为CH),硅酸二钙( $C_2S$ )与水的反应慢于硅酸三钙的水化作用,但同样发生,形成饱和的氢氧化钙溶液,反应式如下:



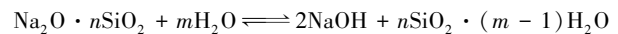
反应后生成的水化硅酸钙(C-S-H)不溶于水,微粒大小与胶体相当,析出后凝聚成凝胶体。同时,饱和的氢氧化钙溶液析出CH六方晶体。饱和的氢氧化钙溶液析出CH六方晶体。极难溶于水的钙矾石(AFT)呈针状。三者经过凝结硬化形成三向结晶网状结构,贯穿于整个浆体。

2) 粉煤灰的活性反应。具有活性的 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 与水泥水化产物氢氧化钙二次反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(A-S-H),反应式如下:



粉煤灰一方面消耗氢氧化钙(CH),另一方面又促进了硅酸三钙( $C_3S$ )水化生成氢氧化钙(CH),从而加速水泥水化,影响浆液的反应进程,同时水泥也增进了粉煤灰的活性反应。

3) 水玻璃( $Na_2O \cdot nSiO_2$ )的催化反应。这是一个复杂的物理化学变化过程,水和水玻璃结合生成 $Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot nH_2O$ 水合物,由于水玻璃是一种强碱弱酸盐,会发生水解生成强碱,反应式如下:



强碱使二氧化硅( $SiO_2$ )胶溶经过电离形成胶体硅酸钠溶液。引入的硅酸钠与氢氧化钙溶液反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,加快反应进程。

综上所述,水固比、粉煤灰掺量、水玻璃添加比三个因素决定着每一个化学反应的反应速率和反应程度,对浆液形成三向结晶网状结构体的密实程度和强度大小起着决定性作用。综合三种物料的化学反应机理,可以对本次试验的数据和SEM图像呈现出的现象进行解释:①随着粉煤灰掺量的提高,中后期14d、28d强度呈现先上升后下降的趋势,在掺量20%时达到强度峰值,并且在粉煤灰掺量为30%、40%的SEM图像中看不到致密排列的氢氧化钙析出的六方晶体。从强度机理上分析是因为过量粉煤灰发生活性反应,它消耗氢氧化钙(CH)的速率会大于它促进了硅酸三钙( $C_3S$ )水化生成氢氧化钙(CH)的速率,氢氧化钙(CH)的减少会大大减少CH六方晶体的析出,从而减小强度;②水玻璃添加比与抗压强度呈负相关,并且在水玻璃添加比为3%、5%的SEM图像中可以看到部分未反应的球形粉煤灰颗粒。从强度机理上分析一方面是因为随水玻璃加入量的增加,导致浆液凝结速度过快,其他物料未能充分反应,另一方面是因为水玻璃发生水解反应会生产强碱NaOH,强碱的环境会抑制氢氧化钙(CH)的生成,从而强度降低;③水固比的增大会稀释浆液,直接导致浆液凝结速度变缓,难以形成预期的强度。

## 5 结论

本文通过统计前人研究影响浆液性能的水固比、粉煤灰掺量、水玻璃添加比例三个因素,每一因素在已有研究结果优化的范围内再次划分4个水平,确定3因素4水平的正交实验方案,运用极差分析和方差分析讨论了各因素对抗压强度的影响规律,采用多元非线性回归法分析得到了能够较好表达该注浆材料28d强度与三个因素之间的定量关系,并从强度形成的机理上探讨了三个因素与强度影响趋势的内在原因。

1) 水固比0.8:1、粉煤灰掺量20%、水玻璃添加比1%的浆液强度性能最好。水固比对前期3d和7d的抗压强度影响最显著,水玻璃添加比次之,粉煤灰掺量影响最小;

水玻璃添加比对中后期 14d 和 28d 的抗压强度影响最显著,水固比次之,粉煤灰掺量的影响最小。

2) 增加水固比和水玻璃添加比不利于提高结石体强度,水固比的增大会稀释浆液,直接导致浆液凝结速度变缓,难以形成预期的强度;水玻璃添加比的提高一方面是导致浆液凝结速度过快,其他物料未能充分反应,另一方面水玻璃发生水解反应会生产强碱 NaOH,强碱的环境会抑制氢氧化钙(CH)的生成,从而强度降低;适当增加粉煤灰掺量有利于提高结石体抗压强度,粉煤灰掺量为 20%时,强度有一个明显的提高并达到峰值,过量粉煤灰的加入会减少氢氧化钙析出 CH 六方晶体从而减少强度。

3) 得出了能够较好描述注浆材料 28d 强度与水固比、粉煤灰掺量、水玻璃添加比 3 个因素之间定量关系的数学模型,拟合出的该公式可以定量阐明水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料的强度规律,在煤矿防治水、采空区治理等工程中的实际应用提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] 李浩,文杰. 注浆理论研究现状及展望 [J]. 科技资讯, 2014(9): 105-106.
- [2] 黄青云,李军民,苏承东,等. 粉煤灰水泥注浆材料特性试验研究 [J]. 煤矿现代化, 2005(5): 32-33.
- [3] 张义顺,何小芳,朱伶俐,等. 水泥-粉煤灰注浆材料的研发与应用 [J]. 河南理工大学学报, 2010, 29(5): 674-679.
- [4] 赵洪水,宋大各. 水玻璃对水泥-粉煤灰浆液在注浆性能的影响试验研究 [J]. 科技创新导报, 2012(22): 21-22.
- [5] 李飞. 粉煤灰注浆材料在矿井防治水中的应用 [J]. 煤炭技术, 2008, 24(1): 111-113.
- [6] 李喜林,王来贵,赵娜,等. 铁路下伏采空区注浆材料配比试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(3): 650-655.
- [7] 孙伟. 粉煤灰基注浆充填材料及性能试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [8] 郭金敏. 注浆材料及其应用 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [9] 童立元,潘石,邱钰,等. 大掺量粉煤灰注浆充填材料试验研究 [J]. 东南大学学报, 2002, 32(4): 643-647.
- [10] 邹友平,张华兴,张刚艳,等. 粉煤灰水泥注浆材料主要性能试验研究 [J]. 煤矿开采, 2012, 17(4): 14-16.
- [11] 李永鑫,陈益民,贺行洋,等. 粉煤灰水泥浆体的孔体积分形维数及其与孔结构和强度的关系 [J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 774-779.
- [12] 蒋林华,林宝玉,蔡跃波. 高掺量粉煤灰水泥凝胶材料的水化性能研究 [J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(6): 695-701.
- [13] 邹友平. 煤矿采空区高掺量粉煤灰注浆扩散机理及应用 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2016.
- [14] 史俊伟,魏中举,刘庆龙,等. 基于正交试验的煤矿安全开采充填材料配比优化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011(6): 111-115.
- [15] 郭玉花. 浅谈水泥灌浆中水泥结石的机制和影响水泥结石性质的因素 [J]. 水利水电技术, 1987(3): 38-42.
- [16] 刘春原. 碱渣-粉煤灰注浆材料强度影响因素的实验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(6): 94-96.

(责任编辑 张宝优)