

极软岩巷道锚注加固注浆材料研究与应用

华心祝^{1, 2}, 谢广祥^{1, 2}

(1. 中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083, 2. 安徽理工大学 资源开发与管理工程系, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 锚注加固是一种理想的改善软岩巷道的围岩承载性能的措施。在实验室对粉煤灰-水泥锚注加固注浆材料的流动性、析水性及抗压强度进行了试验研究, 找出了注浆材料的适宜配比, 即粉煤灰掺量在 20 % 以下, 水灰比为 0.65~0.70, 并在新集三矿极软岩巷道修复加固中进行了应用。

关 键 词: 软岩巷道; 锚注加固; 注浆材料; 粉煤灰; 流动性; 析水性; 抗压强度

中图分类号: TU223

文献标识码: A

Research on grouting material for bolt and grouting reinforcement of soft rock tunnel and its application

HUA Xin-zhu^{1, 2}, XIE Guang-xiang^{1, 2}

(1. College of Resources and Safety Engineering, Beijing Campus, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Department of Resources Exploitation and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Bolt and grouting reinforcement is an ideal measure for improving performance of bearing capacity of soft surrounding rock around tunnel in soft rock. Based on the test and research for fluidity, performance of separating water and compressive strength of fly ash and cement grouting material in laboratory, grouting material with a proper mixture rate is found (fly ash volume fraction is less than 20 %, water to cement ratio is from 0.65 to 0.70). An engineering practical example is given that fly ash and cement grouting has been used in very soft rock roadway at the Xinji NO.3 mine in Huainan.

Key words: soft rock tunnel; bolt and grouting reinforcement; grouting material; fly ash; fluidity; performance of separating water; compressive strength

1 引 言

锚注加固是一种理想的改善软弱围岩承载性能的措施。注浆材料选择是锚注技术中一个重要组成部分, 目前用的注浆材料有化学浆液和水泥浆液两大类, 化学浆液因价格昂贵, 仅应用于用量较小的特殊局部加固。水泥浆液又可分为两类, 一类是普通单液水泥浆, 另一类是水泥-水玻璃双液浆。

作为注浆材料, 需要较高的强度和尽可能低的注浆成本, 若是全部使用水泥作为注浆材料中的胶结材料, 往往不是由于追求高强度而提高了注浆成本, 就是水泥含量太少造成析水和离析, 致使注浆质量得不到保证。由于粉煤灰基本上具有与水泥相同的颗粒尺寸和级配分布, 因而可在注浆材料纯水泥中加入部分粉煤灰以降低成本。

2 粉煤灰-水泥注浆材料试验因素和参数的选取

粉煤灰是具有潜在活性的火山灰质粉末材料,

其化学成份以 SiO_2 , Al_2O_3 , C 及其它金属氧化物为主。从结构上看, 以硅铝玻璃体为主。研究表明, 粉煤灰具有比水泥更多的球形颗粒, 它的球形颗粒及颗粒表面的玻璃体结构起到润滑作用, 因而粉煤灰-水泥注浆材料具有更大的流动性、可泵性和渗透性。与此同时, 粉煤灰在与水泥共同使用具有理想的颗粒级配, 能够使注浆材料在泵送过程中减少分离、沉降和降低析水率。

影响注浆材料强度的因素很多也很复杂, 但在注浆材料品种、施工工艺等一定的条件下, 主要应考虑减少水泥用量及水灰比对混合料流动性、析水性和强度的效应。实验室试验选取的注浆材料原材料为: 425#硅酸盐水泥 (密度为 3.1 g/cm^3)、淮南新集发电厂的粉煤灰 (粉煤灰物理性质如表 1 所示)。表 2 为试验因素和参数, 表中: 水灰比为固料 (粉煤灰和水泥量) 的重量比; 粉煤灰为自然状态; 粉煤灰比例为粉煤灰与固料 (粉煤灰和水泥) 总重量

之比。此次研究进行了粉煤灰-水泥浆液流动性、粉煤灰-水泥浆液析水率、粉煤灰-水泥浆液试件 7 d 抗压强度及试件 28 d 抗压强度 4 项试验, 每项试验做了 16 组, 每组 3 个试件, 取 3 个试样的平均值作为每组试验值。

表 1 粉煤灰物理性质

Table 1 Physical properties of fly ash

含水率/%	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	天然密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙率/%
52.2	0.75	1.345	68.02

表 2 试验因素和参数表

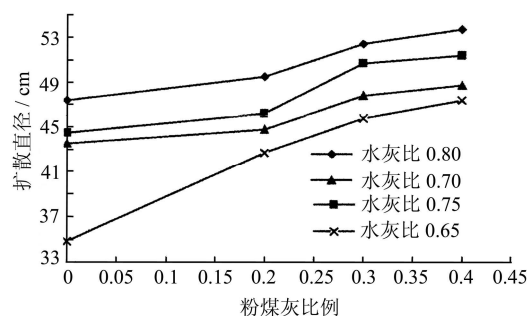
Table 2 Test factors and parameters

因素	量值			
粉煤灰比例/%	0	20	30	40
水灰比	0.80	0.75	0.70	0.65

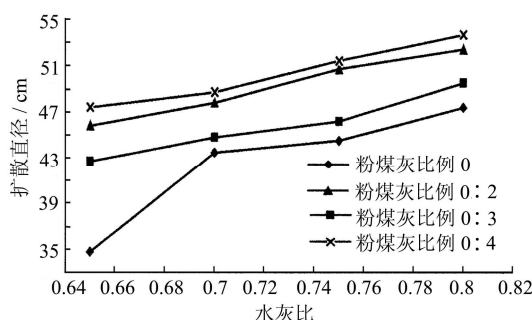
3 粉煤灰-水泥注浆材料配比研究

3.1 流动性研究

注浆材料流动性直接影响注浆工艺, 注浆材料流动性好, 管道输送容易, 注浆扩散半径大。反之, 管道输送困难, 注浆扩散半径小。考虑水泥和粉煤灰的不同配比以及浆液中水所占比例的不同, 进行浆液流动性试验, 流动性试验曲线如图 1 所示。



(a)



(b)

图 1 粉煤灰-水泥浆液流动性曲线

Fig. 1 Curve of fluidity of fly ash-cement paste

从图 1(a)可以看出, 当水灰比为 0.65 时, 浆液扩散直径随粉煤灰比例增加而增大得较快, 粉煤灰比例从 0 增大到 40 % 时, 浆液扩散直径从 34.8 cm 增大到 47.4 cm, 提高了 36 %; 当水灰比等于 0.70 或大于 0.70 时, 浆液扩散直径随粉煤灰比例增大的较慢。当水灰比分别为 0.70, 0.75, 0.80, 粉煤灰比例从 0 增大到 40 % 时, 浆液扩散直径分别增加 12 %, 15.5 %, 13 %。所以水灰比在 0.65~0.70 时, 浆液扩散直径随粉煤灰比例增大而增长的幅度最大。从图 1(b)可以看出, 当粉煤灰比例超过 20 % 时, 浆液扩散直径随粉煤灰比例增大的幅度较小。粉煤灰比例小于 20 %, 即不掺入粉煤灰, 水灰比从 0.65 增大到 0.80 时, 浆液扩散直径增大了 46 %; 当粉煤灰比例超过或等于 20 % 时, 即粉煤灰比例分别为 20 %, 30 %, 40 %, 水灰比从 0.65 增大到 0.80 时, 浆液扩散直径分别增大 16 %, 14 %, 13 %。粉煤灰比例在 0~20 % 之间时, 浆液扩散直径随水灰比增大的幅度最大。

3.2 析水性试验

浆液的析水性是由水泥浆液颗粒沉降和体积收缩引起的。水泥浆液配制后静置时, 在重力作用下沉降, 其沉降速度与颗粒直径的平方成正比, 粗颗粒首先下沉, 其次是细颗粒沉降, 沉降稳定后在浆液上层形成一层清水。析水性较小的浆液, 其性能变化较小, 注浆时易控制, 对注浆效果影响较小, 而析水性较大的浆液, 随着析水产生, 其性能变化较大, 对注浆及其效果影响较大, 影响主要表现为以下方面:

(1) 影响浆液粘度和流动规律, 降低浆液扩散半径。

析水率较大的浆液在裂隙中流动, 随着水泥颗粒沉降, 浆液流动断面减小, 紧靠裂隙上方析出的水因粘度降低而流动速度增大, 而沉降后的浆液粘度增加, 其流动速度大大降低, 裂隙中水泥浆液的流态由层流向紊流方向转化。此外, 由于沉降部分的浆液水灰比减小, 从而导致浆液流变特性的变化和凝胶时间缩短, 大幅度降低浆液的扩散半径。更为重要的是, 析水率大的水泥浆液的沉降, 容易堵塞裂隙阻止浆液向前流动、扩散。

(2) 析水率大的水泥浆液降低注浆充填效果。

析水率大的水泥浆液, 停止注浆后, 裂隙中的浆液因沉降和体积收缩, 使结实体重新产生新的裂隙, 从而, 降低了浆液的凝结性能和浆液充填的密实性。

为确定粉煤灰-水泥浆液的合理配比, 在实验室

进行了析水率试验, 试验结果如图 2 示。可以看出, 当水灰比在 0.65~0.70、粉煤灰比例在 20% 及以下时, 浆液的析水率随粉煤灰比例增加而增大的幅度很小; 而当粉煤灰比例达到 20% 及以上时, 浆液的析水率随粉煤灰比例增加而增大的幅度很快; 当水灰比达到 0.75 及以上时, 浆液的析水率随粉煤灰比例增加而增大的幅度也很快。具体试验参数表明, 粉煤灰比例在 0~20% 之间、水灰比在 0.65~0.70 时浆液析水率为 0.59%~6.437%, 而当浆液参数在这个范围以外时, 浆液的析水率为 9.5%~15.4%, 析水率明显增大。由此可见, 从减小和控制浆液析水率考虑, 浆液中粉煤灰比例为 20% 以下, 水灰比在 0.65~0.70 是适宜的。

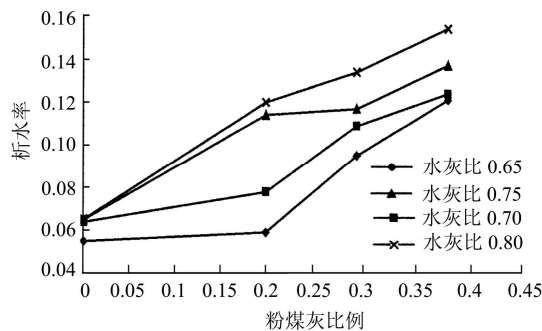


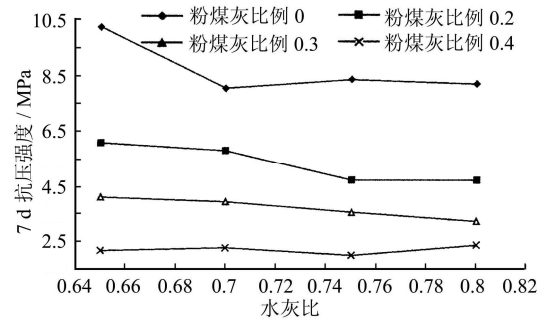
图 2 粉煤灰-水泥浆液析水率试验曲线

Fig. 2 Test curve of bleeding ratio of fly ash-cement paste

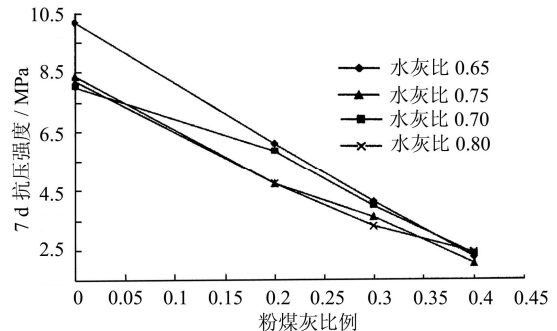
3.3 抗压强度试验

为了获得注浆材料适宜配比参数, 在实验室做了 7, 28 d 龄期不同配比注浆材料的强度试验, 得到了一系列的试验数据。其中 7 d 龄期试件抗压强度随水灰比或粉煤灰比例而变化规律的曲线如图 3 示。

图 3 表明, 当浆液中水灰比在 0.65~0.70, 粉煤灰比例为 0~20% 时, 试件的 7 d 龄期抗压强度为 5.8~10.1 MPa; 而当浆液参数不在这个范围时, 试件的 7 d 龄期抗压强度为 2.0~8.4 MPa, 强度明显减小。所以浆液中粉煤灰比例在 20% 及以下, 水灰比在 0.70 及以下龄期 7 d 的浆材, 依然保持了较高的抗压强度。从浆材 7 d 龄期的强度变化规律看, 浆液粉煤灰掺量达 20% 及以上时, 浆材 7 d 龄期抗压强度随水灰比增加而降低的幅度并不明显, 如图 3(a) 示; 而浆材抗压强度随粉煤灰比例增加而下降的较明显; 但水灰比为 0.70、粉煤灰比例小于 20% 时, 浆材强度随粉煤灰比例增加而下降较其他情况有所减缓如图 3(b)。28 d 龄期浆材的抗压强度变化规律曲线如图 4 所示。



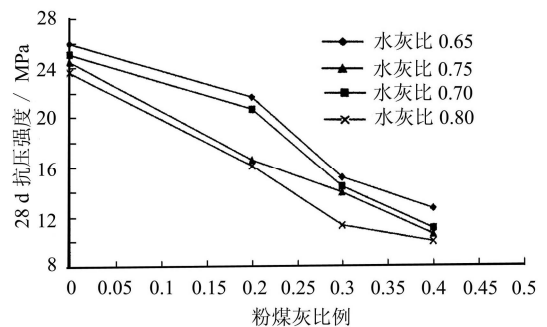
(a)



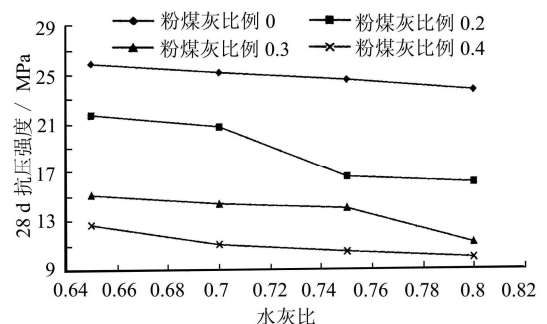
(b)

图 3 试件抗压强度曲线 (7 d 龄期)

Fig. 3 Curve of specimen compressive strengths (age of 7 d)



(a)



(b)

图 4 试件抗压强度曲线 (28 d 龄期)

Fig. 4 Curve of specimen compressive strengths (age of 28 d)

可以看出, 试件 28 d 龄期的抗压强度与 7 d 龄期抗压强度变化规律相类似, 但水灰比在 0.70 及以下时, 浆材 28 d 抗压强度随粉煤灰比例增加而下降并不明显, 仅当超过 20% 时, 下降幅度明显增大。

同时, 水灰比在 0.70 以下时, 浆材 28 d 抗压强度随水灰比变化幅度也较小。因此, 浆液中粉煤灰比例在 20 % 及以下, 水灰比在 0.65~0.70 时, 可获得较稳定的浆材抗压强度。

比较浆液中粉煤灰掺量分别为 0 和 20 % 两种情况下浆材抗压强度从 7 d 龄期到 28 d 龄期的增长情况, 结果如表 3 示。可以看出, 粉煤灰掺量为 20 % 时, 浆材的后期强度增长更快。

综上分析研究可知, 粉煤灰-水泥浆液中粉煤灰掺量应控制在 20 % 以下, 水灰比为 0.65~0.70。

表 3 试件抗压强度增长表
Table 3 Increasing of specimen compressive strengths

粉煤灰比例 / %	不同水灰比时抗压强度增长量/倍			
	0.80	0.75	0.70	0.65
0	2.87	2.94	3.12	2.56
20	3.40	3.50	2.56	3.55

4 工程应用

淮南新集三矿-340 m 水平集中巷总长 1 020 m, 巷道原设计断面为半圆拱形, 净宽 3.4 m, 净高 3.0 m, 巷道原支护方式为 U 型钢支架与喷射混凝土联合支护, 设计方位为 262°, 由于受地质构造影响, 该段岩层产状发生急剧变化, 岩层走向摆动 13°~14°, 倾向发生倒转, 巷道岩层柱状如图 5 所示。集中巷位于 6 层(泥岩)中, 其围岩主要为泥岩、砂质泥岩, 极为松软破碎, 整体性差, 遇水崩解, 该巷道在施工中呈现前掘后修的情况, 巷道掘出仅 3 d 就产生明显变形, 掘出 3~15 d 后巷道变形最剧烈, 底臃也极其严重, U 型钢支架严重扭曲, U 型钢卡缆相互挤压和出现张嘴现象, 巷道掘出不到 2 个月, 巷道宽度由原 3.4 m 缩小为 1.8 m, 由于巷道断面不断缩小, 以至于扒矸机被埋, 严重影响掘进的正常进行。后虽经改棚翻修, 但出现前修后坏的局面, 至施工后 1 年, 大部分巷道已经修复过 3 次, 其变形仍持续增长、流变显著, 维护极其困难, 巷道几乎濒临报废, 严重影响了矿井运输和生产的正常进行。若继续改棚翻修, 巷道变形仍难控制, 且翻修费用极高; 若另掘巷道, 难以找到合适的层位, 其掘进支护费用很高, 且严重影响矿井西部采区的投产时间。为了经济且能确保矿井运输和生产的正常进行, 对巷道修复加固方式采用锚注加固技术。

-340 m 集中巷由于经过多次翻修, 巷道围岩松动圈大、围岩空洞、裂隙多、注浆量大。如何降

低锚注的注浆成本显得尤为重要, 在采用水泥单液注浆材料中加入粉煤灰以降低水泥用量, 是解决问题的有效方法之一。根据实验室对粉煤灰-水泥混合料浆液进行的流动性、析水率以及抗压强度试验结果, -340 m 集中巷锚注加固注浆材料选用 425 # 普通硅酸盐水泥加 20 % 粉煤灰的混合浆, 其水灰比为 0.65~0.70。

层序	分层厚度/m	柱状	岩性名称	岩性描述
1	1.9		颗粒泥岩	灰色, 有少量砾石颗粒
2	5.9		泥岩	灰黑色, 性脆, 见滑面
3	2.1		细砂岩	灰色以长石为主, 少量钙质胶结
4	7.8		粉砂岩	夹薄层泥岩, 厚度不等
5	8.5		灰岩	结构松散, 有明显片理
6	8.1		泥岩	灰黑色, 性脆, 见滑面
7	5.8		砂质泥岩	灰黑色, 泥质条带组成水平层理
8	6.1		细砂岩	局部为泥岩, 胶结性弱

图 5 巷道岩层柱状图

Fig. 5 Histogram of rock strata around tunnel

注浆锚杆采用 $\phi 42$ mm 的无缝钢管制作, 总长为 2 000 mm, 注浆段钻有若干交叉射浆孔。注浆压力为 2 MPa, 注浆扩散半径为 2.5 m。注浆孔间排距为 4 m, 每个断面布置了 5 个注浆孔, 腰线下左右帮各布一孔, 俯角为 10°~20°, 腰线上左右肩窝处各布一孔, 仰角为 25°~30°, 正顶部布一孔, 仰角大于 70°, 注浆孔直径为 43~45 mm, 孔深为 2 500 mm。注浆孔布置如图 6 所示。成孔后随即下入 $\phi 42$ mm $\times$ 2.0 m 锚注管。注浆设备主要包括注浆泵、高压胶管、搅拌机等, 根据选型计算, 注浆泵型号选为 2TGZ-60/210 型, 浆液采用搅拌机搅拌, 搅拌机型号选为 3B-200。锚注加固施工工艺流程是: 施工准备→钻孔→安装锚杆→造浆→注浆施工→清理锚注机具。每一个孔注浆结束 1 d 后, 要求在注浆锚杆末端放上托盘、拧紧螺母。

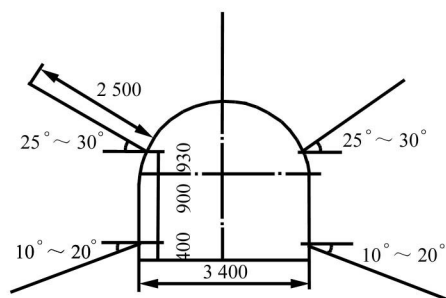


图 6 注浆孔布置示意图(单位: mm)

Fig. 6 Arrangement of grouting holes (unit: mm)

此次工业试验锚注加固巷道 1 020 m, 共使用了水泥 1 879 t, 粉煤灰 469 t, 试验期间共布置了 4 个测站、9 个观测断面对锚注巷道进行了矿压观测, 根据观测表明: 锚注加固 28 d 后巷道围岩的两帮移近速度、底臌速度、都有了较大程度的减少, 3 个月后巷道变形基本趋于稳定。注浆后巷道变形得到了明显控制。

5 结 语

(1) 锚注加固注浆材料, 需要适宜的强度和尽可能低的成本费用。若是使用纯水泥作为注浆材料中的胶结材料, 往往不是强度太高浪费了材料并提高了工程造价, 就是水泥含量太少造成泌水和离析, 致使施工质量得不到保证。而将粉煤灰用于注浆材料中, 可以弥补单一水泥注浆材料的这一缺点, 使注浆材料既满足工程需要, 又可以降低工程造价。

(2) 由于粉煤灰基本上具有与水泥相同的颗粒尺寸和级配分布, 纯水泥作为注浆材料时可加入部分粉煤灰作填充料。由于粉煤灰具有比水泥更多的球形颗粒, 因而粉煤灰-水泥注浆材料具有更大的流动性、可泵性和渗透性。

(3) 从实验室对粉煤灰-水泥注浆材料的流动性、析水率以及抗压强度试验表明, 浆液中粉煤灰掺量在 20 % 及以下、水灰比在 0.65~0.70 时浆液的流动性最好, 析水性最小, 浆材 7 d 龄期和 28 d 龄期的抗压强度分别都最大。同时, 含有粉煤灰的浆材, 其后期强度增长更快。工程实践表明, 粉煤灰含量选取为 20 %、水灰比为 0.65~0.70 的粉煤灰-水泥注浆材料用于软岩巷道锚注加固, 具有良好的技术经济效益。

参 考 文 献

- [1] 于跃勋, 张新中. 粉煤灰在基础灌浆材料中的应用[J]. 粉煤灰综合利用, 1999, (3): 24—27.

- YU Yue-xun, ZHANG Xin-zhong. The Application of fly ash in grouting materials[J]. **Fly Ash Comprehensive Utilization**, 1999, (3): 24—27.
- [2] 林登阁, 宋克志. 跨采软岩巷道锚注支护试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 238—241.
- LIN Deng-ge, SONG Ke-zhi. Research on support of bolt-grouting of roadway in cross-mined and soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 238—241.
- [3] 冯海宁, 杨有海, 龚晓南. 粉煤灰工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 579—582.
- FENG Hai-ning, YANG You-hai, GONG Xiao-nan. Test research on engineering characteristic of fly ash[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2002, 23(5): 579—582.
- [4] 姚裕春, 黄庆享, 姚令侃. 高应力软岩巷道壁后充填支护研究[J]. 西安科技学院学报. 2002, 22(4): 385—391.
- YAO Yu-chun, HUANG Qing-xiang, YAO Ling-kan. Support of filling behind brickword for high stress soft rock[J]. **Journal of XI'AN University of Science and Technology**, 2002, 22(4): 385—391.
- [5] 苏仲杰. 粉煤灰充填离层空间物理力学机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 22—25.
- SOU Zhong-jie. Research on physical and mechanical mechanism of ash grouting separated strata[J]. **Journal of China Coal Society**, 2001, 26(1): 22—25.
- [6] 华心祝, 吕凡任, 谢广祥. 锚注软岩巷道流变研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 297—303.
- HUA XIN-zhu, LU Fan-ren, XiE Guang-xiang. Rheological study on bolt-grouting supported roadways in soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 297—303.