

# 煤矿井用赤泥/粉煤灰充填材料的抗压抗折性能研究

游少洋<sup>1,2</sup>, 黄杰<sup>1,2</sup>, 马吉庆<sup>1,2</sup>, 罗实<sup>1,2</sup>

1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州省冶金工程与过程节能重点实验室, 贵州 贵阳 550025

中图分类号: TD853.34 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0148-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.07.001

**摘要** 以赤泥为主要原料制备煤矿井充填材料, 研究了激发剂种类及其掺量、粉煤灰掺量、水泥掺量及加水量对充填材料抗压强度、抗折强度的影响。研究表明: 激发剂 A(主要成分为木质苯磺酸钙, 用量为赤泥干基的 0.5%) 对充填材料的激发效果最为显著; 且在一定条件下抗压、抗折强度随粉煤灰添加量增加呈先增大后减小的变化趋势; 随水泥添加量的增加逐渐增大。通过各方面试验得出最优强度为: 28 d 抗压强度为 1.30 MPa, 抗折强度为 0.71 Mpa, 满足相关充填指标。经过浸出毒性检验, 结果表明赤泥基填充材料中重金属元素均达标。

**关键词** 煤矿井; 赤泥; 充填; 浸出毒性

## 引言

全球 90% 以上的氧化铝来自拜耳法<sup>[1-2]</sup>, 每生产 1 t 氧化铝就会伴随产生 1~2 t 赤泥<sup>[3-4]</sup>。我国是氧化铝的主要生产国, 近五年氧化铝年产量均超过 7 000 万 t, 超过全球氧化铝产量的 50%<sup>[5]</sup>。目前, 世界赤泥的平均利用率为 15%, 但我国赤泥的综合利用率仅为 4%<sup>[6]</sup>。传统的赤泥处置方法是露天筑坝堆存, 不仅占用大量土地, 还对环境造成了严重破坏, 引起地表及地下水污染、土壤碱化等<sup>[7-10]</sup>。当前, 解决环境问题保证行业的可持续发展, 是全球铝行业面临的共同挑战<sup>[11]</sup>。随着绿色环保和循环利用意识不断增强, 在国家相关政策相继出台背景下, 对赤泥无害化、资源化利用的研究较多<sup>[12]</sup>, 主要集中于有价金属的回收、新型建材的制备、环保领域等<sup>[13]</sup>。刘培坤等<sup>[14]</sup>采用全重选法对赤泥进行分选, 可从铁品位为 26.57% 的赤泥中得到铁品位为 48.83% 的铁精矿; 季文君等<sup>[15]</sup>使用赤泥与粉煤灰为主要原料, 在最佳条件下制备的免烧砖制品抗压强度为 26.76 MPa。但这些研究依然停留在利用率低、掺量小、耗能大、产出低、二次产生渣的层面, 并不能直接有效地解决赤泥堆存问题。随着建设规模的增大及充填技术的发展, 利用赤泥基作充填材料成为目前的有效利用方法。张宁等人<sup>[16]</sup>利用拜耳法赤泥、高吸水性树脂和硫铝酸盐水泥等制备了赤泥基路

基充填材料, 符合基本充填工程要求; 满慎刚等<sup>[17]</sup>利用矿渣及赤泥制备了矿山充填胶结剂, 该胶结剂制备的全尾砂膏体充填材料比同样胶凝材料掺量的水泥全尾砂膏体充填材料强度更高。该方向不仅能大量利用赤泥而且具备安全性高、对地表生态环境破坏较小等一系列优点。因此, 对赤泥基充填材料的深入研究具有较好的社会意义和经济价值。

贵州省是氧化铝生产大省, 其赤泥的合理利用已成为困扰贵州省经济发展的一大因素。为保证地方经济、铝行业健康发展、资源化利用固废, 实现生态建设、降低建设成本的需求, 必须探索赤泥的高效合理利用途径。贵州在修建某高速路时, 须跨越一个废弃煤矿矿井, 由于跨越长度比较大, 架桥费用高昂, 经本课题组前期探索, 将赤泥填充该矿井技术是可行的, 且此矿井处于两个氧化铝赤泥堆场的附近, 运输成本也占有优势。基于上述背景, 本论文将开展激发剂种类、粉煤灰掺量、水泥掺量及加水量对充填材料抗压、抗折强度的影响研究, 为赤泥填充技术的实现提供理论指导。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料

试验所用赤泥取自贵州某氧化铝有限公司, 其主

要成分如表 1 所示, XRD 图谱如图 1 所示; 水泥为贵州惠水西南水泥有限公司出品的 425 普通硅酸盐水泥; 激发剂 A、B、C、D 是研究团队自制, 主要成分分别为木质磺酸钙、沸石、氯化钙、柠檬酸钠等。

表 1 赤泥的主要化学成分 /%

成分	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他	灼减
含量	20.73	20.74	17.19	15.85	6.39	5.29	0.0044	5.51	8.3

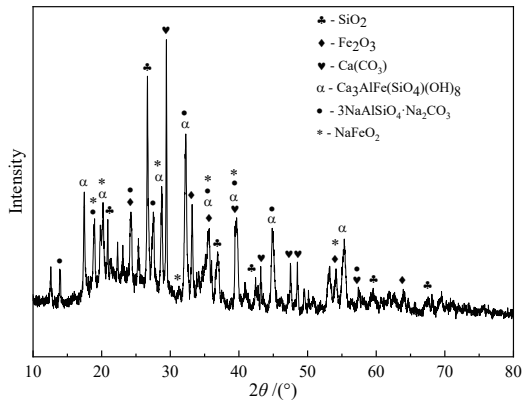


图 1 拜耳法赤泥 XRD 图谱  
Fig. 1 XRD pattern of Bayer red mud

从图 1 可知, 赤泥的主要物相为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Ga<sub>3</sub>AlFe(SiO<sub>4</sub>)(OH)<sub>8</sub>、3NaAlSiO<sub>4</sub>·Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaFeO<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub> 等。

粉煤灰取自贵州广铝铝业有限公司, 其主要成分如表 2 所示。由表 2 可知, 粉煤灰的主要成分为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、CaO 和 C。

表 2 粉煤灰的化学成分 /%

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	C
含量	46.09	28.08	9.61	3.13	2.74	4.39

矿井水的主要成分如表 3 所示, 此溶液为酸性溶液, pH 值较低, 并且铁含量高, 其余成分含量较低。因此, 本试验仅针对 pH 值和 Fe 含量进行模拟溶液的配制。模拟矿井水的配制过程: 常温下在水箱中先加入一定量自来水, 然后加入一定量硫酸亚铁, 搅拌均匀, 再加入适量硫酸调节溶液 pH 值至 2.5~3.0。

表 3 矿井水的化学成分 / (mg·L<sup>-1</sup>)

COD	总磷	pH	SS	氨氮	总氮	氟化物	硫化物	六价铬	石油类					
249	13.4	2.78	106	23.2	50.9	2.41	0.01	0.009	0.72					
铁	锰	铜	锌	铅	镉	铬	汞	砷	硒					
3 195	12.1	1.13	1.71	0.026	30	0.313	92	0.08	0.002	95	0.004	71	0.000	4

### 1.2 试验方法

将 1 000 g 赤泥、一定量粉煤灰和一定量模拟矿

井水加入 JJ-5 型行星式水泥砂胶搅拌机中, 搅拌 2 min 混合均匀, 然后加入一定量水泥后搅拌 2 min, 再加入激发剂(用量为赤泥干基的 0.5%)搅拌 4 min, 然后将混合浆体倒入规格为 40 mm×40 mm×160 mm 的钢制水泥胶砂试模中, 置于震动台上震动 30 s 以除去气泡, 刮平试模后放入模拟矿井水中养护, 24 h 后脱模, 再置于该模拟矿井水中养护, 分别探究养护 3 d、7 d、14 d、28 d 后不同配比对充填材料的性能的影响。

### 1.3 表征方法

(1) 抗压强度与抗折强度依据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法》使用 ZQ-990LA 电动拉力试验机、40 mm×40 mm×160 mm 水泥胶砂软练试模、40 mm×40 mm×160 mm 水泥抗折夹具分别测定养护龄期为 3 d、7 d、14 d 和 28 d 时样品的抗压强度与抗折强度。

(2) 浸出毒性, 根据 HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》对养护好的填充体进行毒性浸出分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 激发剂对样品强度的影响

#### 2.1.1 激发剂种类

控制水泥添加量(质量分数, 下同)为 12%、粉煤灰添加量为 10%、加水量 70%、激发剂添加量为 0.5%, 在模拟矿井水中分别养护 3 d、7 d、14 d、28 d 后, 不同激发剂对该充填材料的影响如图 2、图 3 所示。

激发剂主要是通过影响充填材料的水化进程实现对抗压强度、抗折强度的影响。研究表明, 由于高铁低钙的拜耳法赤泥活性较低, 将其直接用于制备胶凝材料, 仅能利用其中的自由碱, 大部分硅铝物相并不能发生水化反应, 加入一些激发剂可促使硅铝相发生水化反应, 从而提高充填材料的力学性能<sup>[18]</sup>。由图 2、

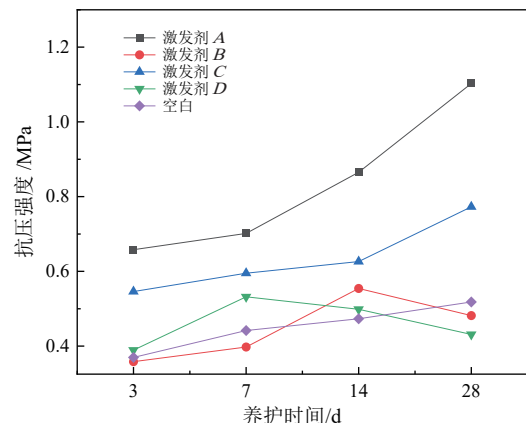


图 2 不同激发剂对抗压强度的影响  
Fig. 2 Effect of different activators on compressive strength

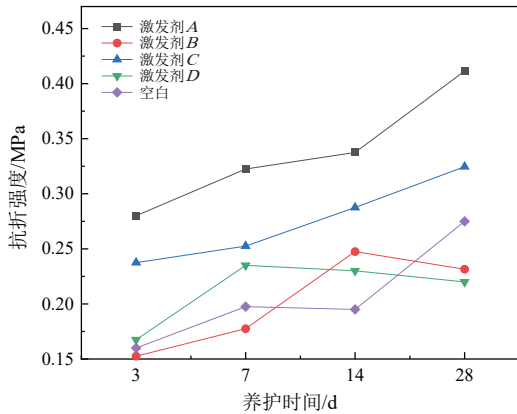


图3 不同激发剂对抗折强度的影响  
Fig. 3 Effect of different activators on flexural strength

图3可知,与无激发剂的试验组相比,加入激发剂A、C后抗压、抗折强度随养护时间的增加而增大,即加入激发剂A、C都有助于激发充填材料的水化进程,其中激发剂A效果最好,养护28d后抗压强度为1.10MPa,抗折强度为0.41MPa,胶凝材料的水化产物较多,赤泥之间黏结较为完全,从而使充填材料结构更为紧密,抗压、抗折强度增强;而激发剂B、D加入后会与赤泥中的部分自由碱相结合,使自由碱不能发生水化反应,同无激发剂的试验组相比,抗压、抗折强度随养护时间的增加先增大后减小,且养护时间为28d时抗压强度均未达到设计单位要求填充体的强度,即激发剂B、D对充填材料的强度不能起到有效作用,对水化进程有一定抑制作用。综合来看,用激发剂A可以对充填材料强度的提高达到最佳效果。

### 2.1.2 激发剂掺量

控制水泥添加量为12%、粉煤灰添加量为10%、加水量为70%,不同掺量的激发剂A对分别养护3d、7d、14d、28d后充填材料的影响如图4、图5所示。

由图4、图5可以看出,随着激发剂掺量的增加,抗压强度、抗折强度均呈现先上升后下降趋势。其原因是激发剂A呈酸性,而赤泥与水泥在加水后溶解,形成碱性胶凝体系。在体系中,赤泥与水泥溶解缓慢,且随着溶解及反应的进行,溶解度会越来越小。往体系中加入激发剂A可以中和体系中的部分碱,以降低体系的碱性,有利于赤泥与水泥的溶解,使胶凝体系水化反应速率提高并进行得更充分,从而使得充填材料的强度得到提高<sup>[9]</sup>。除此之外,木质苯磺酸钙具有减水性,可以改善砂浆和易性,也能使充填材料的强度提高。但随着激发剂A掺量的增加,当激发剂掺量超过一定量时,激发剂A对胶凝体系则起到缓凝作用,延缓了水泥的水化作用,从而导致抗压强度、抗折强度下降。综合来看,用0.5%的激发剂A可以对强度提高达到最佳效果。

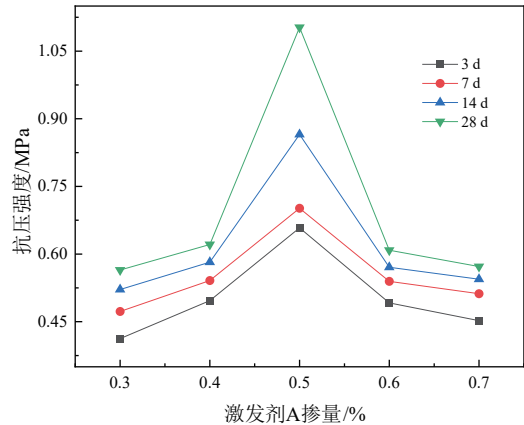


图4 激发剂掺量对抗压强度的影响  
Fig. 4 Effect of activator content on compressive strength

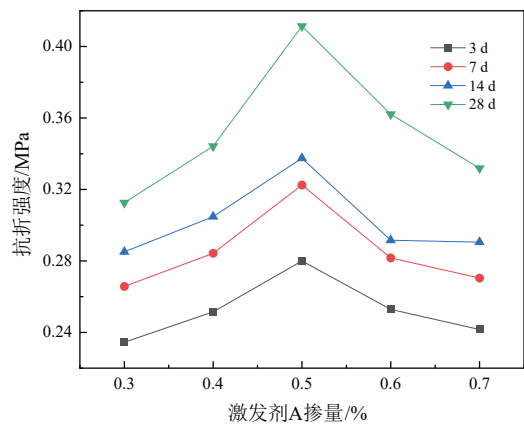


图5 激发剂掺量对抗折强度的影响  
Fig. 5 Effect of activator content on flexural strength

### 2.2 粉煤灰添加量对样品强度的影响

加水量为70%、水泥添加量为12%、激发剂A添加量为0.5%的条件下,粉煤灰添加量对赤泥充填材料的抗压强度、抗折强度的影响分别见图6、图7。

由图6、图7可以看出,养护3d、7d、14d、28d相应的抗压强度与抗折强度随粉煤灰添加量增加均呈先增大后减小的变化趋势,在粉煤灰添加量为10%左右时抗压强度与抗折强度达到最大值,其中3d的最大值分别为0.61MPa、0.36MPa;7d的最大值分别为0.70MPa、0.40MPa;14d的最大值分别为0.79MPa、0.44MPa;28d的最大值分别为0.88MPa、0.46MPa。分别对比图6与图7粉煤灰的掺量,可以确定:粉煤灰的掺量越大,其早期抗压强度与抗折强度越低。当粉煤灰添加量一定时,随着天数的增加赤泥充填材料的抗压强度、抗折强度也在不断增加,其中28d的抗压强度与抗折强度最好,这就保证了赤泥基填充材料填充后材料强度不会因为时间延长出现强度下降的现象,为工程的实施提供了保证。粉煤灰的主要成分有SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等,赤泥是高碱性物质,赤泥的高碱性可以促进水泥-粉煤灰的水化反应,在一定程度上增大其抗压强度与抗折强度。但是由于前期水化

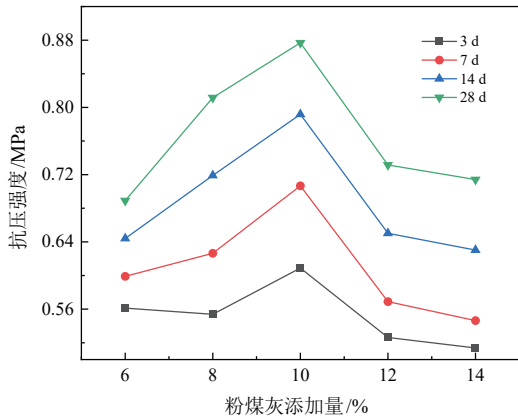


图 6 粉煤灰添加量对抗压强度的影响  
Fig. 6 Effect of fly ash content on compressive strength

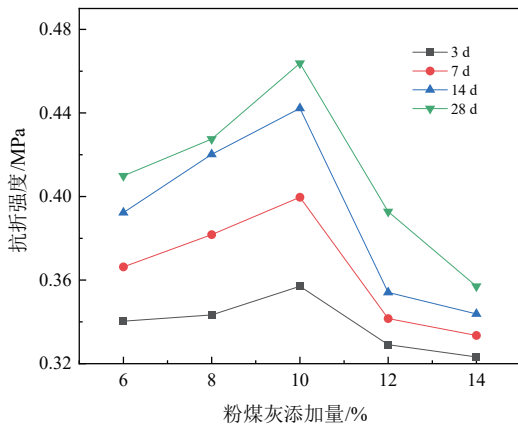


图 7 粉煤灰添加量对抗折强度的影响  
Fig. 7 Effect of fly ash content on flexural strength

反应的进行, 导致其中一些物质的含量减少, 随着粉煤灰掺量增加, 各龄期的水化程度会下降, 以致于赤泥充填材料的抗压强度与抗折强度有所下降<sup>[20]</sup>。所以可以确定粉煤灰的添加量为 10%。

### 2.3 水泥添加量对样品强度的影响

粉煤灰掺量为 10%、加水量为 70%、激发剂 A 添加量为 0.5% 时, 水泥添加量对充填材料抗压强度、抗折强度的影响分别见图 8、图 9。

由图 8、图 9 可知, 在同一养护天数条件下, 随着水泥添加量的增加, 充填材料的抗压强度、抗折强度呈平稳增大趋势, 在水泥添加量为 16% 时达到最大。对于赤泥-粉煤灰-水泥胶凝化体系, 赤泥中含有的游离碱对粉煤灰有一定的活化激发作用, 赤泥继续与活化的粉煤灰进行水化反应生成具有一定强度的水化产物, 水泥水化生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与粉煤灰反应<sup>[21]</sup>, 由赤泥、粉煤灰、水泥三者相互促进作用发生胶凝反应从而形成具有一定强度的胶凝材料。此外, 赤泥与水泥反应可以加快水泥的水化速度, 但赤泥中含有的潜在活性物质的活性通常需要一定激发方式才能释放出来。所以, 随着水泥添加量的增加, 充填材料抗压强

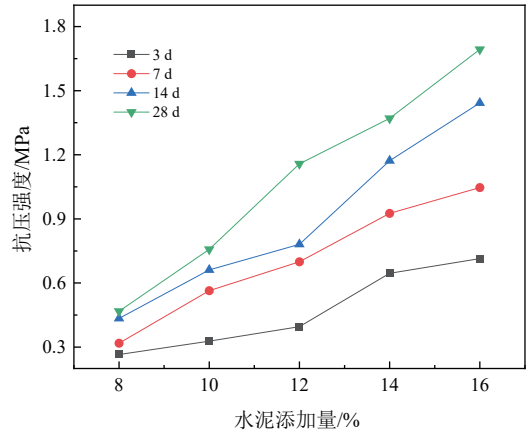


图 8 水泥添加量对抗压强度的影响  
Fig. 8 Effect of cement content on compressive strength

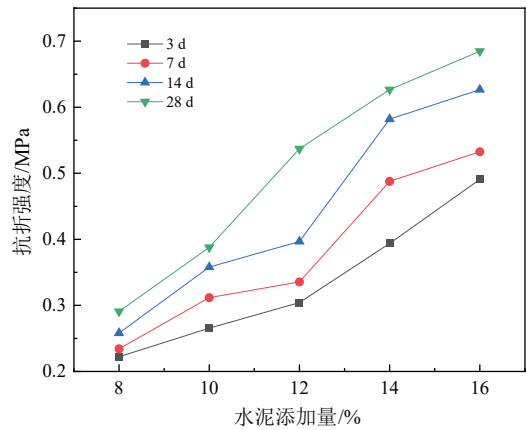


图 9 水泥添加量对抗折强度的影响  
Fig. 9 Effect of cement content on flexural strength

度、抗折强度会上升。根据全尾砂膏体充填技术规范 (GB/T 39489—2020) 和该矿井周边地质调查, 设计单位要求填充体的强度大于 0.6 MPa, 水泥添加量取 12% 为宜。

### 2.4 加水量对样品强度的影响

粉煤灰掺量为 10%、水泥掺量为 12%、激发剂 A 添加量为 0.5%, 加水量对充填材料抗压、抗折性能的影响分别见图 10、图 11。

由图 10、图 11 可看出, 相同养护时间内随着加水量的增加, 充填材料的抗压、抗折强度均呈现先上升后下降的趋势, 抗压、抗折强度均在加水量为 75% 时较为理想。研究发现, 在一定范围内随着加水量的增加, 水灰比增大, 有利于胶凝体系水化反应的进行, 使胶凝体系强度增加。但当加水量继续增大时会使胶凝体系水灰比过大, 体系黏结力和整体强度会随之降低<sup>[22]</sup>。此外, 充填材料的流动性会随着加水量的增加而增大, 但加水量过多则黏稠度过低, 过少则黏稠度过高, 考虑到充填材料的力学性能及便于灌注填充, 所以选取最佳加水量为 75%。

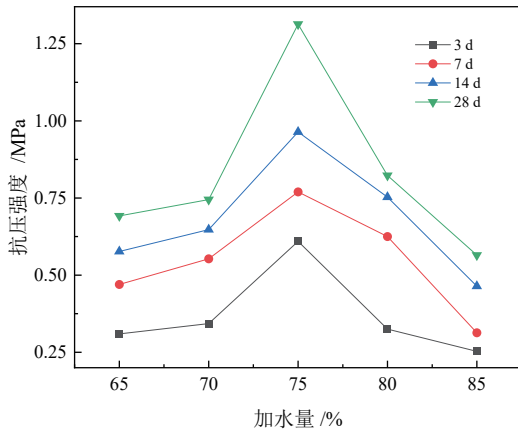


图 10 加水量对抗压强度的影响  
Fig. 10 Effect of water addition on compressive strength

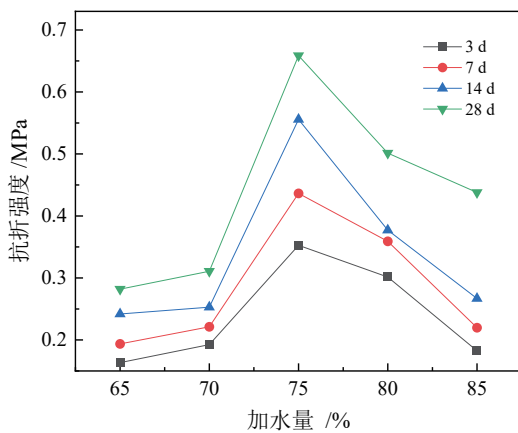


图 11 加水量对抗折强度的影响  
Fig. 11 Effect of water addition on flexural strength

### 2.5 验证试验

通过上述对各个因素的分析,可得出如下最佳方案:在控制其他外在因素不变的情况下,激发剂种类选用激发剂 A(用量为赤泥干基的 0.5%),粉煤灰添加量取 10%,水泥添加量为 12%,赤泥添加量 76%,加水量占总固体量的 75%,可以实现相对好的抗压强度与抗折强度。以最佳方案进行验证试验,分别测试养护 28 d 的抗压、抗折强度,结果如图 12 所示。由图 12 可知,

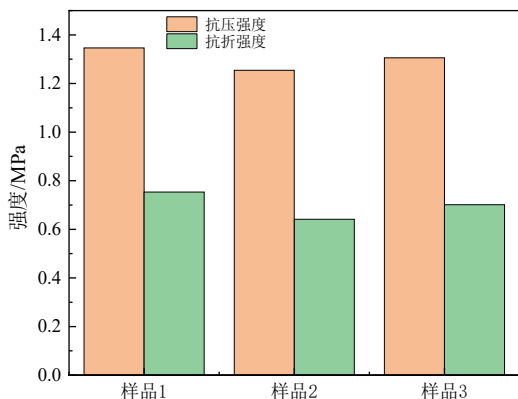


图 12 养护 28 d 最佳方案样品强度  
Fig. 12 Strength of optimum 28 d curing sample

养护 28 d 后抗压强度均在 1.30 MPa 左右,具有一定稳定性,且抗压强度均大于 0.6 MPa,满足设计单位要求填充体的强度。

将这三个验证样混合后采用水平振荡法进行毒性浸出和物相鉴别,以研究充填材料对环境的影响,结果如表 4 和图 13 所示。从图 13 可知充填材料的主要物相为赤铁矿  $Fe_2O_3$ 、 $CaCO_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Ga_3AlFe(SiO_4)(OH)_8$ 、 $3NaAlSiO_4 \cdot Na_2CO_3$ 、 $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$  和  $Na_{0.55}TiS_2$  等,与原赤泥成分不同的是充填材料多了硫元素,其原因是在模拟酸性矿井水制备时加入了硫酸,同时二氧化硅含量略有升高,碳酸钙含量略有下降。

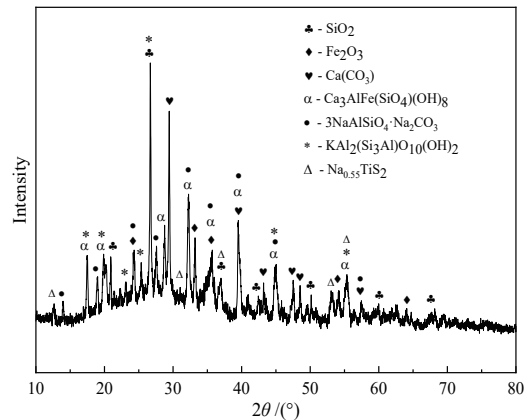


图 13 填充材料 XRD 图谱  
Fig. 13 XRD pattern of filler material

表 4 赤泥基填充材料毒性浸出结果  $(mg \cdot L^{-1})$   
Table 4 Toxicity leaching results of red mud based filling materials

铅	锌	铜	镉	铅	锌	铜	镉	总锰	总铁
ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

从表 4 中可看出,赤泥基填充材料的重金属离子浸出浓度均未达到检测下限,不会对地下水环境造成污染。

### 3 结论

(1) 添加激发剂 A、C 均可以促使硅铝相发生水化反应,从而提高充填材料的抗压、抗折强度,其中激发剂 A 效果为最佳,且最佳掺量为赤泥干基的 0.5%;而添加激发剂 B、D 不能有效促进水化反应。

(2) 随着粉煤灰添加量的不断增加,材料相应的抗压强度与抗折强度呈先增大后减小的变化趋势,在粉煤灰添加量为 10% 时,抗压强度与抗折强度取得最大值。随着水泥添加量的增加,材料抗压强度和抗折强度呈平稳增大的趋势。随着加水量的增加,充填材料的抗压、抗折强度均呈现先上升后下降的趋势。

(3) 当赤泥添加量为 75%、激发剂 A 添加量为 0.5%、粉煤灰添加量为 10%、水泥添加量为 12%、液固比为 75%,28 d 抗压强度为 1.30 MPa,抗折强度为

0.71 MPa。且试样浸出毒性结果表明赤泥基填充材料中重金属元素均达标。

### 参考文献:

- [1] 耿超, 郭士会, 刘志国, 等. 赤泥资源化综合利用现状及展望[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(5): 37-45.  
GENG C, GUO S H, LIU Z G, et al. Status and prospect of comprehensive utilization of red mud resources[J]. Nonferrous Metallurgy of China, 2022, 51(5): 37-45.
- [2] 李义伟, 付向辉, 李立, 等. 赤泥综合回收利用研究进展及展望[J]. 稀土, 2020, 41(6): 97-107.  
LI Y W, FU X H, LI L, et al. Research progress and prospect of comprehensive recovery and utilization of red mud[J]. Rare Earth, 2020, 41(6): 97-107.
- [3] MICHELLE P B, LUCAS F A, LARISSA S R, et al. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 2186-2195.
- [4] WANG S X, JIN H X, DENG Y, et al. Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289(20): 125136.
- [5] 于目深, 王旭江, 孙德强, 等. 赤泥资源化利用现状研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(6): 1-9.  
YU M S, WANG X J, SUN D Q, et al. Current Status of Red Mud Resource Utilization[J]. China Mining, 2022, 31(6): 1-9.
- [6] 夏帆, 崔诗才, 蒲锡鹏. 赤泥综合利用现状综述[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(4): 85-89.  
XIA F, CUI S C, PU X P. A review on comprehensive utilization of red mud[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2021, 39(4): 85-89.
- [7] 王旭东, 李伟斌, 赵君, 等. 新型赤泥基充填材料的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1280-1285.  
WANG X D, LI W B, ZHAO J, et al. Preparation and properties of new red mud based filling materials[J]. Silicate Bulletin, 2021, 40(4): 1280-1285.
- [8] 韩尚云, 姚延伟, 骆虹伟. 拜耳法赤泥脱碱技术与综合利用的研究现状[J]. 科技和产业, 2021, 21(7): 204-207.  
HAN S Y, YAO Y W, LUO H W. Research status of dealkalization technology and comprehensive utilization of Bayer red mud[J]. Technology and industry, 2021, 21(7): 204-207.
- [9] 陈蛟龙, 刘伟, 石存兰, 等. 赤泥综合利用技术现状及发展建议[J]. 居业, 2022, 4: 26-28.  
CHEN J L, LIU W, SHI C L, et al. Present situation and development suggestions of comprehensive utilization technology of red mud[J]. Juye, 2022, 4: 26-28.
- [10] 李洪达, 乐红志, 刘金婵, 等. 赤泥放射性的研究现状与进展[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(3): 40-43.  
LI H D, LE H Z, LIU J C, et al. Current status and progress of radioactivity in red mud[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(3): 40-43.
- [11] 朱逸慧. 凝聚行业力量 开创赤泥综合利用新局面——2021年赤泥综合利用交流推广会召开[J]. 中国有色金属, 2022(2): 52-53.  
ZHU Y H. Gather industry strength to create a new situation of comprehensive utilization of red mud - 2021 comprehensive utilization of red mud exchange promotion meeting held[J]. China Nonferrous Metals, 2022(2): 52-53.
- [12] GARANAYAK L. Strength effect of alkali activated red mud slag cement in ambient condition[J]. Materials Today: Proceedings, 2021(prepublish).
- [13] 幸卫鹏. 赤泥综合利用评述[J]. 世界有色金属, 2019(8): 269-270.  
XING W P. Review on comprehensive utilization of red mud[J]. World Nonferrous Metals, 2019(8): 269-270.
- [14] 刘培坤, 姜兰越, 杨兴华, 等. 全重选法赤泥选铁富集性能试验研究[J]. 轻金属, 2017(6): 22-27.  
LIU P K, JIANG L Y, YANG X H, et al. Experimental study on iron enrichment performance of red mud by full gravity separation[J]. Light metals, 2017(6): 22-27.
- [15] 季文君, 刘云, 李哲. 赤泥及粉煤灰制备免烧砖的工艺探究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 568-572.  
JI W J, LIU Y, LI Z. Study on preparation technology of baking-free brick from red mud and fly ash[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 568-572.
- [16] 张宁, 高益凡, 李召峰, 等. 高掺量赤泥路基充填材料试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(11): 10-13.  
ZHANG N, GAO Y F, LI Z F, et al. Experimental study on high content red mud subgrade filling material[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(11): 10-13.
- [17] 满慎刚, 倪文, 祝丽萍. 矿渣及赤泥制备矿山充填胶结剂对煤矿安全管理的促进[J]. 中国煤炭, 2013(11): 120-123, 129.  
MAN S G, NI W, ZHU L P. Slag and red mud preparation of mine filling cementing agent to promote coal mine safety management[J]. China Coal, 2013(11): 120-123, 129.
- [18] 刘庆, 王强, 吴蓬, 等. 赤泥在胶凝材料中的应用研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 66-74.  
LIU Q, WANG Q, WU P, et al. Research progress on application of red mud in cementitious materials[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 41(3): 66-74.
- [19] 颜贵红. 酸激发水泥基材料力学及收缩性能研究[D]. 中国矿业大学, 2018.  
YAN G H. Study on mechanics and shrinkage properties of acid-activated cement-based materials [D]. China University of Mining and Technology, 2018.
- [20] 张翔, 何廷树, 何娟. 硅酸盐水泥-粉煤灰-脱硫石膏复合材料的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4): 796-799.  
ZHANG X, HE T S, HE J. Study on properties of silicate cement-fly ash-desulfurized gypsum composites[J]. Silicate Bulletin, 2014, 33(4): 796-799.
- [21] 张乐, 赵苏, 梁颖. 赤泥-粉煤灰-水泥胶砂力学性能研究[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(1): 14-16.  
ZHANG L, ZHAO S, LIANG Y. Study on mechanical properties of red mud-fly ash-cement mortar[J]. Low Temperature Building Technology, 2009, 31(1): 14-16.
- [22] 纪爱民. 混凝土及水泥制品中的水[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(6): 33-36.  
JI A M. Water in concrete and cement products[J]. Concrete and Cement Products, 2012(6): 33-36.

## Study on Compressive and Flexural Properties of Red Mud/Fly Ash Filling Material for Coal Mine

YOU Shaoyang<sup>1,2</sup>, HUANG Jie<sup>1,2</sup>, MA Jiqing<sup>1,2</sup>, LUO Shi<sup>1,2</sup>

1. College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Metallurgical Engineering and Process Energy Saving, Guiyang 550025, China

**Abstract:** Red mud was used as the main raw material to prepare filling materials for coal mines. The effects of the types and amounts of activators, fly ash amounts, cement amounts, and water amounts on the compressive and flexural strength of the filling materials were studied. The research showed that activator A (mainly composed of calcium lignosulfonate and added with 0.5% of dry red mud) had the most significant excitation effect on the filling material. Under certain conditions, the compressive and flexural strength first increased and then decreased with the increase of fly ash amounts, and gradually increased with the increase of the cement amounts. The optimal strength indicators obtained through various tests were as follows, the compressive strength at 28 days was 1.30 MPa, and the flexural strength was 0.71 Mpa, meeting the relevant filling indicators. The results showed that the heavy metal elements in the red mud based filling materials met the relevant emission standards after the leaching toxicity test.

**Keywords:** coal mine well; red mud; filling; leaching toxicity

引用格式: 游少洋, 黄杰, 马吉庆, 罗实. 煤矿井用赤泥/粉煤灰充填材料的抗压抗折性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 148-154.

YOU Shaoyang, HUANG Jie, MA Jiqing, LUO Shi. Study on compressive and flexural properties of red mud/fly ash filling material for coal mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 148-154.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)