

# 复合胶凝剂在贵州云峰铝土矿充填膏体中的应用研究\*

张佳<sup>1</sup>, 吴文<sup>2</sup>, 李磊凯<sup>3</sup>

(1.山西工程科技职业大学, 山西太原 030031;

2.太原理工大学 土木工程学院, 山西太原 030024;

3.中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710075)

**摘要:**为促进工业废渣的资源化利用和降低充填采矿的碳排放,采用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝剂对贵州云峰铝土矿充填料浆进行改性,对充填体试件开展了抗压强度、抗折强度、收缩率、渗透率、抗冻融耐久性测试与微观结构观测,分析了胶凝剂掺量对充填体性能的影响规律及其机理,并结合现场观察评价了充填采矿的经济效益。结果表明:相较于单掺水泥的充填膏体试件,经赤泥和矿渣微粉改性的试件的抗压强度、抗折强度、干燥收缩性、抗渗性能与抗冻融耐久性均显著提高;当复合胶凝剂中的水泥、矿渣和赤泥质量比为2:1:1时,充填膏体的各项性能达到最佳;采用复合胶凝剂能够促进胶凝材料的水化反应和微集料反应,进而提升充填膏体的物理力学性能。贵州云峰铝土矿自流充填平台的应用实例表明,采用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝剂改性充填膏体,提高了固废资源化利用效率,同时可创造显著的经济效益。

**关键词:**充填膏体;胶凝剂;固废资源;物理力学性能

**中图分类号:**TD853.34 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)06-0128-07

## 0 引言

矿产资源作为人类社会生存与发展的重要物质基础,对于一个国家的经济发展与安全都有着非凡的意义<sup>[1]</sup>。随着我国有色金属工业的飞速发展,铝土矿的消耗量正在加速提升<sup>[2]</sup>。同时,由铝土矿开采引发了两个亟待解决的问题,即采空区的地表塌陷和尾矿砂的大面积堆积。目前,我国是全球铝土消费和开采的第一大国<sup>[3]</sup>。随着铝土矿开采深度与广度的增加,充填采矿工艺在铝土矿中得到了广泛应用。由于采矿安全的要求,矿井内需留设大量人工充填矿柱以提高围岩稳定性<sup>[4]</sup>。近年来,由于充填采矿工艺可以有效改良采场应力分布,减少围岩冒顶,同时提升矿山固废资源利用率,以尾砂为主要

集料的充填膏体(Cemented Paste Backfill, CPB)被用于矿产开采<sup>[5]</sup>。随着我国“双碳”目标的提出,采矿业面临向绿色、低碳和循环经济转型的挑战<sup>[6]</sup>。水泥是充填膏体的主要胶凝材料,由于水泥的生产伴随着大量的碳排放,将工业废渣用于制备胶凝剂以减少水泥消耗成为矿山工程一个研究热点<sup>[7]</sup>。复合型胶凝剂是一种新型无机材料,在碱激发条件下利用矿渣、粉煤灰和赤泥等工业固废的潜在活性,使拌和料具有水硬性<sup>[8-11]</sup>。碱激发胶凝剂是通过在固废材料中添加碱性激发剂形成的非晶态硅铝聚合物材料,其制备过程中能耗和碳排放量低,同时具有耐腐蚀和耐高温等优点<sup>[12]</sup>。

当前,碱激发剂在复合胶凝剂中取得了诸多应用<sup>[13]</sup>。碱激发胶凝剂的水化产物主要为水滑石与水化硅酸钙,其可以有效填充材料中的孔隙,引发微集料反应,提高CPB试件的力学性能<sup>[14]</sup>。广大学者对碱激发矿渣充填料开展了大量研究,深入探讨了CPB试件强度、耐久性及微观结构的变化规律<sup>[15]</sup>。这些研究降低了充填采矿中的水泥消耗量,促进了固废资源的循环利用<sup>[16-18]</sup>。然而,目前将碱激发胶凝剂用于铝土矿充填开采工艺的优化研究尚未取得突破性进展,工业废渣对于水泥的取代率仍处于一个较低水平,主要原因是过高的掺量可能对CPB强度和耐久性不利<sup>[19]</sup>。实际上,复合胶凝剂的固化性能不仅依赖于外掺料的掺量,试件的养护条件、碱性激发剂掺量、模数等因素均会对水硬材料的力学性能产生显著影响,而现有研究较少考虑这些因素<sup>[20]</sup>。因此,对复合胶凝剂的外掺料类别和掺量进行优化选取是提升充填膏体性能

\* 收稿日期:2023-07-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51911530238)。

作者简介:张佳(1984—),男,山西应县人,硕士,副教授,主要研究方向为隧道工程及新材料应用等,E-mail:24175702@qq.com。

的重要方向。

本研究以贵州云峰铝土矿为工程背景,采用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝剂制备充填膏体试件,并通过试验研究了充填膏体的流动性、强度和耐久性及其影响因素。研究成果旨在为绿色低碳充填采矿的应用提供参考和借鉴。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 铝土尾砂

铝土尾砂的表观呈黄褐色,经检测,尾砂的堆积密度为  $1.97 \text{ g/cm}^3$ ,孔隙比为 0.53,筛分后的颗粒

粒径在 0.02~5 mm 之间。尾砂的矿物成分包括  $\text{SiO}_2$  (66.7%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (17.6%)、 $\text{CaO}$  (7.1%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5.3%) 及其他化合物(3.3%)。

#### 1.1.2 胶凝剂

3 种胶凝剂分别是水泥、矿渣微粉和赤泥。硅酸盐水泥的外观呈深灰色,矿渣微粉呈灰白色,赤泥呈红褐色。硅酸盐水泥的标号为 P·O 42.5;矿渣微粉材料采用粒化高炉矿渣粉末,标号 S105 级。矿渣的主要成分包括硅酸钙、硅铝酸钙、铝酸镁和硅酸镁。赤泥取自贵阳某氧化铝厂的堆场,含水率为 10.5%,pH 为 11.0。3 种胶凝剂的化学成分见表 1,基本物理性能指标见表 2。

表 1 3 种胶凝剂的化学组成

Table 1 Chemical composition of three gelling agents

胶凝剂	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	烧失量
水泥	59.2	6.2	0	22.2	2.8	2.1	1.2	1.3	5
赤泥	22.1	33.3	3.5	18.1	3.1	0	0	7.4	12.5
矿渣微粉	27.1	12.2	2.4	9.1	3.0	21.1	2.1	0	8.7

表 2 3 种胶凝剂的物理性能指标

Table 2 Physical properties of three gelling agents

胶凝剂	比表面积/ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	初凝 时间/min	终凝 时间/min	标准 稠度/%	密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
水泥	382	120	352	29.5	3.05
赤泥	415	105	290	30.8	2.13
矿渣微粉	550	90	240	26.0	2.74

#### 1.1.3 碱激发剂

采用工业级 NaOH,即以烧碱溶液和水玻璃溶液为碱性激发剂,烧碱和水玻璃溶液的纯度均大于 97%,水玻璃溶液初始模数为 2.8,掺入不同体积的 NaOH 溶液,将激发剂模数调节至 1.4。

### 1.2 试件制备

本研究采用的固体物料(尾砂与胶凝剂)质量分数为 65%,并按照 1:4 的灰砂比制备 CPB 试件,采用的材料配合比见表 3,其中 C、S、R 和 T 分别代表水泥、矿渣微粉、赤泥和尾砂的质量含量。制样前,先将干燥的水泥、矿渣微粉、赤泥和尾砂置于水泥砂浆搅拌机中干拌 90 s,然后加入碱性激发剂与水混合溶液搅拌 120 s;将料浆注入模具并放至振动台上振捣,直至料浆表面光滑、平整且无气泡冒出;最后用保鲜膜将模具包裹,并放入养护箱内进行常温养护(相对湿度高于 92%),养护 1 d 后拆模。

表 3 充填膏体的 CPB 试件配合比

Table 3 Mass ratio of CPB specimens of filling paste

试件编号	C	S	R	T
A1	20	0	0	80
A2	15	5	0	80
A3	10	10	0	80
A4	5	15	10	80
A5	15	0	5	80
A6	10	0	10	80
A7	5	0	15	80
A8	10	5	5	80

### 1.3 试验方法

(1) 力学试验。采用 WAW-200B 型伺服万能测试仪对 CPB 试件开展抗压强度和抗折强度的测试,抗折试件规格为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,抗压试件规格为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。

(2) 干缩性试验。CPB 试件的模具规格为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,利用试模两端中心的测针测量了 CPB 试件在干燥失水过程中的轴向变形量,利用轴向变形量与试模标准长度之比计算 CPB 的干燥收缩率  $\delta_1$ 。

(3) 抗渗性能试验。采用逐级施加水压力的方法测定 CPB 试件的渗透率,试件的标准尺寸为  $10 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ,每组试验取 3 个 CPB 试件的

平均值作为最终的渗透率。

(4) 抗冻融耐久性试验。采用 DDR-27 型快速冻融试验仪对 CPB 试件开展冻融循环试验, 单次冻融时间持续 8 h, 冻结温度控制为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 融解温度控制为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻融循环中测量试件的质量实时变化以计算质量损失率。

(5) 微观试验。采用 VP435 型场发射电子显微镜对 CPB 试件断口和粉末开展扫描电镜和 EDS 化学成分检测。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 强度特性

本研究测试了不同养护时间和配比的 CPB 试件的抗压强度、抗折强度, 结果如图 1 所示。为确定养护时间对试件强度特性的影响, 分别对养护时间为 7 d、14 d 和 28 d 的试件进行测试。从图 1 可以

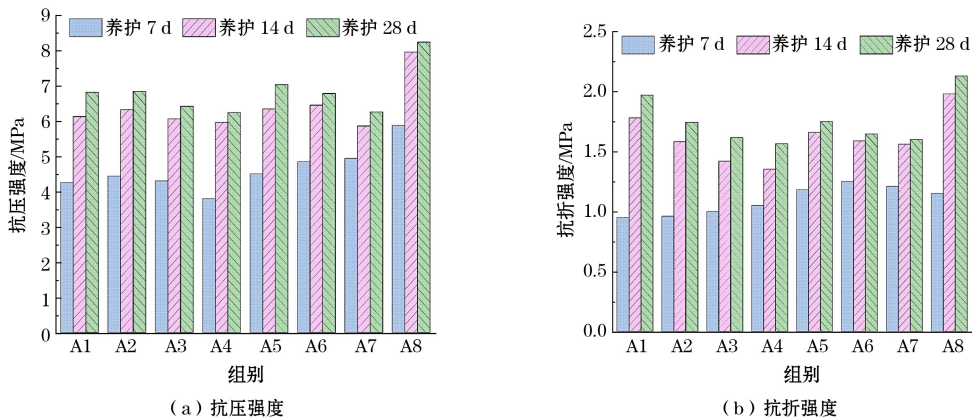


图 1 CPB 试件的强度测试结果

Fig.1 Strength test results of CPB specimens

### 2.2 干燥收缩性

不同配比的充填体干燥收缩率指标  $\delta_t$  随养护时间的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 在前 14 d, CPB 试件  $\delta_t$  的增长速率极快; 养护时间为 14~28 d 时,  $\delta_t$  的增长速率明显放缓; 而当养护时间超过 28 d 后, 养护时间对试件的干燥收缩率的影响降低。通过对比不同配比条件下试件的干燥收缩率, 发现相比于单掺水泥的 CPB 试件, 当水泥、矿渣和赤泥掺量分别为 10%、5% 和 5% 时, CPB 试件的  $\delta_t$  降低了 50% 以上。究其原因, 水泥基材料的收缩变形与料浆内部干燥失水速率成正比, 当失水较少时, 料浆中更易发生水化反应。复合胶凝剂改性充填体干燥收缩性的降低主要是因为在 水泥中掺入矿渣和赤泥, 易引发微集料效应, 对孔隙结构进行填充和改

看出, 随着养护时间的增加, 抗压强度与抗折强度均持续增长, 且 14 d 前的强度增幅明显高于 14 d 后, 说明 CPB 试件的早期强度增长较快, 养护 14 d 后强度基本保持稳定。为确定胶凝材料配比对试件强度的影响, 对比试验数据发现, 当水泥、矿渣微粉和赤泥的掺量分别为 10%、5% 和 5% 时 (A8 组), CPB 试件的不同龄期强度值均最大, 养护 28 d 的抗压强度、抗折强度分别为 8.52 MPa 和 2.13 MPa, 是单掺水泥 CPB 试件 (A1 组) 抗压、抗折强度的 123.5% 和 112.8%, 双掺水泥与矿渣 (A2、A3 组) 或双掺水泥与赤泥 (A5~A7 组) 均会造成强度增益效果的不足, 且强度随矿渣或赤泥掺量的增加呈下降趋势, 说明单独加入矿渣或赤泥对 CPB 试件强度不利。然而, 在赤泥、矿渣和水泥 3 种材料的水化作用下, 抗压强度和抗折强度大幅提高, 即采用 A8 组的配比对 CPB 试件力学性能有较好的提升效果。

善, 进而降低试件内部的裂隙数量。在养护过程中, 赤泥和矿渣的改性作用能在一定程度上改善料浆的失水情况, 降低失水速率, 使得收缩变形减小。

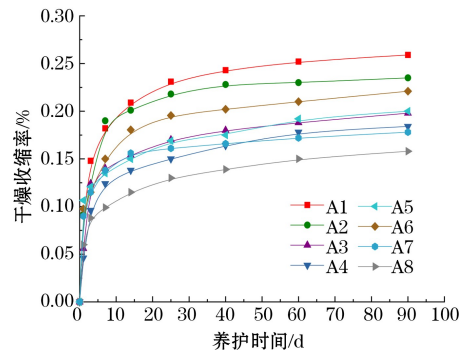


图 2 干燥收缩率测试结果

Fig.2 Test results of drying shrinkage



## 2.3 渗透特性

不同配比条件下 CPB 试件渗透率的平均测试结果如图 3 所示。由图 3 可知,单掺水泥的 CPB 试件渗透率  $K$  较高,达到了  $3.36 \times 10^4$  mD,说明单掺水泥充填体内部的连通裂隙数量较多,在渗透压作用下形成了大量渗流通道。从 A2~A7 组的渗透测试结果可以看出,随着矿渣和赤泥含量的增加,CPB 试件渗透率明显下降,且赤泥对抗渗性的增强效果高于矿渣。综合试验结果,A7 和 A8 的渗透率  $K$  低于其他组,且均接近  $1.8 \times 10^4$  mD。该现象说明复掺水泥、矿渣微粉和赤泥对于充填体的抗渗性能有较大幅度的改善。究其原因,在碱激发条件下,矿渣和赤泥的化学活性显著增强,使得水泥水化生成的水凝胶含量增加,硬化后的料浆密实度提高,使得 CPB 试件的渗透率  $K$  降低。

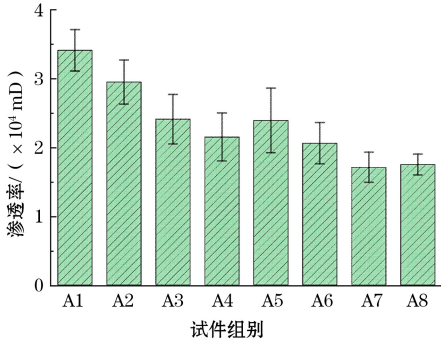


图 3 渗透率测试结果

Fig.3 Test results of permeability

## 2.4 抗冻融耐久性

采用冻融循环过程中的 CPB 试件质量损失率  $\alpha_m$  作为抗冻融侵蚀特性的评价指标,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,CPB 试件的  $\alpha_m$  随着冻融循环次数的增加而逐渐提高,说明在冻融循环过程中,试件内部孔隙在超低温状态下发生冻胀,对胶结体结构造成压应力,冻胀损伤在冻融循环过程中不断积累,直至冻胀应力达到胶结体的极限承载力,导致部分水化产物出现开裂、分解和剥落等现象,从而降低了 CPB 试件的质量。对比 A1~A8 组试件的质量损失率-冻融次数曲线,可以看出在水泥中掺入一定比例的矿渣微粉和赤泥后,试件的抗冻融性能明显提高。在经历 200 次冻融循环后,单掺水泥的 A1 组 CPB 试件的质量损失率达到了 2.18%,而复掺水泥、矿渣和赤泥的 A8 组试件其质量损失率降低至 1.25%。冻融循环试验结果表明,在碱激发作用下,矿渣与赤泥提高了胶凝剂的化学活性,使得水化凝

胶的数量明显增加,内部缺陷的数量减少,进而提升了 CPB 试件的抗冻融耐久性。综上,采用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝剂对贵州云峰铝土矿充填料浆进行改性,当水泥、矿渣和赤泥的质量比为 2:1:1 时,不仅试件的强度增益效果最好,CPB 膏体的干燥收缩性、抗渗特性和抗冻融耐久性均达到最佳,为更好地提升充填采矿效率提供了有利条件。

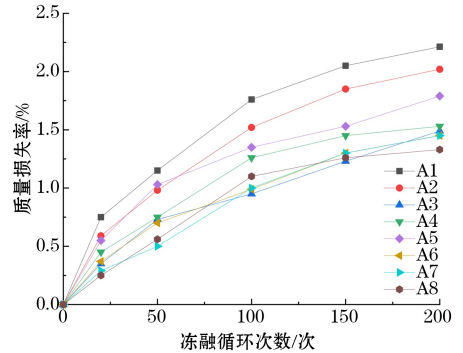


图 4 冻融循环过程中的 CPB 试件质量损失率

Fig.4 The mass loss rate of CPB specimens during freeze-thaw cycles

## 2.5 微观结构特征

图 5 为单掺水泥 CPB 试件的微观图像,由图 5 可以看出 CPB 内部主要由水化胶凝产物、孔隙及铝土尾砂组成。水泥发生水化反应,生成的凝胶物主要由棒状钙矾石(Aft)和无定形网状水化硅酸钙(C-S-H)组成。C-S-H 凝胶在尾砂表面分布并形成整体,但内部存在多条长裂隙,说明单掺水泥形成的 C-S-H 凝胶难以填充尾砂胶结体间的缝隙。在外部荷载作用下,膏体薄弱结合面之间存在的裂隙容易引起应力集中而导致结构损伤。图 6(a)为复掺水泥、矿渣和赤泥的 CPB 胶结体微观图像,由图 6 可以看出在碱性激发作用下,矿渣微粉和赤泥颗粒发生溶解,进而与水泥结合生成了大量的水化凝胶。相较于单掺水泥的试件,复掺水泥、矿渣和赤泥的 CPB 试件的微观结构均匀性和致密程度增加,水化胶凝产物将尾砂颗粒包裹形成致密且连续的整体,裂隙数量明显减少。此外,单掺水泥的硬化 CPB 结构具有明显的边界棱角,而在复掺胶凝剂改性的 CPB 中水化物光滑程度明显提高,说明 3 种胶凝剂一同掺入料浆中,有助于激发潜在化学活性,形成的协同效应使得矿渣微粉颗粒被水化凝胶紧密包裹,产生微集料效应<sup>[21]</sup>。图 5(b)是 CPB 试件中胶结体的 EDS 图谱,可以看出胶结体的基本元素主要由 O、Na、Al、Si 和 Ca 组成。由 EDS 图谱发现胶结体中

的 Al/Si、Ca/Si、Na/Si 的元素质量比分别为 0.54, 0.75 与 0.18。在图 6(b) 所示的 EDS 图谱中, Al/Si、Ca/Si、Na/Si 的元素质量比分别为 0.37, 1.72 与 0.36。该现象表明相对于单掺水泥试件, 复掺水泥、矿渣和赤泥 3 种胶凝剂后, 胶结体中的 Ca/Si 元素质量比明

显提高, Na/Si 的元素质量比也有小幅提升。3 种胶凝剂的协同反应使得颗粒中的硅铝物质发生解聚并形成 C-S-H 凝胶。因此, 在实际工程中采用水泥、赤泥与矿渣作为复合胶凝剂有利于提升 CPB 的品质, 同时对于低碳型 CPB 的推广应用具有重要价值。

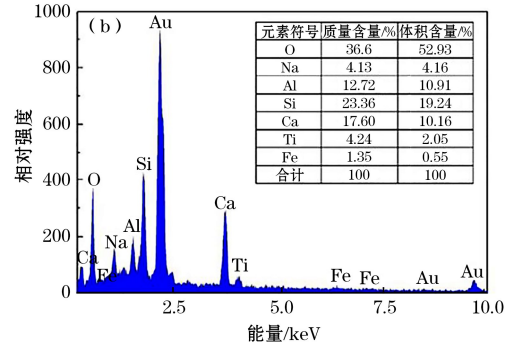


图 5 单掺水泥的 CPB 试件微观图像

Fig.5 Microscopic images of CPB specimens mixed with cement

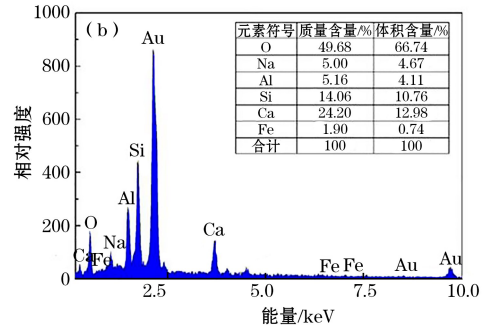
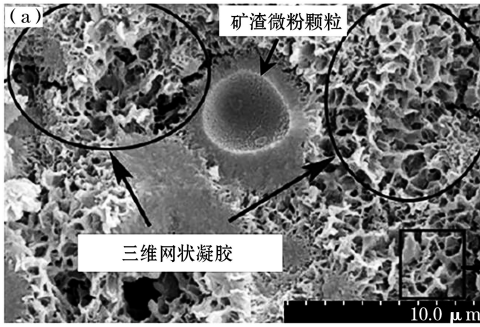


图 6 复掺水泥、矿渣和赤泥的 CPB 试件微观图像

Fig.6 Microscopic images of CPB specimens mixed with cement, slag, and red mud

### 3 工程应用效果评价

水泥-矿渣-赤泥的复合胶凝剂改性 CPB 可显著提升 CPB 的充填工作性能, 根据优化比选认为当水泥、矿渣、赤泥的质量比为 2 : 1 : 1 时, CPB 的物理力学性能达到最优。贵州云峰铝土矿的 II 号矿井工作面生产能力为 150 t/d, 产生的固废为 120 t/d, 约 50 t/d 的尾砂直接进入充填泵站, 剩余进入废石处理车间, 经筛分后再进入充填泵站, 采充比约为 1 : 1.51。2021 年 2 月至 2022 年 3 月, 在自流充填采矿过程中对工作面施行了上述的优化方案。为了保证回采工作面安全有序的进行, 在工作面顶板上布置高清摄像头, 以观察充填采矿过程中井下涌水与料浆堆积的实时情况。如图 7(a) 所示, 在开采初期底板存在大量涌流, 料浆浓度较低; 如图 7(b) 所示, 当料浆浓度提高后, 充填层较为稳定。随着料浆

浓度提升直至稳定, 自流层的料浆流速下降, 流动状态由无规则的紊流过渡为间歇性的波浪流。通过对现场观测与调研, 发现在开采期间连续安全施工 13 个月, 井下的顶板和侧板围岩未出现破碎断裂的情况。矿区地表沉降监测的数据表明, 采用 CPB 形成的支护系统能够显著提高开采的安全性。采用上述的充填料优化配比方案, 水泥的消耗量可减少 30%~45%。据统计, 该工作面回采、充填完毕时, 共采矿 2.485 万 t, 消纳尾砂 3.514 万 t, 消耗赤泥 0.205 万 t, 消耗水泥 0.528 万 t。赤泥购置价格约为 280 元/t, 矿渣微粉价格为 330 元/t, P·O 42.5 水泥价格约 370 元/t, 水泥的消耗量约减少 0.287 万 t, 共节约成本近百万元。依据当地的相关政策, 对充填开采出的矿石, 可减征资源税 50%。因此, 采用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝剂作为充填体的胶凝剂进行充填采矿, 不仅能够加速

矿渣与赤泥的资源化利用,减少水泥消耗,而且可

为矿山工程带来显著的经济效益。



(a) 充填初期



(b) 充填稳定期

图7 井下工作面的现场监测图像

Fig.7 Field monitoring images of underground working face

## 4 结论

(1) 采用水泥、矿渣微粉与赤泥组成的复合胶凝剂对充填膏体进行改性,增强了充填体的强度特征。随着养护时间的增加,充填体试件的抗压与抗折强度均持续增长,且7~14 d 养护时间内的强度增幅明显高于14~28 d,说明充填体的早期强度增长较快,养护14 d后强度基本保持稳定。

(2) 养护完成后充填体试件的干燥收缩率和渗透系数大幅降低。当水泥、矿渣和赤泥质量比为2:1:1时,试件的干燥收缩性、抗渗特性和抗冻融耐久性达到最佳。

(3) 赤泥与矿渣微粉的化学活性促进了水泥的二次水化反应,使得充填材料内水化硅酸钙凝胶含量有所增加,进而提升了充填膏体材料的黏结强度和密实度。

(4) 基于现场观测与调研结果,利用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝剂实施自流充填采矿工艺,提高了井下开采的安全性,实现了工业固废的资源化利用,同时带来了显著的经济效益。

### 参考文献(References):

- [1] 苗元丰,王貽明,吴爱祥,等.超细赤泥膏体充填絮凝沉降浓密试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(1):57-63.  
MIAO Yuanfeng, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. Experimental study on flocculation, settlement of ultrafine red mud paste[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(1):57-63.
- [2] 曾文旭,李鹏程.某矿全尾砂膏体充填自流输送可靠性分析[J].现代矿业,2022,38(7):201-204.  
ZENG Wenxu, LI Pengcheng. Reliability analysis of gravity conveying of full tailings paste filling in a mine[J]. Modern Mining, 2022, 38(7):201-204.

- [3] 马成龙.赤泥-硫铝酸盐水泥高水充填材料性能及对环境的影响[J].新型建筑材料,2020,47(4):60-64.  
MA Chenglong. Properties of red mud-sulfoaluminate cement high water filling material and its impact on the environment [J]. New Building Materials, 2020, 47(4):60-64.
- [4] 诸利一,吕文生,杨鹏,等.超声波对全尾砂砂浆流变特性的影响[J].材料导报,2020,34(6):6088-6094.  
ZHU Liyi, LYU Wensheng, YANG Peng, et al. Effect of ultrasonic on rheological properties of unclassified tailings slurry[J]. Materials Review, 2020, 34(6):6088-6094.
- [5] 吴立波,王貽明,陈威,等.基于正交实验的赤泥粉煤灰膏体充填材料配比优化[J].矿业研究与开发,2020,40(5):45-49.  
WU Libo, WANG Yiming, CHEN Wei, et al. Ratio optimization of red mud-fly ash paste filling material based on orthogonal experiment [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(5):45-49.
- [6] AGNIESZKA Wozzuk, LIDIA Bandura, WOJCIECH Franus. Flyash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235(6):493-502.
- [7] 张修香.矿山废石尾砂高浓度充填料浆的流变特性及多因素影响规律研究[D].成都:昆明理工大学,2016.  
ZHANG Xiuxiang. Study on rheological properties and multivariate effects of high concentration filling slurry in mud waste and tailings [D]. Chengdu: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [8] ZHANG Dongchen, HOU Zhixiang, LIU Zhiyong, et al. Experimental research on Phanerochaete chrysosporium as coal microbial flocculant [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013(23):521-524.
- [9] 张国胜,高谦,郭斌,等.全尾砂胶凝材料开发及泡沫砂浆充填试验研究[J].金属矿山,2020(12):74-80.  
ZHANG Guosheng, GAO Qian, GUO Bin, et al. Development of whole tailings cementitious material and experimental study on foam mortar filling [J]. Metal Mine, 2020(12):74-80.



- [10] 王东星,王宏伟,邹维列,等.碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3197-3205.  
WANG Dongxing, WANG Hongwei, ZOU Weilie, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3197-3205.
- [11] 陈伟,袁森森,袁波.赤泥激发粉煤灰充填材料设计及激发机理研究[J].武汉理工大学学报,2019,41(3):20-23+32.  
CHEN Wei, YUAN Sensen, YUAN Bo. Development of red mud activated fly ash-based backfilling material and its activation mechanism[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2019, 41(3): 20-23+32.
- [12] 黄迪,倪文,祝丽萍.烧结法赤泥全尾砂胶结充填料[J].北京科技大学学报,2012,34(3):246-252.  
HUANG Di, NI Wen, ZHU Liping. Paste backfilling material prepared with red mud from sintering process and unclassified tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(3): 246-252.
- [13] 唐伟佳,倪红军,许茜,等.铝工业废渣制备免烧砖的力学性能研究[J].金属矿山,2020(7):211-215.  
TANG Weijia, NI Hongjun, XU Qian, et al. Study on mechanical properties of non-fired brick prepared from aluminum industrial slag[J]. Metal Mine, 2020(7): 211-215.
- [14] 邢军,胡竞文,李翠,等.石膏对氧化钙激发高炉矿渣胶凝性能的影响[J].中国矿业,2019,28(3):166-171.  
XING Jun, HU Jingwen, LI Cui, et al. The effect of gypsum on the cementitious performance of blast furnace slag stimulated by calcium oxide[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(3): 166-171.
- [15] CHEN Q S, ZHANG Q L, XIAO C C, et al. Backfilling behavior of amixed aggregate based on construction waste and ultrafine tailings[J]. Plos One, 2017, 12(6): e0179872.
- [16] 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+1295.  
WANG Xudong, LI Weibin, ZHAO Jun, et al. Preparation and properties of new packing material contained red mud[J]. Bulletin of Silicate, 2021, 40(4): 1280-1285+1295.
- [17] 何良玉,譙理格,赵日照,等.钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究[J].矿产综合利用,2019(6):94-100.  
HE Liangyu, QIAO Lige, ZHAO Rixu, et al. Study on preparation of high performance mortar using steel slag as cementitious material and fine aggregate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 94-100.
- [18] 李帅,于正,冯如,等.基于RSM-BBD的拜耳法赤泥胶结充填配比优化[J].黄金,2022,43(1):34-41.  
LI Shuai, YU Zheng, FENG Ru, et al. Proportioning optimization of cemented filling of Bayer red mud based on RSM-BBD[J]. Gold, 2022, 43(1): 34-41.
- [19] 阎培渝,张增起.复合胶凝材料的水化硬化机理[J].硅酸盐学报,2017,45(8):1066-1072.  
YAN Peiyu, ZHANG Zengqi. Review on hydration of composite cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(8): 1066-1072.
- [20] 陈杰,梁杨芝,王俊,等.高沙充填材料的输送性能研究[J].硅酸盐通报,2020,39(1):194-198.  
CHEN Jie, LIANG Yangzhi, WANG Jun, et al. Research on transport characteristic of high sand content filling material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(1): 194-198.
- [21] 章求才,贺桂成,黄炳香,等.浅埋石膏矿顶板破断机理及应用研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):773-779.  
ZHANG Qiucan, HE Guicheng, HUANG Bingxiang, et al. Investigation on the fracture mechanism of the immediate roof in shallow buried gypsum mine and its application[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(4): 773-779.

### Application of Composite Gelling Agent in Filling Paste of Yunfeng Bauxite in Guizhou Province

ZHANG Jia<sup>1</sup>, WU Wen<sup>2</sup>, LI Leikai<sup>3</sup>

(1. Shanxi Vocational University of Engineering Science, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

2. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** In order to promote the resource utilization of industrial waste slag and reduce the carbon emission of filling mining, cement-slag-red mud composite gelling agent was used to modify the filling slurry of Yunfeng Bauxite Mine in Guizhou Province. Compressive strength, flexural strength, shrinkage rate, permeability, freeze-melt resistance durability tests and microstructure observation were carried out, and the influence rule and mechanism of cementing agents on backfill properties were analyzed. Combined with the field observation, the economic benefit of filling mining was evaluated. The results show that the compression strength, flexural strength, dry shrinkage, permeability resistance and freeze-thaw durability of the specimens modified by red mud and slag powder are significantly improved compared with the single cement paste specimens. When the mass ratio of cement, slag and red mud in the composite gelling agent is 2 : 1 : 1, the properties of the filling paste reach the best. The use of composite gelling agent can promote the hydration reaction and micro-aggregate reaction of the gelling material, and then improve the physical and mechanical properties of the filling paste. The application example of the self flow filling platform in Yunfeng Bauxite Mine shows that using cement-slag-red mud composite gelling agent to modify the filling paste improves the efficiency of solid waste resource utilization and can create significant economic benefits.

**Key words:** Filling paste, Gelling agent, Solid waste resources, Physical and mechanical property