

文章编号:1007-9629(2024)10-0946-09

# 赤泥基全固废矿井充填材料的制备与性能研究

史建新, 孙星海, 周林邦, 刘 泽\*, 王栋民

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为实现拜耳法赤泥的资源化利用,采用拜耳法赤泥、电石渣、矿粉和煤矸石等制备了赤泥基全固废矿井充填材料.研究了不同赤泥、电石渣掺量对充填材料力学性能与工作性能的影响,并采用X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜及能谱仪(SEM-EDS)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)等微观测试手段,分析了赤泥基全固废矿井充填料浆的水化产物、微观结构演变以及重金属浸出毒性.结果表明:矿井充填材料中,当赤泥占胶凝材料的50%,充填浓度为75%时,充填料浆的流动度可达230 mm,充填料浆硬化体7、28 d的抗压强度分别达到2.29、2.88 MPa,满足大多数矿井充填材料工作性能与力学性能的要求.使用赤泥制备矿井充填材料后,As、Cd、Cr、Pb等重金属离子的浸出浓度显著下降,远低于GB/T 14848—2017《地下水环境质量标准》要求的浸出毒性限制.

**关键词:**拜耳法赤泥;电石渣;矿井充填;微观结构;重金属浸出毒性

中图分类号:TU528.09

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.010

## Fabrication and Performance of Mine Filling Materials Derived from Red Mud Based Full Solid Wastes

SHI Jianxin, SUN Xinghai, ZHOU Linbang, LIU Ze\*, WANG Dongmin

(School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To achieve the resource utilization of Bayer red mud, it is used that Bayer red mud, carbide slag, blast furnace slag and coal gangue to prepare red mud based mine filling materials without natural materials. The effects of different content of red mud and carbide slag on the mechanical properties and working performance of the filling materials were investigated. And the hydration products, microstructural evolution, and heavy metal toxicity of the red mud based mine filling materials were analyzed by using microscopic testing techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy and energy spectroscopy (SEM-EDS), inductively coupled plasma emission spectrometry (ICP-OES) and so on. The results show that when the red mud accounts for 50% in binding material, and the solid content of the backfill slurry is 75%, the fluidity of the backfill slurry is 230 mm, the compressive strength of the backfill can reach 2.29, 2.88 MPa at age of 7 d and 28 d, respectively, which meet the requirements of most mine backfilling performance and mechanical property. After using red mud to prepare mine filling materials, the leaching concentration of As, Cd, Cr, Pb and other heavy metal ions in it decreased significantly, far lower than the leaching toxicity requirements of standard GB/T 14848—2017 *Standard for Groudwater Quality*.

**Key words:** bayer red mud; carbide slag; mine filling; microstructure; heavy metal leaching toxicity

收稿日期:2024-01-11;修订日期:2024-05-20

基金项目:中国矿业大学(北京)中央高校优秀青年团队项目(2023YQTD03)

第一作者:史建新(1996—),男,山东淄博人,中国矿业大学(北京)硕士生.E-mail:jianxin000@163.com

通讯作者:刘 泽(1981—),男,山西朔州人,中国矿业大学(北京)教授,博士生导师,博士.E-mail:lzk1227@sina.com

赤泥是以铝土矿为原料,在生产氧化铝过程中产生的碱性浸出物,因铝土矿中氧化铁含量高,导致其碱性浸出物的外观呈现为红褐色,因而被命名为赤泥<sup>[1]</sup>.根据调查,每生产1 t氧化铝要排放0.5~1.5 t赤泥<sup>[2]</sup>.由于氧化铝企业大多受限于地理条件,其生产的大部分赤泥依旧只能被堆存,当前中国赤泥堆存量约6亿 t<sup>[3]</sup>.这不仅浪费了大量的土地空间还严重污染了环境<sup>[4]</sup>,而将赤泥做成矿井充填材料是解决该问题的关键办法之一<sup>[5]</sup>.

关于赤泥综合利用的研究已经开展多年,取得了许多成就.祝丽萍等<sup>[6]</sup>将赤泥作为矿山充填的材料,研究了材料的抗压强度等性能;杨长辉等<sup>[7]</sup>研究了内掺Ca(OH)<sub>2</sub>对碱矿渣混凝土水化进程的影响.Pan等<sup>[8-10]</sup>研究了赤泥基胶凝材料,发现利用赤泥激发胶凝材料,水化产物主要是钙硅比较低的C-S-H凝胶,具有一定的力学性能.安强等<sup>[11]</sup>探究了碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料的性能.万宗华等<sup>[12]</sup>研究了电石渣对矿渣胶凝体系的碱激发作用,结果表明电石渣对矿渣有较好的激发作用.上述文献为赤泥基矿井充填材料的研究奠定了坚实的基础,但是在全固废体系下关于矿井充填材料工作性能以及重金属离子固化能力的研究较少.

鉴于此,本文以矿粉为胶凝材料,利用赤泥和电石渣共同为体系提供碱性环境,并使用煤矸石为骨料制作充填硬化体.同时,以赤泥掺量(质量分数,文中涉及的掺量、充填浓度、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)、电石渣掺量、水胶比为变量,探究大掺量赤泥对全固废矿井充填材料工作性能的影响及其重金属固化效率.

## 1 试验

### 1.1 原材料

试验用拜耳法赤泥(RM)、电石渣(CS)与磨细粒

化高炉矿渣(BFS,下文简称为矿粉)均来源于山东信发集团.煤矸石来源于郭家湾煤矿,作为矿井充填材料的骨料.原材料的物相分析与化学组成分别见图1和表1.

由图1可知:赤泥的主要晶相包括赤铁矿(hematite)、石英(quartz)和方解石(calcite),电石渣的主要晶相为羟钙石(portlandite)和方解石(calcite);矿渣粉体的主要晶相为方解石(calcite)和莫来石(mullite),在2θ为25°~35°之间明显的弥散峰为无定型硅铝相的特征峰.

试验所用煤矸石取自郭家湾煤矿,由颚式破碎机破碎.煤矸石的筛分结果见表2,煤矸石骨料颗粒级配偏I区.原料粒径的分布曲线如图2所示.

### 1.2 试验流程

通过前期预试验优选,确定充填料浆的胶集比为0.3,充填浓度为75%.两组试验(AR组和BR组)均以煤矸石为骨料,分别改变电石渣与赤泥的比例,探究电石渣与赤泥掺量对赤泥基矿井充填材料性能的影响.各组试样的充填配比见表3.

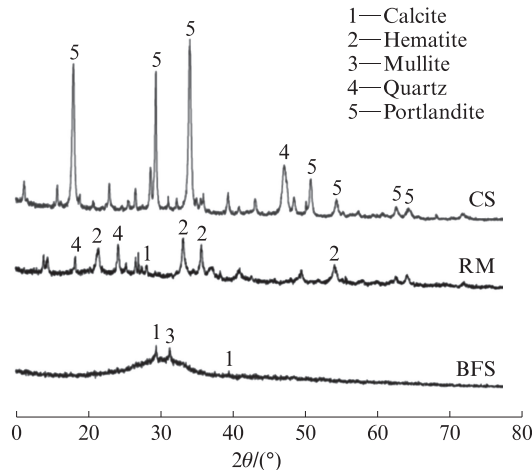


图1 赤泥、矿粉、电石渣的XRD图谱  
Fig. 1 XRD patterns of red mud, blast furnace slag, carbide slag

表1 赤泥、电石渣和矿粉的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of red mud, carbide slag, and blast furnace slag

Raw material	Unit: %						Other
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	
RM	10.01	20.90	48.23	1.06	10.96	0.07	8.77
CS	5.31	3.10	0.88	86.16	0.28	0.27	4.00
BFS	25.08	13.42	0.63	49.74	1.56	5.51	4.06

表2 破碎煤矸石颗粒筛分分析

Table 2 Screening analysis of crushed coal gangue particles

Sieve pore size/mm	4.75-9.5	2.36-4.75	1.18-2.36	0.6-1.18	0.3-0.6	0.15-0.3	<0.15
Passing rate (by mass)/%	8.46	14.28	10.70	21.12	17.13	10.10	18.21

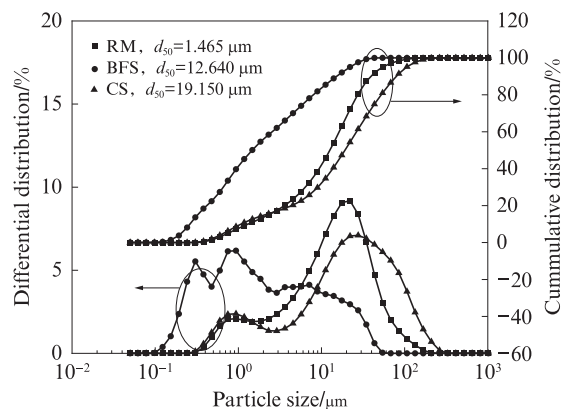


图2 原材料的粒度分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curves of raw materials

表3 试验充填料浆配比

Table 3 Mix proportion (by mass) of experimental backfill slurry  
Unit: %

Sample No.	Binder		
	RM	CS	BFS
AR1	60	5	35
AR2	60	10	30
AR3	60	15	25
AR4	60	20	20
AR5	60	25	15
AR6	60	30	10
BR1	45	20	35
BR2	50	20	30
BR3	55	20	25
BR4	60	20	20
BR5	65	20	15
BR6	70	20	10

料浆制备试验按以上配比进行,先测试料浆的流动度,再进行试块浇筑,之后将料浆注入40 mm×40 mm×40 mm的标准三联模具中.装料时用捣棒沿模壁插捣,插捣后用橡皮锤轻轻敲击四周,待其密实无气泡后,使用抹刀刮去模具上方多余料浆使得浆体表面平齐,用塑料薄膜覆盖,以保持其水分.室温下静置24 h后脱模,将脱模后的试块置于(20±1)°C、相对湿度90%以上的恒温养护箱中养护至3、7、28 d,并测试其抗压强度、沉缩比、微观形貌、物相组成以及重金属含量.

### 1.3 测试方法

原材料的粒径按照JC/T 721—2006《水泥颗粒级配测定方法 激光法》,在65 °C恒温干燥箱中烘干8 h后采用欧美克激光粒度分析仪(型号为LS-C (IIA))进行测试;破碎煤矸石和风积砂的筛分分析按照JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》进行.原材料的化学组成采用Panalytical

### Axios型X射线荧光光谱仪测试

充填体的抗压强度参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》对养护至3、7、28 d龄期的硬化充填体进行测试;流动度参照GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》进行测试;净浆流变性能采用Brookfield DV3T流变仪测定;充填沉缩比参照GB/T 51450—2022《金属非金属矿山充填工程技术标准》进行测试;充填材料的晶相组成,采用日本Rigaku Ultima IV型X射线衍射仪测试(Cu靶材,扫描范围5°~90°,扫描速率10(°)/min,步长0.02°);微观结构分析,采用捷克TESCAN MIRA LMS扫描电子显微镜测试,测试前试样做喷金处理;重金属浸出测试参照HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》进行,取上层清液,使用美国Agilent 7800型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行重金属含量检测.

## 2 结果与讨论

### 2.1 充填体抗压强度分析

保持赤泥掺量不变,研究电石渣掺量对赤泥基全固废矿井充填材料抗压强度的影响,结果见图3(a).由图3(a)可知:(1)随着电石渣掺量的增加,试块3、7、28 d抗压强度均呈现先增大后减小的趋势.(2)电石渣掺量为5%时,试块3 d的抗压强度极低,到28 d时试块的抗压强度才提高起来.这是由于作为碱性激发剂的电石渣,5%的掺量所提供的碱性环境对于促进矿粉的水化有限.(3)当电石渣掺量增加到20%时,充填体的抗压强度达到最高;继续增加掺量到30%,充填体抗压强度下降明显.电石渣作为矿粉的碱性激发剂,可以激发矿粉的胶凝活性,从而提高充填体的强度.电石渣对矿粉的激发作用主要体现在其可以提高体系的pH值,矿粉颗粒在OH<sup>-</sup>作用下,活性玻璃体溶解,产生的Ca<sup>2+</sup>、[SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>发生二次火山灰反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶<sup>[13]</sup>.当达到矿粉所需要的碱性环境时,再增加电石渣的掺量,相当于减少了矿粉这个主要胶凝材料的掺量,因而减少了C-S-H凝胶的产生,导致试块强度下降.

保持电石渣掺量不变研究赤泥掺量对赤泥基全固废矿井充填材料抗压强度的影响,结果见图3(b).由图3(b)可见,当赤泥掺量从45%增至50%时,充填体的抗压强度提高;但超过50%时,其强度逐渐降低;当赤泥掺量超过60%时,强度下降明显.赤泥中的Na<sub>2</sub>O是矿渣的碱性激发剂,增加其掺量可以提升矿粉的活性指数,使得胶凝材料的强度提升.

Choo等<sup>[14]</sup>研究认为,赤泥掺量增加可以增大胶凝材料浆体的pH值,提高被激发组分的活性,生成更多的水化产物,从而提高了胶凝材料的力学强度.但当赤泥掺量超过一定比例后,会使体系中的矿粉含量减少,从而降低了试块强度<sup>[15]</sup>.

综上所述,在赤泥基胶凝体系矿井充填材料抗压强度分析中,赤泥掺量50%以上有一定合理性,但

不宜超过总胶凝材料的60%.结合矿山的具体实践,充填体养护28 d的抗压强度要求不低于0.7~2.0 MPa<sup>[16]</sup>.通过与矿山充填体抗压强度要求对比,发现BR2配比的赤泥基充填体满足矿山充填体强度的要求.基于抗压强度指标,赤泥基全固废矿井充填材料中胶凝材料的最佳配比为50%的赤泥、30%的电石渣和20%的矿渣.

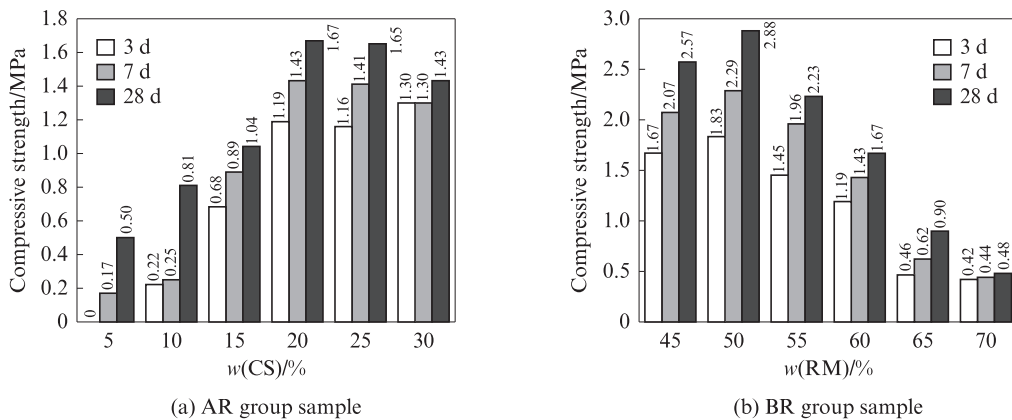


图3 电石渣、赤泥掺量对充填材料抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of carbide slag and red mud content on compressive strength of backfill materials

## 2.2 沉缩比分析

沉缩变化是充填料浆入井后,随着时间的推移,料浆固化后体积收缩的现象,是矿井充填工程中影响充填质量的一个重要因素,其与泌水变化趋势一致<sup>[17]</sup>.充填料浆的沉缩受充填浓度的影响较大.因此,本节调整AR组和BR组料浆充填浓度依次为72%、75%和78%,以研究其对料浆沉缩比的影响,测试结果见图4.由图4可见,在同等配比情况下,当充填浓

度从72%增加到78%时,充填料浆的沉缩比都随着充填浓度的增大而明显降低,这证实了充填浓度对料浆沉缩比的影响十分显著.由图4还可见:充填料浆的沉缩比随着电石渣掺量的增加而降低(图4(a)),但随着赤泥掺量的增加而增加(图4(b)),这可能与电石渣和赤泥的颗粒细度有关;相较于电石渣,赤泥的颗粒明显更细(图2),随着赤泥掺量的增加其比表面积更大,需水比也更大,因此硬化后料浆的沉缩比更大.

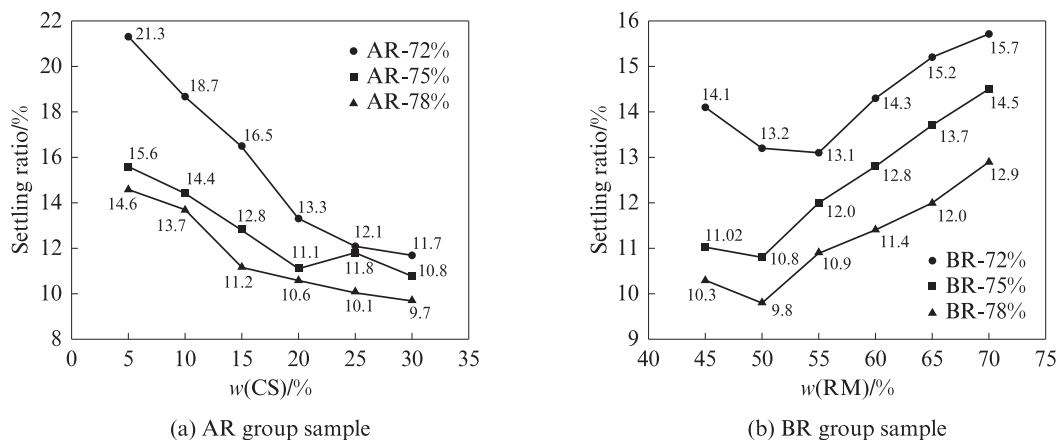


图4 电石渣、赤泥掺量对充填材料沉缩比的影响

Fig. 4 Influence of carbide slag and red mud content on settling ratio of backfill slurry

## 2.3 流动性能分析

### 2.3.1 流动度分析

图5为充填料浆的流动性测试结果.由图5(a)可

知,充填料浆胶凝体系中赤泥掺量在45%~70%递增时,充填料浆流动度持续降低,流动度从240 mm降到190 mm,降幅为20.8%.这是因为赤泥比矿粉具



有更大的比表面积,随着赤泥替代矿粉比例的提升,胶凝体系需水量增加。

由图5(b)可知,随着电石渣掺量的增加,胶凝体系的流动度随之降低,当电石渣掺量由0%增至30%时,流动度从260 mm降至180 mm,降幅为30.8%。从掺入量和流动度下降趋势来看,电石渣对胶凝体系流动度的影响要大于赤泥。

### 2.3.2 流变性能分析

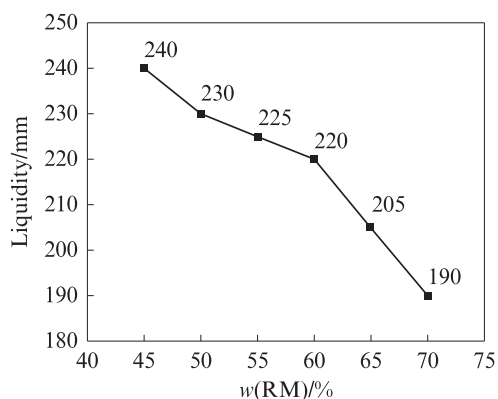
流变特性决定了胶凝材料的流动特性和可泵送性,是充填工程中的一个重要工艺技术参数<sup>[18]</sup>。图6充填料浆净浆的流变拟合曲线(图6(a)中,调整AR组料浆的水胶比为0.8;图6(b)中,选择AR3料浆保持其电石渣掺量不变,调整其水胶比依次为0.8、1.0和1.2)。图6显示,流变曲线整体呈现快速上凸后缓慢增加的趋势。取较为稳定的流变下行曲线为研究对象,用Herschel-Bulkley模型对数据进行拟合,拟合结果如表4所示,拟合相关系数接近0.99。模型表

达式为:

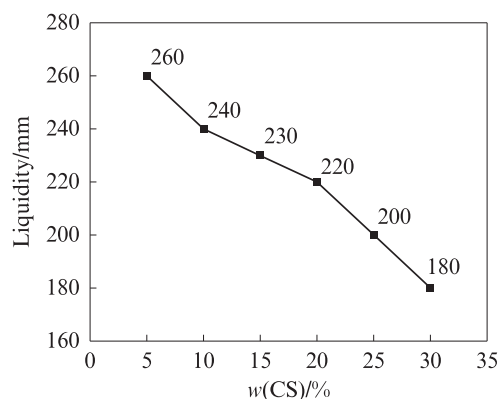
$$\sigma = \sigma_y + k_{HB} \gamma^n \quad (1)$$

式中: $\sigma_y$ 为屈服应力,Pa; $k_{HB}$ 为Herschel-Bulkley系数; $n$ 为Herschel-Bulkley指数。

由图6(a)可知,保持水胶比为0.8,随着电石渣掺量的增加,剪切应力与屈服应力显著增大。可能是电石渣本身极细,使得材料易于团聚,同体积浆体电石渣含量越多,含水率越低,剪切应力就越大,因而随着电石渣掺量的不断上升,充填材料的流动度也会呈现出较为明显的下降趋势。由图6(b)可知,水胶比为0.8时,浆体具有较高剪切应力和屈服应力,水胶比为1.0和1.2时,两者拟合结果相近。这一现象可能的原因是,水胶比超过1.0时,胶凝体系中自由水开始增加,由于自由水在体系中可以充当润滑剂,料浆流动阻力减小,从而使得浆体屈服应力相对较小,充填料浆净浆表现出良好的流变性能。



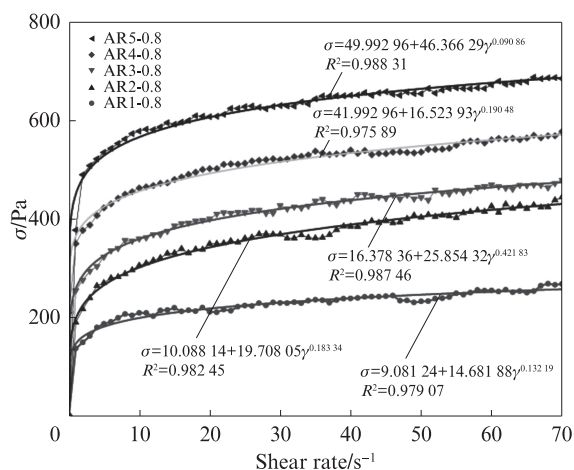
(a) RM group sample



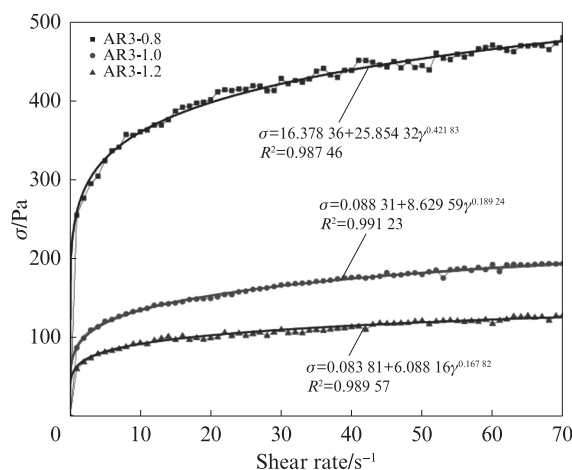
(b) AR group sample

图5 赤泥和电石渣掺量对充填料浆流动度的影响

Fig. 5 Effect of red mud and carbide slag content on fluidity of backfill slurry



(a) Different carbide slag contents



(b) Different water-binder ratios

图6 充填料浆净浆的流变拟合曲线

Fig. 6 Rheological fitting curves of backfill slurry without aggregate

表 4 流变性能测试拟合结果  
Table 4 Fitting results of rheological property test

Sample No.	$\sigma_y/\text{Pa}$	$k_{\text{HB}}$	$n$
AR1-0.8	9.081 24	14.681 88	0.132 19
AR2-0.8	10.088 14	19.708 05	0.183 34
AR3-0.8	16.378 36	25.854 32	0.142 83
AR4-0.8	41.992 96	16.523 93	0.190 48
AR5-0.8	49.992 96	46.366 29	0.090 86
AR3-0.8	16.378 36	25.854 32	0.142 83
AR3-1.0	0.088 31	8.629 59	0.189 24
AR3-1.2	0.083 81	6.088 16	0.167 82

2.4 XRD 分析

赤泥掺量为 60% 时,不同电石渣掺量下,硬化充填体的 XRD 图谱见图 7.由图 7 可知,在 20°~35°扫描范围内出现了弥散峰,这说明有无定形结构逐渐生成<sup>[19]</sup>.结合图 1、7 可以看出赤泥中水钙铝榴石、赤铁矿等在各个龄期的衍射峰基本无变化,说明赤泥中的晶态物质基本不参与反应,赤泥中的氧化钠和细

颗粒对充填体强度的提升归因于其提供了碱源和微集料效应.

由图 7 还可见,将电石渣加入到赤泥-矿粉体系中,几乎观察不到氢氧化钙的特征峰,但出现了无定形硅铝相特征峰,说明由电石渣产生的氢氧化钙与赤泥中的碳酸钠发生了反应,同时也与矿粉中的玻璃相发生了火山灰反应,导致氢氧化钙被消耗.

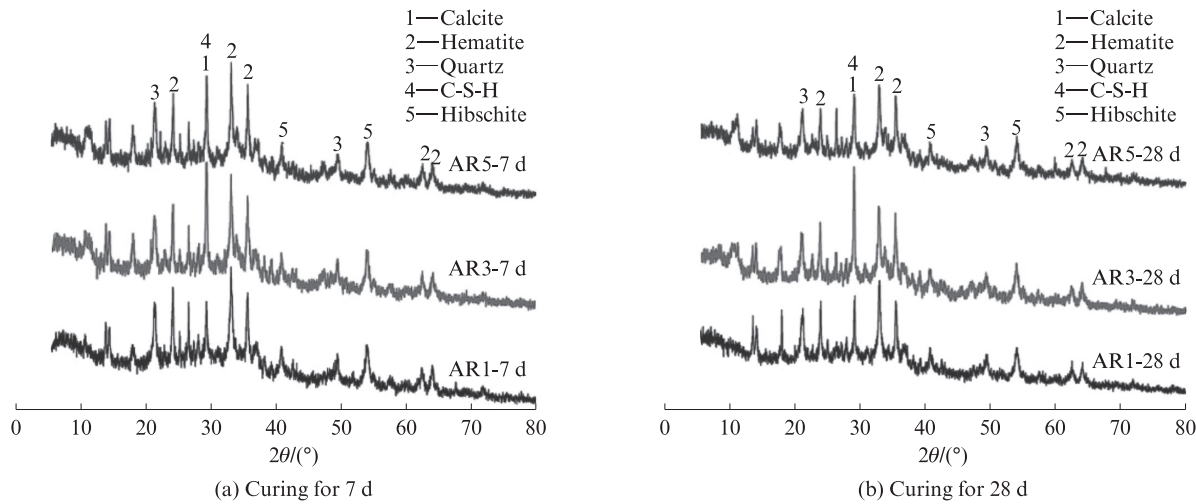


图 7 赤泥掺量为 60% 时不同电石渣掺量下硬化充填体的 XRD 图谱  
Fig. 7 XRD patterns of hardened backfill with 60% red mud and different carbide slag contents

2.5 SEM-EDS 分析

图 8 为赤泥掺量为 60% 时充填体的 SEM 照片.由图 8 可见:当电石渣掺量为 5% 时,胶凝材料内部结构比较松散,水化产物尚未密实;当电石渣掺量增加到 15% 时,水化产物填充了胶凝材料颗粒间的缝隙,内部结构密实度上升明显;继续增加电石渣掺量到 25% 时,水化凝胶类物质减少,结构间的密实度降低.这可能是当电石渣掺量不足时,体系内碱度不够,矿粉水化不充分;随着电石渣掺量增加,体系内碱度升高,矿粉在碱性物质激发下,表面的硅酸根离子团与钙离子结合,产生 C-S-H 凝胶增多,但继续增加电石渣掺量,导致矿粉含量减少,由矿粉反应生成

的凝胶类物质减少.充填体从 7 d 养护到 28 d 时,各配比下的胶凝材料结构密实度均上升,这说明胶凝材料的水化反应仍在继续.

图 9 为图 8 中 A、B、C 点的能谱分析.由图 9 可以发现,3 个点主要包含 Ca、Si、Al 和 O 元素,结合 XRD 结果可确定水化产物为 C-S-H 或水化硅铝酸钙 C-A-S-H 凝胶,其为矿井充填材料基体结构的强度提供了支撑<sup>[20-21]</sup>,同时也为重金属的固化创造了条件.

图 10 为养护 28 d 时,电石渣掺量为 5%、15%、25% 的充填体表面 Si、Ca、Al、Fe、Na、Mg 等 6 种元素的能谱扫描分布图.图中点的均一化与密集程度代表了元素的分布与含量,可以直观地反映出 SEM 照

片中各元素富集状态与水化反应程度变化.由图10可以看出,随着电石渣掺量的增加,Al、Si、Ca元素的分布逐渐密集,但当电石渣掺量增加到25%时,元素

的均匀性变差,物质扩散均匀性较低.这说明在电石渣掺量为15%时充填体中的元素有最佳的密集状态

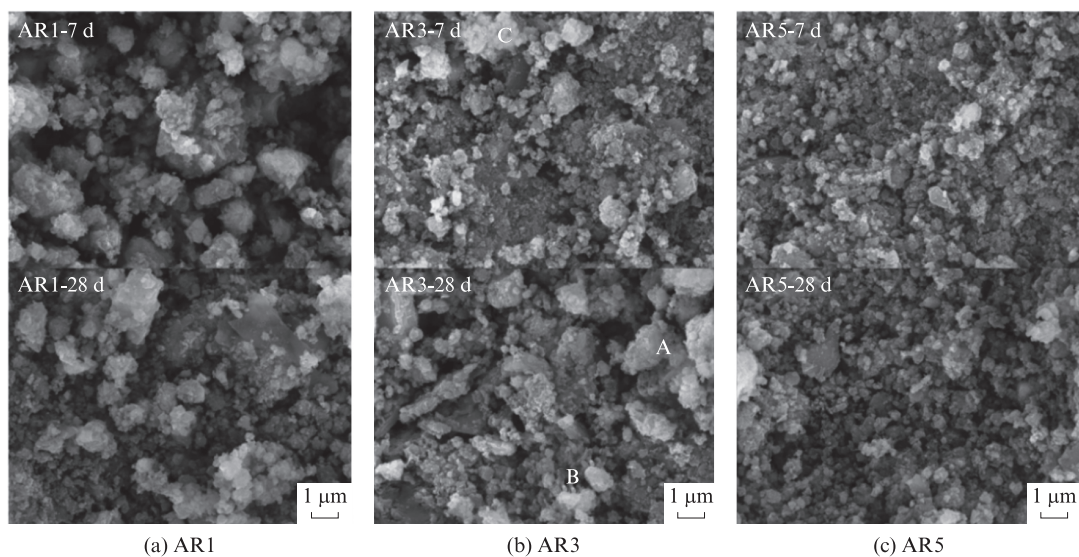


图8 赤泥掺量为60%时不同电石渣掺量下充填体的SEM照片

Fig. 8 SEM images of backfill at different curing ages with 60% red mud and different carbide slag contents

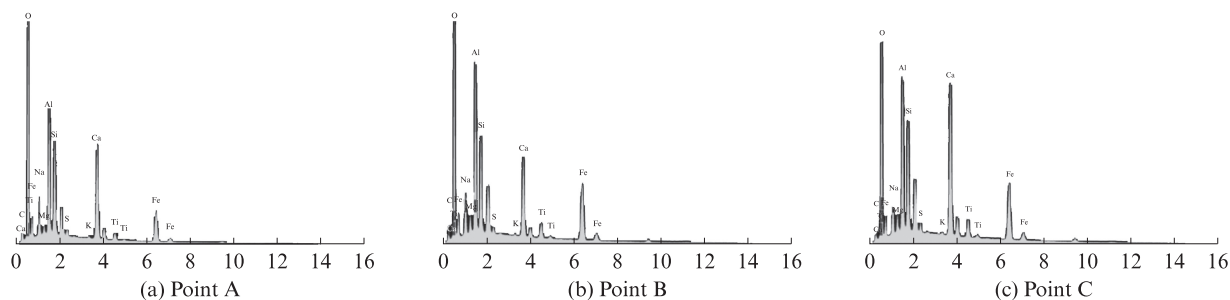


图9 SEM图中点A、B、C的能谱分析

Fig. 9 EDS analyses of point A, B and C in SEM images

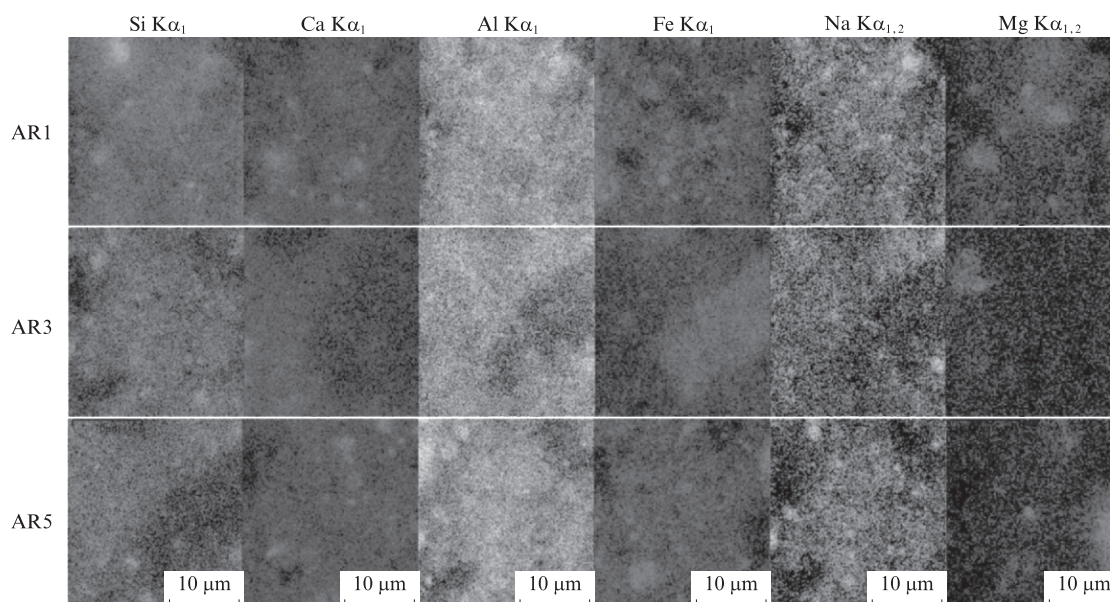


图10 养护龄期为28 d的充填体表面元素分布

Fig. 10 Distribution of elements on the surface of backfill with curing for 28 d



### 2.6 ICP-OES 分析

为验证赤泥基全固废矿井充填材料应用的安全性,按照水平振荡法浸提重金属,探讨充填体在地下水浸沥时的浸出毒性,并对环境风险作出评价.赤泥等固废原材料中含有大量的 As、Cd、Cr、Pb 等重金属,容易超过 GB/T 14848—2017《地下水环境质量标准》规定的限值;又由于赤泥基矿井充填材料会不可避免地地下水环境中浸泡淋溶,因而具有潜在的污染性<sup>[22]</sup>.考虑到赤泥掺量超过 60% 时,充填料浆强度下降明显,不再适宜做矿井充填,因此选择赤泥掺量为

55% 的 BR3 试样进行重金属浸出试验,试验结果见表 5.由表 5 可以看出,在制成矿井充填材料后,重金属浸出浓度显著下降,固化效率达到 62.2%~97.3%,采用 GB/T 14848—2017 来评估赤泥基矿井充填材料的环境安全性,可以发现 As 的浸出值满足Ⅳ类标准值,其余浸出元素均满足Ⅰ、Ⅱ类标准值.其原因是赤泥基矿井充填材料在水化过程中生成的 C-S-H 凝胶等以化学键合和物理包覆的方式,对材料中的重金属进行固化,有效抑制了重金属向液相转移,说明赤泥基矿井充填材料具有安全性和可靠性.

表 5 赤泥基矿井充填体浸出液重金属浓度  
Table 5 Concentration of heavy metals in the leaching solution of red mud based backfill

Heavy metal	Leaching concentration×10 <sup>-3</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )		Limit standard of leaching concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	RM	BR3	ClassⅠ	ClassⅡ	ClassⅢ	ClassⅣ	ClassⅤ
Cd	0.512	0.170	0.001	0.005	0.005	0.005	0.010
Cr	321.015	8.783	0.005	0.010	0.050	0.010	0.010
Cu	8.960	2.044	0.010	0.050	1.000	1.500	1.500
Ni	1.388	0.525	0.002	0.002	0.020	0.100	0.100
Pb	0.615	0.074	0.005	0.005	0.010	0.100	0.100
Zn	6.843	2.394	0.050	0.500	1.000	5.000	5.000
As	50.850	27.438	0.001	0.001	0.010	0.050	0.050

### 3 结论

(1)赤泥与电石渣作为碱源为体系提供了碱性环境,驱动矿粉发生水化反应.当赤泥掺量为 50%、电石渣掺量为 20%、矿粉掺量为 30%、胶集比为 0.3、充填浓度为 75% 时,其充填体 28 d 抗压强度为 2.88 MPa,满足矿井充填力学的要求.电石渣对充填体沉缩比的影响要比赤泥更大.同时充填浓度的改变对沉缩比的影响同样很大,其是影响赤泥基充填料浆沉缩的重要因素.

(2)当赤泥掺量为 60% 时,充填料浆净浆屈服应力随着电石渣掺量的增加而增大,且在水胶比为 1.0 时,充填料浆净浆表现出良好的流变性能.通过微观结构分析并结合 XRD 结果,确定净浆的水化产物为 C-S-H 或 C-A-S-H 凝胶,其为矿井充填体基体结构的强度提供了支撑,同时也为重金属的固化创造了条件.

(3)通过对赤泥基全固废矿井充填材料进行重金属浸出试验,发现充填体中 As、Cd、Cr、Pb 等重金属均满足国家毒性控制标准,表明赤泥基矿井充填材料具有安全性和可靠性.

#### 参考文献:

[1] 南相莉,张延安,刘燕,等.我国赤泥综合利用分析[J].过程工

程学报,2010,10(增刊1):264-270.  
NAN Xiangli, ZHANG Yanan, LIU Yan, et al. Analysis of comprehensive utilization of red mud in china[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10 (Suppl 1):264-270. (in Chinese)  
[2] 王晓,张磊,罗忠涛,等.赤泥对道路硅酸盐水泥性能和矿物组成的影响[J].建筑材料学报,2017,20(5):774-779.  
WANG Xiao, ZHANG Lei, LUO Zhongtao, et al. Effects of red mud on properties and mineral composition of Portland cement for road [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20 (5):774-779. (in Chinese)  
[3] 张兴武,刘鹏,程钰.矿化微生物对赤泥基碱激发胶凝材料性能的增强研究[J].建筑材料学报,2024,27(1):9-15.  
ZHANG Xingwu, LIU Peng, CHENG Yu. Enhancement of properties of alkali-activated red mud based cementitious materials by mineralizing microbe[J].Journal of Building Materials, 2024, 27(1):9-15. (in Chinese)  
[4] 刘俊霞,李忠育,张茂亮,等.赤泥地聚物水泥力学性能和聚合机理[J].建筑材料学报,2022,25(2):178-183.  
LIU Junxia, LI Zhongyu, ZHANG Maoliang, et al. Mechanical property and polymerization mechanism of red mud geopolymer cement[J].Journal of Building Materials, 2022, 25(2):178-183. (in Chinese)  
[5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委办公厅关于开展大宗固体废弃物综合利用示范的通知:发改办环资[2021]438号[A/OL]. (2021-05-30)[2024-01-11]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18155>.  
National Development and Reform Commission. Notice of the



- General Office of the National Development and Reform Commission on carrying out demonstration of comprehensive utilization of bulk solid waste: NDRC [2021] No. 438[A/OL]. (2021-05-30)[2024-01-11]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18155>. (in Chinese)
- [6] 祝丽萍, 倪文, 张旭芳, 等. 赤泥-矿渣少熟料体系制备全尾砂胶结充填料试验研究[J]. 金属矿山, 2009(11):175-178.  
ZHU Liping, NI Wen, ZHANG Xufang, et al. Experimental research on the preparation of whole-tailings paste backfilling material with red mud, slag and minor clinker aggregate[J]. Metal Mine, 2009(11):175-178. (in Chinese)
- [7] 杨长辉, 朱效宏, 郑雨佳, 等. 内掺 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对碱矿渣混凝土水化进程的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2):161-167  
YANG Changhui, ZHU Xiaohong, ZHENG Yujia, et al. Effect of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  on hydration process of alkali slag concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):161-167. (in Chinese)
- [8] PAN Z H, CHENG L, LU Y N, et al. Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3):357-362.
- [9] 刘龙, 黄莉美, 王爱贞, 等. 赤泥-粉煤灰-矿渣碱激发胶凝材料性质的研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2012, 22(1):13-20.  
LIU Long, HUANG Limei, WANG Aizhen, et al. Property study of red mud-fly ash-slag alkali activated gel material[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science), 2012, 22(1):13-20. (in Chinese)
- [10] ZHANG N, LIU X M, SUN H H, et al. Evaluation of blends bauxite-calcination-method red mud with other industrial wastes as a cementitious material: Properties and hydration characteristics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(1):329-335.
- [11] 安强, 潘慧敏, 赵庆新, 等. 碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):14-20.  
AN Qiang, PAN Huimin, ZHAO Qingxin, et al. Properties of Alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composites [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):14-20. (in Chinese)
- [12] 万宗华, 张文芹, 刘志超, 等. 电石渣-矿渣复合胶凝材料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5):1704-1714.  
WAN Zonghua, ZHANG Wenqin, LIU Zhichao, et al. Properties of carbide slag-slag composite cementitious material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5):1704-1714. (in Chinese)
- [13] 安赛, 王宝民, 陈文秀, 等. 矿渣-电石渣地质聚合物的性能及作用机制[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(11):3996-4005.  
AN Sai, WANG Baomin, CHEN Wenxiu, et al. Performance and action mechanism of slag-carbide slag based geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(11):3996-4005. (in Chinese)
- [14] CHOO H, LIM S, LEE W, et al. Compressive strength of one-part alkali activated fly ash using red mud as alkali supplier [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125:21-28.
- [15] 刘冲昊, 岳雪涛, 矫川本, 等. 赤泥基胶凝材料的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11):3574-3581.  
LIU Chonghao, YUE Xuetao, JIAO Chuanben, et al. Study on preparation and properties of red mud-based cementitious materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(11):3574-3581. (in Chinese)
- [16] QI C C, ANDY F. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives [J]. Minerals Engineering, 2019, 144:106025.
- [17] 孙长坤, 于永纯, 魏晓明. 充填料浆沉缩性能试验研究[J]. 矿冶, 2021, 30(6):16-19, 28.  
SUN Changkun, YU Yongchun, WEI xiaoming. Experimental study on the shrinkage performance of backfill slurry[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(6):16-19, 28. (in Chinese)
- [18] 梁龙, 张鑫, 刘巧玲. 浆体流变性能对超高延性水泥基材料性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 75(5):21070107.  
LIANG Long, ZHANG Xin, LIU Qiaoling. Effect of Rheology on properties of ultra-high ductility cementitious composites[J]. Materials Reports, 2023, 75(5):21070107. (in Chinese)
- [19] 高英力, 孟浩, 万红伟, 等. 电石渣碱激发矿渣/粉煤灰胶凝材料性能及微结构[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(5):1739-1747.  
GAO Yingli, MENG Hao, WAN Hongwei, et al. Properties and microstructure of alkali-activated cementitious materials prepared with carbide slag-slag-fly ash solid waste[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(5):1739-1747. (in Chinese)
- [20] 杨军, 张高展, 丁庆军, 等. 铝掺杂水化硅酸钙的分子结构和力学性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6):565-571, 584.  
YANG Jun, ZHANG Gaozhan, DING Qingjun, et al. Molecular structure and mechanical properties of aluminum substituted C-S-H[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):565-571, 584. (in Chinese)
- [21] 刘继中, 赵庆新, 张津瑞, 等. 碱渣-矿渣复合胶凝材料硬化体的微观结构与组成[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6):872-877.  
LIU Jizhong, ZHAN Qingxin, ZHANG Jinrui, et al. Microstructure and composition of hardened paste of soda residue-slag complex binding materials[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6):872-877. (in Chinese)
- [22] 刘恒凤, 张吉雄, 周楠, 等. 矽石基胶结充填材料重金属浸出及其固化机制[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3):523-531.  
LIU Hengfeng, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, et al. Study of the leaching and solidification mechanism of heavy metals from gangue-based cemented paste backfilling materials[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3):523-531. (in Chinese)