



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405233

引用格式:袁浩为,张煜东,李超,等.离子型稀土矿山帷幕灌浆防渗材料研究[J].科学技术与工程,2025,25(12):4932-4937.

Yuan Haowei, Zhang Yudong, Li Chao, et al. Ionic rare earth mine curtain grouting and seepage control materials[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 4932-4937.

## 一般工业技术

# 离子型稀土矿山帷幕灌浆防渗材料研究

袁浩为<sup>1,2</sup>, 张煜东<sup>1,2</sup>, 李超<sup>1\*</sup>, 舒荣波<sup>1,2</sup>, 程蓉<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所 成都 610041; 2. 中国地质调查局矿山生态保护修复中心(西部), 成都 610041)

**摘要** 原地浸出工艺优化了离子型稀土矿开采方式,但无组织泄露可能会造成资源的流失和生态环境的影响,因此开采过程中防渗工作尤为重要。以水泥复合材料(C-CM)、液态硅基复合材料(Si-CM)、丙烯酸盐复合材料(A-CM)3种灌浆防渗材料为基础,并复配高岭土尾矿,通过帷幕灌浆材料的pH、密度、黏度、凝结时间、固砂体强度测试、浆液扩散模拟、渗透性和耐久性测试,分析对比各帷幕灌浆材料各项指标。结果表明:C-CM的固砂体强度较高,但A-CM和Si-CM的黏度较低,可灌性更强,所形成的固砂体的渗透系数更低,更适合裂隙较小区域防渗。Si-CM在干湿循环和冻融循环中降解较快,且降解产物主要为SiO<sub>2</sub>。另外,添加高岭土尾矿可在一定程度上提升防渗材料固砂体的强度和防渗性能,且增加了材料的前期耐久性。

**关键词** 离子型稀土; 原位浸出; 帷幕灌浆; 耐久性

中图法分类号 TB332; 文献标志码 A

## Ionic Rare Earth Mine Curtain Grouting and Seepage Control Materials

YUAN Hao-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-dong<sup>1,2</sup>, LI Chao<sup>1\*</sup>, SHU Rong-bo<sup>1,2</sup>, CHENG Rong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chengdu 610041, China;

2. Mine Ecological Protection and Restoration Technology Center (Western) Geological Survey, Chengdu 610041, China)

**[Abstract]** The mining method of ion-type rare earth ores has been optimized by the in-situ leaching process. However, unorganized leakage may cause resource loss and impacts on the ecological environment. Therefore, anti-seepage work during the mining process is of particular importance. Based on three grouting anti-seepage materials, namely cement composite material (C-CM), liquid silicon-based composite material (Si-CM), and acrylate composite material (A-CM), and compounded with kaolin tailings, various indicators of each curtain grouting material were analyzed and compared through tests including the pH, density, viscosity, setting time, solid sand body strength test, slurry diffusion simulation, permeability, and durability test of the curtain grouting materials. The results indicate that the solid sand body of C-CM has relatively high strength, while A-CM and Si-CM have lower viscosity, stronger groutability, and the solid sand bodies formed have lower permeability coefficients, making them more suitable for anti-seepage in areas with smaller fractures. Si-CM degrades relatively quickly in dry-wet cycles and freeze-thaw cycles, and the degradation product is mainly SiO<sub>2</sub>. In addition, the strength and anti-seepage performance of the solid sand body of the anti-seepage material can be improved to a certain extent by adding kaolin tailings, and the early durability of the material is also increased.

**[Keywords]** ionic rare earth; *in-situ* leaching; curtain grouting; durability

稀土作为一种重要的战略矿产资源,可广泛应用于国防军工和新兴产业等高精尖领域。离子型稀土矿作为重要的中重稀土来源,近年来对其开采技术的研究热度较高<sup>[1-2]</sup>。20世纪七八十年代以前主要采用堆浸方式,20世纪90年代后逐渐采用池浸方式,但这两种方式均存在开采搬运量较大,矿

山原有生态环境影响严重的问题<sup>[3]</sup>。随着环保意识的增加,离子型稀土矿的开采方式逐渐采用原地浸出开采技术取代<sup>[4]</sup>。原地浸出技术主要是通过原矿区钻孔注液的方式,将浸矿液注入矿区内部岩层,将反应后带有稀土元素的渗滤液收集提炼。此方法降低了开采对于矿区表层的生态破坏,但该

收稿日期:2024-07-12; 修订日期:2025-02-14

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2902201);中国地质调查局公益性地质调查项目(DD20221697)

第一作者:袁浩为(1994—),男,汉族,陕西宝鸡人,硕士研究生,工程师。研究方向:矿山生态调查与修复。E-mail:824079369@qq.com。

\*通信作者:李超(1989—),男,汉族,四川达州人,硕士研究生,工程师。研究方向:低品位黏土类矿产资源综合利用。E-mail:409194685@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

开采过程使用的浸矿液进入矿体后可能会产生无组织渗流的情况,致使浸矿液泄露,不仅会造成稀土资源流失,而且会对矿区周围地下、地表水的质量产生影响<sup>[5]</sup>。针对该问题,舒荣波等<sup>[6]</sup>提出原位渗流控制开采新工艺,开发矿山渗漏通道防渗帷幕构筑新技术,通过灌浆的方式将防渗材料注入离子型稀土矿山已探明的隐伏渗漏通道内,建立有效防渗体系减少或防止浸矿液无组织渗漏,从而保障稀土资源的高效回收。

目前,以水泥基材料为主的灌浆材料应用较广。水泥灌浆材料固结体强度较高,一般无毒无味,材料来源广,价格成本较低,通过水灰比的调节能有效灌浆材料的流动性<sup>[7-8]</sup>。水泥材料缺点同样较为明显,水泥材料在高水灰比条件下易泌水,水化反应导致浆液温度升高,浆液匀质性和稳定性下降,难以灌入裂隙较小区域<sup>[9]</sup>。20世纪80年代,超细水泥的研制成功有效改善了水泥材料稳定性和可灌性<sup>[8]</sup>。研究发现,在水泥材料中掺入粉煤灰矿渣等能有效降低浆液温度<sup>[9]</sup>。当水泥浆液进入矿区岩体后,自然淋滤浸出液偏碱性,材料固结后在自然界中降解较慢,难以恢复生态原貌。近年来,液态硅基灌浆材料的研究热度也逐渐上升<sup>[10]</sup>。与水泥类材料相似,液态硅基材料起始浓度较低,可灌性与现场适应性强,材料来源广泛,经济效益好。液体硅基材料主剂的化学性质稳定,无毒无味,对环境的影响较小。但液态硅基灌浆材料固结体强度较低,耐久性较差,凝胶时间随环境变化较大。将水泥与液态硅基材料复配,强度、耐久度和抗渗性得到有效提升,取得明显突破。研究表明,粉煤灰等掺合料能延长硅基-水泥复合材料的胶凝时间,增加材料的抗折强度和水化程度,使其更符合现场防渗要求<sup>[11]</sup>。丙烯酸盐灌浆材料于20世纪80年代开始规模化推广使用<sup>[12-13]</sup>,因其黏度较低,可灌性较好,胶凝时间易于控制,渗透系数较低,具有一定伸缩性能等特点,常应用于堤坝等水利设施项目的防渗,但材料应用成本较高<sup>[2,14]</sup>。

基于此,通过对比3种常见灌浆材料的基本性能,结合离子型稀土矿原位渗流的灌浆防渗工程特点,开展浆液扩散模拟实验,探究材料的工程实施可行性。最后通过灌浆材料与尾矿渣的复配,以尾矿渣替代部分灌浆基材,不仅可降低灌浆成本和新材料生产过程的碳排放,还可通过防渗帷幕工程构筑,探索形成“废物利用-污染防控”的双重环境增益模式,为矿业-环保-建材产业的跨领域协同提供了创新范式。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及试样制备

3种灌浆试验材料分别为水泥复合材料(C-CM)、液态硅基复合材料(Si-CM)、丙烯酸盐复合材料(A-CM)。其中,水泥复合材料中主要成分为普通硅酸盐水泥(42.5);液态硅基复合材料与丙烯酸盐复合材料为实验室现配,丙烯酸盐复合材料主要成分包括丙烯酸、交联剂、缓凝剂等。实验过程中所用标准砂为厦门艾思欧标准砂有限公司生产国标中砂。尾矿渣采用高岭土尾矿,成分与粒度分布分别如表1、图1所示。

表1 高岭土尾矿成分

成分	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl
含量/%	0.741	0.272	28.45	50.112	0.03
成分	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	
含量/%	0.116	0.117	4.356	0.116	

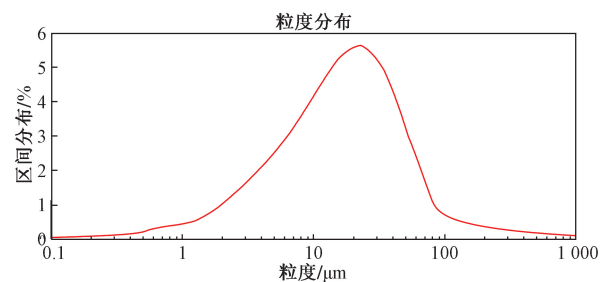


图1 高岭土尾矿粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of kaolin

### 1.2 灌浆性能测试

灌浆材料的凝结时间、黏度、密度以及力学强度作为衡量灌浆材料与砂岩等结合后物理影响的基本评价参数,3种灌浆材料分别参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)确定灌浆固砂体的初凝时间和终凝时间;使用六速黏度计测试各灌浆材料的视黏度、塑性黏度等参数。参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021),按照相同胶砂比分别制备3种灌浆材料胶砂标准试件40 mm(宽) 40 mm(高) 160 mm(长),记录在相同养护条件养护不同龄期的抗折强度、抗压强度。

衡量灌浆材料在与介质接触后防渗效果的根本参数是材料的渗透系数和耐久性变化。灌浆固砂体渗透系数测试参照《土工实验方法标准》(GB/T 50123—2019)制备灌浆材料胶砂标准试件( $\Phi 61.4$  mm 40 mm),记录供水箱的水力压头、水头变化和渗流时间。耐久性测试样品为胶砂标准

试件 40 mm(宽) 40 mm(高) 160 mm(长),将各灌浆固砂体标准试块分别进行干湿和冻融循环,其中干湿循环干燥环境在真空干燥箱中进行,保持干燥温度  $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿润环境直接浸入自来水中,干燥与湿润环境各维持 30 min。冻融循环设置冰冻温度为  $3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,融化温度  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冰冻与融化环境各维持 30 min。

### 1.3 灌浆浆液扩散模拟试验

浆液扩散模拟试验可以评估的灌浆材料在不同条件下的扩散性能以及浆液扩散后对周围介质的影响,特别是对地下水和土壤的影响。通过浆液扩散模拟试验,可以比较不同灌浆材料在扩散性能方面的差异,从而选择最适合特定工程需求的材料。浆液扩散试验装置如图 2 所示。灌浆压力装置由螺旋泵提供,控制为  $(0.5 \pm 0.1)\text{ MPa}$ ,灌浆介质由矿区模拟岩土装填,装填规格为  $\Phi 110\text{ mm} \times 2\text{ }000\text{ mm}$  柱状,装填密度设置为  $1.49 \sim 1.52\text{ g/cm}^3$ 。柱体一端接入灌浆管,一端使用滤膜覆盖,以滤膜出液为准,记录灌浆时间、扩散距离,计算扩散速度。各组材料灌浆 7 d 后,使用环刀分别取在各柱体上段(0 ~ 40 cm)、中段(80 ~ 120 cm)、末段(160 ~ 200 cm),参照 1.2 节中方法测试灌浆后固砂体渗透系数。

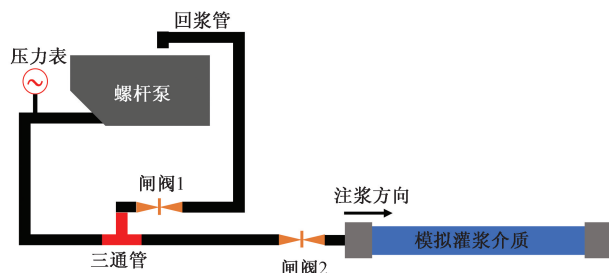


图 2 灌浆模拟试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grouting simulation test

### 1.4 尾矿渣复配探索

基于为减少传统灌浆材料水泥的用量与操作性考虑,实验选取不同类型灌浆材料,将不同比例高岭土尾矿与灌浆材料进行复配,分别对其基本性能、渗透系数以及耐久性进行测试。测试方法参照 1.2 节。

## 2 测试结果与分析

### 2.1 基本灌浆性能测试结果

根据表 2 结果可知,3 种灌浆材料中 C-CM 为碱性,Si-CM 为酸性、A-CM 接近中性。三者密度与黏度相差较大,C-CM 的黏度较大,而 Si-CM 和 A-CM 的黏度均小于  $5\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,可灌性较好。C-CM 材料的初终凝时间跨度较大,通过水灰比以及外加剂调节

可凝结时间;Si-CM 材料通过调节剂添加量,凝结时间可在一定范围内浮动,工程适应性较强;A-CM 材料通过双液混合调节凝结时间,初凝到终凝的跨度较小,可快速完成对固砂体的胶凝。图 3 为不同灌浆材料固砂体在 3 d 和 28 d 的机械强度变化。可以看出,以水泥基为主要成分的 C-CM 固砂体的各龄期力学强度是显著大于 Si-CM 和 A-CM 材料固砂体,其中 Si-CM 材料固砂体强度最低,说明 Si-CM 与砂岩形成的固砂体材料胶凝作用较低,在较大的外力作用下更易变形溃散。

表 2 灌浆材料基本性能

Table 2 Basic properties of grouting materials

基本性能	C-CM	Si-CM	A-CM
pH	13.7	3.8 ~ 4.3	6.72
密度/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	1.55	1.07	1.09
凝结时间/min	初凝时间	65	15 ~ 20
	终凝时间	270	25 ~ 120
黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	45	2 ~ 5	2

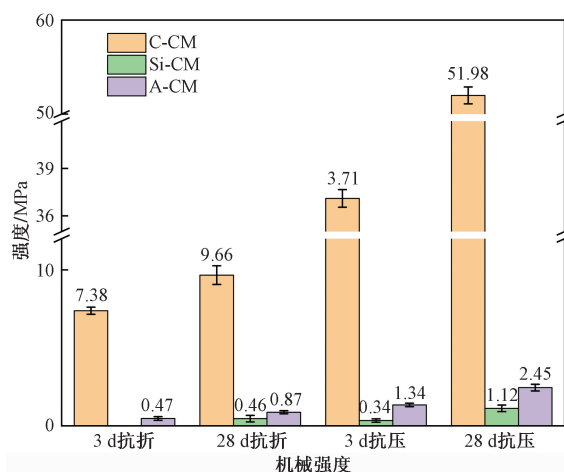


图 3 不同灌浆材料固砂体力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of different grouting materials for sand consolidation

### 2.2 渗透与耐久性测试结果

表 3 为 3 种灌浆材料固砂体的渗透系数测试结果,可以看出,3 种材料渗透系数差别较大,从大到小依次为 C-CM、Si-CM 和 A-CM。以有机材料丙烯酸盐为主要成分的 A-CM 材料的渗透系数较低,这表明有机胶凝材料对于标准砂的结合更为紧密,材料的孔隙率更低。相反,以水泥为主要成分的 C-CM 材料固砂体渗透系数较高,这是由于水泥作为胶凝材料,胶凝原理主要是由于硅酸二钙与硅酸三钙等与水反应生成水化硅酸钙凝胶,与砂石的结合处仍留有大量的孔隙,内部球状与管状孔隙在压力作用下将形成联通孔,降低材料的渗透性能。Si-CM 材料在调节剂作用下,硅酸钠转化为二氧化硅凝胶并

表3 各灌浆材料固砂体渗透系数结果

Table 3 Results of permeability coefficients of sand consolidation bodies using various grouting materials

固砂体名称	C-CM	Si-CM	A-CM
渗透系数/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1.85 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-7}$	$6.81 \times 10^{-8}$

逐渐固化,因为是由黏度较小的液态转化为固态,与标准砂间的孔隙较小,渗透系数低于 C-CM 材料。但由于 Si-CM 材料形成固砂体的强度较低,在进行渗透测试时在水压的作用下可能会形成部分渗流孔,造成渗透系数高于 A-CM 材料固砂体。

不同灌浆材料固砂体在干湿与冻融循环下的耐久性试验结果分别如图 4、图 5 所示。如图 4 所示,在干湿循环中,C-CM 材料固砂体强度最高,材料机械强度在 10 个循环以前呈现略微增加的趋势,这是由于水泥材料的水化缓慢,在一段时间内水化作用仍在持续,强度略微增长。在 10 个循环以后由于干湿循环下,水泥中水化硅酸钙在持续浸泡和干燥的作用下开裂,造成强度下降。Si-CM 材料固砂体整体机械强度较低,且在干湿循环下,主要胶凝成分二氧化硅凝胶在干燥后迅速收缩脆化,整体溃散速度较快,无法继续产生胶凝作用,致使在 3 个循环后迅速劣化,无法测试强度。对于 A-CM 材料固砂体来说,在干燥阶段材料失水后体积迅速收缩,在浸润阶段材料吸水后体积有一定的恢复,但材料内部会积累气泡,对固砂体的整体强度造成了不利影响,在 10 个循环后逐渐劣化。图 5 为各灌浆材料固砂体冻融循环下力学强度变化。可以看出,在冻融循环下,C-CM 材料固砂体强度较高,在 10 个循环前逐渐上升,后显著下降。Si-CM 和 A-CM 的固砂体强度随着冻融循环次数的增加,力学强度显著降低, Si-CM 材料固砂体力学强度下降最为明显,这是由于 Si-CM 材料中的二氧化硅凝胶凝在温度下降后变为固体析出,导致胶凝材料流失,强度下降。干湿与冻融循环在一定程度上代表了胶凝材料在环境中的耐久性能,其中 Si-CM 材料固砂体强度在两种循环条件下强度显著下降,这也表明 Si-CM 灌浆材料在环境中干湿与季节交替下更易降解,降解后主要产物为二氧化硅。

2.3 灌浆浆液扩散模拟结果

在模拟灌浆条件下,调整 C-CM 灌浆材料水灰比分别为 0.6、1、2。如图 6 所示,对比自来水在材料中的渗透速度,各灌浆材料在模拟渗流介质中的渗流速度均有所下降,其中 C-CM(0.6)材料的速度较低,A-CM 灌浆材料的渗流速度最高,这与灌浆材料的黏度呈反比,可见,A-CM 材料的可灌性最佳。根据对各模拟灌浆组材料前段、中段与末段 7 d

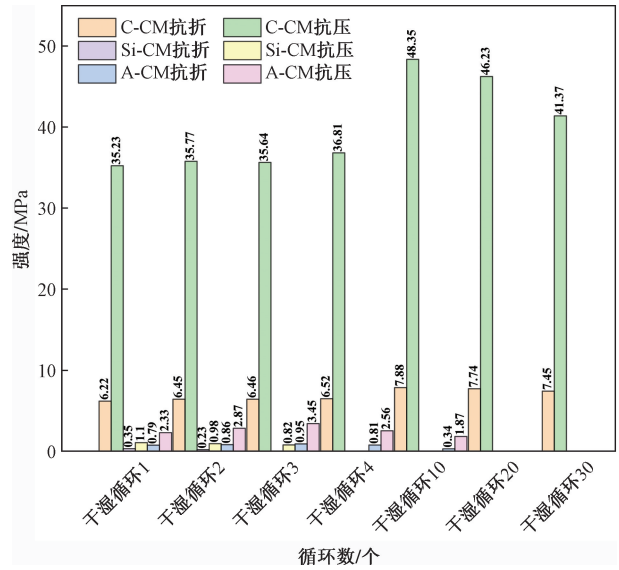


图4 各灌浆材料固砂体干湿循环下力学强度

Fig. 4 Mechanical strength of each grouting material for sand consolidation under dry wet cycles

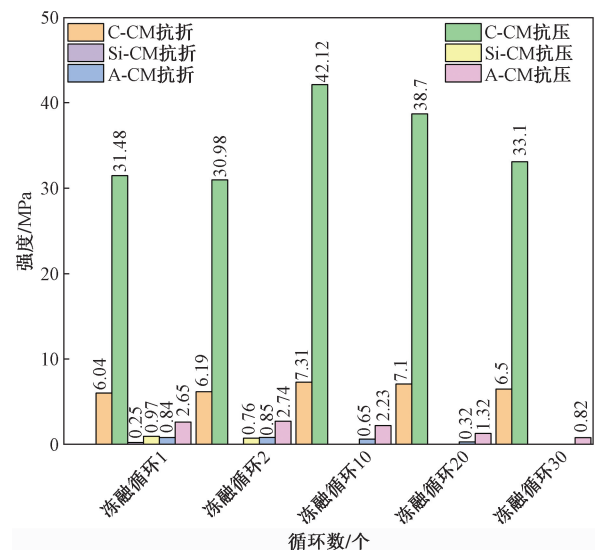


图5 各灌浆材料固砂体冻融循环下力学强度

Fig. 5 Mechanical strength of each grouting material for sand solidification under freeze-thaw cycles

后各固砂体渗透系数的测试结果可以看出,各灌浆材料灌入后均能降低模拟介质的渗透系数。对于 C-CM 材料,随着水灰比的增加,固砂体的渗透系数显著下降,且水灰比较低的组分前、中、后三段差异较大,这是由于水灰比较高的浆液不利于扩散,主要胶凝成分因为滤过作用留滞介质柱体前段,造成前后灌浆材料不均匀,渗透系数变化明显。对于黏度较低的 C-CM(2)、Si-CM 和 A-CM 材料,灌入模拟介质后,前、中、后三段渗透系数变化不明显,这也表明表面黏度较低的材料可灌性以及均匀性都较好。其中 A-CM 灌浆材料前、中、后三段渗透系数均为最低,防渗性能良好。

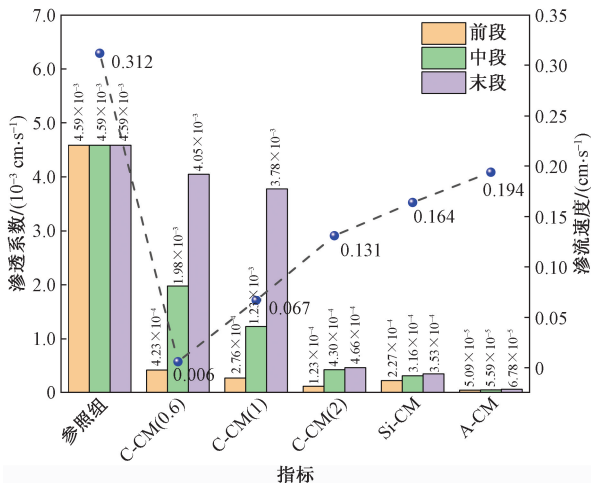


图6 灌浆模拟渗流速度及渗透系数结果  
Fig. 6 Results of grouting simulation seepage velocity and permeability coefficient

### 2.4 尾矿渣复配试验结果

表4结果显示,向C-CM材料中复配加入高岭土尾矿后(C-CM-K),根据添加高岭土尾矿的比例不同,强度均有所下降,且随着高岭土尾矿添加比例的增加,材料整体机械强度降低,这是由于胶凝材料被非胶凝组分所替换,材料的物理强度有所减小。添加高岭土尾矿后,材料的渗透系数显著下降,且与高岭土掺量呈反比,防渗性能提升,这是由于粒径较小的高岭土尾矿材料填充了材料内部孔隙,减小了有害孔的数量,提升了材料的防渗性能。

如表5所示,向Si-CM材料中加入高岭土尾矿后(Si-CM-K),材料的力学性能先增加后减少,这是由于高岭土尾矿的主要成分为二氧化硅,与Si-CM材料胶凝后主要成分一致,一定掺量范围内对材料胶凝固化起到了一定的支撑作用。随着高岭土掺量的增加,材料整体渗透系数下降,这与C-CM-K灌浆材料渗透系数变化趋势一致。

分别从C-CM-K和Si-CM-K材料中选取水泥:高岭土尾矿和调节剂:高岭土尾矿比例为1:1和5:3,表6显示了复配灌浆材料固砂体干湿循环和冻融循环条件下强度变化规律,与复配前相比,高岭土尾矿降低了C-CM材料在各循环中的强度,略微提

表4 C-CM-K复配灌浆材料基本性能

Table 4 Basic properties of C-CM-K composite grouting material

水泥:高岭土尾矿	1 d		3 d		渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度	
1:3	未测出	0.35	0.13	0.46	1.73 × 10 <sup>-7</sup>
1:2	0.13	0.49	0.22	0.75	2.69 × 10 <sup>-7</sup>
2:3	0.36	0.78	0.52	0.91	2.89 × 10 <sup>-7</sup>
1:1	0.82	1.12	0.98	2.25	5.12 × 10 <sup>-7</sup>

表5 Si-CM-K复配灌浆材料基本性能

Table 5 Basic properties of Si-CM-K composite grouting material

调节剂:高岭土尾矿	1 d		3 d		渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度	
10:1	未测出	0.24	0.11	0.46	3.58 × 10 <sup>-8</sup>
5:1	未测出	0.36	0.15	0.51	2.34 × 10 <sup>-8</sup>
5:2	未测出	0.38	0.15	0.52	2.15 × 10 <sup>-8</sup>
5:3	未测出	0.42	0.17	0.53	1.98 × 10 <sup>-8</sup>
5:4	未测出	0.40	0.14	0.50	1.91 × 10 <sup>-8</sup>

表6 复配灌浆材料固砂体耐久性试验结果

Table 6 Durability test results of composite grouting material for sand consolidation

循环名称	循环次数	C-CM-K(1:1)		Si-CM-K(5:3)	
		抗折	抗压	抗折	抗压
干湿循环	1	2.67	14.21	0.54	1.98
	2	3.19	14.61	0.43	1.38
	3	3.45	14.87	—	0.92
	4	3.80	14.89	—	0.84
	10	3.97	14.65	—	—
	20	3.32	14.14	—	—
冻融循环	30	2.14	13.34	—	—
	1	2.57	14.10	0.52	1.87
	2	2.78	14.83	—	1.16
	10	3.14	14.88	—	—
	20	2.86	14.37	—	—
	30	2.74	13.88	—	—

升了Si-CM材料的耐久强度,这与基本性能测试结果一致。虽然C-CM-K材料在加入高岭土尾矿后强度有所下降,但整体强度仍高于Si-CM-K材料,Si-CM-K分别在4个干湿循环和3个冻融循环后无法检出强度。

### 3 结论

通过对比3种灌浆材料的基本性能以及耐久度试验,并使用模拟介质进行模拟灌浆试验,最后使用高岭土尾矿对灌浆材料进行复配研究,得到以下结论。

(1)对于3种灌浆材料C-CM、Si-CM和A-CM,灌浆后固砂体强度从大到小依次为C-CM、A-CM和Si-CM,但Si-CM和A-CM的黏度较低,固砂体渗透系数更低。3种材料在干湿循环与冻融循环条件下Si-CM材料劣化更为明显,这表明在自然环境中Si-CM材料更易在环境中降解,且降解产物主要为二氧化硅,对环境较为友好。

(2)灌浆材料的黏度越高,可灌性越差。对于C-CM材料水灰比宜控制为2时渗透性较好,A-CM和Si-CM材料可灌性相对较好,更适合裂隙较小的矿区防渗。

(3)帷幕防渗材料中加入高岭土尾矿,一定程度上可提升固砂体强度和防渗性能,且增加了材料的前期耐久性。因此,采用 Si-CM 材料与高岭土尾矿复配体系能够有效提升材料部分性能,同时降低了材料使用成本,可为离子型稀土矿山防渗帷幕构筑技术提供新思路。

### 参 考 文 献

- [1] 施展华,朱健玲,程哲,等. 离子型稀土开采提取技术的现状与发展[J]. 世界有色金属, 2018(17): 48-50.  
Shi Zhanhua, Zhu Jianling, Cheng Zhe, et al. Present situation and development of extraction technology for ionic rare earth extraction[J]. World Nonferrous Metals, 2018(17): 48-50.
- [2] Li Z, Huang F, Yang Y, et al. Improving the anti-washout property of acrylate grouting material by bentonite: its characterization, improving mechanism, and practical application [J]. Polymers, 2023, 15(19): DOI:10.3390/polym15193865.
- [3] 邹国良,吴一丁,蔡嗣经. 资源环境保护视角下离子型稀土资源开采政策导向研究[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(2): 147-152.  
Zou Guoliang, Wu Yiding, Cai Sijing. Policy orientation of rare earth resources mining based on perspective of resources and environment protection [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2016, 7(2): 147-152.
- [4] 李超,舒荣波,程蓉,等. 不同深度离子型稀土矿连续浸出实验[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 78-82.  
Li Chao, Shu Rongbo, Cheng Rong, et al. Continuous leaching test of lon-type rare earth ore at different depths[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 78-82.
- [5] 郭钟群,唐韬,罗飞跃,等. 离子型稀土原地浸矿诱发污染物释放迁移及其影响因素探讨[J/OL]. (2024-05-24) [2024-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20240523.0954.002.html>.  
Guo Zhongqun, Tang Tao, Luo Feiyue et al. Analysis on the release and migration of pollutants induced by in-situ ionic rare earth leaching and its influencing factors[J/OL]. (2024-05-24) [2024-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20240523.0954.002.html>.
- [6] 舒荣波,程蓉,李超,等. 一种离子型稀土的渗流控制原位开采方法: CN201910337737.5[P]. 2024-06-28.  
Shu Rongbo, Cheng Rong, Li Chao, A *in-situ* extraction method for ion type rare earth through flow control: CN201910337737.5[P]. 2024-06-28.
- [7] 刘斌云. 水泥灌浆帷幕的耐久性分析[J]. 水利水电技术. 1998(6): 34-37.  
Liu Binyun, Durability analysis of cement grouting curtain[J]. Water Resources and Hydropower Engineering. 1998(6): 34-37.
- [8] 张迎威,姚直书,徐进,等. 新型灌浆材料超细水泥的发展现状[J]. 四川建材, 2016, 42(8): 8-16.  
Zhang Yingwei, Yao Zhishu, Xu Jin, et al. The development status of new grouting materials ultrafine cement [J]. Sichuan Building Materials, 2016, 42(8): 8-16.
- [9] El Tani M. Grouting rock fractures with cement grout [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 547-561.
- [10] 孙永明,华萍. 水玻璃化学灌浆材料的发展现状与展望[J]. 吉林水利, 2005(9): 13-22.  
Sun Yongming, Hua Ping. The development status and prospects of water glass chemical grouting materials [J]. Jilin Water Resources, 2005(9): 13-22.
- [11] 万志,张蕾,刘健,等. 改性水泥-水玻璃注浆材料防渗性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 277-282.  
Wan Zhi, Zhang Lei, Liu Jian, et al. Experimental investigation of anti-seepage performance of improved cement-silicate grouting material [J]. Coal Geology & Exploration. 2018, 18(19): 277-282.
- [12] 曾娟娟,李惠枝,韦代东,等. 矿用丙烯酸盐灌浆材料的制备与性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 22-29.  
Zeng Juanjuan, Li Huizhi, Wei Daidong, et al. Preparation and properties of acrylate grouting material used in coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 22-29.
- [13] 谭日陞. 丙烯酸盐化学灌浆材料的研究及其应用[J]. 岩土工程学报, 1991(6): 27-34.  
Tan Ribei. A study of acrylate chemical grouting material and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991(6): 27-34.
- [14] Chhun K T, Lee S H, Keo S A, et al. Effect of acrylate-cement grout on the unconfined compressive strength of silty sand [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23: 2495-2502.