

复合碱性缓释材料处理高浓度 SO_4^{2-} 酸性 矿山渗出水研究

何 叶

(核工业北京化工冶金研究院,北京 101149)

摘要:研究了用自合成的一种新型复合碱性缓释材料处理含高浓度 SO_4^{2-} 的铀矿山酸性渗出水(AMD)。先通过静态试验优选复合释碱材料,再利用静态条件试验和动态柱试验分析了该材料的释碱性能、物理稳定性,并考察了其对模拟 AMD 中 U(VI)、Mn 的去除效果。结果表明:针对 $\text{pH}=2.6$ 、 SO_4^{2-} 质量浓度为 2.7 g/L 的酸性溶液,该新型复合优选释碱材料具有良好的抗粉化能力和持续释碱性能;在动态柱试验中,当材料与溶液接触 40 min 时,出水 pH 可稳定提升至 $8\sim 9$,U 和 Mn 初始质量浓度分别为 1 和 2.9 mg/L 时,U 和 Mn 去除率分别为 69.8% 和 67.2% ;该材料在高浓度 SO_4^{2-} 酸侵蚀作用下具有长期抗粉化能力,适于在可渗透性反应墙(PRB)技术中作为缓释碱源。

关键词:酸性矿山渗出水(AMD);碱性缓释材料;硫酸盐;铀矿山;可渗透性反应墙(PRB)

中图分类号:X703;TF803.25;TL212

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)03-0441-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.020

在我国铀矿山退役治理中,对开采生产过程中产生的废石采用填埋和覆盖方式处置。但部分含硫的废石会与空气中的氧或渗入雨水中的溶解氧发生氧化反应。在特定环境条件下,即水、空气及细菌的共同作用下,该氧化反应会生成硫酸^[1]。而生成的硫酸具有溶解性,会进一步将废石中的铀及重金属离子溶解出来。在此过程中,未反应的 H^+ 与溶解出的铀及重金属离子会随着渗流出填埋场外,进而形成酸性矿山渗出水(Acid mine drainage,AMD)^[2-4]。AMD 的 pH 一般在 $2\sim 4$ 之间。国内的铀尾矿渗滤液中,铀质量浓度通常在 $0.4\sim 23\text{ mg/L}$ 之间^[5-6],重金属离子浓度差异较大,一般在几毫克/升至几百毫克/升之间^[7],部分重金属离子可达克/升。若这些酸性矿山渗出水得不到有效治理,易对周边水体和土壤等造成污染。

目前,国内针对 AMD 的治理主要采用碱性中和法^[8]。该法因具有成本低廉、适应性强等优点,在 AMD 治理实践中应用广泛。传统的碱性中和法是将生石灰、熟石灰等碱性物质直接投入 AMD 中,促使其发生中和反应。目前,该法在应

用中还存在一些局限:碱性物质投入后易瞬时释放,造成局部过碱^[9];外层易被反应形成的沉淀或絮状物包覆,阻隔内部碱源持续溶出,降低实际利用率^[9];对高浓度重金属废水处理效率欠佳^[10];中和反应后产生的大量污泥处理难度大,极易对环境造成二次污染^[10]。在国外 AMD 的治理技术体系中,可渗透性反应墙(Permeable reactive barriers,PRB)技术相对成熟。该技术是在被污染地下水的流动路径上,设置一个填充了活性反应介质的被动反应区,而当污染物(如重金属离子、超标阴离子等)流经该反应区时,会与反应介质发生物理、化学或生物等作用,进而被吸附、沉淀或降解去除,最终使流经反应区的出水能够达标排放,实现污染水净化目的^[11]。PRB 技术具有诸多优势,能实现可持续原位处理,可处理的污染物组分多样,且价格相对低廉,对当地环境的影响较小。在应用 PRB 技术治理 AMD 时,其反应区中填充的活性反应介质中包含碱性缓释材料。由于 pH 的提升能够有效降低大部分金属离子浓度^[7],因此通过碱性缓释材料被动提升 pH ,并与其他活性材料协同发挥去污作用,可使各部分反

收稿日期:2026-01-29;修订日期:2026-04-02

作者简介:何叶(1994—),女,硕士,工程师,主要研究方向为辐射防护和环境保护。

应介质得到充分利用,这有利于提升该技术在工程应用中的经济性、适用性和安全性。

碱性缓释材料在传统 AMD 处理方式和 PRB 技术应用中都能发挥至关重要的作用。目前,针对该材料的研究呈现多个方向,既有面向受有机物污染地下水修复的缓释材料体系研究,以及对该体系与原位化学氧化/微生物修复结合的应用探索;也有针对地下水中重金属去除,研发的以煅烧菱镁矿为基础的低溶解度高反应性 MgO 类碱性反应材料,及其用于 PRB 长期缓释碱度与金属去除;还有利用制浆造纸过程产生的碱性残渣和粗砂作为 PRB 碱性反应介质,实现酸性矿山废水中 Cu 与 SO_4^{2-} 高效去除的研究。但目前针对处理含高浓度 SO_4^{2-} 复杂体系的铀矿山 AMD 的碱性缓释材料研究相对较少。因此,试验研发了一种碱性缓释材料并用于处理含高浓度 SO_4^{2-} 复杂体系的铀矿山 AMD,旨在避免材料瞬时释放、防止局部过碱引发材料板结,同时确保材料在高浓度 SO_4^{2-} 环境下能够保持一定强度且不易粉化。

1 试验部分

1.1 原料、试剂及设备仪器

原料:某铀矿山 AMD, $\text{pH}=2.6$, 主要化学污染成分见表 1。其中 SO_4^{2-} 、Mn、U 影响较大,试验以该污染物为主要成分配制模拟水样,并用于后续研究。

表 1 某铀矿山 AMD 的主要化学污染成分

Table 1 Main chemical pollutants of AMD in a uranium mine

mg/L				
SO_4^{2-} *	Mn	U	Zn	Cu
2.77	2.90	1.06	5.62	1.66

*. 单位为 g/L。

复合碱性缓释材料:由钙基碱性化合物与硅铝酸盐胶凝材料协同作用形成的球体,具有一定强度,不溶于水, $\phi=2.5$ cm, 质地较为密实,呈均匀的多孔构造,主要由凝胶孔与毛细孔构成,产物主要成分为水化硅酸钙(C-S-H)凝胶与氢氧化钙共存,堆积密度为 0.915 g/cm³。

试验试剂:硫酸钠(AR);氯化锰(AR);U 标准溶液(碳酸铀酰, U(VI) 质量浓度为 20 g/L); HCl 标准溶液(20%); H_2SO_4 标准溶液(20%)。

试验仪器及设备:恒温培养摇床, YC-R50, 天

津市泰斯特仪器有限公司;电子天平, ME204, METTLER TOLEDO;多参数分析仪, DZS-706F-A, 仪电科学仪器股份有限公司;蠕动泵, BT100L-CE, 保定雷弗流体科技有限公司。

1.2 试验水样配制

静态试验水样:用电子天平准确称取一定量硫酸钠,加入适量去离子水和 H_2SO_4 标准溶液,配制成 $\text{pH}=2.6$ 、 SO_4^{2-} 质量浓度为 2.7 g/L 的酸性溶液,记为 S-0 水样。

动态试验水样:1)某铀矿山 AMD 的模拟水样。用电子天平准确称取一定量硫酸钠、氯化锰,加入适量去离子水、U 标准溶液和 H_2SO_4 标准溶液,配制成 $\text{pH}=2.6$ 、U(VI) 质量浓度为 1 mg/L、 Mn^{2+} 质量浓度为 2.9 mg/L、 SO_4^{2-} 质量浓度为 2.7 g/L 的 AMD 模拟溶液,记为 F-1[#] 水样;2)对照组试验水样。取适量去离子水加入 HCl 标准溶液,调节 pH 至 2.6 ,记为 F-2[#] 水样。

1.3 试验原理

自合成的新型复合释碱材料在酸性环境中不易板结、能持续稳定释放碱性物质,中和酸性水中的 H^+ ,避免直接加入碱性物质时造成局部过碱而导致实际利用率过低。主要反应方程式:

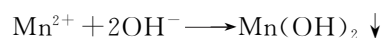
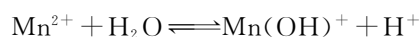
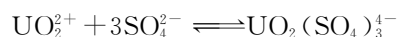


根据反应方程式中 H^+ 的中和量,计算出 OH^- 消耗量,即碱性释放量 Q ,并在此基础上计算碱性物质释放率 q ,计算公式如下:

$$q = \frac{Q}{m} \times 100\%$$

式中: q —碱性物质释放率,%; Q —碱性释放量, mol/L; m —外加碱源总量, mol/L。

试验主要考察在高浓度 SO_4^{2-} 及含 U(VI)、 Mn^{2+} 的模拟 AMD 中,该材料对提升 pH 的影响,进而通过提升 pH 形成沉淀,达到去除或降低 SO_4^{2-} 的目的。 SO_4^{2-} 、U(VI) 和 Mn 通过 pH 提升可分别形成配合物或沉淀物,反应式如下:



1.4 试验方法

1.4.1 复合释碱材料的筛选及静态试验设计

处理含高浓度 SO_4^{2-} 的酸性溶液时,所用材料需具备一定的物理稳定性,主要包括材料本身是否

易碎,以及在强酸性溶液中的粉化程度等。基于此要求,对材料试件进行筛选,剔除明显不符合条件的试件,最终获得 7 种不同配比且符合要求的材料试件。为获得最佳配比的优选释碱材料,通过静态试验来考察这些材料的释碱性能及物理稳定性。具体操作步骤为:分别称取 1[#]~7[#] 材料试件各 5 g,置于锥形瓶中;之后向每个锥形瓶中加入 200 mL S-0 水样;再将装有试件和水样的锥形瓶置于温度为 25 ℃、转速为 150 r/min 的恒温振荡器中,每隔 1 h 测定并记录溶液 pH;然后再重新向每个锥形瓶中加入等量的 S-0 水样,重复上述测定和记录步骤。

1.4.2 静态条件试验设计

对优选复合释碱材料进行静态条件试验,确定该材料在酸性溶液中应用时的最佳固液质量体积比和接触时间。具体操作步骤为:取一定量该材料 4 份,分别置于 4 个锥形瓶中,加入适量 S-0 水样,调节固液质量体积比分别为 10/1、15/1、20/1、25/1(g/L);将 4 个锥形瓶分别置于 25 ℃、150 r/min 的恒温振荡器中,每隔10 min取样并记录溶液 pH。

1.4.3 动态柱试验设计

通过动态柱试验考察该复合释碱材料提升 pH 的长期性能及其对 AMD 中金属离子的处理效果。动态柱试验分为试验组和对照组。2 组装置设备仪器及连接方式均相同,如图 1 所示。反应容器为内壁 $\phi=5.5$ cm、 $h=20$ cm 的有机玻璃柱,释碱材料的填充高度均为 10 cm,材料粒径 $\phi=2.5$ cm。试验首先测算孔隙度,再根据孔隙度设定蠕动泵速度,使其接触时间为 40 min,排出柱内空气后开启蠕动泵,定时取样,选择测定水样中 U、Mn 浓度。1[#] 试验组装置,用于考察针对含高浓度 SO_4^{2-} 、U(VI)和 Mn^{2+} 的 AMD,释碱材料提升 pH 的效果;2[#] 对照组装置,用于考察无 SO_4^{2-} 和其他离子干扰时,释碱材料提升 pH 的效果。

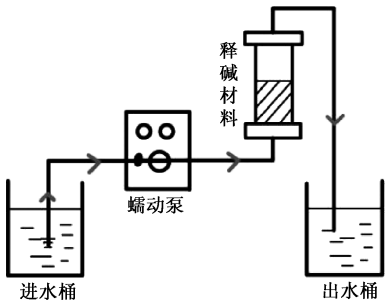


图 1 动态柱试验装置示意
Fig.1 Schematic diagram of column test device

2 试验结果与讨论

2.1 静态试验结果与分析

7 种不同碱源配比的材料试件参数见表 2。针对初始 pH=2.6、含高浓度 SO_4^{2-} (2.7 g/L) 的酸性溶液,7 种材料试件提升溶液 pH 的性能对比如图 2 所示。

表 2 7 种不同碱源配比的材料试件参数
Table 2 Parameters of material specimens with different-proportions material of 7 types of alkali sources

材料试件编号	碱源占比/%	碱性物质释放率/%
1 [#]	30	24.26
2 [#]	40	27.42
3 [#]	50	19.00
4 [#]	60	13.32
5 [#]	70	13.09
6 [#]	80	12.39
7 [#]	90	16.00

由表 2 可知,碱源占比较低的 1[#]、2[#]、3[#] 和占比最高的 7[#] 材料试件的碱性物质释放率较好,其中 2[#] 的碱性物质释放率最高;而碱源占比较高的 4[#]、5[#]、6[#] 材料试件的碱性物质释放率相对较低。这与合成材料的特性相关,碱源占比较低时,胶凝材料占比相对较高,其水化形成的 C—S—H 凝胶结构致密^[12],能将碱源颗粒有效包裹,形成物理屏障,显著减缓内部 OH^- 扩散与外部 H^+ 的渗透,从而实现缓慢、可控的释放。

试验中发现,7[#] 材料试件的粉化程度较严重,因碱源占比更高时,胶凝材料相对不足,导致结构疏松,酸性溶液更易快速渗入,使碱源迅速释放;而与 1[#]~3[#] 碱源占比较低的试件相比,7[#] 的碱性物质释放率偏低,这是由于碱源的快速渗出量大,造成局部过碱,表面生成的沉淀物会迅速堵塞孔隙通道,使碱源被“封存”而无法有效利用,且在实际应用中粉化严重易造成反应系统堵塞。综上,7[#] 不符合碱性缓释的要求。

由表 2 和图 2 可知:4[#]、5[#] 和 7[#] 材料试件持续提升 pH 的性能更佳;同时,5[#] 材料试件轻度粉化,7[#] 材料试件存在严重粉化现象,这是其碱性物质释放率和 pH 提升效果较好的直接原因。综上,由于 2[#] 材料试件的碱源占比低于 4[#],在接触时间、固液质量体积比等条件

均相同条件下,4[#]材料试件持续提升 pH 的性能明显优于 2[#]。综合考虑无粉化现象、碱源占比、持续提升 pH 性能,确定选择 4[#]材料试件进行静态条件试验,进一步优化固液质量体积比和接触时间。

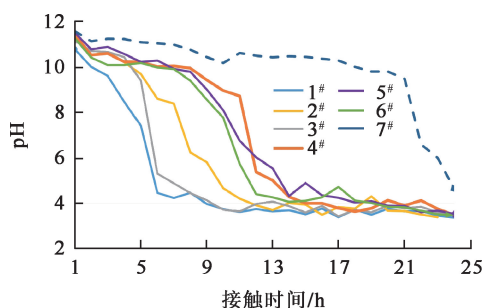


图 2 不同配比的材料试件提升 pH 的性能对比

Fig. 2 Performance comparison of different-proportions material in terms of pH increase capability

2.2 条件试验

在初始 pH=2.6、温度 25 ℃、转速 150 r/min 恒温振荡条件下,不同固液质量体积比和接触时间对 pH 提升的影响如图 3 所示。可以看出:在接触 15 min 后,不同固液质量体积比下的溶液 pH 均开始快速上升,且固液质量体积比越大,达到相同 pH 提升效果所需的时间越短,反应越快。接触时间在 50 min 内,不同固液质量体积比下的 pH 均能提升至 7 以上,其中,固液质量体积比为 25 g/L 时,30 min 内即可使酸性溶液达到中性水平。因此,试验制备的释碱材料可通过提高固液质量体积比、减少接触时间,提高 AMD 处理效率,也可适当降低固液质量体积比、延长接触时间,满足经济适用性。

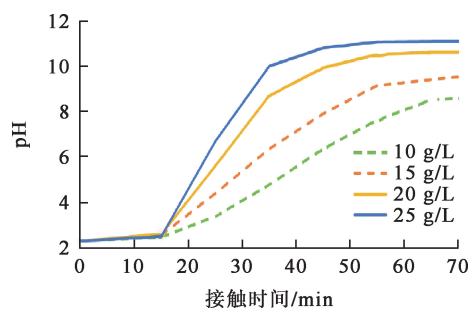


图 3 不同固液质量体积比和接触时间对 pH 提升的影响

Fig. 3 Effect of different solid mass to liquid volume ratios and reaction times on increase of pH

2.3 动态柱试验结果与分析

针对模拟 AMD 溶液进行两组柱试验:一组是初始 pH=2.6,且溶液中 U(VI) 质量浓度为 1 mg/L、Mn²⁺ 质量浓度为 2.9 mg/L、SO₄²⁻ 质量浓度为 2.7 g/L、接触时间为 40 min 的柱试验;另一组是初始 pH=2.6 的对照柱试验。两组柱试验中释碱材料提升 pH 的结果对比如图 4 所示,U、Mn 出水质量浓度随床体积的变化情况如图 5 所示。

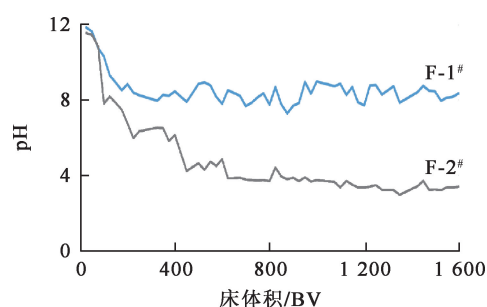


图 4 两组柱试验中释碱材料提升 pH 的结果对比

Fig. 4 Comparison of results of increasing pH by alkaline slow-release material in two groups of column tests

试验中发现,经 1 600 个床体积(BV)后,释碱材料的外观完整,未见明显粉化现象,物理稳定性良好。由图 4 看出,释碱材料与酸性水反应提升 pH 的过程中存在波动,这可能与材料本身特性有关。综合分析推断,在含 SO₄²⁻ 的酸性溶液中,释碱材料近表面先发生反应,当表面反应点位减少,pH 随接触时间延长呈先上升后下降趋势;SO₄²⁻ 具有侵蚀作用,当硫酸盐逐渐侵入内部时会生成石膏(CaSO₄ · 2H₂O)和钙矾石(Aft, Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂ · 26H₂O),二者的形成在材料内部会产生较大的结晶压力,导致微观结构膨胀开裂、剥落^[13],从而新的反应表层出现;随反应时间延长,SO₄²⁻ 侵蚀作用缓慢发生,不断形成新的孔隙或通道,侵蚀作用持续进行,使合成材料具有良好的持续释碱功能,达到缓慢释放碱性物质目的,从而使 pH 出现小幅上升。

由图 4 还可看出,该释碱材料对 F-1[#] 水样(含 SO₄²⁻) pH 的提升效果优于 F-2[#] 水样(无 SO₄²⁻)。这是因为 F-2[#] 水样中没有 SO₄²⁻,释碱材料表层易生成 CaCO₃,而 CaCO₃ 的 K_{sp} 比 CaSO₄ 的 K_{sp} 小,更不易溶于水,且纯酸溶液对释碱材料的侵蚀比硫酸盐弱,表层更易发生钝化,因

此 F-1[#] 的反应条件优于 F-2[#], 更利于释碱材料缓慢释放碱性物质。

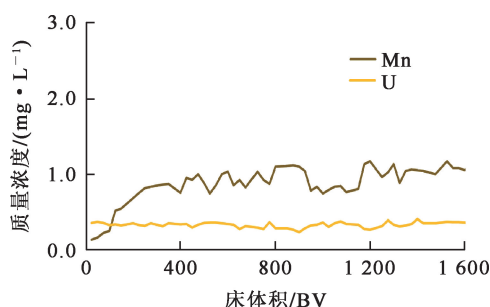


图 5 柱试验中 Mn、U 出水质量浓度随床体积数的变化

Fig. 5 Effluent concentrations of Mn and U in column test changed with bed volume

结合图 4、5 看出:U、Mn 出水质量浓度随 pH 波动而发生变化,pH 基本稳定在 8~9 范围内,此时 Mn 出水平均去除率降至 69.8%左右,Mn 出水质量浓度均低于 2 mg/L,符合《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)的排放标准要求;pH 在 8~9 范围内,Mn 以 Mn^{2+} 、 MnOH^+ 及 $\text{Mn}(\text{OH})_2$ 形式存在,而 Mn 完全沉淀时,则需 pH 高于 10^[9],这表明仅依据当前 pH 条件,并不符合 Mn 完全沉淀的排放标准要求;出水中 U 平均去除率约 67.2%,U 在高浓度 SO_4^{2-} 溶液中主要以 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$ 形式存在,此外还有一些 U(VI)的水解聚合物,因 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$ 配离子的稳定常数 $k_{\text{稳}}$ 较低^[14],其稳定性较差,而 U 的去除与溶液 pH 的提升密切相关,当 pH>8 时,部分配合物会被破坏,因此要完全去除 U,还应辅以其他方式,如共沉淀或其他配合方式^[15]。

综上所述,释碱材料作为 PRB 技术处理 AMD 的活性组分之一,用于前端提升 pH,可极大地减少后续完全去除 U 和 Mn 的其他活性材料用量。

2.4 XRD 分析结果

图 6 为柱试验反应前、后释碱材料表面的 XRD 图谱对比。可以看出:反应前、后特征峰衍射角明显发生了变化,反应前释碱材料的主要成分以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为主,由于 SO_4^{2-} 的侵蚀反应生成了钙矾石、石膏等侵蚀产物,从而引起体积膨胀和内部应力增加,加速材料微观表层的剥落更新,这与图 4 的 pH 波动变化相关联;反应前、后材料表面均未发现 U、Mn 的结晶相,说明材料作为缓释

碱源仅提供碱性物质,使 U、Mn 形成配合物或沉淀物,不会在材料表面生成放射性固体废物。

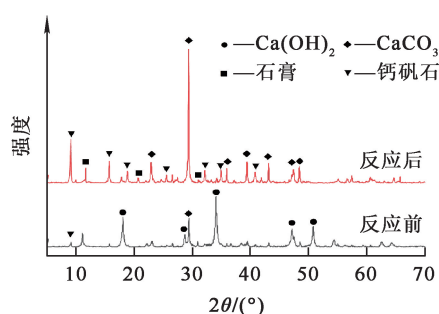


图 6 柱试验反应前、后释碱材料表面的 XRD 图谱对比

Fig. 6 Comparison of XRD spectra of surface of alkaline slow-release material before and after column test reaction

3 结论

由钙基碱性化合物与硅酸盐胶凝材料自合成了一种新型复合碱性缓释材料,并研究了将其用于处理含高浓度 SO_4^{2-} 的铀矿山酸性渗出水 (AMD) 的效果。首先通过静态试验筛选出优选释碱材料,之后利用静态条件试验和动态柱试验分析了该材料的释碱性能、物理稳定性,并考察了该材料对模拟 AMD 中 U(VI)、Mn 的去除效果。结论如下:

1) 碱源占比为 60% 的 4[#] 释碱材料试件成型性好、物理结构稳定,在含高浓度 SO_4^{2-} 的酸性环境中不易粉化,能满足长期使用要求。静态条件试验结果表明,增大固液质量体积比可缩短接触时间,在固液质量体积比为 25 g/1 L 条件下,30 min 内即可将酸性溶液 pH 提升至 7,使溶液转为中性。

2) 动态柱试验中,材料能持续将含高浓度 SO_4^{2-} 、U(VI)、Mn 等离子体的模拟 AMD 的出水 pH 稳定在 8~9,此时, Mn^{2+} 和 U(VI) 的平均去除率分别达 69.8% 和 67.2%;该释碱材料在模拟 AMD 中持续释碱性能主要源于高浓度 SO_4^{2-} 的侵蚀作用,钙矾石、石膏等侵蚀产物的生成,使材料内部产生结晶压力,导致材料微观结构开裂、剥落,从而不断暴露出新的碱源反应界面,实现碱性物质的持续可控释放;U(VI) 在高浓度 SO_4^{2-} 环境中以 U 的多羟基配合物、硫酸配合物为主,Mn 的去除则主要通过生成 MnOH^+ 、 $\text{Mn}(\text{OH})_2$ 等实现,在 pH=8~9 时,二者完全去除还需辅以其他方式。

3)XRD 分析结果表明,该释碱材料反应后,其表面生成了钙矾石、石膏和碳酸钙等产物,未发现 U、Mn 的结晶相,说明材料本身主要作为碱源,不固定放射性核素,适于在 PRB 技术中作为前置缓释碱源,以减少后续处理单元负荷。

该研究在实验室规模验证了材料性能,但实际 AMD 组分更为复杂,多种离子共存可能对处理效果产生影响,后续研究应开展实际水体验证、中试试验,并探索该材料与其他功能介质(如吸附剂、还原剂)联用的集成工艺。

参考文献:

- [1] 贺俊,赵强,杨建强,等. 陕南硫铁矿矿山酸性水形成机理及治理方法探究:以西乡五里坝硫铁矿为例[J]. 西北地质, 2025,58(1):219-230.
HE Jun, ZHAO Qiang, YANG Jianqiang, et al. Formation mechanism of acid water and treatment method in pyrite mine: example from Wuliba Pyrite Mine in Xixiang, Southern Shaanxi [J]. Northwestern Geology, 2025,58(1):219-230.
- [2] 邱文杰,杜卓然,尹子悦,等. 酸性矿山废水形成过程:来自反运移模拟与同位素的启示[J]. 高校地质学报, 2025,31(1):1-13.
QIU Wenjie, DU Zhuoran, YIN Ziyue, et al. The generation of acid mine drainage: insights from reactive transport modeling and stable isotope [J]. Geological Journal of China Universities, 2025,31(1):1-13.
- [3] 梁刚. 有色金属矿山废水的危害及治理技术[J]. 金属矿山, 2010(12):158-161.
LIANG Gang. Harms and treatment techniques of nonferrous metal mining wastewater [J]. Metal Mine, 2010(12):158-161.
- [4] ACHARYA B S, KHAREL G. Acid mine drainage from coal mining in the United States: an overview [J]. Journal of Hydrology, 2020,588(1):125061.
- [5] 陈宏亮,彭洪娇,刘亚洁,等. 不同来源 SRB 菌株在铀矿山污染地下水中脱硫及固铀效果差异性研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(5):154-162.
CHEN Hongliang, PENG Hongjiao, LIU Yajie, et al. Study on the differences in sulfate reduction and uranium immobilization effects of SRB strains from different sources in uranium mine groundwater [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(5):154-162.
- [6] 张志和,杨智兴,刘峙嵘. 某退役铀矿山酸性渗出水治理技术及工程研究[J]. 铀矿冶, 2021,40(4):327-331.
ZHANG Zhihe, YANG Zhixing, LIU Zhirong. Treatment technology and engineering of acid seepage water in a decommissioned uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021,40(4):327-331.
- [7] 李嘉怡. 酸性矿山废水中有价金属的分离及铁尾矿制备吸附材料的研究[D]. 广州:广东工业大学, 2025.
- [8] 白润才,李彬,李三川,等. 矿山酸性废水处理技术现状及进展[J]. 长江科学院院报, 2015,32(2):14-19.
BAI Runcai, LI Bin, LI Sanchuan, et al. Development and status of the treatment technology for acid mine drainage [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(2):14-19.
- [9] 徐卫娟,陈俊,张景,等. 分级中和处理高锰酸性矿山废水的试验研究[J]. 现代矿业, 2025,41(10):158-162.
XU Weijuan, CHEN Jun, ZHANG Jing, et al. Experimental study on segmented neutralization treatment of acid mine drainage with high concentration of manganese [J]. Modern Mining, 2025,41(10):158-162.
- [10] 牛政,贺铝,肖伟,等. 酸性矿山废水处理组合工艺的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2021,39(9):188-190.
NIU Zheng, HE Lü, XIAO Wei, et al. Research progress of combined process for acid mine drainage treatment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021,39(9):188-190.
- [11] 蒙萍,李江,李琪航,等. 铀矿开采及铀污染地下水修复技术研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(10):39-52.
MENG Ping, LI Jiang, LI Qihang, et al. Progress on uranium mining and remediation technologies of uranium-contaminated groundwater [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(10):39-52.
- [12] 韩松,崔叶富,郑玉飞,等. 低水胶比水泥浆体的力学性能与水泥石微结构[J]. 硅酸盐学报, 2019,47(2):153-160.
HAN Song, CUI Yefu, ZHENG Yufei, et al. Mechanical properties and pore-structure of hardened cement paste with low water-binder ratio [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019,47(2):153-160.
- [13] 张玉栋,张佳帅,黄玉鸿,等. 硫酸盐侵蚀下再生混凝土耐久性能及微观结构研究[J]. 混凝土, 2025(12):31-38.
ZHANG Yudong, ZHANG Jiashuai, HUANG Yuhong, et al. Study on durability and microstructure of recycled concrete under sulfate attack [J]. Concrete, 2025(12):31-38.
- [14] VERCOUTER T, VITRORGE P, AMEKRAZ B, et al. Stoichiometries and thermodynamic stabilities for aqueous sulfate complexes of U(VI) [J]. Inorganic Chemistry, 2008, 47(6):2180-2189.
- [15] 周函,张辉,杨迎春,等. 低浓度含铀废水处理技术研究进展[J]. 黄金, 2024,45(1):99-106.
ZHOU Han, ZHANG Hui, YANG Yingchun, et al. Research progress on treatment technologies for low-concentration uranium-containing wastewater [J]. Gold, 2024, 45(1):99-106.

Treatment of Acid Mine Drainage with High Concentration of SO_4^{2-} Using a Composite Alkaline Slow-Release Material

HE Ye

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: A self-synthesized novel composite alkaline slow-release material was studied for the treatment of uranium mine acid mine drainage (AMD) containing high concentrations of SO_4^{2-} . Static tests were first conducted to screen for an optimal composite alkali-releasing material. Subsequently, static condition tests and dynamic column experiments were carried out to evaluate the alkali-release performance, physical stability, and the removal efficiency of U(VI) and Mn from simulated AMD. The results show that for an acidic solution with pH 2.6 and SO_4^{2-} mass concentration of 2.7 g/L, the optimal composite alkali-releasing material exhibits good resistance to pulverization and sustained alkali-release performance. In the dynamic column experiment, when the material contacted the solution for 40 minutes, the effluent pH can be stably raised to 8–9. With initial mass concentrations of U and Mn at 1 mg/L and 2.9 mg/L, respectively, the removal rates of U and Mn are 69.8% and 67.2%, respectively. The material demonstrates long-term resistance to pulverization under the erosion of high-concentration SO_4^{2-} acid, making it suitable for use as a slow-release alkali source in Permeable reactive barrier (PRB) technology.

Key words: Acid mine drainage (AMD); alkaline slow-release material; sulfate; uranium mine; Permeable reactive barrier (PRB)