

文章编号:1007-9629(2024)01-0009-07

矿化微生物对赤泥碱激发胶凝材料性能的增强研究

张兴武¹, 刘 鹏^{1,*}, 程 钰²

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 山东科技大学 交通学院, 山东 青岛 266510)

摘要:通过微生物矿化技术提升赤泥的碱激发反应,研究了矿化微生物用量、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 用量和尿素浓度对赤泥碱激发胶凝材料强度的影响;通过扫描电镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)等分析了矿化微生物作用下碱激发胶凝材料的物相变化与微观形貌,并对矿化微生物改性赤泥碱激发胶凝材料机理进行分析.结果表明:微生物矿化作用可以促进赤泥的碱激发反应,生成更多的胶凝物质,增加体系密实度,从而提高赤泥碱激发胶凝材料的强度;赤泥碱激发胶凝材料的强度随矿化微生物用量、尿素浓度及养护龄期的增加而增大;当加入 1.5 mol/L 尿素和 75 mL 矿化微生物时,赤泥强度增加最为显著,相较仅加入等量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的工况,提升幅度可达 85.7%;与此同时,微生物矿化作用还显著加快了胶凝材料强度的增长速率,有利于胶凝材料早期强度的形成.

关键词:赤泥;碱激发;微生物矿化;道路工程;微观结构

中图分类号:TU525

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.01.002

Enhancement of Properties of Alkali-Activated Red Mud Based Cementitious Materials by Mineralizing Microbe

ZHANG Xingwu¹, LIU Peng^{1,*}, CHENG Yu²

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. School of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: It was proposed to improve the alkali-activated reaction of red mud through microbial mineralization technology, and the effects of mineralizing microbe amount, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content and urea concentration on the strength of red mud-activated cementitious materials was investigated. The change of material composition and microscopic morphology of alkali-activated cementitious material under the action of mineralizing microbe were also analyzed by means of scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD), and the mechanism of cementitious material modified by mineralizing microbe was obtained. The results show that microbial mineralization can promote the alkali-activated reaction of red mud to produce more cementitious material and increase the system compactness, thus the strength of red mud-activated cementitious materials is improved. And the strength can increase with increasing the mineralizing microbe amount, the urea concentration, and the curing age. When 1.5 mol/L urea and 75 mL mineralizing microbe after centrifugation are added, the strength of red mud increases most significantly. Compared to the sample with only calcium hydroxide added, the increase in strength can reach 85.7%. At the same time, the formation of cementitious materials is significantly accelerated by microbial mineralization, which is conducive to the formation of early strength of cementitious materials.

Key words: red mud; alkali-activated; microbial mineralization; road engineering; microstructure

收稿日期:2023-01-30; 修订日期:2023-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809139)

第一作者:张兴武(1997—),男,江苏徐州人,南京林业大学硕士生. E-mail:1358927223@qq.com

通讯作者:刘 鹏(1985—),男,山东青岛人,南京林业大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:liupengreal@sina.com

中国作为氧化铝生产大国,赤泥堆存量和产量巨大.据估算,当前中国赤泥堆存量约6亿t,年新生产量在7 000万t以上^[1-2].赤泥中含有大量铝硅酸盐物质,符合碱激发反应条件.许多研究者通过碱激发手段,制备出赤泥基碱激发胶凝材料^[5-10].薛生国等^[11]阐明了赤泥基碱激发胶凝材料的理论基础,分析了其应用在路用工程中所存在的主要问题和环境风险.安强等^[12]利用NaOH和Na₂SiO₃溶液作为碱激发剂,制备了碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料.张鹏^[13]确定了赤泥基碱激发胶凝材料的基本配比,并在此基础上研究了不同养护制度下赤泥基碱激发胶凝材料的性能及反应产物.尽管目前取得了一定进展,但碱激发胶凝材料在使用中仍存在以下不足:一方面碱激发剂参与反应生成新的物质,造成激发剂大量快速失效,活性离子大量减少;另一方面,新生成的物质有可能附着在矿物表面,堵塞活性离子反应通道,使反应速率显著下降或无法进行.

随着微生物学与工程科学的相互促进,生物技术已经与土木工程、环境工程快速融合,微生物矿化技术应运而生.该技术在各领域有着广泛的应用^[14-16].鉴于此,本文利用微生物矿化技术来增强碱激发反应,并采用赤泥制备胶凝材料.相较之前研究

中采用的蒸汽养护、加大激发碱用量和增大比表面积等方法,利用微生物矿化作用促进赤泥的碱激发反应更加生态、低碳,并可以达到减少强碱用量的目的,兼具经济和环境效益.

1 试验

1.1 赤泥的基本特性

试验用赤泥取自中国铝业山东分公司的固体废弃物堆场,其化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比)见表1.

表1 赤泥的化学组成
Table 1 Chemical composition (by mass) of red mud
Unit: %

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Other
28.11	28.46	22.17	10.34	2.62	1.65	0.14	0.25	6.26

在氧化铝生产过程中,铝土矿需要经过破碎、湿磨和碱浸溶出等流程,因此残留的赤泥颗粒具有粒径细小且均匀、含水量大、含碱量高和力学性质差等特性.赤泥的颗粒级配曲线和主要物理指标如图1和表2所示.由图1可以看出,赤泥粒径较细,平均粒径为10 μm, D₉₀为30 μm.

表2 赤泥的主要物理指标
Table 2 Main physical indicators of red mud

Liquid limit/%	Plastic limit/%	Plasticity index/%	Dry density/(g·cm ⁻³)	Specific gravity	Void ratio	pH value
43.8	29.2	14.6	0.71	2.79	2.93	12.2

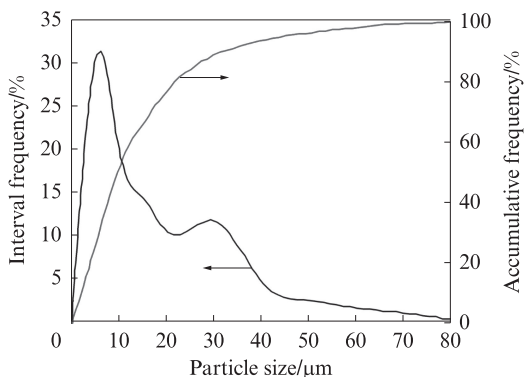


图1 赤泥的颗粒级配
Fig. 1 Particle gradation of red mud

1.2 矿化微生物的制备及试验方案

矿化微生物为巴氏芽孢杆菌(*sporosarcina pasteurii*),购于德国菌种保藏中心(DSMZ),编号为DMS33.培养该菌种所用营养液的配合比如表3所示.其中尿素和氯化钠均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司;大豆蛋白胨和胰蛋白胨购自英国Oxoid公司.

表3 营养液的配合比
Table 3 Mix proportion of nutrient solution

V(deionized water)/mL	m(urea)/g	m(NaCl)/g	m(soy peptone)/g	m(tryptone)/g
1 000	20	5	5	15

试验用巴氏芽孢杆菌为菌泥形态,具体制备步骤为:①将配置好的营养液pH值调至7.3,置于高压灭菌锅中,在121℃下进行高温灭菌;②将巴氏芽孢杆菌菌种与营养液按体积比1:8,接种至400 mL营养液中;③将接种好的菌液放入恒温震荡培养箱中,在30℃、120 r/min条件下培养20 h,此时其吸光值(OD₆₀₀)可以达到2.0左右,使用电导率仪对巴氏芽孢杆菌生成的脲酶活性进行检测;④将培养好的菌液置于高速离心机中,以4 000 r/min的转速离心20 min后,将离心管取出,除去离心管中的上层清液,即可获得离心管底部的菌泥.

试验用碱激发剂为Ca(OH)₂,购自国药集团化学试剂有限公司,拥有良好的碱激发效果.具体试验方案如表4所示.

表4 试验方案
Table 4 Testing program

Influencing factor	Value
$w(\text{Ca}(\text{OH})_2)/\%$	0, 5, 10, 15
Urea concentration/(mol·L ⁻¹)	0, 0.5, 1.0, 1.5
Mineralizing microbe amount/mL	25.0, 32.5, 50.0, 75.0, 100.0

1.3 制样方法及测试内容

所有赤泥试样均采用拌和法进行制备,步骤如下:
①将赤泥放入烘箱中,在105℃下烘24 h,取出后粉碎过2 mm筛。②取内径为30 mm、高为90 mm的塑料模具,在其内壁均匀涂上凡士林。③在过筛后的赤泥中掺入质量分数为0%、5%、10%和15%的Ca(OH)₂,搅拌均匀。④取尿素固体粉末按0、0.5、1.0、1.5 mol/L的浓度,加入配置好的营养液中制成混合溶液,冷藏备用。⑤将扩大培养的菌液离心、沉淀后,用移液管吸去上清液,留下离心管底部的菌泥,用配置好的混合溶液将其冲散摇匀,即摇即用。⑥按设计水灰比0.3,将摇匀的混合溶液加入赤泥中,充分拌和均匀;先取塑料模具,倒入1/3左右拌和均匀的赤泥,然后插捣密实;对其表面进行刮毛,防止分层,重复上述操作,直至将模具填至设计高度。⑦将制备好的赤泥试样置于养护箱((30±2)℃、相对湿度(RH)≥95%)中养护至设计龄期。

试样养护结束后,对其进行无侧限抗压强度(f_{uc})、pH值和超声波波速(v)测试,并选取部分代表试样进行X射线衍射仪(XRD)和扫描电镜(SEM)试验等,以分析其微观特征。

2 结果及分析

2.1 微生物矿化对碱激发赤泥反应的影响

图2为赤泥试样在不同工况下的无侧限抗压强度(f_{uc}),其中 f_{UMA} 为微生物矿化与碱激发联合作用(UMA)时的强度, f_{OA} 为仅碱激发作用(OA)时的强

度, $f_{OM}+f_{OA}$ 为微生物矿化作用(OM)时的强度(f_{OM})和碱激发作用单独作用(OA)时的强度(f_{OA})之和。

由图2可见:(1)当存在微生物矿化作用时,赤泥的碱激发作用明显强于仅Ca(OH)₂存在时的工况,表现为 f_{UMA} 明显高于 f_{OA} ,也高于 $f_{OM}+f_{OA}$;随着尿素浓度的增大,胶凝材料强度提升的同时,这三者之间的差距也进一步增大。(2)当赤泥中仅掺入Ca(OH)₂时,在Ca(OH)₂碱激发作用下,赤泥强度得到迅速增长,且Ca(OH)₂用量为10%时赤泥强度最优,可达2.1 MPa。(3)当尿素浓度为1.5 mol/L、Ca(OH)₂用量为10%时,UMA作用效果达到最优,此时赤泥的 f_{uc} 可达3.9 MPa,相较OA作用提升了85.7%,且仅养护7 d即完成了约90%的强度增长;与OA作用相比,UMA作用不仅使赤泥强度显著提高,还大大加快了碱激发反应速率,缩短了强度增长时间。

由图2还可见:当UMA作用时,随着Ca(OH)₂用量的增加,赤泥强度呈现先增高后降低的趋势。这是由于赤泥属于贫钙体系,掺入一定用量的Ca(OH)₂有利于体系中生成水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶,提高体系的密实度^[17-18];而过高用量的Ca(OH)₂导致赤泥颗粒间的pH值陡然上升,不仅不利于微生物的生存繁殖,还降低了微生物生成的脲酶活性;同时体系中过高的钙含量导致碱激发产物的强度和耐久度降低^[19-20]。

2.2 矿化微生物用量对碱激发作用的影响

固定尿素浓度为1.5 mol/L,研究矿化微生物用量和Ca(OH)₂用量对赤泥试样无侧限抗压强度的影响。图3为UMA作用下矿化微生物用量对赤泥试样无侧限抗压强度的影响曲线。由图3可见:(1)随着矿化微生物用量的增加,赤泥试样强度呈现先增大后稳定的变化趋势。这是由于微生物的掺入有利于赤泥中碱激发反应的进行,能够生成更多的C-A-S-H凝胶,增强了赤泥颗粒之间的胶结^[21-22]。(2)矿化微生

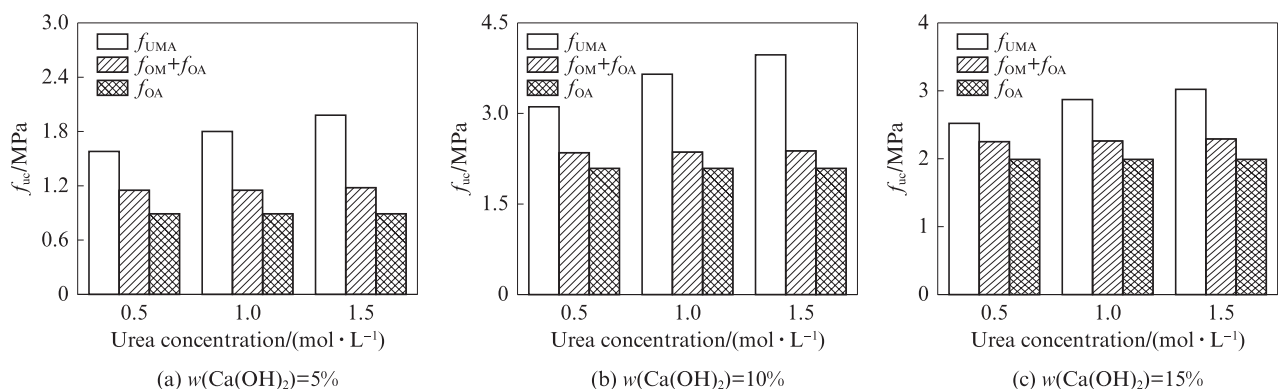


图2 赤泥试样的无侧限抗压强度
Fig. 2 Unconfined compressive strength of red mud samples

物用量 50 mL 是一个明显拐点,当矿化微生物用量大于 50 mL 时,赤泥强度不再提升.这是因为此工况的水灰比为 0.3,尿素浓度为 1.0 mol/L,在此情况下尿素被微生物完全消耗利用.若想更多的微生物发挥增强碱激发反应的作用,进一步提高赤泥强度,需要加入更多的尿素.

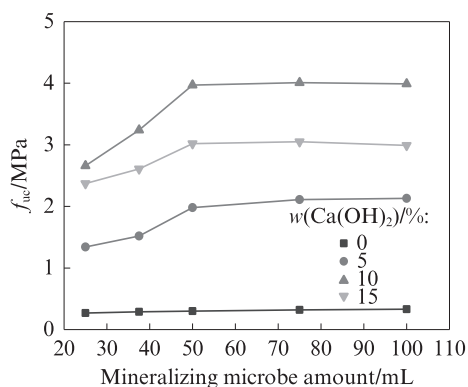


图3 UMA作用下矿化微生物用量对赤泥试样无侧限抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of mineralizing microbe amount on unconfined compressive strength of red mud samples under UMA action

2.3 不同工况下赤泥的超声波波速

采用NM-4B非金属超声检测分析仪,对不同工况下的赤泥试样进行无损超声波波速(v)检测,结果见图4.由图4可见: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碱激发作用生成的C-A-S-H凝胶较好地填充了赤泥孔隙,提高了赤泥的密实度,使其强度和超声波波速得以提升;OA作用下赤泥试样的超声波波速由原始赤泥的0.38 km/s提升至0.72~1.11 km/s;相较OA作用,UMA作用下赤泥试样的超声波波速进一步提高,主要分布在1.20~1.64 km/s.这说明UMA作用下的赤泥试样密实度大大提升,其无侧限抗压强度也进一步提高.由图4还可见,赤泥试样的超声波波速与其无侧限抗压

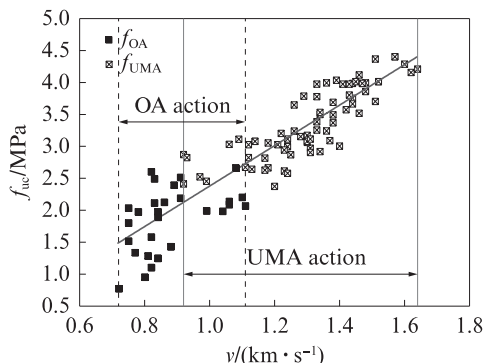


图4 不同工况下赤泥试样的超声波波速

Fig. 4 Ultrasonic wave velocity of red mud samples under various working conditions

强度之间存在良好的线性相关性,与其他碱激发赤泥研究结论相吻合.

3 微生物矿化对碱激发反应的影响机理

3.1 XRD分析

图5展示了3组赤泥试样的XRD图谱.由图5可见:原始赤泥的主要成分为赤铁矿、勃姆石、镍钛氧化物和方解石等.需要注意的是,硅是铝土矿中最有害的杂质,在氧化铝生产过程中很容易在设备内壁形成结疤,造成产能下降,少量进入溶液中还会影响产品质量.因此碱法生产氧化铝的关键在于铝、硅分离.采用拜耳法生产氧化铝时,硅先以 Na_2SiO_3 的形态进入溶液,然后与 $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ 溶液反应生成水合铝硅酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$),沉淀析出,其中大部分随着赤泥外排出去.

a—Hematite; b—Boehmite; c—Calcite;
d—Nickel titanium oxide;
e—Sodium aluminum silicate hydrate;
f—Calcium hydroxide;
g—Calcium aluminum silicate hydrate

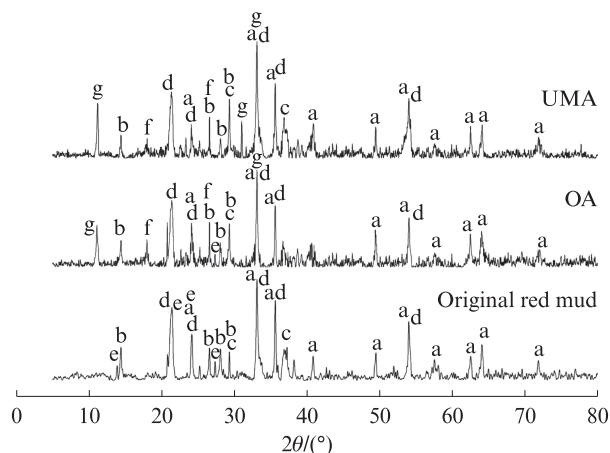
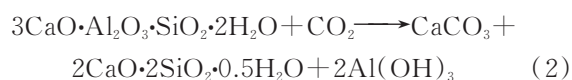
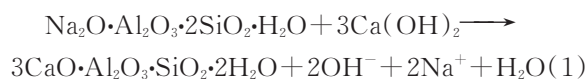


图5 不同工况下赤泥试样的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of red mud samples under various working conditions

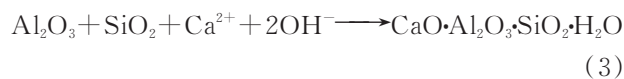
赤泥中的 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 主要以方钠石结构存在,常温常压下较为稳定,很难与 CO_2 发生反应^[23];而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可与方钠石发生离子交换反应,生成C-A-S-H凝胶^[24];C-A-S-H吸收空气中的 CO_2 发生碳化反应.上述化学反应式为:



为加快该反应进程,生成更多具有胶凝特性的C-A-S-H凝胶和 CaCO_3 ,以往研究通常采用注入加

压 CO_2 、高温加热和加入苛碱等方法.本文开创性地利用微生物的生物矿化反应来加快该反应的进程.矿化微生物在新陈代谢过程中分泌出大量脲酶,这些脲酶分解尿素生成 CO_2 ,同时使周围环境中pH值升高^[25-26].

在微生物矿化过程中,水解尿素生成的 OH^- 与赤泥中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 发生反应,使得 $\text{Si}-\text{O}$ 、 $\text{Al}-\text{O}$ 键裂解,发生解聚反应,生成低聚硅铝酸盐^[27].随着养护龄期的延长,尿素水解不断进行,有利于维持赤泥体系的pH值,使得硅铝酸盐聚合度增加,结晶度增大,持续不断地生成水硬性C-A-S-H胶凝材料,赤泥的力学性能随之增强.其化学反应式为:



另外,微生物分解尿素产生的 CO_2 可以与C-A-S-H进一步发生碳化反应,生成更多的 CaCO_3 晶体.相较先前研究中采用的直接注入 CO_2 的赤泥碳化方式,本文采用的矿化微生物和尿素被均匀拌入赤泥中,反应生成的 CO_2 分布在赤泥孔隙中,能够与C-A-S-H直接接触,碳化反应效率更高;而且赤泥孔隙不会受到被胶凝物质堵塞,外部 CO_2 进入困难的限制.

UMA作用可以更加均匀、高效地处理赤泥.图5

中的分析结果也验证了这一点,相较OA作用,UMA作用下赤泥中的C-A-S-H和方解石衍射峰有明显增强.表明在UMA作用下,不但微生物矿化反应产生的 OH^- 可以与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的 OH^- 协同作用进行碱激发反应,生成更多的C-A-S-H;而且其主要产物 CO_2 也利于C-A-S-H的碳化,生成更多的 CaCO_3 ,共同提高赤泥强度.

3.2 SEM微观形貌分析

图6为不同工况下赤泥试样的SEM照片.由图6可见:(1)赤泥中物质结晶度低,颗粒形状较为复杂,颗粒尺寸大小不一,且微观结构较为疏松,颗粒之间存在较多的空隙.赤泥具有胶结的孔架状结构,主要由凝聚体、集粒体和团聚体构成.(2)OA作用下,碱激发反应的产物为无定形的C-A-S-H凝胶,呈棉团状结构,与各个方向杂乱分布的赤泥颗粒紧密连接在一起.(3)UMA作用下,松散的赤泥颗粒吸附在六面体形状的 CaCO_3 晶体表面,呈“包裹”形态;无定形的C-A-S-H凝胶、方解石及杂乱分布其间的赤泥颗粒紧密地交织连接在一起,构成一个整体.UMA作用下生成的C-A-S-H和方解石,不仅填充了赤泥中的孔隙,还起到胶结赤泥颗粒的作用,为赤泥力学性能的提升奠定了结构基础.

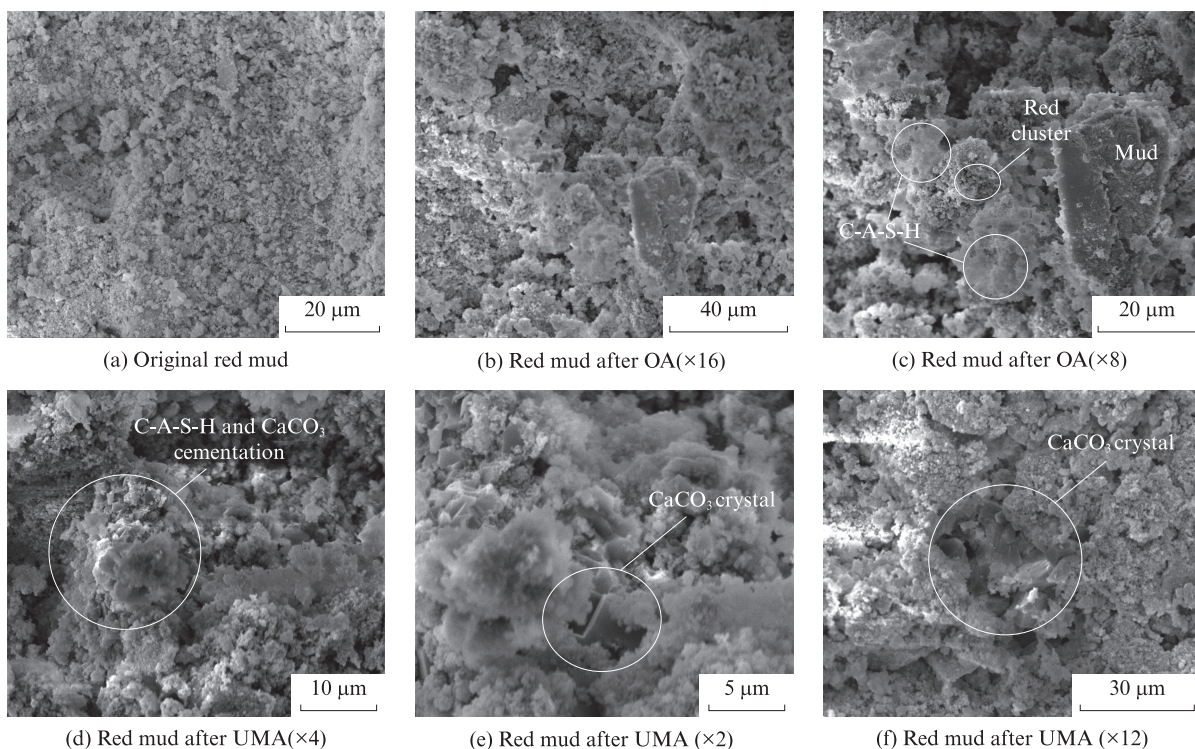


图6 不同工况下赤泥试样的SEM照片

Fig. 6 SEM images of red mud samples under various working conditions

3.3 pH值分析

将过1 mm筛的10 g赤泥与10 g蒸馏水搅拌均匀,静置1 h,参考ASTM D4972-01 (2007)

Standard Test Method for pH of Soils进行赤泥pH

值测试.未处理的原始赤泥pH值为10.2~11.3,其上悬液pH值为12.1~13.0.图7为不同工况下赤泥试样的pH变化曲线.由图7可见:OA作用下,赤泥pH值在20 h后趋于稳定,这是因为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碱激发作用生成的C-A-S-H凝胶物质可以起到包裹赤泥中碱性成分的作用,降低了碱性物质的溶出;UMA作用下,赤泥pH值远低于OA作用时,且pH值的变化主要集中在前8 h.结合上文XRD、SEM及超声波波速测试结果可知,UMA作用下赤泥的密实度有较大提高,对赤泥中碱性成分的包裹度进一步增强,使得碱性物质更加难以溶出.这不仅降低了赤泥制成建筑材料后表面泛碱的风险,也意味着更好的环境友好性与更广阔的应用范围.

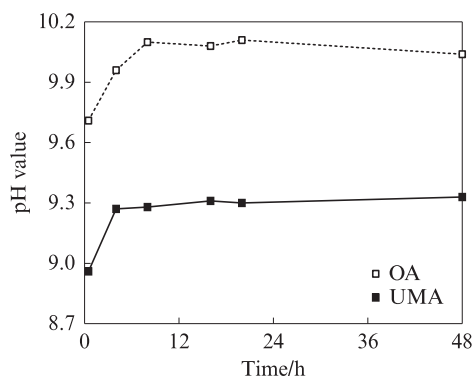


图7 不同工况下赤泥试样的pH值变化曲线

Fig.7 Change curves of pH value of red mud samples under various working conditions

4 结论

(1)微生物矿化作用可以促进赤泥的碱激发反应,由此引起的强度增加远大于碱激发单独作用时的效果.赤泥基碱激发胶凝材料的强度随着矿化微生物用量及养护龄期的增加而提升.加入1.5 mol/L尿素和75 mL矿化微生物时,胶凝材料的强度提升最为显著,相较仅加入等量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的工况,提升幅度可达85.7%.与此同时,还显著加快了胶凝材料强度的增长速率,有利于胶凝材料早期强度的形成.在赤泥碱激发反应过程中掺入矿化微生物可以减少强碱用量,兼具经济和环境效益.

(2)微生物矿化与碱激发联合作用下,赤泥中生成大量具有胶凝作用的水化硅铝酸钙(C-A-S-H)和 CaCO_3 .无定形的C-A-S-H凝胶和 CaCO_3 的增加是赤泥基碱激发胶凝材料强度提高的关键,它们共同构成了胶结连接体系,与赤泥颗粒紧密结合成为一个整体.

(3)赤泥基碱激发胶凝材料pH值测试结果表

明,由于微生物矿化与碱激发联合作用下赤泥的密实度明显提高,对赤泥中碱性物质的包裹度进一步增加,使得碱性物质的溶出量和溶出速率明显降低,减少了赤泥的pH值.这不仅降低了赤泥制成建筑材料后表面泛碱的风险,也意味着更好的环境友好性与更广阔的应用范围.

参考文献:

- [1] 李彬, 张宝华, 宁平, 等. 赤泥资源化利用和安全处理现状与展望[J]. 化工进展, 2018, 37(2):714-723.
LI Bin, ZHANG Baohua, NING Ping, et al. Present status and prospect of red mud resource utilization and safety treatment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(2): 714-723. (in Chinese)
- [2] WANG S H, 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(11):125-136.
- [3] LIANG G J, CHEN W M, NGUYEN A V, et al. Red mud carbonation using carbon dioxide: Effects of carbonate and calcium ions on goethite surface properties and settling[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 517(10):230-238.
- [4] KHAIRUL M A, ZANGANEH J, MOGHADDERI B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud[J]. Resources Conservation and Recycling, 2019, 141(2):483-498.
- [5] 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. Effect 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)
- [6] 丁崧, 陈潇, 夏飞跃, 等. 净水型赤泥-矿渣基地聚合物透水混凝土的研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):48-55.
DING Song, CHEN Xiao, XIA Feiyue, et al. Study on red mud-slag based geopolymer pervious concrete with function of water purification[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 48-55. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 郭凌志, 周梅, 王丽娟, 等. 煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10):1092-1100.
GUO Lingzhi, ZHOU Mei, WANG Lijuan, et al. Preparation and properties of coal-based solid waste geopolymer grouting materials[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10): 1092-1100. (in Chinese)
- [9] 马璐璐, 张翥, 刘芳, 等. 赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特性及机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7):762-770.
MA Lulu, ZHANG Xiao, LIU Fang, et al. Strength

- characteristics and mechanism of red mud-fly ash stabilized coal gangue base[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7): 762-770.(in Chinese)
- [10] 李亚倩. 碱激发胶凝材料抗干缩机理研究与分析[D]. 淮南:安徽理工大学, 2022.
- LI Yaqian. Study and analysis on drying shrinkage mechanism of alkali activated cementitious materials [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [11] 薛生国, 朱铭星, 杨兴旺, 等. 赤泥激发胶凝材料及路用研究进展[J/OL]. *中国有色金属学报*: 1-32. (2022-11-30) [2023-10-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20221129.1527.002.html>.
- XUE Guosheng, ZHU Mingxing, YANG Xingwang, et al. Property of bauxite residue-activated cementitious materials and its engineering road application: A comprehensive review[J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*: 1-32. (2022-11-30) [2023-10-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20221129.1527.002.html>.(in Chinese)
- [12] 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 Huiming, ZHAO Qingxin, et al. Study on properties of alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composite[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1): 14-20. (in Chinese)
- [13] 张鹏. 赤泥基碱激发胶凝材料的优化设计及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- ZHANG Peng. Design and optimization of alkali-activated red mud based cementitious materials and the investigations on its properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology Guangzhou, 2016. (in Chinese)
- [14] DEJONG J T, MORTENSEN M B, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210.
- [15] CHU J, STABNIKOV V, IVANOV V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, 29(6): 544-549.
- [16] PAASSEN L A, GHOSE R, LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [17] YANG T, YAO X, ZHANG Z H. Quantification of chloride diffusion in fly ash-slag-based geopolymers by X-ray fluorescence (XRF)[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 69(5): 109-115.
- [18] SONG W, ZHU Z D, PENG Y, et al. Effect of steel slag on fresh, hardened and microstructural properties of high-calcium fly ash based geopolymers at standard curing condition [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116933.
- [19] YIP C K, PROVIS J L, LUKEY G C, et al. Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(10): 979-985.
- [20] GOMEZ-ZAMORANO L, BALONIS M, ERDEMLI B, et al. C-(N)-S-H and N-A-S-H gels: Compositions and solubility data at 25 °C and 50 °C [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 100(6): 2700-2710.
- [21] CHOU C W, SEAGREN E A, AYDILEK A H, et al. Biocalcification of sand through ureolysis [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(12): 1179-1189.
- [22] 李款, 卢都友, 李孟浩, 等. 用水量对偏高岭土基聚合物微观结构及反应过程的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 226-231.
- LI Kuan, LU Duyou, LI Menghao, et al. Effect of water content on microstructure and reaction process of metakaolin-based geopolymers [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(2): 226-231.(in Chinese)
- [23] LIZCANO M, GONZALEZ A, BASU S, et al. Effects of water content and chemical composition on structural properties of alkaline activated metakaolin-based geopolymers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(7): 2169-2177.
- [24] 伊元荣. 含碱工业固体废弃物捕获 CO₂ 反应特性与机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- YI Yuanrong. The reaction characteristics and mechanism of the CO₂ capture by alkaline industrial solid wastes [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012. (in Chinese)
- [25] 柯家骏, 张帆. 赤泥水热处理的渣物相的热力学分析[J]. *冶金*, 1994, 15(4): 341-347.
- KE Jiajun, ZHANG Fan. Thermodynamical analysis on residue phases resulted from hydrothermal treatment of the Bayer red mud [J]. *Engineering Chemistry & Metallurgy*, 1994, 15(4): 341-347. (in Chinese)
- [26] MUYNCK W D, BELIE N D, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 118-136.
- [27] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1537-1548.
- QIAN Chunxiang, WANG Anhui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)