doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.09.008

赤泥微生物脱碱试验及机理探究

燕旭东,朱晓波,李望

(河南理工大学 化学化工学院,河南 焦作 454000)

摘要:赤泥是制铝行业产生的碱性工业废渣,其强碱性是制约赤泥综合利用的主要因素。利用微生物对赤泥进行脱碱以降低赤泥对环境的危害。探究了巨大芽孢杆菌菌粉添加量、处理时间、液固比、培养方式及空气供应等条件对赤泥脱碱的影响。借助XRD、SEM分别对赤泥及脱碱渣进行矿相组成和表面形貌分析,利用HPLC对菌株进行产酸分析。结果表明,在赤泥用量20 g、菌粉添加量20 g、液固比7.5,震荡培养条件下,赤泥试样的pH可从10.3降至6.5左右,且最终可以保持在7.5;赤泥中主要的含碱矿物钙霞石衍射峰明显减弱,碳酸钙衍射峰加强;经过处理之后的脱碱渣物理结构更加规则;赤泥pH降低是微生物代谢产生的酸中和作用所致,巨大芽孢杆菌代谢有机酸主要为丙酸和苹果酸。

关键词:赤泥;脱碱;巨大芽孢杆菌;微生物;有机酸

中图分类号:X758 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2023)09-0068-08

Experiment and Mechanism of Microbial Dealkalization in Red Mud

YAN Xudong, ZHU Xiaobo, LI Wang

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Red mud is an alkaline industrial waste produced in aluminum industry, and its strong alkalinity prove to be the primary factor restricting the comprehensive utilization of red mud. Microbial dealkalization of red mud was studied to reduce the harm to the environment. The effects of *Bacillus megatherium* powder addition amount, treatment time, liquid-solid ratio, culture method and air supply on the dealkalization of red mud were investigated. The mineral-phase composition and surface morphology of red mud and its dealkalization slag were characterized by XRD and SEM test, and acid production of strain was analyzed by HPLC. The results show that pH value of red mud samples drops from 10.3 to 6.5, and keeping a constant figure at 7.5 under the conditions including shock culture, amount of red mud of 20 g, amount of bacteria powder of 20 g, the ratio of liquid to solid of 7.5. The XRD analysis implies that the diffraction peak of calcium nepheline tremendously weakened, while that of calcium carbonate is strengthened. The SEM results exhibit a more regular physical morphology of dealkalization slag treated by microorganism. The decrease of pH of red mud results from the neutralization of acid produced by microbial metabolism. The HPLC data demonstrates that the organic acids metabolized by *Bacillus megaterium* are mainly propionic acid and malic acid.

Key words: red mud; dealkalization; *Bacillus megaterium*; microorganism; organic acid

---

收稿日期:2023-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904097);河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS056);河南理工大学杰出青年基金资助项目(J2022-3)

作者简介:燕旭东(1999-),男,硕士研究生;**通信作者:**朱晓波(1985-),男,博士,副教授

赤泥是制铝行业产生的碱性工业废渣[1]。我国是赤泥排放量最大的国家,然而国内外针对赤泥综合利用的相关研究均难以实现大规模工业应用,其总体利用率不超过 20%[2]。关键原因在于赤泥的碱性强,盐分和持水性高。我国赤泥的碱性平均 pH 为 10～12,目前大部分针对赤泥脱碱的研究集中在水洗、酸洗和添加药剂中和碱性的方式。然而,采用水洗法会浪费大量的水资源,同时水洗之后的碱性溶液难以处理[3]。酸洗法会导致赤泥中的一些重金属被溶出,同时脱碱处理之后的废酸造成环境的二次污染[4];盐类脱碱法脱碱率较高,但脱碱药剂用量较大,且脱碱后赤泥酸性强、过滤性较差,工业化应用受到了极大阻碍[5]。

由于赤泥碱性强且难以脱除,国内尚无有效的工业化处理方法,导致氧化铝厂大都只能将赤泥进行筑坝堆存[6]。赤泥堆存不仅占用大量农田、土地,污染地表地下水源,造成附近土壤盐碱化。赤泥扬尘进入到空气中,造成大气污染,危害人体健康[7-8]。因此,开发有效的减量化、资源化和无害化处理赤泥的新途径已迫在眉睫。

目前,微生物脱碱法以其高效性和无二次污染等特点受到了广泛关注[9]。利用微生物的分解作用可对赤泥进行原地脱碱处理,不仅可以解决氧化铝厂工业废渣的处理问题,还可改善附近农田的土壤盐碱化,实现赤泥的土壤资源化利用。

巨大芽孢杆菌属革兰氏阳性菌,可以提高土壤肥质,同时耐高温抗逆性强,农业化用途广泛[10]。为此,本文利用巨大芽孢杆菌对赤泥进行了脱碱研究,考察了巨大芽孢杆菌用量、赤泥用量、液固比、培养方式、培养温度和培养天数等因素对赤泥脱碱的影响,阐述赤泥微生物脱碱机制,以期为赤泥高效脱碱和综合利用提供理论依据和技术支持。

1　试验

1.1　试验原料

赤泥试样取自河南某氧化铝厂,该厂使用拜耳法生产氧化铝。赤泥试样经过 X 射线荧光光谱分析后,其主要化学成分为(质量分数,%):Al_2O_3 27.53、SiO_2 24.40、CaO 16.67、Fe_2O_3 11.28、Na_2O 10.50、TiO_2 5.22、K_2O 1.18、MgO 1.51、SO_3 1.20、P_2O_5 0.28、Cr_2O_3 0.23。可知,该赤泥中氧化钠含量为 10.50%,为赤泥中主要的含碱物质,同时该赤泥试样氧化铁含量为 11.28%,氧化铝含量为 27.53%,氧化硅含量为 24.40%,还含有微量的氧化钾、氧化镁、氧化铬等金属氧化物。对赤泥原矿进行 XRD 和 SEM 分析,结果如图 1 和图 2 所示。

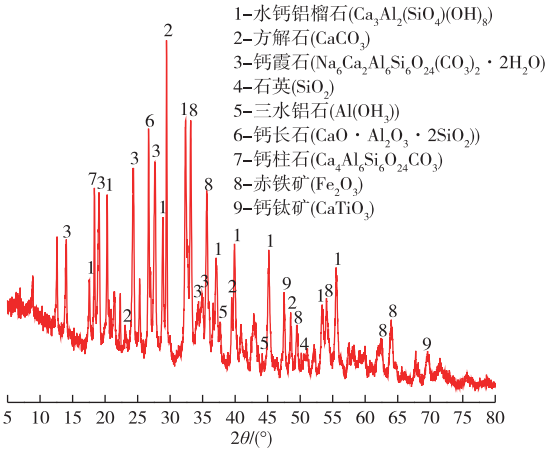

图 1　赤泥的 XRD 谱

Fig. 1　XRD pattern of red mud

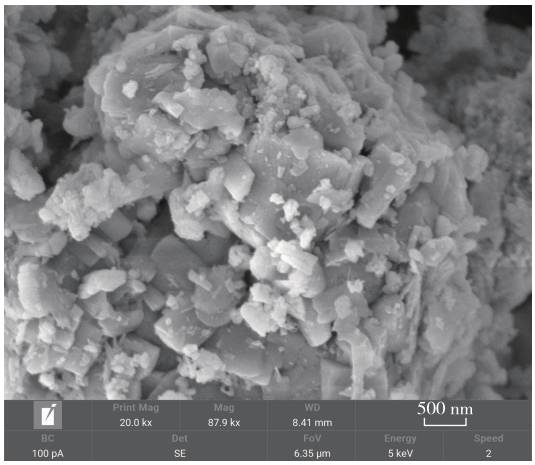

图 2　赤泥的表面形貌

Fig. 2　Surface morphology of red mud

由图 1 可知,赤泥中主要的矿物组成为水钙铝榴石、方解石、钙霞石、钙柱石和赤铁矿等。赤泥中的碱主要分为结合碱和游离碱两大类,其中结合碱主要包含在含钠元素的矿物钙霞石中。由图 2 可知,赤泥颗粒微细且分散不均匀,没有固定形状。

巨大芽孢杆菌购自沧州旺发生物技术研究所有限公司,采用 LB 固体培养基(蛋白胨 10.0 g、氯化钠 5.0 g、牛肉膏粉 3.0 g、琼脂 15.0 g、蒸馏水 1 000 mL)纯培养后其菌落形态如图 3 所示。通过显微镜观察,菌体形态如图 4 所示。单个菌落呈圆形、黄白色,菌体形态为杆状,末端圆,单个或呈短链排列,(1.2～1.5) μm×(2.0～4.0) μm,能运动。芽孢为(1.0～1.2) μm×(1.5～2.0) μm,椭圆形,中生或

次端生，革兰氏阳性，属于芽孢杆菌属(Bacillus)[11]。

在试验中，分别采用牛皮纸和保鲜膜密封处理，其中牛皮纸模拟有空气供给，保鲜膜模拟无空气供给(PE 保鲜膜氧气透过率小，即隔断性高，隔绝了外界空气供应[12])。

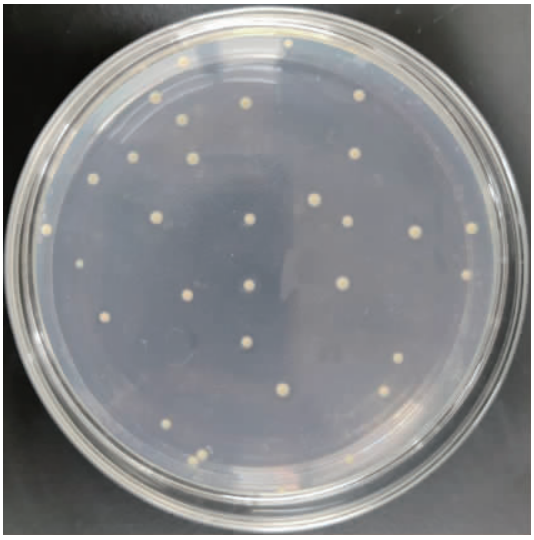

图 3　巨大芽孢杆菌菌落形态

Fig. 3　Colonial morphology of *Bacillus megaterium*

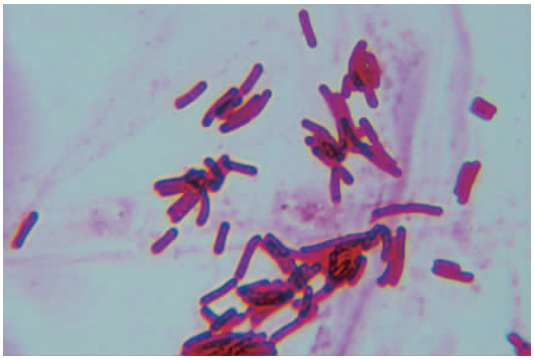

图 4　巨大芽孢杆菌菌体形态

Fig. 4　Morphology of *Bacillus megaterium*

1.2　试验方法

菌液的制备：分别取 1、2.5、5、10、20 g(菌量为 $6.8\times10^{10}\sim1.0\times10^{11}$ 个/g)巨大芽孢杆菌粉，分别加入 50、100、150 mL 无菌水在 250 mL 锥形瓶中，放入微生物培养箱(30 ℃、180 r/min)避光震荡 15 min，混匀待用。

脱碱过程：赤泥经过灭菌处理之后烘干密闭保存备用。称取 20 g 赤泥加入到含有菌液的锥形瓶中，放入恒温培养箱(30 ℃)培养，每隔 12 h 检测整个体系的 pH。试验完毕，取出离心，将脱碱渣放入烘箱中 80 ℃烘干，研磨保存备用。

1.3　检测方法

使用 pH 便携酸度仪(PHS-3C)测定脱碱前后赤泥的 pH。采用 U3000 高效液相色谱-紫外检测器(HPLC)对巨大芽孢杆菌代谢产生的有机酸进行定量及定性分析。利用 X 射线荧光光谱仪(XRF，型号 PANalytical Axios)测定赤泥的化学成分，使用 X 射线衍射仪(XRD，型号 SmartLab)对赤泥和脱碱渣进行物相分析，使用扫描电子显微镜(SEM，型号 Merlin Compact)对原矿和脱碱渣进行表面形貌分析。

2　结果与讨论

2.1　巨大芽孢杆菌用量对降低赤泥 pH 的影响

称取 1、2.5、5、10、20 g 巨大芽孢杆菌粉，分装于 250 mL 锥形瓶中。称取赤泥 20 g，无菌水 100 mL，充分混匀之后放于恒温 30 ℃的环境中避光静置培养，每隔 12 h 测定其 pH，结果如图 5 所示。由图 5 可知，赤泥中添加巨大芽孢杆菌之后，整个体系的 pH 呈现迅速降低，约在 36 h 时达到最低，之后虽然稍有回升，但整体趋近于一个稳定的数值。当添加量为 20 g 时，活菌数量可达到 10^{12} CFU/mL，赤泥的 pH 从 10.70 降低到 6.58，在 72 h 后缓慢上升，可能是耐碱微生物不喜中性环境，改变自身代谢使得体系 pH 上升[13]。同时铝土矿中的碱性矿物被破坏，在矿物被完全溶解破坏之前，整个体系的 pH 会有一定的波动[14]。

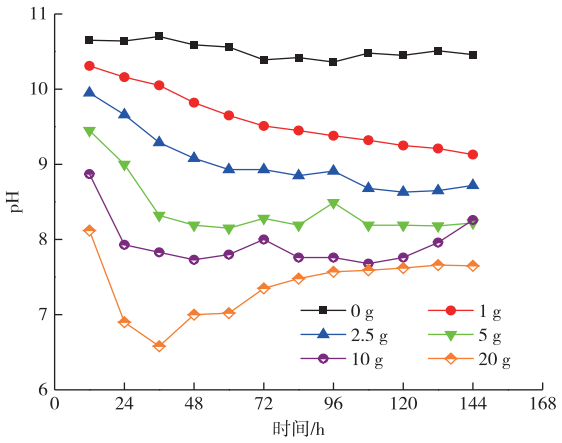

图 5　不同菌粉添加量对赤泥的脱碱效果

Fig. 5　Effects of different fungus powder addition on red mud alkali removal

2.2　液固比对巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 的影响

称取 10 g 菌粉于 250 mL 锥形瓶中,分别量取 50、100、150 mL 无菌水(记为 1 号至 3 号),加入 20 g 赤泥。制作对照组,赤泥用量为 20 g,不添加菌粉,无菌水的用量分别 50、100 和 150 mL(分别记为 1 号对照、2 号对照和 3 号对照组),充分混匀之后在恒温 30 ℃的环境中避光静置培养,每隔 12 h 测定其 pH,结果如图 6 所示。

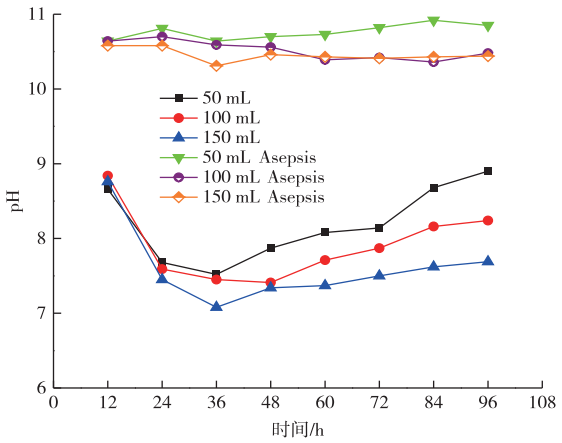

图 6　不同无菌水添加量对巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 效果影响

Fig. 6　Effects of different amounts of sterile water on reducing pH value of red mud by *Bacillus megaterium*

根据图 6 可知,巨大芽孢杆菌对降低赤泥 pH 效果显著,其中在 0～24 h 不同的液固比对巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 效果相差很小。在 36 h 时,无菌水用量为 50 mL 和 150 mL 整个体系的 pH 降到最低,分别为 7.52 和 7.08,无菌水用量为 100 mL 在 48 h 时达到最低,为 7.41。在 48 h 之后不同液固比条件下,赤泥 pH 开始缓慢上升,但均稳定在 8.5。无菌水添加量为 150 mL 时,由于水的缓冲作用,赤泥的 pH 波动较小,最终稳定在 7.5。同时较对照组,不同液固比条件下,赤泥的 pH 呈现先减小后增大的趋势,最终稳定在 10.6。这可能是由于无菌水的添加使得赤泥中的部分游离碱被析出,导致赤泥的 pH 呈现出缓慢增大的趋势,这也侧面说明水洗法只能去除赤泥中部分游离碱[15]。不同液固比对巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 前期影响不大,在处理后期由于营养物质的消耗、活菌浓度的变化、赤泥中碱性物质的进一步析出和水的缓冲作用,使得在液固比较大的条件下,巨大芽孢杆菌降低赤泥的 pH 且保持稳定的效果更加明显。

2.3　巨大芽孢杆菌培养方式对降低赤泥 pH 的影响

称取 10 g 菌粉于锥形瓶中,加入 100 mL 无菌水后,加入 20 g 赤泥。分别在恒温 30 ℃的环境中避光静置培养和震荡培养(震荡速率 175 r/min),每隔 12 h 测定其 pH,结果如图 7 所示。根据图 7 可知,震荡培养加快微生物代谢,可能是将巨大芽孢杆菌的对数期提前,或增加了菌与营养物质的接触机率。静置培养条件下赤泥在 36 h 时达到最小 pH,为 7.28;震荡培养条件下,赤泥在 24 h 时达到最小 pH,为 7.11。在震荡培养 36 h 之后,微生物代谢产物的减少和赤泥碱性物质的进一步析出导致赤泥 pH 缓慢上升,但总体稳定在 7.5 左右。震荡培养更有利于微生物生长,但由于没有外来物质的供给,导致微生物在大量繁殖之后,菌液浓度过高时体系溶氧量和营养物质无法满足微生物生长需求,开始出现衰亡。

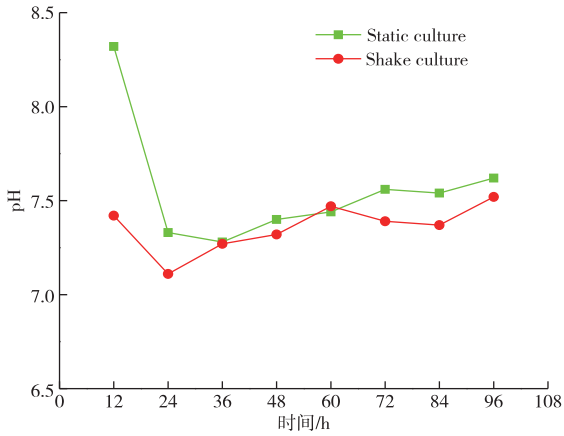

图 7　巨大芽孢杆菌培养方式对降低赤泥 pH 的影响

Fig. 7　Effectss of *Bacillus megaterium* culture mode on pH value reduction of red mud

在 0～12 h,震荡培养条件下,赤泥试样的 pH 从 10.5 迅速降低到 7.5 左右,较静置培养条件下,赤泥试样的 pH 从 10.5 降低至 8.5 左右,这就排除了巨大芽孢杆菌菌粉中的营养物质使赤泥试样 pH 下降。因此可以推测赤泥试样 pH 的下降原因主要是巨大芽孢杆菌代谢产生的某种酸性物质或者可以与 OH^- 反应的某种物质造成的[16]。

震荡培养通过充分震荡,使得微生物和营养物质之间的接触面更大,因此巨大芽孢杆菌在震荡条件下更快地进入对数期,这是在 0～12 h 震荡培养条件下赤泥试样 pH 降低较快的主要原因。之后两种培养条件下,赤泥试样的 pH 都趋于平稳在 7.5

附近,这说明巨大芽孢杆菌菌粉中的营养物质已经不足以再支持微生物代谢,此时微生物生长和衰亡正处于一种动态平衡。虽然两种方式不同,但最后两种培养方式对应的赤泥 pH 变化相差并不大,考虑到能耗问题和实际工业生产应用,静置培养较为合适。

2.4　空气供给对巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 的影响

称取 10 g 菌粉于 250 mL 锥形瓶中,加入 100 mL 无菌水后,再加入 20 g 赤泥。分别用保鲜膜和牛皮纸封存处理后在遮光恒温 30 ℃的环境中静置培养,每隔 12 h 测定其 pH,结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,由于巨大芽孢杆菌属于好氧微生物,在氧气充足的条件下,24 h 将赤泥的 pH 降低到 7.32。同时充足的氧气供应也促进了巨大芽孢杆菌的生长,使得其代谢产物增多,在 36 h 后虽然体系的 pH 在缓慢增加,但最终都稳定在 7.5 附近。总体看来,巨大芽孢杆菌在氧气供应充足的条件下,对降低赤泥 pH 具有显著的效果。在处理后期,由于营养物质的匮乏,导致巨大芽孢杆菌浓度降低,代谢产物减少,使得赤泥的 pH 有小幅度回升。但考虑到工业生产,裸露的赤泥堆场,如果可以在适当时间引入一定的营养物质,那么巨大芽孢杆菌处理赤泥,降低赤泥 pH 可能会有比较不错的效果。

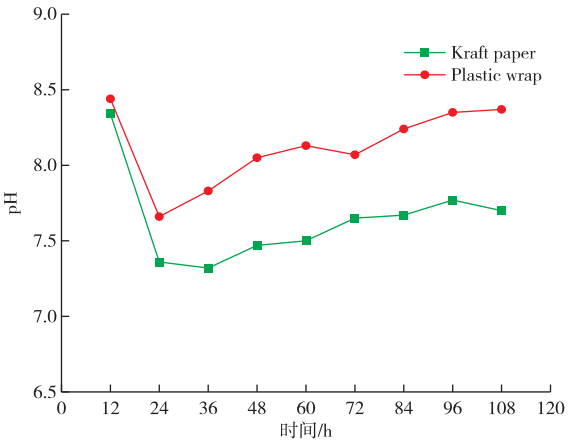

图 8　空气供给对巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 的影响

Fig. 8　Effects of air supply on reducing pH value of red mud by *Bacillus megaterium*

2.5　巨大芽孢杆菌降低赤泥 pH 机理分析

对巨大芽孢杆菌代谢有机酸进行检测,甲酸、苹果酸、乳酸、乙酸、马来酸、丙酸含量分别为 18.49、554.89、153.49、157.75、9.35、533 mg/L。可知,巨大芽孢杆菌代谢产生的有机酸主要为苹果酸和丙酸,含有少量的乳酸、乙酸、马来酸和甲酸。赤泥中碱的存在形态分为游离态和化学态,其碱性降低可以分为中和作用、沉淀作用和抑制作用[17]。赤泥在经过巨大芽孢杆菌处理前 pH 在 10.5 左右,经过处理之后,最低可以达到 7 左右,说明巨大芽孢杆菌在赤泥中生存代谢时产生的有机酸等物质可以与赤泥中的碱性物质发生中和反应[18],导致体系 pH 降低,同时这些有机酸促进赤泥的分解,使得赤泥中的结合碱,通过间接酸浸的方法转化为可溶性的盐,从而被除去。

对赤泥原矿和巨大芽孢杆菌处理效果较好的脱碱渣进行了 XRD 分析,结果如图 9 所示。对图 9 分析可知,对比赤泥原矿和脱碱渣,经巨大芽孢杆菌处理后,赤泥中的钙柱石和钙长石衍射峰消失,钙霞石、水钙铝榴石和赤铁矿衍射峰减弱,三水铝石和碳酸钙的衍射峰明显加强。这说明巨大芽孢杆菌代谢物将原矿中矿相破坏,主要表现为分解原矿中的钙柱石、钙长石、钙霞石和水钙铝榴石,其中钙霞石和钙柱石中的 Ca^{2+} 与其自身的 CO_3^{2-} 结合生成碳酸钙,另一部分矿相中的 Ca^{2+} 通过与微生物的呼吸作用产生的 CO_2 相结合[19],生成了较为稳定的碳酸钙。微生物代谢可以产生对 Fe^{3+} 具有螯合能力的有机化合物-铁载体[20],经过处理之后的赤泥,赤铁矿衍射峰明显减弱,其大部分铁元素不再以赤铁矿的形式存在,颜色也由红色变为灰色,赤泥脱碱前后颜色对比见图 10。

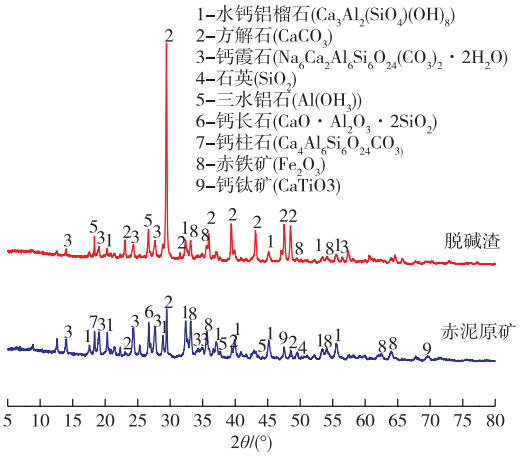

图 9　赤泥原矿及菌株处理之后脱碱渣的 XRD 谱

Fig. 9　XRD patterns of alkali removal residue after red mud raw ore and strain treatment

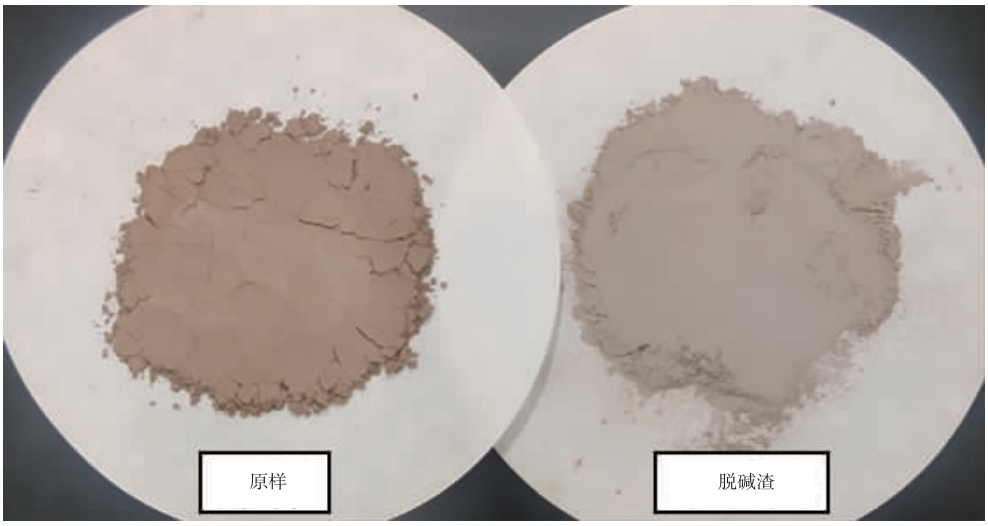

图 10　赤泥脱碱前后颜色对比

Fig. 10　Color comparison of red mud before and after dealkalization

结合图 9 和图 10,由于赤泥矿相中主要含碱矿物为钙霞石,经过脱碱反应之后,钙霞石的衍射峰明显减弱。因此可以认定巨大芽孢杆菌对赤泥脱碱具有较明显的效果。对巨大芽孢杆菌处理效果较好的脱碱渣进行了 SEM 分析,结果如图 11 所示,其中图 11(b)为图 11(a)的局部放大图。

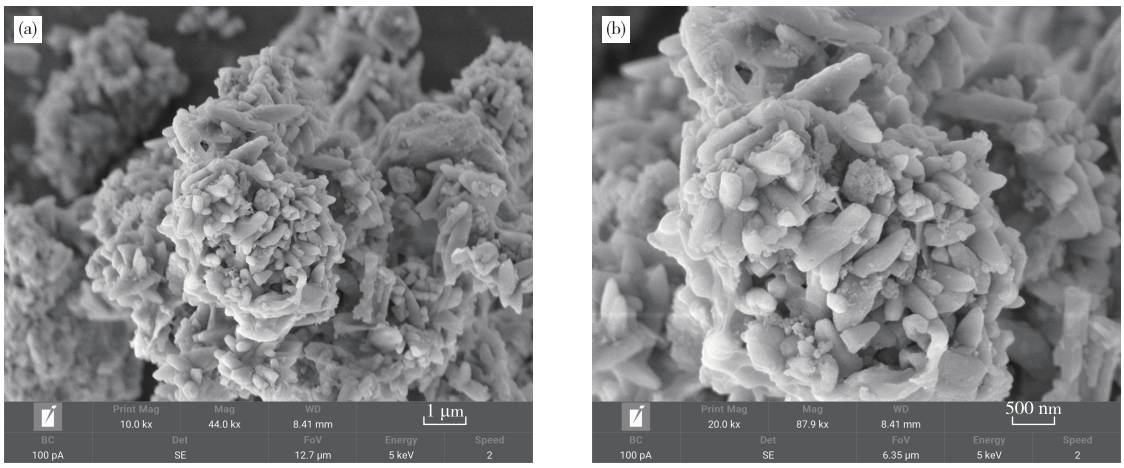

图 11　菌株处理后脱碱渣 SEM 形貌

Fig. 11　SEM morphologies of dealkalized residue after strain treatment

对图 2 和图 11 分析可知,原赤泥中团聚体粒度较小,棱角分明,结构松散,颗粒分布不均匀;经过巨大芽孢杆菌处理之后,赤泥颗粒的大小明显增加,表面平滑,呈紧密的堆叠状,颗粒间间隙减小,以明显的不规则棒状或针状形态存在,呈现出明显的细菌对其腐蚀痕迹。这说明巨大芽孢杆菌改变了原有赤泥的形貌。由于赤泥含有较大的比表面积,使得其可以吸附菌液中的菌体及菌体代谢产物,从而形成赤泥-菌体复合产物[21]。通过溶蚀作用,赤泥边缘变得平滑。微生物代谢能够产生具有胶结能力的物质,使得赤泥的团聚体颗粒增大,团聚体稳定性增强[22-23],这与本研究具有很好的一致性。

3　结论

1)利用巨大芽孢杆菌对赤泥进行脱碱处理,在赤泥用量为 20 g,巨大芽孢杆菌菌粉添加量为 20 g,无菌水用量为 150 mL,牛皮纸封存,175 r/min 震荡培养条件下,赤泥试样的 pH 从 10.3 降低至 6.5 左右,36 h 后可以保持在 7.5。

2)XRD 分析表明,赤泥经微生物脱碱处理后,

原矿中主要的含钠物质-钙霞石衍射峰明显减弱,同时钙柱石和钙长石衍射峰消失,水钙铝榴石和赤铁矿衍射峰减弱,三水铝石和方解石的衍射峰明显加强。对赤泥原样和脱碱渣进行的 SEM 分析可知,经过巨大芽孢杆菌处理之后的赤泥形状变得更加规则,颗粒明显增大。HPLC 检测表明,巨大芽孢杆菌在生长过程中代谢产生了大量的有机酸(主要为苹果酸和丙酸),通过产酸将含碱矿物钙霞石溶解、中和并固定为稳定的难溶性矿物(方解石和三水铝石),从而降低了赤泥的碱性。

参考文献

[1] 李杨,欧宸邑.双碳背景下大宗固废资源化利用发展对策研究[J].江西建材,2022(5):5-8,12.
LI Y,OU C Y. Research on countermeasures for the development of bulk solid waste resource utilization under the background of dual carbon[J]. Jiangxi Building Materials,2022(5):5-8,12.

[2] 李帅,周斌,刘万超,等.赤泥综合利用产业化现状、存在问题及解决方略探讨[J].中国有色冶金,2022,51(5):32-36.
LI S,ZHOU B,LIU W C,et al. Discussion on the current situation,existing problems and solutions of the industrialization of comprehensive utilization of red mud[J]. China Nonferrous Metallurgy,2022,51(5):32-36.

[3] 王芝成,路坊海,谷晓斐,等.赤泥脱碱的研究现状[J].贵州农机化,2020(2):15-18.
WANG Z C,LU F H,GU X F,et al. Research status of red mud de alkali[J]. Guizhou Agricultural Mechanization,2020(2):15-18.

[4] 韩尚云,姚延伟,骆虹伟.拜耳法赤泥脱碱技术与综合利用的研究现状[J].科技和产业,2021,21(7):204-207.
HAN S Y,YAO Y W,LUO H W. Research status of Bayer's red mud de-alkali removal technology and comprehensive utilization[J]. Science Technology and Industry,2021,21(7):204-207.

[5] 陈珊,陈允建,谢鑫,等.赤泥脱碱方法及其机理研究进展[J].硅酸盐通报,2021,40(10):3414-3426.
CHEN S,CHEN Y J,XIE X,et al. Research progress on red mud alkali removal method and its mechanism[J]. Bulletin of Silicates,2021,40(10):3414-3426.

[6] CARLO E D,BOULLEMANT A,COURTNEY R. A field assessment of bauxite residue rehabilitation strategies[J]. Science of the Total Environment,2019,663:915-926.

[7] 付新峰,尹国勋,谭利敏,等.中州铝厂赤泥堆放场对环境的影响及治理对策[J].焦作工学院学报(自然科学版),2003(2):136-139.
FU X F,YIN G X,TAN L M,et al. The impact of the red mud dump of Zhongzhou Aluminum Plant on the environment and its treatment measures[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science Edition),2003(2):136-139.

[8] ORESCANIN V,NAD K,MIKELIC L,et al. Utilization of bauxite slag for the purification of industrial wastewaters[J]. Process Safety and Environmental Protection,2006,84(4):265-269.

[9] P·索马桑德兰,崔洪山,李长根.矿物加工中的生物药剂的应用[J].国外金属矿选矿,2000(11):10-12,35.
SOMAS P,CUI H S,LI C G. Application of biological agents in mineral processing[J]. Metallic Ore Dressing Abroad,2000(11):10-12,35.

[10] 初少华.巨大芽孢杆菌对次生盐渍化土壤硝酸盐的转化途径及其机理研究[D].上海:上海交通大学,2019.
CHU S H. Transformation pathway and mechanism of *Bacillus macrosifloracis* to secondary saline soil nitrate[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2019.

[11] 程帆,袁向芬,谢承卫.巨大芽孢杆菌(ACCC10011)制备煤矸石肥料的研究[J].现代化工,2013,33(8):65-68.
CHENG F,YUAN X F,XIE C W. Study on the preparation of coal gangue fertilizer by *Bacillus megaterium* (ACCC10011)[J]. Modern Chemical Industry,2013,33(8):65-68.

[12] 师晓娜.不同包装材料对南果梨贮藏保鲜效果的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
SHI X N. Effect of different packaging materials on the storage and preservation effect of Nanguo pear[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2009.

[13] 庞宁.复合微生物菌剂促进水稻改良盐碱地的研究[D].长春:吉林农业大学,2021.
PANG N. The compound microbial fungal agent promotes the study of improved saline-alkali land in rice[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2021.

[14] KONG X F,TIAN T,XUE S G,et al. Development of alkaline electrochemical characteristics demonstrates soil formation in bauxite residue undergoing natural rehabilitation[J]. Land Degradation and Development,2018,29(1):58-67.

[15] 张毅,莫皓然.赤泥脱碱技术研究进展[J].中国有色冶金,2019,48(2):26-29,33.
ZHANG Y,MO H R. Research progress of red mud alkali removal technology[J]. China Nonferrous

Metallurgy,2019,48(2):26-29,33.

[16] 宋建,赵尚昆,李方方,等.耐盐碱细菌筛选、鉴定及其降碱机理探究[J].有色金属(冶炼部分),2021(9):48-53,103.
SONG J, ZHAO S K, LI F F, et al. Screening, identification and alkali-lowering mechanism of saline-resistant bacteria[J]. Non-Ferrous Metals (Extractive Metallurgy),2021(9):48-53,103.

[17] 薛生国,李晓飞,孔祥峰,等.赤泥碱性调控研究进展[J].环境科学学报,2017,37(8):2815-2828.
XUE S G,LI X F,KONG X F,et al. Research progress on alkaline regulation of red mud [J]. Journal of Environmental Science,2017,37(8):2815-2828.

[18] SANTINI T C, KERR J L, WARREN L A. Microbially-driven strategies for bioremediation of bauxite residue[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015,293:131-157.

[19] 巩文辉,朱晓波,李望,等.煤矸石原生菌溶磷效果分析及产酸性能优化[J/OL].煤炭科学技术:1-13[2023-03-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20220923.1149.002.html.
GONG W H, ZHU X B, LI W, et al. Phosphorus dissolving effect analysis and acid producing performance optimization of coal gangue protobacteria[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-13 [2023-03-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20220923.1149.002.html.

[20] 李欣.微生物菌剂对盐碱胁迫下玉米幼苗的促生效果研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
LI X. Effect of microbial agent on growth promotion of maize seedlings under saline-alkali stress[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2022.

[21] 连宾,傅平秋,莫德明,等.硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应[J].矿物学报,2002,22(2):179-183.
LIAN B, FU P Q, MO D M, et al. Comprehensive effect of potassium hydrolysis mechanism of silicate bacteria[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(2): 179-183.

[22] JONES B E H, HAYNES R J, PHILLIPS I R. Influence of organic waste and residue mud additions on chemical, physical and microbial properties of bauxite residue sand[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2011,18(2):199-211.

[23] OTTENHOF C J M,CANO Á F,AROCENA J M, et al. Soil organic matter from pioneer species and its implications to phytostabilization of mined sites in the Sierra de Cartagena (Spain)[J]. Chemosphere,2007, 69(9):1341-1350.