

文章编号: 1004-0609(2004)02-0280-06

硅酸盐细菌的选育及铝土矿细菌脱硅效果^①

钮因健, 邱冠周, 周吉奎, 覃文庆
(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为了找到能从高硅含量铝土矿中脱硅的细菌, 利用无氮铝硅酸盐矿物培养基对菜园土、生物钾肥、铝土矿等材料进行了硅酸盐细菌的分离, 筛选到一株编号为 GSY-5[#] 的产荚膜芽孢杆菌。通过对该细菌的形态、生理生化等表型特征以及固体、液体培养条件研究, 发现该细菌菌体大小为(1~1.2) μm $\times$ (4~7) μm , 荚膜呈椭圆形, 大小为(5~15) μm $\times$ (10~30) μm ; 培养后期产生芽孢, 芽孢呈椭圆形, 大小为(1.5~1.7) μm $\times$ (3~4) μm 。显微镜下观察细菌不运动, 没有观察到鞭毛。该菌生长最适 pH 为 7.3~8.4, 最适生长温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ 。在矿物盐固体培养基上生长良好, 具有较强的固氮能力。通过比较该菌与胶质芽孢杆菌模式菌株的生理生化特征, 可认为 GSY-5[#] 菌株是硅酸盐细菌胶质芽孢杆菌。使用 GSY-5[#] 菌株对 5 种含有不同铝硅酸盐矿物的铝土矿进行了生物脱硅研究, 浸出条件为 pH 7.2, 30 $^{\circ}\text{C}$, 200 r/min, 矿浆含量 5%, 浸出 7 d。5 种矿样的 A/S 分别从 4.58, 6.74, 6.03, 5.09, 2.93 提高到 5.88, 8.45, 8.55, 6.79, 13.54, 表明该株硅酸盐细菌具有一定的脱硅能力。

关键词: 硅酸盐细菌; 胶质芽孢杆菌; 筛选; 模式菌株; 表型特征; 铝土矿; 脱硅

中图分类号: Q 939.97; TD 952.5

文献标识码: A

Screening of silicate bacteria and bioleaching silicon from bauxite

NIU Yin-jian, QIU Guan-zhou, ZHOU Ji-kui, QIN Wen-qing
(School of Resources Processing and Bioengineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to obtain some strains of bacterium which may liberate silicate from bauxite with a high Si content, some strains of bacterium were isolated from materials such as garden soil, biological fertilizer and bauxite mineral using nitrogen media. The phenotype characteristics such as morphology, physiology and biochemical tests show that GSY-5[#] bacteria belong to *Bacillus* sp because they are rod shaped and can produce oval endospore. The sizes of bacteria and endospore are (1~1.2) μm $\times$ (4~7) μm and (1.5~1.7) μm $\times$ (3~4) μm , respectively. The cultivating conditions of GSY-5[#] on solid media and in liquid media were identified. The results show that GSY-5[#] grows best within pH range of 7.3~8.4, and the optimum temperature for the growth is 30 $^{\circ}\text{C}$. The microorganism can fix nitrogen because it grows very well on solid nitrogen-free mineral media and show apparent capsule. It can produce a rich variety of exopolysaccharide in liquid nitrogen-free media. In comparison of characteristics of GSY-5[#] bacteria with those of mold strain of *Bacillus mucilaginosus*, GSY-5[#] bacteria are a strain of *Bacillus mucilaginosus*. In this experiment five bauxite samples containing aluminosilicates as impurities were leached with silicate bacteria GSY-5[#] at pH 7.2, 30 $^{\circ}\text{C}$, 200 r/min, for 7 days, and the ratio of Al_2O_3 to SiO_2 (A/S) in samples is increased from 4.58 to 5.88, from 6.74 to 8.45, from 6.03 to 8.55, from 5.09 to 6.79 and from 2.93 to 13.54, respectively. The leaching results indicate that leaching with silicate bacteria is useful in the improvement of low-grade high-SiO₂ bauxite.

Key words: silicate bacteria; *bacillus mucilaginosus*; screening; mold strain; phenotype characteristics; bauxite

1912 年巴撒立克从蚯蚓肠道中分离出一种能分解硅酸盐的细菌。1939 年前苏联学者亚历山大罗夫和扎克直接从土壤中分离得到这种细菌, 并将其称为硅酸盐细菌 (Silicate bacteria)^[1]。该细菌是土壤中一种特殊的细菌, 它能分解仅仅由硅酸盐和铝硅酸盐组成的岩石矿物, 不仅具有溶磷、解钾、释硅的作用, 亦有固氮能力^[2, 3]。原苏联学者把它命名为胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*), 在我国的菌种目录上为胶胨样芽孢杆菌, 还有的报道认为是环状芽孢杆菌 (*Bacillus circulans*)^[4, 5]。

国内外学者对硅酸盐细菌进行了多方面的研究^[4, 6, 7]。例如形态学的基本研究, 利用该菌的菌体蛋白或其他代谢产物作为饲料应用研究, 将其作为生物钾肥应用的研究最多。硅酸盐细菌在矿物加工领域的研究还停留在基础阶段, 但在该方面的应用前景广泛^[5, 6, 8-11]。作者对铝土矿细菌脱硅进行了探索性研究, 成功地分离到了多株硅酸盐细菌, 并研究了铝土矿的细菌脱硅效果。

1 实验

1.1 细菌分离材料

1) 土壤: 在中南大学对面左家垅菜地 3 个不同地方取土壤, 分别编为 1[#], 2[#], 3[#]; 岳麓山上 2 个不同地方的土壤为 4[#], 5[#]。

2) 生物钾肥: 湖南某厂产的生物钾肥, 编为 6[#]。

3) 河南铝土矿: 由本实验室提供, 编为 7[#]。

1.2 培养基

1) 分离与计数用固体培养基^[12]: 蔗糖 5 g, Na_2HPO_4 2 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, FeCl_3 0.005 g, CaCO_3 0.1 g, 铝土矿⁻ 0.5 g, 琼脂 10~20 g, 水 1 000 mL, pH 7.0~7.5。121 °C 灭菌 20 min。活细菌计数采用平板计数法进行测定。

2) 液体培养基^[12]: 蔗糖 5 g, Na_2HPO_4 2 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, FeCl_3 0.005 g, CaCO_3 0.1 g, 铝土矿⁻ 0.5 g, 水 1 000 mL, pH 7.0~7.5。121 °C 灭菌 20 min。

1.3 分离方法

采用平板稀释分离法进行分离^[12]。

1) 做平板。将固体培养基加热熔化, 待冷至 55~60 °C 时, 分别倒入 28 个 (9 cm) 已灭菌的培养

皿中, 每个倒入 10~15 mL 培养基, 室温下凝固成平板即可。

2) 制备细菌悬浮液。取 7 种不同的分离材料各 10 g, 分别加入到装有 90 mL 无菌水的锥形瓶中, 然后在搅拌器上充分搅拌 15 min, 使细菌从分离材料上洗脱下来, 搅拌后静置 20 min, 得到细菌悬液。将上层悬液用 10 倍稀释法依次稀释成 4 种不同浓度的细菌悬液。

3) 涂布平板。用移液器分别取细菌悬液各 0.5 mL, 依次倾入上述培养基平板上, 用无菌玻璃棒均匀地把悬液涂开。

4) 将平板置于 28 °C 温箱中培养 24 h, 待平板表面不再有水滴滴时, 倒置平板, 培养 3~5 d, 随时观察细菌菌落生长情况。

5) 挑单菌落培养。根据菌落长出的时间以及菌落的形态, 从培养基平板上挑出黏液状凸起的透明菌落, 进行再培养, 直到获得纯培养。

1.4 细菌的形态与生理生化特性研究

1) 培养性状观察。把 GSY—5[#] 细菌分别接种于硅酸盐培养液、琼脂斜面和琼脂平面上, 28 °C 培养 48 h, 观察液体中细菌的生长情况以及平板与斜面上菌落与菌苔性状。

2) 细菌的形态观察^[10]。细菌培养 24~48 h, 用悬滴法观察细菌的运动, 对处于对数期的细菌分别进行革兰氏染色、芽孢染色、荚膜染色、鞭毛染色, 观察细菌的形态, 测量细菌的大小。

3) 平板培养基的最适 pH 研究。将硅酸盐细菌平板分离 (测数) 培养基的 pH 调到以下 5 个值处理: 5.6, 6.6, 7.3, 8.4, 9.1。用培养 48 h 的菌液, 稀释后分别涂布到以上 5 种不同 pH 的平板上, 根据长出的菌落数测定各处理的活细菌数。

4) 液体培养基中细菌生长的最适 pH 研究。将硅酸盐细菌液体培养基的 pH 调到以下 7 个值处理: 4.7, 5.5, 6.1, 6.7, 7.5, 8.2, 9.1。用培养 48 h 的菌液, 按 1% 的比例分别接种到以上 7 种不同 pH 的硅酸盐液体培养基中, 将摇瓶于 28 °C、200 r/min 的条件下培养 48 h, 测定各处理摇瓶培养液中的活细菌数^[7]。

5) 培养温度对细菌生长的影响。用培养 48 h 的菌液, 按 1% 的比例接种到硅酸盐液体培养基中, 分别在 15, 25, 30, 36, 45 °C 的条件下静置培养 72 h, 测定不同温度下培养液中的活细菌数。

6) 细菌其它生理生化特性研究。采用常规方法进行^[13], 主要测定几种大分子物质的水解, 碳素

化合物与氮素化合物的分解利用, 是否产生氧化酶与过氧化氢酶等几种主要生理生化特性。

1.5 铝土矿细菌脱硅效果研究

用硅酸盐细菌 GSY-5[#] 对 A、B、C、D、E 共 5 个矿样进行生物脱硅试验。其中矿样 A 为河南铝土矿原矿石, B、C、D、E 分别为一水硬铝石与高岭石、伊利石、叶蜡石、石英按照 4:1(质量比)的比例配成的 4 种不同的人工混合矿, 各矿样中的 Al₂O₃ 和 SiO₂ 含量见表 1。实验在 250 mL 的锥形瓶中进行, 每个瓶中装有 90 mL 无 N 液体培养基, 5 g 矿样(粒径 < 75 μm), 接种 10 mL 已在含铝土矿的液体培养基中处于对数生长期的 GSY-5[#] 硅酸盐细菌。锥形瓶置于转速为 200 r/min 的振荡培养箱中, 在 30 ℃ 条件下培养 7 d。然后静置使矿浆体系自然沉降 60 min, 收集固体浸渣, 并用 0.1% 的 NaOH 溶液对固体浸渣洗涤 5 min, 洗后的固体浸渣为铝土矿精矿。对浸出精矿进行 Al₂O₃ 和 SiO₂ 含量测定, 分析细菌脱硅效果。

表 1 浸出前 5 种矿样中 Al₂O₃ 和 SiO₂ 含量(质量分数, %)

Table 1 Contents of Al₂O₃ and SiO₂ of bauxite samples(mass fraction, %)

Bauxite sample	Al ₂ O ₃	SiO ₂	A/S
A	60.71	13.26	4.58
B	69.99	10.38	6.74
C	68.9	11.42	6.03
D	68.92	13.54	5.09
E	62.3	21.28	2.93

2 结果与分析

2.1 细菌分离结果

硅酸盐细菌分离平板在 28 ℃ 下培养 48 h, 开始有菌落长出。研究中发现不同分离材料中长出的菌落数量有差异, 其中土壤材料在硅酸盐细菌分离平板上长出的菌落数最多, 铝土矿材料分离出的菌落数最少。根据菌落生长情况, 先后挑出 13 株菌落为圆形、透明的细菌, 分别编号为 GSY-1~13[#]。这 13 株细菌在硅酸盐细菌平板培养基上进行培养, 通过与同时培养的硅酸盐细菌胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*) 模式菌株的菌落进行比较, 发现 GSY-5[#] 菌株的菌落呈圆形, 边缘整齐, 表面湿润, 透明, 菌落挑起时富有弹性, 可拉成丝,

与模式菌株的菌落形态最为相似。这样挑出 GSY-5[#] 细菌进行纯培养, 对该菌的形态、培养特性以及生理生化特性进行研究及鉴定。

2.2 细菌培养性状

2.2.1 培养液中细菌的培养性状

把 GSY-5[#] 细菌接入 pH=7.3 的硅酸盐细菌液体培养基中, 在 28 ℃、150 r/min 条件下培养 48 h, 细菌浓度达到 10⁸ 个/mL, 细菌生长良好。28 ℃ 静置培养 48 h, 细菌浓度也达到 10⁷ 个/mL 以上。摇瓶与静置两种条件下培养的菌液都无色透明、粘稠, 可拉成丝。当在培养基中加入 0.1% 的酵母浸膏时, 细菌的生长速度加快, 细菌浓度升高, 但菌液粘度降低。

2.2.2 琼脂平板上细菌的培养性状

接种在固体平板上的 GSY-5[#] 细菌在 30 ℃ 下培养 48 h, 菌落呈圆形、凸起, 边缘整齐, 表面湿润, 透明, 有弹性, 挑起时可拉成丝, 很难挑取, 见图 1。

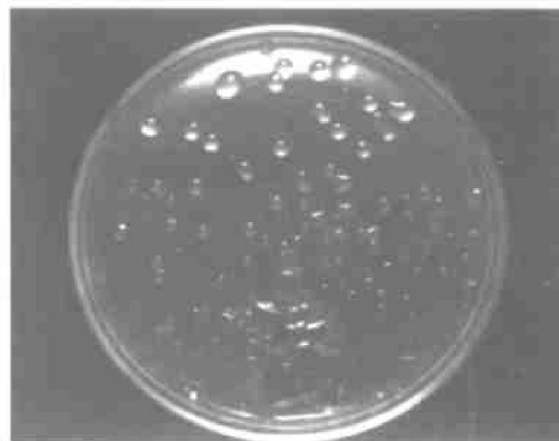


图 1 GSY-5[#] 细菌菌落形态

Fig. 1 Lucent type colony of GSY-5[#] strain

2.2.3 琼脂斜面上细菌的培养性状

斜面上培养, 菌苔表面光滑, 平坦均匀, 质地粘质, 透明。

2.3 细菌的形态观察

对固体平板上生长处于对数期的 GSY-5[#] 细菌进行革兰氏染色、芽孢染色、荚膜染色、鞭毛染色、悬滴法观察、电镜观察。发现该细菌是大荚膜杆菌, 菌体长杆状, 大小为(1~1.2) μm × (4~7) μm, 见图 2。细菌荚膜很厚, 呈椭圆形, 大小为(5~15) μm × (10~30) μm, 与文献[5]报道的图 3 相似。革兰氏染色阴性。产生芽孢时, 菌体中央部分变粗, 芽孢呈椭圆形, 大小为(1.5~1.7) μm × (3

~ 4) μm 。显微镜下观察细菌不运动。鞭毛染色没有观察到鞭毛。

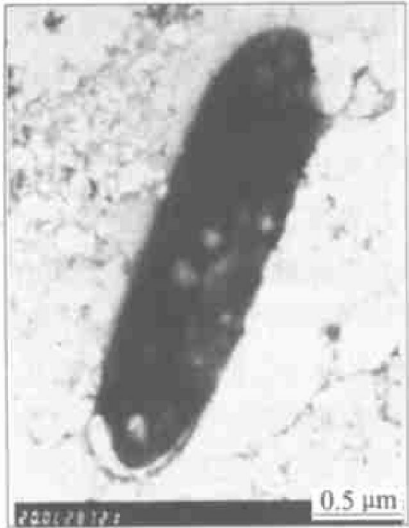


图 2 GSY-5[#] 细菌形态(TEM)

Fig. 2 TEM image of GSY-5[#] strain

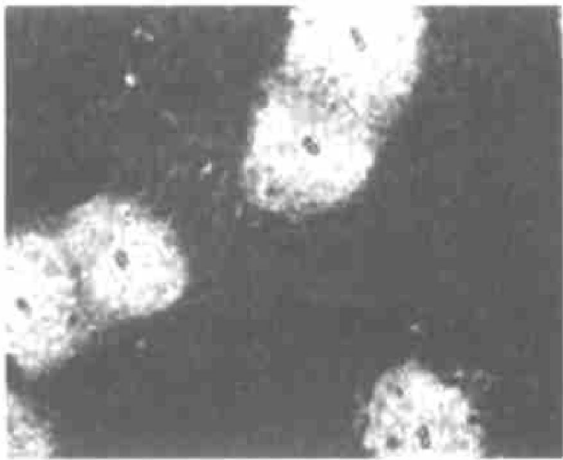


图 3 GSY-5[#] 细菌的荚膜^[5]

Fig. 3 Micrograph of capsule of GSY-5[#] strain

2.4 pH 对细菌生长的影响

测定了 5 种不同 pH 的平板上菌落数量和 7 种不同 pH 的液体培养基中细菌浓度, 结果见表 2 和表 3。发现不论是在固体平板上还是在液体培养基中, 在 pH= 7.3~ 8.4 时细菌生长最好, 在 pH= 6.1~ 9.1 范围内细菌都能生长。

2.5 温度对细菌生长的影响

将初始细菌浓度为 6.4×10^5 个/mL 的 GSY-5[#] 细菌培养液分别在 15, 25, 30, 36, 45 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下静置培养 48 h, 检测 5 种温度下培养液中的细菌浓度, 结果见表 4。发现 GSY-5[#] 细菌的最适生长温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 在 15 $^{\circ}\text{C}$ 以下和 45 $^{\circ}\text{C}$ 以上不能生长。与表 2、表 3 中的细菌浓度比较, 发现 GSY-5[#] 细菌在摇瓶培养时生长快, 表明该细菌生长好气。

2.6 GSY-5[#] 细菌的主要生理生化性状

对 GSY-5[#] 细菌的几项主要生理生化指标进行了测定, 包括对淀粉、明胶 2 种大分子化合物的分解, 对葡萄糖、蔗糖、果糖等碳素化化合物的利用和分解, 对硝酸盐、苯丙氨酸等 2 种氮素化化合物的利用和分解, 以及细菌的接触酶反应, 测定结果见表 5。可以发现, GSY-5[#] 细菌与 *B. mucilaginosus* 模式菌株的生理生化特性是相同的。

2.7 GSY-5[#] 细菌对不同类型含硅铝土矿浸出效果

GSY-5[#] 细菌对 6 种铝土矿样的脱硅效果见表 6。可以发现, 该细菌对一水硬铝石与高岭石、

表 2 平板测数培养基的 pH 值对细菌生长的影响(单位: 个/mL)

Table 2 Effect of pH value of solid plate on bacterial growth (unit: cfu/mL)

Original pH value	5.6	6.7	7.3	8.4	9.1
Number of bacterium	1.9×10^7	8.0×10^7	1.4×10^8	1.3×10^8	5.1×10^7

表 3 摇瓶液体培养基中 pH 值对细菌生长的影响(单位: 个/mL)

Table 3 Effect of pH value of liquid culture medium on bacterial growth (unit: cfu/mL)

Original pH value	4.7	5.5	6.1	6.7	7.5	8.2	9.1
Number of bacterium	5.9×10^5	5.1×10^6	1.9×10^7	9.0×10^7	1.5×10^8	1.3×10^8	9.1×10^7

表 4 温度对 GSY-5[#] 细菌生长的影响(单位: 个/mL)

Table 4 Effect of temperature on bacterial growth (unit: cfu/mL)

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	15	25	30	36	45
Number of bacterium	3.3×10^4	2.1×10^6	4.2×10^6	3.9×10^6	5.9×10^3

表 5 GSY—5[#] 的一些主要生理生化特性

Table 5 Main physiological and biochemical characteristics of GSY—5[#] strain

Physiological and biochemistrical reactions	<i>B. mucilaginosus</i>	GSY—5 [#]
Decomposition of high molecular mass compound		
Amylum	+	+
Glutin	+	+
Decomposition of carbohydrate		
Glucose	+	+
Sucrose	+	+
Fructose	+	+
Lactose	+	+
Maltose	+	+
D-mannitol	+	+
Citrate	-	-
Decomposition of nitric compound		
Nitrate	-	-
Phenylalanine	-	-
Other reactions		
Catalase	+	+
Oxidase	-	-

“+” indicates positive reaction; “-” indicates passive reaction

伊利石、叶蜡石、石英配成的人工混合矿均有一定的脱硅效果。其中与高岭石配的矿样的 A/S 由浸出前的 6.74 提高到 8.45，与伊利石配的矿样的 A/S 由浸出前的 6.03 提高到 8.55，与叶蜡石配的矿样的 A/S 由浸出前的 5.09 提高到 6.79，而与石英配的矿样的 A/S 则由浸出前的 2.92 提高到 13.54，效果最好。且 Al₂O₃ 回收率高，都在 90% 以上。但发现 GSY—5[#] 细菌对河南铝土矿原矿石的脱硅效果不理想，A/S 仅从浸出前的 4.58 提高到 5.88，且 Al₂O₃ 回收率不高，只有 73%。但从总体研究结果来

看，GSY—5[#] 硅酸盐细菌具有一定的脱硅能力。

2.8 硅酸盐细菌浸矿机理分析

硅酸盐细菌对铝硅酸盐矿物的作用机理目前说法不一^[5, 9, 14]。Grondeva^[4] 认为硅酸盐细菌对铝硅酸盐的作用与矿物结构的破坏、其中组分的溶解和富高岭土微粒从铝土矿中分出有关，分解作用是由细菌分泌的有机酸(主要是草酸和柠檬素)完成的。分泌粘液的细菌胶囊能包围高岭土微粒，认为具有较大的分泌粘液的胶囊和形成酸的能力较强的菌种，脱硅的效果最好。但有研究^[9] 发现硅酸盐细菌在培养过程中很少产酸，本研究也发现该细菌在培养过程中很少产酸，并且解矿作用不明显，但硅酸盐细菌在培养过程中会产生大量的胞外多糖。本研究发现，高岭石、伊利石、叶蜡石以及石英的微细颗粒(粒径< 75 μm)在这种多糖溶液中具有较好的分散性能，其中石英的分散稳定性最好。而同样粒径的一水硬铝石在该溶液中会很快沉淀。认为硅酸盐细菌对铝土矿脱硅主要是由于胞外多糖产生的生物浮选作用所致，矿石中的铝硅酸盐矿物特别是石英分散到浸出液中，一水硬铝石则絮凝沉淀形成精矿^[15]。硅酸盐细菌对铝土矿的脱硅机理以及对铝硅酸盐矿物的分解作用很复杂，有待于具体研究。

3 结论

1) 硅酸盐细菌是能够分解铝硅酸盐矿物并具有固氮能力的一类芽孢杆菌，因此采用铝硅酸盐矿物无氮培养基可分离得到该类细菌。本研究中分离到一株编号为 GSY—5[#] 的芽孢杆菌，通过对该菌株进行形态、生理生化等表型特征以及固体、液体培养条件研究，与胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*) 模式菌株以及文献[13]报道的结果进行比较，表明 GSY—5[#] 菌株是一株硅酸盐细菌胶质

表 6 硅酸盐细菌 GSY—5[#] 对铝土矿中硅的浸出效果

Table 6 Result of silicate bacteria GSY—5[#] leaching silicon from bauxite

Bauxite sample	Pre bioleaching			Post bioleaching			Recovery rate of Al ₂ O ₃ / %
	w (Al ₂ O ₃) / %	w (SiO ₂) / %	A / S	w (Al ₂ O ₃) / %	w (SiO ₂) / %	A / S	
A	60.71	13.26	4.58	62.66	10.65	5.88	73.0
B	69.99	10.38	6.74	70.36	8.33	8.45	92.9
C	68.90	11.42	6.03	72.15	8.44	8.55	97.8
D	68.92	13.54	5.09	71.22	10.49	6.79	95.9
E	62.30	21.28	2.93	74.21	5.48	13.54	97.1

芽孢杆菌。

2) 使用硅酸盐细菌 GSY-5[#] 浸出含有各种铝硅酸盐矿物的铝土矿, 在 pH 7.2、30℃、200 r/min、5% 矿浆浓度的浸出条件下, 浸出 7 d, 5 种矿样的 A/S 分别从 4.58、6.74、6.03、5.09、2.93 提高到 5.88、8.45、8.55、6.79、13.54。表明该株硅酸盐细菌对高硅铝土矿具有一定的脱硅效果。

3) 对铝土矿细菌脱硅的机理进行了初步分析。认为产酸不是细菌脱硅的主要原因, 细菌对铝硅酸盐矿物的分解作用也不明显。细菌对铝土矿脱硅主要是由于细菌生长过程中产生的胞外多糖对矿物的生物浮选作用, 使矿石中的铝硅酸盐矿物微粒特别是石英分散到浸出液中, 而一水硬铝石则絮凝沉淀形成精矿。

4) 采用生物方法进行铝土矿脱硅, 不仅可以提高铝土矿品位, 使低品位铝土矿质量提高, 同时可最大限度地满足环保要求。因此应该进一步选育该类细菌, 从中筛选脱硅效果好的菌株, 为铝土矿生物脱硅研究提供足够多的菌种材料, 同时优化浸出条件, 为大规模工业应用打下基础。

REFERENCES

- [1] 亚历山大罗夫. 硅酸盐细菌[M]. 叶维青译. 北京: 科学出版社, 1955.
Alexandrov. Silicate Bacteria[M]. YE Wei-qing transl. Beijing: Science Press, 1955.
- [2] 池景良, 葛英华. 硅酸盐细菌解钾活性的研究[J]. 微生物学杂志, 1999, 19(2): 43-51.
CHI Jing-liang, GE Ying-hua. Study on potassium releasing activity of silicate bacteria[J]. Journal of Microbiology, 1999, 19(2): 43-51.
- [3] 李明, 张灼, 樊竹青, 等. 硅酸盐细菌 JF88 菌株磷化作用的研究[J]. 云南环境科学, 2000, 19(4): 11-13.
LI Ming, ZHANG Zhuo, FAN Zhuqing. Study on phosphorization of silicate bacteria JF88[J]. Yunnan Environment Science, 2000, 19(4): 11-13.
- [4] Grondova V I. Bauxite dressing by means of bacillus circulans[J]. Eur Congr Biotechnol, 3rd, 1984, 2: 211-216.
- [5] 连宾, Smith D L, 傅平秋. 硅酸盐细菌在工农业生产中的应用及其作用机理[J]. 贵州科学, 2000, 18(1-2): 43-53.
LIAN Bin, Smith D L, FU Ping-qiu. Application and mechanism of silicate bacteria in agriculture and industry [J]. Guizhou Science, 2000, 18(1-2): 43-53.
- [6] Groudrev S. Use of heterotrophic microorganisms in mineral biotechnology[J]. Acta Biotechnol, 1987, 7(4): 299-306.
- [7] Ullman W J, Kirchman D L, Welch S A, et al. Laboratory evidence for microbially mediated silicate mineral dissolution in nature[J]. Chem Geol, 1996, 132(1-4): 11-17.
- [8] 吴小琴. 硅酸盐细菌的应用概况[J]. 江西科学, 1997, 15(1): 60-66.
WU Xiao-qin. Applicable basic facts of silicate bacteria [J]. Jiangxi Science, 1997, 15(1): 60-66.
- [9] 周吉奎, 胡岳华, 邱冠周. 硅酸盐细菌在矿物工程领域应用研究进展[J]. 金属矿山, 2002(1): 26-28.
ZHOU Ji-kui, HU Yue-hua, QIU Guan-zhou. Advances in the application research of silicate bacteria in mineral engineering field[J]. Metal Mine, 2002(1): 26-28.
- [10] 李聆值. 采用生物技术提高铝土矿质量[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(Suppl. 2): 361-364.
LI Ling-zhi. Improving bauxite quality using biological technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(Suppl. 2): 361-364.
- [11] 姜涛, 邱冠周, 李光辉, 等. 中低品位铝土矿选矿预脱硅的新进展[J]. 矿冶工程, 1999, 19(2): 3-6.
JIANG Tao, QIU Guan-zhou, LI Guang-hui, et al. Pre-desilication of mid-low grade bauxite using processing methods—Recent advances[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1999, 19(2): 3-6.
- [12] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
SHEN Ping, FAN Xiurong, LI Guangwu. Microbiology Experiment[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [13] 廖延雄, 傅筱冲, 蔡汝林, 等. 一株硅酸盐细菌的表型特征[J]. 江西科学, 2000, 18(3): 149-153.
LIAO Yan-xiong, FU Xiao-chong, CAI Ru-lin. The phenotype characteristics of a silicate bacterium[J]. Jiangxi Science, 2000, 18(3): 149-153.
- [14] 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 Bin, FU Ping-qiu, MO De-ming, et al. A comprehensive review of the mechanism of potassium releasing by silicate bacteria[J]. Acta Mineral Sinica, 2002, 22(2): 179-183.
- [15] Andreev P I, Andreeva G S, Sidiyakina G G. Bioflotation, its possibilities and prospects[J]. Razved Okhr Nedr, 1992(2): 27-28.

(编辑 袁赛前)