

文章编号: 1004 - 0609(2005) 12 - 2016 - 07

Nocardia 在黄铁矿和方铅矿表面的选择性吸附^①

沈岩柏¹, 李晓安², 魏德洲¹, 朱一民¹, 贾春云¹, 韩 聪¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 鞍山科技大学 土木与交通工程学院, 鞍山 114044)

摘 要: 研究了 *Nocardia* 在不同影响因素条件下在黄铁矿和方铅矿表面的选择性吸附。结果表明: *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面可发生明显的选择性吸附, 在黄铁矿表面的最大吸附率为 96.99%; 而在方铅矿表面的吸附率为 20% 左右; 两种矿物表面的吸附在较短的时间内即可达到平衡; pH 值是影响 *Nocardia* 在两种矿物表面发生选择性吸附的关键因素, 当 pH 为 3~10 时, 选择性吸附现象明显; 而当矿浆浓度超过 6 g/L 和菌液浓度为 0.5~4 g/L 时, 有利于选择性吸附; 温度对吸附效果影响较小。扫描电镜检测结果表明, *Nocardia* 细胞外膜表面的菌丝是重要的吸附位; 矿物解理面状态、*Nocardia* 表面基团的桥连作用和静电力是导致选择性吸附的关键。

关键词: 黄铁矿; 方铅矿; 硫化矿物; 选择性吸附; 生物浮选

中图分类号: TD 925

文献标识码: A

Selective adsorption of *Nocardia* on surface of pyrite and galena

SHEN Yan-bai¹, LI Xiao-an², WEI De-zhou¹,
ZHU Yi-min¹, JIA Chun-yun¹, HAN Cong¹

(1. School of Resources and Civil Engineering,
Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Civil and Traffic Engineering,
Anshan University of Science and Technology, Anshan 114044, China)

Abstract: The selective adsorption of *Nocardia* on the surface of pyrite and galena was studied under the condition of various factors. The results show that selective adsorption of *Nocardia* on the surface of pyrite and galena is obvious. The maximum adsorption rate on the surface of pyrite is 96.99%, that on the surface of galena is about 20%. The adsorption balance can reach in a short time on the surface of both two sulfides. pH value is the key factor of influencing *Nocardia* selective adsorption on the surface of pyrite and galena, and the adsorption effect is apparent when pH is 3~10. The mineral slurry concentration over 6 g/L and bacterium density between 0.5 and 4 g/L are favorable to selective adsorption. Temperature has little effect on the attachment. The SEM result indicates that the mycelium on the surface of ectoblast of *Nocardia* cell is the important adsorption area. According to the experiments, it can be concluded that the state of mineral cleavage plane, the bridging function of the group on the surface of *Nocardia* and the electrostatic force are important factors.

Key words: pyrite; galena; sulphide mineral; selective adsorption; bioflotation

利用微生物细胞及其代谢产物对矿物表面进行 改性生物浮选技术(Bioflotation)是近年来新兴的工

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50174014); 辽宁省自然科学基金资助项目(20022025); 沈阳市经贸委(技术创新)项目(2003061)

收稿日期: 2005-03-23; 修订日期: 2005-07-28

作者简介: 沈岩柏(1978-), 男, 博士研究生

通讯作者: 沈岩柏, 电话: 024-81615395; E-mail: syb.neu@eyou.com

艺技术,它具有分选效果好、工艺简单、生产成本低和不污染环境等许多优点^[1-4]。在利用微生物浸矿的过程中,人们就逐渐注意到某些矿物的可浮性会随着浸出过程的进行而发生改变,这些现象表明可以利用微生物细胞吸附在矿物表面来调整矿物的可浮性,从而实现两种或多种矿物间的分离^[5, 6]。将微生物作为选矿药剂的研究及应用在国外开展得较早,研究主要包括微生物捕收剂、微生物絮凝剂和微生物调整剂,目前已取得了较多的研究成果,并在工业上有所应用^[7-12]。国内在微生物调整剂方面的研究较多,主要应用在煤脱硫的研究中^[13-17],而在其它方面的研究则较少。已进行的关于微生物在矿物表面吸附的研究,大多数为探讨影响微生物吸附量的因素、微生物吸附量与浸出效果的关系以及发生吸附后的宏观效果,对于微生物对混合矿物的选择性吸附和作用机制的研究较少。本文作者研究了微生物 *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的选择性吸附情况,考察了各吸附实验因素对其吸附效果的影响,并对吸附机理进行了初步探讨,为开发新型、环保和具有选择性的微生物浮选药剂奠定基础。

1 实验

1.1 材料

实验采用的黄铁矿和方铅矿均来源于辽宁省八家子铅锌矿,化学成分为黄铁矿: Fe 45.91%, S 49.42%; 方铅矿: Pb 85.28%, S 14.19%。分析结果表明两种矿样的纯度很高,用球磨机湿磨,取小于 75 μm 的矿样用于吸附实验的研究。

实验选用的微生物为 *Nocardia*, 代号为 AS. 4. 1126, 菌种由中国科学院微生物研究所菌种保存中心提供。

1.2 方法

1.2.1 *Nocardia* 的培养

Nocardia 的培养基配方为牛肉膏 3 g, 蛋白胨 5 g, 氯化钠 5 g, 蒸馏水 1 L, pH 为 7.0~7.2。培养基采用高温灭菌,在 CBV-1000A 生物洁净台接种后于 28 $^{\circ}\text{C}$, 150 r/min 振荡频率的条件下,在 HZQ-C 空气浴振荡器中培养 6 d。

1.2.2 *Nocardia* 细胞悬浊液的制备

取生长 6 d 的 *Nocardia* 培养液在 TGL-16G 离心分离机上于 16 000 r/min 离心分离 10 min, 将获得的 *Nocardia* 称取质量后再分散到体积一定的蒸

馏水中,于 85-2 型恒温磁力加热搅拌机上充分搅拌均匀即可制备出菌液浓度一定的 *Nocardia* 细胞悬浊液。

1.2.3 吸附实验

取菌液浓度一定的 *Nocardia* 细胞悬浊液 50 mL 于 120 mL 的小烧杯中,调节其 pH 值,然后加入定量的硫化矿物,在固定转速条件下进行吸附实验。

1.2.4 分析方法

采用分光光度法,以蒸馏水为参比溶液,在波长为 330 nm 的条件下测定 *Nocardia* 细胞悬浊液的吸光度值。

1.2.5 吸附率 Q 的计算方法

吸附率的计算式为

$$Q = (A_0 - A) / A_0$$

式中 Q 为吸附率; A_0 和 A 分别为吸附前后 *Nocardia* 细胞悬浊液的吸光度值。

1.2.6 扫描电镜分析

用 SSX-550 型扫描电子显微镜对 *Nocardia* 进行了微观形貌观察。在测定前,需将 *Nocardia* 进行清洗、固定、脱水、干燥和喷金等处理。

2 结果和讨论

2.1 *Nocardia* 的生长曲线

隔一定时间取出 100 mL 实验条件下培养的 *Nocardia* 液,在 1.6×10^4 r/min 的转速下离心分离 10 min 后测定细菌的湿质量,绘制 *Nocardia* 的生长曲线(见图 1)。从图 1 可看出, *Nocardia* 经过很短的延滞期便可进入指数生长期,大约 72 h 后该菌

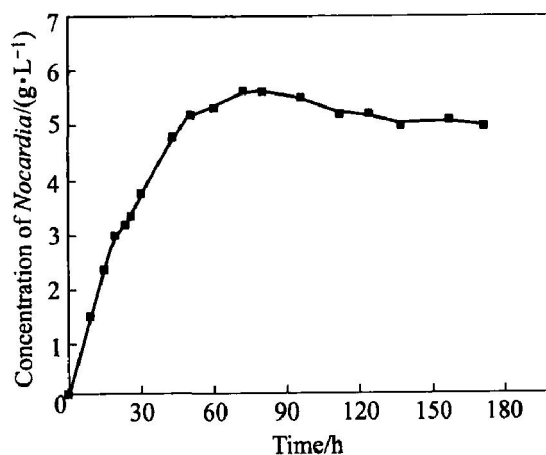


图 1 *Nocardia* 浓度随时间的变化曲线

Fig. 1 Change curve of *Nocardia* concentration with time

进入稳定生长期。细胞在指数生长期的初始阶段,表面的荚膜及粘液层并未发育完全;待细胞培养 120~160 h 后,细胞荚膜和菌丝生长完好,随后进入衰亡期。实验中所使用的 *Nocardia* 为生长 120 h 后的菌体。

2.2 吸附

2.2.1 吸附动力学

当 $\text{pH} = 6.82$ 时,矿浆浓度 $c_{\text{core}} = 10 \text{ g/L}$,菌液浓度 $c_{\text{bac}} = 1.517 \text{ g/L}$ 。在 $\theta = 26^\circ\text{C}$ 的实验条件下,改变吸附时间,测定 *Nocardia* 在两种硫化矿物表面的吸附情况,结果如图 2 所示。从图 2 中可看出,随着吸附时间的增加,*Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面上的吸附率逐渐上升,并在较短的时间内达到吸附平衡阶段。*Nocardia* 在黄铁矿表面的吸附情况较好,最高吸附率几乎达到 90% 左右;而在方铅矿表面上的吸附情况则较差,吸附率不超过 20%。整体而言,*Nocardia* 在两种硫化矿物表面上具有明显的选择性吸附。

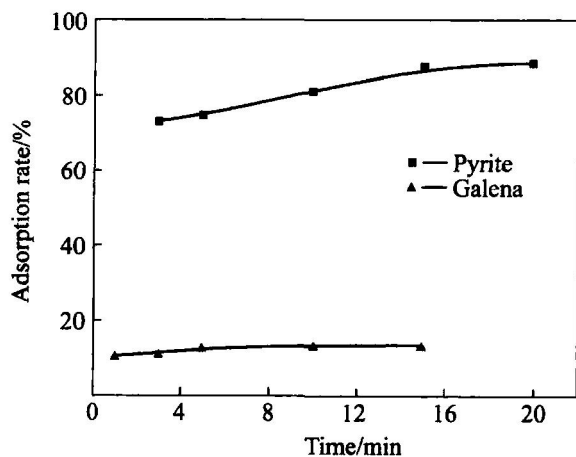


图 2 吸附时间对吸附率的影响

Fig. 2 Effect of adsorption time on adsorption rate

由实验数据可以推出在该吸附过程中,*Nocardia* 在黄铁矿(1)和方铅矿(2)表面的吸附动力学方程分别为

$$Y_1 = 67.2777 + 1.80705t - 0.03526t^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 9.77262 + 0.57668t - 0.02308t^2 \quad (2)$$

从吸附动力学方程可以得出,随着吸附时间的增加,吸附率呈逐渐上升趋势,并最终接近吸附平衡。在实际应用中,用该菌对两种硫化矿物进行处理,可以采用较少的吸附时间即可达到较好的选择性吸附效果。

2.2.2 溶液初始 pH 值对吸附过程的影响

在 $c_{\text{core}} = 10 \text{ g/L}$, $c_{\text{bac}} = 1.525 \text{ g/L}$, $t = 10 \text{ min}$, $\theta = 26^\circ\text{C}$ 的实验条件下,改变吸附溶液体系的初始 pH 值,并观察其对吸附过程的影响,结果如图 3 所示。从图 3 可看出,在强酸性条件($\text{pH} < 3$)和强碱性条件($\text{pH} > 10$)下,*Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的吸附率相差不大,选择性吸附不明显;而当 pH 为 3~10 时,*Nocardia* 在两种硫化矿物表面上显示出良好的选择性吸附。在此 pH 值范围内,*Nocardia* 在黄铁矿表面的吸附率几乎都在 80% 以上,最高可达到 95.26%;而在方铅矿表面的吸附率则普遍偏低,最低仅为 14.21%。

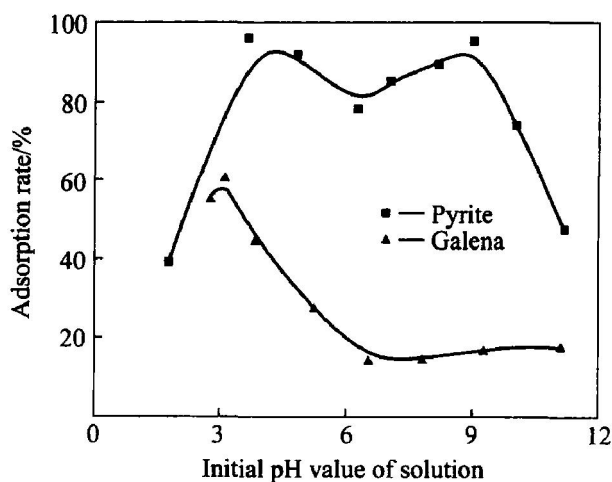


图 3 溶液初始 pH 值对吸附过程的影响

Fig. 3 Effect of initial pH value for solution on adsorption process

由文献[18]可知,黄铁矿和方铅矿的等电点均位于 $\text{pH} = 2.2$ 附近,此后随着 pH 值的增加,电泳迁移率逐渐向负值方向增加。*Nocardia* 的等电点在 $\text{pH} = 2.1$ 左右^[19],当 $\text{pH} > 2.1$ 时,*Nocardia* 表面带负电,因而静电力在吸附过程中作用较小。与此同时,*Nocardia* 在强酸性条件下有微量的聚团存在,致使少量细胞菌体由于聚团而自然沉降,因此,在强酸性条件下,*Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的吸附相差较小。

吸附溶液体系的 pH 值控制硫化矿物表面的羟基化程度,通常情况下,硫化矿物在碱性条件下的羟基化程度较高。在方铅矿上形成的氢氧化铅比较稳定,在一定程度上阻碍了 *Nocardia* 在其表面上的吸附,因而吸附率普遍偏低;而在黄铁矿上形成的氢氧化铁沉淀是不稳定的,特别是在强碱条件下($\text{pH} > 12$),搅拌吸附后的细胞悬浊液中有橙黄色出现,可能是由于析出了铁离子,从而导致实验结

果有较大偏差。

2.2.3 矿浆浓度对吸附过程的影响

在 $t = 10 \text{ min}$, $\text{pH} = 7.02$, $c_{\text{bac}} = 1.543 \text{ g/L}$, $\theta = 27^\circ\text{C}$ 的实验条件下, 改变矿浆浓度以考察其对吸附过程的影响, 结果如图 4 所示。

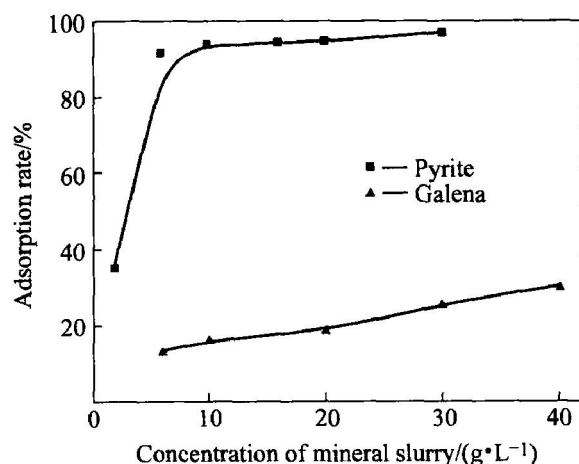


图 4 矿浆浓度对吸附过程的影响

Fig. 4 Effect of mineral slurry concentration on adsorption process

从图 4 中可看出, 在矿浆浓度较低的情况下, *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的吸附情况均较差, 这是由于在 *Nocardia* 浓度一定的条件下, 当矿浆浓度较低时, 硫化矿物相对数量较少, 因而提供给 *Nocardia* 的吸附位置也相对减少, 致使大量细胞处于游离状态, 导致吸附率较低。随着矿浆浓度的升高, 矿物表面提供的吸附位置逐渐增多, 因而有利于 *Nocardia* 在矿物表面上的吸附。从实验结果来看, *Nocardia* 大量吸附在黄铁矿表面上, 吸附率最高可达到 96.99%; 而 *Nocardia* 在方铅矿表面上的吸附率也随着矿浆浓度的增加而略有上升, 但增加的幅度较小, 最高吸附率也仅仅接近 30%。从该实验中可以得出, *Nocardia* 在较低矿浆浓度 ($< 6 \text{ g/L}$) 的条件下, 在黄铁矿和方铅矿表面的选择性吸附不明显; 而在较高矿浆浓度 ($> 6 \text{ g/L}$) 的情况下, 则利于选择性吸附的进行。

2.2.4 温度对吸附过程的影响

在 $t = 10 \text{ min}$, $c_{\text{ore}} = 10 \text{ g/L}$, $c_{\text{bac}} = 1.55 \text{ g/L}$, $\text{pH} = 6.50$ 的实验条件下, 改变吸附过程的温度, 考察其对吸附效果的影响, 结果如图 5 所示。由图 5 中可以看出, 随着温度的升高, *Nocardia* 在黄铁矿表面的吸附率逐渐增加, 但升高的幅度不大, 仅从 8°C 的 84.75% 上升到 50°C 的 91.74%; 而在方铅矿表面上的吸附则是先升高后下降, 但变化幅度

也不大, 在 28°C 时达到最大吸附率 13.88%。

Nocardia 最佳生长温度范围为 $28 \sim 32^\circ\text{C}$, 在此范围内, *Nocardia* 的生理活性较强, 表面的活性基团可以选择性地快速吸附于黄铁矿表面, 使其从疏水变成亲水; 而 *Nocardia* 也于最适宜的生长温度在方铅矿表面达到最大吸附率。但总体上看, 温度对吸附过程的影响不大, 适当升高温度有利于 *Nocardia* 在两种矿物表面上的吸附, 但在此吸附条件下仍可以获得较好的选择性吸附效果。

2.2.5 *Nocardia* 菌液浓度对吸附过程的影响

在 $t = 10 \text{ min}$, $c_{\text{bac}} = 10 \text{ g/L}$, $\theta = 27^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7.77$ 的实验条件下, 改变 *Nocardia* 细胞悬浊液浓度, 考察其对吸附过程的影响, 结果如图 6 所示。从图 6 中可看出, 随着 *Nocardia* 菌液浓度的升高, *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的吸附率都

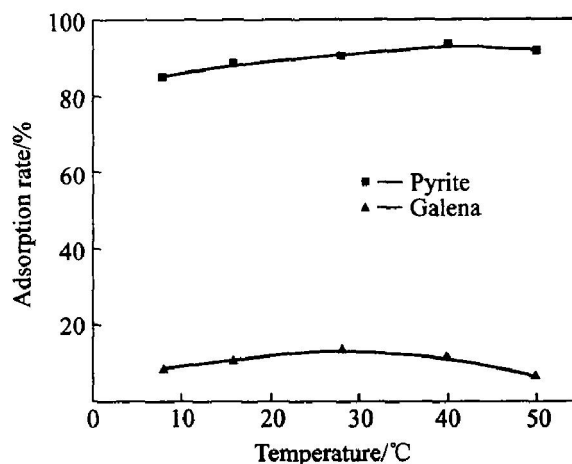


图 5 温度对吸附率的影响

Fig. 5 Effect of temperature on adsorption rate

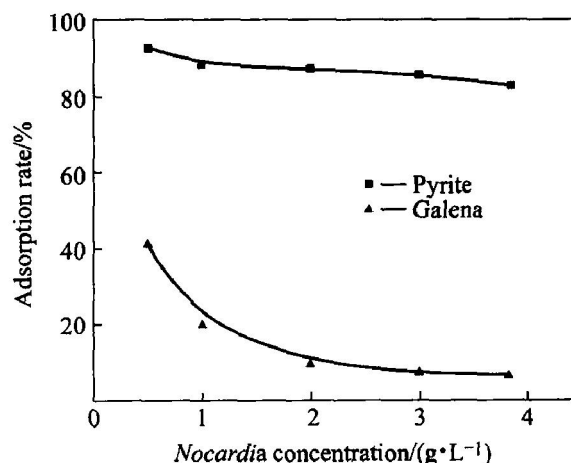


图 6 菌液浓度对吸附率的影响

Fig. 6 Effect of *Nocardia* concentration on adsorption rate

表现出下降的趋势, 当黄铁矿从初始 0.5 g/L 的 92.24% 下降至 3.83 g/L 的 82.43% 时, 方铅矿也是由 0.5 g/L 的 40.94% 下降至 3.83 g/L 的 6.29%。选择性吸附现象在菌液浓度大于 1 g/L 后较为明显。

在 *Nocardia* 菌液浓度较低的情况下, 矿物相对过剩, 更多的吸附位置可以提供 *Nocardia* 附着, 因而有利于吸附过程的进行, 所以吸附率相对较高; 随着 *Nocardia* 菌液浓度的增加, 吸附率均呈下降趋势, 这是由于在 *Nocardia* 较高浓度情况下, 矿物表面提供的吸附位置相对不足, 从而导致吸附率较差。

2.3 *Nocardia* 表面形貌

用扫描电镜对 *Nocardia* 进行了表面微观测定分析, 结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出, *Nocardia* 的形态为球形放线菌, 半径约为 400~500 nm, 其细胞壁外膜表面生有线性菌丝, 是微生物分泌的一种粘性物质, 以粘液的形式吸附于细胞壁的表面。

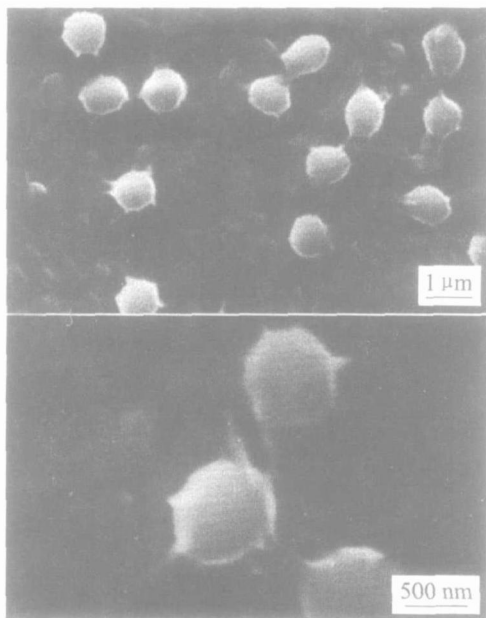


图 7 *Nocardia* 表面形貌

Fig. 7 Morphologies of *Nocardia* surface

2.4 作用机理探讨

1) 通常来讲, 细菌在矿物表面的吸附是有选择性的, 细菌往往吸附在有缺陷的矿物表面, 矿物晶格的形状和走向对细菌的吸附都有影响。矿物的解理面是进行吸附反应的重要部位, 由硫化矿物浮选理论^[20~21]可知, 方铅矿在{001}面上有完全的立

方解理, {001}面也是浮选吸附面(见图 8); 而黄铁矿的解理面也是平行{001}面(见图 9), 但是解理不明显, 可以任意选择浮选吸附面。本研究将 *Nocardia* 作为浮选药剂, 它也应易于吸附在解理面上, 因此可以预测出解理面对吸附效果有较大的影响。黄铁矿的解理不完全, 吸附面相对方铅矿来讲更为丰富, 易于产生更多的吸附位置供 *Nocardia* 在其表面吸附; 而方铅矿则只有平行于{001}面的解理面可能是进行吸附的位置, 因而解理面相对黄铁矿是少量的, 在方铅矿表面的吸附率较差。由此可以推断出, 矿物解理面丰富与否是影响 *Nocardia* 在两种矿物上选择性吸附的原因之一。

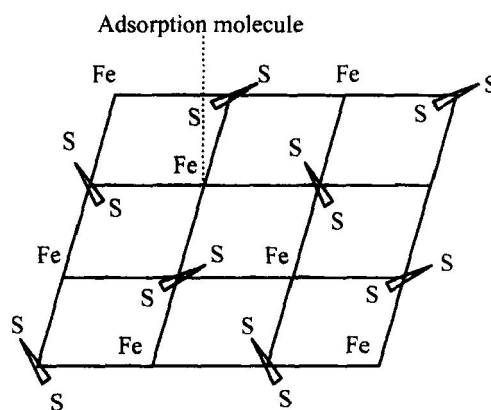


图 8 黄铁矿的{001}面结构

Fig. 8 Configuration of {001} plane of pyrite

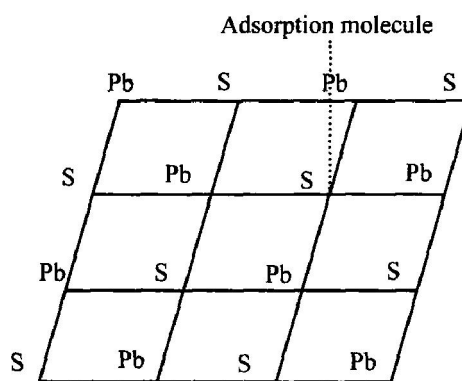


图 9 方铅矿的{001}面结构

Fig. 9 Configuration of {001} plane of galena

2) *Nocardia* 吸附在两种硫化矿物表面并改变其表面性质, 而不是生物的氧化还原作用于矿物内部, 因而对于 *Nocardia* 表面的研究就更为有意义。参与细菌和矿物间吸附的生理结构是细胞壁及外膜, 而细胞内膜及其他细胞器几乎不影响吸附作用, 外膜结构直接影响着细菌和矿物间的粘着速度和吸附速度。由图 7 可看出, *Nocardia* 外膜上长有

大量的菌丝, *Nocardia* 红外光谱分析也表明, 其外膜分布着许多活性基团, 如羟基 (—OH)、巯基 (—SH)、氨基 (—NH₂) 等, 这些物质属于蛋白质、多糖等大分子。如果这些大分子在矿物表面吸附且其长度大于双电层厚度的两倍, 则它们会以桥联作用^[22]形式在矿物表面牢固吸附。这些物质在黄铁矿表面发生强烈的键合作用而发生特性吸附, 但在方铅矿表面则不明显。

3) Van Loosdrecht 等^[23]认为, 细菌在浮选过程中抑制黄铁矿的机理可能是由于菌体与黄铁矿的电性相反, 使细菌由于静电作用吸附在黄铁矿表面, 从而改变了黄铁矿的表面润湿性。本研究过程中的 pH 值普遍在中性条件下, 此时黄铁矿带正电, *Nocardia* 带负电, *Nocardia* 由于静电作用吸附在黄铁矿表面; 而方铅矿的电性比黄铁矿要更负, 所以与 *Nocardia* 的吸附作用较弱, 吸附效果不明显。综合考虑, 静电力在该选择性吸附过程中所起的作用较小。

3 结论

1) *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面发生明显的选择性吸附, 在黄铁矿表面的最大吸附率可达到 96.99%, 而在方铅矿表面的吸附率大约为 20% 左右。

2) *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的吸附在较短的时间内即可达到吸附平衡; pH 值是影响 *Nocardia* 在两种硫化矿物表面发生选择性吸附的关键因素, 当 pH 为 3~10 时, 选择性吸附现象明显; 当矿浆浓度大于 6 g/L 和菌液浓度为 0.5~4 g/L 时, 有利于选择性吸附; 温度对吸附效果影响较小。

3) *Nocardia* 细胞外膜表面的菌丝是进行吸附的重要位置; 矿物解理面状态、*Nocardia* 表面基团的桥连作用和静电力是发生选择性吸附的关键吸附机理。

4) 在浮选分离中可以通过抑制黄铁矿而优先浮选方铅矿。

REFERENCES

- [1] Hosseini T R, Kolahdoozan M, Tabatabaei Y S M, et al. Bioflotation of sarcheshmeh copper ore using *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria[J]. Mineral Engineering, 2005, 18(3): 371-374.
- [2] Subramanian S, Santhiya D, Natarajan K A. Surface modification studies on sulphide minerals using bioreagents[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1-4): 175-188.
- [3] 钟宏, 杨运琼. 生物药剂在矿物加工和冶金中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2002, 6(3): 28-32.
ZHONG Hong, YANG Yur-qiong. Applied research on microbe reagents in mineral and metallurgy processing[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2002, 6(3): 28-32.
- [4] 刘汗钊, 张永奎. 生物浮选法的发展与方向[J]. 国外金属矿选矿, 1998, 11: 2-6.
LIU Han-zhao, ZHANG Yong-kui. Development and direction of bioflotation[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1998, 11: 2-6.
- [5] 魏以和, 钟康年, 王军. 生物技术在矿物工程中的应用[J]. 国外金属矿选矿, 1996, 1: 1-13.
WEI Yi-he, ZHONG Kang-nian, WANG Jun. Application of biotechnology in mineral engineering[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1996, 1: 1-13.
- [6] 钮因键, 邱冠周, 周击奎, 等. 硅酸盐细菌的选育及铝土矿细菌脱硅效果[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 280-285.
NIU Yin-jian, QIU Guan-zhou, ZHOU Ji-kui, et al. Screening of silicate bacteria and bioleaching silicon from bauxite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(2): 280-285.
- [7] Smith R W, Misra M, Dubel J, et al. Mineral bioprocessing and the future[J]. Minerals Engineering, 1991, 4(7-11): 1127-1141.
- [8] Dubel J, Smith R W, Misra M, et al. Microorganism as chemical reagents: the hematite system[J]. Mineral Engineering, 1992, 5(3-5): 547-556.
- [9] Subramanian S, Santhiya D, Natarajan K A. Surface modification studies on sulphide minerals using bioreagents[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1-4): 175-188.
- [10] Natarajan K A, Deo N. Role of bacterial interaction and bioreagents in iron ore flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 62(1-4): 29-36.
- [11] Patra P, Natarajan K A. Microbially induced flocculation and flotation for separation of chalcopyrite from quartz and calcite[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74(1-4): 143-155.
- [12] Modak J M, Kitamura K, Saiki H. Mechanism of microbial flotation using *Thiobacillus ferrooxidans* for pyrite suppression[J]. Hydrometallurgy, 1995, 38(2): 175-187.

- [13] 魏德洲, 周志付, 梁海军, 等. 燃煤微生物预处理浮选脱硫的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(5): 477-479.
WEI Dezhou, ZHOU Zhifu, LIANG Haijun, et al. Study on microbial pretreatment and floatation desulfurization in coal[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2002, 23(5): 477-479.
- [14] 周志付, 魏德洲, 王英敏, 等. 燃煤微生物预处理浮选脱硫的研究进展[J]. 工业安全与环保, 2002, 28(2): 3-7.
ZHOU Zhifu, WEI Dezhou, WANG Yingmin, et al. The progress of the research on microbial pretreatment and floatation desulfurization in coal[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2002, 28(2): 3-7.
- [15] 张兴, 肖雷, 王永志. 三种细菌对煤中黄铁矿抑制作用的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(6): 604-607.
ZHANG Xing, XIAO Lei, WANG Yongzhi. Suppression effects of three bacteria on pyrite in coal during flotation process[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 30(6): 604-607.
- [16] 张明旭, 李庆, 王勇, 等. 球红假单胞对黄铁矿浮选脱除的影响[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, 23(3): 45-49.
ZHANG Mingxu, LI Qing, WANG Yong, et al. A study of bio-surface modification by *Rhodopseudomonas spheroids* in the froth flotation of coal pyrite[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 23(3): 45-49.
- [17] 何德文, 柴立元, 宋卫锋. 真菌煤炭脱硫的实验因素与规律研究[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(1): 5-6.
HE Dewen, CHAI Liyuan, SONG Weifeng. Experimental research on factors affecting desulfurization mechanism of fungi[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27(1): 5-6.
- [18] Santhiya D, Subramanian S, Natarajan K A, et al. Bio-modulation of galena and sphalerite surfaces using *Thiobacillus thiooxidans*[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 62(1-4): 29-36.
- [19] 魏德洲, 朱一民, 周东琴. *Nocardia amarae* 菌吸附 Hg^{2+} 的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(9): 903-906.
WEI Dezhou, ZHU Yimin, ZHOU Dongqin. Biosorption of Hg^{2+} by *Nocardia amarae*[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2003, 24(9): 903-906.
- [20] 丁敦煌, 李天瑞. 硫化矿物的表面结构和表面电荷与无捕收剂浮选[J]. 中国有色金属学报, 1994, 4(3): 36-40.
DING Dunhuang, LI Tianrui. Flotation without collector and surface structure and charge of sulfide[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1994, 4(3): 36-40.
- [21] Sharma P K, Hanumantha R K. Adhesion of *Paenibacillus polymyxa* on chalcopyrite and pyrite: surface thermodynamics and extended DLVO theory[J]. Colloid and Surfaces Biointerfaces, 2003, 29(1): 21-38.
- [22] 王文生, 魏德洲, 郑龙熙. 微生物在矿物表面吸附的意义及研究方法[J]. 国外金属矿选矿, 1998, 3: 37-40.
WANG Weisheng, WEI Dezhou, ZHENG Longxi. Significance and investigation method of microorganism attach to mineral surface[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1998, 3: 37-40.
- [23] Van Loosdrecht M C M, Lyklema J, Norde W, et al. The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion[J]. Applied Environment Microbiol, 1987, 53: 1893-1897.

(编辑 李艳红)