

文章编号: 1004-0609(2006)06-1081-07

诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面的选择性吸附^①

魏德洲¹, 沈岩柏¹, 李晓安², 朱一民¹, 贾春云¹, 苏秀娟¹, 秦玉春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: 研究了诺卡氏菌在不同影响因素条件下, 在黄铁矿和闪锌矿表面的选择性吸附。结果表明: 培养 120 h 后诺卡氏菌达到最大生长量; 诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌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%, 而在闪锌矿表面的吸附率大都在 20% 以下; 诺卡氏菌在两种矿物表面于 20 min 内即可达到吸附平衡; pH 值是影响诺卡氏菌在两种矿物表面发生选择性吸附的关键因素, pH 在 4~10 之间时, 选择性吸附现象明显; 矿浆浓度超过 6 g/L 时有利于发生选择性吸附; 细胞悬浊液浓度、搅拌速度和温度对吸附效果影响不大, 均可产生选择性吸附。扫描电镜检测结果表明, 诺卡氏菌细胞表面的菌丝是重要的吸附部位; 红外光谱分析结果表明, 诺卡氏菌表面含有 $-\text{OH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{P}=\text{O}$ 、 $\text{S}=\text{O}$ 等活性官能团, 它们在吸附过程中起重要作用。

关键词: 黄铁矿; 闪锌矿; 诺卡氏菌; 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 sphalerite

WEI De-zhou¹, SHEN Yan-bai¹, LI Xiao-an², ZHU Yi-min¹,
JIA Chun-yun¹, SU Xiu-juan¹, QIN Yu-chun¹

(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 sphalerite was studied under various conditions. The results show that the maximum growth quantity of *Nocardia* can be achieved after culturing 120 h and obvious selective adsorption of *Nocardia* on the surface of pyrite and sphalerite can be detected. The maximum adsorption rate on the surface of pyrite is 96.99%, whereas it is less than 20% in the case of sphalerite. Adsorption equilibrium can be attained within 20 min on the surfaces of the two minerals. pH value is the key factor influencing upon selective adsorption, and the difference of adsorption quantity on the surfaces of two minerals is apparent when pH is between 4 and 10. Slurry concentration over 6 g/L is favorable to selective adsorption. *Nocardia* cell concentration, stirring speed and temperature have no obviously effect on selective adsorption. SEM result indicates that the mycelium on the surface of ectoblast of *Nocardia* cell is the important attachable site. IR spectrum shows that the functional groups such as $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{P}=\text{O}$, $\text{S}=\text{O}$, etc make vital contribution on adsorption process.

Key words: pyrite; sphalerite; *Nocardia*; selective adsorption; bioflotation

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(20042021); 沈阳市经贸委(技术创新)资助项目(2003061)

收稿日期: 2005-09-12; 修订日期: 2005-12-20

通讯作者: 魏德洲, 教授; 电话: 024-83681461; E-mail: dzwei2002@yahoo.com.cn

随着矿产资源日益“贫、细、杂”等难选特点的突现,以及常规浮选药剂对自然环境造成日益严重的污染现状,人们逐渐将关注的目光投向对环境友好的微生物资源^[1-3]。近些年来,将生物技术与浮选技术有效结合而产生的微生物浮选技术发展迅速^[4-6]。微生物细胞壁上的某些特殊基团可以选择性地吸附在矿物表面,使其物理、化学性质发生改变,利用这种特性吸附来实现两种或多种矿物之间分离。生物浮选法的一个重要研究热点就是将微生物作为浮选药剂以改变矿物的浮选行为,桑瑟亚等研究了用氧化硫硫杆菌调节方铅矿和闪锌矿的表面性质,结果表明:人工混合矿样在 $\text{pH} = 2 \sim 2.5$ 的条件下与该菌作用后,在 $\text{pH} = 9 \sim 9.5$ 时进行浮选,可从方铅矿中优先浮选闪锌矿^[7]。另有一些研究者研究了氧化亚铁硫杆菌对硫化物矿物可浮性的影响,认为该菌对黄铁矿和黄铜矿具有明显的抑制作用^[8-11]。

迄今为止,已进行的关于微生物在矿物表面吸附的研究主要集中在单一微生物对单一矿物的吸附,而对选择性吸附方面的研究则较少涉及。本文作者研究了诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面的选择性吸附情况,考察了多种因素对吸附效果的影响,并对吸附机理进行了初步探讨,以期开发新型、环保、具有选择性的微生物浮选药剂奠定基础。

1 实验

1.1 材料

1.1.1 矿样

实验所选用的黄铁矿采自辽宁省八家子铅锌矿,闪锌矿采自内蒙古赤峰,矿样的化学成分为:黄铁矿 $\text{Fe} \ 45.91\%$, $\text{S} \ 49.42\%$; 闪锌矿 $\text{Zn} \ 59.06\%$, $\text{S} \ 28.71\%$ 。分析结果表明两种矿样的纯度很高。用球磨机湿磨,自然晾干后取小于 0.074 mm 的矿样用于实验研究。

1.1.2 微生物菌种

实验所选用的微生物菌种为诺卡氏菌(*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 诺卡氏菌的培养

诺卡氏菌的培养基配方为:氯化钠 5 g , 蛋白胨 5 g , 牛肉膏 3 g , 蒸馏水 1 L , $\text{pH} \ 7.0 \sim 7.2$ 。培养基经高温灭菌,在 CBV - 1000A 生物洁净台接种后,

于 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 150 r/min 震荡频率的条件下于 HZQ - C 空气浴震荡器中培养 6 d 。

1.2.2 诺卡氏菌细胞悬浊液的制备

取生长 6 d 的诺卡氏菌培养液在 TGL - 16G 离心分离机上于 16000 r/min 下离心分离 10 min , 将获得的诺卡氏菌湿细胞称量后,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。

1.2.3 吸附实验

取浓度一定的诺卡氏菌细胞悬浊液 50 mL 于 120 mL 小烧杯中,调节其 pH 值,然后加入定量的矿物,在固定实验条件下进行吸附实验。

1.2.4 吸附率测定方法

采用分光光度法,以蒸馏水作为参比溶液,在波长为 330 nm 的条件下测量诺卡氏菌细胞悬浊液的吸光度值。吸附率的计算式为

$$Q = (A_0 - A) / A_0 \quad (1)$$

式中 Q 为吸附率; A_0 为吸附前诺卡氏菌细胞悬浊液的吸光度值; A 为吸附后诺卡氏菌细胞悬浊液的吸光度值。

1.2.5 X 射线衍射研究

在日本理光 D/max-rB 转靶 X 射线衍射仪上对实验用黄铁矿和闪锌矿进行测定分析。

1.2.6 扫描电镜研究

用 SSX - 550 型扫描电子显微镜对诺卡氏菌进行扫描电镜研究。在电镜测定前,将诺卡氏菌进行清洗、固定、脱水、干燥、喷金。

1.2.7 红外光谱研究

用 510P FT - IR 型红外光谱仪对诺卡氏菌进行红外光谱分析。测定前,将离心分离后的诺卡氏菌菌体用蒸馏水洗涤,干燥后与光谱纯溴化钾一起在玛瑙研钵中研磨,并将干粉压片。

2 结果和讨论

2.1 X 射线衍射分析

X 射线衍射谱如图 1 所示。可以看出,实验选用的黄铁矿和闪锌矿矿样所产生的衍射峰形状尖锐、对称且清晰,与其各自标准矿样的衍射谱线十分吻合,符合实验对纯矿物的要求。

2.2 诺卡氏菌的生长曲线

在本实验条件下培养的诺卡氏菌,隔一定时间取出 100 mL 培养液,在 16000 r/min 下离心分离 10 min 后测定细菌的湿质量,绘制的诺卡氏菌生长

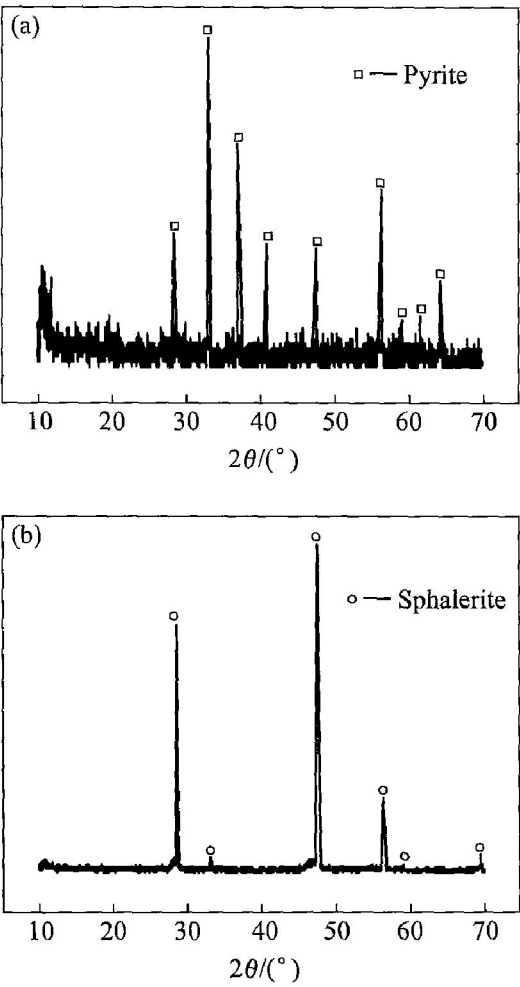


图 1 实验矿样的 X 射线衍射谱

Fig. 1 XRD patterns of experimental minerals

曲线如图 2 所示。可以看出, 诺卡氏菌经过很短的延滞期便进入了指数生长期, 大约 72 h 后该菌进入稳定生长期。为了保证实验用菌体既有足够的活性, 又可获得足够的数量, 实验中所使用的诺卡氏菌为生长 120~160 h 范围内的菌体。

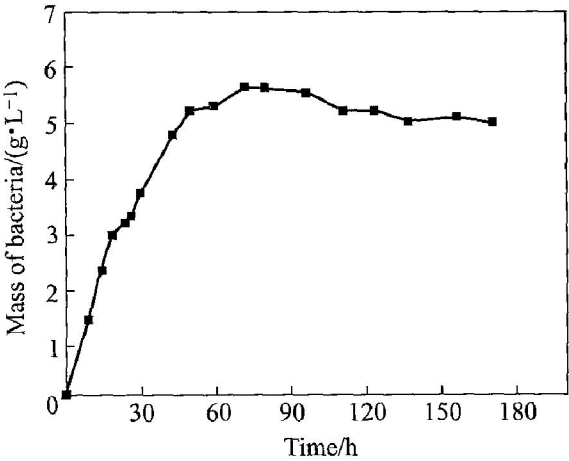


图 2 诺卡氏菌的生长曲线

Fig. 2 Growth curve of *Nocardia*

2.3 吸附实验结果

2.3.1 吸附时间对吸附效果的影响

在矿浆浓度 $c_{\text{core}} = 10 \text{ g/L}$ 、 $\text{pH} = 6.82$ 、诺卡氏菌细胞悬浊液浓度 $c_{\text{bal}} = 1.517 \text{ g/L}$ 、搅拌速度 $v = 600 \text{ r/min}$ 、温度 $\theta = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 的实验条件下, 改变吸附时间, 测定诺卡氏菌在两种硫化物矿物表面的吸附情况, 结果见图 3。可以看出, 在 0~5 min 内, 诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面上的吸附率增加最快, 在较短的时间内吸附即可接近平衡。此后, 随着吸附时间的增加, 吸附率仍逐渐上升, 但变化幅度已不明显。诺卡氏菌在黄铁矿表面的吸附情况较好, 最高吸附率达到 90% 左右; 而在闪锌矿表面的吸附情况则较差, 吸附率不超过 15%, 选择性吸附现象明显。

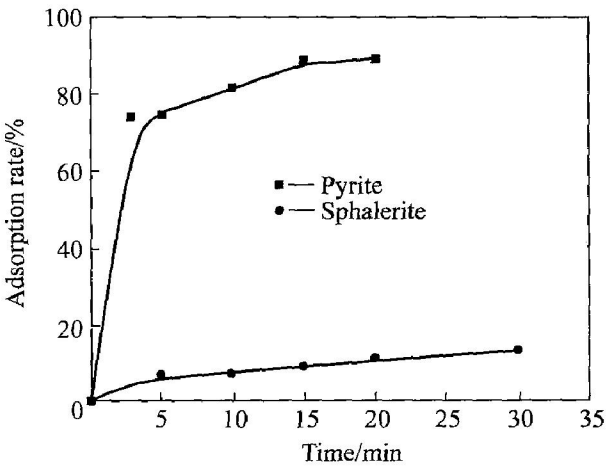


图 3 吸附时间对吸附效果的影响

Fig. 3 Influence of time on adsorption process

诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面发生选择性吸, 主要是由于诺卡氏菌细胞壁表面含有大量的活性基团, 如羟基、羧基等, 这些极性基团与铁原子的键合作用大于锌原子^[12], 因此符合吸附率的表征。此外, 矿物表面的解理情况对吸附效果也有一定的影响。黄铁矿解理不完全, 可以任意选择解理面进行吸附; 而闪锌矿解理平行于(110)面^[13], 因而解理面比黄铁矿的要少许多, 这是造成在闪锌矿表面吸附率较低的另一个原因。

2.3.2 矿浆浓度对吸附效果的影响

在吸附实验条件为 $t = 10 \text{ min}$ 、 $\text{pH} = 7.02$ 、 $c_{\text{core}} = 1.543 \text{ g/L}$ 、 $v = 600 \text{ r/min}$ 、 $\theta = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, 改变矿浆浓度以考察其对吸附过程的影响, 实验结果见图 4。可以看出, 在 c_{core} 小于 2 g/L 的条件下, 诺卡氏菌在黄铁矿表面的吸附情况较差; 吸附过程在 c_{bal} 大于 6 g/L 后接近平衡, 吸附率在 90% 以上。而在闪锌矿表面, 随着矿浆浓度的增加, 吸附率也呈上

升趋势,最高吸附率可接近 20%。在诺卡氏菌细胞悬浊液浓度一定的条件下,矿浆浓度较低时,矿物相对菌体细胞的数量少,所以提供给诺卡氏菌的吸附位置也相对减少,致使大量的诺卡氏菌细胞处于游离状态,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,更多的诺卡氏菌可以在矿物表面上吸附,吸附率逐渐上升。该实验结果表明,在较高矿浆浓度($c_{\text{core}} > 6 \text{ g/L}$)的条件下,有利于选择性吸附。

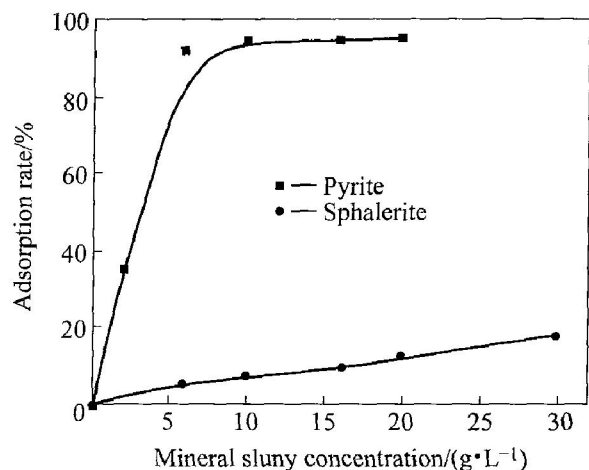


图 4 矿浆浓度对吸附效果的影响

Fig. 4 Influence of mineral slurry concentration on adsorption process

2.3.3 溶液初始 pH 值对吸附效果的影响

在 $t = 10 \text{ min}$ 、 $c_{\text{core}} = 10 \text{ g/L}$ 、 $c_{\text{chal}} = 1.525 \text{ g/L}$ 、 $v = 600 \text{ r/min}$ 、 $\theta = 26^\circ\text{C}$ 的实验条件下,改变吸附溶液初始 pH 值,考察其对吸附过程的影响,结果见图 5。从图可知,在强酸性($\text{pH} < 4$)和强碱性($\text{pH} > 10$)条件下,诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面的吸附率相差不大,选择性吸附不明显。调节细胞悬浊液至强酸性($\text{pH} < 4$)时,细胞发生聚团现象,一部分诺卡氏菌细胞聚合成大团而自然下沉,致使液相中悬浮的菌体数量显著降低,按式(1)计算出的结果已不再是真正的吸附率。在 $\text{pH} 4 \sim 10$ 范围之内,诺卡氏菌在两种矿物表面上显示了良好的选择性吸附。在此 pH 值范围内,诺卡氏菌在黄铁矿表面的吸附率大都在 80% 以上,最高可达到 95.26%;在闪锌矿表面的吸附率则普遍偏低,最低仅为 3.59%。

据文献[7]报道,纯净的黄铁矿和闪锌矿的等电点均在 $\text{pH} = 2.2$ 附近,但发生轻微氧化的黄铁矿的等电点有可能偏移至 $\text{pH} = 6.4$ 左右。诺卡氏菌的等电点在 $\text{pH} = 2.1$ 左右^[14], $\text{pH} > 2.1$ 时,诺卡氏菌表面荷负电,因而静电力在吸附过程中起一

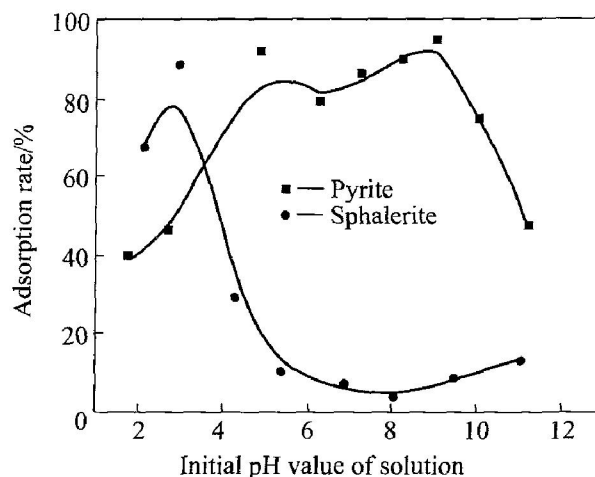


图 5 溶液初始 pH 值对吸附效果的影响

Fig. 5 Influence of initial pH value of solution on adsorption process

定作用。吸附溶液体系的 pH 值控制着硫化物矿物表面的羟基化程度,通常硫化物矿物在碱性条件下的羟基化程度较高。一般来说,在闪锌矿表面形成的氢氧化锌比较稳定,这在一定程度上阻碍了诺卡氏菌在其表面的吸附,致使吸附率普遍偏低;而在黄铁矿表面形成的氢氧化铁是不稳定的,对细菌在黄铁矿表面的吸附没有显著影响,这就是 pH 值明显影响吸附选择性的关键所在。

2.3.4 细胞悬浊液浓度对吸附效果的影响

在 $t = 10 \text{ min}$ 、 $c_{\text{core}} = 10 \text{ g/L}$ 、 $\text{pH} = 7.77$ 、 $v = 600 \text{ r/min}$ 、 $\theta = 27^\circ\text{C}$ 的条件下,改变诺卡氏菌细胞悬浊液浓度,考察其对吸附效果的影响,实验结果见图 6。可以看出,随着诺卡氏菌浓度的升高,诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面的吸附率都表现出下降的趋势。黄铁矿从初始 0.5 g/L 的 92.24% 下降至 3.83 g/L 的 82.43%,而闪锌矿也由 0.5 g/L 的 21.51% 下降至 4 g/L 的 3.01%。

上述实验结果充分体现出,在诺卡氏菌细胞悬浊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诺卡氏菌附着,因而有利于吸附过程的进行,所以吸附率相对较高;然而,在诺卡氏菌较高浓度的情况下,矿物表面提供的吸附位置相对不足,致使吸附率下降。

2.3.5 搅拌速度对吸附效果的影响

在 $t = 10 \text{ min}$ 、 $c_{\text{core}} = 10 \text{ g/L}$ 、 $c_{\text{chal}} = 1.517 \text{ g/L}$ 、 $\text{pH} = 7.14$ 、 $\theta = 16^\circ\text{C}$ 的实验条件下,改变吸附溶液体系的搅拌速度,考察其对吸附效果的影响,结果见图 7。可以看出,搅拌速度在 600 r/min 左右时,诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面均有一吸附率峰值,吸附率数值分别为 90.97% 和 17.71%。在搅拌

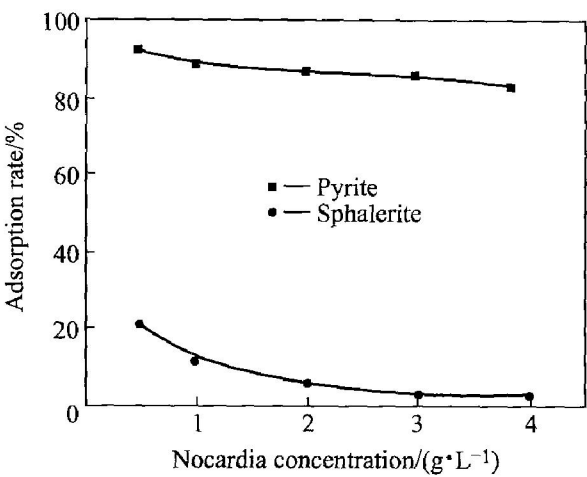


图 6 细胞悬浊液浓度对吸附效果的影响

Fig. 6 Influence of *Nocardia* concentration on adsorption process

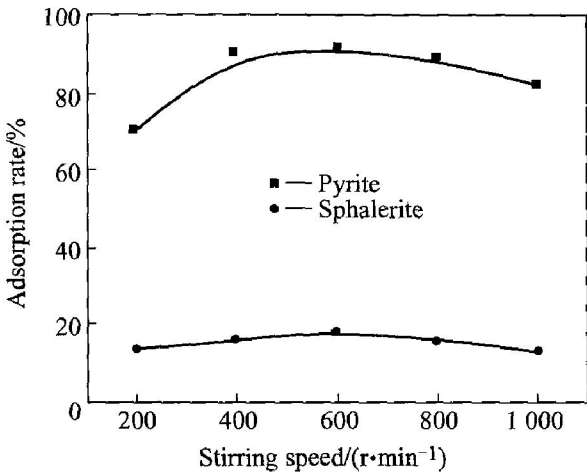


图 7 搅拌速度对吸附效果的影响

Fig. 7 Influence of stirring speed on adsorption process

速度较低时, 诺卡氏菌与矿物之间接触不够充分, 导致吸附率较低; 而搅拌速度过大, 又会使已吸附在矿物表面的菌体脱落, 同样导致吸附率降低。总体上看, 搅拌速度对吸附效果的影响不大, 在所有实验点上选择性吸附均很明显。

2.3.6 温度对吸附效果的影响

在 $t = 10 \text{ min}$ 、 $c_{\text{ore}} = 10 \text{ g/L}$ 、 $c_{\text{bal}} = 1.55 \text{ g/L}$ 、 $\text{pH} = 6.50$ 、 $v = 600 \text{ r/min}$ 的条件下, 改变吸附过程的温度, 考察其对吸附效果的影响, 结果见图 8。可以看出, 随着温度的升高, 诺卡氏菌在黄铁矿表面的吸附率逐渐增加, 但升高的幅度不大; 而在闪锌矿表面上的吸附则是先升高后下降, 但变化幅度也不大。诺卡氏菌最佳生长温度范围为 $28 \sim 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 诺卡氏菌在此范围内的活性较强, 细胞表面的活性基团可以选择性地快速吸附在黄铁矿表面。但总体

上看, 适当升高温度有利于诺卡氏菌在两种矿物表面上发生选择性吸附。

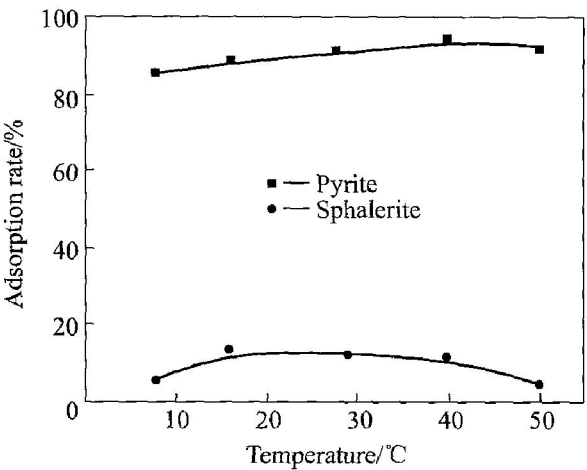


图 8 温度对吸附效果的影响

Fig. 8 Influence of temperature on adsorption process

2.4 扫描电镜分析

用扫描电镜对诺卡氏菌进行表面微观测定分析, 结果见图 9。可以看出, 诺卡氏菌的形态为球形菌, 半径为 $400 \sim 500 \text{ nm}$, 其细胞壁外膜长有线性菌丝, 它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, 是进行吸附的重要部位。

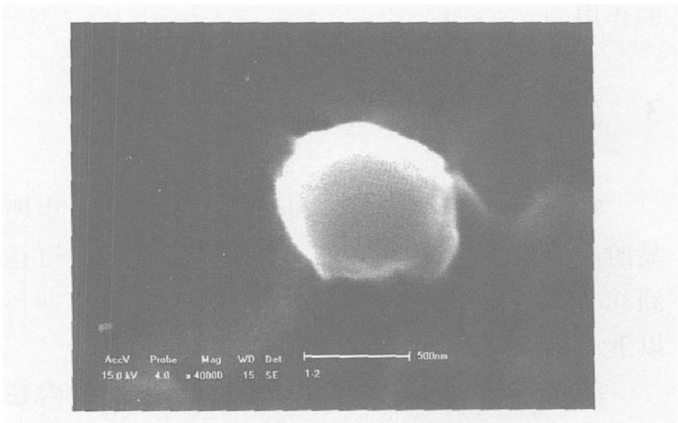


图 9 *Nocardia* 的表面形态

Fig. 9 Surface morphology of *Nocardia*

2.5 红外光谱分析

对诺卡氏菌进行了红外光谱分析, 其结果见图 10。将图 10 中的谱带进行归属^[15]: 3296.38 cm^{-1} 附近的强宽峰为缔合的 $\text{O}-\text{H}$ 伸缩振动和 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩振动吸收带; 2958.468 cm^{-1} 和 2927.078 cm^{-1} 附近的小双峰为 CH_3 和 CH_2 的不对称伸缩振动吸收带; 2872.03 cm^{-1} 和 2854.74 cm^{-1} 附近的小双峰为 CH_3 和 CH_2 的对称伸缩振动吸收带;

1649.80 cm^{-1} 附近为缔合的酰胺 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收带; 1535.58 cm^{-1} 和 1237.44 cm^{-1} 附近为酰胺 $\text{N}-\text{H}$ 的弯曲振动和 $\text{C}-\text{N}$ 的伸缩振动吸收带; 1451.61 cm^{-1} 和 1393.95 cm^{-1} 附近处为 CH_3 和 CH_2 的不对称和对称弯曲振动吸收带; 1237.44 cm^{-1} 附近还可能为 $\text{P}=\text{O}$ 伸缩振动吸收带; 1067.39 cm^{-1} 附近为 $\text{S}=\text{O}$ 伸缩振动吸收带。

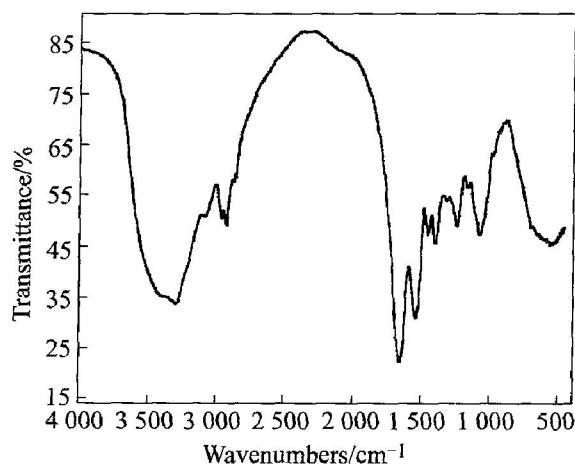


图 10 *Nocardia* 的红外光谱

Fig. 10 IR spectrum of *Nocardia*

上述红外光谱分析结果充分表明, 诺卡氏菌细胞成分中含有一 OH 、 —NH_2 、 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{P}=\text{O}$ 、 $\text{S}=\text{O}$ 等活性官能团, 它们在吸附过程中起着重要的作用。

3 结论

1) 诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌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可达到 96.99%, 而在闪锌矿表面的吸附率大都在 20% 以下。

2) 诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面的吸附在 20 min 内即可达到吸附平衡; pH 值是影响诺卡氏菌在两种硫化物矿物表面发生选择性吸附的关键因素, pH 在 4~10 之间时, 选择性吸附现象明显; 矿浆浓度在 6 g/L 以上有利于发生选择性吸附; 细胞悬浊液浓度、搅拌速度和温度对吸附效果影响较小。

3) 扫描电镜测定结果表明, 诺卡氏菌属球形放线菌, 其细胞外膜表面的菌丝是进行吸附的重要位置。

4) 红外光谱分析结果表明, 诺卡氏菌细胞表

面含有一 OH 、 —NH_2 、 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{P}=\text{O}$ 、 $\text{S}=\text{O}$ 等活性官能团, 它们在吸附过程中起重要作用。

REFERENCES

- [1] Subramanian S, Santhiya D, Natarajan K A. Surface modification studies on sulphide minerals using bio-reagents[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1-4): 175-188.
- [2] Sharma P K, Hanumantha R K, Forssberg K S E, et al. Surface chemical characterization of *Paenibacillus polymyxa* before and after adaption to sulfide minerals[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001 (62): 3-25.
- [3] 沈岩柏, 魏德洲, 朱一民, 等. 草分枝杆菌在硫化矿物表面的选择性吸附规律[J]. 金属矿山, 2005(4): 31-35.
SHEN Yan-bai, WEI De-zhou, ZHU Yi-min, et al. Selective adsorption law of *mycobacterium phlei* on sulfide mineral surface[J]. Metal Mine, 2005(4): 31-35.
- [4] 陈顺方, 桑正林. 生物技术在矿业中的应用[J]. 湿法冶金, 1999(2): 1-4.
CHEN Shun-fang, SANG Zheng-lin. Application of biology technology on mining[J]. Hydrometallurgy of China, 1999(2): 1-4.
- [5] Vaughan D J, Becker U, Wright K. Sulphide mineral surfaces: theory and experiment[J]. International Journal of Mineral Processing, 1997(57): 1-14.
- [6] Akcil A, Ciftci H. Metals recovery from multimetal sulphide concentrates(CuFeS_2 - PbS - ZnS): combination of thermal process and pressure leaching[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003(71): 233-246.
- [7] 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, 2002(7): 29-36.
- [8] 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.
- [9] QIU Guang-zhou, WANG Jun, HU Yue-hua, et al. Bio-leaching of low grade large porphyry chalcopyrite containing ore[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(Special Issue): 19-22.
- [10] Sharma P K, Hanumantha R K. Adhesion of *Paenibacillus polymyxa* on chalcopyrite and pyrite: surface

- thermodynamics and extended DLVO theory [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2003, 29(1): 21 - 38.
- [11] WEI Dezhou, ZHU Yimin, LIANG Haijun, et al. Mechanisms of *thiobacillus ferrooxidans* depressing the floatability of pyrite[A]. Proceedings of the 22nd International Mineral Processing Congress (IMPC) [C]. Marshalltown: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003. 1279 - 1287.
- [12] 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.
- [13] 孙伟, 胡岳华, 邱冠周, 等. 闪锌矿(110)表面离子吸附的动力学模拟[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 187 - 190.
- SUN Wei, HU Yuehua, QIU Guanzhou, et al. Dynamic simulation of ion adsorption on ZnS(110) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 187 - 190.
- [14] 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.
- [15] 卢涌泉, 邓振华. 实用红外光谱解析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989.
- LU Yongquan, DENG Zhenhua. Analytics of Applied IR Spectrum[M]. Beijing: Electronic Industry Publishing Company, 1989.

(编辑 陈爱华)