

R. erythropolis 对赤铁矿和石英的吸附-捕收作用

杨慧芬, 唐琼瑶, 王传龙, 张 露, 李 甜

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为考察红城红球菌(*Rhodococcus erythropolis*, *R. erythropolis*)作为赤铁矿捕收剂使用的可能性及效果, 对 *R. erythropolis* 形貌、细胞壁成分及其吸附前后赤铁矿、石英表面电性、疏水性进行分析, 对赤铁矿、石英单矿物以及赤铁矿与石英矿 1:1(质量比)混合矿进行浮选实验, 对其在赤铁矿表面的吸附状况及吸附机理进行研究。结果表明, 杆状 *R. erythropolis* 表面既含有非极性基团, 又含有极性基团, 使得其表面具有较高的负电性和较强的疏水性, 因而对赤铁矿的吸附作用明显大于对石英的吸附作用。当以此细菌为捕收剂、在溶液 pH 值为 6、*R. erythropolis* 用量为 75 mg/L 时, 赤铁矿的回收率为 89.68%, 而石英的回收率仅为 26.25%。混合矿经过一次浮选, 可获得铁品位和回收率分别为 50.08%和 76.41%的铁精矿。*R. erythropolis* 在赤铁矿表面发生复杂的化学吸附且使赤铁矿颗粒形成疏水絮团, 从而证实 *R. erythropolis* 可作为赤铁矿的捕收剂使用。

关键词: *R. erythropolis*; 微生物; 赤铁矿; 石英; 吸附; 絮团; 捕收剂

中图分类号: TD-05; TD951

文献标志码: A

Adsorption-collecting function of *Rhodococcus erythropolis* on hematite and quartz

YANG Hui-fen, TANG Qiong-yao, WANG Chuan-long, ZHANG Lu, LI Tian

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The possibility and effect of *Rhodococcus erythropolis* (*R. erythropolis*) as a flotation collector for hematite were investigated. The surface morphology and cell wall constituent of *R. erythropolis* were analyzed. The surface potentials of the strain, hematite and quartz before and after adsorption with *R. erythropolis* were measured. Flotation tests for the collection of pure hematite and pure quartz respectively and the separation of hematite-quartz mixture (1:1, mass ratio) were carried out. The adsorption characteristics and mechanisms were also discussed. The results show that the rod-shaped bacterium is detected with hydrophobic and hydrophilic groups on the cell wall, showing highly negative charged and strongly hydrophobic characteristics. The adsorption is significantly more selective onto hematite than onto quartz. The hematite recovery of 89.68% and quartz recovery of only 26.25% are obtained under solution pH value of 6 and cell concentration of 75 mg/L. Iron concentrate with the grade of 50.08% and recovery rate of 76.41% is recovered from the mixture after one-stage flotation. The chemical adsorption of the strain onto hematite makes hematite form hydrobolic agglomerate. It is confirmed that *R. erythropolis* can be acted as the collector for hematite.

Key words: *Rhodococcus erythropolis*; microorganisms; hematite; quartz; adsorption; agglomerate; collector

RAO 等^[1]认为, 生物浮选是未来非常重要的选矿手段, 而微生物捕收剂的研究和开发则是实现生物浮选的关键。最早提出微生物捕收剂研究的是美国雷诺

大学的 SMITH, 最早得到研究的微生物捕收剂是草分枝杆菌(*Mycobacterium phlei*, *M. phlei*)。SMITH 等^[2-4]利用 *M. phlei* 表面负电性较大和疏水性较高的特点,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074017)

收稿日期: 2012-06-02; 修订日期: 2012-09-14

通信作者: 杨慧芬, 教授, 博士; 电话: 13691283453; E-mail: yanghf@ustb.edu.cn

以这种微生物为捕收剂对微细粒赤铁矿、石英进行了浮选试验。结果发现, *M. phlei* 对赤铁矿具有特殊的亲和力, 可使微细粒赤铁矿形成疏水絮团, 而石英等矿物则与 *M. phlei* 的作用效果很差。因此判断, *M. phlei* 可用作赤铁矿-石英体系中赤铁矿的捕收剂。随着 SMITH 等^[2-4]研究成果的报道, 各国研究人员也开始积极寻找各种性能类似于 *M. phlei* 的微生物用于赤铁矿及其他矿物的浮选。目前, 已发现可用作赤铁矿捕收剂的微生物包括: *Bacillus polymyxa*^[5]、*Paenibacillus polymyxa*^[6]、*Rhodococcus opacus*^[7]、*Bacillus subtilis*^[8]。这些微生物与 *M. phlei* 一样, 也具有使微细粒赤铁矿形成疏水絮团而获得分离的作用。此外, RAICHUR 等^[9]扩大了 *M. phlei* 的应用领域, 将 *M. phlei* 用于浮选煤炭, 也取得了很好的效果。BOTERO 等^[10]将 *Rhodococcus opacus* 作为菱镁矿-石灰石体系中菱镁矿的捕收剂也取得了成功。除浮选赤铁矿外, 浮选其他矿物的微生物捕收剂也开始得到开发研究, 如 FARAHAT 等^[11]开发了一种浮选石英的微生物捕收剂 *Escherichia coli*。自然界可用作捕收剂的微生物远不止以上几种, 鉴于微生物捕收剂的特殊选择性及絮凝作用, 正在世界范围内开展微生物捕收剂的研究。

R. erythropolis 是一种广泛存在于自然界的无毒微生物, 目前已广泛用于油污染水中油的降解和油污染土壤的生物修复。如 CHANG 等^[12]用这种微生物去除了油污染水体中大量的长链烷烃, 并发现水中烷烃是通过微生物吸附-絮凝而去除的, 形成的絮团直径可达 0.1~2 cm。LIU 和 LIU^[13]的研究发现, *R. erythropolis* 可通过吸附-絮凝方式降解由柴油和原油污染土壤中 C₁₀~C₃₂ 的碳氢化合物。CARLA^[14]还发现 *R. erythropolis* 对酚醛树脂生产过程产生的工业废水、增塑剂废水中的酚、醛等碳氢化合物有明显的吸附-降解作用。此外, 刘滨等^[15]研究发现, *R. erythropolis* 对煤炭、石油中的含硫物质也有明显的吸附脱硫作用。因此, *R. erythropolis* 已成为令人瞩目、极具应用价值的工业菌种之一。

R. erythropolis 利用吸附-絮凝降解有机污染物的特性, 使其通过吸附-浮选微细粒矿物成为可能。目前, *R. erythropolis* 在矿物加工领域中的应用未见报道。因此, 本文作者以赤铁矿石中赤铁矿和石英两种矿物为研究对象, 通过对 *R. erythropolis* 本性及这两种矿物吸附前后矿物表面性能的变化及浮选效果和机理的研究, 分析这种微生物作为赤铁矿捕收剂使用的可行性。

1 实验

1.1 原料

实验所用赤铁矿和石英均为纯矿物, 经化学分析, 其矿物含量分别为 97.6%(质量分数)和 99.9%。赤铁矿和石英经表面纯化处理后在瓷球磨中干磨至粒径小于 30 μm 备用。

R. erythropolis 购至中国农业微生物菌种保藏中心, 编号为 ACCC 10188, 革兰氏阳性菌。所用培养基组成如下: 牛肉膏 3 g, 蛋白胨 10 g, NaCl 5 g, 赤铁矿 0.01 g, H₂O 1 L, pH 7.2。图 1 所示为 *R. erythropolis* 在温度为 30 °C、转速为 180 r/min 生物摇床中的生长曲线。

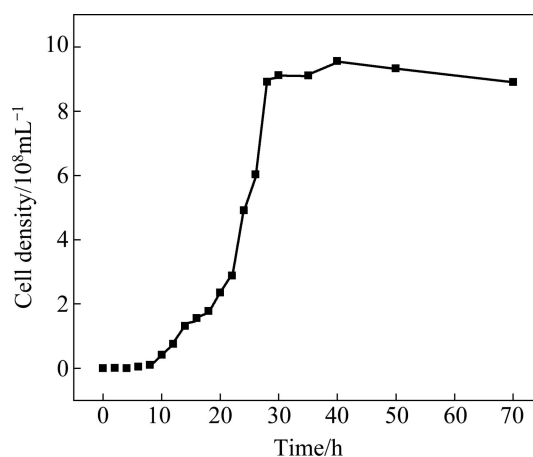


图 1 温度为 30 °C、转速为 180 r/min 时 *R. erythropolis* 的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of *R. erythropolis* at 30 °C and rotation rate of 180 r/min

实验所用 *R. erythropolis* 为培养 28 h 后的培养物经多次离心、洗涤脱除剩余培养基后获得的菌体。菌体保存在 0.01 mol/L 的 NaCl 溶液中, 并放入 4 °C 冰箱备用。单位体积的菌体浓度用重量法确定。

1.2 实验方法

用 Quanta 200 扫描电子显微镜 (SEM) 观察 *R. erythropolis* 的形貌以及 *R. erythropolis* 在赤铁矿表面吸附后的状态。观察前, 试样经反复离心洗涤, 再用临界点干燥法干燥后进行喷金处理。

用 Nicolet 6700 红外光谱分析仪测定 *R. erythropolis* 表面及其作用前后赤铁矿表面的基团。测定前, 先进行多次洗涤, 并在真空度为 -0.1 MPa 的干

干燥箱中干燥 24 h。

用 Zeta 电位分析仪(Brookhaven Instruments Corp., zeta-potential analyzer ver5.57)测定 *R. erythropolis* 及其作用前后赤铁矿、石英表面的 Zeta 电位。测定时,菌体和矿物浓度均为 100 mg/L,预先分散在 0.01 mol/L 的 NaCl 溶液中,并调节 pH 值至设定值。

用 JY-82 型接触角测定仪测定 *R. erythropolis* 及其作用前后矿物表面的疏水性。将培养 28 h 后的菌体离心收集、无菌水洗涤 2 次,用 0.45 μm 硝酸纤维素膜过滤直到滤膜上菌体浓度高于 $1 \times 10^8 \text{ mm}^{-2}$,再将滤膜平铺在无菌琼脂培养基上室温放置 2 h 润湿均匀,然后放在普通滤纸上干燥,干燥后的滤膜放到接触角测量仪上测量,得到 *R. erythropolis* 的接触角为 $(70 \pm 3)^\circ$;将 3 g *R. erythropolis* 作用前后的赤铁矿和石英在 100 mm $\times$ 50 mm 模具中进行压片,带模进行接触角测定,获得相应条件下的接触角数据。

采用一段浮选流程,包括赤铁矿、石英纯矿物的浮选及其混合矿(1:1,质量比)的浮选,在 30 mL 小型浮选槽中进行。称取 3 g 浮选试样,加入具有去离子水的浮选槽中搅拌 2 min,用 1 mol/L HCl 或 1 mol/L NaOH 调浆至设定 pH 值,再加入 *R. erythropolis* 搅拌 10 min,刮泡 10 min。将上浮产品过滤、烘干、称量,化验,计算回收率。

2 结果与讨论

2.1 *R. erythropolis* 形貌及表面基团分析

图 2 所示为 *R. erythropolis* 的形貌。由图 2 可见,其菌体尺寸为 $0.5 \mu\text{m} \times (2 \sim 4) \mu\text{m}$,是一种杆状细菌。

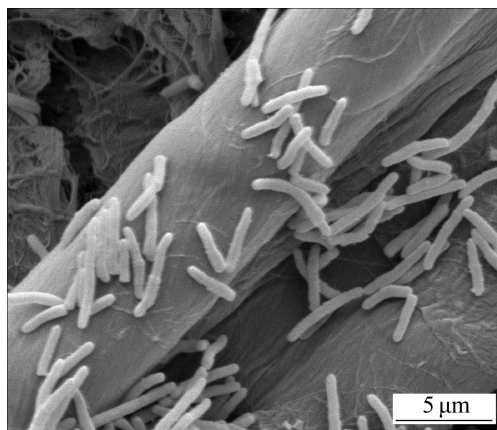


图 2 *R. erythropolis* 的 SEM 像

Fig. 2 SEM image of *R. erythropolis*

图 3 所示为 *R. erythropolis* 细胞壁的红外光谱。由图 3 可见,在红外光谱中出现了不同基团的振动峰。在 3398.52 cm^{-1} 处出现了羟基($-\text{OH}$)的伸缩振动峰,在 2926.40 cm^{-1} 处出现了 $-\text{CH}_2$ 、 $-\text{CH}_3$ 的伸缩振动峰,在 1716.36 cm^{-1} 处出现了羧基($-\text{COO}^-$)的弯曲振动峰, 1652.77 cm^{-1} 处为 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰, 1540.00 cm^{-1} 处为 $-\text{NH}$ 的弯曲振动峰, 1389.68 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 的弯曲振动峰, 1236.66 cm^{-1} 处为 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 的复杂振动峰, 1059.44 cm^{-1} 处为磷酸基的反对称伸缩峰, 690.40 cm^{-1} 处为 $\text{C}=\text{O}$ 的弯曲振动或 $-\text{COO}^-$ 的弯曲振动峰, 533.65 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2$ 的摇摆振动峰。其中, $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 使菌体表面具有疏水性,磷酸基和 $-\text{COO}^-$ 基团使菌体表面具有亲水性。因此, *R. erythropolis* 表面的性质类似于脂肪酸类捕收剂表面的性质,有可能作为赤铁矿的捕收剂使用。

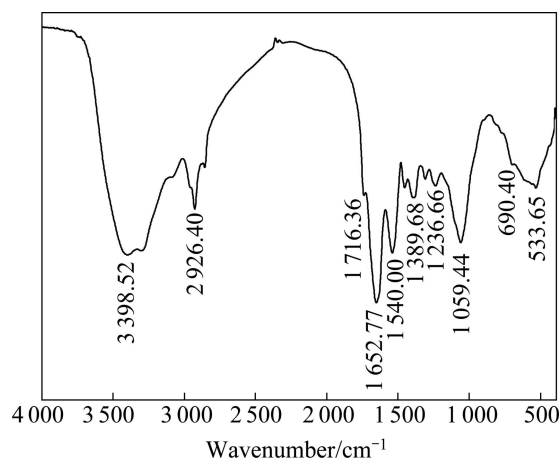


图 3 *R. erythropolis* 细胞壁的红外光谱

Fig. 3 Infrared spectrum of *R. erythropolis* cell wall

2.2 Zeta 电位和接触角测量

R. erythropolis 能否吸附于矿物表面,受矿物表面电性和 *R. erythropolis* 表面电性的共同影响。赤铁矿和石英均为氧化矿,其表面电性受溶液 pH 值影响。*R. erythropolis* 细胞壁的组成也决定了其表面电性受溶液 pH 值的影响。图 4 所示为溶液 pH 值对 *R. erythropolis*、*R. erythropolis* 吸附前后的赤铁矿和石英表面电性的影响。

由图 4 可见, *R. erythropolis* 具有较高的负电性,在 pH 为 2~10 范围内,其表面 Zeta 电位始终低于 0。赤铁矿表面的 Zeta 电位在整个溶液 pH 范围内始终高于 *R. erythropolis* 表面的 Zeta 电位,石英表面的 Zeta 电位则在溶液 $\text{pH} < 7$ 时高于 *R. erythropolis* 的 Zeta 电

位,在溶液 $\text{pH} > 7$ 时低于 *R. erythropolis* 的 Zeta 电位。赤铁矿和石英表面的零电点(IEP)分别为 $\text{pH} \approx 5.5$ 和 $\text{pH} \approx 3.0$ 。可以判断,当矿浆 $\text{pH} < 5.5$ 时,带负电的 *R. erythropolis* 很容易吸附于带正电的赤铁矿表面;当 $\text{pH} < 3$ 时,带负电的 *R. erythropolis* 也容易吸附于带正电的石英表面;当 pH 为 $3.0 \sim 5.5$, *R. erythropolis* 更易吸附在带正电的赤铁矿表面,较难吸附在带负电的石英表面。虽然在矿浆 pH 为 $5.5 \sim 7$ 时 *R. erythropolis*、赤铁矿和石英表面均带负电,但由于赤铁矿表面所带负电荷较石英表面所带负电荷少, *R. erythropolis* 吸附在赤铁矿表面的可能性依然大于吸附在石英表面的可能性。而当矿浆 $\text{pH} > 7$ 时, *R. erythropolis* 与赤铁矿、石英的电位差值变小,排斥作用增大,因此, *R. erythropolis* 对赤铁矿、石英的吸附作用减小。

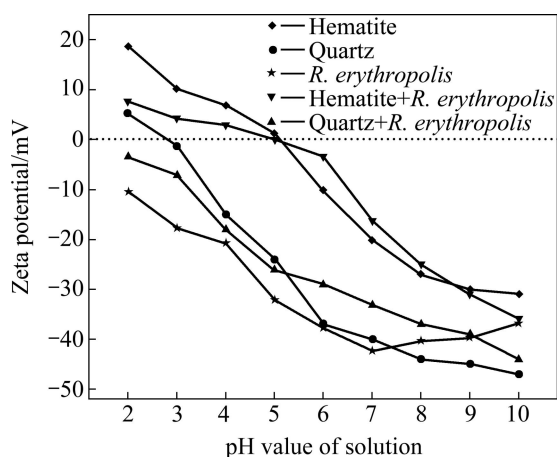


图4 不同溶液 pH 值时 *R. erythropolis* 及其吸附前后赤铁矿、石英表面的 Zeta 电位

Fig. 4 Zeta potentials of bacterial cells, hematite and quartz before and after treatment with cells at different pH values of solution

R. erythropolis 在矿物表面的吸附调整了矿物表面的电性,使赤铁矿表面的零电点(IEP)从吸附前的 $\text{pH} = 5.5$ 升高到 $\text{pH} = 6.2$,石英表面的零电点则从吸附前的 $\text{pH} = 3.0$ 到不存在。

R. erythropolis 在矿物表面吸附调整矿物表面电性的同时,也必定会以本身疏水性调整矿物表面的疏水性。图5所示为溶液 $\text{pH} = 5.5$ 时 *R. erythropolis* 用量对矿物表面疏水性的影响。由图5可见,具有疏水性的 *R. erythropolis* 在矿物表面的吸附提高了矿物表面的疏水性。赤铁矿和石英本身的接触角仅分别为 20° 和 2.1° ,随着微生物用量的增加,赤铁矿表面的接触

角逐渐增大,微生物用量达 45 mg/L 后趋于平缓。石英表面的接触角也随着微生物用量的增加而增大,但增幅较小。当微生物用量为 45 mg/L 时,赤铁矿和石英表面的接触角分别达到 58.8° 和 10° 。

综上所述, *R. erythropolis* 的吸附调整赤铁矿、石英表面电性和疏水性的特点,对扩大赤铁矿和石英表面性质差异具有重要意义,为赤铁矿和石英的浮选分离创造了前提条件。

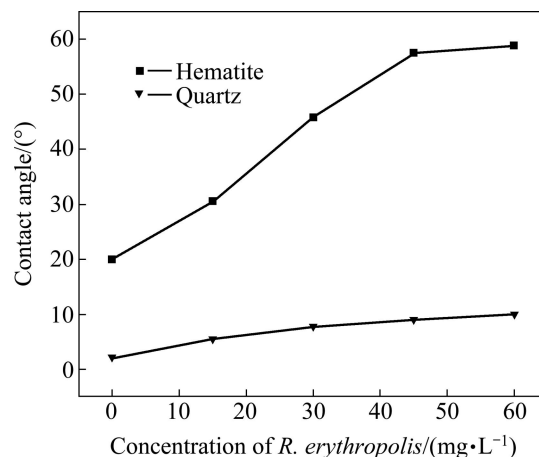


图5 $\text{pH} = 5.5$ 时 *R. erythropolis* 用量对矿物接触角的影响

Fig. 5 Effect of *R. erythropolis* concentration on mineral contact angle at $\text{pH} = 5.5$

2.3 浮选试验

图6所示为矿浆 pH 值对赤铁矿和石英浮选回收率的影响。由图6可见,矿浆 pH 值对赤铁矿的回收

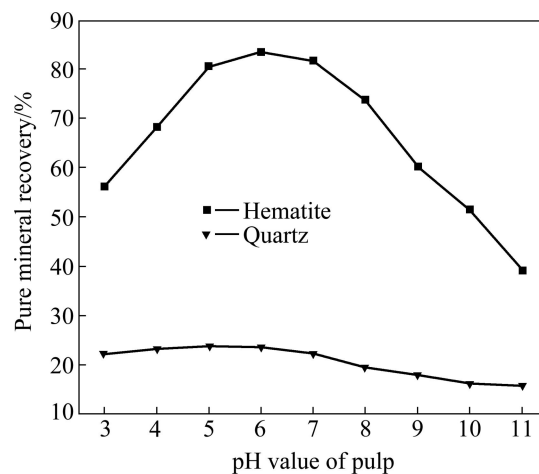


图6 *R. erythropolis* 用量为 40 mg/L 时矿浆 pH 值对赤铁矿和石英可浮性的影响

Fig. 6 Effect of pH value of pulp on flotation recovery at *R. erythropolis* concentration of 40 mg/L

率影响较大,对石英回收率的影响较小,说明 *R. erythropolis* 对赤铁矿的吸附作用大于对石英的吸附作用。在矿浆 pH 值为 6 左右时,赤铁矿的回收率出现最大值,此时赤铁矿的回收率为 83.27%,而石英的回收率仅为 23.72%。矿浆 pH=6 正好对应于图 4 中 *R. erythropolis* 与赤铁矿的静电引力较大、与石英吸引力较小的 pH 范围。

图 7 所示为 pH 值为 6 时 *R. erythropolis* 用量对赤铁矿和石英浮选回收率的影响。由图 7 可见, *R. erythropolis* 用量对赤铁矿的回收率影响很大,而对石英回收率的影响较小。随着 *R. erythropolis* 用量的增加,赤铁矿回收率迅速增大,当 *R. erythropolis* 用量达到 45 mg/L 时,增大幅度才明显减小。而石英的回收率随着 *R. erythropolis* 用量的增加持续增大,但增幅却很小。当微生物用量为 75 mg/L 时,赤铁矿回收率最大,为 89.68%,而石英的回收率仅为 26.25%。这是因为微生物用量增大,赤铁矿表面的疏水性增强,导致赤铁矿和石英表面的可浮性差异扩大,从而造成赤铁矿和石英回收率的差异。

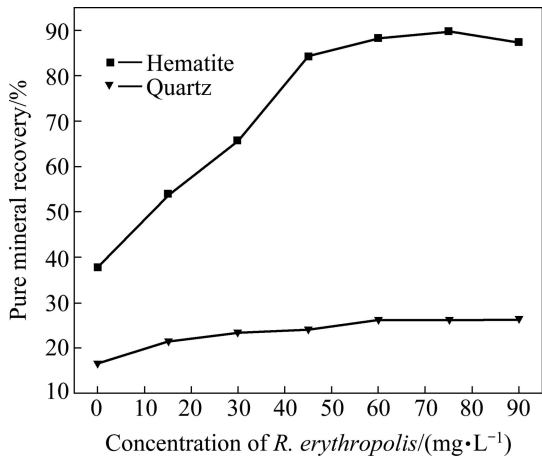


图 7 pH 值为 6 时 *R. erythropolis* 用量对赤铁矿和石英可浮性的影响

Fig. 7 Effect of concentration of *R. erythropolis* on flotation recovery of hematite and quartz at pH value of 6

以上研究表明,在矿浆 pH 值为 6、*R. erythropolis* 用量为 75 mg/L 的条件下, *R. erythropolis* 对赤铁矿的捕收作用明显大于对石英的捕收作用。为考察 *R. erythropolis* 从赤铁矿、石英混合矿中分离赤铁矿的可行性及效果,对混合矿进行浮选试验,结果见表 1。

由表 1 可见, *R. erythropolis* 可以从赤铁矿-石英混合矿(1:1,质量比)中分离出赤铁矿。经过一次浮选,可分离获得铁品位和铁回收率分别为 50.08%和

表 1 *R. erythropolis* 从赤铁矿-石英混合矿中分离赤铁矿
Table 1 Separation of hematite-quartz mixture (1:1, mass ratio) through flotation using *R. erythropolis*

Product	Yield/%	Grade/%	Recovery/%
Iron concentrate	51.57	50.08	76.41
Tailing	48.43	16.46	23.59
Hematite-quartz (1:1) mixture	100.00	33.80	100.00

76.41%的铁精矿,进一步证明 *R. erythropolis* 对赤铁矿的捕收作用大于对石英的捕收作用, *R. erythropolis* 可作为赤铁矿的捕收剂使用。

2.4 *R. erythropolis* 在赤铁矿表面的吸附及吸附基团

图 8 所示为 *R. erythropolis* 在赤铁矿表面吸附的 SEM 像。由图 8 可见,当 *R. erythropolis* 在赤铁矿表面的吸附时,有单个细菌的吸附,也有多个细菌的吸附,但主要是多个细菌的吸附。吸附于赤铁矿表面的细菌互相吸引,象“架桥”一样将赤铁矿颗粒连成一

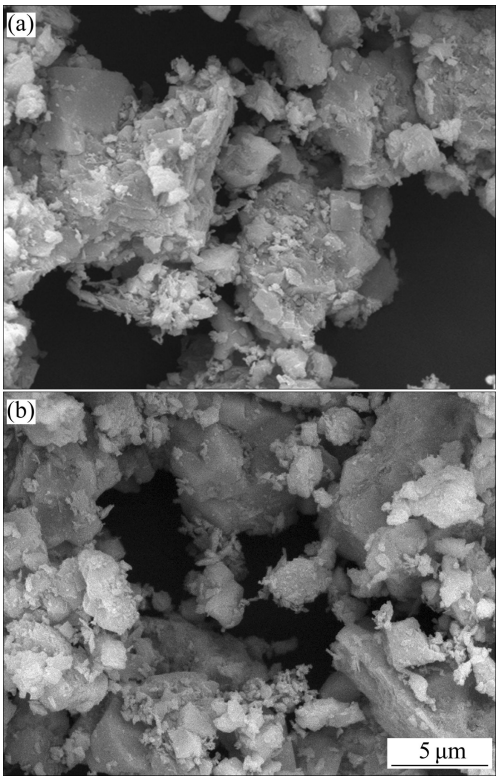


图 8 *R. erythropolis* 作用后赤铁矿表面的 SEM 像
Fig. 8 SEM images showing attachment of *R. erythropolis* on hematite: (a) *R. erythropolis* on hematite surface; (b) *R. erythropolis* between hematite particles

体,形成赤铁矿絮团。

图9所示为 *R. erythropolis* 吸附前后赤铁矿表面的红外光谱。由图9可见,赤铁矿经 *R. erythropolis* 吸附后,表面多了6个图3中 *R. erythropolis* 细胞壁所具有的振动峰,但这些振动峰的位置与图3相比均发生了不同方向的位移。如 $3\,407.40\text{ cm}^{-1}$ 处—OH的伸缩振动峰发生了左移, $2\,921.74\text{ cm}^{-1}$ 处—CH₂和—CH₃的伸缩振动峰、 $1\,643.48\text{ cm}^{-1}$ 处C=O的伸缩振动峰及 $1\,539.13\text{ cm}^{-1}$ 处—NH的弯曲振动峰均发生了右移, $1\,400.00\text{ cm}^{-1}$ 处—CH₂和—CH₃的弯曲振动峰发生了左移, $1\,047.26\text{ cm}^{-1}$ 处磷酸基的反对称伸缩峰发生了右移。同时发现,图3中 $1\,716.36\text{ cm}^{-1}$ 处—COO⁻的弯曲振动峰、 $1\,652.77\text{ cm}^{-1}$ 处的C=O的伸缩振动峰、 $1\,236.66\text{ cm}^{-1}$ 处C—O—C的复杂振动峰等在图9中无法观察到。说明 *R. erythropolis* 在赤铁矿表面的吸附以化学吸附为主,包括磷酸基、羧基与矿物表面的化学作用、疏水性赤铁矿颗粒之间的疏水缔合作用等。正是这些化学吸附使得赤铁矿表面的疏水性增强,并形成疏水絮团,增强了赤铁矿的可浮性,扩大了与石英的浮选分离效果。

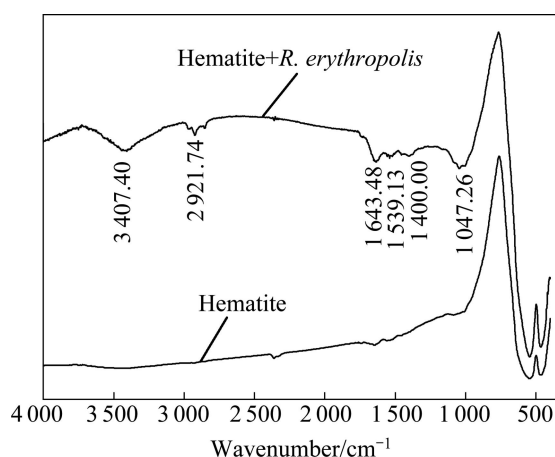


图9 *R. erythropolis* 作用前后赤铁矿表面的红外光谱

Fig. 9 Infrared spectra of hematite surface before and after treatment with *R. erythropolis*

3 结论

1) *R. erythropolis* 是一种杆状细菌,其表面同时存在疏水基团和亲水基团,是一种性质类似于脂肪酸类捕收剂的生物表面活性剂。

2) *R. erythropolis* 表面的 Zeta 电位低于石英表面的 Zeta 电位,更低于赤铁矿表面的 Zeta 电位,因此,

其对赤铁矿的吸附亲和力比对石英的吸附亲和力大。吸附后, *R. erythropolis* 不但调整了赤铁矿和石英的表面电位,也增强了赤铁矿和石英表面的疏水性,提高了赤铁矿和石英浮选分离的可行性。

3) 在矿浆pH值为6、*R. erythropolis*用量为75 mg/L的条件下进行浮选获得的赤铁矿和石英的回收率分别为89.68%和26.25%,两者相差63.43%。混合矿经过一次浮选,可获得铁品位和铁回收率分别为50.08%和76.41%的铁精矿。

4) *R. erythropolis* 能像“架桥”一样将赤铁矿颗粒连接而形成具有疏水性的赤铁矿絮团,且在赤铁矿表面发生以化学吸附为主的吸附。

5) *R. erythropolis* 对赤铁矿表面具有选择性吸附作用,可作为赤铁矿的捕收剂使用。

REFERENCES

- [1] RAO K H, VILINSKA A, CHEMNYSHOVA I V. Minerals bioprocessing: R & D needs in mineral biobeneficiation[J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(3): 465-470.
- [2] SMITH R W, MISHRA M. Mineral bioprocessing—An overview[C]//Mineral Bioprocessing. Pennsylvania: The Minerals Metals and Materials Society, 1991: 3.
- [3] DUBEL J, SMITH R W, MISRA M, CHEN S. Microorganisms as chemical reagents: The hematite system[J]. Minerals Engineering, 1992, 5(3): 547-556.
- [4] MISRA M, CHEN S, SMITH R W. *Mycobacterium phlei* as a flotation collector for hematite[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 1993, 10(1): 170-176.
- [5] SHASHIKALA A R, RARCHUR A M. Role of interfacial phenomena in determining adsorption of *Bacillus polymyxa* onto hematite and quartz[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2002, 24(1): 11-20.
- [6] DEO N, NATARAJAN K A. Studies on interaction of *Paenibacillus polymyxa* with iron ore minerals in relation to beneficiation[J]. International Journal of Mineral Processing, 1998, 55(1): 41-60.
- [7] MESQUITA L M S, LINS F F, TOREM M L. Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite-quartz flotation system[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71(1): 31-34.
- [8] SARVAMANGALA H, NATARAJAN K A. Microbially induced flotation of alumina, silica/calcite from haematite[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 9(1): 70-77.
- [9] RAICHUR A M, MISRA M, BUKKA K, SMITH R W. Flocculation and flotation of coal by adhesion of hydrophobic

- Mycobacterium phlei*[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 1996, 8(1): 13–24.
- [10] BOTERO A E C, TOREM M L, MESQUITA L M S. Fundamental studies of *Rhodococcus opacus* as a biocollector of calcite and magnesite[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(10): 1026–1032.
- [11] FARAHAT M, HIRAJIMA T, SASAKI K, AIBA Y, DOI K. Adsorption of *SIP E. coli* onto quartz and its applications in froth flotation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(5): 389–395.
- [12] CHANG W N, LIU C W, LIU H S. Hydrophobic cell surface and bioflocculation behavior of *Rhodococcus erythropolis*[J]. Process Biochemistry, 2009, 44(9): 955–962.
- [13] LIU C W, LIU H S. *Rhodococcus erythropolis* strain NTU-1 efficiently degrades and traps diesel and crude oil in batch and fed-batch bioreactors[J]. Process Biochemistry, 2011, 46(1): 202–209.
- [14] CARLA C C R. Adaptation of *Rhodococcus erythropolis* cells for growth and bioremediation under extreme conditions[J]. Research in Microbiology, 2012, 163(2):125–136.
- [15] 刘 镔, 马 洁, 孙西同, 孙晓彦. 直流电场对红串红球菌 NCC-1 脱硫效率的影响及电刺激机理的初探[J]. 应用化学, 2010, 27(9): 1071–1075.
- LIU Bin, MA Jie, SUN Xi-tong, SUN Xiao-yan. Electro-stimulation mechanism and desulfurization ratio of *Rhodococcus erythropolis* NCC-1 with the presence of direct current[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2010, 27(9): 1071–1075.

(编辑 陈卫萍)