

微生物在矿物表面吸附的研究进展

贾春云^{1*} 李培军¹ 魏德洲² 张海荣¹ 刘宛¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所 辽宁 沈阳 110016)

(2. 东北大学资源与土木工程学院 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 微生物在矿物表面的吸附是微生物与矿物表面深度作用的前提,也是生物药剂在选矿中的应用的基础研究。本文综述了影响微生物在矿物表面吸附的环境因素,微生物细胞与矿物表面之间的相互作用,微生物细胞表面基团、表面成分及其胞外聚合物对吸附过程的影响,并提出了今后的研究方向。

关键词: 微生物, 矿物, 吸附, 影响因素, 相互作用

Research Advances on Adsorption of Bacteria to Mineral Surface

JIA Chun-Yun^{1*} LI Pei-Jun¹ WEI De-Zhou² ZHANG Hai-Rong¹ LIU Wan¹

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

(2. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: Adsorption of bacteria to mineral surface is the premise of deep interaction of bacteria and mineral, and is also the fundamental application research of bacteria in mineral processing as reagents. The environmental factors influencing adsorption of bacteria to mineral surface, interaction between bacteria and mineral, effect of bacterial surface groups, surface components and its extracellular polymer substance on adsorption were summarized in this article, and the research direction of microbe applying in mineral processing is proposed.

Keywords: Bacteria, Mineral, Adsorption, Influencing factor, Interaction

微生物选矿是微生物学、化学及其他工程学科在矿物加工领域中的综合应用,是利用某些微生物或其代谢产物与矿物相互作用,产生氧化、还原、溶解、吸附等反应从而脱除矿石中不需要的组分或回收其中有价金属的技术。国外近 10 年来对微生物选矿药剂进行广泛而创造性的研究,包括微生物捕收剂、调整剂和絮凝剂等,虽然已取得了一些令人

鼓舞的实验室研究成果,但获得工业应用尚有很长的距离。国内在微生物浮选调整剂方面进行了较多的实验室研究,但作为捕收剂的应用研究特别少。

微生物要作为选矿药剂使用,它在矿物表面的吸附必须达到一定的数量才能调整和改变矿物的表面性质,进而实现两种或多种矿物之间的分离。吸附是微生物生命活动的基本特征,也是微生物与矿

基金项目: 国家 863 计划项目(No. 2008AA06Z331); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX-YW-446); 国家基金重点项目(No. 40930739); 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室项目; 全国土壤现状调查与污染防治专项

* 通讯作者: Tel: 86-24-83970367; E-mail: jiachunyun@126.com

收稿日期: 2010-01-22; 接受日期: 2010-02-18

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

物作用的第一步。在生物冶金的基础研究中,目前达成共识的是微生物在矿物颗粒表面的吸附是微生物与矿物表面深度作用的前提^[1-2]。近年来,生物选矿领域内研究较多的是微生物在矿物表面的吸附情况及其对矿物分选效果的影响、微生物细胞与矿物表面之间的相互作用方式、微生物表面成分及其代谢产物对吸附效果的影响等。

1 影响微生物在矿物表面吸附的环境因素

关于微生物在矿物表面吸附的环境因素,研究者大多选择一些可以表观的物理化学参数作为影响因素研究其对吸附过程的影响,例如不同的矿物化学表面组成、矿浆浓度、矿样粒度、营养条件、温度、pH 值、有毒元素的浓度等^[3]都会影响微生物细胞在矿物表面的吸附情况。

陈建华等人^[4]研究了产碱杆菌和酵母菌在方解石、石英和锡石表面的吸附情况,主要考察了反应时间、反应温度、pH 值、微生物种类和驯化条件等对微生物吸附的影响,结果表明,吸附的最佳时间为 6 min, pH 值为 2 时吸附率最大。沈岩柏^[5-7]、贾春云^[8-10]等人研究了诺卡氏菌、草分枝杆菌、氧化亚铁硫杆菌在硫化物矿物表面的吸附情况,主要考察了吸附时间、矿浆浓度、pH 值等对吸附效果的影响,结果表明,两种细菌在 10 min 内即可达到吸附平衡,而且 pH 值是影响细菌吸附率的主要因素;同样条件下这两种细菌在黄铁矿表面的吸附量明显大于在其他硫化物矿物。沙尔姆 PK 等^[11]研究了氧化亚铁硫杆菌在黄铁矿和黄铜矿表面的吸附情况,结果表明细菌细胞在矿物表面的吸附是一个很快的进行过程,而且基质上生长的细菌在黄铁矿表面的吸附量大于黄铜矿。Santhiya D 等人^[12]报道了吸附在方铅矿和闪锌矿表面上的 *Thiobacillus thiooxidans* (*T. t*) 数量与 pH 无关,但是,细菌细胞在方铅矿上的吸附量比在闪锌矿上的吸附量高 1 个数量级;与 *T. t* 菌作用 1h 后闪锌矿的浮选回收率不受影响,而与 *T. t* 菌作用 1 h 后在 pH 5-11 范围内,方铅矿的浮选几乎完全被抑制。Mohsen Farahat 等人^[13]的研究结果表明 pH 小于 4.3 时 *Escherichia coli* 在石英表面的吸附量最大, pH 4.5-8.5 之间 *Escherichia coli* 在刚玉表面的吸附量也比较大,而在整个 pH 值范围内 *Escherichia coli* 在赤铁矿表面的吸附量都很低,

并用扩展的 DLVO 理论解释了这种吸附现象。另外还有许多研究者^[14-15]报道了一些环境因素对微生物细胞在矿物表面吸附效果的影响。

在微生物细胞与矿物表面接触过程中,这些可以表观的参数改变了二者的作用环境,进而影响到吸附效果。不同矿物因其表面化学组成不同,表面疏水性、表面键能、不均匀性、溶解性等都存在差异,因此同样条件下,同种菌种在不同矿物表面的吸附效果也存在差异;对于同一菌种,当矿浆浓度、矿样粒度不同时,矿物颗粒的表面积不同,因此吸附效果也不同;不同的营养条件影响细胞的生长情况,进而影响细胞活性,此外,不同菌种的最佳生长温度范围不同,因此温度的改变也能影响细胞的活性,这些因素都能影响细胞在矿物表面的吸附效果;有毒元素的浓度大小影响细胞的生长情况,也影响矿物表面的各种理化性质;pH 值的大小能改变细胞和矿物表面的荷电性,改变二者之间的静电作用力的大小,此外, pH 值还能改变细胞的絮凝性、矿物表面的羟基化程度,这些因素的改变都能影响细胞的吸附效果。当其他条件一定的情况下,作用时间的长短也影响细胞的吸附效果,因为二者之间存在吸附平衡的问题。这些环境因素的改变,从本质上来说是改变了微生物细胞和矿物表面之间的物理作用力大小,表现在宏观效果上是改变了吸附效果。

2 微生物细胞与矿物表面之间的相互作用

微生物与矿物的界面作用涉及到一系列复杂的物理化学过程,也就是说,细菌吸附不仅取决于生物的生化特性而且还取决于作用体系中的各种界面的性质。总结已有的关于微生物在矿物表面吸附机理的研究结果,大致分为疏水相互作用、静电作用、氢键作用、化学键合作用等。微生物与矿物相互作用后既改变了细菌表面的化学性质,也改变了与其作用的矿物表面的化学性质。

2.1 疏水相互作用

疏水相互作用是非极性分子之间的一种弱的非共价的相互作用,这些非极性的分子在水相环境中具有避开水而相互聚集的倾向。微生物细胞在矿物表面的吸附过程中,疏水相互作用是指疏水性较强的细胞能够避开水易与疏水性较强的矿物

发生作用。

Preston Devasia 等^[16]研究指出,生长在硫、黄铁矿和黄铜矿中的 *Thiobacillus ferrooxidans* (*T. f*) 比生长在亚铁中的 *T. f* 表现出更强的疏水性,且前者的等电点高于后者。使用 *T. f* 进行的疏水相互作用层析和相分离的结果说明,生长在矿物基质上的细菌中超过 50% 的细菌能结合至辛基琼脂糖,而生长在亚铁离子液体培养基中的细菌只有大约 18% 的细菌结合至辛基琼脂糖,较大的疏水性可以帮助吸附。Devasia 还研究了 *T. f* 在黄铁矿表面的吸附,他指出增加 *T. f* 菌的疏水性可以有利于吸附过程,并通过测定细菌的接触角证明了疏水细菌比亲水细菌具有更大的吸附性。Naoya Ohmura 等^[17]运用 *T. f* 浸出黄铁矿、石英、黄铜矿和方铅矿,并对其选择性吸附进行了研究,用大肠杆菌(*E. coli*)作为对照,用接触角表示疏水性指标。在 5% 的氯化钠溶液中 *E. coli* 的接触角为 31°,在 pH 2.0 的硫酸溶液中 *T. f* 的接触角为 23°。4 种矿物在 pH 为 2.0 硫酸溶液中接触角按下列顺序变小:黄铜矿、方铅矿、黄铁矿、石英。矿物的疏水强度以相同的顺序降低。*E. coli* 倾向于通过疏水相互作用吸附至疏水性的矿物,而 *T. f* 选择性的吸附至含铁的矿物,如黄铁矿和黄铜矿。

2.2 静电作用

一些研究者报道,尽管在疏水细菌的吸附中疏水相互作用是占支配地位的,但静电相互作用常常存在并影响该过程。1993 年 Barrett 等在细胞壁物质中发现了荷电的官能团:羧基(-COOH)、氨基(-NH)和羟基(-OH)等。这些官能团在溶液中存在不同的电离常数,结果使得细胞荷正电或负电。Blake 等^[18]在 *T. f* 吸附到黄铁矿和硫上时发现了这种静电作用。Marshall^[19]通过电泳试验也发现与 *T. f* 作用后黄铁矿和硫粉的等电点明显右移,表明细菌表面电性对矿物表面性质的改变。硫、黄铁矿和黄铜矿与 *T. f* 相互作用后比作用前矿物等电点的初始值显示出明显的位移^[22]。这些研究结果表明细菌与矿物作用后,细菌与矿物的等电点均迁移至更高值,说明细菌在一个更宽 pH 值范围内荷正电,而矿物也在一个更宽 pH 值范围内电负性逐渐增强,这种动电学变化将促进细菌吸附至矿物。在 pH 值为 2.0 的硫酸溶液中黄铁矿和 *T. f* 的 Zeta 电位分别为 -7.0 mV 和

-4.6 mV,表明 *T. f* 能够选择性的吸附至黄铁矿。在各种矿物中 *T. f* 能够选择性的吸附至黄铁矿和黄铜矿,生物这种选择性维持了它在矿物表面的生长。Fowler^[20]用混合电位模式解释了固着细菌的作用,该模式说明随着细菌表面 pH 值的增加浸出率增加,而混合电位降低。

2.3 氢键作用

除了上述讨论的疏水相互作用和静电作用外,通常认为氢键键合是普遍存在的吸附机理。这种推测是建立在傅立叶变换红外光谱(FTIR)、核磁共振(NMA)和拉曼光谱等现代表面分析技术基础之上的。不同矿物表面上不仅氢键质点数存在差异,氢键能也存在差异。这种键能的差异可归因于存在不同类型的表面羟基团(M-OH)。由于细菌表面多糖等物质具有多个羟基以及羧基、羰基等,可与矿物表面及其表面的水化层在多个部位形成氢键。

Santhiya^[21]等人利用 FTIR 技术对 *Acidithiobacillus thiooxidans* (*A. t*) 进行了研究,检测到了两种硫化矿吸附 *A. t* 后波数移动的结果,为氢键作用机理提供了依据。中南大学傅建华^[22]研究了硫培养和亚铁培养细菌的红外图谱的差异性,指出多羟基肽键、C-O 键和氢键等在吸附过程中起着重要作用。布叶罗帕乌里克 M 等人^[23]研究了氢键在提高分选效率的药剂吸附中的作用,认为氢键是一个控制吸附的重要因素,而且氢键键合类型与物质表面结构密切相关。Subramanian 等^[24]通过浮选试验、絮凝试验考查了方铅矿和闪锌矿与多黏芽孢杆菌代谢物之间的相互作用,得出细胞代谢物中多糖化合物的羟基通过氢键和化学力与矿物表面上的金属氢氧化物作用。Rong XG 等^[25]报道在 *Pseudomonas putida* 细胞与高岭石、蒙脱石作用的过程中氢键起到很重要的作用。

2.4 化学键合作用

依据有机药剂与矿物的作用理论,在吸附过程中,细胞表面有机基团与矿物表面金属元素会发生化学键合作用。已有的文献资料多数是根据细胞表面基团的分析推断出细胞与矿物表面之间的化学作用,或者简单的提及细胞表面基团与矿物表面金属元素之间的键合作用,并没有深入的分析具体的化学作用力及其原子间的键合方式。

Namita Deo 等人^[26]研究了 *Paenibacillus po-*

lymyxa (*P. p*) 在赤铁矿、刚玉和石英表面的黏附机理, 得出界面作用能是细菌吸附到赤铁矿和刚玉表面的主要作用力, 化学作用力可能是细菌吸附到石英表面的主要作用力。王军等人^[27]研究了细菌对硫化物矿物可浮性影响的研究, 指出细菌和黄铁矿之间的作用力之一是菌体表面粘膜中分布的活性基团, 如羟基(-OH)、羧基(-COOH)、巯基(-SH)等易与矿物表面发生强的键合作用。

3 微生物自身特性对吸附的影响

3.1 微生物表面功能基团对吸附的影响

近年来, 一些研究者开始关注微生物表面功能基团、矿物表面结构及其成分对吸附效果的影响。Vilinska A 等人^[28]通过对与 *Leptosirillum ferrooxidans* (*L. f*) 作用前后黄铁矿和黄铜矿的红外光谱分析得出细胞表面的功能基团在吸附过程中起到很重要的作用, 而且 *L. f* 与黄铜矿表面高的亲和性源于黄铜矿的表面积大于黄铁矿, 这是由于黄铜矿晶格表面大缺陷和表面 Fe 原子易于接近。贾春云、魏德洲等人^[29-30]通过研究得出氧化亚铁硫杆菌、草分枝杆菌两种细胞表面均含有 C-O-H、C-O-C、C=O、C-N 等基团, 氧化亚铁硫杆菌细胞表面含有比较明显的 S=O 和 S-H 基团, 而草分枝杆菌细胞表面含有比较明显的 P=O 基团。另外, 草分枝杆菌细胞表面 C-O-H 或 C-O-C、C=O 或 C(=O)-OH、C-N 基团的含量明显大于氧化亚铁硫杆菌, 吸附细胞前后矿物表面的光电子能谱分析结果表明, 两种细胞表面的 O-H 或 N-H、C=O 等有机基团通过矿物表面的 Fe、Cu、Pb、Zn、S 元素与矿物表面发生了化学吸附, 与矿物表面金属元素的作用程度大于硫元素。而且, 氧化亚铁硫杆菌细胞的吸附对 4 种硫化物矿物表面元素化学环境的改变程度比较大, 草分枝杆菌的吸附对黄铁矿表面各元素化学环境的改变程度最大, 黄铜矿次之, 方铅矿和闪锌矿居后。

3.2 微生物表面成分对吸附的影响

已有研究者通过多种方法研究了微生物在矿物表面的吸附行为并提出了各种观点, 有人认为疏水性和动电相互作用在初始吸附过程中起着重要作用, 还有研究者认为外源凝聚素对于多糖-蛋白质复合物纤维具有特定的吸引力并且也能促使在细菌与矿物之间形成聚合桥。Sampson 等^[31]总结了微生物吸

附到矿物的作用方式, 其中涉及到微生物表面分泌的黏液层、结合蛋白受体、多糖-蛋白质复合物和菌毛等。由于细菌表面成分十分复杂, 它们的物理、生物-化学性质直接影响着细菌吸附至矿物表面。

3.2.1 细菌表面蛋白对吸附的影响: 在生物浸出实验中, 人们发现以黄铁矿和黄铜矿生长的细菌与以硫生长的细菌的抗血清能进行免疫反应, 而亚铁生长的细菌对于相同的抗血清没有显示出免疫反应。表明矿物生长的细菌产生了一种新的表面成分, 并且推断它与促进吸附至矿物表面的过程有关。研究者还发现硫基质中培养的细菌比黄铜矿、黄铁矿、硫代硫酸盐以及亚铁培养细菌的表面蛋白质含量高许多, 细菌表面蛋白质含量愈高, 意味着细菌吸附率愈高, 为生物氧化的直接作用提供了关键的前提条件。为了弄清矿物生长细菌表面成分的性质, 通过 FTIR 差别谱获得了细菌表面敏感信息, 即特异性吸附和非特异性吸附的成分, 谱线将反映出两种成分的特性。这就为生长在固体能源下的细菌产生一种新的具蛋白质性质的表面成分提供了证据, 这种成分在表面吸附过程中发挥作用, 并可以解释疏水性和动电学的变化。Ohmura^[32]等研究者先后报道了特异蛋白 Aporusticyanin 的作用, 他们认为氧化亚铁硫杆菌首先依靠趋化性质靠近硫化矿物颗粒表面, 细菌中特异蛋白分别吸附到金属硫化物颗粒表面的铁和硫的部位。Natarajan KA 等^[33]报道与 *P. p* 作用后, 石英和高岭石表面上蛋白质占主导地位, 而且认为细菌代谢物和蛋白质作用后, 石英和高岭石 Zeta 电位向正值偏移可归因于蛋白质中的氨基的存在, 为了进一步证实生物处理的石英和高岭石表面确实有大量蛋白质物质的存在, 先用 K 胰酶处理这两种矿物, 然后研究他们的动电行为, 结果证实了上述结论。

3.2.2 细胞表面多糖对吸附的影响: 最近研究发现, 细菌的细胞壁能强烈的吸附金属阳离子, 而细菌胞壁的主要化学成分是多聚糖。这些多聚糖化合物表面有许多官能团, 如羧基、磷酸基和羟基等, 可以与金属离子相结合。革兰氏阳性菌的细胞壁中一般含有 90% 的肽聚糖, 革兰氏阴性菌细胞壁中含的糖类主要是脂多糖(Lipopolysaccharided, LPS)。Liu Qi 等人^[34]研究了多聚糖在矿物表面的吸附, 指出天然多糖都是通过表面金属的羟基化与矿物发生作用。

Natarajan KA^[35]等也报道了经 *P. p* 处理后,赤铁矿、方解石和刚玉表面细菌多糖占主导地位,已通过红外光谱结果验证,而且认为经细菌处理后 3 种矿物的动电行为也可归因于过量的多糖在这些矿物表面上的吸附。

3.3 胞外多聚物对吸附的影响

最新的文献主要探讨胞外多聚物(EPS)对细菌在矿物表面上附着的影响。EPS 聚合物也被称为胶质物或胶浆,它是细菌细胞新陈代谢的产物。这种聚合物主要是由高分子多糖、蛋白质和类脂化合物组成。EPS 在细菌细胞周围形成了胶浆外壳,它们承担着大量重要的功能,例如,保护细胞免受有毒物质的伤害。它们也为基质破裂创造了扩展的反应空间。

Harneit K^[36-37]等人研究了 *A. f.*、*A. t.* 和 *L. f.* 在金属硫化物表面的黏附,结果表明去除胞外聚合物后 *A. f.* 和 *A. t.* 在矿物表面的吸附量明显减少,3 种细菌的 EPS 化学分析结果表明含有中糖、脂肪酸和糖醛酸,而且在亚铁离子溶液和黄铁矿上生长的细菌的 EPS 中能检测到 Fe^{3+} ,而在硫基质上生长的细菌 EPS 中没有检测到 Fe^{3+} 。Somasundaran P 等^[38]研究了生物聚合物在细菌固着和矿物选别中的作用,FTIR 光谱结果表明,在石英中生长的 *P. p* 可产生更多的表面蛋白质,而在方解石中生长的细菌可产生更多的表面多糖。透射扫描电镜分析发现,Bromfield 介质中生长的细胞周围有黏液层存在,而方解石中生长的细胞被结构很好的皮囊多糖所包裹,相反地,石英中生长的细胞周围既没有皮囊,也没有黏液层存在。并认为石英表面上的细菌分泌更多的蛋白质,促使其在石英上固着。根据很多专家的观点,在细胞附着到矿物表面上的复杂机理中,EPS 起了重要作用。在一些研究者看来,EPS 甚至对嗜酸的氧化亚铁硫杆菌的选择性附着也起着重要作用。Partha Patra 等人^[39-41]报道了 *P. p* 细胞及其代谢产物比如胞外蛋白和多聚糖可用于方铅矿和黄铜矿的分选,胞外蛋白处理后黄铜矿得到选择性的絮凝,而方铅矿则呈分散状态,经过 *P. p* 胞外蛋白预处理,可以将闪锌矿、方铅矿、石英与黄铁矿、黄铜矿分选开。

4 结论与展望

关于微生物在矿物表面的吸附,普遍认为微生物细胞与矿物表面之间的作用主要是疏水相互作

用、静电作用和氢键键合等,这些作用都属于物理吸附。最近的研究结果表明了细胞表面多种有机基团在吸附过程中与矿物表面的金属离子具有键合作用,但是具体的作用方式却无人论述。随着分子生物学和各种先进检测手段的发展,微生物细胞表面有机基团的空间排布方式将能加以确定,我们可以选取周围环境与细胞表面某一基团类似的有机物进行模拟实验,采用带有分子碎片相互作用和分子轨道分析能力的量子化学程序 MOAN 等计算含有相同基团的有机物分子的电子结构及其与金属离子的作用,并能较详细的探讨它们的电子密度分布、键合状态以及与金属离子作用的活性位置和作用模式,从而更深层次的分析细胞表面功能基团与矿物表面元素的作用方式,为微生物选矿药剂的开发提供理论依据。

随着各种生物提取方法及其相应检测手段的发展,在微生物细胞与矿物表面作用过程中,我们可以提取在吸附过程中起关键作用的细胞表面某些特殊成分及其胞外多聚物,分析清楚这些组分的微观结构及其生理特性,更好的分析其在吸附过程中的作用。我们也可以根据这些组分的存在规律及其对吸附效果的影响,发掘更多更好的菌种,为微生物菌种在矿业中的应用提供理论基础。

参 考 文 献

- [1] 柳建设,王兆慧,耿梅梅,等. 微生物浸出中微生物-矿物多相界面作用的研究进展. 矿冶工程, 2006, 26(1): 40-44.
- [2] Chandrababha MN, Natarajan KA. Surface chemical and flotation behavior of chalcopyrite and pyrite in the presence of *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Hydrometallurgy*, 2006, 83(5): 146-152.
- [3] Nathan Yee, Jeremy B Fein, Christopher J Danghney. Experimental study of the pH, ionic strength, and reversibility behavior of bacteria mineral adsorption. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(4): 609-617.
- [4] 陈建华,陈晔,吴伯增,等. 方解石、石英和锡石生物吸附试验研究. 有色矿冶, 2005, 21(7)(增刊): 26-28.
- [5] 魏德洲,沈岩柏,李晓安,等. 诺卡氏菌在黄铁矿和闪锌矿表面的选择性吸附. 中国有色金属学报, 2006, 16(6): 1082-1088.
- [6] 沈岩柏,李晓安,魏德洲,等. *Nocardia* 在黄铁矿和方铅矿表面的选择性吸附. 中国有色金属学报, 2006,

- 15(12): 2016–2022.
- [7] 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. 金属矿山, 2005(4): 31–35.
- [8] 贾春云, 魏德洲, 高淑玲, 等. 氧化亚铁硫杆菌在硫化矿物表面的吸附. 金属矿山, 2007(8): 34–38.
- [9] 贾春云, 魏德洲, 沈岩柏, 等. 草分枝杆菌在黄铁矿和闪锌矿表面的选择性吸附机理研究. 中国有色金属学报, 2008, 18(1): 151–158.
- [10] 贾春云, 魏德洲, 沈岩柏, 等. 草分枝杆菌在黄铁矿和闪锌矿表面的选择性吸附研究. 有色矿冶, 2006, 22(1): 12–16.
- [11] Sharma PK, Hanumantha Rao K, Forssberg KSE, *et al.* Surface chemical characterization of *Paenibacillus polymyxa* before and after adaptation to sulfide minerals. *Int J Miner Process*, 2001, 62(1/4): 3–25.
- [12] Santhiya D, Subramanian S, Natarajan KA, *et al.* Bio-modulation of galena and sphalerite surfaces using *Thiobacillus thiooxidans*. *Int J Miner Process*, 2001, 62(1/4): 121–141.
- [13] Mohsen Farahat, Tsuyoshi Hirajima, Keiko Sasaki, *et al.* Adhesion of *Escherichia coli* onto quartz, hematite and corundum: Extended DLVO theory and flotation behavior. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2009, 74(1): 140–149.
- [14] Jiang D, Huang Q, Cai P, *et al.* Adsorption of *Pseudomonas putida* on clay minerals and iron oxide. *Colloids and Surfaces B*, 2007, 54(2): 217–221.
- [15] Mohsen Farahat, Tsuyoshi Hirajima, Keiko Sasaki, *et al.* Adsorption of SIP *E. coli* onto quartz and its applications in froth flotation. *Mineral Engineering*, 2008, 21(5): 389–395.
- [16] Devasia Preston, Natarajan KA, Sathyanarayana DN, *et al.* Surface chemistry of *Thiobacillus ferrooxidans* relevant to adhesion on mineral surfaces. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(12): 4051–4055.
- [17] Naoya Ohmura, Keiko Kitamura, Hiroshi Saiki. Selective adhesion of *Thiobacillus ferrooxidans* to pyrite. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(12): 4044–4050.
- [18] Blake HRC, Shute EA, Howard GT. Solubilization of minerals by bacteria: Electrophoretic mobility of *Thiobacillus ferrooxidans* in the presence of iron, pyrite and sulfur. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(9): 3349–3357.
- [19] Marshall KC. Interfaces in microbial ecology. Cambridge: Harvard University Press, 1976.
- [20] Fowler PR, Crundwell TA. Mechanism of pyrite dissolution in the presence of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(7): 2987–2993.
- [21] Santhiya D, Subramanlan S, Natarajan KA. Surface chemical studies on galena and sphalerite in the presence of *Thiobacillus thiooxidans* with reference to mineral beneficiation. *Minerals Engineering*, 2000, 13(7): 747–763.
- [22] 傅建华. 硫化铜矿浸矿细菌超微结构与吸附机理及 SFORase 的纯化. 中南大学博士学位论文, 2003.
- [23] 向平, 李崇德, 译雨, 等译. 氢键在提高分选效率的药剂吸附中的作用. 国外金属矿选矿, 2001(6): 36–39.
- [24] Subramanian S, Santhiya D, Natarajan KA. Surface modification studies on sulphide minerals using bioreagents. *Int J Miner Process*, 2002, 72(10): 175–188.
- [25] Rong XM, Huang QY, He XM, *et al.* Interaction of *Pseudomonas putida* with kaolinite and montmorillonite: A combination study by equilibrium adsorption, ITC, SEM and FTIR. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 64(1): 49–55.
- [26] Deo Namita, Natarajan KA, Somasundaran P. Mechanisms of adhesion of *Paenibacillus polymyxa* onto hematite, corundum and quartz. *Mineral Processing*, 2001, 62(1/4): 27–39.
- [27] 王军, 钟康年, 译. 细菌对硫化矿可浮性影响的研究. 国外金属矿选矿, 1996(5): 4–10.
- [28] Vilinska A, Hanumantha Rao K. *Leptosirillum ferrooxidans*-sulfide mineral interactions with reference to bioflotation nad bioflocculation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(6): 1403–1409.
- [29] Jia CY, Wei DZ, Liu WG, *et al.* Study on selective adsorption of bacteria on sulfide minerals surface. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(5): 1247–1252.
- [30] Jia CY, Wei DZ, Shen YB, *et al.* Study on selective adsorption of bacteria on pyrite and galena. Proceedings of the 24th International Mineral Processing Congress. Beijing: Beijing University Press, 2008: 1093–1100.
- [31] Sampson MI. Influence of the attachment of acidophilic bacteria during the oxidation of mineral sulfides. *Minerals Engineering*, 2000, 13(4): 373–389.
- [32] Ohmura N, Tsugita K, Koizumi J, *et al.* Sulfur-binding protein of flagella of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Bacteriology*, 1996, 178(19): 5776–5780.
- [33] Natarajan KA, Deo Namita. Role of bacterial interaction and bioreagents in iron ore flotation. *Int J Miner Process*, 2001, 62(7): 143–157.
- [34] Liu Q, Zhang YH, Laskowski JS. The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: An acid/base interaction. *Mineral Processing*, 2000, 60(3/4): 229–245.
- [35] Natarajan KA, Deo Namita. Role of bacterial interaction and bioreagents in iron ore flotation. *Int J Miner Process*, 2001, 62(7): 143–157.
- [36] Harneit K, Goksel A, Kock D, *et al.* Adhesion to metal sulfide surfaces by cells of *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Leptospirillum fer-*

rooxidans. *Hydrometallurgy*, 2006, **83**(5): 245–254.

- [37] Yu RL, Tan JX, Yang P, *et al.* EPS-contact-leaching mechanism of chalcopyrite concentrates by *A. ferrooxidans*. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, **18**(6): 1427–1432.
- [38] 李长根, 林森, 译. 生物聚合物在细菌固着和矿物选别中的作用. 国外金属选矿, 2005(7): 25–32.
- [39] Partha Patra, Natarajan KA. Microbially-induced separation of chalcopyrite and galena. *Minerals Engineering*,

2008, **21**(10): 691–698.

- [40] Partha Patra, Natarajan KA. Role of mineral specific bacterial proteins in selective flocculation and flotation. *Int J Miner Process*, 2008, **88**(1/2): 53–58.
- [41] Partha Patra, Natarajan KA. Surface chemical studies on selective separation of pyrite and galena in the presence of bacterial cells and metabolic products of *Paenibacillus polymyxa*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **298**(2): 720–729.

2010 年中国微生物学会及各专业委员会学术活动计划表

序号	会议名称	主办单位	时间	人数	地点	联系人
1	第三届生物资源与环境调控学术研讨会	中国微生物学会农业微生物专业委员会	5–6 月	120	安徽合肥	李峰 010-82109561
2	曲霉和曲霉病研讨会	中国微生物学会真菌学专业委员会	5 月 15–16 日	150	天津	刘伟 010-8357 3056
3	第八届中日病毒学会议	中国微生物学会病毒学专业委员会	7 月 4–7 日	100	黑龙江哈尔滨	张凤民 0451-86669576 钟照华 0451-86685122
4	第八届全国微生物学青年学者学术研讨会	中国微生物学会基础微生物学专业委员会	7 月 21–24 日	150	云南昆明	李文均 0871-5033335
5	第三届全国农业微生物研究及产业化研讨会	中国微生物学会农业微生物专业委员会	8 月	120	新疆阿拉尔	张利莉 agmicrob@mail.hzau.edu.cn
6	第二届微生物资源学术研讨会	中国微生物学会微生物资源专业委员会	8 月	150	黑龙江大庆	阮志勇 13301101231
7	第十一届全国土壤微生物学术讨论会暨第四届全国微生物肥料生产技术研究研讨会	中国微生物学会农业微生物专业委员会	9–10 月	150	湖南长沙	李俊 010-68975891
8	合成生物学学术研讨会	中国微生物学会分子微生物学与生物工程专业委员会	9–10 月	80	上海	朱春宝 021-62896804
9	2010 年全国微生物毒素与创伤感染学术会议	中国微生物学会微生物毒素专业委员会	9 月 17–20 日	250	重庆	梁华平 023-68757404
10	第 11 届中日韩国际酶工程学术研讨会	中国微生物学会酶工程专业委员会	10 月	150	四川成都	金城 64807425
11	病原进化与致病机制国际研讨会	中国微生物学会分析微生物学专业委员会	10 月 22–25 日	150	江苏镇江	倪斌
12	第十三次全国环境微生物学术研讨会	中国微生物学会环境微生物学专业委员会	10 月	500	江苏南京	蒋建东 025-84395326
13	2010 年中国微生物学会学术年会	中国微生物学会	10 月	500	安徽	王旭 010-64807200
14	首届全国芽孢杆菌研究及产业化研讨会	中国微生物学会基础、农业微生物学专业委员会	10 月	140	湖北武汉	翁锦周 bacillus@mail.hzau.edu.cn
15	第三届全国微生物基因组学学术研讨会	中国微生物学会基础、农业微生物学专业委员会	11 月	150	福建厦门	邵宗泽 micgeno@mail.hzau.edu.cn
16	第一届中国临床微生物学大会	中国微生物学会临床微生物学专业委员会	11 月	500	贵州遵义	李宣霖 13976609892