

# 矿物表面性质生物调节机理的研究

张东晨<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>1,2</sup>, 侯志翔<sup>1,2</sup>, 周倩倩<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 材料科学与工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽省现代矿业工程重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 在生物选矿过程中, 生物作用主要是发生在矿物表面, 利用生物调节作用使矿物表面电性、疏水性及润湿性等发生改变, 有利于矿物的生物加工与处理。微生物在矿物表面产生的界面作用涉及的是复杂的物理化学过程, 笔者对矿物表面与微生物之间的静电引力作用、特性吸附作用、黏附作用和微生物对能源物质需求的作用等进行分析, 探讨了微生物对矿物表面的作用特点及矿物表面物理化学特性的变化规律, 为深入研究和揭示矿物表面的生物调节改性的机理提供了一定的理论参考。

**关键词:** 矿物; 微生物; 吸附; 黏附; 生物改性

中图分类号: TQ939.97; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)01-0005-05

## Mechanism of microorganism regulating mineral surface properties

ZHANG Dong-chen<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1,2</sup>, HOU Zhi-xiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Qian-qian<sup>1,2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering Anhui University of Science and Technology Huainan 232001, China;

2. Key Laboratory of Modern Mining Engineering of Anhui Province Huainan 232001, China)

**Abstract:** In the course of biological mineral processing, the biological actions occur mainly on mineral surface. The electrical property, hydrophobic property and wettability of mineral surface can be modified by microorganism, which create favorable conditions for biological mineral processing. Interface effects come down to a series of complex physical and chemical process between mineral and microorganism. Study the electrostatic force, specific adsorption and adhesive attraction between mineral and microorganism, as well as energy substances requisite for some types of microorganism. Investigate the characteristics that microorganism act on mineral surface and change law of mineral surface properties. The results provide the theoretical reference for biological modification of mineral surface.

**Key words:** mineral; microorganism; adsorption; adhesion; biological modification

当前, 国民经济的快速发展使得对矿物资源的需求持续增长, 对矿物资源的开采力度越来越大, 而矿物资源日渐贫乏, 大量的贫杂矿开始引起人们

的重视。由于目前对贫杂的矿物资源存在着资源利用率低, 能源消耗大, 环境污染严重等问题, 人们开始寻找更加经济、环保的矿物加工方法。矿物生

收稿日期: 2012-10-18 责任编辑: 武英刚

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274012)

作者简介: 张东晨(1965—), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士, 主要从事矿物加工与生物洁净煤技术研究。E-mail: dchzhang@aust.edu.cn

引用格式: 张东晨, 王涛, 侯志翔, 等. 矿物表面性质生物调节机理的研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 5-9, 23.

物技术具有作用范围广、投资低、环境友好、污染小等优点。同时,由于微生物在自然界中分布来源极为广泛(如河流、湖泊、海洋、土壤、空气和矿层等)。因此,加强对矿物生物技术的研究具有广泛而深远的意义。

生物技术目前已经在铜、金和铀的提取上实现了工业应用,取得了良好的效果和收益,在对锌、镍、钴等金属的生物提取方面也取得了长足的进步。此外,生物技术在浮选、脱硫、絮凝及废水处理等矿物加工过程中作用的研究也取得了良好的效果。

作为新型交叉学科矿物生物加工领域里的一个重要的研究课题,矿物表面性质的生物调节近年来越来越受到关注。通过对微生物对矿物表面作用调节机理进行分析探讨,以便为进一步的深入研究提供理论参考。

## 1 矿物表面性质的生物调节

界面分选是根据矿物颗粒界面性质的天然差异或人工差异,直接或间接地利用相界面来实现矿物颗粒分选的工艺过程。矿物颗粒表面的生物改性是利用某些微生物来调节矿物颗粒的界面性质,并通过传统的工艺来实现矿物分选,从而达到降灰脱硫的目的。微生物对矿物颗粒表面性质的调节不同于传统的物理调节(如加热法、超声波处理、电磁波以及粒子束辐照等)和化学调节(如调整剂、表面活性剂等)它对矿物表面是一种生物调节的方法。

微生物体和矿物表面之间能通过某种作用形式产生吸附,矿物的表面性质就会被微生物的表面性质所影响或取代。通过这种方式可不同程度地改变矿物表面的物理化学性质,如疏水性、表面电性、吸附性、表面元素的氧化与还原性等。

微生物对矿物表面的改性是复杂的新型界面分选技术。其优点在于这种方法属于“绿色化学”范畴,是环境友好型技术。同时,其反应条件也很温和。研究矿物及微生物的表面物理化学特性,对于矿物表面生物改性机理的认识具有十分重要的意义。

Fakoussa<sup>[1]</sup>最早研究发现微生物可以与煤发生作用并产生新陈代谢,进而研究微生物对硬煤的改性。Osipowicz等<sup>[2]</sup>描述了白腐菌 *Piptoporus betulinus* 及其它 2 株菌种对波兰硬煤的氯仿抽提物进行生物

转化的研究。此外 Monistrol 等<sup>[3]</sup>采用分离菌的模式对西班牙硬煤进行了液化改性,形成了焦油状物质。煤变质程度越高,对煤进行生物改性愈困难,据报道德国 Hofrichter 等对采用微生物技术改性硬煤研究较深入,所采用的菌种见表 1。

表 1 腐化德国硬煤的菌种

真菌菌株	生态类别	产生酶类氧化 ABTS 效应
<i>Corpinus sclerotigenis</i> C142-1	垃圾腐菌	-
<i>Agrocybe semiorbicularis</i> A72-1	垃圾腐菌	-
<i>Panus tigrinus</i> HI	树木腐菌	+
<i>Mycena tintinabulum</i> M25-1	垃圾腐菌	+
Compost isolate S22-30	垃圾腐菌	-
<i>Lentinus edodes</i> A20-2	树木腐菌	+

利用微生物对煤进行改性,煤表面的润湿性加强,正己烷使煤的抽提率提高。同时,煤中能释放出 2-羟基酚、烷基化苯和多缩合芳香碳氢化合物等,还可以打破煤中的某些化学键,从而使煤的结构发生破坏。对低阶煤的生物改性效果也很好,可以使低阶煤发生降解,生成小分子的芳香化合物,同时也可以发生一些聚合反应,生成分子量达 50 kD 的聚合产物。这些聚合物将具有良好的性能,为将煤作为洁净的原材料来源来制备芳香化合物提供了新的途径,有利于煤炭的综合利用。

## 2 矿物与微生物界面行为的主要表现形式及作用机理

微生物的体形细小,一般以微米作为测量其大小的单位,且具有较大的比表面积,界面行为在生命活动中占有重要地位,其中微生物与矿物界面行为的主要表现是吸附。吸附是生物生命活动的基本特征之一,也是微生物与矿物发生作用的第一阶段,也正是由于具有改性作用的微生物在矿物表面能发生吸附,才使矿物表面性质得以改变。

微生物在矿物颗粒表面吸附和生长,并以菌体本身性质或其代谢产物的性质对被吸附矿物颗粒表面的物理化学性质产生影响,可以改变矿物表面性质,如表面元素的氧化还原性、溶解沉降性、电性及润湿性等,是微生物直接氧化作用的前提<sup>[4-5]</sup>。

Sampson 等<sup>[6]</sup>对微生物在矿物表面的吸附作用方式进行研究,研究包括:微生物菌体表面分泌的黏液层、结合蛋白受体、多糖与蛋白质复合物、菌毛等与矿物之间发生的作用。

## 2.1 微生物与矿粒表面的静电作用

微生物与矿物颗粒表面均带有一定的电荷,且具有双电层结构。根据同种电荷相斥、异种电荷相吸的原理,当微生物与矿物表面所带电荷相反时,会因静电引力的作用而相互靠近,并产生静电物理吸附。吸附的结果会改变微生物与矿粒表面的结构,使电动电位发生变化(降低或变号),吸附作用强弱与2种物质的表面结构及所带电荷性质有关。

微生物的吸附作用是在矿物表面发生的,因此矿物的表面性质对吸附影响极大。在对矿物进行破碎以后,矿物的晶体结构会被破坏,矿物表面层含有剩余的不饱和能。研究表明,微生物极易选择在这些高表面能的位点吸附。同时,矿物表面的不均匀性对矿物的表面能和吸附能也有影响。由于矿物在水溶液中会发生离子交换和表面溶解等反应,因此使矿物表面带电,采用电泳测定硫化矿的等电点在5~7,表明在微生物吸附过程中硫化矿表面带正电荷。

一般认为微生物细胞表面的电性和疏水性对微生物的初始吸附影响至关重要。Barrett等<sup>[7]</sup>于1993年在对细胞壁物质的研究中发现了带电官能团,如羧基(-COOH)、氨基(-NH)和羟基(-OH)等。这些官能团在溶液中具有不同的电离常数,会使得细胞荷正电或者荷负电。Blake等在研究氧化亚铁硫杆菌在黄铁矿和硫表面吸附时发现了这种静电作用。Devasia等<sup>[8]</sup>通过电泳试验也发现了氧化亚铁硫杆菌吸附作用后,黄铁矿和硫粉表面的等电点明显右移,证明细菌表面的电性能改变矿物表面性质。同时,其研究还表明氧化亚铁硫杆菌的吸附是细菌生长依赖性的表现。在存在有亚铁离子和硫代硫酸铁的液态培养基中培养的细胞也具有相同的电动现象,其等电离点的pH为2。另外,生长在固体硫基培养基中的细胞出现从pH为2~3.8的等电点变化。说明其表面化学性质会随着生长条件的变化而发生变化。Devasia等还提出了增加氧化亚铁硫杆菌的疏水性有利于吸附过程的观点,通过测定细菌的接触角,发现疏水细菌比亲水细菌具有更强的吸附性。

研究表明,微生物表面带电,而且不同的微生物表面电性和所带的电量不同<sup>[9]</sup>。研究发现革兰氏阳性菌的等电点pH为2~3,革兰氏阴性菌的等电点pH为4~5。表2为不同微生物所带的电性和电量。

表2 不同微生物所带电性和电量<sup>[10]</sup>

微生物	电泳迁移率/ $\mu\text{m}(\text{S} \cdot \text{V} \cdot \text{cm})^{-1}$
大肠杆菌 NCTC9002	-0.42
假单胞菌属特种菌株 52	-2.67
荧光假单胞菌	-2.36
硫杆菌类 Versutus	-2.97
土壤细菌类单体	-1.08
恶臭假单胞菌	-1.60
土壤杆菌放射细菌	-1.48
藤黄色微球菌	-1.62
棒状杆菌特种菌株 125	-3.07
草分支杆菌	-3.09

由表2可见,微生物种类不同,其表面电性和所带的电量也不同,有的相差较大,例如土壤细菌类与草分支杆菌的单体之间就相差了2.01个单位的电量。

根据电性的原则,若无特性吸附存在,只要微生物表面与矿物表面的电性有助于微生物在矿物表面发生吸附作用,微生物就有机会吸附到矿物表面,并以其自身的性质对矿物表面的性质进行调节、影响或改性。

微生物与矿物表面通过静电力作用,不仅可以减少矿物表面的净电荷数,而且还可通过矿物表面净电荷数的减少,调节矿物的抑制与活化、分散与絮凝等状态。微生物可以充当矿物分选的调节剂。微生物对城市生活污水、矿区废水及选煤厂的煤泥水等进行的絮凝沉降,就是利用了静电引力作用,改变了矿物表面的电性和电量而使得矿粒间相互絮凝沉降。如带电量较高的草分枝杆菌,选择性地吸附到矿物表面能使矿物絮凝沉降加快,而且絮凝产生的絮团更密实。图1是微生物对煤泥水的絮凝作用模型<sup>[11]</sup>。

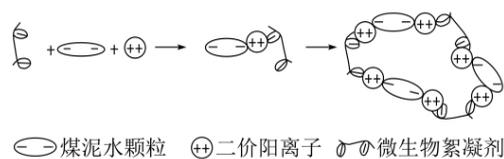


图1 煤泥水微生物絮凝剂体系絮凝模型

由模型可以看出,微生物在溶液中可看成带电胶体,在煤泥水絮凝时,它与相反电性的煤泥水颗粒发生电性中和,压缩双电层,使煤泥水中的颗粒相互靠近并发生絮凝沉降,微生物絮凝剂大分子通过离子键、氢键和范德华力的作用,同时吸附煤泥水中的多个颗粒,在颗粒间产生架桥现象,形成网

状絮团结构,同时在重力作用下使煤泥水中的颗粒最终沉降下来。

## 2.2 微生物与矿粒表面的特性吸附

微生物表面存在许多大分子基团,在与矿粒表面的碰撞接触过程中,会与矿物表面存在的金属离子产生化学力和氢键作用力等特殊作用力而发生特性吸附,从而实现了对贫矿或低品位矿的重金属富集或者除去。对于处理采矿和加工过程中产生的污水、化工生产中排出的污水、环境中水体的污染等也非常有用。这种特性吸附情况多发生在双电层外层。不过在菌体对金属的吸附过程中,由于金属离子的积累会对细菌的代谢产生副作用,可能会使微生物中毒并最终导致死亡。因此细菌的培养要进行单独驯化培养,并在其处于最佳状态下进行金属离子的吸附。

研究表明,微生物与矿粒之间的吸附机理是由于特异性和非特异性相互作用<sup>[12]</sup>。除了疏水性、表面自由能和静电力作用等非特异性作用外,离子键、化学键微观机制为揭示吸附机理提供了更加深入具体的说明。Ohmura等<sup>[12]</sup>研究并报道了特异蛋白Aporusticyanin在吸附过程中的作用。研究认为氧化亚铁硫杆菌首先利用趋化性质靠近硫化矿粒的表面,细菌中特异蛋白通过键合作用吸附到金属硫化物颗粒表面的铁和硫的相应位点。微生物中特异酶的活性部位在与底物结合的过程中其性状会改变,形成互补形状,与底物分子发生紧密结合。因此,微生物菌体表面的有机分子所具有的拓扑结构与空间分布等对于研究微生物在矿物表面吸附微观机制方面是非常重要的。

Murr等<sup>[13]</sup>研究了含硫化物和硅酸盐矿物的低品位废石的浸出,发现微生物对硫化矿具有选择黏附作用。这一研究结论不仅支持了直接接触氧化作用机理,而且还支持了微生物利用选择性吸附来获得能源的论点。Bennett等<sup>[14]</sup>采用扫描电子显微镜研究和观察了被氧化亚铁硫杆菌浸出的黄铁矿表面,也使上述观点得到证实。虽在大多数情况下,矿物表面吸附的微生物的分布状况是随机的,但是通过对一些有序的单细胞、细胞群或链吸附的研究表明细菌具有在矿物表面选择最佳吸附位点的能力。

王国惠<sup>[15]</sup>利用从活性污泥中筛选得到的霉菌菌株G-28,就是利用细胞表面分泌的功能团与重金属Cr(VI)发生特性吸附,使Cr(VI)从废水中分

离出来。其吸附率高达98.2%~98.8%。其菌丝球吸附Cr(VI)的动力曲线如图2所示。

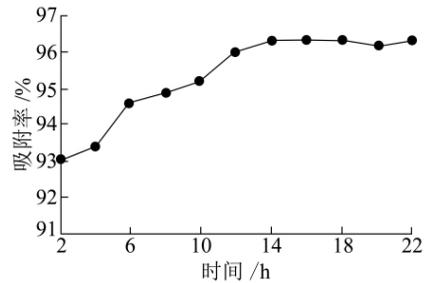


图2 G-28 吸附 Cr(VI) 动力曲线

总之,利用微生物在矿物表面的特性吸附选矿的还有很多,在国外微生物用于多种金属的提取并已经实现了工业化,包括铜、铀、金、银、钴、钼、锌等的浸出。

## 2.3 微生物与矿物颗粒的黏附作用

微生物与矿物颗粒的黏附现象并非是吸附现象,它是一种机械黏附,是微生物与矿物表面为了尽量减小体系自由能升高而产生的黏附。如疏水的M. phlei菌与煤表面的黏附作用。

利用微生物的黏附作用作为一种表面调整剂,改变煤系黄铁矿的表面疏水性,可以克服常规浮选脱硫效果不高的缺点。微生物在煤的浮选中的使用,就是利用表面具有一定亲水性或带有一定性质的电性的微生物在煤浆中黏附于疏水的黄铁矿颗粒表面,使其表面强烈亲水抑制黄铁矿的可浮性,从而加强了用泡沫浮选和油团聚法分离煤和黄铁矿的能力。

雷光伦等<sup>[16]</sup>利用6种微生物对灰岩和玻璃片进行改性实验,通过微生物改性后,试片上的水滴高度减小,长度增大,表明试片的亲水性增强,亲油性减弱;作用时间越长,则水滴高度越小,长度越大。而对比经水作用后的试片,水滴高度虽然也减小,亲水性增强,但幅度均小于微生物作用后的相应试片。图3为灰岩试片和玻璃试片效果,图中每排从左向右代表作用时间增加。图4为微生物在灰岩试片和玻璃试片上作用不同时间的接触角的变化图<sup>[16]</sup>。



图3 灰岩试片和玻璃试片与水(上排)和微生物菌液(下排)作用后润湿性变化对比图像

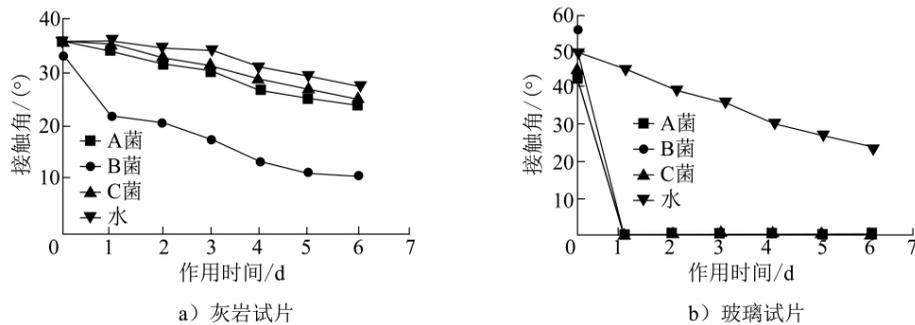
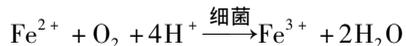


图4 微生物作用后水滴在灰岩试片和玻璃试片上接触角的变化

## 2.4 微生物对矿物质的生长需求

当矿物表面包含有某些改性微生物生长所需的矿物质时,细菌能够自行地吸附于矿物表面。例如 T·f 菌对黄铁矿及高硫煤表面中硫和铁元素的作用,此时微生物在浸出体系中是通过间接作用来进行矿物表面改性的。这种微生物在进行改性处理时,会吸附在含有这些成分的矿物表面上。然而这种行为并非所有用于改性的微生物都具有的,如 R·s 菌和 M·phlei 菌等。

硫杆菌在矿物的浸出上是使用最广泛的微生物菌种<sup>[18]</sup>,其能量来源是将矿物中硫的化合物氧化成硫酸盐。而硫酸盐比矿物中的硫的化合物可溶性更好,所以可以起到脱硫的目的。而且硫杆菌的培养基能在堆浸过程中以矿物中的成分实现自然生长,不需要特殊的培育。目前硫杆菌对矿物的作用机理还未完全清楚。氧化铁硫杆菌的作用机理可以认为是间接氧化。由以下反应将二价铁氧化成三价铁



这是一个放热反应,在此过程中细菌获得了自身的代谢能,生成  $\text{Fe}^{3+}$  再吸附到矿物上,对于黄铁矿而言,其反应式为



产生的二价铁离子又被细菌再氧化。虽然不存在细菌,此反应也能够发生,但细菌的存在可使  $\text{Fe}^{3+}$  的再生速度增大数百倍,反应时间大大缩短。

总之,在不同条件下,不同微生物菌种与矿物颗粒表面产生吸附的原因是非常复杂的,通常是多种吸附同时起作用,必须根据具体情况,通过仪器分析测试才能准确地判断出吸附的种类和吸附的主次。

## 3 结 语

矿物表面性质的生物调节是近年来矿物学、微生物学、化学及环境科学交叉研究领域中的一个前沿性研究课题。在生物选矿过程中,生物作用主要是发生在矿物表面,利用生物调节作用能使矿物表面电性、疏水性及润湿性等发生改变,有利于微生物对矿物的分选作用。微生物与矿物的界面作用涉及到一系列的物理化学反应,其相互作用是非常复杂的。目前对微生物与矿物表面作用方面所进行的研究,包括对机理的研究等都还不够深入,对某些现象的解释还缺乏足够的依据。另外,目前研究中普遍采用的微生物菌种对矿物表面的改性也还存在着作用速度慢、周期长、菌种选育和培养成本较高等问题。今后研究的重点,应该注重于具有优良生长性能、高效、适应性强的矿物微生物菌种的培育、驯化和筛选,同时对矿物与微生物之间的相互作用的机理开展更加系统深入地研究。

### 参考文献:

- [1] Fakousaa R M. Production of water-soluble coal substance by partial microbial liquefaction of untreated hard coal [J]. Resour Conserv Rec, 1988(1): 251-260.
- [2] Opsipowicz B, Jablonski L, Siewinski A et al. Biodegradation of hard coal and its organic extract by selected microorganisms [J]. Fuel, 1994, 73(12): 1858-1862.
- [3] Monistrol I F, Laborda F. Liquefaction and/or solubilization of Spanish coals by Newly isolated microorganism [J]. Fuel Process Technology, 1994, 40(3): 205-216.

(下转第23页)

由表 2 可估算出:

小时累计发热量提高为:  $(16359 \times 50 + 12552 \times 100) - 12552 \times 150 = 190372$  MJ。

估算年累计提高发热量:  $190372$  MJ/h  $\times 16$  h  $\times 330$  d =  $10.05 \times 10^8$  MJ

换算成标准煤, 则每年可节约 43680 t。

按每吨标准煤 500 元计算, 则年效益为:  $43680$  t  $\times 500$  元/t = 2184 万元。

节省煤泥水系统压力和投资近 20%。

### 3 结 语

所用的分析模型是建立在单个球形颗粒的基础之上, 忽略了生产实践中颗粒与颗粒之间的相互作用, 原煤水分、煤泥黏附、煤流速度、分离时间、分离效率、非稳定负压环境等因素对颗粒运动的影响, 理论分析所得参数对生产实践有局限性, 仍然需要大量实验来修正理论参数。

初步研究表明, 风力干法分离细粒粉煤, 干煤粉煤回掺能解决部分选煤厂煤泥量大, 煤泥水系统制约生产, 煤泥发热量低等问题, 具有很高的社会效益和经济效益, 前景广泛, 值得进一步研究推广。

(上接第 9 页)

- [4] Shrihari J, Jayant M, Kumar R, et al. Dissolution of particles of pyrite mineral by direct attachment of *Thiobacillus ferrooxidans* [J]. *Hydrometallurgy*, 1995, 38(2): 175 - 187.
- [5] 李秀艳, 魏德洲. 含砷金精矿生物预氧化过程中细菌吸附的作用[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2000, 21(6): 641 - 644.
- [6] Sampson M I. Influence of the attachment of acidophilic bacteria during the oxidation of mineral sulfides [J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(4): 373 - 389.
- [7] Blake II R C, Shute E A, Howard G T. Solubilization of minerals by bacteria electrophoretic mobility of *Thiobacillus ferrooxidans* in the presence of iron, pyrite and sulfur [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(9): 3349 - 3357.
- [8] Devasi P, Natarajan K A, Sathyanarayana D N, et al. Surface chemistry of *Thiobacillus ferrooxidans* relevant to adhesion on mineral surfaces [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(12): 4051 - 4055.
- [9] 杨履涓. 微生物学及检验技术 [M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1992.

参考文献:

- [1] 黄光许, 谌伦建. 煤泥无废排放综合利用模式 [J]. *洁净煤技术*, 2005, 11(2): 59 - 62.
- [2] 匡亚莉. 选煤工艺设计与管理 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [3] 周焕熊. 煤泥及其利用初探 [J]. *洁净煤技术*, 2000, 6(3): 31 - 33.
- [4] 龚欣, 郭晓镭, 代正华, 等. 高固气比状态下的粉煤气力输送 [J]. *化工学报*, 2006, 57(3): 640 - 644.
- [5] 赵素莉, 秦文宪, 李少平. 自制耐磨旋风除尘器的应用及改进 [J]. *水泥技术*, 2009(4): 114 - 116.
- [6] 谢广元, 张明旭, 边炳鑫, 等. 选矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [7] 王大飞, 刘林, 邵珠超. 循环流化床锅炉物料循环系统维护 [J]. *中国粉体技术*, 2005, 11(3): 47 - 48.
- [8] 朱建凤, 骆振福, 李振. 基于物料分离的振动流化床研究现状与展望 [J]. *煤炭工程*, 2007(9): 91 - 94.
- [9] 范建平. 螺旋气力取料装置分离机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [10] 冯立成, 周强, 张燕, 等. 细粘物料分离新技术实验研究 [J]. *化肥工业*, 2004, 31(3): 32 - 34.
- [11] 王琦. 煤泥干燥与泵送技术对煤泥燃烧发电的影响 [J]. *洁净煤技术*, 2011, 17(4): 74 - 76.
- [10] Smith R. W, Misra M, Dubel J. Mineral Bio-processing, An Overview [J]. *Mineral Bio-processing*, 1991, 4(7): 1121 - 1147.
- [11] 刘志勇, 张东晨. 煤泥水微生物絮凝剂絮凝机理的研究 [J]. *广州化工*, 2007, 35(6): 29 - 30, 40.
- [12] Ohmura N, Tsugita K, Koizumi J, et al. Sulfur-binding protein of flagella of *Thiobacillus ferrooxidans* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1996, 178(19): 5776 - 5780.
- [13] Murr L E, Berry V K. Direct observations of selective attachment of Bacteria on low-grade sulfide ores and other mineral surface [J]. *Hydrometallurgy*, 1976, 2(1): 11 - 24.
- [14] Bennett J C, Tributsch H. Bacteria leaching pattern on Bacterial leaching surfaces [J]. *J Bacterial*, 1978, 134(3): 310 - 317.
- [15] 王国惠. 霉菌菌丝球对重金属 Cr(VI) 的吸附特性 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46(3): 112 - 116.
- [16] 雷光伦, 李希明. 微生物对岩石表面及地层流体性质的影响 [J]. *油田化学*, 2001, 18(1): 72 - 78.
- [17] 李岭值. 细菌浸出及其应用 [J]. *环境保护*, 1996(1): 19.