

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.004

# 复合硫杆菌对污泥重金属生物淋滤机制的影响

张弛<sup>1</sup>, 马青兰<sup>1</sup>, 王增长<sup>1</sup>, 曹秋芬<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西省农业生物技术研究中心, 太原 030031)

**摘要:**对污泥生物淋滤过程中各种重金属元素的形态变化情况进行了测定,借助重金属化学形态转化规律,间接判断污泥重金属生物淋滤的转化机制。试验结果显示,Cu、Ni、Cd的生物淋滤是以直接机制为主的,Zn的生物淋滤过程是以间接机制为主的,Cr、Pb的生物淋滤过程属于混合机制,但其混合机理是有差别的。

**关键词:**污泥; 重金属; 生物淋滤; 机制

**中图分类号:**X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)05-0019-06

## Analysis on the Bioleaching Mechanism of Heavy Metal in Sludge by Composite Thiobacillus

Zhang Chi<sup>1</sup>, Ma Qinglan<sup>1</sup>, Wang Zengchang<sup>1</sup>, Cao Qiufen<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China;  
2. Agricultural Biotechnology Research Center of Shanxi Province, Taiyuan 030031, P. R. China)

**Abstract:** The variation of heavy metal speciation during the bioleaching of sludge were carried out. By virtue of heavy metal speciation transformation pattern, the transformation mechanism of heavy metal speciation during the bioleaching could be judged indirectly. The test results show that the bioleaching process of Cu, Ni, Cd are mainly dominated by direct mechanism, the bioleaching process of Zn is mainly dominated by indirect mechanism, and bioleaching process of Cr, Pb are mainly dominated by combined mechanism, while the chemical principle between Cr and Pb are different.

**Key words:** sludge; heavy metal; bioleaching; mechanism

污泥是重要的环境污染物,其性质复杂、毒害性持久,污泥中的重金属处理更是环境污染控制领域的重要课题<sup>[1-2]</sup>。传统的污泥消化、浓缩、脱水工艺并不能有效去除其中的重金属。近年来新开发的针对重金属去除的技术主要有:化学法(离子交换、氯化、化学淋滤、电化学等),物理法(超临界流体萃取、动电技术、微波法、吸附法)。以上方法存在着成本较高、去除率有限、伴生二次毒物、存在安全隐患等问题。生物法也可用于污泥重金属去除。一般用于污泥重金属处理的生物法包括生物淋滤法以及植

物提取法等。污泥生物淋滤法<sup>[3-6]</sup>是利用弱嗜酸菌硫杆菌、嗜酸硫杆菌(*T. t.*、*T. f.*)以及部分异养菌的生物化学代谢过程<sup>[7-9]</sup>,使污泥中重金属由难溶态逐渐转化成为易溶态,达到去除污泥中重金属的目的。生物淋滤法具有适用面广、去除率较高、操作条件简单、添加基质廉价易得、反应温和、耗酸量少、可与污水厂原有污泥消化工艺同步实施等优点。近年来对污泥生物淋滤技术的研究虽然较多<sup>[10-14]</sup>,但对其淋滤机制的研究成果较少,尤其是对Cd、Ni、Cr、Pb淋滤机制的研究更少。这种对污泥生物淋滤机理研究

收稿日期:2013-01-09

基金项目:山西省自然科学基金(2010011038-2)

作者简介:张弛(1973-),男,博士,主要从事污泥处理研究,(E-mail)tyut007@tom.com。

马青兰(通信作者),女,教授,博士生导师,主要从事污水处理、环境化学研究,(E-mail)lab006@163.com。

的欠缺严重制约了污泥淋滤技术的发展。在污泥生物淋滤机理研究领域,重金属化学形态在淋滤过程中的转化关系研究是一个核心问题<sup>[15]</sup>。借助重金属化学形态转化规律,可以间接推断污泥重金属生物淋滤的转化机制。基于这一思路,本文对多种重金属元素的生物淋滤机制进行了系统研究,以期找到污泥生物淋滤过程中常见重金属元素的普遍规律,进而为提高重金属淋滤效率提供生物化学理论依据,促进对污泥生物淋滤机制的理解。

## 1 材料和方法

### 1.1 污泥样品

研究所用污泥取自太原市河西中北部污水处理厂的浓缩污泥,以及冶峪化工厂污水站的浓缩污泥,将二者混合作为本试验用原始污泥。污泥重金属含量的测定采用王水-高氯酸-氢氟酸消解-原子吸收分光光度法,此方法是近年来对污泥生物淋滤的研究者通用的方法,其测定结果可靠度较好。经测定,试验用污泥的基本性质见表 1。

表 1 试验用污泥的基本性质

检测指标	有机质/%	pH	含水率/%	Cu/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Ni/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cr/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
数值	49.7	7.3	78.6	938.2	431.9	865.3	41.4	272.5	269.5

### 1.2 试验用菌种

试验菌种的主体是复合硫杆菌,其组成为氧化硫硫杆菌(*Thiobacillus thiooxidans*,简称 T. t)与氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*,简称 T. f)混合菌液,试验所用的氧化硫硫杆菌与氧化亚铁硫杆菌,是在新鲜浓缩污泥中添加硫粉底物进行预培养,再经过重复接种加富培养获得的,试验时采用体积比 2% T. t+20% T. f 的接种量。另外配合加入课题组开发的 MT 基因工程菌(pGEX-ZjMT-B)接种液作为对硫杆菌淋滤的促进菌种(3%接种量)。试验所用的 MT 基因工程菌是采用金属硫蛋白基因工程菌(pGEX-ZjMT-B)为基本菌液,经过耐酸性驯化后,得到耐酸型 MT 基因工程菌,作为对硫杆菌淋滤过程的协作菌种。

### 1.3 污泥生物淋滤去除率及 pH 变化规律试验

为了考察所用技术在处理实际污泥时的效果,试验过程未采用灭菌处理,但设置了空白对照组以对比未添加混合菌时的处理效果。通过试验对“空白对照组”与“添加混合菌组”分别对重金属的去除率进行了对比。空白对照组的试验条件为:不添加

混合菌,也不添加菌群生长所需的底物。试验在同等条件下重复 3 次,取 3 次试验结果的平均值。

pH 变化情况是影响污泥生物淋滤效果以及重金属形态的重要因素之一,研究对接种混合菌与未接种混合菌(空白对照组)条件下污泥淋滤体系的 pH 值随时间的变化情况进行了试验。空白对照组的试验条件为:不添加混合菌,也不添加菌群生长所需的底物。

### 1.4 污泥淋滤中重金属形态转化规律试验

通过检测污泥中各种重金属元素在生物淋滤过程中的形态变化情况,间接分析淋滤机制。重金属元素的化学形态测定方法,参考了改进的顺序浸提法<sup>[16]</sup>进行。主要步骤包括:1)利用 KNO<sub>3</sub> 提取出可交换态重金属;2)利用 KF 提取出吸附态重金属。3)采用 Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 提取有机结合态。4)采用 EDTA 实现对碳酸盐结合态重金属的提取。5)采用 HNO<sub>3</sub> 将剩余的硫化物结合态重金属提取出来。6)剩余的重金属含量即残渣态。先对试验用原始污泥的形态比例进行测定,将测出的质量浓度换算成质量比,见表 2。

表 2 试验用原始污泥的重金属形态比例

重金属元素	交换态/%	吸附态/%	有机结合态/%	碳酸盐结合态/%	硫化物结合态/%	残渣态/%
Cu	8.1	11.5	15.9	8.4	45.2	10.9
Cd	16.4	14.7	13.3	9.9	34.1	11.6
Ni	11.8	10.3	12.1	6.3	31.3	28.2
Zn	14.1	7.7	22.1	34.2	9.9	12.0
Pb	12.0	10.8	12.6	24.7	20.4	19.5
Cr	7.1	7.8	33.7	9.3	14.6	27.5

在污泥生物淋滤过程中,对各种重金属元素的形态变化情况每天定时检测,作为机制分析的依据。

## 2 结果和讨论

### 2.1 污泥生物淋滤去除率及 pH 变化规律

混合菌接种组、空白对照组对污泥重金属去除率随时间的变化情况分别见图 1、图 2。

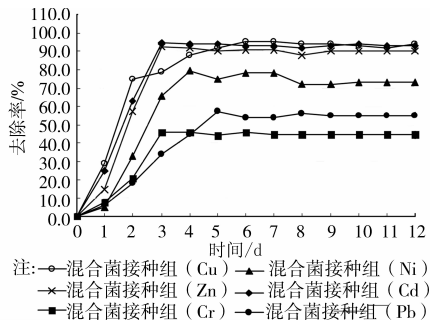


图 1 接种混合菌情况下的淋滤效果

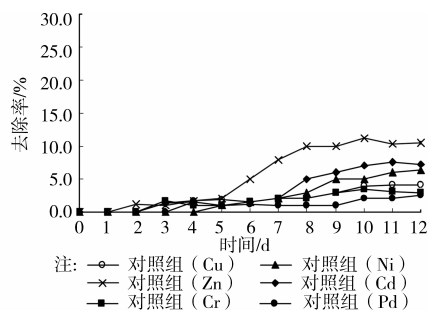


图 2 对照组的淋滤效果

由图 1、图 2 可知,添加混合菌时,可以提高淋滤效果,其原理主要是缩短了淋滤启动时间,提高了转化速率。对照组试验各种重金属的去除率都很低,这是由于对照组没有添加混合菌,也没有添加菌群生长所需的底物,即使此时的样品中存在本土自有菌群,也由于缺乏增殖所需的底物,缺少所需的电子供体,硫细菌不能大量增殖。此时淋滤过程中的重金属化学形态比例变化微弱,不利于对重金属转化过程中的化学形态变化情况开展研究,因此仅对添加混合菌时的重金属形态变化情况进行讨论。

接种混合菌与未接种混合菌(空白对照组)条件下污泥淋滤体系的 pH 值随时间的变化情况见图 3。

由图 3 可知,添加混合菌时淋滤体系的 pH 值在 3~6 d 时出现明显下降。不添加混合菌,也不添加底物的对照组, pH 值变化始终很小, 12 d 内反应体系的 pH 值始终未能低于 5.20。

淋滤过程中的 pH 值既是淋滤过程的影响制约参数,又是淋滤过程中的表现参数,它关系到氧化硫

硫杆菌(T. t)与氧化亚铁硫杆菌(T. f)的生长增殖情况,也关系到重金属淋滤过程中各种化学形态的转化情况。

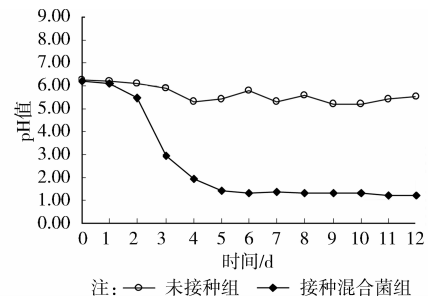


图 3 污泥淋滤体系的 pH 值随时间的变化情况

整个淋滤过程中的 pH 值下降与否取决于以上几种反应的组合效果。pH 值的降低速率越快, pH 值降低幅度越大,说明生物淋滤作用越强。添加混合菌与不添加混合菌时 pH 变化结果的差异间接证明了添加混合菌对淋滤效果确有促进。

### 2.2 污泥生物淋滤过程中重金属形态变化规律

虽然污泥的性质复杂,但通过顺序浸提的方法,可以测得污泥的 6 种形态:交换态、吸附态、有机结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态、残渣态。交换态重金属含量比例的增加值,可以反映出淋滤后重金属去除率的变化规律。只要在污泥淋滤过程中,定时取出一定量的污泥样品进行重金属的化学形态分析,就可以得到淋滤过程中重金属形态转化的规律,籍此可以间接推断某种重金属元素在生物淋滤过程中的生化机制。

一般将污泥淋滤机制<sup>[17]</sup>分为直接机制、间接机制、混合机制 3 种。直接机制是指以重金属硫化物结合态以及有机结合态被直接氧化成可溶硫酸盐为特征的淋滤机制。间接机制是指以碳酸盐结合态以及有机结合态重金属大量转化为交换态为特征的淋滤机制。混合机制是指直接与间接机制同等地发挥作用。此时,碳酸盐结合态与硫化物结合态同等大量转化为交换态为特征的淋滤机制,也可以是以有机结合态大量转化为交换态为特征,而硫化物结合态仅起次要转化作用。试验中各种重金属元素在生物淋滤过程中的形态变化情况见图 4~9。

由图 4 可以看到,生物淋滤过程中, Cu 的硫化物结合态显著减少,交换态显著增加,碳酸盐结合态略有减少,吸附态略有减少,残渣态经历了先增、再减、再增的过程。其中交换态由 8.1% 增加至 64.6%;有机结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态的减少量分别占交换态总增加量的 22.5%、6.9%、70.1%。可见,对交换态增加量贡献的大小顺序是:

硫化物结合态>有机结合态>碳酸盐结合态。由此可以推断:对于试验的污泥,Cu 的生物淋滤过程属于直接机制。此结论是基于以下 3 方面的原因:1)原始污泥化学形态比例因素(Cu 的硫化物结合态所占比例较大);2)主导因素(硫化物结合态的转化量对交换态的增加量贡献最大);3)可忽略因素(碳酸盐结合态虽也对交换态的增加量有贡献,但仅占 6.9%,可以忽略)。

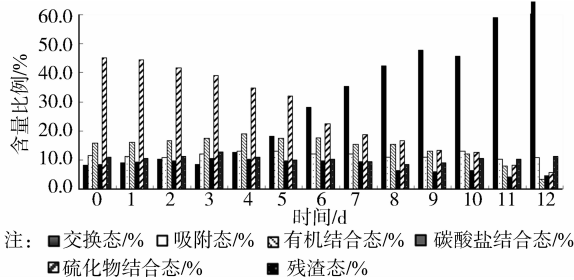


图 4 Cu 在生物淋滤过程中的形态变化

由图 5 可以看到,Ni 的淋滤过程中各种化学形态的转化规律类似于 Cu,硫化物结合态显著减少,交换态显著增加,碳酸盐结合态略有减少,吸附态逐渐减少,残渣态经历了先减、再增的过程。交换态由 11.8%增加至 54.7%,共增加了 42.9%;有机结合态的减少量占交换态总增加量的 13.5%,本文认为有机结合态的转化对 Ni 而言属于可忽略因素;碳酸盐结合态在全程由 6.3%减少至 4.7%,没有讨论价值;硫化物结合态在全程由 31.3%减少至 7.5%,其减少量占交换态总增加量的 55.5%;可见,对交换态增加量贡献的大小顺序是:硫化物结合态>有机结合态>碳酸盐结合态。由此可知,本试验 Ni 的生物淋滤过程是以直接机制为主的,其规律类似于 Cu。

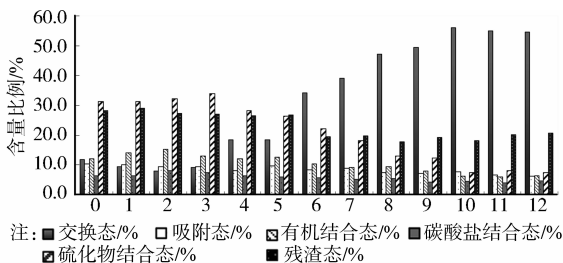


图 5 Ni 在生物淋滤过程中的形态变化

由图 6 可以看到,生物淋滤过程中 Zn 的交换态显著增加,碳酸盐结合态显著减少,吸附态、有机结合态与硫化物结合态也有所减少,残渣态逐渐增加。交换态由 14.1%增加至 65.8%;碳酸盐结合态、有机结合态、硫化物结合态的减少量分别占交换态总增加量的 59.6%、22.1%、12.4%。可见,对交换态

增加量贡献的大小顺序是:碳酸盐结合态>有机结合态>硫化物结合态。由此可以推断 Zn 的生物淋滤过程以间接机制为主。此结论是基于以下 3 方面的原因:1)在试验用原始污泥中 Zn 的原始化学形态比例中,碳酸盐结合态与有机结合态所占比例较大。2)主导因素(碳酸盐结合态的转化量对交换态的增加量贡献最大)。3)可忽略因素(硫化物结合态虽也对交换态的增加量有贡献,但仅占 12.4%)。

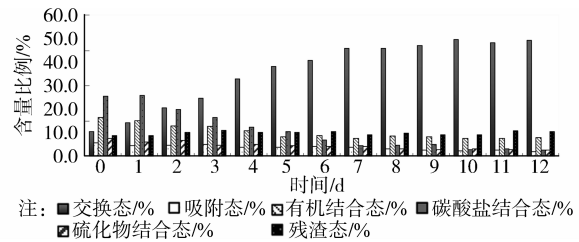


图 6 Zn 在生物淋滤过程中的形态变化

由图 7 可以看到,Cd 的生物淋滤过程中各种化学形态的转化规律是:硫化物结合态显著减少,交换态显著增加,有机结合态略有减少,碳酸盐结合态略有减少,吸附态变化轻微,残渣态略有增加。交换态由 16.4%增加至 62.6%;有机结合态在全程由 13.3%减少至 6.4%,其减少量占交换态总增加量的 14.9%;碳酸盐结合态在全程由 9.9%减少至 3.4%,其减少量占交换态总增加量的 14.1%;硫化物结合态在全程由 34.1%减少至 5.9%,其减少量占交换态总增加量的 61.0%。可见,对交换态增加量贡献的大小顺序是:硫化物结合态>有机结合态≈碳酸盐结合态。由此可以推断 Cd 的生物淋滤过程是以直接机制为主的。其规律类似于 Ni。

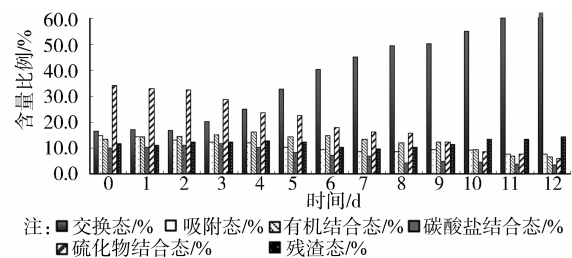


图 7 Cd 在生物淋滤过程中的形态变化

由图 8 可以看到,生物淋滤过程中 Cr 的有机结合态显著减少,交换态显著增加,碳酸盐结合态与硫化物结合态略有减少,残渣态经历了有小幅增加。交换态由 71%增加至 33.5%;有机结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态的减少量分别占交换态总增加量的 56.1%、21.2%、22.7%。可见,对交换态增加量贡献的大小顺序是:有机结合态>硫化物结合

态>碳酸盐结合态。由此可以推断:对于本试验的污泥,Cr的生物淋滤过程属于混合机制,也就是直接与间接机制同时发挥作用。此结论是基于以下3方面的原因:1)原始污泥化学形态比例因素(有机结合态所占比例较大);2)主导因素:有机结合态的转化量对交换态的增加量贡献最大。这种形态特征意味着在Cr的淋滤进程中,既有硫杆菌对有机结合态重金属的直接氧化(这趋向于直接机制),又有高价态金属离子(如:Fe<sup>3+</sup>)对ORP提高之后的二次氧化作用(这属于间接机制)。同时,在Cr的生物淋滤过程中,硫化物结合态的转化量对交换态的增加量贡献也有24.6%,这更使Cr的生物淋滤不能排除直接机制的可能性。3)兼顾因素:碳酸盐结合态也对交换态的增加量有贡献,占23.1%,不宜忽略。

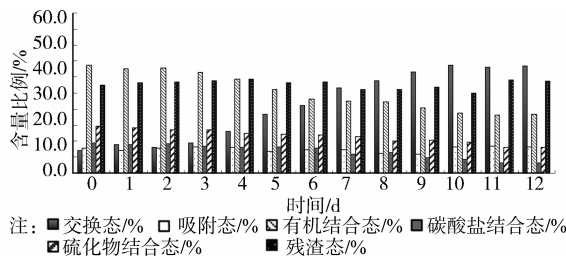


图8 Cr在生物淋滤过程中的形态变化

由图9可以看到,Pb的生物淋滤过程中各种化学形态的转化规律是:碳酸盐结合态与硫化物结合态均显著减少,交换态显著增加,其余各态变化不明显。交换态由12.0%增加至47.1%,共增加了35.1%;有机结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态的减少量分别占交换态总增加量的19.7%、40.5%、35.0%。可见,对交换态增加量贡献的大小顺序是:碳酸盐结合态≈硫化物结合态>有机结合态。由此可以推断:对于本试验的污泥,Pb的生物淋滤过程属于混合机制,即直接与间接机制同时发挥作用,但其机理规律不同于Cr。此结论是基于以下3方面的原因:1)原始污泥化学形态比例因素(碳酸盐结合态与硫化物结合态所占比例都较大);2)主导因素:碳酸盐结合态与硫化物结合态的转化量对交换态的增加量贡献近似,说明直接机制与间接机制在此同等重要。

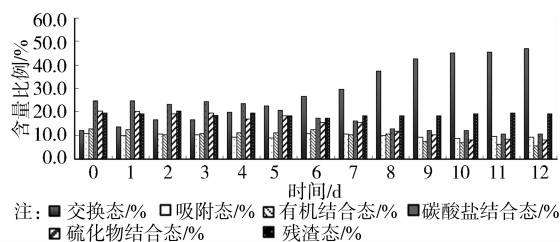


图9 Pb在生物淋滤过程中的形态变化

由Cr、Pb的转化规律可以看到,有机物型与弱碳酸型的重金属元素在生物淋滤过程中,均可表现为混合机制,但其规律是不同的。需注意,不同城市的试验污泥,其成份是不同的,其淋滤过程中的化学形态转化特征也是有差异的。

### 3 结论

对污泥重金属生物淋滤过程中的重金属形态转化机制进行了系统的研究。根据各种重金属在淋滤前后的化学形态转化规律对相应的淋滤机制进行了归类。判断其淋滤机制的依据包括以下3个方面:1)原始污泥化学形态比例;2)主导因素(何种化学形态的转化量对交换态的增加量贡献最大);3)可忽略因素(某种化学形态的转化量对交换态的增加量贡献小于15%)。

试验结果表明,Cu、Ni、Cd的生物淋滤是以直接机制为主的,Zn的生物淋滤过程是以间接机制为主的。Cr、Pb的生物淋滤过程属于混合机制,但其规律是不同的,Cr的有机结合态的转化贡献是其主导因素,Pb的碳酸盐结合态与硫化物结合态同时发挥着转化贡献。

### 参考文献:

- [1] 李端,周少奇,陈晓武. 城市污泥的重金属生物活性及其控制[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(7):60-64.  
Li D, Zhou S Q, Chen X W. Bioavailability of heavy metals in municipal sludge and its control [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003,4(7):60-64.
- [2] 唐鸣放,王白雪,郑怀礼. 城市污泥处理与绿化利用[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(4):103-106.  
Tang M F, Wang B X, Zheng H L. Sludge treatment and application in greening [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009,31(4):103-106.
- [3] 周顺桂,周立祥,黄焕忠. 生物淋滤技术在去除污泥中重金属的应用[J]. 生态学报,2002,22(1):125-133.  
Zhou S G, Zhou L X, Huang H Z. Removal of heavy metals from sewage sludge by bioleaching [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(1):125-133.
- [4] Chan L C, Gu X Y, Wong J W C. Comparison of bioleaching of heavy metals from sewage sludge using iron-and sulfur-oxidizing bacteria [J]. Advances in Environmental Research, 2003,7:603-607.
- [5] Solisio C, Lodi A, Veglio F. Bioleaching of zinc and aluminum from industrial waste sludges by means of

- Thiobacillus ferrooxidans [J]. Waste Management, 2002,22(6):667-675.
- [6] 赵一德,张鹏,吴志超. 生物浸沥去除污泥中的重金属 [J]. 环境工程, 2002,20(1):47-50.  
Zhao Y D, Zhang P, Wu Z C. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge [J]. Environmental Engineering, 2002,20(1):47-50.
- [7] 王世梅,周立祥,黄峰源,等. 耐酸性异养菌的分离及其在制革污泥重金属生物淋滤中的作用[J]. 环境科学, 2004,25(5):153-157.  
Wang S M, Zhou L X, Huang F Y, et al. Isolation of heterotrophic microorganism and its role in bioleaching of heavy metals from tannery sludge [J]. Environmental Science,2004,25(5):153-157.
- [8] 任婉侠,李培军,何娜,等. 异养微生物在金属生物淋滤技术中的应用[J]. 生态学杂志, 2007,26(11):1835-1841.  
Ren W X, Li P J, He N, et al. Application of heterotrophic microorganisms in metals removal by bioleaching [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(11):1835-1841.
- [9] 谭险夷,袁兴中,曾光明,等. 丝状菌对生物淋滤去除底泥中重金属的促进作用[J]. 环境工程学报, 2010,4(12):2853-2859.  
Tan X Y, Yuan X Z, Zeng G M, et al. Promotion effect of filamentous bacteria on removal of heavy metals during bioleaching from contaminated sediment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010,4(12):2853-2859.
- [10] 华玉妹,陈英旭,田光明,等. 初始 pH 值对污泥中重金属生物沥滤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(1):128-131.  
Hua Y M, Chen Y X, Tian G M, et al. Effects of initial pH on bioleaching of heavy metals from sewage sludge [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006,25(1):128-131.
- [11] 方迪,周立祥. 温度对制革污泥的生物淋滤除铬效果的影响[J]. 环境科学,2006,27(7):1455-1458.  
Fang D, Zhou L X. Effect of temperature on bioleaching of Cr from tannery sludge [J]. Environmental Science,2006,27(7):1455-1458.
- [12] 邹思丹,刘云国,曾光明,等. 表面活性剂强化污泥生物淋滤 Cu、Zn 的研究[J]. 中国环境科学,2010,30(6):791-795.  
Wu S D, Liu Y G, Zeng G M, et al. Surfactant-enhanced bioleaching of Cu and Zn from sewage sludge [J]. China Environmental Science, 2010,30(6):791-795.
- [13] 霍金枝,张弛,王增长. 复合硫杆菌生物淋滤对 Mn 去除的研究[J]. 环境保护科学, 2012,38(2):53-56.  
Huo J Z, Zhang C, Wang Z C. Study on Mn removal by composite thiobacillus bioleaching [J]. Environmental Protection Science, 2012,38(2):53-56.
- [14] 李超,周立祥,王世梅. 复合硫杆菌生物浸出污泥中重金属的效果及与 pH 和 ORP 的关系[J]. 环境科学学报,2008,28(6):1155-1160.  
Li C, Zhou L X, Wang S M. Bioleaching of heavy metals from municipal sludge by the co-inoculation of two acidophilic thiobacillus [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(6):1155-1160.
- [15] 原武斌. 污泥生物淋滤过程中 Cd 及 Pb 形态变化研究[J]. 山西建筑, 2011,37(31):110-111.  
Yuan W B. Research on morphological changes of Cd and Pb in sludge bioleaching process [J]. Shanxi Architecture, 2011,37(31):110-111.
- [16] 华玉妹,李文红,陈英旭,等. 不同接种量下生物沥滤去除污泥中重金属的研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2005,31(1):47-51.  
Hua Y M, Li W H, Chen Y X, et al. Effect of amount of inoculum on the bioleaching of heavy metals from sewage sludge [J]. Journal of Zhejiang University: Agricultural and Life Science, 2005,31(1):47-51.
- [17] 华玉妹,陈英旭. 污泥中重金属生物沥滤的工艺参数优选和反应机制探讨[J]. 环境科学学报,2004,24(3):423-427.  
Hua Y M, Chen Y X. Bioleaching of heavy metals in municipal sludge-optimum parameters and reaction mechanism [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2004,24(3):423-427.

(编辑 王秀玲)