

微生物技术在典型危废 资源化利用的应用、装备和案例

辛宝平

固废资源化技术研究室
北京理工大学材料学院

个人简介

研究方向：危废/固废资源化技术及标准政策

- ◆ 北京理工大学材料学院 教授，博导
- ◆ 中国物资再生协会湿法冶金分会首席科学家
- ◆ 中华环保联合会固危废治理专业委员会副主任委员
- ◆ 中国环境科学学会固体废物专业委员会副主任委员
- ◆ 中国再生资源回收利用协会危险废物专委会副主任委员
- ◆ 中国环境科学学会重金属污染防治专业委员会副主任委员
- ◆ “无废城市”建设试点帮扶专家组专家
- ◆ 中国有色冶金学会污染防治专委会委员
- ◆ 中国微生物学会环境微生物专委会委员

交流内容

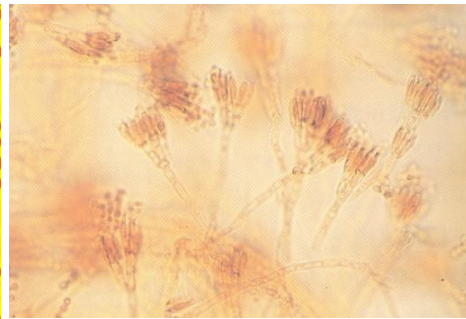
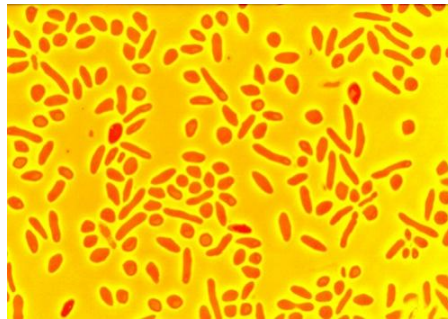
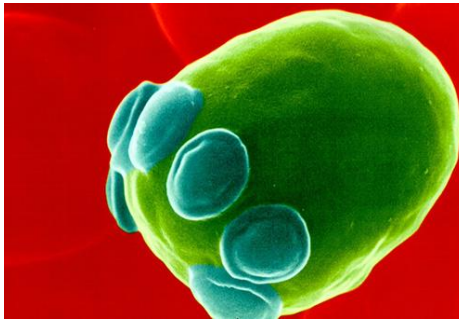
1. 微生物技术及其特点
2. 微生物技术在环境污染治理中的应用
3. 微生物技术在固废/危废资源化利用中应用
4. 本团队危废微生物资源化新技术研究进展及应用
5. 微生物技术在危废资源化利用中的问题,对策和展望

微生物技术及其特点

1. 微生物及其特点

微生物是一切肉眼看不见或看不清楚的微小生物的总称，它们是一些个体微小、构造简单的低等生物，尺寸0.1-10微米。

5大特点：体积小、面积大；吸收多、转化快；生长旺、繁殖快；适应强、易变异；分布广、种类多。



微生物技术及其特点

2. 微生物技术其特点

微生物技术指利用微生物进行物质转化、产品制造和菌体生产的工艺、过程和装备。

技术特点：常温常压、绿色低碳、经济高效、环境友好，无二次污染。



微生物用于环境污染治理

1. 微生物治理环境污染的原理

通过微生物的生物转化、生物矿化、生物氧化、生物还原、生物吸附、生物吸收等实现污染物的分解、降解、脱毒和去除。

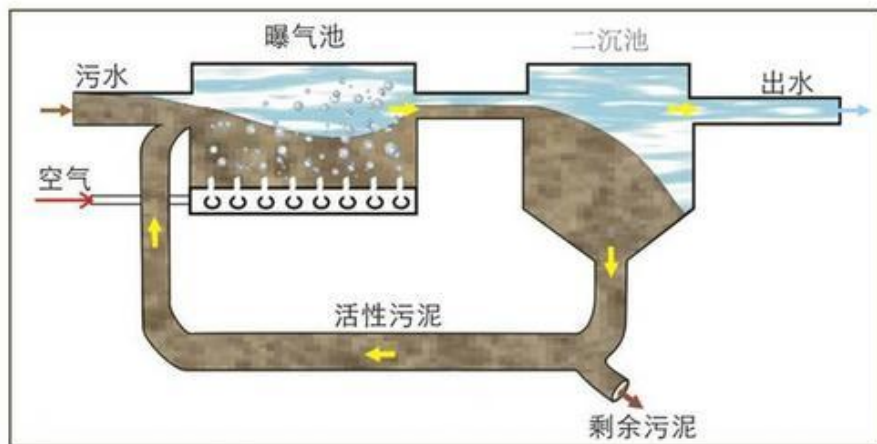
2. 微生物治理环境污染的优点

- ◆ 巨大的比表面积、极高的物质转化效率和极快的繁殖速度使得微生物转化污染物具有经济高效的特点；
- ◆ 在常温常压温和条件下分解有毒污染物质，赋予微生物治理技术具有环境友好、无二次污染的特点；
- ◆ 丰富多样的物种类型和代谢类型使得微生物技术能够处理各种类型的环境污染和有毒物质；
- ◆ 极强的环境适应性和变异性使得微生物能够产生相应酶类和基因降解人工合成的污染物质。

微生物用于环境污染治理

3. 微生物治理环境污染的工艺

- ◆ 微生物处理废水：生活污水活性污泥法、工业废水生物膜法、高浓度有机废水制沼气、废水生物脱氮除磷等
- ◆ 微生物处理废气：废气生物除臭
- ◆ 微生物处理固废：垃圾生物堆肥
- ◆ 微生物处理土壤：微生物土壤修复



微生物用于固废/危废资源化

1. 无害化和资源化

无害化：微生物转化使污染物成为低毒无毒的物质

资源化：微生物转化使污染物成为有价高价物质

2. 无害化到资源化

无害化是底线、资源化是方向

废水处理：生物脱碳脱氮除磷⇒回收磷（鸟粪石）

生活垃圾：卫生填埋⇒焚烧发电⇒厨余垃圾发酵产沼产肥

3. 资源化到高值资源化

从利用热值⇒制造产品（燃料、肥料、饲料）

从大宗产品⇒功能产品（保温产品、装饰产品、陶瓷、微晶玻璃）

微生物用于固废/危废资源化

4. 有机类固废/危废的微生物堆肥

◆ **生物堆肥**：利用自然界广泛存在的微生物，有控制地促进固体废物中可降解有机物转化为稳定的腐殖质的生物化学过程。腐殖质增加土壤保水、保温、透气、保肥的能力。

◆ **固废原料**：各种有机废物如秸秆、杂草、树叶、泥炭、有机生活垃圾、餐厨垃圾、污泥、人畜粪尿、酒糟、菌糠以及其它废弃物等，经堆制腐解而成的有机肥料。

◆ **发酵特性**：物料类型多样（基础料、含氮含碳有机质、矿物类）
生物类型多样（细菌、真菌、放线菌等）
发酵过程复杂（升温、高温、降温、腐熟）

◆ **有机危废**：可以降解、分解、稳定一些不含卤素、不含重金属的有机类危废。如低浓度油土油泥、高爆炸性含氮危废等。

微生物用于固废/危废资源化

5. 工业固废高价/高毒金属的微生物提取/脱除

- ◆ **工业固废来源**：矿石冶炼和煤炭燃烧过程
- ◆ **工业固废类型**：粉煤灰、汽化渣、钢铁灰、铝灰等
- ◆ **稀贵金属回收**：粉煤灰中锗、钢铁灰中银、铝灰中镓等微量稀贵金属的选择性提取、富集和回收
- ◆ **剧毒金属脱除**：粉煤灰和汽化渣等大宗工业固废中含有微量的剧毒金属镉砷铬等。用于土壤改良和农用肥料时就受到严格限制
- ◆ **生物沥浸富集**：可以用于微量稀贵金属的绿色回收和微量剧毒金属的高效脱除，实现大宗工业固废的高值资源化利用

微生物用于固废/危废资源化

6. 涉重危废中有价金属的生物沥浸

- ◆ **涉重危废来源**：有色冶炼、电镀、酸洗、石化、煤化、烟气脱硝
- ◆ **涉重危废类型**：电镀污泥、酸洗污泥、冶炼废渣、废催化剂、废电池
- ◆ **涉重危废特性**：含有高浓度有价金属。种类多、数量大、来源广
- ◆ **无害化处置**：金属流失、风险依旧
- ◆ **资源化利用**：金属利用、风险减低
- ◆ **生物沥浸回收**：高浓度危废先化学浸提，再生物沥浸
中低浓度物料直接生物浸提循环富集

涉重危废/工业固废全组分资源利用法律导向

在污染防治原则层面，强化了减量化和资源化的约束性规定，明确“无害化”是“资源化”的前提；提出固体废物综合利用过程和产品的污染防治要求，防止二次污染，**确保“资源化”过程和产品的“无害化”**；提出有关部门在制定规划时，**应最大限度减少填埋处置量，倒逼源头减量化和资源化。**

涉重危废全组分资源化利用政策导向

危险废物鉴别标准通则（GB 5085.7—2019）

6 危险废物处理后判定规则

6.2 具有毒性、感染性等一种或一种以上危险特性的危险废物利用过程产生的废物经鉴别不再具有危险特性的，不属于危险废物；具有毒性、感染性等一种或一种以上危险特性的危险废物处置过程产生的废物仍属于危险废物，国家有关法规、标准另有规定的除外。

国务院

《“无废城市”建设试点工作方案的通知》

“无废城市”建设要求提升城市固体废物减量化、资源化、无害化水平，推动共享经济、分享经济的发展，减少资源要素的投入，促进大宗工业固体废物综合利用产业，再生资源回收利用产业的规模化、高值化、集约化发展。1) 固体废物资源化利用产品要走向市场，2) 确保生态环境安全，3) 要求包括工业副产品、资源综合利用产品等国家、行业和团体标准的制定。

提升“三个能力”建设工作方案

明确提出危废资源化利用和产业培育

1. 鼓励有条件地区制定危险废物资源化利用过程污染控制技术规范，开展**危险废物豁免管理制度**试点，开展**定向“点对点”**利用。
2. 鼓励**技术先进、运营管理水平高**的**大型企业和行业龙头企业**做大做强，提高产业集中度，打造“危险废物利用处置百强单位”。
3. 提高危险废物焚烧、填埋污染控制标准，倒逼**危险废物减量化、资源化**，逐步减低危险废物处置比例。
4. 新建园区要**配套建设相应的危险废物利用处置能力**，确保危险废物得到科学合理的利用处置。
5. 鼓励对**库存量大、处置难**的危险废物的利用处置**新技术、新工艺、新装备开发、试点示范和推广**。

研究室定位和主攻方向

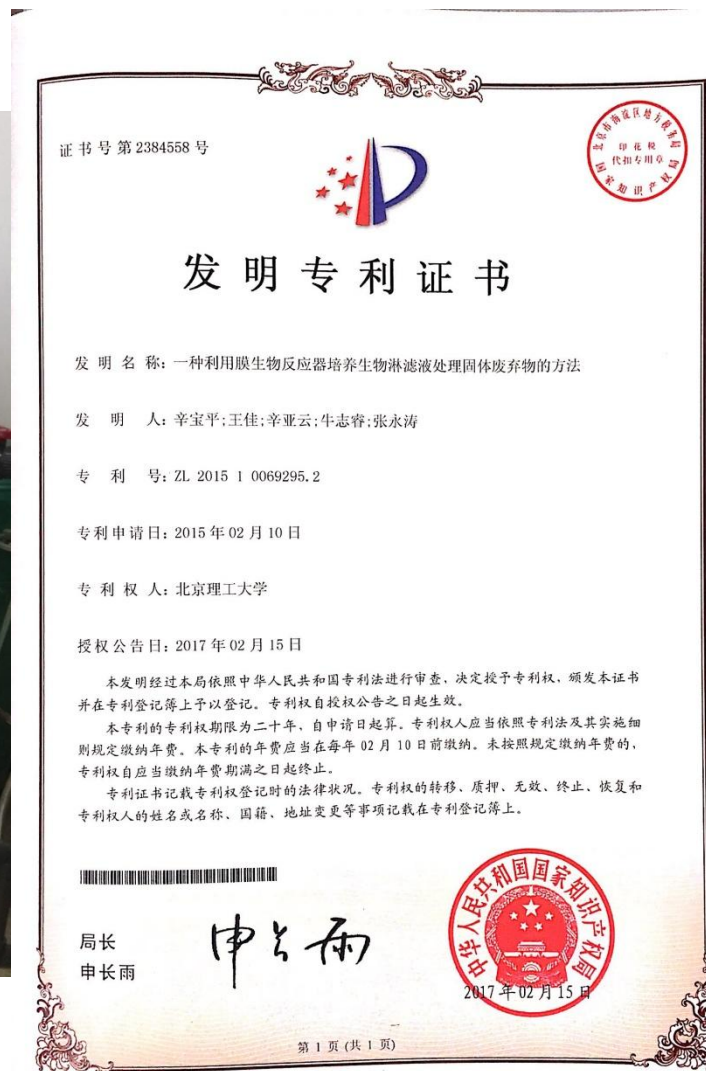
针对材料源和工业源涉重危废包括废旧电池、失效催化剂、电镀废渣、冶炼废渣等，研发经济、高效、绿色的**生物沥浸技术**、工艺和设备，实现有价金属的快速浸提和循环富集；针对浸出的低价和剧毒金属离子，研发高附加值的光电纳米材料**生物制备技术**，为该类危废的高值资源化利用奠定技术基础。

瞄准危险废物，实现金属回收；
发展生物技术，推动产业升级。

固废微生物资源化研究主要进展

1. 从2006年全面转向危险废物有价金属的生物浸提和循环富集技术研究，迄今超12年
2. 首次提出并详细阐明基于 Fe^{2+} 还原的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 循环是无机类危废浸提的重要机制
3. 首次研究了胞外多聚物EPS在无机类危废有价金属高效浸提的表面化学和电化学机理
4. 提出消除和抑制无机类危险废物有毒组分如氟离子对沥浸菌株的毒性效应的整套工艺
5. 研究了高固液比条件下（4%-10%）各类无机类危废高效浸提的关键技术和工艺参数
6. 研发了生物沥浸专用反应器和工艺，微生物浓度提高5-10倍，浸提时间由10天缩至1天
7. 和多个危废产生和处置企业合作，建设酸洗废渣、电镀废渣和飞灰生物浸提工程示范
8. 近年来研究组年发表SCI文章8-10篇，专利2-3项，成为世界上具有重要影响的生物沥浸技术研究实验室之一

生物沥浸快速浸提和循环富集成套装备研发



基于膜生物反应器的生物沥浸和循环富集

工艺特点

1. 通过专利技术-膜生物反应器大幅提高了微生物浓度，较之常规的生物冶金/生物沥浸其效率提高了一个数量级，浸提时间由**5-10天**缩短至**6-24小时**。
2. 通过专利技术-膜生物反应器实现了沥液的再生循环和金属的循环富集，不但解决了危废中金属含量低、回收困难的问题；而且显著减少了**废水的产生和培养液的消耗**。
3. 该技术在常温常压条件下实现金属的浸提和富集，**无需消耗强酸和双氧水**等危险化学品，设备无需过度防腐，无需庞大的酸雾处理系统，设备投入低、运行安全。
4. 该技术属平台技术，对于各种材料源危废（废旧电池、失效催化剂、电子线路板）和工业源危废（电镀污泥、酸洗污泥、冶炼废渣）均可实现金属浸提和富集。
5. 该技术尤其对于**火法和湿法过程产生的低含量烟灰、炉灰、浸出渣**都具有很强的**适用性、高效性和经济性**，可同步实现**有价金属最大程度回收和残渣脱毒脱帽**。

10立方的生物沥浸-循环富集回收酸洗污泥中镍的工程示范建设和试运行 (2017)



1. 沥浸专用膜生物反应器中微生物浓度较之实验室增加1倍。
2. 用废弃的硫膏为能源底物微生物浓度和沥液再生完全不受影响。
3. 适宜的流态设计和运行参数调控下单纯曝气即可满足沥液再生需求。
4. 世界上首个应用生物沥浸-循环富集回收涉重危废中有价金属的工程示范。

2018年生物沥浸-循环富集工艺在涉重危废金属回收的工程应用和专著出版

1. 已和北京某公司签订合同，建立年处理30000吨的电镀污泥有价金属铜和镍回收的生物沥浸-循环富集技术总包服务。
2. 已和四川某危废处置企业签订协议，建立年处理3000吨的表面处理混合污泥有价金属铜镍锌回收的生物沥浸-循环富集技术服务。
3. 已和科学出版社签订合同，出版《涉重危险废物的微生物资源化材料化利用技术》专著。这将是该领域的第一本专著。



正在加工的75立膜生物反应器（再生罐），有效容积50立方，年处理量2000-2500吨。

电镀污泥中铜镍锌的生物沥浸和富集

表1 不同电镀污泥样品中有价金属的含量 (%)

	1#	2#	3#	混合
镍	----	3.5	2.6	3
铜	----	5.4	6.1	5.2
锌	13.5	-----	6.8	6.2

每吨电镀污泥中含有铜和镍大约30和50公斤，按目前市场价格计算（公斤铜和镍的价格分别为50和100元，**每吨电镀污泥中仅铜镍回收直接毛收益超过5000**）

电镀污泥中铜镍锌的生物沥浸和富集

表2 化学浸提和生物浸提工艺溶释富集电镀污泥中镍的比较

工艺类型	主要原料	工作介质	固液比	风险性	吨处理费	可否循环	循环次数	累计固液比	浸提液镍浓度
化学浸提	浓硫酸	10%硫酸（1M）	10%-20%	高	320-360	否	0	20%	≈3.0g/L
生物浸提	硫磺和黄铁矿	pH 0.8 -1.0 可调 生物浸提液	5%-10%	低	300-320	可	10	50%-60%	≥10g/L

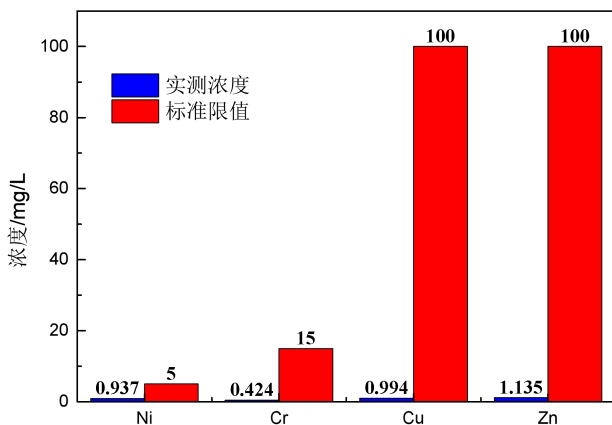
表3 生物沥浸循环富集电镀污泥中有价金属

	2#		混合	
	单次固液比 （10%）	循环10次累计固液比100%	单次固液比 （5%）	循环10次累计固液比50%
镍	浸出浓度	(30克/升)	浸出浓度	(10克/升)
铜		(50克/升)		(20克/升)
锌		-----		(20克/升)

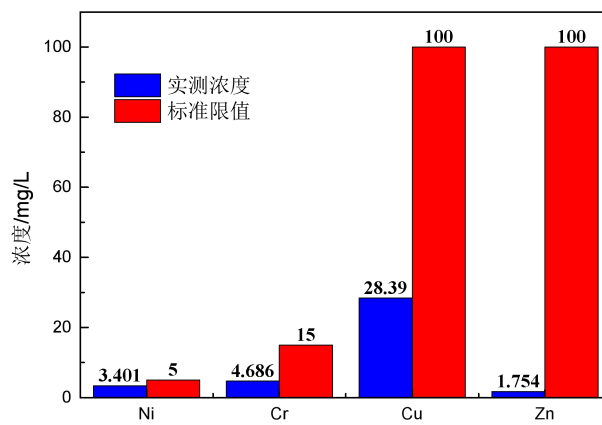
循环10次后，累计固液比50%，即100立方的培养基可处理50吨的电镀污泥；相应地，镍、铜、锌的富集浓度达到10克、20克和20克/升。

生物沥浸-循环富集实际运行系统

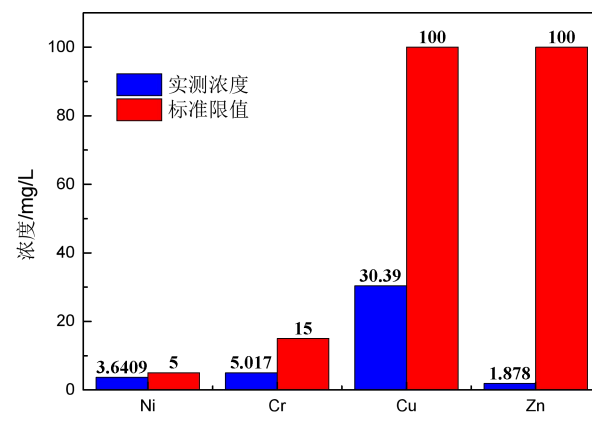
循环浸提残渣的浸出毒性



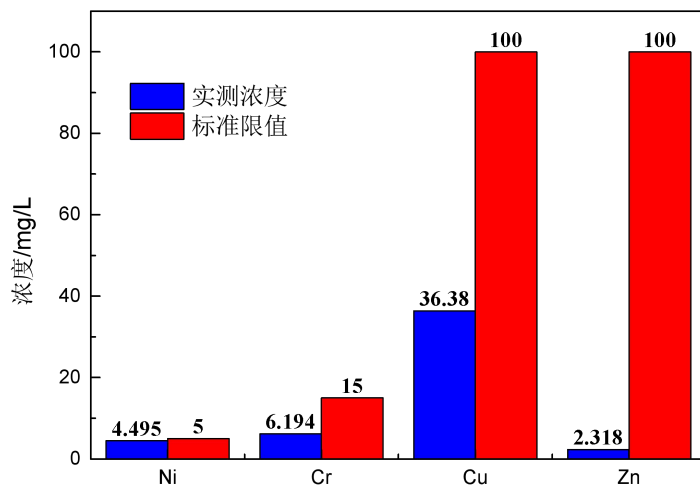
第一次循环



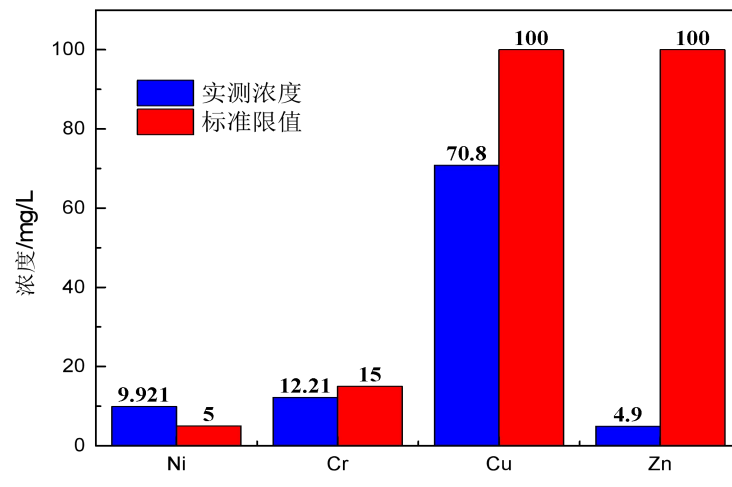
第二次循环



第三次循环



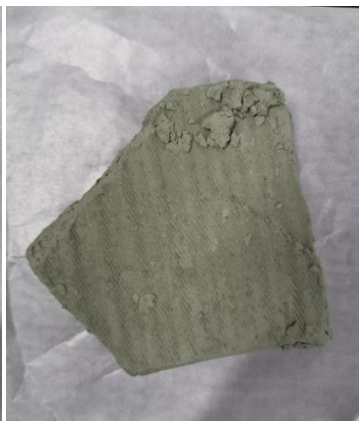
第四次循环



第五次循环



化学浸渣



循环1生物浸渣



循环2生物浸渣



循环3生物浸渣



循环4生物浸渣

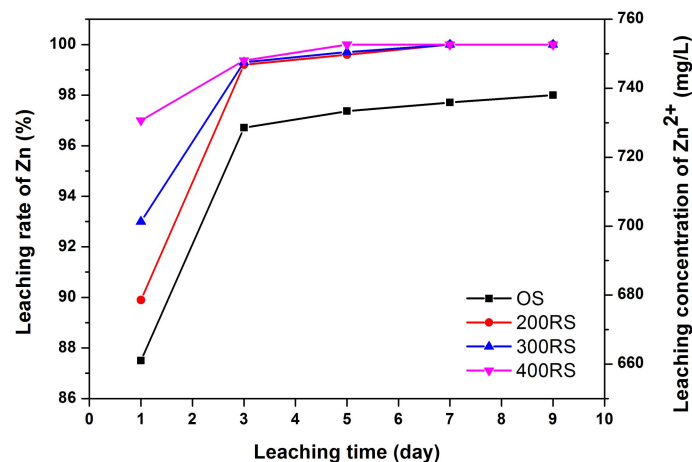
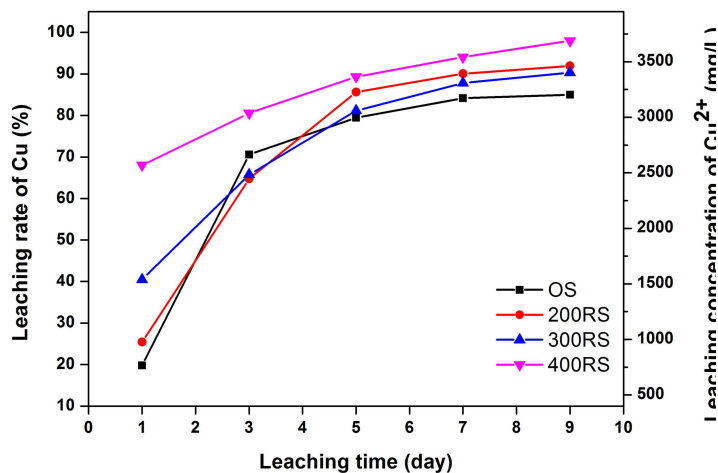
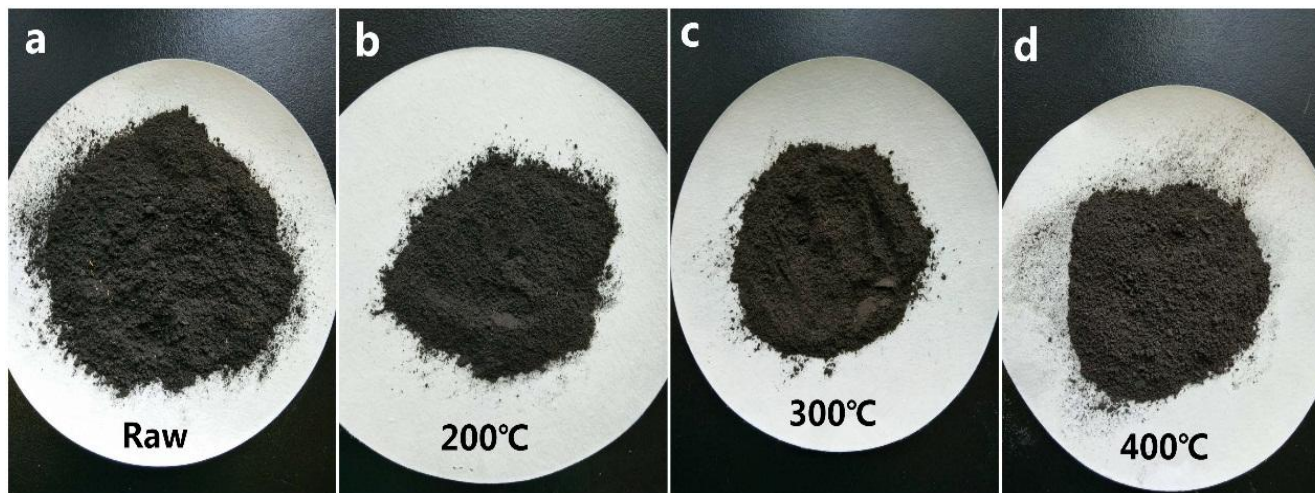


萃取系统



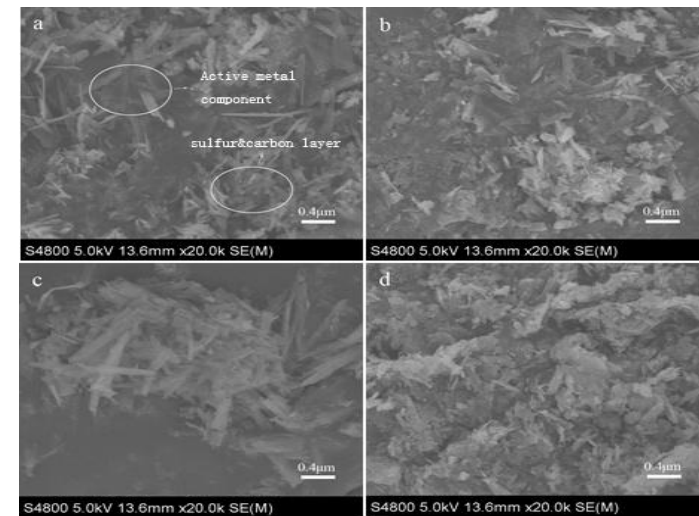
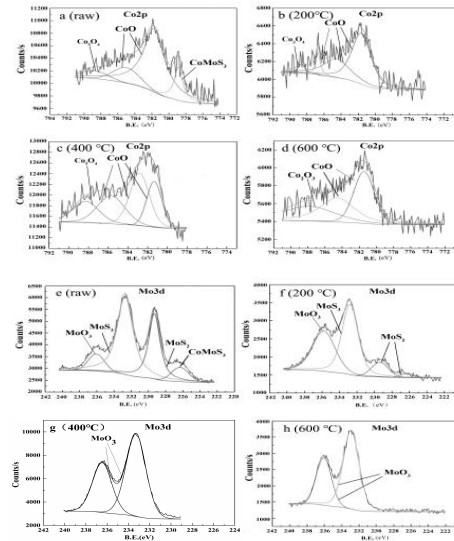
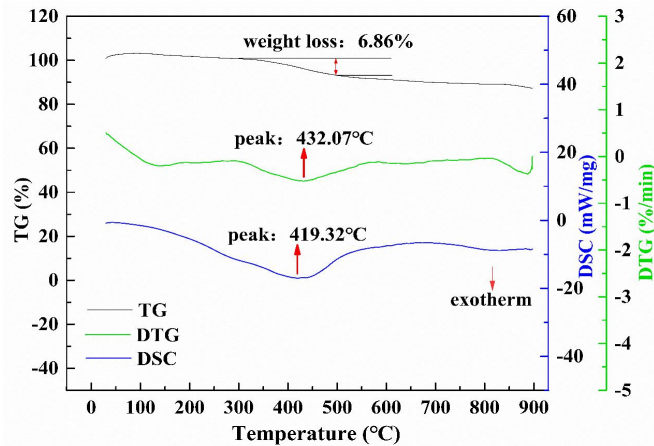
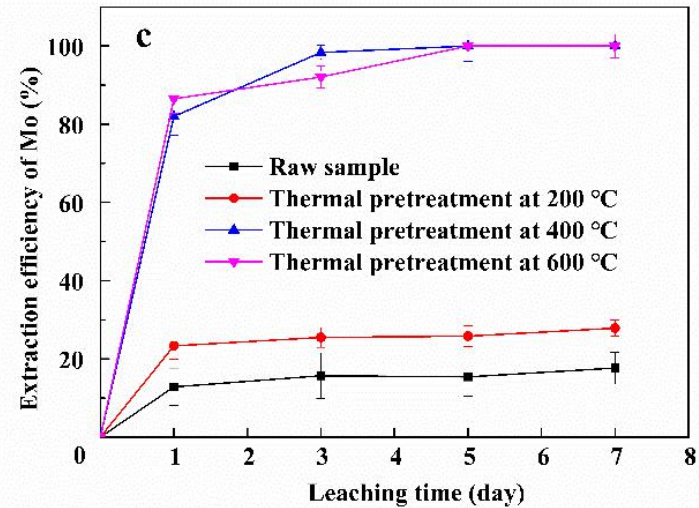
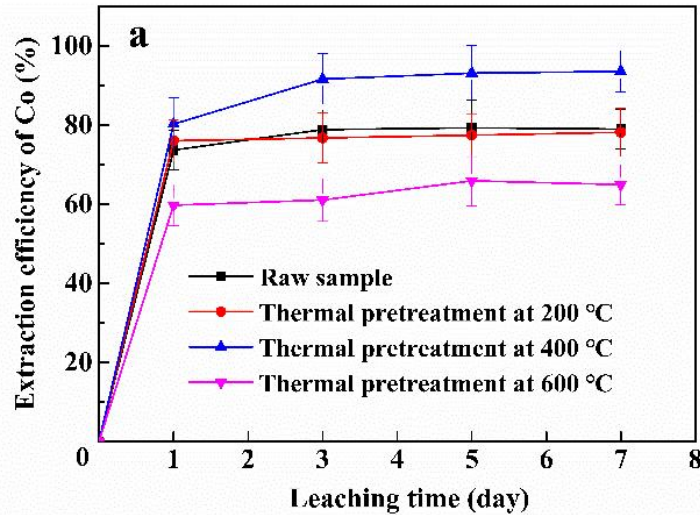
低温煅烧-生物沥浸耦合工艺

实现废树脂（刹车片）中铜和锌的高效提取回收



低温煅烧-生物沥浸耦合工艺

实现废催化剂中钴和钼的高效提取回收



粉煤灰中有毒金属的脱除

粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固废，目前常被用来做为土壤改良剂、调理剂和肥料等高值、大量和持续利用。

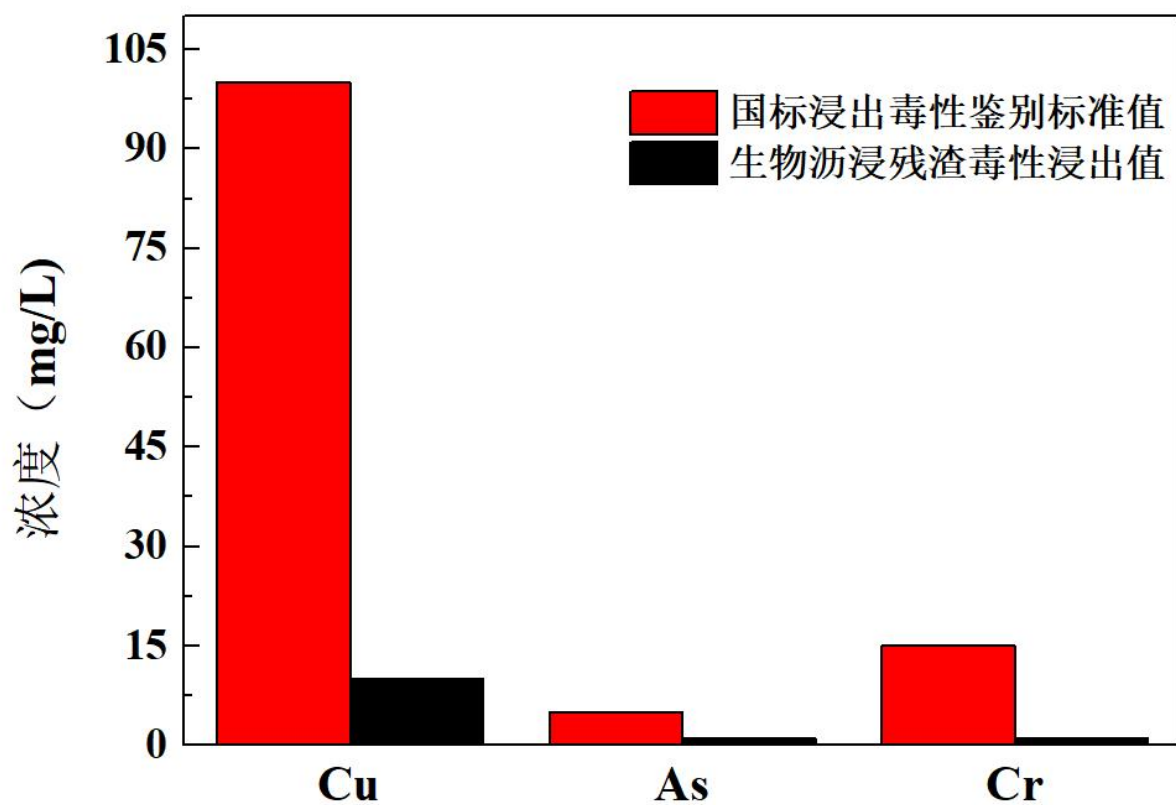
表4 不同来源的粉煤灰中有毒金属的含量及浸出毒性分析

样品	Cu含量 (mg/kg)	Cu浸出浓度 (mg/L)	As含量 (mg/kg)	As浸出浓度 (mg/L)	Cr含量 (mg/kg)	Cr浸出浓度 (mg/L)
I	160	110	5	8	100	20
II	120	80	8	6	95	22
III	180	101	3	1	80	18

浸出毒性鉴别标准值：Cu 100mg/L；As 5mg/L；Cr 15mg/L

粉煤灰中有毒金属的脱除

20%固液比条件下，粉煤灰生物沥浸残渣的浸出毒性分析。



生物沥浸处理后的粉煤灰渣达到土壤调理剂的要求

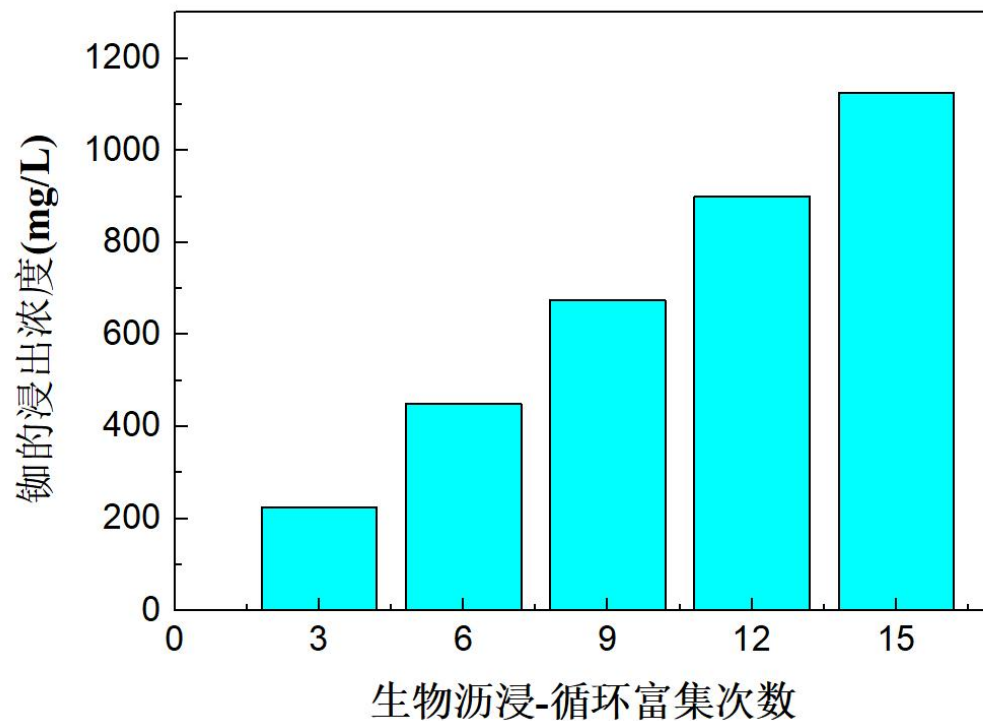
烟灰中铷的回收

- 1、在江苏南京某冶炼厂的飞灰中检测到稀贵金属铷的含量为**万分之五**，铷的市场价格为**每吨13亿元人民币**。
- 2、在15%固液比条件下，经过生物沥浸，**铷的浸出浓度为75mg/L，浸出率为100%**。
- 3、在生物沥浸-循环富集15次后，**铷的富集浓度达到1.13g/L，每升富集液中铷的回收收益近1500元**。
- 4、每处理一吨该冶炼烟尘，仅稀贵金属铷的回收收益就**为75000元**。

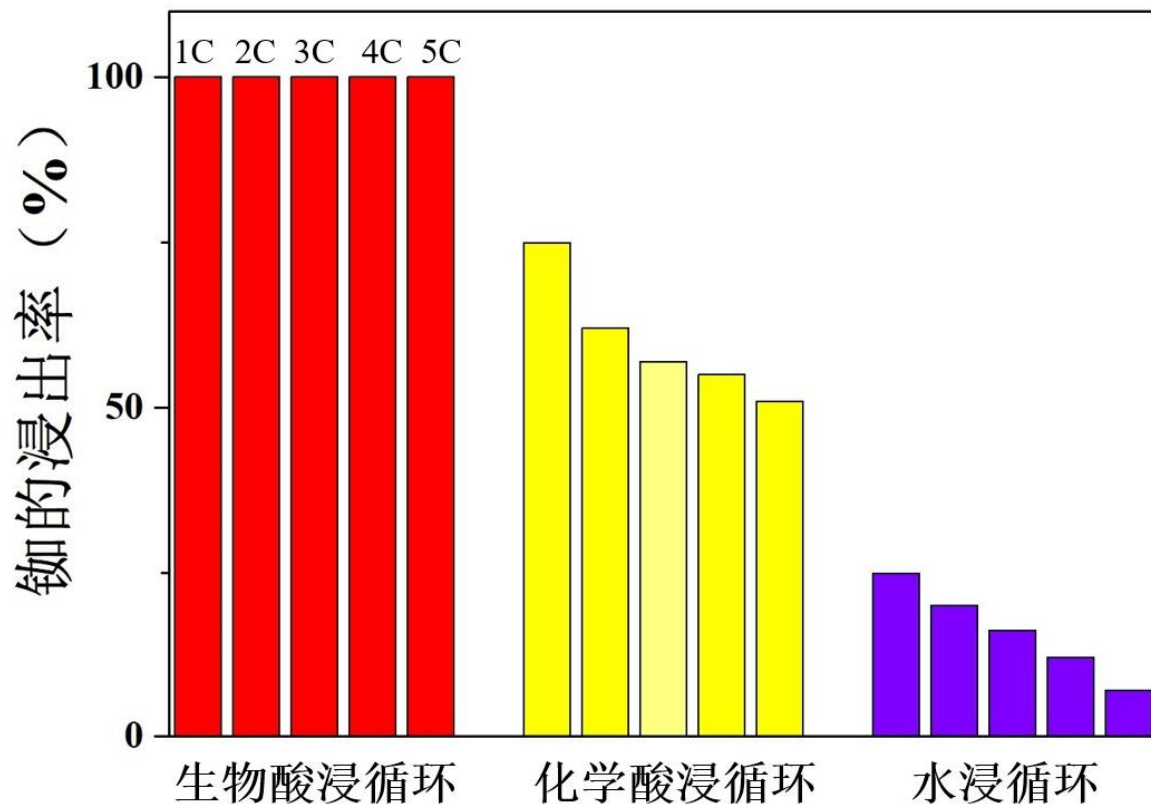
烟灰中铷的生物沥浸-循环富集



含铷烟灰



烟灰中铷在不同沥浸体系循环富集

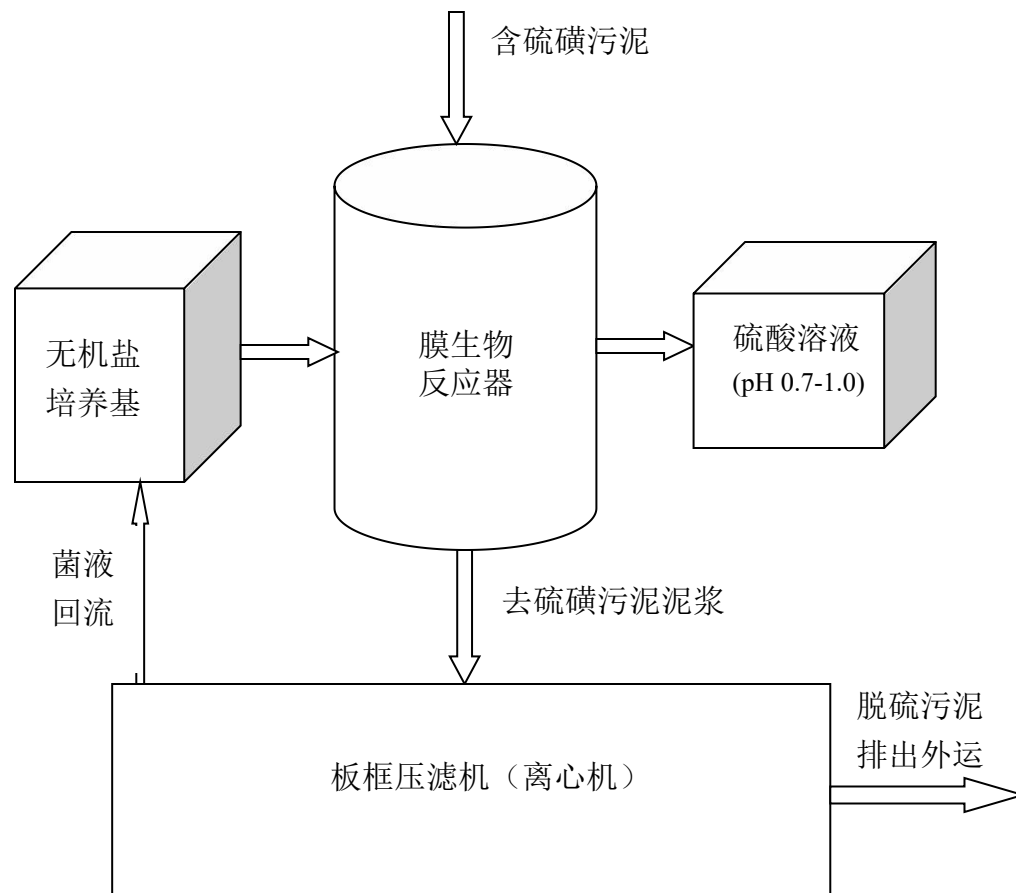


5次循环富集浸提后，
铷的**生物酸循环富集**
浓度为375mg/L；
化学酸循环富集浓
度为225mg/L；
水浸循环富集浓度
仅为80mg/L。

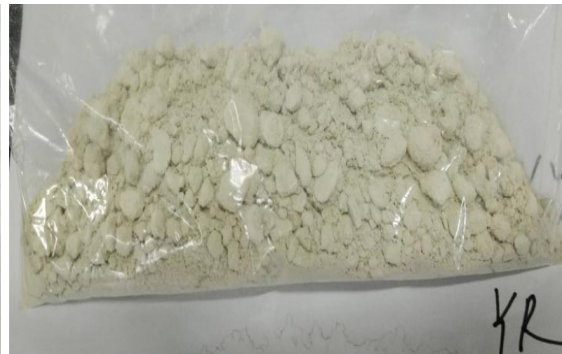
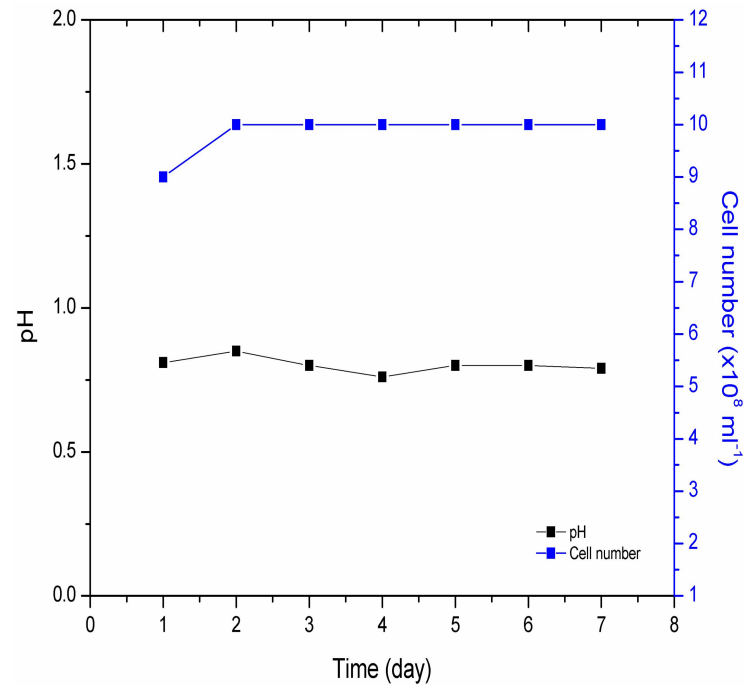
含硫磺污泥的生物氧化制酸和污泥脱硫

1. 含硫磺污泥是采气采油过程产生的易燃性和反应性危险废物
2. 由于含有10-30%的硫磺，焚烧和填埋都难以胜任无害化
3. 物化处置费用8000元/吨，给产废企业带来很大的经济负担
4. 生物氧化工艺在常温常压条件下完成硫磺制酸以及污泥脱硫
5. 生物技术可以实现低成本、高安全、绿色高效的污泥资源化
6. 进入设计阶段，制做45立方的主反应器，日处理1.5吨污泥

含硫磺污泥生物制酸工艺流程



微生物生长、产酸效能和脱硫效率



含硫磺污泥膜生物反应器生物制酸装备



生物膜反应器制酸罐有效容积15立方，日处理污泥量500公斤，
年处理硫磺污泥量200吨，日产硫酸150公斤，年产硫酸50吨。

落地油土和油泥的处理

1. 落地油土/油泥的主要处理工艺是焚烧。既造成能源浪费又产生严重环境污染。
2. 一些地区将油土或油泥与煤粉混合制成型煤用于特定行业加热之用；但消纳量有限，而且不符合国家相关政策。



生物技术处理回收油泥中油



泥浆工艺微生物生物分离某地高浓度油土效果

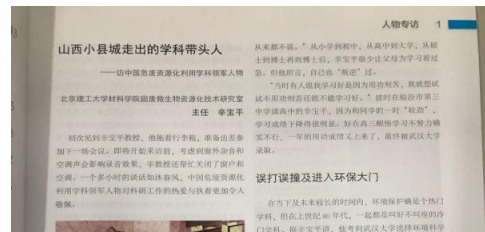
处理时间 (天)	1	3	5	7
对照组 (不加菌)	13%	19%	19%	21%
处理组 (外加菌)	23%	38%	66%	81%



团队在**危废资源化领域**的贡献和影响

在国际上首次提出**涉重危废、重金属再分类、危废脱帽摘帽**及其资源化利用等**基础性概念**，被行业标识为**中国危废资源化领军人物**。先后接受国内多家媒体专访就危废资源化技术发展、标准制定、路径选择等重大问题发表意见和建议。

团队在危废资源化领域的贡献和影响



山西小城走出的学科带头人
探索“蓝海”市场——多方位分析危废产业现状及发展前景
探讨危废的综合利用及无害化处理

邮发代号 82-59

主管 中国石化和化学工业联合会
主办 中国化工信息中心有限公司

中国化工信息

2019年第4期 总第1366期
2019年2月16日

本社网址: <http://www.cci.com.cn>



《中国化工信息》官方微信公众账号
关注微信请扫描左侧二维码或
搜索“中国化工信息周刊”

中国化工信息
CHINA CHEMICAL NEWS

《中国化工信息》官方网站
www.chemnews.com.cn

CCR
CHINA CHEMICAL REPORTER

英文版 CHINA CHEMICAL REPORTER
官方网站: www.ccr.com.cn

主编 吴军 (010) 64444035
副主编 唐苗 (010) 64419612

国际事业部 吴杨 (010) 64418037
产业活动部 魏坤 (010) 64426784
轻纺协作组 崔志宏 (010) 64420719
周刊理事组 吴军 (010) 64444035
发行服务部 李梦佳 (010) 64433927

读者热线 (010) 64419612
广告热线 (010) 64444035
网络版订阅热线 (010) 64433927
咨询热线 (010) 64419612

编辑部地址 北京市安外小关街53号(100029)
E-mail cn@cnic.cn
国际出版部 ISSN 1006-6438
国内统一刊号 CN11-2574/TQ
广告发布登记 京朝工商广登字 20170103号

排版 北京宏扬创意图文
印刷 北京博海升彩色印刷有限公司
定价 内地 20元/期 480元/年
台港澳 480美元/年
国外 480美元/年
订阅版 单机版:
大陆 1280元/年
台港澳及国外 1280美元/年
多机版, 全库:
大陆 5000元/年
台港澳及国外 5000美元/年
订阅电话: 010-64433927

总发行 北京报刊发行局
订 阅 全国各地邮局 邮发代号: 82-59
开户行 工行北京信义支行
户 名 中国化工信息中心有限公司
账 号 0200 2282 1902 0180 864

凡转载、摘编本刊内容, 请注明“据《中国化工信息》周刊”, 并按规定向作者支付稿酬。对于转载本刊内容却不标明出处的做法, 本刊将追究其法律责任, 直至诉讼长期有效。

本刊总目录查询: www.chemnews.com.cn
包括 1996 年以来历史数据

打好废旧锂电池回收利用组合拳

——访中国危废资源化利用学科领军人物 辛宝平



中国危废资源化利用学科领军人物 辛宝平

废旧电池由于具有直接或潜在的环境危害, 其回收问题历来牵动着社会各界的神经。未来几年, 我国首批锂电池电动车将进入报废期, 由此产生的大批量废旧锂电池将何去何从? 高新技术在电池的回收处理中扮演什么样的角色? 社会各方如何通力合作, 打赢这场战役? 近日, 北京理工大学材料学院失效材料/涉重危废资源化技术研究室主任辛宝平就我国废旧锂电池的处理现状、政策历程、新

型回收技术等问题接受了本刊记者的采访。

【CCN】锂电池废物对环境的危害有哪些? 锂电池废物的回收价值如何?

【辛宝平】锂离子电池通常被称为“绿色电池”, 不含汞、镉等有毒元素, 但随废弃量增加会对环境造成很大的污染。废旧锂电池存在的隔膜材料和镍、钴、锰等有重金属需求会对环境产生危害。此外, 锂电池的电解质具有挥发性, 有的含有氯或酸, 具有一定腐蚀性, 但和重金属相比环境危害

不大。

废旧锂电池的石墨类负极材料通常价格低廉且没有毒性, 回收价值不高; 液态有机电解质作为结构和功能已发生不可逆退化的混合物, 基本丧失回收价值; 锂电池的隔膜在老化后, 其电化学稳定性下降、放电容量降低、电池安全风险显著增加, 也失去了回收价值。而锂电池正极材料含有多种高浓度贵金属(如钴、镍、锂和锰), 单一金属含量在 1%~15%, 金属总

量占电池总量的 25%~35%, 有着很高的循环再生和回收利用价值, 尤其是钴、镍和锂。据估算, 1 吨废旧锂电池的有价值金属直接回收价值甚至超过 10 万元。

大容量动力电池的正极材料主要包括磷酸铁锂 (LiFePO₄)、钴酸锂 (LiMnO₂) 和三元材料 (LiNi_{1-x-y}Co_yMn_{1-x-y}O₂)。电动汽车的快速发展引发了对动力电池的爆炸式需求, 导致原材料金属价格持续走高。未来动力电池的原材料金属需求必将进一步加剧, 尤其是锂、钴、镍。锂电池中锂、钴、镍的质量分数分别为 2%~7%、5%~15%、0.5%~2%; 此外还有铝、铜、铁等金属元素。因此, 从废旧锂电池中回收有价值金属是应对锂电池生产原材料金属短缺、推动锂电池行业持续健康发展的根本途径。

【CCN】当前, 我国对废旧车用锂电池的处理处置、回收工艺技术有哪些?

【辛宝平】动力电池被更换时, 通常还具有 70% 左右的储能能力, 可以进行梯次利用, 如用于光伏发电、储能、家庭用电、低速

□ 本期编辑: 宋一帆 (010) 64440246 zhong@cnic.cn | 热点透视

打造校企产学研合作平台

促进涉重危废资源化新技术快速落地



2019年5月15日团队与首创环境科技公司签约，建立产学研校企合作平台，推动危废行业科技创新，促进危废资源化技术快速落地和成果转化。

生态环境频道的《生态环境大讲坛》

固体废物和社会发展



固体废物和美好生活: <http://www.eetv.org.cn/plus/view.php?aid=1429>

危险废物及其环境安全: <http://www.eetv.org.cn/plus/view.php?aid=1430>

危废资源化利用技术现状和问题

- 1. 一些企业在资源属性较强、污染属性较低的危废类型已有不少资源化实践**
一些企业蚀刻/微蚀刻液铜的高质产品化回收、废酸资源化利用，钢洗废酸生产絮凝剂和铁黄铁黑，废油漆直接油漆回用，油泥油土中原油回收，废有机溶剂定向制氢和氨。
- 2. 一些危废资源化技术的科学性/经济性以及污染控制和环境风险有待甄别**
对于危废资源技术研发和宣传有时存在言过其实，有时科学原理说不清楚，环境污染控制、产品环境风险和有毒物质元素走向也缺乏数据支撑。
- 3. 大量组分复杂、资源-环境交互属性强烈的危废资源化技术工艺有待研究**
多酸混合、多金属混合及各种有机物的复杂危废种类，尤其含有氯氟硫磷等有害元素的危险废物，需要适宜的技术组合以及资源化-无害化耦合。
- 4. 微生物技术在危废资源化利用领域的独特优势和巨大潜力有待挖掘**
低浓度涉重危废有价金属的生物沥浸-富集低浓度，含硫磺污泥的生物产酸脱硫，油土油泥的混合堆肥，爆炸性有机危废的固态发酵降解等。
- 5. 危险废物资源化理论框架以及技术指标风险评价体系有待建立**
危险废物的定量危害识别和分级分类、危险废物资源环境交互属性定量精细描述、资源化和无害化过程元素和物质代谢定向设计，技术体系、指标体系、评估模型等。

Thanks you for your attentions

**共同努力写好/固废危废资源化这篇大文章
为生态文明建设贡献我们的力量！**

辛宝平