

环境污染源头控制与生态修复系列丛书

微生物吸附剂

尹 华 陈烁娜 叶锦韶 彭 辉 唐少宇 著



科学出版社

环境污染源头控制与生态修复系列丛书

微生物吸附剂

尹 华 陈烁娜 叶锦韶 彭 辉 唐少宇 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于微生物吸附剂制备、作用机理及其在环境污染治理方面的应用的著作,在简单介绍微生物吸附剂的定义、种类、特性、影响因素,以及微生物吸附法的发展历程与趋势的基础上,系统总结微生物选育制备微生物吸附剂和微生物吸附剂处理重金属废水的作用机理等方面的研究成果,提出微生物吸附法在环境、能源等方面的应用前景。

本书可供环境科学与工程、环境微生物学、水处理工程、发酵工程等学科的科研人员,环境保护、矿产资源、制药、食品及水利等部门的工程技术与管理人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微生物吸附剂/尹华等著. —北京:科学出版社,2015.9

(环境污染源头控制与生态修复系列丛书)

ISBN 978-7-03-045686-1

I. ①微… II. ①尹… III. ①微生物-吸附剂-应用-矿区-废水处理-研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 218623 号

责任编辑:耿建业 万群霞 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年9月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:375 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

微生物吸附剂是利用活体、死体微生物或其衍生物制备而成的,能有效吸附分离介质中的金属离子和有机物等。跟传统的物理和化学治污方法相比,利用微生物吸附剂修复环境污染具有对环境干扰小、微生物资源丰富、实地操作性强等优点,尤其在重金属污染治理方面具有显著的优越性,已成为研究的热点。

大部分微生物对重金属具有一定的适应性,且具有吸附特性,可以在含有重金属的环境中生长代谢,通过自身的氧化还原、螯合、配位结合等机制将毒性金属离子转化为无毒或低毒赋存形态的离子或沉淀物,从而达到对水体或生态环境重金属污染治理的目的。已有的研究证实,微生物吸附剂应用于重金属废水的治理在工艺上是可行的,在技术上更表现出极大的优越性和竞争性,无论从吸附性能、pH适用范围,还是运行费用等方面均有很大的竞争优势。最早,微生物吸附剂是被用来分离去除废水中的重金属离子,达到净水的目的。目前,随着研究的深入,微生物吸附剂的应用领域逐渐扩展到富集回收贵金属、吸附治理放射性元素和分离脱除染料、难降解有毒有害有机物等。

微生物吸附剂进行应用的关键条件是选育高效、性能稳定的吸附菌株。在环境污染治理中,这些微生物可以从长期受污染的水体、沉积物或土壤中筛选分离得到,也可以通过诱变、原生质体融合和基因工程等技术手段构建。微生物吸附剂若要持续有效地应用,从菌种的选育、复合吸附剂开发和制备,到处理工艺的选择和优化实施,每个步骤都非常重要。近几十年来,国内外学者对微生物吸附的研究逐步深入,提出了各种微生物吸附机理,根据菌体活性可以将微生物吸附剂的作用机理分为两类,一类是依赖新陈代谢(活菌),一类是不依赖新陈代谢(死体微生物或其衍生物)。对微生物吸附机理的深入探索有利于在实际应用中更有针对性地构建高效吸附菌剂及调控工艺参数,以提高微生物吸附剂的吸附效率和工艺运行的稳定性。

华南理工大学环境与能源学院的尹华教授及其研究团队在近十几年来以水体、沉积物和土壤重金属污染的微生物修复为核心问题,从受污染环境中筛选、分离和富集培育了一批高效微生物菌剂,并用于高效吸附工程菌构建、水体/土壤/沉积物中重金属的微生物吸附性能、规律和作用机理等方面的研究,阐明了微生物吸附剂吸附不同重金属的最优环境条件和工艺参数的调控,揭示了微生物吸附重金属过程中离子代谢规律、重金属离子的转化解毒机制及微生物细胞的胁迫响应等,

为微生物吸附剂在环境污染治理中的广泛应用提供了充分的理论依据。该书重点介绍了微生物吸附剂菌种的选育和影响微生物吸附剂吸附性能的主要因素；从废弃物的资源化利用角度介绍了微生物吸附剂的廉价制备；结合作者及研究团队的研究成果全面总结了微生物吸附剂对重金属的吸附、生物转化和解毒机制，并介绍了微生物吸附机理研究中常用的仪器分析方法；最后从能源、污染治理和环境监测等不同领域介绍了微生物吸附剂的应用前景。

该书是介绍微生物吸附剂特性、菌种选育、制备、作用机理和应用的代表性专著，在很大程度上丰富了微生物吸附的研究内容，对环境污染微生物修复及微生物吸附剂构建与应用的研究都具有重要的学术借鉴意义。

是为序。

任志琪

2015年3月

前 言

微生物在自然界中分布广泛、种类丰富,包括原核生物、真核生物、藻类及非细胞类的病毒和亚病毒等,而且大部分的菌种已被研究证实具有优越的吸附能力。微生物吸附是利用活性或死体微生物及其衍生物吸附、分离和去除某些成分的过程。与传统的非生物吸附处理法相比,微生物吸附具有显著的优点:一是生物材料来源丰富、品种多、成本低廉,设备简单易操作、投资小、运行费用低,吸附量大、有较好的选择性;二是微生物吸附剂的再生性能好,用一般的物理、化学方法可以解吸微生物上的吸附质,实现循环利用。20 世纪中期,人们发现微生物对金属离子具有特殊亲缘性,从此以后微生物吸附引起了国内外学者的高度重视,尤其是用微生物吸附剂从废液中回收或处理金属离子的研究变得非常活跃并取得显著进展,包括细菌、酵母菌、霉菌和藻类等多种微生物被证实对不同的重金属具有高效的吸附性能。近三十年来,微生物吸附剂的研究和应用范围进一步扩大到放射性元素和有机污染物等的处理。随着对微生物吸附剂研究的深入,目前提出了不同的吸附机理,包括物理吸附、表面络合、配位、螯合、离子交换、静电吸附、氧化还原、酶促机理、微沉积等。微生物结构的复杂性及同一微生物和不同金属间亲和力的差别决定了微生物吸附机理非常复杂,在微生物吸附的过程中可能存在一种作用机理,也可能几种机理同时起作用。

在实际工业废水处理的应用中,由于环境条件及污染物的复杂性,对微生物吸附的要求越来越高,利用单一的微生物吸附剂已经不能满足要求。如何更有效、更具有针对性地提高微生物吸附的效率成为关注的要点,其主要集中在构建高效稳定工程菌、制备复合菌吸附剂、完善吸附设备和工艺等方面。近十几年来,笔者在国家自然科学基金委员会-广东联合基金重点项目、国家自然科学基金项目、广东省自然科学基金项目和广东省科技计划项目等的资助下,以重金属污染水体、沉积物和土壤为研究对象,重点开展了微生物吸附剂菌种的选育、微生物吸附特性、规律和作用机理,以及微生物吸附处理重金属工业废水工艺等方面的研究,取得了一系列的研究成果,本书对这些研究成果进行了全面的介绍和总结。

全书共 6 章,第 1 章介绍微生物吸附剂的种类和吸附性能的影响因素;第 2 章介绍微生物吸附剂菌种的选育;第 3 章介绍微生物吸附剂的制备;第 4 章介绍重金属的微生物吸附机理;第 5 章介绍微生物吸附剂处理重金属废水;第 6 章介绍微生物吸附法的应用前景。

本书的撰写建立在笔者及课题组成员多年研究成果积累的基础上,书中的研究成果和成果的总结出版在课题组老师彭辉、叶锦韶、何宝燕和数届博士及硕士研究生陈烁娜、卢显研、王会霞、杨峰、李森、史一枝、佟瑶、白洁琼等的大力支持和共同努力下完成。博士及硕士研究生的学位论文及与笔者共同发表的科研论文是本书写作的基础。本书由尹华、陈烁娜、叶锦韶、彭辉和唐少宇统稿,参与本书资料收集和整理工作的还有常晶晶、张峰、肖巧巧、廖丽萍、刘芷辰、卫昆、黄捷、唐立涛、王琳琳、邱云云、王芳芳、周艾平、冯绮澜、彭元、杨萍萍等,在此对他们一并致以诚挚的感谢!此外,在本书的撰写过程中,还参阅了大量相关的文献,已将主要参考文献列于书后,在此向各位编著者表示深切的谢意!

最后,衷心感谢任南琪院士在百忙之中为本书作序!

限于学术水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

尹 华

2015年3月于广州

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微生物吸附剂的定义	1
1.2 微生物吸附剂菌种的种类	1
1.3 微生物吸附剂的特性	2
1.4 微生物吸附剂吸附性能的影响因素	3
1.4.1 微生物因素	3
1.4.2 重金属因素	5
1.4.3 环境因素	6
1.5 微生物吸附法的发展历程与趋势	9
1.5.1 微生物吸附法的发展历程	9
1.5.2 微生物吸附法的发展趋势	11
第 2 章 微生物吸附剂菌种的选育	16
2.1 微生物吸附剂菌种的筛选	16
2.1.1 筛选微生物吸附剂菌种的重要性	16
2.1.2 微生物吸附剂菌种的筛选方法	16
2.2 自然选育	17
2.2.1 实验室自然选育高效菌株的流程和步骤	17
2.2.2 自然选育的局限性	22
2.3 诱变育种	22
2.3.1 诱变育种的基本程序	22
2.3.2 诱变剂	25
2.3.3 物理诱变育种	26
2.3.4 化学诱变育种	34
2.3.5 突变菌株的筛选	36
2.4 原生质体技术育种	38
2.4.1 原生质体制备技术	38
2.4.2 原生质体诱变育种技术	41
2.4.3 原生质体融合育种技术	42

2.5	基因组改组育种	51
2.5.1	基因组改组技术的具体方法	51
2.5.2	基因组改组技术的特点	52
2.5.3	基因组改组技术的应用	52
2.6	基因工程	54
2.6.1	基因工程育种技术的特点和步骤	54
2.6.2	基因工程育种技术在环境中的应用	55
2.6.3	基因工程育种技术的发展	55
第3章	微生物吸附剂的制备	57
3.1	微生物吸附剂制备的基本程序	57
3.1.1	微生物的筛选和发酵培养	57
3.1.2	菌株的预处理与修饰	60
3.1.3	微生物吸附剂的固定化处理	62
3.1.4	微生物吸附剂固定化载体	64
3.2	微生物吸附剂的廉价制备	66
3.2.1	剩余污泥制备微生物吸附剂	66
3.2.2	发酵工业副产物制备微生物吸附剂	68
3.2.3	发酵废液的资源化利用	72
3.3	微生物吸附剂产品	75
3.3.1	BV-SORBEX™	75
3.3.2	AlgaSORB™	78
3.3.3	Bio-Fix	79
3.3.4	AMT-Biocclaim™	79
第4章	重金属的微生物吸附机理	80
4.1	微生物吸附剂对重金属的作用机理	82
4.1.1	胞外沉淀	82
4.1.2	表面吸附与络合	84
4.1.3	静电吸附	87
4.1.4	离子交换	88
4.1.5	氧化还原	89
4.1.6	微沉积	94
4.1.7	金属离子跨膜运输	95
4.1.8	胞内积累	101
4.1.9	高容量金属络合物吸附	101
4.2	重金属的生物解毒和生物转化	103

4.2.1 生物解毒	103
4.2.2 微生物对重金属的转化	107
4.3 仪器分析在微生物吸附机理研究中的应用	110
4.3.1 原子力显微镜	111
4.3.2 电子显微镜与能谱分析仪联用	114
4.3.3 红外光谱	118
4.3.4 X射线吸收精细结构谱	120
4.3.5 核磁共振	121
4.3.6 流式细胞术	121
第5章 微生物吸附法处理重金属废水	124
5.1 微生物吸附剂处理重金属废水	124
5.1.1 解脂假丝酵母对铬的吸附	124
5.1.2 嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附	131
5.2 工程菌吸附剂处理重金属废水	172
5.2.1 重金属微生物吸附剂菌种选育	172
5.2.2 酵母融合菌 R ₃₂ 处理含镍废水	185
5.2.3 酵母融合菌 R ₃₂ 处理含铬废水	196
5.2.4 基因工程菌处理含镍废水	205
5.3 固定化微生物吸附剂处理电镀废水	213
5.3.1 材料	213
5.3.2 实验方法	213
5.3.3 固定化酵母融合菌 R ₃₂ 吸附剂处理含铬废水的影响因素	215
5.3.4 固定化吸附剂对实际电镀废水的处理	217
5.3.5 固定化吸附剂填充柱吸附工艺连续处理含铬废水	218
第6章 微生物吸附法的应用前景	219
6.1 微生物吸附法回收贵金属	219
6.1.1 物理化学法	219
6.1.2 微生物吸附法	219
6.1.3 贵金属微生物吸附的影响因素	222
6.1.4 微生物吸附剂中贵金属的解吸	224
6.2 放射性元素的微生物吸附	225
6.2.1 物理化学法	225
6.2.2 植物修复法	225
6.2.3 微生物吸附法	226
6.3 微生物吸附法在染料废水处理中的应用	228

6.3.1	染料废水处理发展现状	228
6.3.2	微生物吸附剂在染料废水处理中的应用	230
6.4	有机金属化合物的微生物吸附	234
6.4.1	有机金属化合物特性及环境行为效应	234
6.4.2	有机金属化合物的微生物修复	236
6.5	毒害性有机污染物的微生物吸附	237
6.5.1	环境中毒害性有机污染物的去除	238
6.5.2	吸附材料	239
6.5.3	毒害性有机污染物微生物吸附机理	239
6.5.4	国内外研究现状	241
6.5.5	毒害性有机污染物微生物吸附的影响因素	242
6.6	微生物吸附与环境微量元素的检测	243
6.6.1	利用微生物吸附进行环境中微量金属元素检测的前处理	243
6.6.2	利用微生物吸附法对环境中微量金属元素的生物检测	244
6.7	微量元素富集菌剂	245
6.7.1	微量元素富集菌剂的特点	245
6.7.2	微量元素富集菌剂的研发	245
6.8	微生物吸附法在催化剂上的应用	250
6.8.1	催化反应中的吸附作用	250
6.8.2	催化反应中的微生物吸附	251
6.9	微生物吸附法在杀菌剂和消毒剂中的应用	257
6.9.1	杀菌剂和消毒剂的发展现状	257
6.9.2	微生物杀菌剂和消毒剂	258
6.10	微生物吸附法在生物探矿与采矿中的应用	263
6.10.1	微生物吸附法在生物探矿和采矿中的作用	264
6.10.2	微生物吸附法在探矿和采矿中的应用技术	265
6.10.3	微生物吸附法在探矿和采矿中的应用研究	267
6.11	微生物吸附与微生物污损	268
6.11.1	微生物污损定义	268
6.11.2	微生物污损影响	268
6.11.3	微生物吸附与微生物污损	269
6.11.4	防污涂料	270
6.12	生物吸附与同步生物固碳	271
6.12.1	固碳微生物	271
6.12.2	生物固碳技术	272

6.13 生物吸附与同步生物制氢	273
6.13.1 光解水制氢法	274
6.13.2 暗发酵制氢法	275
6.13.3 光发酵制氢法	276
6.13.4 光发酵和暗发酵耦合制氢法	276
6.13.5 生物制氢与生物吸附	277
6.14 生物吸附与同步生物多糖制备	277
6.14.1 微生物胞外多糖的提取	279
6.14.2 微生物胞外多糖的分离纯化	279
6.14.3 微生物胞外多糖的特性	280
参考文献	281

第 1 章 绪 论

1.1 微生物吸附剂的定义

微生物吸附剂指能有效地从水体或气体中吸附、分离或去除某些成分的微生物或其衍生物,主要包括细菌、真菌、藻类或有机化合物等。它最早被用于水体中重金属等无机化合物的分离,之后随着研究的深入和扩展,微生物吸附剂也被用于染料、放射性元素、杀虫剂、持久性有机化合物等生物难降解和有毒有害物质的分离和富集。

微生物吸附剂处理重金属废水实质上是利用细菌、真菌、酵母菌、藻类等微生物材料及其生理代谢活动的产物吸附、转化、积累和去除废水中的重金属,并通过化学、物理等不同方法使重金属从吸附剂上解吸、释放出来,从而实现吸附剂的再生和重金属的分离和回收。

1.2 微生物吸附剂菌种的种类

研究表明,可用于制备吸附剂的微生物种类非常丰富,包括细菌、酵母菌、霉菌和藻类等。近年来研究较多的微生物吸附剂菌种见表 1-1。

表 1-1 微生物吸附剂的种类(王建龙和陈灿,2010)

种类	微生物吸附剂
细菌	枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)、地衣形芽孢杆菌(<i>Bacillus licheniformis</i>)、铜绿假单胞菌(<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)、生枝动胶菌(<i>Zoogloea ramigera</i>)、蜡状芽孢杆菌(<i>Bacillus cereus</i>)
酵母菌	酿酒酵母(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)、假丝酵母(<i>Candida albicans</i>)、产脲假丝酵母(<i>Candida utilis</i>)
霉菌	黄曲霉(<i>Aspergillus flavus</i>)、米曲霉(<i>Aspergillus oryzae</i>)、产黄青霉(<i>Penicillium chrysogenum</i>)、白腐真菌(<i>White rot fungi</i>)、黄绿青霉(<i>Penicillium citreo-virde</i>)、黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)、芽枝霉(<i>Blastocladia pringsheimii</i>)、鲁氏毛霉(<i>Mucor rouxii</i>)
藻类	褐藻(<i>Phaeophyta</i>)、鱼腥藻(<i>Anabaena</i>)、墨角藻(<i>F. vesiculosus</i>)、小球藻(<i>Chlorella</i>)、马尾藻(<i>Sargassum</i>)、节囊叶藻(<i>Ascomyllum nodosum</i>)、海带(<i>Laminaria japonica</i>)

微生物是地球上种类最多、繁殖能力最强的物种,若能将其用作生物吸附的原材料,将是取之不尽的廉价资源。发酵工业产生的大量废菌体(如酿酒酵母、面包酵母、根霉菌属、枯草芽孢杆菌等)也是一种极具潜力的吸附剂。在这些微生物吸附剂中,就吸附效果而言,酵母、曲霉、青霉和毛霉等几个属的微生物极具应用前景,因为这些属的微生物中既包含具有高度吸附专一性的菌株,又包含具有吸附广泛性的菌株。

1.3 微生物吸附剂的特性

微生物吸附法处理重金属废水越来越受到青睐,主要是因为微生物吸附法与传统的化学、物理法相比,具有无法比拟的优点。

与传统的吸附剂相比,微生物吸附剂具有以下主要特性:①适应性广,能在不同范围的 pH 和温度条件下进行加工操作;②金属选择性好,能从溶液中吸附重金属离子而不受碱金属离子的干扰;③金属离子浓度的影响小,在低浓度($<10\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和高浓度($>100\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下都具有良好的金属吸附能力;④对有机化合物的耐受力好;⑤再生能力强、步骤简单,再生后吸附能力无明显降低;⑥节能、处理效率高。

利用微生物吸附法治理重金属废水时,不仅是具有活性的微生物吸附剂,死体的微生物吸附剂同样也具有较好的吸附效果。同时不同微生物对同一种金属的吸附去除效率是不同的。一般情况下,每一种金属都有其特定的最优微生物吸附剂。表 1-2 显示了不同微生物对同一种金属吸附量的显著差异。

表 1-2 不同微生物对同一种金属吸附量的比较(Wang and Chen, 2006)

金属离子	吸附量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 干重)
Zn^{2+}	泡叶藻(<i>Ascomyllum nodosum</i>)(25.6)>产黄青霉(19.2)>墨角藻(17.3)>龟裂链霉菌(<i>Streptomyces rimosus</i>)(6.63)>酿酒酵母(3.45)
Cu^{2+}	死菌体:龟裂链霉菌(9.07)>产黄青霉(8.62)>墨角藻(7.37)>酿酒酵母(4.93)>泡叶藻(4.89) 活菌体:酿酒酵母(7.11)>马克斯克鲁维酵母(<i>Kluyveromyces marxianus</i>)(6.44)>念珠菌(<i>Nostoc</i>)(4.80)>栗酒裂殖酵母(<i>Schizosaccharomyces pombe</i>)(1.27)
Ni^{2+}	墨角藻(2.85)>龟裂链霉菌(1.63)>酿酒酵母(1.47)>泡叶藻(1.11)
Pb^{2+}	黄孢原毛平革菌(<i>Phanerochaete chrysosporium</i>)(419.4)>黑根霉(<i>Rhizopus nigricans</i>)(403.2)>绛红小单孢菌(<i>Micromonospora purpurea</i>)(279.5)>酿酒酵母(211.2)>土曲霉(<i>Aspergillus terreus</i>)(201.1)>伊纽小单孢菌(<i>Micromonospora inyoensis</i>)(159.2)>棒状链霉菌(<i>Streptomyces clavuligerus</i>)(140.2)
$\text{Cd}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$	迟缓芽孢杆菌(<i>Bacillus lentus</i>)(≈ 30)>米曲霉>酿酒酵母(<5)

1.4 微生物吸附剂吸附性能的影响因素

研究微生物吸附的影响因素,进而确定最佳的吸附条件是保证微生物吸附剂有优良稳定吸附效果的前提。影响微生物吸附剂吸附重金属能力的因素很多,主要包括三个方面:微生物因素、重金属因素、环境因素。其中微生物因素包括代谢能力、生理状态、细胞年龄、存在状态等;重金属因素包括重金属的浓度、化学形态和价态等;环境因素包括 pH、温度、吸附时间和吸附液中的共存离子等。

1.4.1 微生物因素

1. 微生物吸附剂的预处理

微生物吸附剂的预处理是指在处理重金属废水之前,通过干燥、碱化、酸化或化学修饰等物理、化学方法处理微生物细胞。适当的预处理可有效提高微生物吸附剂对重金属的去除能力及吸附剂的稳定性。这是因为在酸、碱、无机盐或氨基酸等物质的作用下,微生物细胞表面的理化特性发生改变,例如:①增加细胞表面的有效基团;②改变细胞壁上关键酶的结构和催化性能;③通过几种不同基团间建立化学交联而达到提高酶活性的目的;④对细胞壁表面基团进行修饰,提高微生物吸附剂的选择性;⑤改变微生物表面电荷,增加细胞的有效吸附位点。

已有文献报道,干燥处理后的真菌凤尾菇(*Pleurotus sajor-caju*)对废水中 Cd^{2+} 的去除能力显著提高,且冷冻干燥的效果比高温干燥好(Cihangir and Saglam, 1999)。经乙醇处理的废弃酵母菌细胞对废水中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附量分别达 $15.63\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重)和 $17.49\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重),分别比对照实验组增加了 2 倍和 1 倍(Goksungur et al., 2005)。Celaya 等(2000)发现,NaOH 处理后的氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)对重金属离子的吸附量显著增加,其原因是碱处理使细胞表面的吸附位点去质子化,使细胞表面的羟基增多,从而增加金属的有效吸附位点。

2. 微生物吸附剂的细胞壁

微生物细胞与动物细胞的最大区别在于细胞原生质膜外有明显的细胞壁。它既可以避免微生物受到外界环境的伤害,又可以控制原生质和周围环境之间的物质交换,细胞壁直接与外界环境接触,并可以与液态介质中的可溶性物质发生作用。虽然细胞壁不是微生物发生吸附的唯一部位,但却是最早与污染物接触的部位,细胞壁上的有效基团、关键蛋白酶、离子通道是重金属吸附、络合和转运的主要位点,因此,细胞壁的特殊结构在微生物吸附中起重要作用。

3. 微生物吸附剂的菌龄

通常来说,微生物吸附剂的吸附效率与菌龄密切相关。有研究认为,细胞在生长对数期和衰亡期对重金属的吸附能力强于生长稳定期。这与微生物细胞的代谢有关,同时又与体系中的溶液环境变化相关。对数期细菌的细胞运动能力强,表面胞外聚合物的数量多且质量较好。细胞的运动能力不仅可以增加微生物与吸附质的接触机会,而且运动细胞所产生的动能可以克服微生物与吸附质之间的静电斥力;胞外聚合物中的多糖、蛋白质及核酸等生物大分子通过含有的带电官能团,如羧基、磷酸基、氨基和羟基等和金属阳离子相互作用。这是导致对数期微生物具有较高吸附量的原因。

有研究者发现,死细胞对某些金属也具有与活细胞相似甚至更高的吸附量,而且不受体系中有毒物质的限制,也不需要营养物质供给,所以更具有开发成吸附剂的潜力。不过也有研究表明,处于稳定期的微生物对重金属的吸附能力最优。但由于一些细菌的芽孢、外毒素和抗生素等有害代谢产物大多在稳定期大量产生并积累,体系中营养物比例、溶液 pH 和 E_h 值等理化条件不利于微生物生长繁殖,因此,该阶段的细胞开始趋向衰亡,吸附能力减弱。

4. 微生物吸附剂对重金属的选择性

微生物吸附剂对重金属具有一定的选择性。这与吸附剂构造、官能团及重金属在溶液中的化学形态、大小、键能等因素有关。例如,小球藻、黑曲霉、褐藻等对金的选择吸附性强,假丝酵母、枯草杆菌、氰基菌对铬的选择吸附能力大。同时由于水体中重金属离子一般以水合金属离子 $M(H_2O)_x^{n+}$ 、强碱、络合物及金属有机物等不同形态存在,这更加促进了微生物吸附剂的吸附选择性。

5. 微生物吸附剂的粒径

微生物吸附剂粒径对生物吸附量有明显的影响(Wang and Chen, 2006),主要是粒径决定吸附剂比表面积的大小及有效吸附位点的多少。吸附剂粒径太大、太小都不利于吸附处理。若利用曲霉(*Aspergillus* sp.)处理含铬废水,大径菌丝球(4~5mm)的去除率比小径菌丝球(1.5~2.0mm)低4%,但采用的大径菌丝球对各种金属离子的单位吸附量均超过了小径菌丝球。因此,吸附剂的粒径为1~3mm比较适宜,这与金属在吸附剂中的内扩散及吸附剂内表面积利用状况有关。

微生物吸附剂固定化是指通过包埋、吸附、交联等物理、化学作用将游离的细胞或蛋白酶定位于限定区域,改变吸附剂本身的粒径、运动能力等性能,但仍保持其活性。载体不同,固定化微生物吸附剂的吸附量也不一样。无机载体大多具有

多孔结构。例如,活性炭具有发达的孔隙结构和比表面积,且表面较粗糙,为微生物生长和繁殖提供了空间,有利于增加细胞密度和有效的吸附位点。微生物在有机物等其他载体表面黏附生长,一般载体的大小决定吸附剂的粒径及有效作用面积的大小。

另外,虽然较大粒径吸附剂有时表现出良好的吸附性能,但小粒径吸附剂的耐压能力却优于大粒径吸附剂,因此,在实际操作过程中必须综合考虑几方面的因素。

6. 微生物的存在状态

微生物的存在状态(游离的或被固定在载体上)对其处理重金属废水的效果具有显著影响,且对不同的重金属种类其作用效果存在差异。例如,游离的酵母菌细胞对 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 的吸附量分别为 $79.2\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重)和 $23.4\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重),而当用明胶载体固定后,其吸附量分别为 $41.9\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重)和 $35.3\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重)(Al-Saraj et al., 1999)。固定化微生物细胞富集水体中的重金属时,实际上起着生物离子交换树脂的作用。微生物吸附剂固定化可以大幅度地提高参加反应的微生物浓度,增强耐环境冲击能力。固定化的微生物具有生物量高且稳定、不易流失、反应速率快、耐毒害能力强、产物容易分离、能实现连续操作等特点,使其在废水处理和受污染水环境的修复中更实用。

7. 微生物的生理条件

微生物吸附包括活细胞和死细胞的吸附,而细胞是否具有活性对其吸附重金属也有较大的影响。

非活性微生物吸附剂主要通过物理、化学机制去除重金属离子,涉及离子交换、表面络合、静电吸附等,主要受细胞表面组分和性质的影响,其表面吸附决定吸附速率快、可逆的特点,而活性微生物吸附剂的吸附特点则是吸附速率较慢且可逆性差,因为其吸附过程包含表面吸附和胞内积累两个阶段,虽然第一个阶段的速率很快,但第二个阶段是一个主动运输的过程,吸附在细胞表面的重金属离子缓慢地进入细胞内部进行积累,该过程与细胞的生理代谢活动相关。微生物的活性不仅影响吸附速率,而且影响吸附量的大小。例如,对于 Zn^{2+} , 活性酿酒酵母的吸附量 ($15.0\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 低于非活性的细胞 ($30.5\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); 对于 Cu^{2+} 恰恰相反,非活性酿酒酵母的吸附量 ($4.3\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 低于活性的细胞 ($12.7\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) (孟令芝等, 2000)。但活性与非活性微生物吸附剂在吸附量上的差异还没有合理的解释。

1.4.2 重金属因素

废水中重金属的浓度、化学形态和价态等都会影响微生物吸附剂的吸附效果。