



Wastewater Multi-Media
Ecological Treatment Technology

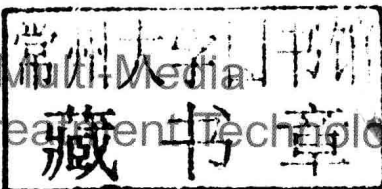
污水多介质 生态处理技术原理

籍国东 谢崇宝◎著



科学出版社

Wastewater Multi-Media
Ecological Treatment Technology



污水多介质 生态处理技术原理

籍国东 谢崇宝◎著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书以水利部公益性基础科研专项、国家自然科学基金、霍英东教育基金、北京市与中央高校共建项目的科研成果为基本素材,阐述了污水多介质生态处理技术的基本原理,介绍了多介质生物陶粒的制备方法及性能,论述了多介质快速生物滤池、多介质曝气生物滤池、多介质地下渗滤系统、垂直流层叠人工湿地、多介质层叠人工湿地、复合折流生物反应器和多介质折流生物反应器的结构、技术特点、污染物转化效率、限制性水力负荷和微生物多样性,系统分析了多介质生态处理系统中氮转化功能基因的空间演化和优势富集规律,深入阐述了氮转化分子生态过程的耦联机制。

本书可供从事水处理工程、生态水利工程、污染生态工程和给排水工程领域的科技工作者、设计人员、管理人员,以及大中专院校环境工程、水利工程、生态工程、市政工程和农业工程等专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

污水多介质生态处理技术原理 / 籍国东, 谢崇宝著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034129-7

I. 污… II. ①籍… ②谢… III. 污水处理—生物处理 IV. X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 080735 号

责任编辑: 李 敏 刘 超 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 5 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 260 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

污水生态处理技术是环境工程学、生态工程学、水利工程学和环境生物技术等多学科交叉融合的产物,其最大特点是通过促进生态系统内部的物质循环、能量流动和信息传递,减少外部资源和能源的投入,将资源利用和水质净化有机结合,实现污水的低成本处理与再生利用。

20 世纪 80 年代以来,污水生态处理技术伴随着人们对可持续发展认识的不断深入而日新月异地快速发展,逐渐形成了以人工湿地、地下渗滤、快速渗滤、多段土壤层和慢速渗滤为主体、特色鲜明的技术体系。传统的污水生态处理技术的共同优点是费用低廉、管理方便,但也存在占地面积大、效率低和易堵塞等瓶颈技术问题,这在一定程度上限制了其进一步推广应用。为了突破传统污水生态处理技术瓶颈的制约,北京大学和中国灌溉排水发展中心的研究人员,以水利部公益性基础科研专项(No. 200801048)、国家自然科学基金(No. 51179001)、霍英东教育基金(No. 122041)和北京市与中央高校共建项目等的科研成果为基本素材,完成了本书的写作。本书阐述了污水多介质生态处理技术的基本原理,介绍了多介质生物陶粒的制备方法及其性能,论述了多介质快速生物滤池、多介质曝气生物滤池、多介质地下渗滤系统、垂直流层叠人工湿地、多介质层叠人工湿地、复合折流生物反应器和多介质折流生物反应器的结构、技术特点、污染物转化效率、限制性水力负荷和微生物多样性;系统分析了多介质生态处理系统中氮转化功能基因的空间演化和优势富集规律,深入阐述了氮转化分子生态过程的耦联机制。

本书共分 9 章。第 1 章系统介绍了多介质生物陶粒的制备方法及其性能;第 2 章系统论述了多介质快速生物滤池的结构、氮转化速率、微生物分布特征、优势基因富集规律及氮转化过程耦联机制;第 3 章重点论述了多介质曝气生物滤池的结构、限制性水力负荷、容积负荷和微生物分布规律;第 4 章系统论述了多介质地下渗滤系统设计、氮转化效率、微生物和功能基因空间演化规律,以及氮转化基因功能群组 and 关键途径;第 5 章系统阐述了垂直流层叠人工湿地设计、启动、限制水力负荷率和氮磷限制因子;第 6 章重点论述了多介质层叠人工湿地设计,氮转化速率、微生物空间演化及氮转化过程的耦联机制;第 7 章着重阐述了复合折流生物反应器的类型及其处理稠油废水的特性;第 8 章系统论述了多介质复合

■ 污水多介质生态处理技术原理

折流生物反应器设计、污染物降解效率、厌氧污泥特性、好氧填料微观特性和微生物沿程演化规律；第9章重点介绍了复合折流反应器组合人工湿地的技术特点、运行特性、植物选配、微生物特性及工程案例。

全书由籍国东和谢崇宝共同撰写，由籍国东审校定稿。此外，项目组成员张国华、童晶晶、周游、谭玉菲和张轩瑞参与了部分实验数据测试，孙铁珩院士对部分章节写作给予了悉心指导，在此向孙铁珩院士和项目组成员表示真诚的感谢！

本书撰写过程中，作者力求做到科学性、前沿性和实用性的有机结合，但由于污水多介质生态处理技术涉及的内容广泛，又与多学科交叉，并且目前国内外尚无这方面的专著，书中内容难免有不足之处，敬请同行专家和广大读者批评指正！



目 录

前言

第1章 多介质生物陶粒	1
1.1 概述	1
1.2 多介质生物陶粒制备	2
1.2.1 生物陶粒原料	2
1.2.2 生物陶粒制备	3
1.3 多介质生物陶粒表征	4
1.3.1 元素组成	4
1.3.2 表面特征	6
1.3.3 孔径分布	8
1.4 多介质生物陶粒性能	9
1.4.1 机械性能	9
1.4.2 耐酸碱性	9
1.4.3 氮吸附特性	10
1.4.4 磷吸附特性	12
第2章 多介质快速生物滤池	15
2.1 概述	15
2.2 多介质快速生物滤池设计	16
2.2.1 滤池设计	16
2.2.2 运行控制	16
2.3 氮转化速率	17
2.3.1 NH_4^+ 和 TN 转化速率	17
2.3.2 NO_3^- 和 NO_2^- 转化速率	18
2.4 微生物空间分布特征	18
2.4.1 微生物多样性	18
2.4.2 微生物系统发育	19
2.5 氮转化基因空间演化	22
2.5.1 基因定量溶解曲线	22

2.5.2	氮转化基因丰度	25
2.5.3	氮转化基因相对多度	27
2.5.4	功能基因多样性指数	27
2.5.5	Pearson 秩相关系数	28
2.6	氮转化基因富集	29
2.6.1	优势基因富集	29
2.6.2	稀有基因富集	31
2.7	氮转化过程耦联机制	31
2.7.1	功能基因菌群协作	31
2.7.2	功能基因菌群竞争	32
2.7.3	氮转化过程耦联机制	32
第3章	多介质曝气生物滤池	36
3.1	概述	36
3.2	多介质曝气生物滤池设计	37
3.2.1	滤池设计	37
3.2.2	运行控制	37
3.3	限制性水力负荷	39
3.3.1	基于 COD 的水力负荷	39
3.3.2	基于 NH_4^+ 的水力负荷	40
3.3.3	基于 TP 的水力负荷	41
3.4	污染物容积负荷	41
3.4.1	有机负荷	41
3.4.2	氨氮容积负荷	43
3.5	微生物分布规律	44
3.5.1	微生物形态	44
3.5.2	微生物多样性	45
3.5.3	微生物系统发育	48
3.5.4	微生物丰度	50
第4章	多介质地下渗滤系统	52
4.1	概述	52
4.2	多介质地下渗滤系统设计	53
4.2.1	系统设计	53
4.2.2	运行控制	53
4.3	氮转化速率	54

4.3.1	NH_4^+ 和 TN 转化速率	54
4.3.2	NO_3^- 和 NO_2^- 转化速率	56
4.4	氮转化基因空间演化	57
4.4.1	氮转化基因丰度	57
4.4.2	基因多样性指数	59
4.4.3	Pearson 秩相关系数	59
4.5	氮转化基因富集	60
4.5.1	稀有基因富集	60
4.5.2	优势基因富集	62
4.6	氮转化基因功能群组	63
4.6.1	好氧功能群组	63
4.6.2	厌氧功能群组	64
4.6.3	生态联结群组	65
4.7	氮转化关键途径	65
4.7.1	升流区氮转化途径	65
4.7.2	渗滤区氮转化途径	66
第 5 章	垂直流层叠人工湿地	67
5.1	概述	67
5.1.1	人工湿地主要类型	67
5.1.2	人工湿地作用机制	68
5.1.3	人工湿地去污机理	71
5.2	垂直流层叠人工湿地设计	72
5.2.1	湿地设计	72
5.2.2	湿地启动	73
5.3	限制性水力负荷	74
5.3.1	同化容量计算模型	74
5.3.2	限制性水力负荷计算模型	77
5.3.3	限制性水力负荷	77
5.3.4	限制性水力停留时间	78
5.4	限制因子	80
5.4.1	氮磷转化	80
5.4.2	COD 和 Oil 降解	82
第 6 章	多介质层叠人工湿地	86
6.1	概述	86

6.2 多介质层叠人工湿地设计	87
6.2.1 湿地设计	87
6.2.2 运行控制	88
6.3 氮转化速率	89
6.3.1 NH_4^+ 和 TN 转化速率	89
6.3.2 NO_3^- 和 NO_2^- 转化速率	90
6.4 微生物空间演化	91
6.4.1 微生物多样性	91
6.4.2 微生物同源性	92
6.5 氮转化基因空间演化	96
6.5.1 基因丰度演化	96
6.5.2 基因多样性演化	102
6.6 氮转化过程耦联机制	104
6.6.1 功能基因群落生态联结性	104
6.6.2 氮转化过程耦联协作机制	106
第7章 复合折流生物反应器	109
7.1 概述	109
7.1.1 折流生物反应器结构	109
7.1.2 折流生物反应器特性	112
7.2 ABR 处理稠油废水	115
7.2.1 启动运行控制	115
7.2.2 启动运行特性	117
7.2.3 污泥和微生物特性	121
7.3 AOBR 处理稠油废水	124
7.3.1 AOBR	124
7.3.2 AOBR 启动特性	127
7.3.3 AOBR 运行特性	131
7.3.4 颗粒污泥特性	137
第8章 多介质复合折流生物反应器	140
8.1 概述	140
8.2 MHBR	140
8.2.1 反应器设计	140
8.2.2 运行控制	141
8.3 污染物降解效率	142

8.3.1	COD 降解	142
8.3.2	氮磷转化	143
8.4	厌氧污泥特性	144
8.4.1	表观形态	144
8.4.2	元素组成	145
8.4.3	官能团组成	147
8.5	好氧填料微观特性	149
8.5.1	表观形态	149
8.5.2	微生物形态	150
8.6	微生物演化	152
8.6.1	微生物多样性	152
8.6.2	微生物系统发育	154
第 9 章	复合折流反应器组合人工湿地	159
9.1	MHBR 组合人工湿地	159
9.1.1	技术特点	159
9.1.2	植物选配	159
9.1.3	工程案例	161
9.2	AOBR 组合人工湿地	171
9.2.1	技术特点	171
9.2.2	运行控制	171
9.2.3	运行特性	172
9.2.4	微生物特性	178
参考文献		186

第1章 多介质生物陶粒

1.1 概 述

据统计,我国每年的粉煤灰排放量高达1.6亿吨,因为没有很好的高值利用技术,实际利用率仅为30%~50%,导致多年累计堆存量超过10亿t(Fu et al., 2008)。粉煤灰的堆存,不仅占用大量土地,任意堆放也会产生扬尘,污染空气,通过暴雨径流等排入水系则会造成河流淤塞,粉煤灰中携带的有毒化学物质还会危害人体和动植物健康(Cprek et al., 2007)。当前,粉煤灰的无害化处理和高值利用已成为全球广泛关注的热点问题(Rostami and Brendley, 2003; Golightly et al., 2005)。

生物陶粒是水处理的重要滤料,其制备需要消耗大量页岩等不可再生矿石资源(Hartman et al., 2007; Xu et al., 2008a, 2008b, 2008c)。而采用粉煤灰代替页岩制备生物陶粒,则可以提高生物陶粒的耐久性、抗拉强度和抗酸碱侵蚀能力(Gao et al., 2009),既可以解决粉煤灰的污染问题,又能够节省大量不可再生资源,还可以改善生物陶粒的性能(Bankowski et al., 2004),是一条很有前景的粉煤灰无害化处理和高值利用途径。近年来,为了增强粉煤灰陶粒在生物滤池中的适用性,Fu等采用有机造孔剂和粉煤灰制备了一种填充密度小和比表面积大的多孔生物陶粒(Fu et al., 2008);为了增强粉煤灰的吸附能力,Chen等制备的酸碱和纳米材料改性粉煤灰陶粒,大大提高了粉煤灰陶粒的氨氮吸附容量(Chen and Lin, 2007);为了增强粉煤灰陶粒化学反应过程,Gao等将 FeCl_3 等催化剂涂至粉煤灰陶粒表面,显著提高了粉煤灰陶粒表面的生物化学反应速率(Gao et al., 2009)。这些研究都在一定程度上,改善了粉煤灰生物陶粒的性能,促进了粉煤灰陶粒在水处理中的应用。

铁屑和C共同浸没在水中时,会发生宏观和微观两种原电池电解反应(Loyo et al., 2008; Liu et al., 2009)。一方面,铁屑中的金属Fe和 Fe_3C 存在明显的氧化还原电势差,当Fe和 Fe_3C 共同浸没在水中时,会发生原电池电解反应,形成许多细微的原电池,金属Fe作为原电池的阳极, Fe_3C 作为阴极。另一方面,Fe和C也存在明显的氧化还原电势差,当Fe和C共同浸没在水中时,也会发生

原电池电解反应，形成 Fe/C 宏观的原电池（Loyo et al.，2008；Liu et al.，2009）。目前，具有双原电池效应的铁屑团球、纳米铁颗粒和海绵铁等，都被用于处理各种废水（Mcgeough et al.，2007；Ma et al.，2008），但是，截至目前，通过掺杂金属 Fe 制备具有 Fe/C 和 Fe/Fe₃C 双原电池效应的改性粉煤灰生物陶粒，改善粉煤灰生物陶粒的理化性质和氮磷吸附性能还少有报道。

粉煤灰生物陶粒高温烧结制备过程中，为了使其内部形成适量的、大小达到微米或纳米级的微孔，增加其比表面积和污染物吸附容量，往往需要添加大量造孔剂（Ismail，2007）。目前，使用较多的造孔剂是煤粉和合成有机物，它们的最大优点是在 400～800℃ 就完全燃尽（Hartman et al.，2009）。但是，煤粉属于不可再生资源，合成有机造孔剂也需要消耗大量不可再生资源，因此，寻找替代煤粉和合成有机物造孔剂的廉价的、易得的造孔材料，就显得非常必要。锯末是一种来源相当丰富的工业废弃物，是木材加工的主要剩余物之一，约占原木材加工总量的 8%～12%（Salehi et al.，2009）。目前，一些国家通过将锯末用作燃料、栽培食用菌、家畜饲料敷料、生产炭化制品、土壤改良剂、制版原料及模压成型制品等，实现了锯末的高值利用。可是，由于技术和经济等方面的原因，仍然有大部分锯末有待妥善处理或有效利用（Ma et al.，2009）。锯末的主要成分是木质素和纤维素，其高温烧结后均能转化为碳物质，并留下丰富的孔隙，可用于制备多孔材料（Salehi et al.，2009）。

1.2 多介质生物陶粒制备

1.2.1 生物陶粒原料

1#、2#和 3#三种多介质生物陶粒的原料见表 1-1。此外，在上述原料基础上，还分别掺杂相当于上述原料总和 20% 的 CaCO₃。

表 1-1 多介质生物陶粒原料组成 (单位:%)

编号	粉煤灰	锯末屑	黏土	天然斜发沸石	金属 Fe
1	49	25	10	15	1
2	48	25	10	15	2
3	46	25	10	15	4

由表 1-1 可知，多介质生物陶粒的主要原料包括沸石、粉煤灰、黏土、锯木屑和 CaCO₃ 等。沸石是一族骨架状结构多孔性含水硅铝酸盐晶体的总称，它具有

独特的吸附性、催化性、离子交换性和选择性、耐酸性、热稳定性、多成分性及很高的生物活性和抗毒性等。天然沸石尤其是斜发沸石被广泛证明有很强的吸附能力，其在自然界中广泛存在，是天然沸石中储量最丰富的一种，在我国有着广泛而丰富的储量，廉价易得。粉煤灰主要含 SiO_2 、 Al_2O_3 等活性成分，属硅铝酸盐，此外还含少量的 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 和未燃尽碳。粉煤灰呈多孔蜂窝状组织，比表面积较大，具有较强的吸附能力。其处理污水的机理主要有以下几个方面：吸附作用、接触凝聚作用和沉淀作用。在多介质生物陶粒原料中，粉煤灰主要用于污水中 P 的去除， CaO 对 P 具有沉淀作用， Al_2O_3 和 Fe_2O_3 有吸收 P 的能力， Ca-Al-Fe 复合氧化物是重要的 P 吸收成分。黏土起黏结剂的作用，使生物陶粒更易于成型，同时增加陶粒的强度。活性炭除了具有很强的吸附能力以外，还可为硝化反应和反硝化反应提供碳源。而选择锯木屑是因为它们燃烧后均能转化为碳物质，并且在高温烧结后留下丰富的孔隙，是生物陶粒中形成大孔的主要原因。 CaCO_3 是造孔剂，在高温下能释放出 CO_2 ，使生物陶粒具有丰富的孔隙，同时还可与磷酸盐发生吸附沉淀反应。

1.2.2 生物陶粒制备

如图 1-1 所示，按比例将粉煤灰、金属 Fe、废弃锯木屑、 CaCO_3 、天然斜发沸石和黏土充分混合均匀后，经造粒机制成直径为 8mm 的球状颗粒，放置在陶粒烧结窑中，首先升温至 100°C ，并保温 60min，继续升温至 900°C ，保温 60min，以便使造孔剂充分燃烧或分解，在成型颗粒内部形成微米和纳米孔，最后升温到 1050°C 保温 7h，以防止生物陶粒表面釉化，减少内部微孔熔融，然后自然降至室温（12h），经筛选后得到多介质生物陶粒成品（图 1-2）。

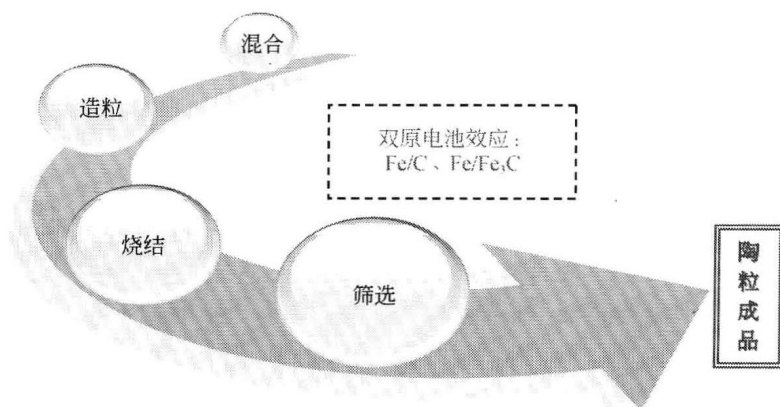


图 1-1 多介质生物陶粒制备流程

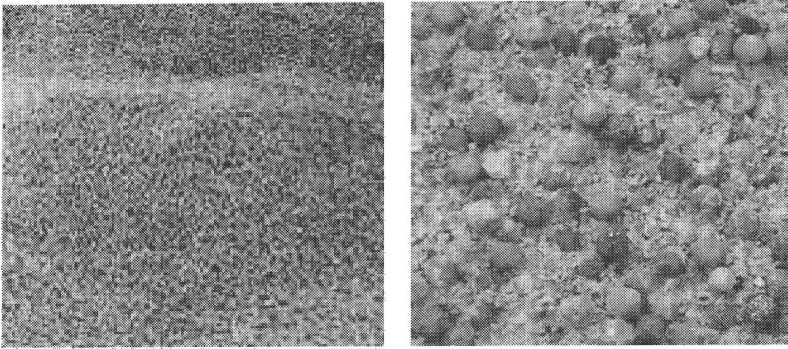


图 1-2 多介质生物陶粒成品

1.3 多介质生物陶粒表征

1.3.1 元素组成

1. XRF 分析

多介质生物陶粒的元素组成，按其作用可分为 2 类（表 1-2）。

表 1-2 多介质生物陶粒的元素组成 (单位: %)

元素组成	1#	2#	3#
SiO ₂	39.2	39.6	39.2
Al ₂ O ₃	14.7	14.7	14.6
CaO	12.4	12.2	11.8
MgO	6.6	6.3	6.2
FeO	6.6	6.8	7.0

一是成陶成分，在烧制陶粒时起支撑骨架的作用，多介质生物陶粒中主要是 SiO₂ 和 Al₂O₃，其中，SiO₂/Al₂O₃ 是表征陶粒吸附活性的主要指标（Xu et al.，2008a，2008b），在 3 种多介质生物陶粒中，SiO₂/Al₂O₃ 相差不大，这与原料中 Si 和 Al 元素的丰度基本相关有关。二是起助熔作用的熔剂氧化物，可调节原料熔点，多介质生物陶粒中主要以 FeO、MgO 和 CaO 形态存在，它们都是反映多介质生物陶粒脱 N 除 P 活性的重要指标（Xu et al.，2008a），在 3 种多介质生物陶粒中，MgO 和 CaO 随金属 Fe 掺杂量增加而减少，FeO 则随金属 Fe 掺杂量增加而增加，这也与原料中 Mg、Ca 和 Fe 元素的相对丰度趋势一致。

2. XRD 分析

X 射线粉晶衍射分析发现，3 种多介质生物陶粒的矿物组成中，均存在大量

Fe_3C 和无定型碳。金属 Fe 添加量越大，粉煤灰陶粒中 Fe_3C 丰度越高（图 1-3）。

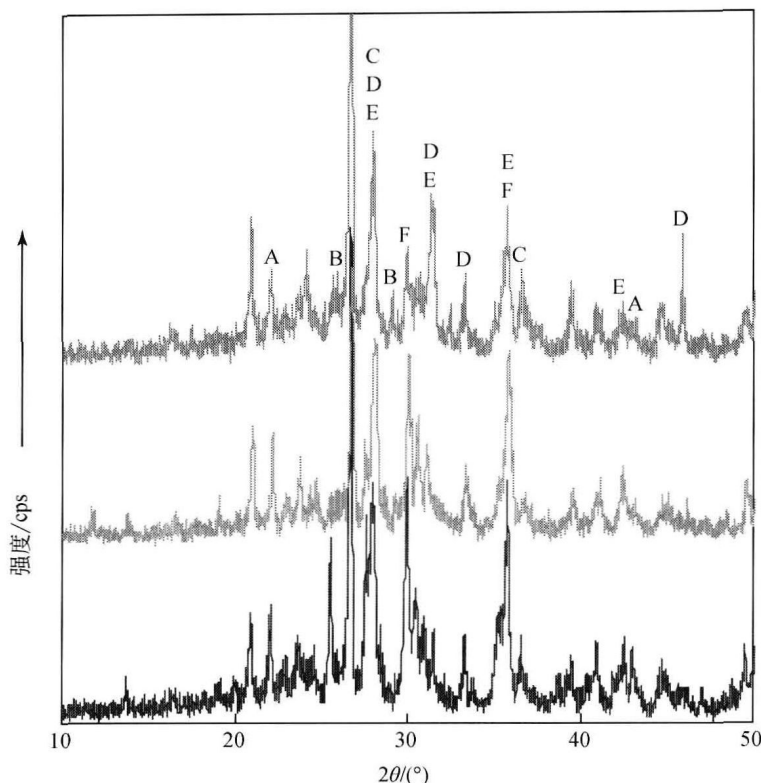
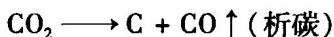
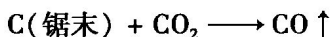
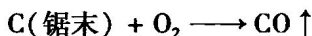
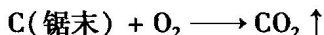


图 1-3 多介质生物陶粒 XRD

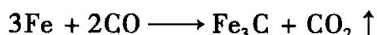
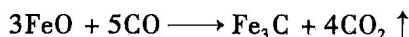
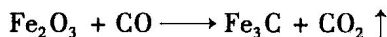
A. 无定型碳；B. 石墨；C. Fe；D. Fe_3C ；E. FeC_8 ；F. FeO

据此推测，多介质生物陶粒高温烧结制备过程中可能存在以下反应：

(1) 锯末产生气体及析碳

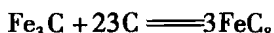


(2) Fe_2O_3 、 FeO 和金属 Fe 转化为 Fe_3C



此外，在 3 种多介质生物陶粒中都发现了 FeC_8 团簇，而且多介质生物陶粒

原料中金属 Fe 掺杂量越多, FeC_8 的丰度越高 (图 1-3)。这就是说, 多介质生物陶粒在高温烧结制备过程中, 存在以下反应:



有趣的是, 在 2θ 角为 26° 附近存在明显的石墨衍射峰 (图 1-3)。尽管多数研究表明, 无定型碳石墨化的温度一般在 2000°C 以上; 但是早在 1998 年, Inagaki 等就报道了在 Fe_2O_3 与 PVC 混合烧结过程中, 在 1000°C 左右出现了无定型碳石墨化, 并包裹在金属 Fe 颗粒周围的现象 (Inagaki et al., 1998); 而且, FeC_n 团簇通常也以石墨碳包覆金属 Fe (或 Fe_3C) 的形式存在 (Huo et al., 2005)。据此我们推测, 本研究在 1050°C 左右出现无定型碳石墨化现象, 可能与 FeC_8 团簇的生成有关。

1.3.2 表面特征

1. 堆积密度

以粉煤灰为主要原料制备的 1#、2#和 3#多介质生物陶粒的表观密度分别为 $1.54\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $1.53\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $1.51\text{g}/\text{cm}^3$, 堆积密度分别为 $0.68\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $0.68\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $0.66\text{g}/\text{cm}^3$ (表 1-3)。由此可见, 3 种多介质生物陶粒的表观密度和堆积密度差异并不显著。但总的趋势为金属 Fe 掺杂量越多, 多介质生物陶粒的表观密度和堆积密度越小, 这个结果出乎我们的预料。众所周知, 金属 Fe 的密度 ($7.9\text{g}/\text{cm}^3$) 比粉煤灰的密度 ($1.6\text{g}/\text{cm}^3$) 大得多, 这就是说, 在经高温烧结前, 金属 Fe 杂质越多, 造粒体的密度越大。然而, 在 3 种多介质生物陶粒原材料中, 除了金属 Fe 和粉煤灰外, 其他原料的配比和组成完全相同。有研究指出, 在 $800 \sim 1050^\circ\text{C}$ 高温下, 金属 Fe 可与 C 反应转化为 Fe_3C (Gutsev et al., 2004; Loyo et al., 2008), 金属 Fe 与 C 反应转化为 Fe_3C 的过程中所产生的 CO_2 的逸出或内部膨胀是导致金属 Fe 掺杂量越多、多介质生物陶粒的表观密度和堆积密度越小的关键因素, 其反应方程式为

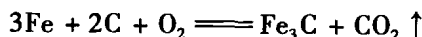


表 1-3 多介质生物陶粒的性能参数

项目	1#	2#	3#
表观密度/ (g/cm^3)	1.54	1.53	1.50
堆积密度/ (g/cm^3)	0.68	0.68	0.66
比表面积 BET/ (m^2/g)	6.20	6.41	6.56
强度损失率/%	2.86	3.00	3.04

续表

项目	1#	2#	3#
酸蚀率/%	2.45	2.27	2.11
碱蚀率/%	0.81	0.74	0.58

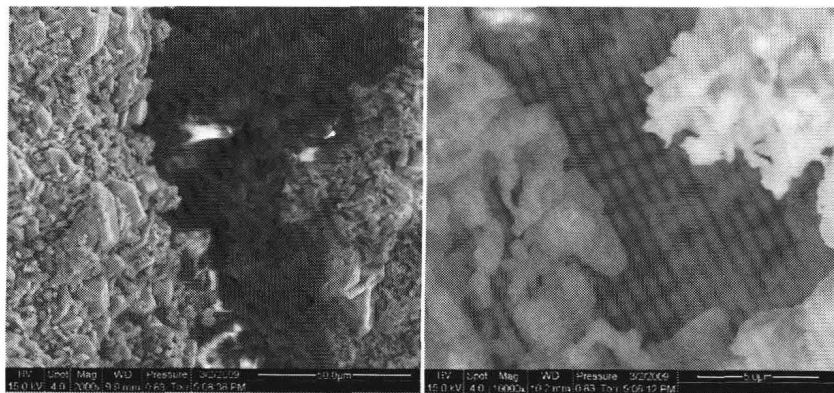
需要指出的是,3种多介质生物陶粒的堆积密度仅相当于轻质粉煤灰陶粒堆积密度($1.3\text{g}/\text{cm}^3$)的1/2(Fu et al., 2008; Chen et al., 2007),都具有堆积密度小的特点。多介质生物陶粒较小的堆积密度,可减少其在生物滤池中单位体积的填充量,既可节省成本,又能够增加生物滤池的有效容积,有利于延长使用寿命(Ismail, 2007)。

2. 比表面积

多介质生物陶粒的金属Fe掺杂量每增加1倍,比表面积约升高3%(表1-3),这可能是因为多介质生物陶粒原料中的金属Fe掺杂量越多,其高温烧结时金属Fe转化为 Fe_3C 的过程中释放的 CO_2 的量越多(Gutsev et al., 2004; Loyo et al., 2008),因此其造孔效应就越显著,多介质生物陶粒比表面积就越大。由表1-3可知,3种多介质生物陶粒的比表面积在 $6.2\sim 6.6\text{m}^2/\text{g}$,约为普通页岩生物陶粒的($4.1\text{m}^2/\text{g}$)的1.5~1.6倍,较大的比表面积有利于提供更多的吸附点位(Hartman et al., 2009)。

3. 显微结构

多介质生物陶粒表面形态和内部孔隙连通性是反映其吸附性能的主要指标(Hartman et al., 2007; Wang et al., 2006)。3种多介质生物陶粒的外表面都很粗糙,断面内孔隙发达,内部孔隙连通性较好,都有利于其吸附污染物[图1-4(a), (b), (c), (d), (e), (f)]。



(a) 1#表面

(b) 1#内部