

环境科学与工程理论丛书

水和废水 的臭氧反应动力学

Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems

[西] Fernando J. Beltrán 著

周云瑞 译

祝万鹏 校

中国建筑工业出版社

环境科学与工程是一个快速发展的学科,各种新技术、新工艺的研发与工程实践十分活跃。环境科学与工程理论的研究,是技术和工艺创新与发展的原动力,是科研成果转化为工程实践的基石。“环境科学与工程理论丛书”集中收录引进和原创的优秀理论专著,内容涵盖各个前沿性的研究方向和热点工程技术,兼有权威的学术内涵和重要的应用价值,可以作为环境科学与工程领域教学、科研以及工程实践的参考用书。

《水和废水的臭氧反应动力学》是最新引进的有关臭氧反应动力学的理论专著。本书系统地建立了水和废水臭氧反应动力学研究的科学体系,全面介绍了臭氧的基本物化性质、臭氧直接反应动力学、气-液反应动力学、废水臭氧化动力学、臭氧与其他化学及物理过程协同反应动力学、气-液-固催化反应动力学、动力学反应模型等多方面的内容。

本书可以为从事臭氧水处理研究和工程设计的科研人员、工程师提供必备的臭氧反应动力学理论知识。同时,本书也可作为环境科学与工程专业的本科生、研究生学习化学反应动力学的辅导教材,帮助他们掌握将反应动力学理论应用于实践的方法。



经销单位:各地新华书店、建筑书店

网络销售:本社网址 <http://www.cabp.com.cn>

网上书店 <http://www.china-building.com.cn>

博库书城 <http://www.bookuu.com>

图书销售分类:城乡建设·市政工程·环境工程 (B50)

责任编辑:石枫华 姚丹宁

封面设计:贺伟

ISBN 978-7-112-09235-2



9 787112 092352 >

(15899)定价:48.00 元

环境科学与工程理论丛书

水和废水的臭氧反应动力学

Ozone Reaction Kinetics for Water
and Wastewater Systems

[西] Fernando J. Beltrán 著

周云瑞 译

祝万鹏 校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2007-2153 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水和废水的臭氧反应动力学/ (西) Fernando J. Beltrán
著, 周云瑞译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007
(环境科学与工程理论丛书)
ISBN 978-7-112-09235-2

I. 水… II. ①F… ②周… ③祝… III. ①臭氧-应用-水处理-反应动力学 ②臭氧-应用-废水处理-反应动力学
IV. TU991.2X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 052738 号

Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems/Fernando J. Beltrán
Copyright © 2004 CRC Press LLC

Translation Copyright © 2007 China Architecture & Building Press

All Rights Reserved. Authorized translation from English language edition published by St.
Lucie Press, Lewis Publishers an imprint of CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

本书由美国 Taylor & Francis Group, LLC 授权翻译出版。

环境科学与工程理论丛书

水和废水的臭氧反应动力学

Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems

[西] Fernando J. Beltrán 著

周云瑞 译

祝万鹏 校

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京密云红光制版公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 字数: 415 千字

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-09235-2

(15899)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>



《水和废水的臭氧反应动力学》全面系统论述了臭氧的基本物化性质、臭氧直接反应动力学、气—液反应动力学基础、废水臭氧化动力学、臭氧与其他物质协同反应动力学、气—液—固三相反应动力学、动力学反应模型等多方面的内容。

本书可供环境科学与工程、化学工程等相关专业的科研工作者学习水和废水臭氧反应动力学基础理论和科研方法，从事实际水处理的工程技术人员也可从本书获取丰富的臭氧工程应用方面的知识。同时，本书也可作为本科生、研究生辅导教材，学习有关化学反应基础理论及将反应基础理论应用于实践的方法。

* * *

责任编辑 石枫华 姚丹宁

责任设计 赵明霞

责任校对 安 东 王雪竹

原著致谢

非常感谢西班牙埃斯特雷马杜拉大学 (University of Extremadura) 化学工程系我的同事们，是他们的帮助，使我能够顺利开展试验，研究水和废水中有机物的臭氧氧化动力学；同时特别要感谢我的学生 Juan Fernando Garcia-Araya、Francisco J. Rivas、Pedro M. Alvarez、Benito Acedo、Jose M. Encinar、Manuel Gonzalez 等人，本书的部分内容来自他们博士课题的研究成果。

非常感谢西班牙科学与技术部 CICYT 基金、欧洲 FEDER 基金以及埃斯特雷马杜拉省的基金支持，使我能够连续 15 年投身于臭氧反应动力学的研究。

此外，非常感谢 CRC 出版社责任编辑 Christine Andreasen，将我的西班牙语手稿翻译成英语出版发行。

最后，将我最真挚的谢意献给我的家人，是他们默默的支持和理解使我顺利开展研究并完成此书。

原著序

目前,臭氧作为氧化—消毒试剂,已经广泛地应用在水处理、空气污染防治以及医药等领域。尤其是在水处理领域,臭氧可以用做消毒剂、氧化剂,或是与其他的试剂(如 Fenton 试剂、过氧化氢等)和工艺(如 UV、生物活性炭等)联用。到目前为止,有关臭氧的基础知识已经在许多著作中详细地报导,如 Langlais 等等(1991)。但是,水中化合物(尤其是那些被认为是污染物的有机物)臭氧氧化动力学的研究却很少涉及,只是有一些学术期刊(如 *Ozone Science and Engineering*, *Water Research*, *Industrial and Engineering Chemistry Research*)介绍了水中臭氧参与反应的多种可能性和废水处理动力学研究的一些简单的实例。所以笔者认为非常有必要出版一本专著,以全面论述臭氧反应动力学的研究内容和方法,更好地理解臭氧动力学基本知识。

在臭氧氧化有机污染物方面,笔者已经从事了 20 多年的研究,尤其是针对水介质中有机物的臭氧氧化的研究,发表了 100 多篇相关的文章,并指导了多名博士生完成毕业论文,论文涉及臭氧氧化染料、酚类物质、杀虫剂、多环芳烃以及废水等方面。此外笔者在西班牙埃斯特雷马杜拉大学(University of Extremadura)化学工程系从事本科生课程《化学反应工程》以及研究生课程《臭氧反应动力学》教学多年。基于以上的研究和教学经验,笔者确信,臭氧在水和废水处理领域的应用潜力是巨大的,臭氧氧化动力学无论在理论还是实际应用上都是一门非常具有挑战性的学科,为此笔者结合在这个领域多年的研究成果完成此书,希望能对臭氧氧化动力学研究以及臭氧氧化技术的推广起到一定的推动作用。

本书主要面向本科生、研究生、博士后以及从事水和废水处理的专业人员。立志投身于臭氧水处理的学生能够通过此书掌握相关领域扎实的基础知识,包括臭氧的溶解和吸收,稳定性和分解,反应活性,反应动力学体系,臭氧氧化动力学以及反应器模拟等等。从事实际水处理的专业人员,在以往丰富的臭氧水处理经验的基础上,从本书也能够进一步得到很多有用的信息。此外,本书也可以用作教学的辅助手段,以加深对化学反应机理以及化学的基本知识的理解,尤其是可以通过臭氧氧化水中的污染物的结果,验证化学工程动力学以及非均相反应动力学。

全书共包括 11 章,主要介绍臭氧动力学的各个方面。

第 1 章,简要地介绍了自然界中的臭氧,解释了决定臭氧活性的臭氧的分子结构。

第 2 章,通过研究臭氧的直接反应、间接反应以及自由基反应的类型,介绍

了水中臭氧反应的化学。

第3章, 主要介绍臭氧直接反应的动力学, 包括均相和多相臭氧反应动力学。

第4章和第5章研究直接臭氧反应动力学, (不包括气-液多相反应动力学) 即臭氧气体在水和废水处理中的应用。其中, 第4章介绍了这些反应动力学的基本知识, 包括对气-液反应动力学方程。第5章讨论臭氧-水反应的例子, 其中包括研究所需要的一些工具, 即水中臭氧的性质, 如溶解性和扩散性。根据臭氧吸收动力学体系可以建立臭氧动力学, 动力学体系一旦建立, 就能进行速率常数和传质系数的测定。

第6章, 重点介绍了废水臭氧氧化反应, 包括废水和臭氧反应的活性、水的特征参数、pH 值的影响以及臭氧氧化过程对于废水生物处理过程的影响, 并对废水进行分类。第6章还重点介绍了废水臭氧氧化反应动力学以及相应的研究成果。

第7章到第9章介绍了臭氧间接反应的动力学, 即有臭氧参与的高级氧化过程。包括单独臭氧反应体系、 O_3/H_2O_2 反应体系以及 UV/O_3 反应体系。其中第7章主要介绍臭氧的分解 (不加过氧化氢和 UV 辐射) 引起的间接反应。第7章从研究臭氧直接反应和分解反应的相对重要性开始, 这些研究结果是建立任何臭氧与化合物 B 反应的总的动力学的基础。第7章还介绍了确定羟基自由基与污染物 B 反应速率常数的方法, 以及天然水质特性对臭氧反应的影响。第8章, 介绍了臭氧/过氧化氢体系的动力学。包括动力学体系的确定、反应速率常数的测定方法、臭氧直接反应的竞争反应以及他们之间的相对重要性。第9章着重研究了 UV/O_3 的反应体系, 包括直接光解和 UV/H_2O_2 反应体系。后者也是重要的, 因为在 UV/O_3 反应过程中会同时产生 H_2O_2 形成 UV/H_2O_2 反应。此外这一章也介绍了反应过程光量子产率、羟基自由基与化合物 B 的反应速率常数的测定方法, 以及臭氧直接反应、臭氧与过氧化氢反应和臭氧直接光解反应之间相对重要性等。

第10章, 讨论了多相催化臭氧化工艺。尽管这种工艺起源于 20 世纪 70 年代, 但在过去的 10 年中, 有关多相催化臭氧化方面的研究与日俱增。第10章详细介绍了涉及气-液-固三相的催化臭氧氧化反应的基本知识, 以及在催化臭氧氧化处理中的应用。为更广泛地了解相关内容, 本章还以表格的形式详细评述了该领域的研究进展。

第11章, 介绍了臭氧反应的动力学数学模型。本章首先详细介绍了根据臭氧吸收动力体系的不同, 建立臭氧反应动力学模型的方法; 给出了数学模型和求解的方法以及相关文献中的具体实例; 重点是研究模型化合物的臭氧氧化动力学模型, 特别是与饮用水处理和废水臭氧氧化有关的模型化合物。

本书在附录中给出了动力学研究的数学方法、理想反应器和曝光试剂的概念、以及为求解和理解前人开展的臭氧反应动力学研究实例所需要的非理想流研究方法。

译者前言

工业废水和生活污水中的一些难氧化、高稳定性的有机物，是水源水中难于处理的污染物，对作为饮水水源水环境造成了严重的破坏。经济有效地去除水中这类有机污染物已成为目前水处理技术的研究和工程应用热点。

臭氧是一种强氧化剂，在水中有较高的氧化还原电位 ($\varphi^{\circ}=2.07\text{V}$ ，仅次于氟)，且不易引起二次污染，可以利用空气就地制备，使用方便。臭氧可以氧化分解水中的有毒、有害有机物；除臭味和色度；氧化溶解性的铁、锰，具有广谱灭菌的消毒功能。近年来，以臭氧为核心氧化剂又开发出了多种高级氧化工艺，可更有效地氧化分解水中的高稳定性、有毒有害的有机污染物。所以近年来，臭氧技术已成为国内外研究的热点领域之一。

臭氧在水处理工程上的应用在国外已有近 100 年的历史，而在我国应用则刚刚开始，且主要集中在北京、昆明、广州、上海等大城市，应用不够广泛。其原因主要是由于投资高、运行费用高。但随着臭氧制备技术的提高，臭氧产生能耗的降低，相信臭氧技术在我国水和废水处理中的应用将越来越广泛。

反应动力学主要是确定反应速率以及各影响因素对反应的影响。系统地掌握反应动力学的特性，可以帮助我们判断臭氧氧化工艺在水处理中应用的可行性；可以进一步设计合理的反应工艺。同时，也可以基于动力学参数建立动力学模型，预测重要参数对臭氧氧化过程的影响，帮助我们深刻地理解所研究的体系，优化处理工艺。因此，臭氧反应动力学理论的研究和进展对臭氧技术在工程上的应用推广具有主要的推动作用。

《水和废水的臭氧反应动力学》(英文版)于 2004 年出版。作者费尔南多·胡安·贝尔特兰·诺维奥 (Fernando Juan Beltrán Novillo) 博士长期从事臭氧氧化领域的研究工作，具有丰富的理论知识和实践经验。本书系统地建立了水和废水的臭氧反应动力学研究的科学体系，全面地介绍水和废水中臭氧反应动力学的研究方法和前沿信息，学术价值很高、实践指导性很强，着实令人兴奋，是进行臭氧水处理试验研究和工程实践必备的理论专著。将此书译成中文在国内出版，必将大大提高我国臭氧氧化技术的应用水平。

本书由周云瑞组织翻译。参加本书翻译工作的有周云瑞 (第 1、2、3、5、10、11、附录)，王建兵 (第 8、9 章)，陈迅 (第 7 章)，杨少霞 (第 4 章)，王伟 (第 6 章)。全部译稿由祝万鹏教授审校。此外陈正雄、王文东、蔡然、李祥

也参加了部分工作。

由于译者水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正，不胜感激。

2006 年 12 月 14 日于清华园

主要符号一览表

符号	物理意义	单 位
a	气液系统中的比界面面积	s^{-1}
a_c	单位质量催化剂的外表面积	m^2/g
A	吸光率	无量纲
Acc	累积速率项, 见式(5-32)	mol/s
Alk	碱度, 见式(7-31)到式(7-34)	mg/L (以 $CaCO_3$ 计)
BOD	生化需氧量	mg/L
C	浓度	mol/L 或 mg/L
COD	化学需氧量	mg/L
$\cosh(x)$	双曲余弦函数, 见附录 A2	无量纲
D	分子扩散系数;	m^2/s
	轴向扩散系数	m^2/s
D_{eA}	有效扩散系数, 定义见式(10-21)	m^2/s
Dam	Damkohler 准数, 定义见式(A3-18)	无量纲
DF	损耗因子, 定义见式(11-22)	无量纲
DOC	溶解性有机碳	mg/L
E	反应因子, 定义见式(4-31);	无量纲
	辐射能量;	J
	停留时间分布函数, 定义见式(A3-2)	s^{-1}
E_i	瞬时反应因子, 定义见式(4-46)、(4-47)或(4-48)	无量纲
E_0	紫外灯的辐射能量	Einstein/($cm \cdot s$)
f	逸度, 定义见式(5-15)、(5-16)	
F	摩尔速率;	mol/s
	辐射吸收率, 定义见式(9-12);	无量纲
	F 分布函数, 定义见式(A3-3)	无量纲
g	重力加速度	m^2/s
G	吉布斯自由能;	J
	生成速率项	$mol/(L \cdot s)$
h	反应柱高度;	m
	离子物种的盐析效应系数, 见式(5-22)	L/mol

符号	物理意义	单 位
h_G	气体物种的盐析效应系数, 定义见式(5-23)	L/mol
h_T	式(5-23)定义的参数	L/(mol · K)
H	反应柱总高度	m
H_A	气体的吸收热	J/mol
Ha_1	一级气液反应的 Hatta 数, 定义见式(4-20)	无量纲
Ha_2	二级气液反应的 Hatta 数, 定义见式(4-40)	无量纲
Ha_S	修正的串连-并联气液反应的 Hatta 数, 定义见式(4-54)	无量纲
He	亨利常数, 见式(4-78)	(Pa · L)/mol
He_{ap}	表观亨利常数, 定义见式(5-19)	(Pa · L)/mol
$HeCO$	多相催化臭氧氧化	
$HoCO$	均相催化臭氧氧化	
I	离子强度, 定义见式(5-21)	mol/L
I_a	局部辐射吸收速率	Einstein /(L · s)
I_0	入射辐射强度	Einstein /(L · s)
IC	无机碳	mg/L
k	化学反应速率常数	s ⁻¹ 或是 L/(mol · s)
k_c	分液固传质系数, 见式(10-16)	m/s
k_G	气相分传质系数	mol/(Pa · m ² · s)
k_L	液相分传质系数	m/s
$k_{L,a}$	液相容积传质系数	s ⁻¹
k_v	挥发系数	s ⁻¹
K_S	Sechenov 数, 见式(5-19)	L/mol
L	通过光反应器的有效辐射距离	m
M	摩尔速率	mol/s
M_1	最大物理吸收速率, 定义见式(4-22)	mol/(m ² · s)
M_2	通过膜层的最大物理扩散速率, 定义见式(4-43)	mol/(m ² · s)
MCL	最大污染水平	
MOC	碳的平均氧化数	无量纲
MW	摩尔质量, 见式(5-1)	g/mol
n	摩尔数	mol
N	吸收速率或是某一组分的通量	mol/(m ² · s)
N_{AV}	阿佛加德罗(Avogadro)数	分子数/mol
N_D	扩散数, 定义见式(11-60)	无量纲

符号	物理意义	单 位
NOM	天然有机物	
NPOC	非挥发性有机碳	mg/L
P	压力	Pa
Pe	Peclet 数, 定义见式(11-60)	无量纲
POC	挥发性有机碳	mg/L
q	辐射强度通量	Einstein / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
q_0	光反应器内壁辐射强度通量	Einstein / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
r	化学反应速率	mol / ($\text{L} \cdot \text{s}$)
R	理想气体常数;	(Pa · m^3) / (K · mol)
	催化剂粒径	m
R_{b1}	液相体相一级反应的最大化学反应速率, 定义见式(4-24)	mol / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
R_{b2}	液相体相二级反应的最大化学反应速率, 定义见式(4-41)	mol / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
R_{CT}	式(7-61)中定义的系数	无量纲
R_F	液相体相最大化学反应速率	mol / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
R_0	光反应器的内径	m
s	表面更新速率, 见式(4-12)	s^{-1}
S	熵, 定义见式(5-7);	J/K
	反应柱的截面积	m^2
Sc	Schmidt 数, 定义见式(5-40)	无量纲
S_g	多孔催化剂的内表面积	m^2/g
$\sinh(x)$	x 的双曲正弦函数, 见附录 A2	无量纲
SOC	悬浮有机碳或颗粒有机碳	mg/L
SS	悬浮固体	mg/L
t	反应时间	s 或 min
t_D	扩散时间, 定义见式(4-84)	s
t_i	达到稳态条件所需的时间, 见式(5-81)	s
t_m	分布函数的平均停留时间, 定义见附录(3-4)	s
t_R	反应时间, 定义见式(4-85)或式(4-86)	s
T	温度	K
$\tanh(x)$	x 的双曲正切函数, 见附录 A2	无量纲
ThOD	理论需氧量	mg/L
TOC	总有机碳	mg/L
U 或 u	反应柱中的表观速率	m/s

符号	物理意义	单 位
v	流速	m^3/s
V	反应体积	m^3
V_A	扩散溶质的摩尔体积, 见式(5-1)	cm^3/mol
w	式(7-22)中定义的参数; 催化剂的浓度	无量纲 mg/L
x	距离气液界面的液相中的穿透深度; 液体的摩尔分数	m 无量纲
y	气体的摩尔分数	无量纲
z	化学计量系数, 或某离子的化合价	无量纲
希腊字母		
α	解离度, 定义见式(3-21); 式(5-52)中定义的参数	无量纲 无量纲
β	持液率, 定义见式(5-43)或式(5-44); 平衡臭氧溶液的 Bunsen 系数, 见公式(5-24)	无量纲 无量纲
χ	表面更新理论的式(4-63)中定义的参数	无量纲
δ	膜层厚度, 见式(4-7)	m
ϵ	消光系数, 以 10 为基数	$\text{L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$
ϵ_{O_3}	废水的臭氧化速率系数, 定义见式(6-7)	$\text{L}/(\text{mg} \cdot \text{s})$
ϵ_P	催化剂颗粒的孔隙率	无量纲
φ	多孔催化剂的浓度, 定义见式(10-25)	无量纲
ϕ_1	一级液-固催化反应的 Thiele 数, 定义见式(10-26)	无量纲
ϕ_s	溶剂的缔合参数, 见式(5-1)	无量纲
Φ	量子产量, 定义见式(9-14)	$\text{mol}/\text{Einstein}$
γ	活度系数, 见式(5-17)	mol/L
Γ	液-固催化反应的总效率因子, 定义见式(10-31)	无量纲
η	液固催化反应的效率因子, 定义见式(10-29)	无量纲
ζ	式(6-23)中定义的参数	$(\text{mg} \cdot \text{m})^{1/2}$
λ	式(11-66)或附录(3-17)定义的无量纲距离	无量纲
μ	衰减系数, 定义见式(9-7)	cm^{-1}
μ_L	液体的黏度, 见式(5-40)	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
μ_s	溶剂黏度, 见式(5-1)	cm^{-1}
μ_i^{phase}	在给定相中 i 组分的化学势, 定义见式(5-10)	$(\text{Pa} \cdot \text{m}^3)/\text{mol}$
ν	逸度系数, 见式(5-15)	无量纲
θ	无量纲反应时间, 定义见式(11-66)	无量纲

符号	物理意义	单 位
ρ_l	液体密度	kg/m ³
ρ_p	催化剂颗粒的表观密度	kg/m ³
ρ_b	催化剂床的堆积密度	kg/m ³
σ_l	液体的表面张力	kg/m ³
σ^2	分布函数的标准偏差, 定义见式(A3-5)	s ²
σ_θ^2	分布函数的无量纲标准偏差, 定义见式(A3-11)	无量纲
τ	水力停留时间	s
τ_p	催化剂颗粒孔道的曲折系数	无量纲
ϑ	式(5-50)中定义的参数	无量纲
Ψ	式(11-66)中定义的无量纲浓度	无量纲
$\Psi(t)$	表面更新的分布函数, 定义见式(4-11)	s ⁻¹
Ω	氧化竞争系数, 定义见式(7-45)	mg/L

上标

g	气相
l	液相
m	反应级数
n	反应级数
*	气液平衡条件

下标

A	指某一化合物 A
ap	指定参数的表观值
b	体相
B	指某一化合物 B
bg	半导体光催化剂的带隙
c, c1, c2	依次指式(7-18)和碳酸盐物种和羟基自由基之间反应式(7-16)和反应式(7-17)
cb	半导体光催化剂的导带
CH, CH1, CH2	指式和过氧化氢物种和碳酸盐离子自由基之间的反应
CM	碳酸盐离子自由基与水中除过氧化氢以外物质的反应
D	臭氧直接反应
Dd	某一化合物解离态与臭氧之间的直接反应, 见式(8-20)
Dn	某一化合物非解离态与臭氧之间的直接反应, 见式(8-20)

符号	物理意义
g	气相
G	指定参数的总值或指气相
HCO_3t	重碳酸盐的总量
$\text{HO}\cdot$	羟基自由基
HOB	羟基自由基与 B 物质之间的反应
$\text{H}_2\text{O}_2\text{t}$	过氧化氢的总量
i	水中某一成分,或气液界面条件或反应器入口条件
i-S	催化剂表面的吸附的物种 i
Ii	水中臭氧分解反应的引发成分,见式(2-70)
L	液相
Mi	与臭氧发生直接反应的成分,见式(2-70)
o	反应器出口条件
O_3	臭氧
$\text{O}_{3\text{i}}$	水相中的臭氧
$\text{O}_{3\text{g}}$	气相中的臭氧
P	臭氧直接反应的产物
Pi	能促进水中臭氧分解的任何成分,见式(2-70)
Rad	自由基反应
rel	各参数的相对值,见式(3-16)
S, s	羟基自由基的捕获剂
Si	能抑制水中臭氧分解的化合物,见式(2-70)
t	催化剂表面活性位点的总数,见式(10-11)
T	非理想流研究中的示踪物质(见附录 3); 总的条件
UV	UV 辐射
v	催化剂表面的自由活性中心
vb	半导体光催化作用中的价带
vgi	气相中的挥发性物质 i
vi	水中溶解的挥发性物质 i
0	反应发生的初始条件或反应器的入口条件

目 录

原著致谢	IV
原著序	V
译者前言	VII
主要符号一览表	IX
第 1 章 绪论	1
1.1 自然界中的臭氧	2
1.2 臭氧分子	2
第 2 章 水中臭氧的反应	5
2.1 氧化—还原反应	5
2.2 环加成反应	6
2.3 亲电取代反应	8
2.4 亲核反应	11
2.5 臭氧的间接反应	11
2.5.1 臭氧的分解反应	15
第 3 章 臭氧直接反应动力学	23
3.1 均相臭氧氧化动力学	25
3.1.1 间歇反应器动力学	25
3.1.2 推流反应器动力学	30
3.1.3 pH 对直接臭氧反应速率的影响	31
3.1.4 反应计量系数的确定	32
3.2 非均相反应动力学	33
3.2.1 反应计量系数的确定	34
第 4 章 气—液反应的动力学基础	35
4.1 物理吸收	35
4.1.1 液膜理论	35
4.1.2 表面更新理论	37
4.2 化学吸收	38
4.2.1 液膜理论	38
4.2.2 DANCKWERTS 表面更新理论	48