



科爱传播
KEAN COMMUNICATIONS
化学化工

· 导读版 ·

Photocatalytic Technologies

光催化技术

Hugo I. De Lasa
Benito Serrano Rosales



ELSEVIER



科学出版社

www.sciencep.com

Photocatalytic Technologies

光催化技术

Hugo I. De Lasa, Benito Serrano Rosales



科学出版社

北京

图字:01-2010-2758 号

This is an annotated version of

Photocatalytic Technologies

by **Hugo I. De Lasa, Benito Serrano Rosales**

Copyright © 2009 Elsevier Inc.

ISBN:9780123747631

Authorized English language reprint edition published by the Proprietor.

ISBN 13:9789812727183

Copyright © 2010 by Elsevier(Singapore)Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier(Singapore)Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House 1

Singapore 239519

Tel:(65)6349-0200

Fax:(65)6733-1817

First Published 2010

(2010)年初版

Printed in China by Science Press under special arrangement with Elsevier(Singapore)Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书英文影印版由 Elsevier(Singapore)Pte Ltd. 授权科学出版社在中国大陆境内独家发行。本版权在中国境内(不包括香港和澳门特别行政区以及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

图书在版编目(CIP)数据

光催化技术=Photocatalytic Technologies; 英文/(加)拉萨编著. —北京:科学出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-03-027582-0

I. ①光… II. ①拉… III. ①光催化-英文 IV. ①0644. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 088753 号

责任编辑:霍志国/责任印制:钱玉芬

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>

北京佳信达版艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 5 月第一次印刷 印张:24

印数:1—1 800 字数:483 000

定价:99.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

导 读

近年来,随着我国经济的快速发展和人民生活水平的提高,大量有毒难降解污染物如药品、农药、染料、表面活性剂、重金属以及亚硝酸盐等进入环境尤其是江、河、湖、海,导致水质下降和化学性水污染事件的发生。此外,我国还是一个能源消耗大国,据测算,到 2020 年我国对进口石油的依存度将超过 60%。可以说,在未来很长时间内,能源安全和环境污染将严重制约我国实现可持续发展、提高人民生活水平和保障国家安全。

光催化技术是一种真正环境友好的绿色技术。它既可在能源领域应用——将低密度的太阳能转化为可储存的、高密度的洁净能源氢能;也可在环境领域应用——利用光能降解和矿化环境中的有机和无机污染物。因此,可以说光催化技术是一种在能源和环境领域有着重要应用前景的绿色技术。光催化治理污染物的基本原理是光催化剂如 TiO_2 在大于或等于其带隙能的光激发下,产生光生电子和空穴,光生电子和空穴与吸附的 O_2 、 H_2O 、催化剂表面羟基等反应产生活性氧物种,如羟基自由基、超氧自由基等。这些氧化性很强的活性物种可与大多数有机分子发生非选择性的氧化还原反应,使之彻底矿化生成 CO_2 、 H_2O 以及矿物酸或盐等。与传统的污染物治理方法相比,光催化技术具有 (1) 除净度高,无二次污染; (2) 不需要在反应体系中引入额外的化学物种如 H_2O_2 和 O_3 等以及 (3) 可利用廉价的太阳能作为替代光源驱动有机污染物光催化降解等优点。有鉴于光催化技术在环境污染治理方面的巨大潜力,世界上发达国家,如美国、日本、英国、德国、韩国等相继投入大量的人力和物力进行有关光催化新技术、新方法、新工艺的探讨与研究,如日本有由大学、研究院所和企业联合组成的研究队伍,成立了数个专门的研究中心进行与光催化有关的基础研究和应用开发;美国环境保护局 (EPA) 也已将光催化列为最有应用前景的环境技术;欧洲共同体也组织了由 8 个国家有关科学家联合参加的特大研究项目,进行光催化水净化处理的大型试验与技术开发。与国际上的发展趋势同步,我国在最近几年也相继启动多个大型的研究项目开展光催化领域包括光催化污染治理和光催化制氢方面的研究工作。通过相关领域研究人员的共同努力,我国已在光催化反应机理、新一代光催化材料的探索、光催化剂的结构设计与性能剪裁方面开展了很多原创性的研究工作并取得了一些国际瞩目的研究成果。总的来说,我国光催化领域的研究工作更多地集中在基础和应用基础研究方面,在光催化技术的工程应用,尤其是光催化反应器工程方面的基础研究和中试工作开展得很少。这一环节的缺

失，将成为制约我国光催化技术从实验室走向工程应用的短板，限制着我国未来在光催化领域的国际竞争力。

近年来，有关光催化在能源和环境方面应用和进展的报道、综述以及专著详尽描述和总结了光催化反应的基本原理、化学本质、污染物尤其是有机污染物的光催化降解机理、光催化剂尤其是可见活性催化剂的研究进展以及光催化技术在不同领域的应用等。《化学工程进展》(Advances in Chemical Engineering)系列中的第 36 卷(2009 年出版)是介绍“光催化技术”(Photocatalytic Technology)尤其是光催化化学工程进展的专辑，特别邀请化学反应器工程领域的专家加拿大西安大略大学、化工和生物化工系化学反应器工程中心主任 Hugo I. De Lasa 教授和墨西哥的 Benito Serrano Rosales 担任编辑，邀请世界范围内光催化尤其是光催化化学工程领域的知名专家结合自身的研究实践系统地阐述了光催化技术在环境和能源领域应用的工作原理、应用对象和研究进展，特别总结和讨论了面向不同应用的光催化反应器的研究进展。全书内容丰富、数据详实、综述全面，反映了光催化反应工程领域的最新研究成果和未来的发展方向。该书由两大部分组成，第一部分主要围绕光催化剂的光诱导催化剂表面特性研究、光催化治理水中的无机污染物、有机污染物和制氢的基本原理和最新研究成果展开。第二部分则以光催化技术的工程应用为背景，围绕光催化反应工程重点描述光催化反应器的结构设计、数学模拟、面临的挑战和未来的发展趋势等。

本书第 1 章由意大利的 V. Augugliaro 教授等撰写，总结了世界范围内光诱导光催化剂表面性能特别是表面吸附性能变化的研究成果、具体的实验方法以及描述光诱导表面吸附的数学模型。

目前，重金属污染已经成为最严重的环境杀手之一。第 2 章以我国光催化研究较少涉及的重金属污染治理作为对象，重点讨论使用多相光催化方法处理水中重金属离子的原理、途径和范围，并且以危害最严重的重金属离子如 Hg、Cr、Pb、U 和 As 及其衍生物为例，综述了近年来在光催化治理水中重金属污染的研究进展及环境气氛如氧气、氮气、空气以及外加的有机污染物等对光催化治理重金属效果的影响。该章的阅读将会拓展我国光催化研究领域科学家的思维空间，为水中低浓度重金属污染物的环境治理提供新的思路和方法。

苯酚是一种典型的高毒性、难溶解、难以生物降解的芳香族有机污染物。第 3 章以苯酚的光催化氧化作为研究对象，重点探讨金属阳离子特别是铁离子存在对紫外光激发 TiO_2 光催化矿化苯酚及其中间产物的影响、苯酚光催化矿化的动力学模型及光催化氧化机理。

第 4 章从光解水的途径、反应器结构、能量需求和太阳光转化效率等几个方面总结了该领域的一些基本概念和研究进展。重点讨论了可见光驱动光催化分解水制氢，包括实现水分解的光催化剂的能带结构；可见光驱动光催化剂的研究进

展和光催化剂未来的发展趋势等。

直到现在，多相光催化技术治理水中的有机污染物仍未实现中试，这可能与水处理系统中大型光催化反应器设计的难题有关。第 5 章通过光反应器与传统反应器的比较，重点讨论了紫外光激发水处理系统中的中试规模光反应器设计的难点和注意事项，并且以 TiO_2 悬浮液光催化降解苯甲酸为例，说明如何通过宏观动力学参数如催化剂用量、污染物起始浓度、光强、流动速度、pH 值、氧气分压和温度等对反应速率常数影响的研究来确定影响光催化反应速率的动力学控制区域和传质控制区域。这些参数的获得对大型光反应器的结构设计、数学模拟、光催化剂的性能评价和光催化反应机理的研究具有重要的指导作用。本章的第三部分内容是有关于大型光反应器结构设计面临的挑战和发展趋势，并且综合评述了多种新型光反应器的优缺点。

第 6 章重点描述了太阳光驱动水处理系统中光反应器的设计和数学模拟。首先通过不同结构光反应器光利用效率的比较说明对太阳光驱动型多相光催化反应系统而言，非聚焦型光反应器是能量最优化的反应器类型之一。光吸收能力是评价光反应器效率的关键参数之一。然后提出了光反应器内光能传递的基本概念、常用数学模型和研究方法，特别讨论了一种简单的扩散近似模型，并在此基础上比较了不同结构反应器中的光能传递情况。

第 7 章是关于面向高级氧化过程的光反应器的放大。全章详细总结了器壁型光催化反应器、均相光化学反应器和多相光催化反应器从实验室到中试规模的放大方法。整个光反应器的放大包括反应器反应机理、动力学模型、实验室反应器的结构和数学模拟、中试规模反应器的包括相关的反应模型、辐射模型和模型的可靠性验证等内容。读者通过阅读该章，可以获得包括光催化反应工程领域的丰富知识，并且对实际的大型光催化反应器的结构设计提供具体的指导作用。

以色列理工学院的 Yaron Paz 教授在第 8 章全面综述了光催化技术在空气净化方面的应用，内容包括光催化净化空气的反应动力学、传质过程和光源类型等对光催化反应速率常数的影响；空气中典型污染物的光催化降解机理、参数对污染物降解性能的影响以及催化剂的再生等问题。重点总结了多种用于室内空气净化器的结构和优缺点以及光催化净化空气领域存在的主要问题和未来的发展趋势。通过该章的阅读，读者可以获得包括针对不同类型的污染物，影响空气净化器效率的根本原因、光反应过程中光催化剂的失活机理和光反应器结构设计方面的丰富信息，对未来高性能光净化器的设计和研究具有重要的指导作用。

由于光催化技术在环境和能源领域的巨大应用前景，使用光催化技术处理水和空气中的污染物及光催化制氢已经愈来愈引起研究者和产业界的广泛兴趣。但该领域的研究要从实验室走向产业化，还必须解决包括中试反应装置的运行、大

型光反应器的设计等众多瓶颈问题。读者通过本书的阅读可以获得光催化化学工程领域的最新进展、光催化反应器放大方面的方法论和丰富知识，为未来大型光催化反应器的设计提供理论和实验指导。

总之，该书的出版和引进将会给我国的光催化治理环境污染提供新的思路，并且对光催化领域的研究尤其是工程应用研究起到促进和指导作用。该书不仅适合于光催化、材料和工程领域的科学和技术研究人员阅读，使其获得有关催化剂结构设计方面的有用信息；同时也可供化学、物理和工程领域的研究生及相关科研人员阅读参考。

刘云 刘春艳

中国科学院理化技术研究所光化学重点实验室

前 言

最近数年，随着国际社会对化学和能源生产过程对自然环境影响的持续关注，新型绿色技术的发展和应用的倍受重视。绿色技术预期将为持续增长的饮用水、清洁空气和多种类型的能源需求提供生态友好的解决方案。

光催化技术是一种有巨大发展前景的创新性绿色技术，是一个真正环境友好的过程。在光特别是紫外或太阳光作用下，受激半导体产生可向表面移动的电子和正电荷，促进表面氧化还原反应的发生，这是污染物降解和其他光诱导光化学转化过程，如分解水的基本步骤。

最近的出版物密切关注光催化及其相关技术的发展。Elsevier 出版社的化学工程进展系列丛书的第 36 卷——《光催化技术》的目标就是全面介绍光催化技术的最新进展。为此，特别邀请数位该领域的杰出科学家撰写了第 36 卷的相关章节。

第 1 章介绍了光催化反应化学模拟的现象学原理，包括化学物种的光吸附；提供了一种定量测定化学物种在光激发态 TiO_2 表面吸附的方法，并将此方法用于苯酚和苯甲醇的光氧化过程的研究。

第 2 章主要阐述水中无机污染物的光催化治理。金属阳离子在单电子过程中先形成非稳态的中间物种，接着形成稳态产物。光催化治理水中无机污染物的可能途径包括：（1）光生电子直接还原；（2）电子给体型中间产物的间接还原；（3）光生空穴或羟基自由基的氧化。以水中的无机污染物，如 Cr、Hg、Pb、U 和 As 为例说明光催化过程在水中无机污染物清除中的巨大作用。

第 3 章主要论述了水中有机污染物的光催化矿化及铁离子存在对光催化矿化过程的改善。在实验过程中使用 CREC 光反应器来研究 Fe^{3+} 对 TiO_2 光催化矿化苯酚的影响。研究表明，5ppm 铁离子可最大限度地加快苯酚及其芳环中间产物的光催化氧化及矿化。此外，该章还描述了苯酚矿化过程可能涉及的一系列基元反应。这些基元反应和相应的动力学参数可非常合理地解释 Fe^{3+} 促进苯酚光催化氧化的机制。

第 4 章主要报道了光催化分解水制氢方面的研究进展。紫外光解水表现出了很好的前景，但对可见光激发水分解而言还需要大大改善光催化反应的效率，提高辐照生成的光子产生每个氢分子的利用率。为实现这一目标，必须发展新的纳米材料并实现光催化剂结晶度、电子结构和形貌的精确控制。

在第 5 章作者强调，催化剂的光照因素是光催化反应器放大过程中最重要的

工程设计参数。光反应器设计是将高效均一的光催化剂辐照与 TiO_2 悬浮液彻底混合的有机结合。为实现这一设计目的，作者介绍了多种光反应器，如多管式反应器，管式发光反应器，旋转式管式反应器和 Taylor 涡流式反应器。

第 6 章描述了太阳光驱动的处理水中有机污染物的光催化反应器。对于太阳光驱动的光催化反应器而言，非聚焦型光反应器是能量最优化的反应器类型之一。辐射吸收是评价反应器效率的一个最关键参数。基于 P1 近似的最简单条件下得到的辐射传递方程 (RTE) 的解可用于评估不同反应器的光吸收能力。

第 7 章总结了光催化反应器的放大步骤。放大方法包括一个与光吸收和光催化剂反射系数有关的模型。需要的动力学参数可通过小型的平板反应器获得，然后外推至大的三层同心圆柱型管式反应器。在这种反应器中光催化剂沉积在反应器壁上。上述放大过程可用于空气中过氯乙烯光催化转化及水中甲酸和 4-氯苯酚的光催化降解反应器的放大。

第 8 章是关于流动空气中的污染物治理，关注重点放在反应动力学和传质过程的区别上。综述性的调查表明，该领域的研究已从早期对 TiO_2 光催化基本过程参数的了解发展到了指导光催化反应器放大的方法学上。

总之，化学工程进展第 36 卷集中综述和讨论了光催化反应工程的基本原理以及到目前为止的主要应用。此外，第 36 卷还展示了光催化技术作为一种很有前景的绿色技术的可能性。

Hugo I. de Lasa 和 Benito Serrano Rosales

2008 年 12 月

(刘云 刘春艳 译)

PREFACE

In recent years, the international community has been increasingly concerned about the stresses imposed on the natural environment by many chemical and energy-generating processes. As a result, the world is witnessing an accelerated development and implementation of new green technologies. These green technologies are called to provide ecologically responsible solutions for the much needed supply of drinking water, clean air, and various forms of energy.

Photocatalysis holds great promise for delivering these ground-breaking technologies. Photocatalysis is a truly environmentally friendly process where irradiation, either near UV or solar light, promotes photoexcitation of semiconductor solid surfaces. As a result, mobile electrons and positive surface charges are generated. These excited sites and electrons accelerate oxidation and reduction reactions, which are essential steps for pollutant degradation and other photoinduced chemical transformations such as water splitting.

Photocatalysis and its related technological issues have been strongly influenced by recent publications. The present Volume 36-*Photocatalytic Technologies* of the Elsevier's *Advances in Chemical Engineering Series* aims at offering a comprehensive overview of the state-of-the-art photocatalytic technology. In order to accomplish this, several prominent researchers were invited to contribute a chapter for the Volume 36.

Chapter 1 examines the phenomenological principles involved in the modeling of photocatalytic reactions including the photo-adsorption of chemical species. This chapter proposes a method to quantify photo-adsorbed species onto irradiated TiO_2 . The technique is applied to the oxidation of phenol and benzyl alcohol.

Chapter 2 considers the removal of inorganic water contaminants using photocatalysis. Metal cations react via one-electron steps first leading to unstable chemical intermediates, and later to stable species. Three possible mechanisms are identified: (a) direct reduction via photo-generated conduction band electrons, (b) indirect reduction by intermediates generated from electron donors, and (c) oxidative removal by electron holes or hydroxyl radicals. The provided examples show the significance of these mechanisms for the removal of water contaminants such as chromium, mercury, lead, uranium, and arsenic.

Chapter 3 addresses the photocatalytic mineralization of organic species in water and its enhancement by using ferric ions. This methodology uses Photo-CREC reactors with Fe-promoted TiO_2 . It is shown that 5 ppm of Fe in water provides an optimum iron concentration able to maximize the rates of

oxidation and mineralization for both phenol and its aromatic intermediates. This chapter also describes a parallel-series kinetic reaction network. This reaction network and the derived kinetic parameters are most suitable for describing the improved phenol photocatalytic oxidation with ferric ions.

Chapter 4 reports research progress on hydrogen production via water splitting using photocatalysis. It is stated that while water splitting with UV light shows good prospects, water splitting under visible light requires a significant efficiency improvement provided by an enhanced utilization of irradiated photons per molecule of hydrogen produced. In order to accomplish this, new nanomaterials manufactured under close control of crystallinity, electronic structure, and morphology are proposed.

Chapter 5 addresses the scaling-up in photocatalytic reactors with catalyst irradiation being identified as a most important engineering design parameter. It is stated that the photocatalytic reactor design involves a skilful combination of a highly and uniformly irradiated photocatalyst, and an intensive mixing of the TiO_2 suspension. In order to attain these design objectives, several reactor designs are reviewed such as a multiple tube reactor, a tube light reactor, a rotating tube reactor, and a Taylor vortex reactor.

Chapter 6 describes solar-powered photocatalytic reactors for the conversion of organic water pollutants. Nonconcentrating reactors are identified as some of the most energetically efficient units. It is reported that the absorption of radiation is a critical parameter in the efficiency reactor evaluation. The radiative transfer equation (RTE) solution under the simplified conditions given by the P1 approximation is proposed for these assessments.

Chapter 7 reports a scaling-up procedure for photocatalytic reactors. The described methodology uses a model which involves absorption of radiation and photocatalyst reflection coefficients. The needed kinetics is obtained in a small flat plate unit and extrapolated to a larger reactor made of three concentric photocatalyst-coated cylindrical tubes. This procedure is applied to the photocatalytic conversion of perchloroethylene in air and to the degradation of formic acid and 4-chlorophenol in water.

Chapter 8 addresses the treatment of contaminated air streams using photocatalysis. Special attention is given to the distinction between reaction kinetics and mass transport processes. The reviewed studies show the evolution from the early days of TiO_2 photocatalysis, where the aim was to understand the basic process parameters, to today's development of phenomenological models assisting in the scaling-up of units.

In summary, the present issue of *Advances in Chemical Engineering* Volume 36 offers an up-to-date overview and discussion of principles and applications of photocatalytic reaction engineering. Altogether, Volume 36 is an invitation to reflect on the possibilities of photocatalysis as a promising technology for green reaction engineering.

Hugo I. de Lasa and Benito Serrano Rosales,
December 2008.

CONTRIBUTORS

Orlando M. Alfano, INTEC (Universidad Nacional del Litoral and CONICET),
3000 Santa Fe, Argentina

M.C. Álvarez-Galván, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/ Marie
Curie 2, 28049, Madrid, Spain

Camilo A. Arancibia-Bulnes, Centro de Investigación en Energía, Universidad
Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco s/n, Col. Centro, A. P. 34,
Temixco, 62580 Morelos, México

Vincenzo Augugliaro, "Schiavello-Grillone" Photocatalysis Group, Dipartimento
di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo, Viale
delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

Alberto E. Cassano, INTEC (Universidad Nacional del Litoral and CONICET),
3000 Santa Fe, Argentina

Hugo de-Lasa, Chemical Reactor Engineering Centre-CREC, Department of
Chemical and Biochemical Engineering, The University of Western Ontario, Lon-
don, Ontario, Canada N6A5B9

F. del Valle, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/ Marie Curie 2,
28049, Madrid, Spain

Claudio A. Estrada, Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional
Autónoma de México, Privada Xochicalco s/n, Col. Centro, A. P. 34, Temixco,
62580 Morelos, México

J.L.G. Fierro, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/ Marie Curie 2,
28049, Madrid, Spain

Antonio E. Jiménez, Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional
Autónoma de México, Privada Xochicalco s/n, Col. Centro, A. P. 34, Temixco,
62580 Morelos, México

Marta I. Litter, Gerencia Química, Centro Atómico Constituyentes, Comisión
Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz 1499, 1650 San Martín, Prov. de
Buenos Aires, Argentina

Vittorio Loddo, "Schiavello-Grillone" Photocatalysis Group, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

Jesus Moreira-del-Rio, Chemical Reactor Engineering Centre-CREC, Department of Chemical and Biochemical Engineering, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada N6A5B9

R.M. Navarro, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/Marie Curie 2, 28049, Madrid, Spain

Aaron Ortiz-Gomez, Chemical Reactor Engineering Centre-CREC, Department of Chemical and Biochemical Engineering, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada N6A5B9

Giovanni Palmisano, "Schiavello-Grillone" Photocatalysis Group, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

Leonardo Palmisano, "Schiavello-Grillone" Photocatalysis Group, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

Yaron Paz, Department of Chemical Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Ajay K. Ray, Department of Chemical and Biochemical Engineering, University of Western Ontario, London, ON N6A 5B9, Canada

Benito Serrano-Rosales, Programa de Ingeniería Química, Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autonoma de Zacatecas, Km.6 Carretera a Guadaluajara, Ejido La Escondida, Zacatecas, Zac., 98160, Mexico

J.A. Villoria de la Mano, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC), C/Marie Curie 2, 28049, Madrid, Spain

Sedat Yurdakal, "Schiavello-Grillone" Photocatalysis Group, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy; Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, Yunus Emre Kampüsü, 26470 Eskişehir, Turkey

目 录

前言	ix
编者	xi
1. TiO₂ 悬浮液在光激发条件下的吸附容量测定	1
<i>Vicenzo Augugliaro, Sedat Yurdakal, Vittorio Loddo, Giovanni Palmisano 和 Leonardo Palmisano</i>	
1. 导论	2
2. 实验	5
3. TiO ₂ 光诱导表面性能变化	8
4. 光致吸附性能测定	10
5. 结果	18
6. 讨论	21
7. 结论	28
附录	29
符号说明	33
参考文献	33
2. 多相光催化方法处理水中重金属污染物 Cr、Hg、U 和 Pb	37
<i>Marta I. Litter</i>	
1. 导论	37
2. 热力学原理和变化途径	41
3. Cr	44
4. Hg	49
5. Pb	53
6. U	57
7. As	58
8. 结论	61
致谢	62
参考文献	62
3. 铁离子辅助光催化矿化苯酚的反应机理和动力学模拟	69
<i>Aaron Ortiz-Gomez, Benito serrano-Rosales, Jesus Moreira-del-Rio 和 Hugo</i>	

de-Lasa

1. 导论	70
2. CREC 中使用的实验方法	79
3. 铁离子辅助光催化矿化苯酚及其中间产物	81
4. 动力学模拟：非辅助型和铁离子辅助光催化氧化苯酚	92
5. 结论	105
展望	106
符号说明	106
参考文献	108
4. 可见光分解水：基本原理和光催化剂研究进展	111
<i>R. M. Navarro, F. del Valle, J. A. Villoria de la Mano, M. C. Álvarez-Galván 和 J. L. G. Fierro</i>	
1. 导论	111
2. 光电化学分解水	113
3. 分解水的可见光光催化剂（可见光驱动的光催化水分解）	124
4. 结论和展望	140
致谢	141
参考文献	141
5. 光催化水净化反应器构筑：实验方法和数学模拟	145
<i>Ajay K. Ray</i>	
1. 导论	145
2. 宏观动力学研究	148
3. 大型光反应器设计和发展中的主要挑战	159
4. 结论	181
致谢	183
参考文献	183
6. 太阳光激发多相光催化反应器的进展和模拟	185
<i>Camilo A. Arancibia-Bulnes, Antonio E. Jiménez 和 Claudio A. Estrada</i>	
1. 导论	186
2. 太阳光激发光催化反应器	187
3. 光催化反应器中的辐射传递	206
4. P1 近似	213
5. 结论和展望	222
致谢	223

符号说明	223
缩略语	225
参考文献	225
7. 用于高级氧化过程的大型光反应器	229
<i>Orlando M. Alfano 和 Alberto E. Cassano</i>	
1. 导论	230
2. 存在辐射吸收和反射的器壁型光反应器的放大	234
3. 存在辐射吸收的均相光化学反应器的放大	250
4. 存在辐射吸收和散射的多相光催化反应器的放大	263
5. 结论	282
致谢	283
注释	283
参考文献	286
8. 光催化处理空气中的污染物：从基本原理到反应器	289
<i>Yaron Paz</i>	
1. 导论	290
2. 光催化处理的空气类型	293
3. 光催化净化空气的基本原理	296
4. 目标污染物类型	303
5. 空气净化器：工作方式	310
6. 空气净化器类型	312
7. 目前存在的问题和未来的发展趋势	329
8. 结论	331
致谢	331
符号说明	331
缩略语	332
参考文献	333
索引	337
该系列丛书各卷目录	353

(刘云 刘春艳 译)

CONTENTS

<i>Preface</i>	ix
<i>Contributors</i>	xi
1. Determination of Photoadsorption Capacity of Polychrystalline TiO₂ Catalyst in Irradiated Slurry	1
Vincenzo Augugliaro, Sedat Yurdakal, Vittorio Loddo, Giovanni Palmisano and Leonardo Palmisano	
1. Introduction	2
2. Experimental	5
3. TiO ₂ Surface Modifications Under Irradiation	8
4. Photoadsorption Determination	10
5. Results	18
6. Discussion	21
7. Conclusions	28
Appendices	29
List of Symbols	33
References	33
2. Treatment of Chromium, Mercury, Lead, Uranium, and Arsenic in Water by Heterogeneous Photocatalysis	37
Marta I. Litter	
1. Introduction	37
2. Thermodynamical Considerations and Mechanistic Pathways	41
3. Chromium	44
4. Mercury	49
5. Lead	53
6. Uranium	57
7. Arsenic	58
8. Conclusions	61
Acknowledgment	62
References	62