



Minerals-Titanium Dioxide Micro-Nanometer Scale
Particle Composition and Functionalization

矿物-TiO₂微纳米颗粒 复合与功能化

丁浩 等 著
Ding Hao et al.



清华大学出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助项目



Minerals-Titanium Dioxide Micro-Nanometer Scale
Particle Composition and Functionalization

矿物-TiO₂微纳米颗粒 复合与功能化

丁 浩

Ding Hao

其他作者 林 海 邓雁希 陈代梅
王丽娟 敖卫华 周 红



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是矿物与 TiO_2 颗粒复合及功能化研究的专著,阐述了矿物与 TiO_2 微纳米颗粒复合及功能化的基础理论、研究方法和工程背景,系统介绍了作者在这一领域的科研工作成果,包括利用化学沉积、液相机械力研磨和颗粒疏水聚团方法制备微米-亚微米矿物- TiO_2 复合颗粒及其颜料功能化技术、通过矿物表面负载纳米 TiO_2 和蒙脱石层间柱撑 TiO_2 途径制备微米-纳米复合颗粒技术及光催化性能表征、矿物- TiO_2 复合颗粒表面有机改性、在液相介质中的分散调控和在工业制品中的填充应用等。

本书适合大专院校和科研院所材料、化工、矿物加工等专业的师生和技术人员阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

矿物- TiO_2 微纳米颗粒复合与功能化/丁浩等著. —北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-42943-2

I. ①矿… II. ①丁… III. ①矿粒—研究 IV. ①TD912

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060503 号

责任编辑:黎 强

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:36.5 字 数:620 千字

版 次:2016 年 5 月第 1 版

印 次:2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价:140.00 元

产品编号:051283-01



作者简介

丁浩 男, 1964年出生于辽宁。中国地质大学(北京)材料科学与工程学院教授、博士生导师。1985年毕业于东北工学院, 获学士学位; 1991年毕业于北京科技大学, 获硕士学位, 1998年毕业于北京科技大学, 获博士学位。1998—2000年在清华大学材料科学与工程博士后流动站从事博士后研究。

1985—1994年在国家建筑材料工业局地质研究所工作, 任工程师; 2000—2003年在北京建筑材料科学研究总院工作, 任科研部主任、纳米与环境材料研究室主任, 高级工程师; 2003年调入中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 任材料工程教研室主任、材料学专业实验室主任等职。荣获北京建材行业“十佳”科技人员和“中国地质大学(北京)研究生指导名师”称号。主要社会兼职有: 中国建筑材料工业联合会科技教育委员会委员, 北京建材集团科技委员会委员, 中国非金属矿工业协会矿物加工专家委员会委员, 《中国非金属矿工业导刊》编委, 北京建筑材料科学研究总院客座研究员, 国家科技部中小企业创新基金委员会、国家自然科学基金委员会、北京市科委、北京市海淀区科委项目评审专家。

长期从事无机矿物材料、环境材料、非金属矿深加工和粉体材料等研究和技术开发工作, 在矿物复合材料、环境材料、纳米矿物材料和非金属矿深加工等方面形成多项专有技术并实现了产业化。主要研究方向为: (1)矿物-TiO₂微纳米尺度颗粒复合与功能化; (2)层状硅酸盐矿物结构改造和纳米化; (3)多孔矿物纳米单元组装复合材料及其应用; (4)工业固体废物的资源化开发与利用。

主持完成国家科技支撑计划课题1项、国家自然科学基金项目3项、北京市自然科学基金项目1项、国土资源部信息中心项目1项和企业委托课题20多项。有7项成果通过省部级鉴定, 获部级科技进步二等奖1项, 获得国家发明专利12项, 成果产业化推广企业11家。作为第一作者或通讯作者发表学术论文170篇, 其中SCI收录18篇, EI和ISTP收录50篇。作为第一作者出版专著《新型复合功能涂料与应用》、《纳米抗菌技术》、《粉体表面改性与应用》和《建筑装饰材料及其环境影响》4部, 参编著作3部。





林海 男, 1966年出生于四川。北京科技大学土木与环境工程学院教授、博士生导师, 享受国务院政府特殊津贴。现任北京科技大学教务处副处长, 兼任全国冶金类高校环境专业联盟秘书长、中国有色金属学会技术专家工作委员会委员、中国有色金属学会环境保护学术委员会副主任委员、北京排水协会理事。被评为北京市教学名师、北京市优秀博士学位论文指导教师和全国优秀博士学位论文提名奖指导教师。

1989年毕业于北京钢铁学院, 1992年获北京科技大学硕士学位并留校任教, 1999年获北京科技大学博士学位, 2005年晋升为教授。2015年作为课题负责人承担国家科技重大水专项“丹江口库区小流域特色矿产重金属污染全过程控制关键技术与示范”课题。长期从事环境材料开发与应用、土壤和水体污染防治与资源化、工业污水污染控制与回用、复杂难选矿微生物处理等研究工作。在利用非金属矿物制备高附加值水处理环境材料、水体重金属污染防治生物质材料和尾矿综合利用等方面获得7项国家发明专利。发表学术论文150余篇, 作为主编出版《环境工程微生物学》(第2版)、《矿业环境工程》、《微生物应用技术》3部教材。



邓雁希 女, 1968年出生于河南。中国地质大学(北京)材料科学与工程学院副教授、硕士生导师。1991年毕业于东北工学院; 1996年毕业于东北大学, 获硕士学位, 同年进入中国地质大学(北京)材料科学与工程学院工作, 2002年毕业于中国地质大学(北京), 获博士学位。2011年任中国地质大学(北京)教务处副处长。

长期从事纳米材料、矿物材料和工业固体废弃物综合利用等研究工作。主持国家自然科学基金项目1项、北京市科技计划课题1项、中国地质大学(北京)中央高校基本科研业务费项目2项, 参加国家科技支撑计划、国家自然科学基金和企业横向科研课题20余项, 发表科技论文50余篇, 其中SCI收录5篇。



陈代梅 女, 1975年出生于四川。中国地质大学(北京)材料科学与工程学院高级实验师, 工学博士, 硕士生导师。2004年毕业于天津大学, 获化学工程专业硕士学位; 2007年毕业于天津大学, 获化学工艺专业博士学位。2008年3月进入中国地质大学(北京)材料科学与工程学院从事科研和实验教学等工作。

主要研究方向有: (1)光催化材料的制备与应用研究; (2)环境矿物材料的表面改性及应用, 包括以矿物材料为基体的光催化材料和吸附材料的制备与性能研究; (3)介孔和纳米材料的制备和性能研究。主持国家自然科学基金项目2项、中国地质大学(北京)中央高校基本科研业务费项目3项, 参加多项国家自然科学基金和企业横向合作项目的研究工作。2006年以来作为第一作者在Appl. Catal. B-Environ., J. Phy. Chem. C., Ind. Eng. Chem. Res., Appl. Surf. Sci.和Dalton Trans.等国际期刊上发表SCI收录论文20多篇。



王丽娟 女, 1979年出生于湖北。中国地质大学(北京)材料科学与工程学院讲师, 理学博士。2001年毕业于中国地质大学(武汉); 2004年毕业于中国地质大学(北京), 获分析化学专业硕士学位; 2015年毕业于中国地质大学(北京), 获岩石矿物材料学专业博士学位。2004年至今在中国地质大学(北京)材料科学与工程学院工作。

主要从事层状硅酸盐矿物改造和制备先进矿物功能材料的研究工作, 主持中国地质大学(北京)中央高校基本科研业务费项目1项, 参加国家科技支撑计划项目子课题1项、北京市自然科学基金项目1项。作为第一发明人获国家发明专利1项, 发表EI检索论文3篇, 合作出版专著1部。



敖卫华 男, 1978年出生于湖北。中国地质大学(北京)材料科学与工程学院工程师, 工学博士。2005年毕业于中国地质大学(北京), 获理学硕士学位, 同年进入中国地质大学(北京)材料科学与工程学院从事科研和实验室管理工作。2013年毕业于中国地质大学(北京), 获工学博士学位, 兼任世界青年地球科学家联盟(Y.E.S.)会员, 国际煤与有机岩石学会(TSOP)会员等。

从事非金属矿物加工、材料制备、能源利用与环境保护方面的研究, 主要致力于矿物-TiO₂颗粒复合系列产品的应用及推广。主持国家自然科学基金项目1项、中国地质大学(北京)中央高校基本科研业务费项目2项, 参加国家重大科技专项计划及国家973课题2项。发表学术论文30余篇, 其中SCI、EI和ISTP收录论文10余篇, 负责起草行业标准1项。



周红 女, 1980年出生于辽宁。中国地质大学(北京)材料科学与工程学院工程师, 理学博士。2004年毕业于大连医科大学; 2007年毕业于北京科技大学, 获硕士学位; 2015年毕业于中国地质大学(北京), 获博士学位。2007—2014年在北京建筑材料科学研究总院节能环保技术研究所工作; 2015年进入中国地质大学(北京)材料科学与工程博士后流动站从事博士后研究工作。

从事纳米材料、环境材料和复合功能材料的研究, 包括纳米抗菌剂制备、纳米TiO₂改性、矿物-TiO₂复合颗粒制备与应用等。主持中国地质大学(北京)中央高校基本科研业务费科研启动基金项目1项, 参加国家自然科学基金项目2项、国家火炬计划项目1项。申请国家发明专利2项, 作为第一作者发表学术论文5篇, 其中SCI收录1篇。

序

颗粒复合是指不同固体颗粒间的相界面有序缔合的过程,是设计、调控和优化粉体材料性能的有效途径,是无机粉体材料领域的重要研究方向。颗粒复合技术涉及矿物学、界面科学、无机非金属材料、矿物加工、化学工程等一系列学科领域,具有明显的跨学科特征。在微纳米多尺度结构设计理念基础上通过颗粒复合构建新型微纳米功能材料,可以赋予材料以崭新的形貌特征、独特的物理化学性质及机械加工特性,从而开拓新的应用领域,节约原材料,降低生产成本。微纳米颗粒复合技术业已成为当前开发新材料的重要手段。

二氧化钛(TiO_2)是一种具有优异性能的金属氧化物,钛白粉(TiO_2 , $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$)是当今性能最为优异的白色颜料。纳米 TiO_2 作为最具代表性的光催化材料已在轻工、化工、建材和环境净化等众多工业部门得到广泛应用。然而,在 TiO_2 微粉的生产和应用中却存在着资源、环境、成本以及应用技术等方面的严重制约。矿物- TiO_2 微纳米颗粒复合及其功能化,可以提高 TiO_2 的应用力度、降低实际用量,从而为缓解上述制约提供有效且可行的技术途径,还能显著提高矿物材料的使用价值。

丁浩教授及其科研团队在矿物- TiO_2 微纳米颗粒复合与功能化方面开展了多年的具有前沿性及实用性的研究工作,取得了一系列研究成果。通过颗粒尺度、形貌、介质体系中界面结构及颗粒间相互作用的预先设计,成功地实现了矿物与 TiO_2 在微米/亚微米和微米/纳米尺度的颗粒复合,提高了 TiO_2 的功能效率,发挥了矿物材料的协同效应,实现了复合粉体的颜料功能化;同时,也提升了纳米 TiO_2 的光催化活性及对污染物的降解作用,为其回收与循环利用提供了可行途径。令人欣喜的是,这方面的部分成果业已实现了产业化。

《矿物- TiO_2 微纳米颗粒复合与功能化》这本专著就是在上述研究工作

基础上撰写而成的,是作者及其团队多年研究工作的系统性总结,也是对纳米颗粒复合过程的一次深入的理论探讨。相信这本书的出版能够对从事粉体技术工作的工程技术人员及高校师生带来有益的启发,并促进我国颗粒学、粉体技术和无机新材料科学技术的发展。



2015 年 12 月

前 言

颗粒复合是指固体微小颗粒之间在相界面区域的有序结合。通过颗粒复合,可获得具有单颗粒组合效应或协同功能的复合粒子,这既可有效避免因超细单颗粒聚团而制约其功能和应用特性发挥的现象,又能通过协同效应,使原有功能提升,或被赋予新的物理或物理化学新功能。作为影响材料性能的多尺度结构设计中承上启下的重要环节,颗粒复合,特别是不同物质颗粒之间微纳米尺度上的复合往往成为从颗粒外观、物理或物理化学层面上设计和调控粉体性质的重要途径,是粉体材料功能化的重要方法,也是构建微纳米尺度新功能材料的有效手段。

二氧化钛(TiO_2)是具有优异光学(高折射率、可见光散射、紫外吸收)和光化学(光催化反应)性能的粉体材料。其中,颗粒尺度在亚微米级(约 $0.3\mu\text{m}$)的颜料二氧化钛(钛白粉)是当今最优良的白色颜料和国民经济中十分重要的精细化工原料,在涂料、塑料和造纸等众多轻、化工领域应用广泛,不可或缺。但钛白粉生产和应用中存在的资源、环境、需求和成本价格等制约问题也越来越突出。研发能取代钛白粉或降低 TiO_2 实际用量的新功能颜料无疑是解决这些问题的有效途径。将颜料 TiO_2 与白色非金属矿物实现微纳米颗粒复合,特别是制成矿物表面包覆 TiO_2 为特征的复合颗粒,因 TiO_2 分散性提高及矿物材料的协同效应而使 TiO_2 颜料性能得以更有效发挥,从而实现矿物对 TiO_2 的替代以降低 TiO_2 的实际用量。矿物与 TiO_2 颗粒间复合有序性和二者结合的稳定性是影响矿物- TiO_2 复合颗粒颜料性能的主要因素,它取决于矿物与 TiO_2 颗粒在微米和亚微米尺度上的复合结构设计、复合方法设计及其实现。

纳米二氧化钛($<100\text{nm}$)是近十多年发展起来的重要功能粉体,其中锐钛矿型纳米 TiO_2 因优良的光催化效应在水处理和环境净化领域展示出良好应用前景。但纳米 TiO_2 颗粒微小,实际应用过程难以回收,既造成浪费,又形成新的污染;颗粒间的强烈团聚还导致其光催化功能大大降低。将纳米 TiO_2 与具有内部孔道或空隙结构的矿物进行纳米颗粒复合,可提高

TiO₂分散性和光催化功能,并因复合颗粒尺度的增大而提高可回收性。同时,矿物的孔道或空隙结构还为纳米 TiO₂性能的发挥提供协同、辅助作用。矿物与 TiO₂在纳米尺度实现颗粒复合既取决于对二者复合结构、方法和工艺的预先设计,也取决于对矿物基体从结构和功能角度的选择及其加工控制。

笔者多年来一直从事非金属矿加工技术,特别是粉体和颗粒技术相结合的研究与开发。近 10 多年来,笔者及科研团队在原有粉体湿法超细粉碎、表面改性和矿物材料结构改造等技术研究基础上,重点开展了矿物与 TiO₂微纳米颗粒复合及功能化研究,包括以提高 TiO₂ 颜料功能、降低实际用量为目标,以构筑亚微米 TiO₂在矿物表面包覆和二者有序凝聚镶嵌结构为手段的矿物-TiO₂微米/亚微米颗粒复合,以及以提高纳米 TiO₂光催化功能和可回收性为目标的矿物-TiO₂纳米颗粒复合。在利用化学沉积法、液相机械力化学法和颗粒疏水聚团方法制备包覆结构复合颗粒及调控复合粉体性能,在实现纳米 TiO₂在矿物表面或结构内部负载和通过矿物自身结构改造对负载的影响控制以及矿物-TiO₂复合颗粒实际应用等方面取得了一系列成果,其中的部分成果还实现了产业化,并取得显著经济与社会效益。这些成果、经验及形成的研究与发展方向为今后的研究和应用向纵深发展奠定了基础。本书就是在上述科学研究和技术开发工作基础上撰写而成的,它是笔者及科研团队、合作者在矿物-TiO₂微纳米颗粒复合与功能化研究成果的系统性总结。希望本书的出版能够对我国颗粒学、粉体技术、矿物加工和无机新功能材料的研究与技术开发提供借鉴与帮助。

本书由丁浩、林海、邓雁希、陈代梅、王丽娟、敖卫华和周红撰写。特别感谢合作者林海教授和王丽娟博士,他们为本书贡献了自己优秀的研究成果(王丽娟的工作在廖立兵教授指导下完成)。感谢博士后侯喜锋、研究生杜亚利、冉君、叶灿、查炎鹏、曹虎、李燚、王柏昆、于守仁、王萌萌、郑允星、王旭明、崔程琳、沈凯、杨倩茹、王健和孙思佳等对研究工作所做的贡献!

本书共分 11 章,具体内容和人员分工如下:第 1 章,绪论(丁浩);第 2 章,矿物-TiO₂颗粒复合与功能化设计(丁浩);第 3 章,矿物表面化学沉积包覆 TiO₂复合颗粒制备及表征(丁浩 3.1,3.2,3.4~3.6;林海 3.3);第 4 章,矿物液相机械力研磨过程表面包覆 TiO₂复合颗粒技术(丁浩);第 5 章,碳酸钙与 TiO₂颗粒的有序凝聚复合(丁浩);第 6 章,碳酸钙与 TiO₂颗粒疏水聚团复合与表征(丁浩);第 7 章,矿物负载纳米 TiO₂复合颗

粒制备与性能表征(邓雁希,丁浩 7.1;邓雁希 7.2;陈代梅 7.3,7.4);第 8 章,蒙脱石层间柱撑 TiO_2 复合颗粒制备与表征(陈代梅 8.1;丁浩 8.2;王丽娟 8.3;陈代梅 8.4;陈代梅,王丽娟,丁浩 8.5);第 9 章,碳酸钙- TiO_2 复合粉体的表面有机改性(丁浩 9.1,9.2,9.4;周红 9.3);第 10 章,矿物- TiO_2 复合颗粒在液相中的分散调控及应用(丁浩);第 11 章,矿物- TiO_2 复合粉体的应用特性(丁浩 11.1~11.4;敖卫华,丁浩 11.5)。全书由丁浩进行统稿和审订。

在本书即将出版之际,笔者衷心感谢国家自然科学基金项目(编号 50674088、51144011、51474194 和 59704006)、国家科技支撑计划项目(编号 2008BAE60B06)、北京市自然科学基金项目(2022017)和北京市科技计划课题(Z080003032208015)对本书涉及的研究工作的资助,感谢合作企业和测试单位的协作与服务,感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的支持,感谢中国循环经济学会的鼓励与支持,感谢恩师卢寿慈教授为本书作序。笔者所在的中国地质大学(北京)暨材料学院各位领导与同事多年来给予我们团队各种支持与配合,谨在此一并表示衷心的感谢。

由于笔者能力和水平有限,加之撰写过程有些仓促,所以错误和不当之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

丁 浩

2016 年 3 月于中国地质大学(北京)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 TiO_2 性质与粉体材料	1
1.1.1 TiO_2 的晶体结构与性质	1
1.1.2 钛白粉的制造和应用	3
1.1.3 钛白粉代用品的现状与发展	8
1.1.4 纳米 TiO_2	15
1.2 颗粒复合与复合粉体功能化	21
1.2.1 颗粒复合及其目标	21
1.2.2 复合粉体材料的性能特点	22
1.3 白色非金属矿物	24
1.3.1 种类与应用特性	24
1.3.2 加工技术与发展	25
1.3.3 与 TiO_2 颗粒进行复合的特点	28
1.4 TiO_2 及与矿物颗粒复合研究的发展	28
参考文献	29
第 2 章 矿物- TiO_2 颗粒复合与功能化设计	36
2.1 矿物- TiO_2 颗粒复合的设计原则	36
2.1.1 颗粒复合方式与特点	36
2.1.2 矿物- TiO_2 复合颗粒的分类	36
2.1.3 颗粒复合与功能化设计原则	37
2.2 矿物- TiO_2 颗粒复合方法	40
2.2.1 TiO_2 在矿物颗粒表面包覆复合	40
2.2.2 矿物- TiO_2 颗粒有序凝聚复合	42
2.2.3 纳米 TiO_2 在矿物表面负载复合	43
2.2.4 层状硅酸盐矿物层间 TiO_2 柱撑复合	43

2.3	矿物-TiO ₂ 复合颗粒的物理性能	43
2.3.1	粒度和粒度分布	43
2.3.2	颗粒形状与形貌	45
2.3.3	颗粒比表面积	46
2.4	矿物-TiO ₂ 复合颗粒的表面和界面性能	47
2.4.1	表面能和表面活性	47
2.4.2	界面吸附特性	48
2.4.3	颗粒聚团和分散	49
2.5	矿物-TiO ₂ 复合粉体的功能性质	53
2.5.1	颜料性能	53
2.5.2	光催化性能	60
	参考文献	60
第3章	矿物表面化学沉积包覆 TiO₂ 复合颗粒制备及表征	63
3.1	概述	63
3.2	化学沉积包覆法	64
3.2.1	原则工艺流程	64
3.2.2	原材料和试剂	66
3.2.3	试验设备	67
3.2.4	评价与表征方法	67
3.3	煅烧高岭土-TiO ₂ 复合颗粒的制备与机理	69
3.3.1	TiOSO ₄ 的水解行为	69
3.3.2	TiOSO ₄ 水解物在煅烧高岭土表面的包覆	73
3.3.3	煅烧高岭土表面 TiO ₂ · nH ₂ O 的晶型转化	86
3.3.4	煅烧高岭土-TiO ₂ 复合颗粒结构与颜料性能	92
3.3.5	TiOSO ₄ 水解包覆煅烧高岭土的机理	97
3.4	绢云母-TiO ₂ 复合颗粒的制备与表征	102
3.4.1	绢云母基体水解包覆物的制备	103
3.4.2	水解包覆物中 TiO ₂ · nH ₂ O 的晶型转化	110
3.4.3	绢云母-TiO ₂ 复合粉体的颜料性能	115
3.4.4	绢云母-TiO ₂ 复合颗粒的结构与组分	117
3.4.5	绢云母-TiO ₂ 复合颗粒制备过程机理	119

3.5 重晶石- TiO_2 复合颗粒制备技术	123
3.5.1 TiOSO_4 水解包覆重晶石条件的影响	124
3.5.2 重晶石表面 $\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 的晶型转化	131
3.5.3 重晶石- TiO_2 复合粉体的颜料性能	136
3.5.4 重晶石- TiO_2 复合颗粒制备过程机理	138
3.6 TiOSO_4 水解产物在矿物基体表面的形核机制	144
参考文献	147
第4章 矿物液相机械力研磨过程表面包覆 TiO_2 复合颗粒技术	151
4.1 概述	151
4.2 液相机械力研磨包覆法	153
4.2.1 原理和原则工艺	153
4.2.2 原材料和试剂	157
4.2.3 试验装置	160
4.2.4 试验效果与产物性能评价	162
4.2.5 机理研究	163
4.3 碳酸钙- TiO_2 复合颗粒的制备及性能	164
4.3.1 碳酸钙基体的制备与表征	164
4.3.2 复合颗粒实验室制备试验	174
4.3.3 复合颗粒工业性制备试验	182
4.3.4 复合粉体性能与颗粒微观结构	187
4.3.5 碳酸钙与 TiO_2 颗粒间的复合机理	193
4.4 煅烧高岭土- TiO_2 复合颗粒制备及表征	198
4.4.1 非机械力因素的影响	200
4.4.2 机械力各因素的影响	202
4.4.3 复合颗粒性能与微观结构	208
4.4.4 煅烧高岭土与 TiO_2 颗粒间复合机理	211
4.5 重晶石- TiO_2 复合颗粒的制备	214
4.5.1 与锐钛矿型 TiO_2 的复合	215
4.5.2 与金红石型 TiO_2 的复合	220
4.5.3 复合粉体性能与颗粒微观结构	224
4.5.4 重晶石与 TiO_2 颗粒间的作用性质	230

4.6	绢云母-TiO ₂ 复合颗粒的制备与性能	235
4.6.1	湿法研磨-剥离制备绢云母基体及其性能	236
4.6.2	绢云母与金红石型 TiO ₂ 的复合	241
4.6.3	绢云母与锐钛矿型 TiO ₂ 的复合	243
4.6.4	复合颗粒结构与颜料性能	247
4.6.5	绢云母和 TiO ₂ 颗粒间的作用机制	250
4.7	水镁石-TiO ₂ 复合颗粒的制备	252
4.7.1	湿法研磨制备水镁石基体试验	253
4.7.2	水镁石湿法研磨过程的机械力化学效应	257
4.7.3	水镁石-TiO ₂ 复合颗粒的制备与性能	260
4.7.4	水镁石与 TiO ₂ 颗粒间的复合作用机理	265
4.8	硅灰石-TiO ₂ 复合颗粒的制备	266
4.8.1	机械力各因素的影响	268
4.8.2	复合体系 pH 值的影响	271
4.8.3	TiO ₂ 复合比例的影响	272
4.8.4	复合颗粒微观结构与性能	273
4.8.5	硅灰石与 TiO ₂ 颗粒间作用机理	276
4.9	电气石-TiO ₂ 复合颗粒的制备及性能	277
4.9.1	复合过程中各因素影响的正交试验	278
4.9.2	电气石-TiO ₂ 复合粉体的性能	280
4.9.3	电气石-TiO ₂ 复合颗粒结构与作用性质	281
4.10	矿物基体的影响行为	284
4.10.1	对复合粉体颜料性能的影响	284
4.10.2	对颗粒间复合作用性质的影响	287
4.10.3	矿物基体的协同效应	288
4.10.4	矿物基体的选用依据	289
	参考文献	290
第5章	碳酸钙与 TiO ₂ 颗粒的有序凝聚复合	299
5.1	概述	299
5.2	试验研究方法	301
5.2.1	原材料和试剂	301

5.2.2	试验装置和流程	302
5.2.3	产物性能评价	303
5.3	碳酸钙增量剂的制备	304
5.4	碳酸钙与 TiO_2 颗粒有序凝聚复合及表征	307
5.4.1	碳酸钙与 TiO_2 颜料复合物性能	307
5.4.2	碳酸钙与 TiO_2 复合物的微观形态	308
5.4.3	碳酸钙与 TiO_2 颗粒有序凝聚机理	310
	参考文献	312
第 6 章	碳酸钙与 TiO_2 颗粒疏水聚团复合与表征	313
6.1	概述	313
6.1.1	颗粒疏水聚团及其机制	315
6.1.2	同质颗粒疏水聚团及其应用	317
6.1.3	异质颗粒疏水聚团及发展	319
6.2	颗粒疏水聚团包覆法	320
6.2.1	工艺流程和关键技术	320
6.2.2	原材料和试剂	321
6.2.3	设备和装置	322
6.2.4	测试与表征方法	322
6.3	碳酸钙与 TiO_2 颗粒表面诱导疏水性调控	323
6.3.1	碳酸钙颗粒表面诱导疏水性调控	323
6.3.2	TiO_2 颗粒表面诱导疏水性调控	325
6.3.3	颗粒表面诱导疏水性的稳定性	325
6.4	疏水聚团制备碳酸钙表面包覆 TiO_2 颗粒及其表征	328
6.4.1	疏水聚团复合工艺因素的影响	328
6.4.2	复合粉体性能	338
6.4.3	复合颗粒形貌与组分	339
6.5	碳酸钙和 TiO_2 颗粒疏水聚团复合机理	341
6.5.1	碳酸钙与 TiO_2 颗粒间作用性质	341
6.5.2	水介质中颗粒间相互作用能	342
6.5.3	碳酸钙与 TiO_2 颗粒间的作用识别与驱动结合	346
6.5.4	碳酸钙与 TiO_2 颗粒疏水聚团复合模型	348
	参考文献	348