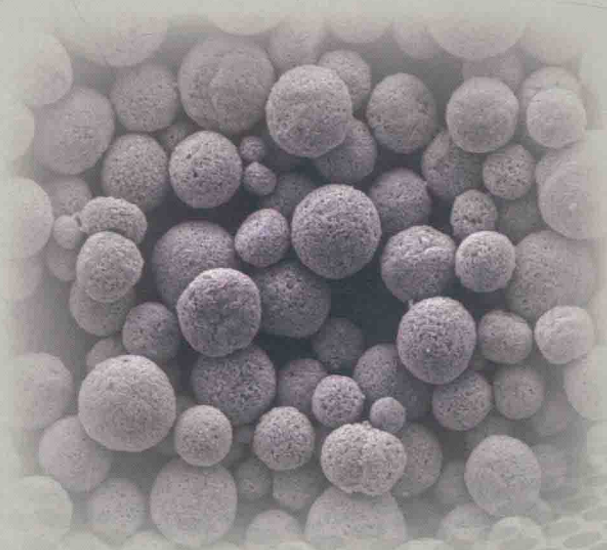


中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

纳米尖晶石/磁铅石型铁氧体 吸波防腐涂层设计与制备

魏世丞 王玉江 刘毅 等 编著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

纳米尖晶石/磁铅石型铁氧体 吸波防腐涂层设计与制备

魏世丞 王玉江 刘 毅 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

隐身技术能有效提高装备生存和突防能力,已成为现代战争中最重要、最有效的战术技术手段,高性能吸波涂层制备技术是实现装备隐身的主要途径之一。本书系统介绍了纳米尖晶石/磁铅石型铁氧体吸波防腐涂层设计原则、制备工艺及性能表征等,主要包括纳米铁氧体材料的研究进展、纳米铁氧体吸收剂及其制备方法、热喷涂纳米铁氧体涂层制备与表征、纳米铁氧体涂层机械性能与防护机理、纳米铁氧体涂层耐蚀性能与防护机理、纳米铁氧体涂层电磁特性及吸波机理等内容。

本书可供从事吸波材料与电磁防护工程、表面工程的技术人员、研究人员、高校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米尖晶石/磁铅石型铁氧体吸波防腐涂层设计与制备/魏世丞等编著.
—北京:科学出版社,2017.6
(中国腐蚀状况及控制战略研究丛书)
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-053838-3

I. ①纳… II. ①魏… III. ①尖晶石-防腐涂层-制备-研究 ②磁铅石型铁氧体-防腐涂层-制备-研究 IV. ①TB4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第139709号

责任编辑:李明楠 高 微/责任校对:高明虎
责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017年6月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:249 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	孟 伟
郝吉明	胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪
翁宇庆	高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基
魏复盛					

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015年9月

丛 书 前 言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”倡议的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的共同努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

随着雷达、微波通信技术的迅速发展，特别是各种先进探测器及精密制导武器的相继问世，电磁波吸收材料的研究日益受到重视。其中纳米隐身吸收剂具有密度低、吸波效率高和吸收频段宽等优点，在吸波材料研究领域表现出极大的优势。如何将高性能纳米吸收剂制备成兼具优异隐身性能和优异环境适应性的高性能吸波涂层，成为国内外专家、学者关注的焦点。

热喷涂技术具有使用范围广、工艺简单、效率高等特点，在提高涂层与基体结合强度、提升涂层机械性能、力学性能及环境适应性能方面具有明显的优势，为高性能隐身涂层制备提供了技术手段。《纳米尖晶石/磁铅石型铁氧体吸波防腐涂层设计与制备》的作者及其所在单位经过多年的理论研究、应用研究和丰富的工程实践，在热喷涂理论及热喷涂技术方面均取得了显著的成果，为国民经济、国防建设做出了巨大贡献。

该书以纳米铁氧体吸波防腐涂层设计和制备为主线，系统阐述了纳米铁氧体吸收剂及其制备方法、热喷涂纳米铁氧体涂层制备与表征、纳米铁氧体涂层机械性能与防护机理、纳米铁氧体涂层耐蚀性能与防护机理、纳米铁氧体涂层电磁特性及吸波机理等内容。该书学术见解独到，数据翔实，对从事科学研究的学者和工作在工程实践一线的技术人员均具有很好的理论指导和借鉴作用。

相信该书的出版将会使人们对铁氧体涂层吸波特性及热喷涂技术制备高性能吸波涂层技术有更为全面而深入的理解，将有力推动热喷涂技术在隐身、防腐等功能性涂层制备领域的推广应用。

侯保荣

2017年5月

前 言

随着雷达探测系统技术和电子通信的迅速发展,各种新型雷达、先进探测器及精密制导武器相继问世,致使飞机、舰船、坦克等武器装备面临的威胁日益增加。电磁波吸收材料的研究受到广泛重视,并已取得长足进展,其中纳米隐身材料相对于传统吸波材料具有密度低、介电常数高、波段宽等优点,在吸波材料研究领域表现出极大的优势,国内外专家、学者均在积极探索优质纳米吸收剂的研制及开发。

从工程应用角度,涂层隐身性能不仅取决于吸收剂的性能及含量,还与涂层制备技术密切相关。热喷涂技术具有使用范围广、工艺简单、效率高等特点,在提高吸波涂层与基体结合强度、提升涂层机械性能及环境适应性能方面具有明显的优势。为了与相关学者、工程技术人员共同推进高性能吸波涂层制备技术研究,我们编著了《纳米尖晶石/磁铅石型铁氧体吸波防腐涂层设计与制备》一书,全书以纳米铁氧体吸波防腐涂层设计和制备为主线,共分为概论、纳米铁氧体吸收剂及其制备方法、热喷涂纳米铁氧体涂层制备与表征、纳米铁氧体涂层机械性能与防护机理、纳米铁氧体涂层耐蚀性能与防护机理、纳米铁氧体涂层电磁特性及吸波机理等六章内容。

本书由中国工程院院士、波兰科学院外籍院士徐滨士教授担任顾问,由魏世丞、王玉江任主编,刘毅、梁义任副主编。各章节编著人员为:第1章魏世丞、刘毅、郭蕾,第2章王玉江、刘毅、郭蕾,第3章刘毅、梁义、王新坤、王博,第4章魏世丞、刘毅、朱晔、郑超,第5章梁义、王博、苏宏艺、刘玉欣,第6章王玉江、王新坤、刘文超、黄玉炜。全书由魏世丞、王玉江统稿。

本书可供从事吸波材料与电磁防护工程、表面工程的技术人员、研究人员、高校师生阅读和参考。

本书的编写基础是中国工程院重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“表面技术与表面效应”、国家自然科学基金面上项目“高温高湿海洋环境中纳米吸波涂层腐蚀行为对吸波性能的影响规律研究”、中国博士后科学基金面上项目“腐蚀行为对铁氧体涂层电磁信号屏蔽规律及退化机制研究”及中国博士后科学基金特殊资助项目“纳米铁氧体/空心微珠复合涂层制备及其腐蚀行为对吸波性能影响规律研究”。

借本书出版之际,向中国工程院、国家自然科学基金委员会等单位和部门表

示衷心的感谢。同时，向书中参考文献的作者致以敬意。

限于编著人员水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者指正并提出宝贵的意见。

作 者

2017年5月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 纳米材料概述	1
1.2.1 纳米材料分类	2
1.2.2 纳米材料的发展历程	2
1.2.3 纳米材料的特性	3
1.2.4 纳米材料的应用	5
1.3 吸波材料概论	8
1.3.1 材料的吸波原理	8
1.3.2 影响材料吸波性能的因素	10
1.3.3 吸波材料的分类	15
1.3.4 吸波材料研究现状	16
1.4 纳米铁氧体材料的研究现状	20
1.4.1 纳米铁氧体的制备方法	20
1.4.2 纳米铁氧体材料吸波机制及应用	28
参考文献	29
第 2 章 纳米铁氧体吸收剂及其制备方法	33
2.1 引言	33
2.2 尖晶石型铁氧体及其制备方法	34
2.2.1 尖晶石型铁氧体晶体结构	34
2.2.2 溶胶-凝胶自蔓延燃烧法制备 Ni-Zn-Mg 系纳米铁氧体粉体	36
2.2.3 高能球磨法制备 Ni-Zn-Mg 系纳米铁氧体粉体	50
2.3 磁铅石型铁氧体	61
2.3.1 磁铅石型铁氧体晶体结构	61
2.3.2 M 型铁氧体吸波材料	63

2.3.3 W 型铁氧体吸波材料	65
2.3.4 磁铅石型铁氧体粉体制备工艺	67
2.4 复合铁氧体吸波材料	69
2.4.1 铁氧体与介电材料的复合	70
2.4.2 铁氧体/碳纳米管复合材料	71
2.4.3 铁氧体与导电高分子复合吸波材料	71
2.4.4 铁氧体与金属微粉的复合吸波材料	72
2.4.5 不同类型铁氧体的复合	73
参考文献	73
第 3 章 热喷涂纳米铁氧体涂层制备与表征	77
3.1 引言	77
3.2 热喷涂制备吸波涂层的研究进展	78
3.2.1 碳化硅型吸波涂层	78
3.2.2 碳系吸波涂层	79
3.2.3 铁氧体吸波涂层	81
3.2.4 其他类型吸波涂层	83
3.3 等离子喷涂纳米铁氧体涂层的制备	84
3.3.1 纳米粉体重构后特性分析	84
3.3.2 纳米铁氧体涂层等离子喷涂参数选取原则	86
3.4 涂层的微观组织结构	87
3.4.1 黏结层微观组织	87
3.4.2 尖晶石型铁氧体涂层微观组织	88
3.4.3 磁铅石型铁氧体涂层微观组织	93
3.5 纳米铁氧体涂层性能表征方法	99
3.5.1 涂层常规机械性能测试方法	99
3.5.2 腐蚀性能试验方法	101
3.5.3 摩擦磨损试验方法	102
3.5.4 电磁及吸波性能测试方法	102
参考文献	104
第 4 章 纳米铁氧体涂层机械性能与防护机理	108
4.1 铁氧体涂层机械性能	108
4.1.1 铁氧体涂层硬度	108
4.1.2 铁氧体涂层结合强度	112
4.1.3 铁氧体涂层纳米力学性能	116

4.2 铁氧体涂层磨损行为和机理研究	119
4.2.1 基体铝合金磨损行为和磨损机理	119
4.2.2 尖晶石型铁氧体涂层磨损行为和磨损机理	121
4.2.3 磁铅石型铁氧体涂层磨损行为和磨损机理	125
4.2.4 基体与铁氧体涂层磨损量分析	130
4.3 本章小结	131
参考文献	132
第5章 纳米铁氧体涂层耐蚀性能与防护机理	134
5.1 热喷涂涂层研究现状	134
5.1.1 金属腐蚀的危害与防护	134
5.1.2 热喷涂涂层腐蚀行为研究现状	136
5.2 浸泡腐蚀试验	140
5.3 极化曲线试验	142
5.3.1 尖晶石型铁氧体涂层的极化曲线	142
5.3.2 磁铅石型铁氧体涂层的极化曲线	145
5.4 腐蚀机理研究	146
5.4.1 尖晶石型铁氧体涂层的腐蚀机理	146
5.4.2 磁铅石型铁氧体涂层的腐蚀机理	150
参考文献	154
第6章 纳米铁氧体涂层电磁特性及吸波机理	156
6.1 铁氧体静态磁性能	157
6.1.1 尖晶石型铁氧体静态磁性能	157
6.1.2 磁铅石型铁氧体静态磁性能	159
6.1.3 腐蚀对铁氧体静态磁性能影响	162
6.2 铁氧体吸波性能及机理研究	165
6.2.1 铁氧体动态磁性能及机理分析	165
6.2.2 铁氧体涂层雷达波反射率	170
6.2.3 铁氧体涂层吸波机理	174
参考文献	180

第1章 概 论

1.1 引 言

随着雷达探测系统技术和电子通信的迅速发展,各种新型雷达、先进探测器及精密制导武器相继问世,极大地提高了飞行器探测系统搜索、跟踪目标的能力,致使飞机、坦克、舰艇等大型传统作战武器所面临的威胁日益增加。隐身技术作为提高武器系统生存、突防能力的有效手段,已经成为集陆、海、空、天、电(磁)五位一体的立体化现代战争中最重要、最有效的突防战术技术措施,是提高武器系统生存能力不可或缺的手段,因而受到世界各国的重视。

在未来战争中,雷达仍将是探测目标的最可靠手段,而雷达隐身技术的核心是降低雷达散射截面。实现隐身主要有两个途径:一是外形隐身,即通过改进飞机、军舰等武器的外形,减小目标的雷达散射截面;二是应用雷达吸波材料对雷达波进行吸收或减少其反射。外形隐身技术通过目标的非常规外形设计降低其雷达散射截面,该技术难度较大,成本高,而雷达吸波材料技术相对简单,设计难度低,因此研究和开发高性能、多功能的雷达吸波材料成为各国研究热点。

近20年来,雷达吸波材料的研究取得了长足的进展。其中纳米技术作为当今科学的前沿技术,于20世纪80年代被用于隐身技术与隐身材料。纳米吸波材料相对于传统吸波材料具有密度低、介电常数高、波段宽、抗氧化等优点,可以实现现代吸波材料“薄、轻、宽、强”的综合性能要求。国内外针对纳米吸波材料的研究主要包括铁氧体材料、稀土材料、羰基铁粉、空心微珠、磁性纤维材料等几类,其中相对成熟且已得到应用的是纳米铁氧体材料,该材料具有较宽的吸收频段、高吸收率等特点,在吸波材料研究领域表现出极大的优势。

1.2 纳米材料概述

20世纪80年代末以来,一项令世人瞩目的纳米科学技术正在迅速发展,纳米科技在21世纪促使许多产业领域发生革命性变化。关注纳米技术并尽快投入到与纳米科技有关的研究,是21世纪许多科技工作者的历史使命。

习惯上人们将1~100nm的范围特指为纳米尺度,在此尺度范围的研究领域称为纳米体系,纳米材料具有明显不同于体材料和单个分子的独特性质,如界面效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应等,在电子学、光学、化工、陶瓷、生

物和医药等诸多方面具有重要的价值,引起了世界各国科技工作者的浓厚兴趣,以及各国政府的广泛关注。近年来,纳米材料的制备、性能和应用等各方面的研究,都取得了丰硕的成果。

纳米(nanometer)是一个长度单位,用 nm 表示,1 纳米(nm)等于十亿分之一米($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$),相当于头发丝直径的十万分之一。纳米材料的概念是在 20 世纪 80 年代末由德国科学家 Gleiter 提出来的。纳米材料一般指在三维空间至少有一个维度的几何尺寸在 $1\sim 100\text{nm}$ 的尺度范围内,或者由其为基本单元所构成的材料。根据其维度可以分为三类:①零维纳米材料,指空间三维尺度均在纳米尺度范围,如纳米颗粒、原子团簇和量子点等;②一维材料,指在三维空间中两个维度在纳米尺度范围,如纳米管、纳米线、纳米带等;③二维材料,指在三维空间仅有一个维度在纳米尺度范围,如纳米薄膜等。这些纳米材料往往具有量子性质,所以零维纳米材料通常又称量子点,一维纳米材料又称量子线,二维纳米材料中有量子面(量子阱)。

1.2.1 纳米材料分类

纳米材料的分类方法有很多种。按其维度可以将纳米材料分为三类:零维纳米材料、一维纳米材料和二维纳米材料。

按化学组成可分为:纳米金属、纳米晶体、纳米陶瓷、纳米玻璃、纳米高分子和纳米复合材料。

按材料物性可分为:纳米半导体、纳米磁性材料、纳米非线性光学材料、纳米铁电体、纳米超导材料、纳米热电材料等。

按应用可分为:纳米电子材料、纳米光电子材料、纳米生物医用材料、纳米敏感材料、纳米储能材料等。

按形态可分为:纳米颗粒、纳米固体材料、纳米膜材料及纳米液体材料。

按功能可分为:纳米生物材料、纳米磁性材料、纳米药物材料、纳米催化材料、纳米智能材料、纳米吸波材料、纳米热敏材料及纳米环保材料等。

1.2.2 纳米材料的发展历程

纳米材料是纳米科技发展的重要基础,从 20 世纪 80 年代至今,纳米材料研究从纳米颗粒扩大到纳米线、纳米管、纳米孔等。纵观纳米材料发展的历史,大致可以划分为以下三个阶段。

第一阶段(1990 年以前),主要是实验探索阶段,研究人员在实验室尝试各种手段制备纳米颗粒的粉体或块体,探索表征纳米材料的方法,研究纳米材料的特性。

第二阶段(1990~1994 年),利用已发现的纳米材料独特的物理、化学和力

学性能,开发新型纳米复合材料。通常采用纳米颗粒与纳米颗粒复合,纳米颗粒与常规块体复合及发展复合纳米薄膜,并研究这些纳米复合材料的制备方法和物理性能。这一阶段纳米复合材料的合成及物性的探索一度成为纳米材料研究的主导方向。

第三阶段(1994年至今),研究焦点为纳米组装体系、人工组装合成的纳米阵列体系或者称为纳米尺度的图案材料。纳米图案材料是以纳米颗粒、纳米棒等为基本单元在一维、二维和三维空间排列组装成具有有序或无序的纳米结构体系,如纳米线阵列体系、介孔组装体系、薄膜镶嵌体系等。在这一研究阶段,人们更强调以纳米材料的功能化为导向,设计、合成新型纳米材料。

1.2.3 纳米材料的特性

由于纳米材料的晶粒小、比表面积大,其表面能和表面张力会随着粒径的减小而急剧增大,呈现出不同于宏观材料的奇特的物理、化学性能,如小尺寸效应、量子尺寸效应、表面与界面效应、宏观量子隧道效应、介电限域效应。这些特殊的效应使得纳米材料在声学、磁学、电学、光学、化学等方面表现出新的特性,所以,纳米材料在能源、信息、材料、生物医学等领域应用前景广阔。

1. 小尺寸效应

当超微粒子的尺寸与光波波长、传导电子的德布罗意波长以及超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相当或更小时,晶体周期性的边界条件将被破坏,非晶态纳米粒子的颗粒表面层附近原子密度减小,导致声学、光学、电学、磁学、热学、力学性能等发生很大的变化,这就是纳米粒子的小尺寸效应。例如,纳米粒子的熔点可远低于相应的体相材料,因此可降低陶瓷制造和粉末冶金工业的反应温度和能耗。又如,利用等离子体共振频移随材料尺度变化的性质,改变颗粒尺寸,控制吸收边的位移,制造具有一定频宽的微波吸收材料,用于电磁屏蔽、隐形飞机等。

2. 量子尺寸效应

根据固体能带理论,金属材料的费米能级附近一般是连续的,但是,这一理论只有在高温或宏观尺寸的情况下才成立,当金属粒子尺寸下降到某一阈值时,金属费米能级附近的电子能级由准连续变为离散能级的现象,以及纳米半导体微粒存在不连续的最高占据分子轨道和最低未占分子轨道能级而能隙变宽的现象均称为量子尺寸效应。量子尺寸效应将在微电子和光电子领域占有重要地位,根据量子尺寸效应研制出多种性能优异的器件,如粗品状态下难以发光的间隙半导体Si、Ge等,当粒径减小到纳米量级时会表现出明显的不可见光发光现象,且随着