

纳米氧化锌的制备与应用研究进展^{*}

马正先¹, 韩跃新¹, 郑龙熙¹, 刘建彬²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳, 110006; 2. 赤峰富龙集团, 赤峰, 024300)

摘 要 纳米氧化锌作为一种功能材料, 有着许多优异的性能和广泛的应用价值, 对它的研究也得到了高度重视。本文对纳米氧化锌的制备和应用研究状况进行了较为系统的评述, 针对目前存在的问题, 提出了进一步研究的方向。

关 键 词 纳米氧化锌; 制备; 应用; 研究进展

中图分类号: TQ132.4⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2002)01-0037-07

Progress in Study and Application of Nanometer Zinc Oxide

MA Zheng-xian, HAN Yue-xin, ZHENG Long-xi, LIU Jian-bin

(School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, 110006)

Abstract: Nanometer zinc oxide is the functional material with manifold excellent performances and widespread applications. The study has being attached great importance to it. In this paper, we reviewed the present situation and the latest research progress in the preparation and application technology of Nanometer zinc oxide. In view of this situation, we also put forward to the future ways for the research.

Key words: nanometer zinc oxide; preparation; application; research

纳米材料是指颗粒尺寸在 1~100nm 之间的新型超细材料, 其尺寸大于原子簇而小于通常的微粒, 处在原子簇和宏观物体交界的过渡区域。当材料的尺寸小至纳米量级时, 与普通材料相比, 就显示出体积(小尺寸)效应、表面效应、宏观量子隧道效应、久保效应等许多宏观材料所不具有的特殊的性质, 使其在光吸收、敏感、催化及其它功能特性等方面展示出引人注目的应用前景。

纳米氧化锌与普通氧化锌相比, 显示出诸多特殊性能(如压电性、荧光性、无毒和非迁移性、吸收和散射紫外线能力等)和用途(如用于压敏电阻、压电材料、荧光体、化妆品、气体传感器、变阻器、吸湿离子传导温度计、图像记录材料、磁性材料、紫外线屏蔽材料、高效催化剂和光催化剂等)。因此, 对纳米氧化锌制备的理论研究和应用相对较多。但就目前的研究而言, 仍存在一些问题需要

^{*} 收稿日期: 2001-06-05; 收稿日期: 2001-12-04

作者简介: 马正先(1962-), 男, 山东梁山人, 济南大学副教授, 东北大学在读博士, 主要研究粉体加工。

进一步的研究与探索。

1 纳米氧化锌的制备与理论研究现状

1.1 制备方法综述

对纳米材料的研究首先是侧重于制备方法的研究,随着研究的不断发展和深入,新的制备方法不断涌现。面对众多的制备方法,分类方法很难统一,目前使用较多的分类方法有:一是将其分为气相法、液相法和高能球磨法^[1];二是将其分为物理法和化学法^[2];三是将其分为固相法、液相法和气相法^[3]等。作者认为,根据制备过程中有无化学反应发生,分为化学制备法、物理制备法和化学物理制备法等三大类制备方法较为合理。下面就根据这种分类方法,结合纳米氧化锌的制备现状加以介绍。

1.1.1 化学制备法

化学制备法各组分的含量可精确控制,并可实现分子/原子水平上的均匀混合,通过工艺条件的控制可获得粒度分布均匀、形状可控的纳米微粒材料。因此,它是目前采用最多的一类方法,纳米氧化锌的制备也不例外。化学制备法又可分为化学沉淀法、化学还原法、水热法、热分解法、微乳液法、溶胶—凝胶法等多种方法(表1)。

1.1.2 物理制备法

物理制备方法是指采用光、电技术使材料在真空或惰性气氛中蒸发,然后使原子或分子形成纳米微粒,或利用球磨、喷雾等以力学过程为主获得纳米微粒的制备方法。它包括蒸发冷凝法、机械球磨法、激光法等。纳米氧化锌的物理制备方法概括如表2所示。

1.1.3 化学物理制备法

化学制备法包括喷雾法、化学气相沉积法、爆炸法、超临界流体干燥法、冷冻干燥法、微波辐照法、反应性球磨法等。

万方数据

表1 化学制备法制备纳米氧化锌概况

制备方法	原 料	产品形貌*
水热法	乙酸锌,氯化锌,硝酸锌,氢氧化钾	短柱状,15
	氨水,亚硝酸钠	纤维,长径比 16:1
	硝酸锌,氨水	~500
	碳酸铵,锌盐	球形或近球形,50
化学沉淀法	氯化锌,草酸铵	球形,10~80
	氯化锌,草酸	六角晶体,20~40
	氯化锌,氨水,乙醇	6~17
	氧化锌矿,碳酸铵	
	硝酸锌,尿素	8~60,15~80
	硫酸锌,尿素	~120
	硝酸锌,氨水	球形,~100
	氯化锌,HMTA	球形~100,针状,~500
	硫酸锌,氯化锌,氨水	球形
	锌盐,表面活性剂	8~10
	锌盐,碱	20~50
	硝酸锌,氯化锌,HMTA	棒状、针状、球状团聚体、棒状与针状混合体
	硝酸锌,HMTA	柱状、针状
硫酸锌,硝酸锌,尿素	六角柱状	
硝酸锌,碳酸钠	~10	
乳液或微乳液法	硝酸锌,氨水	球形,20~50
	乙酸锌,氢氧化钠,乙醇,表面活性剂	~30
	锌盐,表面活性剂(甲苯)	球形,4~90
	乙酸锌,氢氧化钠,氨水,氯化铵,聚乙二醇	六角片状,~50
	Span-80 等	球形,30~40
胶体化学法	乙酸锌,氢氧化锂,无水乙醇,正己烷,镁粉	3,5
	硝酸锌,柠檬酸,聚乙二醇	球形,20
	硫酸锌,氢氧化钠,碳酸氢铵	10~20
	硝酸锌,乙酸锌,碳酸钠,氨水	球形,20~80
	硫酸锌,硫酸亚铁,氢氧化钠	球形,10~20
	硫酸锌,碳酸钠,六偏磷酸钠,二甲苯	~110
	硝酸锌,氢氧化钠,N ₂ H ₄	针状
	乙酸锌,丙醇,氢氧化钠	近球形,~4
	硝酸锌,氢氧化钠	球形,40~80
Sol-Gel 法	乙酸锌,硝酸锌,氢氧化锂	<107
	乙酸锌,氢氧化锂	~6
	草酸,乙酸锌	球形,20
固相化学反应法	硫酸锌,碳酸钠	棒球形,6~12.7

* 除注明长径比外其余数字为粒径, 单位 nm。

表 2 物理制备法制备纳米氧化锌概况

制备方法	原料	产品形貌和粒径
激光法	锌盐	10~20nm
激光法	锌片	多面体,10~40nm
机械球磨法	ZnO	≥100nm

(1)喷雾热解法所用原料为硝酸锌时,产品粒径 10~20nm;所用原料为乙酸锌、甲醇时,产品为球形,粒径 10~40nm;用硝酸锌、氮气时,产品粒径<1000nm;用二水合乙酸锌时产品粒径 20~30nm。(2)化学气相沉积法用锌可产出球形、粒径 50nm 的产品或 25nm、类四角锥体形产品。(3)热爆法用硝酸锌、氢氧化钠、双氧水、五氧化二磷可产出针棒形、(8~20)×(50~1000)nm 的产品。(4)临界干燥法用硝酸锌,氨水等可产出≥20nm 的产品。

1.2 纳米氧化锌的表征

纳米级粒子的测试和表征与普通粉体不同,目前常用(1)透射电镜(TEM)观察粒子的形貌、大小;(2)热重(TG)、差热分析(DTA)测试表征颗粒表面吸附、脱附机理及晶型转变温度;(3)X-射线衍射仪(XRD)测试晶型及大小;(4)红外光谱(IR)测试粒子的中间体结构;(5)EDTA 分析产品纯度;(6)BET 方法测定粒子的比表面积。

1.3 理论研究现状

纳米氧化锌的理论研究同所有其它纳米材料一样,开始时主要集中在制备方法的研究上,包括各式各样的纳米制备技术的研究与完善、不同前驱物种类的实验研究、相应方法下制备工艺条件及其参数的研究等,随制备方法的不断完善,对有些方法的晶体形成机理也进行了理论分析与研究。

水热法^[4~6,54~57]研究了不同反应条件(前驱物浓度、反应温度、添加剂浓度等)对 ZnO 纳米粉体及纤维的影响以及卸压在纳米 ZnO 粉体及纤维形成过程中的作用,研究了在水热卸压条件下 ZnO 纤维及 ZnO 纳米

粉体的形成机理、以及影响水热法制得的 ZnO 粉体的晶粒粒度的主要原因及纤维形成的主要因素。根据晶粒形态与水热介质碱度强弱之间的关系揭示了不同形态的 ZnO 的形成机理,通过对晶体生长机理的理解和晶体界面结构的方向,探讨出晶体形态与生长时的物理化学之间的关系,实现了水热法氧化锌陶瓷微晶制备过程中晶体生长的形态调控和晶体习性的人工调控。同时还对水热法制备陶瓷粉体中的聚集生长问题进行了研究,结果表明,水热条件下晶粒的形成经历了前驱物溶解、成核并形成稳定晶粒和晶粒聚集生长三个阶段;水热条件下晶粒的聚集生长分为 2 种类型,即第一类聚集生长和第二类聚集生长,前者是物料从小尺寸晶粒向大尺寸晶粒运输的重结晶过程,后者则是聚集的小晶粒之间由于某些暴露的晶面结构相容而在一定条件下发生配向生长的过程。两类聚集生长的热力学驱动力都是晶粒平均粒径的增大降低了体系总的表面自由能。从理论上说,水热法可制取各种纳米晶。但由于水热条件下聚集生长的发生,最终只能得到较大粒度的晶粒,而且具有一定的粒度分布范围。如何调控水热法制备粉体中晶粒的聚集生长,对于控制产品粒度和粒度分布范围十分重要。

化学沉淀法^[7~24]对不同反应温度和时间、反应物配比、热分解温度和时间等工艺参数进行了研究,对利用均匀沉淀法制备纳米 ZnO 结晶过程中的热力学和动力学进行了分析,指出沉淀产物的过饱和比对粒径及粒径分布起关键作用,分析了选定制备纳米氧化物的工艺条件的一般原则。在此基础上进行了小试和中试研究^[58~59]。

乳液法及微乳液法^[25~28]研究了不同表面活性剂对产品粒度的影响,通过电子自旋共振谱(ESR)进行了顺磁共振特性分析。研究了用超声微乳液法制备表面改性的单分散纳米氧化锌的条件,并对其光吸收特性研究

时发现,不同的表面活性剂包覆会改变纳米材料的光吸收特性。表面活性剂改性氧化锌后,它们的红外吸收都会发生蓝移现象,说明表面活性剂与氧化锌之间存在着相互作用,可以在一定程度上防止团聚。

胶体化学法^[29~36]研究了不同制备条件对氧化锌纳米晶晶化过程的影响以及纳米晶氧化锌晶体的生长动力学问题。

Sol-Gel 法^[37~39]探讨了最佳制备工艺条件,量子化凝聚作用,胶凝作用以及凝聚态氧化锌胶体的晶体生长问题。

固相化学反应法^[40~41]主要进行了制备条件的研究与产品表征。

物理法^[42~44]和化学气相沉积法^[50~51]主要进行了条件试验。

喷雾热解技术^[45~49]研究了操作参数对粒子形态和组成的影响,研究表明:产物粒子分解程度随反应温度的提高,溶液浓度和流量的降低而增大,随压力的提高先增大后略有减小,粒子形态与分解程度密切相关,只有当分解程度高于 90% 以上才能获得形态规则粒度均匀的产物粒子。由理论计算和实验结果的比较推断出粒子的形成机理为一次粒子成核-分裂机理:气溶胶微液滴经蒸发干燥形成由大量一次粒子相互粘连构成的微米级 $Zn(CH_3COO)_2$ 粒子,相互粘连的粒子,在分解过程中,在巨大应力作用下分裂为单个 20~30nm ZnO 产物粒子,一次粒子分裂不完全是较低分解程度的样品粒子形态恶化的原因所在。

2 纳米氧化锌的应用研究现状

2.1 应用范围

纳米氧化锌作为一种新型功能材料,在磁、光、电、敏感、抗菌消毒、紫外线屏蔽等方面具有普通氧化锌产品所不具备的特殊性能和用途。

2.1.1 制抗菌除臭、消毒、抗紫外线产品

纳米氧化锌在阳光,尤其在紫外线照射

下,在水和空气(氧气)中,能自行分解出自由移动的带负电的电子(e^-),同时留下带正电的空穴(H^+)。这种空穴可以激活空气中的氧变为活性氧,有极强的化学活性,能与大多数有机物发生氧化反应(包括细菌内的有机物),从而把大多数病菌和病毒杀死。纳米氧化锌的定量杀菌试验表明^[60]:在 5min 内纳米氧化锌的浓度为 1% 时,金黄色葡萄球菌的杀菌率为 98.86%,大肠杆菌的杀菌率为 99.93%。

金属氧化物粉末对光线的遮蔽能力,在粉末粒径为光波长的 1/2 时最大,在整个紫外光区(200~400nm)氧化锌对光的吸收能力比氧化钛强。

纳米氧化锌吸收紫外线的能力强,对 UVA(长波 320~400nm)和 UVB(中波 280~320nm)均有屏蔽作用。

纳米氧化锌无毒、无味、对皮肤无刺激性、不分解、不变质、热稳定性好,本身为白色,可以简单地加以着色,价格便宜。氧化锌是皮肤的外用药物,对皮肤有收敛、消炎、防腐、防皱和保护等功能。可用于化妆品的防晒剂,以防止紫外线的伤害并能抗菌除臭;可以用于生产防臭、抗菌、抗紫外线的纤维^[61~62],如日本帝人公司生产的采用纳米 ZnO 和 SiO_2 混合消臭剂的除臭纤维,能吸收臭味净化空气,可用于制造长期卧床病人和医院的消臭敷料、绷带、尿布、睡衣、窗帘及厕所用纺织品等;日本仓螺公司将 ZnO 微粉掺入异形截面的聚酯纤维或长丝中,开发出世界著名的防紫外线纤维,除具有屏蔽紫外线的功能外,还有抗菌、消毒、除臭的奇异功能,除用于制造手术服、护士服外,还可制造内衣、外装、鞋、帽、袜、浴巾、帐篷、日光伞、夏日装、农用工作服、运动服等。加有纳米 ZnO 的陶瓷制品具有抗菌除臭和分解有机物的自洁作用,经处理后的产品可制作浴缸、地板砖、墙壁、卫生间和桌石等^[63]。添加纳米 ZnO 紫外线屏蔽涂层的玻璃^[64~66]可抗紫外

线、耐磨、抗菌和除臭,可用作汽车玻璃和建筑用玻璃。在石膏中掺入纳米 ZnO 及金属过氧化物粒子后,可制得色彩鲜艳、不易褪色的石膏产品,具有优异的抗菌性能,适用于建筑材料和装饰材料^[67]。将一定量的超细 $\text{ZnO} \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{AgNO}_3$ 等加入 25% 的磷酸盐溶液中,经混合、干燥、粉碎等再制成涂层涂于电话机、微机等,有很好的抗菌性能^[68]。

2.1.2 用于催化剂和光催化剂

由于气体通过纳米材料的扩散速度为通过其他材料的上千倍,因此,纳米颗粒是极好的催化剂。纳米 ZnO 由于尺寸小、比表面积大、表面的键态与颗粒内部的不同、表面原子配位不全等,导致表面的活性位置增多,形成了凸凹不平的原子台阶,加大了反应接触面。纳米催化剂的催化活性和选择性远远大于其传统催化剂。

纳米 ZnO 是一种很好的光催化剂,在紫外光照射下,能分解有机物质,抗菌和除臭。

2.1.3 制备气体传感器及压电材料

它是利用纳米 ZnO 随周围气氛中组成气体的改变,而电学性能——电阻发生变化,对气体进行检测和定量测定的。目前已有利用纳米 ZnO 的电阻变化制备的气体报警器和湿度计。将纳米 ZnO 粉体用于瞬态薄膜传感器的研究表明,纳米 ZnO 便于喷涂与质量控制,易于极化与转向,表现出比较理想的电特性和动态特性,适用于瞬态信号的测量。利用纳米 ZnO 的压电性能,可制压电音叉、振子表面滤波器等。

2.1.4 制备图像记录材料

纳米 ZnO 依制备条件可获得光导电性、半导体和导电性等不同性质。利用这种变异,可用作图像记录材料,还可以利用其光导电性质用于电子摄影;利用半导体性质可作放电击穿记录纸;利用导电性质作电热记录纸等。其优点是无三废公害,画面质量好,可高速记录,能吸附色素进行彩色复印,酸蚀后

有亲水性,可用于胶片印刷等。

2.1.5 用于荧光体和电容器^[69~70]

纳米 ZnO 是在低压电子射线,唯一可发荧光的物质,光色为蓝色和红色。

添加了 ZnO 、 TiO_2 、 MnO_2 等的陶瓷微粉经烧结而成的具有高介电常数、表面微细平滑的片状体,可用于制造陶瓷电容器。

2.1.6 用于雷达波吸收材料

雷达波吸收材料(简称吸波材料)系指能有效地吸收入射雷达波并能使其散射衰减的一种功能材料。纳米 ZnO 等金属氧化物由于质量轻、厚度薄、颜色浅、吸波能力强等优点,作为一种有发展前途的新型军用雷达波吸收剂,而成为吸波材料研究的热点之一。

2.1.7 用于橡胶^[71]和涂料工业^[72]

纳米 ZnO 是制造高速耐磨橡胶制品的原料,如飞机轮胎、高级轿车用的子午线胎等。它与其它纳米材料配合用于建筑内外墙乳液涂料及其它涂料中,使涂层具有屏蔽紫外线、吸收红外线及抗菌防霉作用,同时还具有增稠作用,以便于颜料分散的稳定性。

2.2 应用研究现状

氧化锌的应用研究除了在橡胶、化工、涂料、陶瓷、玻璃、电子、医药卫生和食品等传统工业外,随着材料纳米化和功能性的深入研究,进一步拓宽了它的应用领域,其中紫外线屏蔽、光催化导电氧化锌等方面的应用研究开展得比较多。但从 3.1 中的应用情况来看,对纳米氧化锌的应用基础理论的研究比较少,而针对其制备方法的研究比较多。

根据光敏半导体催化理论和实验发现,半导体催化能力与其能级结构有关,其禁带宽度越小,催化能力越强。但从禁带所处能级及抗光阴极腐蚀性来看,半导体粉末光催化活性顺序为 $\text{TiO}_2 > \text{ZnO} > \text{WO}_3$ ^[73]。

纳米光催化剂的研究主要用于分解有机物、贵金属回收、对废水和空气中有机物、

NOX 等有害物质进行催化、氧化、分解来净化水和空气,还能使微生物、细菌等分解成 CO_2 和 H_2O ,起到灭菌、除臭、防污、自洁。如以太阳光、氙灯为光源,氧化锌为光催化剂,对苯胺的光降解行为进行了研究^[74]。

随着大气臭氧层的破坏,到达地球表面的紫外线强度日趋增加,人类由此造成的皮肤病威胁越来越大。因此,紫外线的防护已成为非常重要的研究课题之一。对纳米氧化锌防紫外线的研究主要是防辐射的效率问题。

用超声微乳液法^[28]制备表面改性的单分散纳米氧化锌时,对其光吸收特性进行了研究,发现不同的表面活性剂包覆会改变纳米材料的光吸收特性。表面活性剂改性氧化锌后,它们的红外吸收都会发生蓝移现象,说明表面活性剂与氧化锌之间存在着相互作用,可以在一定程度上防止团聚。这种改性的纳米氧化锌不仅可强烈地屏蔽/吸收紫外线,由于紫外吸收的波长范围不尽相同,只需在环己烷中掺加较少剂量的 40~250nm 的氧化锌,紫外吸收就可达到 89% 以上。而且热稳定性、化学稳定性高,同时表面活性剂的存在可使之与各种基材混溶性好,无色、无毒、无臭、耐溶剂。

3 存在的问题与研究方向

3.1 存在的问题

3.1.1 制备技术方面

化学制备法在纳米粒子的规模生产方面具有一定的优势。但产品中易混入杂质,粒子易团聚,制备过程存在着污染等一系列问题尚待解决。

化学制备法中,目前大多采用化学沉淀法(包括直接沉淀法、共沉淀法、均匀沉淀法、配位沉淀法等),它是通过化学反应使原料的有效成分生成沉淀,然后再经过滤、洗涤、干燥、加热分解而得到纳米粒子。此法操作简

单,但由于沉淀物通常为胶状物,存在阴离子洗涤和去除的问题(水洗、过滤困难);沉淀剂作为杂质易混入;沉淀过程中各种成分可能发生偏析,水洗时部分沉淀物发生溶解。

传统的溶胶-凝胶法一般采用有机金属醇盐为原料,通过水解、聚合、干燥等过程得到固体的前驱物,最后再经适当热处理得到纳米材料。由于采用金属醇盐为原料,使其成本较高。由于凝胶化过程较慢,因此一般合成周期较长。另外,一些不容易通过水解聚合的金属如碱金属较难牢固地结合到凝胶网络中,从而使得该方法的使用受到限制。

水解法是将金属盐溶液在高温下水解生成氢氧化物或水合氧化物沉淀,经加热分解后得到纳米粒子的方法(包括无机盐水解法、金属醇盐水解法、喷雾水解法等)。其中金属醇盐水解法最为常用,此法得到的物质纯度高,杂质被引入的可能性小。其最大特点是从物质的溶液中直接分离出所需的超微粒,且粒径小,粒度分布窄。具有制备工艺简单、化学组成能精确控制,粉体性能重复性好以及得率高的特点。但原料成本高,如能降低成本,此法将具有极强的竞争力。

水热合成法是在高温高压下在水溶液或蒸汽等流体中一步合成欲制备的粉体。此法具有原料易得、粒子纯度高、分散性好、晶形好且可控、成本相对较低等特点。

物理制备方法中的机械球磨法得到的产品最小粒径为 $1\mu\text{m}$,还不能完全达到纳米级,激光聚集原子沉积法的工业化还存在问题。

化学物理合成法中,喷雾法是将溶液通过各种物理手段雾化,再经物理、化学途径转变为纳米粒子,在雾化的雾滴干燥、水解或热解时容易形成空心现象^[47];气相法合成纳米 ZnO 的工业化也是一个亟待解决的问题。

3.1.2 理论研究方面

化学制备技术中大多是采用二步法,即先将原料制成氧化锌的某种前驱物,然后再

将前驱物分解成纳米氧化锌。而前驱物大多是胶状物,胶体的分散、稳定性或分解机理、胶体(结晶或沉淀)对后续分解与氧化锌晶体形成过程的影响、溶胶与凝胶的转变机理及对氧化锌晶形的影响等问题还有待于进一步研究。

物理制备技术中如何使粒子进一步细化,粉磨介质的选配、工艺及操作参数的优化、添加剂的合理使用、粉磨机理的研究、分级理论的研究等。

化学物理制备技术中的分解质量与效率的理论问题、结晶过程及结晶形态的控制理论等。

各种现有制备技术中都存在着不同程度的团聚现象,分散与团聚是纳米材料制备技术中的共性问题。

3.1.3 应用研究方面

如何寻找纳米氧化锌与传统领域融合的切入点和突破口,是推动纳米氧化锌应用研究的关键。纳米氧化锌的应用研究同其它纳米材料一样还处于初级阶段,应用基础理论的研究还不深入,一些应用领域还未开发。

纳米氧化锌作为一种良好的光催化剂,可用于抗菌消毒、屏蔽紫外线等,但目前的研究中还存在一些问题:反应机理的研究缺乏中间体的鉴定;用于公共设施的杀菌技术,新型的半导体复合催化剂的开发;多元复杂组分有机物体系的考察,目前的报道大多为单一组分考察;大型工业化的光催化氧化反应器的设计;光催化剂的寿命、中毒、再生与回收。

3.2 研究方向

制备方法与机理研究方面:发展新的制备技术,包括现有技术的融合与其它高新技术的介入;制备研究与工业化规模生产尚有相当大的差距,适合工业化的制备方法、反应机理研究与工艺技术有待于进一步完善;加

强控制工程方面的研究,包括颗粒尺寸、形状、表面及微结构的控制,表面改性与修饰技术等,如何能生产出粒径更小、大小均一、形貌均一、粒径和形貌均可调控、生产成本低廉且能规模生产的纳米氧化锌;各种制备技术中氧化锌形成机理的系统研究,纳米氧化锌的结构、形貌、尺寸大小等对其性能、应用场合与范围的影响。

产业化方面一些共性的关键技术问题:制备和使用过程中分散特别是规模分散技术;与其它纳米材料或非纳米材料的复合添加技术,如表面包覆后更好地应用于抗菌、消毒等领域,如抗菌塑料及制品、家电制品、厨房用品、医疗卫生、卫浴洁具、合成纤维、日用品、玩具、电子通讯等;纳米氧化锌的涂层技术,如何根据纳米 ZnO 的特性设计出几种性能的涂层,如与树脂(或其它物质)复合(或制作)作为静电屏蔽涂层、紫外线反射涂层、红外线吸收涂层等;制备过程中的环保与经济技术,纳米氧化锌应用领域的拓展问题。

纳米材料的应用已成为人们关注的热点,如何针对不同用途的需要,设计与制备出专用的纳米 ZnO 。应加强应用基础理论与实践方面的研究,加快生产力转化的步伐。

产品的粒度分级以及现代化的测试技术等也有待于进一步开发研究。

4 结论

综上所述,广大科技工作者已经对纳米氧化锌的研究进行了许多工作,取得了相当的成就,国内也已有厂家开始生产,但还存在着前面介绍的一系列问题尚需解决。纳米氧化锌的开发、应用已引起社会各界的高度重视,相信这些问题的解决会指日可待。

参考文献:

(共74条,本刊从略)