

文章编号: 1004 - 0609(2005)03 - 0435 - 06

超细 CeO_2 粉体的制备及其紫外线吸收性能^①

朱兆武, 龙志奇, 崔大立, 张顺利, 张国成

(北京有色金属研究总院 有研稀土新材料股份有限公司, 北京 100088)

摘要: 用碳酸氢铵作沉淀剂通过添加 NH_4NO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_4$ 两种不同的试剂制备了超细 CeO_2 粉体。采用 X 射线衍射、BET 和激光散射的方法研究了不同灼烧温度下粉体粒径的变化规律, 并研究了粉体粒径对紫外线吸收的影响。结果表明: NH_4NO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_4$ 作为添加剂可以制得一次粒径在 10~100 nm 的纳米粉体, 团聚粒径在 200~300 nm 分散性好的超细 CeO_2 粉体。X 射线衍射和 BET 测得的一次粒径随灼烧温度升高呈明显增大的趋势, 激光散射测得的团聚粒径随灼烧温度变化不明显。 CeO_2 粉体分散在去离子水中的吸收光谱研究表明, 粉体一次粒径大小对光的吸收效果有明显影响, 粒径小, 紫外线吸收效果好, 可见光穿透性强, 粒径增大, 粉体将失去紫外线吸收效果, 紫外吸收受粉体的团聚粒径影响不大。

关键词: 超细 CeO_2 粉体; 制备; 紫外吸收

中图分类号: O 643

文献标识码: A

Preparation of ultra-fine particle-sized CeO_2 powder and its UV absorbance

ZHU Zhao-wu, LONG Zhi-qi, CUI Da-li,

ZHANG Shun-li, ZHANG Guo-cheng

(Grirem Advanced Materials Co. Ltd,

General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Ultra-fine CeO_2 particle-sized powders were prepared by precipitation method with bicarbonate as precipitant while NH_4NO_3 and $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_4$ serve as additives, respectively. The variant regularity of particle size with calcinations temperatures was studied by XRD, BET and Laser Scattering methods. The results show that nano-particle sized CeO_2 with primary particle size of 10 - 100 nm and aggregated particle size of 200 - 300 nm can be obtained while NH_4NO_3 and $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_4$ serves as additive. The primary particle size determined by XRD and BET method increases significantly with temperature, however the secondary particle size dose not change appreciably analyzed by laser scattering method. As CeO_2 dispersed in de-ionized water, ultra violet(UV)-visible absorbance spectrum was applied to study its absorbance characters. The study finds that it has good UV absorbance and visible light transparency as CeO_2 powder with an ultra-fine particle size. UV absorbance is greatly influenced by the primary particle size. With the primary particle size increase, the UV absorbance weakens markedly. The secondary particle size has little influence on its UV absorbance.

Key words: ultra-fine CeO_2 ; preparation; ultra violet absorbance

我国稀土储量居世界之首, 其中铈约占稀土总量的 50%, 因此开发铈基功能材料具有重要意义。超细氧化铈具有强的紫外线吸收性能, 而且对可见

光穿透性良好^[1-5], 因此, 超细氧化铈作为抗紫外线吸收剂可应用于玻璃、塑料、橡胶以及化妆品等领域, 它具有价格低、无毒害, 而且不改变原料的

① 基金项目: 国家发展与改革委员会稀土专项资助项目

收稿日期: 2004 - 06 - 30; 修订日期: 2004 - 12 - 10

作者简介: 朱兆武(1966 -), 男, 副研究员, 博士。

通讯作者: 朱兆武, 副研究员; 电话: 010-82241188; 传真: 010-82241188; E-mail: zwuzh@263.net

颜色等优点，目前引起了人们广泛的兴趣。Liu 等^[6]用 Kramers Kronig 转换模型研究了超细颗粒的氧化铈的紫外线吸收性能。研究表明，超细氧化铈在 200~ 480 nm 之间有一宽的吸收带，并且在这个宽的吸收带中还有两个窄的吸收带叠加在一起。宽的吸收带为 O 的 2p 和 Ce 的 4f 电子跃迁，而两个窄的吸收带是铈的 4f¹ 态的自旋轨道分裂造成的。Shinryo^[4]用 Mg²⁺，Ca²⁺，Sr²⁺，Ba²⁺，Y³⁺，La³⁺，Nd³⁺，Sm³⁺，Eu³⁺，Tb³⁺ 等离子对 CeO₂ 掺杂，发现 20% 的 Ca²⁺ 和 Zn²⁺ 掺杂后 CeO₂ 的粒径明显减小，紫外线吸收效果好，而且可见光透过性强。尽管研究表明 CeO₂ 固体颗粒减小，紫外线吸收效果加强，但是紫外线吸收性能与 CeO₂ 粉末颗粒之间的关系尚不明确。本文作者采用碳酸氢铵沉淀法添加 NH₄NO₃ 和 (NH₄)₂CO₄ 分别制备了超细 CeO₂ 粉体，研究了紫外线吸收与颗粒大小之间的关系。

1 实验

1.1 试剂与仪器

主要试剂: Ce₂(CO₃)₃, m(CeO₂)/m(REO) > 99.9%, 甘肃稀土公司生产; 其他试剂均为分析纯。

主要仪器有: JSM - 840 扫描电镜, 日本电子光学公司生产; X'Pert Pro MPD X 射线衍射仪, 荷兰 PaNalytical 公司生产; 90Plus 激光粒度仪, 美国 BrookHaven 仪器公司生产; Lambda19 紫外可见分光光度计, 美国 PE 公司生产; ST - 08 比表面仪, 北京科学仪器公司生产。

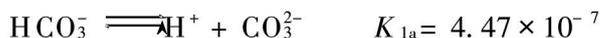
1.2 样品制备

将市售 Ce₂(CO₃)₃ 粉末用 HNO₃ 溶解转化为 Ce(NO₃)₃, 稀释配成 0.5 mol/L 的溶液。

方法 1(Method 1): 取 100 mL 0.5 mol/L 的 Ce(NO₃)₃ 溶液加入 NH₄NO₃ 使其浓度为 0.15 mol/L, 搅拌均匀后, 室温下(16 °C)按 13 mL/L 的加料速度均速加入 160 mL 1.0 mol/L 的 NH₄HCO₃。加料完全后将沉淀体系升温到 80 °C 陈化 4 h, 冷却后过滤干燥, 在预定温度下灼烧即得超细 CeO₂ 粉体。

方法 2(Method 2): 取 1.54 g (NH₄)₂CO₃ 溶于 160 mL 1.0 mol/L 的 NH₄HCO₃ 中, 然后在室温下(16 °C)按 13 mL/L 的加料速度均速加入 100 mL 0.5 mol/L 的 Ce(NO₃)₃ 溶液中。加料完全后将沉淀体系升温到 80 °C 陈化 4 h, 冷却后过滤干燥, 在预定温度下灼烧即得超细 CeO₂ 粉体。

NH₄HCO₃ 在水溶液中发生下列反应:



令 [CO₃²⁻]_{total} = [CO₃²⁻] + [HCO₃⁻] + [H₂CO₃], 那么, 碳酸氢铵溶液中 CO₃²⁻ 的浓度占溶液中总 CO₃²⁻ 浓度(表示为 [CO₃²⁻]_{total}) 的比例可表示为

$$\frac{[CO_3^{2-}]}{[CO_3^{2-}]_{total}} = \frac{K_{1a}K_{2a}}{[H^+]^2 + K_{1a}[H^+] + K_{1a}K_{2a}}$$

当 1.0 mol/L 的 NH₄HCO₃ (pH ≈ 9) 加入 1.0 mol/L 的 Ce(NO₃)₃ 溶液中时, CO₃²⁻ 与 Ce³⁺ 瞬间形成的浓度积约为 4 × 10⁻⁶, 浓度积远大于 CO₃²⁻ 与 Ce³⁺ 形成沉淀的浓度积(1.08 × 10⁻²⁸)。因此, 当用 NH₄HCO₃ 沉淀 Ce(NO₃)₃ 溶液中的 Ce³⁺ 时, 瞬间形成较大的过饱和度, 而且形成的 Ce₂(CO₃)₃ 具有很小的溶解度。根据 Weimarn 成核与颗粒生长理论:

$$v_1 = \frac{dn}{dt} = K_1 \frac{(c - S)}{S}$$

$$v_2 = K_2 D(c - S)$$

式中 v₁、v₂ 分别为成核速率和生长速率; n 为成核数目; t 为时间; c、S 分别为过饱和度和溶解度; D 为溶质分子扩散系数; K₁、K₂ 为常数。可以推知, 沉淀反应将有较大的成核速率, 形成的固体具有极细的颗粒。

尽管文献[7 - 10]曾报道多种制备纳米级超细 CeO₂ 粉体的方法, 但沉淀法由于工艺简单, 易于工业化生产, 目前仍是制备 CeO₂ 超细粉体的主要方法, 文献[11, 12]已报道用碳酸氢铵沉淀法制备出超细的氧化铈粉体。沉淀法制备稀土氧化物时, 由于颗粒表面易形成氢键相互交联, 因此团聚现象较严重, 往往得不到分散性好的粉体。本文作者分别采用 NH₄NO₃ 和 (NH₄)₂CO₄ 作添加剂, 制备了超细分散性好的 CeO₂ 粉体。

1.3 样品分析

1.3.1 粒径分析

1.3.1.1 X 射线衍射测得的粒径

由 X 射线衍射谱(111)面衍射峰半高宽, 根据 Scherrer 计算公式,

$$D_x = \frac{K\lambda}{\beta \sin(\theta)}$$

式中 D_x、β 和 θ 分别为 X 射线衍射粒径、半高峰宽化度以及 Bragg 衍射角; λ 为入射 X 射线波长, λ = 0.154 1 nm; K 为宽化常数, 这里 K = 0.89。

1.3.1.2 BET 测得的粒径

采用 BET 吸附法测定样品的比表面积, 用 Archimede 排水法测定样品的密度, 样品粒径 D_{BET} 计算公式为

$$D_{\text{BET}} = \frac{6}{\rho S_{\text{BET}}}$$

式中 ρ 为样品密度; S_{BET} 为样品的比表面积。

1.3.1.2 激光散射法测得的粒径

取少量样品用超声波分散在去离子水中, 用激光散射粒度分析仪测定样品的粒度。

1.3.2 样品吸光度分析

取少量样品用超声波分散在去离子水中, 置入 1 cm 石英比色杯中, 以去离子水为参比, 在分光光度计上测定 200~600 nm 区间的吸收光谱。

2 结果与讨论

2.1 样品形貌分析

按实验所述的两种制备方法, 将 Ce₂(CO₃)₃ 溶解在 HNO₃ 溶液中制得 0.5 mol/L 的 Ce(NO₃)₃ 溶液, 碳酸氢铵沉淀晶化后得到的 Ce₂(CO₃)₃ 在 700 °C 下灼烧 2 h, 形成的氧化铈粉体的 SEM 形貌如图 1 所示。可以看出, 两种合成方法得到的 CeO₂ 粉

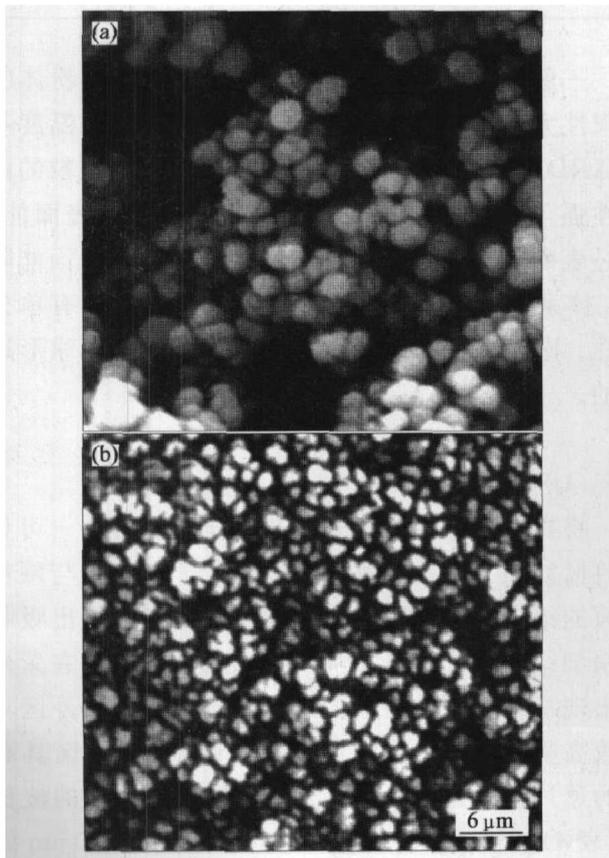


图 1 不同方法制得的 CeO₂ 粉体的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphologies of CeO₂ powder

(a) —Method 1; (b) —Method 2

体具有不同的形貌。沉淀前在 Ce(NO₃)₃ 溶液中加入一定量的 NH₄NO₃ 得到的 CeO₂ 颗粒近似球形, 平均粒径在 300 nm 左右, 而在沉淀剂中加入 (NH₄)₂CO₃ 得到的 CeO₂ 球化度较差, 形成的颗粒度较小, 平均粒径在 200 nm。

2.2 X 射线衍射分析

两种合成方法得到的 Ce₂(CO₃)₃ 在不同温度下灼烧 2 h 后, X 射线衍射谱见图 2。由图可见, 在两种条件下合成的样品不同温度下灼烧后得到的 X 射线衍射谱差不多。400 °C 下灼烧已得到明显的 CeO₂ 面心立方晶型衍射峰, 说明晶粒在 400 °C 以上灼烧后, 晶格基本完善。400 和 500 °C 灼烧后样品的衍射峰明显宽化, 衍射峰强度较弱, 说明 CeO₂ 的晶化度低。按照 Scherrer 公式和 Bravais 法则, 由 (111) 晶面计算的晶粒大小和晶胞参数 (a) 列于表 1。

表 1 的计算结果表明, 当灼烧温度低于 500 °C 时, 晶粒非常小, 两种制备路线均能得到纳米级尺

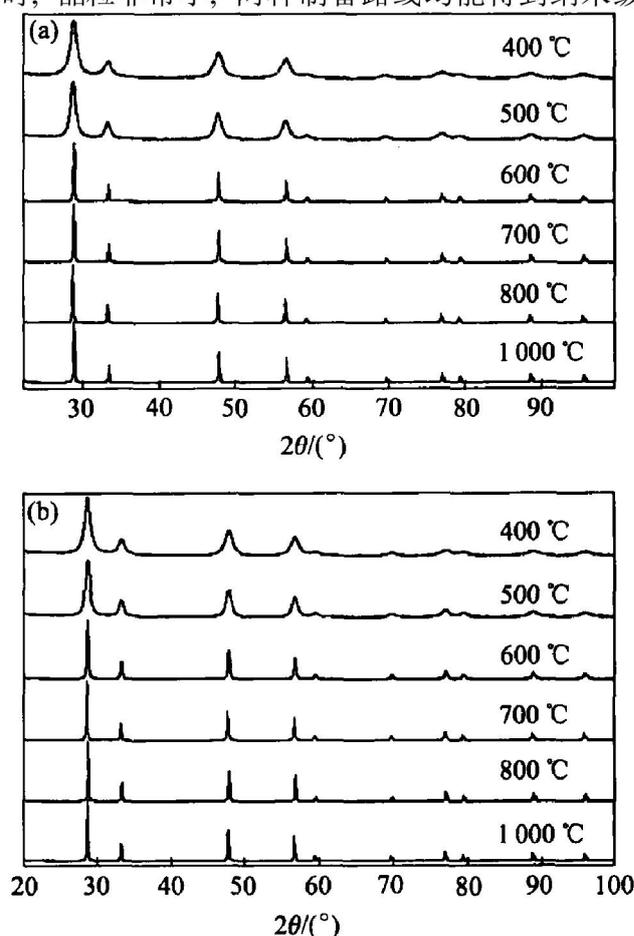


图 2 不同温度灼烧后 Ce₂(CO₃)₃ 的 X 射线衍射谱

Fig. 2 XRD patterns of Ce₂(CO₃)₃ after calcined at different temperatures

(a) —Method 1; (b) —Method 2

表 1 由 X 射线衍射谱计算的晶粒大小和晶胞参数(*a*)

Table 1 Crystal particle size and parameter(*a*) calculated from XRD patterns

Temperature/ °C	Particle size/ nm		<i>a</i> / nm	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
400	9.17	11.52	0.541 1	0.539 6
500	13.27	15.93	0.541 8	0.539 2
600	136.57	63.72	0.539 4	0.539 6
700	137.58	208.51	0.539 9	0.541 3
800	222.95	273.05	0.542 3	0.538 9
1 000	263.02	326.75	0.539 9	0.539 5

寸的晶粒。随灼烧温度增大，晶胞参数 *a* 没有发现规律性的变化，晶胞畸变不明显，但粒径随之增大，说明高温下小的晶粒烧结成为较大的晶粒。当灼烧温度大于 600 °C 时，衍射峰的宽化不明显，计算误差较大。但从衍射峰宽化度的变化可知，添加 NH₄NO₃ 制备的 CeO₂，当灼烧温度在 500~ 600 °C 之间，一次粒径烧结长大较显著，而添加 (NH₄)₂CO₃ 制备的 CeO₂，当灼烧温度在 600~ 700 °C 之间，一次粒径烧结长大较显著，这可能是由于粉体颗粒表面结构不同，表面张力的差异引起的。

2.3 BET 粒径分析

两种合成方法得到的样品在不同温度下灼烧后测得的比表面、密度以及按球体计算的粒径列于表 2。

表 2 不同温度灼烧后比表面、密度以及按球体计算的粒径

Table 2 Specific surface area, density and BET particle sized after calcined at variant temperatures

Temperature/ °C	Surface area/ (m ² · g ⁻¹)		Density/ (g · mL ⁻¹)		BET particle size/ nm	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
	400	70.09	80.33	4.36	5.68	19.63
500	64.99	63.84	5.08	5.43	18.17	17.31
600	8.27	17.70	6.33	6.33	114.62	53.55
700	4.34	3.89	6.76	6.61	204.51	233.35
800	3.09	2.41	7.15	6.83	271.57	364.51
1 000	2.00	1.50	7.28	7.19	412.09	556.33

随着灼烧温度增大，样品的密度增大，比表面迅速减小。由表 2 可知，BET 方法测得粒径与 X 射

线衍射峰计算的粒径极为接近，这说明形成的颗粒表面较光滑，颗粒空隙少。

2.4 激光散射法粒径分析

用激光散射方法测定的粒径一般称为粉体的团聚粒径，因为它反映了颗粒在运动过程中团聚体的大小。尽管团聚粒径是由一些小的一次粒径组成，但这些小的颗粒由表面分子键粘连在一起，在运动过程中表现为一整体，难以分离。两种合成路线得到的样品在不同温度下灼烧后测得的团聚粒径以及与 BET 粒径的比值列于表 3。

表 3 样品的团聚粒径以及与 BET 粒径的比值

Table 3 Aggregated particle size(*D_A*) and ratio of them to BET particle size(*D_{BET}*)

Temperature/ °C	<i>D_A</i> / nm		<i>D_A</i> / <i>D_{BET}</i>	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
400	340.40	254.6	17.34	19.36
500	371.60	287.9	20.45	16.63
600	344.20	240.5	3.00	4.49
700	313.30	286.8	1.53	1.23
800	321.70	359.3	1.18	0.99
1 000	350.64	441.2	0.85	0.79

一般用团聚粒径与 BET 粒径的比表示粉体的团聚性大小，从表 3 可以看出，尽管在较低温度下由 XRD 和 BET 测得的一次粒径较小，但颗粒的团聚性强，这是由于小的颗粒具有较高的比表面能，通过表面分子键合形成较大的团聚颗粒使表面能降低，体系趋于稳定。当温度较高时，颗粒具有单分散性。比值小于 1，这可能是由于颗粒偏离球形造成的。

2.5 UV 吸收

将样品分散在去离子水中，样品的紫外-可见吸收谱如图 3 所示。由图看出，由于水分子与颗粒表面的结合作用，吸收谱在紫外区没能表现出吸收的精细结构。低温(400~ 600 °C)灼烧的样品在紫外区出现一宽的吸收峰，在 200~ 400 nm 的紫外区具有较高吸收性能，而对大于 400 nm 可见光区具有好的透过性。随灼烧温度升高，最大吸收峰的波长(见表 4)红移。用最大吸收峰的吸光度与 550 nm 处的吸光度比表示对紫外光的吸收性能，结果列于表 4。可以看出，灼烧温度升高，随 CeO₂ 颗粒的烧结，紫外吸收效果明显变差。晶体 CeO₂ 有一个

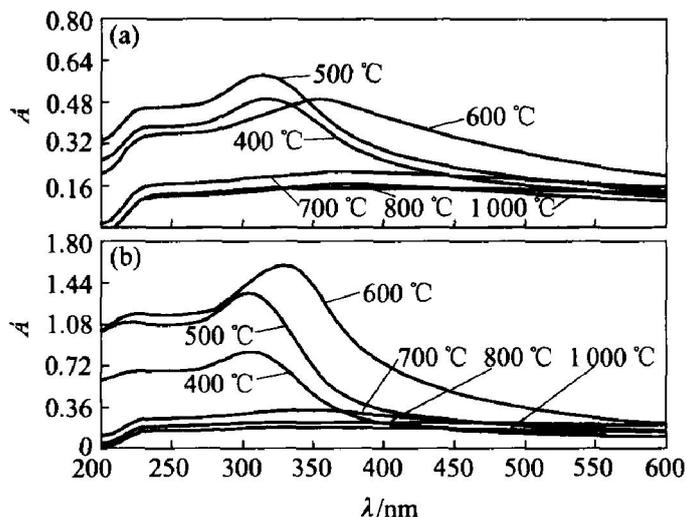


图 3 样品的紫外可见吸收光谱

Fig. 3 UV and visible absorbance spectrum of prepared samples
(a) —Method 1; (b) —Method 2

表 4 不同温度下 CeO₂ 粉体的最大吸收波长和最大吸收强度与 550 nm 处吸收强度比

Table 4 Maximum absorption wavelength of CeO₂ powder and ratio of its maximum absorbance (A_{max}) to that in 550 nm

Temperature/ °C	λ_{max}/nm		A_{max}/A_{550}	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
400	316	305	3.47	6.69
500	318	305	3.51	7.30
600	354	329	2.07	5.64
700	370	350	1.44	1.97
800	374	358	1.27	1.06
1 000	392	364	1.09	1.23

3.1 eV 的能带间隔, 在此能带区电荷转移在紫外区有很强的吸收, 吸收边界 $\lambda = hc/E_g = 1\ 240/3.1 = 400\ nm$ (式中 λ 为吸收波长; h 为 Plank 常数; c 为光速; E_g 为能带间隔)。从吸收峰可以看出, 一次粒径在 10 nm 附近, CeO₂ 对波长小于 400 nm 的紫外光具有很强的吸收。许多文献曾对 CeO₂ 的吸收光谱进行指认, 结果列于表 5。

尽管表 5 中的研究结果对吸收峰的指认有所差异, 但是可以看出 CeO₂ 的紫外吸收大都与表面电荷迁移相关, 因此它们受粒径影响较大, 粒径越小, 表面积越大, 电荷转移数越多, 紫外吸收越强。Bwnslem 等^[13] 研究表明, 类似 CeO₂, ZrO₂ 的半导体材料, 其紫外吸收波长受粒径影响较大, 带间能

表 5 不同文献中指认的 CeO₂ 的电荷转移和对紫外—可见光的吸收光谱

Table 5 Charge transition and UV—vis absorption of CeO₂ in different references

Electron transition	$\lambda\ nm$				
	Ref. [13]	Ref. [14]	Ref. [15]	Ref. [16]	Ref. [17]
Low coordinated surface Ce ³⁺ —O ²⁻ Ce ³⁺ ← O ²⁻	265	250 - 350	255		250
Low coordinated surface Ce ⁴⁺ —O ²⁻ Ce ⁴⁺ ← O ²⁻	280	250 - 350	278		297
Surface Ce ³⁺ / Ce ⁴⁺ C ³⁺ → Ce ⁴⁺	588			588	
Ce ³⁺ surface f → d				200 - 300	208 - 218
CeO ₂ Interband	325	350	320 - 350		320 - 340

量增大, 最大紫外吸收波长蓝移, 这从实验结果中 (图 3) 也能明显地看出。随着晶体颗粒增大, 紫外线激发 CeO₂ 能带间电荷迁移也会明显减少, 因此导致紫外线吸收明显减弱。

实验结果表明, CeO₂ 对紫外线的吸收性能受粉体颗粒的影响较复杂, 它既与粉体的一次晶体粒径 (XRD 粒径或 BET 粒径) 有关, 当一次粒径在 10 nm 左右时, CeO₂ 具有强的紫外吸收效果和可见光穿透性能, 当粉体晶体粒径 (XRD 测得粒径) 在几十或 BET 测得粒径在 100 nm 以上时, 粉体将失去紫外吸收效果。另外, 粉体的紫外吸收效果又受粉体团聚粒径的影响, 分散性越好, 紫外吸收效果越强。但 CeO₂ 粉体的紫外吸收主要是由颗粒的一次粒径决定的, 团聚粒径的大小影响较弱。

3 结论

1) 以 NH₄NO₃ 和 (NH₄)₂CO₃ 作添加剂, 用碳酸氢铵沉淀法可以制备颗粒细、分散好的 CeO₂ 粉体。

2) 超细 CeO₂ 具有很好的紫外线吸收效果, 并对可见光透射性良好。当粉体一次粒径在 10 nm 左右时, CeO₂ 具有强的紫外吸收效果和可见光穿透性能, 当粉体一次粒径在 100 nm 以上时, 粉体将失去紫外吸收效果。

3) CeO₂ 粉体的紫外吸收强度主要受颗粒一次粒径的影响, 团聚粒径对 CeO₂ 粉体也有一定的影

响, 随团聚粒径的减小, 紫外线吸收效果增强。

REFERENCES

- [1] 姜亚昌, 望达健. 纳米 CeO₂ 的制备技术及其紫外线吸收应用[A]. 纳米材料和技术应用进展. 全国第三届纳米材料和技术应用会议集(下)[C]. 南京: 中国材料研究学会, 2003. 788 - 791.
- JIANG Ya-chang, WANG Da-jian. Preparation of nanosized CeO₂ and its application for UV absorption [A]. Progress of Nanostructured Materials and Technical Applications[C]. Nanjing: Chinese Material Research Academic Association, 2003. 788 - 791.
- [2] 高金良. 防紫外线化妆品用氧化铈[J]. 稀土信息, 1997, 8: 11.
- GAO Jin-liang. Cerium dioxide applied for anti-ultraviolet radiation in cosmetic[J]. Rare Earth Information, 1997, 8: 11.
- [3] Ruixing L, Shinryo Y, Yamashita M, et al. Synthesis and UV-shielding properties of ZnO- and CaO-doped CeO₂ via soft solution chemical process[J]. Solid State Ionics, 2002, 151(1 - 4): 235 - 241.
- [4] Shinryo Y, Yamashita M, Shigeyoshi M, et al. Synthesis and UV-shielding properties of metal oxide doped ceria via soft solution chemical processes[J]. International Journal of Inorganic Materials, 2001, 3(7): 1003 - 1008.
- [5] Shinryo Y, Tsugio S. Cerium oxide for sunscreen cosmetics[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2003, 171(1 - 2): 7 - 11.
- [6] Fangxin L, Chengyun W, Qingde S, et al. Optical properties of nanocrystalline ceria[J]. Applied Optics, 1997, 36(13): 2796 - 2798.
- [7] Purohit R D, Sharma B P, Pillai K T, et al. Ultrafine ceria powders via glycine-nitrate combustion[J]. Materials Research Bulletin, 2001, 36(15): 2711 - 2721.
- [8] 张环华, 李秀珍, 潘湛昌, 等. 纳米二氧化铈的制备及应用[J]. 化学工程师, 2002, 89(2): 36 - 38.
- ZHANG Huan-hua, LI Xiu-zhen, PAN Zhan-chang, et al. Application and preparation on liquid phase methods of nanometer CeO₂[J]. Chemical Engineer, 2002, 89(2): 36 - 38.
- [9] 董相廷, 洪广言. 溶胶-凝胶法合成二氧化铈纳米晶[J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(2): 43 - 46.
- DONG Xiang-tiang, HONG Guang-yan. Synthesis of nanocrystalline CeO₂ by sol-gel method[J]. J Chang-chun Univ Sci Tech, 2002, 25(2): 43 - 46.
- [10] Jir-Seok L, Sung-Churl C. Crystallization behavior of nano-ceria powders by hydrothermal synthesis using a mixture of H₂O₂ and NH₄OH[J]. Materials Letters, 2004, 58(3 - 4): 390 - 393.
- [11] 李梅, 柳召刚, 刘铃声, 等. 氧化铈超细粉体的制备研究[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(4): 265 - 267.
- LI Mei, LIU Shaogang, LIU Ling-sheng, et al. Study on the preparation of ultrafine particle sized ceria powder[J]. Journal of the Rare Earth Society, 2003, 21(4): 265 - 267.
- [12] 肖楚民, 潘湛昌, 张环华, 等. 碳酸氢铵沉淀法制备二氧化铈超细粉体[J]. 矿冶工程, 2003, 23(1): 41 - 43.
- XIAO Chu-min, PAN Zhan-chang, ZHANG Huan-hua, et al. Preparation of ultrafine particle sized ceria powder by precipitation method with ammonium bicarbonate[J]. Mining Engineering, 2003, 23(1): 41 - 43.
- [13] Bensalem A, Muller J C, Bozor-Verduraz F. In-situ diffuse reflectance spectroscopy of supported cerium oxide[J]. J Chem Soc, Faraday Trans 1992, 88: 153 - 159.
- [14] Bensalem A, Bozor-Verduraz F, Delamar M, et al. Preparation and characterization of highly dispersed silica-supported ceria[J]. Appl Catal, 1995, A121: 81 - 93.
- [15] Zaki M I, Hussein G A, Mansour S A, et al. Ceria on silica and alumina catalysts: dispersion and surface acid-base properties as probed by X-ray and in situ IR absorption diffractometry, UV-vis diffuse reflectance studies[J]. Colloids Surfaces, 1997, A127: 47 - 56.
- [16] Binet C, Bardi A, Lavalley J C. A comparative UV-vis-diffuse reflectance study on the location and interaction of cerium ions in Al- and Zr-pillared montmorillonite clays[J]. J Phys Chem, 1994, 98: 6392 - 6398.
- [17] Ranga R H, Ranjan S H. XRD and UV diffuse reflectance analysis of CeO₂-ZrO₂ solid solutions synthesized by combustion method[J]. Proc Indian Acad Sci(Chem Sci), 2001, 113(5 - 6): 651 - 658.

(编辑 陈爱华)