



现代化工
Modern Chemical Industry
ISSN 0253-4320, CN 11-2172/TQ

《现代化工》网络首发论文

题目: CeO₂纳米材料的制备与应用研究进展
作者: 赵丹, 梁飞雪, 封瑞江, 鞠佳
收稿日期: 2020-01-15
网络首发日期: 2020-09-28
引用格式: 赵丹, 梁飞雪, 封瑞江, 鞠佳. CeO₂纳米材料的制备与应用研究进展. 现代化工. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2172.TQ.20200928.1024.012.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

CeO₂ 纳米材料的制备与应用研究进展

赵丹, 梁飞雪, 封瑞江*, 鞠佳

(辽宁石油化工大学化工与环境学部, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 综述了 CeO₂ 纳米材料的制备方法, 包括水热法、溶胶-凝胶法、电化学沉积法、沉淀法、微乳液法等, 介绍了 CeO₂ 纳米材料在催化、化学机械抛光、紫外吸收材料、燃料电池、抗氧化生物中的应用研究进展, 并对 CeO₂ 纳米材料的发展方向进行了展望。

关键词: 纳米材料; CeO₂; 制备; 催化应用

中图分类号: O614

Research progress in preparation and application of cerium dioxide nanomaterials

ZHAO Dan, LIANG Fei-xue, FENG Rui-jiang*, JU Jia

(Division of Chemistry, Chemical Engineering and Environment, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: The preparation methods of CeO₂ nanomaterials, including hydrothermal method, sol-gel method, electrochemical deposition method, precipitation method and microemulsion method, were reviewed. The application of CeO₂ nanomaterials in catalysis, chemical mechanical polishing, ultraviolet absorbing materials, fuel cells and antioxidant organisms was introduced. The development trend of CeO₂ nanomaterials was also prospected.

Keywords: nanomaterials; CeO₂; preparation; catalytic applications

铈作为一种廉价、用途极广的镧系元素, 是我国重要的稀土元素。二氧化铈因自身独特的萤石结构, 特殊的储氧和放氧功能, 具有独特的光、电和磁性能, 与传统材料相比具有更多不同的特殊性质^[1]。近年来, CeO₂ 纳米材料应用在越来越多的领域, 在制备方法、形貌控制、应用发展等方面都有重大进展。CeO₂ 纳米复合材料更是成为研究的热点。CeO₂ 纳米材料形貌多样, 张志鑫^[2]通过改变 NaOH 浓度来制备不同形貌纳米 CeO₂, 制备出了棒状、立方体和八面体几种不同形貌的 CeO₂ 纳米催化剂。此外还有菜花形、空心球形、梭形、菱形、三角纳米片、六边形纳米片等不同形貌的纳米 CeO₂ 被合成出来。目前, CeO₂ 纳米材料发展迅速, 被广泛应用。但也存在着很多问题, 如可控地制备出形貌规整、性能良好的复合型 CeO₂ 纳米材料就是面临的难题之一。综述了 CeO₂ 纳米材料的制备方法和应用研究进展, 为后面的研究做准备工作。

1 CeO₂ 纳米材料的制备

随着 CeO₂ 纳米材料的研究发展, CeO₂ 纳米材料的制备方法主要有固相法、气相法和液相法^[3]。固相法是利用固相化学反应得到前驱体, 前驱体经高温分解得到纳米粒子。具有操作方便、产量大等优点; 但其能耗大、效率低、粉体纯度不够。该方法适用于对粉体要求较低的场合。气相法是反应物质发生物理或化学反应, 进而生成纳米级新化合物的一种方法。气相法合成的纳米材料具有晶体纯度高、团聚少等优点, 但产量少, 所需的合成设备昂贵, 不适合大批量生产。液相法主要是通过改变反应过程中的控制参数, 得到不同纳米材料的方法。液相法具有制备形式多样、操作简单, 且纳米材料晶体纯度高、团聚少、可大规模工业生产等优点。液相法不仅被广泛应用于实验室, 更是在工业化生产中被广泛应用的合成方法之一。液相法主要有水热法、溶胶-凝胶法、电化学沉积法、沉淀法和微乳液法^[4]等。

1.1 水热法

水热法是以水或其他溶液为介质, 高温高压密闭条件下制备纳米材料的合成方法。He 等^[5]在一定反应条件下, 通过控制铈源和温度变化制备出不同晶粒大小和形貌的 CeO₂ 晶体, 研究发现 NO₃⁺ 和 Cl⁻ 等阴离子影响晶体的生长, 且晶粒的尺寸也受温度变化的影响。Gao 等^[6]利用水热法制备 CeO₂ 纳米棒, 研究棒状 CeO₂ 的 CO 催化氧化性能, 研究结果表明, 棒状 CeO₂ 因特有的层次结构, 使其对 CO 氧化反应具有良好的催化活性。水热法具有晶体纯度高、分散性好、晶型好等优点。其晶体生长方向发育完整, 所以在化工生产中水热法被广泛应用。但在制备过程中缺乏对 CeO₂ 动态生长的系统研究, 是未来在理论与性能研究方面的重点。

1.2 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是在液相下将原料和前驱体均匀混合，进行水解、缩合等化学反应形成溶胶-凝胶体系，再经陈化、干燥、焙烧等步骤制备出纳米材料。Acosta-Silva 等^[7]利用溶胶-凝胶法制备合成氧化铈，以硝酸铈为原料，乳酸为助剂，研究不同焙烧温度对氧化铈晶粒尺寸的影响以及表面粗糙度和光学性质的变化情况。Voskanyan 等^[8]以固体 SiO_2 为模板剂，采用溶胶-凝胶法制备不同孔径尺寸的多孔 CeO_2 纳米材料，实验通过 SiO_2 胶体的三维空间网络结构来控制 CeO_2 纳米粒子的有序生长，以控制不同孔径尺寸 CeO_2 纳米材料的形成。溶胶-凝胶法制备过程温度要求低，实验过程中可以有效调控微观结构，但溶胶体系形成和陈化时间长，对焙烧温度要求较高。

1.3 电化学沉积法

电化学沉积法是在电场力的作用下，电解质溶液中的阳极和阴极构成电回路，通过氧化还原反应制备纳米材料的一种方法。Zhang 等^[9]以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 、 NH_4Cl 和 KCl 为电解液溶液，在 70°C 条件下分别采用电流密度为 0.44、0.88 mA/cm，反应 2 h，分别得到氧化铈纳米棒和氧化铈纳米线，研究表明，氧化铈纳米棒是由大量的纳米线组合而成的，它们在光催化过程中具有很好的效果。Lu 等^[10]采用电沉积的方法，以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 KCl 和 $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 为电解质原料，合成出多孔氧化铈纳米线，后又通过电沉积法制备出直径约 240 nm 的氧化铈纳米棒。电化学沉积法具有操作简单、反应快速、适用性广等优点，是制备 CeO_2 常用的方法，合成的 CeO_2 纳米材料聚集少，分散性良好。但电解质溶液的化学反应过程比较复杂，难以有效地调控。

1.4 沉淀法

沉淀法是在盐溶液中加入沉淀剂，将所得沉淀物经过过滤、洗涤、干燥和焙烧等处理后得到纳米级氧化物粉末。常用的沉淀法有共沉淀法、直接沉淀法、均相沉淀法、水解沉淀法和配合物分解法等。Liu 等^[11]利用共沉淀法合成 CeO_2/ZnO 纳米复合氧化物，研究表明，纳米复合氧化物 CeO_2/ZnO 具有更强的抗紫外能力和光催化活性。栾宝平等^[12]以六水合硝酸铈为铈源，尿素为沉淀剂，水热合成出纺锤形和花束形 CeO_2 ，通过改变形貌控制剂柠檬酸，制得了球形 CeO_2 。沉淀法具有反应成核快、易控制、操作简单、成本低廉等优点，可以实现工业化生产，但制备的 CeO_2 材料分散性较差。

1.5 微乳液法

微乳液法是指在表面活性剂的作用下，不相溶的溶剂混合形成乳液，经过一系列的工序处理得到的纳米粒子。Pournajaf 等^[13]利用反相微乳液法制备出立方型氧化铈纳米材料，研究不同的煅烧温度对氧化铈性能的影响。Zhang 等^[14]采用微乳液法，以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为铈源，在复合型表面活性剂的条件下制备出了 CeO_2 空心微球。微乳液法中表面活性剂对粒子团聚现象和控制晶粒大小具有非常重要的作用。同时，微乳液法需要大量的表面活性剂，不仅生产成本低，制备的 CeO_2 纳米材料也易含有表面活性剂的残留，研究易回收、无残留的表面活性剂是努力的方向。

1.6 其他制备方法

CeO_2 纳米材料的制备方法还有微波法和燃烧法等。Bezkrvnyi 等^[15]利用微波辅助水热法制备氧化铈纳米晶体，研究 OH^-/Ce 的物质的量对氧化铈的形态和结构的影响变化。史纪峰等^[16]采用硝酸铈的乙醇溶液燃烧法合成含有微量碳的 C- CeO_2 材料，测试结果表明，相同条件下掺杂后材料的电容提高了 2.3 倍，在循环充放 1000 次的情况下，电容保持率仍高达 83%。

2 CeO_2 纳米材料的应用研究

2.1 在催化方面的应用

近年来， CeO_2 纳米材料在催化领域发挥着越来越重要的作用，应用于 CO 氧化、 NO_x 还原和甲醇氧化等催化反应。 CeO_2 复合材料是有效净化汽车尾气排放的催化剂组分，在提高活性涂层的催化性能、储氧和放氧功能、载体热稳定性和助催化作用等方面具有重要意义^[17]。Said 等^[18]采用共沉淀法，成功合成出 $\text{Ce}/\text{CuO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 催化剂应用于 CO 催化氧化。研究表明，掺杂 Ce 的 $\text{CuO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 催化剂表面的储氧能力和电导率都有明显的提高，提高了催化剂的活性。谢桂花等^[19]利用水热法制备出前驱体金属有机框架化合物 (MOFs)，再合成出系列 CuO/CeO_2 催化剂，研究 CuO 含量催化性能的影响。研究表明，不同 CuO 含量的

催化剂都有较高的催化活性，其中 5% CuO/CeO₂ 催化剂对 CO-PROX 催化性能最好。

CeO₂ 纳米材料也是催化臭氧氧化净化工业废水和吸附二氧化硫净化工业废气的重要催化剂。铈基催化剂不仅能延长催化剂的使用寿命，还能促进贵金属的反应活性与分散，在降低贵金属含量、防止重金属污染等方面有好的应用前景^[20]。Huang 等^[21]采用两步水热法制备出 CeO₂/TiO₂ 核-壳纳米结构催化剂，研究 NH₃ 选择性催化还原 NO_x。研究发现，核-壳形 CeO₂/TiO₂ 催化剂具有较大的表面积，对 SO₂ 和 H₂O 的耐受性都比较强，对 SCR 也表现出很强的催化活性。

CeO₂ 在催化应用中可作催化剂，也可作催化剂载体和掺杂的组成，研究发现，CeO₂ 纳米复合材料具有更好的催化性能，在各种 Ce 基催化剂中，Ce-Cu 体系催化剂是研究较多的，其次还有 Mn、Fe、Co、Ni、Ti 等元素的催化剂。在催化应用中，CeO₂ 材料的形貌、晶体尺寸、性能结构等对催化活性、稳定性都有影响。如何可控地制备出理想的 CeO₂ 纳米复合材料是面临的难题之一。

2.2 在化学机械抛光中的应用

CeO₂ 是一种性能优异的抛光粉，其抛光浆料与传统的抛光浆料不同，在碱性抛光条件能同时吸附阴离子和阳离子，是两性的，具有更好的抛光性能。CeO₂ 纳米材料是玻璃抛光最常用的磨料，被广泛应用于玻璃的精密抛光加工工艺中。陈爱莲等^[22]用改进的 Stober 法合成具有放射状孔道的介孔氧化硅微球，并制备包覆型的核壳结构 mSiO₂/CeO₂ 复合粒子，研究对二氧化硅薄膜的抛光效果及氧化硅内核结构对抛光效果的影响因素。王晶等^[23]以碳酸镧铈和碳酸氢铵为原料，分别加入氟化钠、氢氟酸来制备抛光粉，研究氟化物对铈基稀土抛光粉性能的影响。研究表明，2 种氟化物的加入均提高了铈基稀土抛光粉的切削率，但掺入氢氟酸制备的抛光粉抛光效果更好。氧化铈抛光粉的形貌、结构、粒度、化学组成及活性等都是影响抛光效果的因素，近年来，更多的是制备复合型磨料抛光浆料，抛光效果更好。

2.3 在紫外吸收材料中的应用

CeO₂ 在 300~450 nm 范围内有较强的吸收能力，对紫外光的吸收尤为强烈，但对可见光吸收能力几乎为零。其透光性好，可作紫外吸收剂，应用于防紫外线涂料、防晒化妆品、塑料抗老化等方面。研究表明，对紫外光的吸收，纳米 CeO₂ 比 TiO₂ 吸收性能好，是更好的紫外吸收剂。高天佐等^[24]利用共沉淀法制备出块状、近球形、片状和花状的 CeO₂，研究了其对紫外线屏蔽性能的影响，研究表明，纳米级 CeO₂ 较微米级 CeO₂ 具有更强的紫外屏蔽性能。史艳丽等^[25]利用超声技术和沉淀法，在一定条件下制备出含有 Ti⁴⁺ 的纳米 CeO₂，以研究含有 Ti⁴⁺ 的纳米 CeO₂ 的抗紫外性能的影响。研究结果表明，含有 Ti⁴⁺ 的纳米 CeO₂ 的紫外屏蔽范围变大，并且 CeO₂ 的紫外吸光能力变强。

2.4 在燃料电池中的应用

在燃料电池中研究较多的是固体氧化物燃料电池 (SOFC)，燃料电池具有高效率、无污染、寿命长、生产成本低等优点，是清洁燃料之一。莫逸杰等^[26]通过微波辅助法制备 Pt-CeO₂/RGO 催化剂，研究扫描状 CeO₂ 对 Pt 基阳极催化剂电催化性能的影响。研究表明，当 $m(\text{RGO})/m(\text{CeO}_2)=1/2$ 时，Pt-CeO₂/RGO 催化剂的电催化性能最好，电化学活性表面积为 102.83 m²/g，对乙醇氧化的峰值电流密度为 757.17 A/g。徐兴等^[27]以月季茎秆为模板制备 CeO₂-NiO-C 复合材料，研究发现，加入 CeO₂ 的 NiO-C 材料电极的比电容可达 237.1 F/g，经循环测试后，相比较 NiO-C 材料的剩余比电容多出 21%，循环寿命更长，导电性更好。

近年来，燃料电池的发展趋势是低温化，电极材料的性能占有十分重要的地位，掺杂 CeO₂ 的复合材料电极表面会产生较多的电化学活性点，表现良好的催化性能。CeO₂ 不仅是优异的电解质材料，也有效地解决了电池燃烧造成的碳沉积问题；未来，在对燃料电池化学反应机理的深层次研究，以及如何更有效地提高燃料电池使用寿命、降低生产成本等方面是十分重要的。

2.5 在抗氧化生物中的应用

随着纳米科技与现代医学和生物学的交叉与渗透，CeO₂ 基纳米结构材料在抗氧化生物学方面得到越来越多的关注。CeO₂ 作为药物载体进入体内，因 Ce⁴⁺/Ce³⁺ 氧化还原能力，在体内发生的价态变化能够消除体内的自由基抗氧化酶，包括超氧自由基、过氧化氢和羟基自由基等。Kim 等^[28]实验表明，CeO₂ 材料通过缺血脑细胞，在受损脑细胞聚集，降低自由基抗氧化酶的水平，有效减少细胞凋亡数，证明了 CeO₂ 纳米材料可以有效地预防缺血性中风。研究表明，CeO₂ 纳米结构材料可以减少辐射后细胞的死亡率，更是对胃肠道上皮细胞起到保护作用，是辐射治疗过程中的保护剂。Wang 等^[29]合成出核-壳形 Cu₂O/CeO₂ 立方

体催化剂, 相比较纯 CeO_2 或 Cu_2O 催化剂, 在类似过氧化物酶的催化反应中活性更强。

除 Ce-Cu 体系催化剂外, Ce-Co 体系催化剂催化氧化酶活性也受到关注。最近, Bhargava 小组^[30]制备出 Co_3O_4 装饰的 CeO_2 微球催化剂, $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂对 TMB 表现出很好的催化氧化酶活性。 CeO_2 纳米复合材料在治疗肿瘤、神经性疾病等方面有着重要作用, 是一种十分有效的仿酶材料, 但 CeO_2 材料在毒性和生物效应等方面仍存在诸多争议, 为实现 CeO_2 材料的应用, 未来需要更多科学、准确、有效的安全性评价方法。

3 展望

CeO_2 纳米材料在诸多领域被广泛应用, 发挥着越来越重要的作用, 不同形貌的 CeO_2 纳米材料具有不同的性质, 制备方法也不尽相同; 各种制备方法具有不同的优缺点, 水热法是目前实验室最常用的制备方法, 但在制备过程中缺乏对 CeO_2 动态生长系统性的观察和研究; 同时, 如何有效可控地制备特定形貌、晶体尺寸的合成方法一直是研究的热点。随着复合型 CeO_2 纳米材料的应用研究, CeO_2 纳米材料在催化活性、燃料电池和生物医学应用方面得到越来越多的关注, CeO_2 纳米材料的合成具有更多的实用价值, 为了提高 CeO_2 纳米材料的应用价值, 在合成手段、形貌控制、应用性能等方面是未来在理论与性能研究方面的重点。利用综合的优良性能, 解决实际工业化生产中的问题是努力的方向。

参考文献

- [1] Laachir A, Perrichon V, Badri A, *et al.* reduction of CeO_2 by hydrogen[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 1991, 87:1601-1609.
- [2] 张志鑫. 纳米二氧化铈的制备、表征及其催化串联反应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [3] Gao W, Zhang Z Y, Li J, *et al.* Surface engineering on CeO_2 nanorods by chemical redox etching and their enhanced catalytic activity for CO oxidation [J]. Nanoscale, 2015, 7(27):11686-11691.
- [4] 张敬超, 张玉军, 谭砂砾, 等. 纳米二氧化铈的制备与应用[J]. 现代化工, 2014, 24(1): 233-235.
- [5] He H Y, Yang P, Li J, *et al.* Controllable synthesis, characterization and CO oxidation activity of CeO_2 nanostructures with various morphologies [J]. Ceramics International, 2016, 42(6): 7810-7818.
- [6] Gao W, Zhang Z Y, Li J. *et al.* Surface engineering on CeO_2 nanorods by chemical redox etching and their enhanced catalytic activity for CO oxidation [J]. Nanoscale, 2015, 7(27): 11686-11691.
- [7] Acosta-Silva Y J, Castanedo-Perez R, Torres-Delgado, *et al.* Effect of annealing temperature on structural, morphological and optical properties of CeO_2 thin films obtained from a simple precursor solution[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2017, 82:20-27.
- [8] Voskanyan A A, Chan K Y, Li C V. Colloidal solution combustion synthesis: Toward mass production of a crystalline uniform mesoporous CeO_2 catalyst with tunable porosity[J]. Chemistry of Materials, 2016, 28(8): 2768-2775.
- [9] Zhang C, Zhang X Y, Wang Y C, *et al.* Facile electrochemical synthesis of CeO_2 hierarchical nanorods and with excellent photocatalytic activities[J]. New Journal of Chemistry, 2014, 38(6): 2581-2586.
- [10] Lu X H, Zhai T, Cui H N, *et al.* Redox cycles promoting photocatalytic hydrogen evolution of CeO_2 nanorods[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(15): 5569-5572.
- [11] Liu I-Tsan, Hon Min-Hsiung, Teoh Lay Gaik. The preparation, characterization and photocatalytic activity of radial-shaped CeO_2/ZnO microstructures[J]. Ceramics International, 2014, (40):4019-4024.
- [12] 栾宝平, 余锡宾, 刘洁, 等. 不同形貌的 CeO_2 的水热法制备及表征[J]. 上海师范大学学报, 2011, 40(2):157-162.
- [13] Pournajaf R, Hassanzadeh-Tabrizi S A, Jafari M. Reverse microemulsion synthesis of CeO_2 nanopowder using polyoxyethylene(23)lauryl ether as surfactant[J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 8687-8692.
- [14] Zhang D E, Xie Q, Wang M Y, *et al.* O/W/O double emulsion-assisted synthesis and catalytic properties of CeO_2 hollow microspheres[J]. Solid State Sciences, 2010, 12(9): 1529-1533.
- [15] Bezkrvnyi O S, Lisiecki R, Kepinski L. Relationship between morphology and structure of shape-controlled CeO_2 nanocrystals synthesized by microwave-assisted hydrothermal method[J]. Crystal Research & Technology, 2016, 51(10):554-560.

- [16] 史纪峰, 孙明轩. 一步乙醇燃烧法合成 CeO₂ 超级电容器电极材料[J]. 现代化工, 2019, 39(6): 162-165.
- [17] 吕广明, 王艳杰, 刘瑞, 等. 纳米氧化铈的抗氧化生物应用[J]. 中国科学:化学, 2013(10): 1309-1321.
- [18] Said Alod-EI-Aziz A, El-Wahab M M M A, Goda M N. Synthesis and characterization of pure and (Ce, Zr, Ag) doped mesoporous CuO-Fe₂O₃ as highly efficient and stable nanocatalysts for CO oxidation at low temperature[J]. Appl Surf Sci, 2016, 390: 649-665.
- [19] 谢桂花, 朱冰, 袁文兴, 等. Cu(tpa) (dmf)为前驱体制备 CuO/CeO₂ 催化剂及其 CO 优先氧化性能研究[J]. 江西化工, 2019, (6): 119-121.
- [20] 袁慎忠, 鞠文鹏, 张燕, 等. 纳米氧化铈的制备及其催化性能的研究[J]. 中国稀土学报. 2003, 21(12): 84-56.
- [21] Huang B J, Yu D Q, Sheng Z Y, *et al.* Novel CeO₂@TiO₂ core-shell nanostructure catalyst for selective catalytic reduction of NO_x with NH₃[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 55(5):129-136.
- [22] 陈爱莲, 李泽锋, 陈杨. 氧化硅内核结构对核/壳包覆性 SiO₂/CeO₂ 复合颗粒抛光性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(6): 430-436.
- [23] 王晶, 金彦章, 王振波. 氟化物掺入对稀土抛光粉性能的影响[J]. 无机盐工业, 2019, 51(4): 37-41.
- [24] 高天佐, 于晓丽, 张玉玺, 等. 不同形貌二氧化铈的制备及其紫外屏蔽性能研究[J]. 湿法冶金, 2018, 37(6): 497-500.
- [25] 史艳丽, 张金生, 李丽华, 等. Ti⁴⁺掺杂纳米 CeO₂ 的制备及其抗紫外性能[J]. 稀土, 2012, 33(3): 60-63.
- [26] 莫逸杰, 郭瑞华, 安胜利, 等. 扫帚状氧化铈制备及其对 Pt 基阳极催化剂催化性能的影响[J]. 无机化学学报, 2018, (11): 1991-1999.
- [27] 徐兴, 陈志刚, 钱君超, 等. CeO₂-NiO 纳米晶的电化学性能研究[J]. 苏州科技大学学报:自然科学版, 2019, 36(2): 36-40.
- [28] Kim C K, Kim T, Choi I Y, *et al.* Ceria nanoparticles that can protect against ischemic stroke[J]. Angew Chem Int Ed, 2012, 51(44): 11039-11043.
- [29] Wang X, Liu D P, Li J Q, *et al.* Clean synthesis of Cu₂O@CeO₂core@shell nanocubes with highly active interface[J]. NPG Asia Mater, 2015, 7(1):7-19.
- [30] Jampaiah D, Srinivasa Reddy T, Coyle V E, *et al.* Co₃O₄@CeO₂ hybrid flower-like microspheres: a strong synergistic peroxidase-mimicking artificial enzyme with high sensitivity for glucose detection[J]. Chem, 2017,5: 720-730.

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-08-29

作者简介: 赵丹 (1993-), 女, 硕士生; 封瑞江 (1961-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为石油化工新材料研发, 通讯联系人, frj610620@163.com。