

文章编号: 1006-9941(2005)05-0344-05

## 固体推进剂用纳米燃烧催化剂制备研究新进展

王 晗, 赵凤起, 高红旭

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 综述了固体推进剂用纳米燃烧催化剂制备方法的最新研究进展, 讨论固相反应法、电解法、水热法、沉淀法、溶胶-凝胶法、微乳液法制备纳米粒子的优缺点, 指出了固体推进剂用纳米催化剂制备研究中存在的问题, 今后纳米燃烧催化剂制备方法发展的方向及研究重点: (1) 发展和完善现有制备工艺, 寻求适合工业化生产的高效、廉价制备途径; (2) 深入地研究纳米结构和性质以及制备机理; (3) 纳米催化剂表面改性和修饰技术研究; (4) 推进剂用绿色纳米有机催化剂、含能纳米有机催化剂, 以及由一些新型碳材料比如碳纳米管、C<sub>60</sub>等制备的复合纳米催化剂。

**关键词:** 材料学; 固体推进剂; 纳米; 燃烧催化剂; 制备方法; 综述

**中图分类号:** TJ763; TQ560.4

**文献标识码:** A

### 1 引 言

固体推进剂的燃烧过程是一个复杂的传质传热过程, 它的燃速主要取决于氧化剂和可燃物的接触面积以及燃烧催化剂的催化效果。在固体推进剂中常用的燃烧催化剂有铜、铅、铁、铬、钛、铋、锡等金属的部分氧化物和有机酸配合物。虽然这些燃烧催化剂在推进剂配方中用量不多, 但对燃速影响极大<sup>[1,2]</sup>。国内外研究表明, 将燃烧催化剂的粒度从毫米级超细化到纳米级, 并进行适当的复合处理, 可大幅度提高推进剂燃速。因此固体推进剂用纳米燃烧催化剂近年来成为燃烧催化剂研究的热点, 研究领域主要涉及制备、微观结构、宏观物性和应用四个方面。其中纳米燃烧催化剂制备最为关键。传统纳米燃烧催化剂的制备方法主要有还原法、沉淀法、溶胶-凝胶法、水热法、溶剂热法等。近年来在这些传统制备方法基础之上又发展了一些新的方法, 呈现出物理方法和化学方法以及物理方法、化学方法联用的趋势。本文综述了近年来金属氧化物和金属有机配合物纳米燃烧催化剂制备方法的研究进展及各种方法的优缺点, 指出固体推进剂用纳米燃烧催化剂制备研究中存在的问题, 展望了纳米燃烧催化剂的发展前景。

### 2 固体推进剂用纳米燃烧催化剂的制备方法

#### 2.1 固相反应法

固相反应法是制备固体推进剂用燃烧催化剂的一

种传统方法。该法设备和工艺简单, 产率高、成本低。但制成的燃烧催化剂粒径很难小于 1 μm, 分布不均匀、易团聚。周益明<sup>[3]</sup>在传统固相法的基础上开发出了适合制备纳米级燃烧催化剂的室温固相反应法。此法可在室温下得到纳米级燃烧催化剂, 有产率高、节能、污染小等优点, 符合合成绿色催化剂的要求, 得到的纳米催化剂表面粗糙、比表面能高、催化活性也较高。但是和传统固相法一样纳米粒子易团聚。洪伟良等<sup>[4]</sup>对室温固相反应法作了进一步改进, 加入分散剂解决了纳米粒子易团聚问题, 改进后的室温固相反应法成为制备固体推进剂用纳米燃烧催化剂的先进方法。目前洪伟良、赵凤起等利用室温固相反应法已制备出纳米复合物(*n*-TPCC)等 20 多种纳米燃烧催化剂, 高红旭<sup>[5]</sup>制备出多种复合纳米氧化物, 粒径均在 10~50 nm 之间。这些纳米粒子在双基推进剂中的应用研究证明<sup>[6]</sup>, 此法制备的纳米燃烧催化剂 *n*-TPCC 经过包覆后, 能使某些双基推进剂在低压下燃速提高 2~3 倍, 压强指数下降, 并出现平台和负压强指数; 而且用此方法制备的复合纳米粒子的催化效率普遍高于单一组分的纳米粒子。

#### 2.2 电解法

电解法是一种有发展前途的制备固体推进剂用纳米燃烧催化剂的方法。此法制得的纳米氧化物粒子纯度高, 粒度小(可达到几个纳米), 且成本低, 适于扩大实验和工业生产; 不足之处在于电解液的废料对环境污染严重。

近几年电解法又有了以下新进展。刘英麟<sup>[7]</sup>等开发出了制备纳米氧化物的阴极电沉积法。该法先进之处在于在电解液中引入二甲基亚砷溶液, 用溶液中

收稿日期: 2005-06-30; 修回日期: 2005-07-19

基金项目: 国防科技重点实验室基金(No. 5155030205ZS3505)

作者简介: 王晗(1973-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事固体推进剂催化性能研究。e-mail: npecc@21cn.com

溶解的氧气作为合成氧化物的氧源,使制得的纳米氧化物粒子不含—OH,不易团聚;而且具有沉积速率高、可低温操作、成本低、适合大规模工业生产的优点。缺点是对环境也有污染。

王瑞华<sup>[8]</sup>等设计了一种全新的高压电解法,制备出了平均粒径为2~3 nm的纳米氧化物。此法创新之处在于,高电压条件下,在乙醇中电解纯金属板,避免了水解过程和副产品产生,沉积出了纳米氧化物颗粒,使产品达到了催化剂所需的高纯度的要求。这一制备技术避免了传统电解制备方法给环境带来污染的问题,符合绿色催化剂合成的要求,并且具有原料便宜、设备简单、条件温和、对环境友好的优点。

周幸福<sup>[9]</sup>等采用牺牲阳极法,以乙醇、酰丙酮等溶剂为电解液,首次在无隔膜的电解槽中电解金属铜和锡,一步制备了多种铜和锡的醇盐以及其它含铜和锡配合物的前驱体,并进一步水解得到了具有燃烧催化功能的纳米CuO和纳米SnO<sub>2</sub>。此法首次通过一步电解得到了纳米CuO和纳米SnO<sub>2</sub>的前驱体,克服了传统电解法合成纳米氧化物前驱体步骤多、产率低、纯度达不到要求以及后续处理繁琐等缺点。

### 2.3 水热法

水热法也是制备固体推进剂用纳米燃烧催化剂的方法之一。用此方法制得纳米燃烧催化剂位错密度低,晶型好,纯度高,分散性好;且纳米催化剂颗粒大小可控;也可制备其它方法难以获得的某些物相。因此,水热法是合成纳米氧化物燃烧催化剂的一种较好方法。研究者利用此法加工了许多纳米氧化物粉体。例如TANIE<sup>[10]</sup>以水热法合成了具有燃烧稳定功能的纳米ZrO<sub>2</sub>。朱俊武<sup>[11]</sup>等以乙酸铜为原料,通过水热法方便地制备了直径为8~15 nm的针状纳米CuO。实验证实此针状纳米CuO可提高某火药体系的燃速达30%~40%,改善其燃烧性能。

近几年水热法和其它方法相结合也发展了一些新方法,例如均匀沉淀-水热法。此工艺过程易于控制,制备的粉体粒径小(粒度在4~5 nm之间)、分布窄、晶型稳定、纯度较高。再比如高压热晶法,综合了溶胶-凝胶法和水热法的优点。微波水热法将微波技术引入了水热法。它的优点在于通过微波内部加热,可在短时间内提供足够的能量,克服了常规水热法由外及内的加热不均匀的缺点,还可加速分子或离子的极化,促进金属离子的水解,能够在短时间内能获得高浓度的纳米氧化物的前驱体溶胶,从而缩短了体系的反应时间。

### 2.4 沉淀法

直接沉淀法是制备纳米燃烧催化剂的普遍方法,广泛用于合成纳米氧化物和金属-有机酸配合物。该法的优点是反应过程简单、成本低,便于推广和工业化生产。缺点是制得的纳米催化剂粒径不易控制,颗粒大小不均匀。为了避免该现象,近年来多采用均匀沉淀法来制备金属氧化物粉体。均匀沉淀法是利用某一化学反应使溶液中的构晶离子从溶液中缓慢地释放出来,使沉淀在整个溶液中缓慢地生成。这种方法既改进了直接沉淀法存在的反应物混合不均匀、反应速率不可控等缺点,又使沉淀物的颗粒均匀而致密,实现了对纳米金属氧化物的粒度控制,从而使其具有工业化生产的前途。陈继智<sup>[12]</sup>利用此法制备了纳米级PbCO<sub>3</sub>。共沉淀法是制备含有两种以上金属元素纳米复合燃烧催化剂的重要方法。这种方法易于实现复合燃烧催化剂组分设计和控制。洪伟良<sup>[13]</sup>等利用共沉淀法已制备出了纳米Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SnO<sub>2</sub>、MgO·SnO<sub>2</sub>等复合燃烧催化剂,对双基推进剂都有一定的燃烧催化作用。

近年来,也出现了一些新型沉淀法。微波诱导均匀沉淀法借助微波特有的加热方式和促进离子水解以及分散功能,可在短时间内制得粒度达到几个纳米的、可用作燃烧催化剂的纳米氧化物粒子。超声技术引入沉淀法是沉淀法的重大革新,Kumar R. V.<sup>[14]</sup>以超声沉淀法研制了CuO纳米材料。该法也适用于其他过渡金属氧化物,如ZnO、CO<sub>3</sub>O<sub>4</sub>等。此法可实现介质均匀混合,提高反应速度,有利于微小颗粒的形成,对各种反应介质都有很强的通用性,而且改变溶剂可获得不同尺寸、形貌和产率的目标产物,遗憾的是产率低,设备昂贵。

液相分散沉淀法是洪伟良、赵凤起等人首次开发的制备金属-有机酸配合物纳米燃烧催化剂的一种新方法<sup>[15]</sup>。该方法依据的是金属-有机酸配合物分子中的有机基团具有亲油性,能与固体推进剂中的NC、NG、粘结剂等有机组分很好相容,且能在固体推进剂中很好分散,并且不需进行表面修饰的性质。目前洪伟良等人以芳香羧酸和高级脂肪酸为配体,已成功制备出九种金属-有机酸配合物纳米燃烧催化剂。双基推进剂应用证实,其中两种金属-有机酸配合物纳米粒子是高效的宽平台燃烧催化剂,能显著提高燃速,降低压强指数。此研究为固体推进剂用纳米级燃烧催化剂的研制提供了新途径,迄今国内外仍未有文献报道,属首创。

### 2.5 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法(sol-gel)也是一种制备固体推进剂用纳米金属氧化物燃烧催化剂的传统方法。此方法工

艺简单,可控制产物的组分,所得纳米粒子粒径小、分散性好、纯度高,具有较高的烧结性。因此它是制备纳米材料的优秀方法。但此法也存在成本高、所用有机溶剂有毒性、合成周期长以及不易制备碱金属纳米氧化物等缺点。近年来又开发了以金属无机盐为前驱体的溶胶-凝胶法,降低了生产成本。

溶胶-凝胶法与其他方法结合是该方法的重大改进。溶胶-凝胶-超临界流体干燥法,成功实现了一步完成醇凝胶在乙醇超临界状态(262 °C, 815 MPa)下的干燥晶化,再经焙烧得到纳米金属氧化物。此法制备的纳米粒子具有粒径小、分布窄、比表面积大、分散性好和催化活性高的优点。连进军<sup>[16]</sup>将冷冻干燥技术与溶胶-凝胶法相结合开发出了溶胶-凝胶-冷冻干燥法,并制备粒度分布均匀、形状规则、粒径在 10 nm 左右的纳米 SnO<sub>2</sub>。此法不仅很好地解决了凝胶干燥过程中粉体团聚的问题,也避免了其他方法(如胶体化学法)在制备过程中因添加阴离子表面活性剂和有机溶剂,而引入不易除去的杂质,从而影响产品质量的缺陷。溶胶-凝胶自燃烧合成法是近年来纳米燃烧催化剂合成技术研究所取得的重要突破。它是以无机盐和有机酸为原料,具有成本低、工艺简单、易操作以及所得纳米粒子粒径均匀的优点。这些方法都是制备固体推进剂用纳米金属氧化物燃烧催化剂的好方法。

近几年来研究用碳纳米管(CNTs)吸附凝胶,再经灼烧而得到纳米金属氧化物/CNTs 固体推进剂用燃烧催化剂已成为一个热点。碳纳米管(CNTs)<sup>[17-19]</sup>拥有的纳米级管腔结构、较高的表面积、表面能和表面结合能及类石墨的多层管壁等结构和性质,导致了纳米金属氧化物/CNTs 具有较高活性、选择性和稳定性<sup>[20-22]</sup>。因此它在作固体推进剂的燃烧催化剂方面有着良好的应用前景。目前李悦<sup>[23]</sup>等通过 sol-gel 法在碳纳米管上吸附 Ni(OH)<sub>2</sub> 凝胶,经灼烧得到纳米 NiO<sub>2</sub>/CNTs 的复合物。邹勇<sup>[24]</sup>利用此法制备了剂-BaO/CNTs。

## 2.6 微乳液法

微乳液法是近期刚开始研究和应用的制备固体推进剂用纳米燃烧催化剂的一种新方法。微乳技术制备粉体纳米催化剂的一般方法是,将合成催化剂的反应物溶于微乳液中,在剧烈搅拌的条件下,反应物在水核内进行化学反应(包括沉淀反应,氧化、还原反应,水解反应等)且产物在水核内成核、生长。当水核内的粒子长到最后尺寸,表面活性剂就会附在粒子的表面,使粒子稳定并防止其进一步长大。反应完成后,通过离心分离或加入水和丙酮等有机溶剂,以除去附在粒子表面的

油和表面活性剂,然后在一定温度下干燥、焙烧,即得到纳米粉体催化剂产品。高保娇<sup>[25]</sup>通过反相微乳液制备了超微镍粉。邓鹏图<sup>[26]</sup>利用微乳液法制备了纳米 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,并研究了它对复合推进剂燃烧性能的影响。Ki C S<sup>[27]</sup>用该方法合成了粒径小于 40 nm 的 SO<sub>2</sub>。贺拥军<sup>[28]</sup>将微乳液法和均匀沉淀法相结合开发了微乳液-均匀沉淀耦合法。此法综合了微乳液法和均匀沉淀法的优点,能够合成粒径分布较窄的纳米氧化物粒子。

## 3 讨论及展望

制备纳米燃烧催化剂的方法不断在发展,其目标是制备出粒径小、纯度高、分散性好、易于工业化生产的纳米粒子。但从上所述可看出现有的各种制备方法各有优点和不足:(1)从传统的固相反应法发展而来的室温固相反应法具有设备和工艺简单、催化活性高等优点。但是室温固相反应法粒径分布较大,粒径控制问题需进一步研究、解决,而且也不适合工业化生产;(2)电解法以及它的一些发展方法制得的纳米氧化物粒子纯度高,粒度小(可达到几个纳米),而且成本低,适合于扩大实验和工业生产;不足之处在于电解液的废料对环境或多或少都有污染,在今后的研究中需解决环境污染问题;(3)水热法以及一些新型水热法制得纳米燃烧催化剂位错密度低,晶型好,粒径小,纯度高,分散性好,且纳米催化剂颗粒大小可控。它是目前比较适合工业化生产的方法;(4)各种沉淀法反应过程简单、成本低,便于推广和工业化生产。但需解决纳米催化剂粒径控制和团聚问题。今后的研究中应重点发展将一些微波、超声等特有的加热方式和冷冻干燥技术等粉体处理技术引入的新型均匀沉淀法;(5)溶胶-凝胶法是制备纳米材料的优秀方法。但此法也存在成本高、所用有机溶剂有毒性、合成周期长、粉体团聚以及不易制备碱金属纳米氧化物等缺点。今后的研究中需大力发展溶胶-凝胶法与其他方法结合的一些廉价、高效、环保的新方法;(6)虽然微乳液法制得的纳米燃烧催化剂粒径小,分布窄,表面活性高,不易团聚。但目前不适合工业化生产,也不符合环保要求。今后微乳技术同其它技术有机结合成高效、廉价、绿色的微乳体系将是微乳技术的发展方向。

可看出以上所述的各种制备方法没有一种方法真正满足工业化生产的高效、廉价、环保的要求。而且目前的制备研究中仍有许多理论和实践问题有待解决。这些问题主要是,各种制备技术中具体工艺条件的影响、纳米催化剂的生成机理、环保化制备装置以及纳米

的催化剂收集和存放问题缺乏足够的研究。但是从目前各种方法之间联用的趋势来看,今后可能出现的新的纳米粒子制备方法将是各种方法的有机结合、能满足工业化生产要求的方法。因此笔者认为今后的研究重点是:(1)为制备研究奠定坚实理论基础,必须深入地研究纳米结构、性质以及制备机理;(2)发挥现有的各种制备方法的优点,将各种方法有机结合寻求适合工业化生产的高效、廉价、环保的制备途径;(3)为了提高纳米粒子分散性和催化活性,应积极开展纳米催化剂表面改性和修饰技术的研究;(4)为了适应固体推进剂环保化、高能的要求,必须进行的绿色纳米有机催化剂、含能纳米有机催化剂,以及它们和一些新型碳材料比如碳纳米管、 $C_{60}$ 等的复合纳米催化剂的研究。

#### 参考文献:

- [1] 赵凤起,陈沛,杨栋,等. 纳米金属粉对 RDX 热分解的影响[J]. 南京理工大学学报,2001,25(4): 420-423.  
ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, YANG Dong, et al. Effect of nanometer metal powder on thermal decomposition characteristic of RDX [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2001, 25(4): 420-423.
- [2] 高红旭, 赵凤起, 李上文, 等. 纳米  $PbTiO_3$  的制备及其燃烧催化性能[J]. 纳米科技, 2004(3): 18-22.  
GAO Hong-xu, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Synthesis of nano-sized  $PbTiO_3$  and its combustion catalyzing properties[J]. *Nanoscience & Technology*, 2004, (3): 18-22.
- [3] 周益明, 折新泉. 低热固相合成化学[J]. 无机化学学报, 1999, 15(3): 273-192.  
ZHOU Yi-ming, QI Xing-quan. Solid phase synthesise at low temperature [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 1999, 15(3): 273-192.
- [4] 洪伟良, 赵凤起, 刘剑洪, 等. 制备纳米氧化铜的新方法[J]. 火炸药学报, 2000, 23(3): 7-9.  
HONG Wei-liang, ZHAO Feng-qi, LIU Jian-hong, et al. A new preparation method of nanometer size copper oxide[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2000, 23(3): 7-9.
- [5] 高红旭. 纳米催化剂的制备及其在微烟推进剂中的应用研究[D]. 西安: 西安近代化学研究所, 2004.  
GAO Hong-xu. Preparation of nanocatalyst and application study on few smoke propellants[D]. Xi'an: Xi'an Morden Chemistry Institute, 2004.
- [6] 赵凤起, 洪伟良, 陈沛, 等. 纳米催化剂对双基系推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2004, 27(3): 13-16, 20.  
ZHAO Feng-qi, HONG Wei-Liang, CHEN Pei, et al. Effect of nanocatalyst on the combustion properties of DB/RDX-CDMA propellants[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2004, 27(3): 13-16, 20.
- [7] 刘英麟, 刘益春, 王维彪, 等. 一种新的制备 ZnO 纳米粒子的方法: 阴极电沉积法[J]. 发光学报, 2003, 24(3): 289-291.  
LIU Ying-lin, LIU Yi-chun, WANG Wei-biao, et al. A new method of growing nanocrystalline ZnO films: Cathodic electro deposition [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2003, 24(3): 289-291.
- [8] 王瑞华, 李怀祥, 张华, 等. 制备纳米发光氧化锌的新方法[J]. 纳米材料与结构, 2004, (2): 23-25  
WANG Rui-hua, LI Huai-xiang, ZHANG Hua, et al. A novel method for preparing Zinc oxide nanoparticles with photoluminescence at room temperature[J]. *Nanomaterial & Structure*, 2004, (2): 23-25.
- [9] 周幸福, 赵俊峰, 何惠, 等. 电化学合成铜配合物的研究[J]. 化学学报, 2004, (1): 106-108.  
ZHOU Xing-fu, ZHAO Jun-feng, HE Hui, et al. Direct electrochemical preparation of copper complexes [J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2004, (1): 106-108.
- [10] SHIMURA S. Formation of ultra fine tetragonal zirconia powder under hydrothermal conditions[J]. *J Am eram Soc*, 1983, 66(1): 11213.
- [11] 朱俊武, 陈海群, 郝艳霞, 等. 针状纳米 CuO 的制备及其催化性能研究[J]. 材料科学与工程, 2004, 22(89): 334-336.  
ZHU Jun-wu, CHEN Hai-qun, HAO Yan-xia, et al. Preparatoin of needle nano-sized CuO and study on its catalysis properties[J]. *Science of Material and Engineering*, 2004, 22(89): 334-336.
- [12] 陈继智, 矫庆泽. 纳米级  $PbCO_3$  的制备与应用[J]. 无机化学学报, 2004, 20(8): 980-982.  
CHEN Ji-zhi, JIAO Qing-ze. Preparation and application of nano-size  $PbCO_3$  [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2004, 20(8): 980-982.
- [13] 洪伟良, 赵凤起, 刘剑洪, 等. 纳米  $Bi_2O_3 \cdot SnO_2$  制备及对 RDX 热分解特性研究[J]. 火炸药学报, 2002, 26(1): 37-39, 46.  
HONG Wei-liang, ZHAO Feng-qi, LIU Jian-Hong, et al. Synthesis of nanocomposite  $Bi_2O_3 \cdot SnO_2$  and its effect on thermal decomposition of RDX [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2002, 26(1): 37-39, 46.
- [14] Fendler J H, Dekany I. Nanoparticles in Solids and Solutions [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [15] 洪伟良, 赵凤起, 刘剑洪, 等. 邻苯二甲酸  $Pb(II)$  配合物纳米颗粒的合成及其燃烧催化性能研究[J]. 无机化学学报, 2004, 20(8): 996-1000.  
HONG Wei-liang, ZHAO Feng-qi, LIU Jian-hong, et al. Synthesis and combustion catalytic activity of nanoparticle  $Pb(II)$ -Phtalate complex [J]. *Chinese Journal of Inorganic chemistry*, 2004, 20(8): 996-1000.
- [16] 连进军, 李先国, 冯丽娟, 等. 溶胶-凝胶-冷冻干燥技术制备纳米二氧化锡及其表征[J]. 化学世界, 2004, (4): 171-174.  
LIAN Jin-jun, L I Xian-guo, FENG L i-juan, et al. Nanometer-scale stannic oxide from soL-gel-freeze drying process and its characterization [J]. *World of Chemistry*, 2004, (4): 171-174.
- [17] Lijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, 354: 56-58.
- [18] Ebbesen T W, Hiura H, Bisher M E. Decoration of carbon nanotubes [J]. *Adv Mater*, 1996, 8(2): 155.
- [19] Tomblor T W, Zhou C M, Alexsetev L, et al. Reversible electromechanical characteristics of carbon nano tubes under local-probe manipulation [J]. *Nature*, 2000, 405: 769-772.
- [20] Ajayan P M, Iijime S. Capillarity induced filing of carbon nano tubes [J]. *Nature*, 1993, 361: 333-334.
- [21] Guerret C, LeBouar Y, Loseau A. Relation between metale lectronics tructure and morphology of metal compound sin-side carbon nano tubes [J]. *Nature*, 1994, 372: 761-764.

- [22] Ajayan P M, Stephan D, Redlich Ph, et al. Carbonnanotubes [J]. *J Am Chem Soc*, 1994, 116: 7935 - 7936.
- [23] 李悦, 陈艾, 梁逵, 等. 碳纳米管/ $\text{NiO}_2$  复合电极超大容量离子电容器[J]. *电子元件与材料*, 2003, 22(6): 3 - 6.  
LI Yue, CHEN Ai, LIANG Kui, et al. Super-ionistors: Composite electrodes of carbon nano tube and nickel oxide [J]. *Electronic Components & Material*, 2003, 22(6): 3 - 6.
- [24] 邹勇, 刘吉平. 碳纳米管负载氧化钡催化剂的制备及性能[J]. *贵州化工*, 2004, 29(2): 1 - 3.  
ZOU Yong, LIU Ji-ping. Study on preparation and properties of carbon nano tube supported barium oxide [J]. *Gui zhou Chemical Industry*, 2004, 29(2): 1 - 3.
- [25] 高保娇, 高建峰, 周加其, 等. 超微镍粉的微乳液制备研究[J]. *无机化学学报*, 2001, 17(4): 491 - 495.  
GAO Bao-jiao, GAO Jian-feng, ZHOU Jia-qi, et al. [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2001, 17(4): 491 - 495.
- [26] 邓鹏图. 超细  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的制备方法 [P]. 专利号: 97107927.7.  
DENG Peng-tu. Preparation of ulyrafine  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [P]. Patent no: 97107927.7.
- [27] Ki chang song. Preparation of nanosize tin oxide partacle from water-in-oil microemulsions [J]. *J Colloid Interface Sci*, 1999, 212: 193 - 196.
- [28] 贺拥军, 扬伯伦. 草酸锌纳米粒子合成动力学 [J]. *高校化学工程学报*, 2004, 18(4): 437 - 441.  
HE Yong-jun, YANG Bo-lun. Studies on the kinetics of synthesis of Zinc oxalate nano paiticles [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2004, 18(4): 437 - 441.

## Development in the Preparation of Nano-scale Combustion Catalysts Used in Solid Rocket Propellant

WANG Han, ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The latest development in the preparation of nano-scale combustion catalysts used in solid propellant was reviewed. Advantages and disadvantages of solid phase reaction method, electrolysis method, hydrothermal reaction method, precipitation method, hydrolysis method, sol-gel method and micro-lacteous method were stated and compared. The problems existed in the preparation study of nano-scale combustion catalysts used in solid propellant, the research directions of the preparation study and emphases in the future were also pointed out.

**Key words:** material science; solid propellant; nano-scale; combustion catalyst; preparation method; review



### 《军事装备润滑剂应用技术》介绍

《军事装备润滑剂应用技术》(ISBN7 - 118 - 04103 - 3), 国防工业出版社 2005 年 9 月出版, 中国人民解放军第二炮兵工程学院王焯军教授、第二炮兵某部曹小平高级工程师等编著。主要著述了军事装备润滑油、润滑脂、固体润滑剂、特种液的应用, 军事装备润滑剂的选择与更换、质量分析、鉴别方法和储运管理, 废军事装备润滑剂的处理与再利用, 以及外军装备润滑剂的应用现状和发展趋势等。

该书是军内外首部全面、系统介绍军事装备润滑剂应用技术知识的著作, 是部队开展装备维修、维护保养和完成作战训练任务的基础, 该书的出版对于军事装备润滑剂筹措、储备和使用的标准化、制度化, 避免盲目采购、供需脱节和积压浪费等具有积极作用。著者结合多年从事教学、科研及装备润滑剂管理工作的实践, 尤其是融合著者对军事装备润滑剂新旧型号代用难题多年研究的成果, 提出了许多新理论、新观点以及应用新技术, 对海军、陆军、空军、二炮都极具实用价值, 且指导性、可操作性强, 军事效益显著。

本书可作为军事装备管理及技术人员的参考书, 同时可作为高等军事院校本科生教材或研究生和教师的参考用书。

(第二炮兵工程学院 张有智 供稿)