

纳米技术在耐火材料中的应用及研究进展

赵惠忠^{1,2}, 汪厚植^{1,2}

(1. 武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 湖北 武汉, 430081;
2. 武汉科技大学纳米材料与技术中心, 湖北 武汉, 430081)

摘要: 纳米技术作为一门新的技术, 近十年来在耐火材料研究领域得到了迅速发展。归纳国内外最新的相关文献资料, 总结这一新技术在耐火材料领域的研究概况及研究成果, 提出纳米技术在今后一段时期研究的重点和努力方向。

关键词: 纳米技术; 纳米复合耐火材料; 纳米材料

中图分类号: TQ050.4+7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3090(2008)03-0242-05

纳米尺度范围内的研究作为一门科学技术, 始于 20 世纪 80 年代末。它所研究的对象是人们很少涉及的既非宏观又非微观的中间领域——被人们称为介观领域。这个领域是一个相对独立的物质层次。对这一物质层次的研究, 必将为人类全面、系统地认识世界展现新的视野和内涵。

随着科技进步的日益加快和对纳米技术广泛而又深入的研究, 作为高新技术, 纳米技术得到了迅速发展和广泛应用, 并越来越深入地影响和改变着人们的生产、生活及思维方式, 而对经济、政治及社会的影响则更多地体现在各国间对纳米技术及应用的激烈竞争上。耐火材料是材料学科的一个分支, 它一直伴随着高温技术和材料学科的进步而发展。如何应用高新技术来提升耐火材料的性能, 一直是广大耐火材料工作者关注的问题。笔者在自己工作的基础上, 进一步搜集国内外相关文献资料, 从技术的角度综述了纳米技术在耐火材料中的应用及研究进展。

1 纳米技术与纳米材料

1.1 纳米技术

从字面上讲, 纳米技术即纳米尺度的科学和技术^[1]; 从专业层面上来讲, 纳米技术是在纳米尺度范围内研究物质的特性和相互作用, 以及利用这些特性进行多学科交叉研究的科学与技术^[2]; 从技术体系上来讲, 纳米技术是指在纳米尺度范围内对物质进行制备、研究和工业化, 以及利用纳米尺度物质进行交叉研究和工业化应用的一门综

合性技术体系^[3]。

国际上公认 0.1~100 nm 为纳米尺度空间。为研究工作方便, 把尺寸 0.1~1 μm 视为亚微米体系, 按尺寸 1~100 nm 划分纳米体系, 若典型尺寸小于 1 nm 则称为团簇^[4]。

纳米材料技术(包括纳米相材料技术和纳米复合改性技术)是利用纳米颗粒性能的变化而使纳米材料在力学、磁学、热学、光学、电学、催化等方面的性能发生改变, 被广泛应用于各种材料领域^[5], 包括耐火材料和陶瓷材料领域^[6,7]。

1.2 纳米材料

纳米技术的兴起和发展与纳米材料的研究、开发及应用密切相关。纳米材料可划分为两个不同的层次: 一是纳米微粒, 即颗粒尺寸为纳米量级的超微粒, 其尺度大于原子簇而小于通常的微粒, 纳米微粒一般在 1~100 nm 之间, 是肉眼和普通显微镜看不见的微小粒子, 只有用高倍的电子显微镜才能观察到; 二是纳米固体材料(包括薄膜), 又称为纳米结构材料, 它是由尺寸为 1~100 nm 的纳米微粒经一定的制备工艺凝聚而得的块体、薄膜、多层膜或纤维。

按纳米固体材料的结构, 纳米固体材料可分为纳米微晶材料、纳米准晶材料和纳米非晶材料; 按键型来分, 纳米固体材料可分为纳米金属材料、纳米离子晶体材料、纳米半导体材料及纳米陶瓷材料; 从纳米粒子的相态来看, 又可将由单相微粒构成的纳米固体称为纳米相材料, 由两相构成(一种纳米相弥散于另一种纳米相材料中)的纳米材

收稿日期: 2008-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774057)。

作者简介: 赵惠忠(1961-), 男, 武汉科技大学教授, 博士生导师。E-mail: wustnano@163.com

料称为复相纳米材料,把由纳米粒子分散到不同成分、不同相或不同种类的纳米粒子、常规三维固体及二维薄膜材料中而形成的纳米固体材料称为纳米复合材料。纳米复合耐火材料是指采用纳米技术制备的、具有纳米结构的(分散相尺寸至少有一维小于100 nm)、性能更优的耐火材料^[8]。

纳米技术的重要意义主要体现为,在纳米这样一个尺寸范围内所研究的物质对象将产生许多既不同于宏观物体也不同于单个原子、分子的奇异性质,或对原有性质有十分显著的改进和提高。因此,对于纳米材料,不仅要看颗粒尺寸是否在纳米级范围,更要检测其在这一尺度范围内是否发生了性能的改变或原有性能的显著提升。

2 纳米技术在耐火材料中的应用

2.1 纳米级耐火粉体材料的制备

纳米粉体的制备方法多种多样,从物理与化学角度可分为化学法和物理法。某些文献将液相法和气相法划归化学方法,将机械粉碎法划为物理方法,但是,一些气相法在制备超微粒的过程中并没有化学反应,因此笼统划为化学法不妥。相反,机械粉碎法中的机械合金化法是把不同种类微米、亚微米粒子的混合粉体经高能球磨机粉碎形成合金超微粒粉末,在一定情况下可形成金属间化合物,这里涉及到化学反应,故把粉碎法全归为物理方法也不合适。目前制备纳米微粒的方法按气相法、液相法和固相法来分类^[9,10],具体分类如图1所示。

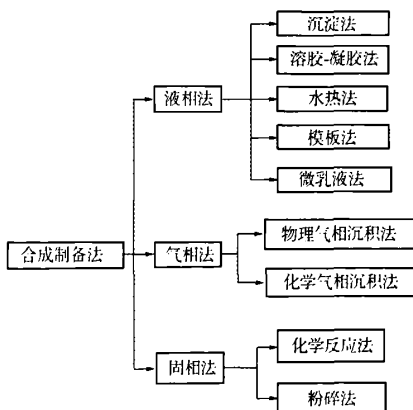


图1 纳米微粒合成制备法分类

图1中的每种方法还能衍生出多种方法,如沉淀法中包括共沉淀、均相沉淀等,溶胶-凝胶法中又有溶胶-凝胶火焰法、溶胶火焰法、溶胶超临界法等,且随着纳米技术研究的不断深入,新的研究方法还将不断涌现。

纳米级耐火粉体材料的制备研究,以一元或多元纳米耐火氧化物或非氧化物粉体的制备与表征为主。如 Michel 等^[11]以高速行星球磨机制备了 SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , Y_2O_3 等耐火氧化物粉体材料,并用 EXAFS(X 射线吸收精细结构谱)、XRD 等进行了表征,结果表明,纳米晶粉体氧化物中金属原子周围的氧邻位与非纳米粉体相似,但峰值却大大下降,大部分纳米晶呈现出混乱的结构。Datta 等^[12]也曾报道了以亚微米级 $\beta\text{-SiC}$ 为原料,用几种不同的表面活性剂,在球料比为 12:1 的条件下,在水中用高能球磨机制备出纳米级 $\beta\text{-SiC}$ 的过程。有关纳米级耐火粉体材料的制备方法还有很多,如微波等离子反应法^[13],溶胶燃烧法(又称低温燃烧法或溶胶-凝胶燃烧合成法)^[14,15],该法可制备多种纳米级耐火粉体材料,如纳米 SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC , Si_3N_4 , MgO , TiN 和尖晶石等粉体。另外还有湿化学法,即溶胶-凝胶法^[16],配合该法的干燥技术有超临界流体法^[17]、喷雾干燥法^[18]和真空冷冻法^[19]等。武汉科技大学利用液相法和气相法已制备出了一元及多元纳米级耐火氧化物粉体材料、纳米碳及碳纳米管等^[20~24]。

2.2 纳米级耐火粉体材料的应用

2.2.1 在定型制品中的应用

众所周知,耐火材料是冶金工业及其他高温工业必不可少的组成部分,但其烧成温度高,能源耗费大,结构缺陷多,力学性能低,极大地影响了其使用性能。如何克服耐火材料的这些缺点,一直是广大耐火材料科技工作者共同关心的问题。20 世纪 70~80 年代,复合耐火材料的研究与应用为钢铁冶金工业的发展立下了汗马功劳。20 世纪 80~90 年代,微粉技术的应用又为不定形耐火材料的推广应用奠定了坚实的基础。由于纳米粉体尺寸小,在结构组元中界面占了相当大的比例,表面原子随着粒子尺寸的减小快速增加,因而表面能高,具有很高的活性,很容易与其他原子结合,其熔点和烧结温度比常规粉体低得多,因此在耐火材料领域的应用研究备受关注。

一般情况下,在定型耐火材料中,纳米粉可作为微量添加剂引入,能改善制品的烧结性和显微结构,从而强烈地影响制品的力学性能^[25~27]。骨料颗粒中加入纳米粉后,纳米粉分布于颗粒间或颗粒内,使晶粒的晶格发生畸变,促进烧结,同时,在晶粒内形成很多次界面,在材料受力产生裂纹时,可引起裂纹偏转或裂纹被钉扎,从而提高制品的断裂强度和韧性,改善耐高温性能,提高抗热震

性和抗高温蠕变性。

贾晓林等^[25]报道了 α - Al_2O_3 纳米粉与 α - Al_2O_3 微粉对高纯刚玉砖烧结性能的影响,通过在刚玉砖基质中引入0.5%,1%,2%,3%的 α - Al_2O_3 纳米粉和4%,8%,12%的 α - Al_2O_3 微粉,研究纳米粉对高纯刚玉砖烧结性能的影响,结果表明,同时加入 α - Al_2O_3 纳米粉和 α - Al_2O_3 微粉可以促进固相烧结,改善制品烧结性能,使烧结温度降低200~400℃;当 α - Al_2O_3 纳米粉加入量(质量分数,下同)为1%~2%, α - Al_2O_3 微粉加入量为4%~8%时,烧结温度可降到1400~1500℃,此时,试样的体积密度和强度达到最佳值,且其烧结机理是以扩散传质为主的固相烧结。笔者曾在普通的刚玉质耐火材料中分别加入少量纳米 Al_2O_3 和 SiO_2 ,研究了这两种纳米材料对经1450,1550,1650,1750℃保温3h烧成后的刚玉砖性能的影响,结果发现,这两种纳米材料均能使刚玉砖的烧成温度降低100~200℃,并能在相同烧成条件下使试样的常温抗折强度和耐压强度提高1~2倍^[26]。同时,通过研究添加纳米 Fe_2O_3 对镁铬耐火材料烧结性能和力学性能的影响表明,在相同工艺条件下,加入1%的纳米 Fe_2O_3 即可改善镁铬砖的显微结构,使其烧成温度降低150℃左右,且在相同烧成温度下,试样的常温抗折强度和耐压强度得以大幅提高^[27]。

文献^[28]研究表明,在 MgO-C 质复合耐火材料中,用纳米碳粉替代鳞片石墨或在基质中原位形成纳米纤维能明显地提高 MgO-C 砖的使用性能。

Naofumi Kido等^[29]研究了由经230℃还原气氛下热处理即可原位形成纳米碳纤维的复合结合剂结合的不烧镁碳砖的性能,结果表明,用这种复合结合剂结合的镁碳砖与酚醛树脂结合的镁碳砖相比,抗渣性和热震稳定性相当,但具有更高的高温抗折强度。另外,与镁铬砖相比,这种新型结合剂结合的镁碳砖因具有高的抗渣渗透性而具有更有效抗结构剥落的特性。

基质是耐火材料的薄弱部位,采取一定措施改变基质料的孔结构要比减少孔体积更重要。控制基质的孔径分布和孔的形状,使孔径尽量微小化将能防止金属液的渗透及化学反应的发生,并提高耐火材料的隔热性和热震稳定性。炭黑是一种典型的高温稳定的纳米材料,Shigeyuki Takanae等^[30,31]用炭黑及用SHS(自蔓延高温合成)方法获得的含有金属碳化物的石墨化炭黑作为镁碳砖的原料,发现加入少量纳米炭黑作为基质,能

调控制品的弹性模量,使制品保持良好的抗渣侵蚀性能,并可使 $w_c \leq 3\%$ 的镁碳砖具有优良的热震稳定性和明显的抗氧化性能;加入含有B,C的复合石墨化炭黑能显著地提高低碳镁碳砖的抗氧化性。相同纳米技术也被用于 MgO-C 质滑板^[32]。

溶胶-凝胶法是由原子或分子水平获得纳米材料的常用方法。直接用溶胶-凝胶作为结合剂或浸渍剂,能达到改善耐火材料性能的目的。Amutha等^[33]用硝酸盐和硅酸乙酯制得均质、化学计量的莫来石前驱体溶胶,凝胶化处理后的凝胶经600℃×3h热处理,然后分别进行干磨和湿磨,浆料干燥后的粉体作为莫来石质定型耐火材料自结合用结合剂。研究发现,自结合电熔莫来石的体积密度(2.48 g/cm³)、常温抗折强度(17.2 MPa)和耐压强度(78.5 MPa)与传统的粘土/高铝结合莫来石制品相当,但莫来石自结合制品具有更优的高温力学指标。邓勇跃等^[34]采用化学法制备出 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 溶胶和 $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-Cr}(\text{OH})_3$ 混合溶胶,并用此两种溶胶分别对炼铜炉用镁铬砖进行真空浸渍处理,结果发现,两种溶胶的粒子在镁铬砖孔隙中分布均匀,均呈球形或近球形,平均粒径在50nm左右。对浸渍前后试样的理化性能和孔隙率进行对比分析可知,浸渍后试样中的 Cr_2O_3 含量增加,耐压强度和体积密度略有升高,显气孔率显著下降;两种试样的中位孔径由浸渍前的17.45 μm分别下降至浸渍后的9.56 μm和12.24 μm,孔径大于12 μm的气孔数量由浸渍前的88.47%分别下降至浸渍后的40.65%和58.92%;浸渍后试样抗炼铜转炉渣的侵蚀性比浸渍前要好得多。

2.2.2 在不定形耐火材料中的应用

纳米粉在不定形耐火材料领域的应用虽是超微粉在耐火材料领域应用的推广和延伸,但这方面的工作目前报道得不多。研究表明,纳米技术对不定形耐火材料性能的提高是有益的。在不定形耐火材料中,以结合剂和添加剂的形式加入纳米粉,利用其表面和界面效应来减少水泥或其他结合剂的用量,从而减少施工加水量,降低有害成分,提高不定形耐火材料的力学性能。

Mukhopadhyay等^[35,36]研究了由凝胶制得的纳米晶尖晶石对高铝浇注料性能的影响,结果表明,在相同操作条件下,加入用Sol-Gel得到的纳米晶尖晶石,其流动性要比加纯氧化镁细粉和加共沉淀法制得的微米级尖晶石要高出80%,同时在二次精炼侵蚀性条件下,表现出更优良的热

震稳定性和抗渣性。吕春燕等^[37]研究了以硅铝凝胶粉取代纯铝酸钙水泥的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ 浇注料的性能,结果表明,采用硅铝凝胶粉取代纯铝酸钙水泥作结合剂,硅铝凝胶粉的加入既有利于降低 $\beta\text{-Sialon}$ 的生成温度,又可以减少材料中的低熔物质的量,使试样经中温、高温热处理后的常温抗折强度及耐压强度有较大提高。

3 展望

20世纪后半叶,随着制粉及粒度分析技术手段的进步,人们对材料结构与性能间关系的认识也越来越深入,使得高性能耐火材料的设计和开发成为可能。尤其是20世纪80~90年代微粉技术的应用,使得耐火材料的研究、开发呈现出了突飞猛进的发展,极大地推进了我国冶金及高温工业的发展。

耐火材料在制备和使用过程中都要承受高温,高温下耐火材料的晶粒不可避免地要长大,因此要制备真正意义上的纳米相耐火材料还存在很大的困难,纳米复合耐火材料或纳米技术处理耐火材料仍是近几年乃至今后较长时间内的研究热点。对于定型耐火材料,应侧重研究纳米粉表面活性 and 尺寸效应对制品烧结性和力学性能的影响,进一步探讨使制品中气孔降至纳米量级的方法。对不定形耐火材料,应着重研究纳米粉在水介质中的团聚性、分散性、含纳米粉浆料的流变学特性和稳定性,并进一步降低纳米粉及纳米处理技术的成本。

纳米复合耐火材料或纳米技术处理耐火材料中,应进一步探讨使基质中的纳米微粒均匀地分布于基体材料晶粒内部的方法及其可行性,为增强晶界强度、大幅度提高耐火材料的力学性能和结构可靠性提供理论依据。从宏观复合到微观复合是材料技术发展的必然趋势,应不断探索原位反应或引入纳米粒子以形成纳米复合耐火材料的新方法、新途径。纳米复合耐火材料在组织上将向多相复合化的方向发展,在性能上向多功能方向耦合,由结构复合向结构功能一体化方向发展,要求其不仅能满足力学性能和使用性能的要求,同时还应具有“资源节约型、环境友好型”的特点。

参 考 文 献

- [1] Bharat Bhushan. Handbook of Nanotechnology[M]. Springer, 2003.
- [2] Rao C N R, Cheetham A K. Science and technology of nanomaterials: current status and future prospects[J]. J Mater Chem, 2001, 11: 2 887-2 894.
- [3] 李亚青,贾果,邢润川. 我国纳米技术产业化的现状、问题及对策研究[J]. 自然辩证法研究, 1998, 14(9): 28-32.
- [4] 赖珍荃,周斌,王钰. 介观体系及其新进展[J]. 自然杂志, 1998, 20(5): 259-263.
- [5] 李亚青. 试论纳米技术[J]. 科学技术与辩证法, 1998, 15(3): 32-37.
- [6] Martin Sternitzke. Structural ceramic nanocomposites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 1997, 17(9): 1 061-1 082.
- [7] 吴义权,张玉峰,郭景坤. 高新技术在耐火材料领域中的应用[J]. 耐火材料, 2000, 34(5): 292-294.
- [8] 汪厚植,赵惠忠,顾华志,等. 纳米技术在耐火材料中的应用研究[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版, 2005, 28(2): 130-133.
- [9] 张立德,牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [10] 高濂,勒喜海,郑珊. 纳米复相陶瓷[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [11] Michel D, Gaffet E, Berthet P. Structure of nanosized refractory oxide powders[J]. Nanostructured Materials, 1995, 6(5-8): 667-670.
- [12] Datta M S, Chaudhuri B. Preparation of nano $\beta\text{-silicon carbide}$ crystalline particles by attrition grinding[J]. Inter Ceram, 2003, 52(6): 340-343.
- [13] Vollath D, Sickafus K E. Synthesis of nanosized ceramic oxide powders by microwave plasma reactions[J]. Nanostructured Materials, 1992, 1(5): 427-437.
- [14] 程永亮,宋武林,谢长生. 燃烧法制备氧化物纳米材料的研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(7): 70-72.
- [15] Pratsinis S E. Flame aerosol synthesis of ceramic powders[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(3): 197-219.
- [16] Thiruchitrabalama M, Palkar V R, Gopinathan V. Hydrolysis of aluminum metal and sol-gel processing of nano alumina[J]. Materials Letters, 2004, 58(24): 3 063-3 066.
- [17] 赵惠忠,雷中兴,汪厚植,等. Sol-Gel-SCFD法制备纳米莫来石[J]. 无机材料学报, 2004, 19(3): 471-476.
- [18] 马清,葛山,赵惠忠,等. SPD法制备二元 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 粉体材料研究[J]. 耐火材料, 2005, 39(5): 347-350.
- [19] 赵惠忠,葛山,张鑫,等. 真空冷冻干燥法制备纳米 MgAl_2O_4 粉体[J]. 耐火材料, 2005, 39(3): 168-171.
- [20] 赵惠忠,计道珺,雷中兴,等. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 纳米复合粉体材料的超临界制备及其性能[J]. 耐火材料, 2003, 37(2): 69-74.
- [21] 赵惠忠,李轩科,计道珺. 纳米 NiO/SiO_2 催化剂的制备及其在碳纳米管合成中的应用[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版, 2001, 24(4): 334-337.

- [22] 计道珺,李轩科,赵惠忠,等.碳纳米管的催化热裂解法制备与表征[J].武汉科技大学学报:自然科学版,2003,26(3):239-240.
- [23] 雷中兴,刘静,李轩科,等.CVD法制备的碳包覆(Fe,Co)纳米粒子的结构及电磁特性[J].磁性材料及器件,2003,8:4-6.
- [24] Lei Z X,Li X K,Wang H Z,et al. Magnetic properties of carbon nanotubes encapsulating nanosized nickel particles[J].新型炭材料,2002,17(4):67-70.
- [25] 贾晓林,钟香崇. α - Al_2O_3 纳米粉对高纯刚玉砖烧结性能的影响[J].耐火材料,2005,39(5):326-328.
- [26] 赵惠忠,吴斌,汪厚植,等.纳米 Al_2O_3 和 SiO_2 对刚玉质耐火材料烧结与力学性能的影响[J].耐火材料,2002,36(2):66-69.
- [27] 赵惠忠,李红,魏建修,等.纳米 Fe_2O_3 对镁铬耐火材料烧结及力学性能的影响[J].耐火材料,2003,37(5):256-258.
- [28] Shinichi Tamura, Tsunemi Ochiai, Shigeyuki Takanaga, et al. Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories[C]. Osaka: UNITECR,2003:517-520.
- [29] Naofumi Kido, Kenzo Yamamoto, Mareyasu Kamiide. Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories[C].Osaka:UNITECR,2003:264-267.
- [30] Shigeyuki Takanaga, Tsunemi Ochiai, Shinichi Tamura, et al. Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories[C]. Osaka: UNITECR,2003:521-524.
- [31] Shigeyuki Takanaga, Yoji Fujiwara, Manabu Hatta. Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories[C].Orlando: UNITECR,2005:385-387.
- [32] Yusuke Shiratani, Tomohiro Yotabun, Kenji Chihara, et al. Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories[C]. Orlando: UNITECR,2005:338-340.
- [33] Amutha R D, Gnanam F D. Sol-gel mullite as the self-bonding material for refractory applications[J]. Ceramics International, 2000,26(4):347-350.
- [34] 邓勇跃,汪厚植,赵惠忠.溶胶浸渍对镁铬砖性能的影响[J].耐火材料,2005,39(6):401-403.
- [35] Mukhopadhyay S, Pal P, Nag B, et al. Influence of gel-derived nanocrystalline spinel in a high alumina castable[J]. Ceramics international, 2007, 33(2): 175-186.
- [36] Ghosh S, Majumdar R, Sinhamahapatra B K. Microstructures of refractory castables prepared with sol-gel additives[J]. Ceramics International, 2003, 29(6):671-677.
- [37] 吕春燕,汪厚植,顾华志,等.硅铝凝胶粉结合 Sialon 增强 Al_2O_3 -SiC-C浇注料[J].耐火材料,2005,39(3):188-190.

Applications and research progress of nanotechnology in refractories

Zhao Huizhong^{1,2}, Wang Houzhi^{1,2}

(1. The State Key Laboratory Breeding Base of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Center of Nanomaterials and Nanotechnology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: As a main focus of research in materials science, the nanotechnology in the refractory field has developed very quickly. The latest literatures in this respect are discussed and the general situation and research results are summarized. The emphases and the direction of nanotechnology investigation in the refractories in the near future are given.

Key words: nanotechnology; nanocomposite refractory; nanomaterial

[责任编辑 郑淑芳]



赵惠忠,1961年出生,2004年获武汉科技大学材料科学博士学位。现为武汉科技大学材料与冶金学院教授、博士生导师。长期从事材料科学的专业基础研究与教学工作,曾参加过国家“七五”、“八五”和“九五”攻关课题;近几年在纳米粉体材料制备、应用方面作了较多的研究,承担了湖北省重大科技攻关项目、武汉市重大科技攻关项目及湖北省教育厅等多项省级和市级攻关课题,在国内外学术期刊和学术会议上先后公开发表耐火材料应用基础研究、无机纳米粉体材料制备及应用基础研究论文50多篇,近5年来有15篇论文被SCI或EI收录。先后获湖北省“教书育人先进个人”、“全国师德标兵”及湖北省“三育人”先进个人荣誉称号。

纳米技术在耐火材料中的应用及研究进展

作者: [赵惠忠](#), [汪厚植](#), [Zhao Huizhong](#), [Wang Houzhi](#)
作者单位: [武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地](#), 湖北, 武汉, 430081; [武汉科技大学纳米材料与技术中心](#), 湖北, 武汉, 430081
刊名: [武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC**
英文刊名: [JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2008, 31 (3)
被引用次数: 2次

参考文献(37条)

1. [Bharat Bhushan Handbook of Nanotechnology](#) 2003
2. [Rao C N R;Cheethama A K Science and technology of nanomaterials:current status and future prospects](#)[外文期刊] 2001
3. [李亚青;贾杲;邢润川 我国纳米技术产业化的现状、问题及对策研究](#) 1998 (09)
4. [赖珍荃;周斌;王钰 介观体系及其新进展](#)[期刊论文]-[自然杂志](#) 1998 (05)
5. [李亚青 试论纳米技术](#) 1998 (03)
6. [Martin Sternitzke Structural ceramic nanocomposites](#)[外文期刊] 1997 (09)
7. [吴义权;张玉峰;郭景坤 高新技术在耐火材料领域中的应用](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2000 (05)
8. [汪厚植;赵惠忠;顾华志 纳米技术在耐火材料中的应用研究](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2005 (02)
9. [张立德;牟季美 纳米材料和纳米结构](#) 2001
10. [高濂;勒喜海;郑珊 纳米复相陶瓷](#) 2004
11. [Michel D;Gaffet E;Berthet P Structure of nanosized refractory oxide powders](#) 1995(5-8)
12. [Datta M S;Chaudhuri B Preparation of nano \$\beta\$ -silicon carbide crystalline particles by attrition grinding](#)[外文期刊] 2003(06)
13. [Vollath D;Sickafus K E Synthesis of nanosized ceramic oxide powders by microwave plasma reactions](#) 1992(05)
14. [程永亮;宋武林;谢长生 燃烧法制备氧化物纳米材料的研究进展](#)[期刊论文]-[材料导报](#) 2003 (07)
15. [Pratsinis S E Flame aerosol synthesis of ceramic powders](#)[外文期刊] 1998 (03)
16. [Thiruchitrambalama M;Palkar V R;Gopinathan V Hydrolysis of aluminum metal and sol-gel processing of nano alumina](#)[外文期刊] 2004(24)
17. [赵惠忠;雷中兴;汪厚植 Sol-Gel-SCFD法制备纳米莫来石](#)[期刊论文]-[无机材料学报](#) 2004 (03)
18. [马清;葛山;赵惠忠 SPD法制备二元Al₂O₃-SiO₂ 粉体材料研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2005 (05)
19. [赵惠忠;葛山;张鑫 真空冷冻干燥法制备纳米MgAl₂O₄粉体](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2005 (03)
20. [赵惠忠;计道珺;雷中兴 Al₂O₃-SiO₂纳米复合粉体材料的超临界制备及其性能](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2003 (02)
21. [赵惠忠;李轩科;计道珺 纳米NiO/SiO₂催化剂的制备及其在碳纳米管合成中的应用](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2001 (04)
22. [计道珺;李轩科;赵惠忠 碳纳米管的催化热裂解法制备与表征](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2003 (03)
23. [雷中兴;刘静;李轩科 CVD法制备的碳包覆\(Fe, Co\)纳米粒子的结构及电磁特性](#)[期刊论文]-[磁性材料及器件](#)

2003(4)

24. [Lei Z X;Li X K;Wang H Z](#) [Magnetic properties of carbon nanotubes encapsulating nanosized nickel particles](#)[期刊论文]-[新型炭材料](#) 2002(04)
25. [贾晓林;钟香崇](#) [\$\alpha\$ -Al₂O₃纳米粉对高纯刚玉砖烧结性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2005(05)
26. [赵惠忠;吴斌;汪厚植](#) [纳米Al₂O₃和SiO₂对刚玉质耐火材料烧结与力学性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2002(02)
27. [赵惠忠;李红;魏建修](#) [纳米Fe₂O₃对镁铬耐火材料烧结及力学性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2003(05)
28. [Shinichi Tamura;Tsunemi Ochiai;Shigeyuki Takanaga](#) [查看详情](#) 2003
29. [Naofumi Kido;Kenzo Yamamoto;Mareyasu Kamiide](#) [查看详情](#) 2003
30. [Shigeyuki Takanaga;Tsunemi Ochiai;Shinichi Tamura](#) [查看详情](#) 2003
31. [Shigeyuki Takanaga;Yoji Fujiwara;Manabu Hatta](#) [查看详情](#) 2005
32. [Yusuke Shiratani;Tomohiro Yotabun;Kenji Chihara](#) [查看详情](#) 2005
33. [Amutha R D;Gnanam F D](#) [Sol-gel mullite as the self-bonding material for refractory applications](#)[外文期刊] 2000(04)
34. [邓勇跃;汪厚植;赵惠忠](#) [溶胶浸渍对镁铬砖性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2005(06)
35. [Mukhopadhyay S;Pal P;Nag B](#) [Influence of gel-derived nanocrystalline spinel in a high alumina castable](#)[外文期刊] 2007(02)
36. [Ghosh S;Majumdar R;Sinhamahapatra B K](#) [Microstructures of refractory castables prepared with sol-gel additives](#)[外文期刊] 2003(06)
37. [吕春燕;汪厚植;顾华志](#) [硅铝凝胶粉结合Sialon增强Al₂O₃-SiC-C浇注料](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2005(03)

本文读者也读过(4条)

1. [汪厚植. 赵惠忠. 顾华志. 王周福. 邓勇跃. WANG Hou-zhi. ZHAO Hui-zhong. GU Hua-zhi. WANG Zhou-fu. DENG Yong-yue](#) [纳米技术在耐火材料中的应用研究](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2005, 28(2)
2. [李晓伟. 杨林. 钱忠俊](#) [纳米技术在不定形耐火材料中的应用](#)[会议论文]-2005
3. [赵惠忠. 汪厚植](#) [纳米技术在耐火材料中的应用研究进展](#)[会议论文]-2006
4. [杜涛. 于绍文. 孟洪君](#) [耐火材料的发展趋势和新技术](#)[会议论文]-2000

引证文献(2条)

1. [ZHANG Daoyun. JIANG Mingxue. XIAO Guoqing. HUANG Shaobo](#) [Influence of Nano-Al₂O₃ on Properties of Magnesite Chrome Refractories](#)[期刊论文]-[中国耐火材料\(英文版\)](#) 2012(2)
2. [黄少波. 蒋明学. 章道运](#) [纳米Al₂O₃和Cr₂O₃对镁铬材料烧结与力学性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2011(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_whkjdx200803005.aspx