

金属基纳米复合材料的研究现状和展望^①

龚荣洲¹, 沈翔², 张磊¹, 张凌²

(1. 华中科技大学 电子科学与技术系, 武汉 430074; 2. 中国地质大学 材料科学和化学工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 综述了金属基纳米复合材料的制备方法和金属基纳米复合材料的力学和磁学性能, 分析了金属基纳米复合材料的微观结构, 介绍了国内外相关研究现状及应用的最新进展。指出了金属基纳米复合材料研究中存在的几个重要问题, 展望了金属基纳米复合材料的未来发展趋势。

关键词: 纳米材料; 金属基纳米复合材料; 机械合金化; 微观结构; 塑性流动; 断裂行为; 碳纳米管

中图分类号: TG 383; TG 113; TB 331

文献标识码: A

纳米材料是由纳米量级(1~100 nm)的纳米粒子组成的固体材料。纳米微粒有 4 个基本效应: 小尺寸效应、表面与界面效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应。因此, 纳米材料表现出一些特殊性能, 如高热膨胀系数、高比热容、低熔点、奇特的磁性、极强的吸波性能等。纳米微粒尺寸很小, 纳米粒子的表面原子数与其总原子数之比随粒径尺寸的减小而急剧增大, 所以纳米材料有高密度缺陷、高的过剩能、大的比表面积和界面过剩体积。纳米材料也因此具有许多特殊的性能, 如高的弹性模量、较强的韧性、高强度、超强的耐磨性、自润滑性和超塑性等。由于纳米材料的特异性能, 纳米材料有着广泛的应用^[1-3]。

金属基纳米复合材料(Metal matrix nanocomposites, MMNCs)是以金属及合金为基体, 与一种或几种金属或非金属纳米级增强相相结合的复合材料。金属基纳米复合材料具有力学性能好、剪切强度高、工作温度较高、耐磨损、导电导热好、不吸湿、不吸气、尺寸稳定、不老化等优点, 故以其优异的性能应用于自动化、航天、航空等高技术领域。各种复合新工艺, 如压铸、半固态复合铸造, 喷射沉积和直接氧化法、反应生成法等的应用, 促进了纳米颗粒、纳米晶片、纳米晶须增强金属基复合材料的快速发展, 使成本不断降低, 从而使金属基纳米复合材料的应用由自动化、航空、航天工业扩展到汽车工业^[4]。1995 年福特和丰田公司开始使用 Duralcan 公司铸造的 20% SiC 颗粒增强铝基复合

材料作制动盘; Duralcan 公司制造的 20% Al₂O₃ 颗粒增强铝基复合材料也应用于驱动轴^[5]。

1 金属基纳米复合材料的制备

制备金属基纳米复合材料的方法有机械合金化法(Mechanical alloying, MA)、熔融纺丝(Melt spun, MS)法、粉末冶金法(Powder metallurgy, PM)、机械诱发自蔓延高温合成(Self-propagating high-temperature synthesis, SHS)反应法、真空蒸发-惰性气体凝聚及真空原位加压法(Inert gas condensation method combined with vacuum co-evaporation and in situ compaction, ICVCSC)等, 以下介绍几种金属基纳米复合材料制备方法的优缺点:

1) 机械合金化法 工艺简单、增强体分布均匀、增强体体积分数 φ_f 范围较大、制品质量较好、产量高、能制备高熔点的金属和合金纳米材料。缺点是: 在制备过程中易引入杂质、晶粒尺寸不均匀、球磨及氧化会带来污染。

2) 熔融纺丝法 工艺简单、设备投资少、生产成本较低。缺点是: φ_f 有限(一般不超过 20%)、有界面反应的可能性、增强体分布难达到均匀化、有气孔, 需二次加工。

3) 粉末冶金法 基本上不存在界面反应, 质量稳定, φ_f 可较高, 增强体分布均匀。缺点是: 工艺程序多、制备周期长、成本高、降低成本的可能

① 收稿日期: 2002-08-29; 修订日期: 2002-11-05

作者简介: 龚荣洲(1963-), 男, 教授, 博士生导师。

通讯联系人: 龚荣洲, 教授, 博士生导师, 华中科技大学电子科学与技术系 430074; 电话: 027-87542494; 传真: 027-87547337;

E-mail: rzhong@sina.com

性小。

4) 真空蒸发-惰性气体凝聚及真空原位加压法
适用范围广、增强体分布均匀、制品质量好。缺点是: 工艺设备昂贵、产量极低、制造大型零部件有困难, 如冷却工序安排不妥善, 可产生明显的界面反应, 制备周期较长。

5) 机械诱发自蔓延高温合成反应法 过程简单、不需要复杂的设备、产品纯度高、能获得复杂的相和亚稳定相。缺点是: 不易获得高的产品密度、不能严格控制反应过程和产品性能。

6) 原位反应复合法 成本较低、增强体分布均匀、基本上无界面反应、可以使用传统的金属熔融铸造设备、工艺周期较短。缺点是: 工艺过程要求严格, 较难掌握, 增强相的成分和体积分数不易控制。

7) 非晶合金晶化法 成本低、产量大、界面清洁致密、样品中无微孔隙、晶粒度变化易控制。缺点是: 只适用于非晶形成能力较强的合金系。

制备金属基纳米复合材料的工艺中应用比较广泛的一种是机械合金化法。

1.1 机械合金化(MA)法

制备金属基纳米材料的 MA 法: 将按合金粉末金属元素配比配制的试料放入立滚、行星或转子高能球磨机中进行高能球磨, 制得纳米晶的预合金混合粉末, 为防止粉末氧化, 球磨过程中采用惰性气体保护; 球磨制得的纳米晶混合粉经烧结致密化形成金属基纳米复合材料。在球磨过程中, 大量的碰撞现象发生在球粉末与磨球之间, 被捕获的粉末在碰撞作用下发生严重的塑性变形, 使粉末反复的焊合和断裂。经过“微型锻造”作用, 元素粉末混合均匀, 晶粒尺度达到纳米级, 层状结构达到 1 μm 以下, 比表面积大大增加。由于增加了反应的接触面积, 缩短了扩散距离, 元素粉末间能充分进行扩散, 扩散速率对反应动力的限制减小^[6], 而且晶粒产生高密度缺陷, 储备了大量的畸变能, 使反应驱动力大大增加。实验研究表明, 在球磨阶段元素粉末晶粒度达到 20~50 nm 左右, 甚至几个纳米, 球磨温升在 30~40 K 左右^[6]。MA 可使互不相溶的 W, Cu 等合金元素、或溶解度较低的合金粉末如 W, Ni, Fe 等发生互扩散, 形成具有一定溶解度或较大溶解度的 W-Cu, W-Ni-Fe 超饱和固溶体和 Ni 非晶相^[7, 8]。

最近, 黄等^[9]用行星式高能球磨机制备了 $\text{Al}_{80-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{20}$ ($x = 20 \sim 40$) 三元非晶纳米合金粉

末, 发现成分为 $\text{Al}_{40}\text{Cu}_{40}\text{Fe}_{20}$ 的粉末球磨时逐步非晶化, 球磨 33 h 后, 非晶化程度最大, 最小颗粒尺寸达到 5.6 nm, 进一步球磨, 非晶晶化, 颗粒尺寸增大。席等^[10]通过对 Al-Ti 系和 Al-TiO₂ 系进行高能球磨和压制烧结制备了固态原位反应生成的纳米晶块体 $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Al}$ 复合材料, 发现: Al-Ti 合金系高能球磨后, 各组元晶粒得到细化, 并且 Ti 在 Al 中发生了强制超饱和固溶, 烧结时原位反应形成纳米晶 $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Al}$ 复合材料; 而 Al-TiO₂ 反应体系高能球磨仅发生组分晶粒细化, 烧结时 TiO₂ 部分还原并和 Al 原位反应生成纳米晶 $(\text{Ti}_2\text{O}_3 + \text{Al}_3\text{Ti})/\text{Al}$ 复合材料。El-Eskandaray^[11]用高能球磨法成功地合成了有纳米晶特性的 SiC 颗粒增强的 Al 基纳米复合材料。

Hwang 等^[12]通过机械碾磨 Mg, Ti 和 C 粉末合成了 Mg-TiC 纳米复合材料, 磨制过程中 Mg-TiC 混合物的 XRD 图谱表明: 随磨制时间的增加有 TiC 晶粒生成, TEM 图像显示纳米晶 Mg 晶粒尺寸在 25~60 nm 之间, TiC 纳米微粒尺寸在 3~7 nm 之间。经热处理后 Mg 晶粒轻微增大到 28~90 nm 之间, TiC 微粒约为 8 nm。从图 1 可以看到 TiC 纳米微粒随机地分布在基体中, 一些在 Mg 晶粒内, 一些在晶粒的边界, 这些在晶粒边界的纳米微粒阻碍了晶粒边界滑移, 从而增加了流动应力。而且这些纳米微粒随晶界的滑移而移动, 不会在基体中产生断裂。因此, Mg-TiC 纳米复合材料具有比 Mg-Ti 合金相似的高的延展性。

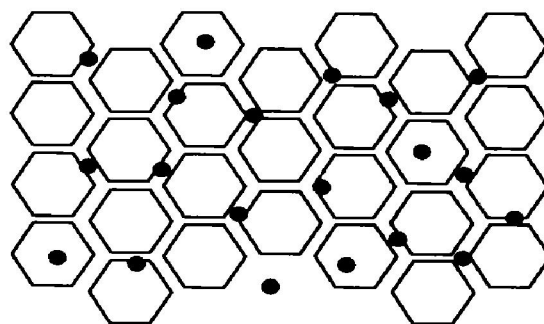


图 1 Mg-TiC 纳米复合材料的微结构模型^[10]

Fig. 1 Microstructural model of
Mg-TiC nanocomposite
●—TiC particle; ○—Mg particle

1.2 熔融纺丝(MS)法

MS 法是在氩气氛围中熔融合金元素, 熔融体在 40 m/s 的线速度旋转的铜轮上熔融纺丝而快速固化, 在预热的管式炉中一密封的排空低到

6.666×10^{-3} Pa 的石英管中对带状样品进行退火处理。Akhtar 等^[13]用 MS 法制备了一种包含高饱和 α -Fe, Fe₃B 软化相和 Nd₂Fe₁₄B 硬磁相的三相纳米复合材料, 材料具有相邻晶粒间交互连接的微结构, 用适宜的相比比例可制备高剩磁三相纳米复合材料。

Sheng 等^[14]成功地用 MS 和球磨(Ball-milling, BM) 2 种非均衡过程合成了 Al_{1-x}Pb_x ($x = 0.05, 0.10, 0.20, 0.30$) 纳米复合材料, 在旋转熔化 Al-Pb 合金的过程中, 纳米级 Pb 颗粒均匀定向分布在微米颗粒的 Al 基体上, 而在球磨过程, 通过延长研磨时间来精制 Pb 和 Al 组分, 形成 Pb 颗粒均匀扩散入 Al 基体的复合材料, 样品中最小的 Pb 微粒随 Pb 含量的增加而线性增加。由于有符合正 Hall-Petch 关系^[1]的纳米尺寸 Al 颗粒的增强作用, BM 的 Al-Pb 样品的显微硬度比 MS 的样品大很多。BM 和 MS 的样品的显微硬度都随 Pb 含量的变化而变化, Pb 的含量大约为 5% 时有最大硬度, 少量 Pb 纳米颗粒的形成可以强化 Al 基复合材料。

1.3 机械诱发自蔓延高温合成(SHS)反应法

SHS 法有“扩展”反应法和“整体”反应法: 扩展反应法是通过局部引燃粉末反应物让燃烧波在压坯中传播; 整体反应法是将粉末压坯在炉中同时快速加热, 使合成反应在整个坯体中同时发生。Uenishi 等^[15]对机械合金化的粉末进行燃烧合成制备了 Ti-Al 和 Ti-Al-TiB₂ 合金, 并对比热处理温度和时间对相应的烧结过程和晶粒生长行为进行研究。在球磨 2 880 ks 条件下, 混合好的 Al 和 Ti 粉末转变为无定形相 Al-Ti 合金, TiB₂ 很好地弥散入无定形合金形成 Al-Ti-TiB₂ 粉末; 对 MA 粉末样品进行热处理, 当退火时间超过 1.804 ks, 长时间机械合金化的 Al-Ti-TiB₂ 粉末的晶粒长大显著降低, 这归因于均匀弥散 TiB₂ 颗粒相的存在。

1.4 粉末冶金(PM)法

肖等^[16]用 PM 法制备了纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料, 材料的组织均匀而细小, 材料的布氏硬度 (40.6 ± 0.5) 较纯铝制品提高 20%, 电阻率较纯铝制品提高 456.0%。

1.5 真空蒸发-惰性气体凝聚及真空原位加压(ICVCSC)法

ICVCSC 是在高真空反应室中惰性气体保护下使金属受热升华并在液氮冷却镜壁上聚集、凝结为

纳米尺寸的超微粒子, 刮板将收集器上的纳米微粒刮落进入漏斗并导入模具, 在真空下原位加压使纳米粉烧结成块。秦等^[17]用真空蒸发-惰性气体凝聚及真空原位加压方法制备出粒度均匀, 平均尺寸在 10 nm 以下的纳米 NiAl 合金固体。纳米 NiAl 合金具有较大的晶格畸变(1.2%), 退火实验显示当退火温度低于 800 K 时, 晶格畸变没有明显下降且晶粒度没有明显长大。当用多晶 NiAl 合金制成纳米结构后(晶粒尺寸小于 10 nm)磁特性由弱磁性向强磁性转变。最近, Nakayama 等^[18]用共蒸发和惰性气体凝聚、原位氧化、原位压实技术合成了由铁氧化物和银组成的磁性纳米复合材料。

1.6 非晶合金晶化法

非晶合金晶化法是将原料用急冷技术制成非晶薄带或薄膜, 然后控制退火条件, 在合金中生成纳米级晶粒。邵等^[19]用铜模急冷法制得直径达 8 mm 的棒状稀土 NdFeAl 样品, 测得起始晶化温度 T_x 和熔点 T_m 分别为 743 K 和 823 K, $\Delta T_m = T_m - T_x = 80$ K, $T_{rx} = T_x / T_m = 0.90$ 。发现极小的 ΔT_m 和高的 T_{rx} 是具有良好非晶形成能力的主要原因。通过控制大块状非晶样品的热处理工艺可以得到不同纳米晶比例的非晶/纳米晶双相材料。

1.7 其他合成方法

制备金属基纳米复合材料的方法还有喷射与喷涂共沉积法、原位反应复合法、加盐反应法、反应喷雾沉积法、反应低压等离子喷射沉积法等^[4]。最近, 王等^[20]通过控制反应物 B₂O₃ 和石墨的含量制备了原位生长纳米增强 Cu 基复合材料。研究表明: 铜基体中弥散分布着 50 nm 的 TiB₂ 颗粒, 对 Cu 基体有良好的增强作用。Lee 等^[21]用偏钨酸铵和硝酸铜为原料, 制备混合溶液, 然后将混合溶液采用喷雾干燥, 通过旋转雾化和干燥工艺得到金属盐混合粉末的前驱体。将前驱体煅烧, 形成 W-Cu 氧化物复合粉末, 再将氧化物粉末球磨和采用二步氢气还原, 从而制备出纳米复合粉末。此粉末具有很好的烧结活性, 在 1 050~1 200 °C 烧结后具有晶粒度为 1 μ m 左右的细晶显微组织。

目前, 金属基纳米复合材料的制备有以下发展:

1) 纳米晶粒活性很大, 在烧结中极易长大, 因此, 烧结工艺十分关键。添加 VC, TaC, NbC 等碳化物作为晶粒长大抑制剂, 可以在一定程度上抑制晶粒的进一步长大。采用强化烧结如加压烧结、等

离子体活化烧结、热压、热等静压、低压热等静压、超高压烧结、烧结热锻、微波烧结、电磁场烧结、冲击波烧结、高能高速烧结、脉冲电流烧结等烧结技术可望有效地控制纳米结构^[22, 23]。

2) 由于纳米碳管与金属在高温复合过程中形成的脆性界面削弱了界面的结合强度, 降低了复合材料的力学性能。而对于高熔点金属和硬质合金碳纳米管复合材料, 用传统的热加工方法制备更是困难。复合镀技术可以制备多种金属及合金的碳纳米管复合镀层, 而且通过控制镀液的成分和工艺条件, 可以制得非晶态和纳米晶等不同微结构的金属基碳纳米管复合镀层^[24-29], 从而可使纳米碳管与金属基体高强度结合。

2 金属基纳米复合材料的特性

金属基纳米复合材料的力学性能主要具有如下的特点: 高强度和高韧性, 高比强度和高比模量, 抗蠕变和抗疲劳性好, 高温性能好, 断裂安全性高等^[4]。

2.1 微观结构

Wang 等^[30]用超声波气态原子化法(USGA) 和热挤压锻造制备了 $\text{Al}_{88}\text{Ni}_9\text{Ce}_2\text{Fe}_1$ 纳米复合材料, 研究其微观结构演化、热稳定性和 $\alpha(\text{Al})$ 纳米相生长动力学, 发现: 原子化粉末的微观结构受基体中溶质过饱和度、隐含微应力、溶质大小、分布状态和沉积纳米相的体积分数等因素影响; 在热的结晶过程中, $\alpha(\text{Al})$ 相的沉积和 $\text{Al}_3(\text{Ni, Fe})$ 纳米相的生长优于 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 纳米相的生长; 在 250~300 °C 时, $\alpha(\text{Al})$ 的晶粒生长需具有 1.3 eV 的活化能; 材料金属丝强度高达 1.6 GPa。

Cantor 等^[31]研究了 $\text{TiB}_2/\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Al}$ 复合材料的成核机制。发现: 在铸造铝合金的过程中初生 Al 晶粒必须小于 100 μm 以确保其各向同性; TiB_2 和 Al_3Ti 的加入, 可使基体合金的晶粒细化; 纳米尺寸的铝化物(Al_3Ti) 第二相的形成受铝合金中 10^{-6} 级杂质的影响; 纳米级铝化物可改善材料的表面修饰、浸蚀和强度等特性。

Berbon 等^[32]用摩擦搅动焊接技术(Friction stir welding, FSW) 改善了材料的非均相微观结构, 制备了有极高强度的易延展的纳米相铝合金(如 Al-Ti-Cu 和 Al-Ti-Ni 合金)。在热等压条件下复合材料的微结构中, 细的金属间化合物(Al_3Ti) 分散在铝基体中。 Al-Ti-Cu 合金的挤压过程有与热等压过程

相同的微结构特征, 但在富铝区域出现了延长的暗线。而经摩擦搅动过程(Friction stir processing, FSP) 的复合材料的均一性则大大增加, 这种铝合金在 650 MPa 下延展性提高 10%。

2.2 强度、塑性和断裂韧性

郭等^[33]用 TiO_2 颗粒与铝合金液原位反应制备了 $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{LY12}$ 复合材料, 发现: TiO_2 与 LY12 铝合金液反应后生成约 40 nm 的 Al_3Ti 颗粒, 弥散分布在 LY12 基体合金中, $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{LY12}$ 界面良好结合, 使复合材料的强度、塑性、冲击韧度均比 LY12 铝合金有显著地提高。

董等^[34]用气-液原位反应合成法制备了 $\text{AlN}/\text{Al-7Si}$ 纳米复合材料, 其增强相 AlN 颗粒尺寸约 80 nm 呈颗粒均匀分布于 $\alpha(\text{Al})$ 基体晶粒内, Al-7Si 中的共晶硅主要以棒状形态分布于 $\alpha(\text{Al})$ 基体的晶界上。由于面内生长所形成的细小增强体能阻碍位错滑移, 使材料的强度提高, 伸长率降低。AlN 的异质晶核作用细化了 Al-7Si 的初生 $\alpha(\text{Al})$ 和共晶硅, 使材料在断裂前可承受较大的变形。

李等^[35]用机械合金化方法获得 $\text{NiAl}(\text{Co})$ 纳米晶粉末, 经过热压, 制备出 $\text{NiAl}(\text{Co})$ 块体纳米晶材料, 其晶粒尺寸约在 300~480 nm, 致密度可达到 91% 以上, 室温压缩屈服强度达到 1 250~1 400 MPa, 是铸态 NiAl 合金的 3.1~3.5 倍, 室温塑性良好, 有大约 13% 的压缩塑性, 其中 $\text{Ni}_{50}\text{Al}_{40}\text{Co}_{10}$ 纳米晶块体材料压缩率可达 30% 而无裂纹产生; $\text{Ni}_{50}\text{Al}_{40}\text{Co}_{10}$ 在 980 °C 高温压缩至 19.5% 无裂纹产生, 变形均匀, 还发现含 γ' 相的 $\text{NiAl}(\text{Co})$ 的双相纳米晶块体材料压缩性能优于单相 $\text{NiAl}(\text{Co})$ 纳米晶块体材料。

Asano 等^[36]研究了用热压法制作的 $\text{Y-TZP}/\text{Mo}$ 纳米复合材料的静力和动力断裂韧性, 材料的断裂韧性不受加载速度的影响。复合材料含体积分数 70% 的 Mo, 微结构显示了一个连续的钼相, 表明有高的断裂韧性。XRD 分析断裂面发现在断裂过程中 ZrO_2 没有从四方晶相向单斜晶相的转变, 说明材料的断裂韧性的改善是由于第二相的掺入和微观结构形态的变化。

Semiatin 等^[18]研究了 Al-Ti-Cu 纳米复合材料的塑性流动和断裂行为, 纳米微粒在液氮保护下球磨制备, 材料的形变由位错增加和动力恢复来控制, 纳米相 Al-Ti-Cu 合金展示了从脆性到延展性的

转变行为。制备的纳米相粉末经挤压强化产生了一种包含两相(富铝相和 Al_3Ti 微粒相)区域和少量单相铝固溶体的复合结构。脆性行为通过初始化微粒-基体界面,然后在名义上的两相区域和单相微结构之间传播。

2.3 耐磨性

Luo 等^[37]提出添加 TiC 硬质颗粒增强相可大大增加 TiNi 合金的耐磨性,这种高的耐磨性可能主要受益于合金的拟塑性,而添加纳米 TiN 粉末去增强 TiC/TiNi 基体,发现纳米 TiN/TiC/TiNi 复合材料的耐磨损性优于 TiC/TiNi 复合材料和硬质颗粒覆盖表面的 WC/NiCrBSi 材料的。

陈等^[38]用碳纳米管作为增强相制备了镍基复合镀层,碳纳米管均匀地嵌镶于基体中,且端头露出,覆盖于基体表面,镍基复合镀层具有优良的耐磨性和自润滑性,可以显著改善金属表面的耐磨和减摩性能。

朱等^[39]用真空熔烧方法在 45 号钢表面制备纳米金刚石粉和镍基自熔合金组成的复合涂层,用扫描电镜和 SRV 磨损试验机分析涂层,发现:涂层主要由 Ni 固溶体和分布于其间的碳化物、合金渗碳体、合金碳化物和硼化物组成;复合涂层的硬度和耐磨性随着纳米金刚石粉加入量的增多而提高,当复合涂层中添加的纳米金刚石粉的质量分数在 0.8%~10% 时,其耐磨性能最好,摩擦因数可减小 60%。

2.4 碳纳米管金属基纳米复合材料

碳纳米管具有极高的纵横比(长径比达 100~1 000)和超强的力学性能,单壁碳纳米管的弹性模量理论估计可高达 5 TPa,实验测得多壁碳纳米管的弹性模量平均为 1.8 TPa,弯曲强度为 14.2 GPa^[40,41]。碳纳米管的抗拉强度为钢的 100 倍,密度仅为钢的 1/6~1/7,且耐强酸强碱,在 973 K 以下,在空气中基本不发生变化,具有较好的热稳定性。因此,用碳纳米管增强的金属基纳米复合材料具有极好的力学性能。

王等^[42]利用销盘式磨损试验机研究了粉末冶金法制备的多壁纳米碳管增强铜基复合材料的稳态摩擦磨损行为,发现:在低载荷和中等载荷作用下,随着纳米碳管质量分数的增加,复合材料的磨

损率减小;而在高载荷作用下,由于发生表面开裂和片状层剥落,纳米碳管质量分数高的复合材料的磨损率增高。

董等^[43,44]制备的含 10%~14% 碳纳米管的铜基复合材料,具有较好的摩擦性能。Kuzumaki 等^[45]用热压-热挤工艺制备了碳纳米管增强铝基复合材料,其强度比纯铝具有更好的热稳定性。

金属基纳米复合材料的一些磁学性能如磁化强度、磁化率等与材料的晶粒大小、形状、第二相分布及缺陷密切相关,而另一些磁学性能如饱和磁化强度、居里温度等与材料中的相及其数量有关。磁化由 2 个因素控制:一是晶粒的各向异性,每个晶粒的磁化都趋向于排列在自己易磁化的方向;二是相邻晶粒间的磁交互作用,这种交互作用使得相邻晶粒朝向共同磁化方向磁化。因此,纳米级磁性材料具有高的矫顽力,低的居里温度,颗粒尺寸小于某一临界值时,具有超顺磁性等^[4]。

2.5 巨磁电阻效应

20 世纪 90 年代,人们在 Fe/Cu, Fe/Ag, Fe/Al, Fe/Au, Co/Cu, Co/Ag 等纳米结构的多层膜中观察到了显著的巨磁阻效应。1992 年美国率先报道了 Co/Ag, Co-Cu 颗粒膜中存在巨磁电阻效应,其效应在液氮温度下可达 55%,室温可达 20%^[45],但颗粒膜的饱和磁场较高,而隧道结的饱和场远低于多层膜、颗粒膜以及钙钛矿化合物。在通常由铁磁薄膜、非磁性绝缘膜所构成的三明治结构,如 Fe/ Al_2O_3 /Fe 中, Al_2O_3 绝缘层厚度小于 10 nm。

2.6 超顺磁性

Nakayama 等^[46]用共蒸发和惰性气体凝聚、原位氧化、原位压实技术合成了由铁的氧化物和银组成的磁性纳米复合材料,调节氦气压力为 133.322 Pa 可得到 10 nm 的复合颗粒。TEM 和 EDX 发现几个纳米尺寸的铁纳米团簇被银晶粒包围,实验发现作为单畴的单个晶粒表现出超顺磁性。

Tanaka 等^[47]也作了同样的研究,合成了包含 10~30 nm 的铁的氧化物和铁的氮化物纳米颗粒弥散于银基体里的超顺磁纳米复合材料,发现磁矩的对数分布降低了磁热效应,作为单畴的纳米颗粒的

磁性晶体各相异性能比热能小,使超顺磁性可能发生在相对高的温度。

2.7 矫顽力

Sung-Tag 等^[48]研究了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiCo}$ 纳米复合材料的微观结构、力学性能和磁性质,发现减小分散颗粒的尺寸可以提高材料的矫顽力。

金属基纳米复合材料的制备是在高温下完成的,活性的金属基体与纳米增强相之间的界面会不稳定,金属基体在冷却、凝固、热处理过程中还会发生元素偏聚、扩散、固溶、相变等,使金属基复合材料界面区的结构十分复杂。界面区的组成、结构明显不同于基体和增强体的,并受金属基体成分、增强体类型、复合工艺参数等各种因素的影响。

2.8 新的分析手段应用于研究金属基纳米复合材料

Inkson 等^[49]用三维聚焦等离子束(3D focused ion beam, 3DFIB)X 光照相分析法观测到挤压 FeAl 纳米复合材料中单个晶粒的三维形态,每个 2D FIB 交叉部分的微结构通过在几个角度成像去定位晶粒的边界,利用穿过晶粒的许多平行的 2D 切片成像和计算机重建可确定亚微米级单个晶粒的 3D 形态。

Cantor 等^[31]用三维原子探针(3-D atom probe, 3DAP)研究了合成的 $\text{Fe}_{71.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Al}_2$ 软磁纳米微晶复合材料,发现 $\gamma\text{-Fe}(\text{Si})$ 中的 Al 粉减小了材料的磁各向异性,Al 也被混合到 Cu 束中,通过形成纳米尺寸的 $\text{Fe}(\text{Si})$ 粉晶核而控制其初始结晶。3DAP 也显示硬磁纳米微晶 $\text{Pr}(\text{FeCo})\text{B}$ 中的分隔行为。Co 的不均匀分布,使晶粒尺寸增大,而增大 $\text{Pr}(\text{FeCo})\text{B}$ 中 Co 与 Fe 的含量可以提高其居里温度。

2.9 金属基纳米复合材料的烧结行为

Kim 等^[50]对纳米 W-Cu 合金粉采用常规烧结,可在较低的温度下得到近全致密(致密度为 98%~99%)且晶粒为 1 μm 的合金。王等^[51,52]研究了球磨驱动制备的 $\text{Ag}_{50}\text{Ni}_{50}$ (摩尔比)合金粉末。球磨后的粉末在 620 $^{\circ}\text{C}$ 热压后,合金相的颗粒长大至 40~60 nm。热压块体化的 $\text{Ag}_{50}\text{Ni}_{50}$ 合金密度很高,经

600 $^{\circ}\text{C}$, 24 h 退火处理后,其 $\alpha\text{-Ag}$ 和 $\beta\text{-Ni}$ 相颗粒长大至 100~110 nm。高^[53]将纳米结构 WC-Co 复合粉末在 1400 $^{\circ}\text{C}$ 保温 30 s 可获得高致密合金结构,其 WC 晶粒尺寸为 200 nm,但若将保温时间延长 1 倍即保温 60 s,则晶粒迅速增大到 2.0 μm 。

3 金属基纳米复合材料的展望

金属基纳米复合材料具有优异的力学性能,并继续向高硬度、高弹性模量、高屈服强度和低温超塑性等高性能的方向发展。

金属基纳米复合材料具有优异的磁特性,因此在工业上有广阔的应用前景^[54]。利用稀土永磁材料的优异磁性能,将软磁相与永磁相在纳米尺度范围内进行复合,获得兼备高饱和磁化强度、高矫顽力二者优点的新型永磁材料成为新的发展方向。

由于界面结构和性能对金属基纳米复合材料应力、应变的分布、导热、导电及热膨胀性能、载荷传递、断裂过程起决定性作用^[55],故用先进的分析技术和手段深入研究界面的和精细结构界面的反应规律、界面微结构及性能对复合材料各种性能的影响、界面结构和性能的优化与控制途径以及界面结构性能的稳定性成为金属基纳米复合材料研究的重要方向。

通过碳纳米管的表面修饰,可制备空腔微结构材料;也可以先打开碳纳米管,借助碳纳米管的优良合成模板特性,将相应的金属材料填充到碳纳米管的内孔,从而制备高性能的金属基纳米复合材料。碳纳米管增强金属基纳米复合材料是金属基纳米复合材料的一种新兴发展方向。

虽然目前一些金属基纳米复合材料的制备工艺仍停留在实验阶段,但随着分析方法的不断进步、制备工艺的不断成熟和制备成本的不断降低,金属基纳米复合材料必将以其优良的特性在新材料、冶金、自动化和航空航天等领域发挥更加巨大的作用。

REFERENCES

- [1] 张立德,牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 5-265.
ZHANG Li-de, MOU Ji-mei. Nanomaterials and nanostructure[M]. Beijing: Science Press, 2001. 5-265.

- [2] 王 淼. 纳米材料应用技术的新进展[J]. 材料科学与工程, 2000, 6: 103 - 105.
WANG Miao. The new progress in the application technology of nanophase materials[J]. Materials Science & Engineering, 2001, 6: 103 - 105.
- [3] 江焕林, 王建宁, 张 军. 纳米材料的应用[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2002, 20(1): 34 - 36.
JIANG Huanlin, WANG Jianning, ZHANG Jun. Application of nanometer materials[J]. Journal of Qinghai University, 2002, 20(1): 34 - 36.
- [4] 曹茂盛, 关长斌, 徐甲强. 纳米材料导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. 44 - 97.
CAO Maosheng, GUAN Changbin, XU Jiaqiang. Nanomaterials introduction[M]. Haerbin: Haerbin University Press, 2001. 97 - 44.
- [5] 赖化清, 范宏训, 徐 祥. 金属基复合材料及其在汽车上的应用[J]. 汽车研究与开发, 2001, 4: 42 - 44.
LAI Huaqing, FAN Hongxun, XU Xiang. Metal matrix composites and application on automobile[J]. R and D of Vehicle, 2001, 4: 42 - 44.
- [6] 周兰章, 郭建亭, 全明秀. NiAlTiC 纳米材料机械合金化合成机理[J]. 金属学报, 1997, 33(11): 1222 - 1226.
ZHOU Lanzhang, GUO Jianing, QUAN Mingxiu. Formation mechanism of NiAl/TiC nano-composite by mechanical alloying[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(11): 1222 - 1226.
- [7] FAN Jinglian, HUANG Baiyun, QU Xuanhui. Rheological behavior of W-NiFe nanostructured powder[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(2): 127 - 130.
- [8] FAN Jinglian, HUANG Baiyun, QU Xuanhui, et al. Characteristics of high energy milled W-NiFe nanocomposite powders[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(3): 208 - 211.
- [9] 黄维清, 王玲玲, 邓辉球. 机械合金化法制备 AlCuFe 纳米非晶合金[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 647 - 650.
HUANG Weiqing, WANG Lingling, DENG Huiqiu. AlCuFe nano amorphous alloy prepared by mechanical alloying[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 647 - 650.
- [10] 席生岐, 周敬恩, 朱蕊花. 高能球磨制备 Al_3Ti/Al 块体纳米晶复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 115 - 119.
XI Shengqi, ZHOU Jing'en, ZHU Ruifeng. Preparation of bulk Al_3Ti/Al nanocomposite by high-energy ball milling and in-situ reaction sintering[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 115 - 119.
- [11] EfEskandarany M S. Mechanical solid state mixing for synthesizing of SiC_p/Al nanocomposites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1998, 279(2): 263 - 271.
- [12] Hwang S, Nishimura C, McCormick P G, et al. Compressive mechanical properties of Mg-TiC nanocomposite synthesized by mechanical milling[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(10): 2457 - 2462.
- [13] Akhtar D, Mather R P, Ruediger A, et al. Melt-spun hard magnetic three-phase nanocrystalline $Nd_5Fe_{78.5}B_{16.5}$ alloy[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(4): 439 - 442.
- [14] Sheng H W, Zhou F, Hu Z Q, et al. Investigation of AlPb nanocomposites synthesized by nonequilibrium processes[J]. Journal of Materials Research, 1998, 13(3): 308 - 315.
- [15] Uenishi K, Matsubara T, Kambara M, et al. Nanostructured titanium-aluminides and their composites formed by combustion synthesis of mechanically alloyed powders[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(8, 9): 2093 - 2097.
- [16] 肖永亮, 李亚利, 梁 勇. 纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料研究[J]. 金属学报, 1996, 32(6): 658 - 662.
XIAO Yongliang, LI Yali, LIANG Yong. Nanometer sized SiC particulates reinforced Al base composite material[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1996, 32(6): 658 - 662.
- [17] 秦晓英, 张立德, 侯碧辉. 惰性气体凝聚法制备纳米 NiAl 合金的结构及磁特性[J]. 金属学报, 1996, 32(3): 303 - 307.
QIN Xiaoying, ZHANG Lide, HOU Bihui. Structure and magnetic character of nanostructured NiAl alloy synthesized by inert-gas condensation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1996, 32(3): 303 - 307.
- [18] Semiatin S L, Jata K V, Uchic M D, et al. Plastic flow and fracture behavior of an AlTiCu nanocomposite[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(3): 395 - 400.
- [19] 邵元智, 蓝 图, 林光明. 稀土大块状非晶/纳米晶双相 NdFeAl 的制备与性能测量[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 362 - 366.
SHAO Yuanzhi, LAN Tu, LIN Guangming, et al. Investigation on bulk rare earth NdFeAl amorphous/nanocrystalline alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 362 - 366.
- [20] 王耐艳, 涂江平, 杨友志. 原位反应纳米 TiB_2/Cu 复合材料的制备和微结构[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 151 - 154.
WANG Naiyan, TU Jiangping, YANG Youzhi, et al. Preparation and microstructure of nanoscale TiB_2/Cu

- in situ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 151 - 154.
- [21] Lee G G, Ha G H, Kim B K. Synthesis of high density ultrafine W/Cu composite alloy by mechano-thermochemical process [J]. Powder Metallurgy, 2000, 43(1): 79 - 82.
- [22] 范景莲, 黄伯云, 张传福. 纳米钨合金粉末的制备技术与烧结技术[J]. 硬质合金, 2001, 18(4): 225 - 231.
FAN Jing-lian, HUANG Bai-yun, ZHANG Chuan-fu. Technology of sintering and preparation of nanometer tungsten based alloy powder [J]. Cemented Carbide, 2001, 18(4): 225 - 231.
- [23] 张凤林, 朱敏, 王成勇. 纳米硬质合金进展[J]. 稀有金属, 2002, 26(1): 54 - 58.
ZHANG Feng-lin, ZHU Min, WANG Cheng-yong. Progress of nanostructured cemented carbide[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2002, 26(1): 54 - 58.
- [24] 沈曾民, 赵东林. 镀镍碳纳米管的微波吸收性能研究[J]. 新型炭材料, 2001, 16(1): 1 - 3.
SHEN Zeng-min, ZHAO Dong-lin. Study on the microwave absorbing property of composite material containing carbon nanotubes with Ni coating[J]. New Carbon Materials, 2001, 16(1): 1 - 3.
- [25] 陈小华, 颜永红, 张高明. NiCo 合金包覆碳纳米管的研究[J]. 微细加工技术, 1999, 2: 17 - 21.
CHEN Xiao-hua, YAN Yong-hong, ZHANG Gao-ming. Preparation of coating of carbon nanotube with nickel-cobalt alloy [J]. Microfabrication Technology, 1999, 2: 17 - 21.
- [26] 陈小华, 张高明, 李宏健. 碳纳米管的化学镀银及 SEM 研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(6): 14 - 17.
CHEN Xiao-hua, ZHANG Gao-ming, LI Hong-jian. Preparation of coating of carbon nanotube with silver and SEM study [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 1999, 26(6): 14 - 17.
- [27] 陈贵如, 徐才录, 毛宗强. 碳纳米管上沉积铂工艺的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 5 - 7.
CHEN Gui-ru, XU Cai-lu, MAO Zong-qiang. Optimization of the technique for depositing platinum on carbon nanotubes [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2001, 41(2): 5 - 7.
- [28] Ota K, Kawabata A, Murakami H, et al. Metal nanocrystals grown by vacuum deposition on aligned carbon nanotubes [J]. Materials Transactions, 2001, 42(8): 1684 - 1687.
- [29] Bezryadin A, Lau C N, Tinkham M, et al. Quantum suppression of superconductivity in ultrathin nanowires [J]. Nature, 2000, 404(6781): 971 - 974.
- [30] Wang J Q, Tong S C. Microstructural stability of gas-atomized Al-based nanophase composites [J]. Materials Transactions, 2001, 42(8): 1710 - 1716.
- [31] Cantor B, Allen C M, Burowski R D. Applications of nanocomposites [J]. Scripta Materialia, 2001, 44(8, 9): 2055 - 2059.
- [32] Patrick B B, William B H, Murray M W. Friction stir processing—a tool to homogenize nanocomposite aluminum alloys [J]. Scripta Materialia, 2001, 44(1): 61 - 66.
- [33] 郭永春, 李建平, 李高宏. 原位自生纳米 Al_3Ti /LY12 复合材料的组织及性能[J]. 热加工工艺, 2002, 2: 28 - 29.
GUO Yong-chun, LI Jian-ping, LI Gao-hong. TEM microstructure and mechanical properties of LY12 aluminium alloy composite reinforced with nano Al_3Ti particle [J]. Hot Working Technology, 2002, 2: 28 - 29.
- [34] 董晟全, 郭永春, 李高宏. 纳米 AlN 颗粒增强铝基复合材料的制备与力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2000, 3: 43 - 47.
DONG Sheng-quan, GUO Yong-chun, Li Gao-hong. The study on synthesizing process and mechanical properties of the nanoparticulate reinforcement aluminum matrix composites [J]. Hot Working Technology, 2000, 3: 43 - 47.
- [35] 李博, 夏冬生, 郭建亭. $\text{NiAl}(\text{Co})$ 金属间化合物纳米晶块体材料的制备及性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(5): 584 - 587.
LI Bo, XIA Dong-sheng, GUO Jian-ting, et al. The preparation and properties of $\text{NiAl}(\text{Co})$ intermetallic bulk nano materials [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2001, 22(5): 584 - 587.
- [36] Asano M, Kobayashi T, Nawa M, et al. Static/dynamic fracture toughness in Y-TZP/Mo nanocomposites [J]. Japan Institute of Metals, 1996, 60(12): 1222 - 1228.
- [37] Luo Y C, Li D Y. New wear-resistant material—nano $\text{TiN}/\text{TiC}/\text{TiNi}$ composite [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(19): 4695 - 4702.
- [38] 陈小华, 李德意, 李学谦. 碳纳米管增强镍基复合镀层的形貌及摩擦磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(1): 7 - 9.
CHEN Xiao-hua, LI De-yi, LI Xue-qian. Morphology and wear behavior of Ni-carbon nanotube composite coating [J]. Tribology, 2002, 22(1): 7 - 9.
- [39] 朱少峰, 张华堂, 佟晓辉. 纳米金刚石增强镍基合金熔覆涂层的摩擦学性能[J]. 金属热处理, 2000, 12:

- 3-5.
- ZHU Shao-feng, ZHANG Huo-tang, TONG Xiao-hui. Tribological behavior of composite coatings of nickel based self-fluxing alloy strengthened by nano-sized diamond powder[J]. Hot Processing Metals, 2002, 12: 3-5.
- [40] 董树荣. 粉末冶金法制备纳米碳管增强铜基复合材料的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, 35(1): 29-32.
- DONG Shu-rong. Preparation of Cu-based composite materials reinforced by nanotube by powder metallurgy[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2001, 35(1): 29-32.
- [41] 董树荣. 巴基管增强铜基复合材料的磨损性能研究[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(1): 1-7.
- DONG Shu-rong. Wear property of Cu-based composite materials reinforced by carbon nanotubes[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(1): 1-7.
- [42] 王浪云, 涂江平, 杨友志. 多壁纳米碳管/Cu 基复合材料的摩擦磨损特性[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 367-371.
- WANG Lang-yun, TU Jiang-ping, YANG You-zhi, et al. Friction and wear behavior of multiwalled carbon nanotube/Cu matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 367-371.
- [43] 董树荣, 涂江平, 张晓彬. 纳米碳管增强铜基复合材料的力学性能和物理性能[J]. 材料研究学报, 2000, 14(增刊): 132-136.
- DONG Shu-rong, ZHANG Xiao-bin. Mechanical properties and physical properties of Cu-based composite materials reinforced by carbon nanotubes[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(S): 132-136.
- [44] 董树荣, 张孝彬. 纳米碳管增强铜基复合材料的滑动磨损特性研究[J]. 摩擦研究学报, 1999, 19(1): 1-6.
- DONG Shu-rong, ZHANG Xiao-bin. Sliding wear property of Cu-based composite materials reinforced by carbon nanotube[J]. Tribology, 1999, 19(1): 1-6.
- [45] 都有为, 倪刚. 磁性纳米材料的新进展[J]. 物理学报, 1998, 27(9): 524-529.
- DU You-wei, NI Gang. New developments of magnetic nanostructured materials[J]. Journal of Physical, 1998, 27(9): 524-529.
- [46] Nakayama T, Yamamoto T A, Choa Y H, et al. Structure and magnetic properties of iron oxide dispersed silver based nanocluster composite[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(15): 3857-3861.
- [47] Tanaka M, Misaka Y, Shiomi K, et al. Magnetic nanocomposites composed of a silver matrix and grains of iron compound[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(8, 9): 2141-2144.
- [48] Oh S T, Sando M, Niihara K, et al. Processing and properties of Ni-Co alloy dispersed Al_2O_3 nanocomposites[J]. Scripta Materialia, 1998, 39(10): 1413-1418.
- [49] Inkson B J, Mulvihill M, Mobus G. 3D-determination of grain shape in a Fe-Al based nanocomposite by 3D-FIB tomography[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(7): 753-758.
- [50] Kim J C, Ryu S S, Lee H, et al. Metal injection molding of nanostructured W-Cu composite powder[J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 1999, 35(4): 47-55.
- [51] 赵泽良, 赵越, 王崇琳. 纳米晶二元双相 $Ag_{50}Ni_{50}$ 合金的制备及其显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 361-364.
- ZHAO Ze-liang, ZHAO Yue, WANG Chong-lin. Synthesis of two phase nanocrystalline $Ag_{50}Ni_{50}$ alloy by mechanic alloying[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 361-364.
- [52] 王崇琳, 林树智, 赵泽良. 热压致密化块体纳米晶 $Ag_{50}Ni_{50}$ 合金的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 741-749.
- WANG Chong-lin, LIN Shu-zhi, ZHAO Ze-liang. Microstructure of bulk nanocrystalline $Ag_{50}Ni_{50}$ alloy prepared by hot pressing of mechanically alloyed powders[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 741-749.
- [53] 高荣根. 纳米结构 WC-Co 复合粉末的制备与应用[J]. 稀有金属与硬质合金, 1999, 137: 49-54.
- GAO Rong-gen. Preparation and applications of nanostructured WC-Co composite powders[J]. Journal of Rare Metals and Cemented Carbide, 1999, 137: 49-54.
- [54] 张立德. 纳米材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 123-125.
- ZHAN Li-de. Nanomaterials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 123-125.
- [55] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 399-411.
- WU Ren-jie. Composites[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000. 399-411.
- [56] 李新林, 王慧远, 姜启川. 颗粒增强镁基复合材料的研究现状及发展趋势[J]. 材料科学和工艺, 2001, 9(2): 219-224.
- LI Xin-lin, WANG Hui-yuan, JIANG Qi-chuan, et al. The present status and developing trends of particulate reinforced magnesium matrix composites[J]. Materials Science & Technology, 2001, 9(2): 219-224.

Status and expectation of research on metal matrix nanocomposites

GONG Rong-zhou¹, SHEN Xiang², ZHANG Lei¹, ZHANG Ling²

(1. Department of Electronic Science and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Faculty of Materials Science and Chemical Engineering,

China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Some of the recent advances in the synthesis of metal matrix nanocomposites were reviewed. Mechanical and magnetic properties of metal matrix nanocomposites were also expounded. Microstructures of metal matrix nanocomposites were analyzed. The development of the relative research and applications in China and abroad were introduced as well. Several major challenges were also analyzed and the future directions were forecast.

Key words: nano-material; metal matrix nanocomposite; mechanical alloying; microstructure; plastic flow; fracture behavior; carbon nanotube

(编辑 陈爱华)