



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104630570 B

(45)授权公告日 2017.02.22

(21)申请号 201410759012.2

(22)申请日 2014.12.11

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104630570 A

(43)申请公布日 2015.05.20

(73)专利权人 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

地址 266111 山东省青岛市城阳区棘洪滩镇锦宏东路88号

专利权人 上海交通大学

(72)发明人 李志强 邓小军 刘韶庆 谭占秋  
范根莲 李斌 张荻 孙召进  
郭建强

(74)专利代理机构 北京元中知识产权代理有限公司 11223

代理人 曲艳

(51)Int.Cl.  
G22C 21/00(2006.01)  
G22C 1/05(2006.01)  
G22F 1/04(2006.01)

审查员 马娜

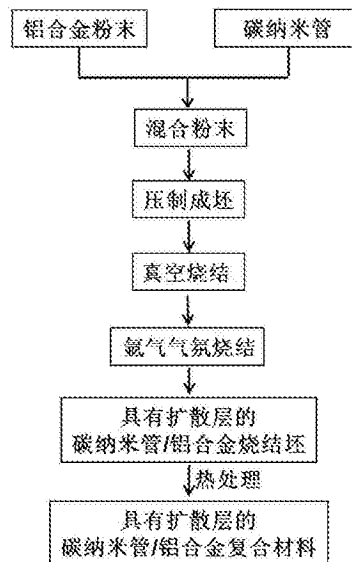
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

## (54)发明名称

一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料及其制备方法

## (57)摘要

本发明提供一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,所述的碳纳米管均匀分布在铝合金基体中,所述碳纳米管的外表面包覆扩散层,所述扩散层自碳纳米管的外表面向铝合金基体延伸,所述扩散层具有与铝合金基体不同的微观结构且与铝合金基体间具有一微观界面,所述高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的阻尼因子为0.005-0.0011。本发明制备的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料由于在碳纳米管外部形成扩散层,可显著降低碳纳米管与合金基体之间的界面势能,调和并强化界面结合,使制备的复合材料具有更理想的塑性、阻尼性能等。



1. 一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,所述的碳纳米管均匀分布在铝合金基体中,其特征在于:所述碳纳米管的外表面包覆扩散层,所述扩散层自碳纳米管的外表面向铝合金基体延伸,所述扩散层具有与铝合金基体不同的微观结构且与铝合金基体间具有一微观界面,所述高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的阻尼因子为0.005-0.011;

其中所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,包括如下步骤:

(1)将碳纳米管与铝合金粉末混合均匀后压制成坯;

(2)将坯加入到烧结炉中,在真空环境中 $0.9-0.99T_m$ 条件下保温10-45min;

(3)真空环境中保温结束后,向烧结炉中通入氩气,使氩气气体压力为0.1MPa,并将烧结炉温度降至 $0.8-0.85T_m$ ,继续保温120-300min,冷却后获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

(4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

(5)将碳纳米管/铝合金型材经 $0.7-0.85T_m$ 温度条件下热处理60-480min获得碳纳米管/铝合金复合材料;

其中,所述 $T_m$ 为所述铝合金粉末的熔点温度。

2. 根据权利要求1所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述扩散层的厚度为碳纳米管直径的0.1-4倍。

3. 根据权利要求2所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述扩散层的厚度为碳纳米管直径的0.1-2倍。

4. 根据权利要求1-3任意一项所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述碳纳米管的直径为5-50nm,长度为1-20 $\mu\text{m}$ 。

5. 根据权利要求4所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述碳纳米管的直径为10-40nm,长度为5-20 $\mu\text{m}$ 。

6. 根据权利要求4所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述碳纳米管的直径为20-30nm,长度为10-15 $\mu\text{m}$ 。

7. 根据权利要求4所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料中碳纳米管的体积含量为0.5-10%。

8. 根据权利要求7所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料中碳纳米管的体积含量为2-8%。

9. 根据权利要求7或8所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料中碳纳米管的体积含量为3-5%。

10. 根据权利要求1所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,其特征在于:所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的拉伸强度为410-418MPa,延伸率为13-15%。

11. 一种具有权利要求1-10任意一项所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,其特征在于:包括以下步骤:

(1)将碳纳米管与铝合金粉末混合均匀后压制成坯;

(2)将坯加入到烧结炉中,在真空环境中 $0.9-0.99T_m$ 条件下保温10-45min;

(3)真空环境中保温结束后,向烧结炉中通入氩气,使氩气气体压力为0.1MPa,并将烧结炉温度降至 $0.8-0.85T_m$ ,继续保温120-300min,冷却后获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

(4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

(5)将碳纳米管/铝合金型材经 $0.7-0.85T_m$ 温度条件下热处理 $60-480\text{min}$ 获得碳纳米管/铝合金复合材料;

其中,所述 $T_m$ 为所述铝合金粉末的熔点温度。

12.根据权利要求11所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,其特征在于:所述铝合金粉末为片状粉末,所述铝合金粉末的厚度为 $0.1-2\mu\text{m}$ ,片径为 $5-500\mu\text{m}$ ,径厚比大于10。

13.根据权利要求11所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,其特征在于:所述步骤(2)中烧结炉的升温速率为 $2-5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,升温至 $0.99T_m$ 后保温 $5-20\text{min}$ ,然后以 $5-15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温至 $0.90-0.95T_m$ ,继续保温 $5-25\text{min}$ 。

14.根据权利要求13所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,其特征在于:所述步骤(2)中烧结炉升温至 $0.99T_m$ 后保温 $5-20\text{min}$ ,然后以 $5-15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温至 $0.90T_m$ ,然后以 $2-5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $0.95$ 继续保温 $5-25\text{min}$ 。

15.根据权利要求11所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,其特征在于:所述步骤(3)向烧结炉中通入氩气并将烧结炉温度以 $5-15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率降至 $0.8-0.85T_m$ ,继续保温 $120-300\text{min}$ ,以 $5-15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率冷却至 $0.6-0.7T_m$ 后以 $2-5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯。

## 一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种高性能铝合金复合材料,具体地说,涉及的是一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的粉末冶金制备方法。

### 背景技术

[0002] 随着高速列车技术的飞速发展,其升级换代对材料的性能要求越来越高,轻质、高拉伸强度、高模量、高塑性、高阻尼材料的应用,不但可有效减轻列车重量,提高列车速度,还能保障列车的安全与舒适性。然而,高速列车现役的铝合金材料(6N01、7N01等)拉伸强度和模量已不能满足高速列车进一步减轻车身重量、提高速度的使用要求,新型高拉伸强度、高模量、高塑性、高阻尼高速列车用金属材料的开发应用,成为制约新一代列车发展的瓶颈。

[0003] 与传统材料相比,碳纳米管具有超高的拉伸强度和模量,并具有低的密度,被认为是制备轻质、高强、高模量新型铝基复合材料最合适的增强体。碳纳米管增强铝合金复合材料不但可获得高模量、高拉伸强度,还可同时提高铝合金基体的阻尼减震性能,因而是适用于高速列车的新型材料。但碳纳米管与传统铝合金(5XXX、6XXX等)复合后界面结合控制较困难,一方面,当界面结合较差时,无法发挥碳纳米管对铝合金基体的增强作用,与铝合金基体相比,复合材料的力学性能并无明显提高;另一方面,当合金基体与碳纳米管发生化学反应形成连续碳化物层(主要是 $Al_4C_3$ 相)时,可以形成强界面结合,但由于碳化物的高脆性,复合材料负载后极易导致碳化物与铝基体界面剥离、脱粘,不能最大化发挥碳纳米管的高拉伸强度、高阻尼增强特性,因而制备的碳纳米管/铝合金复合材料拉伸强度和模量较高,而塑性和阻尼性能较差,材料综合性能不理想。因此,如何在充分控制界面反应的前提下,改善复合界面结合,是碳纳米管/铝合金复合材料获得优异综合性能的关键。

[0004] 对现有技术的文献检索发现,文献“Synthesis of copper coated carbon nanotubes for aluminium matrix composites”(铜包覆碳纳米管制备铝基复合材料)(International Symposium on Advanced Materials(ISAM 2013).IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering 60(2014)012040)采用分子水平混合(molecular-level mixing process)制备铜包覆碳纳米管的铝基复合材料,以改善界面结合,并抑制界面反应;然而,由于铜在致密化烧结或高温热处理过程中,易于扩散至铝基体内部,改变了铝合金中的元素含量,严重影响合金的拉伸强度和耐蚀性。文献“Fabrication and characterization of Al-matrix composites reinforced with amino-functionalized carbon nanotubes”(氨基功能化碳纳米管增强铝基复合材料的制备与表征)(Composites Science and Technology 72(2011)103-111)采用氨基功能化碳纳米管制备了碳纳米管/铝复合材料,以期促进复合界面结合,虽然碳纳米管/铝复合界面结合在一定程度上得到了强化,但材料中仍然生成了较多的碳化物( $Al_4C_3$ ),并不能有效抑制界面反应,难以获得理想的综合性能。文献“Microstructural and mechanical behavior of multi-walled carbon nanotubes reinforced Al-Mg-Si alloy composites in aging treatment”(多

壁碳纳米管增强Al-Mg-Si合金复合材料时效态的微观组织与力学行为)(Carbon 72(2014) 15-21)在采用传统粉末冶金方法制备的CNT/6063铝合金复合材料时发现,合金元素会在碳纳米管附近偏聚并发生反应生成 $Al_2MgC_2$ 、 $MgO$ 、 $MgAl_2O_4$ 等大量脆性陶瓷化合物,从而导致材料力学性能不理想,其制备的T6热处理态0.56vol.%CNT/6063和1.22vol.%CNT/6063复合材料拉伸强度分别为210MPa和180MPa,甚至低于相同条件制备的6063铝合金基体的性能(230MPa)。由此可见,界面反应对材料性能有着致命的影响作用。

[0005] 因此,高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料粉末冶金制备方法的主要问题在于:(1)高温烧结致密化时,碳纳米管与铝合金基体之间界面反应严重,反应产物 $Al_4C_3$ 导致界面结合塑性差,材料综合性能降低;(2)通过碳纳米管的改性处理,可在一定程度上避免碳纳米管与铝合金之间的界面反应,但会影响合金相成分,改变了合金基体的拉伸强度和耐蚀性。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是针对现有技术的不足,提供一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,在碳纳米管/铝合金界面形成一定厚度的扩散层,降低界面势能,调和适当的界面结合,获得良好的塑性、阻尼等综合性能。

[0007] 本发明的技术方案是:一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料,所述的碳纳米管均匀分布在铝合金基体中,所述碳纳米管的外表面包覆扩散层,所述扩散层自碳纳米管的外表面向铝合金基体延伸,所述扩散层具有与铝合金基体不同的微观结构且与铝合金基体间具有一微观界面,所述高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的阻尼因子为0.005-0.011。

[0008] 通常,人们在制备碳纳米管/铝合金复合材料时,往往追求一定量的界面反应层,以获得较高的界面结合拉伸强度。但界面反应 $Al_4C_3$ 层本身性脆很大,与铝合金基体及碳纳米管之间的结合韧性差,当复合材料负载或受到冲击时, $Al_4C_3$ 界面层并不能有效的将载荷传递给碳纳米管,也不能有效吸收冲击能量。因而,具有 $Al_4C_3$ 界面反应层的碳纳米管/铝合金复合材料,虽然由于具有反应结合的强界面,可以具有较高的拉伸强度,但界面的脆性使其塑性和阻尼性能较差,因而综合性能并不理想。本发明的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料在碳纳米管的外表面包覆有扩散层,扩散层由铝合金基体中熔点较高的合金元素偏析形成,既能改善碳纳米管/铝合金基体的界面结合,又避免碳纳米管与铝合金基体发生界面反应形成碳化物界面反应层。通过扩散层降低碳纳米管与铝合金基体间的界面势能,调和适当的界面结合,使碳纳米管/铝合金复合材料获得良好的塑性、阻尼等综合性能。

[0009] 所述扩散层的厚度为碳纳米管直径的0.1-4倍;

[0010] 优选的所述扩散层的厚度为碳纳米管直径的0.1-2倍。

[0011] 当扩散层厚度太小时,该扩散层不足以阻挡从碳纳米管缺陷处游离出的碳原子与铝基体的反应,无法避免 $Al_4C_3$ 反应产物的生成;当扩散层厚度太大时,常需要更长的保温时间或更高的热处理温度,会导致碳纳米管缺陷处的碳原子中扩散层中的铝原子甚至与合金元素发生化学反应,更重要的是,厚的扩散层意味着更多的合金元素会偏聚在碳纳米管附近,改变了铝基体中的合金成分,从而对材料的力学性能不利。因而,本发明研究人员经过长期大量实验确定扩散层厚度为0.1-4倍时,碳纳米管/铝合金复合材料能够获得更好增强和阻尼减震的作用。

[0012] 所述碳纳米管的直径为5-50nm,长度为1-20 $\mu$ m;

[0013] 碳纳米管直径太小,相同体积含量时的数目增加,碳纳米管的聚集和缠结趋势大大增加,给碳纳米管的均匀分散带来巨大挑战,而一旦分散不均匀,则会导致材料致密化恶化、性能下降;碳纳米管直径太大,其性能与碳纤维较接近,难以体现碳纳米管的增强优势。

[0014] 优选的,所述碳纳米管的直径为10-40nm,长度为5-20 $\mu\text{m}$ ;

[0015] 更优选的,所述碳纳米管的直径为20-30nm,长度为10-15 $\mu\text{m}$ 。

[0016] 所述高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料中碳纳米管的体积含量为0.5-10%;

[0017] 若碳纳米管体积含量太小(<0.5%),其对复合材料阻尼性能的影响作用很小;若碳纳米管体积含量太大(>10%),则材料致密化下降。

[0018] 优选高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料中碳纳米管的体积含量为2-8%;

[0019] 更优选高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料中碳纳米管的体积含量为3-5%。

[0020] 所述的高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的拉伸强度为410-418MPa,延伸率为13-15%。

[0021] 本发明的另一目的在于提供一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,

[0022] 一种高阻尼碳纳米管/铝合金复合材料的制备方法,包括以下步骤:

[0023] (1)将碳纳米管与铝合金粉末混合均匀后压制成坯;

[0024] (2)将坯加入到烧结炉中,在真空环境中0.9-0.99 $T_m$ 条件下保温10-45min;

[0025] (3)真空环境中保温结束后,向烧结炉中通入氩气,使氩气气体压力为0.1MPa,并将烧结炉温度降至0.8-0.85 $T_m$ ,继续保温120-300min,冷却后获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0026] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0027] (5)将碳纳米管/铝合金型材经0.7-0.85 $T_m$ 温度条件下热处理60-480min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0028] 其中,所述 $T_m$ 为所述铝合金粉末的熔点温度。

[0029] 在本发明的方法中,首先将碳纳米管与铝合金粉末均匀混合,短时高温真空烧结和长时间低温氩气保护烧结致密化过程,获得具有界面扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯。烧结过程中的短时高温真空可以加快原子扩散传质过程,实现复合材料的快速烧结并完成一定程度的致密化;短时真空烧结后降温至0.8-0.85 $T_m$ ,在降温的过程中一部分高熔点的合金组分在碳纳米管的外表面偏析结晶,形成了扩散层。扩散层形成后,在0.8-0.85 $T_m$ 条件下经长时间氩气保护烧结使扩散层中的低熔点组分熔出,进一步控制碳纳米管附近复合界面层的形成。通过调控合适的烧结温度和时间碳纳米管/铝合金界面产生扩散层,并且真空和氩气保护的条件下避免碳纳米管与铝合金基体间发生化学反应,降低界面势能,改善界面结合,增强界面载荷与振动能量的传导吸收,提高材料拉伸强度与阻尼减震综合性能。 $T_m$ 为所述铝合金粉末的熔点温度,也就是铝合金的熔点温度,一般为520-660 $^{\circ}\text{C}$ 。

[0030] 所述铝合金粉末为片状粉末,所述铝合金粉末的厚度为0.1-2 $\mu\text{m}$ ,片径为5-500 $\mu\text{m}$ ,径厚比大于10。

[0031] 采用片状的铝合金粉末与碳纳米管混合,首先由于片状粉末具有更大的比表面积,能够提高碳纳米管与铝合金粉末之间的混合效果,使碳纳米管均匀的分散在片状铝合金粉末的表面;其次能够降低压制成坯后的孔隙率,还在烧结的过程中更容易致密化,在烧结的过程中铝合金与碳纳米管的结合会更加紧密,在降温的过程中,高熔点的组分更容易

向碳纳米管的外表面迁移并在碳纳米管的外表面偏析形成扩散层。

[0032] 所述步骤(2)中烧结炉的升温速率为2-5°C/min,升温至0.99T<sub>m</sub>后保温5-20min,然后以5-15°C/min的速率降温至0.90-0.95T<sub>m</sub>,继续保温5-25min。

[0033] 真空烧结可以分两步进行,在0.99T<sub>m</sub>保温5-20min,使铝合金中的合金组分接近熔融状态加速合金的快速传质扩散,实现复合材料初步致密化;以5-15°C/min的速率降温至0.90-0.95T<sub>m</sub>,由于降温速率过快,铝合金中的一些高熔点组分会在碳纳米管的外表面结晶偏析。在0.90-0.95T<sub>m</sub>,继续保温5-25min可以进一步提高铝合金的致密化效果。

[0034] 所述步骤(2)中烧结炉升温至0.99T<sub>m</sub>后保温5-20min,然后以5-15°C/min的速率降温至0.90T<sub>m</sub>,然后以2-5°C/min的速率升温至0.95继续保温5-25min。

[0035] 真空烧结降温再升温的过程有利于提高扩散层的厚度,增强扩散层与碳纳米管的结合能力。烧结炉以5-15°C/min的速率降温至0.90T<sub>m</sub>可以使熔点介于0.90T<sub>m</sub>与0.99T<sub>m</sub>之间的大部分高熔点合金组分在碳纳米管的外表面偏析结晶,提高了扩散层的厚度。在升温的过程中,可以将掺杂在高熔点组分中结晶析出的部分低熔点组分重新溶解到铝合金基体中,然后继续保温5-25min,使扩散层降低了碳纳米管之间的界面势能,使扩散层与碳纳米管之间结合更加紧密。

[0036] 所述步骤(3)向烧结炉中通入氩气并将烧结炉温度以5-15°C/min的降温速率降至0.8-0.85T<sub>m</sub>,继续保温120-300min,以5-15°C/min的降温速率冷却至0.6-0.7T<sub>m</sub>后以2-5°C/min的降温速率冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯。

[0037] 烧结炉以5-15°C/min的降温速率降至0.8-0.85T<sub>m</sub>,使碳纳米管/铝合金复合材料以碳纳米管为核心,碳纳米管外表面的扩散层组分由内向外熔点逐渐降低,最终与铝合金基体的熔点相同。

[0038] 与现有技术相比,本发明具有以下优点:(1)易于使复合材料获得良好的拉伸强度、塑性及阻尼减震等综合性能;(2)通过控制烧结致密化的温度和时间调控合适厚度的界面扩散层,而不必对碳纳米管进行复杂的界面改性处理,工艺简便灵活,易于制备大尺寸复合材料。

## 附图说明

[0039] 图1是本发明的工艺流程图

[0040] 图2是碳纳米管与铝合金基体的界面特征图

## 具体实施方式

[0041] 本发明通过如下实施例做详细说明:

[0042] 实施例1

[0043] (1)将直径为5-50nm,长度为1-20μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500μm,径厚比大于10的铝合金粉末按2:98的体积比混合均匀后压制成坯;

[0044] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}$ Pa,烧结炉以5°C/min的升温速率升温至614°C后,在614°C条件下保温20min;

[0045] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为0.1MPa,控制烧结炉温度15°C/min的降温速率降至527°C,在527°C条件下继续保温180min,控制降温速率为15°C/min

降温至430℃后,控制降温速率为2℃/min冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0046] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0047] (5)将碳纳米管/铝合金型材480℃热处理480min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0048] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为5-10nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为415MPa和15%,阻尼因子为0.011。

[0049] 实施例2

[0050] (1)将直径为10-40nm,长度为5-20μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500μm,径厚比大于10的铝合金粉末按10:90的体积比混合均匀后压制成坯;

[0051] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}$ Pa,烧结炉以2℃/min的升温速率升温至614℃后,在614℃条件下保温5min,以10℃/min的速率降温至590℃,继续保温25min;

[0052] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为0.1MPa,控制烧结炉温度5℃/min的降温速率降至527℃,在527℃条件下继续保温180min,控制降温速率为15℃/min降温至380℃后,控制降温速率为5℃/min冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0053] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0054] (5)将碳纳米管/铝合金型材500℃热处理180min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0055] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为10-20nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为410MPa和13%,阻尼因子为0.009。

[0056] 实施例3

[0057] (1)将直径为20-30nm,长度为10-15μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500μm,径厚比大于10的铝合金粉末按0.5:99.5的体积比混合均匀后压制成坯;

[0058] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}$ Pa,烧结炉以2℃/min的升温速率升温至614℃后,在614℃条件下保温15min,以10℃/min的速率降温至558℃,然后以5℃/min的速率升温至590℃,继续保温5min;

[0059] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为0.1MPa,控制烧结炉温度5℃/min的降温速率降至500℃,在500℃条件下继续保温300min,控制降温速率为10℃/min降温至420℃后,控制降温速率为3℃/min冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0060] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0061] (5)将碳纳米管/铝合金型材500℃热处理60min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0062] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为10-20nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为418MPa和14%,阻尼因子为0.007。

[0063] 实施例4

[0064] (1)将直径为10-40nm,长度为10-15μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500μm,径厚比大于10的铝合金粉末按5:95的体积比混合均匀后压制成坯;

[0065] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}$ Pa,烧结炉以5℃/min的升温速率升温至614℃后,在614℃条件下保温20min,以15℃/min的速率降温至558



℃,然后以2℃/min的速率升温至590℃,继续保温15min;

[0066] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为0.1MPa,控制烧结炉温度10℃/min的降温速率降至500℃,在500℃条件下继续保温300min,控制降温速率为15℃/min降温至420℃后,控制降温速率为2℃/min冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0067] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0068] (5)将碳纳米管/铝合金型材500℃热处理60min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0069] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为10-20nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为418MPa和14%,阻尼因子为0.011。

[0070] 实施例5

[0071] (1)将直径为10-40nm,长度为10-15μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500μm,径厚比大于10的铝合金粉末按3:97的体积比混合均匀后压制成坯;

[0072] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}$ Pa,烧结炉以5℃/min的升温速率升温至614℃后,在614℃条件下保温20min,以10℃/min的速率降温至558℃,然后以3℃/min的速率升温至590℃,继续保温15min;

[0073] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为0.1MPa,控制烧结炉温度5℃/min的降温速率降至500℃,在500℃条件下继续保温180min,控制降温速率为10℃/min降温至420℃后,控制降温速率为3℃/min冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0074] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0075] (5)将碳纳米管/铝合金型材500℃热处理120min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0076] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为5-10nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为417MPa和13%,阻尼因子为0.009。

[0077] 实施例6

[0078] (1)将直径为20-30nm,长度为10-15μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500μm,径厚比大于10的铝合金粉末按8:92的体积比混合均匀后压制成坯;

[0079] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}$ Pa,烧结炉以5℃/min的升温速率升温至614℃后,在614℃条件下保温15min,以10℃/min的速率降温至558℃,然后以3℃/min的速率升温至590℃,继续保温25min;

[0080] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为0.1MPa,控制烧结炉温度5℃/min的降温速率降至500℃,在500℃条件下继续保温180min,控制降温速率为10℃/min降温至420℃后,控制降温速率为4℃/min冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0081] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0082] (5)将碳纳米管/铝合金型材500℃热处理120min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0083] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为5-10nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为416MPa和13%,阻尼因子为0.008。

[0084] 实施例7

[0085] (1)将直径为20-30nm,长度为10-15μm的碳纳米管与厚度为0.1-2μm,片径为5-500

$\mu\text{m}$ , 径厚比大于10的铝合金粉末按3:97的体积比混合均匀后压制成坯;

[0086] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ ,烧结炉以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $614^\circ\text{C}$ 后,在 $614^\circ\text{C}$ 条件下保温25min,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温至 $558^\circ\text{C}$ ,然后以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $590^\circ\text{C}$ ,继续保温10min;

[0087] (3)向烧结炉中通入氩气,使烧结炉中氩气气体压力为 $0.1\text{MPa}$ ,控制烧结炉温度 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率降至 $500^\circ\text{C}$ ,在 $500^\circ\text{C}$ 条件下继续保温180min,控制降温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 降温至 $420^\circ\text{C}$ 后,控制降温速率为 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ 冷却至室温,获得具有扩散层的碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0088] (4)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0089] (5)将碳纳米管/铝合金型材 $500^\circ\text{C}$ 热处理120min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0090] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面扩散层厚度为5-10nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为 $416\text{MPa}$ 和13%,阻尼因子为0.009。

[0091] 本发明实施例1-7所制备的碳纳米管/铝合金复合材料在碳纳米管的外表面具有一层合金扩散层,扩散层的厚度为5-20nm,室温下碳纳米管/铝合金复合材料的拉伸强度为 $410-418\text{MPa}$ ,延伸率为13-15%,阻尼因子为0.005-0.011。

[0092] 比较例1

[0093] (1)将直径为20-30nm,长度为10-15 $\mu\text{m}$ 的碳纳米管与厚度为0.1-2 $\mu\text{m}$ ,片径为5-500 $\mu\text{m}$ ,径厚比大于10的铝合金粉末按2:98的体积比混合均匀后压制成坯;

[0094] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空至烧结炉内压力小于 $2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ ,烧结炉以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $614^\circ\text{C}$ 后,在 $614^\circ\text{C}$ 条件下保温90min,冷却至室温,获得碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0095] (3)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0096] (4)将碳纳米管/铝合金型材 $500^\circ\text{C}$ 热处理120min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0097] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面存在针状的碳化物晶体, $\text{Al}_4\text{C}_3$ 反应层厚度为25-30nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为 $358\text{MPa}$ 和3.5%,阻尼因子为0.004。

[0098] 比较例2

[0099] (1)将直径为20-30nm,长度为10-15 $\mu\text{m}$ 的碳纳米管与厚度为0.1-2 $\mu\text{m}$ ,片径为5-500 $\mu\text{m}$ ,径厚比大于10的铝合金粉末按2:98的体积比混合均匀后压制成坯;

[0100] (2)将坯加入到烧结炉中,抽真空后向烧结炉内充入氩气至烧结炉内压力 $0.1\text{MPa}$ ,烧结炉升温至 $614^\circ\text{C}$ 后,在 $614^\circ\text{C}$ 条件下保温90min,冷却至室温,获得碳纳米管/铝合金烧结坯;

[0101] (3)将碳纳米管/铝合金烧结坯经挤压变形加工制备碳纳米管/铝合金型材;

[0102] (4)将碳纳米管/铝合金型材 $500^\circ\text{C}$ 热处理120min获得碳纳米管/铝合金复合材料。

[0103] 碳纳米管/铝合金复合材料中界面存在针状的碳化物晶体, $\text{Al}_4\text{C}_3$ 反应层厚度为20-28nm,室温下材料的拉伸强度和延伸率分别为 $350\text{MPa}$ 和3.2%,阻尼因子为0.003。

[0104] 由比较例1-2可以看出,采用真空烧结和氩气气氛烧结相结合,并在真空烧结的过程中控制温度变化能够避免碳纳米管与铝合金基体反应生成碳化物层。明显的提高碳纳米管/铝合金复合材料的阻尼因子和延伸率。

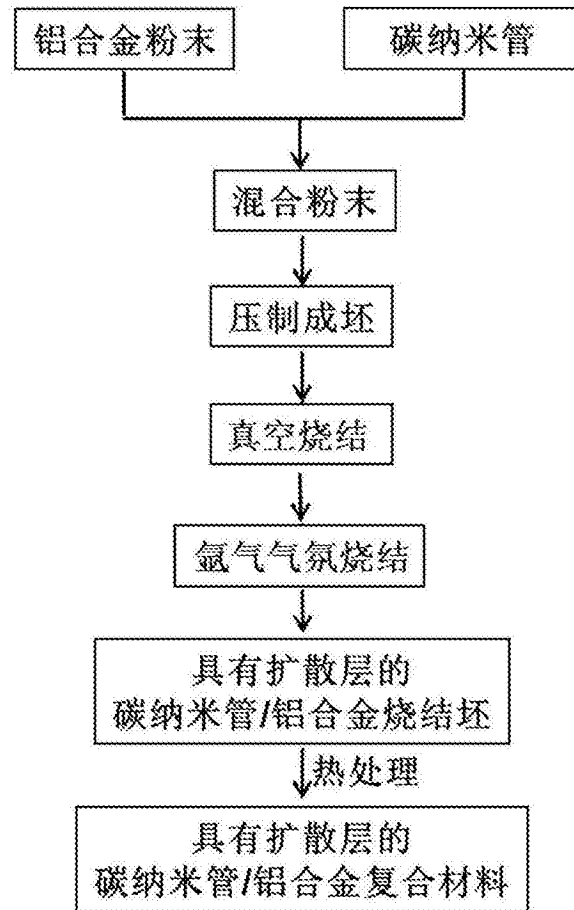


图1

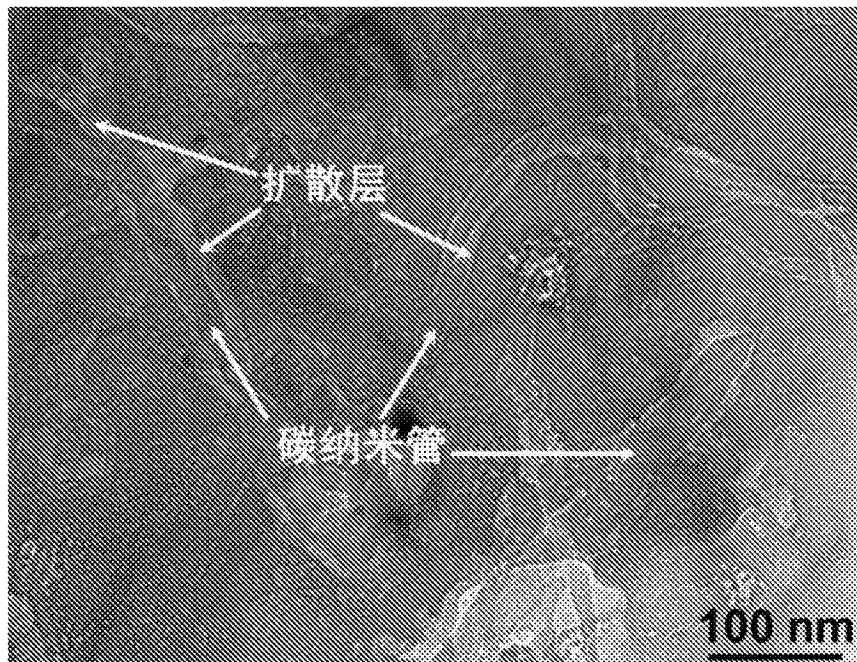


图2