DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20170254

CNTs 含量对 CNTs/Al 微观组织及力学性能的影响

庞 秋[1],胡志力[2],谷万里[3],吉国强[4],孙东立[5]

(1.武汉东湖学院 机电工程学院,武汉 430212;2.武汉理工大学 汽车工程学院,武汉 430070;3.山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255000;4.中国广州分析测试中心,广州 510070;5.哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要:为增加碳纳米管(CNTs)在铝基体中的分散性,利用机械球磨-真空热压烧结工艺制备碳纳米管/铝(CNTs/Al)复合材料,采用扫描电子显微镜(SEM)、电子万能试验机和万能摩擦磨损实验机,研究了 CNTs 质量分数对CNTs/Al复合材料微观组织、力学性能及摩擦磨损性能的影响.结果表明:CNTs 经超声波预先分散后分散性增加;当 CNTs 质量分数为2.0%时,复合材料中 CNTs 与 Al 粉之间表现出较好的相容性;随着 CNTs 含量进一步增加,CNTs 团聚现象严重;热压烧结温度600 ℃时,随着 CNTs 添加量的增加,铝基复合材料的屈服强度和抗拉强度呈现出明显的先增大后降低的趋势,同时,CNTs/Al 复合材料的摩擦因数和磨损率随 CNTs 含量的增大先减小后增加;CNTs 质量分数为2.0%时,复合材料的屈服强度最大值为116 MPa,抗拉强度最大值为245 MPa,与纯 Al 基体相比,分别提高了78%和1.9倍.2.0% CNTs/Al 复合材料可获得较好的摩擦磨损性能,其摩擦系数和磨损率呈现平缓趋势,复合材料的磨痕最浅.

关键词:碳纳米管(CNTs);Al 基复合材料;粉末冶金法;力学性能;显微组织

中图分类号:TB34 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-0299(2019)01-0030-09

The effect of CNTs content on the microstructure and mechanical properties of CNTs/Al composites

PANG Qiu[1], HU Zhili[2], GU Wanli[3], JI Guoqiang[4], SUN Dongli[5]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China; 2. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China; 4. China National Analytical Center, Guangzhou 510070, China; 5. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to increase the dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum matrix, CNTs/Al composites were successfully fabricated by the combination of ball-milling and the vacuum sintering. The effects of CNTs contents on the microstructure, mechanical properties, and friction-wear performance of CNTs/Al composites were investigated by means of scanning electron microscopy (SEM), electronic universal testing and friction, and wear testing machines. Results show that the dispersion of CNTs increased after ultrasonic dispersion. When the content of CNTs was 2wt.%, the CNTs and Al matrix composites showed better compatibility. However, with further increase of CNTs contents, the phenomenon of CNTs reunion was intense. When the sintering temperature was 600 ℃, the tensile and yield strengths of CNTs/Al composites first increased and then decreased with the increase of CNTs contents. Simultaneously, the friction coefficient and wear rate of CNTs/Al composites firstly increased and then decreased with the increase of CNTs contents. When the content of CNTs was 2.0 wt.%, the tensile and yield strengths of CNTs/Al composites reached the maximum of 245 MPa and 116 MPa, which was improved by 1.9 times and 78% compared with pure Al matrix, respectively. In addition, the friction and wear properties of the 2wt.% CNTs/Al composites were better. The friction coefficient and wear rate curves of the 2wt.% CNTs/Al composite had a better wear performance and showed a steady state. The grinding marks of the 2wt.% CNTs/Al composite became smoother.

Keywords: carbon nanotubes (CNTs); Al matrix composites; powder metallurgy method; mechanical properties; microstructure

随着现代工业特别是航空航天和汽车制造业的迅速发展,轻量化是未来发展的重要趋势.实现轻量化的主要途径是采用铝合金、高强钢和碳纤维等轻量化材料.纳米相增强铝基复合材料是近十年迅速发展起来的一种新型材料[1-3].由于纳米分散相具有大的表面积和强的

收稿日期:2017-07-25. **网络出版日期**:2018-01-11.
基金项目:国家自然科学基金项目(51501133);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队项目(T201629);哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开放基金(AWJ-M16-11).
作者简介:庞 秋(1979—),女,博士,副教授;
谷万里(1965—),男,教授,博士生导师;
孙东立(1958—),女,教授,博士生导师.
通信作者:胡志力,E-mail:zhilihuhit@163.com
期刊网址:http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx

界面相互作用,纳米复合材料表现出不同于一般宏观复合材料的力学、热学、电学、磁学和光学性能,还可能具有原组分不具备的特殊性能和功能[4]. 因此,纳米相增强铝基复合材料被认为是 21 世纪最有前途的材料之一.

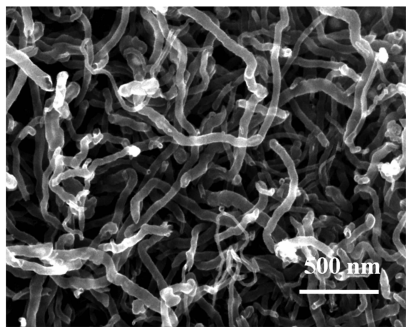
碳纳米管(CNTs)作为一种自组装单分子材料,具有独特的结构和优异的理化性能,其抗拉强度约为高强钢的 100 倍,密度仅为钢的 1/6 ~ 1/7;同时,CNTs 还具有优良的导电导热性、低的热膨胀系数、良好的热稳定性和耐蚀性而成为纳米科技领域的研究热点[5-6],被认为是制备高性能复合材料的理想增强相之一. 目前,北美[7]、欧盟[8]、亚洲[9]等国家和地区都投入了大量的资金对 CNT/Al 复合材料进行了一系列的研究,例如:邓春锋等[10]以 2024Al 合金为基体,采用热挤压方法结合冷等静压制备了 WCNT/Al 复合材料,研究结果表明,当碳纳米管体积分数为 2.1% 时,WCNT/Al 复合材料具有良好的力学性能,与基体材料相比,其硬度、抗拉强度和屈服强度分别提高了 33.0%、34.6% 和 39.7%. 许世娇等[11]采用高能球磨法结合粉末冶金工艺制备了 CNT/Al 复合材料,结果发现,CNT 体积分数 1.5% 时,复合材料的力学性能达到最高值,屈服强度相对于纯 Al 基体提高了 53.6%. Bastwros 等[12]利用高能量球磨结合冷热挤压工艺制备 CNT/Al 复合材料,研究了复合材料的摩擦磨损性能,结果表明,添加适量 CNT 后,复合材料的硬度和耐磨性显著增加,与纯铝相比,质量分数 5% 的 CNT/Al 复合材料磨损率降低了 78.8%. Laha 等[13]采用等离子喷涂工艺制备了质量分数 10% 的 CNT 增强 6061Al 复合材料,与基体 6061Al 合金材料相比,复合材料的硬度明显提高,其硬度达到(146 ± 10)VHN. 然而,目前大部分研究存在较大技术难题是:由于 CNTs 具有较高比表面能,如何将严重团聚 CNTs 均匀分散在金属基体中;同时,如何解决低表面活性 CNTs 与金属基体的润湿性问题,达到与基体的牢固结合. 同时,研究只针对 CNT/Al 复合材料的单一性能进行,缺少系统全面的性能分析.

本文预先采用超声波对缠绕的 CNTs 进行分散,然后利用机械球磨 - 真空热压工艺制备不同质量分数 CNTs/Al 复合材料. 采用 SEM 等显微观测手段研究 CNTs 质量分数对 CNTs/Al 复合材料微观组织结构的影响,并利用电子万能试验机和万能摩擦磨损实验机对不同质量分数 CNTs/Al 复合材料的力学性能及其摩擦磨损性能进行了分析.

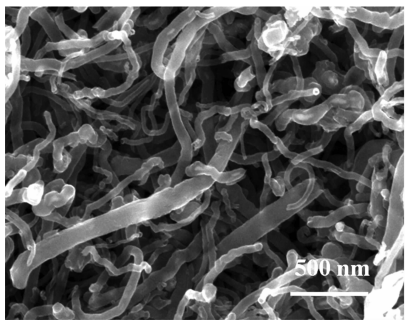
1　实　验

1.1　CNTs 的纯化及分散处理

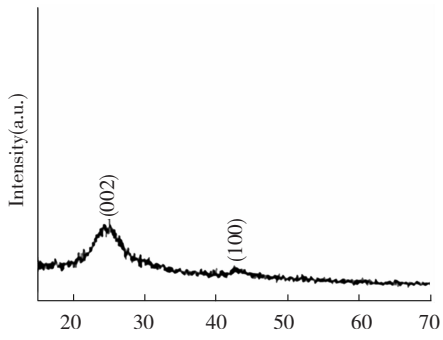
采用化学气相沉积法(CVD)制备试验所用的多壁碳纳米管,管径 60 ~ 100 nm,纯度(质量分数)大于 95%,比表面积大于 60 m^2/g,图 1 所示为 CNTs 的原始形貌. 首先,为去除 CNTs 中混合的碳相及催化剂颗粒等杂质,对多壁碳纳米管进行纯化处理. 取一定量的原始碳纳米管,加入浓度 2 mol/L 的 NaOH 溶液,超声处理 1 h 后,在磁力搅拌器上加热并冷凝回流 2 h,用去离子水洗涤至中性. 然后,对 CNTs 进行分散处理,将 CNTs 置于 100 mL 的乙醇溶剂中,用 20 kHz、3 000 W 超声分散 30 min,并加热回流 1 h,再用去离子水洗涤至中性. 最后,100 ℃ 真空干燥 2 h.



(a) 原始形貌



(b) 超声波分散 30 min



(c) CNTs 的 XRD 谱图

图 1　CNTs 形貌及 XRD 谱图

Fig. 1　Morphologies and XRD spectrum of CNTs: (a) Morphology of original CNTs; (b) CNTs after ultrasonic dispersion 30 min; (c) XRD spectrum of CNTs

图 1 给出了超声波分散前后 CNTs 的 SEM 照片(已经进行了纯化处理). 图 1(a)为 CNTs 的微观原始形貌,可以看出,纯化处理后去除了与 CNTs 缠绕的杂质,初始 CNTs 较长,管壁均匀光滑,呈纤维状一维管状结构分布,彼此相互缠结、团聚且有一定的弯曲. 图 1(b)为无水乙醇中超声分散 30 min 后的照片,可以看出,超声波振荡对 CNT 没有明显的损伤,CNTs 的长度没有变化,CNTs 仍然保持完整管壁结构,壁厚均匀,CNTs 中缠结的部分有所改善,团簇已有打开的趋势. 图 1(c)为超声波分散 30 min 后的碳纳米管 X 射线衍射谱图,可以看出,碳纳米管的主要衍射峰出现在衍射角(2θ)为 25.83°处,其衍射峰对应的晶面指数分别为(002)、(100)晶面,这与文献[10]中给出的碳纳米管 XRD 谱图相一致.

1.2 机械球磨制取 CNTs/Al 复合粉末

采用南京大学仪器厂生产的 QM - ISP4 - CL 型球磨机,利用玛瑙球在干磨和湿磨(乙醇介质)2 种状态下对 CNTs 进行预球磨,以氩气为保护气氛,球磨转速 400 r/min,球磨时间 1 h. 然后,将预球磨好的 CNTs 按照适当的质量分数(1.0%、2.0%、3.0%和 4.0%)混合到装有铝粉的玛瑙罐中,采用氩气作为保护气体防止高速球磨过程中铝粉表面氧化. CNTs 和铝粉混球磨转速 300 r/min,球磨时间 1 h,球料比为 5∶1.

1.3 真空热压烧结制备 CNTs/Al 复合材料

称取一定量样品(40 g)装入 ZRY - 30L 真空热压烧结炉的石墨模具中,烧结前利用电子万能实验机对模具中的粉末进行预压. 然后,将样品放入真空热压烧结炉中,采用真空泵将炉内抽至真空,通入高纯氩气作保护气体,将样品进行烧结,烧结温度 600 ℃,升温速度 10 ℃/min,保温时间 20 min. 利用阿基米德原理测量样品的相对密度.

采用飞利浦公司生产的 FEI Siron200 扫描电镜(SEM)分别对 CNTs/Al 复合材料及拉伸断口形貌进行观察. 利用 HV - 5 维氏硬度计对不同质量分数 CNTs/Al 复合材料的表面硬度进行测量,条件为载荷 3 000 g,加载时间 10 s,每个试样测量 3 次求取算术平均值. 力学性能测试在 CSS - 88000 电子万能拉伸试验机上进行拉伸测试,应变速率 0.5 mm/min. 拉伸试样的标距 26 mm,拉伸试样的形状与尺寸如图 2 所示,厚度 5 mm. 同时,利用销 - 盘接触式摩擦磨损实验机对 CNTs/Al 复合材料表面耐磨性能进行测试.

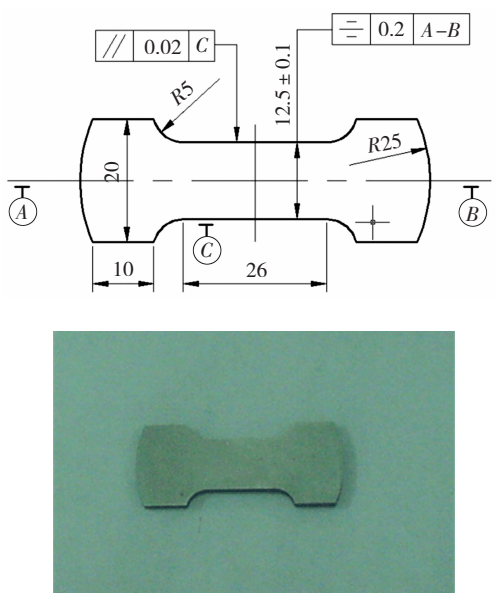


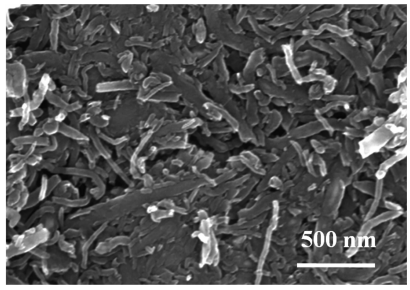
图 2 拉伸试验样品尺寸及实物图(单位:mm)

Fig. 2 Sample dimension of tensile test and picture of real product

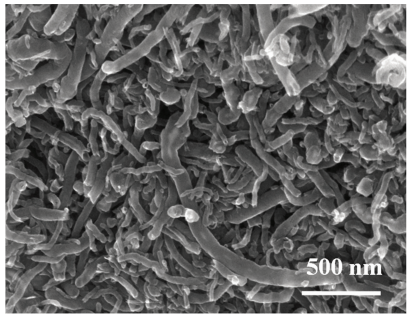
2 结果与讨论

2.1 干磨和湿磨(乙醇)介质对 CNTs 形貌的影响

图 3 为玛瑙球干磨和湿磨 2 种介质对 CNTs 进行预球磨 400 r/min +1 h 的 SEM 照片.



(a) 干磨



(b) 湿磨

图 3 玛瑙球球磨 400 r/min +1 h 后 CNTs 形貌

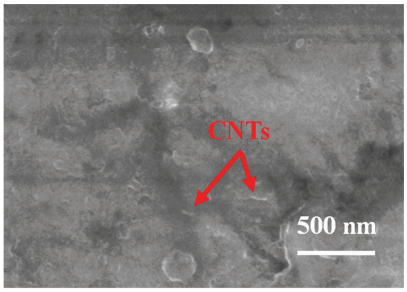
Fig. 3 Morphologies of CNTs after ball-milling with agate balls at 400 r/min for 1 h: (a) dry ball-milled; (b) wet ball-milled

对比可以发现:球磨介质对 CNTs 的切断效果差异较大,玛瑙球干磨时 CNTs 的切断比较明

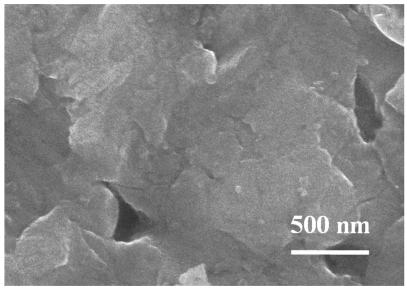
显,长短较均匀一致,并且其弯曲和缠结的管部被明显解开,如图 3(a)所示,然而,湿磨时可能由于乙醇介质浸润 CNTs 表面,使得 CNTs 的柔韧性及弹性增加,因而不利于碳管发生切断,如图 3(b)所示. 结果表明,采用玛瑙球对 CNTs 进行干磨比较适宜[14].

2.2　CNTs 质量分数对复合材料形貌的影响

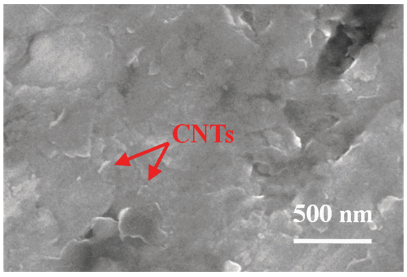
图 4 所示为不同质量分数 CNTs/Al 复合材料的形貌照片.



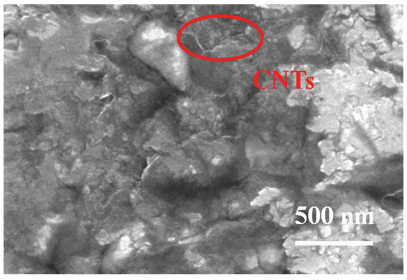
(a) 1%CNTs/Al



(b) 2%CNTs/Al



(c) 3%CNTs/Al



(d) 4%CNTs/Al

图 4　不同质量分数 CNTs/Al 复合材料形貌

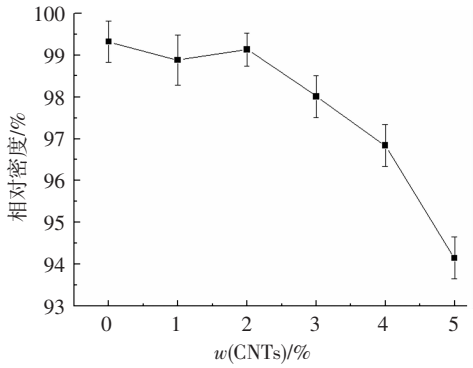
Fig. 4　SEM morphologies of CNTs/Al composites with different mass fractions of CNTs

由图 4 可以看出:添加质量分数 1.0% 的 CNTs 样品中,增强相 CNTs 与铝基体分布相对均匀,样品表面未出现大块团聚的 CNTs,但样品表面存在微小孔洞,如图 4(a)所示;质量分数 2% 的 CNTs/Al 复合材料样品致密,表面组织较光滑,复合材料中 CNTs 与超细铝粉之间表现出较好的相容性,CNT 几乎全部嵌入到韧性的 Al 粉中,没有发现碳管露头现象,很难分辨出 CNTs 的存在,如图 4(b)所示;当 CNTs 质量分数增加到 3.0% 时,CNTs 与铝基体之间相容性变差,少许的 CNT 零散地分布在样品表面,如图 4(c)所示;当质量分数 4.0% 的 CNTs 添加到铝基体时,SEM 照片显示,CNTs 存在一定的团聚与缠结现象且表面孔洞增多[15],容易导致裂缝形成,如图 4(d)所示.

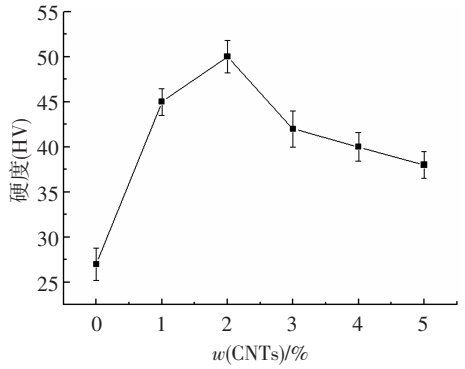
2.3　CNTs 质量分数对复合材料拉伸性能的影响

2.3.1　CNTs 质量分数对复合材料密度和硬度的影响

图 5 所示为 CNTs 质量分数对复合材料相对密度和硬度的影响曲线.



(a) 相对密度



(b) 硬度

图 5　不同 CNTs 含量 CNTs/Al 复合材料相对密度和硬度的曲线

Fig. 5　Curves of relative density and hardness of CNTs/Al composites with different CNTs contents: (a) relative density; (b) hardness

从图 5(a)可以看出,纯铝的相对密度为 99.32%,添加适量的 CNTs(质量分数≤2.0%),CNTs/Al 复合材料的相对密度呈平缓递减趋势. 当 CNTs 质量分数达到 2.0% 时,复合材料相对密

度达到最大值 99.13%，比纯铝基体稍低些. 随着 CNTs 含量进一步增加，CNTs/Al 复合材料的相对密度曲线迅速下滑. 这可能由于 CNTs 质量分数大于 2.0% 时 CNTs 团聚现象严重，使得 CNTs 与铝基体之间相容性降低，CNTs/Al 复合材料相对密度也降低.

从图 5(b) 中可知：随着 CNTs 质量分数从 1% 增加至 4%，CNTs/Al 复合材料的硬度曲线遵循先增加后降低的变化规律；当 CNTs 的质量分数为 2.0% 时，复合材料硬度达到最大值 65 kg/mm^2. 这一方面可能由于添加适当的 CNTs，使得增强相 CNTs 能够均匀地分散在 Al 基体中，复合材料中的孔洞能够被 CNTs 填充，有效提高了复合材料的致密度；另一方面，由于碳纳米管本身具有优异的力学性能，碳纳米管与基体之间界面结合较好，从而使 CNTs/Al 复合材料的硬度明显提高.

但是，随着 CNTs 质量分数增多(≥3.0%)，复合材料的硬度下降(如图 5(b) 所示). 这是由于复合材料中 CNTs 出现团聚现象，而孔隙等组织缺陷容易在 CNTs 团聚体处出现，使得复合材料的硬度下降.

2.3.2 CNTs 质量分数对复合材料力学性能的影响

表 1 给出了不同质量分数 CNTs/Al 复合材料与纯 Al 材料力学性能的对比. 从表 1 可以看出，随着 CNTs 质量分数的增加，CNTs/Al 复合材料的抗拉强度和屈服强度先增加后降低. 当 CNTs 质量分数为 2.0% 时，复合材料的抗拉强度和屈服强度出现峰值，分别为 245 和 116 MPa. 这是由于在一定的 CNT 含量(质量分数≤2.0%)内，CNTs 与铝基体的相容性、界面润湿性较好，CNT 能够得到充分的分散，对铝基体起到良好的强化效果. 但是，当 CNTs 含量超过临界体积分数后，过量的 CNTs 在基体中发生偏聚使其分布不均匀，将会导致复合材料的力学性能降低.

然而，随着 CNTs 质量分数不断增加，复合材料的弹性模量明显提高. 这是由于 CNTs 的弹性模量较高(10^3 GPa)，CNTs 的加入导致复合材料的弹性模量高于基体合金，如表 1 所示. 另外，CNTs 也可能通过阻碍位错运动而提高复合材料的弹性模量[16]. 同时，与纯铝样品相比，随着 CNTs 含量增加，CNTs/Al 复合材料的延伸率明显降低，例如：含 CNT 质量分数为 1.0% 和 2.0% 的复合材料延伸率分别只有 5.2% 和 4.3%，研究结果与现有文献相一致[11]. 一方面，由于随着增强体(CNTs)含量增加，CNTs 在铝基体内分散性较差，团聚现象严重，许多组织缺陷，包括孔隙、疏松等容易出现在 CNTs 团聚处[17]；另一方面，由于 CNTs 含量增加，大量的碳化铝脆性相生成使复合材料的延伸率下降[18]，这方面今后将进行进一步研究.

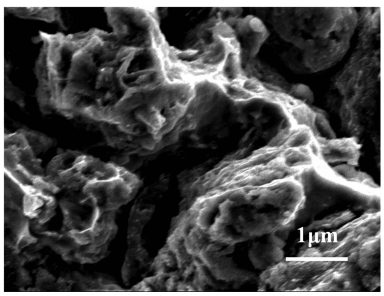
表 1 纯 Al 和不同 CNTs 含量 CNTs/Al 复合材料材料力学性能对比

Table 1 Comparison of mechanical properties of pure Al and CNTs/Al composite with different CNTs contents

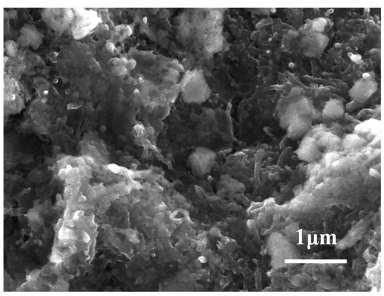
Samples	σ_b/MPa	σ_s/MPa	E/GPa	δ/%
Pure Al	85 ± 10	65 ± 5	73 ± 5	13.7 ± 0.5
1% CNTs/Al	168 ± 8	88 ± 6	77 ± 3	5.2 ± 0.5
2% CNTs/Al	245 ± 8	116 ± 3	97 ± 5	4.3 ± 0.3
3% CNTs/Al	186 ± 10	96 ± 5	98 ± 3	5.9 ± 0.5
4% CNTs/Al	155 ± 10	73 ± 5	100 ± 5	2.7 ± 0.5

2.3.3 CNTs 质量分数对 CNTs/Al 复合材料断口形貌的影响

图 6 为纯 Al 和质量分数 1% 的 CNTs/Al 复合材料拉伸断口的 SEM 形貌.



(a) 纯 Al



(b) 1%CNTs/Al

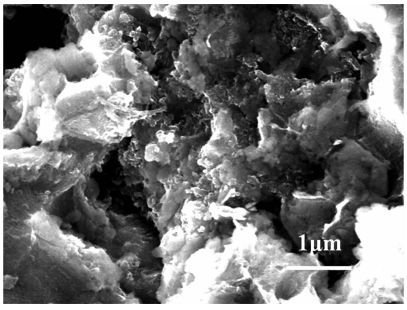
图 6 纯 Al 和 1% 的 CNTs/Al 复合材料的拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphologies of (a) pure Al and (b) 1wt. % CNTs/Al composites

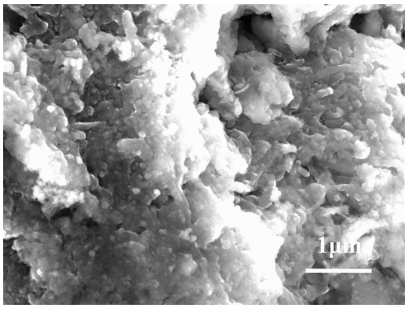
从图 6(a) 可观察到，纯 Al 拉伸断口呈现明显的韧窝，表明纯 Al 具有塑性断裂特征. 与纯 Al 材料相比，加入 CNTs 后，其拉伸断口形貌明显不同. 从图 6(b) 中可以发现：CNTs 均匀分散在铝基体中，没有看到 CNTs 团聚现象发生，且彼此不粘连；同时，CNTs/Al 复合材料中未出现裂纹，拉伸断口处存在深度较浅的圆形韧窝，说明 CNTs/Al

复合材料的断裂机制仍是以微孔聚积的方式发生破坏.

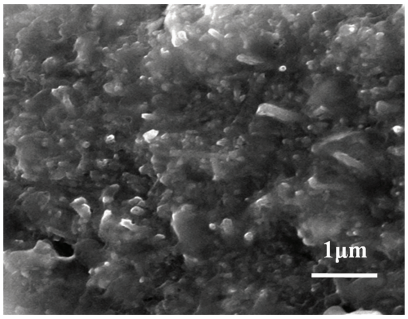
图 7 为含 CNTs 质量分数 2% ~4% 的增强铝基复合材料的拉伸断口形貌. 从图 7 可知,加入质量分数 2.0% 的 CNTs 试样有较好的韧性和延展性,其拉伸断口处几乎布满圆形深韧窝,CNTs 相对均匀弥散地分散在断口上,且出现了部分 CNTs 的桥接和拔出,如图 7(a)所示. 这是由于 CNTs 很细小,且具有良好的力学性能,拉伸断裂过程中 CNTs 的剥离引起断口处出现大量圆形韧窝. 试验结果表明,镶嵌在复合材料中的 2.0% CNTs 对铝基体起到复合强化的作用,使得复合材料具有很好的韧性.



(a) 2%CNTs/Al



(b) 3%CNTs/Al



(c) 4%CNTs/Al

图 7　不同 CNTs 质量分数时 CNTs/Al 复合材料的拉伸断口形貌

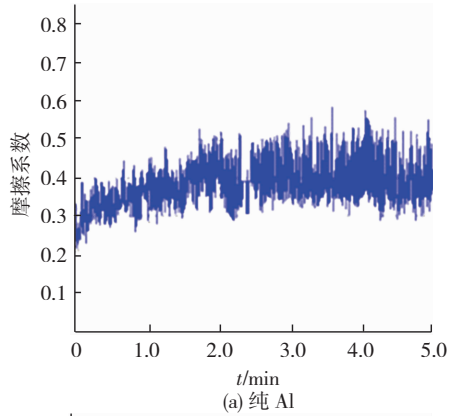
Fig. 7　Tensile fracture morphologies of CNTs/Al composites with different CNTs contents

图 7(b)所示为质量分数 3% 的 CNTs/Al 复合材料断口分析,与 2% CNTs/Al 复合材料相比,断口处 CNTs 的桥接和拔出较少,圆形韧窝深度及数量明显减少. 并且,复合材料破坏后 CNTs 的表面光洁度及拔出长度下降,这说明 CNTs 与铝基体的结合强度降低. 进一步增加 CNTs 质量分数至 4.0%,发现断口形貌中圆形韧窝几乎消失,如图 7(c)所示. 并且部分区域颜色为黑色,这可能由于该处 CNTs 发生缠绕聚集,此时 CNTs 起不到较好的增强作用.

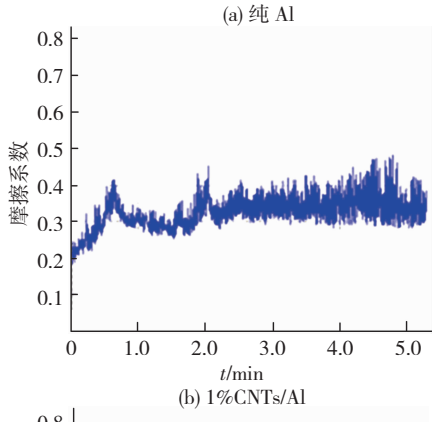
2.4　CNTs 质量分数对 CNTs/Al 复合材料摩擦磨损性能的影响

2.4.1　CNTs/Al 复合材料摩擦系数 - 时间曲线

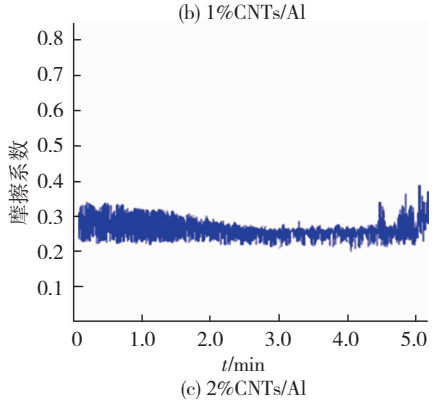
图 8 所示为 CNTs 质量分数分别为 0、1.0%、2.0% 的复合材料的摩擦系数 - 时间曲线.



(a) 纯 Al



(b) 1%CNTs/Al



(c) 2%CNTs/Al

图 8　不同质量分数 CNTs 时 CNTs/Al 复合材料的摩擦系数 - 时间曲线

Fig. 8　Friction coefficient-time curves of CNTs/Al composites with different CNTs contents: (a) pure Al; (b) 1wt. % CNTs/Al; (c) 2wt. % CNTs/Al

从图 8 可以看出，摩擦系数 - 时间曲线可分为磨合期和稳态磨损两个阶段. 加载稳定后，纯 Al 样品的摩擦系数比 CNTs/Al 复合材料摩擦系数大，如图 8(a)所示. 这是因为碳纳米管具有良好的自润滑作用[19]，导致复合材料的摩擦系数下降. 同时，不同 CNTs 含量的 CNTs/Al 复合材料的摩擦系数存在较大差异. 质量分数 1.0% 的 CNTs/Al复合材料摩擦系数先上升后逐渐平稳，如图 8(b)所示，这可能由于 1.0% CNTs/Al 复合材料样品表面由于 CNTs 含量相对较少，在磨合初期，摩擦磨损过程主要是基体铝与摩擦副进行对磨，摩擦系数呈上升的趋势，但是与纯 Al 样品相比，其摩擦系数仍然略低；在磨合后期试样的摩擦系数趋于平稳. 然而，与纯 Al 和1.0% CNTs/Al 复合材料相比，2.0% CNTs/Al 复合材料的摩擦系数较平稳，这是由于 2.0% CNTs 均匀分散在铝基复合材料中，复合材料具由较好的耐磨性，如图 8(c)所示.

2.4.2　CNTs/Al 复合材料的磨损率对比

图 9 给出了载荷为 1 和 3 N 的稳态磨损下，CNTs/Al 复合材料的磨损率随 CNTs 质量分数的关系曲线. 从图 9 可以发现，CNTs 的质量分数为 0 ~ 2% 时，CNTs/Al 复合材料呈现出平缓稳定的磨损率. 这是由于 CNTs 与 Al 基体结合较好，CNTs 本身的高强、高韧和自润滑性能，可以有效抵抗载荷作用下摩擦表面的磨损作用，使得复合材料的耐磨性提高. 然而，当 CNTs 质量分数大于 2% 时，复合材料的磨损率较高，呈现出直线上升. 同时，不同载荷(1 和 3 N)对 CNTs/Al 复合材料的磨损率影响较大，尤其载荷为 3 N 时，复合材料的磨损率明显增加. 这可能由于当 CNTs 质量分数大于 2% 时，CNTs 团聚现象严重，使得复合材料的致密度和硬度降低，其磨损率急剧增大.

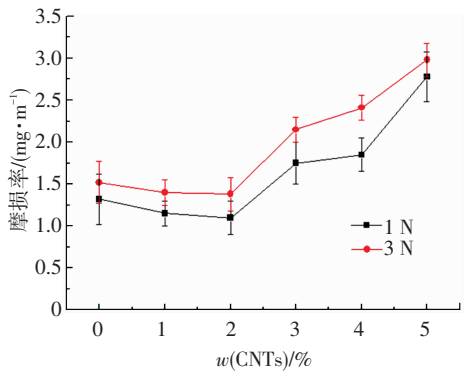
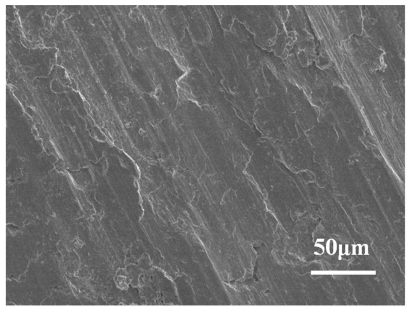


图 9　不同质量分数 CNTs 时 CNTs/Al 复合材料的磨损率变化曲线

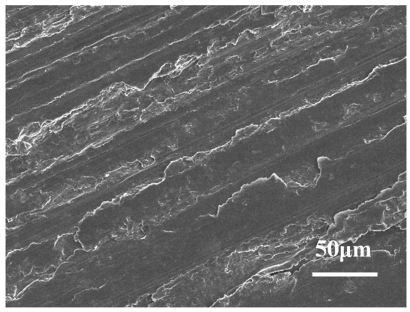
Fig. 9　Wear rate curve of CNTs/Al composites with different CNTs contents

2.4.3　CNTs/Al 复合材料的磨损表面形貌

图 10 所示为纯铝和质量分数 1.0% CNTs/Al 复合材料磨损表面形貌. 由图 10 可以看出，不含 CNTs 的纯铝表面磨损现象比较严重，磨痕处基体发生较大的塑性变形，表明摩擦过程中大量的磨屑从基体中剥落，如图 10 (a)所示；然而，与纯 Al 样品相比，1.0% CNTs/Al 复合材料磨痕深度变浅，磨损表面呈现出磨粒磨损迹象，表面有明显的犁沟状划痕，如图 10 (b)所示.



(a) 纯 Al

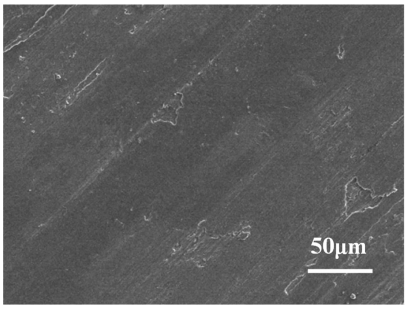


(b) 1%CNTs/Al

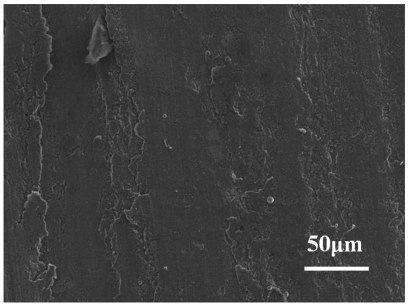
图 10　纯铝和 1.0%CNTs/Al 复合材料磨损表面形貌

Fig. 10　Worn surface morphologies of (a) pure Al and (b) 1wt. % CNTs/Al composites

图 11 为质量分数 2.0% 和 3.0% 的 CNTs/Al 复合材料磨损表面形貌. 从图 11(a)可以看出，CNTs 质量分数为 2.0% 时，复合材料的磨痕最浅，磨损表面为鳞片状且有浅显凹坑，这属于典型的剥层磨损的磨屑形貌，说明由于 CNTs 自身具有较好的润滑性及较强的抗拉强度，适量添加 CNTs 能较好地改善复合材料的抗开裂能力，可提高 CNTs/Al 复合材料的耐磨性. 然而，与质量分数2.0% 的 CNTs/Al 复合材料相比，质量分数 3.0% CNTs/Al复合材料的磨损表面存在大量片状磨屑和裂纹，如图 11(b)所示. 这可能由于添加质量分数 3.0% CNTs 时，由于增强体 CNTs 在铝基体中发生团聚，应力开裂容易产生在团聚处，同时，复合材料致密度降低，进一步增加了 CNTs/Al 复合材料的磨损率.



(a) 2%CNTs/Al



(b) 3%CNTs/Al

图 11　不同 CNTs 含量 CNTs/Al 复合材料磨损表面形貌

Fig. 11　Worn surface morphologies of the CNTs/Al composites with different CNTs contents: (a) 2wt.% CNTs/Al; (b) 3wt.% CNTs/Al

3　结　论

1) CNTs 经超声波预先分散后,分散性增加. 当 CNTs 质量分数为 2.0% 时,复合材料中 CNTs 与铝粉之间表现出较好的相容性. 然而,随着 CNTs 含量进一步增加,CNTs 团聚现象较严重,且表面孔洞不断增多,最终导致复合材料中裂缝的形成.

2) 随着 CNTs 含量的增加,CNTs/Al 复合材料的相对密度和强度先增加后降低. 质量分数 2.0% 的 CNTs/Al 复合材料的相对密度和硬度达到最大值 99.13% 和 50.2 HV,并且质量分数 2.0% 的 CNTs/Al 复合材料的抗拉强度和屈服强度达到最高值. 这表明 CNTs 质量分数为 2.0% 时,碳纳米管与基体之间界面结合较好,CNTs 起到了明显强化作用.

3) CNTs/Al 复合材料摩擦磨损性能研究表明:当 CNTs 质量分数为 1.0% 时,纳米复合材料的磨损表面生成大量的磨屑,并且磨损沟槽也较大;当 CNTs 质量分数升高到 2.0% 时,纳米复合材料表面磨屑明显减少,且磨损表面光滑.

参考文献:

[1] SALAMA E I, ABBAS A, ESAWI A M K. Preparation and properties of dual-matrix carbon nanotube-reinforced aluminum composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 99: 84 - 93.
DOI:10.1016/j.compositesa.2017.04.002

[2] JAVADI A H, MIRDAMADI S H, SHAKHESI S. Process optimization and microstructural analysis of aluminum based composite reinforced by multi-walled carbon nanotubes with various aspect ratios [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2017, 48(7): 719 - 725.
DOI:10.1002/mawe.201600495

[3] 李景瑞, 蒋小松, 刘晚霞, 等. 碳纳米管增强铝基复合材料的界面特性及增强机理研究进展[J]. 材料导报:综述篇, 2015, 29(1): 31 - 35.
LI Jingrui, JIANG Xiaosong, LIU Wanxia, et al. Research progress of the interface characteristics and strengthening mechanism in carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites [J]. Material Review: summary, 2015, 29(1): 31 - 35.

[4] 庞秋, 谷万里, 盛文斌. 碳纳米管增强铝基复合材料的研究进展[J]. 材料导报: 综述篇, 2008, 22(12): 41 - 44.
PANG Qiu, GU Wanli, SHENG Wenbin. Research progress in carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites [J]. Material Review: summary, 2008, 22(12): 41 - 44.

[5] CAVALIERE P, SADEGHI B, SHABANI A. Carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites produced by spark plasma sintering [J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(14):8618 - 8629.
DOI:10.1007/s10853 - 017 - 1086 - 6

[6] ALDOSHAN A, KHANNA S. Effect of relative density on the dynamic compressive behavior of carbon nanotube reinforced aluminum foam [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 689(24):17 - 24.
DOI:10.1016/j.msea.2017.01.100

[7] ISAZA C A, SILLAS J E L, MEZA J M, et al. Mechanical properties and interfacial phenomena in aluminum reinforced with carbon nanotubes manufactured by the sandwich technique [J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(11): 1619 - 1629.
DOI:10.1177/0021998316658784

[8] SUNDARAM R M, KOZIOL K K, WINDLE A H. Continuous direct spinning of fibers of single-walled carbon nanotubes with metallic chirality [J]. Advanced Materials, 2011, 23(43): 5064 - 5068.
DOI:10.1002/adma.201102754

[9] GUO Baisong, NI Song, YI Jianhong, et al. Microstructures and mechanical properties of carbon nanotubes reinforced pure aluminum composites synthesized by spark plasma sintering and hot rolling

[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 698: 282 – 288.
DOI:10.1016/j.msea.2017.05.068

[10] 邓春锋,马艳霞,薛旭斌,等. 碳纳米管增强 2024 铝基复合材料的力学性能及断裂特性[J]. 材料科学与工艺,2010,18(2):229 – 232.
DENG Chunfeng, MA Yanxia, XUE Xubin, et al. Mechanical properties and fracture characterization of 2024Al composite reinforced with carbon nanotube [J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(2):229 – 232.

[11] 许世娇, 肖伯律, 刘振宇, 等. 高能球磨法制备的碳纳米管增强铝基复合材料的微观组织和力学性能[J]. 金属学报, 2012, 48(7): 882 – 888.
XU Shijiao, XIAO Bolu, LIU Zhenyu, et al. Microstructures and mechanical properties of CNT/Al composites fabricated by high energy ball-milling method [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(7): 882 – 888.

[12] BASTWROS M M H, ESAWI A M K, WIFI A. Friction and wear behavior of Al-CNT composites [J]. Wear, 2013, 307(1/2):164 – 173.

[13] LAHA T, AGARWAL A, MCKECHNIE T, et al. Synthesis and characterization of plasma spray formed carbon nanotube reinforced aluminum composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 381(1/2):249 – 258.

[14] 庞秋,谷万里,冯柳,等. 机械球磨法制备 CNTs/Al 复合粉末的工艺过程研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(4): 46 – 48.
PANG Qiu, GU Wanli, FENG Liu, et al. Study on preparation process of CNTs/Al composite powder by mechanical milling [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(4): 46 – 48.

[15] 杨旭东,陈亚军,师春生,等. 球磨工艺对原位合成碳纳米管增强铝基复合材料微观组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 93 – 100.
YANG Xudong, CHEN Yajun, SHI Chunsheng, et al. Effect of ball-milling process on the microstructure and mechanical properties of in-situ synthesized carbon nanotube reinforced aluminum composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 93 – 100.

[16] ANSARI R, HASSANZADEH-AGHDAM M K, DARVIZEH A. On elastic modulus and biaxial initial yield surface of carbon nanotube-reinforced aluminum nanocomposites [J]. Mechanics of Materials, 2016, 101: 14 – 26.
DOI:10.1016/j.mechmat.2016.07.008

[17] 董占青,裴久阳,陈名海,等. 采用粉末冶金与热轧技术制备的碳纳米管增强铝基复合材料的组织和性能研究[J]. 热处理,2015,30(5): 6 – 10.
DONG Zhanqing, PEI Jiuyang, CHEN Minghai, et al. Microstructure and property of carbon nanotube reinforced aluminum-matrix composites prepared by powder metallurgy combined with hot-rolling[J]. Heat Treatment, 2015, 30(5): 6 – 10.

[18] 丛洪涛,钟蓉,成会明,等. 单壁纳米碳管增强纳米铝基复合材料的增强效果[J]. 材料研究学报, 2003, 17(2): 132 – 137.
CONG Hongtao, ZHONG Rong, CHENG Huiming, et al. Reinforeing effeets of SWNTs associated with nano-Al base [J]. Chin J Mater Res, 2013, 17(2): 132 – 137.

[19] CANDELARIO V M, MORENO R, GUIBERTEAU F, et al. Enhancing the sliding-wear resistance of SiC nanostructured ceramics by adding carbon nanotubes [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(13): 3083 – 3089.
DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2016.05.004

(**编辑** 程利冬)

本文引用格式:

庞 秋,胡志力,谷万里,等. CNTs 含量对 CNTs/Al 微观组织及力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺,2019,27(1):30 – 38. DOI:10.11951/j.issn.1005 – 0299.20170254

PANG Qiu, HU Zhili, GU Wanli, et al. The effect of CNTs content on the microstructure and mechanical properties of CNTs/Al composites[J]. Materials Science and Technology,2019,27(1):30 – 38. DOI:10.11951/j.issn.1005 – 0299.20170254