



搅拌摩擦加工 CNTs/7075 铝基复合材料 热膨胀性能

刘奋成¹, 钱 涛¹, 邢 丽¹, 梁 伟²

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063;

2. 太原理工大学 先进镁基材料山西省重点实验室, 太原 030024)

摘 要: 采用搅拌摩擦加工法制备 CNTs/7075 铝基复合材料, 测量并分析加工态、热处理态试样的热膨胀系数, 并分别用 ROM、Turner 和 Schapery 模型进行理论计算。结果表明: 搅拌摩擦加工后材料的晶粒细小, CNTs 的添加能进一步细化晶粒。CNTs/7075 复合材料的热膨胀系数低于退火态和搅拌摩擦加工后 7075 铝合金试样的, 说明搅拌摩擦加工对材料晶粒的细化及 CNTs 的加入可以有效地约束基体材料的热膨胀, 且随着 CNTs 含量的增加, 复合材料的线膨胀系数呈减小趋势。后续热处理对 CNTs/7075 复合材料的热膨胀系数也有影响, 退火和固溶时效处理均可以降低该复合材料的热膨胀系数。理论计算发现, Turner 模型计算得到的热膨胀系数预测值最接近于实测值。

关键词: 碳纳米管; 复合材料; 搅拌摩擦加工; 热膨胀

中图分类号: TB331

文献标志码: A

近年来, 随着航空航天装备性能的不不断提高, 对材料的性能也提出了越来越高的要求, 不仅要求材料具有质量轻、高比强度和高比刚度等优点, 对其热膨胀性能也提出一定的要求。为降低材料的热膨胀性能, 对金属材料进行复合处理, 制备金属基复合材料, 成为研究的热点^[1]。碳纳米管增强铝基复合材料, 以其高强轻质而成为航空航天领域关注的热点材料之一^[2]。

目前, 颗粒增强铝基复合材料制备方法主要有搅拌铸造法、粉末冶金法、真空浸渗法、共喷沉积法、原位复合法和搅拌摩擦加工方法^[3-7]等, 其中搅拌摩擦加工法(Friction stir processing, FSP)作为一种复合材料的固态加工方法不会引入基体和增强相的氧化以及更容易实现增强相的均匀分散而引起了广大研究者的关注。在铝合金的 FSP 加工方面, 此方法的应用较多。例如林毛古等^[8]利用搅拌摩擦加工法成功制备了碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)增强铝基复合材料, 研究表明碳纳米管的添加提高了铝基体材料的硬度和常温力学性能。LIU 等^[9]对粉末冶金后搅拌摩擦加工的制备的 CNTs/2009 复合材料的热膨胀性进行研究, 发

现随着 CNTs 含量的增加复合材料热膨胀系数减小。刘奋成等^[10]对搅拌摩擦加工制备 CNTs/Mg 复合材料的热膨胀性能进行了研究, 发现热处理能同样可以有效地降低复合材料的热膨胀系数。作为重要的航空材料, 铝基复合材料除了具有较高的比强度外, 还要求具有良好的尺寸稳定性, 以避免因为环境温度的变化造成结构尺寸的过度变化。

本文作者对搅拌摩擦加工制备的 CNTs/7075 铝基复合材料的热膨胀性能进行研究, 实测了加工态、退火态和固溶时效态试样的热膨胀系数, 比较了 CNTs 的体积分数和热处理状态对该复合材料热膨胀性能的影响, 并采用 ROM、Turner 和 Schapery 模型对复合材料热膨胀系数进行计算。

1 实验

试验所用基体材料为 10 mm 厚 7075 退火态(7075-O 态)铝合金板材, 增强相为碳纳米管(Carbon Nanotubes, MWCNTs)。7075 铝合金化学成分如表 1

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51364037, 51274149); 江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD12074); 先进镁基材料山西省重点实验室(太原理工大学)开放课题

收稿日期: 2016-01-13; **修订日期:** 2016-12-05

通信作者: 刘奋成, 副教授, 博士; 电话: 0791-83863028; E-mail: fencheng999@163.com

所示。增强相 MWCNTs, 其外径为 10~20 nm, 内径为 5~10 nm, 长度为 5~15 μm , 纯度大于 98%。

表 1 7075 铝合金母材化学成分

Table 1 Chemical composition of the 7075 aluminum alloy matrix (mass fraction, %)

Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Al
5.5	2.4	1.22	0.4	0.5	0.3	Bal.

本试验中采用打孔填充碳纳米管的方法将 CNTs 填充在铝板已钻好的盲孔内。复合材料在自制搅拌摩擦加工设备上制备, 采用圆柱右螺纹搅拌头, 搅拌头轴肩直径为 30 mm, 搅拌针直径为 10 mm, 搅拌针长度为 8 mm, 轴肩通过电火花加工凹槽。复合材料的搅拌摩擦加工工艺参数固为: 搅拌头旋转速度 475 r/min, 前进速度 23.5 mm/min, 搅拌针偏转角度为 2.5°, 对同一区域进行往复 5 道次加工, 制备碳纳米管体积分数为 3%和 5%的复合材料试样。复合材料的热处理工艺参考 7075 铝合金的热处理工艺: 1) 固溶+时效处理为 470 $^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h 水淬+120 $^{\circ}\text{C}$ 保温 24 h 空冷; 2) 退火为 415 $^{\circ}\text{C}$ 保温 3 h 后随炉冷却, 冷却到 250 $^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷。

使用光镜和 TESCAN VEGAII-LMH 型扫描电子显微镜(SEM)对复合材料显微组织进行观察, 并使用 EBSD 技术对复合材料的晶界进行标定。复合材料热膨胀系数测试在 DIL 402C 型热膨胀仪上进行, 测试温度范围为 30~300 $^{\circ}\text{C}$, 升温速度为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。热膨胀测试所用试样为 d 4.5 mm $\times$ 长 24 mm 的圆棒状试样, 并严格要求试样端面与圆柱轴线垂直。热膨胀试样的截取方向为测试试样轴线平行于 FSP 加工搅拌头移动方向。为保证测试时温度均匀和防止试样氧化, 采用高纯氦气进行保护, 流量为 50 mL/min。为了消除设备的系统误差, 在相同的实验条件下, 首先采用氧化铝标样进行较验。复合材料线膨胀系数计算公式如下:

$$\alpha = \frac{dL}{l_0 \cdot dt} \quad (1)$$

式中: l_0 是试样在温度 t_0 时的长度, 这里 t_0 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 CNTs/7075 复合材料显微组织

图 1 所示为 7075 铝合金原始组织, 图 2 所示为搅拌摩擦加工后 7075 铝合金试样(FSPed)和 CNTs/7075

铝基复合材料通过 EBSD 呈现的晶粒分布形态。由图 1 和图 2 对比中可知, 7075 铝合金在搅拌摩擦加工过程中由于受到搅拌头强烈的破碎作用, 晶粒得到细化。对晶粒尺寸进行统计, 结果表明 FSPed 试样和 CNTs/7075 试样的平均晶粒大小分别为 2.5 μm 和 1.2 μm 左右, 且 CNTs/7075 复合材料中存在部分超细晶, 晶粒尺寸在 0.1~1 μm 之间。由此可见, CNTs 的添加进一步细化了复合材料的晶粒。

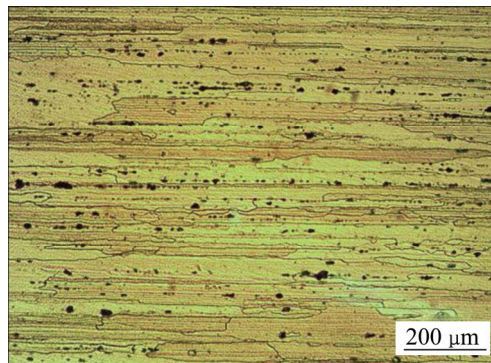


图 1 7075 铝合金母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of 7075 aluminium alloy

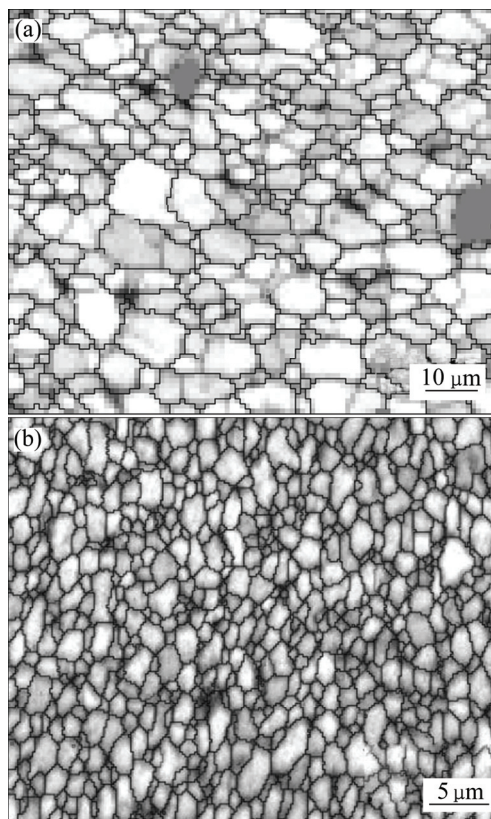


图 2 CNTs/7075 铝基复合材料 EBSD 晶粒分布图

Fig. 2 Distribution diagrams of CNTs/7075 composite by EBSD: (a) 7075-FSPed; (b) 5%CNTs/7075 composite

图 3 所示为 FSPed 试样和 CNTs/7075 铝基复合材料的 SEM 像。由图 3(a)中可以看出, 7075 铝合金经搅拌摩擦加工后细化的晶界处出现二次相颗粒, 图 3(b)由于晶粒过于细小, 晶界处二次相难以观察, 但整个图中存在大量的二次相颗粒。由图 3(a)中还可以看到母材中大颗粒难溶二次相在 FSP 过程中被搅碎分散在基体中, 在热处理过程中搅碎的二次相更易回溶形成更充足的过饱和固溶体, 在时效过程中完全析出对基体起进一步强化作用。

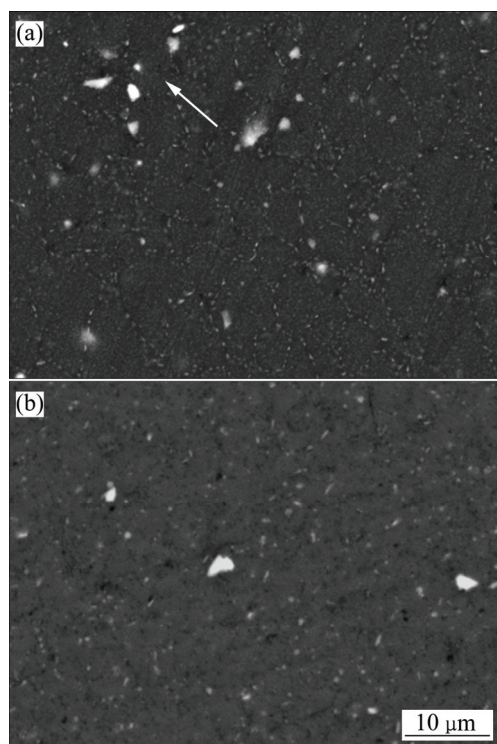


图 3 加工态试样的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of as-produced samples: (a) 7075-FSPed; (b) CNTs/7075 composite

2.2 CNTs/7075 复合材料线膨胀性能

图 4 所示为退火态 7075 铝合金、搅拌摩擦加工后 7075 试样以及不同体积分数 CNTs 增强铝基复合材料的热膨胀系数随着温度的变化曲线。由图 4 中可看出, 各试样的热膨胀系数都随着温度的升高而变大, 但搅拌摩擦加工后的 7075 试样和 CNTs/7075 铝基复合材料的热膨胀系数明显低于退火态 7075 铝合金基体的热膨胀系数, 同时随着 CNTs 含量的增加, 复合材料的热膨胀系数呈现减小趋势, 这说明搅拌摩擦加工和增强相 CNTs 的添加均能够有效地降低材料的热膨胀性能。

热膨胀是固体材料受热后晶格点阵的非简谐振动加剧而引起的容积膨胀。对复合材料而言, 材料的热

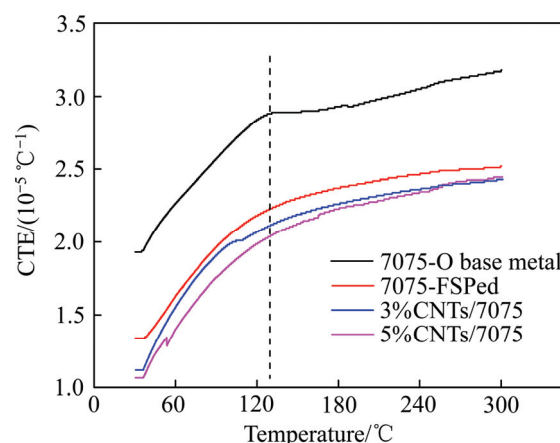


图 4 7075-O、7075-FSPed 和 CNTs/7075 的热膨胀系数随温度变化曲线

Fig. 4 Variation of thermal expansion coefficient of 7075-O, 7075-FSPed and CNTs/7075 composite samples with the temperature

膨胀系数(CTE)是由基体的热膨胀系数、增强相的热膨胀系数以及增强体通过基体与增强体界面对基体的制约程度决定的^[11]。随着温度升高, 一方面, 铝合金的热膨胀系数随着温度的升高而增大, 另一方面, 复合材料中增强相与基体界面对热膨胀的制约作用随温度升高下降, 最终导致复合材料的热膨胀系数随着温度升高而增大。

搅拌摩擦加工和 CNTs 的添加均能有效地细化晶粒, 使得复合材料的晶界增多。晶界在晶体中所占体积分数增大, 它对位错运动产生的阻碍作用增大^[12], 同时使得材料在热膨胀变形过程中可协调能力增强, 因此 FSPed 和 CNTs/7075 复合材料试样的热膨胀小于母材。随着复合材料体积分数的增加, 其热膨胀系数减小。这是因为增强体 CNTs 的热膨胀系数远小于基体 7075 铝合金的热膨胀系数, 由混合模式可知复合材料中 CNTs 体积分数越大, 基体材料的体积分数就越小, 使得材料的整体热膨胀系数减低。此外, 当基体 7075 铝合金受热膨胀时, 增强相 CNTs 通过基体 7075-CNTs 界面对基体热膨胀行为进行约束, CNTs 含量越高, 约束越大。因此复合材料的热膨胀系数小于未添加 CNTs 的试样。

综上所述, 各复合材料按热膨胀系数从小到大的顺序排列如下: 5% CNTs/7075, 3% CNTs/7075, 7075-FSPed, 7075-O 铝合金。

由图 4 中可以看出, 基体退火态 7075 铝合金的热膨胀系数在温度升高到 130 °C 以后存在一个变化点, 以此温度为分界将各材料的热膨胀系数变化分为两部

分,统计结果如图5所示。由图5可见,各材料热膨胀系数在30~130℃之间的平均增长率均高于在130~300℃之间的,130℃之前材料的热膨胀系数增加迅速,之后则增加缓慢。由正常热膨胀概念可知,随着温度的升高, α 先是很快增加($\alpha \sim T^3$),随后增加速度减慢并近于恒值^[13]。此处130℃的温度接近于7075沉淀相 MgZn_2 的时效析出温度,超过此温度后,材料消耗部分能量用于沉淀相析出,从而使得基体膨胀作用减弱,材料的热膨胀系数减小,时效过程中产生的细小的沉淀相 MgZn_2 弥散分布于材料中, MgZn_2 的热膨胀系数小于Al,进一步对基体材料膨胀起制约作用,因此材料的热膨胀系数增长幅度减小。

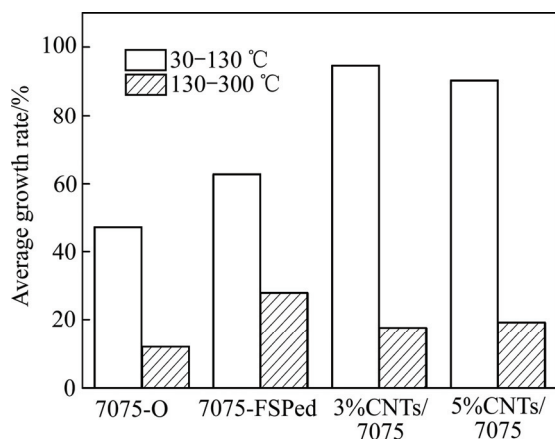


图5 不同试样热膨胀系数在不同温度区间的平均增长率

Fig. 5 Average growth rate of thermal expansion coefficient among different temperature ranges of different samples

2.3 热处理对复合材料热膨胀性能的影响

图6所示为不同热处理状态的5% CNTs/7075 铝基复合材料热膨胀系数随温度的变化曲线。由图6可以看出,各试样的热膨胀系数均随着温度的升高而变大,加工态的热膨胀曲线一直位于T6态和退火态的热膨胀曲线上方,说明固溶时效和退火处理均降低了复合材料的热膨胀系数。

在升温过程中,除了考虑复合材料混合体的热膨胀系数外,还需考虑由内应力引起的膨胀,由内应力引起的热膨胀系数与基体中的初始残余应力 σ_0 及升温过程中引起的热配错应力 $\sigma_{\Delta T}$ 密切相关^[14]。在CNTs/7075 铝基复合材料的制备和冷却过程中,由于基体和增强相CNTs的热膨胀系数不匹配,基体7075-CNTs界面上产生约束作用,在近界面区的基体7075中产生大量的残余拉应力,同时在复合材料进行升温热膨胀时,引起热配错应变 $\Delta\alpha \cdot \Delta T$ 。由于后续热处理对CNTs/7075 铝基复合材料相当于消除残余应力的作用,所以由温度升高导致材料膨胀进而在界面

处产生压应力,产生的压应力在热膨胀初期部分抵消FSP造成的残余应力,使得初始残余应力 σ_0 降低,随着温度的升高,使基体发生自由膨胀,整体热膨胀系数比加工态有所降低^[15]。

T6态CNTs/7075复合材料的热膨胀系数低于退火态试样的,分析认为固溶时效后基体中存在大量弥散析出的沉淀相,大量细小的沉淀相颗粒弥散分布在基体材料中,阻碍基体由原子非简谐振动引起的容积膨胀,并且使得基材7075-CNTs界面结合强度和界面滑移阻力增加,对基材的自由热膨胀起制约作用。上述原因协同作用使得T6态CNTs/7075 铝基复合材料具有更好的尺寸稳定性,最终使得复合材料的热膨胀系数比退火态低。

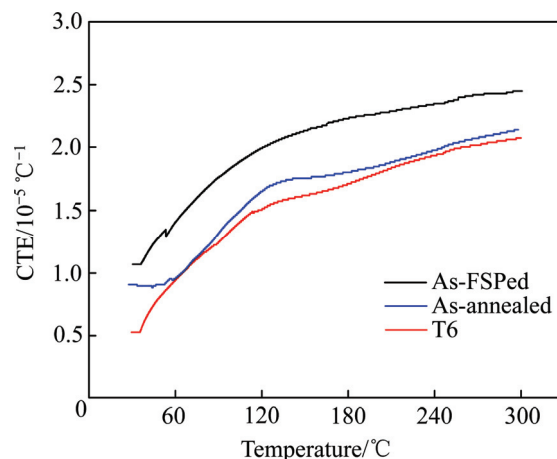


图6 加工态、T6态和退火态5% CNTs/7075的热膨胀系数随温度的变化曲线

Fig. 6 Variation of thermal expansion coefficient of as-FSPed, T6 and as-annealed 5% CNTs/7075 composite sample with temperature

2.4 复合材料的线膨胀计算

为了更好地分析复合材料的热膨胀行为,分别采用混合定律(ROM)、Turner模型和Schapery模型^[16]对复合材料的热膨胀系数的理论计算。

混合定律(ROM)的计算公式为

$$\alpha_c = \alpha_m \cdot \varphi_m + \alpha_p \cdot \varphi_p \quad (1)$$

Turner模型的计算公式为

$$\alpha_c = \frac{(\alpha_m \varphi_m K_m + \alpha_p \varphi_p K_p)}{(\varphi_m K_m + \varphi_p K_p)} \quad (2)$$

Schapery模型的计算公式为

$$\alpha_c = \frac{E_p \alpha_p \varphi_p + E_m \alpha_m (1 - \varphi_p)}{E_p \varphi_p + E_m (1 - \varphi_p)} \quad (3)$$

式中: α 为热膨胀系数; ϕ 为体积分数; K 为压缩模量, $K = E/3(1-2\nu)$, ν 为泊松比, E 为弹性模量; 角标 c、m、p 分别表示为复合材料, 基体合金和增强相。

基体合金和 CNTs 的相关参数^[17-18]列于表 2 中, 按 3 种理论模型进行计算的复合材料热膨胀数值及实测值列于表 3 中。

表 2 基体 7075-O 合金和 CNTs 的物理参数^[17-18]

Table 2 Physical parameters of 7075-O matrix alloy and carbon nanotubes

Component	CTE/ $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	E/GPa	ν
7075-0	23.6	71.7	0.33
CNTs	0	450	0.06

表 3 复合材料的热膨胀系数试验值与理论计算值

Table 3 Experimental and theoretical CTEs of CNTs/7075 composite (at 100 $^{\circ}\text{C}$)

Sample	CTE/ $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$			
	ROM	Turner's model	Schapery's model	Actual value
7075-FSPed	23.6	23.6	23.6	20.5
3%CNTs/7075	22.9	20.2	16.5	19.8
5%CNTs/7075	22.4	18.4	13.6	18.5

从表 3 数据中可以看出混合模型(ROM)的理论计算值均高于实测值, 这是因为 ROM 模型忽略了基体对增强相膨胀的约束作用, 而实际上在复合材料内部这种约束作用是很大的。Schapery's 模型分为轴向和径向的热膨胀系数, 本文作者采用轴向进行计算, 考虑 CNTs 在复合材料中分布杂乱, 故预测值与实测值偏差较大。在上述两个模型中忽略了 CNTs 与铝基体的界面产物及界面分布情况, 这同样会造成理论计算值与实验测量值偏离很大。Turner 模型的计算值最接近于实测值, 此模型中在考察温度范围内, 材料内部无内应力存在且材料协调变形, 材料内部产生的所有附加应力为张应力和压应力^[19], 因此在 CNTs 增强铝基复合材料中 Turner 模型计算更为合适。

3 结论

1) 搅拌摩擦加工后 7075 试样和 CNTs/7075 铝基复合材料的热膨胀系数均小于退火态 7075 铝合金的, 且随着 CNTs 含量的增加, 复合材料的热膨胀系数呈

现减小趋势, 搅拌摩擦加工细化晶粒和添加增强相 CNTs 可以有效降低材料热膨胀系数。

2) 后续热处理能降低 CNTs/7075 铝基复合材料的热膨胀系数, 且固溶时效态试样热膨胀小于退火态试样的。

3) 通过理论模型计算与实测值对比可知, Turner 模型更适合 CNTs/7075 铝基复合材料的热膨胀模型计算。

REFERENCES

[1] LIU Z Y, XIAO B L, WANG W G, MA Z Y. singly dispersed carbon nanotube/aluminum composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing[J]. Carbon, 2012, 50(5): 1843-1852.

[2] 孙康宁, 李爱民. 碳纳米管复合材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

SUN Kang-ning, LI Ai-ming. Composites reinforced by Carbon nanotube[M]. Beijing: China Machine Press. 2009.

[3] BAKSHI S R, LAHIRI D, AGARWAL A. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites—A review[J]. International Materials Reviews, 2010, 55: 41-64.

[4] KWON H, ESTILI M, TAKAGI K, MIYAZAKI T, KAWASAKI A. Combination of hot extrusion and spark plasma sintering for producing carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites[J]. Carbon, 2009, 47: 570-577.

[5] YUUKI J, KWON H, KAWASAKI A, MAGARIO A, NOGUCHI T, BEPPU J, SEKI M. Fabrication of carbon nanotube reinforced aluminum composites by powder extrusion process[J]. Materials Science Forum, 2007, 53: 2891-2896.

[6] MA Z Y, SHARMA S R, MISHRA R S, MAHONEY M W. Microstructural modification of cast aluminum alloys via friction stir processing[J]. Materials Science Forum, 2003, 426: 2891-2896.

[7] KWON Y, SAITO N, SHIGEMATSU I. Friction stir process as a new manufacturing technique of ultrafine grained aluminum alloy[J]. Journal of Materials Science Letter, 2002, 21(19): 1473-1476.

[8] 林毛古, 徐卫平, 柯黎明, 刘 强. 旋转摩擦挤压制备 MWCNTs/Al 复合材料的界面微观结构[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 98-102.

LIN Mao-gu, XU Wei-ping, KE Li-ming, LIU Qiang. Interface microstructures of MWCNTs/Al composites prepared by rotational friction extrusion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 98-102.

[9] LIU Z Y, XIAO B L, WANG W G, MA Z Y. Elevated temperature tensile properties and thermal expansion of

- CNT/2009Al composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(15): 1826–1833.
- [10] 刘奋成, 刘强, 简晓光, 柯黎明. 搅拌摩擦加工 MWCNTs/AZ80 复合材料热膨胀性能研究[J]. *热加工工艺*, 2013(18): 1–6.
- LIU Fen-cheng, LIU Qiang, JIAN Xiao-guang, KE Li-ming. Thermal expansion characteristic of MWCNTs/AZ80 composite prepared by friction stir processing[J]. *Hot Working Technology*, 2013, (18): 1–6.
- [11] 王常春. 电子封装用 SiC_p/Cu 复合材料的微观组织和性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- WANG Chang-chun. Microstructure and properties of SiC_p/Cu composites for electronic packing[D]. Ji'nan: Shandong University, 2007.
- [12] KHORRAMI M S, KAZEMINEZHAD M, KOKABI A H. Thermal stability of aluminum after friction stir processing with SiC nanoparticles[J]. *Materials & Design*. 2015, 80: 41–50.
- [13] 毛卫民, 朱景川, 郦剑, 龙毅, 范群成. 金属材料结构与性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- MAO Wei-min, ZHU Jing-chuan, LI Jian, LONG Yi, FAN Qun-cheng. The structure and properties of metallic material[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [14] 陈国钦, 修子扬, 朱德智, 张强, 武高辉. 热处理对高体积分数 SiC_p/Cu 热膨胀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(2): 22–24.
- CHEN Guo-qin, XIU Zi-yang, ZHU De-zhi, ZHANG Qiang, WU Gao-hui. Effect of heat-treatment on thermal expansion properties of SiC_p/Cu composites with high reinforcement content[J]. *Transactions of Material and Heat Treatment*, 2009, 30(2): 22–24.
- [15] 宋美慧, 武高辉, 王宁, 张贵. C/Mg 复合材料热膨胀系数及其计算[J]. *稀有金属材料与工程*. 2009, 38(6): 1043–1047.
- SONG Mei-hui, WU Gao-hui, WANG Ning, ZHANG Gui. Coefficient of thermal expansion and compute of carbon fiber reinforced magnesium composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(6): 1043–1047.
- [16] VAIDYA R U, CHAWLA K K. Thermal expansion of metal-matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 1994, 50(1): 13–22.
- [17] LIU Z Y, XIAO B L, WANG W G, MA Z Y. Effect of carbon nanotube orientation on mechanical properties and thermal expansion coefficient of carbon nanotube-reinforced aluminum matrix composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2014, 27(5): 901–908.
- [18] 熊其平. 碳纳米管增强铝基复合材料挤压线材的性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- XIONG Qi-ping. Research on the carbon nanotubes alignment and their impact on the mechanical and electrical properties of aluminum matrix composite[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014.
- [19] 朱德智, 李凤珍, 陈国钦, 张强, 武高辉. SiC_p/Cu 复合材料热膨胀性能研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2005, 10(2): 125–128.
- ZHU Zhi-de, LI Feng-zhen, ZHANG Qiang, WU Gao-hui. Thermal expansion properties of SiC_p/Cu composites in electronic packaging applications[J]. *Journal Harbin Univ Sci & Tech*, 2005, 10(2): 125–128.

Thermal expansion characteristic of CNTs/7075 aluminum alloy composites prepared by friction stir processing

LIU Fen-cheng¹, QIAN Tao¹, XING Li¹, LIANG Wei²

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan 030024, China)

Abstract: 7075 aluminum alloy based composite reinforced with carbon nanotubes was prepared by friction stir processing. The thermal expansion coefficients of CNTs/7075 composites with processed state and heat treatment were measured. And the theoretical thermal expansion coefficient of CNTs/7075 composite was calculated with ROM, Turner and Schapery's model. The results show that the grain size of material can effectively reduced by friction stir processing, and the addition of CNTs can further refine grain size of composite. The CNTs/7075 composite has smaller thermal expansion coefficients compared with annealed 7075 matrix materials and the FSPed 7075 samples, which indicates that the addition of CNTs can effectively constrain the thermal expansion of the composite. The thermal expansion coefficients of CNTs/7075 composite samples decrease along with the increase of volume fraction of CNTs. Heat treatment has a positive effect on the thermal expansion characteristic of the composite, and the annealing or aging treatment can decrease the thermal expansion of the composite. The theoretical calculation shows that thermal expansion coefficient of CNTs/7075 composite with Turner's model is the closest to the experimental result.

Key words: carbon nanotubes; composite; friction stir processing; thermal expansion

Foundation item: Projects(51364037, 51274149) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(KJLD12074) supported by the Landed Plan of Science and Technology in Colleges and Universities of Jiangxi Province, China; Project supported by Open Project of Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials (Taiyuan University of Technology), China

Received date: 2016-01-13; **Accepted date:** 2016-12-05

Corresponding author: LIU Fen-cheng; Tel: +86-791-83863028; E-mail: fencheng999@163.com

(编辑 何学锋)