

TiC和单壁碳纳米管协同增强6061铝合金组织和性能研究

吴满意¹, 陈文琳¹, 陈浩¹, 刘爱军^{1, 2}

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院 安徽合肥 230009

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心 安徽合肥 230009

摘要: 采用高能球磨和真空热压烧结制备单壁碳纳米管/TiC/6061铝基复合材料, 研究不同TiC含量对6061铝合金组织和力学性能的影响。结果表明: 随着TiC含量的增加, 铝基复合材料的硬度增加, 而抗拉强度先提高后降低, 当TiC含量(质量分数)为4%时, 复合材料的晶粒尺寸最小, 其综合性能最优, 抗拉强度为196.4MPa, 硬度为81.7HV0.1。铝基复合材料主要的强化机制是弥散强化和第二相强化, 第二相主要有单壁碳纳米管(SWCNTs)和TiC。

关键词: TiC; 单壁碳纳米管; 力学性能; 粉末冶金

Study on the microstructure and properties of 6061 aluminum alloy reinforced by TiC and single-walled carbon nanotubes in synergy

WU Manyi¹, CHEN Wenlin¹, CHEN Hao¹, LIU Aijun^{1, 2}

1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

2. Anhui Powder Metallurgy Engineering Technology Research Center, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract: Single walled carbon nanotubes/TiC/6061 aluminum matrix composites were prepared by high-energy ball milling and vacuum hot pressing sintering, and the effect of different TiC contents on the microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy was studied. The results show that with the increase of TiC content, the hardness of aluminum based composites increases, while the tensile strength first increases and then decreases. When the mass fraction of TiC is 4%, the grain size of the composite material is the smallest, and its comprehensive performance is the best. The tensile strength is 196.4MPa, and the hardness value is 81.7HV0.1. The main strengthening mechanisms are dispersion strengthening and second phase strengthening, with the second phase mainly consisting of single-walled carbon nanotubes and TiC.

Keywords: TiC; single-walled carbon nanotubes; mechanical properties; powder metallurgy

1 序言

铝基复合材料因其具有低密度、高弹性模量、高抗疲劳性能、良好的耐蚀性和成形性等优异的性能, 在航空航天和汽车工业领域获得越来越多的应

用^[1, 2]。

在铝合金基体中, 可以使用纳米颗粒、纤维、陶瓷颗粒等不同的元素作为增强材料^[3]。单壁碳纳米管(SWCNTs)具有极高的强度、良好的导电性

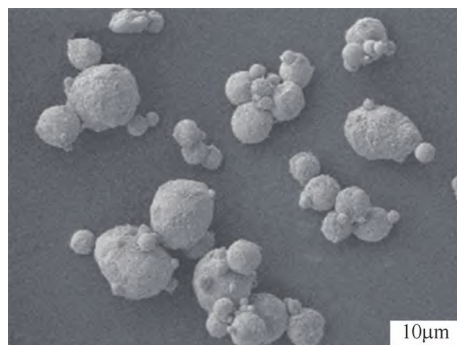
能、高断裂韧度、低热导率等优点，是铝基复合材料理想的增强体，能有效地提高铝基复合材料的塑性^[4]。但是单壁碳纳米管和铝基体之间的界面控制存在一些困难，使得碳纳米管的增强作用没有得到充分发挥。TiC是一种性能优异的陶瓷增强材料，具有高熔点、高弹性模量、较高的热稳定性和化学相容性等特性^[5]，而且与铝基体有相同的晶体结构和相似的晶格常数，能有效细化基体晶粒，强化金属材料^[6]，除此之外，有研究表明，Ti能有效改善单壁碳纳米管与铝基体界面的结合状态^[7]。因此，可以将低含量的单壁碳纳米管与陶瓷颗粒共同作为增强体，制备出两种或两种以上增强体增强的铝基混合材料，获得比单一增强体更高的强化效果^[8]，从而更有效地提升复合材料的力学性能。

粉末冶金铝合金具有微观组织均匀、性能优异及稳定性好等一系列优点，具有广阔的应用前景^[9]。本文以6061铝合金为基体，以TiC和SWCNTs为增强相，采用粉末冶金的方法制备TiC/SWCNTs/6061铝基复合材料，并对铝基复合材料的组织和力学性能进行检测分析，研究不同含量的TiC对铝基复合材料组织和性能的影响。

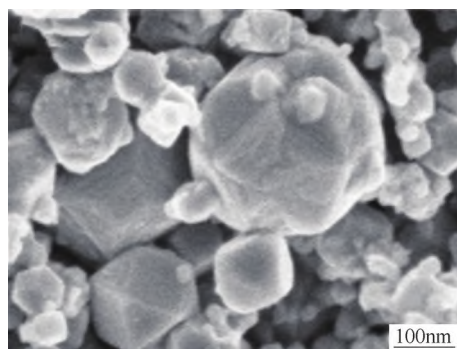
2 试验材料与方法

试验所用6061铝合金粉末主要的化学成分见表1。6061铝合金粉末平均粒径为15 μm ，TiC粉末粒度为纳米级，纯度 $\geq 99\%$ ，试验所用粉末的微观形貌如图1所示。试验共制备5种不同成分的TiC/SWCNTs/6061铝基复合材料试样，每种成分中SWCNTs添加量为定值0.2%，TiC添加量依次为0%、2%、4%、6%、8%，其余为6061铝合金粉末。首先将TiC、SWCNTs和6061铝合金粉末进行配比，然后将配比后的复合粉末按照球料比8:1的比例放入球磨机中进行球磨混合，球磨参数为：300r/min，运行1h，停转30min，共运行6h。球磨结束后将混合粉末取出适量放入石墨模具中，然后使用压力机进行预压，最后在真空热压烧结中进行烧结成形，烧结温度为560 $^{\circ}\text{C}$ ，压力为10MPa，升温升压时间为

1h，保温保压时间为1h。



a) 6061铝合金



b) TiC

图1 试验所用粉末的微观形貌

采用金相显微镜对6061铝基复合材料试样的金相组织进行观察；采用维氏硬度计对每种成分的试样随机选取7个点进行测试，然后取平均值，硬度计压头载荷为100g（0.98N），每个点保压时间为15s；采用X射线衍射仪（Smartlab）对试样进行物相分析；采用热场发射扫描电子显微镜（蔡司Gemini500SEM）观察试样的拉伸断口和微观组织；在室温下采用电子万能材料试验机（AGX-1000）对试样进行拉伸测试，拉伸试样尺寸如图2所示，厚度为1mm，拉伸速度为0.5mm/min。

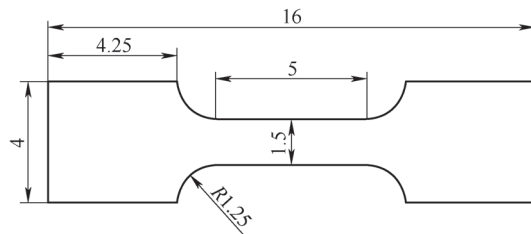


图2 拉伸试样的尺寸

3 结果与分析

3.1 复合材料的微观组织

图3所示为不同TiC含量的TiC/SWCNTs/6061铝

表1 6061铝合金主要成分（质量分数）（%）

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Cr	Ti	Al
0.83	0.52	0.34	0.63	0.16	0.26	0.36	0.14	余量

基复合材料的XRD图谱。由图3可看出,复合材料中主要的物相是Al和TiC,在TiC含量为2%时能观察到明显对应于TiC的峰,没有出现其他物相衍射

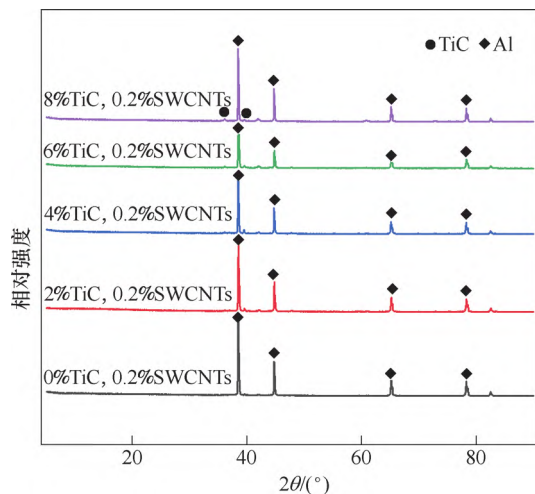


图3 不同TiC含量铝基复合材料XRD图谱

峰,可能是在烧结过程中没有生成或者含量太少导致没有被检测出来。

图4所示为复合材料的金相组织。由图4可看出,通过粉末冶金法制备的复合材料的晶粒组织较为均匀,在加入TiC后,复合材料晶界处黑色区域部分增多,因此推断黑色区域为TiC增强颗粒。另外,复合材料的晶粒尺寸在加入TiC后有一定的减小,这是因为纳米级的TiC可以作为异质形核的核心,起到有效的形核作用,从而细化晶粒尺寸,而当TiC添加量过多时,会发生团聚,降低异质形核的效果,使细化效果减弱^[10]。

图5所示为TiC含量为4%时,复合材料试样经过腐蚀后的微观形貌。从图5a可看出,复合材料中除了一些白色颗粒状的增强相外,还存在一些黑色的块状相,并且在晶界处富集了较多的第二相,这可能不仅使晶粒变得不规则和不均匀,还会阻碍晶界

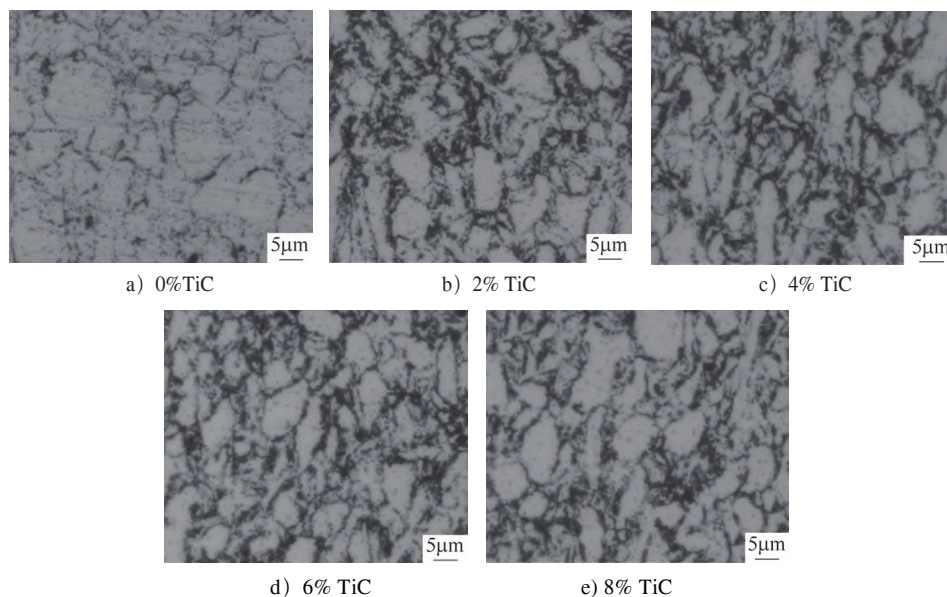


图4 不同TiC含量铝基复合材料的金相组织

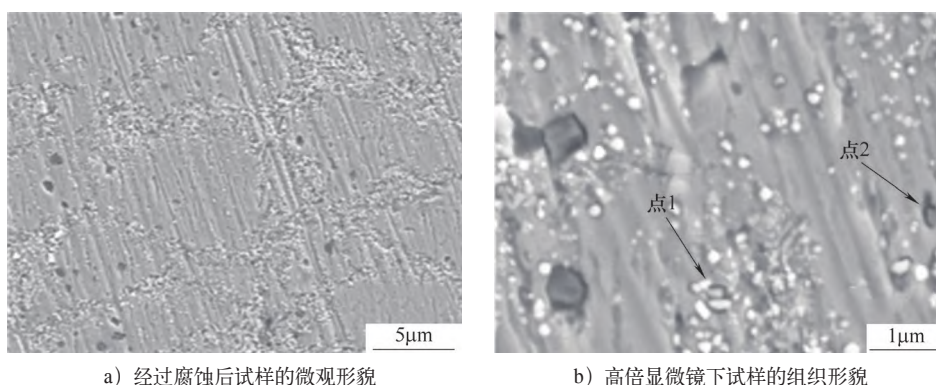


图5 不同TiC含量铝基复合材料的微观形貌

的移动和位错,影响复合材料的性能。从图5b可看出,点1处白色的颗粒状增强相为TiC,点2处黑色的第二相可能是6系铝合金中重要的强化相Mg₂Si。同时可以看出,白色的TiC颗粒均匀分布在基体材料内,说明通过高能球磨可以将TiC增强颗粒均匀有效地分散到铝基体中^[11]。点1、点2能谱分析结果见表2。

表2 点1、点2能谱分析结果

区域	元素	含量 (质量分数, %)	含量 (原子分数, %)
点1	C	21.33	40.22
	Al	57.82	48.53
	Ti	20.85	11.25
点2	Al	98.25	98.29
	Mg	1.1	1.08
	Si	0.65	0.63

3.2 力学性能

图6所示为TiC/SWCNTs/6061铝基复合材料的抗拉强度和硬度变化曲线。由图6可知,随着TiC含量的增加,复合材料的抗拉强度呈现先上升后下降的趋势,当TiC含量增加到4%时,复合材料的抗拉强度达到了最大值,为196.4MPa。原因可能是当TiC添加量较少时,混合粉末经过球磨后,粉末颗粒的尺寸会减小,使TiC能均匀地分散在铝基体中,促进了TiC在复合材料中的弥散强化效果,从而阻碍了铝基体中的位错运动,提高了复合材料的强度。另外,是在复合材料的晶界处聚集有更多的第二相,起到钉扎位错的作用,同样能提高复合材料的强度^[12],并且TiC颗粒还有细晶强化作用,能有效细化晶粒,提高复合材料的强度。而随着TiC含量的继续增加,复合材料的抗拉强度明显下降,这是因为TiC含量增加,TiC在基体中的分散效果会减弱,容易引起TiC在基体中的团聚,并且多分布于晶界等缺陷位置,破坏了材料的力学性能。复合材料硬度随着TiC含量的增加而提高。首先,这是因为TiC颗粒具有极高的强度和刚度,对复合材料硬度有很大的提升作用;其次,TiC在承受载荷过程中不易变形,能很好地承担传递载荷的作用,并且TiC在铝基体中能有效地起到弥散强化作用,帮助基体在硬度测试中抵抗变形,阻碍基体的位错运动,提高复合材料的硬度值。

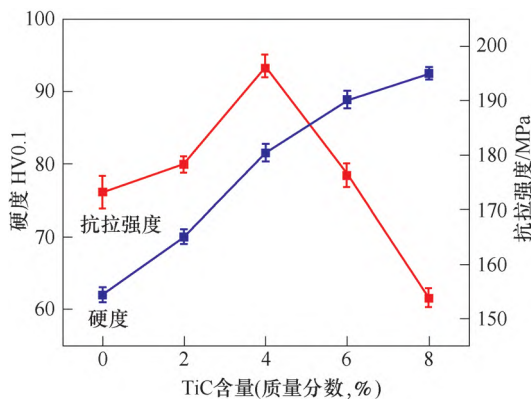


图6 6061 铝基复合材料的抗拉强度和硬度

图7所示为TiC/SWCNTs/6061铝基复合材料的伸长率变化趋势。由图7可看出,复合材料的断后伸长率随着TiC含量的增加而减小,原因可能是由于TiC颗粒与铝基体界面的结合性较差,使得TiC添加量过多后在铝合金基体晶界处聚集成团簇,降低材料塑性。

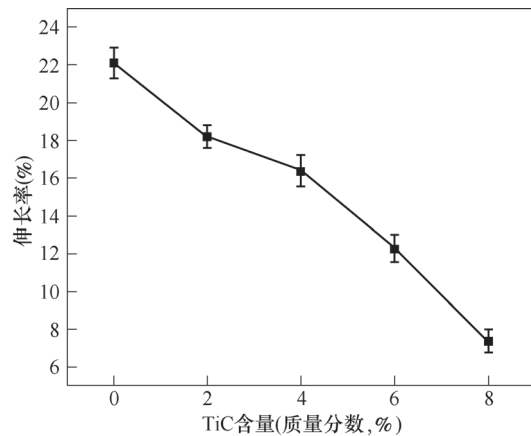


图7 不同TiC含量铝基复合材料伸长率

图8所示为6061铝基复合材料的拉伸断口SEM图。从图8可看到,断口处有明显的撕裂棱和韧窝,但是撕裂棱和韧窝较少,同时有不规则的拉伸断口截面,说明铝基体在拉伸过程中发生了严重的塑性变形。在断口处的裂纹扩展区可以观察到SWCNTs的存在,说明SWCNTs在铝基体承受应力作用时能帮助基体承担载荷,因为单壁碳纳米管与铝基体的界面处可以生成界面反应产物碳化铝(Al₄C₃),可以起到连接铝基体和单壁碳纳米管的作用,提高载荷传递效率,还可以在纳米尺度上抑制裂纹的扩展,提高复合材料的抗拉强度。同时在加入TiC后,在断口处能看见白色的TiC颗粒,与铝基体结合良好。

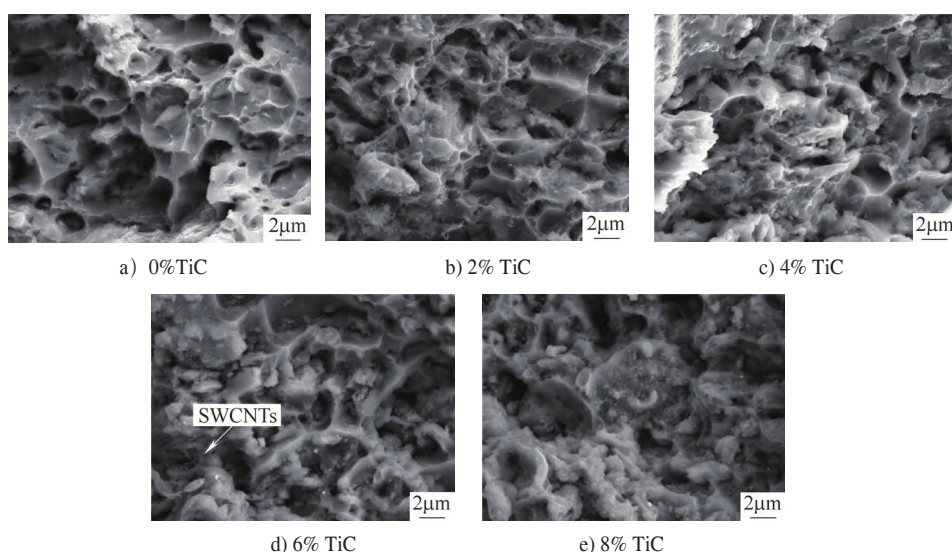


图8 不同TiC含量铝基复合材料拉伸断口的SEM图

4 结束语

通过上述分析,可得出以下结论。

1) 通过高能球磨的方法,能使得TiC增强颗粒均匀地分布在铝基体中,获得TiC增强颗粒分布均匀的铝基复合材料,且复合材料中TiC的加入能阻碍晶粒长大,细化晶粒尺寸。

2) TiC可以改善 6061 铝合金的组织 and 性能,随着TiC含量的增加,铝基复合材料的硬度会提高,抗拉强度呈现先上升后下降的趋势。当TiC的含量为4%时,复合材料的综合性能最优,抗拉强度为196.4MPa,硬度为81.7HV0.1。

参考文献:

- [1] 王琪,江峰,孙军. 汽车领域铝基粉末冶金的研究与进展[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31 (1): 86-90.
- [2] 李宝绵,柯奇,张海涛,等. 高强耐热 $6\times\times\times$ 系铝合金的研究现状及其发展趋势[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (5): 8-14.
- [3] SERCOMBE T B, LI X. Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites: review [J]. Materials Technology, 2016, 31 (2): 77-85.
- [4] NAYIM S M T I, HASAN M Z, SETH P P, et al. Effect of CNT and TiC hybrid reinforcement on the micro-mechano-tribo behaviour of aluminium matrix composites [J]. Elsevier, 2020.
- [5] 杨才定,薛峰,吴钱林,等. 原位合成TiC颗粒增强铝基复合材料及其磨损性能[J]. 东南大学学报自然

科学版, 2005 (6): 907-910.

- [6] YANG H, GAO T, WU Y, et al. Microstructure and mechanical properties at both room and high temperature of in-situ TiC reinforced Al-4.5Cu matrix nanocomposite [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 606-616.
- [7] SUN X, HAN Y, CAO S, et al. Rapid in-situ reaction synthesis of novel TiC and carbon nanotubes reinforced titanium matrix composites [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33 (10): 1165-1171.
- [8] SABA F, SAJJADI S A, HADDAD-SABZEVAR M, et al. Exploring the reinforcing effect of TiC and CNT in dual-reinforced Al-matrix composites [J]. Diamond & Related Materials, 2018, 89: 180-189.
- [9] 张兰,夏慧敏,马会中,等. 粉末冶金铝合金的研究综述[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30 (5): 78-83.
- [10] 赵炳怡,蔡启舟,李欣蔚,等. 纳米TiC/Ti细化剂加入量对铸态Al-Zn-Cu-Mg合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27 (4): 692-700.
- [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.
- [12] 潘琪琛,陈文琳,吴满意,等. 单壁碳纳米管增强6061铝基复合材料性能研究[J]. 热加工工艺, 2023: 1-5. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20212438.