

添加 Ti 对 C/C 复合材料渗 NiAl 金属间化合物的影响

於广军, 肖 鹏, 方华婵

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 通过铺展实验研究添加 Ti 对 NiAl 金属间化合物与 C/C 复合材料润湿性的影响, 发现添加 Ti 元素可改善熔融 NiAl 与 C/C 复合材料基体的润湿性。以低密度 C/C 复合材料为坯体, 采用真空熔渗法制备 C/C-NiAl 复合材料, 利用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)对材料进行分析。结果表明: 添加的 Ti 粉含量(质量分数)为 15%时, C/C 复合材料熔渗 NiAl 金属间化合物的效果最佳, 且 TiC 颗粒与 NiAl 熔体在 C/C 复合材料内部呈网状分布; 渗 NiAl 后材料的密度从 1.35 g/cm³ 提高到 2.47 g/cm³, 开孔率从 27%下降到 15.1%, 沿平行纤维排布面方向的洛氏硬度较未渗 NiAl 的 C/C 复合材料提高约 30.7%。添加 Ti 能改善 C/C 复合材料渗 NiAl 性能的主要原因是 Ti 与 C 反应形成的 TiC 改善了 NiAl 在 C/C 复合材料中的化学吸附和物理吸附特性。

关键词: C/C 复合材料; NiAl 金属间化合物; 钛; 熔渗; 润湿性

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

Influence of adding Ti on molten NiAl intermetallic infiltration into C/C composites

YU Guang-jun, XIAO Peng, FANG Hua-chan

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The influence of adding titanium on the wettability of molten NiAl intermetallic on the surface of C/C composites was investigated by spreading experiment. It is indicated that adding Ti can improve the wettability between C/C composites and NiAl intermetallic. Using the low-density C/C composite perform the C/C-NiAl composites were prepared by the vacuum molten infiltration. The composites were analyzed by X-ray diffraction(XRD) and scanning electronic microscope(SEM). The results show that NiAl with about 15%Ti (mass fraction) possesses good wettability on the surface of C/C composites. The TiC particles and NiAl melt present network distribution in C/C composites internal. The density increases from 1.35 g/cm³ to 2.47 g/cm³ while the porosity decreases from 27% to 15.1% after the infiltration of NiAl. On the other hand, the Rockwell hardness of C/C-NiAl composites increases by 30.7% in the direction parallel to fiber fabric plane compared with that of C/C composites. The improvement of adding Ti for molten NiAl infiltration into the C/C composites results from the improvement of the chemical and physical adsorption characteristics of NiAl alloy on the composites, which is caused by TiC from reaction of Ti and C.

Key words: C/C composites; NiAl intermetallic; Ti; infiltration; wettability

C/C 复合材料具有抗烧蚀性能和抗热震性能优异、比强度高、比模量高、断裂韧性好、蠕变小和高

温性能稳定等特点, 可用于 2 000 ℃ 以上的超高温环境, 尤其是其高温下力学性能不降反升的独特性

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB605804); 中国博士后科学基金资助项目(2013M531810); 中南大学博士后基金资助项目(109001)

收稿日期: 2013-02-27; **修订日期:** 2013-09-10

通信作者: 肖 鹏, 教授, 博士; 电话: 0731-88830131; E-mail: xiaopeng@mail.csu.edu.cn

能,使其在航天航空和军事等领域具有广泛的应用前景^[1-3]。然而,C/C复合材料在超过370℃的氧化气氛中极易氧化^[4-5],导致其力学性能急剧降低,极大地限制了C/C复合材料在高温氧化环境中的应用。目前,C/C复合材料的高温抗氧化方法主要有采用SiC等陶瓷相的基体改性和金属、陶瓷等涂层防护两种途径^[6],但涂层/基体热膨胀系数的不匹配以及涂层易损伤破坏等特性,导致涂层在超高温、强冲刷、高频振动、高低温瞬时热震等服役环境下易因为开裂、剥落、烧蚀等而失效,因此,单纯依靠涂层技术难以彻底解决C/C复合材料的抗氧化问题,必须首先对其基体进行改性。碳基体改性添加抑制剂主要包括金属和超高温陶瓷,金属中最典型的就是Cu,利用Cu本身在复合材料中的发汗冷却或者热沉的作用,可以大幅度地提高复合材料本身的抗烧蚀性能。有资料表明,俄罗斯采取类似钨渗铜的工艺对C/C复合材料进行渗铜,制备出高温喉衬材料。冉丽萍等^[7]采用真空熔渗技术制备了C/C-Cu复合材料,且添加活性元素Ti以改善熔融Cu与C/C复合材料的润湿性,通过烧蚀过程中生成的TiO₂和Cu₂O保护相,提高了材料的抗烧蚀性能。李娜等^[8]采用Cu、Si共渗C/C坯体制备了C/C-SiC-Cu₃Si复合材料,在700℃氧化10 min时质量损失率仅为0.049%,700~1 000℃氧化时质量损失明显,在1 000~1 300℃氧化时质量损失率趋于稳定,最大质量损失率为4.26%。

目前,广泛应用于航空发动机涡轮叶片和导向叶片材料的NiAl金属间化合物^[9-12]具有很高的熔点(1 638℃)和较低的延-脆转变温度(500℃),在800~1 100℃时具有超塑性(伸长率为480%)。特别是NiAl金属间化合物的热导率较高,在20~1 100℃为70~80 W/(m·K),能极大程度地降低温度差引起的热应力,在热震过程中能够缓和热膨胀系数的失配。

利用NiAl金属间化合物优异的耐高温、抗氧化、高强度、高导热率以及高温超塑性和抗热震性能,对多孔C/C复合材料进行基体改性,使C/C复合材料具有较强的抗氧化能力,并调节其热膨胀系数,相关研究尚未见报道。鉴于NiAl和C/C复合材料润湿性差,拟通过添加活性元素改善两者的润湿性。有研究表明,TiC基和NiAl润湿性非常好,采用真空熔渗法在TiC基体上渗NiAl,可得到近乎全致密且结合良好的复合材料^[13]。因此,本文作者采用基体合金化改性技术,研究添加Ti元素对NiAl和C/C复合材料之间润湿性能的影响。通过优化Ti的添加量,采用真空熔渗^[14-15]的方法,将NiAl熔融渗入密度为1.35 g/cm³的C/C坯体中制备新型C/C-NiAl复合材料,并对其组织和物理

性能进行研究。

1 实验

1.1 实验原料

采用日本东丽公司生产的12KPAN基T700碳纤维针刺整体毡为预制体(密度约为0.55 g/cm³),以丙稀为碳源气体,氢气为稀释气体,进行预制体CVI增密,沉积时间为120~300 h,沉积温度为900~1 100℃,制得密度为1.35 g/cm³的C/C多孔坯体。再将制得的C/C复合材料切割成16 mm×16 mm×5 mm的块状小试样,并用砂纸打磨,超声波清洗后烘干。采用真空熔炼法制备的Ni50Al50(NiAl)金属间化合物经1 350℃真空均匀化退火5 h后,研磨、过筛得到150 μm的NiAl粉末。Ti粉纯度为99%以上,粒度为50 μm左右。

1.2 实验过程

采用熔渗剂在C/C坯体上铺展的实验方法定性考察NiAl合金熔液对C/C坯体的润湿性。铺展实验是将添加不同NiAl和Ti质量比的直径为12 mm、厚度为2 mm的圆片(压制压力为500~700 MPa,室温)放在C/C坯体表面,在真空状态下升温到1 800℃保温1 h,根据铺展和粘结的情况比较润湿性。NiAl粉和Ti粉的质量比分别为100:0、95:5、90:10、85:15和80:20。

根据铺展实验获得改善NiAl与C/C间润湿性的最佳Ti配比,采用真空熔渗法制备C/C-NiAl复合材料,熔渗温度为1 800℃,保温时间为1 h。采用Archimedes排水法测量C/C-NiAl复合材料的开孔率和密度;用HR-150A型洛氏硬度计测试材料的洛氏硬度(HRB);用Canon Power Shot G12数码相机记录5种比例NiAl、Ti粉压制圆片在C/C坯体上铺展的宏观形貌;用RIGAKU-3014型X射线衍射仪分析材料的物相;用NOVATM Nano SEM230型扫描电镜观察和分析材料的微观结构和微区化学成分。

2 结果与讨论

2.1 添加Ti对NiAl在C/C复合材料上润湿性的影响

通过铺展实验考察不同Ti含量的NiAl合金在C/C坯体上的润湿性,结果列于表1。5种不同Ti含量的NiAl粉末压制圆片在C/C坯体上铺展的宏观形貌如图1所示。由铺展实验结果可知,未添加Ti元素

表 1 铺展实验结果

Table 1 Results of spreading experiment

Sample	w(Ti)/%	Result of spreading
a	0	Furling into ball cap shape, no bonding
b	5	Furling into ball cap shape, a little spreading and bonding
c	10	Spreading obviously, melt infiltration occurred
d	15	Spreading wholly, melt infiltration occurred
e	20	Spreading partly, bonding

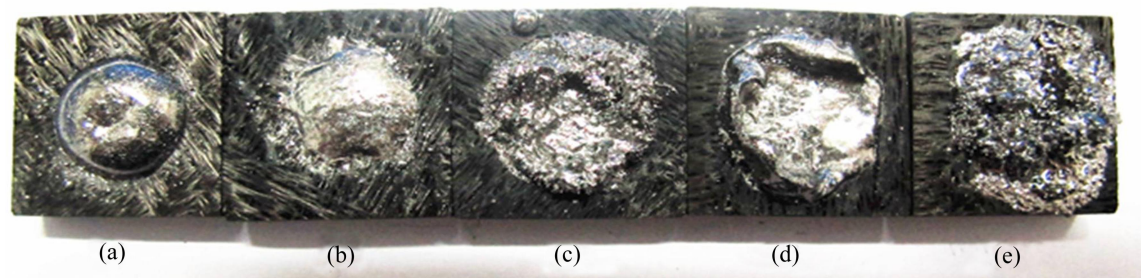


图 1 不同比例 Ti、NiAl 粉末压制圆片熔化凝固后在 C/C 块体上铺展的宏观形貌

Fig. 1 Macromorphologies of wafer compacted by Ti and NiAl powder melting and solidification spreading on C/C perform: (a) 100%NiAl; (b) 95%NiAl+5%Ti; (c) 90%NiAl+10%Ti; (d) 85%NiAl+15%Ti; (e) 80%NiAl+20%Ti

的 NiAl 粉末与 C/C 块体的润湿性很差，没有出现任何粘结和渗透现象(见图 1(a))。添加少量 Ti 时，NiAl 块与 C/C 块体略有粘结(见图 1(b))，NiAl 与 C/C 的润湿性改善不明显；当 Ti 含量达到 10%~15%时，NiAl 与 C/C 开始有粘结的现象，NiAl 块已渗入到 C/C 块体中，两者的润湿性显著提高(见图 1(c)和(d))。当 Ti 含量增加到 20%，润湿性反而变差(见图 1(e))。由于 Ti 易与 C 反应，当 Ti 含量较高时，对 C/C 将有大的损伤，因此，Ti 含量应控制在 10%~15%的范围内。

2.2 熔渗 NiAl 后材料的组织结构

2.2.1 XRD 分析

通过铺展实验，可以看出当 Ti 含量为 15%NiAl 左右时具有较好的熔渗效果，故选定 Ti 含量为 15% 的 NiAl/Ti 混合粉进行熔渗实验制备 C/C-NiAl 复合材料。图 2 所示为 C/C-NiAl 复合材料表面和截面的 XRD 谱。由图 2(a)所示表面 XRD 谱分析发现，渗 NiAl 后材料表面主要由 C、NiAl 和反应生成的 TiC 组成。为进一步确定 NiAl 是否熔渗入 C/C 基体内部，对 C/C-NiAl 复合材料样品截面进行观察。NiAl 的峰位有较明显的降低，TiC 峰位几乎没有变化，可以证明 NiAl 已经渗入 C/C 基体内部(见图 2(b))。

2.2.2 组织分析

为进一步确定 NiAl 已渗入 C/C 基体内部，对

C/C-NiAl 复合材料样品的截面进行扫描电镜分析。图 3 所示分别为 C/C 复合材料和 C/C-NiAl 复合材料样品截面的低倍 SEM 像。对比图 3(a)和(b)发现 C/C 复合材料内部存在大量空隙(见图 3(a))，而 C/C-NiAl 复合材料内部的孔隙被大量白色物质所填充(见图 3(b))。

图 4(a)所示为 C/C-NiAl 复合材料截面的高倍 SEM 像。由图 4(a)可知，白色相填充了碳纤维的间隙，在白色相内镶嵌着大量灰色颗粒状物质。这些灰色颗粒沿着碳纤维分布非常致密，而远离碳纤维则分布较少，但是熔体中的灰色颗粒较沿碳纤维分布的颗粒粗大。对白色相和灰色颗粒(图 4(a)中区域 A 和 B)进行能谱分析发现，白色相由 Al 和 Ni 两种元素组成，两者的摩尔比接近 1:1，初步判断为 NiAl(见图 4(b))，灰色颗粒为由 Ti 和 C 元素组成，两者的摩尔比接近 1:1(见图 4(c))，结合 XRD 谱分析判定为由 C 和 Ti 反应生成的 TiC 相。

图 5 所示为渗 NiAl 后材料的 C、Ti、Ni 和 Al 的线扫描分布。碳纤维内部都是 C，从碳纤维边界开始 Ti 峰升高，结合图 2(b)的 XRD 谱分析和图 4(b)的能谱分析，说明 Ti 主要在碳纤维和 C/C 基体周围形成 TiC；远离碳纤维且在灰色颗粒处，Ti 和 C 的含量显著增高，说明内部镶嵌的颗粒为 TiC，同时也表明 Ti 与 C/C 基体内部热解碳反应生成 TiC。白色区域内 Ti 和 C 的含量急剧降低，Al 峰和 Ni 峰急剧升高，且 Al

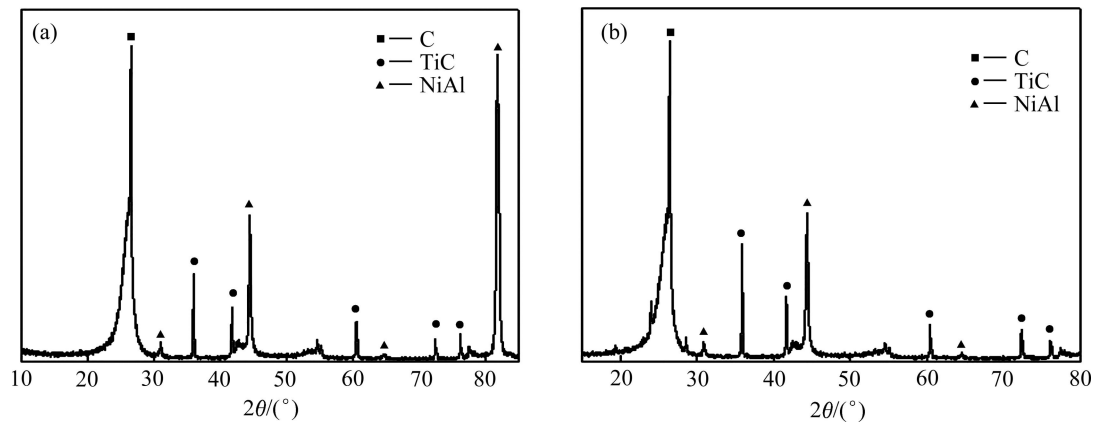


图 2 C/C-NiAl 复合材料的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of surface(a) and cross-section(b) of NiAl-infiltrated C/C composites

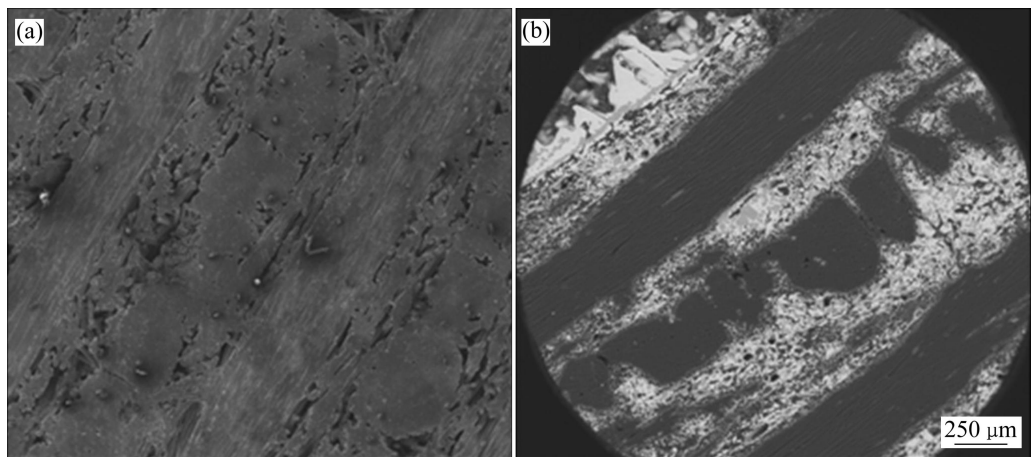


图 3 C/C 复合材料和 C/C-NiAl 复合材料的截面 SEM 像

Fig. 3 Cross-section SEM images of C/C composites(a) and NiAl-infiltrated C/C composites(b)

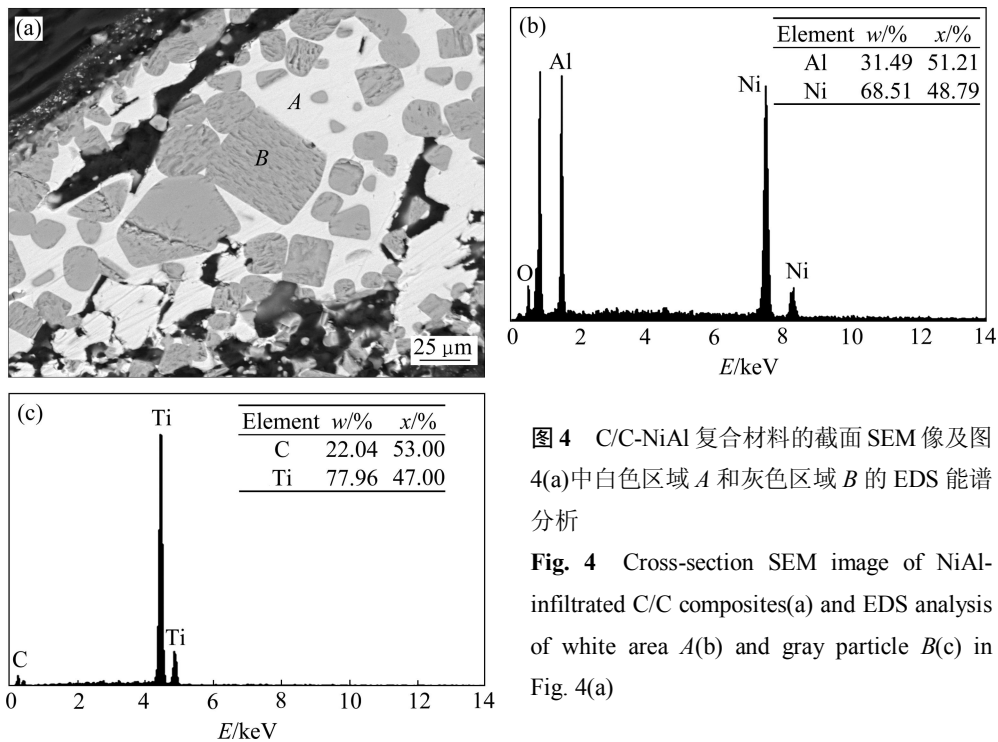


图 4 C/C-NiAl 复合材料的截面 SEM 像及图 4(a)中白色区域 A 和灰色区域 B 的 EDS 能谱分析

Fig. 4 Cross-section SEM image of NiAl-infiltrated C/C composites(a) and EDS analysis of white area A(b) and gray particle B(c) in Fig. 4(a)

峰和 Ni 峰同高同低,说明白色区域确为熔渗入碳基体的 NiAl 合金。同时还发现 Ti 的波峰和波谷正好与 Ni 和 Al 的相反,即 Ti 的波峰对应 Ni 和 Al 的波谷,可以

推测 NiAl 和 TiC 的界面非常明显,没有出现互溶迹象。

图 6 所示为渗 NiAl 后材料中 C、Ti、Ni 和 Al 的面扫描分布。由图 6 可知, Ti 主要分布在碳纤维和

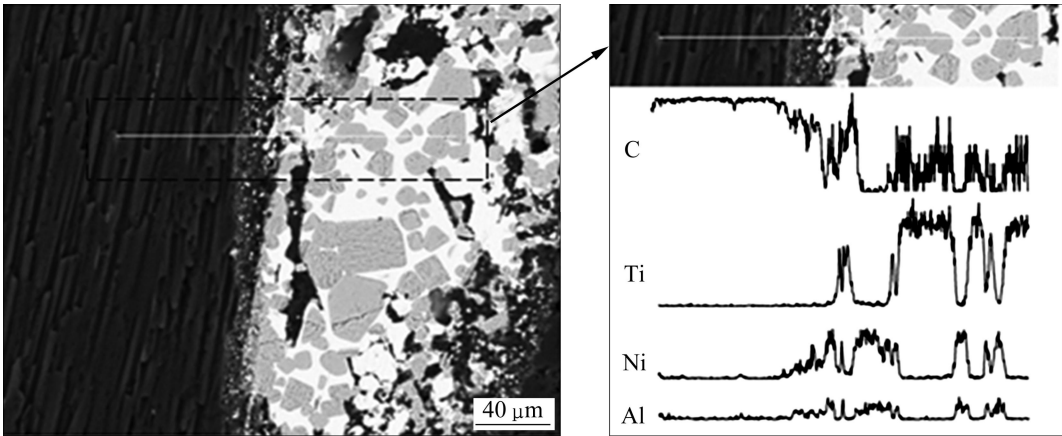


图 5 C/C-NiAl 复合材料中元素 C、Ti、Ni 和 Al 的线扫描分布

Fig. 5 Line scanning image of C, Ti, Ni and Al in NiAl-infiltrated C/C composites

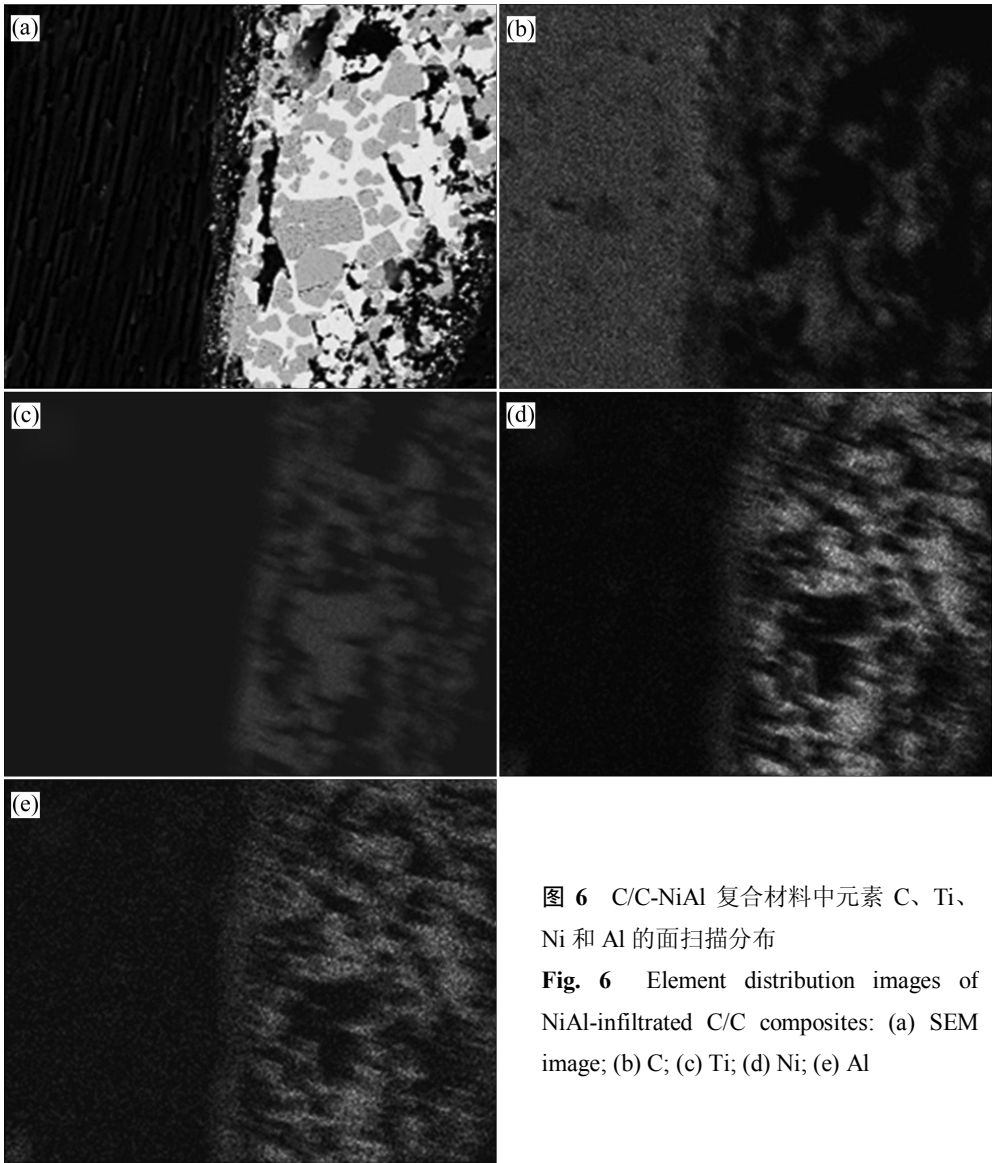


图 6 C/C-NiAl 复合材料中元素 C、Ti、Ni 和 Al 的面扫描分布

Fig. 6 Element distribution images of NiAl-infiltrated C/C composites: (a) SEM image; (b) C; (c) Ti; (d) Ni; (e) Al

C/C 基体碳周围并形成 TiC 颗粒, 在碳纤维和 TiC 颗粒周围分布着 Ni 和 Al 元素, Ni 和 Al 的分布几乎一致, 且与 Ti 的分布呈互补状, 但是 C 元素的分布与 Ti 分布略有出入, 可能是 C 元素收集时间不够以及仪器对 C 元素扫描固有的缺陷所致。TiC 与 NiAl 的界面明显, 各自分布, 没有互溶及各自渗透迹象。

2.3 物理性能

表 2 所列为 C/C-NiAl 复合材料与 C/C 复合材料洛氏硬度的比较。由表 2 可知, C/C 复合材料平行纤维排布面方向的平均硬度为 30.6HRB, 渗 NiAl 后材料的平均硬度为 40HRB, 提高了 30.7%, 这是高硬度 TiC 和 NiAl 的渗入使 C/C-NiAl 复合材料硬度得到显著提高。C/C 复合材料表面是网状结构, 且有部分空隙未被 NiAl 填充(见图 4(a)), 导致测得的值略有起伏。

表 3 所列分别为 C/C-NiAl 复合材料与 C/C 复合材料的密度和开孔率。由表 3 可知, 熔渗入 NiAl 后, 材料密度由 1.35 g/cm^3 提高到 2.47 g/cm^3 , 而开孔率则从 27% 下降到 15.1%。渗 NiAl 后的 C/C 材料具有较低的密度, 应用于高温结构材料中具有一定的优势。但由于 NiAl 未能完全填充 C/C 复合材料的内部空隙, 导致材料的开孔率依然较高。因此, 如何进一步降低材料的开孔率是下一步研究的关键。

表 2 C/C-NiAl 复合材料与 C/C 复合材料的洛氏硬度

Table 2 Rockwell hardness of NiAl-infiltrated C/C composites and C/C composites

Sample	Rockwell hardness, HRB					
C/C	35	34	29	28	27	30.6
C/C-NiAl	44	36	39	41	40	40

表 3 C/C-NiAl 复合材料与 C/C 复合材料的密度和开孔率

Table 3 Density and porosity of NiAl-infiltrated C/C composites and C/C composites

Sample	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Porosity/%
C/C	1.35	27.0
C/C-NiAl	2.47	15.1

2.4 渗透机理初探

液体与固体表面接触时, 要想达到吸附的效果, 必须满足固体表面分子对液体分子的作用力大于液体分子间的作用力, 才能使液体分子向固液界面聚集渗透, 完成吸附的过程。物理和化学吸附均可以达到润湿的效果^[16], 而在本研究中通过化学方法改性固液界

面张力, 降低润湿角, 即利用 Ti 与 C 的反应改善润湿性, 以达到熔渗 NiAl 的目的。

由图 3(a)可知, C/C 基体内部存在大量孔隙, 观察熔渗 NiAl 材料的组织(见图 3(b))发现 NiAl 合金分布在碳纤维间的孔洞和孔隙中。高温下, 熔融状 NiAl 金属液滴借助孔洞和孔隙毛细管力渗入 C/C 内部。NiAl 与 C/C 的润湿性差, 不利于熔渗, 所以通过添加 Ti 改善两者的润湿性。从图 4(a)可以看出, 高温下 Ti 与碳基体中的热解碳反应生成 TiC, 首先在碳纤维周围形成一层 TiC, 利用 TiC 与 NiAl 良好的润湿性, 将 NiAl 熔体渗进 C/C 复合材料的孔隙中。这说明可以通过 Ti 与 C 发生反应, 产生化学吸附, 降低固液界面能, 从而降低液态 NiAl 合金的内界面张力, 提高 NiAl 合金液向 C/C 的渗透能力。

但是, 熔体中间的 TiC 颗粒比沿碳纤维分布的 TiC 颗粒大很多, 这可能是由于 TiC 晶粒的长大与 Ti 含量相关, 熔体中间的 Ti 含量高于碳纤维边缘的 Ti 含量, 所以导致 TiC 大颗粒的出现。另一方面由于 Ti 易与 C 反应, 故添加过量的 Ti 粉可能导致 TiC 颗粒快速形成长大, 反而会导致 C/C 基体中的孔隙被生成的 TiC 填满, 不利于 NiAl 合金的熔渗。

3 结论

1) 添加 Ti 可以改善 NiAl 与 C/C 基体的润湿性, Ti 含量为 15% 时, NiAl 合金与 C/C 复合材料具有最佳的润湿效果。

2) Ti 与 C 反应生成的 TiC 可提高 NiAl 合金熔液的熔渗效果。

3) 渗 NiAl 后的材料沿平行纤维排布面的平均硬度从 30.6HRB 提高到 40HRB, 密度从 1.35 g/cm^3 提高到 2.47 g/cm^3 , 开孔率从 27% 下降到 15.1%。

REFERENCES

- [1] LI Cui-yan, HUANG Jian-feng, LU Jing, CAO Li-yun, FEI Jie. Effect of Nb coating on oxidation behavior of C/C composites[J]. Corrosion Science, 2012, 63: 182-186.
- [2] FU Qiang-gang, LI He-jun, WANG Yong-jie, LI Ke-zhi, WU Heng. A Si-SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites prepared by a two-step pack cementation[J]. Ceramics International, 2009, 35(6): 2525-2529.
- [3] 李贺军, 薛 晖, 付前刚, 张雨雷, 史小红, 李克智. C/C 复合材料高温抗氧化涂层的研究现状与展望[J]. 无机材料学报, 2010, 25(4): 337-343.

- LI He-jun, XUE Hui, FU Qiang-gang, ZHANG Yu-lei, SHI Xiao-hong, LI Ke-zhi. Research status and prospect of anti-oxidation coatings for carbon/carbon composites[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, 25(4): 337–343.
- [4] HUANG Jian-feng, LIU Miao, WANG Bo, CAO Li-yun, XIA Chang-kui, WU Jian-peng. SiC_m/SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites[J]. *Carbon*, 2009, 47(6): 1198–1201.
- [5] JACOBSON N S, ROTH D J, RAUSER R W, CAWLEY J D, CURRY D M. Oxidation through coating cracks of SiC-protected carbon/carbon[J]. *Surface and Coating Technology*, 2008, 203(3/4): 372–383.
- [6] 黄剑锋, 李贺军, 熊信柏, 曾燮榕, 李克智, 付业伟, 黄敏. 炭炭复合材料高温抗氧化涂层的研究进展[J]. *新型炭材料*, 2005, 20(4): 373–378.
- HUANG Jian-feng, LI He-jun, XIONG Xin-bai, ZENG Xie-rong, LI Ke-zhi, FU Ye-wei, HUANG Min. Research and application of high temperature anti-oxidation coatings for C/C composites[J]. *New Carbon Materials*, 2005, 20(4): 373–378.
- [7] 冉丽萍, 李文军, 杨琳, 易茂中. C/C-Cu 复合材料的烧蚀性能及烧蚀机理[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(3): 510–515.
- RAN Li-ping, LI Wen-jun, YANG Lin, YI Mao-zhong. Ablation properties and ablation mechanism of C/C-Cu composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(3): 510–515.
- [8] 李娜, 肖鹏, 李专, 刘逸众. C/C-SiC-Cu₃Si 复合材料的氧化行为[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(11): 3054–3058.
- LI Na, XIAO Peng, LI Zhuan, LIU Yi-zhong. Oxidation behavior of C/C-SiC-Cu₃Si composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(11): 3054–3058.
- [9] 李爱民, 董维芳, 孙康宁. 金属间化合物的研究现状及其最新发展趋势[J]. *现代技术陶瓷*, 2004(2): 27–34.
- LI Ai-min, DONG Wei-fang, SUN Kang-ning. Research status and new development trend of intermetallics[J]. *Advanced Ceramics*, 2004(2): 27–34.
- [10] ALBITER A, SALAZAR M, BEDOLLA E, DREW R A L, PEREZ R. Improvement of the mechanical properties in a nanocrystalline NiAl intermetallic alloy with Fe, Ga and Mo additions[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 347(1/2): 154–164.
- [11] STOLOFF N S, LIU N S, DEEVI S C. Emerging applications of intermetallics[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(9/11): 1313–1320.
- [12] XU G H, ZHANG K F, HUANG Z Q. The synthesis and characterization of ultrafine grain NiAl intermetallic[J]. *Advanced Powder Technology*, 2012, 23(3): 366–371.
- [13] 高明霞, 潘颐, OLIVERIA F J, BAPTISTA J L, VIEIRA J M. 自发熔渗法制备 TiC/NiAl 复合材料和其微观组织特征[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(5): 11–15.
- GAO Min-xia, PAN Yi, OLIVERIA F J, BAPTISTA J L, VIEIRA J M. Pressureless melt infiltration processing and the microstructure characteristics of TiC/NiAl composites[J]. *Acta Material Composite Sinica*, 2004, 21(5): 11–15.
- [14] 冉丽萍, 周文艳, 赵建新, 易茂中, 杨琳. 熔渗法制备 C/C-Cu 复合材料的力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(7): 1607–1613.
- RAN Li-ping, ZHOU Wen-yan, ZHAO Jian-xin, YI Mao-zhong, YANG Lin. Mechanical properties of C/C-Cu composites fabricated by molten infiltration method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(7): 1607–1613.
- [15] 王林山, 熊翔, 肖鹏, 任芸芸. 反应熔渗法制备 C/C-SiC 复合材料及其影响因素的研究进展[J]. *粉末冶金技术*, 2003, 21(1): 37–41.
- WANG Lin-shan, XIONG Xiang, XIAO Peng, REN Yun-yun. Factors affecting properties of C/C-SiC composites prepared by reactive melt infiltration[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2003, 21(1): 37–41.
- [16] 易振华, 易茂中, 冉丽萍, 杨琳. 添加钛对炭/炭复合材料渗铜的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(7): 1214–1218.
- YI Zhen-hua, YI Mao-zhong, RAN Li-ping, YANG Lin. Influence of adding Ti on molten copper infiltration into C/C composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(7): 1214–1218.

(编辑 陈卫萍)