

文章编号: 1004 - 0609(2003) 03 - 0640 - 05

热处理对 TiC_p/Fe 复合材料基体组织与力学性能的影响^①

姚秀荣^{1, 2}, 刘兆晶², 李凤珍², 韩杰才¹, 任善之²

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 通过不同的热处理工艺改变原位 TiC_p/Fe 复合材料的基体组织, 探讨了原位 TiC_p/Fe 复合材料不同基体组织与性能的关系。试验结果表明: 在热处理过程中基体组织明显改变, TiC 增强相不发生变化。退火处理降低材料的硬度, 提高材料的韧性。淬火+ 低温回火处理使材料的强度和硬度提高, 而韧性没有明显的下降。采用等温淬火工艺, 可使 TiC_p/Fe 复合材料具有最好的综合力学性能。

关键词: TiC_p/Fe 复合材料; 热处理; 组织; 性能

中图分类号: TB 331

文献标识码: A

在当今材料研究领域中, 复合材料是材料工作者研究的热点之一, 而满足一定特殊性能要求的金属基复合材料是复合材料领域的一个重要分支^[1-3]。由于这种材料融合了金属与其它非金属的特性, 除具有一般金属材料难以达到的高比强度, 高比模量外, 还有高的工作温度, 高的剪切强度以及高的耐磨性等特点^[4, 5], 受到各国材料工作者的广泛关注, 其开发研究一直处于材料科学的前沿^[6, 7]。

20 世纪 90 年代以前, 对金属基复合材料的制备工艺研究一直侧重于传统的外加增强体与基体复合的方法, 如粉末冶金^[8]、热挤压或流变铸造等等。这类方法不仅工艺复杂, 成本较高, 而且存在严重的界面反应, 或增强体与基体之间相容性较差、结合不良, 难以达到理想的增强效果。针对这些情况, 近年来发展了一种制备金属基复合材料的新型方法——金属基原位反应合成法^[9, 10]。其基本原理是在一定条件下, 通过元素之间或元素与化合物之间的化学反应, 在金属基体内原位生成一种或几种高硬度、高弹性模量的陶瓷增强相, 从而达到强化金属基体的目的^[11]。这种方法克服了传统方法的主要缺点, 且界面干净, 基体与增强相润湿性好, 提高了材料的综合力学性能。

本文作者在工业化生产的实际条件下, 熔炼制备出原位 TiC_p/Fe 复合材料, 并经不同热处理工艺, 改变基体组织状态, 观察光学显微组织, 测试其力学性能, 为其今后的实际应用奠定基础。

1 实验

采用原位反应铸造法制备 TiC_p/Fe 复合材料。为适应工业化生产要求, 以钛铁、生铁和废钢等为主要原材料。在常压大气状态下, 采用特殊坩埚炉衬和覆盖保护剂进行熔炼^[12, 13]。对制备出的原位 TiC_p/Fe 复合材料实施不同的热处理工艺(见表 1), 以改变其基体组织形态, 得到马氏体、贝氏体、珠光体等组织, 从而考察其组织与性能的关系。试验采用日本理学 Rigaku, D/max-RB 型 X 射线衍射仪对材料的相组成进行分析。冲击试验和硬度试验分别在摆锤式冲击试验机和洛氏硬度试验机上进行, 均取 6 个数据的平均值作为实验数据。利用 4X 型金相显微镜观察材料的显微组织。利用 S-570 型和 JEOL Super probe 773 型扫描电镜对材料断口和表面形貌进行组织观察。

表 1 原位 TiC_p/Fe 复合材料的热处理工艺

Table 1 Procedure of heat treatment of in situ TiC/Fe composite

Operation	Parameter		
	Temperature/ ℃	Holding time/min	Cooling method
Quenching	840~ 860	30	Oil cooling
Isothermal quenching	300~ 310	60	Salt-bath cooling
Annealing	890~ 910	120	Furnace cooling
Tempering	200~ 220	120	Air cooling

① 基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(G99A9-2); 黑龙江省教育厅基金资助项目(10531052); 哈尔滨市基金资助项目(2002AF××J038)

收稿日期: 2002-10-15; 修订日期: 2003-01-12 作者简介: 姚秀荣(1963-), 女, 副研究员, 博士研究生。

通讯联系人: 姚秀荣, 副研究员; 电话: 0451-6390137; E-mail: yaoxr@hrbust.edu.cn

2 实验结果

2.1 X 射线衍射谱

图 1 所示为铁熔体与钛铁反应生成的复合材料的 X 射线衍射谱, 从图 1 中可见, 生成相有 TiC, 说明在常压大气状态下, 采用特殊坩埚炉衬和覆盖保护剂进行熔炼, 可原位反应生成 TiC_p/Fe 复合材料。

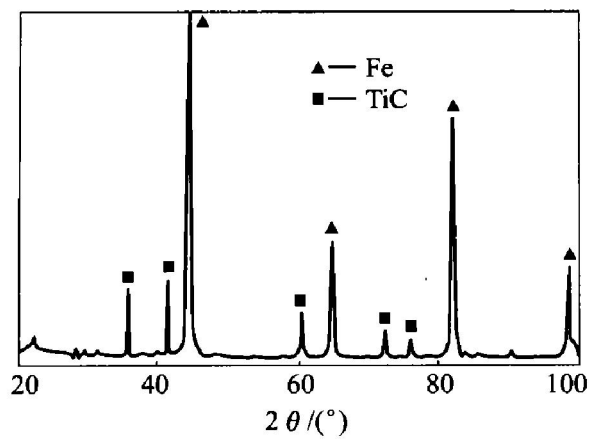


图 1 复合材料的 XRD 谱
Fig. 1 XRD pattern of composites

2.2 力学性能

表 2 所列为不同热处理工艺条件下的性能测试结果, 从表中可以看出, 热处理可明显改变复合材料基体的硬度, 对 TiC 相的硬度影响不大, 复合材料的硬度随基体硬度的变化而变化。退火和等温淬火可大幅度提高复合材料的冲击韧性, 淬火+ 低温回火使复合材料的硬度大幅度提高的同时, 冲击韧性与铸态的相近。

表 2 经不同工艺热处理后的性能

Table 2 Properties after different heat treatments

Procedure	Hardness of composite, HRC	Hardness of matrix, HV	$a_k/(J \cdot cm^{-2})$
Casting	45	435	14.67
Annealing	30	285	28.58
Quenching+tempering at low temperature	60	803	13.99
Isothermal quenching	55	628	26.44

2.3 OM 显微组织

图 2 所示为不同状态的显微组织, 由图可见: 该复合材料的铸态组织是珠光体+ 索氏体+ 屈氏体+ 二次渗碳体+ TiC 颗粒相; 退火组织是片状珠光体+ TiC 颗粒相; 淬火组织是马氏体+ TiC 颗粒相; 等温淬火组织是下贝氏体+ TiC 颗粒相。

2.4 扫描电镜 (SEM) 显微组织

图 3 所示为 300 ℃等温淬火试样的扫描电镜显微组织; 图 4 所示为 300 ℃等温淬火试样的断口扫描形貌。TiC 颗粒相在复合材料中分布均匀, TiC 颗粒相与基体的界面干净, 润湿性好, 结合紧密, 无间隙和界面反应产物生成。

3 分析与讨论

3.1 铸态与退火态的复合材料的组织与性能比较

当 Fe-Ti-C 合金熔体在高温下原位反应生成 TiC 增强颗粒时, 合金熔体的 Ti 含量降低, 而此时合金熔体中 C 含量由于反应生成 TiC 也降低许多。随后的冷却凝固非平衡过程会出现成分偏析, 原位反应又强化了偏析现象。伴随着温度的继续下降, 过冷奥氏体经共析反应转变为不均匀的珠光体型组织, 即珠光体+ 索氏体+ 屈氏体的混合组织。而由于成分偏析的存在, 在共析转变过程中有二次渗碳体沿奥氏体晶界析出, 所得到的 TiC_p/Fe 复合材料铸态组织为珠光体+ 索氏体+ 屈氏体+ 二次渗碳体+ TiC 增强颗粒(如图 2(a) 所示)。

铸态的 TiC_p/Fe 复合材料在经过 900 ℃高温保温后, 原铸态基体组织中的成分偏析在奥氏体化温度下和较长时间的保温过程中基本消除。此时奥氏体的成分趋于一致, 在随后的缓慢冷却过程中, 奥氏体析出转变为均匀的珠光体组织。二次渗碳体由于是随炉缓慢冷却而析出, 奥氏体析出转变的产物是较为均匀一致的片状珠光体。所得到的复合材料的退火态组织为片状珠光体+ TiC 增强颗粒(如图 2(b) 所示)。

TiC_p/Fe 复合材料的铸态组织与退火态组织的基体虽说都是珠光体型组织+ TiC 增强颗粒, 但由于存在细微的差异, 使得其力学性能有较大的差别(见表 2)。由于冷却速度较快, 加之 TiC 颗粒的增强作用, 铸态的复合材料硬度可高达 HRC45 左右。与之相比退火态的复合材料虽有 TiC 颗粒增强相, 但由于奥氏体冷却转变较慢, 表现为硬度降低较多, 为 HRC30 左右。由于 TiC 颗粒增强的作用, 与共析钢相比退火硬度(HRC20 左右) 要高。与之相反, 韧性指标表现为由于铸态中存在成分偏析, 基体中有二次渗碳体存在, 使铸态的复合材料冲击韧性值较低。因为冲击韧性对组织十分敏感, 退

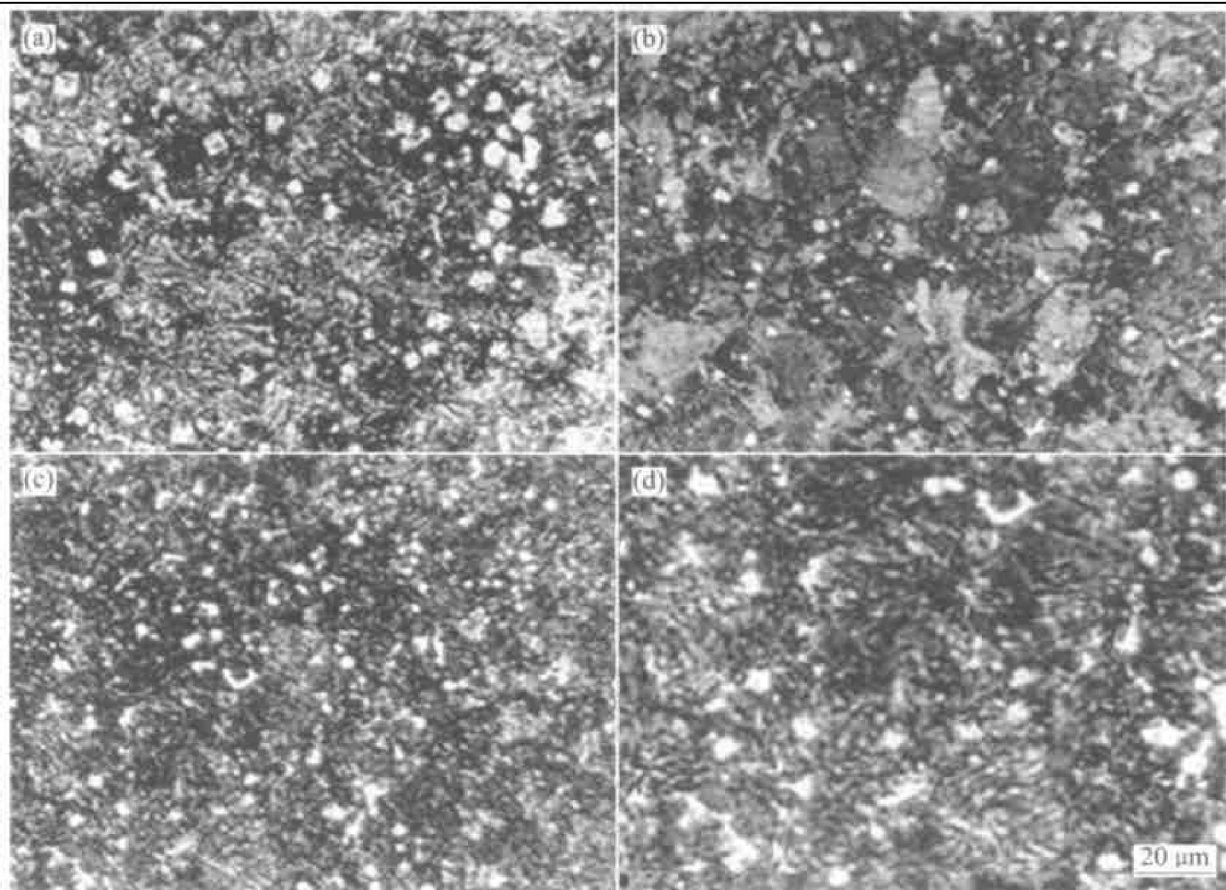


图 2 不同状态的 OM 显微组织

Fig. 2 Microstructures at different states

(a) —Casting; (b) —Annealing; (c) —Quenching+ tempering at low temperature;
(d) —Isothermal hardening at 300 °C

火后降低了成分偏析, 因此, 退火态复合材料冲击韧性值比铸态复合材料的提高近 1 倍。

3.2 淬火与等温淬火处理后的复合材料的组织与性能

TiC_p/Fe 复合材料淬火的目的是为了获得马氏体组织, 等温淬火的目的是为了获得贝氏体组织。马氏体是碳在 α -Fe 中的过饱和固溶体, 而其转变是典型的非扩散型相变。贝氏体是奥氏体在中温区的转变产物, 是含碳过饱和的铁素体(α -Fe)与碳化物组成的两相混合物。由于复合材料的基体碳含量在共析成分附近, 所以淬火得到的马氏体为高碳片状马氏体。300 °C 等温时, 转变组织为针片状的下贝氏体。淬火后组织的脆性大、内应力较大, 为此采用低温回火以降低脆性、消除或减少内应力。淬火或等温淬火后的基体组织中有部分残余奥氏体, 而残余奥氏体是不稳定相, 经低温回火处理后, 大部分转变为马氏体。

由图 2(c) 可以看出, TiC_p/Fe 复合材料经加热淬火+ 低温回火后的组织形态为回火马氏体+ TiC

颗粒。由图 2(d) 可以看出, 300 °C 等温淬火后的组织形态为下贝氏体+ TiC 颗粒+ 少量回火马氏体。从表 2 可以看出, 由于 TiC_p/Fe 复合材料的基体组织不同, 性能上差别较大。TiC_p/Fe 复合材料经淬火和 300 °C 等温淬火工艺得到的组织和性能与铸态复合材料的相比有以下差别:

1) 淬火后的 TiC_p/Fe 复合材料与铸态相比硬度高, 而冲击韧性没有下降。这是因为片状马氏体晶格的正方畸变大, 淬火时片状马氏体中存在着显微裂纹和内应力, 片状马氏体的微细孪晶破坏了滑移系, 这些使马氏体的硬度和强度增高, 脆性增大。热处理使基体组织发生变化, 铸造应力等缺陷消除。故淬火+ 低温回火的韧性指标基本没有下降, 而硬度高达 HRC60 以上。

2) 300 °C 等温淬火后 TiC_p/Fe 复合材料的性能指标是硬度较高, 韧性很好, 比铸态的提高近一倍。这是因为在此温度下奥氏体等温转变成下贝氏体, 而下贝氏体一个显著的显微组织特点是棒状碳化物在针状铁素体片中长大。由于这种特殊的组织形态, 使得下贝氏体组织的性能表现为硬度高、韧

性好, 从断口的扫描形貌(图 3)中可以看出有部分韧窝存在。

3.3 不同组织结构与性能的变化

从表 2 可以看出, 并不是硬度高的基体组织冲击韧性就低。铸态组织、退火态组织的硬度都不高, 而冲击韧性相差近一倍。300 °C 等温淬火和退火态组织的硬度相差很多, 而冲击韧性却很接近。淬火+ 低温回火与 300 °C 等温淬火的硬度都很高, 但冲击韧性却相差一倍。这说明原位复合材料的硬

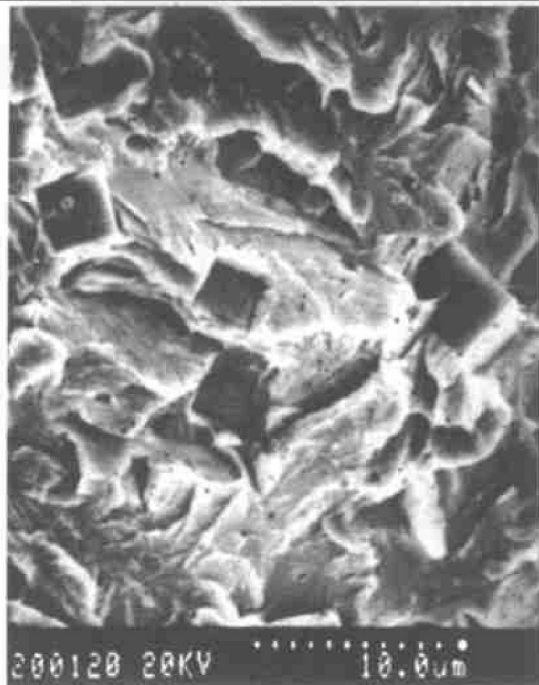


图 3 300 °C 等温淬火试样断口的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM fractograph of sample by isothermal quenching at 300 °C

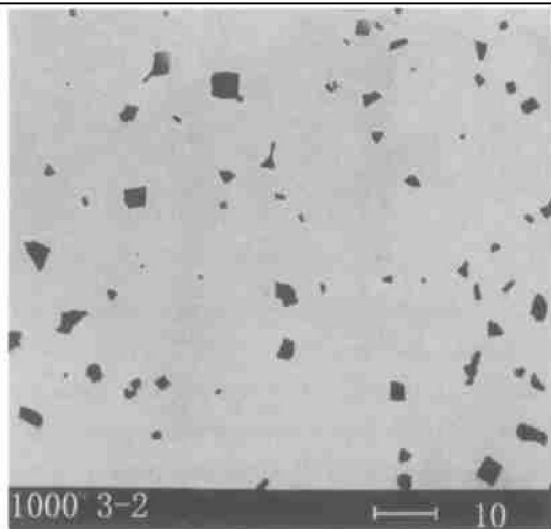


图 4 300 °C 等温淬火试样的 SEM 像

Fig. 4 SEM micrograph of sample by isothermal quenching at 300 °C

度和冲击韧性不是完全对应关系, 要依据使用条件要求对其组织和性能进行合理搭配。

3.4 热处理对 TiC 颗粒增强相的影响

比较表 2 和图 2 可以看出, TiC 颗粒在加热和保温过程中显微硬度没有变化, TiC 颗粒形态也没有改变。图 3, 4 中也没有发现 TiC 颗粒在加热后有所改变。可见通过不同热处理工艺可使 TiC_p/Fe 复合材料的基体组织发生改变, 而 TiC 颗粒通过热处理是不易改变的。因为 TiC 颗粒是一种比较稳定的相, 在 900 °C 以下不易发生分解反应。从图 4 中还可以看出, TiC 颗粒增强相与基体结合较好, 界面干净, 在截面处没有看见裂纹源。

综上所述, TiC_p/Fe 复合材料可以通过热处理方法改变其基体组织, 从而改变其性能, 但热处理对 TiC 增强相影响不大。生产 TiC_p/Fe 复合材料, 要求原位反应产物质量高, 因而控制良好的 TiC 颗粒相的生成条件最为重要, 以便获得理想的 TiC 颗粒增强相。通过热处理控制基体可获得理想的 TiC_p/Fe 复合材料。

4 结论

- 1) 通过不同的热处理工艺可明显改变原位 TiC_p/Fe 复合材料的基体组织, 但 TiC 增强相不发生变化。
- 2) 退火处理使材料的硬度降低, 韧性提高, 便于机械加工。
- 3) 淬火+ 低温回火处理使材料的强度和硬度提高, 而韧性无明显降低。
- 4) 采用等温淬火工艺, 可使 TiC_p/Fe 复合材料具有最好的综合力学性能。

REFERENCES

- [1] 严有为, 魏伯康, 林汉同. 金属基原位复合材料的研究现状及发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 1998 (1): 47 - 49.
YAN Your-Wei, WEI Bo-kang, LIN Han-tong. The present status and developing trends of metal matrix in situ composites [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1998, 1: 47 - 49.
- [2] 王自东, 胡汉起, 李春玉, 等. 金属基“内晶型”复合材料及其制备[J]. 金属学报, 1995, 31(1): B40 - B43.
WANG Zi-dong, HU Han-qi, LI Chun-yu, et al. Concept

- and fabrication of metal matrix intragranular composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1995, 31(1): B40-B43.
- [3] 惠希东, 王执福, 杨院生, 等. 液态反应法制备 TiC_p 增强铸造 Fe-Cr-Ni 基复合材料[J]. *金属学报*, 1998, 10, 34(10): 1115-1120.
- HUI Xi-dong, WANG Zhi-fu, YANG Yuan-sheng, et al. Cast Fe-Cr-Ni matrix composite reinforced by TiC_p synthesized with liquid state in situ process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(10): 1115-1120.
- [4] John V F, Charles M B. Metal matrix composites[J]. *Advanced Materials & Processes*, 1998(12): 19-23.
- [5] ZHANG Li-bin, HAI Jiu-tao. Metal matrix composites in China[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 1998, 75: 1-5.
- [6] 乐永康, 张迎元. 颗粒增强金属基复合材料的研究现状[J]. *材料开发与应用*, 1997, 12(5): 23-29.
- LE Yong-kang, ZHANG Ying-yuan. Present research situation of metal matrix composites with particulates[J]. *Research and Application of Material*, 1997, 12(5): 23-29.
- [7] 严有为, 魏伯康, 林汉同. 化学成分对原位 TiC_p/Fe 复合材料组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 1999, 9(2): 225-230.
- YAN Your-wei, WEI Bo-kang, LIN Han-tong. Effect of chemical composition on microstructure and property of in situ TiC_p/Fe composite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1999, 9(2): 225-230.
- [8] Liu Z, Fredriksson H. On the reaction between Fe-Ti and Fe-C liquids under microgravity[J]. *Metall Mater Trans A*, 1996, 27A: 407-414.
- [9] Nukmi T, Flemings M C. In situ synthesis of TiC particulates reinforced aluminum matrix composites[J]. *Metall Mater Trans A*, 1995, 26A: 1884-1887.
- [10] Terry B S, Chinyamakobvu O S. In situ production of Fe-TiC composites by reaction in liquid iron alloys[J]. *J Mater Sci Lett*, 1991, 10: 628-629.
- [11] 严有为, 魏伯康, 林汉同. 铸造原位 TiC_p/Fe 复合材料的制备工艺的研究[J]. *铸造*, 1998, 4: 5-8.
- YAN Your-wei, WEI Bo-kang, LIN Han-tong. Study on preparing of casting in situ TiC/Fe composite[J]. *Foundry*, 1998, 4: 5-8.
- [12] 刘兆晶, 左 锋, 章德铭, 等. 坩埚炉衬材料对 TiC_p/Fe 复合材料组织及性能的影响[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2000, 6(6): 45-48.
- LIU Zhao-jing, ZUO Feng, ZHANG De-ming, et al. The effect of furnace liner materials of pot furnace on microstructure and properties of composite enhanced by TiC_p/Fe [J]. *J Harbin University of Science and Technology*, 2000, 6(6): 45-48.
- [13] 刘兆晶, 章德铭, 左 锋, 等. 熔体覆盖剂对 TiC_p/Fe 复合材料组织及力学性能的影响[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2002, 7(2): 83-86.
- LIU Zhao-jing, ZHANG De-ming, ZUO Feng, et al. The effect of flux covering agents on microstructure and properties of TiC_p/Fe composite[J]. *J Harbin University of Science and Technology*, 2002, 7(2): 83-86.

Effect of heat-treatment on microstructures and mechanical properties of in-situ TiC_p/Fe composites

YAO Xiu-rong^{1, 2}, LIU Zhao-jing², LI Feng-zhen², HAN Jie-cai², REN Shan-zhi²

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. College of Materials Science and Engineering,

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The matrix microstructure of TiC_p/Fe composites was changed under different heat treatment processes. The relations between different matrix microstructures and properties were discussed. The results show that the particulates of TiC have no change in heat treatment, but the matrix microstructure has changed in the same situation. When the composite being annealed, the hardness of composite can be lowered and the toughness of composite can be improved. The quenching+ tempering at low temperature could enhance the strength and hardness with few decrease of toughness. After isothermal quenching, TiC_p/Fe composites possess the best mechanical properties.

Key words: TiC_p/Fe composites; heat treatment; microstructure; properties

(编辑 黄劲松)