

Research Review of TiC/Fe Composites's Preparation Technology and Amelioration of Capability

Li-yan Zou¹, Zhi-ping Sun², Guo-jun Zhang³

¹Shandong Institute of Light Industry Mechanical Engineering, Jinan, china, 250353

²Shandong Institute of Light Industry Mechanical Engineering, Jinan, china, 250353

³Shandong Institute of Light Industry Mechanical Engineering, Jinan, china, 250353

Email: baby_dawn@163.com

Abstract: The paper introduced the TiC/Fe composites research in recent years, with emphasis on the research review of the preparation method and modified channels of TiC/Fe composites, and on this basis, the application of the TiC/Fe composites are predicted.

Keywords: TiC/Fe composites; preparation method; application

TiC/Fe 复合材料制备工艺及其改性研究进展

邹丽艳¹, 孙志平², 张国俊³

¹山东轻工业学院, 济南, 中国, 250353

²山东轻工业学院, 济南, 中国, 250353

³山东轻工业学院, 济南, 中国, 250353

Email: baby_dawn@163.com

摘要: 介绍了TiC/Fe复合材料近年来的研究情况, 重点论述了TiC/Fe复合材料制备工艺和改性途径的研究进展, 并在此基础上对TiC/Fe复合材料在工业生产中的实际应用进行了展望。

关键字: TiC/Fe 复合材料; 制备工艺; 实际应用

1 引言

陶瓷增强金属基复合材料结合了金属和陶瓷的优点, 既具备陶瓷材料的高硬度、高强度、高熔点同时又具备金属的良好的机械加工性能和高导电导热等性能, 其应用在近年来得到极大的发展。

近20年来, 金属基复合材料的研究受到了广泛的重视, 但是因为钢铁材料的熔点很高不利于熔体的机械搅拌, 导致外加增强相难以进入熔体和均匀分布, 而使以钢铁为基的复合材料研究很少, 大部分的研究工作主要集中在Al、Mg等轻金属基材料上。近年来出现的原位自生增强相制备新技术使得金属基复合材料的合成成为了可能, 并已经成功制备原位自生TiC颗粒增强铁基复合材料^[1]。另外世界上钛铁矿的储量极为丰富, 我国钛铁矿的储量居世界前列, 以钛铁矿为原料制备高性能的金属基复合材料具有广阔的前景^[2]。本文将重点介绍TiC/Fe复合材料的主要制备工艺, 近年来的研究热点及改进途径和实际应用。

2 TiC/Fe 复合材料的制备工艺

2.1 原位合成法

金属基复合材料就是以金属为基体引入增强相, 得到综合性能好的复合材料。在引入增强相的技术中可以分为两大类, 一类是外加增强相; 一类是内生增强相, 也就是平常所说的“原位反应法”^[3,4], 所谓原位合成就是在在一定条件下, 通过化学反应在基体内原位生成一种或几种增强相, 从而达到强化的目的^[5]。20世纪末, 国外对应用原位合成法制备TiC/Fe复合材料就已有研究^[6,7]。

和强制法相比, 原位反应法有很多优势: (1) 以传统熔炼为基础, 有利于工厂利用已有设备和工艺进行生产, 生产成本低; (2) 由于增强相是由原材料间的化学反应直接生成, 不必对增强相的表面进行清洁处理, 不但节省了加工费用, 更不会出现界面结合强度不足以及界面反应形成污染等问题^[8]。因此原位颗粒增强金属基复合材料是当今复合材料研究领域的热

点, 也将是今后金属基复合材料的一个重要的发展方向。

但是值得注意的是, 利用原位合成技术虽然能够得到热力学稳定, 尺寸细小, 分布均匀的 TiC 颗粒, 但是与此同时也会伴随有其他相产生, 这些相通常是板条状或网状割裂基体, 使复合材料的塑性、韧性降低。为此研究伴随相形成机理及抑制其产生的工艺措施就显得十分重要。文献^[9]的研究表明, 稀土元素在 Fe-Ti-C 熔体中可形成细小的稀土复合化合物粒子, 能促进 TiC 增强体的非均匀形核, 使组织中原位 TiC 颗粒尺寸增加, 数量减小, 并能够抑制有害相产生, 有利于材料的性能的改善。

每一种金属基复合材料的制备方法都有其优点和缺点, 就原位合成法而言也有其不足, 因此经常将原位合成法与其他制备方法相结合, 使其优势互补得到更好的制备方法。目前, 国内外主要是将原位合成工艺与铸造法和高温自蔓延法结合制备 TiC/Fe 复合材料^[10], 但是都有一定的局限性。就铸造法而言, 一方面, 当 TiC 的体积分数较大时, 铸液的流动性变差, 从而影响其铸造性能; 另一方面由于铁于 TiC 密度相差较大, 容易造成 TiC 颗粒上浮, 使其分布不均匀。就高温自蔓延法而言, 直接合成的材料往往是多孔的, 疏松状的, 不能直接作为结构材料用。文献^[11]将粉末冶金技术与原位合成技术相结合, 一次性完成了材料的合成与致密化, 成功的制备出了 TiC 质量分数为 35% 的 TiC/Fe 复合材料。

2.2 自蔓延高温合成法 (SHS)

自蔓延高温合成法, 也称燃烧合成法, 是利用化学反应的剧烈放热来制取高熔点化合物, 尤其是难容材料、复合材料、功能材料和耐磨材料的新工艺。自蔓延高温合成工艺本身是放热反应, 只要点燃就可自动进行, 适合于制备某些高熔点陶瓷和金属间化合物。因为自蔓延高温合成工艺具有耗能少、效率高、产物纯、和工艺相对简单等优点, 所以受到各国科研人员的高度关注, 利用自蔓延高温合成工艺不仅可以合成碳化物、硼化物、硅化物、氮化物和金属间化合物等 500 多种化合物, 而且也是制备在金属基的重要方法之一^[12], 在金属及陶瓷复合材料领域得到广泛的应用。文献^[13]结合消失模铸造 (EPG) 和在蔓延高温合成两种工艺, 在铸件表面制备具有高硬度的复合材料层, 从而使铸件表面获得 TiC/Fe 自生复合材料层, 其硬度值

为 HRC54-59。该文献由于采用了消失模铸造 (EPG) 工艺, 聚苯乙烯泡沫气化后为还原性气氛, 故陶瓷相在还原性气氛下“原文”生长, 克服了增强相表面的污染、氧化等问题。

目前, 自蔓延高温合成工艺是金属及陶瓷复合材料制备中应用较为广泛的一种方法, 但是在某些领域还是具有其局限性, 例如该工艺已成功制备陶瓷内衬复合钢管, 但是对于平面性工件表面燃烧常压下合成涂层的研究并不多见, 因此为解决这一问题, 文献^[14]通过自蔓延高温合成工艺结合准热等静压技术制备了 TiC/Fe 基复合材料, 所制备的 TiC/Fe 基金属基具有优良的耐磨性, 在干摩擦条件次, 载荷为 30N, 磨损时间为 40min, 材料几乎没有质量损失, 其磨损机制主要为粘着磨损, 磨粒磨损和硬质相剥落。文献^[12]同样利用自蔓延高温合成工艺与准热等静压技术结合成功制备了 TiC/Fe 金属基, 研究表明 TiC 与 Fe 之间有一扩散层, 随着 Fe 含量的增加扩散层的厚度和颗粒尺寸减小且反应趋于不完全, 并且在 Fe 粘结相中发现少量析出相, TiC 晶粒中存在大量位错。

2.3 反应火焰喷涂法 (RFS)

反应火焰喷涂技术 (RFS) 是近期发展的一种制备金属及陶瓷复合涂层的新技术, 所谓反应火焰喷涂技术就是将自蔓延高温合成 (SHS) 和火焰喷涂技术相结合, 在合成材料的同时将合成材料沉积。

该技术主要有以下特点: (1) 由于陶瓷相是由喷涂材料经过自蔓延高温反应原位反应合成, 因此该相与金属基体的界面不易受污染; (2) 在喷涂过程中, 涂层材料的合成与沉积一步完成, 无中间环节, 工艺简单; (3) 在反应火焰喷涂金属及陶瓷涂层过程中, 利用普通氧乙炔火焰喷枪和廉价原料, 不需要达到碳化物熔点即可合成所需碳化物, 因此成本低; (4) 涂层中的陶瓷相晶粒细小 ($<1\mu\text{m}$), 体积分数高 (可达 60%), 分布均匀, 有望改善金属碳化物的耐磨性能^[15]。正是因为有如上的特点, 反应火焰喷涂技术在制备金属及陶瓷涂层的方面得到广泛的应用, 文献^[16]成功利用反应火焰喷涂技术制备了 TiC/Fe 复合涂层, 文献^[17]以钛铁粉和碳的先驱体 (石油沥青) 为原料, 用先驱体碳化复合技术制备了 Ti-Fe-C 反应喷涂复合粉末, 采用普通火焰喷涂技术成功制备了 TiC/Fe 陶瓷金属复合涂层。

与此相类似的还有反应等离子喷涂技术、反应电

弧喷涂技术等, 但是因为反应等离子喷涂技术需要复杂的设备, 反应电弧喷涂技术所需要的原材料价格昂贵, 致使制造成本较高, 所以就经济的方面来看, 反应火焰喷涂技术更具竞争力。近年来又出现的一种反应爆炸喷涂技术 (RES), 爆炸喷涂作为一种热喷涂技术已经得到广泛应用, 尤其是在美国、日本、俄罗斯等国的航空工业上^[18], 类似的反应爆炸喷涂技术就是将高温自蔓延合成技术 (SHS) 与爆炸喷涂技术相结合从而得到一种更好的制备方法, 文献^[18]通过反应爆炸喷涂技术制备了 TiC/Fe-Ni 金属基复合涂层, 该涂层粉末粒度均匀, TiC 颗粒大致呈球形, 粒度为纳米级, 并且复合涂层的平均显微硬度为 18.9Gpa。

2.4 其他制备方法

除上述制备方法外, 还有其他的一些制造方法, 例如铸造法、粉末冶金、电弧冶金

原位碳热还原法等, 这些方法都各有其优缺点, 在制备金属基复合材料时采用何种方法, 要根据实际情况而定。文献^[19]采用廉价的钛铁、石墨、人造金红石作为堆焊材料的组分, 通过电弧冶金反应形成 TiC 颗粒增强体弥散分布在低碳马氏体和残余奥氏体基体上, 熔敷层硬度为 HRC55 以上, 且具有很高的耐磨性和良好的抗裂性。文献^[20]通过原位碳热还原法, 以钛铁矿 (FeTiO₃) 和石墨为原料制备了 TiC/Fe 复合材料, TiC 的颗粒尺寸均匀, 大约为 2-5 μm。

3 TiC/Fe 复合材料性能的改进途径

由于金属基复合材料综合了金属材料 and 陶瓷材料的优点, 所以近年来在各方面得到广泛的应用, 但是在实际的制备过程中也存在着不足, 例如, 金属相对增强体的即 Fe 对 TiC 颗粒的润湿性差; 增强相分布不均匀, 颗粒尺寸粗大; TiC 颗粒与基体的热膨胀系数差别大, 所以 TiC 颗粒与基体的结合区域易出现孔隙等, 这些问题都直接影响了 TiC/Fe 复合材料的性能。

3.1 提高 TiC 与 Fe 的润湿性

金属基复合材料的性能主要与显微结构有关, 在显微组织形成过程中起主要作用的是熔体对固体相 (即 Fe 熔体对 TiC 增强体) 的润湿性和相间的表面能。TiC 与 Fe 的润湿性不佳 (在 1550°C, 真空介质 TiC 对 Fe 的润湿角为 41°), 容易在晶面处形成微孔^[20], 从而降低材料的强度。材料研究工作者对 Mo 元素对

TiC/Fe 复合材料润湿性的影响进行了分析研究, 研究结果表明^[21], Mo 的添加使增强相最强共价键增强, 增强相相表面能升高, 有利于金属对增强相的润湿。文献^[11]同样通过加入稀土元素 V 使复合材料的润湿性得以提高, 从而提高了复合材料的使用性能。

3.2 均匀增强相分布, 细化颗粒

由于 TiC 增强体和 Fe 基体的密度 (4.25g/cm³ 和 7.87g/cm³) 相差较大, 而引起熔体中的 TiC 颗粒上浮, 使其分布不均匀, 这在制备大型铸件时会表现的更加明显, 为了解决此问题, 研究人员发现加入添加剂能有效抑制晶粒长大, 目前添加剂抑制晶粒长大的机理存在两种理论: (1) 吸附说, 添加剂吸附在基体碳化物颗粒表面阻碍了硬质相颗粒在液相中的溶解, 同时降低了颗粒的表面能, 使晶粒长大的驱动力降低。(2) 添加剂在液相中有一定的溶解度, 从而降低硬质相晶粒在液相中的溶解度阻碍了重结晶长大过程。为此研究人员已经进行了这方面的研究, 文献^[22]加入重元素 W 在铁基体中原位合成 (TiW)C 相成功解决了这一问题, 得到了增强相分布均匀的复合材料, 并且硬度和耐磨性都得到相应的提高。由于 Ti 与 V 的原子半径很接近, TiC 和 VC 可形成无限互溶的 (Ti, V)C 固溶体^[23], 故有的研究人员加入一定量的 V 取代增强相中的部分 Ti 原子, 文献^[11]研究结果表明未加入 V 元素时 TiC ≤ 2.3 μm, 当加入一定量的 V 后, 其组织更加致密, 抗弯强度提高, (Ti, V)C ≤ 1.6 μm, 颗粒形状趋于球形。

3.3 优化 TiC/Fe 中各元素含量及其配比

TiC/Fe 中各元素含量及其配比本身就对复合材料的性能有影响, 例如, Fe 对 Fe-Ti-C 系 SHS 合成 TiC/Fe 金属基复合材料有重要的作用, 实验证明, 当 Fe=30wt% 时, 燃烧波速达到最大值, 点火温度也较低 (约 1100°C)^[24]。文献^[25]的研究结果表明, 在制备材料的过程中如果只添加 Ti, 则材料的硬度随着 Ti 含量的增加先增加后降低, 这是因为在形成 TiC 时候, 基体中的 C 元素也在减少, 从而使基体中的 Fe₃C 减少或消失, 而如果在添加 Ti 的同时按照一定比例添加 C 元素, 则随着 Ti 含量的增加硬度值也增加并逐渐达到饱和值。由此可见研究 TiC/Fe 中各元素含量及其配比的影响对制备性能优越的 TiC/Fe 复合材料有重大的意义。研究工作者对 Fe 元素在 TiC/Fe 复合材料制备过程中的影响进行了分析研究, 文献^[26]的研究结果表

明 Fe 含量对涂层的显微结构影响很大, Fe 含量过高会使涂层中富 TiC 片层的显微硬度显著降低, 过低则涂层中含有大量的氧化物。

在实际应用中, 为使TiC/Fe复合材料具有更好的性能以满足一些特殊场合下的应用, 热处理工艺也是改善TiC/Fe复合材料的性能的重要途径, 文献^[13]在利用高温自蔓延技术合成TiC/Fe复合涂层的基础上, 又经过900℃*2h的热处理后, 表面复合材料层可析出更加细小且弥散分布的二次TiC颗粒, 而且通过不同的热处理可以得到各种不同的基体组织, 如马氏体, 贝氏体, 珠光体, 甚至铁素体, 以适应不同的适用场合。

4 TiC/Fe 复合材料在生产中的应用

由于金属基复合材料具有高硬度、高强度、耐磨损、耐高温等优点, 在国防及民用领域有着非常广阔的发展前景, 目前, 金属基复合材料的主要制品有刀具、磨具、磁性材料、加热元件、耐磨轴承、耐腐蚀部件, 被广泛应用于冶金生产、涡轮机制造及火箭技术上^[27]。金属及陶瓷复合材料的最显著的特征是具有高的强度和硬度, 和耐磨、耐高温的优点, 故大型机械的耐磨部件均可采用, 例如, 在过去大部分大型机械的耐磨部件都是用高锰钢耐磨材料, 但是随着工业技术的发展, 原有的材料越来越不能满足生产的要求, 因此, TiC 高锰钢硬质合金得到开发和应用, 它实际上就是一种 TiC/Fe 复合材料, 由 TiC、Fe、Mn 等几相组成^[28]。

TiC/Fe 复合材料不仅可以应用于高磨损环境, 也可应用于高腐蚀性的环境中, 文献^[29]的研究表明, 由于在高温下 Fe₃Al/TiC 复合材料周围仍能形成致密的 Al₂O₃膜, 对基体起到有效的保护作用, 并且 TiC 颗粒的加入也有效的强化了基体, 从而提高了 Fe₃Al/TiC 复合材料的抗磨损性能, 因此石油化工、热能工程、电力工程等领域中的许多在腐蚀环境下工作的设备装置, 如化工流化床、催化裂化器、气轮发电机等都可采用金属基复合材料。

结束语

随着工业的发展, 对材料的性能也提出了更高的要求, 原有的一些传统材料也越来越不能满足现实生产的要求, 开发综合性能好的材料势在必行, 在此情况下, 具有高硬度、高强度、耐磨损、耐高温等优点的金属及陶瓷复合材料具有广阔的发展空间。

References (参考文献)

- [1] Wenhui Jiang, Li Qi, Liming Fu, Xiaoming Zhou, Xingsen Han. Effect of W on microstructures of in situ synthesized 10%TiC/ Fe composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 127-130(Ch).
姜文辉, 威力, 付立铭, 周晓明, 韩行霖. W对原位自生10%TiC/Fe复合材料组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1):127-130.
- [2] Xinmin Min, Dehua Xu, Chunyong Ye. Quantum Chemistry Calculation on Composite Ceramics of TiC/Fe-Al[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(9):1-4(Ch).
闵新民, 许德华, 叶春勇. TiC/Fe-Al复合陶瓷材料量子化学计算研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(9): 1-4.
- [3] R. Subramanian, J. H. Schneibel. FeAl/TiC cermets-melt infiltration processing and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering, 1997, A239~240:633~639.
- [4] S. Gorsse, J. P. Chaminade, Y. Le. Petitcorps. In situ preparation of titanium base composites reinforced by TiB single crystals using a powder metallurgy technique[J]. Composites, 1998, Part A 29A:1229~ 1234.
- [5] Lifang Cai, Yongzhong Zhang, Mingzhe Xi, Likai Shi. Applications and Development of In-situ Synthesis for Materials Preparation[J]. Heat treatment of metals, 2005, 30(10):1-6(Ch).
蔡利芳, 张永忠, 席明哲, 石力开. 原位合成法在材料制备中的应用及发展[J]. 金属热处理, 2005, 30(10): 1-6.
- [6] Terry B S. In situ production of TiC/Fe composites by reactions in liquid iron alloys[J]. J Mater Sci Lett, 1991, 10:628.
- [7] Liu Z. On the reaction between Fe-Ti and Fe-C liquids under microgravity[J]. Metall Mater Trans, 1996, 27A(2):407.
- [8] Chenguang Yuan, Zhigang Chen, Yalu Cao, Li Wang, Yi Pan. In-situ Production and Microstructure of Ti/PFe₃Al Composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2004, 22(15):720-722(Ch).
原晨光, 陈志刚, 曹涯路, 王利, 潘颐. TiC/Fe-Al原位复合材料制备及其显微结构[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(15): 720-722.
- [9] Zhi Mei, Dechun Lou, Hanqiao Duan. The Influence of Rare earth on TiC_p/Fe Composite Materials' Microscopic Structure[J]. Special Casting and Nonferrous Alloy, 2002, (4):8-9(Ch).
梅志, 娄德春, 段汉桥. 稀土对原位 TiC_p/Fe 复合材料微观结构的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2002, (4): 8-9.
- [10] Partil P, Anders E W J, Steven S. Self-propagating high-temperature synthesis and liquid-phase sintering of TiC/Fe composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127:131~139.
- [11] Sijing Fu. Microstructure and Properties of TiC/Fe Matrix Composite Produced In-situ[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(3):61-64(Ch).
伏思静. 原位合成TiC/Fe基复合材料的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(3): 61-64.
- [12] Weifang Zhang, Jiecai Han, Shanyi Du, Chunhu Tao, Niansheng Xi. Investigation on Microstructure of TiC-Fe Cermets Prepared by SHS/PHIP[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(5): 65-69 (Ch).
张卫方, 韩杰才, 杜善义, 陶春虎, 习年生. SHS/PHIP制备TiC/Fe金属基的微观组织研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(5): 65-69.
- [13] Zhaohui Ji, Zhiping Wang, Kunying Ding. Preparation of TiC/Fe Composites on Cast Steel Surface by SHS[J]. Foundry, 2007, 56(8): 834-836(Ch).
纪朝辉, 王志平, 丁坤英. 利用自蔓延高温合成工艺在铸钢表面制备TiC/Fe复合材料层[J]. 铸造, 2007, 56(8): 834-836.
- [14] Yong Zhang, Hong Zhao, Xinghong Zhang, Nanqi Ren. Investigation of Wear-Resistant Property of TiC/Fe Ceramic Coating Pro-

- duced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis[J]. *China Surface Engineering*, 2007, 20(1):25-28(Ch).
张勇, 赵红, 张幸红, 任南琪. 平面Fe基体TiC/Fe金属基涂层自蔓延高温合成与耐磨性研究[J]. *中国表面工程*, 2007, 20(1): 25-28.
- [15] Changsong Liu, Jihua Huang, Sheng Yin. Influence of composition parameter on microstructure of reactive flame sprayed TiC-Fe coating[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(4):658-662(Ch).
刘长松, 黄继华, 殷声. 成分参数对反应火焰喷涂TiC/Fe涂层的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(4): 658-662.
- [16] Jihua Huang, Changsong Liu, Quankun Dang, Sheng Yin. A Study on Reactive Elame Spraying for TiC/ Fe-Al Composite Coatings[J]. *Powder Metallurgy Techonology*, 2002, 20(4):219-222(Ch).
黄继华, 刘长松, 党全坤, 殷声. TiC/Fe-Al复合涂层反应火焰喷涂研究[J]. *粉末冶金技术*, 2002, 20(4): 219-222.
- [17] Huiyuan Liu, Jihua Hunag, Sixin Yang, Jiangan Zhang. Influence of C/Ti Atomic Ratio on Microstructure and Hardness of TiC/Fe Composite Coating by Reactive Flame Spray[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(3):80-84(Ch).
刘慧渊, 黄继华, 杨四新, 张建纲. C/Ti原子比对反应火焰喷涂TiC/Fe复合涂层组织结构和硬度的影响[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(3): 80-84.
- [18] Jinglei Zhu, Jihua Huang, Haitao Wang, Junlong Xu, Hua Zhang, Xingke Zhao. Fabrication of TiC/Fe-Ni Cermet Composite Coating by Reactive Detonation Spraying[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 137(7):1313-1316(Ch).
朱警雷, 黄继华, 王海涛, 徐俊龙, 张华, 赵兴科. 反应爆炸喷涂制备TiC/Fe-Ni金属基复合涂层[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 137(7): 1313-1316.
- [19] Sili Song, Xinhong Wang, Zengda Zou, Shiyao Qu. Study on the microstructure and mechanical properties of TiC/ Fe composites coating layer[J]. *Journal of Shandong University*, 2004, 34(2):1-5(Ch).
宋思利, 王新洪, 邹增大, 曲仕尧. TiC增强铁基堆焊层组织与性能研究[J]. *山东大学学报(工学报)*, 2004, 34(2): 1-5.
- [20] Zhengguang Zou, Hanyuan Chen, Liqiang Mai. Research on TiC/Fe Composite by In-situ Carbothermic Reduction and Synthesis from Ilmenite[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2001, 29(3):199-203(Ch).
邹正光, 陈寒元, 麦立强. 钛铁矿原位碳热还原合成TiC/Fe复合材料的研究[J]. *硅酸盐学报*, 2001, 29(3): 199-203.
- [21] Wenwu Xu, Zhengguang Zou, Yilongfei Wu, Dongye Yao. Analysis of the Improvement of TiC/Fe Interfacial Wettability Mechanism by Valence Electron Theory[J]. *Cemented Carbide*, 2007, 24(2):70-73(Ch).
徐文武, 邹正光, 吴一龙飞, 姚东野. Mo改善TiC/Fe金属基界面润湿机理的价电子理论分析[J]. *硬质合金*, 2007, 24(2): 70-73.
- [22] Yinglei Ren, Liming Fu, Keqiang Qiu, Wenhui Jiang. Microstructure and Properties of In-situ Synthesized 20 %TiC/ Fe and 20 %(TiW) C/ Fe Composites[J]. *Material s for Mechanical Engineering*, 2004, 28(4):22-25(Ch).
任英磊, 付立铭, 邱克强, 姜文辉. 原位自生20%TiC/Fe和20%(TiW)C/Fe复合材料的组织与性能[J]. *机械工程材料*, 2004, 28(4): 22-25.
- [23] Sepuiveda R, Arenas F. TiC-VC-Co: a study on its sintering and microstructure[J]. *Refractory Metals and Hard Materials*, 2001, 21:389-396.
- [24] Cliche G, Dallaire S. Synthesis and deposition of TiC/Fe coatings by plasma spraying[J]. *urf Coat Technol*, 1991, 46:199.
- [25] Yunxue Jin, Jungang Li. Study on fabrication and microstructure of in-situ TiC/ Fe composites[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloy in 2008 Annual Dinner*, 317-321(Ch).
金云学, 李俊刚. 原位自生TiC/Fe复合材料的制备及组织形态研究[J]. *复合材料特种铸造及有色合金2008年年会专刊*, 317-321.
- [26] Changsong Liu, Jihua Huang, Sheng Yin. The Influence of Fe on the Process of Reactive flame-sprayed TiC-Fe Coatings[J]. *Materials Engineering*, 2001, (10):35-38(Ch).
刘长松, 黄继华, 殷声. Fe在反应火焰喷涂TiC/Fe涂层过程中的作用[J]. *材料工程*, 2001, 10: 35-38.
- [27] Li Zhang. Manufacturing Principle and Application of Cermet[J]. *Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering*, 2001, 19(4):68-70(Ch).
张利. 金属基复合材料的复合原理及应用[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2001, 19(4): 68-70.
- [28] Yiyuan Chen, Zhengguang Zou, Fei Long. Latest Development of TiC/Fe Composite Materials[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2007, 35(1):53-56(Ch).
陈怡元, 邹正光, 龙飞. TiC/Fe复合材料的研究进展[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2007, 35(1): 53-56.
- [29] Min Fan, Xinquan Yu, Feng Xue. Erosion Resistance of Fe₃Al / TiC Composite at High Temperatures[J]. *Journal of Southeast University*, 1999, 29(6):136-139(Ch).
范敏, 余新泉, 薛烽. Fe₃Al/TiC复合材料的耐高温冲蚀性能[J]. *东南大学学报*, 1999, 29(6): 136-139