



原位合成 NiTi-TiB₂ 复合材料的 显微组织与性能

姜 江¹, 马之远², 邵 阳², 彭文屹³, 漆艳军³

(1. 江西省科学院 江西省铜钨新材料重点实验室, 南昌 330029;

2. 中国石油大学(北京) 理学院, 昌平 102249;

3. 南昌大学 材料科学与工程学院, 南昌 330031)

摘 要: 采用电弧熔炼 Ti、Ni 和 B 的方法, 原位合成 B 含量不同的 3 种 NiTi-TiB₂ 复合材料, 对复合材料的显微组织、成分及压缩力学性能进行研究。结果表明: 材料中 NiTi 与 TiB₂ 之间为冶金结合, 结合界面致密无孔隙, 克服了以往研究中非原位复合材料常见的界面结合差以及致密度低等缺点。当 B 的摩尔分数超过 6% 以后, 组织中出现粗大的 Ti₂Ni 脆性枝晶, 并伴随材料压缩性能的降低。样品力学性能的恶化与粗大 TiB₂ 陶瓷以及 Ti₂Ni 脆性枝晶的形成有关。

关键词: NiTi-TiB₂; 形状记忆合金; 原位合成; 马氏体相变

中图分类号: TB34

文献标志码: A

Microstructure and properties of in-situ synthesized NiTi-TiB₂ composite

JIANG Jiang¹, MA Zhi-yuan², SHAO Yang², PENG Wen-yi³, QI Yan-jun³

(1. Jiangxi Key Laboratory of Advanced Copper and Tungsten Materials,
Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029, China;

2. School of Science, China University of Petroleum-Beijing, Changping 102249, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Three in-situ NiTi-TiB₂ composites with different B contents were prepared by arc melting of Ti, Ni and B. The microstructure, composition and compress property were tested. The results show that TiB₂ ceramic phase disperses in NiTi shape memory alloy matrix, with metallurgical bonding interface, and no pore is observed, which can overcome the shortcomings in traditional ex-situ composites, such as poor interfacial bonding, low density, porosity, and so on. However, the coarse TiB₂ ceramic and brittle Ti₂Ni dendrite with tens of micrometers size is observed when the B content is over 6% (mole fraction), which causes compression performance deterioration of the composite.

Key words: NiTi-TiB₂; shape memory alloy; in-situ synthesis composite; martensitic transformation

TiB₂ 陶瓷是一种具有特殊物理性能与化学性能的陶瓷, 熔点极高、化学稳定性高、硬度高、弹性模量高、耐磨性和电性能优异, 常被作为增强相与其他基体复合^[1-12]。NiTi 形状记忆合金(Shape memorial alloy, SMA)是集感知、驱动和执行功能于一体的功能材料, 既可以用作传感器感知应力、应变、温度等变化, 又

可以用作驱动组元改变系统的形状、刚度、固有频率和阻尼等性能^[13-18]。例如, 将 NiTi 记忆合金丝复合于铝合金^[19-20]、镁合金^[21]、高分子^[22]等基体中所制备成的复合材料, 具有升温自增强^[19, 21]、抑制裂纹扩展^[23]和减振降噪^[24-25]等功能特性。近年来, 中国石油大学(北京)崔立山教授的课题组根据 NiTi-Nb 伪二元共晶

转变,在微纳米尺度上将 NiTi 与 Nb 原位复合,制备了记忆合金-Nb 纤维复合材料,该系列材料具有诸多崭新功能特性^[26-32],如宽温域窄滞后相变特性^[27]、宽温域负热膨胀停顿点记忆效应^[28]、应变软模效应和线性超弹性^[32]等。其中,HAO 等^[32]指出,该材料跨越了复合材料中纳米线无法表现出其本征性能的死亡谷,填补了传统金属、陶瓷和高分子三大类材料性能图表的空白区。这些研究表明,在微细尺度上将记忆合金功能材料与具有其他性能的材料进行原位复合,实现对性能的调控,获得崭新功能甚至超常性能,有望成为材料研究的一种发展趋势。

若采用 NiTi 记忆合金与 TiB₂ 陶瓷复合,利用记忆合金的超弹性、高阻尼性及其抑制裂纹扩展功能^[23]增韧脆性陶瓷,有望使材料继承陶瓷的高模量、高硬度、高耐磨特性以及记忆合金的超弹特性和柔韧性等优点^[33],同时抵消陶瓷脆性的缺点,展现出超常的力学特性。此外,与 TiB₂ 陶瓷耦合后,记忆合金的相变特征会发生改变,有望展现出崭新的功能特性。陈久明等^[34]将 TiB₂ 粉末和 Ni、Ti 粉末混合,采用放电烧结的方法制备了 TiNi-TiB₂ 的复合材料,然而,采用粉末冶金法,非原位合成的记忆合金-陶瓷复合材料,普遍存在界面结合强度低、多孔隙以及致密度低等缺点,如以往报道的 NiTi-TiC 复合材料^[35-37]。复合界面强度低不利于复合组元间的载荷传递,导致记忆合金与陶瓷材料耦合而产生的新功能特性难以全面而真实的体现出来;致密度低、孔隙多会降低材料的整体力学性能,难以完全体现记忆合金对陶瓷的增韧效果以及陶瓷对记忆合金的增强效果。因此,要对记忆合金-陶瓷复合材料的功能、力学特性的研究有所突破,需要原位合成界面结合良好、致密度高的记忆合金-陶瓷复合材料。

目前,有关原位合成 NiTi-TiB₂ 复合材料的研究非常少。孟庆猛等^[38]针对 Ti-Ni-TiB₂ 合金体系进行了反应热力学理论分析,在一定程度上证实了熔炼法原位合成 TiNi-TiB₂ 复合材料的可行性,但他们尚没有进行具体的实验研究。HUANG 等^[39-40]针对不同 Ni 含量的 Ni-Ti-B 体系合金进行了实验探索,但其研究的成分配比无法形成近等摩尔比的 NiTi 记忆合金。本文作者通过成分设计,利用电弧熔炼单质 Ni、Ti 和 B 得到含有 NiTi 记忆合金相和 TiB₂ 陶瓷相组织的合金锭,该合金是一种原位自生的 NiTi-TiB₂ 复合材料,与以往的非原位材料相比,其冶金界面结合强度高,不存在致密度低的问题,有利于材料性能及功能特性的体现。本文作者通过对 3 种复合材料的微观组织、成分及力学性能的初步探索,为 NiTi-TiB₂ 复合材料的设计和原

位合成提供了实验基础。

1 实验

采用备有水冷铜坩埚的真空电弧熔炼炉(电弧熔炼炉来自中国科学院沈阳科学仪器研制中心有限公司生产,真空度为 1×10^{-3} Pa),将 Ti、Ni 和 B(纯度分别为 99.8%、99.96%和 99.9%,质量分数)按设计的成分比例进行熔炼,得到名义成分分别为 48.9Ti-46.7Ni-4.4B、48.5Ti-45.5Ni-6B 和 46.5Ti-39.5Ni-14B(摩尔分数)的合金锭各 100 g。根据不同 B 含量,将 3 种样品简称为 B4、B6 和 B14 样品。采用 FEI Quanta 200 型扫描电镜(SEM)观察样品的微观组织,并利用配备的 X 射线能谱仪进行成分分析;采用德国产 NETZSCH 204 F1 型示差扫描量热分析仪(DSC)进行相变行为测试,3 个样品均经历-80~200 的升降温热循环,升降温速率为 10 /min,保护气氛为氩气;利用线切割将合金锭切割成直径 3.7 mm、高 8 mm 的圆柱,并采用 WDT II-20 型万能拉伸试验机对其进行压缩测试,加载速率为 0.3 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 合金的成分与组织

近等摩尔比的 NiTi 形状记忆合金之所以具有形状记忆效应或超弹性等功能特性,是因为其能够发生可逆马氏体相变。而其他的 NiTi 化合物不能发生可逆相变,不具备功能特性。因此,可以通过测试样品在热循环中是否发生可逆马氏体相变,判断熔炼获得的 Ni-Ti 体系合金中是否含有 NiTi 记忆合金相。图 1 所示为 3 种样品的 DSC 测试曲线(吸热峰向下,放热峰向上),由图 1 可见,3 种成分的样品在热循环中都出现了可逆马氏体相变峰,这说明样品中含有 NiTi 记忆合金相。因此,该系列合金是复合了 NiTi 记忆合金的原位复合材料。实验说明,在 Ti-Ni-B 体系中,通过适当调整成分比例,NiTi 记忆合金相可以作为稳定相存在于合金中。由于 3 种样品的正相变开始温度都低于室温,因此,复合的记忆合金都处于母相(奥氏体)状态。

图 2 所示为 3 种样品的 XRD 谱。由图 2(a)可见,3 种样品中都含有 NiTi 母相(奥氏体)和 TiB₂ 相,且随着 B 含量的升高,TiB₂ 峰逐渐增强。Ti₂Ni 峰在 B4 样品中极不明显,但随着 B 含量的增加,Ti₂Ni 峰逐

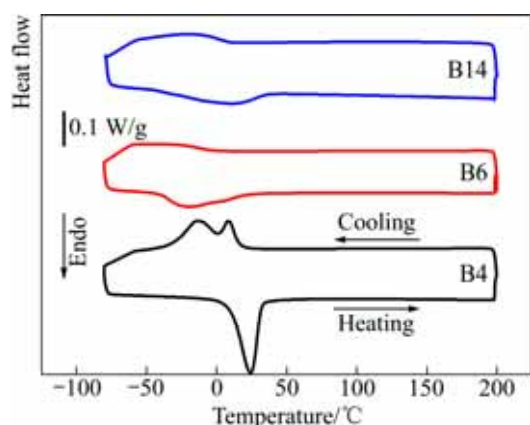


图1 B4、B6和B14样品的DSC测试结果

Fig. 1 DSC results of B4, B6 and B14 samples (Observed DSC peaks corresponding reversible martensitic transformation of equiatomic NiTi shape memory alloy in these samples)

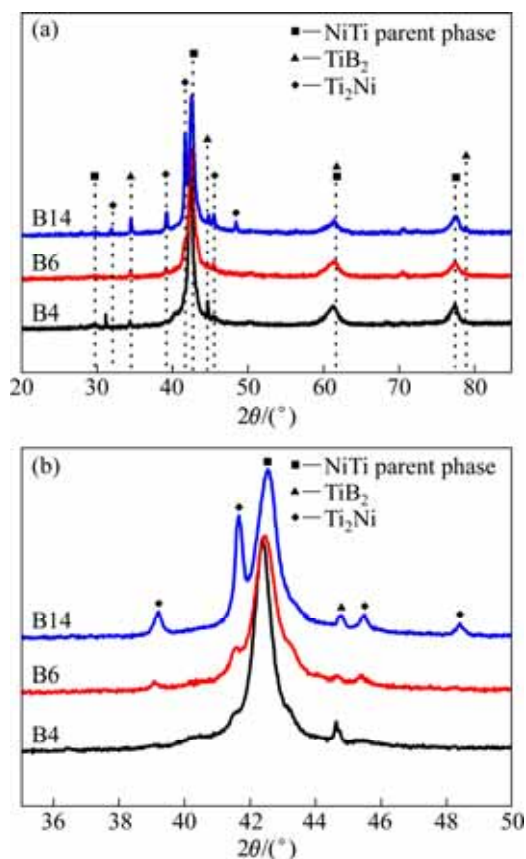


图2 B4、B6和B14样品的XRD谱

Fig. 2 XRD results of B4, B6 and B14 samples: (a) Diffraction angle 2θ from 20° to 85° ; (b) Enlarged view of area corresponding to 2θ from 35° to 50° in Fig. 2 (a)

渐增强。图2(b)中局部放大了 2θ 角度在 35° ~ 50° 之间区域的XRD谱,图中清晰可见, Ti_2Ni 峰在B6样品中已可以分辨,在B14样品中则非常显著。通常,在

近等摩尔比二元NiTi合金体系中, Ti_2Ni 脆性相的形成是由于合金成分中Ti含量过高。而NiTi母相的形成说明Ni含量高,即Ti含量较低。故两者一般不会同时大量存在。与之相反,在Ni-Ti-B三元体系中, Ti_2Ni 相和NiTi母相同时做为稳定相共存于合金中,且在B14样品中, Ti_2Ni 衍射峰强度较高, Ti_2Ni 相和NiTi母相大量共存,说明此时 Ti_2Ni 的稳定化并非受控于Ti含量的多少,而是源于B的加入。因此,B加强了 Ti_2Ni 相的稳定性,难以通过简单微调样品中Ti含量来消除NiTiB合金中的 Ti_2Ni 。

图3所示为3种样品的SEM背散射像。能谱分析显示,图中白色区域为近等原子比的NiTi记忆合金相。由于能谱无法准确识别B的含量,根据XRD成分分析结果判断,图中黑色区域为 TiB_2 陶瓷相。由图3(a)和(b)可见,B4样品的显微组织为块状和线状的 TiB_2 陶瓷(图中黑色区域)镶嵌于NiTi基体(图中白色区域)中。 TiB_2 陶瓷与NiTi记忆合金的复合界面为合金相界面,界面结合强度高,不存在界面污染和孔隙问题。这些特点是以往非原位法获得的记忆合金-陶瓷复合材料难以实现的。在B6和B14样品(见图3(c)、(d)和(e)、(f))中除了 TiB_2 陶瓷相和NiTi记忆合金相外,还出现了粗大的灰色枝晶,并且在B14样品中,枝晶明显增多。根据XRD谱结果,灰色枝晶应为 Ti_2Ni 相。因此,B6和B14样品是 TiB_2 和 Ti_2Ni 复相陶瓷与NiTi记忆合金的复合材料。相比于B4和B6样品而言,B14样品中的线状 TiB_2 陶瓷相明显减少,而块状 TiB_2 陶瓷相增多。3种成分的样品中,除了线状的 TiB_2 陶瓷外,其他陶瓷相都很粗大,达到几十微米级别。

2.2 合金的力学性能测试

图4(a)所示为3种样品的压缩工程应力-应变曲线。得益于NiTi基体的高韧性,3种材料的断裂应变都超过20%,强度都超过1800 MPa。其中,B4样品的断裂应变为33%,强度高达2400 MPa。然而,随着B含量的增加,样品的断裂应变和强度都逐渐降低,变化趋势如图4(b)所示。根据前面的显微组织及成分分析,样品机械性能的劣化与两方面因素有关:1)随着B含量增加,尺寸大的块状 TiB_2 陶瓷逐渐增多,而小尺寸的针状 TiB_2 陶瓷减少并消失。粗大的 TiB_2 陶瓷的大量形成不利于材料力学性能,导致材料压缩性能随B含量增加而劣化;2)随着B含量增加,样品中逐渐出现了粗大的 Ti_2Ni 脆性枝晶,并且其体积分数随B含量的增加而迅速升高。可以认为,粗大的 Ti_2Ni 脆性枝晶的出现加剧了样品的力学性能恶化。因此,在材料合成中,细化陶瓷相尺寸,阻止粗大 Ti_2Ni

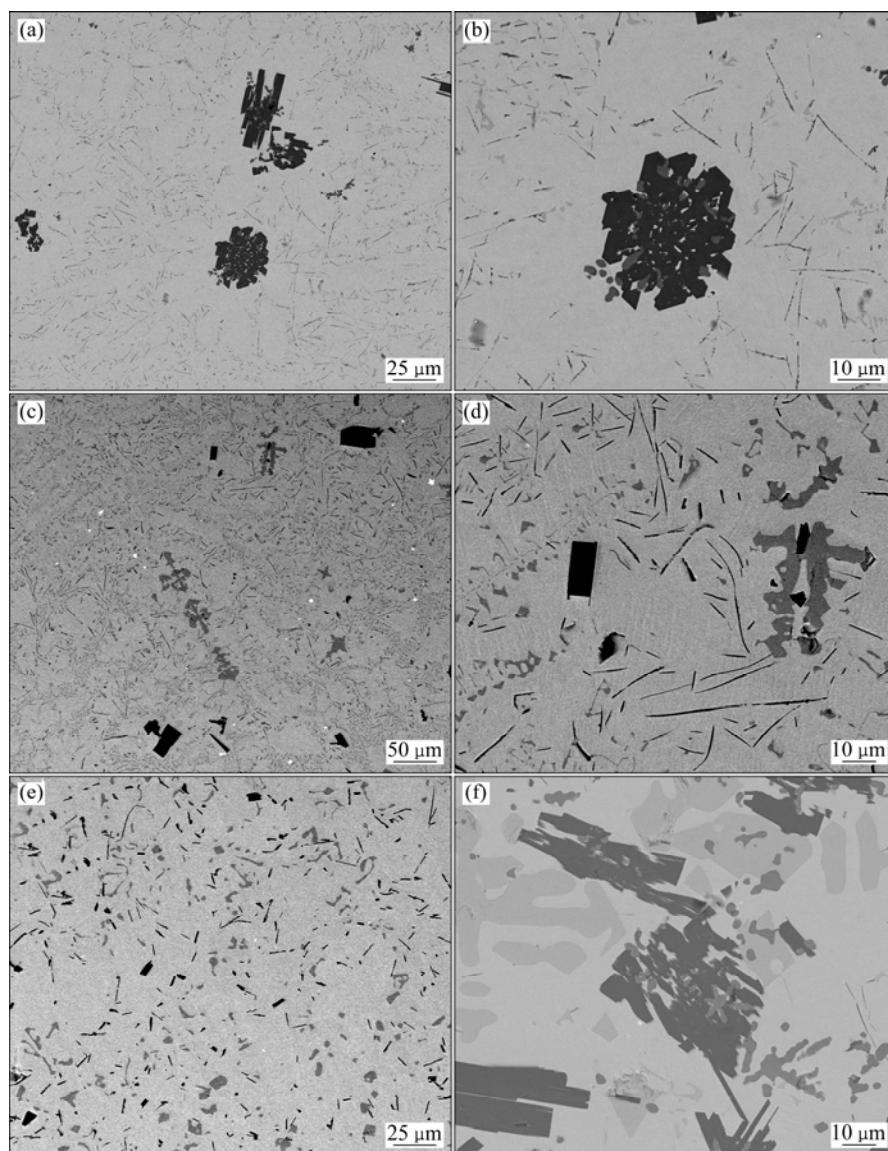


图 3 B4、B6 和 B14 样品的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of samples B4, B6 and B14: (a), (b) B4 sample; (c), (d) B6 sample; (e), (f) B14 sample (Bright and dark areas are NiTi shape memory alloy phase and TiB₂ ceramic phase respectively, and gray area is Ti₂Ni phase)

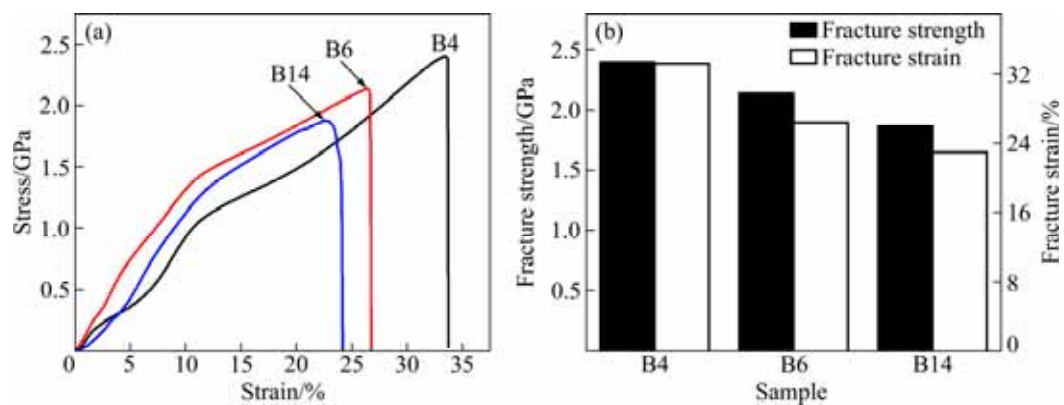


图 4 B4、B6 和 B14 样品的压缩性能测试结果

Fig. 4 Compression test results of samples B4, B6 and B14: (a) Stress-strain curves; (b) Variation of fracture strength and fracture strain of samples with increasing B fraction

枝晶的形成,是进一步研究的重点。

3 结论

1) 通过电弧熔炼单质 Ni、Ti 和 B 得到原位自生 NiTi-TiB₂ 复合材料。该材料的显微组织为块状和线状的 TiB₂ 陶瓷相镶嵌于 NiTi 记忆合金相中。

2) TiB₂ 陶瓷与 NiTi 记忆合金的复合界面为合金相界面,界面结合强度高。当 B 摩尔分数超过 6%后,显微组织中出现粗大的 Ti₂Ni 脆性枝晶,此时样品成为 TiB₂ 和 Ti₂Ni 复相陶瓷与 NiTi 记忆合金的复合材料。在该材料体系中,Ti₂Ni 的稳定存在主要源于 B 的加入,而并非 Ti 含量的配比。

3) 由于块状 TiB₂ 陶瓷相和 Ti₂Ni 枝晶的尺寸都达到几十微米级别,且随着 Ti₂Ni 脆性枝晶相含量的增加,材料的压缩性能逐渐劣化。因此,在材料合成中,细化陶瓷相尺寸和阻止粗大 Ti₂Ni 枝晶的形成是进一步研究的重点。

REFERENCES

- [1] 甘贵生, 杨 滨. TiB₂/7075 铝基复合材料流变挤压成形工艺[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1133-1140.
GAN Gui-sheng, YANG Bin. Rheo-casting forming process of TiB₂/7075 aluminium matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1133-1140.
- [2] CUI H Z, MA L, CAO L L, TENG F L, CUI N. Effect of NiAl content on phases and microstructures of TiC-TiB₂-NiAl composites fabricated by reaction synthesis[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2): 346-353.
- [3] FANG Z, WU X L, YU J, LI L B, ZHU J. Penetrative and migratory behavior of alkali metal in different binder based TiB₂-C composite cathodes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 1220-1230.
- [4] 毛建伟, 吕维洁, 黄 坚, 王立强, 张 荻, 覃继宁, 孙锡建, 朱晓星. 原位自生(TiB+La₂O₃)/Ti 复合材料脉冲氩弧焊接技术[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(Special 1): s678-s683.
MAO Jian-wei, LÜ Wei-jie, HUANG Jian, WANG Li-qiang, ZHANG Di, QIN Ji-ning, SUN Xi-jian, ZHU Xiao-xing. Pulsed argon arc welding of in situ synthesized (TiB+La₂O₃)/Ti composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(Special 1): s678-s683.
- [5] 黄陆军, 唐 鹭, 胡 悦, 陆成杰, 耿 林. 热压烧结制备调控组织 TiB_w/Ti 复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(Special 1): s696-s701.
HUANG Lu-jun, TANG Ao, HU Yue, LU Cheng-jie, GENG Lin. Fabrication of TiB_w/Ti composites with tailored microstructure by reaction hot pressing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(Special 1): s696-s701.
- [6] 黄立国, 孔凡涛, 杜赵新, 肖树龙, 徐丽娟, 陈玉勇. 少量 B/TiB₂ 对近 β 钛合金 Ti-B₂₀ 铸态组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(Special 1): s726-s729.
HUANG Li-guo, KONG Fan-tao, DU Zhao-xin, XIAO Shu-long, XU Li-juan, CHEN Yu-yong. Effect of trace B/TiB₂ on microstructure of near β titanium alloy Ti-B₂₀[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(Special 1): s726-s729.
- [7] 张长江, 张树志, 孔凡涛, 肖树龙, 刘 浩, 陈玉勇. 锻造对 (TiB+TiC)/Ti 复合材料组织和高温拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(Special 1): s756-s760.
ZHANG Chang-jiang, ZHANG Shu-zhi, KONG Fan-tao, XIAO Shu-long, LIU Hao, CHEN Yu-yong. Effect of forging on microstructure and high temperature tensile properties of (TiB+TiC)/Ti composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(Special 1): s756-s760.
- [8] NIRANJAN K, LAKSHMINARAYANAN P R. Optimization of process parameters for in situ casting of Al/TiB₂ composites through response surface methodology[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(5): 1269-1274.
- [9] ZHONG L H, ZHAO Y T, ZHANG S L, CHEN G, CHEN S, LIU Y H. Microstructure and mechanical properties of in situ TiB₂/7055 composites synthesized by direct magnetochemistry melt reaction[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2502-2508.
- [10] SOBHANI M, ARABI H, MIRHABIBI A, BRYDSON R M D. Microstructural evolution of copper-titanium alloy during in-situ formation of TiB₂ particles[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(10): 2994-3001.
- [11] 曹丽丽, 崔洪芝, 吴 杰, 汤华杰. 原位反应合成 (TiB₂-Al₂O₃)/NiAl 复合材料的微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2790-2796.
CAO Li-li, CUI Hong-zhi, WU Jie, TANG Hua-jie. Microstructures of (TiB₂-Al₂O₃)/NiAl composite prepared by in-situ reaction synthesis[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2790-2796.
- [12] CAO G J, XU H Y, ZHENG Z Z, GENG L, NAKA M. Grain size effect on cyclic oxidation of (TiB₂+TiC)/Ni₃Al composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(7): 1588-15936.
- [13] 周本濂. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 224-261.
ZHOU Ben-lian. Composite[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000: 224-261.

- [14] 赵晓鹏, 周本濂. 具有自修复行为的智能材料模型[J]. 材料研究学报, 1996, 10(1): 101-104.
- ZHAO Xiao-beng, ZHOU Ben-lian. Intelligent materials model with self-healing behavior[J]. Journal of Materials Research, 1996, 10(1): 101-104.
- [15] 殷景华. 功能材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- YIN Jing-hua. An introduction to functional materials[M]. Haerbin: Journal of Harbin Institute of Technology, 1999.
- [16] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 145-196.
- WU Ren-jie. Composite[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000: 145-196.
- [17] NEWNHAM R E, SKINNER D P, CROSS L E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites[J]. Materials Research Bulletin, 1978, 13(5): 525-536.
- [18] 舟久保, 熙康. 形状记忆合金[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- ZHOU Jiu-bao, XI Kang. Shape memory alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
- [19] FURUYA Y, SASAKI A, TAYA M. Enhanced mechanical properties of NiTi shape memory fiber/Al matrix composite[J]. Materials Transactions JIM, 1993, 34: 224-227.
- [20] PARK Y C, LEE G C, FURUYA Y. A study on the fabrication of NiTi/Al6061 shape memory composite material by hot-press method and its mechanical property[J]. Materials Transactions, 2004, 45(2): 264-271.
- [21] MIZUUCHI K, INOUE K, HAMADA K. Processing of NiTi SMA fiber reinforced AZ31 Mg alloy matrix composite by pulsed current hot pressing[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 367(1/2): 343-349.
- [22] JANG B K, KISHI T. Adhesive strength between NiTi fibers embedded in CFRP composites[J]. Materials Letters, 2005, 59(11): 1338-1341.
- [23] SHIMAMOTO A, FURUYAMA Y, ABE H. Effect of fatigue crack propagation in the shape memory alloy fiber reinforced smart composite[J]. Advances in Composite Materials and Structures, 2007, 334/335(1/2): 1093-109.
- [24] AOKI T, SHIMAMOTO A. Active vibration control using cantilever beam of smart matrix composite with embedded shape memory alloy[J]. Advances in Nondestructive Evaluation, 2004, 270/273(1/3): 2187-2192.
- [25] BAZ A, POH S, GILHEANY J. A control of the natural frequencies of nitinol-reinforced composite beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185: 171-185.
- [26] JIANG J, CUI L S, ZHENG Y J, XING T Y. Effect of pre-deformation on damping capacity of NiTi/NbTi composite[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24: 2392-2397.
- [27] JIANG J, CUI L S, ZHENG Y J, JIANG D Q, LIU Z Y, ZHAO K. Narrow hysteresis behavior of NiTi shape memory alloy constrained by NbTi matrix during incomplete transformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 536: 33-36.
- [28] JIANG J, CUI L S, ZHENG Y J, JIANG D Q, LIU Z Y, ZHAO K. Negative thermal expansion arrest point memory effect in NiTi shape memory alloy and NbTi/NiTi composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 549: 114-117.
- [29] 姜江, 崔立山, 姜大强, 蒋小华, 焦淑静. 超细片层 NbTi/NiTi 记忆合金复合材料的制备与功能特性[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(3): 151-154.
- JIANG Jiang, CUI Li-shan, JIANG Da-qiang, JIANG Xiao-hua, JIAO Shu-jing. Preparation and functional properties of ultrafine lamellar NbTi/TiNi shape memory alloy composites[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(3): 151-154.
- [30] JIANG D Q, JIANG J, SHI X B, JIANG X H, JIAO S J, CUI L S. Constrained martensitic transformation in nanocrystalline NiTi/NbTi shape memory composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577(Supplement 1): 749-751.
- [31] HAO S J, CUI L S, WANG Y D, JIANG D Q, YU C, JIANG J, BROWN D E, REN Y. The ultrahigh mechanical energy-absorption capability evidenced in a high-strength NbTi/NiTi nanocomposite[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99: 024102-1-024102-3.
- [32] HAO S J, CUI L S, JIANG D Q, HAN X D, REN Y, JIANG J, LIU Y N, LIU Z Y, MAO S C, WANG Y D, LI Y, REN X B, DING X D, WANG S, YU C, SHI X B, DU M S, YANG F, ZHENG Y J, ZHANG Z, LI X D, BROWN D E, LI J. A transforming metal nanocomposite with large elastic strain, low modulus, and high strength[J]. Science, 2013, 339: 1191-1194.
- [33] WEI Z G, SANDSTRÖM R. Review shape memory materials and hybrid composites for smart systems (Part): Shape-memory hybrid composites[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 3763-3783.
- [34] 陈久明, 赵占勇, 梁兴华, 丁龙先. Ti-Ni 合金及其陶瓷复合体的超弹性研究[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(12): 83-88.
- CHEN Jiu-ming, ZHAO Zhan-yong, LIANG Xing-hua, DING Long-xian. Superelasticity measurement of Ti-Ni alloy and its complex with ceramics[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(12): 83-88.
- [35] YE H Z, LI D Y, EADIE R L. Improvement in wear resistance of NiTi-based composites by hot isostatic pressing[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 329/331: 750-755.
- [36] YE H Z, LIU R, LI D Y, EADIE R L. Wear and friction of a new

- wear-resistant material: NiTi-based composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61: 987–994.
- [37] LI D Y. Development of novel wear-resistant materials: NiTi-based pseudoelastic tribomaterials[J]. *Materials and Design*, 2000, 21: 551–555.
- [38] 孟庆猛, 张正茂, 殷蕊, 王艳敏. Ni-Ti 合金/陶瓷复合体反应热力学分析[J]. *金属材料研究*, 2010, 36(2): 12–17.
- MENG Qing-meng, ZHANG Zhen-mao, YIN Rui, WANG Yan-min. Reaction thermodynamics analysis of Titanium-Nickel alloy/ceramics composite[J]. *Research on Metallic Materials*, 2010, 36(2): 12–17.
- [39] HUANG L, WANG H Y, LI Q, YIN S Q, JIANG Q C. Effect of Ni content on the self-propagating high-temperature synthesis of Ni-Ti-B system[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2008, 26: 77–83.
- [40] HUANG L, WANG H Y, QIU F, JIANG Q C. Synthesis of dense ceramic particulate reinforced composites from Ni-Ti-C, Ni-Ti-B, Ni-Ti-B₄C and Ni-Ti-C-B systems via the SHS reaction, arc melting and suction casting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 422: 309–315.

(编辑 龙怀中)