

## W 对高铌 TiAl 合金组织和力学性能的影响

韩建超<sup>1,2</sup>, 徐丽娟<sup>1</sup>, 肖树龙<sup>1,2</sup>, 陈玉勇<sup>1,2</sup>, 王致彬<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;  
2. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨 150001;  
3. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 404100)

**摘要:** 研究分别添加 0.3%、0.7%、1.0%W(摩尔分数)对高铌 TiAl 合金组织和力学性能的影响。结果表明: W 的添加不改变合金的凝固路径, 不影响合金的室温相组成; 随 W 添加量的增加, 合金中 Nb 和 Al 的元素偏析程度提高, 添加 1.0%W 时, Al 元素偏析明显; W 的添加提高 TiAl 合金的显微硬度, W 含量的变化对显微硬度的影响较小; 适量的添加 W 可提高合金的室温压缩强度, 添加 0.7%W 合金的强度达到最大, 为 1821 MPa, 压缩率为 24.47%, 过量的 W(1.0%)将导致合金组织偏析严重, 恶化合金的性能。

**关键词:** TiAl 合金; 钨; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2+3 文献标志码: A

## Effect of W addition on microstructure and mechanical properties of high-Nb TiAl alloy

HAN Jian-chao<sup>1,2</sup>, XU Li-juan<sup>1</sup>, XIAO Shu-long<sup>1,2</sup>, CHEN Yu-yong<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-bin<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
3. Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

**Abstract:** The effects of the addition of 0.3%, 0.7%, 1.0%W (mole fraction) on the microstructure and mechanical properties of high-Nb TiAl alloy were studied. The results show that the W alloying doesn't change the alloy solidification path, has no effect on the room temperature phase composition of high-Nb TiAl alloy. With the increase of W content, the segregation degree of Nb and Al element is enhanced, and the macrosegregation of Al turns striking with 1.0% W addition. Tungsten alloying boosts the microhardness of TiAl alloy, while this boost does not rely on the W content variation. Appropriate W addition can facilitate the room temperature compression strength, the strength achieves maximum value as 1821MPa and the compressibility reaches 24.47% with 0.7% W addition. Nevertheless, excessive W addition (1.0%) will deteriorate the mechanical property owing to severe segregation of Nb, W and Al.

**Key words:** TiAl alloy; W; microstructure; mechanical property

高铌 TiAl 合金作为重要的新型高温结构材料之一, 由于其低密度、优异的高温强度以及良好的高温抗氧化性等优点, 极具应用前景与发展潜力<sup>[1-3]</sup>。然而, 高铌 TiAl 合金具有铸态组织粗大、室温塑性及加工性差、室温与高温性能之间匹配性不良等缺点, 制约了其应用。研究表明<sup>[4-6]</sup>, W 对 TiAl 基合金

具有很强的固溶强化作用以及钉扎 1/6(112)孪生位错、提高合金强度; 同时 W 是  $\beta$  相稳定元素<sup>[7-10]</sup>, 可以抑制  $\alpha_2$  相长大, 细化晶粒进而提高其综合性能。在此, 本文作者对 4 种不同 W 含量的高铌 TiAl 合金铸态显微组织及其力学性能之间的关系进行了讨论。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51001040, 51371064); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB605502)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 徐丽娟, 工程师, 博士; 电话: 0451-86402451; E-mail: xljuan@hit.edu.cn

## 1 实验

实验用原材料为海绵钛(99.9%, 质量分数)、高纯铝(99.9%)、铝铌中间合金(铌含量 52.59%)和高纯钨(99.9%)。合金名义成分 Ti-45Al-7Nb- $x$ W ( $x=0$ 、0.3%、0.7%、1.0%, 摩尔分数), 采用 DHL-400 型真空非自耗电弧炉熔炼成合金锭, 合金锭经 LZ-5 离心铸钛机浇铸为  $d10\text{ mm}\times40\text{ mm}$  的铸锭。压缩试样为  $d3\text{ mm}\times5\text{ mm}$  柱状, 试样由铸锭心部线切割而成。压缩试验在 Instron-5500 万能材料试验机上进行, 测试温度为室温, 压缩应变速率为 1 mm/min。采用 CLEMEX 全自动显微硬度计测试试样的显微硬度值, 加载载荷 0.98 N, 加载时间 15 s。

采用 OLYMPUS-TH3 光学显微镜、S-4700 型扫描电镜观察试样金相组织和压缩试样的断口形貌。利用 D/max-B 型旋转阳极 X 射线衍射仪进行 X 射线衍射(XRD)分析试样的相组成, 衍射范围  $20^\circ\sim100^\circ$ , 步长  $0.02^\circ$ , 每步 0.5 s。

## 2 实验结果

### 2.1 合金的相组成

图 1 所示为不同 W 含量 TiAl 合金的 XRD 谱。从

图 1 可知, Ti-45Al-7Nb- $x$ W 合金组织均由  $\gamma$  相和  $\alpha_2$  相组成, 未发现 B2 相, 这可能是由于 B2 相的含量较少, 未能检测出。

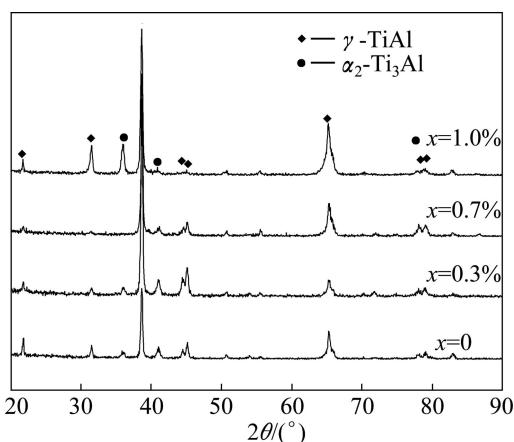


图 1 Ti-45Al-7Nb-xW 合金 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of Ti-45Al-7Nb-xW alloys

### 2.2 合金的显微组织

图 2 所示为不同 W 含量 TiAl 合金的背散射 SEM 像。从图 2 可以发现, 除了 W、Nb 等重元素偏析外, 未见其他化合物, 因此可以判定, W 和 Nb 在合金中固溶于  $\alpha_2$  基体, 在非平衡铸态组织中偏聚于枝晶间。图 2(a)所示合金中不含 W, 但其背散射图像中依然有

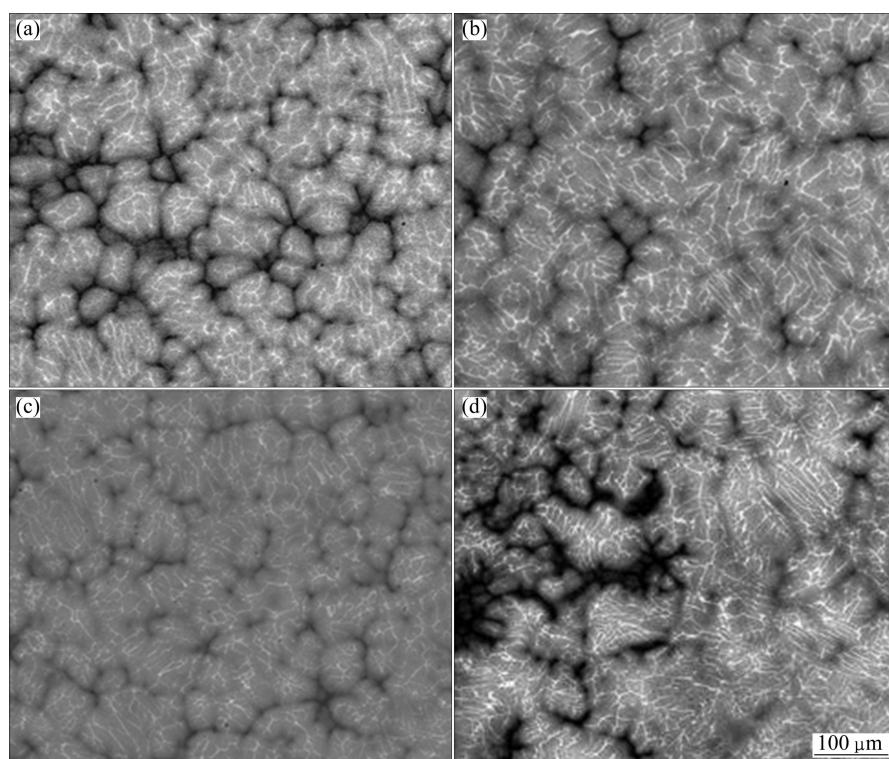


图 2 Ti-45Al-7Nb-xW 合金的 BSE 像

Fig.2 BSE images of Ti-45Al-7Nb-xW alloys: (a)  $x=0$ ; (b)  $x=0.3\%$ ; (c)  $x=0.7\%$ ; (d)  $x=1.0\%$

白色的网状组织,说明其是金属 Nb 的枝晶间偏析。随 W 含量的增加,4 种合金中的偏析情况越来越严重,在图 2(d)中有条状物交叉,可能是合金在凝固过程中由于 W 含量较高,枝晶偏析程度大,枝晶发达,相互交叉的结果。

### 2.3 合金的力学性能

合金的室温压缩试验结果如图 3 所示。由图 3 可知,合金在屈服到断裂的过程中,抗压强度和应变量均显著增加。Ti-45Al-7Nb 的抗压强度为 1460 MPa,当添加 W 后,抗压强度逐渐增加,Ti-45Al-7Nb-0.7W 的抗压强度最大,达到 1821 MPa。Ti-45Al-7Nb 压缩率为 21.82%,添加 W 后合金压缩率并无规律性变化,当合金成分为 Ti-45Al-7Nb-0.7W 时,压缩率增加到最大,达到 24.47%。

图 4 所示为 Ti-45Al-7Nb-xW 合金的压缩断口形貌。从图 4 可以看出,4 种合金的试样断裂面均未出现塑性变形痕迹,失效形式既有穿层片断裂,又有沿层片断裂,断裂类型为脆性断裂,W 的添加对合金断口形貌和断裂方式影响不大。

图 5 所示为 Ti-45Al-7Nb-xW 合金的显微硬度随

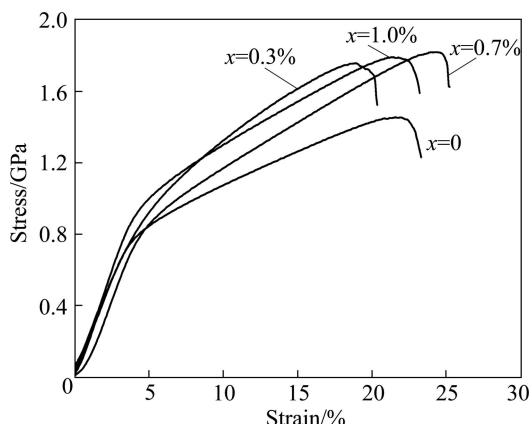


图 3 Ti-45Al-7Nb-xW 合金的室温压缩应力—应变曲线

Fig.3 Room temperature compression stress—strain curves of Ti-45Al-7Nb-xW alloys

W 含量的变化。在本试验中,测试了每种合金 6 个不同位置的显微硬度,最后取其平均值。从图 5 中可以看出,Ti-45Al-7Nb 合金的显微硬度最小,为 332HV;当添加 W 后,显微硬度值上升;随着 W 含量的继续增多,显微硬度值逐渐增加,Ti-45Al-7Nb-1.0W 的显微硬度为 392HV,达到最大值。

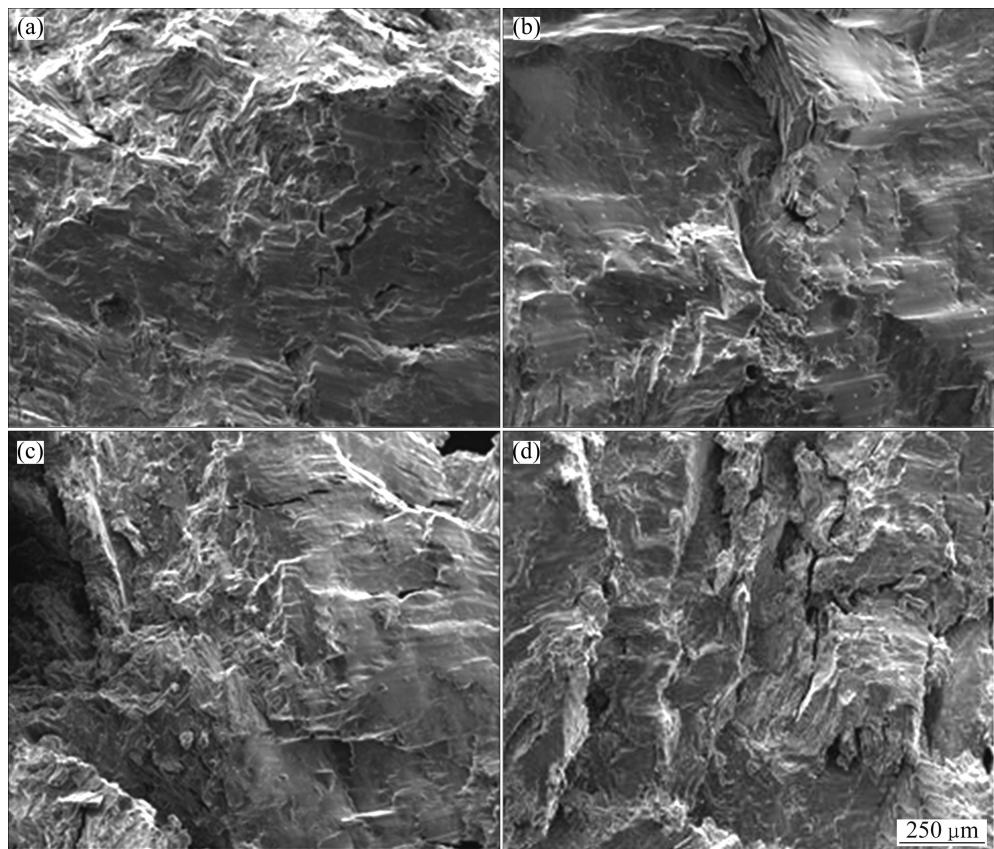


图 4 Ti-45Al-7Nb-xW 合金的断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies of Ti-45Al-7Nb-xW alloys: (a)  $x=0$ ; (b)  $x=0.3\%$ ; (c)  $x=0.7\%$ ; (d)  $x=1.0\%$

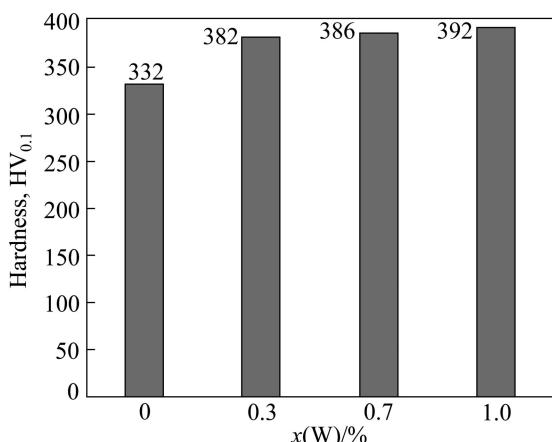


图5 Ti-45Al-7Nb-xW合金的显微硬度

Fig.5 Microhardness of Ti-45Al-7Nb-xW alloys

### 3 分析与讨论

#### 3.1 W对组织的影响

由图1可知, W元素的添加对Ti-45Al-7Nb合金的室温相组成无影响, 图2所示的4种合金的BSE像, 表明W的添加提高了合金中的元素偏析程度。据能谱分析可知, 图中亮白色网络状区域Nb和W含量较多, 暗黑色区域为富Al区。众所周知,  $\beta$ 相稳定元素Nb和W的加入, 扩大了 $\beta$ 相区的范围<sup>[11-13]</sup>。据实验结果分析, W的添加不影响合金的凝固过程, Ti-45Al-7Nb-xW合金沿着 $\beta$ 相凝固路线:  $L \rightarrow L+\beta$ 。在析出的 $\beta$ 相枝晶中Al元素贫乏而 $\beta$ 相稳定元素(如Nb和W)富集, 因此,  $\beta$ 相的析出势必将多余的Al原子通过固液界面向液相中排出, 同时液相中的Nb原子和W原子也通过固液界面向 $\beta$ 相扩散并析出新的 $\beta$ 相。随着 $\beta$ 相的不断析出, 液相中Al元素越来越富集, Nb元素和W元素越来越贫乏, 最后, 在 $\beta$ 枝晶间区域残留的液相中Al元素富集、Nb元素贫乏。

随着温度的继续降低, 合金在凝固过程中通过 $\beta+\alpha$ 双相区, 凝固后的 $\beta$ 枝晶通过 $L+\beta \rightarrow \alpha$ 包晶反应转变为 $\alpha$ 相。包晶反应会首先发生在 $\beta$ 枝晶与液相接触的区域。这部分区域Al元素富集, 随后转变成 $\gamma$ 相, 在BSE像中表现为黑色的组织。在 $L+\beta \rightarrow \alpha$ 转变过程中, Al向 $\alpha$ 相扩散,  $\beta$ 相稳定元素Nb和W沿着相反方向扩散, 这个趋势导致了 $\beta$ 和 $\alpha$ 晶粒的界面处Nb和W富集而Al贫乏。随着包晶反应的进行, 反应界面不断从枝晶间区域向枝晶臂推进, 最后在 $\beta$ 相枝晶臂中Al贫乏而Nb和W富集, 随后转变为B2相, 在BSE像中表现为白色的网状组织。 $\alpha$ 晶粒在随后的

冷却过程中, 转变成 $\alpha_2/\gamma$ 层片组织, 在BSE图像中表现为灰色的层片组织。结合图2可以看出, 随着W含量的增加, BSE像中白色组织的亮度在不断增加。这是因为W的存在促进了Nb的偏析, 同时Nb和W都是 $\beta$ 相稳定元素, Nb和W很容易在 $\beta$ 相中富集。

#### 3.2 W对力学性能的影响

晶粒粗大的TiAl合金中, 由于位错运动困难, 变形过程中易形成位错缠结及位错塞积, 导致合金过早解理断裂而失效。TiAl合金的屈服强度和晶粒尺寸间符合Hall-Petch公式, 因此, 细化晶粒能达到改善延展性和提高强度的目的。有研究表明<sup>[9,14-16]</sup>, 适量添加可提高Ti-Al-Nb合金的室温和高温强度, 但W的添加将导致显微组织偏析, 使塑性恶化, 同时枝晶组织的存在可诱发裂纹萌生, 导致合金的过早失效。

由图3压缩曲线可知, 适量添加W可提高合金的强度, 在W含量为0.7%时, 强度达到最大值, 这是由于W的固溶强化提高晶内和片层内位错运动的阻力。固溶强化效果正比于溶质与溶剂原子半径差, 而W原子和Ti、Al的原子半径差约为5.7%, 因此, W原子可与1/6<112>孪生位错及1/2<110>普通位错发生强烈的交互作用而使其可动性大幅度降低, 从而提高合金的强度。随W含量增加, 合金性能反而下降, 这与文献[14,16]中的报道结果一致。

### 4 结论

1) W元素的添加不影响合金的室温相组成, 不改变高铌TiAl合金的凝固路径, W含量的增加促进了合金中Nb、Al元素的偏析。

2) 随W含量的增加, 合金的室温强度呈上升趋势, 0.7%时达到最值, 为1821 MPa, 压缩率亦为最大, 达到24.47%; W的添加提高了合金的显微硬度, W含量的变化对显微硬度的影响较小。

3) 适量的W含量可以提高合金的强度, 过量的W将会恶化合金性能, W含量为1.0%时, 合金的偏析程度最大, 枝晶粗大, 影响了合金的强度。

### REFERENCES

- [1] ZGHAL S, THOMAS M, NAKA S, FINEL A, COURET A. Phase transformations in TiAl based alloys[J]. Acta Materialia, 2005, 53(9): 2653-2664.
- [2] 王刚, 徐磊, 崔玉友, 杨锐. Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.2W-

- 0.15B 合金板材的制备及其拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s274-s279.
- WANG Gang, XU Lei, CUI Yu-You, YANG Rui. Fabrication and tensile property of Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.2W-0.15B alloy sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s274-s279.
- [3] 肖树龙, 于宏宝, 韩杰才, 徐丽娟, 陈玉勇. 机械合金化与放电等离子烧结制备 Ti-45Al-5.5 (Cr, Nb, B, Ta)合金[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s309-s314.
- XIAO Shu-Long, YU Hong-Bao, HAN Jie-Cai, XU Li-Juan, CHEN Yu-Yong. Preparation of Ti-45Al-5.5(Cr, Nb, B, Ta) alloy by mechanical milling and spark plasma sintering [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s309-s314.
- [4] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. 双温循环热处理对铸造 TiAl 基合金显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 15-18.
- PENG Chao-Qun, HUNAG Bai-Yun, HE Yue-Hui. Effects of double temperature cyclic heat treatment on microstructures of TiAl-based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(1): 15-18.
- [5] 郑瑞廷, 张永刚, 陈昌麒. 循环热处理工艺对于双态复相 TiAl 基合金室温拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(6): 472-475.
- ZHENG Rui-ting, ZHANG Yong-gang, CHEN Chang-qi. The effect of circle heat treatment on room temperature mechanical properties of  $\gamma$ -TiAl alloys with duplex microstructure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(6): 472-475.
- [6] BEDDOES J, ZHAO L, WALLANCE W. High temperature compression behaviour of near  $\gamma$ -titanium aluminides containing additions of chromium or tungsten[J]. Materials Science and Engineering A, 1994, 184: L11.
- [7] MAZISAZ P J, RAMANUJAN R V, LIU C T. Effects of B and W alloying additions on the formation and stability of lamellar structures in two-phase  $\gamma$ -TiAl[J]. Intermetallics, 1997, 5(2): 83-95.
- [8] LARSON D J, MILLER M K. Precipitation and segregation in  $\alpha_2+\gamma$  titanium aluminides[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 250: 65-71.
- [9] 刘自成, 林均品, 陈国良. 添加 W 对高铌 TiAl 合金组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(1): 7-13.
- LIU Zi-Cheng, LIN Jun-Pin, CHEN Guo-Liang. Effect of the addition W on the micro structure and mechanical proper ties for high-Nb TiAl alloy [J]. Transaction of Materials and heat Treatment, 2001, 22(1): 7-13.
- [10] MIZUHARA Y, HASHIMOTO K, MASAHASHI N. Microstructure and phase stability of TiAl-W ternary alloy[J]. Intermetallics, 2003, 11(8): 807-816.
- [11] ARREL D, FLOWER H M, WEST D R F. Effect of Si on microstructure of  $Ti_3Al$  alloys containing niobium[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1996, 12(8): 617-622.
- [12] TERNER M, BIAMINO S, UGUES D, SABBADINI S, FINO P, PAVESE M, BADINI C. Phase transitions assessment on gamma-TiAl by thermo mechanical analysis[J]. Intermetallics, 2013, 37: 7-10.
- [13] YANG F, ZHANG L Q, LIN J P, LIANG Y F, HE Y H, SHANG S L, LIU Z K. Pore structure and gas permeability of high Nb-containing TiAl porous alloys by elemental powder metallurgy for microfiltration application[J]. Intermetallics, 2013, 33: 2-7.
- [14] LARSON D J, LIU C T, MILLER M K. Tungsten segregation in  $\alpha_2+\gamma$  titanium aluminides[J]. Intermetallics, 1997, 5(7): 497-500.
- [15] GABRISCH H, STARK A, SCHIMANSKY F P, WANG L, SCHELL N, LORENZ U, PYCZAK F. Investigation of carbides in Ti-45Al-5Nb-xC alloys ( $0 \leq x \leq 1$ ) by transmission electron microscopy and high energy-XRD[J]. Intermetallics, 2013, 33: 44-53.
- [16] SUN H F, LI X W, FENG J, FANG W B. Characterization of TiAl-based alloy with high-content Nb by powder metallurgy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2): s491-s495.

(编辑 龙怀中)