

Nb 含量对高铌 TiAl 基合金显微组织和力学性能的影响

徐丽娟¹, 肖树龙^{1,2}, 贾 焱^{1,2}, 王致彬³, 陈玉勇^{1,2}

- (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: 通过钨极电弧熔炼制备不同 Nb 含量的高铌 Ti-46Al-xNb ($x=0, 6, 7, 8, 9$, 摩尔分数, %)合金, 研究 Nb 含量对高铌 TiAl 基合金凝固组织和力学性能的影响规律。结果表明: 不同 Nb 含量 TiAl 基合金的显微组织为近层片组织, 同时, 铸态组织存在枝晶间 Al 的偏析和层片内部 Nb 的网状偏析。X 射线衍射分析表明, 高铌 TiAl 基合金中存在 γ 相和 α_2 相。室温压缩试验结果表明, 几种高铌 TiAl 基合金中 Ti-46Al-7Nb 合金的综合力学性能较好, 压缩断裂强度为 1 715MPa, 压缩率为 24.21%。扫描电镜断口分析表明, 不同 Nb 含量的 Ti-46Al 合金均以脆性断裂为主。

关键词: TiAl 基合金; 铌; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

Effect of Nb content on microstructure and mechanical properties of high Nb containing TiAl-based alloy

XU Li-juan¹, XIAO Shu-long^{1,2}, JIA Yi^{1,2}, WANG Zhi-bin³, CHEN Yu-yong^{1,2}

- (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: Nb containing Ti-46Al-xNb ($x=0, 6, 7, 8, 9$, mole fraction, %) alloys were prepared through tungsten arc-melting. The effect of Nb addition on the microstructures and mechanical properties were studied. The results show that a coarse fully lamellar (FL) microstructure is observed in the as-cast Ti-46Al-xNb alloys. At the same time, there are dendrite segregation of Al in the cast structure and the internal network segregation of Nb in the layer. XRD results indicate that Ti-46Al-xNb alloys are only composed of γ and α_2 phases. The results of compression test at room temperature show that the Ti-46Al-7Nb alloys exhibit superior mechanical properties, with ultimate compressive strength of 1 715 MPa and compressibility of 24.21%. Scanning electron microscopy (SEM) observation indicates that the fracture mode of Ti-46Al-xNb alloys is mainly brittle fracture.

Key words: TiAl-based alloy; Nb; microstructure; mechanical property

TiAl 基合金具有低密度、高比强度、高比刚度、良好的高温抗氧化性等优点, 因而成为一种最具潜力的新型轻质高温结构材料之一, 引起各国科学家及有关部门的极大关注^[1-6]。最近几年相关研究成果显著, 但是 TiAl 基合金的应用仍很多面临困难, 比如室温塑

性差, 850℃以上高温抗氧化能力不足等。XU 等^[7]对 Ti-Al-Nb 三元合金做了大量基础研究, 并绘制出含 8%Nb 和 10%Nb 的 Ti-(44-49)Al 的准二元相图。研究表明^[8-12]: 在 TiAl 基合金中添加 Nb, 能够显著提高其高温强度及抗氧化性, 同时 Nb 是 β 相稳定元素,

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

添加 Nb 可以扩大 β 相相区, 保留的 β 相对合金塑性的发挥是有利的。高铌 TiAl 基合金具有良好的高温性能, 代表着 TiAl 基合金的最新发展方向。

本文作者以 Ti-46Al 合金作为研究对象, 通过在合金中添加不同含量的 Nb, 研究 Nb 含量对 Ti-46Al-xNb(x=0,6,7,8,9)合金组织和性能的影响规律。

1 实验

实验用原材料为海绵钛(99.9%)、高纯铝块(99.99%)、铝铌中间合金(Nb-52.59%)。合金的名义成分为 Ti-46Al-xNb(x=0, 6, 7, 8, 9)。按照成分配比, 实验合金采用真空非自耗电弧熔炼法制备, 为保证合金成分均匀, 反复重熔 4 次并进行电磁搅拌, 最后得到 50 g 的纽扣锭。采用 LZ5 型离心铸钛机将纽扣锭浇注成棒状铸锭, 并线切割成实验用试样, 然后研磨和抛光。

实验采用 S-4700 型扫描电镜观察背散射电子显微组织(BSE)和能谱分析, 采用 D/max-B 型旋转阳极 X 射线衍射仪进行 X 射线衍射(XRD)实验。金相腐蚀液为 Kroll 溶液(5% HNO_3 +3% HF +92% H_2O , 体积分数)。采用 Instron-5500 万能材料实验机对 $d3\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的压缩试样进行室温压缩, 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维氏硬度值; 采用扫描电镜观察压缩断口形貌。

2 讨论与分析

2.1 相组成及显微组织分析

图 1 所示为不同 Nb 含量的 Ti-46Al-xNb 合金 XRD 谱。从图 1 可以看出, 不同 Nb 含量的 Ti46Al 合金组织均由 γ 相和 α_2 相组成。

图 2 所示为不同铌含量的 Ti-46Al-xNb 合金的 BSE 像, 从图 2 可以发现, 3 种衬度不同的组织。其中, 暗淡的组织呈狭长的片状, 宽度在 5~20 μm 之间, 随着 Nb 含量的增加, 暗淡的组织越来越多; 明亮的组织相互连接, 呈骨架状, 主要分布在片层晶团内部, 非常细小, 其宽度仅有几微米, 随着 Nb 含量的增加, 明亮的组织越来越多; 衬度介于前两者之间的为灰色的层片组织。在电弧熔炼纽扣锭的过程中, 由于持续不断地加热, 铸锭温度长时间处在 β 和 α 相区的温度

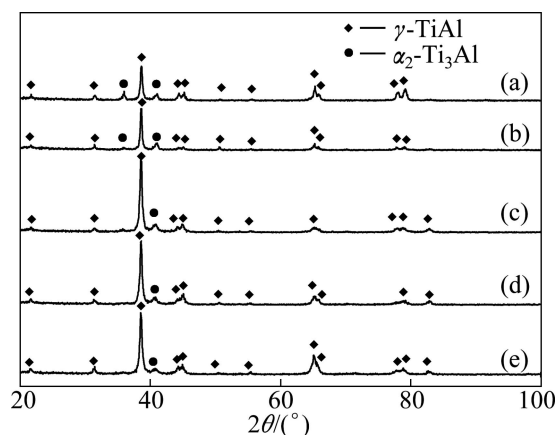


图 1 Ti-46Al-xNb 合金 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of Ti-46Al-xNb alloys: (a) Ti-46Al; (b) Ti-46Al-6Nb; (c) Ti-46Al-7Nb; (d) Ti-46Al-8Nb; (e) Ti-46Al-9Nb

范围内, 这就导致 α 晶粒的长大, 在随后的冷却过程中又转变成粗大的全层片晶团。

为了进一步确定合金中各元素的分布, 选用 Ti-46Al-8Nb 合金进行了能谱分析, 能谱分析结果如图 3 和表 1 所示。从 EDX 数据可以看出, 在黑色的组织中 Al 元素富集, Nb 元素贫乏, 为 γ 相; 在白色的组织中 Nb 元素富集, Al 元素贫乏; 在灰色区域中, Al 元素和 Nb 元素含量介于前两者之间, 为 α_2/γ 层片组织。

图 4 所示为含 8Nb 的 Ti-Al 准二元相图^[7]。从图 4 可以看出, Nb 元素的加入扩大了 β 相区的范围。根据实验结果可知, 本文作者所研究的合金沿着 β 相凝固路线: $L \rightarrow L+\beta$ 。析出的 β 相为 Al 元素贫乏而 Nb 元素富集的枝晶, 因此, β 相的析出势必将多余 Al 原子通过固液界面向液相中排出, 同时液相中的 Nb 原子也通过固液界面向 β 相扩散并析出新的 β 相。随着 β 相的不断析出, 液相中 Al 元素越来越富集, Nb 元素越来越贫乏, 因此, 最后在 β 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, 凝固的 β 枝晶通过 $L+\beta \rightarrow \alpha$ 包晶反应转变为 α 相。包晶反应会首先发生在 β 枝晶与液相接触的区域。这部分区域 Al 元素富集, 随后又转变为 γ 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 α 相扩散, Nb 沿着相反方向扩散, 这势必会导致 β 和 α 晶粒的界面处 Nb 富集而 Al 贫乏。随着包晶反应的不进行, 反应界面从枝晶间区域向枝晶

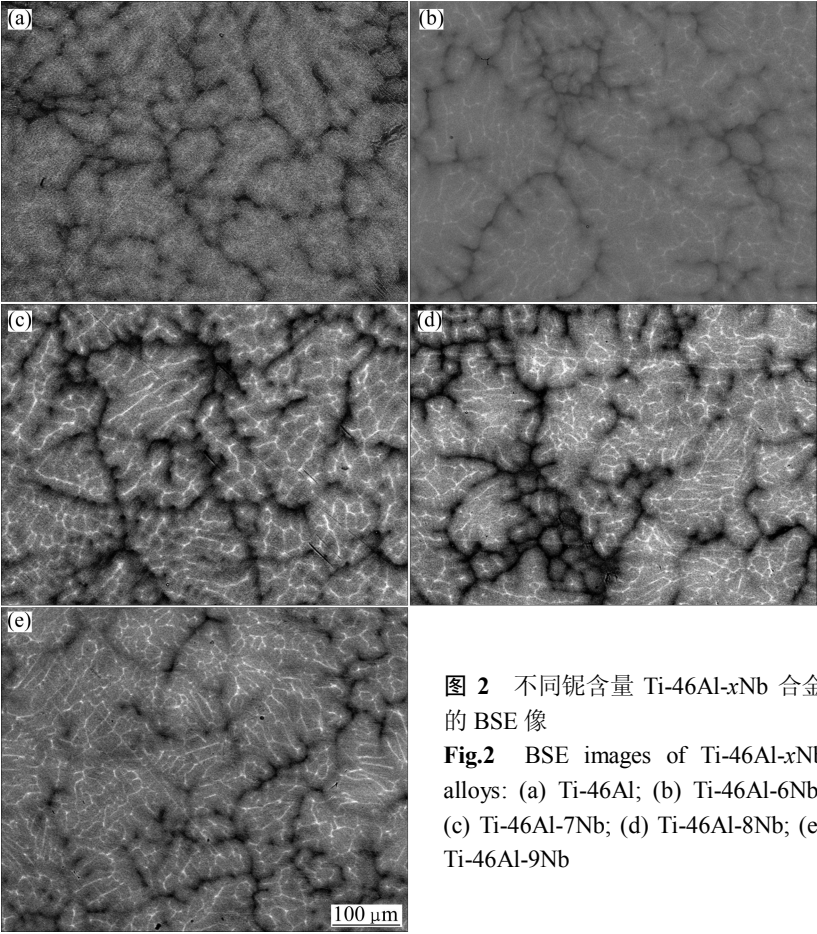


图 2 不同铌含量 Ti-46Al-xNb 合金的 BSE 像
Fig.2 BSE images of Ti-46Al-xNb alloys: (a) Ti-46Al; (b) Ti-46Al-6Nb; (c) Ti-46Al-7Nb; (d) Ti-46Al-8Nb; (e) Ti-46Al-9Nb

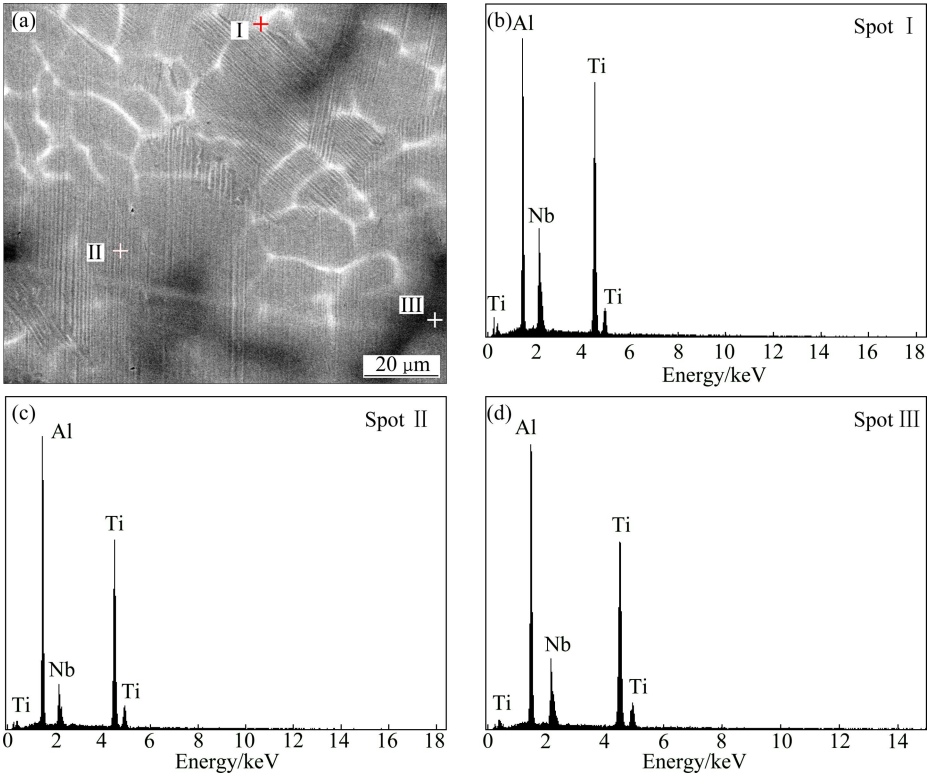
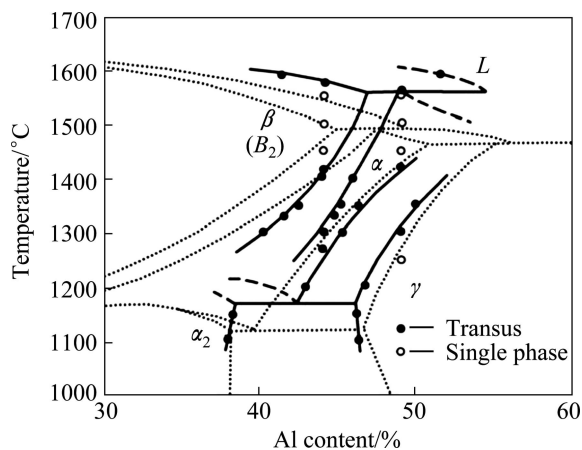


图 3 Ti-46Al-8Nb 合金形貌及能谱分析结果
Fig.3 Morphology (a) and EDX patterns ((b), (c), (d)) of Ti-46Al-8Nb alloy

表1 Ti-46Al-8Nb 合金的 EDX 分析结果

Table 1 EDX analysis results of Ti-46Al-8Nb alloy

Element	Spot I		Spot II		Spot III	
	w/%	x/%	w/%	x/%	w/%	x/%
Al	27.42	43.95	36.11	52.52	31.71	48.34
Nb	21.68	10.09	12.25	05.17	16.79	07.43
Ti	50.90	45.96	51.63	42.30	51.51	44.23

图4 含8%Nb Ti-Al 准二元相图^[7]Fig.4 Quasi binary phase diagram of Ti-Al with 8% Nb^[7]

臂推进,最后在 β 相枝晶臂中 Nb 元素富集、Al 元素贫乏,因而在 BSE 像中表现为白色的组织。 α 晶粒在随后的冷却过程中转变成 α_2/γ 层片组织,在 BSE 像中表现为灰色的层片组织。

2.2 室温压缩性能及断口形貌

图 5 所示为 Ti-46Al-xNb 合金的室温压缩应力—应变曲线。从图 5 可以看出,总压缩变形中弹性变形的区间很小,不到 1/5。当添加 Nb 后,屈服强度增加,达到 796 MPa,随着 Nb 含量的继续增加,屈服强度缓慢降低。从图 5 还可看出,从屈服到断裂过程中,抗压强度和应变都显著增加。Ti-46Al 的抗压强度为 1 709 MPa,当添加 Nb 后,抗压强度刚开始基本不变,随着 Nb 含量的继续增加,抗压强度开始下降,当成分为 Ti-46Al-9Nb 时,抗压强度只有 1 568 MPa。Ti-46Al 压缩率最大,为 26.02%,当添加不同含量的 Nb 后,压缩率均不同程度的下降。含 Nb 的 Ti-46Al-xNb(x=6, 7, 8, 9)合金中, Ti-46Al-7Nb 的压缩率最大,为 24.21%。

对不同 Nb 含量的 Ti-46Al-xNb 合金进行了显微硬度测试,测试结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, Ti-46Al 的显微硬度最大,为 372HV。当添加 Nb 后,

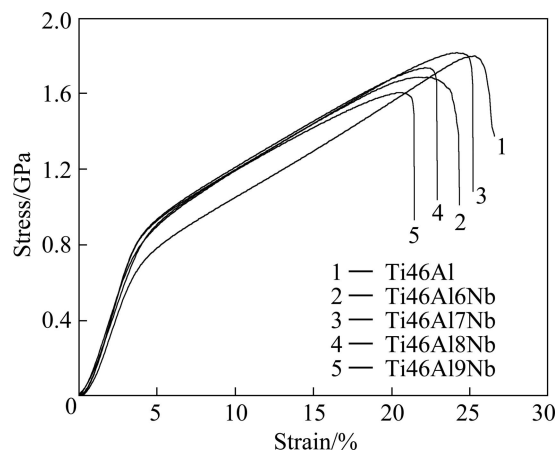


图5 Ti-46Al-xNb 合金的室温压缩应力—应变曲线

Fig.5 Room temperature compression stress—strain curves of Ti-46Al-xNb alloys

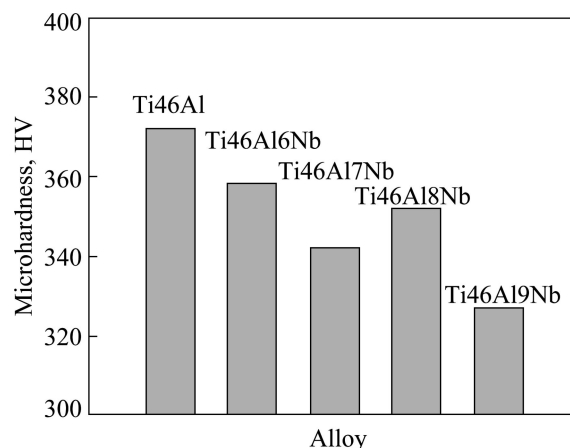


图6 不同 Nb 含量的 Ti-46Al-xNb 合金的显微硬度

Fig.6 Microhardness of Ti-46Al-xNb alloys

显微硬度值均出现下降。即随着 Nb 含量的增加,显微硬度逐渐下降,当合金成分为 Ti-46Al-8Nb 时,显微硬度随之增加,随着 Nb 含量的继续增加,显微硬度又下降。

图 7 所示为 Ti-46Al-xNb 合金断口形貌。从图 7 可以看出,在断裂面中几乎看不到任何塑性变形的痕迹,因此试样断裂类型为脆性断裂。

3 结论

1) Ti-46Al-xNb 合金的相组成均为 γ 相和 α_2 相;其显微组织均为粗大的全层片组织,且在 BSE 像中观察到暗淡的枝晶间组织和明亮的骨架状组织。暗淡的枝晶间组织富 Al 贫 Nb,明亮的骨架状组织富 Nb 贫 Al。

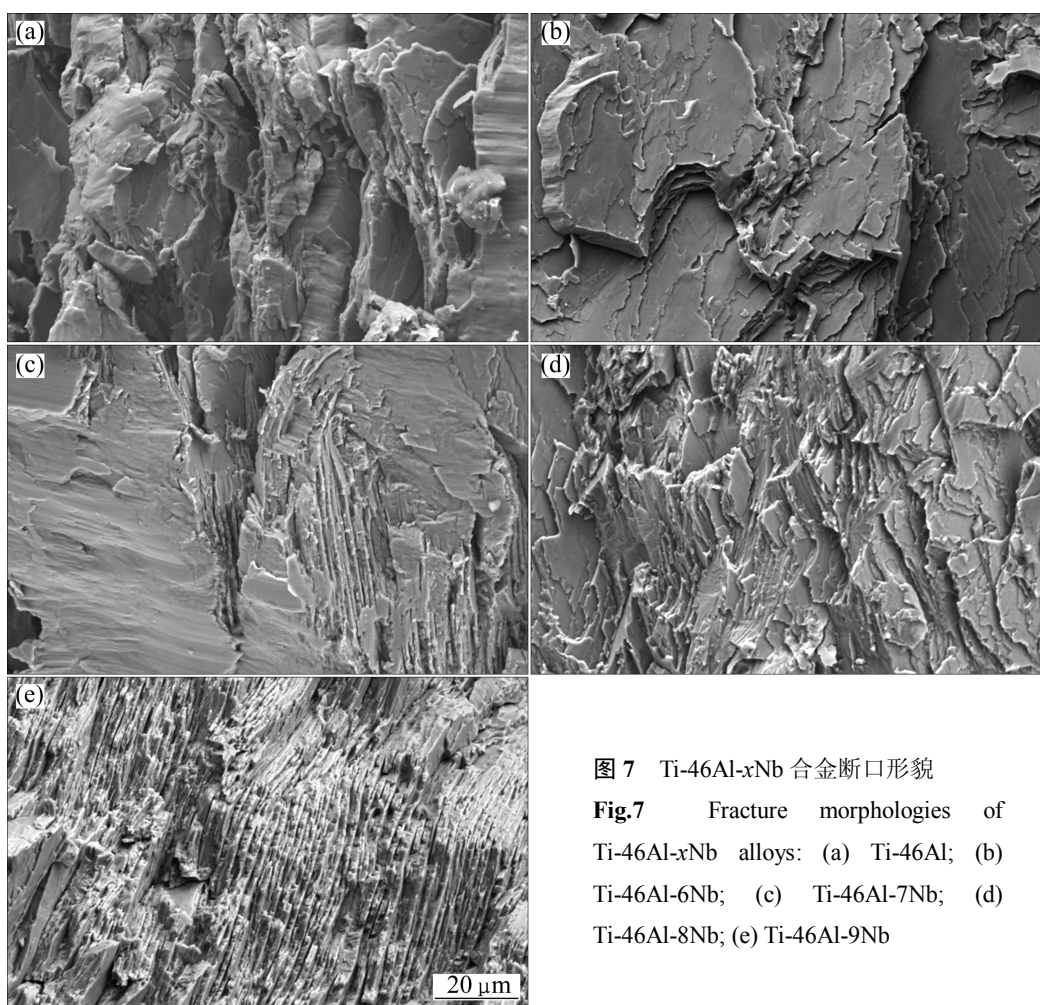


图 7 Ti-46Al-xNb 合金断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of Ti-46Al-xNb alloys: (a) Ti-46Al; (b) Ti-46Al-6Nb; (c) Ti-46Al-7Nb; (d) Ti-46Al-8Nb; (e) Ti-46Al-9Nb

2) 在 Ti-46Al-xNb 合金中, 随着 Nb 含量的增加, 屈服强度先增加再减小, 而抗压强度先是基本不变而后逐渐减少, 压缩率出现不同程度的下降, 显微硬度亦呈现下降趋势。添加 Nb 后, Ti-46Al-7Nb 合金具有较大的压缩率(24.21%)和抗压强度(1 715 MPa)。

3) Ti-46Al-xNb 合金的断裂类型为脆性断裂。

REFERENCES

- [1] CHEN Y Y, CHEN Y F, XIAO S L, KONG F T, TIAN J, XU L J. Research on the hot precision processing of TiAl alloys[J]. Materials Science Forum, 2009, 620/622: 407-412.
- [2] APPEL F, BROSSMANN U. Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2002, 11(2): 699-720.
- [3] ZHANG J, XIA K N. TiAl turbochargers for automobile application[J]. Materials Science Forum. 2009, 618-619: 559-562.
- [4] 张秋平. γ -TiAl 金属间化合物的研究进展[J]. 飞航导弹, 2007(8): 59-63.
- [5] ZHANG Qiu-ping. Development of gamma TiAl intermetallics[J]. Winged Missiles, 2007(8): 59-63.
- [6] 章德铭, 陈贵清, 韩杰才, 孟松鹤. γ -TiAl 基高温结构材料研究评述[J]. 中国稀土学报, 2005, 23(sl): 163-167.
- [7] ZHANG De-ming, CHEN Gui-qing, HAN Jie-cai, MENG Song-he. Review on studies of gamma TiAl-based high-temperature structural materials[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2005, 23(sl): 163-167.
- [8] 彭小敏, 夏长清, 王志辉, 黄珍, 王金惠. TiAl 基合金高温氧化及防护的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(6): 1116-1130.
- [9] PENG Xiao-min, XIA Chang-qing, WANG Zhi-hui, HUANG Zhen, WANG Jin-hui. Development of high temperature oxidation and protection of TiAl-based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(6): 1116-1130.
- [10] XU X J, LIN J P, WANG Y L, GAO J F, LIN Z, CHEN G L. Microstructure and tensile properties of as-cast Ti-45Al-(8-9)Nb-(W,B,Y) alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 414(1/2): 131-136.
- [11] 刘自成, 李书江, 张卫军, 林均品, 陈国良, Y W KIM. Nb 和 Al 对 γ -TiAl 基合金高温强度的影响[J]. 中国有色金属学报,

- 2000, 10(4): 470–475.
- LIU Zi-cheng, LI Shu-jiang, ZHANG Wei-jun, LIN Jun-pin, CHEN Guo-liang, KIM Y W. Effects of Al and Nb on high temperature strength of γ -TiAl based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 470–475.
- [9] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. TiAl 基合金的工艺显微组织力学性能关系[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 527–540.
- PENG Chao-qun, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui. Relationships among technologies, microstructures and mechanical properties of TiAl-based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 527–540.
- [10] LIN J P, XU X J, WANG Y L, HE S F, ZHANG Y, SONG X P, Chen G L. High temperature deformation behaviors of a high Nb containing TiAl alloy[J]. Intermetallics, 2007, 15(5): 668–674.
- [11] ZHANG W J, CHEN G L, APPEL F, NIEH T G, DEEVI S C. A preliminary study on the creep behavior of Ti-45Al-10Nb alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 315(1): 250–253.
- [12] RAINER G, ARNO B, HELMUT C, HEINRICH K, FRANK-PETER S. Structural characterization and tensile properties of a high niobium containing gamma TiAl sheet obtained by powder metallurgical processing[J]. Intermetallics, 2004, 12(3): 275–280.

(编辑 龙怀中)