

热处理工艺对变形 TiAl 板材组织和性能影响

郭 杰¹, 滕艾均^{1*}, 黄召阔¹, 钟 勇², 杨 柳²

(1. 鞍钢集团北京研究院有限公司钒钛研究院, 北京 102200; 2. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

摘 要: TiAl 基金属间化合物因具有轻质、高比强度和优异的高温性能等特点而受到国内外研究的广泛关注, 并应用于航空航天等关键领域, 但由于其本身的特征, 以至于在实际应用场景中受到了很大的限制。采用在不同相区进行热处理工艺制度的探索, 通过选取合适的热处理工艺, 结合室温力学性能和高温力学性能分析, 随着热处理温度的升高, 抗拉强度和屈服强度逐渐增加, 在 $\alpha+\beta$ 相区进行热处理具有最优的延伸率, 进一步结合室温和高温的显微组织和断口形貌进行了观察分析, 确定其裂纹扩展方式和断裂机制, 最终根据结果表明固溶温度为 1 370 °C 的热处理工艺下达到最优力学性能。

关键词: TiAl 合金; 热处理工艺; 组织; 力学性能; 裂纹; 断口形貌

中图分类号: TF823, TG115

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)02-0058-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.02.009

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Effect of heat treatment process on the structure and properties of deformed TiAl sheets

Guo Jie¹, Teng Aijun^{1*}, Huang Zhaokuo¹, Zhong Yong², Yang Liu²

(1. Vanadium Titanium Research Institute, Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 2. Chengdu Advanced Metallic Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China)

Abstract: TiAl based intermetallic compounds have attracted widespread attention of domestic to international researches due to their lightweight, high specific strength, and excellent high-temperature performance, and have been applied in key fields such as aerospace and aviation, etc. However, due to their inherent characteristics, their practical application has been greatly limited. By exploring the heat treatment process in different phase zones and selecting appropriate heat treatment parameters, combined with the analysis of room temperature mechanical properties and high-temperature mechanical properties of TiAl compounds, it is found that the tensile strength and yield strength of specimens gradually increase as the heat treatment temperature increases. The optimal elongation is obtained by heat treatment in the $(\alpha+\beta)$ phase zone. Further observation and analysis of the microstructure and fracture morphology of samples tested at room and high temperatures were conducted to determine the crack propagation mode and fracture mechanism. Finally, the mechanical properties were optimized after heat-treated at the solution temperature of 1 370 °C.

Key words: TiAl alloy, heat treatment process, structure, mechanical properties, cracking, fracture morphology

收稿日期: 2023-06-28

作者简介: 郭杰, 1991 年出生, 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究方向为钛合金板材制备及热处理工艺, E-mail: 18503131996@163.com; * 通讯作者: 滕艾均, 1989 年出生, 男, 河北黄骅人, 博士研究生, 主要研究方向为冶金全流程工艺控制及钒钛基新材料制备, E-mail: wdtaj2008@163.com。

0 引言

TiAl 作为一种金属间化合物, 是一种具备很强的结构性能的材料, 其密度只有高温合金的 $1/2$ ($\rho \approx 4.2 \text{ g/cm}^3$), 具有高比强度、高比刚度、高温抗氧化和蠕变等优异性能, 现阶段在航空航天等领域对轻量化提出了更高的要求^[1], 使其成为一种最具有潜质在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上替代高温合金运用在航空发动机的关键结构材料。但是由于这种材料本身具有本征脆性、塑性、机械加工性能较差等特点, 以至于在实际应用中受到了很大的限制^[2], 仅经过轧制的板材的力学性能较差, 很难应用于实际生产, 从其显微组织和力学性能之间的关系中可以知道晶粒细小、组织均匀的显微组织具有更好的强塑性。现有的研究表明细小的全层片组织最有可能在实际应用中取得成功, 由于细小的全层片组织在力学性能上表现更突出, 因此, TiAl 合金的研究致力于如何得到细小的全层片组织^[3]。而热处理在成形之前或者之后都能达到细化晶粒的效果, 并且对设备要求不高, 成本相对低廉, 效率高。通过适当的热处理工艺, 利用相变机制达到调节组织形貌、细化晶粒、促进显微组织等均匀化等目的, 从而获得良好的综合力学性能。所以固溶温度、时间等参数对其都有重要的影响。对推动 TiAl 合金的工业化生产具有重要的意义。

笔者以轧制完成的 TiAl 金属间化合物板材为原材料, 采用不同的热处理工艺制度, 研究不同的固溶温度和时间对 TiAl 金属间化合物板材的组织 and 性能的影响^[4], 从而获得 TiAl 金属间化合物板材最佳的热处理工艺。

1 试验材料与方法

试验使用的原材料是名义成分为 Ti-44Al-4Nb-1Mo-0.5B 的 TiAl 合金板坯, 尺寸为 $25 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$, 将此板坯进行包套轧制, 采用 TC4 作为包套材料, 初始轧制温度为 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温时间 30 min , 经过多道次、小变形量(道次变形量: $5\% \sim 6\%$)轧制到 5 mm 。图 1 为轧制完成后的 TiAl 板材。

根据 Ti-Al 相图, 热处理温度区间选择在 $\alpha+\gamma$ 、 $\alpha+\beta$ 、 β 相区进行热处理, 由于 $\alpha+\gamma$ 相区温度区间较大, 所以选取 1150 、 1200 、 $1240 \text{ }^\circ\text{C}$ 三个热处理温度, 保温时间 1 h ; $\alpha+\beta$ 相区选取 1270 、 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 两

个热处理温度, 保温时间 30 min ; β 相区 1330 、 $1370 \text{ }^\circ\text{C}$ 两个热处理温度, 保温时间 10 min , 随后进行 $850 \text{ }^\circ\text{C}/8 \text{ h}$ 时效稳定化处理, 最后在拉伸试验机上进行力学性能的测试试验, 在扫描电镜上进行微观组织观察^[5]。

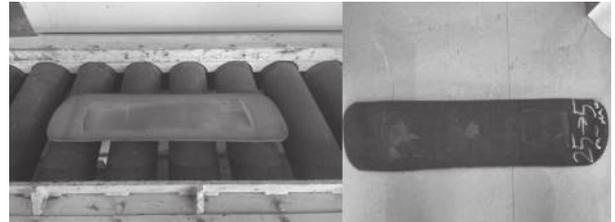


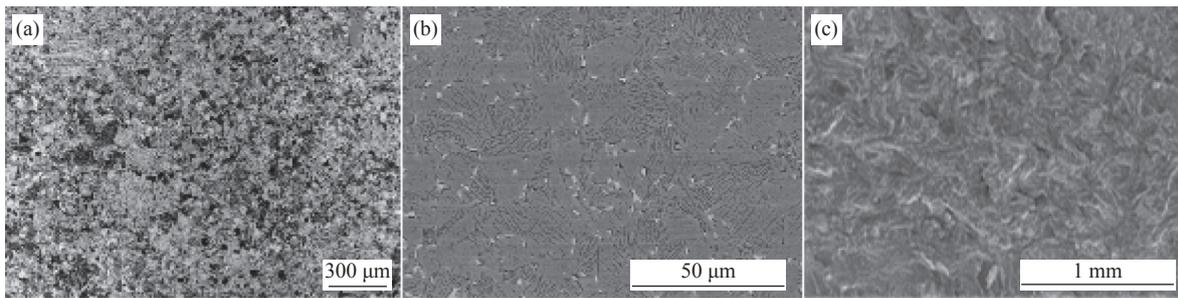
图 1 轧制完成后的 TiAl 板材
Fig. 1 TiAl Plate After Rolling

2 试验结果与分析

2.1 显微组织分析

在轧制后, 对板材进行组织观察, 图 2(a) 为 TiAl 合金在轧制后的金相组织照片, 从金相观察可以发现, 在其显微组织中不存在沿轧制方向晶粒拉长现象, 然而, 在此条件下进行轧制所得板材的组织为近全层片组织。其全片层晶团尺寸在几十微米至一百微米, 在全片层晶粒边界上弥散分布着细小等轴 γ 晶粒。图 2(b)、(c) 为所得 TiAl 基金属板组织的背散射照片及其室温拉伸断口形貌的扫描电镜照片。可以看出, 所得 TiAl 板材中主要为双态组织, 在晶粒边界还含有微量的 β 相。对制备的 TiAl 合金板材进行室温拉伸的过程中, 发现其断裂形式表现为脆性断裂, 断口形貌为脆性断口^[6]。

如图 3 所示, 经过不同相区进行热处理试验, 得到四种典型的组织, 分别是近 γ 组织 (NG)、双态组织 (DP)、近层片 (NL) 和全层片组织 (FL), 通过网格法测量, 在 $\alpha+\gamma$ 相区进行热处理后, 随着温度的升高, γ 相的体积分数分别为 82% 、 68% 、 59% , 其平均晶粒尺寸为 $40 \text{ }\mu\text{m}$, α 相的体积分数分别为 18% 、 32% 、 41% , 其平均晶粒尺寸为 $7 \text{ }\mu\text{m}$; 在 $\alpha+\beta$ 相区进行热处理后, γ 相的体积分数分别为 49% 、 21% , 其平均晶粒尺寸为 $30 \text{ }\mu\text{m}$, 层片体积分数分别为 51% 、 79% , 其平均晶粒尺寸为 $20 \text{ }\mu\text{m}$; 在 β 相区进行热处理后, γ 相的体积分数分别为 13% 、 0 , 晶粒尺寸为 $7 \text{ }\mu\text{m}$, 层片体积分数分别为 87% 、 100% , 其晶粒尺寸分别为 $50 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $80 \text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) 金相组织; (b) 组织背散射照片; (c) 断口扫描照片

图 2 TiAl 板材轧制之后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TiAl plate after rolling

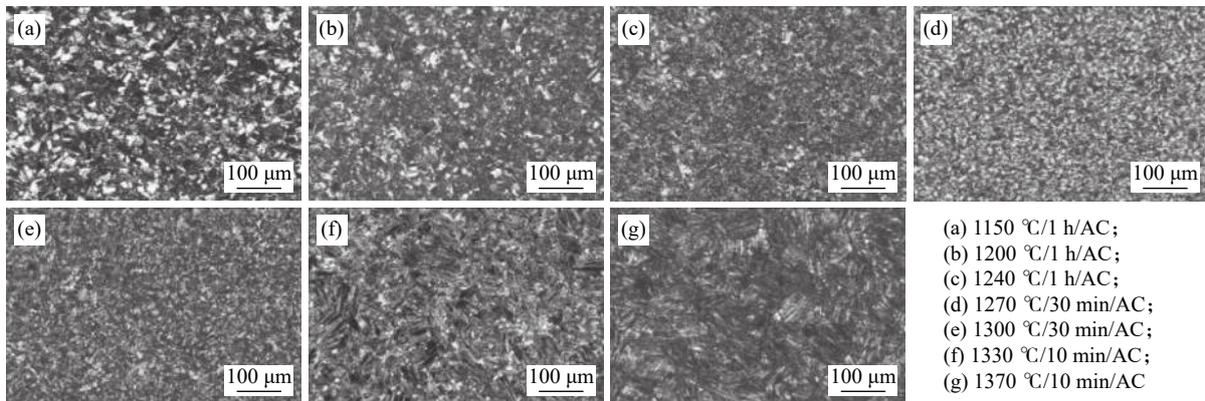


图 3 TiAl 板材经过不同相区热处理得到的显微组织

Fig. 3 Microstructures of TiAl plate after heat treatment in different phase zones

2.2 室温力学性能分析

图 4 为不同的板材热处理工艺下的力学性能对比,从图 4 中可以看出,随着热处理温度的升高,组织中的层片占有比例不断升高,从近 γ 组织到全层片组织,抗拉强度从 680 MPa 升高到 783 MPa,屈服强度从 550 MPa 升高到 641 MPa;对于延伸率而言,在 $\alpha+\beta$ 相区进行热处理,得到的细小双态组织的室温延伸率最好,分别达到 4.3%、4.8%,近 γ 组织的室温延伸率最低,仅为 1.1%,近层片和全层片组织的室温延伸率分别为 3.1% 和 2.8%。随着热处理温度的升高,组织中的 β 相减少,同时在 γ 相边缘形成了 $\alpha_2+\gamma$ 层片组织;由于 β 相为 bcc 结构,具有较多可独立运动的滑移系,可明显减少 TiAl 合金内部位错的滑移阻力,在一定程度上达到了软化效果,所以 β 相的不断减少,逐渐产生了层片组织,导致强度不断升高,且塑性较差;另一方面,合金从近 γ 组织到双态组织的变化,当 γ 晶粒尺寸不断减小,室温强度不断增大,随着片层组织进一步增加,近层片和全层片组织的强度又有了相应的增加,所以在 β 相区 1370 °C 条件下进行热处理时,材料可以在有较好

延伸率的同时达到最优的室温抗拉强度与屈服强度。

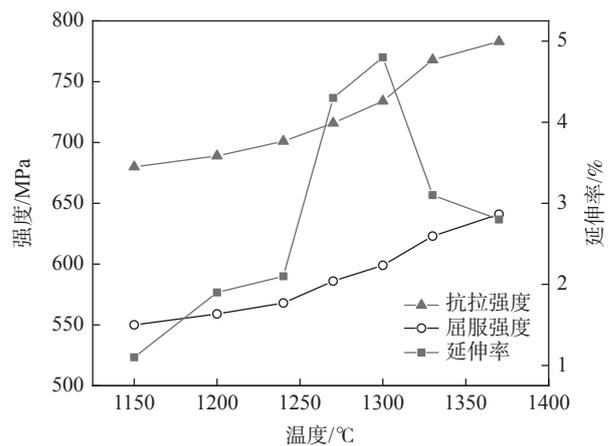
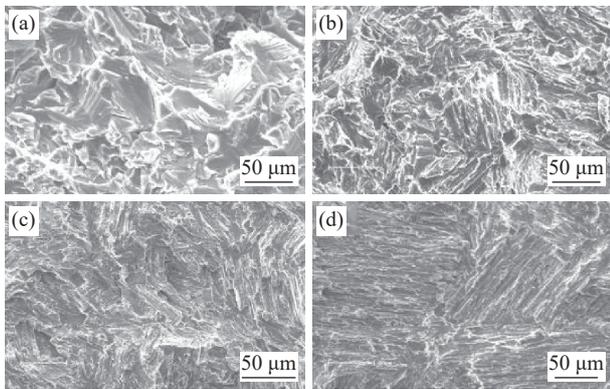


图 4 TiAl 板材室温力学性能对比

Fig. 4 Comparison of mechanical properties of TiAl plate at room temperature

图 5 为不同热处理条件下室温断口观察情况,如图 5(a)所示,可以发现通过 $\alpha+\gamma$ 相区热处理得到的近 γ 组织的断口比较均匀光滑平滑,具有花纹条状的形貌特征, γ 晶粒的断裂方式主要为脆性断裂,在晶界边缘的变形量相对较大。如图 5(b)所示,在

$\alpha+\beta$ 相区热处理后得到的双态组织主要以穿晶断裂和沿晶断裂两种断裂方式进行裂纹扩展: 沿着 γ 晶粒的脆性断裂和与层片方向平行的脆性断裂为穿晶断裂。如图 5(c)、(d) 所示, 发生在 γ 、 α_2/γ 片层界面和 α_2/γ 的晶界处的断裂方式为沿晶断裂, 微裂纹在片层界面或晶界处形核。在 β 相区热处理后得到的近层片和全层片组织的断裂主要包括过片层断裂和层间分离两种裂纹扩展方式的穿晶断裂, 结合对断口的组织观察和测算层片的体积分数, 可以得到层片中密集的层片接口随着层片的体积分数的增加很大程度上使得位错的滑移受到了阻碍, 导致抗拉强度和屈服强度得到增加, 同时晶粒逐渐减小, 细化的层片组织可以得到更高的抗拉强度, 一方面 TiAl 合金的强度随着层片中晶粒的增多而增大, 另一方面晶粒得到细化可以有效减少位错在滑移面上的滑动长度和位错塞积, 使得滑移面交界和晶界处的应力集中得到降低, 减少裂纹形核, 由位错塞积引起的裂纹扩展受到抑制, 所以细小的晶粒要比大晶粒承受更多的断裂应力^[7]。在全层片组织中, 层片间距在很大程度上将改变 TiAl 合金的强度和塑性。层片间距增大使位错运动阻碍减少, 造成延伸率的降低和屈服强度增高。



(a)1240 °C; (b)1300 °C; (c)1330 °C; (d)1370 °C
图 5 不同热处理温度下室温拉伸断口

Fig. 5 Room temperature tensile fracture surfaces after heat treatment at different temperatures

2.3 高温力学性能分析

对不同热处理后的 TiAl 板材进行 750 °C 高温拉伸, 得到如图 6 所示结果, 不同的显微组织显示出较大差别的高温强度, 抗拉强度和屈服强度依然是随片层晶粒体积百分比的增多而增大, 其中抗拉强度由 446 MPa 升高到 515 MPa, 屈服强度由 568 MPa 升高到 603 MPa, 总体来看, 抗拉强度、屈服强度略

有升高, 但变化不明显。由于宏观可以看到基体发生明显的塑性变形, 延伸率得到显著提高。观察 $\alpha+\gamma$ 相区热处理得到的近 γ 组织断口, 发现其与室温断裂形势没有明显差异, 仍然以 γ 晶粒脆性断裂为主, 但是没有花纹状的外貌特征(图 7(a)), 在 $\alpha+\beta$ 相区热处理后得到的双态组织也是如此(图 7(b))。在 β 相区热处理后得到的近层片和全层片组织依然可以观察到由穿晶断裂所造成的片层间解理或断裂, 但是片层之间的结合力下降, 位错容易开动, 造成抗拉强度下降(图 7(c)、(d))。

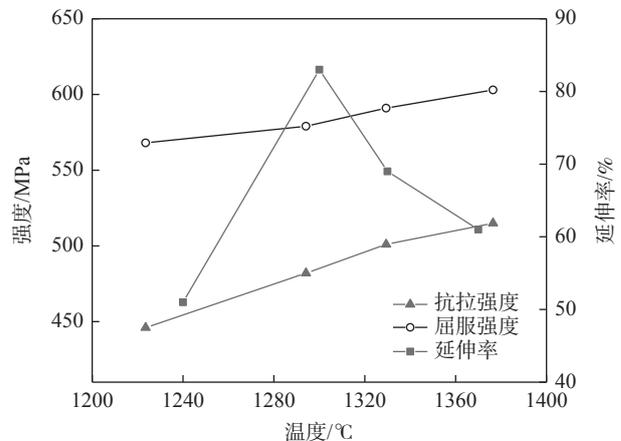
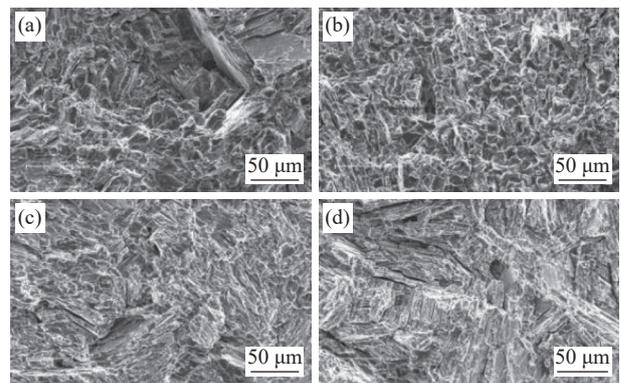


图 6 不同热处理温度下 750 °C 高温力学性能
Fig. 6 Mechanical properties at 750 °C after heat treatment at different temperatures



(a)1240 °C; (b)1300 °C; (c)1330 °C; (d)1370 °C

图 7 不同热处理温度下 750 °C 高温拉伸断口形貌
Fig. 7 High temperature tensile fracture surfaces at 750 °C after heat treatment at different temperatures

组织观察发现无论近 γ 组织还是全层片组织中发生动态再结晶现象, 在断口附近出现了一些孔洞, 它们呈带状非连续沿轴向分布, 这些孔洞大多数是互相分离的, 呈多边形, 以线性排列在一起。孔洞往往存在于晶界处, 特别易存在于 γ 晶粒与片层晶粒或片层与片层晶粒之间晶界组成的晶隅处。由图 8 可以看到, 孔洞在层片晶团与 γ 晶粒的界面形

核长大,这归因于 γ 晶粒在高温拉伸时易在层片晶界处产生滑移,而层片晶团的晶界转动则相对困难,二者非协调变形造成在晶隙处形成孔洞,伴随着层片晶团的拉长,他们将平行于拉力轴排列,最终空洞相互连通,导致材料断裂。

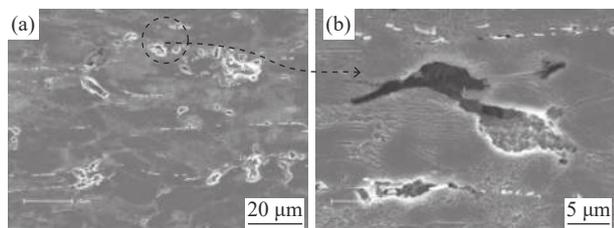


图8 750 °C 高温拉伸时 TiAl 晶间形成的孔洞(图(b)为图(a)局部放大图)

Fig. 8 Voids formed among TiAl grains during high-temperature stretching at 750 °C (Figure (b) is a partially enlarged view of figure (a))

综上所述,不同显微组织的 TiAl 合金具有大致相同的高温变形机理。孔洞的形成对 TiAl 合金高温变形直至断裂的整个过程起到较大的作用。由于孔洞多存在于 γ 晶粒与片层晶粒之间的晶隙处,这种晶隙上相交汇的晶体在力学性能方面存在较大的差异,导致产生晶界变形不协调的现象,所以双态组织呈较低的高温强度。相比较,全片层组织在高温拉伸中,除片层弯曲来适应应力作用外,只有发生动态再结晶产生 γ 晶粒之后才能在 γ 相晶粒和片层晶粒之间形成晶隙。从上述讨论来看,全片层组织试样在高温拉伸过程中形成孔洞较双态组织要迟缓,

同时片层晶团内片层接口对变形有阻碍作用,可以进一步提升高温强度,故全片层组织表现出优异的高温强度。

3 结语

1)经过热处理的 TiAl 板材,其力学性能得到了明显变化,其中随着温度的升高,室温抗拉强度逐渐升高,屈服强度也逐渐升高,1 370 °C 热处理条件下分别为 783 MPa 和 641 MPa; 延伸率方面,在 $\alpha+\beta$ 相区进行热处理,使合金中形成双态组织时延伸率最大,大约达到 4.8%; 在 β 相区进行热处理,合金中产生层片组织,使得内部滑移系减少,导致延伸率有所减少,大约达到 3.2%,塑性因此降低。由此,在 1 370 °C/10 min+850 °C/8 h 热处理条件下能获得最佳力学性能。

2)室温断裂时, TiAl 合金在近 γ 组织的断口为脆性断裂,双态组织中裂纹扩展主要以穿晶和沿晶断裂两种方式,在近层片以及全层片组织中主要是穿晶断裂。

3)对于 750 °C 高温力学性能,与室温力学性能相比较,抗拉强度逐渐降低,屈服强度变化不大,延伸率得到显著提高,对于不同组织的合金,其高温变形机理大致相同,其中对其影响最大的因素为组织中的孔洞的形成,孔洞的形成对高温变形直至断裂的整个过程都起到较大的作用。

参考文献

- [1] Wang Qingjiang, Liu Jianrong, Yang Rui. Present situation and prospect of high temperature titanium alloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34: 1-25.
(王清江, 刘建容, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. *航空材料学报*, 2014, 34: 1-25.)
- [2] Liu Jiageng, Han Jingtao, Liu Jing, *et al.* Effect of cold rolling and annealing processes on the interface bonding properties of titanium aluminum composite plate[J]. *Hot Working Process*, 2018, 47(12): 74-77.
(刘嘉庚, 韩静涛, 刘靖, 等. 冷轧及退火工艺对钛-铝复合板界面结合性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(12): 74-77.)
- [3] He Shuangzhen, He Yuehui, Huang Boyun, *et al.* Research progress on refining cast TiAl alloys through direct heat treatment[J]. *Material Introduction*, 2003, 17 (6): 298-301.
(何双珍, 贺跃辉, 黄伯云, 等. 直接热处理细化铸态 TiAl 合金的研究进展[J]. *材料导报*, 2003, 17(6): 298-301.)
- [4] Li Chenggong. *Aerospace materials*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 83.
(李成功. *航空航天材料*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 83.)
- [5] Wasgs, Foecket. Deformation and fracture in micronaminates[J]. *Thin Solid Films*, 1996, 286(1/2): 1-31.
- [6] Dong Chengli, Yu Huichen, Jiao Zehui, *et al.* High temperature bottom cycle fatigue performance and failure mechanism of a TiAl alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(5): 77-82.
(董成利, 于慧臣, 焦泽辉, 等. 一种 TiAl 合金高温底循环疲劳性能及失效机理[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(5): 77-82.)
- [7] Liu Tao, Zhou Wancheng, Zhou Liang, *et al.* Preparation of Al_3Ti intermetallic compounds by mechanical alloying and heat treatment[J]. *Material Introduction*, 2011, 25(22): 67-69.
(刘涛, 周万成, 周亮, 等. 机械合金化与热处理制备 Al_3Ti 金属间化合物[J]. *材料导报*, 2011, 25(22): 67-69.)