

特约专栏

TiAl 金属间化合物工程实用化研究与进展

张 继, 仲增镛

(钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100083)

摘 要: 回顾了钢铁研究总院在提高 TiAl 金属间化合物合金可靠性和部件制备技术两方面的研究结果, 介绍了已开展的应用研究及减重效果研究, 并对 TiAl 合金今后的发展做了简要评述。

关键词: TiAl 合金; 工艺技术; 组织控制; 力学性能; 工程应用

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)02-0009-05

Research and Development of TiAl Intermetallics-Based Alloys

ZHANG Ji, ZHONG Zengyong

(High Temperature Materials Division, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper reviews the research and development, as well as the application, of TiAl intermetallics alloys based on the work in China Iron and Steel Research Institute Group. The road ahead is also discussed briefly.

Key words: TiAl alloys; process technology; microstructure control; mechanical properties; commercial applications

1 前 言

钛铝金属间化合物作为低密度高温结构材料应用于航空、航天及车用发动机将通过结构减重提高发动机的工作效率, 具有重要的技术推动作用。与传统高温合金材料以固溶强化、弥散强化等方法获得优异的高温力学性能不同, TiAl 金属间化合物的高温强度源于自身原子长程有序的排列和特殊的结合键。但同时这种长程有序的结构中可开动的滑移系数目有限、超结构位错柏氏矢量大、位错交滑移困难等因素使其室温下的拉伸塑性和断裂韧性较低, 解决 TiAl 金属间化合物室温脆性问题是其实用化的前提^[1]。上世纪 80 年代发现通过调整 Ti/Al 原子比由化学配比偏向富 Ti、即在 γ -TiAl 相中引入适当比例的 α_2 -Ti₃Al 相而形成 TiAl 基双相合金, 再施以 Cr, V, Mn 等元素合金化和热机械处理细化组织, 显著地改善了 TiAl 合金的室温塑性^[2-3], 从而, 发展出一系列两相 TiAl 合金, 并有针对性地开展工艺、组织、性能研究, 其中钢铁研究总院开发的 Ti-46.5Al-2.5V-1.0Cr 合金较好地解决了 TiAl 合金的室温脆性问题^[4]。

TiAl 金属间化合物合金的成形, 可采取类似于钛合金的精密铸造和接近于镍基高温合金的热机械加工。但其铸造时存在熔体的化学活泼性强、重力压头小、充型流动性不高等问题。其变形合金所用铸锭一般具有粗大的层片组织, 其中不同取向的层片团变形抗力差异较大, 热塑性变形能力有限。许多研究表明, TiAl 合金的力学性能对其组织状态十分敏感^[5]。因此, 其工程应用需要在现有热成形技术基础上进行工艺创新, 并且需要在这些工艺过程中形成有利的组织。

TiAl 合金工程实用化的关键在于其可靠性和工艺成熟度, 本文介绍了针对铸造和变形 TiAl 合金分别开展的成分-工艺-组织-性能关系研究所取得的成果, 根据应用研究进展评述结构减重可以产生的技术推动效果, 并对 TiAl 合金材料与工艺技术的发展趋势进行了展望。

2 提高变形钛铝合金可靠性的研究

2.1 解决 TiAl 合金塑性、韧性反常关系的途径

研究表明, 变形 TiAl 合金晶粒尺寸细小的双态组织可以具有高的室温拉伸塑性, 但断裂韧性一般却较低; 而层片团尺寸在 200 μm 以上的全层片组织室温拉伸塑性较低, 但断裂韧性却比较高^[3], 这样使得这两种典型组织的 TiAl 合金很难具有工程应用价值。

收稿日期: 2009-11-30

基金项目: 科技部 973 计划项目(2007CB613304)

通信作者: 张 继, 男, 1961 年生, 教授

采用增加稳定 β 相元素含量的方法,引入高温 β 相控制 α 相长大,得到层片团尺寸在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的全层片组织,其室温塑性有所提高,断裂韧性略有下降^[6]。本研究对锻造后的 Ti-46.5Al-2.5V-1.0Cr 合金首先在略低于共析线温度热处理得到等轴晶粒近 γ 组织,然后再加热到 α 单相区温度,短时保温冷却后得到了层片团尺寸小于 $100 \mu\text{m}$ 的全层片组织,这种细小全层片组织具有较好且均衡的室温拉伸塑性、断裂韧性和高温强度性能^[7]。因而,得到细小全层片或近全层片组织是克服 TiAl 合金塑性、韧性的反常关系,从而提高其可靠性的重要技术途径。

2.2 均匀细化变形 TiAl 合金组织的工艺

影响变形 TiAl 合金可靠性的另一重要因素是其组织的均匀性,尤其是当推动变形 TiAl 合金的工程应用需要扩大锭型时。一般认为,增加锻造开坯的变形量是改善材料组织均匀性最有效的工艺途径,对 TiAl 合金采用多火次锻造可以改善组织的均匀性,但变形坯中仍有许多残余层片结构^[8]。分析认为,这是因为分步锻造总的变形量不够大和变形量分配不合理。通过数值模拟和实验相结合的方法研究发现,当采用 $60\% + 62.5\%$ 两步近等温锻造时,锻坯中均匀变形区体积分数达到 90% ,均匀变形区内层片组织破碎完全,变形组织为再结晶的细小近等轴 γ 晶粒和少量 α_2 晶粒^[9](见图 1)。这种均匀的变形组织可为随后通过热处理获得均匀的热处理组织和稳定的力学性能提供坚实的保证。

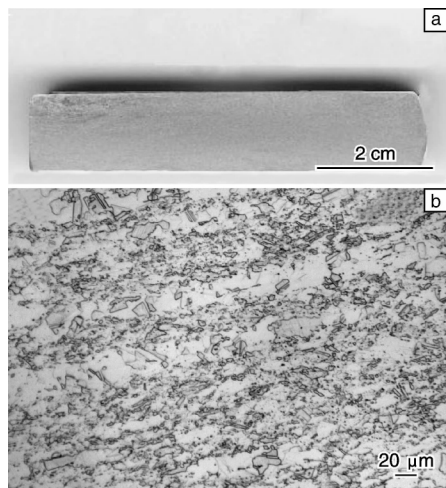


图 1 60% + 62.5% 两步锻造 TiAl 合金锭坯的宏观组织(a)和均匀变形区微观组织(b)

Fig. 1 Macro (a) and microstructures (b) in the 60% + 62.5% two-step forged TiAl pancake

挤压过程中坯料承受三向压应力,可以产生较大的塑性变形而不易开裂,是有利于较大尺寸 TiAl 合金铸锭

获得理想开坯效果的工艺方法。将所建立的流变应力本构模型和变形组织预报模型嵌入商业化有限元模拟软件 Deform 3D,对 TiAl 合金挤压工艺进行了预测和分析,得出了有利于应变均匀的模具半锥角。对不同挤压比挤压后应变场模拟结果表明,在模具半锥角为 60° ,初始变形温度约 1100°C ,挤压速度 15 mm/s 条件下,挤压比达到 6 时可以在挤压棒材中形成较均匀的应变场。但综合考虑温度场和应变速度场对 TiAl 合金动态再结晶的影响,直径在 200 mm 以上 TiAl 合金铸锭挤压开坯的挤压比应超过 $10^{[10]}$ 。对采用真空自耗方法制备的 200 mm 直径 Ti-46.5Al-2.5V-1.0Cr-0.3Ni 合金锭,其挤压比达 14 的挤压开坯实验,得到了冶金质量良好的棒材,解剖进行组织观察发现,宏观流线均匀,微观为近 γ 组织,晶粒均匀细小约 $20 \sim 30 \mu\text{m}$,且沿挤压方向略被拉长(见图 2)。可见,挤压比达到 14 可以实现理想的开坯效果,为下一步研制锻造航空发动机压气机叶片和航天用小尺寸整体叶盘奠定了坚实的基础。

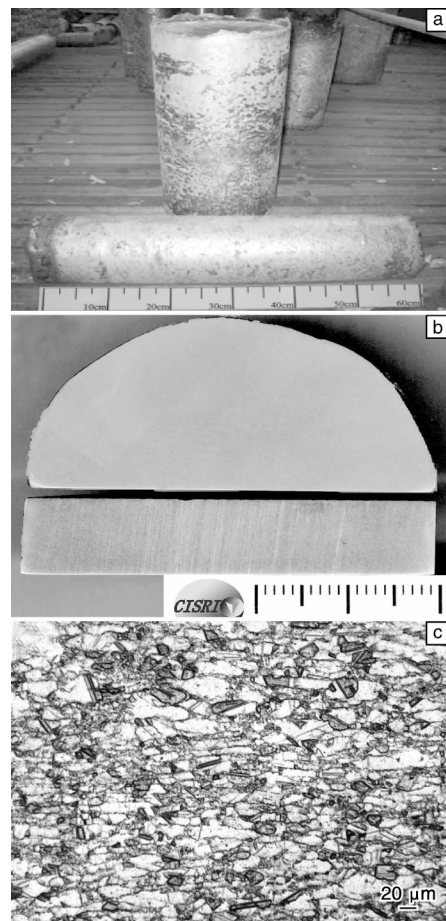


图 2 真空自耗法制备的 200 mm 直径 TiAl 合金锭(a)和挤压比 14 的棒材宏观(b),微观组织(c)

Fig. 2 TiAl ingots (a) prepared by consumable arc melting, macro (b), and microstructures (c) in the extruded rod

2.3 添加稀土改善变形 TiAl 合金层片组织的均匀性

变形 TiAl 合金获得细小全层片或近全层片组织的热处理温度均高于或接近 α 单相区温度, α 相晶粒长大难以控制, 会影响层片组织的层片团尺寸和均匀性。研究发现, 添加稀土元素 Gd 有利于层片团组织的均匀细化, 且析出相包括高熔点的 Gd-Al 中间相和少量 Gd 氧化物, 其中 Gd-Al 中间相在热加工和热处理过程中有溶解和再析出, 可以被分散、细化(见图3)。添加 Gd 的 TiAl 合金经 1 300 $^{\circ}\text{C}$ /2 h/AC 热处理可以获得层片团尺寸均匀、平均为 40 μm 的近层片组织, 其室温拉伸强度 705 MPa, 塑性达到 3.5%。可见, 添加稀土元素 Gd 不仅有助于得到均匀细小的层片组织, 且有可能进一步提高变形 TiAl 合金的力学性能。

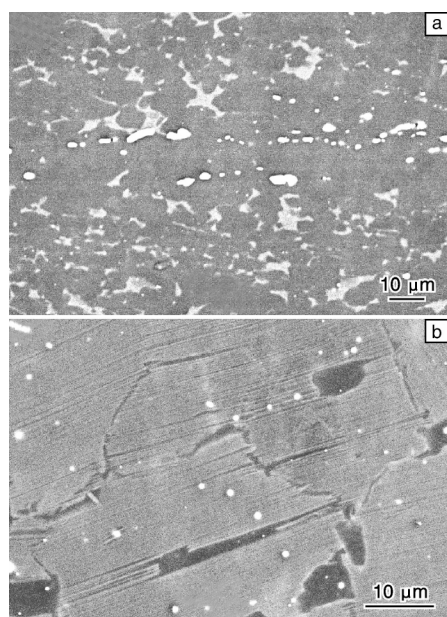


图3 添加 Gd 的 TiAl 合金锻造态(a)和 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 热处理组织中析出相的背散射电子像(b)

Fig. 3 Back-scattering images of forged TiAl alloy (a) with adding and precipitate (b) in sample annealed at 1 300 $^{\circ}\text{C}$

3 铸造钛铝合金室温塑性的改善

3.1 细化铸造 TiAl 合金组织的热处理方法

铸造工艺具有近净成形的优势, 是 TiAl 合金较具工程应用价值的成形方式, 但通过细化铸造 TiAl 化合物组织来提高其室温塑性的难度较大。添加 TiB_2 变质处理产生的晶粒细化效果明显, 但 TiB_2 粒子却增加了材料的脆性^[11]。所以热处理细化晶粒和形成有利的铸态组织是铸造 TiAl 合金实用化的重要前提。

研究发现, 微量 Ni 可使 TiAl 合金的 γ 单相区在共析温度附近向富 Ti 方向扩大, 从而促进铸态层片组织

在共析线温度发生分解。由于这种分解是层片的分段粗化并重结晶等轴化的过程, 从而可以细化铸态组织^[12]。然后再将得到的近 γ 组织重新加热到 α 单相区温度短时保温后冷却, 利用 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变形成细小层片团的 γ/α 层片结构, 冷却后即可得到铸造钛铝合金细小全层片组织^[13]。这种细小层片组织的铸造 TiAl 合金的室温塑性可以达到 3.0%, 但由于其层片间距较宽, 拉伸强度不够高。

3.2 层片组织力学性能各向异性的利用

TiAl 合金凝固过程中 α 相柱状晶的择优生长方向是 $[0001]$, 在随后的冷却过程中是 γ 相按照 $\langle 110 \rangle // \langle 1120 \rangle \parallel \{111\} // (0001)$ 取向关系、沿 α 相的 (0001) 惯习面析出形成层片结构, 而在铸造的板状部件试样中, 柱状晶是垂直于表面向内生长, 则最终得到的层片组织将会平行于板片的表面^[14]。根据 TiAl 合金 PST 晶体研究的结果^[15], 这种层片择优取向的铸造 TiAl 合金在平行于板片表面方向应力作用下, 有可能具有良好的拉伸塑性与强度匹配。通过控制合金的 Ti/Al 原子比和凝固冷却速度得到了全柱状晶, 其中的层片是平行于板片表面的铸态组织(图4)^[16], 并实验得出了可以消除铸造缺陷、同时保持层片组织形貌和取向的热等静压制^[17]。从板片中切取标准试样、沿与层片平行方向施加载荷进行力学测试, 结果表明, 这种择优取向层片组织相比无取向的层片组织具有明显的强韧性优势和可观的室温塑性, 且综合性能优异(见表1, 表2)。近年, 已在增压器涡轮叶片和工业燃机叶片缩比件中实现这种平行表面的层片组织设计, 提高了这些部件的可靠性。

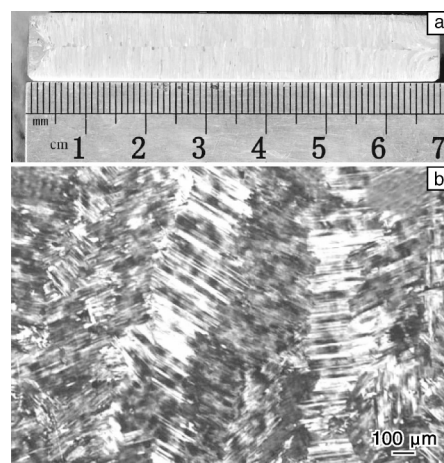


图4 平行于铸态 TiAl 合金板片表面择优取向层片组织的宏观(a)和微观(b)组织

Fig. 4 Macrophoto (a) and microstructure (b) of lamellar structure with preferred orientation parallel to surface of forged TiAl Plate

表 1 沿与层片平行方向施加载荷的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of forged TiAl plate loaded parallel to laminated structure

Properties	Test temperature/°C		
	22	800	850
Tensile strength R_m /MPa	522	575	522
Elongation A /%	2.0	8.0	26.7

表 2 沿与层片平行方向施加载荷的蠕变和疲劳性能

Table 2 Creep and fatigue properties of forged TiAl plate loaded parallel to laminated structure

Properties	Condition	Results
Notch tensile strength/MPa	22 °C/ $K_t = 3$	σ_{bH}
		$q_t(\sigma_b/\sigma_{bH})$
Creep rupture life/h	800 °C/200 MPa	> 100
Rotary bending fatigue/Cycle	750 °C/220 MPa $R = -1$	> 1×10^7

4 部件研制和应用研究进展

4.1 铸造 TiAl 合金车用增压器涡轮、航空涡流器和燃机叶片

在真空感应悬浮炉中用离心铸造方法研制出了车用增压器涡轮、航空涡流器实件(见图 5)。其中,车用 TiAl 增压器涡轮,按增压器试验规范进行了全系列试车考核和发动机实验。与装配镍基高温合金增压器涡轮的发动机对比发现,配备 TiAl 合金涡轮增压器可使某型柴油机全负荷加速响应时间减少约 35%(见图 6),发动机比油耗降低 3 g/kW·h,稳态烟度降低 0.2 波许,实验证明,应用这种轻质新材料可以显著提高车用发动机的性能,并产生明显的节能、减排效果,具有重要的技术推动意义和巨大的市场前景。

研制的航空涡流器实件进行了挂片试验,未出现材料失效现象。对燃机叶片材料做了 700 °C/2 000 h 和 700 °C/10 000 h 的热暴露试验,发现 γ 相等轴晶粒的体积分数随挂片时间延长略有增加,在 2 000 h 内变化的幅度高于 2 000 至 10 000 h 过程中的变化;而 10 000 h 后层片间距并未发生明显变化,表明这种层片组织具有优异的热稳定性^[18]。

4.2 变形 TiAl 合金航空发动机压气机叶片和航天用整体叶盘

在较大锭型冶炼和挤压开坯技术取得突破后,通过热模拟实验得出了调整变形组织的热处理制度和二次变形特点,以有利于实现二次热加工成形与材料组织性能

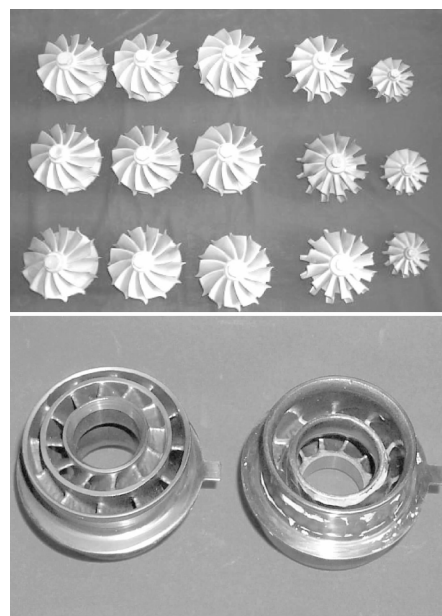


图 5 离心铸造成形的 TiAl 车用增压器涡轮和航空涡流器实件

Fig. 5 Components of TiAl alloys produced by centrifugal casting

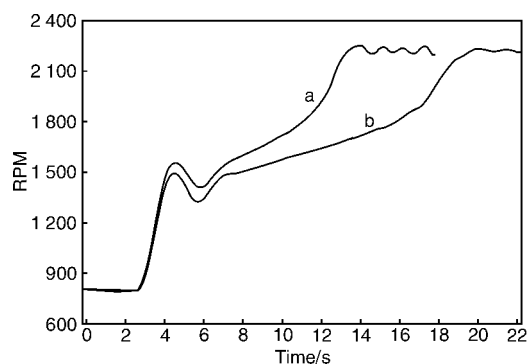


图 6 配备 TiAl 合金(a)与镍基高温合金(b)涡轮增压器的发动机加速响应曲线

Fig. 6 Acceleration response curves of a diesel engine with turbochargers using TiAl(a) and Ni-based superalloys(b)

的匹配。在工艺上采用软包套绝热并连续润滑等措施,以热模锻方式研制出了变形 TiAl 合金航空发动机压气机叶片,并进一步机加工出了完整的叶型和榫头(见图 7),有关用户部门已安排进行 TiAl 合金叶片的振动疲劳试验和发动机短时考核。

以研制航天用变形 TiAl 合金整体叶盘为目标,首先通过实验得出了电极与工件间隙、电解液配比、阴极设计、电解混气等工艺参数对 TiAl 合金加工精度和表面质量的影响规律,将 TiAl 合金锻饼预成形后进行电解加工,现已制备出表面质量和尺寸精度合格的航天用整体叶盘(见图 7),串装后进行了平台转动实验,实验中

已明确反映出应用 TiAl 合金, 具有易于实现整体叶盘高精度动态平衡和瞬态变速的优点。

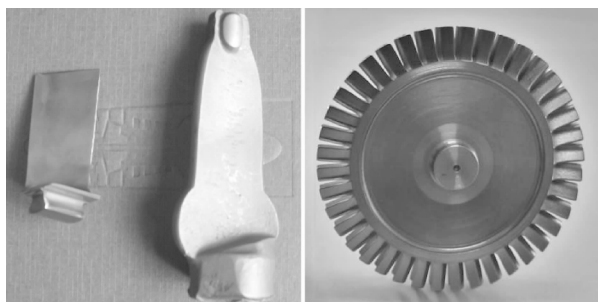


图7 变形 TiAl 合金热模锻及机加工成形航空叶片和航天整体叶盘

Fig. 7 Components of wrought TiAl alloys manufactured by forging and machining

5 结 语

经过 20 余年的努力, 以改善 TiAl 合金室温脆性为目标的材料改性研究已取得突破, 针对应用部件的制备技术及在制备过程中实现成分和组织设计的研究也有显著进展, 一些部件如车用增压器涡轮已进入实际应用。实验证明, 应用 TiAl 合金可以通过结构减重产生明显的技术推动作用。因而有必要针对这种新材料的制备技术和应用研究中暴露的技术问题, 结合国内工业条件和材料开发及应用特点进一步加强基础研究, 提升部件成形与组织匹配技术, 从组织均匀性和稳定性的角度充分地保证 TiAl 合金的可靠性, 并通过扩大应用进一步提高工艺成熟度、降低工艺成本。

参考文献 References

- [1] Kim Y W. Intermetallic Alloys Based on Gamma TiAl[J]. *JOM*, 1989, 41(7): 24-30.
- [2] Huang S C, Hall E L. Plastic Deformation and Fracture of Binary TiAl-Based Alloys [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22A: 2 619-2 627.
- [3] Kim Y W. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of a Forged Gamma Titanium Aluminide Alloys[J]. *Acta metal Mater*, 1992, 40(6): 1 121-1 134.
- [4] Pu Zhongjie(蒲忠杰), Shi Jiandong(石建东). TiAl 基合金组织对拉伸性能的影响[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 1993(8): 31-36.
- [5] Dennis M, Dimiduk, Patrick L. Microstructure Development in Gamma Alloy Mill Products by Thermomechanical Processing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 243: 66-76.
- [6] Maria A, Gil I, David G. Microstructural Stability of G-Based TiAl Intermetallics Containing β Phase[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 929-936.
- [7] Zhang Yonggang(张永刚), Han Yafang(韩雅芳), Chen Guoliang(陈国良), et al. *Intermetallics Structural Material*(金属间化合物结构材料)[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2001: 763.
- [8] Semiatin S L, Seetharaman V, Weiss I. Hot Workability of Titanium and Titanium Aluminide Alloys——an Overview[J]. *Mater Sci Eng*, 1998, A243: 1-24.
- [9] Chang Xia(昌霞). *Improvement on the Microstructure Homogeneity of Wrought TiAl Alloy*(改善变形钛铝合金组织均匀性的研究)[D]. Beijing: China Iron and Steel Research Institute Group, 2008.
- [10] Si Jiayong(司家勇). *Numerical Simulation on the Cogging down of TiAl Alloy*(TiAl 合金开坯过程的数值模拟研究)[D]. Beijing: China Iron and Steel Research Institute Group, 2008.
- [11] Hu D. Effect of Boron Addition on Tensile Ductility in Lamellar TiAl Alloys[J]. *Intermetallics*, 2002, 10: 851-858.
- [12] Zhang Ji(张继), Ma Wanqing(马万青), Zhang Jianwei(张建伟), et al. 含镍铸造钛铝合金的热处理[J]. *Heat Treatment of Metals*(金属热处理), 1999(1): 16-17.
- [13] Zhang Ji(张继), Zhang Jianwei(张建伟), Zou Dunxu(邹敦叙), et al. 铸造 TiAl 合金 FFL 组织形成动力学及机理[J]. *Transaction of Metal Heat Treatment*(金属热处理学报), 1996, 17(4): 12-16.
- [14] Zhang J, Feng D, Zhong Z Y. Intermetallics as Substitutes for Superalloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 18(4): 1-7.
- [15] Yamaguchi M, Inui H, Ito K, et al. High Temperature Structural Intermetallics[J]. *Acta Mater*, 2000, 48: 307-322.
- [16] Zhang Ji(张继), Zhang Jianwei(张建伟), Zou Dunxu(邹敦叙), et al. 铸造钛铝合金组织与力学性能[J]. *Journal of Air Material*(航空材料学报), 1998(3): 1-4.
- [17] Zhang Ji(张继), Zhang Zhihong(张志宏), Ma Wanqing(马万青), et al. *Development of Static Pressuring Technology*(静压技术进展)[M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1996: 181-186.
- [18] Mohammadi. *Thermal Stability of TiAl Intermetallics for Industrial Turbines*[D]. Goteborg: Chalmers University of Technology. 2009.