

TiAl 合金增压器涡轮的耐久性试验研究

朱春雷¹, 李胜¹, 张继¹, 何洪², 刘焯²

(1. 钢铁研究总院 高温材料研究所, 北京 100086)

(2. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

摘要: 针对某增压器台架耐久性考核 240 h 的直径 100 mm 的 TiAl 合金涡轮, 通过对比分析考核前后涡轮轮毂芯部的微观组织和力学性能, 并结合未考核涡轮轮毂取样的高温持久试验结果, 评价了 TiAl 合金增压器涡轮轮毂的耐久性。结果表明, 在考核试验后, 涡轮轮毂芯部的微观组织、洛氏硬度和室温抗拉强度仍保持考核前的水平; 同时, 参照该型涡轮服役条件下的高温持久加载后, 试样的层片组织仍保持完整, 仅只在层片团界析出了体积分数 0.5% 的等轴 γ 晶粒。可见, 该 TiAl 涡轮轮毂具有良好的耐久性, 能够满足应用要求。

关键词: TiAl 合金; 增压器涡轮; 耐久性; 轮毂

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)03-0980-05

涡轮增压是提高内燃机功率和效率的主要技术途径^[1]。当前增压器涡轮普遍采用密度较大的镍基高温合金, 例如 Inconel 713C 或者 Mar-M247 合金。然而, 较重的镍基高温合金涡轮转子转动惯量较大, 涡轮滞后效应非常明显^[2]。采用密度仅是镍基高温合金一半的新型轻质高温结构材料 TiAl 合金, 代替镍基高温合金制备增压器涡轮, 可显著降低涡轮转子的转动惯量, 进而提高发动机以及车辆的加速性响应性, 同时还具有节能减排效果^[3]。当前, 钛铝合金增压器涡轮的实用化, 已被国内外主要增压器厂视为涡轮增压技术的必然发展趋势^[4]。

增压器涡轮是在高温、受力、腐蚀以及冲刷工况下长时服役的转动部件, 评价其耐久性对这类部件使用可靠性具有重要意义。文献[5]基于发动机耐久性台架考核试验剖面, 建立钛铝合金增压器涡轮对应叶片高温持久断裂失效模式的寿命预测模型, 并对某型车用钛铝合金增压器涡轮的叶片高温持久寿命进行预测。研究表明, 该型钛铝合金增压器涡轮叶片高温持久寿命高于服役寿命, 能够满足使用要求。

文献[6]将 TiAl 合金增压器涡轮安装于三菱公司乘用车 TD05 柴油发动机 (排量 2.5 L), 并进行了 500 h 实际工况的耐久性考核试验。该文献主要评价了增压器涡轮叶片在耐久性考核后的叶片表面氧化和冲刷腐蚀行为, 并指出: 即使是抗氧化性相对不足的低铌 TiAl 合金在实际工况下的氧化程度也远低于相同温度/时间条件下空气中的氧化程度, 且能够满足耐久

性考核要求。

对于增压涡轮耐久性考核评价, 由于增压器涡轮的叶片在服役过程中承受的应力较小, 仅需评价叶片高温氧化腐蚀行为和叶片疲劳失效模式。然而, 增压器涡轮服役过程中轮毂尤其是轮毂芯部是受力最大的部位, 因此评价增压器的耐久性还需重点关注涡轮轮毂。文献[7]针对某型车用增压器涡轮的轮毂疲劳失效模式, 分析了增压器工作时涡轮的应力分布特征, 根据涡轮轮毂的应力分布特征与结构特征, 设计了能够体现工艺过程等因素影响的涡轮轮毂疲劳试样, 对试样进行了疲劳性能测试, 获得了涡轮轮毂的疲劳极限以及疲劳强度与寿命之间的数学关系。

本研究针对在某柴油发动机增压器台架耐久性强化考核 240 h 后的 TiAl 合金增压器涡轮, 基于轮毂在高温 (热)、应力和无氧化条件下的服役工况特点, 评价了轮毂芯部取样的组织和力学性能的稳定性, 以完善 TiAl 合金增压器涡轮耐久性评价, 有助于推进 TiAl 合金增压器涡轮的工程化应用。

1 实验

本研究试验对象为某柴油发动机用 $\phi 100$ mm 的名义成分为 Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr-0.2Zr (原子分数, %) 的 TiAl 合金涡轮, 见图 1。其制备工艺如下: 首先采用熔模精密铸造工艺制备涡轮, 之后在 1270 °C/150 MPa 氩气环境中热等静压处理 1.5 h 再 950 °C/12 h 真空退火热处理, 在机加工后采用三体连接工艺制备涡

收稿日期: 2019-03-15

作者简介: 朱春雷, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081, 电话: 010-62183386, E-mail: zhuchunleil@163.com

轮转轴。其中, 三体为 TiAl 涡轮、K418 镍基高温合金过渡体、42CrMo 钢轴, 采用摩擦焊工艺进行 42CrMo 钢与 K418 镍基高温合金过渡体的连接, 采用热装过盈配合进行 42CrMo 钢-K418 过渡体与 TiAl 涡轮的连接^[8]。

将加工后的 TiAl 合金涡轮转轴装配到某柴油发动机增压器, 并在增压器台架进行图 2 所示的耐久性强化考核试验。涡轮气源为柴油燃烧后的气氛, 涡轮进气温度在 700~750 °C 之间, 涡轮标定转速 95000 r/min。该考核试验包括标准转速下连续运转和超速超温循环运转。具体过程如下: 首先在标定转速下连续运转 100 h, 之后在 100%~110% 标定转速下连续循环运转 20 h, 再重复上述过程中, 累计考核时间 240 h。考核试验后, 拆检增压器, 目视检查表明涡轮转轴完好无损, 见图 3。

考虑到涡轮使用过程中主要承受沿径向的离心力作用, 且靠近轮毂面的涡轮芯部应力水平最高, 为评价涡轮考核前后的组织和力学性能演变行为, 选择受力最大的轮毂芯部作为评价的位置, 具体取样示意图见图 4。

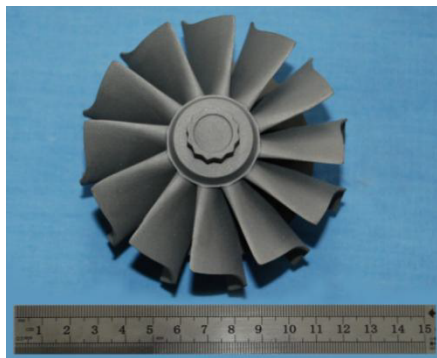


图 1 直径 100 mm 的 TiAl 合金涡轮

Fig.1 External appearance of TiAl turbocharger wheel

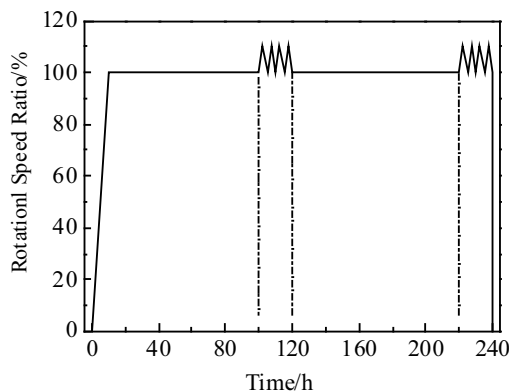


图 2 TiAl 涡轮增压器台架耐久性考核试验曲线

Fig.2 Rig endurance testing curve for TiAl turbocharger



图 3 耐久性考核后的 TiAl 涡轮转轴

Fig.3 TiAl turbocharger wheel after rig endurance test

拉伸试样是以轮毂面为基准沿最大直径处切取, 且考虑到越靠近轮毂面应力水平越高, 本试验螺纹规格仅为 M8 的拉伸试样, 以使所取试样靠近轮毂面, 加工过程中, 由于受到涡轮规格限制, 只能加工非标试样, 拉伸试样规格为螺纹为 M8、标距部分为 $\phi 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。按照 ISO6892.1 标准测试轮毂芯部试样的室温拉伸性能。按照 GB/T2039 标准测试轮芯部径向取样的持久性能。

显微组织分析的金相试样也是取自靠近轮毂面的涡轮芯部。金相试样经碳化硅砂纸研磨+电化学抛光制备得到。电化学抛光液位 10%高氯酸+90%乙醇。在 JOEL7800 扫描电镜背散射电子下观察金相试样微观组织。

由于尺寸限制, 考核后涡轮只能加工一个拉伸试样, 用于力学性能评价的样本数较少, 为详细评估考核前后涡轮的力学性能, 进一步测试了洛氏硬度 (HRC)。

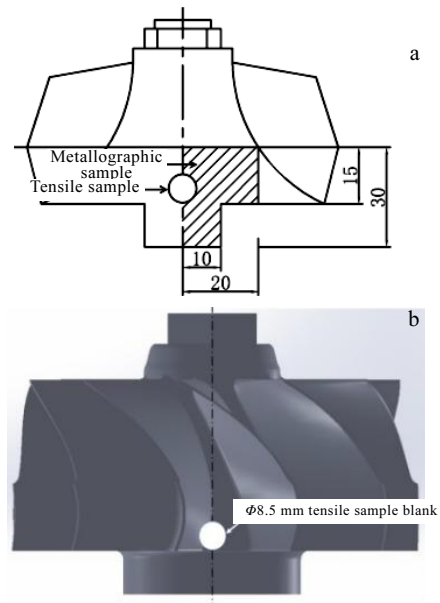


图 4 涡轮轮毂芯部金相试样和拉伸试样取样图

Fig.4 Schematic diagram of metallurgical (a) and tensile (b) samples cut from turbocharger wheel hub core

2 实验结果

2.1 考核前后的微观组织

图 5 给出了考核前后涡轮轮毂芯部金相试样的微观组织。其中，考核前为由 α_2 -Ti₃Al/ γ -TiAl 层片团组成的全层片组织 (α_2/γ)。考核试验后，轮毂芯部仍然保持考核前的全层片组织形态，且层片界面仍保持平直完整，未见层片粗化和瑞丽分解^[9]等现象，同时，在层片界面未见诸如等轴 γ 晶粒的析出相。这说明，在本研究所述的耐久性考核试验条件下，该 TiAl 合金涡轮具有良好的组织稳定性。

2.2 考核前后的力学性能

增压器涡轮服役过程中主要承受沿轮毂径向的离心力作用。该型增压器涡轮的有限元应力计算结果表明，尽管增压器涡轮在不同转速条件下的应力水平逐渐增加，但最大应力均位于涡轮轮毂芯部^[10]。因此，

在评价涡轮的力学性能时，主要关注轮毂芯部。

为详细评价考核前后涡轮轮毂的力学性能，本研究首先对比洛氏硬度 HRC。图 6 是耐久性考核前后轮毂芯部的洛氏硬度对比图。可以看出，考核前涡轮轮毂芯部的平均硬度 HRC 值为 24.0，考核后平均硬度 HRC 值 23.1，即，考核后轮毂芯部的硬度略有降低，但仍保持在基本相当的水平。

考虑到轮毂主要承受沿径向的离心力作用，本研究还评价了考核前后涡轮轮毂芯部径向取样的室温抗拉强度，见表 1。可以看出，多个涡轮轮毂芯部取样的平均室温抗拉强度为 410 MPa。考虑到增压器台架耐久性考核试验成本较高，仅只进行了一台份增压器的考核试验，考核后涡轮轮毂芯部取样只有一个试样。测试结果表明，考核后的室温抗拉强度为 402 MPa。这说明，考核后轮毂芯部强度仍保持在基本相当的水平。这与芯部取样的 HRC 硬度值测试结果是一致的。

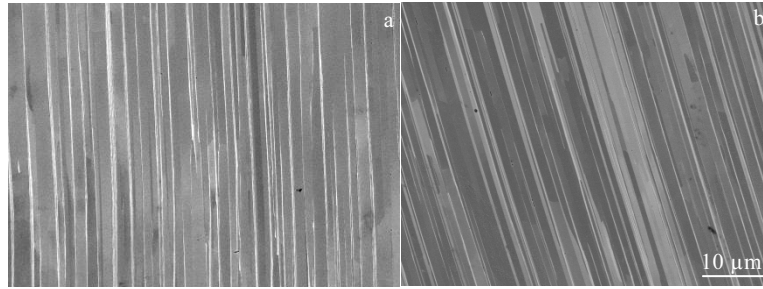


Fig.5 考核前后涡轮轮毂芯部层片组织的 SEM 背散射电子照片

Fig.5 SEM back scatter electron (BSE) images of lamellar microstructure of hub core for the turbocharger wheel before (a) and after (b) rig endurance test

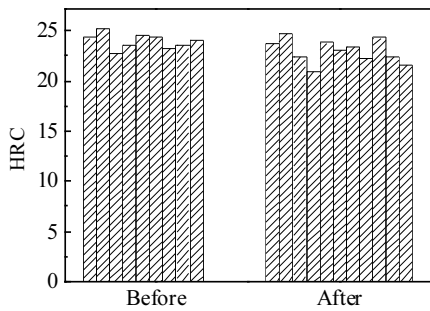


图 6 考核前后涡轮轮毂芯部的洛氏硬度

Fig.6 Rockwell hardness of turbocharger hub core before and after rig endurance test

表 1 考核前后涡轮轮毂芯部径向取样的室温抗拉强度

Table 1 Tensile strength of sample cut from turbocharger hub before and after rig endurance test at room temperature

Condition	Tensile strength/MPa				
Before	396	415	405	418	407
After	402				

3 讨论

现行国军标规定增压器部件台架 120 h 结构考核试验，包括了标定参数运转试验、超速超温试验、最高参数循环变化运转试验，是针对增压器在最极端工况的条件下的验证，同时也是加速和加力状态下的考核验证。本工作研究对象为连续进行了 2 次 120 h 考核试验的增压器涡轮，评价其考核后的组织和力学性能的稳定性的，更能说明该 TiAl 合金涡轮的耐久性。

根据涡轮轮毂芯部的洛氏硬度和室温抗拉强度测试结果可知，考核前后涡轮轮毂的力学性能水平基本保持不变，这与考核前后涡轮轮毂芯部微观组织没有变化相一致。

为进一步评价涡轮轮毂芯部的高温耐久性能，本研究参照该型涡轮的实际服役条件，进行了涡轮芯部径向取样的高温持久试验。试验温度与耐久性考核试验温度相当，选择 700~750 °C。试验应力对应标定转

速和超速 110% 的应力状态。根据有限元计算结果 (见图 7) 可知, 对于该型 TiAl 合金涡轮, 在标定转速下该型涡轮轮毂芯部的应力为 222.55 MPa, 超速 110% 状态下应力约为 260 MPa。因此, 高温持久试验应力选择 220 和 260 MPa。

表 2 给出了涡轮轮毂芯部取样的高温持久试验结果。可以看出, 700 °C 下, 标定转速和超速 110% 对应的 220 和 260 MPa 试验条件下, 涡轮轮毂芯部试样的持久寿命分别超过 1500 和 1000 h; 在 750 °C 条件下, 220 和 260 MPa 应力下持久寿命分别在 1000 和 500 h 以上。而且, 这些试样的面缩率均在 1.0% 水平, 这也从另一方面说明这些试样在本研究所述寿命后仍能保持较长的寿命。在此需要说明的是, 表 2 所给的持久寿命并不是该试验条件下的最终寿命, 但这些数据已能满足设计要求。



图 7 标定转速下涡轮轮毂的等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress of turbocharger wheel hub under the condition of rated speed

为进一步评价其耐久性, 以持久加载最长的 700 °C/220 MPa/1500 h 卸载试样为对象, 进行了微观组织分析, 典型组织见图 8。可以看出, 绝大部分区域的组织没有发生改变, 层片组织仍保持平直完整 (图 8a), 但在在层片团界局部区域析出了体积分数仅为 0.5% 的、尺寸约 10 μm 的等轴 γ 晶粒 (图 8b)。根据 TiAl 合金组织-性能关系的研究可知, 体积分数仅为 0.5% 的等轴 γ 晶粒并不会对 TiAl 合金的力学性能造成显著的影响^[11,12]。在本研究所述的试验条件下, 该型涡轮轮毂芯部试样具有较好的组织稳定性。这样的结果与持久卸载试样较低的面缩率是相对应的。进一步与耐久性强化考核后涡轮轮毂芯部的组织和性能相结合可以推测, 该型涡轮在该车辆工况下将具有较好的耐久性。

表 2 未考核涡轮轮毂芯部径向取样的高温持久性能

Table 2 Tens creep rupture properties of samples cut from the hub core for turbocharger wheel without endurance test

Temperature/ °C	Stress/ MPa	Life/ h	Area reduction/ %	Remark
700	220	>1500	0.80	Shut down
	260	>1000	1.12	Unload
750	220	>1000	1.12	Shut down
	260	>500	0.80	Unload

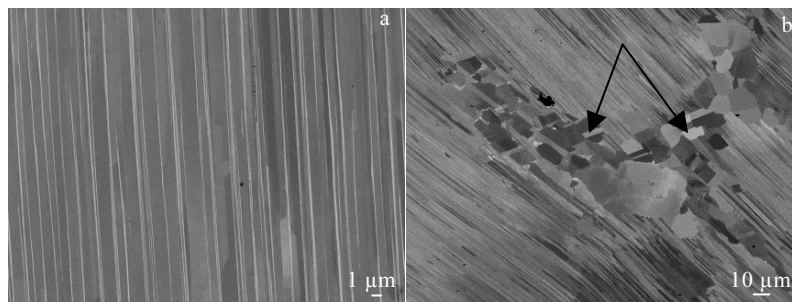


图 8 700 °C/220 MPa/1500 h 持久试样的 SEM-BSE 微观组织

Fig.8 SEM-BSE images of the sample after stress creep loading at of 700 °C/220 MPa/1500 h: (a) lamellar microstructure and (b) equiaxed gamma grain participated along the colony boundary

4 结论

- 1) 在增压器台架 240 h 耐久性考核后, 受力最大的轮毂心部组织仍保持原有的层片组织, 未见层片组织分解和等轴 γ 晶粒析出, 表现出较好的组织稳定性。
- 2) 在增压器台架 240 h 耐久性考核后, 涡轮芯部

径向取样的室温抗拉强度和洛氏硬度均与考核前水平相当, 表现出良好的力学性能稳定性。

- 3) 在考核的温度和应力水平下进行了 700~750 °C、应力 220~260 MPa 试验条件下, 涡轮心部径向取样的持久寿命超过 500~1500 h, 而且试样未见明显的缩颈。

4) 涡轮心部径向取样即使在 700 °C /220 MPa/1500 h 持久加载后, 除析出了体积分数约 0.5% 的等轴 γ 相外, 未见其他显微组织退化现象, 可见该组织表现出良好的稳定性。

5) 在本研究所所述的耐久性考核试验条件下, 该 TiAl 合金涡轮的轮毂具有良好的组织和力学性能稳定性, 可以满足设计对该涡轮轮毂耐久性的要求。

参考文献 References

- [1] Zhu Daxin(朱大鑫). *Turbocharging and Turbocharger*(涡轮增压与涡轮增压器)[M]. Beijing: China Machine Press, 1992: 6
- [2] Noda T. *Intermetallics*[J], 1998, 6(7-8): 709
- [3] Tetsui T. *Materials Science and Engineering*[J], 2002, A329-331: 582
- [4] Zhu Chunlei(朱春雷), Li Sheng(李胜), Zhang Ji(张继). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(6): 35
- [5] Wang Zheng(王正), Li Sheng(李胜), Yang Ce(杨策) *et al.* *Vehicle Engine*(车用发动机)[J], 2017(6): 78
- [6] Tetsui T, Ono S. *Intermetallics*[J], 1999, 7(6): 689
- [7] Wang Zheng(王正), Wang Zengquan(王增全). *The 18th National Conference on Fatigue and Fracture*(第十八届全国疲劳与断裂学术会议)[C]. Zhengzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2016
- [8] Jiang Mingzhi(姜明智), Zhu Chunlei(朱春雷), Li Haizhao(李海昭) *et al.* *Machinery*(机械制造)[J], 2014(9): 56
- [9] Zhang Ji(张继), Zhang Jianwei(张建伟), Zou Dunxu(邹敦叙) *et al.* *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 1996, 8(5): 32
- [10] Wang zheng(王正), Wang Zengquan(王增全), Wang Xiujuan(王秀娟) *et al.* *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2016, 27(3): 408
- [11] Zhu Chunlei(朱春雷), Li Haizhao(李海昭), Luo Chen(骆晨) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2014, 41(3): 79
- [12] Zhu Chunlei(朱春雷), Zhang Xiwen(张熹雯), Luo Chen(骆晨) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(2): 560

Evaluation of Endurance for Turbocharger Wheel of TiAl Based Alloy

Zhu Chunlei¹, Li Sheng¹, Zhang Ji¹, He Hong², Liu Ye²

(1. Division of High Temperature Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

(2. National Key Laboratory of Diesel Engine Turbocharging Technology, China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

Abstract: Based on TiAl turbocharger wheel with the diameter of 100 mm after rig endurance test for total 240 h, this paper evaluated the endurance of turbocharger wheel hub from the aspects of the microstructure and mechanical properties. The results show that the microstructure and mechanical properties of the samples cut from the hub core of turbocharger wheel still retain a considerable level after endurance test. And the microstructure of the sample cut from the hub core of turbocharger wheel without rig test has an excellent stability after stress creep loading for 1000 h under the actual working condition. So the hub of the turbocharger wheel has a satisfactory endurance that can meet the application requirement.

Key words: TiAl based alloy; turbocharger wheel; endurance test; hub

Corresponding author: Zhu Chunlei, Ph. D., Senior Engineer, Division of High Temperature Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-62183386, E-mail: zhuchunleital@163.com