

热暴露对 TiAl 合金喷丸表层组织的影响

余 稳^{1,2} 殷亚军¹ 周建新¹ 南 海^{2,3,4} 丁贤飞^{2,3,4} 冯 新^{2,3,4}

(1.华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室;2.中国航发北京航空材料研究院铸造钛合金技术中心;
3.北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心;4.北京航空材料研究院股份有限公司)

摘 要 研究了 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金喷丸表层组织在服役温度范围内热暴露 24 h 后的变化。结果表明,在热暴露后,喷丸表层组织分为两层。700 ℃热暴露后,表层组织由靠近喷丸表面的细晶层和远离喷丸表面的残留变形层构成,厚度分别为 5 μm 和 10 μm。细晶层由再结晶 γ 晶粒组成,残留变形层主要由变形片层组成,也存在少量细小的 γ 晶粒。900 ℃热暴露后,表层组织由靠近喷丸表面的细晶层和远离喷丸表面的粗晶层构成,厚度分别为 10 μm 和 75 μm。细晶层由再结晶 γ 晶粒组成,粗晶层主要由拉长的粗 γ 晶粒组成,为不完全再结晶。

关键词 TiAl 合金;喷丸;再结晶;热暴露

中图分类号 TG146.2; TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Thermal Exposure on Surficial Structure of TiAl Alloy Subjected to Shot Peening

Yu Wen^{1,2}, Yin Yajun¹, Zhou Jianxin¹, Nan Hai^{2,3,4}, Ding Xianfei^{2,3,4}, Feng Xin^{2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology; 2. Cast Titanium Alloy R&D Center, Beijing Institute of Aeronautical Materials; 3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology; 4. Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd.)

Abstract: Effects of thermal exposure within the range of service temperature for 24 h on the surficial structure of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy subjected to shot peening were investigated. The results indicate that the surficial structure after thermal exposure is obviously divided into two layers, which consists of fine crystal layer near the shot peening surface with a thickness of 5 μm and residual deformation layer far away from the shot peening surface with a thickness of 10 μm after thermal exposure at 700 ℃. The fine grain layer is composed of recrystallized γ grains, and the residual deformation layer is composed of deformation lamellae accompanied by a few fine γ grains. After thermal exposure at 900 ℃, the surficial structure consists of fine crystal layer near the shot peening surface with a thickness of 10 μm and coarse crystal layer far away from the shot peening surface with a thickness of 75 μm. The fine grain layer is composed of recrystallized γ grains, and the coarse grain layer is composed of elongated γ grains, presenting incomplete recrystallization.

Key Words: TiAl Alloy, Shot-peening, Recrystallization, Thermal Exposure

TiAl 合金具有低密度、高比强度、高比刚度以及优异的抗氧化和抗蠕变性能,是航空航天领域最具潜力的高温轻质结构材料之一,在 700~900 ℃可部分替代镍基高温合金,用来制造高压压气机和低压涡轮叶片^[1-5]。在飞机的飞行过程中,TiAl 合金叶片将经受高频振动,由此造成疲劳损伤。有研究表明,在 TiAl 合金疲劳失

效过程中,有 80%~90% 的主裂纹萌生于合金表面^[6]。作为一种传统的表面强化技术,喷丸处理已广泛用于钢、铝合金、钛合金和镍基合金的表面硬化和表面改性^[7-11]。通过在构件的表面产生加工硬化和残余压应力,提高了材料的损伤容限和疲劳强度。尽管喷丸技术对 TiAl 合金表面改性的应用研究仍然有限,但已有研究证明喷丸处理可以有效减少 TiAl 合金表面已存在的

收稿日期:2022-08-05;修改稿收到日期:2022-11-07
基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010186001);北京市自然科学基金资助项目(2222092)
第一作者简介:余稳,男,1991 年出生,博士研究生,武汉(430074),E-mail:yuwen_huster@foxmail.com
通信作者:殷亚军,男,1985 年出生,副教授,武汉(430074),E-mail:yinyajun436@hust.edu.cn
引用格式:余稳,殷亚军,周建新,等. 热暴露对 TiAl 合金喷丸表层组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):942-944.
YU W, YIN Y J, ZHOU J X, et al. Effects of thermal exposure on surficial structure of TiAl alloy subjected to shot peening[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):942-944.

裂纹并提高合金的室温疲劳寿命^[6, 12]。然而, TiAl 合金在服役过程中会不可避免地暴露在高温大气环境中, 由喷丸产生的加工硬化和残余压应力可能被松弛或消除, 从而导致喷丸处理对提升 TiAl 合金的疲劳强度作用降低。因此, 研究热暴露对 TiAl 合金喷丸表层组织的影响十分必要。本研究以喷丸 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金为研究对象, 利用 SEM 和 EBSD 深入分析了喷丸表层组织在服役温度范围内热暴露的演变规律, 为 TiAl 合金喷丸强化和表层组织稳定性研究提供参考。

1 试验材料与方法

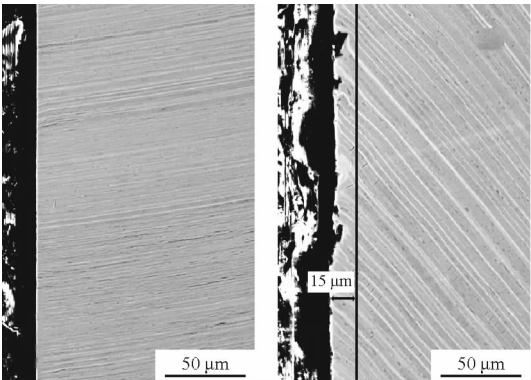
试验材料为 Ti-47Al-2Cr-2Nb(摩尔分数)合金, 其化学成分: Al 为 47.01%, Cr 为 2.02%, Nb 为 2.09%, O 为 0.13%, 余量为 Ti。通过精密铸造制成板材, 经 172 MPa 下 1 260 ℃×4 h 热等静压处理闭合缩孔缺陷, 再经 1 185 ℃×6 h 和 1 360 ℃×0.5 h 的真空热处理获得最终组织。利用线切割从合金板材上截取 10 mm×10 mm×8 mm 的试样, 喷丸处理前将试样表面依次经 260~2 000 目的砂纸打磨。随后进行喷丸处理, 丸料采用平均直径为 0.3 mm 的 ZrO₂ 陶瓷丸, 喷枪中的空气压力为 0.1 MPa, 与试样表面的夹角为 90°, 喷丸阿尔门强度为 0.3 mm·N, 覆盖率为 100%。将喷丸后的试样放入箱式电阻炉中进行热暴露, 温度为 700 ℃和 900 ℃(对应于 TiAl 合金的服役温度范围), 时间为 24 h。

采用 ZEISS Sigma 300 扫描电镜在背散射模式下观察热暴露前后试样的表层组织。另外, 对热暴露后试样的表层组织进行电子背散射衍射(Electron backscattered diffraction, EBSD)观察, 步长为 0.1 μm。利用 Oxford Instruments HKL Channel 5 软件对 EBSD 数据进行处理和分析。

2 试验结果与分析

2.1 喷丸前后表层组织

图1为试样喷丸前后的SEM-BSE横截面组织。



(a) 喷丸前 (b) 喷丸后

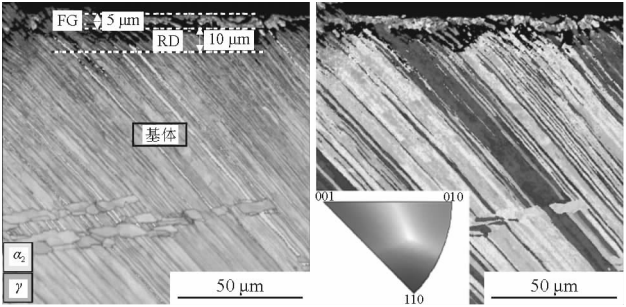
图 1 SEM-BSE 横截面组织

Fig.1 SEM-BSE images of cross-section microstructure

可以看出, Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金热处理后的基体组织为由交替排列的 α_2 和 γ 片层构成的片层组织。喷丸前, 试样经过机械磨削处理, 表面轮廓平直, 表层组织未发生明显变形。喷丸后, 试样表面起伏明显, 某些位置产生了较深的显微凹坑; 表层组织发生了明显的变形, 基于 α_2 和 γ 片层的弯曲程度确定的变形层深度为 15 μm。

2.2 热暴露后的表层组织

图 2 为喷丸试样经 700 ℃热暴露 24 h 后的表层组织。图 2a 中浅灰色板条为 α_2 片层, 灰色板条为 γ 片层。可以看出, 表层组织经热暴露后明显分为两层: 一是靠近喷丸表面的细晶层(FG); 二是细晶层以下的残留变形层(RD)。FG 层由等轴 γ 晶粒组成, 厚度为 5 μm; RD 层主要由变形片层组成, 也存在少量等轴 γ 晶粒, 厚度为 10 μm。图中黑色衬度的区域为残留变形层, 因其变形严重而未能通过 EBSD 解析出来。

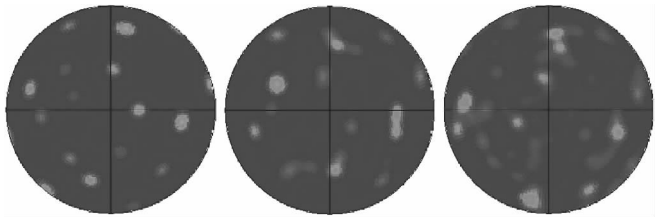


(a) EBSD 相图和花样质量图 (b) EBSD 取向图

图 2 喷丸试样经 700 ℃热暴露 24 h 后的表层组织

Fig.2 Surficial structure of shot-peened specimen after thermal exposure at 700 ℃ for 24 h

图 3 为图 2a 中基体(Matrix, M)、RD 层和 FG 层中的 $\gamma(111)$ 极图, 每种 γ 片层可产生 4 个极点。由图 3a 可以看出, 基体中 γ 片层存在着不同的变体。由图 3b 可以看出, 少量极点呈现随机分布的特征, 表明该层中发生了少量 γ 再结晶。由图 3c 可以看出, 极点呈现完全随机分布的特征, 表明该层中发生了完全 γ 再结晶。再结晶的驱动力来自于喷丸表层组织中的变形储存能。与 FG 层相比, RD 层中的再结晶 γ 晶粒数量明



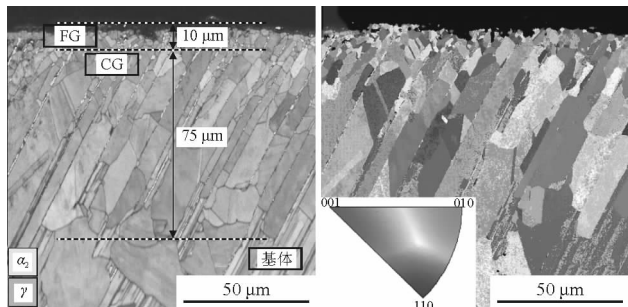
(a) 基体(M) (b) 残留变形层(RD) (c) 细晶层(FG)

图 3 喷丸试样 700 ℃热暴露 24 h 后的 $\gamma(111)$ 极图

Fig.3 $\gamma(111)$ pole figures of shot-peened specimen after thermal exposure at 700 ℃ for 24 h

显更少,这归因于 RD 层中较低的变形储存能。

图 4 为喷丸试样在 900 ℃热暴露 24 h 后的表层组织,其中,浅色板条为 α_2 片层,灰色板条为 γ 片层。由图 4a 可以看出,表层组织经热暴露后也分为两层:一是靠近喷丸表面的 FG 层;二是 FG 层以下的粗晶层(CG)。FG 层由等轴 γ 晶粒组成,厚度为 10 μm ;CG 层的厚度为 75 μm ,主要由拉长的粗 γ 晶粒组成,还存在分布于 γ/γ 界面处少量不连续的条状或颗粒状的 α_2 相,这说明 CG 层中消失的 α_2/γ 片层界面处及 α_2 相间断处均发生了 $\alpha_2 \rightarrow \gamma$ 转变。



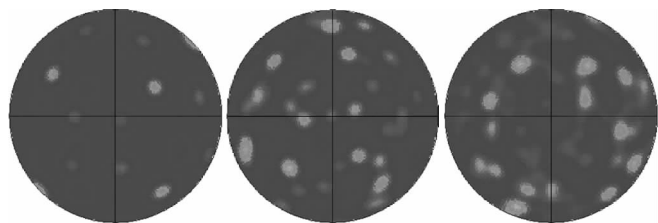
(a) EBSD 相图和花样质量图

(b) EBSD 取向图

图 4 喷丸试样在 900 ℃热暴露 24 h 后的表层组织

Fig.4 Surficial structure of shot-peened specimen after thermal exposure at 900 ℃ for 24 h

图 5 为图 4a 中基体、CG 层和 FG 层中的 $\gamma(111)$ 极图。图 5a 中的极点规律分布表明,基体中 γ 片层存在着不同的变体。由图 5b 可以看出,大量极点呈现随机分布的特征,表明该层中发生了大量 γ 再结晶。由图 5c 可以看出,极点呈现完全随机分布的特征,表明该层中发生了完全 γ 再结晶。由于 CG 层中仍有一定数量的 α_2 相存在,因此该层中形成的 γ 晶粒并不是完全再结晶形成的。靠近 FG 层的 γ 晶粒较小且取向性较强,为完全再结晶,再结晶的驱动力来自于变形储存能。远离 FG 层的 γ 晶粒沿原始片层方向呈伸长状且取向较弱,为不完全再结晶, γ 晶粒长大的驱动力一部分来自于变形储存能,另一部分来自于界面自由能。随着 α_2 片层的溶解,以及 γ/γ 界面的迁移,最终导致 γ 片层的合并,形成了伸长状的 γ 晶粒。与 700 ℃热暴露相



(a) 基体

(b) 粗晶层(CG)

(c) 细晶层(FG)

图 5 喷丸试样在 900 ℃热暴露 24 h 后的 $\gamma(111)$ 极图

Fig.5 $\gamma(111)$ pole figures of shot-peened specimen after thermal exposure at 900 ℃ for 24 h

比,900 ℃热暴露表层组织中不存在 RD 层,取而代之的是 CG 层,这表明升高温度提高了 γ 再结晶驱动力和 γ/γ 界面迁移能力。

3 结 论

(1)Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金喷丸表层组织在 700 ℃和 900 ℃热暴露后明显分为两层。

(2)700 ℃热暴露后,Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金表层组织分为靠近喷丸表面的细晶层和远离喷丸表面的残留变形层。细晶层由再结晶 γ 晶粒组成,驱动力来自于变形储存能。残留变形层主要由变形片层组成,也存在少量细小的 γ 晶粒。

(3)900 ℃热暴露后,Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金表层组织分为靠近喷丸表面的细晶层和远离喷丸表面的粗晶层。细晶层由再结晶 γ 晶粒组成,驱动力来自于变形储存能。粗晶层主要由拉长的粗 γ 晶粒组成,为不完全再结晶,驱动力来自于变形储存能和界面自由能。

参 考 文 献

- [1] SUN Z Y, ZHU L P, MO X F, et al. Microstructure characterization and properties of graphene oxide-reinforced tial matrix composites[J]. Metals, 2021, 11: 883-897.
- [2] CHEN G, PENG Y B, ZHENG G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nat. Mater., 2016, 15: 876-881.
- [3] WANG Y H, LIN J P, HE Y H, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast Ti-45Al-8.5Nb-(W,B,Y) alloy with industrial scale[J]. Mater. Sci. Eng., 2007, A471: 82-87.
- [4] APPEL F, OEHRING M, WAGNER R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys[J]. Intermetallics, 2000 (8): 1 283-1 312.
- [5] WAYNE V. The future use of gamma titanium aluminides by Rolls-Royce[J]. Aircr. Eng. Aerosp. Tech., 1999, 71: 337-340.
- [6] JONES P E, EYLLON D. Effects of conventional machining on high cycle fatigue behavior of the intermetallic alloy Ti-47Al-2Nb-2Cr (%) [J]. Mater. Sci. Eng., 1999, A263: 296-304.
- [7] XIE G, ZHANG J, LOU L H. Effect of heat treatment atmosphere on surface recrystallization of a directionally solidified Ni-base superalloy[J]. Scripta. Mater., 2008, 59: 858-861.
- [8] TAN L, REN X, SRIDHARAN K. Effect of shot-peening on the oxidation of alloy 800H exposed to supercritical water and cyclic oxidation[J]. Corros. Sci., 2008, 50: 2 040-2 046.
- [9] OKOLO B, WILLARD F P, HAWEEKÉR J. Focused ion beam study of the effects of shot peening on the subsurface microstructure of normalized pearlitic steel[J]. J. Mater. Process Tech., 2007, 183: 160-164.
- [10] WANG T S, YU J K, DONG B F. Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Surf. Coat. Tech., 2005, 200: 4 777-4 781.
- [11] PEYRE P, SCHERPEREEL X, BERTHE L. Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance[J]. Mater. Sci. Eng., 2000, A280: 294-302.
- [12] LINDEMANN J, BUQUE C, APPEL F. Effect of shot peening on fatigue performance of a lamellar titanium aluminide alloy[J]. Acta Mater., 2006, 54: 1 155-1 164.

(编辑:刘晨辉)