

引文格式: 赵强, 祝文卉, 帅焱林, 等. 不同热处理制度下 Ti-22Al-25Nb 合金惯性摩擦焊接头显微组织分析[J]. 航空制造技术, 2021, 64(10): 57-63.

ZHAO Qiang, ZHU Wenhui, SHUAI Yanlin, et al. Microstructure analysis of inertia friction welded joints of Ti-22Al-25Nb alloy with different heat treatments[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(10): 57-63.

不同热处理制度下 Ti-22Al-25Nb合金惯性摩擦焊 接头显微组织分析

赵 强¹, 祝文卉¹, 帅焱林¹, 刘佳涛¹, 张 利², 王 冉³, 尚 震¹, 刘 悦¹

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司技术中心, 沈阳 110043;

2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136;

3. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 沈阳 110819)

[摘要] 采用惯性摩擦焊连接 Ti₂AlNb 合金, 分析了焊态和热处理后焊接接头的组织变化, 研究了不同热处理制度对 Ti₂AlNb 合金惯性摩擦焊接头显微组织的影响。结果表明: 利用惯性摩擦焊技术可获得无缺陷、焊缝状态良好的 Ti-22Al-25Nb 合金焊接接头; 温度和热处理时间共同决定了焊合区 O 相的数量和尺寸的变化, 但是相比时间的变化, 热处理温度的变化对 O 相的影响更为明显; 当热处理温度处于 780~850℃ 时, 焊合区 O 相的长大幅度较小, 长大后的尺寸仍然远小于母材的 O 相尺寸; 热力影响区 O 相呈现与焊合区相同的演变规律; 随着温度升高, 热处理时间增长, 热影响区 O 相发生粗化现象, α₂ 相未发生变化。

关键词: 惯性摩擦焊; Ti₂AlNb 合金; 显微组织; 热处理制度; 焊接接头

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.10.057



赵 强

工程师、硕士, 研究方向为高温合金以及钛合金惯性摩擦焊研究。

Ti₂AlNb 是以有序正交结构 O 相作为主要构成相的金属间化合物合金^[1-3], 该合金具有较高的高温强度和抗蠕变性能^[4-5], 并且密度较低, 是镍基高温合金的替代材料之一, 在航空航天领域具有广阔的应用前景^[6-8]。

针对 Ti₂AlNb 合金的焊接技术有电子束焊^[9-10]、激光焊^[11-12]、扩散焊^[13-14]、线性摩擦焊^[15]等。但是在工程化应用过程中, Ti₂AlNb 合金的连接技术仍然存在一些关键问题未被完全解决。张力军^[16]研究了 Ti₂AlNb 合金钎焊焊接头, 结果表明随着连接温度和时间的增加,

Ti₂Ni、Ti₃Al 和 TiNi 化合物增加, Ti 基固溶体减少, 使接头呈现脆性断裂特征, 界面处出现裂纹, 降低了接头强度。吴爱萍等^[17]采用电子束焊连接不同板厚和不同形状 Ti₂AlNb 合金, 结果表明 Ti₂AlNb 合金电子束焊接接头产生了再热裂纹, 其形成的原因主要为升温过程中, 焊缝区 B2 组织转变为 O 相, 晶界处形成 B2+O 双相析出层, 在高的残余拉伸应力作用下, O 相基体与双相析出层的界面应力超过其结合强度而产生再热裂纹。

惯性摩擦焊是一种固相焊接技术, 已被广泛应用到先进航空发动机

核心转子部件的制造中^[18]。惯性摩擦焊焊缝组织为锻造细晶组织^[19-20]，相比于电子束焊焊缝的柱状晶组织，惯性摩擦焊焊缝具有较低的裂纹敏感性，因此惯性摩擦焊技术是实现Ti₂AlNb合金可靠连接的关键技术之一。国内外针对Ti₂AlNb合金惯性摩擦焊已开展了一些基础研究^[21]，但是对于焊后热处理对Ti₂AlNb合金惯性摩擦焊接头组织的影响尚未进行系统研究。本研究采用惯性摩擦焊连接Ti₂AlNb合金，分析焊态和热处理后焊接接头的组织变化，重点研究不同热处理制度对Ti₂AlNb合金惯性摩擦焊接头显微组织的影响。

试验及方法

试验材料为Ti-22Al-25Nb合金，该材料母材晶粒为等轴晶，晶粒尺寸为200~400μm，母材组织主要由B2相、O相和α₂相构成，如图1所示，图中白色组织为B2基体相，灰黑色组织为α₂相，呈颗粒状，灰色组织为O相，呈板条状，各区域相邻的O相板条趋于平行排列，试验用材料由钢铁研究总院提供。

试件为外径φ140mm、内径φ120mm的环形件，焊接试验在YL-200t惯性摩擦焊焊机上完成。研究表明^[22-23]，当Ti-22Al-25Nb合金在780~850℃温度区间热处理时，合金处于O+B2相区，此时析出O相和B2相板条组织，板条和针状O相的体积分数提高对Ti₂AlNb合金的力学性能有促进作用。因此利用焊后热处理尽量多析出板条态O相，可强化焊缝的高温力学性能。为了研究不同热处理温度和时间对Ti-22Al-25Nb合金惯性摩擦焊接头显微组织的影响，在O+B2相区选择780℃、800℃、850℃的不同温度，将原始态焊接接头分别进行3h和6h的热处理，780℃/3h/AC(编号HT1-1)，780℃/6h/AC(编号HT1-2)，800℃/3h/AC(编号HT2-1)，800℃/6h/AC(编

号HT2-2)，850℃/3h/AC(编号HT3-1)，850℃/6h/AC(编号HT3-2)。

采用OLYMPUS GX71金相显微镜(OM)、FEI Quanta 600扫描电子显微镜(SEM)观察焊接接头的微观组织形貌，腐蚀液的成分为100 mL H₂O+2mL HF+5mL HNO₃。

结果与讨论

1 焊接接头形貌

图2为无缺陷的、状态良好的Ti-22Al-25Nb合金惯性摩擦焊接头宏观形貌，由图2可见，焊缝区域在1~2mm范围，上侧飞边(外飞边)相对焊缝中心呈非对称分布，飞边连续、无中断，左、右飞边的结合处根部伸出母材，结合处未呈现深入母材内部的尖端形态。下侧飞边(内飞边)表现与外飞边类似特征。

2 焊接接头热处理前后各区域微观组织形貌分析

原始态的焊接接头焊合区主要由B2相和少量残余α₂相组成，O相全部溶解，如图3所示，焊合区的晶粒呈等轴晶粒，尺寸约在30μm左右，晶界清晰，连续且平直。残余α₂相主要沿着晶界呈棒状或颗粒状形态分布，且数量较少，尺寸不大。

原始态的焊接接头热力影响区主要由B2相、残余O相以及残余α₂相构成，该区域晶粒明显变形，呈流线状，沿着金属流动的方向分布。热力影响区的O相和α₂相发生部分溶解，由图4(a)可见，靠近焊合区的O相完全溶解，α₂相少量残留；由图4(b)可见，离焊合区较远的区域O相存在少部分残余，α₂相溶解较少。热力影响区α₂相发生明显变形，大量的α₂相被挤压、扭曲，呈细长状，α₂相在热力影响区的分布较母材更为密集。原始态的焊接接头热影响区主要由B2相、α₂相以及残余O相构成，O相发生少量溶解，α₂相未发生溶解，也未发生明显变形。

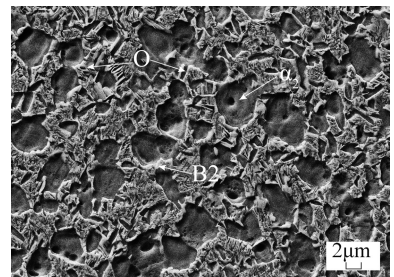


图1 Ti-22Al-25Nb合金母材SEM组织
Fig.1 SEM microstructure of Ti-22Al-25Nb alloy base material

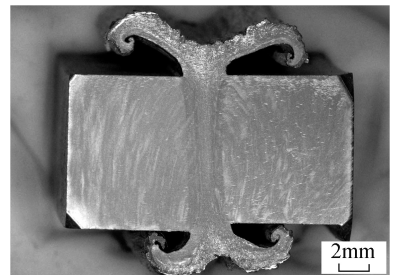


图2 Ti-22Al-25Nb合金焊接接头
OM宏观形貌

Fig.2 OM macroscopic morphology of Ti-22Al-25Nb alloy welded joint

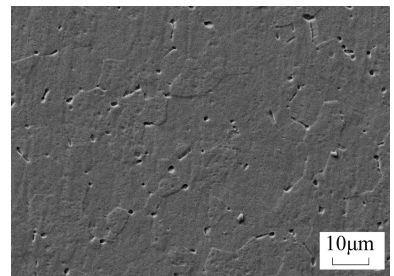


图3 原始态焊合区微观组织
Fig.3 Microstructure of original welding zone

如图5所示，焊接接头经过热处理后焊合区析出大量的细小针状O相，杂乱分布于晶内，残余α₂相的数量和尺寸未发生变化，焊合区晶粒尺寸未发生长大；热力影响区也析出大量细小O相，变形的α₂相未发生长大或粗化；热影响区同时也析出细小针状O相，α₂相未变化。

3 不同热处理制度下焊接接头各区域的显微组织

3.1 焊合区显微组织

图6为不同热处理制度下的焊

接头焊接区的微观组织。如图6(a)和(b)所示,HT1-2相比HT1-1热处理后,焊接区的O相尺寸和数量没有明显变化;由图6(c)和(d)可见,HT2-2相比HT2-1,焊接区的O相尺寸有所长大;图6(e)和(f)显示,HT3-2相比HT3-1,焊接区的O相尺寸也发生了长大。由上述现象发现,当温度处于较低温度时,热处理时间的长短对焊接区O相长大和粗化没有产生显著的影响;随着温度的升高,热处理时间则会对焊接区O相的长大和粗化产生较为明显的影响。

由图6(a)、(c)、(e)可见,当热处理时间较短时,随着热处理温度的升高,焊接区的O相会发生长大现象;如图6(b)、(d)、(f)所示,当热处理时间变长时,随着热处理温度的升高,焊接区的O相则进一步发生了明显的长大,但是长大后O相尺

寸仍然远小于母材的O相尺寸。

综上所述,温度和热处理时间共同决定了焊接区O相的数量和尺寸的变化,但是相比时间的变化,热处理温度的变化对O相的影响更为明显;当热处理温度处于780~850℃时,焊接区O相的长大幅度较小,长

大后的尺寸仍然远小于母材的O相尺寸。

3.2 热力影响区显微组织

图7为不同热处理制度下热力影响区的微观组织,热处理后热力影响区重新析出大量O相,呈细小针状;在焊接过程中未溶解的残余O

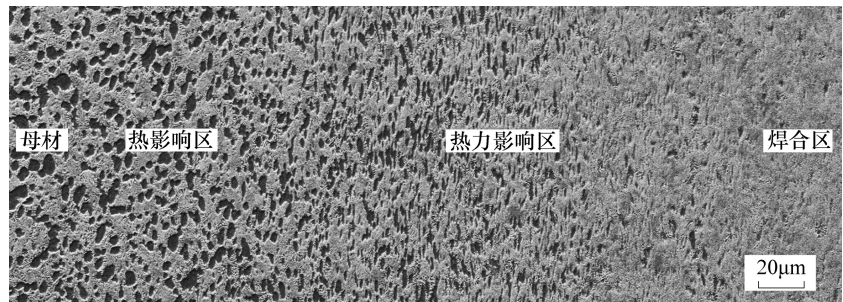
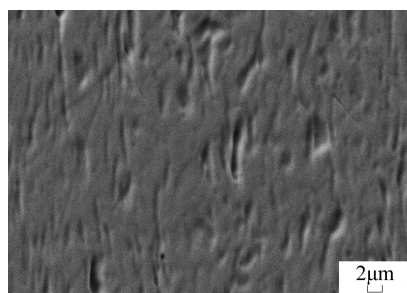
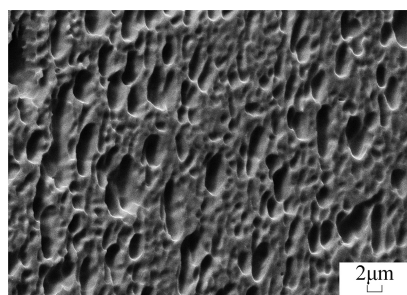


图5 热处理后焊接接头各区域微观组织

Fig.5 Microstructure of different zones of welded joint after heat treatment



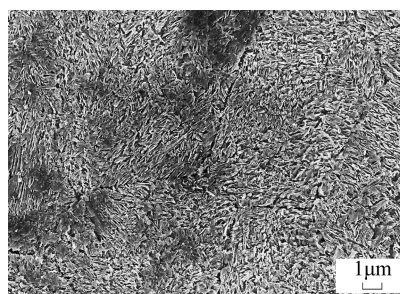
(a) 靠近焊接区



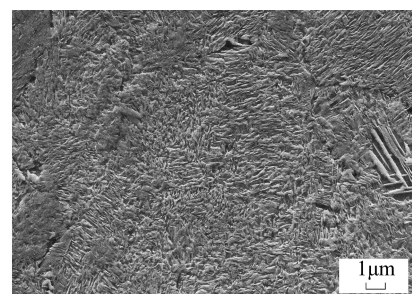
(b) 远离焊接区

图4 原始态热力影响区微观组织靠近焊接区和远离焊接区

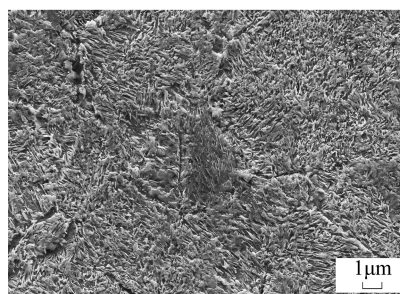
Fig.4 Microstructure of original welding zone of thermo-mechanically affected zone close to welding zone and far from welding zone



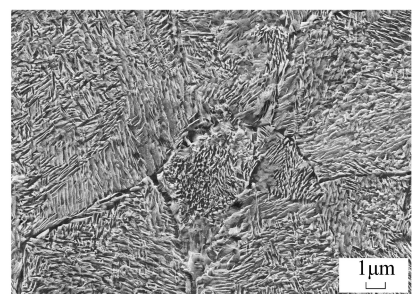
(a) HT1-1



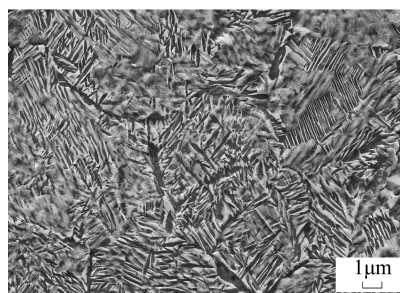
(b) HT1-2



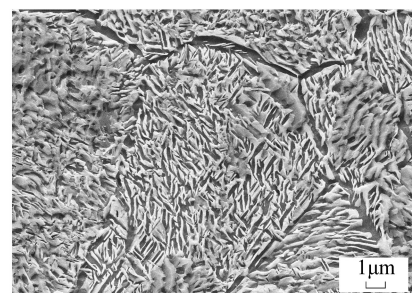
(c) HT2-1



(d) HT2-2



(e) HT3-1



(f) HT3-2

图6 不同热处理制度下焊接区SEM组织

Fig.6 SEM microstructure of welding zone with different heat treatments

相热处理后没有发生明显的长大和粗化,被挤压和拉长的 α_2 相数量和尺寸未变化。HT1-2相比HT1-1,热力影响区的O相尺寸和数量没有明显变化,如图7(a)~(b)所示;HT2-2相比HT2-1,热力影响区的O相尺寸有所长大,如图7(c)~(d)所示;HT3-2相比HT3-1,热力影响区的O相尺寸发生了较为明显长大,如图7(e)和(f)所示。

由图7可观察到与焊合区相同的现象,当热处理时间较短时,随着热处理温度的升高,热力影响区的O相发生不太显著的长大;当热处理时间变长时,随着热处理温度的升高,热力影响区的O相则发生比较

明显的长大。更高的温度热处理后,原来分布较为杂乱的细小针状O相则转变为平行排列的较大尺寸O相。

3.3 热影响区及过渡区显微组织

热影响区在焊接过程中仅受到焊接热输入的影响,O相和 α_2 相没有发生变形,O相受到高温影响发生少量溶解, α_2 相未发生溶解,是由于 α_2 相相变温度高于O相,传递到该区域的温度低于 α_2 相相变温度^[24];热力影响区与热影响区的过渡区域的部分O相和 α_2 相发生了变形,但是变形的程度远小于热力影响区靠近焊合区的区域,过渡区域还存在一些尚未发生变形的 α_2 相,该区域的O相较热影响区发生溶解的数量更

多。图8为不同热处理制度下热影响区、以及热力影响区与热影响区的过渡区域微观组织。可观察到,经过不同热处理后,热影响区析出针状O相,随着温度升高,热处理时间增长,O相发生粗化现象, α_2 相未发生变化;不同热处理后,热力影响区与热影响区的过渡区域的变形 α_2 相未发生变化,O相发生粗化和长大。

3.4 母材显微组织

图9为不同热处理制度下母材的微观组织。可见,在780~850℃的热处理,对于母材大尺寸板条O相和 α_2 相的尺寸和数量没有显著的影响。当热处理温度较低时,在大尺寸O相之间会析出细小针状O相;随着热处理温度升高,时间延长,细小针状O相发生粗化,转变为平行排列的较大尺寸O相。

结论

(1) 利用惯性摩擦焊技术可获得无缺陷、焊缝状态良好的Ti-22Al-25Nb合金焊接接头;母材为B2+O+ α_2 三相组织的原始态焊接接头焊合区主要由B2相和少量残余 α_2 相组成,O相全部溶解;热力影响区主要由B2相、残余O相以及残余 α_2 相构成;热影响区主要由B2相、 α_2 相以及残余O相构成。

(2) 温度和热处理时间共同决定了焊合区O相的数量和尺寸的变化,相比时间的变化,热处理温度的变化对O相的影响更为明显;当热处理温度处于780~850℃时,焊合区O相的长大幅度较小,长大后的尺寸仍然远小于母材的O相尺寸;热力影响区O相呈现与焊合区相同的演变规律;随着温度升高,热处理时间增长,热影响区O相发生粗化现象, α_2 相未发生变化。

参考文献

[1] 沈军,冯艾寒.Ti₂AlNb基合金微观组织调制及热成形研究进展[J].金属学报,

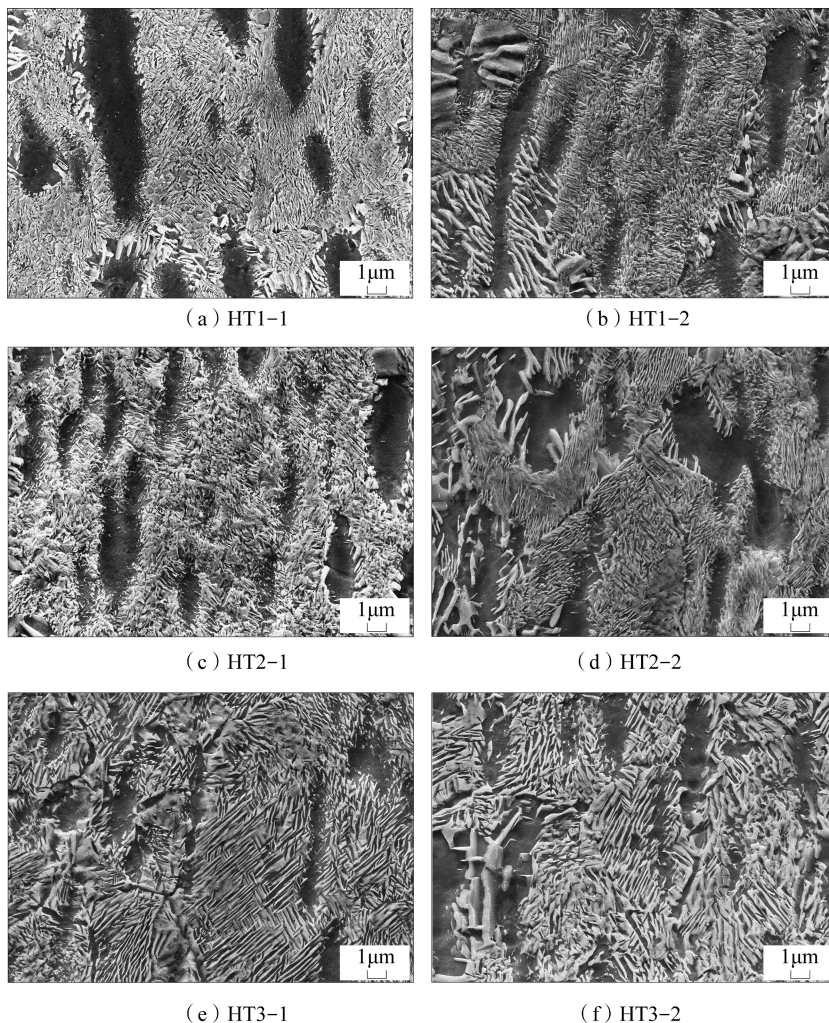


图7 不同热处理制度下热力影响区SEM组织

Fig.7 SEM microstructure of thermo-mechanically affected zone with different heat treatments

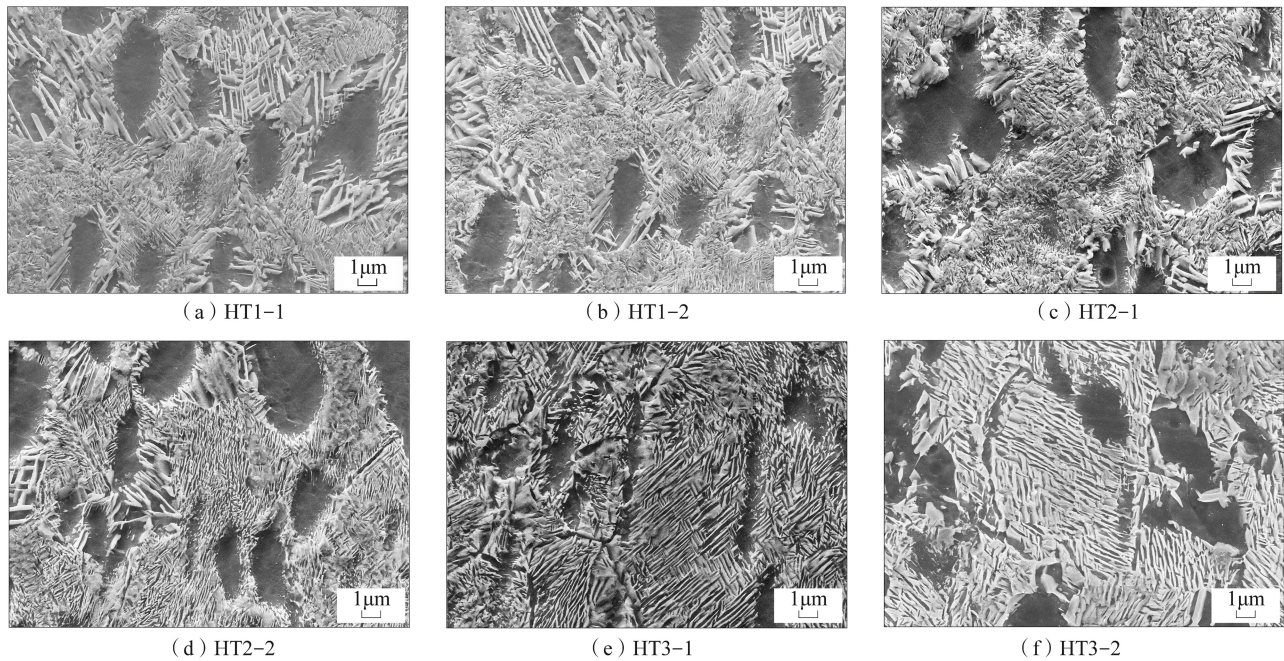


图8 不同热处理制度下热影响区及过渡区SEM组织

Fig.8 SEM microstructure of heat affected zone and transition zone with different heat treatments

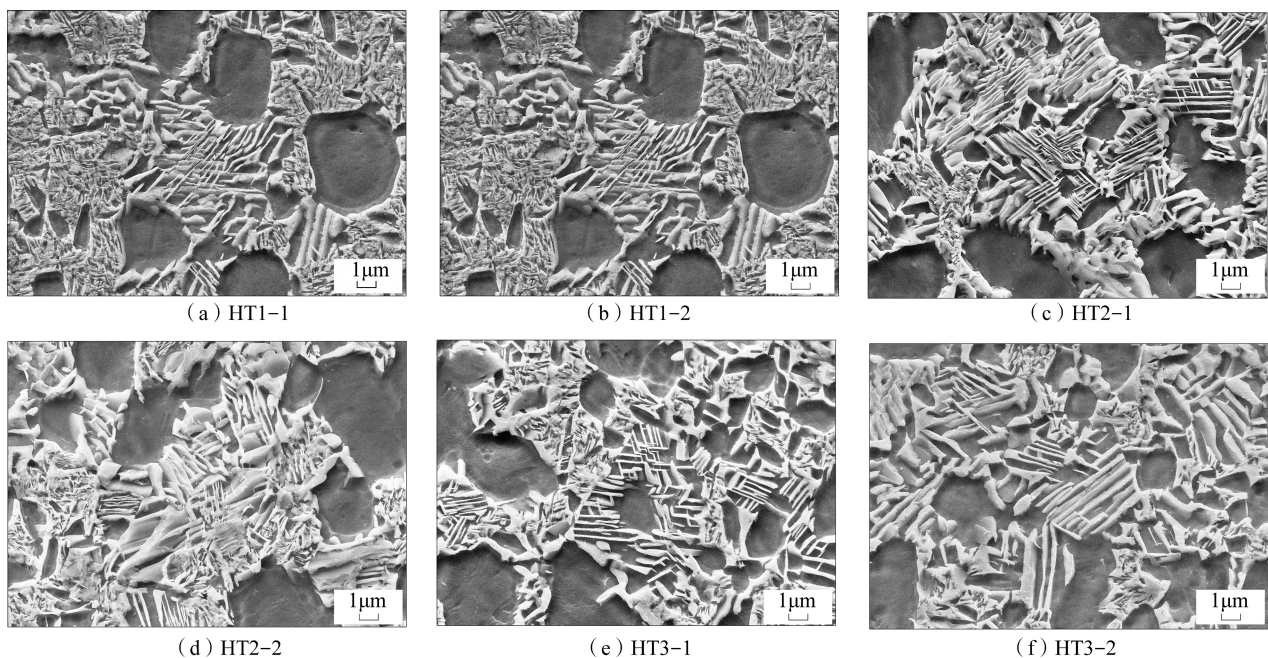


图9 不同热处理制度下母材SEM组织

Fig.9 SEM microstructure of base material with different heat treatments

2013, 49(11): 1286-1294.

SHEN Jun, FENG Aihan. Recent advances on microstructural controlling and hot forming of Ti_2AlNb -based alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(11): 1286-1294.

[2] MURALEEDHARAN K, NANDY

T K, BANERJEE D, et al. Transformations in a $Ti-24Al-15Nb$ alloy: A composition invariant $\beta_o \rightarrow O$ transformation[J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23(2): 417-431.

[3] PATHAK A, SINGH A K. A first principles study of Ti_2AlNb intermetallic[J].

Solid State Communications, 2015, 204: 9-15.

[4] KAZANTSEVA N V, DEMAKOV S L, POPOV A A. Microstructure and plastic deformation of orthorhombic titanium aluminides Ti_2AlNb . III. Formation of transformation twins upon the $B2 \rightarrow O$ phase

- transformation[J]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2007, 103(4): 378-387.
- [5] 司玉锋, 孟丽华, 陈玉勇. Ti₂AlNb 基合金的研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2006, 36(3): 10-13, 25.
- SI Yufeng, MENG Lihua, CHEN Yuyong. Research development of Ti₂AlNb-based alloy[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2006, 36(3): 10-13, 25.
- [6] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. *材料工程*, 2017, 45(10): 1-5.
- LIU Daxiang. One generation of new material, one generation of new type engine: Development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(10): 1-5.
- [7] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基合金的研究与应用[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(10): 336-341.
- ZHANG Jianwei, LI Shiqiong, LIANG Xiaobo, et al. Research and application of Ti₃Al and Ti₂AlNb based alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(10): 336-341.
- [8] 杜刚, 崔林林, 雷强, 等. O 相合金 Ti₂AlNb 的研究进展[J]. *中国材料进展*, 2018, 37(1): 68-73.
- DU Gang, CUI Linlin, LEI Qiang, et al. Research and development of orthorhombic titanium aluminide[J]. *Materials China*, 2018, 37(1): 68-73.
- [9] 尹建明, 卢斌, 李玉兰, 等. Ti₂AlNb 合金板材的电子束焊接[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(10): 325-330.
- YIN Jianming, LU Bin, LI Yulan, et al. Electron beam welding of Ti₂AlNb based alloy sheet[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(10): 325-330.
- [10] TAN L J, YAO Z K, ZHOU W, et al. Microstructure and properties of electron beam welded joint of Ti-22Al-25Nb/TC11[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2010, 14(5): 302-306.
- [11] CHEN Y B, ZHANG K Z, HU X, et al. Study on laser welding of a Ti-22Al-25Nb alloy: Microstructural evolution and high temperature brittle behavior[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 681: 175-185.
- [12] 雷正龙, 董智军, 陈彦宾, 等. 激光焊接热输入对 Ti₂AlNb 合金组织性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(3): 579-584.
- LEI Zhenglong, DONG Zhijun, CHEN Yanbin, et al. Effect of heat input on the microstructures and mechanical properties of laser welded Ti₂AlNb alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(3): 579-584.
- [13] 李万青, 魏红梅, 何鹏, 等. Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 合金扩散连接界面的组织及力学性能[J]. *材料工程*, 2015, 43(1): 37-43.
- LI Wanqing, WEI Hongmei, HE Peng, et al. Interracial microstructure and mechanical properties of diffusion bonding of Ti₃Al and Ti₂AlNb alloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(1): 37-43.
- [14] LI P, JI X H, XUE K M. Diffusion bonding of TA15 and Ti₂AlNb alloys: Interfacial microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(4): 1839-1846.
- [15] 常川川, 张田仓, 李菊. Ti-22Al-27Nb 合金线性摩擦焊接头组织与显微硬度分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 140-144.
- CHANG Chuanchuan, ZHANG Tiancang, LI Ju. Study on microstructure and microhardness of linear friction welded joints of Ti-22Al-27Nb alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(3): 140-144.
- [16] 张力军. Ti₂AlNb 合金钎焊及液相扩散连接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHANG Lijun. Research on brazing and liquid phase diffusion bonding processing of Ti₂AlNb alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] 吴爱萍, 李艳军, 赵玥, 等. Ti₂AlNb 合金电子束焊接接头的残余应力与再热裂纹[J]. *航空制造技术*, 2018, 58(8): 26-35.
- WU Aiping, LI Yanjun, ZHAO Yue, et al. Residual stresses and reheat cracking of Ti₂AlNb electron beam welded joints[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 58(8): 26-35.
- [18] 赵强, 祝文卉, 邵天巍, 等. 惯性摩擦焊在航空发动机转子制造中的应用[J]. *航空动力*, 2019(5): 41-44.
- ZHAO Qiang, ZHU Wenhui, SHAO Tianwei, et al. Application of inertia friction welding in engine rotor manufacturing[J]. *Aerospace Power*, 2019(5): 41-44.
- [19] 王晓峰, 邹金文, 杨杰, 等. FG96 合金惯性摩擦焊焊区的微观组织表征[J]. *中国材料进展*, 2019, 38(8): 806-812.
- WANG Xiaofeng, ZOU Jinwen, YANG Jie, et al. Microstructure characterization of inertia friction bonding region for nickel-based superalloy FG96[J]. *Materials China*, 2019, 38(8): 806-812.
- [20] 何胜春, 张田仓. TC17 钛合金惯性摩擦焊接头组织特征分析[J]. *焊接*, 2008(4): 61-63.
- HE Shengchun, ZHANG Tiancang. Microstructure of TC17 titanium IFW joint[J]. *Welding & Joining*, 2008(4): 61-63.
- [21] 赵强, 祝文卉, 邵天巍, 等. Ti-22Al-25Nb 合金惯性摩擦焊接头显微组织与力学性能[J]. *材料工程*, 2020, 48(6): 140-147.
- ZHAO Qiang, ZHU Wenhui, SHAO Tianwei, et al. Microstructure and mechanical properties of inertia friction welded joint of Ti-22Al-25Nb alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(6): 140-147.
- [22] BOEHLERT C J, MAJUMDAR B S, SEETHARAMAN V, et al. The microstructural evolution in Ti-Al-Nb O+BCC orthorhombic alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(9): 2305-2323.
- [23] BOEHLERT C J. The tensile behavior of Ti-Al-Nb O+BCC orthorhombic alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(8): 1977-1988.
- [24] 孟卫如, 牛锐锋, 王士元, 等. TC4 钛合金惯性摩擦焊接头温度场分析[J]. *焊接学报*, 2004, 25(4): 111-114.
- MENG Weiru, NIU Ruifeng, WANG Shiyuan, et al. Analysis of temperature field in TC4 titanium alloy inertia fraction welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(4): 111-114.

通讯作者: 赵强, E-mail: qiangzhao_1987@163.com.

Microstructure Analysis of Inertia Friction Welded Joints of Ti-22Al-25Nb Alloy With Different Heat Treatments

ZHAO Qiang¹, ZHU Wenhui¹, SHUAI Yanlin¹, LIU Jiatao¹, ZHANG Li², WANG Ran³,
SHANG Zhen¹, LIU Yue¹

- (1. Technology Center, AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;
2. School of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
3. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China)

[ABSTRACT] Ti₂AlNb alloy was welded by inertia friction welding. The microstructure changes of welded joints under welded condition and after different heat treatments were analyzed. The influence of different heat treatments on the microstructure of inertia friction welded joints of Ti-22Al-25Nb alloy was studied. The results show that the Ti-22Al-25Nb alloy welded joint without defect and with weld in good condition can be obtained by inertial friction welding. The change of the number and size of O phase in the welding zone is determined by the temperature and duration of heat treatment. However, compared with the change of duration, the change of temperature during heat treatment has a more remarkable influence on O phase. After heat treatment at temperature between 780 °C and 850 °C, the growth range of O phase in the welding zone is small, and the size after growth is still far smaller than that of the base material. The evolution of O phase in thermo-mechanically affected zone is the same as that in welding zone. With the increasing of heating temperature and prolonging of heating time, O phase in HAZ coarsens, while α₂ phase is of no change.

Keywords: Inertia friction welding; Ti₂AlNb alloy; Microstructure; Heat treatment process; Welded joint

(责编 古京)

(上接第46页)

Study of Materials Flow on Non-Keyhole Friction Stir Welding

LI Dengchang^{1,2}, YUE Yumei², JI Shude², CHAI Peng³, SHANG Zhen²

- (1. Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Xinxiang 453000, China;
2. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
3. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The non-keyhole friction stir welding was used to attain the weld without keyhole in the weld end. A model of material flow was established by the fluent software. The material flow behavior during non-keyhole friction stir welding was obtained by the numerical simulation and was verified by the cross section morphology. The experimental results about cross-section morphology show that the stir zone (SZ) is approximately drum-shaped, the thermo-mechanically affected zone is banded and distributed on both SZ sides and under the SZ, and the heat-affected zone presents a basin shape. The numerical simulation results show that the maximum flow velocity of the material is located at the outer side of the sleeve, the material inside the sleeve flows downward under the action of centrifugal force generated by high-speed rotation. Increasing rotation velocity of tool and decreasing the welding speed can expand the high-speed flow area of the material, which is conducive to reducing the height of the kissing bond line at the root. The experimental results well agrees with numerical simulation results.

Keywords: Non-keyhole friction stir welding; Numerical simulation; Materials flow; Cross-section morphology; Stir zone

(责编 古京)