

GH3044 线性摩擦焊接头组织特征及其形成机制*

石鹏涛, 马铁军, 李文亚, 张 勇, 杨夏炜, 肖 遥

(西北工业大学陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072)

[摘要] 进行了固溶强化型镍基高温合金 GH3044 线性摩擦焊接试验, 光镜与扫描电镜组织观察、EDS 成分分析及拉伸测试表明, 接头中焊缝与热力影响区晶粒明显细化, 碳化物分布发生改变使焊缝与热力影响区均可见明显流线, 但未对接头拉伸强度造成影响, 接头拉伸强度与母材相当。EBSD 分析表明, 接头主要发生了不连续动态再结晶, 并伴随部分连续动态再结晶及静态再结晶, 使焊缝与热力影响区中小角度晶界比例大幅增高, 孪晶界大幅减少。热力影响区中小角度晶界比例更高, 是因为该区形成较强织构而焊缝区再结晶更为充分。

关键词: GH3044; 线性摩擦焊; 组织特征; 形成机制; EDS 分析

Microstructure Feature and Its Forming Mechanism of Linear Friction Welded GH3044 Joint

SHI Pengtao, MA Tiejun, LI Wenya, ZHANG Yong, YANG Xiawei, XIAO Yao

(Key Laboratory of Friction Welding Engineering Technology of Shaanxi Province,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The linear friction welding (LFW) experiment of solid-solution strengthening Ni-base superalloy GH3044 was carried out. Microstructural examination of the joint showed that both in the weld zone (WZ) and thermomechanically affected zone (TMAZ) the grains are refined significantly and the streamlines are formed due to the rearrangement of carbides. The tensile strength of the joint is comparable to that of the base metal (BM). The EBSD results show that the joint microstructure undergoes mainly discontinuous dynamic recrystallization during LFW, accompanying with a part of continuous dynamic recrystallization and static recrystallization. As a consequence, the low-angle grain boundaries (LAGBs) increase sharply while the twin grain boundaries decrease drastically in the joint. The TMAZ has more LAGBs than WZ, because strong microtexture forms in the TMAZ while more sufficient recrystallization occurs in the WZ.

Keywords: GH3044; Linear friction welding; Microstructure feature; Forming mechanism; EDS analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.080

线性摩擦焊 (Linear Friction Welding, LFW) 能够实现复杂截面同质及异质材料的固相连接, 成为国际公认理想的航空发动机整体叶盘焊接制造与维修关键技术^[1]。目前, 该技术已在钛合金整体叶盘的制造中获得成功应用^[2]。

近年来, 为进一步拓展该技术的应用, 国内外已针对几种高温合金开展了线性摩擦焊研究^[3]。Ma 等^[4]针对 GH4169 开展的线性摩擦焊研究发现焊缝区晶粒明显细化, 但由于高温导致强化相 γ' 与 γ'' 发生转变、杂质元素在晶界析出, 且在碳化物与氧化物的共同作用下, 导致接头力学性能下降。Vishwakarma 等^[5]对 IN718 Plus 进行了线性摩擦焊研究, 结果表明: 焊缝区由细小的再结晶晶粒组成, 晶间存在低熔共晶物; 热力

影响区出现了由 MC 碳化物、富钛的碳氮化物以及 δ 相等第二相液化造成的组分化以及晶界液化, 并伴有 Laves 相的产生。Ola 等^[6]研究指出: IN738 可以通过线性摩擦焊获得良好接头, 尽管热力影响区发生了组分化与晶间液化, 却没有产生裂纹, 是由于焊接过程的压应力加速了液相溶质原子扩散, 使得液相能够快速凝固。

可以看出, 上述研究均针对沉淀强化型高温合金展开, 而对于强化机制不同的固溶型高温合金至今尚未开展线性摩擦焊研究。GH3044 是以 W、Cr 为主要强化元素的固溶强化型镍基高温合金, 用以制造 900℃ 以下长期工作的航空发动机主燃烧室和加力燃烧室零部件^[7]。本文针对该合金开展线性摩擦焊接头微观组织特征及其形成机制研究。

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51675435)。

1 试验方法

试验所用材料为 GH3044 锻件, 化学成分如表 1 所示, 其组织主要为等轴奥氏体, 晶粒内部存在较多退火孪晶(见图 1)。采用 EDS 成分分析可知, 母材组织中黑色颗粒(箭头)为 TiN, 大量的白色颗粒(箭头)为 $\text{Cr}(\text{W})_{23}\text{C}_6$, 焊接试样焊合面尺寸为 $28\text{mm} \times 8\text{mm}$, 焊接沿 28mm 方向振动。

焊接试验在西北工业大学自主研制的 XMH-250 型线性摩擦焊设备上, 基于焊接试验探索, 选取表 2 中的工艺参数进行试样焊接。

焊后接头按照 GB/6397-86 标准加工拉伸试样 4 件, 在 WE-30 型万能实验机上进行拉伸测试, 对焊后接头沿摩擦方向截取接头纵剖面金相试样, 抛光后用王水($\text{HCl} : \text{HNO}_3 = 3 : 1$)进行腐蚀, 采用 OLYMPUS PMG3 型光学显微镜对接头进行光镜(OM)组织观察, 采用 TESCAN VEGAII LMU 型电子显微镜对接头进行电镜扫描(SEM)组织观察及 EBSD 分析。

2 结果与讨论

2.1 接头总体特征

焊接接头外观如图 2 所示, 可以看出, 接头两侧飞

表1 GH3044化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of GH3044 %

C	Cr	W	Si	Mo
≤ 0.1	23~26	13~16	≤ 0.8	≤ 1.5
Al	Ti	Mn	Fe	Ni
≤ 0.5	0.3~0.7	≤ 0.5	≤ 4	余量

表2 线性摩擦焊试验参数
Table 2 Linear friction welding parameters

摩擦压力 /MPa	振幅 /mm	频率 /Hz	摩擦时间 /s
160	2.5	35	8

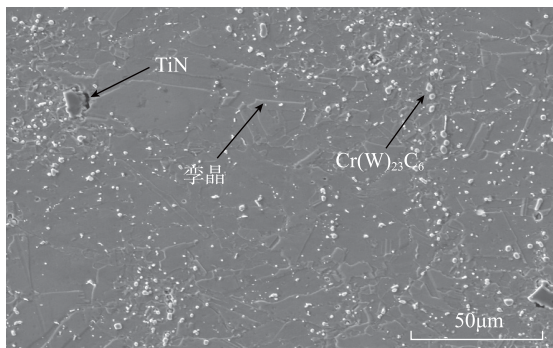


图1 GH3044母材微观组织
Fig.1 Microstructure of GH3044 base metal

边不粘连, 与钛合金接头飞边形貌差异较大^[8]。其主要原因为高温合金在高温下仍然具有较高的强度, 焊接面金属塑性流动差, 焊缝端部易氧化。飞边不粘连难以对焊合面边缘提供良好的保护, 这一点与其他高温合金 LFW 接头相似^[5,8-10]。

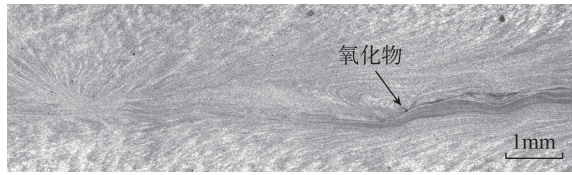
图 3 为接头典型区域组织照片。由图 3 (a) 可见, 接头中焊缝端部存在明显黑色带状物, EDS 分析表明其含有氧化物。根据接头纵向剖面(见图 3 (b)) 组织形态的变化特征, 将接头分为焊缝区(Weld Zone, WZ)、热力影响区(Thermomechanically Affected Zone, TMAZ)和母材区(Base Metal, BM)。WZ 呈现完全水平的流线特征, 其宽度约为 0.4mm; TMAZ 的流线由垂直渐变为水平, 其宽度约为 0.8mm。

从电镜放大照片可以看出, WZ (见图 3 (c)) 由均匀细小的等轴晶粒组成, 原始 BM 中的颗粒状碳化物消失, 而晶界处的白色物质由 EDS 分析可知为碳化物。 M_{23}C_6 型碳化物的熔点约为 1010°C , 表明 WZ 温度超过了碳化物的熔点, 在焊后的快速冷却过程中熔解的碳化物又从基体中析出, 以致密的形态保留于晶界处。由于 GH3044 层错能较低, 易发生动态再结晶, 因此 TMAZ 同样由大量的细晶组成。WZ 到 BM 具有较高的温度梯度, TMAZ 中的碳化物仅发生少量溶解, 故 TMAZ 中可清楚看到与母材基本相同的碳化物白色颗粒(见图 3 (d))。WZ 和 TMAZ 中的碳化物随线性摩擦焊接过程热塑金属的流动, 便形成明显流线, 显然其与变形晶粒形成的钛合金接头流线是不同的^[11]。

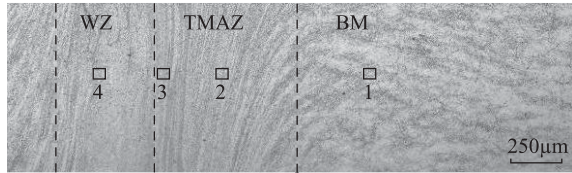
接头拉伸试验结果如表 3 所示, 试样断后位置如图 4 所示, 1 号和 2 号试样由于取材位置靠近接头边缘, 受焊缝端部氧化物的影响, 拉伸断裂发生在焊缝处, 虽抗拉强度仅低于母材约 7%, 但断口塑性明显较差; 3 号和 4 号试样取材位置靠近焊接中心, 试样断裂于远离焊缝的母材处, 断口可见明显颈缩。测试结果表明, GH3044 线性摩擦焊接头由于细晶强化获得较高抗拉强度, 且未受到碳化物流线影响。



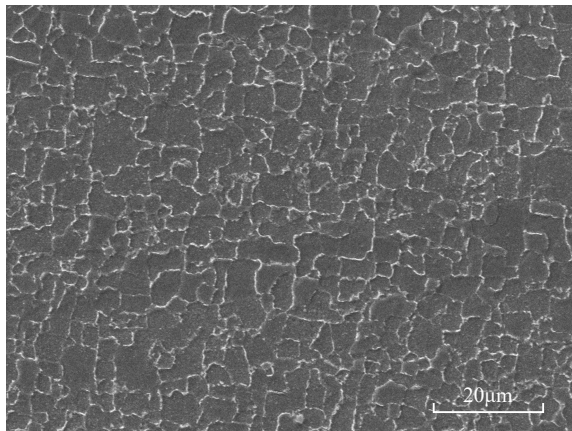
图2 接头外观形貌
Fig.2 Morphology of Joint



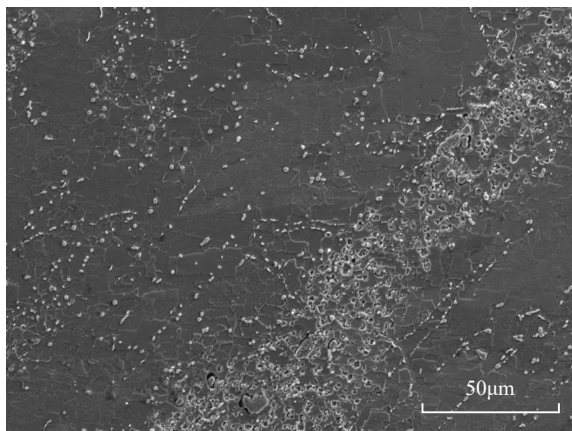
(a) 端部 OM 照片



(b) 中部 OM 照片



(c) 焊缝区 SEM 照片



(d) 热力影响区 SEM 照片

图3 接头金相组织
Fig.3 Micrographs of joint

表3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile testing

试样	抗拉强度 /MPa	断面收缩率 /%	延伸率 /%
1号	809.0	5.2	17
2号	842.6	9.4	23
3号	888.3	41.5	37
4号	889.9	44.4	38

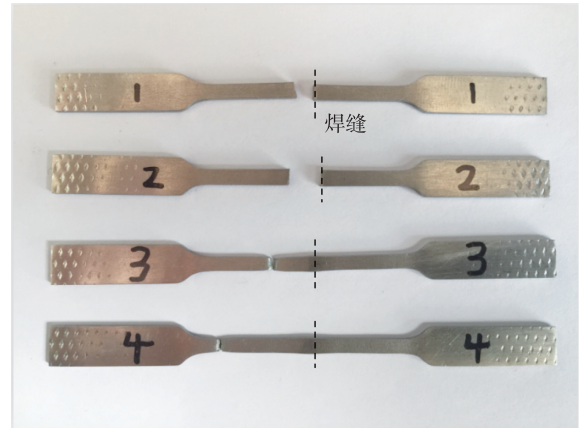


图4 试样拉伸断裂位置

Fig.4 Fracture position of samples after tensile test

2.2 接头微观组织特征及形成机制

为探究接头微观组织演变,在图3中选取了4个区域进行EBSD分析。主要针对OIM软件输出的晶界图(以下简称OIM晶界图)和大小角度晶界所占比例分布图(以下简称晶界角度分布图)进行讨论。区域1(母材)、区域2(TMAZ中部)、区域3(TMAZ近焊缝区)及区域4(焊缝)的测试结果如图5~7所示。

在此说明,晶界图中黑色线条为大角度晶界,绿色线条为小角度晶界,红色线条为孪晶界。晶界角度分布图中取向差处于 $2^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的晶界为小角度晶界(Low-Angle Grain Boundaries, LAGBs),取向差 $>15^{\circ}$ 的晶界为大角度晶界(High-Angle Grain Boundaries, HAGBs),其中取向差处于 60° 处为孪晶界(Twin Boundaries)。

2.2.1 母材

对照图5(a)和(b)可以看出,母材晶粒粗大,主要为大角度晶界,单个晶粒内部的取向几乎一致,仅存在微量小角度晶界。图5(a)中可见大量孪晶界,由图5(b)可知母材中孪晶界约占71%。

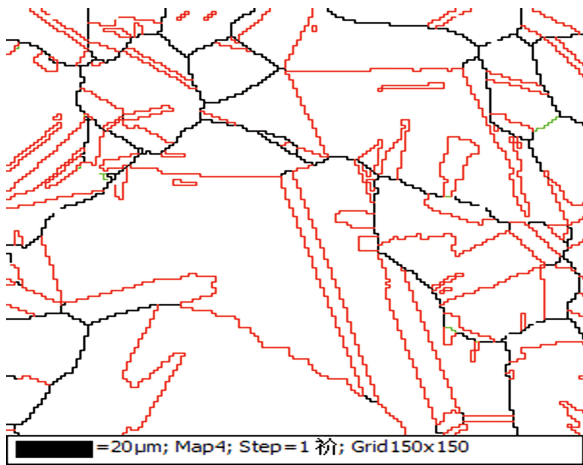
2.2.2 热力影响区

从图6(a)和(c)可以看出,TMAZ中部到近缝区的晶粒的尺寸逐渐变大,但较母材晶粒细小很多,表明TMAZ发生了较为充分的再结晶。从图6(b)和(d)可得出,TMAZ中部的小角度晶界占9.9%,大角度晶界占90.1%,晶粒的平均取向差角为 40.95° ;近缝区的小角度晶界占17.5%,大角度晶界82.5%,晶粒的平均取向差角为 35.26° 。与母材相比,TMAZ小角度晶界比例大幅提高,而近缝区的比例更高,这是因为在线性摩擦焊局部大变形条件下,TMAZ不同区域的变形程度、应变速率及温度具有显著差异。近缝区晶粒内部的位错密度更高,在高温作用下这些高密度位错易发生多边形形

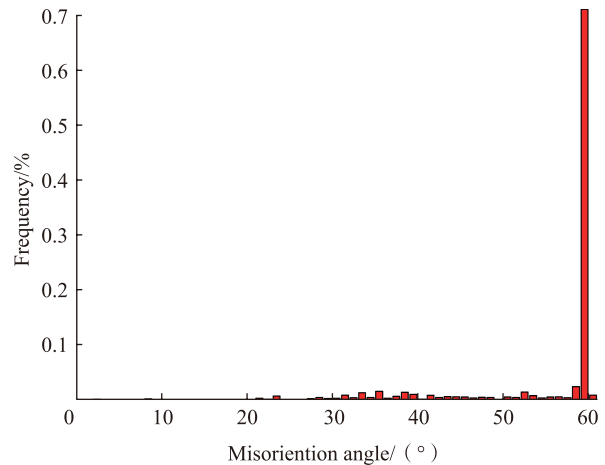
成大量小角度亚晶界。另外, TMAZ 近缝区可见较大尺寸晶粒, 使得大角度晶界比例下降, 但这些大尺寸晶

粒并不是由单纯的晶粒长大形成。

从图 6 中还可以看到孪晶界比例在 TMAZ 中部占



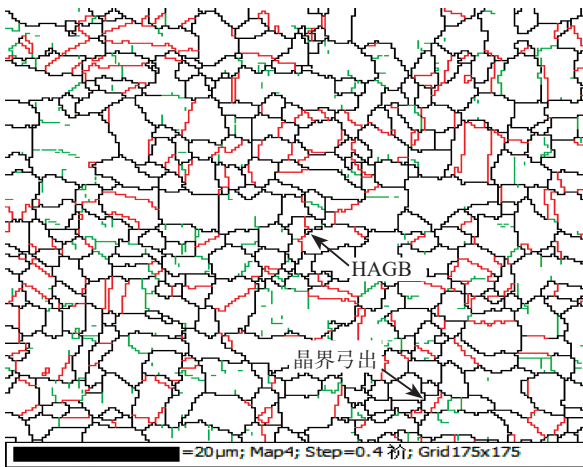
(a) 区域 1 OIM 晶界图



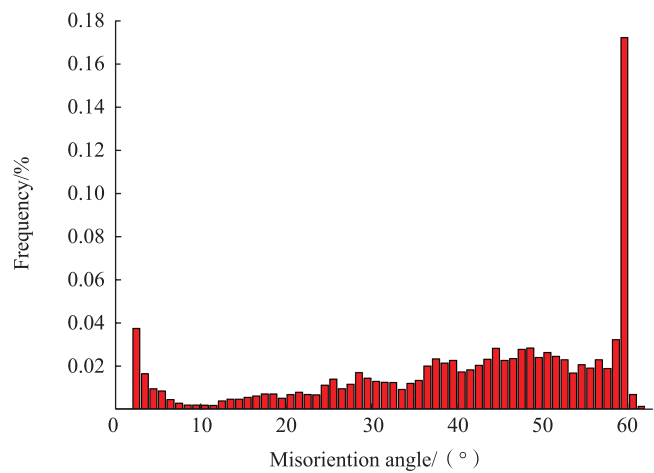
(b) 晶界角度分布图

图5 母材区EBSD图

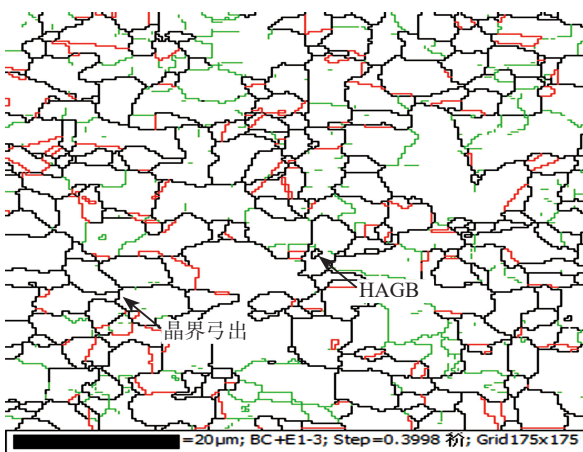
Fig.5 EBSD maps of base metal



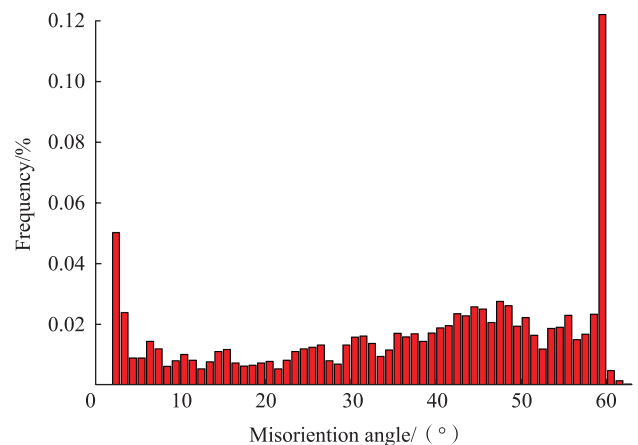
(a) 区域 2 OIM 晶界图



(b) 区域 2 晶界角度分布图



(c) 区域 3 OIM 晶界图



(d) 区域 3 晶界角度分布图

图6 热力影响区EBSD图

Fig.6 EBSD maps of TMAZ

17%,在近缝区占 12.3%,较母材显著减少,这是因为局部塑性大变形导致孪晶发生转动,失去与基体之间理想的位向关系而转变成普通大角度晶界,致使孪晶界比例大量减少^[12-13],近缝区变形程度更高,其孪晶界的比例也就更低。

2.2.3 焊缝区

从图 7 (a) 可以看出, WZ 为细小等轴组织与 TMAZ 相比更加细小均匀。从图 7 (b) 可以得出,焊缝区的小角度晶界比例为 9.9%,大角度晶界比例为 90.1%,平均取向差为 38.96°,通过比较可得出小角度晶界比例的变化趋势:母材微量, TMAZ 中部显著升高, TMAZ 近缝区再次大幅升高到最大值, WZ 下降但与 TMAZ 中部相当。

WZ 的温度必然高于 TMAZ,却没有出现 TMAZ 中的大尺寸晶粒。有如下推测: TMAZ 在 LFW 强烈地变形过程中,部分相邻晶粒的位向趋于一致形成比

较强的织构,使部分 HAGBs 转变为 LAGBs,其中位向趋于一致的相邻晶粒在晶界图中呈现为大尺寸晶粒。TMAZ 近缝区变形程度更高,织构则更为明显,这与接头中 LAGBs 所占比例最高相吻合。WZ 中大小角度晶界比例虽与 TMAZ 中部相当,但孪晶界含量在整个接头中最低,仅为 9%,普通大角度晶界比例则相对更高,加上其晶粒均匀细小,表明在更高的温度和应变速率条件下发生了更为充分的再结晶,而未形成织构。

从图 6 (a)、(c) 和图 7 (a) 中可以看到, WZ 与 TMAZ 较多晶粒发生了晶界弓出(箭头所指),且其附近还出现了一些细小等轴晶粒,这些小晶粒内几乎不含小角度晶界。该组织形态特征表明, GH3044 在 LFW 过程中接头组织主要发生了不连续动态再结晶(DDRX),这与低层错能金属易发生 DDRX 相符,还可以看到部分晶粒内部包含少量的 HAGBs(箭头所指),其为亚晶通过旋转不断吸收位错以增加取向差从而转变为 HAGBs,说明焊接过程中还伴随着部分连续动态再结晶(CDRX)。另外,在 WZ 和 TMAZ 中还可看到个别较小的晶粒内出现了孪晶界(见小晶粒内的红色线段),而基本无小角度晶界,表明 GH3044 在 LFW 快速冷却过程中,还发生了静态再结晶(SRX)使 WZ 晶粒进一步细化,同时产生退火孪晶。

3 结论

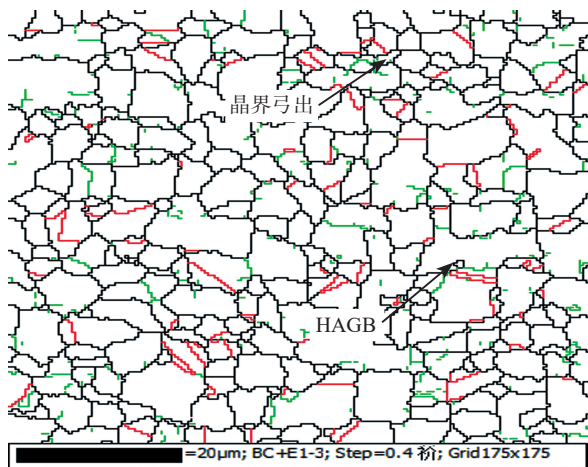
(1) GH3044 通过 LFW 可获得拉伸强度与母材相当的焊接接头,但飞边不粘连易使焊缝端部发生氧化。接头 WZ 和 TMAZ 晶粒均明显细化,碳化物随焊接过程热塑金属流动使两个区域均形成明显流线,但未对接头拉伸强度造成影响。

(2) GH3044 在 LFW 过程中主要发生了不连续动态再结晶(DDRX),并伴随部分连续动态再结晶(CDRX)及静态再结晶(SRX)。WZ 和 TMAZ 中 LAGB 比例大幅提高,同时孪晶界大幅减少, TMAZ 中形成较强织构, LAGB 比例低于 WZ。

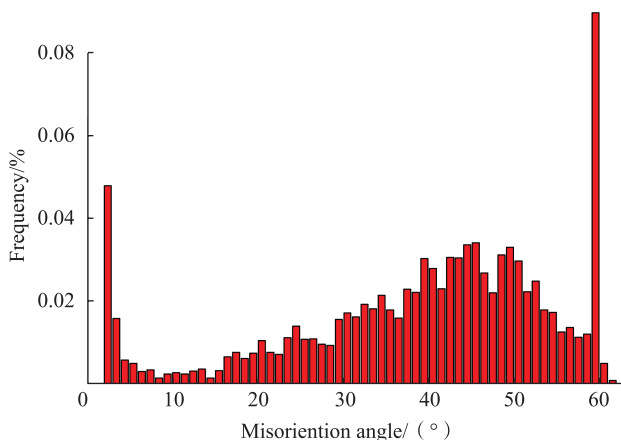
参考文献

[1] 苏宇, 马铁军, 李文亚, 等. 整体叶盘线性摩擦焊接设备研制与发展现状[J]. 航空制造技术, 2016, 59(18): 53-57.
 SU Yu, MA Tiejun, LI Wenya, et al. Research and development status of linear friction welding equipment of blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(18): 53-57.
 [2] 张海艳, 张连锋. 航空发动机整体叶盘制造技术国内外发展概述[J]. 航空制造技术, 2013, 56(23/24): 38-41.

(下转第101页)



(a) 焊缝区 OIM 晶界图



(b) 晶界角度分布图

图7 焊缝区EBSD图

Fig.7 EBSD maps of weld zone

分析[J]. 液压与气动, 2015(10): 52-55, 60.

JIA Chenhui, DU Caifeng, QIU Ming. Analysis of static characteristics of spherical spiral groove aerodynamic bearing[J]. Hydraulic and Pneumatic Transmission, 2015(10): 52-55, 60.

[10] 郭良斌, 彭宝林, 王卓, 等. 基于静特性分析的环面节流静压气体球轴承参数设计[J]. 武汉科技大学学报, 2011, 34(3): 167-172.

GUO Liangbin, PENG Baolin, WANG Zhuo, et al. Parameter design of hydrostatic spherical gas bearing with toroidal throttle based on static characteristic analysis[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2011, 34(3): 167-172.

[11] 解鹏, 金光, 张雷, 等. 小孔节流方式对静压气体球轴承工作特性的影响[J]. 润滑与密封, 2010, 35(3): 77-80.

XIE Peng, JIN Guang, ZHANG Lei, et al. The effect on operating characteristics of static pressure gas bearing for different orifice[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(3): 77-80.

[12] 郭良斌, 王祖温. 小孔节流静压气体球轴承自激振动现象的研究[J]. 机床与液压, 2006(8): 66-68.

GUO Liangbin, WANG Zuwen. Study on pneumatic hammer in external pressurized spherical gas bearings with single orifice compensation[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(8): 66-68.

[13] CHEN C H, KANG Y, YANG D W, et al. Influence of the number of feeding holes on the performances of aerostatic bearings[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2010, 62(3): 150-160.

[14] 王福军. 计算流体力学动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[15] 李树森, 刘曦. 精密离心机静压气体轴承主轴系统的动力学特性分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 28-32.

LI Shusen, LIU Dun. Dynamics characteristic analysis of aerostatic bearing spindle system of precision centrifuge[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 28-32.

[16] TAN K K, HUANG S N. Problem and solution of designing an air beating system[C]//Proceedings of 2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems. IEEE Xplore, 2010.

[17] ELESKAKY M E. CFD Investigation of pressure depressions in aerostatic circular thrust bearings[J]. Tribology International, 2009, 42(7): 1108-1117.

[18] 张国庆. 提高静压气体轴承刚度和承载能力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

ZHANG Guoqing. Research on improving stiffness and load capacity of externally pressurized gas bearings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

(上接第84页)

ZHANG Haiyan, ZHANG Lianfeng. Development overview of aeroengine integral blisk and its manufacturing technology at home and abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(23/24): 38-41.

[3] LI W Y, VAIRIS A, PREUSS M, et al. Linear and rotary friction welding review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71-100.

[4] MA T J, CHEN X, LI W Y, et al. Microstructure and mechanical property of linear friction welded nickel-based superalloy joint[J]. Materials and Design, 2016, 89: 85-93.

[5] VISHWAKARMA K R, OJO O A, WANJARA P, et al. Microstructural analysis of linear friction-welded 718 plus superalloy[J]. JOM, 2014, 66(12): 2525-2534.

[6] OLA O T, OJO O A, WANJARA P, et al. Crack-free welding of IN 738 by linear friction welding[J]. Advanced Materials Research, 2011, 278: 446-453.

[7] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册: 第2卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

China Aeronautical Materials Handbook Editorial Board. China aeronautical materials handbook: Volume II[M]. Beijing: China Standard Press, 2002.

[8] CHAMANFAR A, JAHAZI M, GHOLIPOUR J, et al. Suppressed liquation and microcracking in linear friction welded WASPALOY[J]. Materials & Design, 2012, 36: 113-122.

[9] OLA O T, OJO O A, WANJARA P, et al. Analysis of microstructural changes induced by linear friction welding in a nickelbase superalloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(12): 3761-3777.

[10] 马铁军, 肖遥, 李文亚, 等. 线性摩擦焊 IN718 接头微观组织与结构演变[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 119-123.

MA Tiejun, XIAO Yao, LI Wenya, et al. Investigation on microstructure and texture evolution of linear friction welded IN718 superalloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 119-123.

[11] 马铁军, 杨思乾, 张勇, 等. TC4 线性摩擦焊接头的力学性能及组织变化特点[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 17-20.

MA Tiejun, YANG Siqian, ZHANG Yong, et al. Mechanical properties and microstructure features of linear friction welded TC4 titanium alloy joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 17-20.

[12] MIRONOV S, SATO Y S, KOKAWA H, et al. Structural response of superaustenitic stainless steel to friction stir welding[J]. Acta Materialia, 2011, 59(14): 5472-5481.

[13] JEON J, MIRONOV S, SATO Y S, et al. Friction stir spot welding of single-crystal austenitic stainless steel[J]. Acta Materialia, 2011, 59(20): 7439-7449.

通讯作者: 邓小雷, 博士, 副教授, 主要研究方向为数控技术与装备自动化技术、数字化设计与制造技术, E-mail: dxl@zju.edu.cn.

(责编 逸飞)

通讯作者: 马铁军, 博士, 副教授, 主要研究方向为线性摩擦焊, E-mail: matiejun@nwpu.edu.cn.

(责编 逸飞)