

不同摩擦压力下 TB2 线性摩擦焊过程参量的变化规律研究

赵治鹏, 马铁军, 李文亚, 张勇

(西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室
陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 深入分析钛合金线性摩擦焊接过程, 掌握焊接参数变化时各摩擦阶段过程参量的变化规律及其与接头质量的关系。**方法** 采用不同摩擦压力进行 TB2 钛合金线性摩擦焊接试验, 基于信号采集获得了焊接过程典型参量的变化曲线。**结果** 曲线特征分析表明, 摩擦压力 40 MPa 时, 在设定时间内未达到稳定摩擦阶段, 曲线特征异常, 接头明显未焊合。随摩擦压力增大至 70 和 100 MPa, 各曲线变化规律与线性摩擦焊接 4 个典型阶段相吻合, 分别得到焊缝宽度不同的无缺陷接头。70 MPa 下摩擦剪力过渡平缓, 界面塑性金属的产生与挤出较为协调, 焊接过程的稳定性及接头质量易于得到控制。**结论** 通过对比不同参数下焊接过程参量的变化规律, 有助于认识不同线性摩擦焊接过程的内在差异, 从而判断接头质量并选取合适的焊接参数。

关键词: TB2 钛合金; 线性摩擦焊; 过程参量; 焊接参数; 接头质量

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.004

中图分类号: TG453.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0024-05

Process Variables during Linear Friction Welding of TB2 under Different Friction Pressures

ZHAO Zhi-peng, MA Tie-jun, LI Wen-ya, ZHANG Yong

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The paper aims to deeply analyze the linear friction welding process of titanium alloy, master the variation rules of process variables during each friction stage under different welding parameters and their relationship with joint quality. The linear friction welding experiment of TB2 titanium alloy was carried out with different friction pressures. Based on signal acquisition, the variation curves of different typical variables during welding process were obtained. The curve characteristic analysis showed that when the friction pressure was 40 MPa, a stable friction phase was not reached within the predetermined time; the curve characteristics were abnormal, and the joint was obviously lack of penetration. With the friction pressure increased to 70 and 100 MPa, their curve variations corresponded with the four typical stages of linear friction welding, and the defect-free joints with different weld widths were obtained respectively. The friction shear force changed smoothly at 70 MPa, which meant that the generation and the extrusion of the interface plastic metal was coordinated; so the stability of the welding process and the joint quality were easily controlled. By comparing the varia-

收稿日期: 2019-08-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51675435)

作者简介: 赵治鹏 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为线性摩擦焊。

通讯作者: 马铁军 (1972—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为摩擦焊及电阻焊技术与理论。

tion rules of the process variables during welding under different parameters, it is helpful to understand the inherent differences of different linear friction welding processes, so as to judge the joint quality and select the appropriate welding parameters.

KEY WORDS: TB2 titanium alloy; linear friction welding; process variables; welding parameters; joint quality

线性摩擦焊 (LFW) 是 20 世纪 90 年代问世的一种新型固相连接方法, 在航空航天领域有着重要的应用与发展前景, 已成为高推重比航空发动机制造与维修的关键技术^[1]。目前, 国内外已针对多种钛合金开展了同/异质接头的线性摩擦焊试验及理论研究, 其主要涉及接头组织及力学性能表征^[2-3]、界面金属流动行为^[4]、接头温度场及应力应变场演变^[5-6]、接头残余应力分布^[7]等, 通过系统全面的基础研究, 为航空发动机钛合金整体叶盘的线性摩擦焊接工程应用奠定基础。

除上述以外, 为深入了解及掌握线性摩擦焊接工艺过程, 相关领域还进行了摩擦阶段过程参量的信号采集与分析研究。Vairis A 和 Frost M 研究了 TC4 钛合金线性摩擦焊过程的界面温度、位移、剪切力及界面热输入曲线, 发现增大摩擦压力可以提高输入功率^[8-9]。马铁军等对 TC4 钛合金及 TA2 纯钛线性摩擦焊接过程的摩擦功率曲线进行了检测与分析^[10-11], 结果表明摩擦功率曲线能够反映线性摩擦焊过程的工艺特征。上述几项研究均是在单一焊接参数条件下进行的, 为研究不同焊接参数下钛合金线性摩擦焊接过程典型参量的变化规律, 以分析及掌握焊接参数变化时各摩擦阶段的过程差异, 文中采用 TB2 (Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al) 钛合金, 在不同摩擦压力下

进行焊接试验并开展初期研究, 从而为接头质量的判断和焊接参数的选取提供试验及理论基础。

1 试验过程与方法

采用的 TB2 钛合金焊件尺寸为 12 mm×22 mm×68 mm, 焊接截面为 12 mm×22 mm, 线性摩擦沿 22 mm 尺寸方向。固定振幅 a 、频率 f 和摩擦时间 t 不变, 改变摩擦压力 p_f 进行 3 组线性摩擦焊接试验, 具体工艺参数如表 1 所示。为排除顶锻压力 p_u 对试验结果的影响, 设定 p_u 与 p_f 值相同。

焊接试验在西北工业大学自行研制的 XMH-250

表 1 焊接工艺参数表
Tab.1 LFW parameters

试样 编号	摩擦压力/ MPa	振幅/ mm	频率/ Hz	摩擦 时间/s
1 [#]	40			
2 [#]	70	2	24	3.5
3 [#]	100			

焊机上进行。通过调节变频器的输出频率控制驱动电机的转速, 由此改变振动焊件的频率; 焊接振幅的无级调节通过控制振动-回位机构中回位油缸活塞杆的伸出长度来实现; 摩擦压力/顶锻压力可通过液压油路中的比例阀来调节。该设备进行线性摩擦焊的控制过程如图 1 所示: 首先调节振幅 a 到设定值; t_0 时刻启动驱动电机, t_1 时刻驱动电机到达设定的转速, 此时启动摩擦压力油缸动作使两焊件接近; t_2 时刻摩擦压力 p_f 达到设定值, 接头缩短量 l 逐渐增大; t_3 时刻缩短量达到预设值后, 驱动电机开始减速, 振幅、频率逐渐减小, 缩短量增速减慢; 至 t_4 时刻, 振幅、频率相继减小为 0, 此时施加顶锻压力 p_u 。

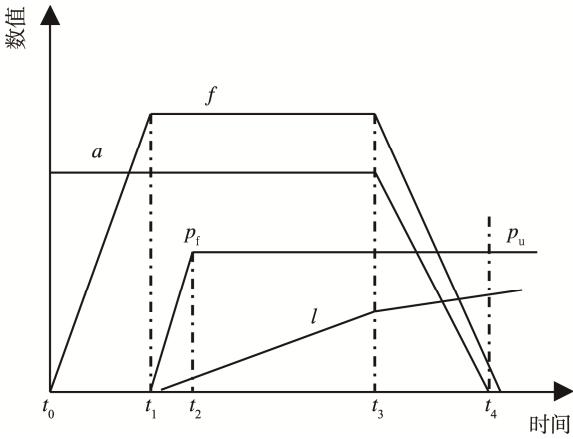


图 1 线性摩擦焊过程控制
Fig.1 Diagram of LFW control process

焊接过程不同参量的检测是基于多信号传感器技术实现的。摩擦压力油缸中内置位移-速度传感器检测接头缩短及缩短速度变化量; 移动端夹具底座安装压力传感器, 检测两焊件之间的摩擦剪力变化量; 移动端夹具与摩擦压力油缸之间安装压力传感器, 检测焊件之间的轴向摩擦压力。此外, 基于前期钛合金线性摩擦焊接过程摩擦功率的检测与分析研究^[11], 得出了摩擦功率的计算方法。该计算方法中所需的驱动电机线电压及线电流变化量, 直接通过变频器控制器输出的模拟量信号测得。这些检测量均通过扩展的多功能数据采集卡输入设备工控机进行数据变换、运算、显示及存储。

2 结果与讨论

2.1 接头外观形貌与纵向剖面组织

接头外观形貌如图 2 所示, 与 TC4 等钛合金 LFW

接头^[10]基本类似,在焊合面4个侧面上均观察到明显的飞边。不同参数下焊接界面金属挤出量不同,3组试样的缩短量测量结果依次为3, 14.5, 17 mm。

接头中部的低倍纵向剖面组织如图3所示。位于接头中部的浅色带状区域为焊缝区,2#和3#接头焊缝均无可见缺陷。与2#接头相比,3#接头的焊缝更窄,是由于摩擦/顶锻压力越大,摩擦剪切力也越大,两者共同作用使焊合面保留下来的热塑金属越少。因1#接头缩短量偏小且焊接界面未被飞边完全封闭,图3中明显可看出未焊合缺陷。



图2 接头外观形貌
Fig.2 Appearance of joints

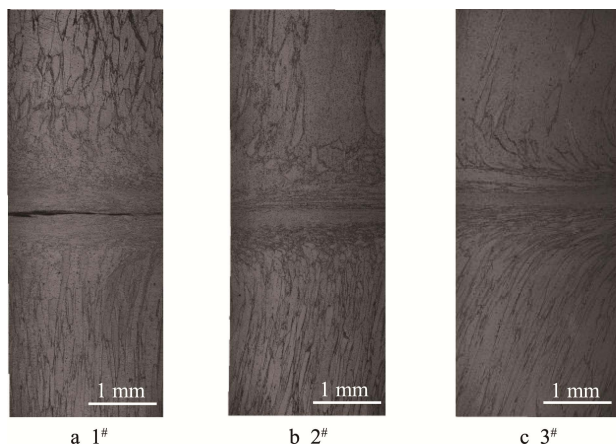


图3 接头纵向剖面组织
Fig.3 OM of joint longitudinal sections

2.2 摩擦压力变化曲线

在3种设定的摩擦压力条件下,焊接过程实测的压力变化曲线如图4所示。根据Vairis A的理论^[8-9],将摩擦过程分为4个阶段(文中阶段的划分以3#试样为准,2#试样与3#试样基本一致,1#试样另做说明):初始阶段A1、过渡阶段A2、稳定阶段A3和减速阶段。

从图4可以看出,摩擦压力在A1阶段随界面摩擦状态的变化及接触面积的增大而快速上升至设定值。此时界面产热机制为摩擦产热,界面金属随温度

迅速上升发生软化,施力油缸卸载部分压力,故摩擦压力在A2阶段开始下降。在A3阶段界面热源机制转变为以塑性变形产热为主导^[12-13],塑性金属层产生量基本等于挤出量,界面塑性层厚度不再增加,摩擦压力基本保持稳定。至减速阶段,随着振幅的减小界面热输入快速降低,热塑金属挤出量大于产生量,塑性金属层不断减薄,摩擦压力迅速回升再次达到峰值。该峰值与旋转摩擦焊出现的后峰值扭矩点相对应^[14]。

1#试样的摩擦压力在b点才达到设定值,并在后续摩擦过程中维持在该值附近,c点之后压力才出现下降,接头直至减速阶段才产生了缩短量。表明40 MPa摩擦压力下,各摩擦阶段与典型的LFW过程有明显差异(详见下文)。

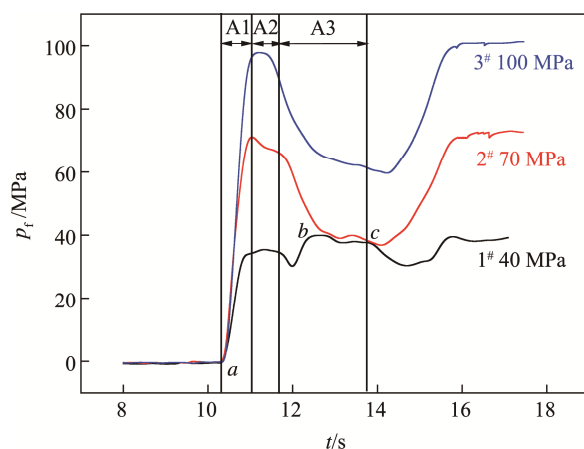


图4 摩擦压力变化曲线
Fig.4 Friction pressure curves

2.3 摩擦剪力与接头缩短速度变化曲线

3组接头摩擦剪力的变化曲线如图5所示。对于2#和3#试样,二者曲线的变化趋势基本相同且各阶段特征明显。A1阶段属于干摩擦阶段,摩擦剪力迅速上升;A2阶段摩擦剪力随着界面金属的软化出现下降趋势,此时界面摩擦机制由混合型摩擦开始转变为液相摩擦^[15];在A3阶段,粘塑性金属层厚度基本保持不变,摩擦剪力也基本保持稳定。两条曲线的主要区别在于,70 MPa下A2段中没有出现摩擦剪力的陡降。这是因为在该压力下焊接,其界面粘塑性金属的产生与挤出较为协调,摩擦剪力处于相对稳定的变化状态,焊接过程的稳定性易于得到控制。

3组接头缩短速度的变化曲线如图6所示,说明A1前曲线表示两焊件接触之前移动焊件空程的移动速度。从图6可看出,2#和3#试样接头缩短速度规律基本相似,两焊件从接触到发生干摩擦的A1阶段,接头缩短非常慢,A2过渡阶段速度缓慢增加,A3阶段由于界面热塑金属的不断产生与挤出形成典型的线性摩擦焊周期性过程^[16],接头缩短速度达到最大且基本处于稳定。在整个摩擦焊接过程,3#试样接头缩

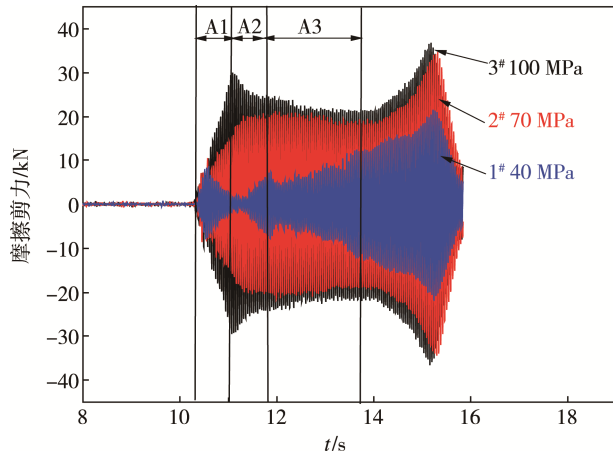


图 5 摩擦剪力变化曲线
Fig.5 Friction shear force curves

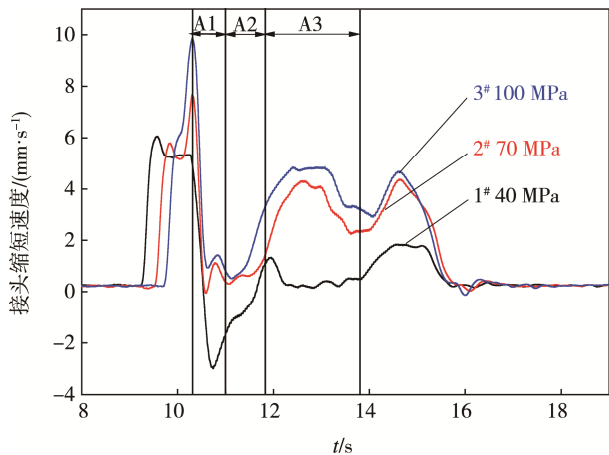


图 6 接头缩短速度变化曲线
Fig.6 Joint short speed curves

短速度略高于 2# 试样。然而,从已有的研究^[17]发现,在大的摩擦压力下焊接(如文中 100 MPa 下的 3# 接头),由于界面摩擦剪力较大,界面金属在较低温度即被挤出,可能使焊缝温度保持在较低的状态,从而对接头组织产生重要影响。另外,由于焊合面塑性金属层较少且温度偏低时,还可能造成焊后接头存在较大的残余应力,从而进一步影响焊接质量。

从图 6 还可看出,摩擦压力为 40 MPa 时的 1# 接头,缩短速度在 A1 和 A2 阶段出现了负值且摩擦剪力在此期间发生回落,是因为摩擦初期界面温度较低,金属变形抗力较大,相对于剧烈的摩擦剪切作用,40 MPa 的摩擦压力不足以在水平方向上约束焊件使摩擦过程稳定进行,速度传感器检测的信号出现短暂失真。随着界面温度的逐渐升高,摩擦过程趋于稳定,摩擦剪力缓慢提升,缩短速度恢复为正,但仍处于极低的水平,因此 1# 试样在设定的摩擦时间内未能进入稳定摩擦阶段。根据前期研究^[18],初始和过渡摩擦阶段界面处会产生金属氧化物,而稳定摩擦阶段和减速摩擦阶段是摩擦焊接界面金属氧化物“自清理”的主要时期,因此,未经历稳定阶段的 1# 试样界面处不可

避免残留金属氧化物。

2.4 摩擦功率曲线

摩擦功率曲线如图 7 所示。在 A1 阶段,焊件在轴向压力的作用下相互接触,由于焊接表面不平,在表面凸起的部分首先开始摩擦。随着焊接表面摩擦压力的增加,摩擦功率 Q 显著增大,近似呈线性增长。A2 前中期由于焊件热量的积累,界面金属的强度降低,塑性和韧性升高,接触面积迅速增大,原子间作用力不断增强,这些因素使得 Q 迅速上升并达到峰值;A2 后期,温度继续升高,界面塑性提高,但强度和韧性大幅降低, Q 开始迅速下降。A3 阶段,焊接界面温度依然维持在较高水平,金属强度极低,塑性很大,摩擦功率趋于稳定。

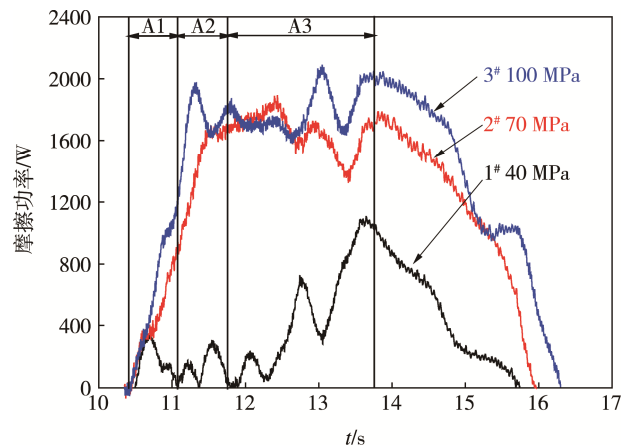


图 7 摩擦功率曲线
Fig.7 Friction power curves

对比 3 条曲线发现,随着摩擦压力的增大,界面摩擦功率呈上升趋势,即焊接界面热输入依次增大。如图 7 所示,1# 试样的 Q 增长率与峰值明显小于 2# 和 3# 试样。在轴向压力作用下,焊接界面原子间的距离不断减小,当接近到原子间距时,系统的静电能发生改变使原子产生焊合,焊合区域在随后的摩擦过程中被摩擦剪力撕裂,这种塑性变形产生大量热量。而 1# 试样所受轴向压力较小,故只有较少原子发生反复焊合与撕裂的过程,导致焊接界面热输入严重不足。 Q 达到峰值后(进入减速阶段)迅速降低,再次证明 1# 试样未进入稳定摩擦阶段,对应的焊接界面出现未焊合缺陷(见图 3)。根据 1# 试样的功率曲线变化趋势推断如果延长摩擦时间,则会增加界面热输入,提高焊合率。

3 结论

1) 基于多信号传感采集获得的摩擦压力、摩擦剪力、摩擦功率及接头缩短速度等典型参量曲线的变化规律,能够反映线性摩擦焊接过程焊合面摩擦机

制、产热机制、塑性金属流动及焊合机制等在初始、过渡、稳定及减速等不同摩擦阶段的变化历程,有助于深入了解不同焊接参数下线性摩擦焊接的过程差异及分析焊接参数对接头质量的影响。

2) 3 组摩擦压力下 TB2 线性摩擦焊过程参量的变化规律表明,摩擦压力较低(40 MPa)时,在设定时间内未达到稳定摩擦阶段,曲线特征异常,接头明显未焊合。随摩擦压力增大(70 MPa 和 100 MPa),各曲线变化规律与线性摩擦过程 4 个典型阶段相吻合,分别得到焊缝宽度不同的无缺陷接头。70 MPa 下摩擦剪力过渡平缓,界面塑性金属的产生与挤出较为协调,焊接过程的稳定性及接头质量易于得到控制。

参考文献:

- [1] LI W Y, VAIRIS A, PREUSS M, et al. Linear and Rotary Friction Welding Review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71—100.
- [2] BUFFA G, CAMPANELLA D, CAMMALLERI M, et al. Experimental and Numerical Analysis of Microstructure Evolution during Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 1: 429—441.
- [3] CHEN X, XIE F Q, MA T J, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Linear Friction Welded Ti2AlNb Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 646: 490—496.
- [4] 姬书得, 刘建光, 陶军, 等. TC4 钛合金线性摩擦焊过程材料流动行为分析[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(7): 689—693.
JI Shu-de, LIU Jian-guang, TAO Jun, et al. Material Flow Behavior in Linear Friction Welding of TC4 Titanium Alloy[J]. Beijing Institute of Technology, 2013, 33(7): 689—693.
- [5] LI W Y, MA T J, LI J L. Numerical Simulation of Linear Friction Welding of Titanium Alloy: Effects of Processing Parameters[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1497—1507.
- [6] TAO J, ZHANG T C, LIU P T, et al. Numerical Computation of A Linear Friction Welding Process[J]. Materials Science Forum, 2008, 575: 811—815.
- [7] LIU C, DONG C L. Internal Residual Stress Measurement on Linear Friction Welding of Titanium Alloy Plates with Contour Method[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1387—1392.
- [8] VAIRIS A, FROST M. High Frequency Linear Friction Welding of a Titanium Alloy[J]. Wear, 1998, 217(1): 117—131.
- [9] VAIRIS A, FROST M. On the Extrusion Stage of Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 271: 477—484.
- [10] 史栋刚, 马铁军, 张勇, 等. TC4 线性摩擦焊过程的功率曲线研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(13): 125—128.
SHI Dong-gang, MA Tie-jun, ZHANG Yong, et al. Research on Friction Power Curve of TC4 Linear Friction Welding[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(13): 125—128.
- [11] 马铁军, 汤化伟, 李文亚, 等. 线性摩擦焊摩擦功率的检测与分析[J]. 航空制造技术, 2013, 430(10): 91—94.
MA Tie-jun, TANG Hua-wei, LI Wen-ya, et al. Detection and Analysis of Friction Power during Linear Friction Welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 430(10): 91—94.
- [12] LI W Y, LI J L, GAO D L. On Conversion of Plastic Work to Heat during Plastic Deformation of Tin-Lead Alloy and Mild Steel[J]. China Welding, 2010, 19(2): 17—22.
- [13] LI W Y, ZHANG Z H, LI J L, et al. Numerical Analysis of Joint Temperature Evolution during Friction Stir Welding Based on Sticking Contact[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(9): 1849—1856.
- [14] 张昌青, 刘雄波, 吕广明, 等. 铝/钢连续驱动摩擦焊焊接扭矩和能量输入特征[J]. 机械工程学报, 2018(2): 110—116.
ZHANG Chang-qing, LIU Xiong-bo, LYU Guang-ming, et al. Friction Torque and Heat Input Characteristics during Continuous Drive Friction Welding of Aluminum to Steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(2): 110—116.
- [15] 张传臣, 张田仓, 季亚娟, 等. 线性摩擦焊接头形成过程及机理[J]. 材料工程, 2015, 43(11): 39—43.
ZHANG Chuan-chen, ZHANG Tian-cang, JI Ya-juan, et al. Formation Process and Mechanism of Linear Friction Welded Joints[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(11): 39—43.
- [16] JI Y P, CHAI Z Z, ZHAO D L. Linear Friction Welding of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr Alloy with Dissimilar Microstructure[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 979—987.
- [17] 刘亚森. 焊接压力对 Ti17 线性摩擦焊接头组织性能的影响研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
LIU Ya-sen. Influence of Welding Pressure on Microstructure and Mechanical Properties for Linear Friction Welded Ti17 Joint[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [18] 马铁军, 王刚, 李文亚, 等. 钛合金线性摩擦焊界面氧化物“自清理”过程研究[J]. 焊管, 2018(3): 24—28.
MA Tie-jun, WANG Gang, LI Wen-ya, et al. Research on Self-Cleaning Behavior of Interfacial Oxide during Titanium Linear Friction Welding[J]. Welded Pipe and Tube, 2018(3): 24—28.