

电磁脉冲焊 304 不锈钢/6061 铝合金管材接头微观结构及性能

彭 晨¹ 谭观华² 王善林¹ 陈维政¹ 叶科江¹ 陈玉华¹ 尹立孟³ 冉 洋⁴
(1.南昌航空大学江西省航空构件成形与连接重点实验室;2.上海卫星装备研究所;
3.重庆科技学院冶金与材料工程学院;4.重庆市光学机械研究所)

摘 要 为了研究电磁脉冲焊接 304 不锈钢/6061 铝合金异种管材焊接接头的显微组织与力学性能,在间隙为 1.5 mm,电压为 17 kV,频率为 15 kHz,电流为 640 kA 工艺参数下对 304 不锈钢/6061 铝合金管材采用电磁脉冲焊进行试验。通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)对焊后管材接头的微观形貌、元素分布和相组成进行了分析。采用硬度计和水压测试仪对接头表面显微硬度和耐压性能进行了测试。焊接后接头形貌良好无缺陷。焊接结合层界面发生了元素扩散,生成脆硬的金属间化合物(FeAl、FeAl₂ 及 FeAl₃),平均硬度(HV)达到了 647.35,水压测试后铝侧母材破裂。电磁脉冲焊接 304 不锈钢/6061 铝合金异种管材可以获得成形良好且性能优异的接头。结合层中的金属间化合物增大了接头硬度,显著提高了焊缝的力学性能,使得焊接接头具有良好的耐压性、致密性和高硬度。

关键词 钢/铝;电磁脉冲焊接;力学性能;显微组织

中图分类号 TG457;TB331 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel/6061 Aluminum Alloy Pipe Joints by Electromagnetic Pulse Welding

Peng Chen¹, Tan Guanhua², Wang Shanlin¹, Chen Weizheng¹, Ye Kejiang¹, Chen Yuhua¹,
Yin Limeng³, Ran Yang⁴

(1. Jiangxi Key Laboratory of Aeronautical Component Forming and Joining, Nanchang Hangkong University;
2. Shanghai Institute of Satellite Equipment; 3. School of Metallurgy and Materials Engineering,
Chongqing Institute of Science and Technology; 4. Chongqing Institute of Optical Machinery)

Abstract: In order to investigate the microstructure and mechanical properties of dissimilar welded joints of 304 stainless steel/6061 aluminum alloy pipe by electromagnetic pulse welding, electromagnetic pulse welding experiment was carried out under the gap of 1.5 mm, voltage of 17 kV, frequency of 15 kHz and current of 640 kA. Microstructure, element distribution and phase composition of welded pipe joints were analyzed by optical microscope(OM), scanning electron microscope(SEM) and energy dispersive spectrometer(EDS). The surface micro-hardness and pressure resistance of the joint were tested by hardness tester and water pressure tester. After welding, the joint presents well morphology without defects. Element diffusion occurs at the interface of the welding bonding layer, and brittle intermetallic compounds(FeAl, FeAl₂ and FeAl₃) are generated, with an average hardness of 647.35 HV. The base metal on the aluminum side is broken after hydrostatic testing. In conclusion, electromagnetic pulse welding of 304 stainless steel/6061 aluminum alloy dissimilar pipe can lead to well-formed joint with excellent performance. The intermetallic compound in the bonding layer promotes the increase of joint hardness, significantly improving the mechanical properties of the weld, which exhibits the desirable pressure resistance, compactness and high hardness.

Key Words: Steel/Aluminum, Electromagnetic Pulse Welding, Mechanical Properties, Microstructure

收稿日期:2022-04-20;修改稿收到日期:2022-08-19
基金项目:江西省科技厅自然科学基金资助项目(20192BBEL50002,20202BBE52004)
第一作者简介:彭晨,男,2002 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:2636052254@qq.com
通信作者:王善林,男,1977 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:slwang70518@nchu.edu.cn
引用格式:彭晨,谭观华,王善林,等. 电磁脉冲焊 304 不锈钢/6061 铝合金管材接头微观结构及性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):211-216.
PENG C, TAN G H, WANG S L, et al. Microstructure and properties of stainless 304 steel/6061 aluminum alloy pipe joints by electromagnetic pulse welding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):211-216.

对汽车进行铝钢轻量化设计(铝钢异种材料焊接部件代替纯钢部件)是汽车轻量化理想解决方案之一^[1-4],汽车总质量每减少 1%,可降低 6%~8%的油耗,并减少 1%的有害气体排放^[5],同时又可以减轻车重,提高汽车性能,充分发挥了铝与钢异种材料各自的优良性能,因此,实现铝合金与不锈钢异种材料之间的高品质焊接有着积极意义。

然而,常规的电弧熔化方法难以实现铝钢焊接^[6],因为铝和钢之间固溶度、热物理性能差异大,易产生脆硬的金属间化合物。且铝和钢的熔点差异大,焊接时,低熔点的铝先熔化,此时钢仍未熔化,由于铝与钢的密度差较大,铝会浮在钢上面,冷却后会造成焊缝成分不均匀。另外,铝和钢之间的线膨胀系数相差较大,从而在焊接接头中产生较大的残余应力,进而会带来焊接裂纹。这些因素都大大降低了焊接接头的性能^[7]。

电磁脉冲焊接则是通过电磁力作用促使待焊件高速变形并猛烈撞击进而实现金属冶金结合的焊接方法^[8]。采用该技术进行焊接时,即使无保护气体也可有效控制金属焊接界面氧化物的产生,从而提升焊接接头的力学性能,且金属间化合物形成与元素扩散反应有关,相同条件下液-液之间元素扩散速度最快,固-固之间元素扩散速度最慢,因此能控制金属间化合物过度生长,实现不同的金属及金属与非金属之间的焊接,这为实现铝钢的可靠连接提供一个可能。

国内外研究电磁脉冲焊接的学者用电磁脉冲焊接成功对 Al-Al^[9-10]、Al-Cu^[11]、Al-Mg^[12-13]、Al-Fe^[14-15]及其他异种金属材料^[16-17]进行了有效焊接。并从仿真分析、组织形貌、焊接参数、接头性能等各个方面对电磁脉冲焊接进行了研究。李成祥等^[18]对 H 型焊接线圈建立了铜铝板的电磁脉冲焊接仿真分析模型,并通过模拟计算发现了各种工艺参数的变化对焊接效果的影响。聂鹏等^[19]研究 TC4 钛合金和 3A21 铝合金电磁脉冲焊接接头组织形貌,发现 TC4 钛合金与不同粗糙度 3A21 铝合金焊接时,形成的焊接面波幅相似,波长相差大,证明接合面组织微观形态由硬的 TC4 表面品质决定。KWEEI D E 等^[20]用光子多普勒测速技术测量焊接时的冲击速度,并测定了焊接后管材的变化量,发现了焊接时的能量与时间对速度、加速度的影响。ZHU C C 等^[21]通过分析经不同参数焊接的铝镁板材的力学性能,发现放电能量、碰撞速度超过一定值时,界面塑性变形能力差,接头性能下降。

目前国内对电磁脉冲焊接的研究主要集中在异种金属板材焊接方面,对管材的研究相对较少。本研究将电磁脉冲焊接技术作用于 304 不锈钢和 6061 铝合金异种金属管材上,并对焊接接头的界面微观形貌和力学性

能等方面进行研究与讨论,为国内电磁脉冲焊接异种金属管材的发展和工业应用提供参考。

1 试验材料、原理及方法

1.1 试验材料

采用 304 不锈钢(0Cr18Ni9)及 6061 铝合金,其化学成分见表 1 和表 2。不锈钢管外径为 29 mm,厚度为 2 mm,铝管外径为 35 mm,厚度为 1 mm。

表 1 6061 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy %								
ω_B								
Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Fe	Al
0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35	0.15	0.4~0.8	0.7	余量

表 2 304 不锈钢的化学成分

Tab.2 Chemical composition of 304 stainless steel %								
ω_B								
C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Fe	
≤0.08	≤1.0	≤2.0	18.0~20.0	8.0~10.0	≤0.03	≤0.045	余量	

1.2 试验原理及方法

采用电磁脉冲焊接设备进行焊接。焊接时,铝管内部会产生与设备线圈电流方向相反的感应电流。根据物理学电磁感应定律,方向相反的两种电流会产生一对强大的相互排斥的电磁力。因而此时铝管内部瞬间产生一个径直向内的斥力,进而使铝管以极快的速度向内层钢管移动进行撞击,并发生快速的塑性变形从而完成固态焊接,电磁脉冲焊接原理见图 1。

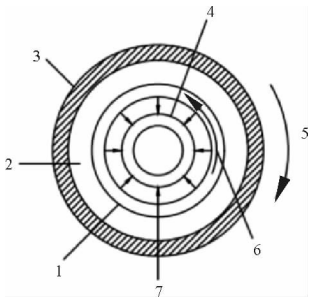


图 1 电磁脉冲焊接原理图

Fig.1 Mechanism diagram of electromagnetic pulse welding

- 1.铝管 2.磁场 3.充电线圈 4.钢管 5.线圈电流方向
6.感应电流方向 7.电磁力

使用 Xtra-Pulse70 型电磁脉冲焊接设备,额定电压为 25 kV,总电容量为 240 μ F,最大储能为 75 kJ。将钢管的一部分套入铝管中进行焊接,焊接结构见图 2。初始工艺参数:电压为 17~20 kV,频率为 12~16 kHz,电流为 540~740 kA。经过大量试验,最终确定了焊接最佳工艺参数:电压为 17 kV,频率为 15 kHz,电流为 640 kA,间隙为 1.5 mm。

用电火花线切割机对焊接后的管材焊缝中间进行

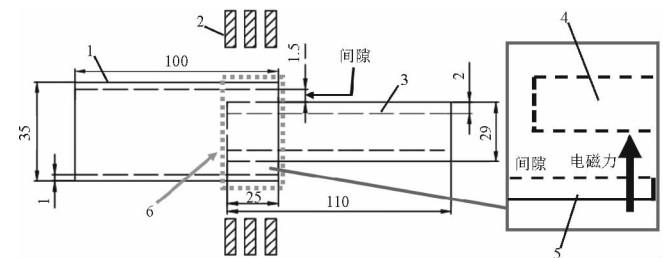


图 2 接头搭接方式示意图

Fig.2 Schematic diagram of joint lapping mode

1.铝箔 2.线圈 3.钢管 4.钢管壁 5.铝管壁 6.焊接区

切割,取下部分焊缝区以便制作封胶试样,并用 600、1000、1500、3000 及 5000 号金相砂纸对封胶试样进行打磨,打磨到试样无明显划痕后再用抛光机及颗粒度为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石抛光剂进行抛光,用 Svs3020 型影像测量仪拍摄焊接区宏观影像,通过 Phenom-XL 台式扫描电镜(Field Scanning Electron Microscope, FSEM)来观察分析 304 不锈钢及 6061 铝合金异种材料电磁脉冲焊接接头显微组织,及其所配有的能谱系统(EDS)用以分析焊接区域的元素分布;采用 Qness 型显微维氏硬度计进行硬度测试,载荷为 20 N,加载时间为 15 s。以垂直于铝钢结合层的方向,以结合层为原点向铝钢母材两边延伸,间隔为 0.2 mm,选取 13 个点进行测试,且在此沿水平方向左右两边 2 mm 处各再进行相同试验,采点位置见图 3。取距结合层距离相同的 3 个测试点结果相加取均值。采用 TPU-25-BK-S 压力试验台进

行水压测试,将铝钢管材的钢管侧开口封闭,再将上方铝管开口封闭,只留一根导管与外界连通,用这根导管对封闭管材加以水压,同时记录过程中管材的应力变化。

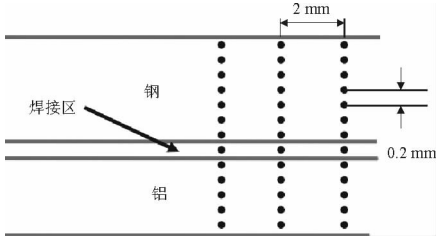


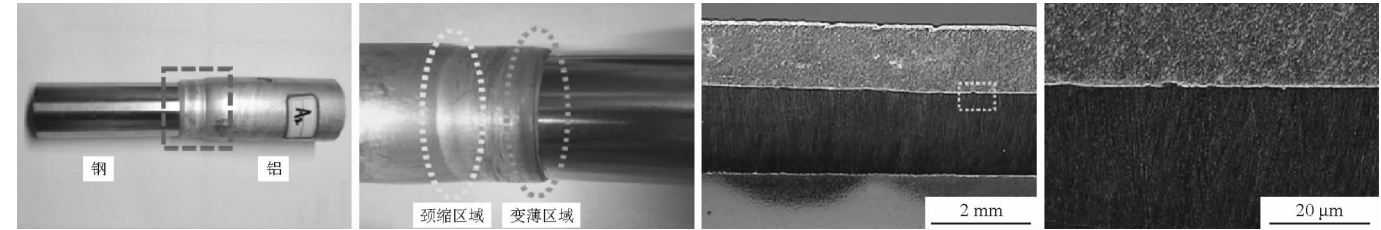
图 3 接头硬度测试位置

Fig.3 Hardness testing location of joint

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌分析

图 4 为电磁脉冲焊接后铝钢管材的宏观形貌。从图 4a 和图 4b 可以看出,铝管焊接位置发生明显颈缩现象,且越靠近铝管焊接末端颈缩越明显,同时发生了明显塑性变形,铝管向内凹陷并紧紧套接在钢管上。铝和钢结合界面平整光滑且富有金属光泽,无裂纹及其他明显缺陷,表面没有明显熔化和热变形现象,钢管因强度高而未发生明显的塑性变形。从图 4c 和图 4d 看出,焊接后的铝钢之间紧密结合,焊接区域连续且较平整,没有空隙、杂质及过厚的过渡区域,焊接接头良好。



(a) 管材宏观形貌

(b) 图 4a 方框处放大

(c) 焊缝宏观形貌

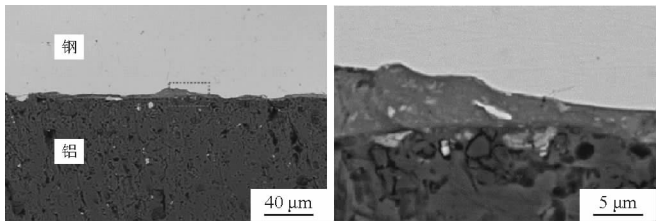
(d) 图 4c 方框处放大

图 4 管材宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of the pipe

2.2 接头显微组织分析

图 5 为电磁脉冲焊接接头的 SEM 图。电磁脉冲焊接界面主要有波形结合区、平直结合区和熔化结合区^[22]。可以看出,接头处无明显气孔和裂纹缺陷。焊接处较平滑、未发现明显的波形起伏界面。此外,结合层的厚度均匀,无明显熔化区域,而是表现出平直结合区形貌。在异种金属材料焊接过程中,因两种材料间热物理性能差异大而在焊接中极易形成脆硬金属间化合物^[22]。通过进一步观察发现,铝钢之间有 $4\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的薄过渡层,说明在焊接过程中发生了机械结合和冶金结合,并因此生成金属间化合物,接下来需要对过渡层进行元素分析。



(a) SEM 图像

(b) 图 5a 中放大图像

图 5 铝钢焊接界面形貌

Fig.5 Morphologies of Al/Fe welding interface

2.3 能谱元素分析

在铝钢管电磁脉冲焊接中,铝管和钢管在极短时间内发生了高速碰撞,使得铝管和钢管紧密焊接在一起,

焊缝处元素成分可能发生变化。采用能谱分析仪对焊缝及附近区域进行元素分析。

图 6 为铝管和钢管接头横截面 EDS 面扫描和线扫描结果。可以看出,结合层中分布有 Al、Fe 两种元素。随着 Fe 同步扩散,可以发现,结合层中间(A、B 之间即为结合层)分布有呈一定比例的 Fe、Al 元素。比较结合层中 Al 和 Fe 的含量,可以发现,结合层 Al 和 Fe 的含量在结合层向彼此扩散的过程中逐渐降低,结合层中 Al 含量明显高于 Fe,符合 Fe 扩散进 Al 中的结果。在高温条件下,接头中 Fe 在以 Al 为基体中的扩散速率远高于 Al 在以 Fe 为基体中的扩散速率^[23],因此结合层中 Al 含量高于 Fe。

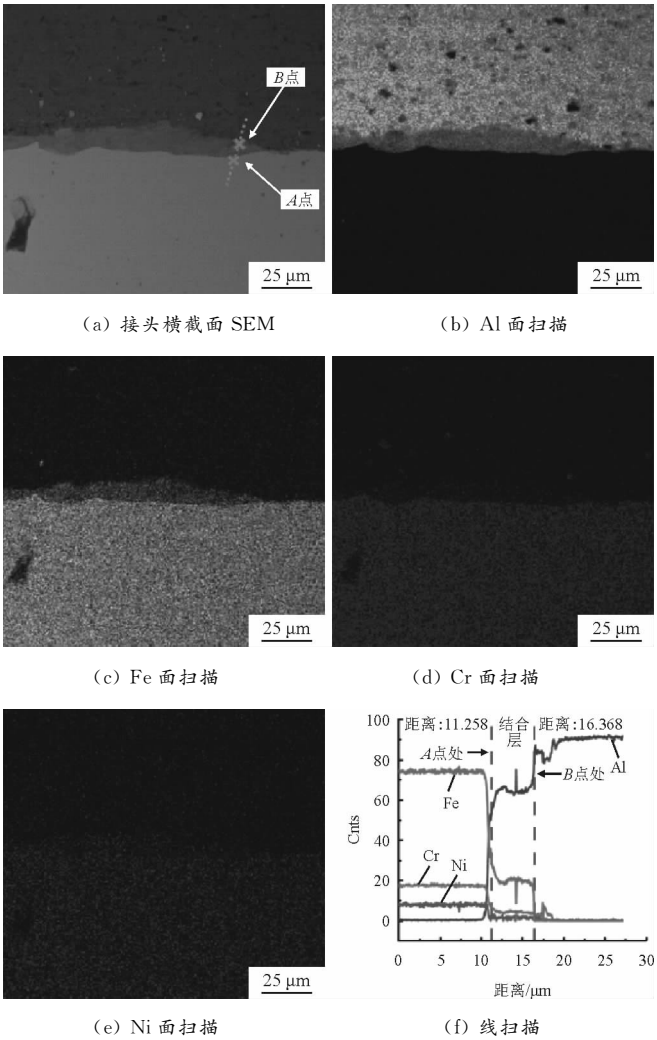


图 6 接头横截面 EDS 面扫和线扫结果
Fig.6 EDS surface and line scanning results of cross-section of joint

图 7 为结合层各个区域 EDS 点扫描位置。Al、Fe、Cr、Ni 含量及相应金属间化合物结果见表 3。可以看出,点 1、2、3 中 Al 和 Fe 摩尔比约为 2 : 1,点 4 中 Al 和 Fe 摩尔比约为 1 : 1,点 5、6 中 Al 和 Fe 摩尔比约为 3 : 1。结合 Al-Fe 二元相图可推断,点 1、2、3 生成的金属间化合物为 FeAl₂,点 4 金属间化合物为 FeAl,点 5、6

的金属化合物为 FeAl₃,这些金属间化合物为脆性相,强度高、硬度高。

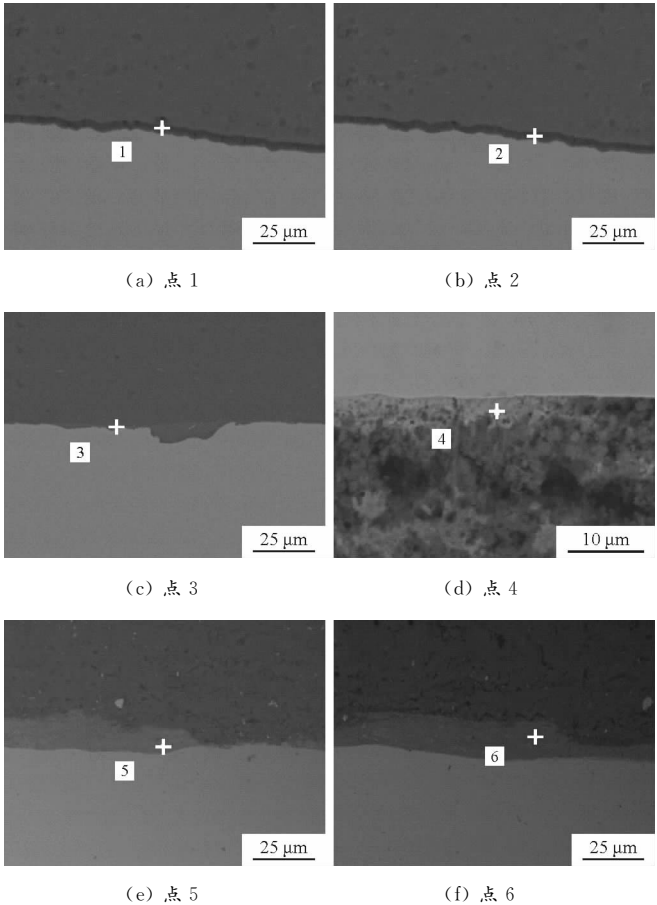


图 7 结合层不同位置扫描
Fig.7 Element distribution of binding layer at different positions

表 3 EDS 点元素分布
Tab.3 Element distribution of EDS point scanning

位置	$x_B/\%$				相
	Fe	Al	Cr	Ni	
1	23.23	43.15	7.16	2.26	FeAl ₂
2	30.43	55.21	8.54	2.91	FeAl ₂
3	30.50	58.93	8.73	2.47	FeAl ₂
4	38.70	37.67	9.98	4.04	FeAl
5	20.76	71.94	5.18	2.12	FeAl ₃
6	19.90	73.05	5.03	2.02	FeAl ₃

2.4 显微硬度分析

图 8 为焊接接头硬度测试结果。可以看出,铝母材

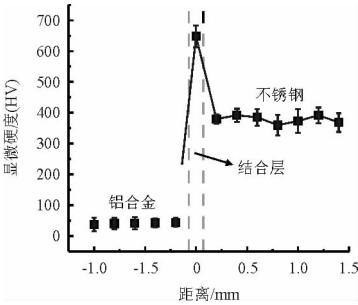


图 8 接头显微硬度分布
Fig.8 Microhardness distribution of the joints

平均硬度(HV)为41.17,钢母材(HV)平均硬度为 378.38,其结合层平均硬度(HV)为 647.35,结合层硬度远高于两种母材硬度。

2.5 水压测试

管材应力随时间变化曲线及破裂后管材形貌见图9。最终测试结果为铝母材破裂,钢母材与焊接接头完好。铝母材在 340 s 时应力 3.8 MPa 左右发生塑性变形,在 710 s 左右应力为 6.8 MPa 时破裂,说明管材承受最大压力为 6.8 MPa。此外,管材在 3.8 MPa 的应力下进行了 240 s 保压试验(340~580 s),说明经电磁脉冲焊接的 6061 铝合金/304 不锈钢管材接头具有优异的耐压性和致密性。

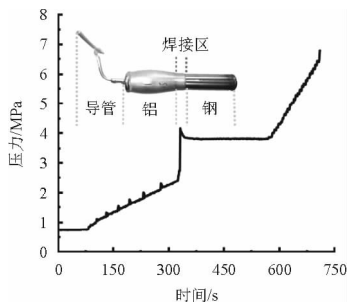


图9 水压测试用的铝钢管及测试结果

Fig.9 Aluminum steel pipe for water pressure test and its test results

6061 铝管材抗拉强度为 205 MPa^[24]。根据管道承压计算如下:

$$p = \frac{\sigma_b d}{r}$$

式中, p 为管道承受压力,MPa; σ_b 为管材的抗拉强度,MPa; d 为管材的壁厚,m; r 为管材的内径,m。

通过计算得出铝管的理论最大压力值为 6.2 MPa,理论计算值与试验值(6.8 MPa)相差较小,说明该水压测试结果具有一定的参考意义。

3 结 论

(1)采用电磁脉冲焊接技术焊接 304 不锈钢和 6061 铝合金,铝管发生塑性变形,焊接结合层界面平稳,无明显缺陷。结合层界面厚度在 4~10 μm 之间,整体成形良好,性能优异,可以取得良好的焊接效果。

(2)铝/钢电磁脉冲焊接界面处发生了一定程度元素扩散,且 Fe 较 Al 占扩散主导地位,说明电磁脉冲焊接界面是机械结合和冶金结合共同作用的结果。焊接结合层中生成了金属间化合物,主要为 FeAl_2 、 FeAl 、 FeAl_3 。

(3)电磁脉冲焊接后 304 不锈钢/6061 铝合金管材焊缝相较于母材的硬度得到了显著提高,平均硬度

(HV)达到 647.35。水压测试中在 3.8 MPa 的应力下保压 240 s,管材在 3.8 MPa 时铝管塑性变形,6.8 MPa 时铝管破裂,此时焊缝与钢母材完好,表明接头具有良好的耐压性、致密性与优异的力学性能。

参 考 文 献

- [1] 陈宇豪,薛松柏,王博,等. 汽车轻量化焊接技术发展现状与未来[J]. 材料导报, 2019, 33(z2): 431-440.
- [2] KAPIL A, SHARMA A. Magnetic pulse welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100(8): 35-58.
- [3] CHEN W, WANG W, LIU Z, et al. Improvement in tensile strength of Mg/Al alloy dissimilar friction stir welding joints by reducing intermetallic compounds[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 861: 1-11.
- [4] 黄永宪,黄体方,万龙,等. 铝/钢异种材料搅拌摩擦焊研究进展[J]. 精密成形工程, 2018, 10(1): 23-30.
- [5] 杜行. 新型材料和工艺在汽车轻量化中的应用[J]. 科技创新与应用, 2019(5): 148-150.
- [6] 万龙. 铝/钢搅拌摩擦搭接强流变作用下界面行为及力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] 李亮,盖力民,王旭. 铝与钢异种金属材料焊接的发展[J]. 焊接技术, 2021, 50(10): 1-7.
- [8] 苏子龙,徐永庚,高雷,等. 电磁脉冲焊接技术研究现状及发展趋势[J]. 焊接技术, 2020, 49(7): 1-7.
- [9] WATANABE M, KUMAI S. High-speed deformation and collision behavior of pure aluminum plates in magnetic pulse welding[J]. Materials Transactions, 2009, 50(8): 2 035-2 042.
- [10] LI Z B, E. DEN BAKKER A J, SCAMANS G, et al. Bonding and microstructure evolution in electromagnetic pulse welding of hardenable Al alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 290: 1-14.
- [11] WANG P Q, CHEN D L, RAN Y, et al. Electromagnetic pulse welding of Al/Cu dissimilar materials: Microstructure and tensile properties[J]. Materials Science & Engineering, 2020, A792: 1-12.
- [12] STERN A, AIZENSHTAIN M. Magnetic pulse welding of Al to Mg alloys: Structural-mechanical properties of the interfacial layer[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(12): 1 809-1 813.
- [13] 朱聪聪,蒙奕帆,柳泉潇潇,等. Al/Mg 异种金属板材电磁脉冲焊接工艺及力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4): 45-51.
- [14] YU H, TONG Y. Magnetic pulse welding of aluminum to steel using uniform pressure electromagnetic actuator[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5/8): 2 257-2 265.
- [15] KORE S D, DATE P P, KULKARNI S V. Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/3): 486-493.
- [16] GENG H, XIA Z, ZHANG X, et al. Microstructures and mechanical properties of the welded AA5182/HC340LA joint by magnetic pulse welding[J]. Materials Characterization, 2018, 138: 229-237.
- [17] CUI J. Mechanical and microstructure investigations on magnetic pulse welded dissimilar AA3003-TC4 joints[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 712-722.

巴氏合金近工况压痕蠕变性能测试装置设计及应用

钱康乐¹ 薛建平² 陈剑锋³ 傅珠荣² 彭 孜²

(1.浙江越宫钢构有限公司;2.绍兴市天龙锡材有限公司;3.申科滑动轴承股份有限公司)

摘 要 针对滑动轴承的特殊性,设计了接近实况的压痕蠕变性能试验装置,研究了压痕深度尺寸测量方法。对取自滑动轴承本体的不同 Zn、Ag 含量巴氏合金试样,进行了 100 ℃×24 h 的蠕变性能试验,获取了所测试样压痕蠕变特性,可对滑动轴承服役温度、寿命作出预判。

关键词 滑动轴承;巴氏合金;压痕蠕变性能;试验方法和装置设计

中图分类号 TG175.3;TG146.1⁺4;TG115.5⁺7 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Application of Indentation Creep Performance Test Device for Babbitt Alloy under Near Working Condition

Qian Kangle¹, Xue Jianping², Chen Jianfeng³, Fu Zhurong², Peng Zi²

(1.Zhjiang Yuegong Steel Structure Co., Ltd.; 2. Shaoxing Tianlong Tin Materials Co., Ltd.;
3. Shenke Slide Bearing Corporation)

Abstract: According to the particularity of sliding bearing, an indentation creep performance test device close to the actual situation was designed, and the measurement method of indentation depth was investigated. The 100 ℃×24 h creep performance was carried out on the Babbitt alloy specimens taken from sliding bearing body with different Zn and Ag contents, and creep performance characteristics were obtained to predict the service temperature and life of the sliding bearing.

Key Words: Sliding Bearing, Babbitt Alloy, Indentation Creep Performance, Measuring Method and Device Design

滑动轴承广泛用于各类机械旋转等重要部位,常以锡基巴氏合金为减摩层^[1]。随着滑动轴承接近 100 ℃服役条件普遍化,对轴承材料和减摩层性能要求随之提高^[2-3]。研究表明,锡基巴氏合金中添加 Zn、Ag、Ni、Cd 等元素可以提高减摩层耐磨性能和抗蠕变性能^[4-7],同时减摩层制备技术发展迅速^[8-9],如 CMT 冷金属过渡

焊(Cold Metal Transfer)等增材制造技术应用,解决了新引入元素导致离心铸造技术存在结合不良的问题,也发现不同制备技术对减摩层性能有影响^[10-12]。巴氏合金性能检测包括化学成分、结合强度、超声检测、布氏硬度,及抗拉、抗压和屈服强度等。除结合强度试样取自滑动轴承本体外,其他试样并非取自滑动轴承本体,也

收稿日期:2022-02-15;修改稿收到日期:2022-03-16

基金项目:浙江省重点研发计划资助项目(2019C01140)

第一作者简介:钱康乐,男,1988 年出生,工程师,浙江绍兴(312001),E-mail:qkl13645751145@163.com

通信作者:彭孜,男,1985 年出生,高级工程师,浙江绍兴(312001),E-mail:274669861@qq.com

引用格式:钱康乐,薛建平,陈剑锋,等.巴氏合金近工况压痕蠕变性能测试装置设计及应用[J].特种铸造及有色合金,2023,43(2):216-219.

QIAN K L, XUE J P, CHEN J F, et al. Design and application of indentation creep performance test device for babbitt alloy under near working condition[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):216-219.

[18] 李成祥,石鑫,周言,等.针对 H 型线圈的电磁脉冲焊接仿真及线圈截面结构影响分析[J].电工技术学报,2021,36(23):4 992-5 001.
[19] 聂鹏,侯中志,王哲峰,等.铝钛金属板电磁脉冲焊接试验研究[J].机械设计与制造,2018(7):90-92.
[20] KWEEI D E, WAELE W, FAES K. Photon doppler velocimetry measurements of the impact velocity during electromagnetic pulse welding of copper-steel tubular joints[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2021, 62(4): 237-262.
[21] ZHU C C, SUN L Q, GAO W L, et al. The effect of temperature on microstructure and mechanical properties of Al/Mg lap joints

manufactured by magnetic pulse welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3): 3 270-3 280.
[22] CHU Q. Interfacial investigation of explosion-welded titanium/steel bimetallic plates[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 78-86.
[23] 王敬. Fe/Al 异种金属扩散焊界面形成机理研究[D].江苏镇江:江苏科技大学,2012.
[24] 黄伯云.有色金属材料手册(上)[M].北京:化学工业出版社,2009.

(编辑:刘卫)