

铝/钢搅拌摩擦辅助铆接接头界面特性研究

任航¹, 刘浩^{1,2}, 吴庚毅¹, 陈玉华^{1,2}

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063;
2. 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330063)

摘要: **目的** 探究搅拌摩擦辅助铆接铝/钢接头界面的结合特征, 解决传统铆接力学性能较低的问题。**方法** 采用搅拌摩擦焊技术实现了对3 mm厚不锈钢板和4 mm厚的铝合金板的搭接点焊, 采用OM及SEM对铝/钢接头界面结合情况进行分析, 并利用EDS对界面处元素分布进行分析。**结果** 搅拌头转速1180 r/min、焊接时间120 s、下压量0.2 mm时, 铝/钢接头界面结合较好, 平均拉剪力达到6519 N, 且在铝/钢界面处产生FeAl金属间化合物。受摩擦热作用的影响, 位于下板的铝母材晶粒发生长大变粗, 铝铆钉与铝板结合紧密, 铝铆钉与铝板的结合情况受搅拌头压力的影响更为显著。**结论** 搅拌摩擦辅助铆接铝/钢异种合金, 实现了铆钉与铝板和钢板的有效冶金结合, 在铝钢结合界面处存在原子的互扩散现象, 且有相应的金属间化合物生成。

关键词: 铝; 钢; 搅拌摩擦焊; 界面

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.013

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0091-07

Interface Characteristics of Riveted Al/Steel Joints by Assisted Friction Stir Welding

REN Hang¹, LIU Hao^{1,2}, WU Geng-yi¹, CHEN Yu-hua^{1,2}

(1. Aviation Manufacturing Engineering Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the interface characteristics of riveted aluminum/steel joints by friction stir welding and solve the problem of low mechanical performance of traditional riveting. The mating spot welding of 3 mm thick stainless steel plate and 4 mm thick aluminum alloy plate was realized by friction stir welding technology, and the combination of aluminum/steel joint interface was analyzed through OM and SEM, and the distribution of elements at the interface was analyzed with EDS. When the speed of pin tool was 1180 r/min, the welding time was 120 s and the pin tool plunge depth was 0.2 mm, the aluminum/steel joint interface had a better combination and the average tensile shear reached 6519 N, and FeAl intermetallic compounds were produced at the aluminum/steel interface. Influenced by the impact of frictional thermal effect, the aluminum master grain located on the lower plate was enlarged and thickened, the aluminum rivet was tightly combined with the aluminum plate, and the combination of aluminum rivet and aluminum plate was more significantly influenced by the pin tool pressure. The aluminum/steel heteroalloys riveting assisted by friction stir welding realizes effective metallurgical binding of rivets and aluminum plates and steel plates. The phenomenon of atomic mutual diffusion exists at the interface of aluminum-steel binding, and there is corresponding inter-metal

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 大学生创新创业训练项目(2019HZ114); 国家自然科学基金(51865035); 江西省杰出青年基金(2018ACB21016); 江西省优势科技创新团队项目(20171BCB24007)

作者简介: 任航(1999—), 男, 焊接工程系本科生。

通讯作者: 陈玉华(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新材料及异种材料焊接和电弧增材制造等。

compound generation.

KEY WORDS: aluminum; steel; friction stir welding; interface

近年来在汽车界最核心的发展方向之一就是实现汽车的轻量化,以践行绿色出行、环保汽车的理念^[1-3]。为了降低能耗提高经济性,减重材料(铝合金、先进高强钢、复合材料等)获得了较高的关注度^[4-6],其中铝合金及先进高强钢在车体结构中的应用,促进了铝/钢异种金属连接的需求。美国早在2002年布什政府期间就推出了一个自由车的项目,而汽车的轻量化就是重要的长期目标之一^[7]。实现汽车的轻量化,铝合金是极具竞争力的应用材料。本田雅阁轿车车门及副车架结构采用铝/钢异种金属复合结构,比采用纯钢材轻25%,极大提高了燃油效率。因为铝/钢异种金属复合结构在实现汽车车身轻量化方面具有巨大潜力,所以实现铝/钢异种金属之间的有效连接是各大汽车厂家追求的目标之一^[8-10],故而要实现汽车轻量化必然要实现铝合金与钢的高效焊接。

由于铝、钢在物理和化学性能上的巨大差异,铝/钢异种金属的连接一直是焊接领域的难点。一方面,铝/钢两种材料在线膨胀系数、熔点、热导率方面都存在很大差异,这些差异会导致在焊接接头区域生成不容忽视的焊接应力和变形,进而产生焊接裂纹等缺陷^[11];另一方面,铝/钢两种材料晶体结构存在较大的差异,铁在铝中的溶解度极低,极易形成脆硬的Fe-Al系金属间化合物,严重影响接头的力学性能^[12]。搅拌摩擦焊是由英国The Welding Institut(TWI)于1991年发明的全新的焊接方法^[13],与熔化焊方法相比,其焊接温度低于母材的熔点,对材料的物理化学性能、力学特性等因素的适应性更强^[14-15],在铝/钢等异种金属及铝合金的连接中有较大的优势和应用前景。Yilmaz M等^[16]采用摩擦焊焊接了多种组合的铝/钢接头,结果表明,界面反应层厚度与焊接时间的平方根呈线性关系,金属间化合物层是依靠扩散生长的,随着金属间化合物层厚度的减小,接头强度逐渐升高。Rest D V等^[17]将钢板置上铝板置下,通过搅拌摩擦焊使得铝板受热熔化与钢板连接。结果表明,接头金属间化合物层厚度在2.5 μm ,分别为 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 。用搅拌摩擦焊技术对铝/钢异种金属进行焊接,已经做了不少的研究,但是采用搅拌摩擦焊辅助铆接铝/钢的焊接方法研究较少。黄体方^[18]采用铝板在上、钢板在下的铆接方法对铝钢进行焊接,在搅拌头挤压与摩擦下塑化的铝合金与钢形成铆接接头。其接头连接机制包括机械结合和冶金结合两部分,大大提高了接头的力学性能,得到了既保证高承载能力和密封性好的

搭接接头。

目前,对于铝/钢两种材料的搭接连接主要是铆接,但传统铆接存在密封性差、结合强度较低等问题。采用焊接的方法对铝/钢进行连接,两种材料要达到冶金结合,界面处的金属间化合物必不可少,过多的金属间化合物又会导致接头变脆。既要控制金属间化合物的产生,又要提高接头的承载能力及保证接头的良好密封性,因此文中采用搅拌摩擦焊辅助铆接铝/钢的方法,有望实现接头的高质量连接,也为该方法在焊接铝钢的实际应用中提供了研究基础与理论支持。

1 试验方法

试验所采用材料为80 mm×40 mm×4 mm的2A12-T4铝合金板材和80 mm×40 mm×3 mm的S304退火态不锈钢,其化学成分如表1和表2所示。试验中的铆钉为GB109-平头实心铝铆钉,搅拌头为GH4169高温合金,尺寸示意图如图1所示。图2a和2b分别为焊接方法和搅拌头的示意图。

试验过程中,S304不锈钢板位于上侧,2A12铝合金板位于下侧。焊接前在钢板和铝板上加工直径为6 mm的通孔,焊接时将铝制铆钉从下向上放于预制孔中进行焊接,如图2a所示。

采用4XB-TV型倒置金相显微镜及扫描电子显微镜,观察分析焊缝形貌及显微组织。同时,采用EDS对接头中不同区域进行点线能谱扫描分析,以此来判断焊缝中不同区域的元素组成。采用WDW-50型微机控制电子万能试验机对复合接头拉剪性进行测试。试样拉伸速率为1 mm/min,每组试验选取3个拉剪试样进行测量,并取其平均值。

表1 2A12铝合金主要化学成分(质量分数)
Tab.1 Major chemical compositions of 2A12 aluminum alloy (mass fraction)

%						
Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn
余量	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤0.5	≤0.2	≤0.30

表2 S304不锈钢主要化学成分(质量分数)
Tab.2 Major chemical compositions of SUS304 stainless steel (mass fraction)

%					
C	Si	Cr	Mn	Ni	P
≤0.08	≤1.00	18.00~20.00	≤2.00	8.00~11.00	≤0.045

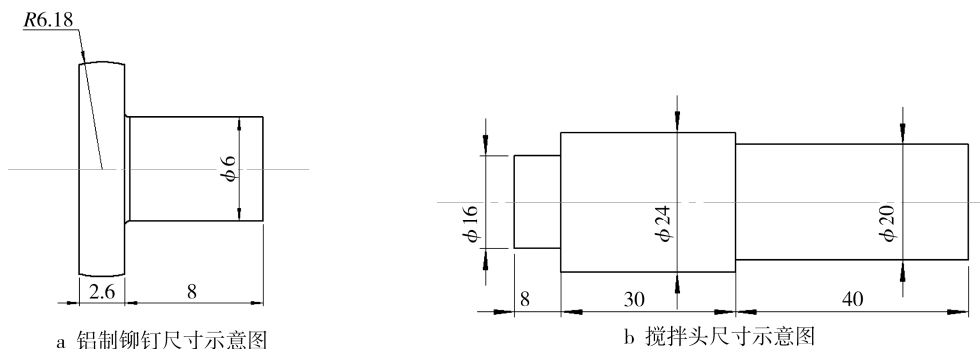


图 1 工具尺寸

Fig.1 Tool size

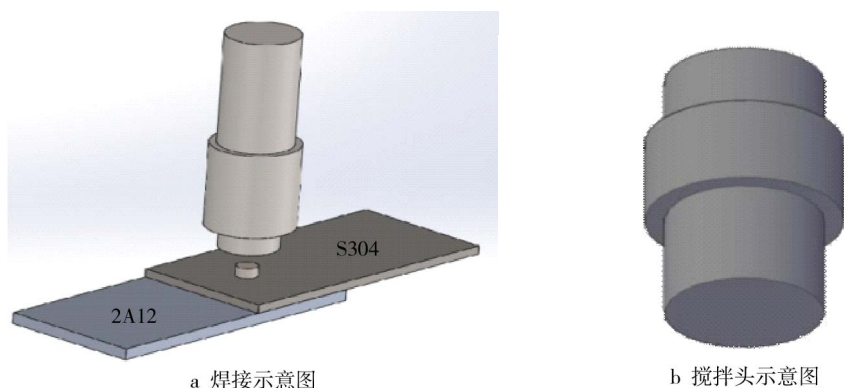


图 2 试验方法

Fig.2 Experimental method

2 结果与分析

2.1 铝/钢接头界面微观组织分析

图 3 为搅拌头旋转速度为 1180 r/min、焊接时间为 120 s、下压量为 0.2 mm 的条件下获得的铝/钢搅拌摩擦辅助铆接接头的横截面宏观形貌。钢板位于上侧、铝板位于下侧, 铝制铆钉被预先放置于钢板和铝板加工好的 6 mm 通孔中。从图 3 可以看出, 搅拌头的压力以及摩擦产生的大量热使得位于中间的铝制铆钉与钢板和铝板发生了较好的结合。图 3 中 A 和 B 区域为铆钉与钢板的结合区, C 和 D 为钢板与铝母材的界面结合区, E 和 F 为铆钉与铝母材的结合区域。为了观察在结合界面区域是否结合紧密, 对各个区域在高倍显微镜下进行观察, 得到的微观组织如图 4 所示。

图 4a 为图 3 中 A 处靠近搅拌头搅拌的区域, 由于搅拌头的旋转摩擦以及挤压力, 在铆钉与钢板的结合处使钢板发生微小的变形, 产生类似于“钩子”的形状紧紧嵌入铝铆钉中。在“钩子”周围生成了一层致密的结合层, 界面处结合良好, 没有出现裂纹等缺陷。图 4b 为图 3 中 B 处位置, 可以看出铆钉与母材钢板在界面处发生很好的结合, 未出现不连续的现象。分析认为, 图 3A 和 B 区域相对于其他区域更加靠近搅

拌头的作用区域, 当搅拌头高速旋转时产生大量热, 位于接近搅拌头下方的区域最先受到摩擦热的作用, 且相对于其他区域摩擦热的散失相对较慢, 为该区域的异种金属的结合提供了较好的条件, 因此在界面处结合相对较好, 没有出现明显的缺陷。图 4c 为图 3 中 C 处位置, 可以看出, 在界面处出现不连续的现象, 图 4d 也出现类似的情况。分析认为该界面处为铝母材与钢母材的结合处, 相对于上两个区域, 该区域的热输入相对较小, 因此会出现结合不连续的现象。

图 4e 为图 3 中 E 处位置, 该区域为铝制铆钉与铝母材的结合区域, 从图 4e 可以看出, 在界面处出现弯曲的变形现象, 分析认为由于铝材质相对钢较软, 在热输入与压力的作用下易发生变形; 在界面处铆钉与铝母材结合紧密, 未出现明显的裂纹或者不连续的缺陷, 一方面由于铝铆钉与铝母材材质相近, 另一方面由于铝材的熔点相对钢材低很多, 因此虽然位于偏下的位置依然可以形成较好的结合。图 4f 为图 3 中 E 区铝母材侧的微观组织, P 区域晶粒相对 Q 区域发生沿箭头方向的生长, 且可看出由于焊接热输入的影响, 其 P 区域处的晶粒相对 Q 区域晶粒发生长大。图 4g 为图 3 中 F 区域, 可以看出铝母材和铆钉形成了很好的结合, 相对于 E 区域, F 区在结合界面处已经不能观察到较明显的过渡区域。分析认为, 虽然 E 区域和 F 区域位于搅拌头的下方, 但 E 区域受到搅拌

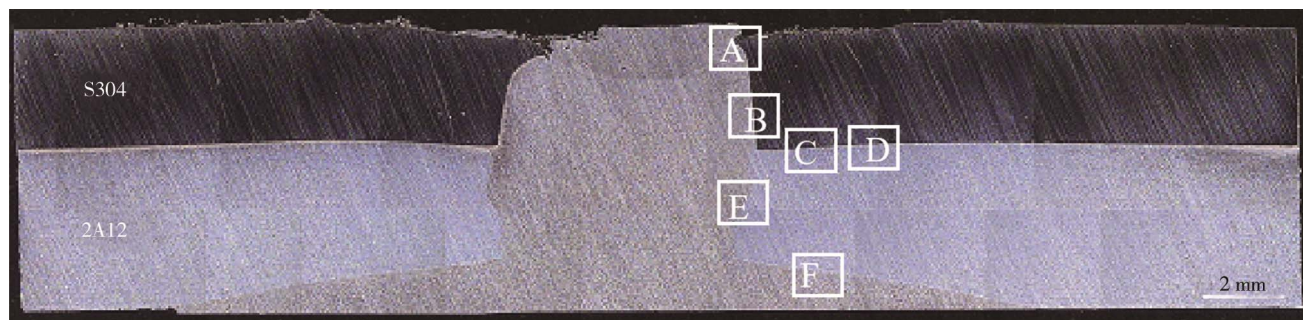
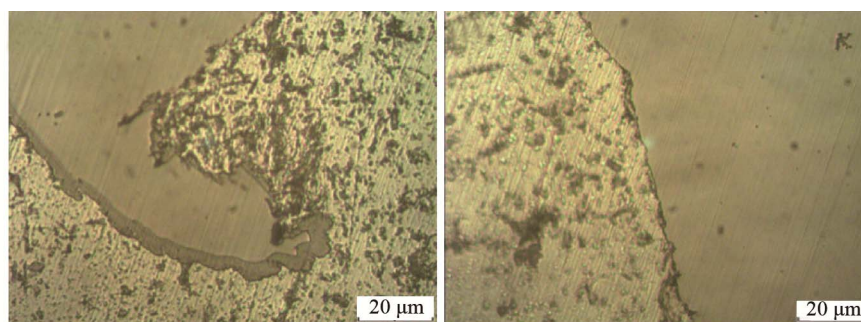
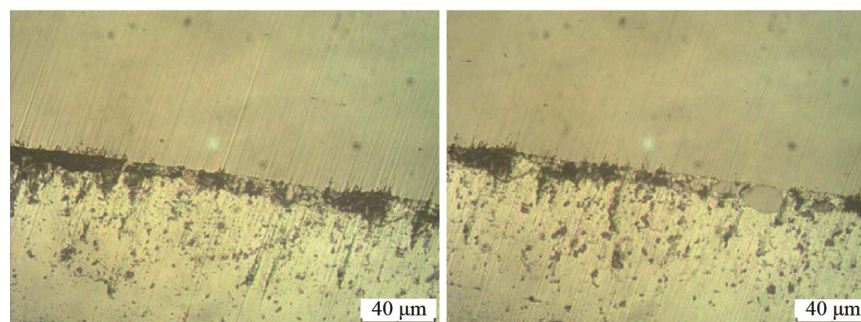


图3 铝/钢接头的宏观形貌
Fig.3 Macro profile of Al/steel joints



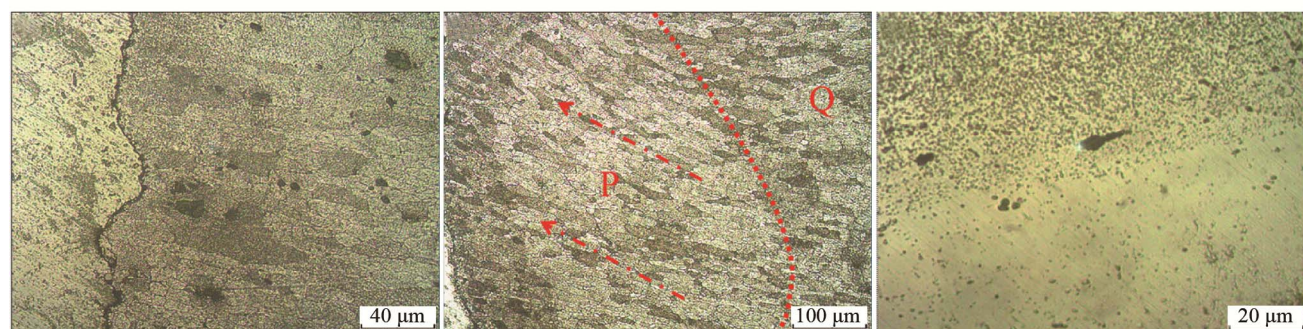
a 图3A区

b 图3B区



c 图3C区

d 图3D区



e 图3E区界面

f 图3E区铝母材侧

g 图3F区界面

图4 铝/钢接头各区域界面微观组织
Fig.4 Regional interface micro-organization of Al /steel joints

头的挤压力相对较小;F区域位于搅拌头的正压力下,一方面受热输入的影响,另一方面更多的是搅拌头的挤压力使得铝母材和铆钉形成了很好的结合。

2.2 铝/钢接头界面成分分析

从图 5 可以明显看出钢母材与铝铆钉发生了冶

金结合,由于搅拌头的压力以及搅拌摩擦的作用,在界面处钢板的表面发生微小的变形,部分区域呈现锯齿状。对图 5 中 1 区域进行放大进一步观察,发现在部分界面的结合处出现圆孔状的缺陷。

对图 6a 界面区域部分位置做 EDS 点扫描分析,分析结果如表 3 所示,从 P_1 点到 P_4 点 Al 元素的含

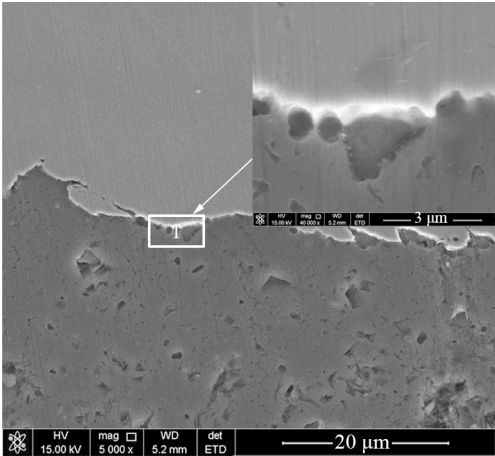
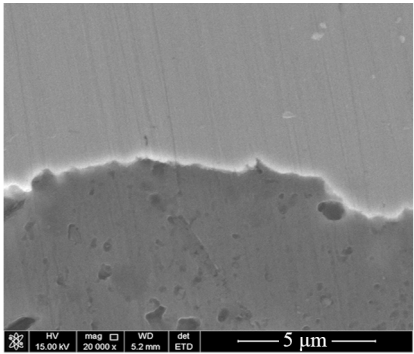
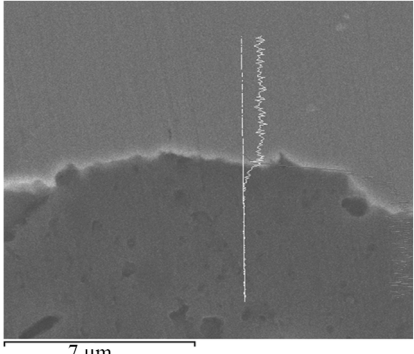


图 5 图 3 界面 A 区域 SEM
Fig.5 Fig.3 SEM of interface A zone

量在逐渐增加，Fe 和 Cr 元素在逐渐降低，从图 6b 也可以明显看出，在界面处出现 Fe 元素与 Al 元素相交的位置。P₂ 点处，Al 元素和 Fe 元素的含量接近 1：1，结合图 7 铝-铁相图以及图 6b 界面区域的线扫描结果，可以推测该界面处可能产生 FeAl 金属间化合物^[19—21]，但是其厚度非常薄。根据相关研究表明，当金属间化合物的厚度小于 5 μm 时，则不会对接头的力学性能产生不利的影响，甚至会改善接头的力学性能^[22—24]。Si 元素的含量出现先增大后减小的趋势，分析认为由于热输入的影响，Si 元素有向界面扩散富集的趋势。



a 界面区域点扫描结果



b 界面区域线扫描结果

图 6 接头界面区域 EDS
Fig.6 EDS of joint interface area

表 3 EDS 元素分析结果（原子数分数）
Tab.3 EDS element analysis results (atomic)

区域	Al	Fe	Cr	Si
P ₁	2.58	80.60	16.82	—
P ₂	46.64	40.19	12.21	0.96
P ₃	97.51	0.78	—	1.71
P ₄	99.41	—	—	0.59

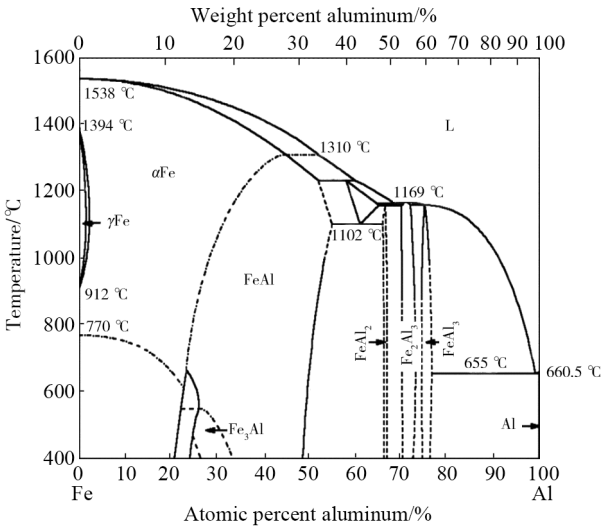


图 7 铝-铁二元合金相
Fig.7 Al/Fe binary diagram

2.3 接头的力学性能分析

在 WDW-50 型微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验，图 8 为铝/钢异种金属搅拌摩擦铆接接头的拉剪力的变形曲线。由图 8 可以看出，最高拉剪力为 6960 N，最低为 6298 N，平均拉剪力达到 6519 N。分析认为，一方面铝制铆钉与钢板和铝板形成冶金结合，另一方面在钢板上方，钢板产生类似“钩状”变形，对界面结合力有一定的机械连接促进作用，因此接头的连接机制包括微观的机械结合和界面的冶金结合。

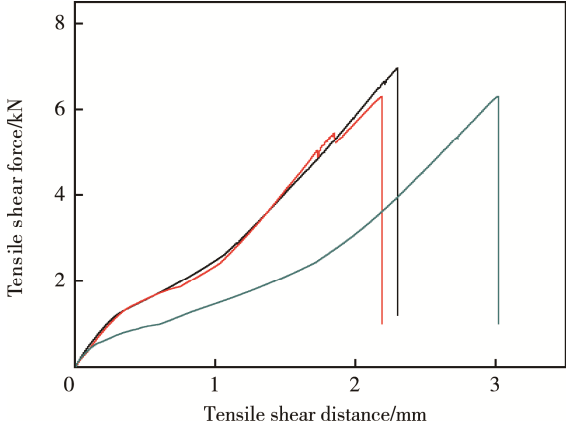


图 8 接头的拉剪变形曲线
Fig.8 Pull-shear deformation curve of joint

接头的拉剪力存在一定的波动,分析认为由于形成的机械结合及界面处冶金结合存在不规则性,因此导致拉剪力不稳定。

3 结论

1)在搅拌头旋转速度为 1180 r/min、焊接时间为 120 s、下压量 0.2 mm 的条件下,可以实现铝/钢异种金属有效搭接连接,接头平均拉剪力达到 6519 N。

2)接头上部钢板与铝铆钉形成冶金结合,且上部钢板发生“钩状”变形;在铝铆钉与钢板界面处发生元素的互扩散,形成 FeAl 金属间化合物。

3)受搅拌头挤压力以及摩擦热的影响,位于下部的铝板与铝铆钉在界面处形成无缺陷的冶金结合。

参考文献:

- [1] 张满,张军,蒋腾,等. Fe-Al 金属间化合物对铝/钢钎焊接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 61—64.
ZHANG Man, ZHANG Jun, JIANG Teng, et al. Effect of Fe-Al Intermetallic Compound on Mechanical Property of Aluminum/Steel Brazed Joint[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2018, 39(1): 61—64.
- [2] 雷振,秦国梁,林尚扬,等. 铝与钢异种金属焊接的研究与发展概况[J]. 焊接, 2006(4): 16—20.
LEI Zhen, QIN Guo-liang, LIN Shang-yang, et al. Research and Developments of Dissimilar Metals Welding of Al/Steel[J]. Welding, 2006(4): 16—20.
- [3] 李亚江,吴娜. 钢/铝异种金属焊接的研究现状[J]. 焊接, 2010(3): 5—12.
LI Ya-jiang, WU Na. Research Status of Steel/Aluminum Heterogeneous Metal Welding[J]. Welding, 2010 (3): 5—12.
- [4] LI Shu-han, CHEN Yu-hua, ZHOU Xing-wen, et al. High-Strength Titanium Alloy/Steel Butt Joint Produced Via Friction Stir Welding[J]. Materials Letters, 2019(234): 155—158.
- [5] LI Shu-han, CHEN Yu-hua, KANG Ji-dong, et al. Interfacial Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Titanium Alloy and Steel Friction Stir Butt-welds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019(40): 160—168.
- [6] CHEN Yu-hua, NI Quan, KE Li-ming. Interface Characteristic of The Friction Stir Welding Lap Joints of Ti/Al Dissimilar Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 299—304.
- [7] 相倩. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊工艺及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.
XIANG Qian. Study on Process and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Al-Steel Joints[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2016.
- [8] 徐海升. 铝/钢异种金属搅拌摩擦焊工艺及连接机制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
XU Hai-sheng. The Research of Process and Joining Mechanism of Dissimilar Materials Al/Fe Friction Stir Welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [9] 关绍康,姚波,王迎新. 汽车铝合金车身板材的研究现状及发展趋势[J]. 机械工程材料, 2001, 25(5): 12—14.
GUAN Shao-kang, YAO Bo, WANG Ying-xin. The Progress and Prospect of Research on Aluminium Alloys for Auto Body Sheets[J]. Mechanical Engineering Materials, 2001, 25(5): 12—14.
- [10] 张丽娜,刘敏,蒋继英,等. 铝及铝合金与钢的连接技术研究现状[J]. 航天制造技术, 2013, 14(2): 15—18.
ZHANG Li-na, LIU Min, JIANG Ji-ying, et al. The Development of Welding of Aluminum Alloy and Steel[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 14(2): 15—18.
- [11] 李树寒. 铝/钢搅拌摩擦焊接头界面特征及力学行为研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
LI Shu-han. Investigation of Friction Stir Welded Al Alloy to Steel Dissimilar Joints Interface Characterization and Mechanical Behavior Estimation[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [12] NANDAN R, DEBROY T, BHADESHIA H. Recent Advances in Friction Stir Welding-Process, Weldment Structure and Properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980—1023.
- [13] THOMAS W M, NICHOLAS E D. Friction Stir Welding for The Transportation Industries[J]. Materials & Design, 1997, 18(4/5/6): 269—273.
- [14] ZHOU Xing-wen, CHEN Yu-hua, LI Shu-han, et al. Friction Stir Spot Welding-Brazing of Al and Hot-Dip Aluminized Ti Alloy with Zn Interlayer[J]. Metals, 2018, 8(11): 922.
- [15] CHEN Yu-hua, DENG Huai-bo, LIU Hao, et al. A Novel Strategy for the Reliable Joining of Ti6Al4V/2A12-T4 Dissimilar Alloys Via Friction Melt-Bonded Spot Welding[J]. Materials Letters, 2019, 253: 306—309.
- [16] YILMAZ M, COL M, ACET M. Interface Properties of Aluminum/Steel Friction-Welded Components[J]. Materials Characterization, 2002, 49(5): 421—429.
- [17] REST C V D, JACQUES P J, SIMAR A. On the Joining of Steel and Aluminium by Means of a New Friction Melt Bonding Process[J]. Scripta Materialia, 2014, 77(12): 25—28.
- [18] 黄体方. 铝/钢铆接辅助搅拌摩擦焊接头界面行为及承载特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
HUANG Ti-fang. Analysis of Interface Behavior and Bearing Characteristics of Aluminum/Steel Riveted Auxiliary Friction Stir Welding Joint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [19] HAGHSHEENAS M, ABDEL-GWAD A, OMRAN A M,

- et al. Friction Stir Weld Assisted Diffusion Bonding of 5754 Aluminum Alloy to Coated High Strength Steels[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 442—449.
- [20] JIANG W H, KOVACEVIC R. Feasibility Study of Friction Stir Welding of 6061-T6 Aluminium Alloy With AISI1018 Steel[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218(10): 1323—1331.
- [21] CHEN Z W, YAZDANIAN S, LITTLEFAIR G. Effects of Tool Positioning on Joint Interface Microstructure and Fracture Strength of Friction Stir Lap Al-to-steel Welds[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(6): 2624—2634.
- [22] MANESH H D, TAHERI A K. The Effect of Annealing Treatment on Mechanical Properties of Aluminum Clad Steel Sheet[J]. *Materials & Design*, 2003, 24(8): 617—622.
- [23] MERTIN C, NAUMOV A, MOSECKER C, et al. Influence of The Process Temperature on The Properties of Friction Stir Welded Blanks Made of Mild Steel and Aluminum[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 611/612: 1429—1436.
- [24] LEE C Y, CHOI D H, YEON Y M, et al. Dissimilar Friction Stir Spot Welding of Low Carbon Steel and Al-Mg Alloy by Formation of IMCs[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2013, 12(4): 216—220.