DOI: 10.3901/JME.2020.06.065

DP590 钢/7075 铝异种金属搅拌摩擦搭接焊 界面组织与力学性能研究*

于海洋^{1,2} 胡志力^{1,2}

- (1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉 430070;
2. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心 武汉 430070)

摘要: 对 7075-T6 铝合金和镀锌 DP590 钢板进行了搅拌摩擦搭接焊,并结合焊接过程中温度场、流场数值模拟结果,研究了金属间化合物(Intermetallic compound, IMC)厚度以及钩状结构对接头力学性能的影响规律。结果表明,IMC 厚度较大时,IMC 层在焊接残余应力作用下产生微裂纹,降低了接头冶金结合强度,当 IMC 厚度由 0.8 μm 增大至 4.3 μm 时,接头拉剪载荷降低 17.8%。当钩状结构高度较大时,钩状结构上下两端宽度差较大,在拉剪载荷作用下钩状结构受力不均,薄弱部位易发生应力集中而断裂,降低了接头机械结合强度,接头性能随钩状结构高度的增大而下降。

关键词: 搅拌摩擦焊; 钩状结构; 金属间化合物厚度; 力学性能

中图分类号: TG453

Investigation of Interfacial Microstructure and Mechanical Properties for DP590 Steel/7075 Aluminum Dissimilar Materials Friction Stir Lap Welding Joints

YU Haiyang^{1,2} HU Zhili^{1,2}

- (1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automobile Components,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: 7075-T6 aluminum alloy and galvanized DP590 steel are friction stir lap welded. Combining with the numerical simulation results of temperature field and material flow during welding, the effects of intermetallic compound (IMC) thickness and hook structure on the mechanical properties of the joint are studied. The results show that when the thickness of IMC is large, the microcracks are easy to initiate and expand at the IMC layer, which reduces the joint metallurgical bond strength. As the IMC thickness increasing from 0.8 μm to 4.3 μm , the joint strength decreases by 17.8%. The width difference between the upper and lower ends of the higher hook structure is larger. Under the tensile shear load, the hook structure is unevenly stressed. The weak part is prone to stress concentration and fracture, which reduces the mechanical bond strength of the joint. As the height of the hook structure increases, the strength of the joint gradually decreases.

Key words: friction stir welding; hook structure; intermetallic compound thickness; mechanical properties

0 前言

随能源紧缺和环境污染的日益严重,汽车轻量化

化已成为汽车行业发展过程中不可避免的问题。目前在车身材料中通常采用铝合金板材代替部分钢材以减轻车身质量,车身钢/铝复合结构可兼顾成本和轻量化的要求,既可充分发挥铝合金在减重及吸能方面的优势,同时兼顾高强钢在强度和成本方面的优势,因此钢/铝复合结构逐渐成为汽车轻量化的重要途径之一。但由于钢、铝在物理以及化学性能上的巨大差异,熔焊等传统焊接方法难以获得高性能

* 国家自然科学基金(51775397)、中国汽车产业创新发展联合基金(U1564202)和湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA007)资助项目。
20190830 收到初稿,20191226 收到修改稿

的钢/铝接头^[1-3]。

搅拌摩擦焊作为一种固相焊技术,具有热输入量低,焊接残余应力小,无熔化缺陷等优点^[4],在钢/铝异种材料连接领域具有广阔的应用前景。近年来国内外学者对钢/铝异种金属搅拌摩擦焊进行了大量研究,研究表明,钢/铝搅拌摩擦搭接焊接头中存在机械结合和冶金结合两种形式^[5],接头界面钩状结构以及金属间化合物(Intermetallic compound, IMC)则是影响机械结合和冶金结合强度的主要因素。SHEN 等^[6]研究发现,在 Al5754/DP600 搅拌摩擦搭接焊接头中,随下压量的增大材料流动更加充分,钩状结构高度逐渐增大,接头性能随之提高。而 YANG 等^[7]发现当采用三角形搅拌针进行搅拌摩擦搭接焊时,可很好地抑制钩状结构的生成,接头拉剪载荷可提高 78%。在冶金结合方面,IMC 的成分和厚度是影响冶金结合强度的主要原因,IMC 成分较为复杂,研究表明富 Fe IMC(FeAl、Fe₃Al 等)的韧性优于富 Al IMC(FeAl₃、Fe₂Al₅ 等),因此含有富 Fe IMC 的接头拉剪载荷相对较高^[8]。而 IMC 厚度对接头性能的影响则存在一定争议,TANAKA 等^[9]对 Al5083 和低碳钢进行了搅拌摩擦搭接焊,结果表明随热输入量的降低,IMC 层厚度逐渐降低,接头性能逐渐提高。BOZZI 等^[10]则认为在 Al6061/IF 钢体系中 IMC 层厚度存在临界值,随 IMC 厚度增大,接头拉剪载荷呈先增大后减小的趋势,最佳 IMC 厚度为 8 μm 。可见众多研究表明,钩状结构以及 IMC 厚度主要受材料流动以及焊接温度影响,但钩状结构以及 IMC 厚度对接头拉剪载荷的影响规律并不明确,有待进一步研究。

目前大量的研究主要集中在 5 系、6 系等焊接性良好的铝合金和钢的连接上^[6-12]。但随汽车安全法规的日趋严格,高强/超高强的 7 系铝合金在汽车生产中有着广泛的应用前景。由于 7 系铝合金强度高、塑性差,自冲铆接(Self-piercing riveting, SPR)、压力连接(Clinching)等机械连接方法难以实现较厚钢/铝板材间的机械连接,同时 7 系铝合金中存在 Zn、Mg 和 Cu 等元素,焊接过程中易发生烧蚀,导致焊缝强度降低,此外焊接区域经历较高温度的焊接热循环,热影响区易发生过时效和晶粒粗化,因此 7 系铝合金的焊接性能较差^[13]。目前对于焊接性较差的高强 7 系铝合金与钢的连接方面的研究仍然较少,缺乏系统而深入的研究。

本文对 7075-T6 铝合金和镀锌 DP590 钢搅拌摩擦搭接焊接头界面组织和力学性能进行研究。本文采用试验与数值模拟相结合的方法,对不同焊接速度下接头中材料流动以及温度场分布进行了研究,

探讨了钩状结构以及 IMC 层厚对接头性能的影响规律。

1 试验及模拟

1.1 试验材料及方法

试验材料采用 7075-T6 铝合金和镀锌 DP590 钢,其化学成分如表 1 所示,板材尺寸分别为 300 mm×80 mm×3 mm 和 300 mm×80 mm×1.2 mm。试验采用的搅拌头材料为 H13 模具钢,且带有右旋螺纹的锥形搅拌针,轴肩直径为 12 mm,搅拌针长 2.9 mm,搅拌针底端直径为 3.6 mm,锥度为 14°,焊接倾角 2.5°,焊接参数如表 2 所示。焊前采用丙酮分别对钢板和铝板进行擦拭,去除板材表面油污。本试验采用铝板在上钢板在下的搭接方式,研究表明^[7-8, 11-12],当钢置于前进侧,铝置于后退侧时,接头性能较好,因此本试验中钢置于前进侧,铝板置于后退侧,搭接宽度为 40 mm,如图 1 所示。

表 1 母材化学成分(质量分数) %

母材	元素							
	Zn	Mg	Cu	Si	C	Mn	Al	Fe
7075-T6	5.33	2.27	1.80	0.09	—	<0.03	余量	0.28
DP590	—	—	—	0.43	0.71	1.84	0.04	余量

表 2 焊接参数

编号	转速/(r/min)	焊速/(mm/min)	下压量/mm
1	1 200	25	0.3
2	1 200	50	0.3
3	1 200	100	0.3
4	1 200	150	0.3

图 1 钢/铝搅拌摩擦搭接焊示意图(mm)

焊后沿垂直焊缝方向截取金相试样以及拉剪试样,拉剪试样规格为 12.5 mm×100 mm。拉剪试验在 WDW-100 型万能试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min,接头拉剪载荷取 3 个拉剪试样的平均值,同时分别在钢、铝母材处加入 3 mm 和 1.2 mm 垫板,以保证拉剪力与接头界面平行。金相试样经研

磨、抛光后利用凯勒试剂(2.5 mL HF, 1 mL HCl and 1.5 mL HNO₃ 和 95 mL H₂O)以及 4%硝酸酒精溶液分别对铝、钢两侧进行腐蚀,并在光学金相显微镜(Optical microscopy, OM)和扫描电镜(Scanning electron microscopy, SEM)下对接头界面微观组织和结构进行分析。

1.2 数值模拟

本文采用商用 CFD 软件 Fluent 对钢/铝搅拌摩擦搭接焊过程中温度场以及流场进行模拟,模型仅考虑钢板和铝板搭接部分,其示意图如图 2 所示。本模拟不考虑焊接过程中搅拌头旋入和旋出过程,仅对焊接稳态下的温度场、流场进行模拟。模型中材料被视为不可压缩的黏塑性非牛顿流体,材料流动本构方程采用 SELLAR 和 TEGART 提出的双曲正弦关系式^[14]表示

$$\bar{\varepsilon} = A(\sinh \alpha \sigma)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, $\bar{\varepsilon}$ 为材料的有效应变率; σ 为材料流动应力; R 为气体常数; T 为绝对温度; Q 为变形热激活能; n 为应力指数, A 和 α 为与材料有关的常数。7075-T6 铝合金和 DP590 钢的本构模型中各项常数以及其他材料参数可参考文献[15-18]。

图 2 三维模型及局部网格放大图(mm)

本模型中,搅拌头与工件接触面的产热考虑了摩擦产热和塑性变形产热两种方式,轴肩以及搅拌针与工件各接触面产热率可表示为^[17-20]

$$q_{sb}(r) = [(1-\delta)\tau_c + \delta\mu_f P_N](\omega r - u_{weld} \sin \theta) \quad (2)$$

$$q_{pb}(r) = [(1-\delta)\tau_c + \delta\mu_f P_N](\omega r - u_{weld} \sin \theta) \quad (3)$$

$$q_{ps}(r) = [(1-\delta)\tau_c + \delta\mu_f \sigma_y](\omega r - u_{weld} \sin \theta) \quad (4)$$

式中, $q_{sb}(r)$ 、 $q_{pb}(r)$ 、 $q_{ps}(r)$ 分别为轴肩底面、搅拌针底面以及搅拌针侧面的产热率, τ_c 为材料的剪切屈服强度, σ_y 为工件材料的屈服强度, P_N 为搅拌头轴向压力, ω 为焊接转速, u_{weld} 为材料流动速度,与焊接速度相等, r 为接触面上微元到搅拌头轴线的径向距离, θ 为焊接方向与 r 径矢方向的夹角, δ 为界面滑移系数, μ_f 为搅拌头与工件接触面的摩擦

因数。本模型中, $P_N=45$ MPa, $\delta_{Al}=0.4$ ^[18], $\delta_{Steel}=0.7$ ^[19], $\mu_{fAl}=0.35$ ^[18], $\mu_{fSteel}=0.3$ ^[20]。

搅拌头与工件接触面的速度边界条件可表示为^[17-19]

$$u = (1-\delta)(\omega r \sin \theta - u_{weld}) \quad (5)$$

$$v = (1-\delta)\omega r \cos \theta \quad (6)$$

$$w = \frac{\psi \omega}{2\pi} \quad (7)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的相对速度, ψ 为搅拌针螺纹螺距。

焊接过程中工件底面与垫板紧密接触,热传导散热为主要的散热形式,其热边界条件表示为^[19-21]

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h_b(T - T_0) \quad (8)$$

式中, k 为工件材料热导率, h_b 为钢板底面对流换热系数, $h_b=500.0$ W/(m²·K)^[20-21], T_0 为环境温度。

而工件顶面、侧面均与空气接触,散热方式包括热传导和辐射换热两种形式,因此其热边界条件可表示为^[14, 17]

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \delta_r \varepsilon_r (T^4 - T_0^4) + h_t(T - T_0) \quad (9)$$

式中, δ_r 为 Stefan-Boltzmann 常数, ε_r 为热辐射系数, h_t 为铝板顶面及侧面对流换热系数, $\delta_r=5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)^[17], $\varepsilon_r=0.2$ ^[17], $h_t=30.0$ W/(m²·K)^[14]。

2 结果与分析

2.1 接头成形

搅拌摩擦搭接焊(Friction stir lap welding, FSLW)过程中,接头的温度分布以及材料流动决定了接头的成形。不同焊速下接头横截面温度分布如图 3a 所示,当焊速为 25 mm/min 时,接头横截面温度呈“U”形分布,铝材与轴肩接触面温度为 512 °C,而实际焊接过程中此接触面的温度为 509 °C(图 3b),可见模拟结果较为准确。图 3c 为不同焊速下接头钢/铝界面的温度分布曲线,接头前进侧(Advancing side, AS)温度明显大于后退侧(Retreating side, RS),这是由于前进侧工件与搅拌头相对速度大,工件材料的有效应变率 $\bar{\varepsilon}$ 较大^[22],因此前进侧摩擦产热以及塑性变形产热量均大于后退侧,最终导致前进侧温度高于后退侧。同时由于前进侧铝板面积较大(图 1),而铝板的热导率较高,因此后退侧的散热大于前进侧,进一步导致前进侧温度高于后退侧。

图 4 为不同焊速下钢/铝搅拌摩擦搭接焊接头横

截面形貌,钢/铝间均通过机械+冶金结合的方式实现连接。在搅拌针轴吸作用下,钢母材向上流动并进入上层铝材,形成钩状结构。在不同焊接速度下,后退侧钩状结构均明显大于前进侧,且随焊接速度的提高,钩状结构尺寸明显减小。由钢/铝界面处的材料流线图 5a 可知,前进侧的钢在搅拌针的驱动下流动至后退侧,后退侧过多的钢材在搅拌针挤压作用下进入铝材,导致后退侧钩状结构明显大于前进侧。随焊接速度的提高,热输入量减少,前进侧与后退侧材料流动能力均减弱,两侧钩状结构尺寸逐渐减小,同时两侧钩状结构尺寸差异也逐渐减小。

(a) 各焊速下接头温度分布云图

(b) 时间-温度曲线图

(c) 接头钢/铝界面温度分布曲线

图3 不同焊速下接头横截面温度分布

图 5b 为 25 mm/min 焊速下钢/铝界面(图 5a 中 I 区)材料沿 x 方向流动的速度场分布,可见后退侧材料的流动速度大于前进侧^[14, 17]。由速度边界条件方程式 $u = (1 - \delta)(\omega r \sin \theta - u_{weld})$ 可知,前进侧搅拌头转速沿焊接方向的分量 $\omega r \sin \theta$ 与材料流动速度 u_{weld} 方向相反,搅拌针壁面与工件材料的相对速度较大,导致前进侧工件材料与搅拌针壁面的相对滑动较大^[23],材料流动速度小于搅拌针壁面速度。工件材料在搅拌针的驱动作用下向后退侧流动(图 5a),在此过程中工件材料在摩擦力等驱动力作用下流动速度逐渐增大,同时由于后退侧 $\omega r \sin \theta$ 与 u_{weld} 方向相同,工件与搅拌针的相对速度逐渐减小,部分材料粘附在搅拌针壁面,进一步提高了材料的流动速度,最终导致后退侧材料流动速度大于前进侧。

图4 钢/铝搅拌摩擦搭接焊接头横截面形貌

由图 4 可知,当焊速为 25 mm/min 时,接头焊核区存在大量钢屑,在焊速提高后,钢屑体积有所增大但数量明显减少,当焊速达到 150 mm/min 时,接头中钢屑完全消失。不同焊速下钢/铝接头横截面的材料粘度分布如图 6 所示,在搅拌针与钢母材接触区域钢母材黏度较大,材料流动能力较差,因此部分钢材在搅拌针的搅拌作用下发生破碎并进入上层铝材。随焊速的提高,搅拌针对钢母材的搅拌作用逐渐减弱,钢屑数量逐渐减少,且由于搅拌破碎作用的减弱以及热输入量的降低,钢屑体积有所增大。焊速继续提高后,搅拌针的搅拌作用不足以将钢屑从钢母材上剥离,接头中钢屑完全消失。

焊接过程中,在搅拌头热机作用下,焊核区钢/铝界面处生成金属间化合物(IMC)进而实现冶金结合,分别对各接头结合界面宽度进行测定,得到焊接速度与结合界面宽度的关系曲线,如图 7 所示。分析认为,焊接速度较小时,热输入量充足,搅拌头热机作用较强,结合界面冶金反应较为剧烈,结

合界面较宽,当焊速提高,热输入量下降,结合界面处钢材流动能力较差,搅拌针难以将钢材挤出焊核区,因此结合界面宽度较小。结合界面宽度反映了接头的结合面积,对接头性能有较大影响。

图 5 接头材料流动及速度场分布

图 6 焊缝横截面粘度分布云图

2.2 接头界面组织

图 8 为钢/铝接头界面钩状结构的 SEM 扫描结

图 7 焊接速度对结合界面宽度影响

果,如图 8a~8d 所示,前进侧和后退侧钩状结构表面均有 IMC 生成,且钩状结构远离焊核区的外侧 IMC 厚度明显大于内侧。分别对内外两侧 IMC 进行线扫描,结果如图 8e、8f 所示,可见钩状结构内侧 IMC 层中 Zn 含量极少,而外侧 IMC 中则存在 Al、Fe、Zn 三种元素。分析认为,在焊接过程中,Al 元素在搅拌头热机作用下扩散进入钢板表面的镀锌层,由 Al-Zn 二元相图^[6]可知,当温度达到 381 °C 时 Al 与 Zn 可生成低熔点共晶成分的液相合金,在搅拌头压力作用下熔融态的 Al-Zn 共晶成分液相合金被挤出搅拌头作用区。由于焊核区搅拌针挤压作用剧烈,因而在靠近焊核区的钩状结构内侧 Zn 元素含量较低,而在远离焊核区的钩状结构外侧,则会存在部分熔融态的 Al-Zn 共晶成分液相合金。钩状结构两侧各点的能谱分析结果如表 3 所示,两钩状结构外侧 IMC 成分均为 Fe_2Al_5 以及 Al-Zn 共晶成分,而钩状结构内侧的 IMC 成分则较为单一仅存在 Fe_2Al_5 ,可见点能谱结果与上述分析相一致。此外钩状结构内侧的钢基体中存在不连续的薄层状 IMC 层,能谱分析结果表明其成分为 Fe_3Al ,这是由于焊接过程中焊核区材料塑性流动剧烈,钢材与铝材相互混合,部分铝材嵌入钢基体,IMC 生成过程中 Fe 元素较为充足,最终形成富 Fe 的 IMC 层。

在钢/铝搅拌摩擦搭接焊接头中,IMC 层成分以及厚度均对接头性能有较大影响。研究表明^[24],焊接冷却阶段,在焊接残余应力等作用下,硬而脆的富 Al IMC 层会产生裂纹,进而对接头性能产生不利影响。图 9 为不同焊速下钢/铝界面的 SEM 结果,由于 IMC 中存在富 Al 的 Fe_2Al_5 ,钢/铝界面 IMC 层存在明显的裂纹。由图 9a~9c 可知当焊速由 25 mm/min 提高至 100 mm/min 时,IMC 层中裂纹逐渐消失,这是由于 25 mm/min 焊速下接头热输入量较高,生成的 IMC 层厚度较厚,且焊接残余应力较大,在冷却过程中硬而脆的 IMC 层在应力集中作用下产生大量细小的微裂纹,当焊速减小后,IMC

厚度以及残余应力逐渐减小, 微裂纹逐渐消失。而焊速增至 150 mm/min 后(图 9d), 由于热输入量不足, 钢/铝间冶金结合较弱, 钢/铝界面难以生成 IMC, 接头冶金结合强度较小。此外焊接速度对 IMC 层厚度也有一定影响, 随焊接速度的增大, 热输入量逐渐减少, IMC 层厚度由 4.3 μm 减小至 0.8 μm 。

图 8 钢/铝接头界面钩状结构 SEM 及能谱分析结果
(焊速 25 mm/min)

表 3 图 8 中各点能谱分析结果(原子分数) %

点	Al	Fe	Zn	成分
A	60.27	30.16	9.57	Al-Zn 共晶成分+ Fe_2Al_5
B	22.96	76.77	0.27	Fe_3Al
C	92.3	6.4	1.3	Al
D	74.69	25.04	0.27	Fe_2Al_5
E	26.34	72.68	0.98	Fe_3Al
F	66.81	26.05	7.14	Al-Zn 共晶成分+ Fe_2Al_5

图 9 不同焊速下钢/铝界面 SEM 结果以及 IMC 厚度

2.3 接头性能及失效形式

图 10 为不同焊速下接头拉剪载荷, 最大焊接强度出现在 100 mm/min 焊速下, 最大拉剪载荷为 3.65 kN, 而在 150 mm/min 焊速下, 接头性能最差, 拉剪载荷仅为 1.53 kN, 接头拉剪载荷随焊接速度的提高而先增大后减小。不同焊速下接头均沿钢/铝界面发生失效, 25 mm/min 焊速下接头失效界面如图 11a 所示, 接头的失效主要包括两个方面(图 11b): 一方面拉伸剪切过程中, 前进侧钩状结构的薄弱位置发生应力集中而断裂, 导致机械结合失效; 另一方面, 由于结合界面以及后退侧钩状结构表面存在脆性的富 Al IMC 层, 在拉剪载荷下 IMC 层中微裂纹逐渐生长, 进而发生冶金结合失效, 最终结合界面发生脱离, 且后退侧钩状结构从铝基体中拔出。

图 10 不同焊速下接头拉剪载荷

(a) 25 mm/min 焊速下接头失效界面

(b) 接头失效形式

图 11 接头失效界面及形式

可见钢/铝接头拉剪载荷受钩状结构以及 IMC 层的影响较大, 当焊速为 25 mm/min 时, 前进侧钩

状结构尺寸较大,且钩状结构上窄下宽,在拉剪载荷下钩状结构受力不均,易在薄弱位置发生应力集中,造成钩状结构断裂。此外低焊速下接头 IMC 层较厚,其成分为硬而脆的 Fe_2Al_5 ,且 IMC 层中存在微裂纹,因而接头冶金结合强度较低。随焊速的提高,接头前进侧钩状结构尺寸逐渐减小,钩状结构受力更加均匀,应力集中在宽度较大的根部,且 IMC 层生长受到抑制,其厚度明显减小,裂纹逐渐消失,接头冶金结合强度得到提高。而当焊速提高到 150 mm/min 时,由于热输入量不足,无法形成连续的 IMC 层,钢/铝间存在较大间隙,且钩状结构持续减小,接头机械结合强度逐渐降低,接头机械性能较差。故接头由于受机械结合以及冶金结合强度的影响,随焊接速度的增大,其强度呈现出先增大后减小的趋势。

3 结论

(1) 由模拟和试验结果可知,钢/铝搅拌摩擦搭接焊过程中,接头前进侧温度高于后退侧,前进侧塑性流动的钢材在搅拌针驱动下流动至后退侧,并在后退侧发生堆积,由于后退侧材料流动速度明显大于前进侧,钢材在搅拌针挤压作用下向上进入铝板形成钩状结构,最终后退侧钩状结构明显大于前进侧,且随焊接速度的增大,两侧钩状结构均有所减小。

(2) 不同焊速下,钢/铝界面 IMC 成分主要为硬而脆的富 Al 的 Fe_2Al_5 ,当焊速由 100 mm/min 降低至 25 mm/min 时,IMC 厚度由 0.8 μm 增大至 4.3 μm ,接头拉剪载荷减小 17.8%,当 IMC 厚度较厚时,IMC 层在焊接残余应力作用下易发生应力集中而产生微裂纹,在拉剪载荷下微裂纹逐渐生长,造成接头性能下降,当焊速为 150 mm/min 时,焊接热输入量较小,冶金结合不足,难以生成连续的 IMC 层,钢/铝间存在较大间隙,接头拉剪载荷仅为 1.53 kN。

(3) 钩状结构高度和形状对接头性能有较大影响,由于钩状结构宽度不均匀,当其高度较大时,钩状结构受力不均,薄弱部位易发生断裂导致机械结合失效,而当钩状结构高度较小时,钩状结构宽度差较小,受力较为均匀,机械结合强度较高。

(4) 接头失效主要包括由前进侧钩状结构应力集中引起的机械结合失效,以及由于结合界面和后退侧钩状表面 IMC 层中微裂纹逐渐生长引起的冶金结合失效,最终前进侧钩状结构发生断裂,焊核区结合界面发生脱离,后退侧钩状结构从铝材中拔出。

参 考 文 献

- [1] SIERRA G, PEYRE P, STUART D, et al. Steel to aluminium key-hole laser welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 447(12): 197-208.
- [2] 相倩, 吕念春, 薛鹏, 等. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017(20): 41-50. XIANG Qian, LÜ Nianchun, XUE Peng, et al. Research status and prospect on friction stir welded dissimilar Al-steel joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 28-37.
- [3] KOUADRRI D A. Study of metallurgic and mechanical properties of laser welded heterogeneous joints between DP600 galvanised steel and aluminium 6082[J]. Materials and Design, 2014, 54(10): 184-195.
- [4] 于明润, 赵洪运, 蒋智华, 等. 铝/黄铜异种金属搅拌摩擦焊搭接接头显微组织与力学性能[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 39-45. YU Mingrun, ZHAO Hongyun, JIANG Zhihua, et al. Research on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum/brass dissimilar joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 39-45.
- [5] 林健, 赵海峰, 雷永平, 等. 钢铝搅拌摩擦焊搭接接头的机械结合与冶金结合方式[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 106-112. LIN Jian, ZHAO Haifeng, LEI Yongping, et al. Mechanical and metallurgical bonding in friction stir welding joint of steel-aluminum dissimilar materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 106-112.
- [6] SHEN Z, CHEN Y, HAGHSHEENAS M, et al. Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds[J]. Engineering Science and Technology, 2015, 18(2): 270-277.
- [7] YANG Q, LI X, CHEN K, et al. Effect of tool geometry and process condition on static strength of a magnesium friction stir lap linear weld[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(6): 2463-2478.
- [8] POURALI M, ABDOLLAH-ZADEH A, SAEID T, et al. Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 715: 1-8.
- [9] TANAKA T, MORISHIGE T, HIRATA T. Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys[J]. Scripta

- Materialia, 2009, 61(7): 756-759.
- [10] BOZZI S, HELBERT-ETTER A L, BAUDIN T, et al. Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds[J]. Materials Science & Engineering: A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing), 2010, 527(16-17): 4505-4509.
- [11] WANG T, SIAHAR H, MISHRA R S, et al. Evaluation of intermetallic compound layer at aluminum/steel interface joined by friction stir scribe technology[J]. Materials & Design, 2019, 174: 107795.
- [12] HAGHSHENAS 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.
- [13] 宋友宝, 李龙, 吕金明, 等. 7xxx 系铝合金焊接研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2018(3): 492-501.
SONG Youbao, LI Long, LÜ Jinming, et al. Research status and perspective of 7xxx series aluminum alloys welding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018(3): 492-501.
- [14] SHI L, WU C S, GAO S, et al. Modified constitutive equation for use in modeling the ultrasonic vibration enhanced friction stir welding process[J]. Scripta Materialia, 2016, 119: 21-26.
- [15] SHEPPARD T, JACKSON A. Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys[J]. Metal Science Journal, 1997, 13(3): 203-209.
- [16] MAHDI M, HOSSEIN K A, SHAHRAM K, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded ferrite-martensite DP700 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 737(9): 213-222.
- [17] SUN Z, WU C S. A numerical model of pin thread effect on material flow and heat generation in shear layer during friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 10-21.
- [18] SHI L, WU C S, PADHY G K, et al. Numerical simulation of ultrasonic field and its acoustoplastic influence on friction stir welding[J]. Materials Design, 2016, 104: 102-115.
- [19] AVILA J, GIORJAO R, RODRIGUEZ J, et al. Modeling of thermal cycles and microstructural analysis of pipeline steels processed by friction stir processing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 2611-2618.
- [20] BILAL A, ALEXANDER G, ATHANASIOS T. Advanced numerical modelling of friction stir welded low alloy steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 625-636.
- [21] DAS H, JANA S, PAL T, et al. Numerical and experimental investigation on friction stir lap welding of aluminium to steel[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2014, 19(1): 69-75.
- [22] SHARGHI E, FARZADI A. Simulation of strain rate, material flow, and nugget shape during dissimilar friction stir welding of AA6061 aluminum alloy and Al-Mg₂Si composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 748: 953-960.
- [23] ZHANG Z, CHEN J T, ZHANG Z W, et al. Coupled thermo-mechanical model based comparison of friction stir welding processes of AA2024-T3 in different thicknesses[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(17): 5815-5821.
- [24] WAN L, HHANG Y X. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8): 1781-1811.

作者简介: 于海洋, 男, 1995 年出生。主要从事异种材料连接技术的研究。
E-mail: haiyang_yu188@163.com
胡志力(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。
主要从事汽车轻量化技术的研究。
E-mail: zhilihuhit@163.com