

DOI: 10.3901/JME.2020.06.200

工具尺寸对铝-钢异种金属搅拌摩擦搭接焊 接头组织与性能的影响*

张 敏¹ 相 倩^{2,3} 吕念春³ 薛 鹏¹ 倪丁瑞¹ 马宗义¹

(1. 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心 沈阳 110016;

2. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240;

3. 沈阳理工大学材料科学与工程学院 沈阳 110168)

摘要: 铝合金与钢的异种连接是汽车轻量化制造的关键, 然而采用传统的熔化焊工艺很难得到高质量焊缝。本文选用不同尺寸的焊接工具对 1.2 mm 厚的 5182 铝合金和 DP1180 高强度钢进行搅拌摩擦搭接焊。微观组织分析表明, 在转速为 800 r/min, 焊接速度为 50 mm/min 的参数条件下, 采用两种尺寸的工具均可得到无缺陷的接头, 且小尺寸工具条件下接头生成明显的“Hook”缺陷, 采用大尺寸工具时“Hook”缺陷显著弱化, 此时铝和钢的反应充分, 堆垛层状结构更为明显。由于堆垛层状结构中金属间化合物的存在, 界面附近硬度波动较大, 最高硬度可达 641 HV, 明显高于钢母材。采用小尺寸工具时, 由于搭接面积较小, 接头拉伸剪切性能较差, 全部沿界面开裂; 而采用大尺寸工具时, 当铝合金位于前进侧的条件下接头性能优异, 断裂于铝合金侧, 最大剪切力高达 3.42 kN, 表明对铝-钢异种金属进行搅拌摩擦搭接可获得高质量的焊接效果。

关键词: 搅拌摩擦焊; 异种金属接头; 金属间化合物; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG156

Influence of Tool Size on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Dissimilar Aluminum-steel Joint

ZHANG Min¹ XIANG Qian^{2,3} LÜ Nianchun³ XUE Peng¹ NI Dingrui¹ MA Zongyi¹

(1. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168)

Abstract: Dissimilar joining of Al alloy and steel is a key issue in the lightweight manufacture of the automotive industry, however achieving good weld is very difficult for the traditional fusion welding methods. In this study, 5182 Al alloy and DP1180 high strength steel plates with 1.2 mm in thickness are friction stir lap welded using different tool sizes. Microstructure analysis indicates that defect-free joints are obtained with both tool sizes under a rotation rate of 800 r/min and a welding speed of 50 mm/min. Obvious “Hook” defect forms in the joint with small tool, however it is significantly inhibited while using the big tool, and the stacking layered structure is more obvious due to the sufficient reaction between Al and steel in this case. Hardness values sharply fluctuates near the interface, due to the formation of the intermetallic compounds in the stacking layered structure, and the highest hardness value is 641 HV which is higher than that of the steel base metal. When using the small tool, weak tensile shear properties are obtained with the joints failed along the interface due to the small lap area; however, sound tensile shear properties are obtained with the joints failed at the Al side using the big tool when the Al alloy plate is located at the advancing side, and the shear force is as high as 3.42 kN. This indicates that high quality Al-steel dissimilar lap joint can be successfully obtained by friction stir lap welding.

Key words: friction stir welding; dissimilar joint; intermetallic compound; microstructure; mechanical property

* 国家自然科学基金资助项目(51671190, U1760201)。20191008 收到初稿,
20200210 收到修改稿

0 前言

随着能源短缺和对环境保护的呼声日益高涨,轻量化成为汽车制造领域持续追求的目标。在诸多轻量化材料中,铝合金兼具比强度高和耐腐蚀的优点,且成本较低,成为汽车制造领域主流的轻量化结构材料^[1-2]。而在某些关键承载结构件中,先进高强度钢仍然是首选材料,因此在汽车制造领域势必会涉及到铝合金与钢的异种金属连接问题。然而,铝合金与钢的密度、线膨胀系数等物理性质存在较大差异,且高温条件下易生成大量的脆性金属间化合物(Intermetallic compound, IMC),因此采用传统的熔化焊工艺很难得到高质量焊缝^[3]。

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)为新发展的固相焊接技术,由于具有绿色环保、优质高效、焊接形式多样等优点,在异种金属的连接中引起了广泛的关注^[4-6]。在汽车制造领域,点焊或搭焊是主要的连接形式,因此有许多学者对铝-钢异种金属的搅拌摩擦搭焊(Friction stir lap welding, FSLW)进行了研究^[7-9]。由于钢的强度较高,对于铝-钢的FSLW,通常将铝合金置于上方,避免焊接工具的断裂与减少磨损。WEI等^[10]研究了搅拌针长度对1060铝与SUS321不锈钢FSLW接头强度的影响,结果表明搅拌针少量插入钢板所得到的接头拉伸剪切强度达到89 MPa,高于搅拌针未接触钢板得到的接头强度。

有研究者认为,采用镀锌钢板或者在铝-钢之间加入锌层可以得到良好的冶金结合,有利于提高接头强度^[11]。事实上,铝-钢之间存在化学反应,可以生成多种IMC,因此铝-钢之间直接获得冶金结合是可以实现的,但需要较高的热输入量。由于高温强度优异的焊接工具尺寸一般较小,因此之前的研究者大多采用提高转速来提高热输入,但转速越高,焊核区(Nugget zone, NZ)的塑性变形和搅动作用也越剧烈,“Hook”缺陷容易生成,且铝-钢之间的反应加剧,不利于接头成形。

除提高转速外,加大焊接工具尺寸也是提高热输入的有效方法,而且此时由于尺寸的增加,可以采用成本相对较低的工具材料。本文选取了汽车制造领域中常用的5182铝合金和DP1180高强度钢两种材料作为研究对象,采用两种尺寸的焊接工具,在相同的焊接参数条件下对其进行FSLW研究,主要探讨不同焊接工具尺寸条件下搭接接头界面组织演变及力学性能变化。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文的焊接板材采用1.2 mm厚的5182铝合金和DP1180双相高强度钢,试验板材宽度为80 mm,长度为200 mm,其化学成分如表1所示。使用两种材质不同的搅拌工具,小尺寸的工具采用常用的WC-Co硬质合金材料,轴肩直径为12 mm,搅拌针为柱状无螺纹结构,直径为4 mm,长度为1.2 mm。大尺寸的工具采用高温合金材料,轴肩直径为24 mm,搅拌针为锥形螺纹针结构,根部直径为12 mm,针长为1.3 mm。

表1 母材的化学成分(质量分数) %

材料	Al	Fe	Mg	Mn	Cu	Si
5182	余量	0.23	4.34	0.34	0.09	0.07
DP1180	0.05	余量	—	2.4	0.02	0.60
材料	Cr	S	P	C	Mo	
5182	0.05	—	—	—	—	
DP1180	0.02	0.005	0.01	0.18	0.01	

1.2 试验方法

铝-钢异种金属FSLW在FSW-SLM-020型数控龙门型专用FSW设备上,按照铝板在上方,钢板在下方的位置用夹具进行固定。焊接前首先对待焊铝板和钢板表面进行打磨,再用砂纸去除表面氧化层,最后用无水乙醇清洗表面污染物。

通常,对于铝-钢的FSLW,搅拌针少量插入钢板侧可减弱“Hook”缺陷而且有利于提高工具寿命^[7-10],因此本研究中在焊接时将旋转的搅拌针插入铝板中,直到搅拌针端部插入钢板表面以下0.2 mm。同时参考之前的研究结果^[9, 12],本研究中焊接工具的保压时间选为4 s,采用工具倾角为3°。为排除其他干扰因素,本研究选取中等热输入的焊接参数,焊接过程中均采用工具转速为800 r/min,焊接速度为50 mm/min,采用小尺寸和大尺寸焊接工具时对应样品分别标记为800-50-12S和800-50-24S。在焊接时采用两种方式进行,即铝合金板分别位于后退侧(Retreating side, RS)和前进侧(Advancing side, AS),对应样品分别标记为Al-RS和Al-AS。

接头横截面微观组织样品沿垂直于焊接方向进行电火花切割加工,然后经过400-2000#砂纸研磨后进行机械抛光。采用MEF4A光学显微镜和配备能谱分析仪(Energy dispersive spectroscopy, EDS)的

FEI Quanta 600 扫描电镜(Scanning electron microscopy, SEM)进行接头组织分析观察。

显微硬度测试采用组织观察样品,在 Leco-LM-247AT 显微硬度计上对 FSLW 接头进行硬度测试,沿着横截面焊核的中心位置,由上至下每隔 0.2 mm 打点测试,铝侧加压载荷 1 N,钢侧加压载荷 2 N,保压 15 s。FSLW 接头拉伸样品尺寸及测试示意图如图 1b 所示,垂直于焊接方向取样,试样宽度为 10 mm。在进行拉伸剪切试验时,试样两端加垫板来补偿厚度偏差,拉伸剪切试验采用 SANS-CMT5205 电子万能试验机,测试时横梁位移速率为 1 mm/min。

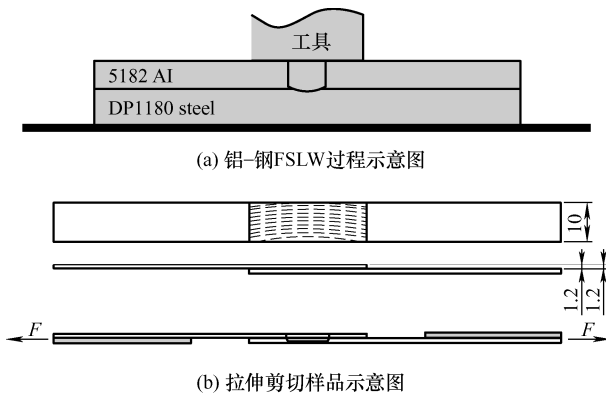


图 1 铝-钢 FSLW 及拉伸剪切样品示意图

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观组织

图 2 所示为铝-钢异种金属 FSLW 接头横截面宏观形貌。采用小尺寸和大尺寸焊接工具时,焊缝均成形良好,无明显孔洞、裂纹等缺陷。从图 2a 可以看出,采用小尺寸焊接工具时,在铝-钢界面处 NZ 底部的边缘部分出现向上突起结构,在 FSLW 中通常把这种结构称为“Hook”缺陷^[13]。然而采用大尺寸焊接工具时未发现明显的“Hook”缺陷,界面比较平直、干净,如图 2b 所示。通常,在 FSLW 过程中,由于搅拌针的剧烈搅拌作用,流动性较好的铝在向下流动的同时将钢挤向两侧,从而在 NZ 底

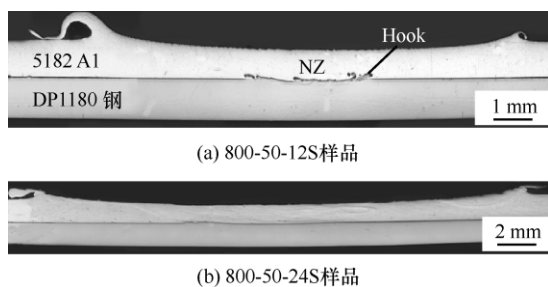


图 2 不同工具尺寸下铝-钢接头的宏观形貌

部形成“Hook”缺陷,尤其是采用小尺寸焊接工具时更为严重。当采用大尺寸焊接工具时,大尺寸的轴肩对 NZ 的影响范围大,而且向下的“锻压”作用增强,因此 NZ 底部向上流动的作用力明显下降,“Hook”缺陷会明显减弱或者消除。

2.2 接头微观组织

图 3 所示为采用小尺寸焊接工具时,800-50-12S 样品的 SEM 形貌。从图 3a 的接头横截面宏观形貌可以看出,NZ 的两侧界面处“Hook”缺陷比较明显,且有少量尺寸较大的钢颗粒被搅入到 NZ,如图 3b 所示。此外,在界面处还可观察到被搅拌针搅起的钢片层组成的堆垛层状结构,但此时由于搅动作用较弱,钢片层之间连接比较紧密,如图 3c 所示。在钢片层与铝基体的界面上可观察到厚度约为 1 μm 的连续 IMC 层,通过图中界面层上 A 点的 EDS 分析得到铝和铁的原子比约为 3:1,如表 2 所示。结合之前的研究报告^[5, 9]以及铝-铁二元相图^[14],可知界面反应产物应该为富铝的 Al_3Fe 相。这是由于界面反应温度远低于钢的熔点,因此富铝的 IMC 相更容易生成。

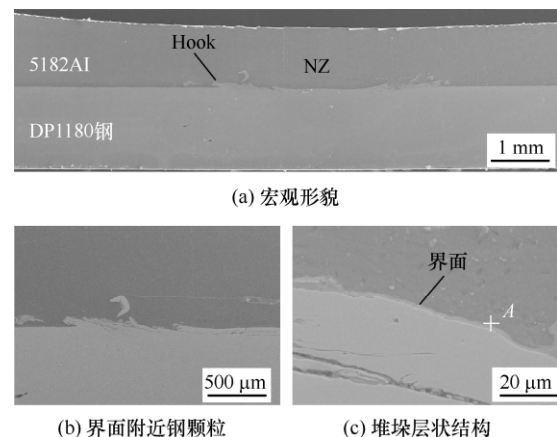


图 3 800-50-12S 样品的 SEM 形貌

表 2 金属间化合物的化学成分(原子分数) %

样品	位置	Al	Fe	总计
800-50-12S	A 点	75.79	24.21	100
	B 点	80.83	19.17	100
800-50-24S	C 点	80.13	19.87	100

图 4 所示为采用大尺寸焊接工具时,800-50-24S 样品的 SEM 形貌。从图 4a 的接头横截面宏观形貌可以看出,虽然搅拌针伸入钢板一侧,但界面处未发现明显的“Hook”缺陷,仅由于搅拌针的挤压作用在 RS 产生非常弱的“Hook”缺陷。此时,仍有少量尺寸较大的钢颗粒被搅入到 NZ,且与铝基体充分混合和反应,形成异种金属 FSLW 中常出现的典

型堆垛层状结构^[9],如图4b所示。此时,钢片层比较细小,片层之间为钢片层与铝基体充分反应生成的IMC,颜色为浅灰色,介于钢和铝基体之间。对图中B点的EDS分析表明,铝和铁的原子比约为4:1,如表2所示。根据铝-铁二元相图,此反应产物也应该为富铝的 Al_3Fe 相^[14],然而由于此IMC在铝基体中分布因此铝元素的含量偏高。除搅入到NZ中的钢颗粒以外,在界面处也可观察到明显的堆垛层状结构,如图4c所示,根据C点的EDS分析可知铝和铁的原子比也为4:1,其结构组成与搅入到NZ中的堆垛层状结构相同。

通过对比800-50-12S和800-50-24S两种接头的组织可以发现,采用小尺寸工具时,虽然可以得到无缺陷的组织,但此时铝和钢之间的反应较弱,而且由于NZ中材料向上的流动作用“Hook”缺陷比较明显;而采用大尺寸工具时,由于热输入量的增加,铝和钢之间的反应更为充分,片层组织之间的IMC更为明显,而且由于大尺寸轴肩的强作用影响,未形成明显的“Hook”缺陷。此外,采用大尺寸工具时,铝与钢之间的搭接区域面积会明显增加,因此更有利于提高接头的力学性能。

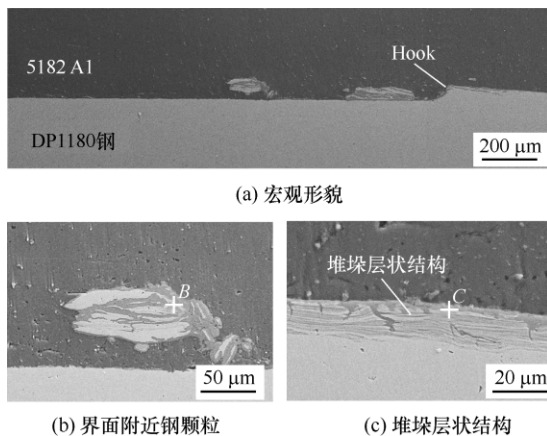


图4 800-50-24S样品横截面的SEM形貌

2.3 接头显微硬度

图5所示为两种接头横截面沿NZ中心线垂直方向的硬度分布曲线。从图中可以看出,由于FSLW过程中的热作用,两种接头的钢侧均呈现出软化现象,最低可降至285 HV,与钢母材(360 HV)相比明显降低。然而,铝侧却呈现出硬度升高的趋势,这是由于NZ发生了动态再结晶,晶粒得到一定程度的细化。更为重要的是,钢颗粒的搅入使铝基体成为颗粒增强的铝基复合材料,强度会大大增强^[6],而800-50-24S样品中由于更多的钢颗粒搅入使得铝基体的硬度增加更为明显,可达到110 HV,远高于铝母材(68 HV)。

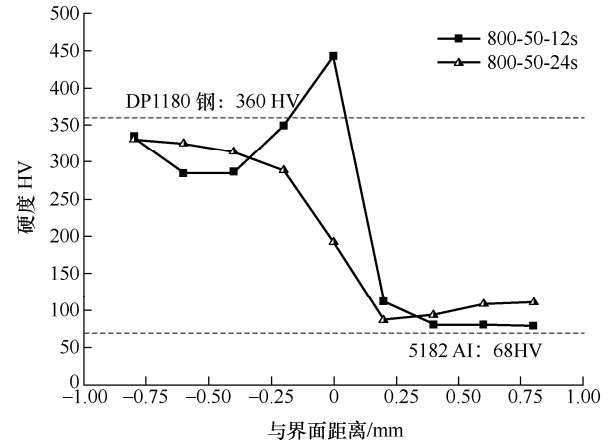


图5 铝-钢FSLW接头硬度曲线分布图

在界面处,硬度波动比较大,而且800-50-12S样品中硬度可高达442 HV,远高于钢母材硬度。通常这是由于界面附近生成的堆垛层状结构中硬脆的IMC相所致^[15]。图6所示为对界面附近堆垛层状结构硬度值的测试,可以看出两种样品中界面附近堆垛层状结构的硬度都高于500 HV,最高可到641 HV。显然,堆垛层状结构中IMC相的生成使得硬度值大大提高。

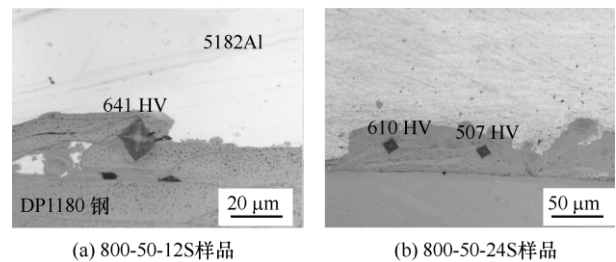


图6 两种样品界面附近的堆垛层状结构及硬度

2.4 接头拉伸剪切性能

对于FSLW接头,在铝合金位置不同(焊接时位于RS或AS)时虽然组织形貌完全相同,但拉伸剪切测试时性能会有所不同^[12]。表3所示为各种FSLW接头拉伸剪切测试性能。可以看出,对于采用小尺寸工具的样品,无论铝合金位于RS还是AS,接头都在界面处开裂,最大剪切力波动较大,最高值仅为2.29 kN。而当采用大尺寸工具时,接头的拉伸剪切性能大大提升,大部分样品断裂于铝合金侧,此时拉伸剪切力波动较小,最高值可达3.42 kN。以铝合金母材的尺寸计算,强度可达到285 MPa,远高于WEI等^[10]的研究结果。然而,在铝合金位于RS时仍有样品断裂在界面处,如图7所示。

图8所示为800-50-12S样品拉伸剪切断裂后表面典型的SEM形貌。从图中可以看出,无论是铝侧还是钢侧,断裂后表面均出现了互相粘连,说明界面处铝、钢之间达到了冶金结合,但由于结合面积

过小, 强度不够, 因此在拉伸剪切力的作用下, 接头沿界面被撕裂拉开导致最终断裂。

表 3 FSLW 接头拉伸剪切性能

样品编号	最大剪切力/kN	断裂位置
800-50-12S (Al-RS)	1.24	界面
	2.21	界面
800-50-12S (Al-AS)	2.29	界面
	1.33	界面
800-50-24S (Al-RS)	3.12	铝侧
	1.84	界面
800-50-24S (Al-AS)	3.39	铝侧
	3.42	铝侧



图 7 800-50-24S 样品拉伸剪切断裂后典型形貌

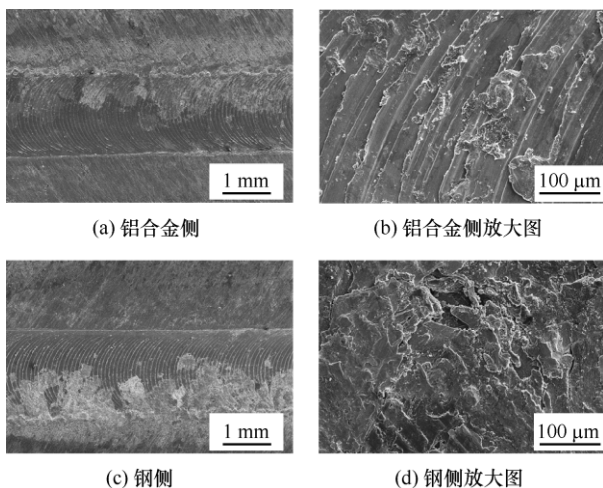
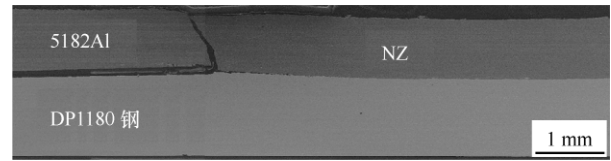


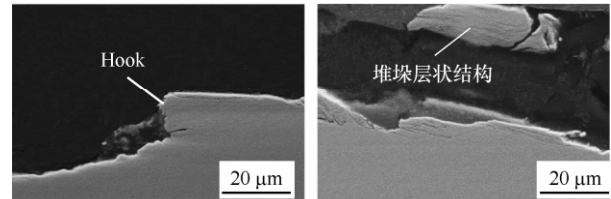
图 8 800-50-12S 样品断裂后表面 SEM 形貌

当采用大尺寸工具时, 由于热输入的提高, 铝与钢之间的冶金结合更为有效, 同时由于搭接面积的增加接合力大大增强, 因此在拉伸剪切测试时样品大多断裂于 NZ 外的铝合金一侧, 如图 9a 所示。然而, 当铝合金位于 RS 时, 虽然此时“Hook”缺陷较弱, 但也会对拉伸剪切性能产生影响, 在强剪

切力作用下也可能在“Hook”缺陷处优先产生裂纹, 然后沿界面扩展导致断裂, 如图 9b 所示。同时, 由于硬脆的 IMC 相存在, 堆垛层状结构更有利于裂纹的快速扩展, 如图 9c 所示。



(a) 铝合金位于前进侧样品



(b) 铝合金位于后退侧样品

(c) 铝合金位于后退侧样品界面处

图 9 800-50-24S 样品断裂后 SEM 形貌

通过以上的研究可以发现, 对于铝-钢的异种金属 FSLW, 工具尺寸对接头组织性能影响非常大。采用大尺寸的工具不仅成本可以降低, 而且有利于消除或减弱“Hook”缺陷, 铝与钢之间的反应充分, 冶金结合更为有效, 同时增加了搭接面积, 接头拉伸剪切性能明显提高。因此, 本文为铝-钢异种金属的焊接提供了一种非常有效的焊接工艺。

3 结论

本文对 1.2 mm 厚的 5182 铝合金和 DP1180 双相高强钢进行搅拌摩擦搭接, 重点研究了两种尺寸的焊接工具对接头组织与性能的影响, 得出如下主要结论。

(1) 采用两种尺寸的工具均可得到无缺陷的接头, 小尺寸工具条件下“Hook”缺陷比较明显, 大尺寸工具条件下铝和钢反应更为充分, 形成明显的堆垛层状结构。

(2) 由于热输入的影响, FSLW 接头钢侧的硬度降低, 而铝侧硬度与铝母材相比升高, 且大尺寸工具下升高更为明显, 可高达 110 HV。界面附近则由于堆垛层状结构的存在硬度波动很大, 最高可达 641 HV。

(3) 采用小尺寸工具时, 在拉伸剪切测试过程中接头全部沿界面开裂; 而采用大尺寸工具, 铝合金位于 RS 时由于“Hook”缺陷的影响, 仍有接头沿界面开裂, 而铝合金位于 AS 的接头断裂在铝侧, 最大剪切力高达 3.42 kN。

参 考 文 献

- [1] BENED Y K J C. Light metals in automotive applications[J]. *Light Metal Age*, 2000, 10(1): 34-35.
- [2] 龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(6): 27-35.
LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(6): 27-35.
- [3] OZAKI H, KUTSUNA M, NAKAGAWA S, et al. Laser roll welding of dissimilar metal joint of zinc coated steel to aluminum alloy[J]. *Journal of Laser Applications*, 2010, 22(1): 1-6.
- [4] 薛鹏, 张星星, 吴利辉, 等. 搅拌摩擦焊接与加工研究进展[J]. *金属学报*, 2016, 52(10): 1222-1238.
XUE Peng, ZHANG Xingxing, WU Lihui, et al. Research progress on friction stir welding and processing[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(10): 1222-1238.
- [5] DEBROY T, BHADSHIA H K D H. Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(4): 266-270.
- [6] XUE P, XIAO B L, NI D R, et al. Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(21-22): 5723-5727.
- [7] 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): 23-29.
HUANG Yongxian, HUANG Tifang, WAN Long, et al. Research progress of dissimilar friction stir welding between aluminium and steel[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2018, 10(1): 23-29.
- [8] 张桂源, 鄯新哲, 宫文彪, 等. 钢铝异种材料搅拌摩擦焊界面组织及性能[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(5): 159-164.
ZHANG Guiyuan, QIE Xinzhe, GONG Wenbiao, et al. Microstructure and properties of friction stir welding interface of steel and aluminum dissimilar materials[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018, 39(5): 159-164.
- [9] 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*, 2015, 51(6): 45-54.
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*, 2015, 51(6): 45-54.
- [10] WEI Y N, LI J Y, XIONG J T, et al. Effect of tool pin insertion depth on friction stir lap welding of aluminum to stainless steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(10): 3005-3013.
- [11] 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.
- [12] XUE P, XIAO B L, WANG D, et al. Achieving high property friction stir welded aluminium/copper lap joint at low heat input[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(8): 657-661.
- [13] KIMAPNG K, WATANABE T. Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(4): 835-841.
- [14] MASSALSKI T B. Binary alloy phase diagrams[M]. New York: ASM International, 1990.
- [15] ELREFAEY A, TAKAHASHI M, IKEUCHI K. Friction-stir-welded lap joint of aluminum to zinc-coated steel[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2010, 23(2): 186-193.

作者简介: 张敏, 女, 1997年出生。主要研究方向为异种金属的搅拌摩擦焊接。

E-mail: mzhang18s@imr.ac.cn

薛鹏(通信作者), 男, 1984年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为搅拌摩擦焊接与加工、超细晶材料的制备及力学行为。

E-mail: pxue@imr.ac.cn