

# ABS 塑料与 6082 铝合金搅拌摩擦点焊工艺及机理

王希靖, 王小龙, 张忠科, 邓向斌

(兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部级国家重点试验室, 兰州 730050)

**摘 要:** 针对 2 mm 厚的 ABS 塑料板和 6082-T6 铝合金进行搅拌摩擦点焊可焊性试验, 并将成形较好的试件的横截面的形貌进行了观察分析, 并对其进行力学性能的测试. 结果表明, 将铝合金板放在上, 塑料板放在下的搭接方式可以实现良好的连接; 最优工艺参数为搅拌头旋转速度为 400 r/min, 焊接时间为 30 s, 所得焊接接头的抗拉剪载荷最大为 3.31 kN; 点焊接头有两种断裂模式.

**关键词:** ABS 塑料; 6082 铝合金; 搅拌摩擦点焊; 力学性能

**中图分类号:** TG 456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)04-0107-04

## 0 序 言

随着汽车工业的发展, 轻量化成为了汽车工业的重大挑战. 塑料以其重量轻、设计空间大、制造成本低、性能优异而得到广泛应用. 铝及铝合金是目前应用最广的有色金属, 具有密度小、比强度高、耐腐蚀和导热导电性好的优点<sup>[1]</sup>. 所以如何使两者实现优质的连接来满足制品使用性能的要求, 同时还要操作比较简单已成为一个关键性的问题, 因此如何将其连接就显得尤为重要.

作为连结方法, 除了粘接<sup>[2-4]</sup>, 焊接技术在工业界、研究界也已得到越来越广泛的重视<sup>[5-7]</sup>. 搅拌摩擦点焊是在搅拌摩擦焊基础上研究开发的一种固相焊接新技术, 可以形成搭接的点焊接头, 具有很高的应用价值和研究意义<sup>[8]</sup>. Liu 等人<sup>[9]</sup>通过对铝合金 AA6061 和 MC 尼龙-6 进行摩擦搭接焊, Yusof 等人<sup>[10]</sup>利用搅拌摩擦点焊对 A5052 铝合金和 PET 塑料进行焊接, 均发现在结合界面上观察到的小气泡产生的高压对界面间的连接十分有利, 都获得了优质的焊接接头.

## 1 试验方法

试验材料选用 2 mm 厚的 6082-T6 铝合金和 ABS 塑料板, 几何尺寸均为 150 mm × 50 mm, 采用由高温合金制成的无搅拌针的搅拌头, 其中轴肩的直径为 27 mm. 焊接时, 将铝合金板置于塑料板上方, 无针搅拌头端面与工件表面紧密接触, 在旋转的过

程中, 无针搅拌头的轴肩与铝合金板所产生的摩擦热传导至塑料板, 使得塑料的局部发生熔化, 并且在轴肩的压力下熔化状态的塑料紧紧连接在铝合金的下表面上, 从而完成整个焊接过程. 焊接试验在 FSW-3LM-015 型搅拌摩擦焊机上完成, 并研究工艺参数对焊接接头成形的影响, 其中最主要的工艺参数为搅拌头的旋转速度、焊接时间. 在轴肩下压量为 0.3 mm 且保持不变的基础上, 利用这些工艺参数进行了试焊, 对成形及连接质量情况较好的试样进行接头表面及横截面的宏观分析和力学性能测试及断裂方式的研究, 同时还利用扫描电镜对点焊接头的横截面形貌进行观察及分析.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊接接头成形情况的分析

在搅拌头旋转速度较低时, 轴肩所产生的摩擦热比较少, 不能使铝合金达到超塑性状态, 仅出现了软化现象, 在焊接的过程中, 由于轴肩与铝合金表面的摩擦力较大, 因而接头表面十分粗糙. 随着旋转速度的增大, 摩擦热也逐渐增多, 在焊接过程中铝合金能够迅速达到塑化状态, 从而表面光滑, 成形良好. 在铝合金与塑料板的焊接中, 由于铝合金的导热率较高, 摩擦热的多少决定塑料板的熔化量, 在很大程度上影响两种材料之间的连接面积. 焊接时间固定为 30 s, 旋转速度为 100 r/min 时产生的热量不足以使塑料板发生熔化, 故在该参数下两种材料之间未焊合; 旋转速度为 200 r/min 产生的摩擦热虽然不能使铝合金达到塑化状态, 但传递至塑料板的热量可使轴肩正下方的区域的塑料板发生熔化进而将

两者连接在一起,因此,接头表面很粗糙(图 1a);旋转速度为 300 r/min 时的情况与 200 r/min 时的类似,但由于产生的摩擦热较多,接头表面成形较好(图 1b);旋转速度为 400 r/min 时接头表面光滑平整,无毛刺(图 1c);但是,在旋转速度为 500 r/min 时产生的摩擦热过多致使经铝合金板传至塑料板使其的迅速熔化而大量外溢,导致其厚度小于 2 mm,在下压量固定的条件下,轴肩与铝合金表面局部脱离,塑化金属不能均匀分布,致使表面较粗糙(图 1d)。

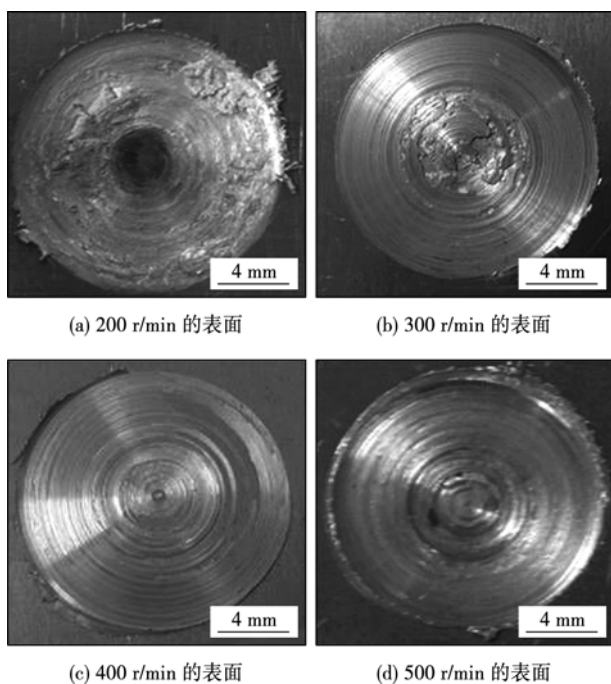


图 1 不同旋转速度下的焊点形貌

Fig. 1 Shaping of welding joint with different rotation speeds

若将搅拌头的旋转速度固定为 400 r/min,在焊接时间为 10, 20 s 时上板与下板均不能充分的连接,并且接头表面均在不同程度上较粗糙,分别如图 2a,图 2b,而在停留时间为 40 s 时溶化的塑料大量外溢,也出现了塑料板减薄的现象,接头表面较粗糙,如图 2c。

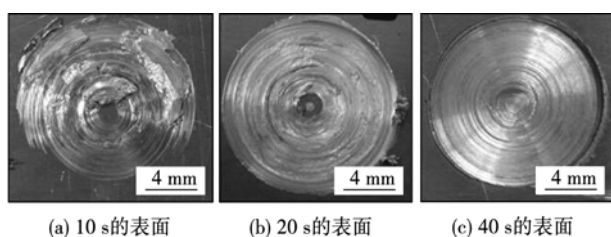


图 2 不同焊接时间下的焊点表面形貌

Fig. 2 Shaping of welding joint with different welding time

## 2.2 点焊接头横截面宏观形貌及分析

在焊接时间为 30 s,不同旋转速度下的焊接接头的横截面形貌如图 3 所示,其中图 3a 为 300 r/min 时的横截面,横截面两端还有一些缝隙,这说明在该参数下部分区域未焊合,图 3b 为 400 r/min 时的横截面,铝板呈现弯曲状,且两端塑料板略有减薄,这是由于在焊接过程中产生的摩擦热在横向上传导比较快,塑料板两端的温度迅速熔化,少量塑料外溢,导致铝板两端失去支撑力,在轴肩的压力下铝板变弯,图 3c 为 500 r/min 时的横截面,由于产生的摩擦热太多,接头区域附近的塑料全部熔化,部分软化后的铝板压入塑料板中,导致塑料板减薄很严重。

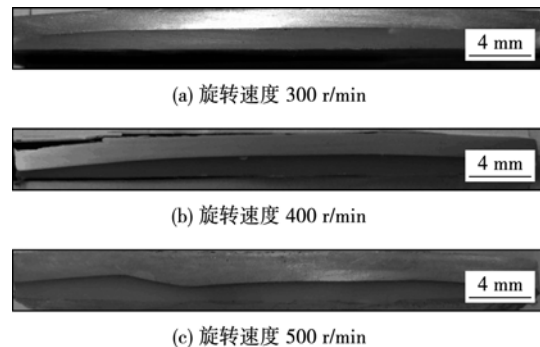


图 3 接头横截面的宏观形貌

Fig. 3 Cross-section macrostructure of joint

由于 ABS 塑料在高于 270 ℃ 时便会分解成碳氢化合物和二氧化碳、一氧化碳等气体。在焊接的过程中产生的摩擦热足以使少量的塑料分子在达到熔融态后发生分解,但是少量的气泡被软化的铝合金板和熔融的塑料包覆住而不能溢出。在轴肩压力作用下,这些小气泡处成为了结合界面上的高压点,将熔融态的塑料压入到铝合金板的下表面上,在轴肩离开接头表面后熔融态的塑料迅速凝固,使两种材料紧密的连接在了一起,并且滞留的少量气泡并不影响焊接接头的质量。

对图 3b 中的接头横截面在扫描电镜下进行观察分析,发现在铝合金板和塑料板的界面之间有一条很窄的再固化层,如图 4a。在摩擦点焊过程中,塑料板的局部经历了熔化后在凝固所形成的一个很窄的区域就是再固化层。这是由于轴肩产生的摩擦热穿过铝合金板材传递到塑料板上的温度到达熔点时,塑料板局部熔化,熔融态的塑料与软化了的铝合金板下表面在轴肩压力作用下,除了机械连接外,还发生了浸润现象,在轴肩离开焊件表面时,液态的塑料迅速凝固,形成了很强的附着力,使得塑料板粘附在了铝合金板的下表面上,实现了铝合金和塑料之

间优质的连接. 所谓浸润现象,就是在摩擦热和气泡产生的高压作用下压入到铝板下表面的塑料分子有向周围扩展的趋势的现象. 对该区域的一部分进一步在能谱仪上进行面分布分析,如图4b,发现在再固化层和铝合金板的下表面的界面上犬牙交错状,说明两种材料之间实现了机械连接. 除此之外,在再固化层中,很明显含有少量的Al元素,如图4c,也含有部分的碳元素,如图4d.

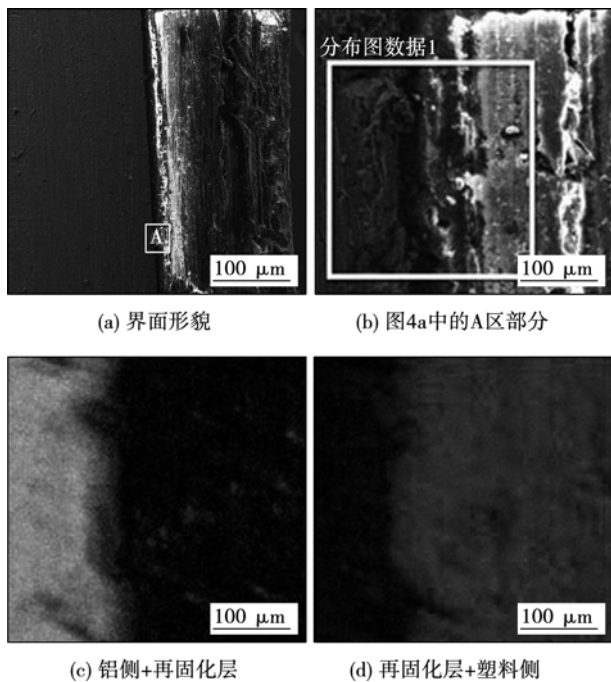


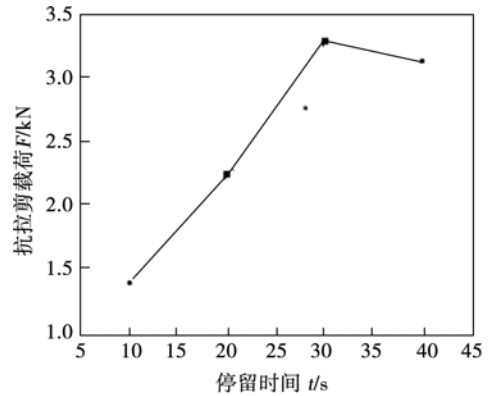
图4 接头横截面的微观形貌

Fig. 4 Cross-section microscopic of joint

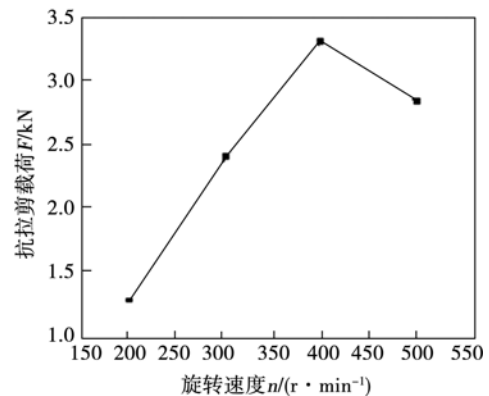
### 2.3 工艺参数对焊接接头力学性能的影响

搅拌头旋转速度固定,其停留时间对点焊接头的影响如图5a所示,可以发现,随着停留时间的增长接头抗拉剪载荷增大. 因为停留时间越长,在摩擦过程中所产生的热量越多,塑料的熔化量越大,两种材料的连接面积增大,载荷随之增大. 超过一定的范围后,抗拉剪载荷有略微下降的迹象,这是由于虽然连接界面已达最大,但摩擦热过多致使部分融化的塑料外溢,使得塑料板减薄. 在停留时间为40 s时,接头的抗拉剪载荷为3.15 kN,略低于停留时间为30 s的抗拉剪切载荷. 搅拌头停留时间固定,其旋转速度对点焊接头的抗拉剪载荷的影响,如图5b所示,可以看出,抗拉剪载荷随着旋转速度的增大呈现出先增大后减小的趋势. 随着摩擦热的增多,上下板间的连接面积的增大,抗拉剪载荷增大,但旋转速度过高时,摩擦热过多将会导致塑料板外溢减薄. 在旋转速度为500 r/min时,接头的抗拉剪载荷由于

这一原因而降低. 由此可知,焊接的最优工艺参数为,旋转速度400 r/min、停留时间30 s,在该参数下接头抗拉剪载荷为3.31 kN.



(a) 停留时间-抗拉剪载荷的关系



(b) 旋转速度-抗拉剪载荷的关系

图5 工艺参数对抗拉剪载荷的影响

Fig. 5 Process parameters under influence of shear load

### 2.4 接头断裂方式的研究

在测试铝合金和塑料板摩擦点焊焊接头抗拉剪性能的过程中,发现接头有两种断裂模式. 一种是从离接头很远的塑料板上发生断裂,塑料板在经过一定的塑性变形后瞬间脆断,这种断裂模式为主要断裂模式,如图6a所示;另一种是从上板与下板连接处的根部断裂,如图6b所示,这是由于在焊接过程中塑料熔化过快而变薄,成为点焊试件的薄弱环节,在拉剪过程中应力集中很严重,因而成为断裂部位,这种断裂模式较少见. 这也说明接头强度高于

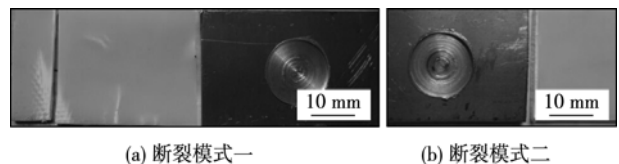


图6 搅拌摩擦点焊接头的断裂形式

Fig. 6 Fracture mode of FSSW joint

塑料板的强度.

### 3 结 论

(1) 利用搅拌摩擦点焊的方法,在选取适当工艺参数的条件下,就可以实现塑料与铝合金之间的优质连接,获得良好的焊接接头.

(2) 塑料板与铝合金板的焊接过程中,在搅拌头产生的摩擦热和轴肩压力的共同作用下,两种材料之间除了机械连接外,还在两板的界面之间发生浸润现象,形成了再固化层,使塑料粘附在了铝合金板上.

(3) 无论是焊接时间还是旋转速度,焊接接头的抗拉剪载荷均随着它们的增大而呈现出先增大后减小的趋势,且焊接质量的优劣主要取决于焊接过程中产生的摩擦热的多少.

(4) 焊接接头的断裂方式有两种,从离接头较远的塑料板上断裂的情况较多,从焊接接头根部的塑料板上断裂的情况较少. 接头强度高于塑料板的强度.

### 参考文献:

- [1] 李永斌, 李亚庭. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 45-51.  
Li Yongbing, Li Yating. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 45-51.
- [2] Dorn Lutz, Moniatis Georgios. Effects of joining component material and adhesive on the strength behaviour of plastics-to-metal adhesive-bonded joints[J]. Welding and Cutting, 1990, 42(3): 50-52.
- [3] Liu Liming, Xie Long. Adhesive bonding between Mg alloys and polypropylene[J]. Materials Technology, 2007, 22(2): 76-100.
- [4] Flock Dustin, Haberstroh Edmund, Bobzin Kirsten. Ultrasonic welding of hybrid metal-plastic components with flame spraying of adhesion layer[J]. Journal of Plastics Technology, 2011, 25(5): 160-177.
- [5] 张宗波, 王晓东, 罗 怡. 超声波塑料焊接机理[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 29-32.  
Zhang Zhongbo, Wang Xiaodong, Luo Yi. Ultrasonic welding mechanism of thermoplastics and its thermal process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 29-32.
- [6] 龚 飞, 胡席远, 谭 赞. 热塑性塑料 PP 半导体激光焊接工艺[J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 109-112.  
Gong Fei, Hu Xiyuan, Tan Yun. Semiconductor laser transmission welding of thermoplastic polypropylene[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 109-112.
- [7] 王 霄, 杨 昆, 张惠中. 两种不同热塑性塑料之间的激光透射焊接试验[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 97-100.  
Wang Xiao, Yang Kun, Zhang Huizhong. Experiment research on laser transmission welding of two different thermoplastics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 97-100.
- [8] Spinella D J, Brockenbrough. Trends in aluminum resistance spot welding for the automotive industry[J]. Welding Journal, 2005, 84(1): 34-40.
- [9] Liu F C, Liao J, Nakata K. Joining of metal to plastic using friction lap welding[J]. Materials and Design, 2014, 54(2): 236-244.
- [10] Yusof F, Miyashita Y, Seo N, et al. Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate[J]. Science Technology Weld Join 2012, 17(7): 544-559.

**作者简介:** 王希靖,男,1956 年出生,教授,博士研究生导师. 主要从事焊接设备及其自动化、搅拌摩擦焊技术及焊接质量控制方面的研究工作. 发表论文 120 余篇. Email: wangxj@lut.cn