

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.13

结构胶对铝合金电阻点焊工艺的影响研究

王胜林, 张成庆, 刘杰, 秦浩深, 陈云

重庆赛力斯新能源汽车设计院有限公司, 重庆 401135

摘要: 为解决汽车轻量化趋势下铝合金点焊的气孔、裂纹等缺陷, 系统探讨了结构胶对电阻点焊工艺参数及接头力学性能的影响机制。通过 SORPAS 数值模拟软件构建铝合金搭接模型 (0.9 mm+1.5 mm), 预测了焊接工艺窗口 (电流 25.5~38.4 kA, 压力 3~5 kN, 时间 60~120 ms), 并优化推荐胶焊最佳参数为电流 36.5 kA、压力 4.85 kN、时间 74 ms。基于正交试验设计, 结合拉伸剪切测试与熔核直径分析, 揭示了焊接参数对力学性能的敏感性规律: 电流>压力>时间。试验数据表明, 胶焊接头拉剪强度达 10.86 kN, 较传统点焊接头 (3.65 kN) 提升 297%, 且失效模式呈现双峰特征, 表现为胶层断裂后焊点承载的渐进失效过程。通过多元回归建模, 建立了拉剪强度与焊接参数的定量关系 ($R^2=0.907$), 验证试验显示预测值 (3.86 kN) 与实测值 (3.47~4.31 kN) 均在 95% 预测区间 (3.255~4.506 kN)。研究证明, 结构胶通过增加界面电阻与塑性环稳定性, 显著抑制飞溅缺陷, 在 38 kA、5 kN、60 ms 的参数组合下可实现熔核直径 7.31 mm 与最大拉剪强度 3.87 kN。

关键词: 铝合金; 胶焊接头; 机械性能; 数值模拟; 回归分析

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0124-10

Effect of Structural Adhesive on the Bonding Resistance Spot Welding Process of Aluminum Alloy

WANG Shenglin, ZHANG Chengqing, LIU Jie, QIN Haoshen, CHEN Yun

Chongqing Selis New Energy Vehicle Design Institute Co., Ltd., Chongqing 401135, China

Abstract: To address the issues of porosity and cracks in aluminum alloy spot welding under the trend of automobile weight reduction, this study systematically investigates the impact mechanism of structural adhesive on resistance spot welding process parameters and joint mechanical properties. Through the SORPAS numerical simulation software, an aluminum alloy lap model (0.9 mm+1.5 mm) was constructed. The welding process window was predicted to be a current of 25.5-38.4 kA, pressure of 3-5 kN, and time of 60-120 ms. The optimal parameters for adhesive welding were recommended as a current of 36.5 kA, pressure of 4.85 kN, and time of 74 ms. Based on orthogonal experimental design, combined with tensile shear testing and nugget diameter analysis, the sensitivity order of welding parameters to mechanical properties was revealed: current>pressure>time. Experimental data showed that the tensile shear strength of the adhesive welded joint reached 10.86 kN, an increase of 297% compared to traditional spot welded joints (3.65 kN). The failure mode exhibited bimodal characteristics, manifesting as a progressive failure process after the adhesive layer ruptured. Through multiple regression modeling, a quantitative relationship between tensile shear strength and welding parameters was established ($R^2=0.907$). Validation tests showed that the predicted value (3.86 kN) was within the 95% prediction interval (3.255-4.506 kN) of the actual measured values (3.47-4.31 kN). The research proves that the structural adhesive, by increasing interface resistance and stability of the plastic ring, significantly suppresses spatter defects. A nugget diameter of 7.31 mm and the maximum tensile shear strength of 3.87 kN can be achieved under the parameter combination of 38 kA, 5 kN, and 60 ms.

Keywords: aluminum alloy; welded joint; mechanical properties; analogue simulation; regression analysis

引用格式: 王胜林, 张成庆, 刘杰, 等. 结构胶对铝合金电阻点焊工艺的影响研究[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 124-133.

收稿日期: 2024-06-25 修回日期: 2024-08-19

作者简介: 王胜林(1983—), 男, 学士, 工程师, 主要从事白车身智能制造技术研究。E-mail: 282838788@qq.com。

Citation:WANG Shenglin, ZHANG Chengqing, LIU Jie, et al. Effect of Structural Adhesive on the Bonding Resistance Spot Welding Process of Aluminum Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 124–133.

0 引言

随着汽车工业技术的发展,国家节能环保政策的推进,汽车材料向轻量化、节能化和高性能方向发展,以铝合金材料替代传统钢铁汽车制造的技术相当成熟,铝制车身相比钢铁结构车身轻40%以上^[1],铝合金材料替代钢铁车身减重效果显著,与传统的钢制车身对比,铝合金具有低密度、耐腐蚀、强度高特点,铝合金车身逐渐得到广泛应用^[1]。由于铝合金材料具有导热性好、导电率高、焊接时易发生合金反应,电阻点焊在铝合金材料的连接中易产生气孔、裂纹、孔洞等缺陷^[3]。为了改善点焊接头性能的可靠性、提高点焊结构的疲劳性能,产生了胶焊工艺^[6],即将电阻点焊和胶接结合起来的胶接点焊工艺,胶焊工艺结合了两种连接技术的优势,改善了电阻点焊密封性差、应力集中以及胶接的抗剥落能力差等缺点,关于胶接和胶焊接头力学性能研究,国内外目前已经取得一些研究成果,王健强等^[8]对接接头、点焊接头和胶焊接头进行了仿真与拉剪力试验。

本文拟以铝合金5182组合搭接为研究对象,研究点焊接头与胶焊接头力学性能差异,利用SORPAS^[11]电阻焊模拟仿真软件获取可焊性窗口,通过试片试验收集数据及分析,创建回归方程找出 y (拉伸剪强度)与 x (焊接参数)之间的关系,计算出最佳组合的焊接参数预测值,并进行试验验证所创建的回归模型是否显著有效。

1 胶焊应用技术介绍

1.1 结构胶及粘接原理介绍

车身用增韧性结构胶是由环氧树脂、填料、助剂等组成的材料,可用于连接各种金属部件之间的连接,亦可用于异种材料部件的连接,结构胶具有十分突出的增韧改性、耐腐蚀、耐高温、耐潮湿及耐久性强技术特点^[12],能够为车身结构件提供优异的连接和支撑性能,使整车更加牢固,增强整车的舒

适性和品质,同时还能有效降低车内噪音和震动^[13]。

结构胶是一种化学与物理的连接技术,粘接原理主要有化学反应型和物理作用型两种。化学反应型是将结构胶涂在粘接材料表面后,通过固化反应形成化学键使材料紧固连接,这种反应型结构胶适用于高强度连接的应用场合,例如用于车身镀锌钢板、铝合金的胶焊连接;物理作用型是指微观下基体表面是粗糙的,结构胶的复合物能够通过基体表面微细孔隙渗入基体表面下方,引起物理和化学作用,结构胶与材料表面形成一层锁定结构从而获得强大的力学连接,亦称之为机械锁定型^[14]。

1.2 结构胶电阻点焊应用

结构胶电阻点焊是指先将结构胶涂抹在待焊件上随板件一起进行点焊,结构胶能够渗入板件表面微细孔隙,最后到涂装烘烤固化,引起物理和化学反应而获得强度力学性能。该种方式要求结构胶黏度适中,粘度(50℃)30~50 Pa·s,黏度过大导致排胶困难焊接异常,黏度太小导致流挂^[15]。

胶焊工艺在汽车车身制造过程中主要应用于镀锌钢板、铝合金的连接,同时,结构胶在异种材料的连接上应用潜力很大,可以实现现有连接工艺无法完成的异种材料的连接。

2 SORPAS仿真

2.1 点焊仿真

2.1.1 点焊仿真设计

不涂抹结构胶进行电阻点焊,选择指定优化仿真,输入材料牌号、厚度、板材叠放顺序、电极帽规格、焊机、焊接压力和焊接脉冲,软件就能自动模拟可焊区间和推荐最优的焊接参数。

SORPAS输入指定参数如下:

(1)材料的牌号。选用车身最具代表性的5系5182为研究对象。

(2)叠放顺序。薄板位于上层正电极,厚板位于下层负电极(如图1所示试片接头叠放)。

(3)材料厚度。选取0.9 mm和1.5 mm搭接组

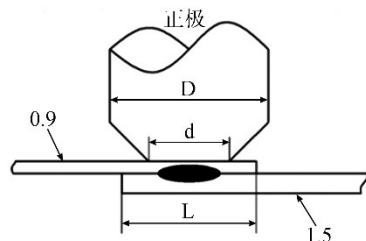


图1 试片叠放示意

Fig. 1 Schematic diagram of stacking test pieces

合,搭接长度 L 为20 mm;

(4)指定焊接压力为4.5 kN,焊接时间120 ms。

(5)电极选型。电极帽端面直径 $d=10$ mm,电极帽材质为铬钴铜。

(6)设备选型。焊接控制器为中频直流,冷却方式为水冷,流量16 L/min,水冷温度为20℃。

(7)焊核直径要求。铝金板焊接最小焊核尺寸要求遵 $d_{\min}=4\sqrt{T_{\text{GMT}}}$, T_{GMT} 搭接总板厚为2.4 mm,即最小焊核直径 $d_{\min}\approx 6.0$ mm。

2.1.2 点焊 SORPAS 指定优化仿真输出报告分析

(1)点焊指定优化输出工况信息如图2所示。

a. 电极规格,端面直径 $\varnothing 10$,材料铬钴铜。

b. 焊件规格:铝合金5182的成分Al95.2Mn0.35Mg4.5,厚度为0.9 mm和1.5 mm,涂层性质无涂层。

c. 焊机类型:直流控制器,最大电流60 kA,最大功率170 kVA,最大压力20 kN。

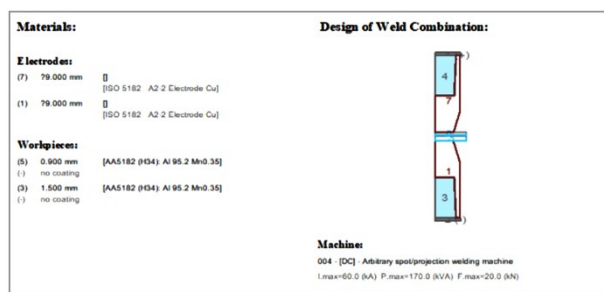


图2 点焊仿真的工况信息

Fig. 2 Working condition information of spot welding simulation

(2)点焊仿真焊核增长曲线分析。

指定优化计算模拟的结果如图3所示,最小焊核直径要求不低于6.0 mm,推荐可焊接电流窗口30.4~36.0 kA;电流小于30.4 kA时焊核小于6.0 mm,电流大于36.0 kA产生焊接飞溅。

在指定焊接时间 $T=120$ ms、焊接压力 $F=4.5$ kN时,SOPARS模拟计算推荐最优焊接焊接电流 $I=$

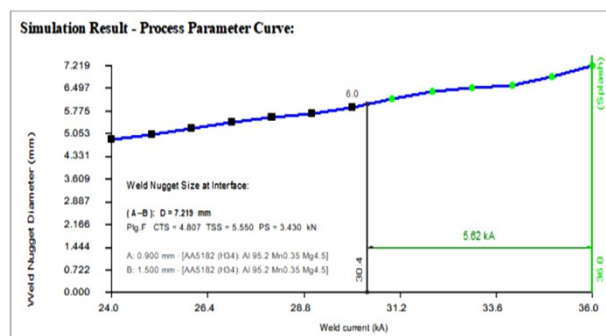


图3 焊核增长曲线

Fig. 3 Growth curve of welding core

36.0 kA,熔核直径7.213 mm,拉伸剪切力3.43 kN。

2.2 胶焊仿真

2.2.1 胶焊仿真设计

胶焊是指涂抹结构胶进行电阻点焊,选择自动优化,自动优化是指输入材料牌号、厚度、叠放顺序、电极帽规格及焊机,软件就能自动计算出焊点的可焊窗口和推荐最优的焊接参数,SORPAS输入设定参数如下:

(1)材料的牌号,选用车身最具代表性的5系5182为研究对象。

(2)叠放顺序,薄板位于上层正电极,厚板位于下层负电极。

(3)材料厚度,选取0.9 mm和1.5 mm搭接组合,搭接长度 L 为20 mm(见图1)。

(4)电极选型,电极帽端面直径选取 $d=10$ mm,电极帽材质为铬钴铜;

(5)设备选型。焊接控制器为中频直流,冷却方式为水冷,流量16.0 L/min,水冷温度为20℃。

2.2.2 胶焊 SORPAS 自动优化仿真输出报告分析

(1)胶焊 SORPAS 仿真输出的工况信息如图4所示。

a. 电极规格:端面直径 $\varnothing 10$,材料铬钴铜。

b. 焊件规格:铝合金5182的成分Al95.2Mn0.35Mg4.5,厚度为0.9 mm和1.5 mm,涂层性质无涂层。

c. 结构胶设置,焊前初始厚度3.0 mm的结构胶,电极压合胶层厚度0.2 mm。

d. 焊机类型:直流控制器,最大电流60.0 kA,最大功率170 kVA,最大压力20.0 kN。

(2)胶焊仿真分析。

SORPAS模拟仿真自动优化推荐可焊电流窗口

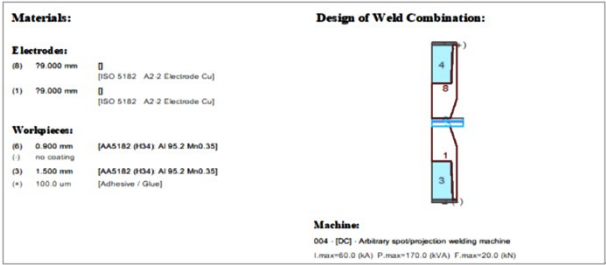


图 4 胶焊仿真的工况信息

Fig. 4 Working condition information of the adhesive welding

如图 5 所示,可焊电流窗口 25.5~38.4 kA,其焊核直径为 5.20~7.83 mm。推荐最优焊接组合参数:焊接电流 36.5 kA,焊接压力 4.85 kN,焊接时间 74 ms,脉冲数 1,保持时间 60 ms,焊核直径 7.31 mm、拉伸剪切力 3.456 kN。当电流小于 25.5 kA 时焊核过小,电流大于 38.4 kA 时会有焊接飞溅产生。

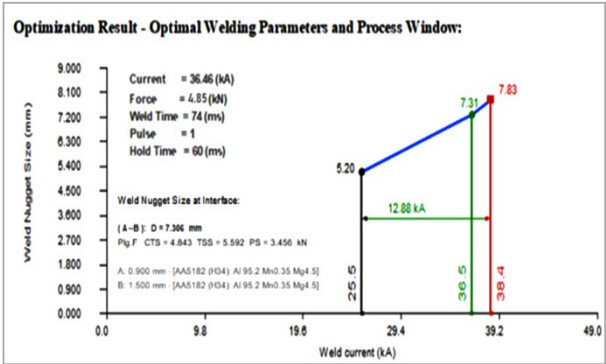


图 5 胶焊可焊电流窗口

Fig. 5 Weldable current window of the adhesive welding

自动优化结果如图 6 所示,电流峰值 36.5 kA,焊接压力 4.85 kN,焊接时间 74 ms,预压时间 40 ms,脉冲数 1,保持时间 60 ms,最大功率 36.5 kVA。焊接窗口如图 7 所示,焊接压力取 3~5 kN。

3 结构胶对点焊工艺影响

3.1 试验过程及数据整理

3.1.1 试验设备及材料

(1)试验采用大功率中频直流焊机、一体化焊钳及剪切拉伸测试设备(如表 1 所示),电极帽为铬锆铜,试片表面不进行物理或化学处理,仅做清洁度处理,目的是保持与现场生产一致,为避免铝点焊大电流带来的强磁性对焊接影响,试片夹持选用非导磁性材料。

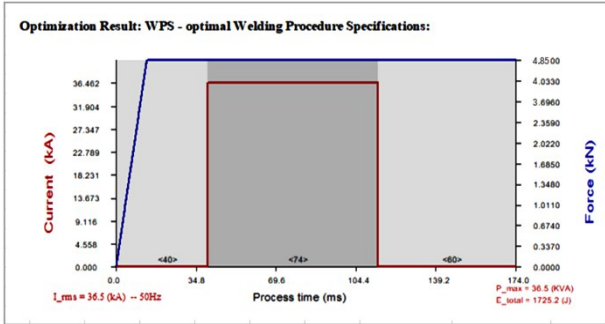


图 6 优化工艺参数

Fig. 6 Diagram of optimized process parameters

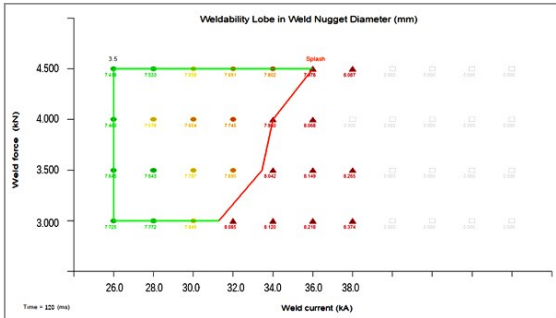


图 7 焊接窗口报告

Fig. 7 Welding window report

表 1 焊接设备及拉伸测试设备

Table 1 Welding equipment and tensile testing equipment

设备名称	设备型号	品牌
控制器中频直流	SMF2-2400R	普电
手工铝点焊枪	PWR01853-118	普电
电子拉力万能试验机	WDW-10H	力领试验机
固化烤箱	YGCH-G-30	宏成

(2)结构胶选用均业新材生产的 3318G 环氧树脂结构胶,结构胶性能如表 2 所示。

表 2 3318G 结构胶性能参数

Table 2 Performance parameters of 3318G structural adhesive

性能	描述
状态	粘度(50 °C): 30~50 Pa·s
剪切强度	>25 MPa
剥离强度	>200 N/25 mm
延伸率	>10%
固化方式	热固性
弹性模量	>1 400 MPa
固化温度、时间	155~190 °C, 30 min

(3)铝合金材料选用 5182 铝合金(JK-5000-S-O),其性能如表 3 所示。

3.1.2 试验方案设计

(1)为研究结构胶对铝点焊接头力学性能的影响

表3 铝合金材料性能参数

Table 3 Performance parameters of aluminum alloy			
厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
0.9/1.5	≥80	≥175	≥15

响,以及对胶焊焊接工艺参数影响程度。将试验分为两组,一组不涂结构胶,一组涂长度 35 mm、直径 3.0 mm 结构胶,涂胶时先使用干净棉布将试片擦拭干净,再将试片划线以保证各试片涂胶位置的一致性,以尽量减少试验组间带来的试验误差,使用手动胶枪进行涂胶,结构胶涂抹好后将试片按图 8 要求示进行搭接压合装。点焊和胶焊采用相同的焊接参数进行焊接,通过试验结果来分析结构胶对电阻点焊工艺参数的影响及力学性能,拉伸试验速度为 15 mm/min。

(2)依据 SORPAS 模拟仿真优化的可焊窗口参数进行试验,可焊电流窗口为 25.5~38.4 kA,焊接压力窗口 3.0~35.0 kN,可焊时间窗口 60~120 ms,脉冲数 1,保持时间 60 ms。

(3)SORPAS 仿真推荐的胶焊最优组合焊接参数,焊接电流 36.5 kA,焊接压力 4.85 kN,焊接时间 74 ms,脉冲数 1,保持时间 60 ms。

(4)依据 SORPAS 仿真设定部分恒定焊接参数,预压时间 40 ms,保持时间 40 ms,预热时间 40 ms,预热电流 10 kA,冷却时间 20 ms,1 个脉冲。

(5)影响铝合金焊接质量的因素很复杂,主要选取焊接电流、焊接压力、焊接时间 3 个因子进行 2 水平试验,另加 3 个中心点,因子水平如表 4 所示。

表4 因素水平表

Table 4 Factor level table			
水平	A 焊接电流/kA	B 焊接压力/kN	C 焊接时间/ms
低	25	3	60
中心点	31.5	4	90
高	38	5	120

(6)试片为 100 mm×40 mm,搭接面为 20 mm×40 mm,试片接头及拉伸测试夹持如图 8 所示。

(7)运用 Minitab 创建焊接因子试验设计计划表,如表 5 所示。

3.1.3 试验结果与分析

(1)点焊和胶焊拉伸载荷。

依据 GB/T7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定》进行试片的制备和测试,将胶焊试片在温

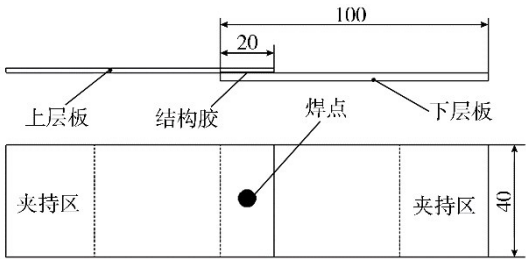


图8 试片接头及拉伸夹持测试示意

Fig. 8 Schematic diagram of test piece joint and stretch clamp test

表5 因子试验设计计划表

Table 5 Factorial experimental design schedule								
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
标准序	运行序	中心点	区组	A 电流	B 压力	C 时间	d/mm	F/kN
7	1	1	1	25.0	5.0	120		
5	2	1	1	25.0	3.0	120		
4	3	1	1	38.0	5.0	60		
3	4	1	1	25.0	5.0	60		
9	5	0	1	31.5	4.0	90		
8	6	1	1	38.0	5.0	120		
1	7	1	1	25.0	3.0	60		
11	8	0	1	31.5	4.0	90		
2	9	1	1	38.0	3.0	60		
10	10	0	1	31.5	4.0	90		
6	11	1	1	38.0	3.0	120		

度为 160 ℃的烘箱中固化 30 min 后取出,常温放置 12 h 然后进行拉伸剪切强度测试,得到点焊、胶焊载荷-位移曲线图,如图 9 所示点焊、胶焊载荷-位移曲线图,曲线图显示点焊拉伸剪切力的峰值 3.65 kN,而胶焊拉伸剪切力的峰值 10.86 kN,可得到胶焊接头的结构胶抗拉强度远大于点焊接头强度。

由图 9 可知,点焊接头拉剪载荷达到峰值后受力位移立即下降,说明点焊接头“脆性”很显著,即点焊达峰值载荷后接头立刻失效,疲劳寿命与耐冲击性能较差。胶焊接头拉伸载荷-位移曲线有双峰性,胶焊接头在到达峰值载荷后受力位移有所缓降,此阶段主要为结构胶受力或点焊接头只受部分拉剪力,随着受力位移剧降,此时结构胶完全失效;受力位移来到第二峰值,此时为点焊接头受拉剪力,该过程与点焊接头载荷-位移曲线失效形态基本一致。对比点焊与胶焊的载荷-位移曲线,从过程分析认为胶焊接头的拉剪失效首先是结构胶层的断裂,而后位移剧降来到第二峰值时焊点完成受力,最后胶焊接头完全失效。胶焊接头相比点焊接

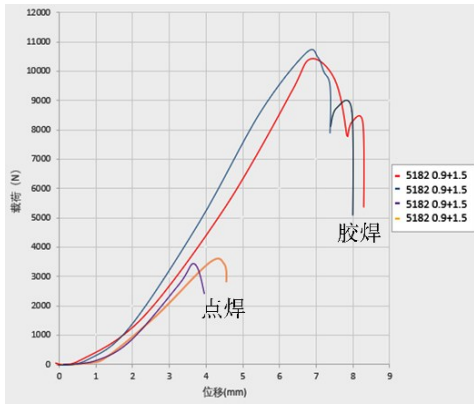


图 9 点焊、胶焊载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of spot welding and adhesive welding

头有着更优良的拉伸强度与延伸率。

试验观察发现,点焊接头疲劳裂纹首先产生于点焊热影响区边缘,裂纹扩展方向基本垂直于拉伸载荷方向;胶焊接头的疲劳破坏先发生在焊点热影响区边缘胶层的断裂,然后焊点热影响区边缘裂纹持续扩散最终完成失效,如图 10 所示。

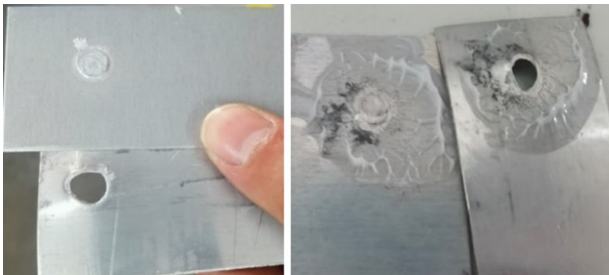


图 10 点焊、胶焊接头断裂

Fig. 10 Tensile shear of spot welding joint and adhesive welding joint

(2)胶焊试验结果与分析。

按试验运行序进行实验,并记录测试数据如表 6 所示,记录的数据熔核直径 d 及拉伸剪切力 F 。因要判断焊接参数对焊点的影响,结构胶固化后接头受力主要由结构胶承担,这对焊点强度判断不够显著,故不对结构胶固化而直接进行拉伸剪切试验得到拉伸力 F 。

多元回归模型建立,单个相应变量 y 对于多个自变量 x 的回归问题称作多元回归,回归方程如式 (1) 所示:

$$y=a+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_kx_k$$
 (1)

建立拉伸剪切力 F 与焊接电流、焊接时间、焊接压力的回归模型。

a. 第一步:拟合选定模型,使用 Minitab 建立回

表 6 胶焊试验结果

Table 6 Results of the adhesive welding

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
标准序	运行序	中心点	区组	A 电流	B 压力	C 时间	d/mm	F/kN
7	1	1	1	25.0	5.0	120	4.0	1.735
5	2	1	1	25.0	3.0	120	5.4	2.530
4	3	1	1	38.0	5.0	60	7.2	3.866
3	4	1	1	25.0	5.0	60	5.0	3.034
9	5	0	1	31.5	4.0	90	5.5	2.526
8	6	1	1	38.0	5.0	120	7.9	2.497
1	7	1	1	25.0	3.0	60	5.4	2.577
11	8	0	1	31.5	4.0	90	6.0	2.892
2	9	1	1	38.0	3.0	60	6.4	3.287
10	10	0	1	31.5	4.0	90	5.5	2.935
6	11	1	1	38.0	3.0	120	8.0	3.846

归模型,经过逐步筛查删除不显著交互效应 A*B 和 A*C 得到的回归模型如图 11 所示。

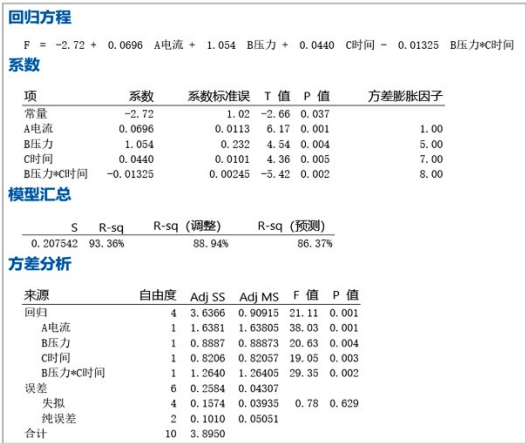


图 11 回归模型

Fig. 11 Regression model

由图 11 分析回归方程总的显著性检验结果,由于 P 值 $=0.001 < \alpha=0.05$,说明在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,所选定的线性回归方程总效果显著。从单个因子效应检验看:主效应 A(电流)、B(压力)、C(时间)及交互效应 B*C(压力*时间)对应的 P 值都小于 0.05,因此判断效应显著。结合 Adj MS 值可知焊接参数对拉伸强度敏感度:A 电流>B 压力>C 时间。

失拟 P 值为 0.629 大于 0.05,说明对响应变量强度的拟合没有明显失拟。

b. 第二步:进行残差诊断,四合一的残差图如图 12 所示。

①观测顺序的散点图中各点是随机地在水平轴上下无规则波动,无显著的升降趋势,因此正常

(见图12右下)。

②观察残差的正态性检验图(见图12左上),残差图符合正态分布。P值为0.736大于0.05,所以残差可以被认为服从正态分布。

③观察残差对于相应变量拟合值的散点图(见图12右上),未有漏斗或喇叭形,因此是正常的。

④观察残差对于各自变量的散点图如图13所示,均无弯曲趋势,各自变量散点图都正常。

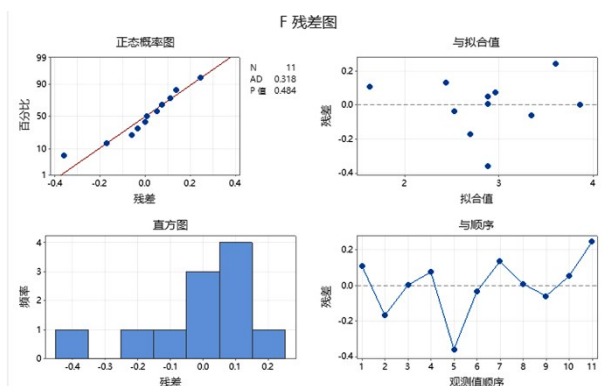


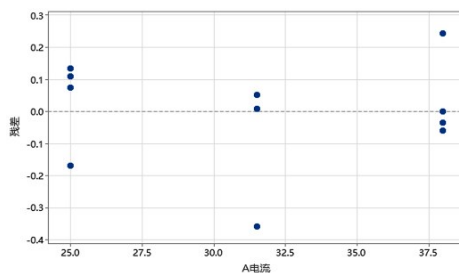
图12 残差四合一图

Fig. 12 Residual four-in-one diagram

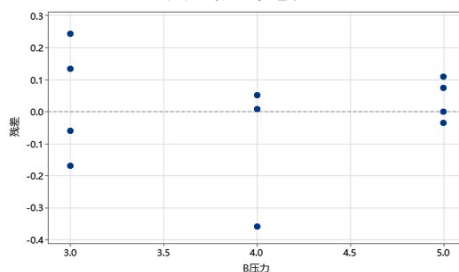
c. 第三步,对选定模型进行分析,输出各因子的胶焊拉伸剪切力主效应图如图14所示,胶焊拉伸剪切力交互效应图如图15所示。

由图14可以看出,因子A(电流)、B(压力)和C(时间)对于相应变量拉伸剪切力的影响确实显著,当A(电流)从25.0 kA增加到38.0 kA时,F值变化一直增大,变化曲率在三者中最大,说明电流对F值影响程度最大;当B(压力)从3.0 kN增加到5.0 kN时,F值先变大后趋于缓慢上升,这是因为胶层使板间电阻不稳定,逐渐增大电极压力使胶尽量排开,从而使焊接更稳定,减少内飞溅,如图11所示试片拉伸撕裂所看到的黑色物质为内部飞溅,当电极压力达到上界值继续加大压力对胶焊接头拉伸力影响减弱;当C(时间)从60 ms增加到120 ms时,F值先减小后缓慢减小,这是由于胶焊的电阻热随时间增加而增大使得熔核生长突破塑性环,从而产生内飞溅使拉伸剪切力性能受破坏。

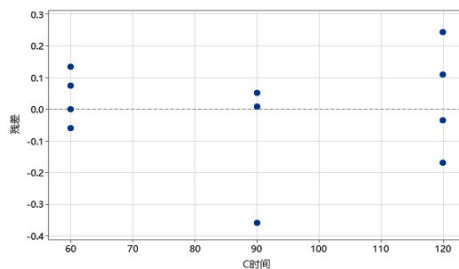
由图15中因子B(压力)与因子C(时间)的交互作用对F值影响显著(两条线相交),而A(电流)与B(压力)、A(电流)与C(时间)交互效应对于F值的影响确实不显著,因为它们之间的两条线几乎平行。



(a)残差与电流



(b)残差与压力



(c)残差与时间

图13 残差对各自变量的散点图

Fig. 13 Scatter plot of residuals against the respective variables

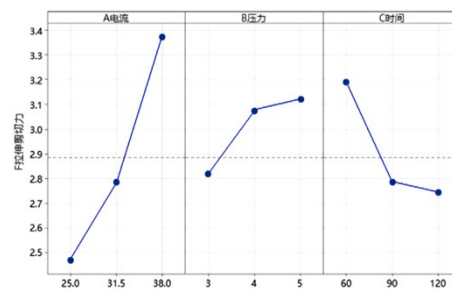


图14 胶焊拉伸剪切力主效应图

Fig. 14 Main effect diagram of tensile shear force of the adhesive welding

d. 第四步:实现最优化的响应变化优化器输出结果(见图16),在实际生产中要求F值越大越好,因此选择最佳的因子水平组合,优化目标是属于望大型。当因子A(电流)取38 kA,B(压力)取5 kN,C(时间)取60 ms时,会使F拉伸剪切力达到最大值3.865 kN,位于95%预测区域(3.255,4.506)内。

(3)点焊试验结果与分析。

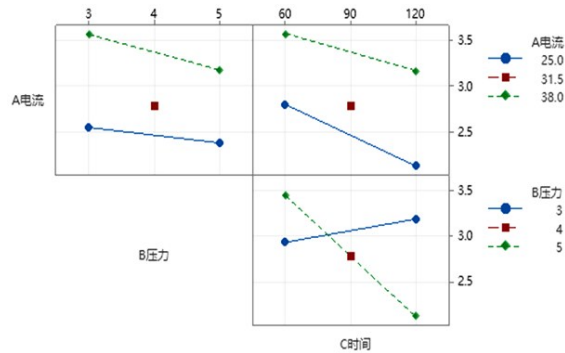


图 15 胶焊拉伸剪切力交互效应图

Fig. 15 Interaction effect of tensile shear force of the adhesive welding

多响应预测

变量 设置

A电流 38
B压力 5
C时间 60

响应 拟合值 拟合值标准误 95% 置信区间 95% 预测区间
F 3.865 0.160 (3.475, 4.255) (3.225, 4.506)

图 16 响应变量优化器输出结果

Fig. 16 Output result of response variable optimizer

点焊试验结果如表 7 所示。

按胶焊多元回归步骤进行分析,如图 17、图 18 所示。方差分析 P 值=0.002< α =0.05,所选定的线性回归方程总效果显著。从单个因子效应检验看:主效应 A(电流)、B(压力)、C(时间)及交互效应 A*B(电流*压力)分别对应的 P 值都小于 0.05,因此判断效应显著。

表 7 点焊试验结果

Table 7 Test results of spot welding

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
标准序	运行序	中心点	区组	A 电流	B 压力	C 时间	d/mm	F/kN
7	1	1	1	25.0	5.0	120	6.1	3.358
5	2	1	1	25.0	3.0	120	7.3	4.367
4	3	1	1	38.0	5.0	60	7.7	4.378
3	4	1	1	25.0	5.0	60	5.4	3.225
9	5	0	1	31.5	4.0	90	5.9	3.047
8	6	1	1	38.0	5.0	120	8.7	3.663
1	7	1	1	25.0	3.0	60	5.7	3.741
11	8	0	1	31.5	4.0	90	6.2	3.086
2	9	1	1	38.0	3.0	60	7.8	3.373
10	10	0	1	31.5	4.0	90	7.0	3.106
6	11	1	1	38.0	3.0	120	8.6	2.707

3.1.4 点焊和胶焊熔核、拉剪力比对分析

依据胶焊试验结果及点焊试验结果(见表 6、表 7),绘制点焊和胶焊熔核、拉剪力对比图,如图 19

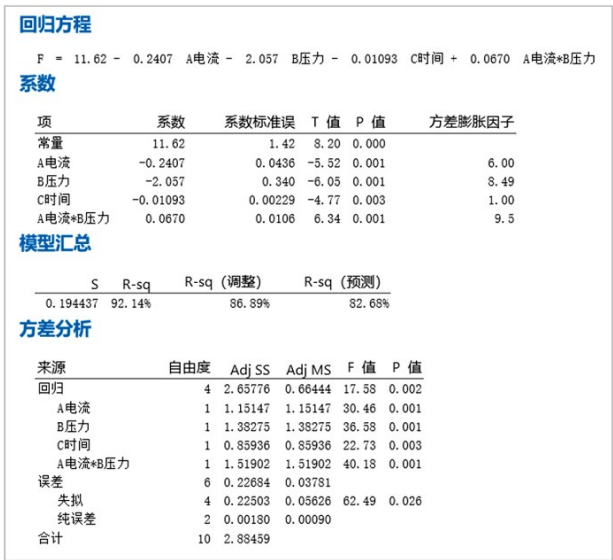


图 17 回归模型

Fig. 17 Regression model

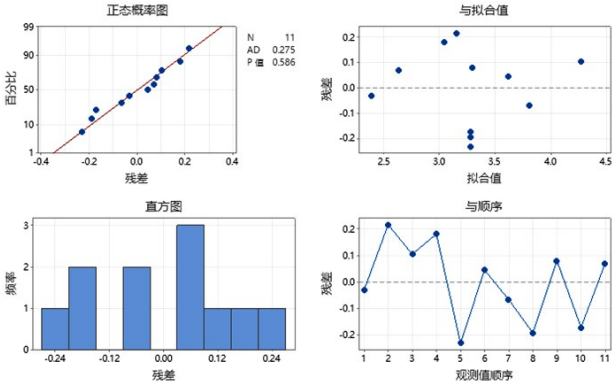


图 18 残差四合一图

Fig. 18 Residual four-in-one diagram

所示。

点焊和胶焊在同等工况和相同的焊接工艺参数下试验,胶焊的结构胶未烘烤固化直接进行拉伸剪切测试获得的熔核直径及拉伸力,从图 19a 熔核直径比可知,点焊比胶焊熔核直径大,随着电流的逐渐增加,点焊、胶焊熔核直径成线性增大。从图 19b 拉伸剪切力比对可知,在小电流参数下点焊拉伸剪切力较大,随着电流增大,在大电流下胶焊的拉伸剪切力大于点焊。

对于点焊和胶焊在电流由小到大的焊接参数变化下,熔核直径及拉伸剪切力呈现有规律的变化,这是因为铝合金导热性高、散热性快,在小电流下点焊电阻热约等于熔核散热,电阻热能有效地使钣金熔合;而对于胶焊板件接触界面间存在薄层的

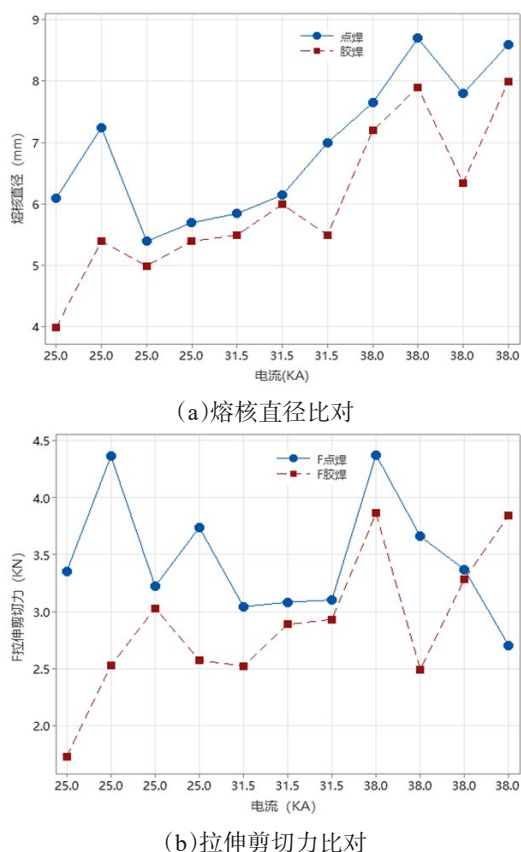


图19 点焊和胶焊熔核、拉伸力比对

结构胶(0.1~0.2 mm),这增加了接触电阻,小电流下胶焊产生电阻热未能使钣金形成熔核。在大电流下点焊的电阻热增大使得熔核生长突破了塑形环而产生飞溅,同时熔核产生“脆性”,从而影响点焊力学性能;而对于胶焊则需要较大的电阻热来使熔核生长,同时接触界面的结构胶层在较大的电极压力条件下,能形成更好塑形环防止飞溅产生,有利于获得更好的力学性能。

3.2 回归方程试验验证

为验证所建立的胶焊回归方程模型的正确性,利用响应变量优化器确定的最优组合胶焊参数,即因子A(电流)取38 kA,B(压力)取5 kN,C(时间)取60 ms时,将最优胶焊焊接参数带入回归方程如式(2)所示:

$$F = -2.72 + 0.0696A + 1.054B + 0.0440C - 0.01325B \times C \quad (2)$$

将最优组合参数带入回归方程(2),计算得到拉剪力 $F=3.859$ kN。

对回归方程计算所得的最优拉剪力进行试验

验证,以验证最优组合焊接参数能获得预期的最佳F值,在最优组合参数 $A=38$ kA, $B=5$ kN, $C=60$ ms时,重复做3次试验,胶焊接头未做烘烤固化处理,试验结果记录如表7所示。

表8 胶焊拉伸强度的试验值与回归值对比

Table 8 Comparison of test values and regression values of tensile strength of welding

试验编号	试验值拉伸剪切力/kN	回归方程最大拉伸剪切力/kN	95%预测区间
1	3.466		
2	4.311	3.865(见图13)	3.225~4.506
3	3.402		(见图13)

由表8的胶焊拉伸强度测试结构来看,3次测试值均落入95%预测区间,说明回归模型正确,预测结果可信。

4 结论

本研究系统地探究了结构胶对铝合金电阻点焊工艺参数和接头力学性能的影响机制,得出以下结论:

(1)利用SORPAS模拟仿真预测了铝合金点焊工艺窗口,并通过试验验证了仿真结果的可靠性。胶焊工艺参数(电流、压力、时间)对熔核直径和拉伸剪切力均有显著影响,且影响程度依次为:电流>压力>时间。

(2)结构胶通过增加界面电阻和塑性环稳定性,显著抑制飞溅缺陷,提高接头质量。胶焊接头相比传统点焊接头,拉伸剪切强度提升297%,且失效模式呈现双峰特征,表现为胶层断裂后焊点承载的渐进失效过程,具有更好的疲劳寿命和抗冲击性能。

(3)基于正交试验数据,建立了拉伸剪切强度与焊接参数之间的定量关系模型($R^2=0.907$)。回归模型预测的最优焊接参数组合为:电流38 kA、压力5 kN、时间60 ms,试验验证结果显示预测值与实测值均在95%预测区间内,模型预测结果可靠。

(4)未来可深入研究结构胶种类、性能等因素对胶焊工艺和接头性能的影响。探索结构胶与其他连接技术的复合应用,拓展其在汽车轻量化领域的应用范围。

参考文献:

- [1] 苏彦芳. 铝材料在汽车轻量化中的应用分析[J]. 汽车测试报告, 2023(09):88-90.
SU Y F. Application analysis of aluminum materials in automotive lightweighting [J]. Car Test Report, 2023 (09):88-90.
- [2] Czerwinski F. Current Trends in Automotive Lightweighting Strategies and Materials[J]. Materials, 2021, 14(21):6631-6658.
- [3] 钟丽慧, 韩立军, 郭院波. 车身铝板电阻点焊技术发展趋势与分析[J]. 电焊机, 2020, 50(06):1-9.
ZHONG L H, HAN L J, GUO Y B. Analysis and development of aluminum alloy resistance spot welding technology for car body [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(06):1-9.
- [4] 刘腊腊, 刘翥寰, 史涛, 等. 异种铝合金电阻点焊接头的组织及性能[J]. 焊接, 2020(05):53-56+64.
LIU L L, LIU Z H, SHI T, et al. Microstructure and properties of resistance spot welded joint of dissimilar aluminum alloys [J]. Welding & Joining, 2020 (05): 53-56+64.
- [5] 王浩, 刘坤, 李洁, 等. 铝合金焊接凝固裂纹及焊材抗裂性的研究进展[J]. 机械工程学报, 2024, 60(12): 207-219.
WANG H, LIU K, LI J, et al. Research Progress on Solidification Cracking of Aluminum Alloy During Welding and Crack Resistance of Filler Materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(12):207-219.
- [6] 杨金秀, 杨武, 范建军, 等. 车用结构胶在白车身轻量化设计中的应用[J]. 中国胶粘剂, 2020, 29(08):49-52+57.
YANG J X, YANG W, FAN J J, et al. Application of vehicle structural adhesive in lightweight design of car body-in-white [J]. China Adhesives, 2020, 29 (08): 49-52+57.
- [7] 王健强, 李岩, 顾延巩, 等. 结构胶对铝合金电阻点焊动态电阻影响分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11):144-146.
WANG J Q, LI Y, GU Y G, et al. Effect of Structural Adhesive on the Dynamic Resistance in the Resistance Spot Welding [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(11):144-146.
- [8] 王健强, 袁波, 钱让发, 等. 铝合金胶接电阻点焊工艺研究与优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15):133-135.
WANG J Q, YUAN B, QIAN R F, et al. Research and Optimization of Bonding Resistance Spot Welding Process of Aluminum Alloy [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15):133-135.
- [9] 李伟平, 曾凯, 邢保英, 等. 胶接点焊接头断裂失效过程的仿真分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(02):113-117.
LI W P, ZENG K, XING B Y, et al. Simulation analysis of fracture failure process of spot weld-bonded joint [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(02):113-117.
- [10] 闫雪燕, 杨文叶, 李振兴, 等. 胶焊连接力学性能的影响因素研究[J]. 汽车零部件, 2023(04):75-78.
YAN X Y, YANG W Y, LI Z X, et al. Research on the Influencing Factors of Weld-bonding Joints Mechanical Properties [J]. Automobile Parts, 2023(04):75-78.
- [11] 赵阳, 熊庆华, 马闯. 电阻焊仿真 SORPAS 在国内的应用[J]. 电焊机, 2013, 43(2):72-78.
ZHAO Y, XIONG Q H, MA C. SORPAS applications in China [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43 (2): 72-78.
- [12] 王玉勤, 徐伟杰. 高强度高粘型改性韧性环氧树脂性能研究[J]. 粘接, 2022, 49(05):18-22.
WANG Y Q, XU W J. Study on properties of toughened epoxy resin with high strength and high bonding [J]. Adhesion, 2022, 49(05):18-22.
- [13] 韦春萍, 韦超忠, 魏嘉丰, 等. 韧性环氧树脂结构胶在汽车上的应用[J]. 北京汽车, 2021(01):49-51+55.
WEI C P, WEI C Z, WEI J F, et al. Application of Ductile Epoxy Resin Structure Adhesive in Automobile [J]. Beijing Automotive Engineering, 2021(01):49-51+55.
- [14] 王红雨. 胶接结构热力学耦合环境下力学性能研究[D]. 辽宁:大连理工大学, 2019.
WANG H Y. Experimental study on the mechanical property of bonded joints subjected to combined thermal and constant loading [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2019.
- [15] 周奇智. 汽车用焊装胶的黏度特性在施工性与贮存稳定性中的影响[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(04):137-140.
ZHOU Q Z. Effect of Viscosity Characteristics of Automotive Welding Adhesive on Construction and Storage Stability [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(04):137-140.