工艺优化设计

76

汽车车身 6061 铝合金电阻点焊工艺优化

王卫生¹,李镇康²,甘贵生³,丁星宇³

(1. 重庆平伟科技(集团)有限公司,重庆 400026; 2. 工业和信息化部电子第5 研究所,广州 510610;
 3. 重庆理工大学 材料科学与工程学院,重庆 400054)

摘要:目的 优化 6061 铝合金电阻点焊工艺参数。方法 采用正交实验对 2 mm 厚 6061 铝合金 薄板进行对接,并进行了方差分析和性能测试。结果 当选取方差最优方案,即电流 22 kA、电极 压力 0.15 MPa、焊接时间 15 个周波这组焊接参数时,接头抗拉力为 5.444 kN,较正交实验最大值 提高了 25.5%。而选取电流 22 kA、电极压力 0.20 MPa、焊接时间 11 个周波的焊接参数时,接头抗 拉力最大,为 6.262 kN,较正交实验最大值提高了 44.35%。结论 6061 铝合金最佳焊接参数为: 电流 22 kA、电极压力 0.20 MPa、焊接时间 11 个周波。

关键词: 6061 铝合金; 正交实验; 电阻点焊; 优化

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.06.012

中图分类号: TG443 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2015)06-0076-05

Optimization of Spot Welding for 6061 Al Alloy in Automotive Body

WANG Wei-sheng¹, LI Zhen-kang², GAN Gui-sheng³, DING Xing-yu³

(1. Chongqing Pingwei Technology (Group) Co., Ltd, Chongqing 400026, China;

2. The Fifth Electronics Research Institute of Ministry and Information Technology, Guangzhou 510610, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to optimize the parameters of spot welding of 6061 Al alloy. Spot welding of 6061 Al alloy of 2 mm thickness were carried out by orthogonal experiment, the analysis of variance and the performance test were conducted. The optimal scheme of variance was the current of 22 kA, the electrode pressure of 0. 15 MPa and the welding time of 15 frequencies. The maximum tensile force of joints under the optimal scheme of variance was 5.444 kN, increased by 25.5% compared with the maximum tensile force in the orthogonal experiment. The optimum parameters of spot welding for 6061Al alloy was the current of 22 kA, the electrode pressure of 0.20 MPa and the welding time of 11 frequencies. Under these parameters, the tensile strength of joints was 6.262 kN, increased by 44.35% compared with the maximum tensile force in the orthogonal experiment.

KEY WORDS: 6061 Al alloy; orthogonal experiment; resistance spot welding; optimization

在汽车轻量化进程中,铝合金由于具有比强度高、 耐腐蚀以及可回收再利用成本低等特点,在汽车工业 中具有广泛的应用前景^[1-2]。6061 铝合金是一种具有 中等强度、良好的抗腐蚀性和可焊接性的 6000 系铝合 金,其薄壁轧制板材被广泛用于汽车车体的薄壁结构 制造中^[2-6]。德国奥迪车总部(ILGOSTADT)已有铝合 金车身的生产制造,各国汽车行业也开展了铝合金电 阻焊接技术研究^[7-15]。国内对于 6061 铝合金薄壁件

收稿日期: 2015-09-10

基金项目:重庆市教委/科技研究一般项目(KJ130813)

作者简介:王卫生(1981—),男,江苏徐州人,工程师,主要从事先进连接技术方面的研究。

电阻点焊方面的研究还不是很深入,因而文中针对 6061 铝合金2 mm 薄板进行搭接,通过正交实验,采用 不同的工艺参数进行点焊实验,并对点焊接头进行性 能测试,进而优化得到最佳的电阻电焊工艺。

1 实验

实验所用的 6061 铝合金成分中除 Al 元素外,Si, Fe,Gu,Mn,Mg,Zn,Ti,Al 元素的质量分数分别为 0.4%~0.8%,0.7%,0.15%~0.40%,0.15%, 0.8%~0.12%,0.25%,0.15%,试样的规格均为 60 mm×20 mm×2 mm。一组(H组)用浓盐酸腐蚀 1 min 后用水冲洗,再用 5% NaOH 清洗 30 s 后用水清洗, 迅速晾干后置于真空中保存待用;另一组(G 组)采用 8% NaOH 腐蚀 6 min 后用水清洗,再用稀的硝酸腐 蚀 1 min 后水洗,迅速晾干后置于真空中保存待用。

采用 YR-A05GM2 型交流电阻点焊机进行点焊, 电极材料选用铬锆铜合金(GuGrZr),电极采用直径 8 mm 的圆锥台型电极。H 组 6061 铝合金采用表 1 所 示焊接参数,3 因素 4 水平选择 L₁₆(4⁵)正交表进行正 交实验(见表 2)。G 组试样将根据 H 组实验结果进

表 1 焊接参数 Table 1 The parameters of spot welding

水平	电流/kA	电极气压/MPa	周波(0.02 s)
1	16	0.10	5
2	18	0.15	7
3	20	0.20	11
4	22	0.25	15

表 2 L₁₆(4⁵)正交实验设计表

le 2	The	orthogonal	experiment	table	of	$L_{16}(4$	ັ)	
	le 2	le 2 The	le 2 The orthogonal	le 2 The orthogonal experiment	le 2 The orthogonal experiment table	le 2 The orthogonal experiment table of	le 2 The orthogonal experiment table of $L_{16}(4$	le 2 The orthogonal experiment table of $L_{16}(4^3)$

灾心旦			列号		
头挜丂 -	1	2	3	4	5
H1	1	1	1	1	1
H2	1	2	2	2	2
H3	1	3	3	3	3
H4	1	4	4	4	4
H5	2	1	2	3	4
H6	2	2	1	4	3
H7	2	3	4	1	2
H8	2	4	3	2	1
H9	3	1	3	4	2
H10	3	2	4	3	1
H11	3	3	1	2	4
H12	3	4	2	1	3
H13	4	1	4	2	3
H14	4	2	3	1	4
H15	4	3	2	4	1
H16	4	4	1	3	2

行优化实验。

2 结果与分析

2.1 正交实验结果分析

按表3参数进行点焊,接头力学性能测试结果见 表4。从表4实验数据和焊接现象来看,H9,H10, H15,H16组的接头抗拉力较好,H9,H10和H16抗拉 力相差不大,且H9和H10没有飞溅,只有轻微的粘 电极。焊接接头最佳为H15,即电流22kA、电极压力 0.20 MPa、焊接时间15个周波,最大拉力为4.338 kN,但焊点有少量飞溅和粘电极现象。

77

表 3 正交实验结果 Table 3 The results of orthogonal experiment

实验	电流	电极气	周波	焊点直	最大载
号	∕kA	压/MPa	(0.02 s)	径/mm	荷/kN
H1	16	0.10	5	5.88	1.366
H2	16	0.15	7	6.13	1.512
Н3	16	0.20	11	6.23	1.629
H4	16	0.25	15	6.38	2.095
H5	18	0.10	11	6.56	2.884
H6	18	0.15	15	7.10	2.860
H7	18	0.20	5	6.39	1.760
H8	18	0.25	7	6.33	2.452
H9	20	0.10	15	7.89	4.129
H10	20	0.15	11	7.36	3.947
H11	20	0.20	7	7.20	3.200
H12	20	0.25	5	6.55	2.837
H13	22	0.10	7	7.76	3.605
H14	22	0.15	5	6.89	3.581
H15	22	0.20	15	8.16	4.338
H16	22	0.25	11	7.97	4.168

表 4 方差分析 Table 4 The analysis of variance

电流	电极气压	周波	
K_1	6.602	11.884	9. 544
K_2	9.956	11.900	10.769
K_3	14.113	10. 927	12.628
K_4	15.692	11. 552	13.422
k_1	1.651	2.971	2.386
k_2	2.489	2.975	2.692
k_3	3. 528	2.732	3.157
k_4	3.923	2.888	3.356
R	2.272	0.246	0.970
优方案		$A_4B_2G_4$	

从表3还可以看出,接头抗拉力和焊点直径有一 定关联,电流小时,焊点直径很小,熔核形成小,拉力 不高;当电流合适时,焊点直径变大,熔核形成完美, 接头抗拉力高;但当电流过大时,焊点直径依然很大, 而接头抗拉力反而降低。

正交实验结果方差分析见表 4。 K_i 示任一列上 水平为 *i* 时,所对应的实验结果之和。*i* 表示所选的 水平, K_1 就表示电流参数为 16 kA 的4 组接头抗拉力 之和。 $k_i = K_i/s$,其中 *s* 表示任一列上各水平出现的 次数,本组实验中 *s* = 4,所以 *k* 值即该参数下 4 组接 头抗拉力的平均值。*R* 为极差,求法为任一列上 *R* = max{ k_1, k_2, k_3, k_4 }-min{ k_1, k_2, k_3, k_4 },例如电流一 列的极差 $R = k_4 - k_1 = 2.272$ 。*R* 数值的大小所反映的 是各因素的水平变化时对实验指标影响的大小。

在实验选择的电流参数范围内,接头抗拉力随着 电流的增加而增强;电流极差 R 最大,为 2.272,表明 电流的改变对实验结果的影响程度最大。周波对实 验结果的影响在电流和压力之间,其 R 值接近电流的 一半。在实验参数范围内,接头抗拉力随着焊接周波 的增加而增强,但电极压力的变动对实验结果的影响 最小。

从表4还可以看出,电流对实验的影响最大,其 次是周波,最小的是电极压力,与公式 Q=I²Rt 吻合。 熔核形成的热量与电流的平方成正比,所以在实际生 产中需要严格控制好电流大小;焊接时间对热量的影 响与电流相似,只是影响程度较小;电极压力的改变, 可以使板间电阻 R 值改变,从而影响到热量的吸收。 从表4中 k 的数据来看,若单纯追求接头最大抗拉 力,在不考虑交互配合作用的情况下,最优方案是电 流 22 kA、电极压力 0.15 MPa、焊接时间 15 个周波, 即 A₄B₂G₄,并非实验所用最佳参数,故需要进一步对 实验参数进行优化。

2.2 正交实验优化结果分析

H组正交实验直观地分析出了各因素对实验的 影响程度和影响趋势,但由于实验结果中得出的参数 最佳水平处于所选实验水平的端点,所以最优点仍有 延伸的可能。在综合H组实验结果的基础上,G组实 验对其实验参数进行了调整,选用20~24 kA的电 流,焊接时间不宜太长,选择11和15个周波,电极压 力选择的是中间值,焊接规范如表5和6所示,实验 结果见表7。

从实验结果可以看到, G5, G8, G12 抗拉力较大,

表 5 焊接参数与水平 Table 5 The parameters of spot welding

水平	电流/kA	电极气压/ MPa	周波(0.02 s)
1	20	0.15	11
2	22	0.20	15
3	24		

表 6 各组接头参数配合方案 Table 6 The optimal experimental design

实验是	由流/レヘ	由极与压/MP。	周波(0.02。)
天迎り	电 /m/ KA	电似 (止/ mi a	川设(0.02 s)
G1	20	0.15	15
G2	22	0.15	15
G3	24	0.15	15
G4	20	0.20	15
G5	22	0.20	15
G6	24	0.20	15
G7	20	0.15	11
G8	22	0.15	11
G9	24	0.15	11
G10	20	0.20	11
G11	22	0.20	11
G12	24	0.20	11

表 7 优化设计实验结果 Table 7 The results of optimal experiment

实验号	最大载荷/kN	现象
G1	4.197	熔深稍小、无飞溅、不粘电极
G2	5.444	熔深合适、轻微飞溅、轻微粘电极
G3	4.553	熔深较大、有飞溅、粘电极
G4	3.933	熔深稍小、无飞溅、不粘电极
G5	5.801	熔深合适、无飞溅、不粘电极
G6	5.619	熔深较大、飞溅较小、比较粘电极
G7	4.673	熔深合适、无飞溅、不粘电极
G8	6.008	熔深合适、无飞溅、极小电极
G9	5.313	熔深较大、有飞溅、轻微粘电极
G10	3.883	熔深稍小、无飞溅、不粘电极
G11	6.262	熔深合适、无飞溅,不粘电极
G12	5.735	熔深较大、飞溅小、轻微粘电极

G4,G10 最小。G3 组和 G6 组飞溅和粘电极比较明显,其他组焊接现象比较理想。采用 G2 电流 22 kA、电极压力 0.15 MPa、焊接时间 15 个周波焊接参数时,接头抗拉力为 5.444 kN,较 H15 提高25.5%。采用 G11 即电流 22 kA、电极压力 0.20 MPa、焊接时间 11 个周波焊接参数时,接头抗拉力最大,为 6.262 kN,较



H15 提高44.35%。从焊接过程现象可以看到,焊接 参数 G11 时,熔深合适、无飞溅,不粘电极,表明其焊 接工艺最为理想。

2.3 熔核金相组织观察

选择6组具有代表性的接头G5,G7,G10,G11,G12,腐蚀其横截面,采用型号为ZOOM-660E熔深立体显微镜观察熔核,见图1。当焊接时间和载荷相同时,G10抗拉力为3.883 kN,它的熔深较小,焊透率较小,熔核比较饱满,呈椭圆形,面积为8.94 mm²;G11抗拉力最大,为6.262 kN,其熔核有明显增大,焊透率合适,熔核明显变得修长,面积达到了11.627 mm²;G12 熔核修长,但面积减小到9.50 mm²,抗拉力为5.735 kN;随着电流增大,熔核尺寸和接头抗拉力都是先增大后减小。当焊接时间同为11个周波,G7 的熔核尺寸形状呈椭圆,面积为9.43 mm²,抗拉力为







b G7





e G12

d G11

图 1 点焊焊接接头熔核形貌 Fig. 1 The morphology of spot welding 4.673 kN,熔核面积和抗拉力都比 G10 稍微高。当电流和载荷相同时,G5 的熔核面积相比 G11 有明显减小,形状修长,仅为9.13 mm²,抗拉力也相应减小,为5.801 kN,表明焊接时间过长,造成的热量过多,反而减小了熔核尺寸,降低了接头抗拉力。

3 结论

1) 6061 铝合金正交电阻点焊表明,当选取焊接 电流 22 kA、电极压力 0.20 MPa、焊接时间 15 个周 波,焊接接头抗拉力最大,为4.338 kN,但有少量飞溅 和粘电极现象。方差分析表明,在不考虑交互配合作 用的情况下,最优方案是电流 22 kA、电极压力 0.15 MPa、焊接时间 15 个周波。

2)电阻点焊优化实验表明,当选取方差最优方 案即电流 22 kA、电极压力 0.15 MPa、焊接时间 15 个 周波焊接参数时,接头抗拉力为 5.444 kN,较正交实 验最大值提高了 25.5%。而选取电流 22 kA、电极压 力 0.20 MPa、焊接时间 11 个周波焊接参数时,接头抗 拉力最大,为 6.262 kN,较正交实验最大值提高了 44.35%。

3) 熔核大小与接头抗拉力直接相关。当焊接时间和载荷相同时,随着电流增大,熔核尺寸和接头抗拉力都是先增大后减小,电流 22 kA、电极压力 0.20 MPa、焊接时间 11 个周波时抗拉力最大,熔核变得修长,面积最大,焊透率合适,焊接工艺参数最佳。

参考文献:

 [1] 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 Jiang-qi, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing. New Technology of Light Weight and Steel-aluminum Hybrid Structure Car Body[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6):27-35.

- [2] DAWOOD H I, MOHAMMED K S, RAHMAT A, et al. The Influence of the Surface Roughness on the Microstructures and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Using Friction Stir Welding[J]. Surface & Coatings Technology, 2015,270:272-283.
- [3] 张柯柯,杜宜乐,邱然锋,等. A6061 铝合金与 Q235 钢电
 阻点焊接头组织与性能[J].材料热处理学报,2012,33
 (12):64—67.

ZHANG Ke-ke, DU Yi-le, QIU Ran-feng, et al. Microstructure and Properties of A6061 Aluminum Alloy/Q235 Steel Joint Welded by Resistance Spot Welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(12):64-67.

[4] 李杏瑞, 牛济泰, 杨顺成. SiCp/6061 铝基复合材料电阻
 点焊接头中的缺陷分析[J]. 机械工程材料, 2013, 37
 (4), 14-16.

LI Xing-rui, NIU Ji-tai, YANG Shun-cheng. Analysis of the Welding Defects in Resistance Spot Welding of SiCp/ 6061Al Composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(4):14—16.

- [5] 罗怡.(Cr₂O₃+Al)粉末铝热剂对 6061 铝合金电阻点焊 熔核的影响[J].焊接学报,2014,35(1):63—71.
 LUO Yi. Influence of (Cr₂O₃+Al) Powder Termite on Nugget in Resistance Spot Welding of 6061 Aluminum Alloy [J]. Transactions the China Welding Institution, 2014, 35 (1), 63—71.
- [6] LI Y, ZHANG Y, BI J, et al. Impact of Electromagnetic Stirring upon Weld Quality of Al/Ti Dissimilar Materials Resistance Spot Welding [J]. Materials & Design, 2015, 83: 577-586.
- [7] 倪建东,刘新霞,宋永伦. 轿车车身 6061 铝合金的中频 点焊工艺及接头性能研究[J]. 电焊机,2009,39(7):
 41-45.

NI Jian-dong, LIU Xin-xia, SONG Yong-lun. Study of IF Resistance Spot Welding Design and Welding Joint Property on 6061 Aluminum Alloy Applied in Auto-body[J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(7):41-45.

- [8] ZHANG W H, SUN D Q, HAN L J, et al. Optimised Design of Electrode Morphology for Novel Dissimilar Resistance Spot Welding of Aluminium Alloy and Galvanised High Strength Steel [J]. Materials & Design, 2015, 85:461-470.
- [9] FLOREA R S, BAMMANN D J, YELDELL A, et al. Weld-

(上接第43页)

- [32] LIN J, LIU Y, FARRUGIA D C J, et al. Development of Dislocation-based Unified Material Model for Simulating Microstructure Evolution in Multipass Hot Rolling[J]. Philosophical Magazine, 2005, 85(18):1967—1987.
- [33] LI X L, LI M Q. A Set of Microstructure-based Constitutive Equations in Hot Forming of a Titanium Alloy [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2005, 13(5):435-441.
- [34] FAN X G, YANG H. Internal-state-variable Based Self-consistent Constitutive Modeling for Hot Working of Two-phase Titanium Alloys Coupling Microstructure Evolution [J]. In-

ing Parameters Influence on Fatigue Life and Microstructure in Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy [J]. Materials & Design,2013,45:456-465.

- [10] FLOREA R S, HUBBARD C R, SOLANKI K N, et al. Quantifying Residual Stresses in Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy Sheets Via Neutron Diffraction Measurements[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (11):2358-2370.
- [11] ZHAO D W, WANG Y X, SHENG S N, et al. Real Time Monitoring Weld Quality of Small Scale Resistance Spot Welding for Titanium Alloy [J]. Measurement, 2013, 46 (6):1957-1963.
- [12] FLOREA R S, SOLANKI K N, BAMMANN D J, et al. Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum; Failure Loads and Deformation [J]. Materials & Design, 2012, 34:624— 630.
- [13] ESHRAGHI M, TSCHOPP M A, ZAEEM M A, et al. Effect of Resistance Spot Welding Parameters on Weld Pool Properties in a DP600 Dual-phase Steel: A Parametric Study Using Thermomechanically-coupled Finite Element Analysis [J]. Materials & Design, 2014, 56:387-397.
- [14] AFSHARI D, SEDIGHI M, KARIMI M R, et al. On Residual Stresses in Resistance Spot-welded Aluminum Alloy 6061-T6: Experimental and Numerical Analysis [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2013, 22 (12): 3612—3619.
- [15] KARIMI M R, SEDIGHI M, AFSHARI D. Thermal Contact Conductance Effect in Modeling of Resistance Spot Welding Process of Aluminum Alloy 6061-T6[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77 (5-8):885-895.

ternational Journal of Plasticity, 2011, 27:1833-1852.

- [35] LUO J, LI M Q, LI X L, et al. Constitutive Model for High Temperature Deformation of Titanium Alloys using Internal State Variables [J]. Mechanics of Materials, 2010, 42: 157-165.
- [36] LUO J, WU B, LI M Q. 3D Finite Element Simulation of Microstructure Evolution in Blade Forging of Ti-6Al-4V Alloy Based on the Internal State Variable Models [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(2):122-130.

80