DOI:10. 13289/j. issn. 1009-6264. 2025-0404

基于响应曲面法的 5083 薄板铝合金 TIG 焊多参数耦合优化

黄祥源[1], 张欣雨[2], 薛 祯[2], 王国举[2], 张子豪[2]
(1. 常州工业职业技术学院, 江苏 常州 213164; 2. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 5083 铝合金薄板广泛应用于汽车制造领域,是车身结构件最为常用的轻质金属材料之一。5083 薄板铝合金钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)主要面临热变形、热裂纹和热影响区组织性能衰退等问题。针对该问题采用响应曲面法对焊接电流、送丝速度和焊接速度 3 个主要参数进行耦合优化,获得了一组适用于 5083 铝合金薄板 TIG 焊的最优工艺参数,其中,焊接速度为 4 mm/s,送丝速度为 254. 5 cm/min,焊接电流为 120 A,数值模拟和试验验证结果均表明采用优化参数获得的焊缝组织结构均匀、缺陷较少,关键力学性能指标抗拉强度达到 274. 736 MPa。

关键词:5083 薄板铝合金; TIG 焊接; 响应曲面法; 多参数耦合优化
中图分类号: TG444. 7 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-6264(2026)10-0253-10

Multi parameters coupling optimization of TIG welding for 5083 thin-plate aluminum alloy based on response surface methodology

HUANG Xiang-yuan[1], ZHANG Xin-yu[2], XUE Zhen[2], WANG Guo-ju[2], ZHANG Zi-hao[2]
(1. Changzhou Vocational Institute of Industry Technology, Changzhou 213164, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: 5083 aluminum alloy thin plate is widely used in the field of automobile manufacturing and is one of the most commonly used lightweight metal materials for vehicle body structural components. The tungsten inert gas (TIG) welding of the 5083 thin plate aluminum alloy mainly faces problems such as hot deformation, hot cracking, and deterioration of microstructure and properties in the heat affected zone. To overcome these issues, response surface methodology was used to couple and optimize the three main parameters of welding current, wire feeding speed, and welding speed for TIG welding of the 5083 aluminum alloy thin plates. A set of optimal process parameters suitable for TIG welding of the 5083 aluminum alloy thin plates was obtained, including a welding speed of 4 mm/s, wire feeding speed of 254. 5 cm/min, and welding current of 120 A. Numerical simulation and experimental verification show that the weld microstructure obtained using the optimized parameters is uniform, with fewer defects, and the key mechanical performance tensile strength reaches 274. 736 MPa.

Keywords:5083 aluminum alloy sheet; TIG welding; response surface methodology; multi-parameter coupling optimization

5083 薄板铝合金具有比强度高、塑性和韧性好、抗疲劳、冷加工性能好等诸多优点而广泛应用于汽车、船舶和航空航天领域[1-3]。焊接是薄板铝合金常用的加工方法,主要有钨极非熔化极气保焊(简称 TIG 焊)和熔化极氩弧焊(简称 MIG 焊)。MIG 焊接生产效率高且不易产生熔渣,但存在易变形、产生裂纹和烧穿现象,使其不适合铝合金薄板的实际焊接生产,加之设备成本较高,所以绝大多数行业仍然采用 TIG 焊[4-5]。田志杰等[6]采用 TIG 焊工艺对 1. 5 mm 厚的 5B70 铝合金薄板进行焊接,通过优化焊接参数,获得了成形良好、性能优异的焊接接头。虽然 TIG 焊在焊接过程中,电弧仍能够稳定燃烧且热量较

收稿日期: 2025-10-29 **修订日期**: 2026-01-12
基金项目: 江苏高校“青蓝工程”资助
作者简介: 黄祥源(1974—), 男, 副教授,硕士,主要从事铝合金结构制造、工业机器人控制研究,发表论文 24 余篇,E-mail: 65428688@ qq. com。
通信作者: 张欣雨(2001—), 女, 硕士研究生,主要从事红外检测研究,E-mail:1741803769@ qq. com。
引用格式: 黄祥源, 张欣雨, 薛祯, 等. 基于响应曲面法的 5083 薄板铝合金 TIG 焊多参数耦合优化[J]. 材料热处理学报, 2026, 47(10):253-262.
HUANG Xiang-yuan, ZHANG Xin-yu, XUE Zhen, et al. Multi parameters coupling optimization of TIG welding for 5083 thin-plate aluminum alloy based on response surface methodology[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2026, 47(10):253-262.

为集中,但是由于钨极的载流能力有限,导致焊接速度慢,生产效率低,且铝合金焊接易发生变形、热裂纹以及烧穿现象[7-8]。若想控制好变形,焊出质量好的焊接接头,则需要合理优化焊接参数[9]。廖平等[10]采用脉冲交流方波 TIG 焊焊接薄板铝合金时,合理调整影响焊接工艺的各种因素,在开环控制的条件下,采用一组焊接规范参数对薄板铝合金对接单面焊双面成形进行了焊接试验,结果焊缝的正面成形均匀,焊缝背面完全熔透。Chao 等[11]研究指出,当热输入保持恒定时,焊接电流与电压对于焊缝的质量有明显的作用。焊接过程中,熔深、余高及平均硬度这 3 个关键指标,其变化趋势均与热输入量呈正相关,即热输入量增加,这些指标也会相应上升。Kumar 等[12]尝试研究脉冲 TIG 焊接工艺参数对焊时条件下的稀释和力学性能的影响,采用田口法优化可热处理(Al-Mg-Si)铝合金焊件的脉冲 TIG 焊接工艺参数,以最大限度地提高其力学性能,并且在缺口拉伸强度和冲击韧性之间观察到反比关系。虽然单一参数或各独立参数的优化有助于焊接接头的质量提升,但实际焊接过程中工艺参数是相互影响的。当前焊接研究在接头组织与性能方面积累了较多认识,但尚未系统建立完善的工艺参数优化方案[13]。鉴于此,试验采用响应曲面中心复合设计法对焊接工艺参数进行科学合理的设计,构建影响因素与响应之间的多元回归方程,能够获得因素与响应之间的相互作用关系[14-15]。从而进一步深入掌握因素间的交互作用、因素与响应间的作用,有助于提高 TIG 焊在实际铝合金薄板焊接中的应用。

本文采用响应曲面法对 3 mm 厚 5083 铝合金薄板进行 TIG 焊接工艺优化试验,先通过构建焊接参数与焊缝质量指标间的数学模型,确定最佳工艺参数组合,随后采用优化后的工艺参数对接头进行焊接,焊后通过焊缝组织结构评价焊缝质量,并测试接头的力学性能和显微硬度,分析熔深(深宽比)等特征参数,最终建立 5083 铝合金薄板 TIG 焊接的参数耦合优化方案,为实际生产提供理论和实验依据。

1 试验材料与方法

5 系铝合金试验所采用的焊丝为 5083,焊丝直径为 1.2 mm,化学成分如表 1 所示。本试验使用的焊接设备为 MasterTig 335ACDC 焊机,焊接板材的尺寸为 200 mm×100 mm×3 mm。焊接试验开始前,使用 SiC 砂纸将待焊接区域的表面氧化层打磨掉。

表 1 5083 铝合金丝材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 5083 aluminum alloy wire (mass fraction, %)

Fe	Cu	Si	Mn	Zn	Mg	Cr	N	Ti	Al
0.4	0.1	0.4	0.4–1.0	0.25	4.0–4.9	0.02	0.0025	0.02	Bal.

使用电火花线切割方法将焊接试样从指定位置切下获得所需试样,如图 1(a)所示,镶嵌后依次用 240、400、600、800、1200 和 1500 目 SiC 金相砂纸研磨,再用 2.5 μm 的金刚石喷雾抛光剂对其进行抛光,直到金相试样表面达到镜面为止,采用数字显微硬度计(HVS-1000)测量截面不同位置硬度,如图 1(c)

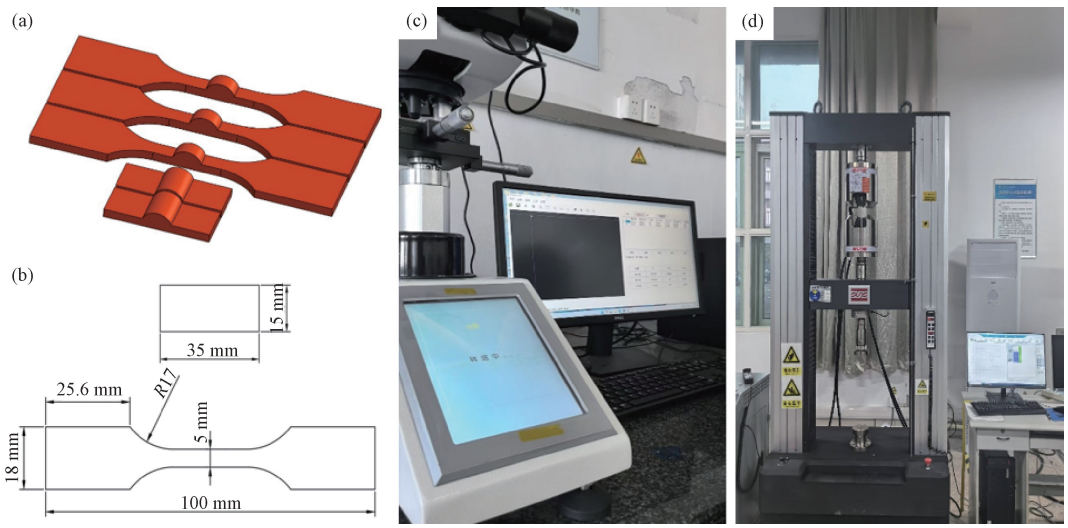


图 1 (a) 试样切割示意图;(b) 试样的尺寸;(c) 数字显微硬度计(HVS-1000);(d) 拉伸测试装置

Fig. 1 (a) Schematic diagram of specimen cutting; (b) dimensions of the specimen; (c) digital microhardness tester (HVS-1000); (d) tensile testing device

所示。金相试样采用 1.5 mL HCl + 1.0 mL HF + 2.5 mL HNO_3 + 95 mL H_2O 的 Keller 试剂进行腐蚀,之后在光学显微镜(OM)上进行组织观察,并采用 Toup View 软件捕捉微观结构图像。采用扫描电镜(SEM,型号 EM-30 Plus1)对焊缝中心和熔合线附近的微观结构进行观察,采用能谱仪(EDS)分析焊缝不同区域的基体相和析出相成分,对焊缝中心和熔合线位置的主要元素分布情况进行分析。采用 WDW-100 电子式万能试验机(如图 1d 所示)对焊缝结合强度进行拉伸测试,拉伸试样尺寸如图 1(b)所示,拉伸试验加载速率 1 mm/min。

试验选择控制焊接质量的 3 个关键工艺参数作为研究变量,即焊接电流[16]、送丝速度[17]和焊接速度[18]。选择试样的抗拉强度作为响应量。为确保铝及铝合金弧焊接头表面无裂纹、气孔等瑕疵,以及焊缝有效深度内无裂纹、未熔合和气孔密集区等缺陷,依据 GB/T 22087—2008/ISO 10042:2005《铝及铝合金的弧焊接头　缺陷质量分级指南》标准,对焊接电流、送丝速度和焊接速度 3 个参数进行了单因素焊接工艺试验,确定了 3 个参数的取值范围,设计了 3 因素 3 水平的 BBD(Box-Behnken design)试验方案,通过线性变换后设计-1、0、1 三个水平,分别代表每个因素的低、中、高水平[19]。具体工艺参数的范围如表 2 所示。

表 2　输入工艺参数及其工作范围

Table 2　Process parameters and their operating ranges

Parameter/unit	Optimization scope		
	-1	0	1
Welding current/A	120	130	140
Wire feeding speed/(cm/min)	220	240	260
Welding speed/(mm/s)	2	3	4

基于响应曲面法设计 7 组试验,其中有 5 组重复试验,试验参数如表 3 所示,I 为焊接电流,WFS 为送丝速度,ν 为焊接速度,R_m 为抗拉强度。

2　试验结果与分析

2.1　数学模型建立与拟合结果分析

在完成各项系数的计算之后,抗拉强度与焊接电流、送丝速度以及焊接速度 3 个输入变量间的函数关系式如式(1)所示(式中各项系数均保留到小数点后三位)。

$$R_m = +236.22 - 4.89 \times A - 5.29 \times B - 0.945 \times C - 9.79 \times AB - 10.68 \times AC - 6.28 \times BC + 3.72 \times A^2 + 10.10 \times B^2 + 16.09 \times C^2 \quad (1)$$

表 3　响应面设计和相应的响应量

Table 3　Response surface design and corresponding response variables

No.	Coding matrix			Input variable			Response volume
				A: I/A	B: Wire feeding speed (WFS)/(cm/min)	C: ν/(mm/s)	Tensile strength, R_m/MPa
1	-1.00	-1.00	0.00	120	220	3	266.392
2	1.00	-1.00	0.00	140	220	3	256.067
3	-1.00	1.00	0.00	120	260	3	263.632
4	1.00	1.00	0.00	140	260	3	214.129
5	-1.00	0.00	-1.00	120	240	2	237.159
6	1.00	0.00	-1.00	140	240	2	268.894
7	-1.00	0.00	1.00	120	240	4	264.560
8	1.00	0.00	1.00	140	240	4	253.572
9	0.00	-1.00	-1.00	130	220	2	260.446
10	0.00	1.00	-1.00	130	260	2	274.210
11	0.00	-1.00	1.00	130	220	4	263.191
12	0.00	1.00	1.00	130	260	4	251.827
13	0.00	0.00	0.00	130	240	3	238.650
14	0.00	0.00	0.00	130	240	3	259.859
15	0.00	0.00	0.00	130	240	3	238.657
16	0.00	0.00	0.00	130	240	3	221.128
17	0.00	0.00	0.00	130	240	3	222.826

表 4 为熔深的回归模型方差分析结果。从表 4 可以看出,熔深的模型 F 值为 1.11,拟合回归方程的决定系数 R-Squared 值为 0.5881,模型的拟合方程可以接受。失拟度(Lack of fit)值为 3,结果表明不显著,说明模型可靠。

虽然模型的决定系数 R-Squared 值为 0.5881,说明模型对响应变量的解释率约为 58.81%,但考虑到 TIG 焊接过程中存在复杂的非线性热-流体行为和多因素耦合,该拟合度在工艺优化研究中具有合理性。失拟度检验结果不显著(P>0.05),进一步表明该模型具有较好的预测可靠性,可用于实际焊接参数优化。

图 2 为模型残差的正态概率分布,观察结果可得,该模型显示出了良好的拟合性能,其误差分布相当匀称,未出现显著偏离的点,因此该模型在预测响应量值时能够提供相对准确的预测结果[20]。获悉各输入变量(A、B 和 C)和其交互项作用于响应量的结果,可以更准确地预测沉积层尺寸随双脉冲工艺参数的变化,变量的分析是工艺参数微调的理论依据。

为了深入分析焊接电流、送丝速度及焊接速度这 3 个输入变量及其交互作用对焊缝抗拉强度的影响,对抗拉强度模型的扰动图进行了研究。图 3 为各输入变量偏离中心点后的变化趋势。从图 3 可以看出,

表 4 熔深的回归模型方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results of the regression model for penetration depth

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	Model significance F	Anomalistic term $P > F$	
Model	3130.00	9	347.78	1.110	0.4555	Not significant
A	190.93	1	190.93	0.610	0.4605	
B	223.63	1	223.63	0.710	0.4261	
C	7.14	1	7.14	0.023	0.8842	
AB	383.74	1	383.74	1.230	0.3049	
AC	456.31	1	456.31	1.460	0.2666	
BC	157.85	1	157.85	0.500	0.5007	
A2	58.56	1	58.56	0.190	0.6785	
B2	429.64	1	429.64	1.370	0.2798	
C2	1090.44	1	1090.44	3.480	0.1043	
Residual	2192.43	7	313.20			
Lack of fit	1214.59	3	404.86	1.660	0.3118	Not significant
Std. Dev.	17.7	R-Squared	0.5881			
2Mean	250.31	Adj R-Squared	0.0585			
C.V. %	7.07	Pred R-Squared	−2.9383			
PRESS	20961.34	Adeq Precision	3.165			

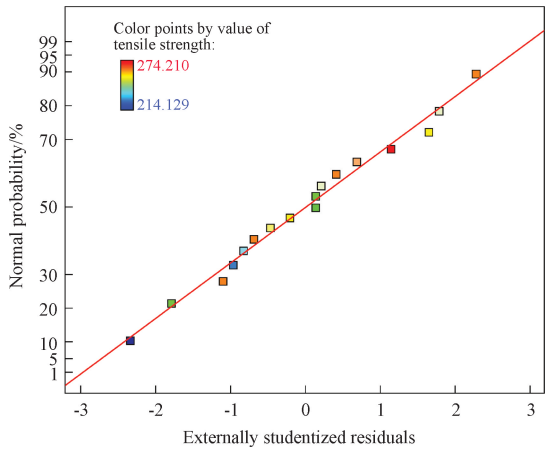


图 2 模型残差的正态概率分布

Fig. 2 Normal probability distribution of model residuals

三者对响应量—抗拉强度的影响差异较小,其中焊接速度对抗拉强度的影响最为显著,且其扰动幅度最大。当焊接速度(变量 A)偏离中心参考点时,焊缝的抗拉强度呈现逐渐下降的趋势。其原因在于焊接速度的增加会导致单位长度上的热输入量增大,从而加大了单位面积内母材的熔化深度和宽度。此时,焊缝的熔深和熔宽增大,填充材料与母材的融合程度提高,进而优化了融合性能。然而,过高的焊接速度会使得熔池不稳定,造成抗拉强度下降。送丝速度对抗拉强度的影响相对较小。微调送丝速度参数主要影响填充材料的用量,但对焊缝的抗拉强度变化影响甚微[21]。这表明,送丝速度的变化不会显著影响焊缝的抗拉强度。焊接电流对焊缝抗拉强度的影响较为平缓,随着焊接电流的增加,焊缝的抗拉强度初期有所下降,但随着电流进一步增大,抗拉强度逐渐增强。

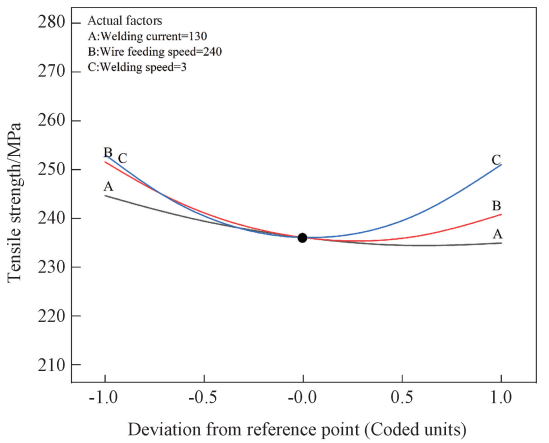


图 3 抗拉强度作为中心参照点偏离量的函数扰动趋势图

Fig. 3 Perturbation plot of tensile strength as a function of deviation from the central reference point

2.2 焊接参数的优化与选取

在分析和验证模型的可靠性之后,对焊接参数进行优化。在 Design-Expert 10.0.7 软件的 Optimization 优化模块中,通过“Criteria”选项卡可对每个焊接参数进行期望值设定。根据试验条件或实际焊接过程需要,将焊接参数设置为某一固定值或在某一范围内优化。为控制焊接过程中的热输入量,减小焊接变形量、细化微观组织,“Criteria”选项卡中设置焊接速度为 maximize,焊接电流为 minimize。此外,希望获得最大的抗拉强度,将抗拉强度的 Goal 设置为

maximize。该焊接方案的可行性指数分布如图 4 所示,在图中的红色区域处取得最优参数,方案可行性值为 1。在该条件优化后得到的结果为:焊接速度 4 mm/s,送丝速度 254.5 cm/min,焊接电流 120 A,预测的抗拉强度值 274.736 MPa。

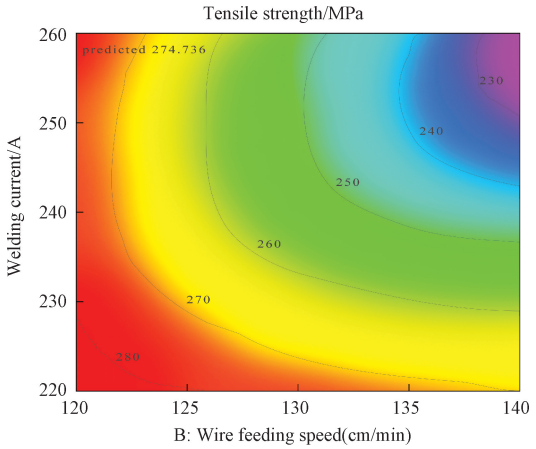


图 4　方案可行性的概率分布等高线图

Fig. 4　Contour map of the probability distribution for solution feasibility

2.3　焊缝成形试验

图 5 为 17 组参数下的焊缝成形表面图,当焊接速度保持恒定时,送丝速度上升会导致成形表面宽度扩大,如第 4 组(送丝速度 260 cm/min、焊接速度 3 mm/s)、第 13 组(送丝速度 240 cm/min、焊接速度 3 mm/s)及第 14 组参数(送丝速度 240 cm/min、焊接速度 3 mm/s)。而当送丝速度保持恒定时,成形表面宽度随焊接速度的减小而增加。由于热输入量较小,焊缝表面无明显氧化迹象,整体抗拉强度较高。

图 6 为 5 系铝合金对接焊缝抛光腐蚀后的截面形貌。5083 铝合金使用 Keller 试剂腐蚀,可以直观地观察到填充材料和两个母材金属板的连接情况,也可以借助体式显微镜对润湿角量化统计。填充材料与连接母材之间连接良好,所有参数均未出现未熔合区域。焊缝的抗拉强度整体较好。熔合较好的焊缝抗拉强度与焊缝的微观组织有直接关系。需要借助显微镜对焊缝的微观组织进一步分析。

表 5 统计了焊缝润湿角在不同焊接参数下的变化情况。在保持其他参数不变的条件下,当焊接电流

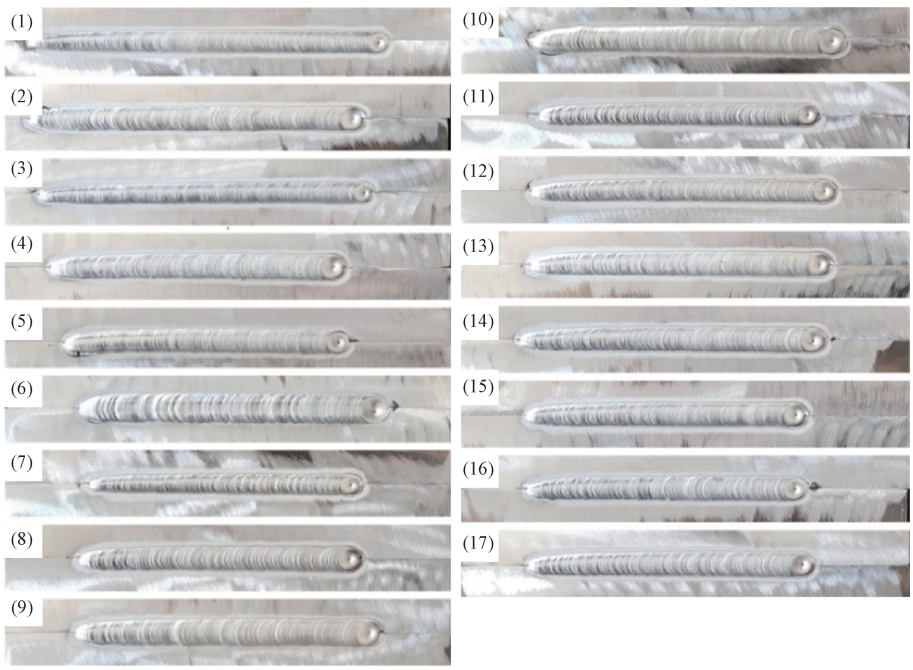


图 5　5083 铝合金对接焊缝的表面形貌(1~17 组)

Fig. 5　Surface morphology of the 5083 aluminum alloy butt welds (Group 1-17)

处于 120~140 A 范围内时,焊接接头的润湿角随电流的增加而逐渐减小。这一趋势与焊接电流与单位长度热输入之间的正相关关系密切相关,表明焊缝对母材的润湿性增强。较小的润湿角意味着熔池金属与母材表面结合更充分,有利于金属间原子扩散,从而提高焊缝的致密性和抗拉强度。焊缝截面观察结果进一步验证了这一规律:润湿角较小的试样焊缝表面更加平整,熔合界清晰,宏观成形质量更佳。随着焊接电流的增加,单位长度的热输入和电弧覆盖范围同步扩大,电弧对铝合金板材表面的作用面积增加,

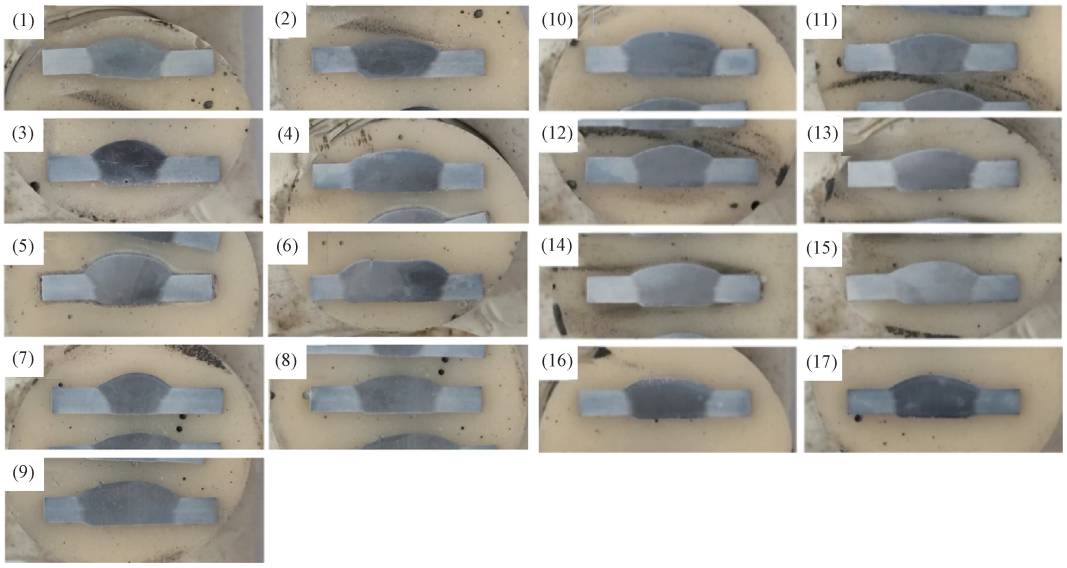


图 6 5083 铝合金对接焊缝截面形貌(1~17 组)

Fig. 6 Cross-sectional morphology of the 5083 aluminum alloy butt welds (Group 1-17)

表 5 润湿角统计(1~17 组)

Table 5 Wetting angle statistics (Group 1-17)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wetting angle/(°)	24.9	20.56	35.27	31.43	49.01	37.3	28.19	23.36	27.36
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	
Wetting angle/(°)	28.84	18.85	23.50	21.66	31.64	21.37	29.05	28.69	

使焊料表面张力下降,焊缝与母材的润湿角进一步减小[22]。此外,焊接速度与单位长度热输入呈反比关系,当其他工艺参数不变时,焊接速度提高至 2.4 mm/s,润湿角随之增大,表明过快的焊接速度不利于熔池充分铺展。

2.4 焊缝微观组织分析

图 7 分别为基体和焊缝中心位置的光学显微组织。焊缝不同区域的冷却速率不同,焊缝中心位置最后冷却。5083 铝合金焊缝中心位置主要由等轴晶和柱状晶构成,晶粒内部均匀散布着点状析出相。在焊缝的中央部分,由于冷却速率相对较低,便形成了均匀细小的等轴晶粒[23]。

图 8(a)为焊缝中心位置的 SEM 形貌。图 8(a)中出现了 45 μm 的缺陷和较多细小孔隙,在放大的 SEM 图中测量到这些细小的孔隙直径大多集中在 5 μm 及以内,如图 8(b)所示。研究表明,50 μm 以内的孔隙不会对接头的力学性能造成显著影响。孔隙的主要来源是空气、焊接耗材和铝合金凝固过程中的收缩。其中,氢气是主要的孔隙来源。由于铝合金对氢气的亲和作用,在焊接过程中,潮气和水分分解为氢气。焊接熔池的温度梯度大,冷却速率快,熔池凝固时,氢气无法逸出,在焊缝中形成孔隙[24]。

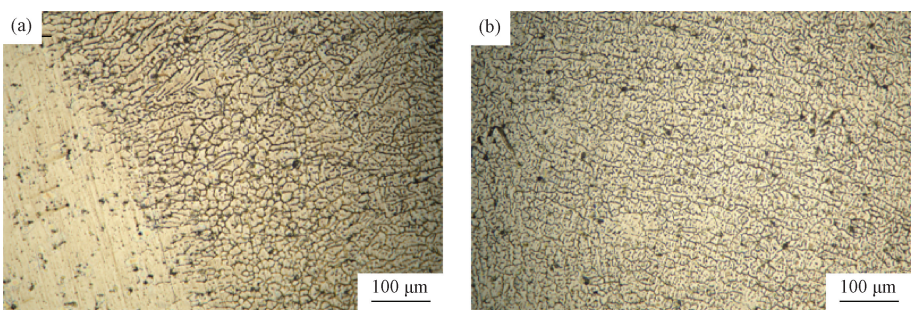


图 7 (a) 基体和焊缝的 OM 显微组织; (b) 焊缝中心位置的 OM 显微组织

Fig. 7 (a) OM microstructure of the base metal and weld; (b) OM microstructure at the center of the tweld

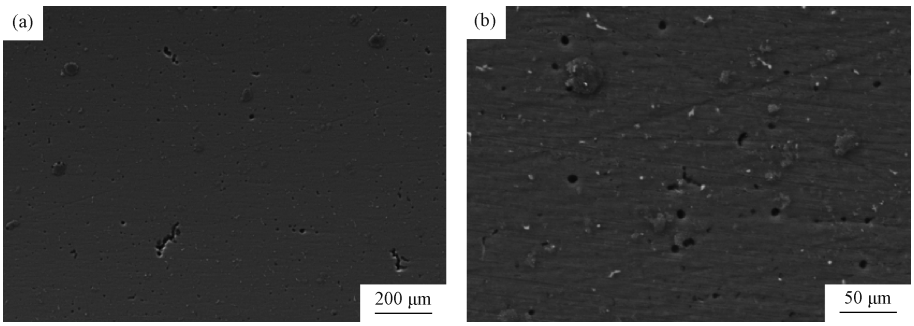


图 8　焊缝中心位置的 SEM 形貌　(a) 低倍;(b) 高倍

Fig. 8　SEM morphology of the center of the weld　(a) low magnification;(b) high magnification

图 9 为焊缝熔合线位置的 SEM 形貌,其中白色微粒均匀分布在灰色基体中。利用光谱学方法对材料进行分析后,发现基底物质为 α-Al 形态,而其中的黑色微粒则属于 β(Al_3Mg_2)晶体结构。Mg 元素的偏析使得白色颗粒周围产生了灰色区域。经过核算,除了部分区域析出的相尺寸较大之外,其余区域析出相的平均尺寸均在 3 μm 以下。

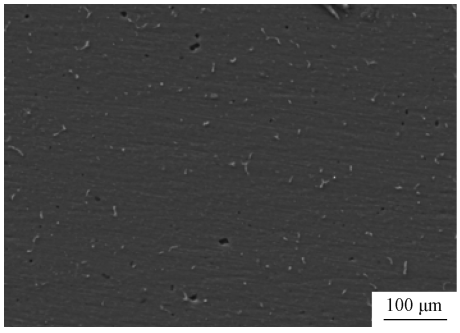


图 9　焊缝熔合线位置的 SEM 形貌

Fig. 9　SEM image of weld fusion line

观察图 8(b)与图 9 两个位置所示的 SEM 形貌,可以明显看出焊接接头在热影响区(HAZ)、熔合区(FZ)以及焊缝(WM)3 个区域之间的明显区别。其中,热影响区的微观结构与熔合区呈现一定的相似性。然而,由于焊接温度高,热影响区的晶粒尺寸大于熔合区和焊缝中心位置的晶粒尺寸。熔合区存在于焊缝过渡区和母材之间。在加热、熔化和凝固之后,母体材料呈现凝固的等轴晶和树枝状的晶体结构[25]。此外,熔合区受到过冷度的影响,可以清楚地看到焊缝的晶粒度。焊缝区的晶粒尺寸大于热影响区和熔合区的晶粒尺寸[26]。

焊接过程中,焊缝的组织结构和元素分布会受到多种因素的影响,如焊接参数、材料成分和热处理状态等。其中,焊接参数的影响至关重要,如:焊接速度和热输入量会影响熔池的形成和冷却速度,从而影响元素的扩散行为和焊缝内部的组织结构。此外,材料成分和热处理状态也会影响焊缝中元素的分布和相组成。一般情况下,铝合金焊缝组织中的基体相为 α-Al,析出相的结构种类较多,需要结合扫描电镜图像和能谱仪进行分析。

图 10 为焊缝中心位置的 SEM 形貌和 EDS 元素面扫描分析,5083 铝合金显微组织主要为 α-Al 基体与 β 析出相。图 11 为焊缝中心位置 Al、Mg、Si 和 Fe

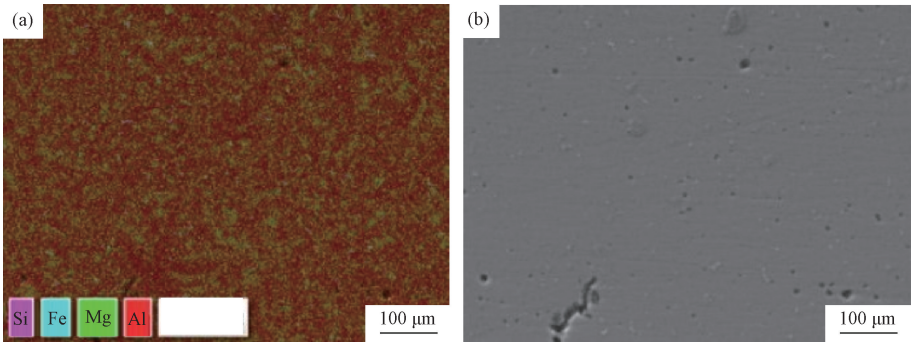


图 10　焊缝中心位置的(a)SEM 形貌和(b)EDS 元素面扫描分析

Fig. 10　(a) SEM morphology and (b) EDS elemental mapping scanning analysis of the center of the weld

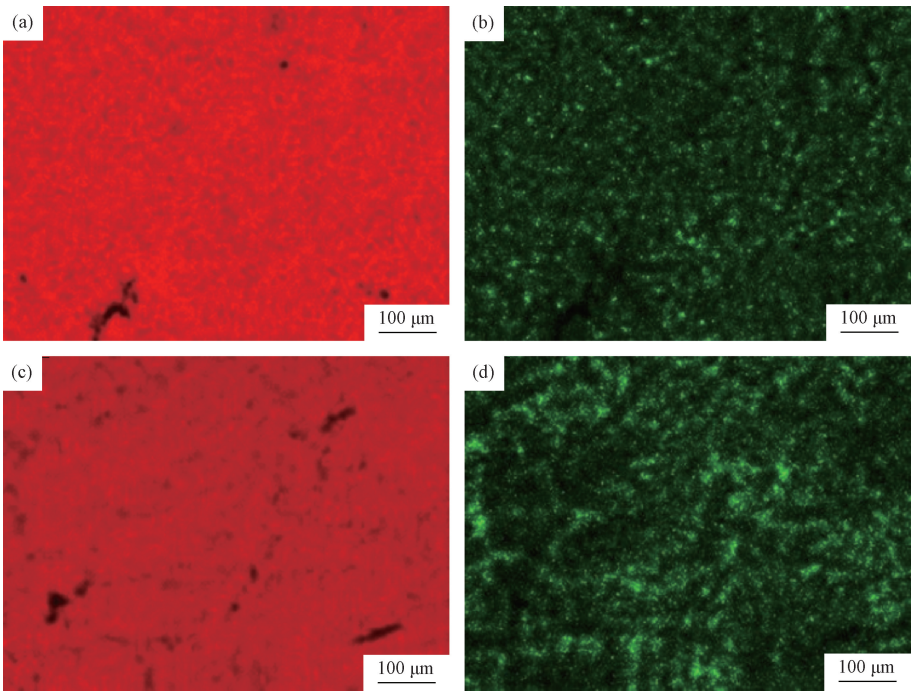


图 11 焊缝中心位置的元素分布图 (a) Al; (b) Mg; (c) Si; (d) Fe

Fig. 11 Element distribution diagrams at the center of the weld (a) Al; (b) Mg; (c) Si; (d) Fe

元素分布图,随着热量的增加(靠近电弧中心位置),析出相分布较为均匀,即在熔池内部析出相生长较为均匀呈连续分布,部分析出相呈小颗粒状析出。图 12 为焊缝熔合线位置 Si 元素和 Fe 元素分布图,在熔池边缘位置,电弧热量输入小,同时热量在板材上散热快,析出相的分布逐渐由连续转变为离散。Fe 元素聚集更加明显,如图 12 所示。焊缝中心位置,析出相在晶界呈连续分布。由于晶界上的自由能高于晶粒中的自由能,更多的热量为 β 析出相的形核提供了更多的活化能,中心位置更有利于镁元素的扩散,析出相呈现连续分布,同时,焊接电流的增加也有利于析出相的连续分布。

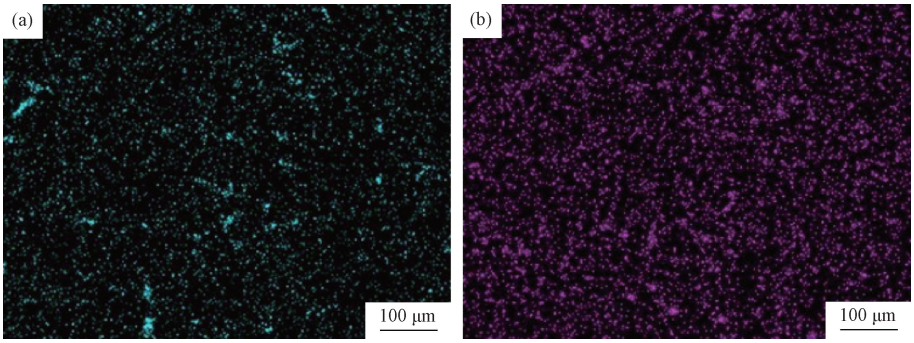


图 12 焊缝熔合线位置元素分布图 (a) Si; (b) Fe

Fig. 12 Element distribution diagrams of weld fusion line (a) Si; (b) Fe

3 结论

1) 响应曲面优化结果表明,5083 薄板铝合金 TIG 焊的最佳工艺参数为:焊接速度 4 mm/s,送丝速度 254.5 cm/min,焊接电流 120 A,该参数下预测抗拉强度值为 274.736 MPa;三者对响应量抗拉强度的影响相差较小;

2) 基于响应曲面法优化模型,采用试验手段,焊接了 7 组 5083 薄板铝合金样件,对样件的焊接接头进行了微观形貌分析,结果表明在焊接速度恒定时,送丝速度的提升会直接导致成形表面的宽度相应增大,相反,若送丝速度保持不变,降低焊接速度会促使成形表面的宽度相应地增加,由于热输入量小,焊缝

表面无明显氧化迹象,整组参数的抗拉强度较好;

3) 对上述 7 组接头样件进行了力学性能测试,综合微观形貌分析和力学性能测试结果表明,响应曲面法优化显著提高了焊接接头的组织致密性和力学性能,并有效降低了孔隙率;

4) 该研究结果表明,利用响应曲面法对多参数 TIG 焊接工艺进行优化具有良好的可行性,可为铝合金车身结构件的高质量焊接提供参考。

参 考 文 献

[1] Mishra R S, Mahoney M, Sato Y, et al. Friction stir welding and processing VIII[M]. Switzerland: Springer International Publishers, 2016: 219-226.

[2] 王军亮,穆壮壮,郁炎,等. 5083 铝合金薄板 CMT+P 焊接接头组织与力学性能研究[J]. 金属加工(热加工),2025(6):65-71.
WANG Jun-liang, MU Zhuang-zhuang, YU Yan, et al. Study on microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy sheet CMT+P welded joint[J]. MW Metal Forming, 2025(6): 65-71.

[3] Li Y, Zou W, Lee B, et al. Research progress of aluminum alloy welding technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(5): 1207-1218.

[4] Chen B Q, Liu K, Xu S. Recent advances in aluminum welding for marine structures[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(9): 1539.

[5] 林文超. 汽车铝合金车身焊接工艺开发与应用分析[J]. 时代汽车,2023(15):132-134.
LI Wen-chao. Development and application analysis of automotive aluminum alloy body welding process[J]. Auto Time, 2023(15): 132-134.

[6] 田志杰,刘焱,尚傲霜,等. 薄板 5B70 铝合金 TIG 焊缝熔池组织细化特征[J]. 导弹与航天运载技术(中英文),2025(1):85-90.
TIAN Zhi-jie, LIU Yan, SHANG Ao-shuang, et al. Micro-structure refine characteristics of 5B70 Al alloy sheet welded joints by TIG welding[J]. Missiles and Space Vehicles, 2025(1): 85-90.

[7] Chen Y, Fan C, Lin S, et al. Effect of tungsten inert gas welding parameters on hot crack sensitivity of cast magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 32(3): 1382-1389.

[8] 周培山,唐珩崴,李国超,等. TIG 焊工艺发展研究[J]. 焊接技术,2023,52(3):14-19.

[9] 黄星光,孙宝福,麻民思,等. 工艺参数对间热式电子束焊接 5083/5052 铝合金异种金属接头组织及性能的影响[J]. 机械工程材料,2025,49(9):48-53.
HUANG Xing-guang, SUN Bao-fu, MA Min-si, et al. Effects of process parameters on microstructure and properties of indirect heating electron beam welded 5083/5052 aluminum alloy dissimilar metal joint[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2025, 49(9): 48-53.

[10] 廖平,陈书杰,杨文杰. 薄板铝合金脉冲交流 TIG 焊工艺[J]. 焊接学报,2003,24(4):65-67.
LIAO Ping, CHEN Shu-jie, YANG Wen-jie. Study on pulsed AC TIG welding technology of thin sheet of aluminium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(4): 65-67.

[11] Chen C, Sun G R, Du W B, et al. Influence of heat input on the appearance, microstructure and microhardness of pulsed gas metal arc welded Al alloy weldment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 121-130.

[12] Kumar A, Sundarrajan S. Effect of welding parameters on mechanical properties and optimization of pulsed TIG welding of Al-Mg-Si alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(1/2): 118-125.

[13] 宋丹丹,沈煜,刘军,等. 铝合金车体材料性能及焊接工艺分析[J]. 设备管理与维修,2025(16):122-124.

[14] 成奇,郭宁,付云龙,等. 基于响应曲面法的铝合金激光封边焊接[J]. 焊接学报,2022,43(10):1-10.
CHENG Qi, GUO Ning, FU Yun-long, et al. Study on laser edge sealing welding of aluminum alloy based on response surface method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(10): 1-10.

[15] 贾志宏,万晓慧,郭德伦. 基于响应面法的超高频电弧增材制造工艺优化[J]. 焊接学报,2020,41(6):90-96.
JIA Zhi-hong, WAN Xiao-hui, GUO De-lun. Optimization of UHFP-GTAW process based on response surface method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(6): 90-96.

[16] Singh I J, Murtaza Q, Kumar P. Effect of welding speed on metallurgical characterization of CMT welding of dissimilar aluminium

alloys of AA6061 and AA8011[J]. Silicon,2024,16(9):3891-3903.

[17] 杨未未,张文庆,杨育军. 工艺参数对TIG自动焊焊缝成形影响规律研究[J]. 山西冶金,2025,48(3):4-7.
YANG Wei-wei,ZHANG Wen-qing,YANG Yu-jun. Research on the influence of process parameters on TIG automatic welding seam formation[J]. Shanxi Metallurgy,2025,48(3):4-7.

[18] Sabdin S D,Hussein N I S,Sued M K. A review on thin plates joining method using arc welding as the heat sources[J]. Journal of Industry,Engineering and Innovation,2019,1(2):1-6.

[19] 曲明. 基于响应曲面法的7050铝合金厚板预时效多目标工艺优化[J]. 有色金属加工,2024,53(5):33-37.
QU Ming. Multi-objective process optimization of pre-aging for 7050 aluminum alloy thick plates based on response surface methodology[J]. Nonferrous Metal Processing,2024,53(5):33-37.

[20] He E G,Liu J,Li J,et al. Effect of porosities on tensile properties of laser-welded Al-Li alloy:an experimental and modelling study[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,95(1):659-671.

[21] 许楠,徐玉缀,高天旭,等. 焊接热循环对5083铝合金搅拌摩擦焊缝晶粒结构的影响[J]. 焊接学报,2025,46(6):27-33.
XU Nan,XU Yu-zhui,GAO Tian-xu,et al. Influence of welding thermal cycle on grain structure of 5083 aluminum alloy weld by friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution,2025,46(6):27-33.

[22] Singh J,Arora K S,Oliveira J P. Unravelling the influence of CMT characteristic parameters on process stability and joint properties in dissimilar aluminium-steel weld-brazing[J]. Journal of Manufacturing Processes,2025,135:253-268.

[23] 高翔,许祥平,刘兆龙,等. 厚板5083铝合金MIG焊工艺与性能研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2024,38(4):36-42.
GAO Xiang,XU Xiang-ping,LIU Zhao-long,et al. Research on MIG welding process and performance of thick plate 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,38(4):36-42.

[24] Guo W,Zhao X,Zhao Y,et al. Research on optimal heat input parameter for TIG welding of thin plate 5083 aluminum alloy[J]. Scientific Reports,2025,15(1):15593.

[25] 孙佳孝,杨可,王秋雨,等. 5356铝合金TIG电弧增材制造组织与力学性能[J]. 金属学报,2021,57(5):665-674.
SUN Jia-xiao,YANG Ke,WANG Qiu-yu,et al. Microstructure and mechanical properties of 5356 aluminum alloy fabricated by TIG arc additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica,2021,57(5):665-674.

[26] Baghel P K,Nagesh D S. Mechanical properties and microstructural characterization of automated pulse TIG welding of dissimilar aluminum alloy[J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences,2018,25(2):147-154.