

文章编号: 0258-7025(2010)05-1375-05

白车身车顶侧围激光焊接工艺参数分析与优化

卢兵兵

(上海通用汽车有限公司, 整车制造工程部, 上海 201201)

摘要 镀锌板的广泛应用给轿车白车身车顶与侧围的激光焊接带来了挑战,采用搭接方式是解决焊缝气孔等问题的最有效措施。针对目前激光搭接焊工艺参数复杂、研究不够全面的现状,以焊缝金相尺寸作为焊缝质量评价标准,采用二次响应面法研究激光束特征参数对焊接质量的影响规律,通过分析确定了关键工艺参数,并获得了最优焊接工艺参数以实现节能的目标。

关键词 激光技术;激光焊接;搭接方式;响应面法;参数优化

中图分类号 TN249;TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103705.1375

Analysis and Optimization for Auto Roof to Body-Side Laser Welding

Lu Bingbing

(Vehicle Manufacturing Engineering, Shanghai General Motors Ltd., Shanghai, 201201 China)

Abstract The wide use of galvanized steel in automobile manufacturing brings much challenge to the laser welding process of roof to body-side. The fillet joint is the most effective way to solve the problem of welding pores in the process of laser welding. However, there is little research on this complicated joint process. Focused on this problem, taking metallographic size of welding seams as weld quality criteria, response surface methodology (RSM) is used to study the influence of laser beam on welding seam quality. Key welding process parameters and the optimum welding parameters are concluded.

Key words laser technique; laser welding; fillet joint; response surface methodology; parameters optimization

1 引 言

白车身车顶与侧围的连接强度对于整车的安全性至关重要^[1],当汽车发生碰撞颠覆时,车顶强度不足会危及车内乘务人员的安全。目前,美国联邦政府对车顶抗击标准是车身重量的 1.5 倍,并建议增至车身重量的 2.5 倍。2009 年 3 月,美国公路安全保险协会(IIHS)率先公布了自己设定的标准,将能抗击车辆重量 4 倍冲击力作为良好车型的标准。为了达到合格的车顶连接强度,对车顶与侧围的连接工艺提出了更高的要求。传统的白车身电阻点焊连接方式由于效率低、强度差、密封性差、焊后不美观等缺陷,已经逐渐被淘汰^[2]。随着激光技术的成熟及成本的下降,激光焊接被认为是白车身车顶与侧围的最佳连接方

式^[3],相比传统的电阻点焊,激光焊接具有焊接速度快、焊缝强度高、密封性好、焊接表面平滑等优点^[4,5]。目前德国大众、奔驰,美国通用、福特等公司都在自己的轿车生产线上应用激光焊接技术来焊接车顶与侧围。在设计激光焊接头时,可采用重叠方式和搭接方式。二者所焊接的位置有所差别:重叠方式只需将激光聚焦在板材重叠区域内即可,对激光焦点的定位要求较低,不需要专门的焊缝跟踪系统,但缺点是当焊接镀锌板时,被激光气化的锌蒸气无法溢出,会导致焊缝出现气孔等缺陷^[6]。搭接方式需将激光聚焦在搭接焊缝上,对激光焦点的定位要求较高,需要专门的焊缝跟踪系统,增加了设备成本,但可以解决焊接镀锌板时的焊缝气孔等缺陷问题,锌蒸气可从接头边

收稿日期: 2009-09-04; 收到修改稿日期: 2009-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(50905111)和上海汽车工业科技发展基金会资助项目(0907)资助课题。

作者简介: 卢兵兵(1971—), 硕士, 高级工程师, 主要从事整车制造工作方面的研究。

E-mail: bingbing_lu@shanghaigm.com

缘的缝隙中排出。

为了增强车子的耐腐蚀性,镀锌板被广泛应用^[7],因此,搭接方式也成为车顶与侧围激光焊接的主要连接手段。但这种接头对于焊接工艺参数的敏感度很高,激光束入射角度、位置、焊接速度、功率都会影响到最终的焊缝质量^[8]。目前这方面的实验研究很少,不够系统,对于工艺参数的优化,也鲜有涉及。本文针对目前现状,对上述参数进行均匀实验设计,采用二次响应面(RSM)回归模型分析,研究各参数对焊接质量的影响规律。在保证焊缝质量的

基础上,对激光焊的生产效率进行优化,以达到降本增效的目标。

2 实验方案

2.1 实验系统及参数确定

以上海通用产别克新君威车顶为例,采用 0.7 mm 热镀锌板,镀层厚度为 60 g/m²,采用 Triumph 公司 4.6 kW 抽运激光器,Kuka 公司激光头,集成 Precitec 公司的焊缝跟踪系统,其车顶与侧围搭接头的设计如图 1 所示,板材的搭接角度为 5°。

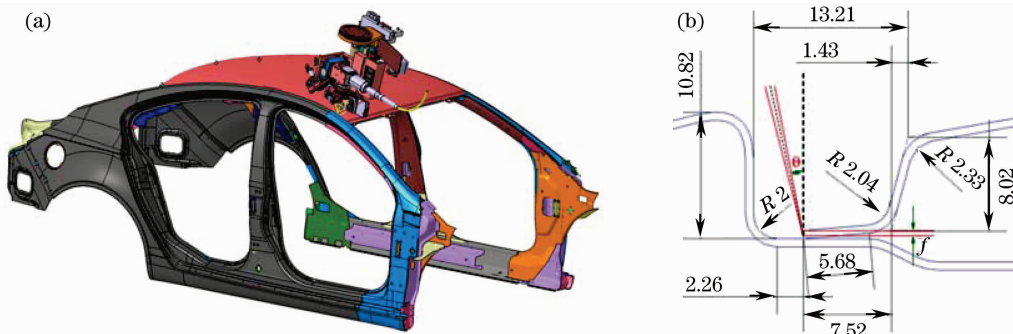


图 1 激光焊接头设计

Fig.1 Design for laser welding joint

实验因子选取为激光焊功率 P ,焊接速度 v ,光束倾角 θ 及焦点偏移量 f 共 4 组。因子水平参考通用汽车公司焊接规范,各取 5 水平,进行编码转换可

得 $x_i (i = 1 \sim 4)$ 从 $-1 \sim +1$ 的对应因子水平值如表 1 所示。

表 1 因子水平选取

Table 1 Factor level selection

No.	Factor name	Level x_i				
		-1	-0.5	0	+0.5	+1
x_1	Welding power P /kW	2.5	3	3.5	4	4.5
x_2	Welding speed v /(mm/s)	60	80	100	120	140
x_3	Laser beam angle θ /($^\circ$)	1	3	5	7	9
x_4	Focus offset f /mm	0	0.15	0.3	0.45	0.6

2.2 焊接质量评定

根据通用汽车激光焊接质量评定规范,以焊缝切面的金相尺寸喉深 a ,脚长 b_1 和 b_2 作为合格标准,如图 2 所示。

其合格焊缝金相尺寸需满足

$$\begin{aligned}
 b_1 &\geq 0.7x_i = 0.49 \text{ mm}, \\
 b_2 &\geq 0.7x_i = 0.49 \text{ mm}, \\
 a &\geq 0.6x_i = 0.42 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

3 实验结果分析

3.1 改进响应面法介绍

采用改进的二次响应面法对上述参数进行分析^[9]。响应面方法的数学表达式是多元线性回归分析。对于 $x \in E^n$, 构造二次响应面近似函数为

$$\hat{y} = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j + \sum_{j=n+1}^{2n} \alpha_i x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \alpha_{ij} x_i x_j. \quad (1)$$

通过变量代换可将其化为形式上的线性函数,令

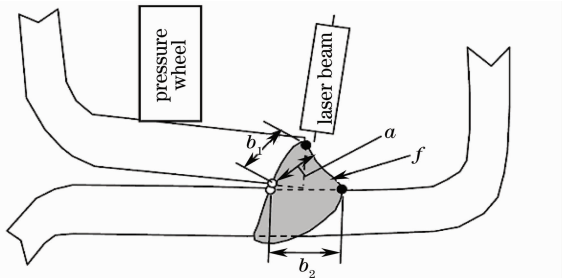


图 2 激光焊缝质量标准示意图

Fig.2 Sketch for laser welding seam quality criterion

$$\begin{cases} x_0 = 1 \\ x_1 = x_1, x_2 = x_2, \dots, x_n = x_n \\ x_{n+1} = x_1^2, x_{n+2} = x_2^2, \dots, x_{2n} = x_n^2 \\ x_{2n+1} = x_1 x_2, x_{2n+2} = x_1 x_3, \dots, x_{k-1} = x_{n-1} x_n \end{cases}, \begin{cases} \beta_0 = \alpha_0 \\ \beta_1 = \alpha_1, \beta_2 = \alpha_2, \dots, \beta_n = \alpha_n \\ \beta_{n+1} = \alpha_{n+1}, \beta_{n+2} = \alpha_{n+2}, \dots, \beta_{2n} = \alpha_{2n} \\ \beta_{2n+1} = \alpha_{12}, \beta_{2n+2} = \alpha_{13}, \dots, \beta_{k-1} = \alpha_{(n-1)n} \end{cases} \quad (2)$$

可得统一的简单形式

$$\bar{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k-1} \beta_i x_i, \quad (3)$$

式中 β_i 为待定系数,其个数 k 视近似函数的形式而定,当响应面为完全二次型时, $k = (n + 1)(n + 2)/2$ 。为了确定 β_i ,必须做 $m \geq k$ 次的独立实验,得到 m 组数据,得到相应的实验值 y ,然后通过求最小二乘解得到。

利用最小二乘法计算参数 β ,得到的近似函数在整体上最接近实验点集合,却可能不通过其中任何一点。而实际参数优化是在某个实验点附近进行

的^[10],这需要响应面函数值在该点附近通过或接近其真实实验值。为此对响应面法进行改造,基本思想有两点:

- 1) 在多个实验中选取一中心点 $x^{(0)}$,响应面函数在该点的取值正好等于实验值 $y^{(0)}$;
- 2) 响应面函数在其余 $m - 1$ 实验值与近似函数计算值的误差满足平方和最小的原则。

利用最小二乘法计算新的回归系数,可得

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (4)$$

相应 X, y, β 形式为

$$X = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} - x_1^{(0)} & x_2^{(1)} - x_2^{(0)} & \dots & x_{k-1}^{(1)} - x_{k-1}^{(0)} \\ x_1^{(2)} - x_1^{(0)} & x_2^{(2)} - x_2^{(0)} & \dots & x_{k-1}^{(2)} - x_{k-1}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^{(m-1)} - x_1^{(0)} & x_2^{(m-1)} - x_2^{(0)} & \dots & x_{k-1}^{(m-1)} - x_{k-1}^{(0)} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y^{(1)} - y^{(0)} \\ y^{(2)} - y^{(0)} \\ \vdots \\ y^{(m-1)} - y^{(0)} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{k-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

表2 实验设计结果

Table 2 Results of experimental design matrix

NO.	Factor level matrix				Experimental results		
	x_1	x_2	x_3	x_4	a / mm	b_1 / mm	b_2 / mm
1	1	-1	-1	0	0.55	0.61	0.96
2	1	0.5	-0.5	1	0.48	0.56	0.92
3	0	-0.5	-1	1	0.45	0.51	0.81
4	-0.5	0.5	0	-0.5	0.39	0.48	0.80
5	0	-1	0.5	-0.5	0.48	0.54	0.86
6	-1	-1	-0.5	-1	0.39	0.47	0.77
7	0.5	1	0	0.5	0.46	0.52	0.84
8	0.5	0.5	0.5	0	0.47	0.53	0.84
9	-1	1	0.5	1	0.33	0.42	0.71
10	0	1	-1	-1	0.37	0.45	0.72
11	-0.5	0.5	-0.5	0	0.36	0.45	0.74
12	0.5	0	-0.5	-0.5	0.49	0.55	0.89
13	-0.5	0	1	-1	0.40	0.47	0.77
14	1	-0.5	0	-1	0.52	0.59	0.95
15	1	1	1	-0.5	0.45	0.56	0.89
16	-0.5	-0.5	0	0.5	0.41	0.51	0.81
17	-1	0	-1	0.5	0.36	0.44	0.71
18	0.5	-1	1	1	0.55	0.64	1.01
19	0	0	0.5	0.5	0.41	0.49	0.80
20	-1	-0.5	1	0	0.37	0.46	0.72
21	0	0	0	0	0.42	0.51	0.83

求得 β 后,根据响应面经过 $y^{(0)}$ 点,可求得

$$\beta_0 = y^{(0)} - \sum_{i=1}^{k-1} \beta_i x_i^{(0)}, \quad (6)$$

从而可得到改进响应面的二次回归函数表达式。

3.2 实验设计及结果

采用完整的二次响应面分析,由于实验因子数为 $n = 4$,最少需要的实验次数为

$$k = (n + 1)(n + 2)/2 = (4 + 1)(4 + 2)/2 = 15. \quad (7)$$

采用 20 组的均匀实验设计表格,将零点(0,0,0,0)作为改进响应面的中心通过点,该点处增加 1 组实验,总共 21 组,实验表格如表 2 所示。针对每组实验,采用金相实验测量对应焊缝的 a, b_1 和 b_2 值,如表 2 所示。

3.3 实验结果响应面分析

根据回归系数 β 的计算公式,分别计算 a, b_1 和 b_2 的回归系数,得到它们的二次回归函数,拟合复相关系数 R^2 分别为 0.9305,0.9632 和 0.9560,模型精度满足要求

$$a = 0.420 + 0.734x_1 - 0.0350x_2 + 0.00358x_3 + 0.00302x_4 + 0.0120x_1^2 + 0.0214x_2^2 + 0.000668x_3^2 - 0.00751x_4^2 - 0.0263x_1x_2 + 0.0138x_1x_3 + 0.0155x_1x_4 - 0.0153x_2x_3 + 0.00450x_2x_4 - 0.0138x_3x_4, \quad (8)$$

$$b_1 = 0.510 + 0.0621x_1 - 0.0329x_2 + 0.0111x_3 + 0.00501x_4 + 0.0332x_1^2 + 0.0183x_2^2 - 0.0302x_3^2 - 0.0104x_4^2 - 0.0251x_1x_2 + 0.0163x_1x_3 + 0.0185x_1x_4 - 0.00874x_2x_3 - 0.0275x_2x_4 - 0.0110x_3x_4, \quad (9)$$

$$b_2 = 0.830 + 0.0932x_1 - 0.0406x_2 + 0.0192x_3 + 0.00526x_4 + 0.0537x_1^2 + 0.0175x_2^2 - 0.0618x_3^2 - 0.00658x_4^2 - 0.0540x_1x_2 + 0.0311x_1x_3 + 0.0426x_1x_4 - 0.00778x_2x_3 - 0.0364x_2x_4 - 0.0163x_3x_4. \quad (10)$$

由于工艺参数优化是在参考零点(0,0,0,0)附近,故针对 a, b_1 和 b_2 的响应面函数,分别在零点对

激光器功率 x_1 ,焊接速度 x_2 以及光束倾角 x_3 ,焦点偏移量 x_4 进行二次响应面分析,如图3所示。

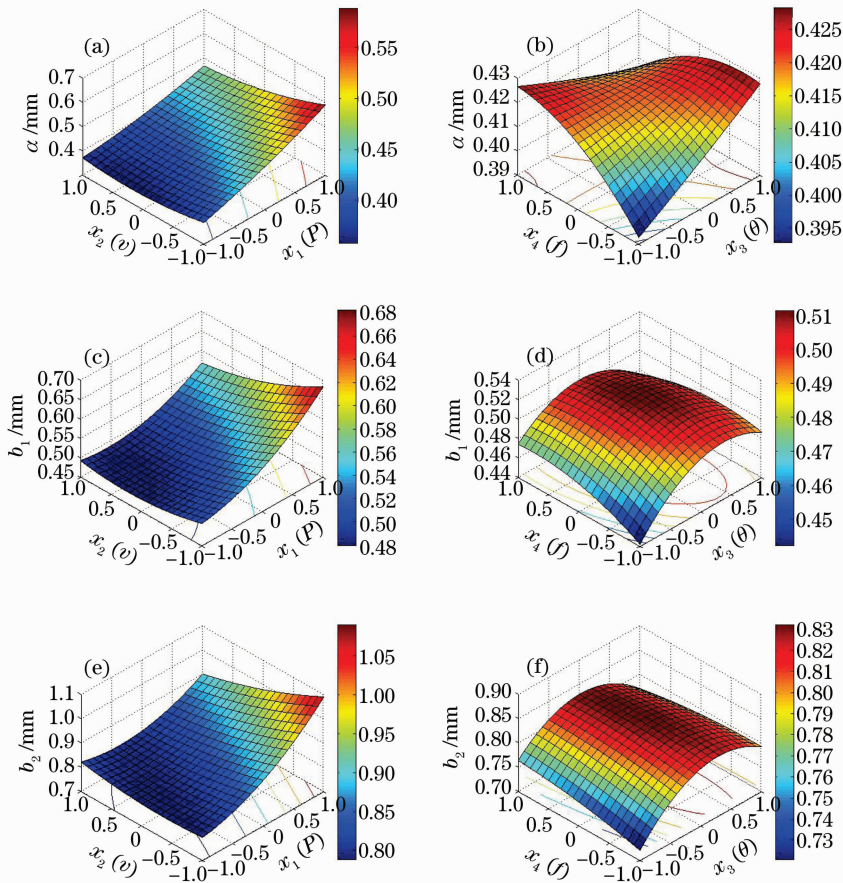


图3 激光焊缝质量与焊接参数的响应面分析

Fig. 3 RSM analysis for weld seam quality on welding parameters

由图3可以看出,焊缝金相尺寸 a, b_1 和 b_2 对工艺参数的变化趋势基本一致。当其他参数固定时,焊缝金相尺寸与激光器功率 x_1 大致成正比,与焊接速度 x_2 大致成反比;当激光束入射角 x_3 适中(5°),焦点偏移量 x_4 较高时,金相尺寸越大,焊缝质量也越好。

3.4 工艺参数优化

对于激光焊接,除了保证焊接质量,焊接的电能

消耗也非常关键。在确保焊接质量的基础上,实现节能增效的目标,故确定优化的约束函数为

$$\begin{cases} a \geq 0.42 \\ b_1 \geq 0.49 \\ b_2 \geq 0.49 \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{P}{v} = \frac{x_1 + 3.5}{40x_2 + 100} \rightarrow \min$$

使用 Matlab 工具箱的 fmincon 函数^[11], 可得最优焊接工艺参数如表 3 所示

表 3 最优焊接工艺参数

Table 3 Optimum welding parameters

No.	Factor name	Value
$x_1 = 0.0192$	Welding power P /kW	3.52
$x_2 = 1.0000$	Welding speed v / (mm/s)	140
$x_3 = 0.0087$	Laser beam angle θ / ($^\circ$)	5.03
$x_4 = 0.0107$	Focus offset f /mm	0.303

此时, 焊接的能量消耗密度为

$$\eta_{\text{optimized}} = \frac{P(\text{kJ/s})}{v(\text{mm/s})} = \frac{3.52}{140} = 0.025 \text{ (kJ/mm)}, \quad (12)$$

未优化时的默认能量消耗密度为

$$\eta_{\text{default}} = \frac{P(\text{kJ/s})}{v(\text{mm/s})} = \frac{3.5}{100} = 0.035 \text{ (kJ/mm)}. \quad (13)$$

由此可见, 在保证激光焊缝质量合格的基础上, 经优化后的能耗密度大幅降低约 30%, 从而能够实现车间降本增效的目标。

4 结 论

采用改进的二次响应面法, 系统地研究了车顶与侧围搭接方式激光焊接参数对焊缝质量的影响规律, 并且通过优化算法, 在保证焊缝质量的基础上, 降低了焊接能耗密度。得到的结论如下:

通过二次响应面回归分析可知, 焊缝金相尺寸大致与激光功率成正比, 与焊接速度成反比, 当光束倾角保持在 5° 左右, 焦点偏移量较大时, 可以获得较好的焊缝质量。

采用 Matlab 软件包提供的优化算法, 获得了在确保焊缝质量的情况下, 激光焊接能耗密度最小的焊接工艺参数, 相比默认焊接工艺参数, 其能耗降低约 30%, 从而实现了降本增效的目标。

参 考 文 献

1 Chen Xiongliang. Roof strength, an ignored hidden danger to automobiles[J]. *Auto and Safety*, 2005, (10): 52~54

陈雄亮. 车顶强度易被忽视的安全隐患[J]. *汽车与安全*, 2005, (10): 52~54

2 Feitianyiming, Chaitianyanyi, Lingmuwozhi *et al.*. Current situation and future for automobile resistance spot welding[J]. *World Auto*, 1986, (4): 9~12

飞田英明, 柴田洋一, 铃木幹治 等. 汽车车身点焊技术的现状和未来[J]. *世界汽车*, 1986, (4): 9~12

3 Wu Mingqing, Yin Zhanshun. Application of laser welding technology in the production of engineering vehicle[J]. *Modern Welding Technology*, 2008, (8): 42~45

吴明清, 尹占顺. 激光焊接技术在工程车辆生产中的应用[J]. *现代焊接*, 2008, (8): 42~45

4 Wu Qiang, Chen Genyu, Xu Lanying *et al.*. CO₂ laser welding of vehicle body[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1726~1731

伍 强, 陈根余, 徐兰英 等. CO₂ 激光焊接车身拼焊板[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1726~1731

5 H. Haferkamp, O. Meier, K. Harley. Laser beam welding of new high strength steels for auto body construction[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, **344**: 723~730

6 Wei Wei, Yao Yuan, Chen Ming. Research on forming and weldability of laser welding galvanized sheet metals for auto body [J]. *Automobile Technology & Material*. 2009, (3): 14~17

魏 伟, 姚 远, 陈 明. 车身镀锌钢板激光搭接焊缝成形及焊接性能研究[J]. *汽车工艺与材料*, 2009, (3): 14~17

7 Xie Peimin, Fu Hanguang. The progress on the application of galvanizing strip to automobile [J]. *J. Xi'an Highway University*, 2000, **2**(2): 76~80

解培民, 符寒光. 镀锌钢板在汽车工业中应用的进展[J]. *西安公路交通大学学报*, 2000, **2**(2): 76~80

8 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding dissimilar metal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268

虞 钢, 赵树森, 张永杰 等. 异种金属激光焊接关键问题研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 261~268

9 X. M. Lai, A. H. Luo, Y. S. Zhang *et al.*. Optimal design of electrode cooling system for resistance spot welding with the response surface method [J]. *International J. Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **41**(3-4): 226~233

10 Sui Yunkang, Zhang Xuan, Yu Huiping. Improvement and application on response surface methodology in shape optimization [J]. *J. Beijing University of Technology*, 2008, **34**(1): 31~36

隋允康, 张 轩, 宇慧平. 结构形状优化响应面方法的改进与应用[J]. *北京工业大学学报*, 2008, **34**(1): 31~36

11 Yang Shiwen, Xu Xiaojian. Application of MATLAB optimization toolbox in structural optimization [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, **8**(5): 1347~1349

杨世文, 许小健. MATLAB 优化工具箱在结构优化设计中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2008, **8**(5): 1347~1349