

一种先进热冲压钢的电阻点焊工艺多元非线性回归设计

贺优优^{1,2}, 刘伟杰¹, 李琦¹

(1. 东北大学 研究院, 沈阳 110819; 2. 沈阳工业大学, 沈阳 110870)

摘 要: 采用多元非线性回归正交组合设计了试验方案, 研究了点焊工艺参数对一种先进热冲压钢焊接接头质量的影响. 将点焊接头最大剪切力与点焊熔核直径作为影响接头质量的主要考察指标. 以电极力、焊接电流及焊接时间作为工艺参数, 并分析三者之间的相互制约关系. 通过正交理论设计了9组试验, 根据回归设计理论, 建立三元二次非线性回归方程并进行了剩余标准差计算. 结果表明, 回归模型能够实现对点焊接头最大剪切力与点焊熔核直径的有效预测. 绘制了其三维视图, 在模型的基础上研究点焊工艺参数对焊缝质量的影响规律.

关键词: 先进热冲压钢; 电阻点焊; 焊接工艺参数; 正交试验

中图分类号: TB 31; TG 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)07-0075-04

0 序 言

汽车轻量化是现代汽车产业发展的趋势, 即采用现代的设计手段与先进的轻质材料相结合的方法, 达到减重、减耗同时兼顾环保与安全的目的^[1]. 已有研究表明, 在汽车白车身上应用热冲压零部件可以显著减小车体自重, 同时能够提高抗冲击性能^[2]. 但传统热冲压钢(如 22MnB5)的显微组织为马氏体, 强度高但断后伸长率较差, 其强塑积通常不超过 9 GPa%, 尚不能满足白车身上某些重要结构件对防撞性能的要求. 课题组近期开发的先进热冲压钢为由马氏体基体和在其中弥散分布的膜状残余奥氏体相组成的复相钢, 具有优异的综合力学性能, 其强塑积可达 20 GPa% 以上^[3]. 但是目前对此新钢种的焊接, 特别是点焊的性能和工艺还知之不多. 点焊工艺一般需要确定焊接电流、焊接时间、电极压力等参数; 合理的选择这些参数对于制定焊接工艺十分必要^[4-7]. 采用回归正交设计组合试验方法对一种先进热冲压钢的点焊工艺进行试验研究.

1 试验方法

点焊试验的材料为自制的, 编号为 98 号的先进热冲压钢, 其化学成分如表 1 所示. 试验钢经多道次热轧和冷轧被轧成厚度为 1 mm 的薄钢板. 点焊

试样按照国家标准 GB2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》所规定的点焊接头抗剪试样形状和尺寸的要求制作, 具体尺寸如图 1 所示.

表 1 试件化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of the tested steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B	Al	N
0.21	1.0	0.35	0.005	0.003 3	0.8	0.22	0.003	0.494	0.003 7

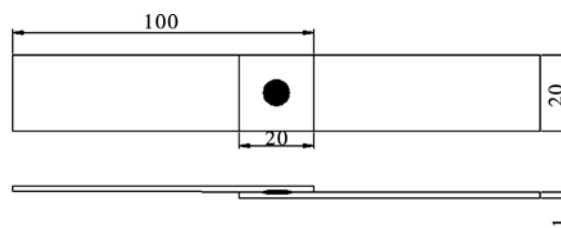


图 1 点焊工件形状及尺寸(mm)

Fig. 1 Shape and the sizes of the specimen

将试样搭接后进行电阻点焊试验. 点焊设备采用骏腾发公司的 DTN-35 微机气动式交流点焊机, 设备装置如图 2 所示, 此点焊机采用 VB-0.12/8 型空气压缩机作为压力源. 电极采用锥形电极, 其材料为铬锆铜合金, 电极端头直径为 5 mm.

为检验点焊质量, 使用拉伸试验机测量焊后试样焊点的最大剪切力, 并对拉断试样进行断面扫描, 通过软件测量点焊熔核直径, 典型点焊熔核结构如图 3 所示.



图 2 点焊装置
Fig. 2 Resistance spot welder



图 3 点焊熔核结构图
Fig. 3 Construction of nugget

2 试验设计

根据点焊特点选取三元二次非线性回归正交组合方法进行试验设计,分别以点焊接头最大剪切力和点焊熔核直径为目标量,以焊接电流、焊接时间和电极力为工艺参数建立回归数学模型.采用回归正交设计安排试验,不仅试验点上的数据含有较多的信息,而且可显著减少试验次数,并消除回归系数间的相关性,使回归方程的建立和统计检验大大简化.正交组合设计试验由三类试验点组成,选择 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,考虑三个工艺参数变化,共计 9 次试验.不同水平对应的数值见表 2.为提高结果准确性,每种试验重复 4 次,然后分别计算熔核尺寸与

表 2 因子水平编码
Table 2 Factor level encode

自然变量	焊接电流 I/kA	焊接时间 t/s	电极力 F_w/kN
基准水平	6	8	2.1
变化区间	0.5	1	0.2
上水平(+1)	6.5	9	2.3
下水平(-1)	5.5	7	1.9

点焊接头最大剪切力平均值.

3 试验结果及讨论

3.1 回归模型的建立

焊接电流、焊接时间和电极力等 3 个工艺参数分别用 x_1, x_2, x_3 表示.点焊接头最大剪切力和点焊熔核直径两个目标量分别用 y_1 和 y_2 表示.其正交试验测试数据如表 3 所示.

表 3 正交试验数据表
Table 3 Data of orthogonal experiment

焊接电流 x_1	焊接时间 x_2	电极力 x_3	熔核直径 y_2	最大剪切力 y_1
I/kA	$t/(\text{周波})$	F_w/kN	d/mm	F_τ/kN
5.5	7	1.9	4.260	6.602
5.5	8	2.1	2.475	2.443
5.5	9	2.3	2.740	3.820
6	7	2.1	3.575	5.433
6	8	2.3	3.425	4.976
6	9	1.9	3.715	7.832
6.5	7	2.3	4.060	5.588
6.5	8	1.9	4.715	9.327
6.5	9	2.1	4.925	9.899

为了准确地描述各个参数变化对点焊性能的影响,建立了二次正交回归数学模型,即

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{i<j}^p b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2 \quad (1)$$

式中: b_0 为二次回归方程中的常数项系数; b_j 是回归方程中的一次项系数; b_{ij} 为方程中的交叉项系数; b_{jj} 是二次回归方程的平方项系数.

在模型中,需要建立具有 P 个变量的回归方程,文中有三个变量,分别为焊接时间、焊接电流和电极力,所以 $P=3$.三元二次回归方程共有 A 项,其中 $A=1+C_p^1+C_p^2+C_p^3=C_{P+2}^2=10$,所以有 10 个未知系数.模型中的回归系数利用最小二乘法并根据试验数据得到三元二次回归方程如式(3),式(4)所示.为验证回归方程的准确性,借助统计学中的剩余标准差来表示估计值的精度.剩余标准差用 S 表示,它是通过对真实值和估计值之间的差值来表示预报值的精度.其数学关系式可以用式(2)表示.

$$S = \sqrt{\frac{Q}{f_Q}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (2)$$

式中: Q 为残差平方和; f_Q 为残差自由度.
将熔核直径各种类型回归模型的剩余标准差进行对比(表 4),剩余标准差越小的回归模型越精确.

从比较结果可得,完全二次模型的剩余标准差最小,所以应该建立完全二次模型.其模型统计检验 R^2 的值为 0.985, F 检验值为 40.3, P 值为 0.005 95, 小于 0.05, 说明整体回归方程有统计学意义.

表4 点焊接头熔核直径剩余标准差对比

Table 4 Contrast for residual standard deviation of spot-welding joint nugget diameter

线性	纯二次	交叉	完全二次
1.282 2	1.041 3	1.140 5	1.026 7

焊接接头熔核直径的二次回归方程为

$$y_1 = 144.484\ 8 - 8.329\ 3x_1 - 11.514\ 7x_2 - 71.047\ 5x_3 + 4.384\ 3x_1x_2 + 2.837\ 3x_2x_3 + 3.074\ 5x_1x_3 + 2.843\ 2x_1^2 + 1.871\ 1x_2^2 + 6.761\ 0x_3^2 \quad (3)$$

同时将接头最大剪切力的各种类型回归模型的剩余标准差进行对比(表5),剩余标准差越小的回归模型越精确.从比较结果可得,完全二次模型的剩余标准差最小,所以应该建立完全二次模型.其模型统计检验 R^2 的值为 0.792, F 检验值为 11.5, P 值为 0.008 95 小于 0.05, 说明整体回归方程有统计学意义.焊接接头最大剪切力的二次回归方程为

$$y_2 = 267.790\ 9 + 4.848\ 8x_1 - 33.969\ 4x_2 - 145.863\ 6x_3 + 1.606\ 3x_1x_2 + 1.625\ 4x_1x_3 + 5.341\ 0x_2x_3 - 1.338\ 4x_1^2 + 0.865\ 7x_2^2 + 20.851\ 6x_3^2 \quad (4)$$

表5 点焊接头最大剪切力剩余标准差对比

Table 5 Contrast for residual standard deviation of spot-welding joint shear strength

线性	纯二次	交叉	完全二次
0.051 8	0.023 9	0.031 97	0.005 3

3.2 各因素的相互作用

点焊过程中的焊接电流、焊接时间与电极力不是孤立的变量,而是相互关联的.在点焊过程中,只有调整好合适的焊接电流与焊接时间,并在相应的电极压力作用下才能取得良好的焊接质量.图4为焊接电流、焊接时间及电极力对点焊接头熔核直径的影响.

由图4可见,当电极力 $F_w = 1.9$ 和 $F_w = 2.1$ 时,熔核尺寸随点焊时间减小与焊接电流增大而增大;当焊接电流和焊接时间不变,电极力增大时,熔核尺寸减小;当电极力 $F_w = 2.3$ 时,熔核尺寸随焊接电流的增大和焊接时间增大而增大.这是由于焊接电流增大时,点焊热输入增加,而引起熔核尺寸的增加.

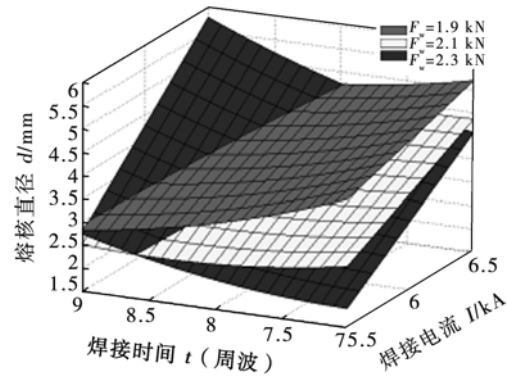


图4 焊接电流、焊接时间和电极力对熔核直径的影响

Fig. 4 Influence of welding time, welding current and electrode pressure on nugget diameter of spot-welding joint

当电极力较小(1.9, 2.1 kN)时,塑性环的生长速度较慢,不能保护熔核内的过热金属,易引起内部喷溅,此时若增加焊接时间,则会增加熔核内部的喷溅量,导致熔核尺寸下降.而当焊接电流和焊接时间不变,电极力增大时,焊接区接触面积增大,总电阻和电流密度均减小,因此焊接热输入减少,同时焊接散热增加,因此熔核尺寸略有下降.而在大的电极力下,若配以大的焊接电流,则能够有效弥补焊接区域热输入的损失,同时避免内部喷溅,导致熔核尺寸明显增大.

图5为焊接电流、焊接时间与电极力对点焊接头最大剪切力的影响.由图5可见,点焊接头最大剪力随点焊参数的变化规律和熔核直径相似.这是由于在点焊接头没有缺陷的情况下,熔核直径的大小可以直接反映出接头的剪切力.熔核尺寸越大,

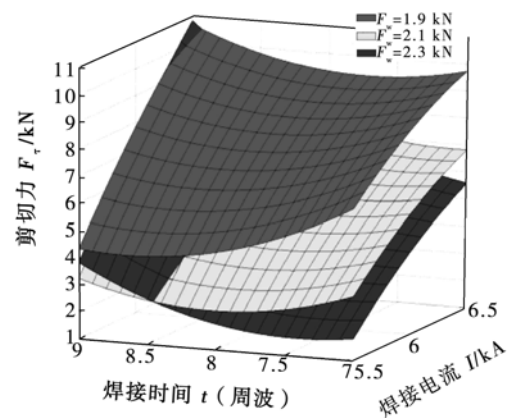


图5 焊接电流、焊接时间与电极力对点焊接头最大剪切力的影响

Fig. 5 Influence of welding time, welding current and electrode pressure on shear strength of spot-welding joint

则试件结合力越强,接头剪切力越大;反之,则接头剪切力越小.

4 结 论

(1) 采用三元非线性正交回归设计将焊接电流、焊接时间与电极力作为独立工艺参数处理,进行因子编码设计,使之应用于点焊试验过程,并以点焊接头熔核直径与剪切力为目标量,建立了回归数学模型.

(2) 建立了先进热冲压钢点焊工艺回归数学模型,分别对点焊熔核直径回归方程与接头最大剪切力数学模型进行了剩余标准差检验,得出了两个完全二次的非线性回归方程.

(3) 利用三维分析的方式绘制了焊接电流、焊接时间与电极力对点焊接头熔核直径与最大剪切力的影响的三维图,研究了不同点焊焊接工艺下焊接接头熔核直径与最大剪切力的变化规律,揭示了焊接工艺过程中各个参数之间的匹配关系.

参考文献:

- [1] 杨海军, 张延松, 来新民, 等. 双相钢点焊熔核界面撕裂失效模式评价[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 62-65.
Yang Haijun, Zhang Yansong, Lai ximing, *et al.* Evaluation on interfacial fracture mode of resistance spot weld dual-phase steels [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 62-65.
- [2] 姜 超, 单忠德, 庄百亮, 等. 热冲压成形 22MnB5 钢板的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(3): 78-81.
Jiang Chao, Shan Zhongde, Zhuang Bailiang, *et al.* Microstructure and properties of hot stamping 22MnB5 steel [J]. Transactions of materials and heat treatment, 2012, 33(3): 78-81.
- [3] 闫 术. 高强塑积 Q&P 钢组织性能研究[D]. 东北大学, 2012.
- [4] 常云龙, 苏 杭, 常荣辉, 等. 熔核尺寸和点焊工艺参数的回归模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(6): 655-658.
Chang Yunlong, Su Hang, Chang Ronghui, *et al.* Regression model between nugget size and processing parameters [J]. Journal of Shenyang University of Technology. 2007, 29(6): 655-658.
- [5] 傅延安, 张 红, 潘 华. 热镀锌双相高强钢电阻点焊点力学性能的研究[J]. 宝钢技术, 2005, (1): 46-49.
Fu Yanan, Zhang Hong, Pan Hua. Research on mechanical behavior of welding spot of high-strength galvanized sheet with dual-phase [J]. Bao-Steel Technology, 2005, (1): 46-49.
- [6] 沈 琦, 李永兵, 陈关龙, 等. 永磁体磁场对双相高强钢电阻点焊质量的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 21-24.
Shen Qi, Li Yongbing, Chen Guanlong, *et al.* Impact of external magnetic field generated by permanent magnet on quality of dual phase high strength steel by resistance spot welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 21-24.
- [7] Park Y J. Quality evaluation by classification of electrode force patterns in the resistance spot welding process using neural networks [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2004, 244(11): 1513-1524.

作者简介: 贺优优, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 讲师. 主要研究新型汽车用钢的焊接工艺. Email: 286908247@qq.com

通讯作者: 刘伟杰, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: wliu@mail.neu.edu.cn