

# 热成形钢点焊接头性能影响因素

王伟峰, 计遥遥, 代朋虎, 周世龙

(马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:** 【目的】为了研究焊接工艺参数对热成形钢点焊接头性能的影响。【方法】采用正交试验方法, 对 22MnB5 热成形钢点焊接头性能进行了试验研究。【结果】单脉冲焊接工艺条件下, 在焊接电流、焊接时间和电极压力 3 个工艺因素中, 焊接电流对点焊接头力学性能的影响程度最大, 电极压力的影响次之, 焊接时间的影响程度较小。最佳的点焊工艺参数组合为焊接电流 8.5 kA, 电极压力 4 kN, 焊接时间 525 ms, 点焊接头的力学性能表现为最好。【结论】热成形钢点焊接头由母材区、回火区、软化区、临界区和熔核区组成, 焊点结合线位置(熔核区)存在严重的应力集中, 是热成形钢焊点失效的危险区域。采用多次脉冲焊接, 末次脉冲小热输入量可以显著降低接头的应力集中, 提升焊点的力学性能。

**关键词:** 热成形钢; 影响因素; 最佳点焊工艺; 多次脉冲焊接

中图分类号: TG453 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20230905004

## Influencing factors of resistance spot welding performance of press-hardened steel

Wang Weifeng, Ji Yaoyao, Dai Penghu, Zhou Shilong

(Technology Center of Ma'anshan Iron and Steel Company, Ma'anshan 243000, Anhui, China)

**Abstract:** [Objective] The purpose is to study influence of welding process parameters on properties of spot welded joints of hot forming steel. [Methods] The orthogonal test is performed for 22MnB5 press-hardened steel. [Results] The order of priority affecting the mechanical properties of spot weld is welding current, electrode pressure and welding time under the condition of single pulse welding process. The best mechanical properties of the welded joint and the good welding quality can be gotten with the best welding parameters, welding current of 8.5 kA, welding time of 525 ms, and electrode pressure of 4 kN. [Conclusion] The press-hardened steel welded joint consists of the BM area, the tempering area, the softening area, the critical area and the nugget area. There is a serious stress concentration at the welding point joint line (nugget zone), which is a dangerous area for the failure of press-hardened steel welding joints. The last pulse small heat input can significantly reduce the stress concentration of the welding joint and improve the mechanical properties of the joint by using multiple pulse welding.

**Key words:** press-hardened steel, influencing factors, best parameters, multiple pulse welding

## 0 前言

随着国内汽车工业的发展, 汽车产量和保有量的增多, 能耗、安全和环境问题逐渐引起人们的关注。热成形钢具有极高的材料强度, 提高了车身的抗碰撞能力和整体安全性, 又能有效的减轻整车重量, 节约能耗, 是轻量化和安全性之间最佳的平衡点<sup>[1-2]</sup>。目前, 电阻点焊是白车身焊装的主要焊接方法, 由于热成形钢添加的合金元素较多, 焊接时极易发生焊

接飞溅, 焊接后易形成复杂的焊区组织分布, 接头质量难以保证<sup>[3]</sup>。因此, 我们开展热成形钢的点焊正交试验, 明确焊接工艺参数对点焊接头质量的影响程度, 并且提供了改善点焊接头性能的焊接工艺优化方案, 为汽车主机厂焊装作业提供参考。

## 1 试验材料和方法

试验材料为某钢厂生产的 1.2 mm 22MnB5 钢板, 材料的化学成分见表 1, 钢板经过热成形后, 性能见

表1 试验材料化学成分(质量分数, %)

Tab. 1 Chemical compositions of tested material (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	B
≤0.30	≤0.50	≤2.00	≤0.025	≤0.008	≤0.30	0.002

表2,热成形后基板显微组织如图1所示,为全马氏体组织。试样尺寸为50 mm×150 mm,采用搭接单点焊方式进行力学性能测试,如图2所示。

表2 试验材料力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of tested materia

厚度 d/mm	屈服强度 $R_{eH}/MPa$	抗拉强度 $R_m/MPa$	断后伸长率 $A_{50}(\%)$
1.2	1 050	1 536	5.86

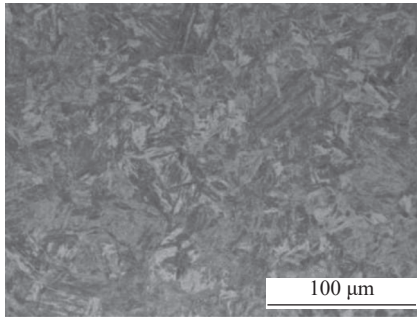


图1 基板微观组织

Fig. 1 Microstructure of tested material

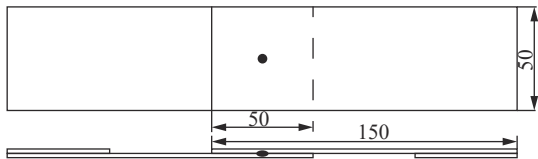


图2 点焊试样规格

Fig. 2 Tensile test specimen of welded joint

点焊设备为DRG-130中频伺服电焊机,使用端面尺寸为 $\phi 6$  mm-R40 mm弧面电极,电极材质为铬锆铜合金,电极形状如图3所示。

根据AWS D8.9M—2012标准<sup>[4]</sup>,采用单脉冲焊接工艺,固定电极压力为3.8 kN,分别在焊接时间350 ms, 438 ms, 525 ms下,增加焊接电流,进行破坏性撕裂试验,如图4(a)所示。从获得满足要求的熔核直径 $D_{min}$ 达到4.38 mm开始,随着焊接电流增加,熔核直径逐渐增加,直到出现焊接飞溅为止,获得对应焊接时间条件下的焊接工艺窗口。获得的焊接工艺窗口范围分别为3.2 kA, 3.2 kA, 3.3 kA,焊接工艺窗口如图4(b)所示。

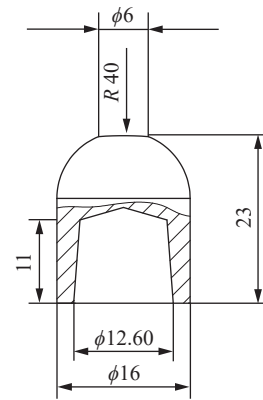


图3 电极规格

Fig. 3 Sketch of welding process

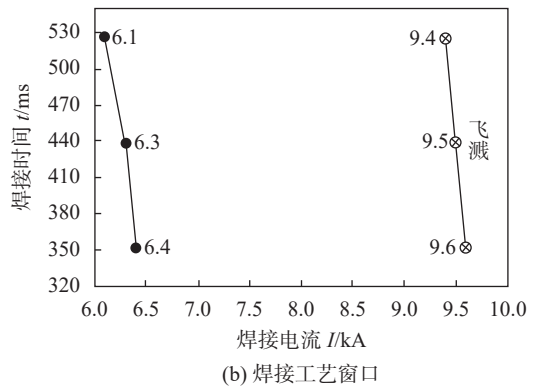
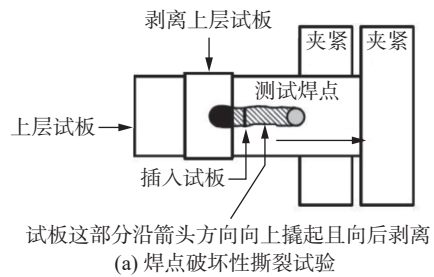


图4 破坏性试验及点焊工艺窗口

Fig. 4 Tearing test and welding lobe. (a) solder joint destructive tearing test; (b) welding lobe

在点焊工艺窗口内采用正交试验法,选取3个主要影响因素,即焊接电流、焊接时间和电极压力,每个影响因素选择3个水平(表3),采用单接头拉剪

表3 焊接工艺参数及水平

Tab. 3 Factor and level of welding parameters

水平	焊接电流(A)I/kA	焊接时间(B)t/ms	电极压力(C)F/kN
1	6.5	350	3
2	7.5	438	4
3	8.5	525	5

峰值载荷作为评价指标。每组焊接工艺制作 3 个试样, 选用正交表  $L_9(3^4)$  工艺参数进行点焊试验。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 极差和方差分析

以单点接头拉剪峰值载荷作为评价指标, 正交试验结果见表 4。其中, 影响因素 A, B, C 分别为焊

接电流、焊接时间和焊接压力,  $F_i(i=1, 2, 3)$  是每组焊接工艺条件下试样的拉剪峰值载荷,  $\bar{F}$  为上述同组工艺下拉剪峰值载荷平均值,  $K_i(i=1, 2, 3)$  表示一列中同一水平焊接工艺下的平均峰值载荷之和,  $k_i=K_i/3(i=1, 2, 3)$  表示上述平均载荷算术平均值,  $\Delta$  表示极差, 是将上述平均载荷算术平均值最大值和最小值之差。

表4 正交试验及极差分析结果

Tab. 4 Result of orthogonal experimental and range analysis

编号	影响因素			拉剪峰值载荷( $F/\text{kN}$ )			
	焊接电流(A) $I/\text{kA}$	焊接时间(B) $t/\text{ms}$	电极压力(C) $P/\text{kN}$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$\bar{F}$
1	6.5(1)	350(1)	3(1)	10.73	10.35	10.46	10.51
2	6.5(1)	438(2)	4(2)	11.78	11.69	11.53	11.67
3	6.5(1)	525(3)	5(3)	11.38	11.12	11.31	11.27
4	7.5(2)	350(1)	4(2)	12.26	12.89	13.36	12.84
5	7.5(2)	438(2)	5(3)	12.22	11.97	11.67	11.95
6	7.5(2)	525(3)	3(1)	12.89	12.96	13.15	13.00
7	8.5(3)	350(1)	5(3)	14.52	14.25	14.17	14.31
8	8.5(3)	438(2)	3(1)	13.82	14.01	13.68	13.84
9	8.5(3)	525(3)	4(2)	15.35	14.85	15.64	15.28
$K_1$	33.45	37.66	37.35	—	—	—	—
$K_2$	37.79	37.46	39.78	—	—	—	—
$K_3$	43.43	39.55	37.54	—	—	—	—
$k_1$	11.15	12.55	12.45	—	—	—	—
$k_2$	12.60	12.49	13.26	—	—	—	—
$k_3$	14.48	13.18	12.51	—	—	—	—
极差 $\Delta$	3.33	0.69	0.81	—	—	—	—
优先顺序		A>C>B		—	—	—	—
优水平	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	—	—	—	—
优水平组合		A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		—	—	—	—

极差分析结果可以直观的比较出此次试验的主要因素。对 22MnB5 热成形材料点焊性能的影响程度由大到小的顺序为焊接电流(A)、焊接时间(B)、电极压力(C), 最优焊接工艺组合为  $A_3B_3C_2$ , 焊接电流为 8.5 kA, 焊接时间为 525 ms, 电极压力为 4 kN。

通过方差分析可以找出对数据起决定性影响的因素, 并作为定量分析判断的依据。方差分析结果见表 5, 查  $F$  表进行显著性检验<sup>[5]</sup>,  $F_A=56.0013 > F_{(2, 2)0.05}=19$ ,  $F_C=4.0845 > F_{(2, 2)0.25}=3$ , 焊接电流(A)因素对试验的影响在 0.05 的显著水平上, 电极压力(C)在 0.25 水

表5 方差分析结果

Tab. 5 Result of variance analysis

项目	自由度 $\delta$	平方和 $S$	$F$ 比	显著性
因素A	2	16.694 0	56.001 3	高
因素B	2	0.886 7	2.974 5	低
因素C	2	1.217 6	4.084 5	低
误差E	2	0.298 1	—	$F_{(2,2)0.05}=19; F_{(2,2)0.10}=9;$ $F_{(2,2)0.25}=3$

平上显著,焊接时间(B)对试验的影响不显著。

电阻点焊利用电流通过接头的接触面及邻近区域产生的电阻热进行焊接的方法,热量是电流和电阻形成的。

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

式中: $Q$ 是热输入量; $I$ 是焊接电流; $R$ 是电阻; $t$ 是焊接时间。电阻由材料自身电阻(恒定值)、电极与钢板间电阻和钢板与钢板之间电阻组成,后者则是由电极压力决定。焊接电流和焊接时间一定时,电极压力越大,电极与钢板间电阻和钢板与钢板间电阻越小,产生的热量越小,形成的焊点直径越小,焊点可以承载的拉剪载荷也较小;电极压力越小,则上述电阻值越大,较大的焊接热输入使焊接过程中熔融金属会突破塑性环而飞溅,带走热量的同时形成了预制缺口,大大降低接头的力学性能,然而在不发生飞溅时,较小的电极压力不足以使硬度很高的基板在焊点处产生塑性变形,从而形成缩松缺陷,也会降低接头的力学性能。因此,热成形钢的点焊,焊接电流影响最大,其次要合理控制电极压力。

### 2.2 熔核直径和断裂模式分析

点焊接头的断裂模式主要有3种:界面断裂IF、纽扣断裂PF和混合断裂模式I&PF<sup>[6]</sup>。

该试验过程中拉剪试验发生IF和PF2种模式,焊点的熔核直径和接头的断裂模式与点焊接头的强度相关,也能反应焊接工艺的选择是否合适。焊点的熔核直径和断裂模式见表6,可见,随着焊接电流的增加,熔核直径呈增大的趋势,焊接电流较小时,多发生界面断裂,焊接电流较大时,点焊接头拉剪试验失效模式为纽扣断裂。

截取断裂接头观察截面形貌,如图5所示。焊接电流为6.5 kA、焊接时间为350 ms、电极压力为3 kN时,拉伸剪切失效模式为界面断裂。发生界面断裂

表6 熔核直径和断裂模式

Tab. 6 Diameter of nugget and failure mode

熔核直径 $D/mm$	断裂模式及对应的数量(个)	
	IF	PF
4.59	3	0
4.88	2	1
5.18	1	2
5.60	0	3
5.65	0	3
5.68	0	3
6.13	0	3
6.06	1	2
6.36	0	3

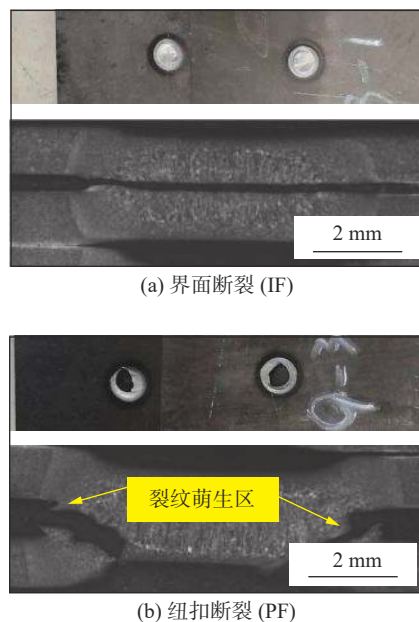


图5 断裂试样宏观形貌和截面形貌

Fig. 5 Macroscopic and sectional morphology of fractured samples. (a) IF; (b) PF

原因主要是由于焊点直径较小,在施加剪切力时,熔核区中心结合面承受的剪切力小于其他区域,裂纹于焊点结合线尖端处萌生,沿焊缝中心扩展至断裂;焊接电流为8.5 kA、焊接时间为525 ms、电极压力为4 kN,拉伸剪切失效模式为纽扣断裂,此时,焊点熔核直径较大,熔核区中心结合面所能承受的剪切力较大,持续加载条件下,焊点结合线尖端至焊点

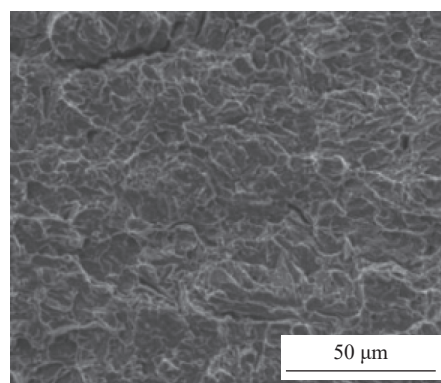
厚度方向抵抗正拉力能力小于其他区域,因此,裂纹萌生于焊点结合线尖端,向熔核区厚度方向扩展,直至接头断裂失效。焊接电流为 8.5 kA、焊接时间为 525 ms、电极压力为 3 kN,拉伸剪切失效会出现界面断裂模式,原因则是焊接热输入量较大,焊点产生飞溅。

观察断口微观形貌,如图 6 所示。界面断裂断口平坦,断口可见大量撕裂棱和解理平面,为脆性断裂断口;纽扣断裂断口分布大小不均匀的韧窝,为韧性断裂断口。

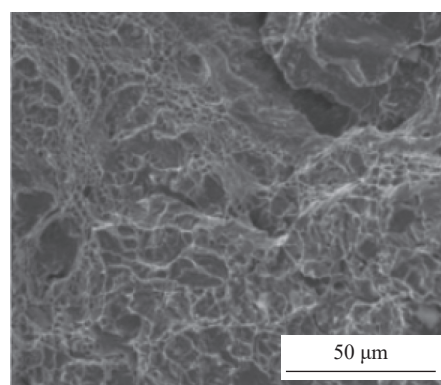
### 2.3 显微组织和显微硬度分析

对上述最优焊接工艺  $A_3B_3C_2$  下的点焊接头进行显微组织和显微硬度分析,如图 7 所示。

焊接接头由 5 个区域组成: a 母材区、b 回火区、c 软化区、d 临界区、e 熔核区。母材区为基板,在 930 °C 保温 4 min,随后模具淬火热处理条件下得到的全马氏体组织。在单个焊接循环里,e 区域焊核中心区温度最高,达到 1 500 °C,在垂直于钢板表面的电极冷却作用下,由钢板表面向焊核中心方向冷却结晶,生成柱状晶,组织为粗大板条马氏体;d 临界区加热温度介于  $A_{c1}$  至母材熔化温度之间,属于过渡区,该区域温度分布导致最终形成不完全重结晶区、细晶区、粗晶区,组织分别为马氏体和少量铁素体、晶粒细小的马氏体、晶粒粗大的马氏体。c 软化区远离焊核中



(a) 界面断裂 (IF)



(b) 纽扣断裂 (PF)

图 6 断口微观形貌

Fig. 6 Fracture morphology. (a) IF; (b) PF

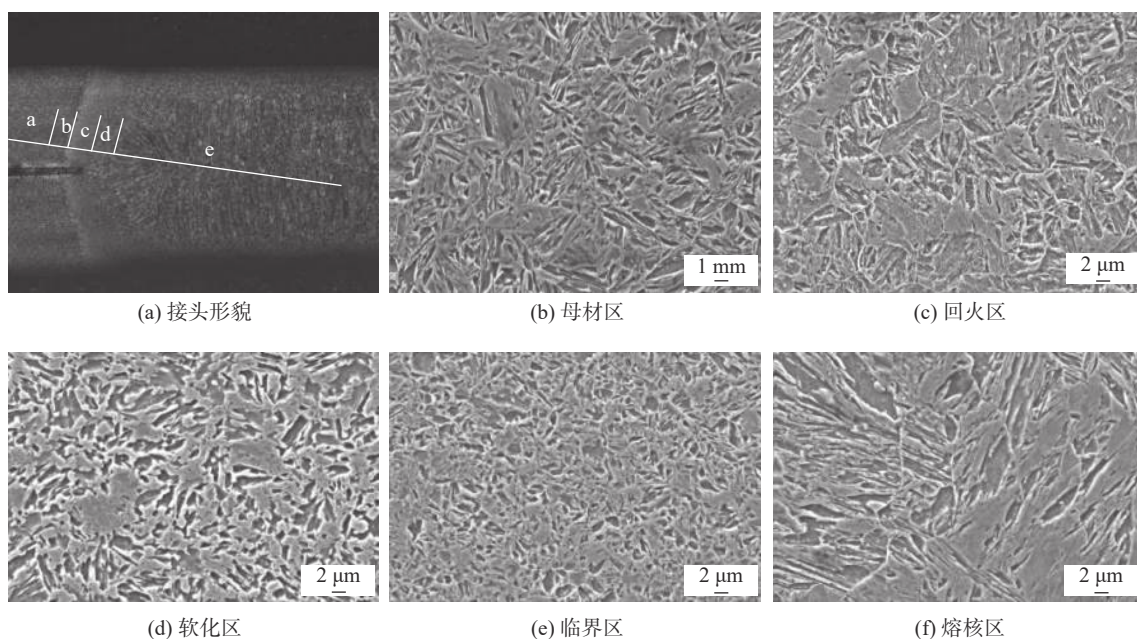


图 7 显微组织形貌

Fig. 7 Microstructure of spot welded joint. (a) morphology of the joint; (b) base metal; (c) tempering zone; (d) softening zone; (e) critical zone; (f) weld nugget

心, 该区域加热时最高温度低于  $A_{c1}$  温度, 由于原始马氏体组织不稳定, 部分马氏体分解为铁素体和碳化物, 最终保留下来的组织为马氏体和铁素体, 生成的铁素体使得该区域的显微硬度明显下降。b 回火区加热温度在  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 发生马氏体回火, 生成回火马氏体组织。

从母材开始沿图 7(a) 所示方向进行显微硬度分布测试, 结果如图 8 所示。热成形钢点焊接头的硬度分布极其不均, 母材区显微硬度值约为  $490\text{ HV}$ , 焊核区显微硬度值约为  $510\text{ HV}$ , 软化区硬度最低, 临界细晶区显微硬度最高, 如图 5 和图 7 所示, 结合线位置(熔核区)的显微组织是脆硬马氏体, 存在严重的应力集中, 是热成形钢焊点失效的危险区域。

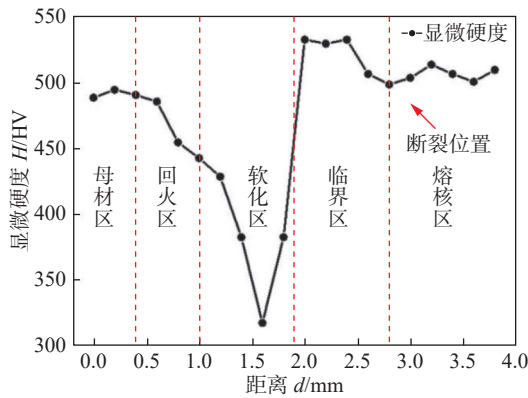


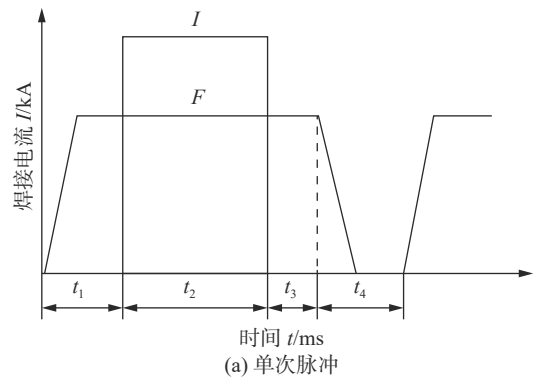
图 8 焊点显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution of welded point

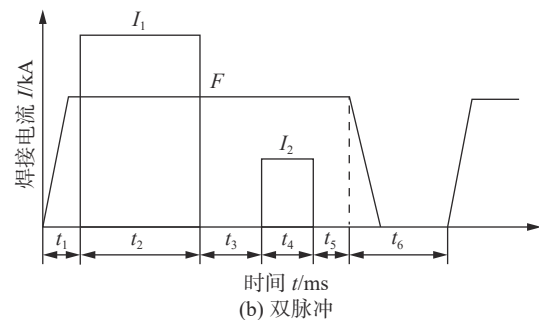
### 3 讨论

热成形钢采用单脉冲焊接时, 进行破坏性试验, 断裂位置总是位于焊点硬度较高的焊核区, 而不是硬度较低的回火区和软化区, 导致点焊接头的强度和韧性均较差。因此在焊接过程中应该施加焊后低热输入量的回火脉冲, 削弱点焊接头在焊核位置的应力集中问题。在最佳焊接工艺  $A_3B_3C_2$  基础上施加多次脉冲, 如图 9 所示。

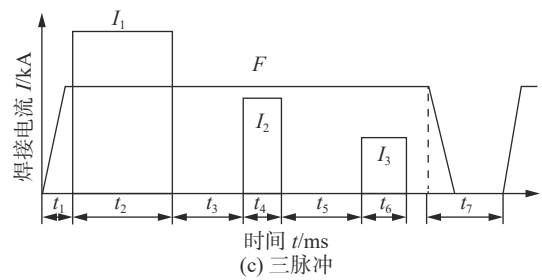
施加双脉冲, 第二次脉冲采用低热输入量, 施加三脉冲, 第二次脉冲电流略低于首次脉冲, 第三次脉冲仍然采用低热输入量。三脉冲方案控制整体热输入量, 使焊点不发生飞溅, 熔核直径略大于双脉冲方案。因此, 双脉冲和三脉冲的破坏性试验, 断裂位置位于热影响区, 且力学性能得到大幅提升, 如图 10 和图 11 所示。



(a) 单次脉冲



(b) 双脉冲



(c) 三脉冲

图 9 焊接工艺

Fig. 9 Welding parameters. (a) single pulse; (b) two pulses; (c) three pulses

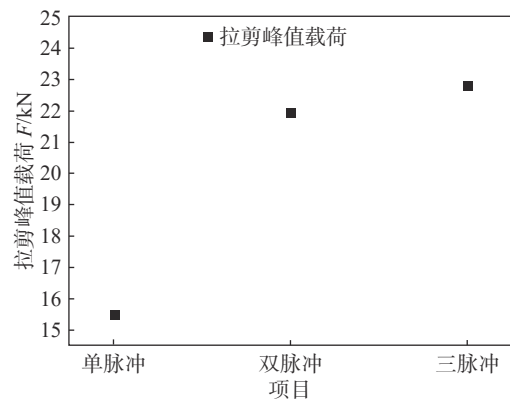


图 10 点焊接头拉剪峰值载荷

Fig. 10 Peak load of spot welded joints TSS



图 11 点焊接头破坏性试验形貌

Fig. 11 Destructive experimental sketch of spot welded joints

#### 4 结论

(1)热成形钢采用单脉冲焊接工艺,焊接电流对点焊接头力学性能的影响程度最大,电极压力的影响次之,焊接时间的影响程度最小。1.2 mm 22MnB5热成形钢点焊的最佳工艺参数组合为焊接电流 8.5 kA,电极压力 4 kN,焊接时间 525 ms,点焊接头的力学性能表现为最好。

(2)单脉冲焊接工艺条件下,热成形钢点焊接头断裂位置位于熔核区,纽扣断裂试样断口为韧性断裂断口,界面断裂试样断口平坦,为脆性断裂断口。

(3)热成形钢点焊接头由母材区、回火区、软化区、临界区和熔核区组成,软化区硬度最低,结合线位置(熔核区)存在严重的应力集中,是热成形钢焊点失效的危险区域。

(4)采用点焊多脉冲且末次脉冲低热输入量焊接工艺设计,可以显著降低接头的应力集中,提升焊点的力学性能。

#### 参考文献

- [1] 康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排 [J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1-7.  
Kang Yonglin. Lightweight vehicle advanced high strength

steel and energy-saving and emission reduction[J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(6): 1-7.

- [2] 马宁, 申国哲, 张宗华, 等. 高强度钢板热冲压材料性能研究及在车身设计中的应用 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 60-65.  
Ma Ning, Shen Guozhe, Zhang Zonghua, et al. Material Performance of Hot-forming High Strength Steel and Its Application in Vehicle Body[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 60-65.
- [3] 陈树君, 于洋, 王超, 等. 超高强马氏体钢中频、电伺服点焊技术 [J]. 电焊机, 2010, 40(5): 70-73.  
Chen Shujun, Yu Yang, Wang Chao, et al. Study on spot welding of UHSS using IF inverter & servo welding gun system[J]. *Electric Welding Machine*, 2010, 40(5): 70-73.
- [4] AWS D8.9M-2012. Test methods for evaluating the rsw behavior of automotive sheet steel materials[S]. America: American Welding Society, 2012.
- [5] 全国统计方法应用标准化技术委员会 GB/T 4086.4—83. 统计分布数值表 F 分布 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1983.  
Application of Statistical Methods. GB/T 4086.4-83 Table for statistical distributions F-distribution[S]. National bureau of standards, 1983.
- [6] Dancette S, Fabregue D, Massardier V. Experimental and modeling investigation of the failure resistance of advanced high strength steels spot welds[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011(78): 2259-2272.

- 第一作者: 王伟峰, 硕士, 工程师; 主要从事汽车用钢焊接应用技术研究工作; 已发表论文 10 余篇, 已授权发明专利 4 项; [877795074@qq.com](mailto:877795074@qq.com)。
- 通信作者: 计遥遥, 硕士, 高级工程师; 主要从事汽车用钢焊接技术研究; [jyiy@baosteel.com](mailto:jyiy@baosteel.com)。

(编辑: 曲畅)

#### 本文引用格式:

王伟峰, 计遥遥, 代朋虎, 等. 热成形钢点焊接头性能影响因素[J]. 焊接, 2024(10): 67-73.

Wang Weifeng, Ji Yaoyao, Dai Penghu, et al. Influencing factors of resistance spot welding performance of press-hardened steel[J]. *Welding & Joining*, 2024(10): 67-73.