

本文参考文献引用格式:刘全龙,孔谅,王敏,等. Q&P980CR 钢电阻点焊工艺优化[J].电焊机,2019,49(08):23-29.

Q&P980CR 钢电阻点焊工艺优化

刘全龙^{1,2}, 孔 谅^{1,2}, 王 敏^{1,2}, 雷 鸣³

(1.上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室,上海 200240;2.高新船舶与深海开发装备协同创新中心,上海 200240;3.宝钢研究院汽车用钢研究所 宝山钢铁股份有限公司,上海 201900)

摘要:研究了常规焊接工艺方法下 Q&P980CR 钢的电阻点焊,因 Q&P980 母材碳当量过高,焊后接头淬硬组织多,焊点塑性差,导致其焊点拉剪试验呈界面断裂。提出了附加后热电流脉冲的优化方案,基于 SORPAS 数值模拟研究后热脉冲焊接电流、焊接时间对点焊接头 t_{85} 段冷却速率的影响,确定了优化工艺参数。实验结果表明,附加后热电流脉冲提高了点焊接头的拉剪强度和正拉强度,接头失效模式由界面断裂转变为熔核剥离,说明后热电流脉冲有效降低了点焊接头冷速,提高了点焊接头韧性。

关键词: Q&P 钢电阻点焊;数值模拟;工艺优化;后热电流脉冲

中图分类号: TG453+.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-2303(2019)08-0023-07

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2019.08.04

Q&P980CR steel resistance spot welding process optimization

LIU Quanlong^{1,2}, KONG Liang^{1,2}, WANG Min^{1,2}, LEI Ming³

(1.Shanghai Key Laboratory of Material Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China; 3.Baosteel Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: In this paper, the resistance spot welding of Q&P980CR steel under conventional welding parameters is studied. Due to the high carbon equivalent of Q&P980 base metal, the joints contain much hardening structure and manifest poor plasticity, resulting in interface fracture in the tensile-shear tests. Thus, the optimization scheme with the additional postheat current pulse is put forward. Based on SORPAS numerical simulation, the influence of the postheat pulse welding current and welding time on the cooling rate of section- t_{85} of the welding joints is studied, and the optimized welding parameters are determined. The experimental results show that the postheat current pulse increases the tensile-shear strength and cross-tension strength of the welding joints, and the failure mode of the joints changes from interface fracture to pullout fracture, indicating that the postheat current pulse effectively reduces the cooling rate and improves the toughness of the welding joints.

Key words: resistance spot welding of Q&P steel; numerical simulation; process optimization; postheat current pulse

0 前言

Q&P 钢经淬火配分(Quenching and Partitioning,

收稿日期:2019-04-04

作者简介:刘全龙(1991—),男,硕士,主要从事先进高强钢电阻点焊方面的研究。E-mail:lqlsytu@163.com。

通讯作者:孔 谅,男,副研究员。E-mail:ingerkongliang@sytu.edu.cn。

Q&P)工艺处理,室温组织主要由马氏体、铁素体和残余奥氏体的复合相组成,兼具高强度和良好成形性,成为汽车结构件的极佳选择^[1]。在汽车制造业中,电阻点焊具有生产效率高、易于实现自动化等优点,是汽车车身结构件连接中应用最为广泛的工艺方法。在无镀锌层 Q&P 钢点焊工艺对接头性能影响的研究中发现,由于熔核区存在马氏体组织,其维氏(HV)

硬度远大于母材;焊点的静态拉剪断裂为 IF,而静态正拉断裂为 PF^[4-5]。镀锌 Q&P 钢的电阻点焊中存在液态金属脆化(LME)裂纹现象,可能诱发整车潜在运行风险^[3,7]。因此,开展 Q&P 钢电阻点焊的工艺和性能优化研究,对进一步推进 Q&P 的广泛应用具有重大意义。

Q&P 钢母材的碳当量较高,其点焊工艺特性、焊点性能特征与普通低碳钢相比差异很大,接头的淬硬组织较多,从而导致其焊点塑性较差,严重影响焊点的力学性能,制约了其在车身制造中的实际应用^[6]。在超高强度钢的电阻点焊可焊性研究试验中,采用焊后回火工艺:即第一个焊接脉冲进行点焊连接,第二个脉冲进行焊后回火,将焊件重新加热再冷却,能够消除部分内应力,并改善高强钢接头处的组织和性能,达到细化晶粒、提高接头强度和韧性的目的^[9-10]。采用回火脉冲,是在焊接后焊接区域的温度降到马氏体转变温度以下后,再通电进行二次加热和保温才能实现原子的扩散和组织转变,所需时间较长,势必影响点焊的作业节拍和生产效率。

本文重点研究采用点焊后的二次加热时间更短的后热脉冲电流,结合数值模拟分析 Q&P 钢点焊的后热脉冲电流对焊点性能的影响规律。

1 试验方法

试验选用 1.2 mm 厚 Q&P980CR 钢板,其化学成分及力学性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 Q&P980 钢板的化学成分

Table 1 Chemical component of Q&P 980 steel %

$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{C})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Cr})$
1.935 2	1.592 7	0.263	0.095 4	0.047 9
$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Fe})$	
0.036 7	0.018 5	0.015 8	余量	

表 2 Q&P980 钢板的力学性能

Table 2 Mechanical property of Q&P980 steel

屈服强度	抗拉强度	断裂伸长率	均匀伸长率	加工硬化
σ_s/MPa	σ_t/MPa	$A/\%$	$l_0/\%$	指数 n
679	967	20.6	15.1	0.14

焊接钢板使用酒精进行超声清洗,以除去灰尘、油污、金属颗粒物等杂质,晾干后将钢板试样放入预制夹具中以保证钢板位置正确、焊点位置固定。

采用直流中频逆变点焊机,点焊电极为端面直

径 6 mm 的 CrZrCu 平面电极,加压模式为伺服加压。焊接完成后采用万能材料试验机对试样进行拉剪试验,加载速率 10 mm/min,采用游标卡尺测量熔核尺寸并取平均值,通过体视显微镜观察断口宏观形貌。采用金相显微镜观察焊点横截面金相组织,并利用自动硬度计测量组织的微观硬度。

2 实验结果与分析

2.1 常规焊接参数下的焊点性能

经多组探索性工艺试验,在飞溅且熔核直径满足 $4\sim 6\sqrt{t}$ (t 为母材板厚)的条件下,获得常规点焊工艺方法的参数范围。当电极压力 $F=4\text{ kN}$ 、焊接时间 $t=300\text{ ms}$ 时,改变焊接电流,得到焊点的拉剪强度(tensile-shear strength, TSS)、正拉强度(cross-tensile strength, CTS)和熔核尺寸随电流变化曲线如图 1 所示,焊点接头的延性比(CTS/TSS)随焊接电流的变化如图 2 所示,点焊接头拉剪断裂模式如表 3 所示。焊接时间及焊接压力对拉剪强度及熔核直径的影响如图 3、图 4 所示。

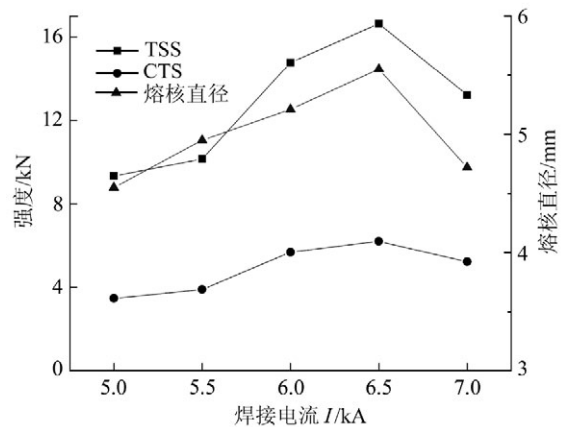


图 1 接头拉剪强度、正拉强度和熔核直径随焊接电流的变化
Fig.1 Variation of tensile-shear strength and nugget diameter of welding joint with welding current

采用常规点焊工艺方法时,Q&P 钢电阻点焊的焊点性能与焊接参数之间的关联规律与其他高强钢类似,即在一定范围内,拉剪强度和熔核直径随焊接电流增大而增大,焊接电流对接头力学性能和熔核尺寸影响最大,电极压力影响最小。

由于 Q&P980 母材碳当量过高,焊后接头淬硬组织多,焊点塑性差,导致其焊点拉剪试验呈界面断裂。界面断裂是低延性断裂,被认为是最差的断裂失效模式,在实际应用中必须避免。

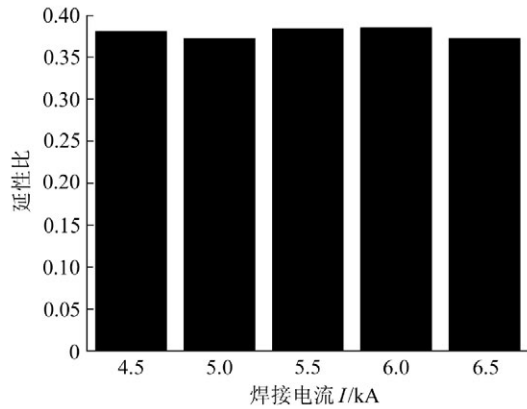


图 2 焊点接头延性比随焊接电流的变化

Fig.2 Variation of CTS/TSS of weld joint with welding current

表 3 Q&P 钢电阻点焊接头拉剪断裂模式

Table 3 Tensile–shear failure mode of Q&P steel spot welding joint

焊接电流 I/kA	熔核直径 /mm	拉剪力 /kN	拉剪断裂模式
5.0	4.55	9.336	IF
5.5	4.95	10.150	IF
6.0	5.21	14.766	IF
6.5	5.55	16.631	IF
7.0	4.72(飞溅)	13.211	IF

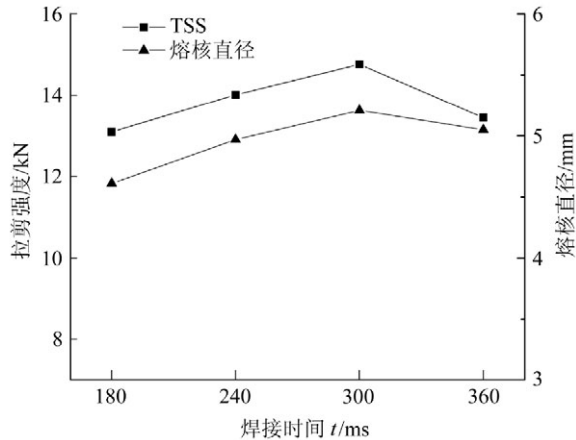


图 3 焊接时间对拉剪强度及熔核直径的影响

Fig.3 Variation of tensile–shear strength and nugget diameter with welding time

2.2 基于模拟的点焊工艺参数优化设计

利用 SORPAS 点焊模式软件模拟 Q&P 钢点焊过程温度场,采用典型常规点焊参数时(焊接电流 6.5 kA、电极压力 4 kN、焊接时间 300 ms)Q&P 钢点焊接头所选节点处的热循环曲线如图 5 所示。

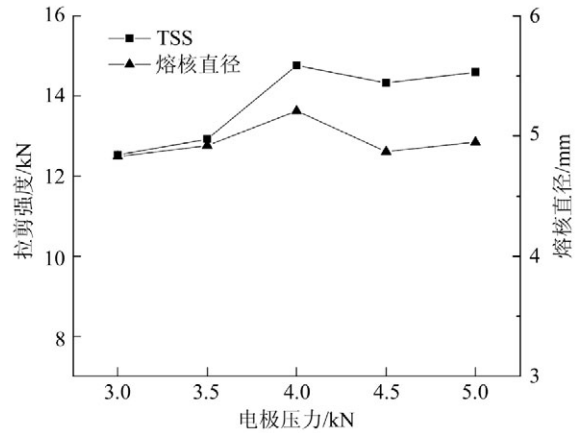


图 4 电极压力对拉剪强度及熔核直径的影响

Fig.4 Variation of tensile–shear strength and nugget diameter of with electrode force

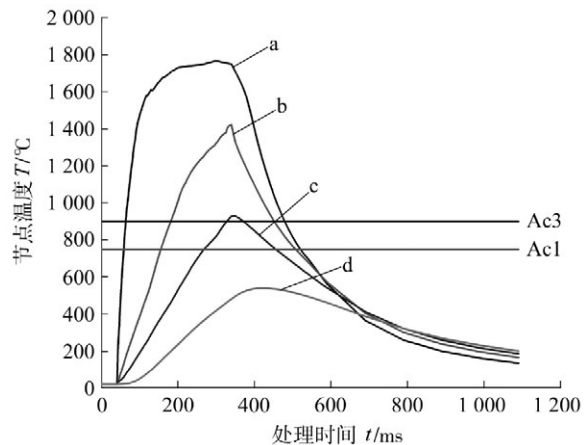
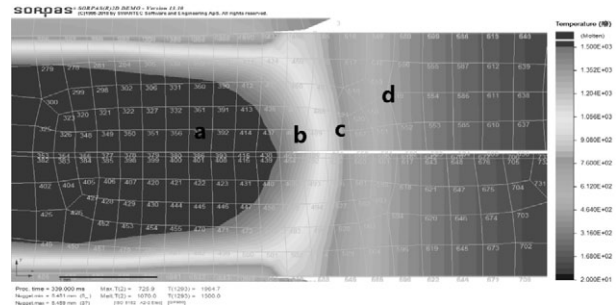


图 5 点焊接头不同区域热循环曲线

Fig.5 Thermal cycle curves in different zone of welding joint

由图 5 可知,a 点接近熔核中心,b 点在熔核边缘,c 点位于热影响区(HAZ)内,d 点在热影响区外。a 点的最高加热温度超过 Q&P 钢熔点,冷却后位于熔核内。b,c 点在整个加热过程中均未超过焊件熔点,但超过 Q&P 钢的 Ac3 温度(901 °C),在加热过程中会完全奥氏体化,在冷却过程中会形成板条状马氏体。b 点相对于 c 点加热温度更高,奥氏体晶粒

也显著增大,故冷却至室温后形成的板条状马氏体也较为粗大。d 点由于距离熔核中心太远,在整个热循环过程中最高温度未超过 Q&P 钢的 Ac1 温度(749 ℃),因此该区域在加热过程中未发生奥氏体化。

Q&P980 母材碳当量过高,焊后接头淬硬组织多,焊点塑性差,是造成其焊点容易出现界面断裂的主要原因。由于 Q&P980 钢板电阻点焊过程是连续变温转变过程,故需分析其连续冷却转变曲线。

Q&P980 钢的连续冷却转变(CCT)曲线如图 6 所示。可以看出,高温奥氏体在点焊通电结束后的冷却过程中,不同冷却速率下会形成不同的组织相;点焊接头的冷却速率将会对点焊接头最终组织以及接头力学性能产生影响,由于电阻点焊焊后处于高速冷却状态,将全部生成无扩散相变的马氏体组织。

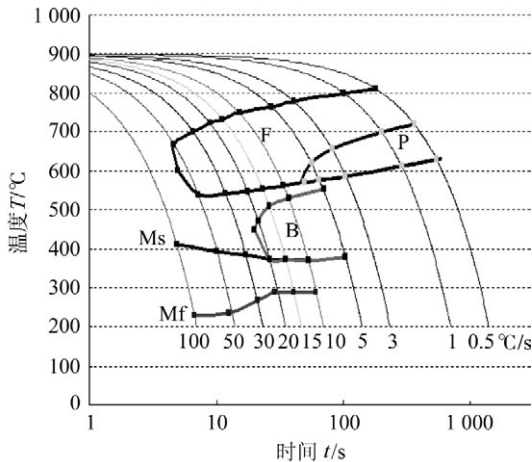


图 6 Q&P980 钢的连续冷却转变(CCT)曲线
Fig.6 CCT diagram of Q&P980 steel

改善 Q&P 钢电阻点焊性能的关键是优化常规焊接工艺,调整焊后的冷却速率。已有的超高强钢点焊研究中提出,利用回火处理脉冲将焊件重新加热再冷却能够消除部分内应力,并改善高强钢接头处的组织和性能,但由于回火处理需在焊接电流脉冲结束后冷却较长时间,且出于保温需要,回火脉冲时间也需较长,而在实际应用中,每个焊点的焊接时间有限,导致回火脉冲的操作在生产应用中受到局限。

本研究的思路是:在焊接过程中增加后热脉冲,以降低接头冷却速度,特别是控制焊点接头熔核区 $t_{8/5}$ 段(点焊接头从 800 ℃冷却至 500 ℃所用时间)冷却速率,以减少淬硬组织生成。后热脉冲电流模式如图 7 所示,通过在主电流脉冲之后附加后热脉

冲/缓冷脉冲,降低接头冷却速度,从而达到改善组织和性能的目的。

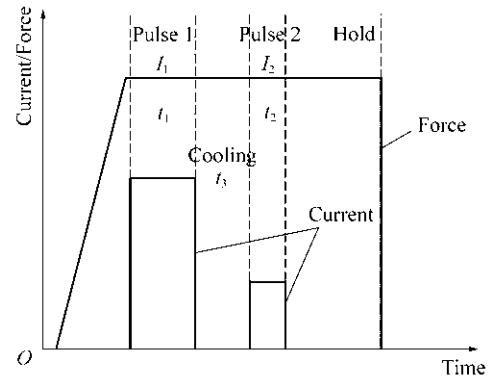


图 7 后热脉冲电流模式示意

Fig.7 Schematic view of current mode of postheat pulse

2.2.1 后热电流 I_2 对冷却速率的影响

固定焊接主电流脉冲(第一个脉冲 pulse1)工艺参数: $I_1=6.5$ kA、 $t_1=300$ ms 和 $F=4$ kN,取固定冷却时间 $t_3=200$ ms,后热脉冲焊接时间 $t_2=100$ ms,研究后热脉冲电流 I_2 对焊点接头 $t_{8/5}$ 段冷却速率的影响。不同后热脉冲焊接电流 I_2 时熔核中心温度变化曲线如图 8 所示。

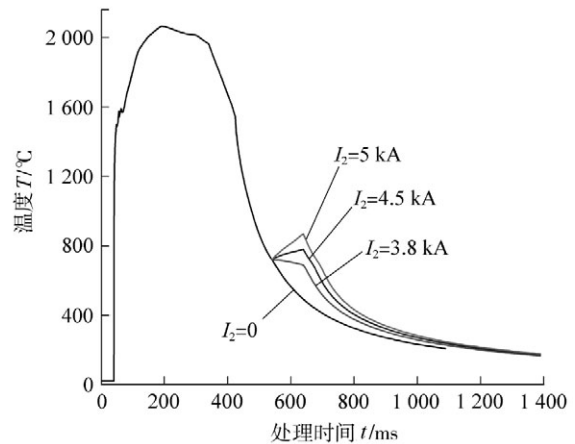


图 8 后热电流脉冲规范下熔核中心温度随后热脉冲焊接电流 I_2 变化曲线

Fig.8 Temperature variation curves of nugget central section with postheat current impulses

由图 8 可知,点焊过程中不附加后热电流脉冲时,焊点接头区域在 800~500 ℃温度范围内快速冷却,热循环曲线呈持续下降态势;施加后热电流脉冲后,由于二次电流脉冲所带来的热输入抑止了点焊接头的冷却势头,如图中后热电流 I_2 为 3.8 kA 时,点焊接头熔核区域温度变化曲线表现为一段平缓平台,温度下降变得缓慢,在后热电流脉冲结束

后,点焊接头温度又进入快速下降状态。当继续增大后热电流时,由于热输入量增加,点焊接头熔核区域温度略微升高,但仍远远低于 Q&P 钢熔点。

后热电流脉冲对点焊接头 $t_{8/5}$ 段停留时间以及冷却速率的影响如表 4 所示。可以看出,当在点焊过程中施加后热电流脉冲时,点焊接头熔核区域在 $t_{8/5}$ 段停留时间相较于不附加后热电流脉冲(单电流脉冲)较明显增加,点焊接头熔核区域的 $t_{8/5}$ 段冷却速率则相应明显减慢,这可以有效减少淬硬组织的生成,从而达到改善点焊接头微观组织以及性能的目的。

表 4 后热电流脉冲对点焊接头 $t_{8/5}$ 段停留时间以及冷却速率的影响

Table 4 Variation of residence time during section- $t_{8/5}$ and cooling rate with postheat pulse welding current

后热电流脉冲 I_2/kA	$t_{8/5}$ 段停留时间 t/ms	平均冷却速率 $v/^\circ C \cdot s^{-1}$
0	120	2 500
3.8	192	1 563
4.5	220	1 364
5.0	242	1 240

2.2.2 后热脉冲焊接时间 t_2 对冷却速率的影响

固定焊接主电流脉冲(第一个脉冲 pulse1)工艺参数: $I_1=6.5 kA$ 、 $t_1=300 ms$ 和 $F=4 kN$,取 $t_3=200 ms$ 、 $t_2=4.5 kA$,研究后热脉冲焊接时间 t_2 对点焊接头 $t_{8/5}$ 段冷却速率的影响。不同后热脉冲焊接时间 t_2 时熔核中心温度变化曲线如图 9 所示,后热脉冲焊接时间 t_2 对点焊接头 $t_{8/5}$ 段停留时间以及冷却速率的影响如表 5 所示。由图 9 和表 5 可知,随着后热电流脉冲焊接时间的增加,点焊接头熔核区域在 $t_{8/5}$ 段冷却过程中的停留时间逐渐延长,冷却速率逐渐降低。后热脉冲焊接时间的延长有利于降低点焊接头的冷却速率以减少接头淬硬性组织的生成,但考虑到实际生产应用中整个焊接周期不宜过长,因此后热脉冲时间也不宜过长。

2.3 后热电流脉冲优化工艺对点焊接头性能的影响

对 Q&P980 钢板进行焊接实验,取相同的基础焊接工艺参数: $I_1=6.5 kA$ 、 $t_1=300 ms$ 和 $F=4 kN$,验证后热脉冲工艺的 I_2 、 t_2 等参数对点焊接头性能的影响。

2.3.1 后热脉冲电流 I_2 对点焊接头性能的影响

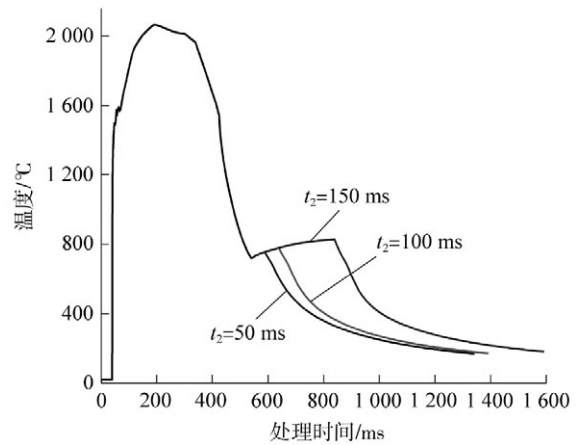


图 9 后热电流脉冲规范下熔核中心温度随后热脉冲焊接时间变化曲线

Fig.9 Temperature variation curves of nugget central section with postheat welding time

表 5 后热脉冲焊接时间 t_2 对点焊接头 $t_{8/5}$ 段停留时间以及冷却速率的影响

Table 5 Variation of residence time during section- $t_{8/5}$ and cooling rate of the joints with postheat pulse welding time

后热脉冲焊接时间 t_2/ms	$t_{8/5}$ 段停留时间 t/ms	平均冷却速率 $v/^\circ C \cdot s^{-1}$
0	120	2 500
50	169	1 775
100	220	1 364
150	425	706

取 $t_3=200 ms$ 、 $t_2=100 ms$,不同后热脉冲电流 I_2 对点焊接头性能的影响如表 6、图 10 和图 11 所示。

表 6 后热脉冲焊接电流 I_2 对焊点接头力学性能影响
Table 6 Variation of mechanical properties of the joints with postheat pulse welding current

实验组号	后热电流 I_2/kA	拉剪强度 $/kN$	拉剪断裂模式	正拉强度 $/kN$
1(单脉冲)	0	16.631	IF	6 200
2	3.8	17.229	BF	8 586
3	4.5	19.291	BF	7 514

在相同基础焊接工艺参数下,与常规点焊工艺方法相比,附加后热脉冲后拉剪强度有所提升;当后热电流 $I_2=4.5 kA$ 时,达到最大拉剪力值 19.291 kN,相较于常规点焊工艺,拉剪强度提高了 16.0%。附加后热脉冲后,接头正拉强度明显提升,当后热电流 $I_2=3.8 kA$ 时,点焊接头正拉力达到最大值 8 586 N,相较于单脉冲(无后热电流脉冲)情况下,正拉强度

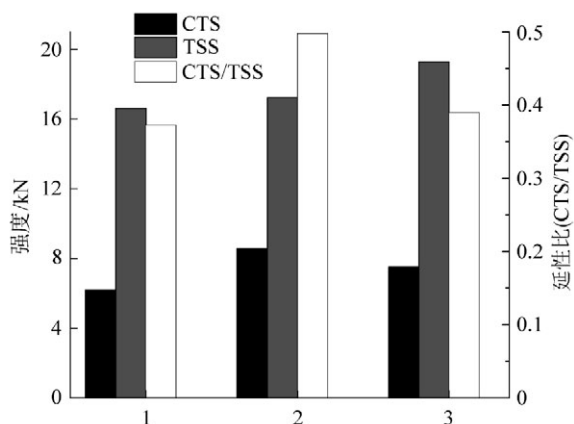


图 10 焊点力学性能随后热电流的变化

Fig.10 Variation of mechanical properties of Inverter welding joint with postheat current

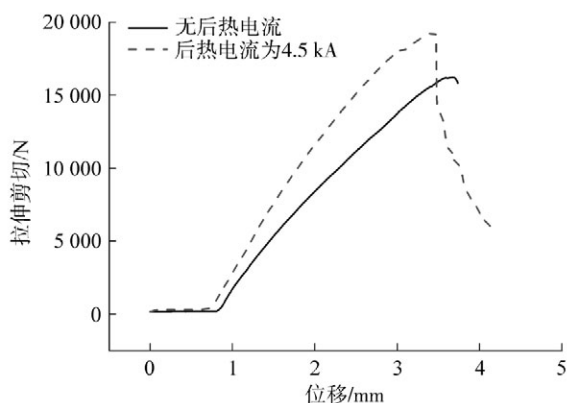


图 11 后热电流作用下焊点拉剪曲线

Fig.11 Tensile-shear curves under different postheat current

提高了 38.5%。加入后热脉冲后,接头延性比明显提高,尤其当后热电流 $I_2=3.8\text{ kA}$ 时,延性比接近于 0.5。由此可见,后热脉冲工艺有效减少了点焊接头淬硬性组织的生成,提高了点焊接头的塑性性能。

由图 11 可知,增加后热电流脉冲后,Q&P 钢点焊接头失效模式由界面断裂变为熔核剥离,说明后热电流脉冲提供的热输入有效降低了点焊接头冷却速,提高了点焊接头韧性。

2.3.2 后热脉冲时间 t_2 对点焊接头性能的影响

取 $t_3=200\text{ ms}$, $I_2=4.5\text{ kA}$,不同后热脉冲焊接时间 t_2 对点焊接头性能的影响如表 7 和图 12 所示。

固定主脉冲 pulse1 焊接参数不变,由于后热脉冲 pulse2 带来的热输入影响,点焊接头拉剪强度常规点焊工艺相同参数情况下有所提升。当后热脉冲焊接时间 t_2 为 200 ms 时,点焊接头达到最大拉剪力值 19.657 kN,相较于单脉冲(无后热电流脉冲)情

表 7 后热脉冲工艺下后热脉冲焊接时间 t_2 对焊点接头力学性能影响

Table 7 Variation of mechanical properties of the joints with postheat pulse welding time

实验组号	t_2/ms	拉剪强度 /kN	拉剪断裂模式
1(单脉冲)	0(无后热脉冲)	16.631	IF
2	50	19.564	BF
3	100	19.291	BF
4	150	19.007	BF
5	200	19.657	BF

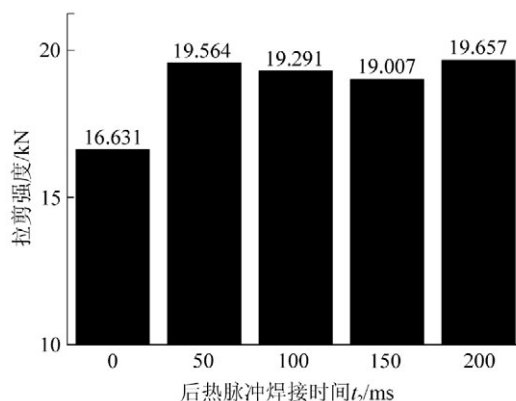


图 12 焊点拉剪强度随后热脉冲时间 t_2 的变化


Fig.12 Variation of tensile-shear strength of Inverter welding joint with postheat welding time t_2

况下,拉剪强度提高了 18.2%。但由于考虑到实际生产对电阻点焊焊接周期的限制,后热脉冲焊接时间不宜过长,当后热脉冲时间 t_2 为 50 ms 或 100 ms 时较优。

3 结论

提出后热电流脉冲优化方案,并通过模拟研究了后热电流脉冲对温度场和组织形态的影响,采用增大后热脉冲焊接电流或增加后热脉冲焊接时间的方法可以有效减缓点焊接头 t_{85} 段冷却速率,减少淬硬组织的生成。

采用实验法验证后热脉冲的有效性,当后热脉冲 pulse2 的焊接电流 I_2 (后热电流)为 3.8 kA、4.5 kA,焊接时间 t_2 (后热脉冲焊接时间)为 50 ms、100 ms,以及焊接主脉冲 pulse1 和后热脉冲 pulse2 之间的冷却时间 t_3 为 200 ms 时,与常规焊接参数相比,点焊接头的拉剪强度提高了 18.2%,正拉强度提高了 38.5%;失效模式由界面断裂变为熔核剥离,说明后热电流脉冲提供的热输入有效降低了

Page 28  点焊接头冷速,提高了点焊接头韧性。为 Q&P 钢的实际生产应用和接头性能优化提供了一定的理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 安柯宇,梁佳敏,幸非凡,等. 第三代汽车用高强钢——Q&P 钢的研究现状[J]. 金属热处理,2019(2):1-7.
- [2] Huanrana Wang, Wenchao Zhang, Dongfang Ma. Dynamic response of a Q&P steel to high-strain-rate tension[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2017, 30(5):484-492.
- [3] 孔谅,凌展翔,王敏,等. 镀锌 Q&P980 钢电阻点焊接头液态金属脆裂纹的影响因素分析[J]. 焊接学报,2018, 39(7):37-41.
- [4] 唐继宗. 考虑冲压和点焊工艺影响的 Q&P 钢疲劳性能试验研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
- [5] 唐继宗. Q&P 钢电阻点焊工艺和搭接接头疲劳性能试验研究[J]. 热加工工艺,2014(15):39-42.
- [6] Wang B, Duan Q Q, Yao G, *et al.* Investigation on fatigue fracture behaviors of spot welded Q&P980 steel[J]. International Journal of Fatigue, 2014(66):20-28.
- [7] 凌展翔,孔谅,王敏,等. 镀锌 Q&P980 钢电阻点焊接头液态金属脆裂纹的影响因素分析[J]. 焊接学报,2018, 39(7):37-41.
- [8] 戈晓岚,招玉春. 机械工程材料[M]. 北京:中国林业出版社,2006.
- [9] Shi G, Westgate S A. Resistance spot welding of high strength steels[J]. International Journal for the Joining of Materials, 2004, 16(1):9-14.
- [10] Mirner M, Svensson L E, Johansson R. Process adjustments to improve fracture behavior in resistance spot welds of ehss and uhss[J]. Welding in the World, 2004, 48(3-4):14-18.