

# 自适应控制技术对白车身点焊质量的影响

易铁, 周建军, 常明

(武汉理工大学, 武汉 430070)

**摘要:** 针对白车身电阻点焊过程存在零件装配不良、焊点分流、板间含涂胶和镀锌板材焊接等影响焊点质量的问题, 开启博士力士乐动态电阻自适应控制系统, 在不同影响因素下分别进行恒流模式和自适应模式焊接, 结合实际焊点动态电阻曲线与合格焊点样本电阻曲线的差异分析, 研究自适应控制技术对白车身点焊质量的影响。研究表明, 利用自适应控制技术, 可有效减少外界干扰对焊接热输入的影响, 减少焊接飞溅, 提高白车身焊点质量。

**关键词:** 电阻点焊; 动态电阻; 自适应控制技术; 焊接热输入

**中图分类号:** TG409

## 0 前言

在汽车制造业中, 电阻点焊技术广泛运用于白车身总分成及总成焊接。一辆乘用车白车身的焊点数约为 3 000 ~ 6 000 个, 其焊点质量决定整车品质。目前汽车批量生产过程中仍存在一些干扰问题, 如零件装配不良、焊点分流、板间涂胶和镀锌板材等因素都将影响焊点质量。随着广大客户对汽车安全性能的关注提高, 如何控制白车身焊点质量已成为汽车制造业的重要课题之一<sup>[1-7]</sup>。自适应控制技术将实测动态电阻曲线与合格样本电阻曲线进行差异比较, 实时调整焊接电流和焊接时间, 补偿各种干扰因素造成的焊接热输入损耗, 从而有效控制焊点质量, 此过程控制技术已逐渐运用于国内各大汽车制造厂家<sup>[8]</sup>。

## 1 动态电阻自适应控制原理

动态电阻自适应控制原理是通过监控焊接次级电压和实测焊接电流, 实时计算焊点动态电阻, 系统根据焊接过程扰动导致动态电阻曲线与合格样本电阻曲线背离情况, 及时增加焊接电流或者延长焊接时间或者两者并用, 确保实际焊点热输入大于等于优质焊点热输入, 对焊接飞溅和各种干扰因素引起的热量损耗进行补偿<sup>[9-10]</sup>。博士力士乐 Bosch Rexroth PSQ 6000 自适应控制系统具备恒流焊接模式和自适应焊接模式, 在恒流模式下记录和创建焊点标准样本电阻曲线。开启自适应模式, 当焊接过程遇到装配精度不良、板件

表面有异物、板件间有涂胶、热成型钢板、电极帽磨损等干扰因素引起的扰动后, 实测电阻背离样本电阻曲线, 系统将自动快速调节焊接电流和焊接时间进行热量补偿, 从而有效保证白车身焊点质量。

## 2 试验方法

试验板材为 0.65 mm、0.8 mm 厚度的汽车用冷轧钢板和 0.8 mm 厚度的热镀锌钢板, 涂胶为普通点焊胶。点焊试验前核查板材匹配信息, 并制作特殊工况板材组 (板材组总厚度均为 1.45 mm), 如零件装配不良 (间隙 > 2 mm)、边缘焊、焊点分流 (点焊位置附近有已焊焊点)、板间涂胶和含热镀锌板材等板材组, 如图 1 ~ 图 5 所示。试验采用 KUKA 机械手、小原焊机和 Bosch Rexroth 控制器等设备。点焊过程中保证焊枪与板材组垂直焊接。



图1 零件装配不良



图2 边缘焊

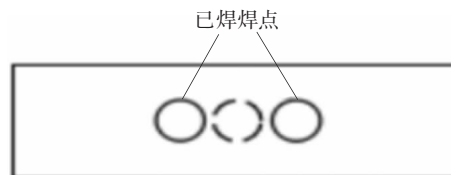


图3 焊点分流

收稿日期: 2019-03-04

doi: 10.12073/j.hj.20190304001

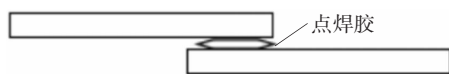


图4 板材间含涂胶



图5 含热镀锌板材

在上述不同工况下分别进行恒流模式和自适应模式焊接,优化的焊接参数见表1。利用 Bosch Rexroth PSQ 6000 自适应控制系统观察并记录各焊点动态电阻曲线<sup>[11]</sup>。制备各焊点横截面试样,使用金相显微镜观察并拍摄焊点金相照片。利用力学拉伸试验机对各试样板组进行室温力学拉伸试验,拉伸试样如图6所示。利用 Tessonic 超声波检测仪进行焊核尺寸检测。结合焊点动态电阻曲线变化规律,综合对比分析两种焊接模式在不同工况下焊点表面成形、飞溅情况、截面形状、焊核尺寸和力学拉伸性能,研究自适应控制技术对焊点质量的影响<sup>[12]</sup>。

表1 焊接参数

电极压力 $F/kN$	预压时间 $t_1/ms$	焊接时间 $t_2/ms$	焊接电流 $I/kA$	保持时间 $t_3/ms$
2	200	240	7.3	160

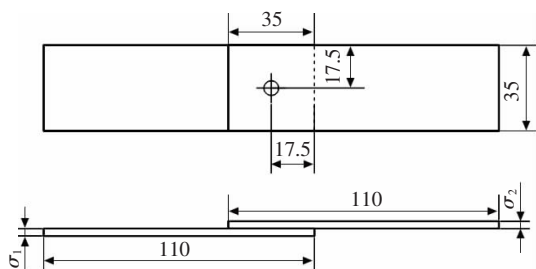


图6 拉伸试样示意图(mm)

恒流模式和自适应模式焊接。传统白车身电阻点焊以恒流模式焊接为主,恒定的焊接电流和焊接时间,保证焊接热输入不变,从而获得质量稳定的焊点。但在实际生产过程中,白车身焊接质量容易受到零件装配精度扰动、焊接电流和电极压力波动、设备冷却效果、电极帽烧损、零件表面异常等多种因素影响。为了保证白车身焊接质量,设定的恒流模式焊接参数往往偏大,从而造成一定的能源浪费和焊接飞溅<sup>[13]</sup>。

针对恒流模式焊接的不足,自适应模式焊接新技术得到成功研制。该技术的核心主要是获得一个焊接

质量合格且无飞溅的优质焊点,创立其电阻样本曲线,开启自适应系统,对后续每次焊接进行实时监控和参数调整,从而有效保证白车身每个焊点的质量。开启自适应模式焊接前,必须在恒流模式下优化焊接电流、焊接时间和电极压力,创建一个优质焊点的样本电阻曲线。在焊接过程中,当遇到干扰因素影响而导致实测动态电阻与样本电阻曲线相背离时,系统将及时的、适当的调整焊接电流和焊接时间<sup>[14-16]</sup>。博士力士 Bosch Rexroth PSQ 6000 自适应控制系统具有快速的调节时间(约 1 ms)、广泛的焊接参数调节公差带、更大的数据存储量(大约可以储存 25 000 个焊点信息)和无需停线就可收集电阻曲线等特点,使其得到了更普遍的应用。

### 3 结果与讨论

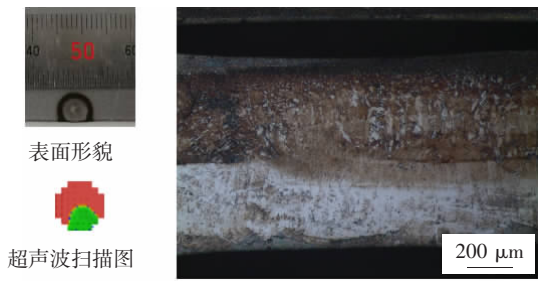
#### 3.1 焊点质量与宏观形貌

对在不同工况下恒流模式和自适应模式焊接的焊点质量及宏观形貌进行分析。总厚度为 1.45 mm 板材组的焊点,其合格要求为焊核直径大于 4.3 mm,抗剪强度大于 27 MPa,且焊接不存在严重飞溅。从表2可知,在恒流模式边缘焊工况下焊接存在严重飞溅,而对应的自适应模式焊接也存在较大飞溅。对比同种工况焊接飞溅情况,可知自适应模式焊接能更有效的降低飞溅。在恒流模式边缘焊工况下焊核直径为 4.1 mm,小于合格值 4.3 mm。在恒流模式边缘焊工况下焊接,其焊点抗剪强度为 23 MPa,小于合格值 27 MPa。

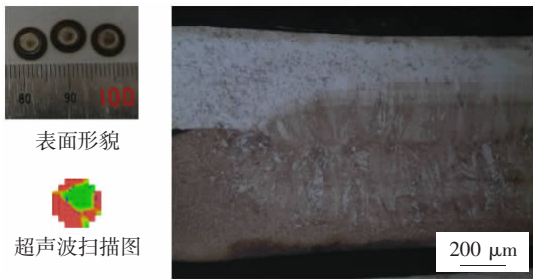
不同工况下恒流模式和自适应模式焊接的所有焊点表面成形如图7和图8所示,焊点表面成形良好,无

表2 焊点质量

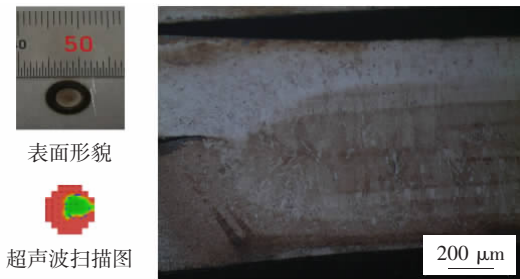
焊接模式	工况	飞溅情况	平均焊核直径 $d/mm$	平均抗剪强度 $\tau/MPa$
恒流	边缘焊	严重	4.1	23
恒流	分流	无	4.6	—
恒流	板间含胶	轻微	4.9	39
恒流	装配不良	较大	5.0	38
恒流	含镀锌板	无	5.4	36
自适应	边缘焊	较大	4.9	28
自适应	分流	无	4.8	—
自适应	板间含胶	无	5.0	41
自适应	装配不良	轻微	5.1	39
自适应	含镀锌板	无	5.2	37



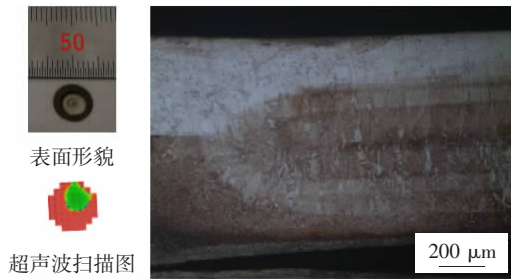
(a) 边缘焊



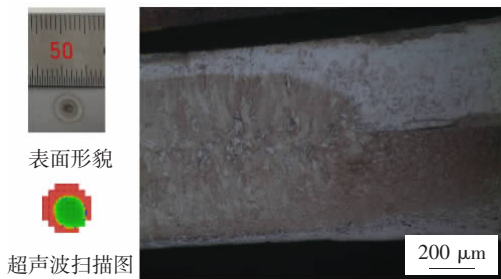
(b) 焊点分流



(c) 板材间含涂胶

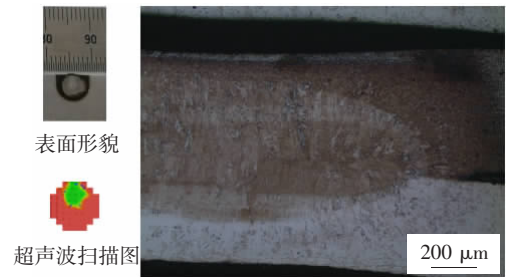


(d) 零件装配不良



(e) 含热镀锌板材

图7 不同工况下恒流模式焊接的焊点宏观形貌图



(a) 边缘焊



(b) 焊点分流



(c) 板材间含涂胶



(d) 零件装配不良



(e) 含热镀锌板材

图8 不同工况下自适应模式焊接的焊点宏观形貌图



明显表面裂纹和烧损等缺欠,焊核金相截面同样显示没有明显内部裂纹和气孔等缺欠。其焊点对应的超声波扫描结果显示焊核成形良好,并无弱焊、虚焊等情况。

### 3.2 焊点动态电阻曲线分析

不同工况下自适应模式的焊点动态电阻曲线如图9所示, $R_{ref}$ 为标准焊点样本电阻曲线, $R_{act}$ 为焊点动态电阻曲线, $U$ 为焊接电压, $I$ 为焊接电流。

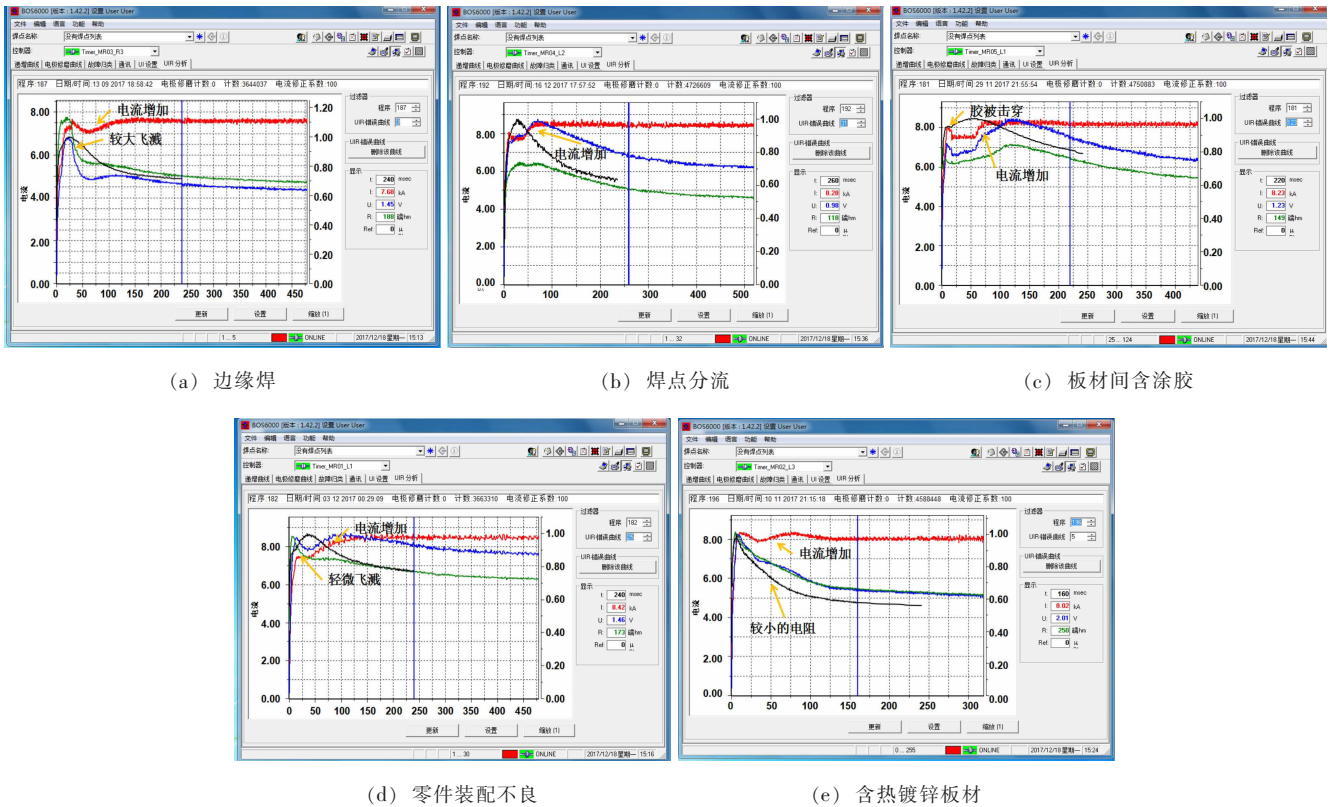


图9 不同工况下自适应模式焊接的焊点动态电阻曲线图

如图9a所示,由于边缘焊必然导致焊核破裂而产生飞溅,其自适应焊接模式下约在20~50ms产生较大飞溅(实测电阻陡降),且电流随之降低,此时系统监测后立即增加电流,并延长焊接时间,补偿飞溅造成焊接热输入的损耗。因此相比恒流模式边缘焊工况焊接,自适应焊接电流在飞溅前期短时间下降,有助于减少飞溅,随后增加电流与延长焊接时间,保证较大的焊核直径和更高的抗剪切强度<sup>[17]</sup>。如图9b所示,由于焊点间距小,焊接存在分流,系统监测电流减少后立即增加电流,补偿分流造成焊接热输入的减少,因此相比恒流模式分流工况焊接,其焊核直径更大。如图9c所示,板间涂胶不仅影响焊接加压过程,导致接触时间滞后,同时引起焊接分流,导致电流下降。系统监测接触时间滞后,立即增加电流击穿涂胶(约在10μs),有效控制飞溅产生,随后增加电流与延长焊接时间,补偿由于击穿涂胶和焊接分流消耗的能量。因此自适应板间含涂胶工况焊接,能有效控制飞溅产生,并保证焊核尺寸

和抗剪强度等性能。如图9d所示,间隙导致焊接前期飞溅(实测电阻降低较大),自适应系统调节方式与边缘焊工况焊接相似<sup>[18]</sup>。如图9e所示,由于镀锌板较软,在电极压力作用下,其焊接面积较大,但接触电阻较小(小的焊接热输入),易形成较大焊核的弱焊情况。系统在监测电流降低后,轻微增加电流,补偿镀锌板较小的焊接热输入<sup>[19]</sup>。

## 4 结论

- (1)针对白车身点焊过程中不同干扰因素引起的焊接热量损耗问题,自适应控制系统通过实时监测动态电阻与样本电阻曲线的背离情况,自动快速的调节焊接时间和焊接电流进行热量补偿,保证焊核直径和焊点强度均大于恒流模式下的焊核直径和焊点强度。
- (2)因边缘焊产生飞溅时,自适应系统能在20~50ms及时监测电阻陡降值,并在飞溅前期瞬速降低焊接

电流,有效减少飞溅,在 120 ms 后增加电流与延长焊接时间,增大焊核尺寸和提高焊点强度。

### 参考文献

- [1] 曾清林,何深成. 浅谈白车身电阻点焊焊接飞溅影响因素及控制预防对策[J]. 汽车与驾驶维修(维修版),2019(7): 80-81.
- [2] 刘芯娟,邵刚. 中频逆变直流点焊与工频交流电阻点焊技术优势比较[J]. 汽车实用技术,2019(17): 195-196.
- [3] 沈婵媛. 轿车白车身电阻点焊焊接缺陷的控制[J]. 汽车实用技术,2019(1): 148-149, 164.
- [4] 刘磊,纵荣荣,李乐乐,等. 轻量化汽车电阻点焊技术的研究与应用[J]. 时代汽车,2019(3): 131-134.
- [5] 沈波,程哲闻,程猛. 低合金汽车用钢薄钢板电阻点焊工艺研究[J]. 汽车实用技术,2019(11): 175-177.
- [6] 齐永成,廉杰. 浅析汽车白车身点焊质量控制措施[J]. 民营科技,2018(12):74.
- [7] 王永生,范兆博,王建华,等. 焊接白车身电阻点焊质量控制[C]. 郑州:第十四届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集,2017:426-428.
- [8] 易铁,田永强,蒋冬,等. 不同自适应控制系统在汽车点焊中的应用[J]. 焊接技术,2018,47(10):80-84.
- [9] Wan X D, Wang Y X, Zhao D, et al. Weld quality monitoring research in small scale resistance spot welding by dynamic resistance and neural network [J]. Measurement, 2017, 99: 120-127.
- [10] Wan X, Wang Y, Zhao D. Quality monitoring based on dynamic resistance and principal component analysis in small scale resistance spot welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9-12): 3443-3451.
- [11] 叶绿,孔锐斌,蒋冬. 电阻点焊自适应功能启用流程及方法研究[J]. 汽车工艺与材料,2017(2): 14-18.
- [12] 施雅丽. 汽车白车身焊接质量控制及常用检测与评价方法[J]. 机电技术,2017(4): 67-72, 95.
- [13] 张波. 点焊恒流模糊控制系统研究[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文,2003.
- [14] Ghazanfari H, Naderi M. Expulsion characterization in resistance spot welding by means of a hardness mapping technique[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2014, 21(9): 894-897.
- [15] 柳治全. 轿车车身焊点质量监控系统的研究[D]. 兰州:兰州理工大学硕士学位论文,2012.
- [16] 李伟. 轿车白车身的电阻点焊质量监测系统设计的研 究[D]. 沈阳:沈阳大学硕士学位论文,2013.
- [17] Liang Jianyong, Liang Jun, Fang Guodong, et al. Evaluation on spot weld models in structural dynamic analysis of automotive body in white [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(1): 84-90.
- [18] 李震生. 汽车制造中电阻点焊常见缺陷及应对措施[J]. 科技创新与应用,2016(12):117.
- [19] 林浩磊,沈洁,张延松,等. 汽车用镀锌钢板电阻点焊可焊性的研究[J]. 汽车工程,2011(6):549-552.
- [20] 易铁,1990 年出生,硕士;主要从事等离子堆焊、汽车白车身自适应焊接、铝合金搅拌摩擦焊等方向研究.
- [21] 周建军,1975 年出生,学士,工程师;主要从事耐磨防腐特种堆焊、再制造技术、表面工程技术和装备等方向的研究,已发表论文 7 篇,专利 9 篇.
- [22] al Duplex Stainless Steel Conference, Glasgow, UK, 1994.
- [23] 陈育生,杜顺林,宁德宇,等. 碳扩散对 SUS304 + Q235B 复合板卷轧制结合性能的影响[J]. 钢铁研究,2016,44(2): 21-24.
- [24] 张仁军,朱洪军,管晓光,等. 铁素体对奥氏体不锈钢性能的影响[J]. 机械工程师,2013(6): 41-42.
- [25] 刘云,1965 年出生,高级工程师;主要从事油气管材研究开发工作;获省部级科技奖励 5 项;已发表论文 20 余篇.

### [上接第 46 页]

- and austenitic stainless steels [J]. Materials & Design, 2012, 34: 666-672.
- [29] John C, Lippold damian, Kotecki J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels [M]. China Machine Press, 2008: 29-31.
- [30] Delong W T. Ferrite in austenitic stainless steel weld metal [J]. Welding Journal, 1974, 53(7): 274-285.
- [31] Suutala N. Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenite stainless steels [J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14(2): 190-192
- [32] Lippold J C. Duplex stainless steels [C]. 4th International