

不锈钢点焊热过程的协同控制策略

李桂中¹, 王兆伟², 李沫³

(1 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025; 2 华晨汽车工程研究院, 沈阳 110144;

3 长春理工大学, 长春 130022)

摘 要: 着重探讨了协同控制法应用于不锈钢点焊过程控制的特殊性、必要性与适用性. 针对动态电阻单调下降的不锈钢材料, 以工艺试验确定的实际熔核形成起点, 把焊接热过程明确划分为未形核与形成熔核两个阶段. 进而, 在这两个阶段中分别采用恒流控制和基于给定动态电流滞后角特性的模型化控制技术, 即协同控制策略. 结果表明, 该监控策略能够保证不锈钢材料电阻点焊热过程的形核起点稳定, 从而确保了阈值法控制的可靠性, 焊接品质优良.

关键词: 不锈钢; 电阻点焊; 恒流控制; 模型化控制法; 协同控制策略

中图分类号: TG438 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2010)07-0063-04



李桂中

0 序 言

由于奥氏体不锈钢具有良好的高温强度, 良好的耐蚀性和良好的点焊焊接性, 因而在许多工业产品中, 如航空发动机, 城轨客车车体以及一些室外装饰部件中均有应用. 与低碳钢材料相对比, 正是由于奥氏体不锈钢的热强性好、电阻率高、热导性差以及电阻-温度系数曲线较平缓等材料自身的特性, 使其在电阻点焊热过程中表现出来的动态电阻曲线有别于低碳钢. 就是说, 低碳钢材料点焊热过程的动态电阻曲线具有鲜明的峰点, 它与熔核形成的起点相对应, 进行质量监控时把它作为动态电阻阈值法累计动态电阻下降幅度的标志点. 而奥氏体不锈钢点焊热过程的动态电阻曲线却往往表现为单调下降的特征^[1], 根本找不到峰点. 换言之, 若采用动态功率因数法进行质量监控时, 作为质量信息的动态电流滞后角曲线上也同样没有谷点, 而呈现出单调上升的特征^[2]. 这就是说, 实时质量监控系统无法根据上述动态特性曲线来直接判断熔核形成的起点. 因而使得动态电阻阈值法在不锈钢点焊质量监控上的应用受到限制或质疑. 目前生产中只能采用基于焊接工艺参数的恒流控制技术对不锈钢点焊热过程进行质量监控, 其中焊接飞溅, 熔核偏小等现象时有发生, 控制效果并不十分理想. 为探索协同控制法^[3]用于不锈钢点焊质量监控的可能性, 必要性与可靠性, 文中进行了深入研究, 并得出了较为详细

而满意的答案.

1 不锈钢点焊热过程的基本划分

依据不锈钢点焊热过程质量监控的基本任务与控制目标并在实际工艺试验的基础上, 将不锈钢点焊热过程简单明确地划分为两个阶段, 即未形核与形成熔核阶段. 也就是说, 无论动态电阻特性曲线或动态电流滞后角特性曲线是否呈现单调性, 不锈钢材料在电阻点焊热过程中依然会客观存在着基本金属升温(未形核)阶段和在一定周波后开始熔化的形核阶段. 焊点处母材金属开始熔化的时刻可定义为形核起点或形核开始时间. 不同焊接工艺参数条件与形核起点的对应关系见图 1^[2].

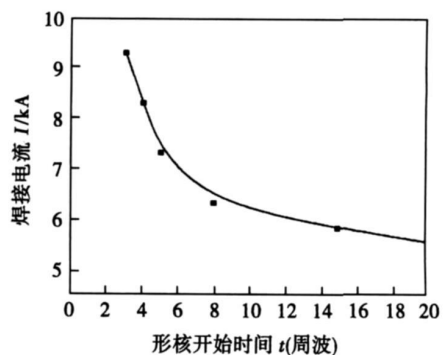


图 1 焊接电流与形核起点的关系曲线

Fig 1 Relationship between welding current and starting point of nugget growing

由此可见,焊接工艺参数的波动对实际形核起点有明显的影 响. 焊接电流偏强时,其影响相对小些,焊接电流偏弱时,影响加剧,甚至在规定的焊接时间内根本不能形成熔核. 为确保形核起点与熔核质量的一致性,应尽量采用焊接电流偏强的工艺参数并且对整个热过程实行严格控制.

2 不锈钢点焊热过程的监控模式

尽管基本金属的实际形核起点是客观存在的,然而,要想在实时监控的动态曲线上直接检测熔核形成的起始点还是无法做到的. 因此,欲实现焊接过程的有效控制,必须转变思路,选择新的控制方案和策略. 综合上述情况,选择了一种全新的监控模式. 即在未形核阶段,采用恒流控制技术,主要实现焊接工艺参数的严格控制,以确保形核起点的一致性;而在形核阶段,及时转换为以电流滞后角为质量监控信息的 DRC法模型化控制^[4]. 并称此复合监控模式为协同控制法(简记为 DRC法).

具体实现两种监控机制切换的时机就以工艺试验确定的优质熔核的形核起点作为转换点,并作为独立的控制参数在初始编程时给定. 当选择 1.2 mm+1.2 mm的 304L 不锈钢为焊接试板时,其形核起点为第 4 周波.

3 主要试验设备及功能

试验是在国产 NA-100 型单相交流点焊机上进 行的. 检测仪器为中国船舶工业总公司天津 707 所研制的 LG-98A 智能阻焊参数测试仪. 实时监控系 统为吉林大学自行开发的 DRC 型智能点焊控制器. 其主控单元为双 MCU(microprogrammed controller)微处理器结构. 其中,面板 MCU 单独完成焊接控制参数的自动编程,数据传送及参数提取与汉字显示;焊接主板 MCU 主要完成焊接程序控制,依据模糊控制算法的焊接过程反馈控制,数据采集,数据交换和数据处理. 每一试验焊点的相关数据,譬如:动态焊接热量,动态焊接电流有效值,动态电流滞后角以及各种特征焊接数据,均可通过面板液晶显示屏读取. 这对于分析焊接热过程十分有利. 此外,监控程序可借助计算机系统软件进行修改和仿真调试;程序的固化可借助市售产品 EasyPRO L+ 型编程器完成控制程序的写入. 焊接电流、电压信号的波形可通过四踪记忆示波器来进行观察和记录.

试验采用的监控系统具有多种监控模式. 如传统的简单定时开环控制模式;传统的恒流控制模式;

恒流控制与 DRC 法协同控制模式. 使得试验研究内容具有对比性和多样性. 以便分析不同监控方法的差异和对影响质量监控效果的动态行为作出更为深入细致的科学判断.

4 试验结果与分析

4.1 标准焊接条件下的试验结果与分析

首先在标准焊接条件下,对不锈钢试件进行了焊接试验. 从理论上说,在标准焊接条件下,无论简单定时控制模式,或是恒流控制模式,还是协同控制法都能在规定焊接时间内,形成优质熔核. 表 1 充分证明了上述观点,与此同时,也获得了优质熔核的特征数据(图 2).

表 1 三种监控方法的试验数据表
Table 1 Data of three control methods

监控模式	给定热量 M_b (%)	给定电流 I_1 /kA	实际电流 I_2 /kA	焊接时间 t (周波)	熔核直径 Φ /mm	飞溅情况
简单定时	60	—	9.4	11	6.5	无
恒流控制	58	9.2	9.2	11	6.3	无
协同控制	58	9.1	9.2	11	6.4	无

注:电极压力均为 4 800 N;电极直径为 7.5 mm.

从图 2 的动态电流滞后角特性曲线可知,协同控制是有效的. 其控制品质优于恒流控制. 这一点从焊接热过程的动态热量特性曲线更容易理解(图 3),即恒流控制的动态热量在形核阶段一直呈单调下降的调节趋势,不利于熔核生长;而协同控制机制在形核阶段的热量调节规律则是中期平稳上升;后期略有回落. 这种热量调节规律既符合熔核

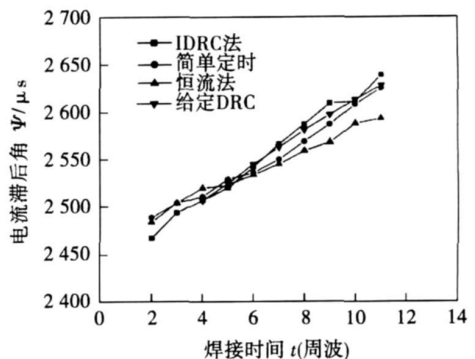


图 2 三种监控模式的电流滞后角曲线

Fig 2 Current lag angle curves corresponding with three control methods

生长规律, 也有利于抑制后期喷溅。恒流控制的热量调节规律恰好是对图 2 中与恒流控制相应的电流滞后角曲线偏软的诠释。

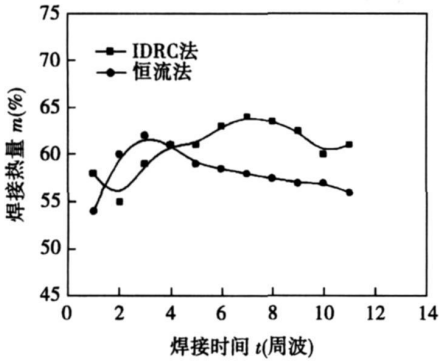


图 3 恒流法与协同控制法的热量调节曲线

Fig 3 Heat Percentage curves corresponding with two control methods

4.2 热量大幅度波动的试验结果与分析

任何外界干扰对点焊热过程的影响最终都可归结为焊接热效应的影响。因此, 为了进行对比试验, 采用改变初始热量分数的方式来综合模拟外界干扰对焊点质量的影响。在将初始热量分数大幅度波动 $\pm 15\%$ 的条件下, 分别采用简单定时法和协同控制法进行焊接, 试验结果见表 2 图 4 图 5。

表 2 对比试验数据表

Table 2 Contrast of data for spot welding

监控模式	给定热量 $M_0(\%)$	给定电流 I_1/kA	实际电流 I_2/kA	焊接时间 t (周波)	熔核直径 Φ /mm	喷溅情况
简单定时	60	—	9.4	11	6.5	无
	45	—	7.9	11	未熔透	无
	75	—	11.0	11	5.9	有
协同控制	60	9.1	9.2	11	6.4	无
	45	9.1	9.1	11	6.4	无
	75	9.1	9.3	11	6.5	无

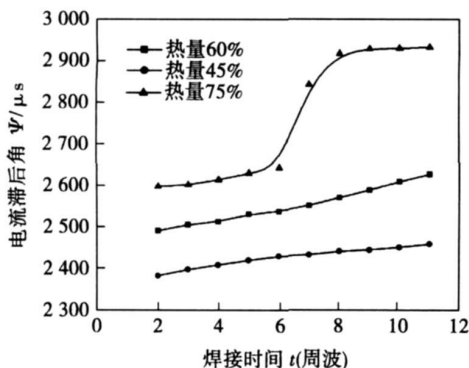


图 4 简单定时法的电流滞后角曲线

Fig 4 Current lag angle curves on condition of no-feedback control

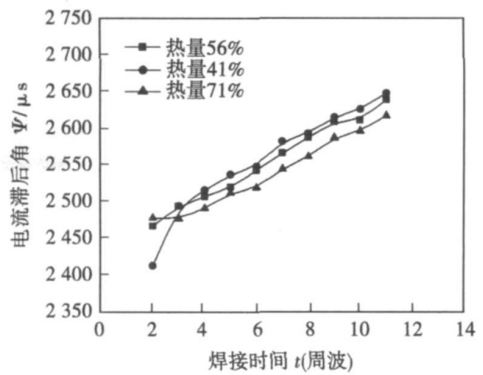


图 5 协同控制法的电流滞后角曲线

Fig 5 Current lag angle curves on condition of negative feedback by cooperating control

从图 4 和表 2 综合分析可知, 无反馈控制的简单定时法, 当热量降低 15% 的条件下, 因没有热量补偿能力, 动态电流滞后角特性曲线变化平缓, 在相同焊接时间内, 熔核尺寸和焊透性明显变差; 而当热量升高 15% 的条件下, 同样因没有热量补偿能力, 加热过急, 在焊接过程中期 6~7 周波便产生了严重喷溅 (电流滞后角曲线产生骤然跳变)。即在焊接热量严重波动时, 焊点质量也产生了严重波动。

从图 5 和表 2 综合分析可知, 采用协同控制法监控策略时, 无论热量降低或升高 15%, 都因监控系统具有极强的热量补偿能力, 动态电流滞后角特性曲线在 3~4 周波后均达到近乎一致的上升率, 并且在相同焊接时间内, 得到了熔核尺寸接近一致焊点。焊接过程没有产生任何喷溅 (电流滞后角曲线平滑无跳变)。

综上所述, 协同控制法是一种积极主动且有效的调控方法。即使在焊接热量大幅度波动的情况下仍能很好地实现控制目标。这正是得益于它在焊接初始阶段引入了恒流控制, 利用恒流法响应速度快, 控制精度高的特点, 迅速地补偿了焊接过程的热波动, 既能有效抑制前期飞溅或加热不足, 特别是通过精确控制前期热输入, 有效保证在焊焊点形成熔核的起始时间达到一致, 进而为中后期的阈值法控制创建了可靠的基准。而焊接中后期, 协同控制法则利用了 DRC 法模型化监控机制, 直接检测熔核成长的质量信息, 根据实际动态电流滞后角特性与监控系统给定的动态电流滞后角特性比较所产生的偏差, 对焊接热量进行实时调节, 保证了熔核成长的质量信息在最佳动态品质下达到规定的阈值。

4.3 分流影响的试验结果与分析

为了考察恒流法和协同控制法对分流情况的适应性, 即对不锈钢材料焊点质量的影响, 又进行了以

下对比试验,并借助试验数据处理后的质量信息图表分析了具体试验结果(表 3和图 6)。从表 3中的熔核直径数据可以看出,在存在焊点分流的情况下,恒流控制的熔核直径明显偏小,偏离幅度达 9.5%。

表 3 有分流存在时恒流法与协同控制法的试验数据
Table 3 Test data for constant current control and collaborative control spot welding

监控模式	分流点距 L/mm	给定电流 I_1/kA	实际电流 I_2/kA	焊接时间 $t(\text{周波})$	熔核直径 Φ/mm	喷溅情况
恒流控制	—	9.2	9.2	11	6.3	无
协同控制	7.5	9.1	9.2	11	5.7	无
恒流控制	—	9.2	9.2	11	6.4	无
协同控制	7.5	9.1	9.2	12	6.2	无

图 6 为恒流法和 IDRC 法单点分流情况的动态电流滞后角对比曲线。在焊接初期由于分流焊点的存在,使得焊接回路动态电阻较低,因而在相同的给定热量前提下,分流情况的焊接电流明显高于无分流时,通过恒流调节都能把焊接电流控制在理想范围,但由于恒流控制对分流导致的熔核区电流密度的下降没有补偿作用,必然使得在焊焊点的电流密度相对偏低,因此熔核尺寸达不到理想值。

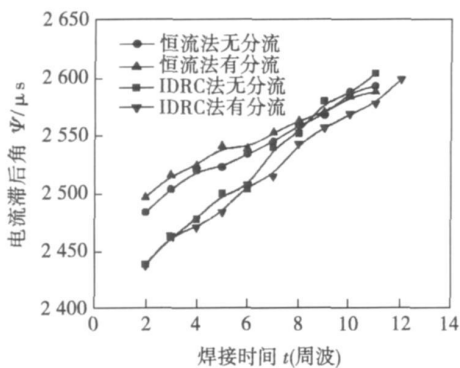


图 6 分流条件下的电流滞后角曲线

Fig. 6 Current lag angle curves when welding current is shunt

从图 6 的电流滞后角曲线可明显看到,恒流控制且有焊点分流情况下,在形核阶段电流滞后角曲线的斜率和上升幅度均明显小于同样条件下协同控制法控制的熔核水平,也没有达到无分流时的水平。

而协同控制法则是根据标志熔核生长状况的电流滞后角的增量与标准动态电流滞后角特性比较所产生的偏差对热量进行实时调节,焊接电流并不是恒定的。因此,即使有分流焊点的存在,也能保证形核期每一熔核的电流滞后角增量很好地达到规定值。熔核尺寸的波动仅为 3%,而且达到优质熔核的标准,从而确保了熔核质量的一致性。

5 结 论

(1) 以工艺试验确定的优质熔核形核起点为基点,累计电流滞后角的上升幅度,依然能够实现基于给定电流滞后角特性的模型化控制。

(2) 在点焊热过程的初始阶段选择偏强的焊接工艺参数并进行实时反馈控制,能够保证熔核形核起点的稳定性,进而确保 IDRC 法阈值控制的可靠性。

(3) 将协同控制策略应用于不锈钢材料焊接热过程质量监控不仅完全可行,而且是十分必要和有效的。

参考文献:

- [1] 陈益平, 饶德林, 胡德安, 等. 不锈钢点焊自适应控制的研究 [J]. 航空工艺技术, 1998 (2): 5-7. 13.
Chen Yiping, Rao Delin, Hu De'an, et al. Study on self adaptive control for stainless steel in spot welding [J]. Aviation Technology, 1998 (2): 5-7. 13.
- [2] 王兆伟. IDRC 法在不锈钢点焊过程控制中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [3] Li Guihong, Wang Changzheng, Kong Meng, et al. A cooperative control strategy of resistance spot welding process by combining the constant current control with the IDRC method [J]. China Welding, 2009, 18(2): 25-29.
- [4] 李桂中, 徐国成, 李树槐. 低碳钢点焊动态过程的模型化控制 [J]. 焊接学报, 1995, 16(2): 75-81.
Li Guihong, Xu Guocheng, Li Shuhuai. Adaptive modeling control during dynamic process of resistance spot welding for low carbon steel sheet [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1995, 16(2): 75-81.

作者简介: 李桂中, 男, 1954 年出生, 副教授。主要从事焊接结构、无损检测及焊接过程控制方面的科学研究。发表论文 20 余篇。

Email: lizg@jlu.edu.cn

the maximum output current of 20 kA. In the power supply IG-BT modules are used to compose the full-bridge converter and the bipolar limited soft switching PWM drive mode is adopted. It realizes the zero voltage zero current switching (ZVZCS) and reduces the loss of power switch pipe. Control circuit takes digital signal processor as core and contains the true RMS processing circuit and the incremental PID control method. All these finally lead to precise control of the power pulse width modulation circuit. Experiment results demonstrate design of them in circuit is valid. The control system is stable and reliable.

Key words: high-power, intermediate frequency, inverter, digital signal processor, resistance spot welding

Corrosion resistance of superduplex stainless steel welded joint. GONG Lihua, ZHANG Bo, WANG Saifu (Jiangsu University of Science and Technology Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China). P 59—62

Abstract: The changes of two phases proportion and element composition of superduplex welded joints stainless steels UNS S32750 welded joints by different techniques were studied by SEM and EDS, meanwhile the pitting corrosion and intergranular corrosion resistance of welded joints were tested by critical pitting temperature (CPT) and 65% nitric acid solution experiment. The results showed that higher heat input, filling welding wire and nitrogen gas protection could make austenitic phase exist steadily and higher heat input could make chromium to diffuse so as to reduce intergranular corrosion sensitivity which on the contrary make pitting corrosion worse. The reason is that the ferrite phase dissolves firstly because of the element partition proportion.

Key words: superduplex stainless steels, welded joints, phase proportion, pitting corrosion, intergranular corrosion

Collaborative control strategy for stainless steel resistance spot welding process. LI Guizhong, WANG Zhaowei, LI Mō (1. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. Brilliance Automobile Engineering Research Institute, Shenyang 110141, China; 3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China). P 63—66

Abstract: The particularity, necessity and suitability of the collaborative control method that was used to stainless steel resistance spot welding process are discussed in this paper. Based on the experiment results, the welding process of every nugget was divided into two periods. That is, no-nugget period and nugget growing period. In no-nugget period, the constant current control method was used. In nugget growing period, the modeling control method was used based on the reference characteristics of the dynamic current lag angle. This control mechanism is the collaborative control strategy. The experiment results show that it can make the starting point of nugget stable, thus provide a threshold control method with high reliability and good nugget quality.

Key words: stainless steel, resistance spot welding, constant current control, modeling control method, collaborative control strategy

Image processing of structure light vision detection of welding robot. WU Xi, QI Bojie (1. School of Mechanical Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Mechanical Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China). P 67—70

Abstract: Image processing algorithms of welding robot structure light detection were studied. Compared with the traditional image processing algorithm, some improved methods were proposed and tested. In filter of image preprocessing, a method combining region segmentation with multi-scale detection was adopted and could overcome the disadvantage of contour easy breaking with single dimension LOG filter and minimize the region to be processed and easy to improve the processing speed. In contour pick-up of postprocessing, Genetic Algorithm as a global optimization algorithm was adopted to realize template matching. By grey coding method, fitness function, selection operators, crossover operators, mutation operators and so on, finally realize template matching and coordination pick-up. The experimental results show that these improved methods can improve the precision and adaptability of welding robot structure light detection.

Key words: image processing, structure light detection, region segmentation, multi-scale detection, genetic algorithm

Effect of GMAW-P parameters on notched impact strength of welding joint in TCS345 stainless steel. ZHANG Jianjun³, LI Wushen², DIXI Jie², LU Qit (1. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300072, China; 3. Lanzhou Construction Supervision of CNPC, Lanzhou 730060, China). P 71—74

Abstract: The effect of pulse gas metal arc welding (GMAW-P) parameters on impact toughness of welding joint nominal fusion line in TCS345 stainless steel were investigated through orthogonal experiments. The influencing factors such as pulse current, time, frequency and welding speed were considered. The result shows that the microstructure in heat affected zone (HAZ) of TCS345 stainless steel composed of ferrite and martensite. Optimization of GMAW-P process parameters was carried out by the software of MATLAB that is pulse current 450 A, pulse time 2.3 ms, pulse frequency 250 Hz and welding speed 500 mm/min.

Key words: pulse gas metal arc welding parameters, TCS stainless steel, nominal fusion line, notched impact strength

OpenCV based camera calibration methods for seam tracking systems. LAI Xiaobo, ZHU Shifang, CHAO Xinxiang (State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China). P 75—78

Abstract: Aiming at the camera calibration of seam track-