

# 工艺参数对板管间接点焊过程的影响

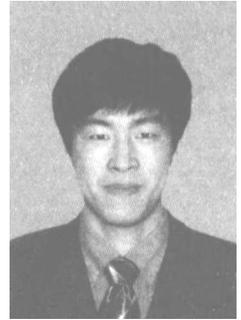
杨洪刚, 张延松, 陈关龙

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘 要:** 针对板管间接点焊过程中焊接变形较大, 引起接头质量难以保证的问题。通过采集电极位移曲线, 研究板管间接点焊过程中膨胀量和变形量的变化规律, 分析不同焊接工艺参数(焊接电流、电极力和焊接时间)对该点焊过程的影响。结果表明, 板管间接点焊焊接阶段, 膨胀过程与变形过程相互耦合; 保持阶段, 在电极力作用下, 焊接变形进一步加大, 最大变形量随着电极力的增大和焊接热输入的增多而线性增加。发生飞溅时, 电极位移曲线出现阶梯状畸变, 可利用位移曲线斜率的变化评判该点焊的飞溅现象。研究结果为板管间接点焊过程在线监测与质量控制提供理论指导。

**关键词:** 间接点焊; 电极位移; 焊接变形

中图分类号: TG441 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)05-009-04



杨洪刚

## 0 序 言

管材液压成形技术是近 30 年才发展起来的一项新技术。由于其成形的构件重量轻, 产品质量好, 并且具有产品设计灵活, 工艺过程简捷等特点, 因此, 在汽车轻量化领域中获得广泛的应用<sup>[1]</sup>。例如汽车元件中的车顶侧围横梁、车顶纵梁、车身纵梁等部位。然而, 由于缺少法兰, 液压成形管与相邻部件的连接成为一个难题, 虽然采用激光焊可以解决, 但是激光焊成本较高。为节约成本, 应尽量使用企业现有的工艺和设备。点焊是目前薄板连接的主要工艺手段, 尤其在汽车和航空领域。因此, 解决这个难题的最好办法就是采用板管间接点焊技术<sup>[2]</sup>。

板管间接点焊过程中, 板材与中空、截面闭合的液压成形管相连, 电极则只能在板材的一侧施加压力和通电, 即板管间接点焊<sup>[2]</sup>。由于结构形式不同, 板管间接点焊与传统点焊具有较大差异。管的内部没有支撑, 点焊过程中, 在电极力的作用下将产生弹性变形, 从而形成环状熔核。而且当变形较大时, 在电极与板的接触面边缘还将出现热塑性裂纹, 裂纹的产生将严重影响焊点的完整性以及拉剪和疲劳强度。因此, 有必要分析板管间接点焊的焊接变形过程, 为焊接质量的控制与提高奠定基础。

传统的气动焊枪冲击力较大, 在板管间接点焊的

加压过程中, 使得板管预先产生变形, 严重时还会使管失效, 因此气动焊枪在一定程度上影响了对板管焊接变形过程的研究。然而, 伺服焊枪是最近几年发展起来的一种新型焊枪, 它实现了对焊枪位置和运动速度的精确控制, 从而可在加压过程中与工件软接触<sup>[3]</sup>, 避免了冲击对焊接变形过程分析的影响。

利用伺服焊枪, 通过研究各种焊接工艺参数下电极位移曲线特征的变化, 系统分析板管间接点焊的焊接变形过程, 为间接点焊焊接质量的在线监测与控制提供理论指导。

## 1 试验系统与方法

### 1.1 试验系统

试验所用伺服焊枪是由美国通用(GM)公司提供的 AC 型伺服焊枪, 并将其集成在 FANUC 公司的 R-2000i 型六自由度机器人上。焊枪的主要参数为: 额定功率 110 kW; 最大焊接电流 18 kA; 最大电极力 4.9 kN; 扭矩 17.35 Nm; 最大行程 160 mm。

间接点焊试验系统如图 1 所示。为了利用现有设备实现间接点焊, 试验中将铜垫块通过支架固定在工作试验台上, 使得伺服焊枪的下电极仅作为焊接通电回路的一部分, 而不起支撑焊接工件的作用。

电极位移传感器为 OMLON 非接触式激光位移传感器, 其测量精度为 0.25  $\mu\text{m}$ , 响应时间为 0.3 ms。输出信号经滤波整流后, 由 AD 转换送入计算机进行实时采集。

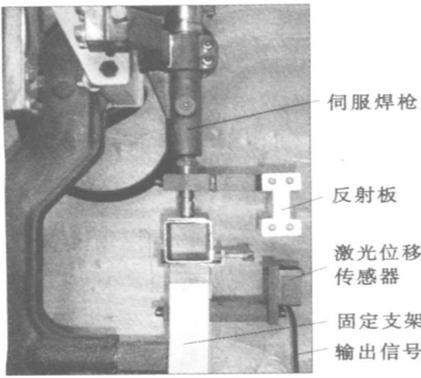


图 1 间接点焊试验系统

Fig. 1 Experimental system of indirect spot welding

### 1.2 试验材料

试验材料为美国通用公司提供的普通冷轧低碳钢, 管材厚度为 2.0 mm, 截面尺寸为 40 mm × 40 mm; 板材厚度为 1.5 mm。焊前, 试验材料经打磨、刨光, 以保证良好的导电性能。

## 2 试验结果及分析

传统点焊过程中, 金属因受热产生体积膨胀, 从而推动电极产生位移; 受热越强烈, 熔化的金属越多, 膨胀量越大, 电极位移就越大。焊接电流结束后, 焊点金属冷却, 体积收缩, 位移减少, 故电极位移曲线能够反映焊点膨胀、融化、生长以及冷却凝固的过程<sup>[4]</sup>。对于传统点焊过程中电极位移曲线的研究也主要以膨胀过程(膨胀量、膨胀速度)为主<sup>[5-9]</sup>。

间接点焊过程中, 液压成形管是中空的, 板管在受热膨胀的同时还在电极力的作用下产生变形。其变形量包括两部分: 局部变形, 即点焊过程中焊点的压痕; 以及全局变形, 即由于电极力的作用而产生的液压成形管自身的弯曲。在点焊过程中, 两者的变形过程相互耦合在一起。下面将通过电极位移曲线着重分析论述焊接工艺参数对膨胀量和变形量的影响。

### 2.1 焊接电流与电极位移的关系

不同焊接电流作用下的电极位移曲线如图 2 所示, 电极力和焊接时间分别固定为 2.6 kN 和 16 周波。(图中圆圈分别表示间接点焊过程中焊接阶段开始和结束时刻, 以下类同)传统点焊过程中, 最大膨胀量均出现在通电结束时刻, 并且随焊接电流的增大而逐渐增加<sup>[8,9]</sup>。然而由图 2 可见, 间接点焊过程中, 最大膨胀量仅出现在焊接阶段的前几个周波内。其原因是由于间接点焊过程中, 电极只有一边

能够到达, 管的内部缺乏向下的约束, 使得受热膨胀的金属无法完全推动电极。并且随着焊接温度的升高材料逐渐软化, 在电极力的作用下板管产生弹塑性变形, 使得膨胀过程与变形过程相互耦合。焊接阶段, 电极剧烈的抖动可充分体现耦合的作用。随着变形的逐步增加, 板管的接触状态发生变化, 最终形成环状熔核。继续升高电流, 由于输入能量增多, 熔核产生的热膨胀力过大, 从而发生喷溅。在保持阶段初期, 由于熔核尚未完全冷却, 在电极力的作用下, 使得焊接变形进一步增大。

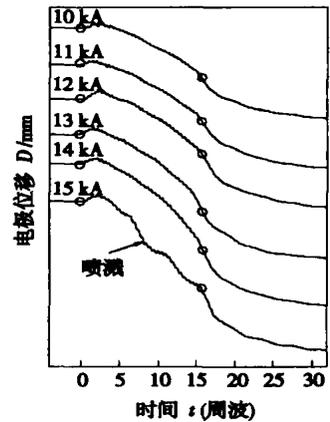


图 2 焊接电流与电极位移的关系

Fig. 2 Relationship between welding current and electrode displacement

图 3 显示了不同焊接电流作用下最大膨胀量和变形量的变化规律。由图 3 可见, 间接点焊过程中, 最大膨胀量并未随着焊接电流的增大而持续增加, 这也是由于板管间接点焊的结构刚性较小, 焊点下方缺少支撑所致; 然而随着焊接电流的递增, 最大变形量则基本上呈线性增加。

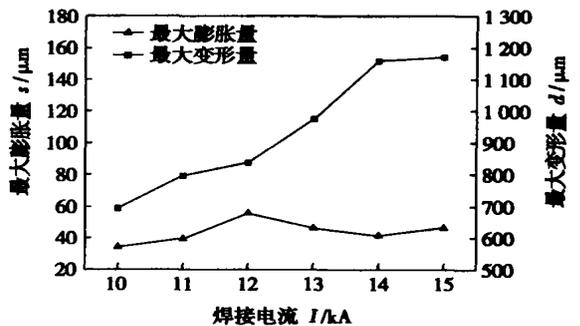


图 3 不同焊接电流下的最大膨胀量和变形量

Fig. 3 Maximum expansion and deformation at different welding current

### 2.2 电极力与电极位移的关系

图 4 反映了不同电极力对电极位移曲线的影响,焊接电流和时间分别固定为 14 kA 和 16 周波。当电极力较小时,不能有效地抵抗液态熔核的膨胀力,从而产生喷溅。从喷溅的位移曲线可以直观地观察到,发生喷溅时,与传统点焊喷溅位移曲线的陡降现象<sup>[9,10]</sup>有所不同,在电极的下落阶段均会出现阶梯状畸变。因此,可以把位移曲线这个阶梯状畸变作为判读间接点焊焊点发生喷溅的特征信息。在提取这一阶梯状畸变时,为了保证有效性,必须对位移曲线进行滤波。

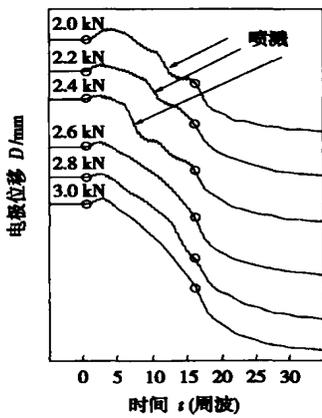


图 4 电极力与电极位移的关系

Fig. 4 Relationship between electrode force and electrode displacement

图 5 体现了间接点焊过程中最大膨胀量和变形量随电极力的变化情况。如图所示,电极力较小时,膨胀量随电极力的增加而逐渐减小,但由于电极只在一边加压,因而当电极力增大到某个值后,其对最大膨胀量的影响则不太明显。然而最大变形量则呈

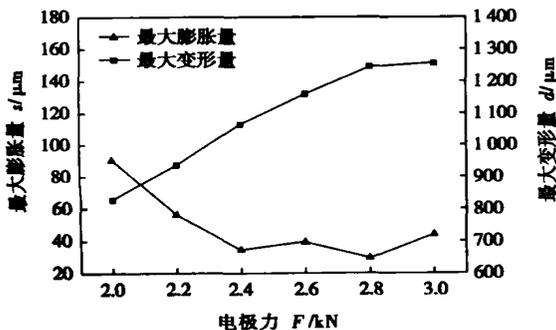


图 5 不同电极力下的最大膨胀量和变形量

Fig. 5 Maximum expansion and deformation at different electrode force

现出较好的线性,随电极力的递增而线性增加,平均增幅达到了 530 μm/kN。

### 2.3 焊接时间与电极位移的关系

最大膨胀量和变形量随焊接时间的变化关系如图 6 所示。随着焊接时间的增加,最大膨胀量略有上升,但幅度不大。焊接时间由 4 周波增加到 16 周波时,最大膨胀量仅仅增加 17 μm,而最大变形量则增加了 833 μm,而且基本上随焊接时间的递增而线性增加。

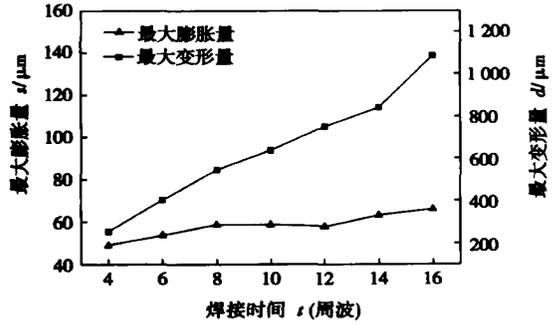


图 6 不同焊接时间下的最大膨胀量和变形量

Fig. 6 Maximum expansion and deformation at different welding time

由图 2 和图 4 可以看出,电极位移曲线较好地反映了板管间接点焊的焊接变形过程。随着焊接参数的增强,变形量相应线性增大。由于大变形,焊点周围区域出现拉应力,当变形较大,拉应力超过抗拉极限后,焊点周围将产生热塑性裂纹。裂纹的出现会降低焊点的强度和完整性,因此,间接点焊过程中应监控板管的变形过程,以减小焊接变形,防止裂纹。

伺服焊枪可以通过调整伺服电机的电流改变电机扭矩,从而改变电极力,而且响应时间很短,最佳调幅可达到 0.1 kN/ms。因此可以利用伺服焊枪的可变电极力特性,在焊接阶段和保持阶段改变电极力,控制间接点焊的变形量,提高焊接质量。变电极力对间接点焊变形量以及焊接质量的影响还有待进一步研究。

## 3 结 论

(1) 与传统点焊相比,由于板管间接点焊特殊的结构形式,焊接阶段膨胀过程与变形过程相互耦合,使得电极位移曲线不能较好体现焊接工艺参数对最大膨胀量的影响;保持阶段,在电极力作用下,

焊接变形进一步加大。

(2) 电极位移曲线较好地反映了板管间接点焊的焊接变形过程,且最大变形量随着电极力的增大和焊接热输入的增多而线性增加。为了降低焊接变形对焊接质量的影响,可在焊接阶段或保持阶段,利用伺服焊枪的可变电极力特性控制电极力,减少焊接变形。

(3) 电极力较小或焊接热输入较大时容易喷溅。发生喷溅时,电极位移曲线出现阶梯状畸变,可用电极位移曲线斜率的变化评判板管间接点焊过程中的喷溅缺陷。

### 参考文献:

- [1] Dohmann F, Hartl Ch. Tube hydroforming-research and practical application [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 71(1): 174-186.
- [2] Michael G P, Joseph M L. Closed tubular automobile parts demand innovative welding methods [J]. *Welding Journal*, 1997, 76(10): 55-58.
- [3] Slavik S A. Using servoguns for automated resistance welding [J]. *Welding Journal*, 1999, 78(7): 29-33.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会电阻焊专业委员会. 电阻焊理论与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [5] 曹彪, 姜以宏, 王建一. 点焊过程热膨胀变形分析 [J]. *焊接学报*, 1995, 16(2): 94-99.
- [6] 胡德安, 郑如忠, 冀殿英. 电阻点焊电极位移监测系统的研究 [J]. *南昌航空工业学院学报*, 1995(1): 16-22.
- [7] 常云龙, 黄石生, 余文松, 等. 热膨胀电极位移法用于机器人点焊过程的研究 [J]. *机器人*, 1999, 21(2): 135-138.
- [8] Tsai C L, Dai W L, Dickinson D W, *et al.* Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding [J]. *Welding Journal*, 1991, 70(12): 339-351.
- [9] Ji C T, Zhou Y. Dynamic electrode force and displacement in resistance spot welding of aluminum [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(3): 605-610.
- [10] 罗贤星, 邓黎鹏, 张晨曦, 等. 铝合金点焊过程中影响因素的特征判识与熔核尺寸的评估 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(7): 37-43.

### [ 上接第 8 页 ]

炉管焊接接头的蠕变损伤研究 [J]. *压力容器*, 2000, 17(4): 11-15.

- [6] 涂善东. 高温结构完整性原理 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2003.
- [7] Jiang Wenchun, Gong Jianming, Chen Hu, *et al.* Finite element creep analysis of brazed stainless steel plate-fin structure [C] // *International Conference of Fracture Mechanics 2006, Nanjing, China*, 2006, 27-33.

- [8] 史进, 涂善东, 巩建鸣, 等. 铸态镍基钎料高温蠕变特性的试验研究 [J]. *机械工程材料*, 2005, 29(7): 20-24.

**作者简介:** 蒋文春, 男, 1980 年出生, 博士研究生。主要从事微小过程设备的蠕变与断裂, 高温设备寿命评价技术和石油化工装置先进再制造技术的研究。发表论文 10 篇。

**Email:** jiangwenchun@126.com

**作者简介:** 杨洪刚, 男, 1979 年出生, 博士研究生。研究方向为电阻点焊焊接质量在线监测与控制方法研究。

**Email:** hgyang@sjtu.edu.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

### **Simulation of AF-MIG weld pool width control by nine point controller** FAN Ding<sup>1,2</sup>, LI Jianjun<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, GAO Yuan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Processing Technology for Non-ferrous Materials, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Gansu Advanced New Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p1-4

**Abstract:** Considering the characteristics of aluminum alloy MIG welding process, nine-point controller was developed to control weld pool width. The structure and the principle of nine-point controller were analyzed. Based on the mathematic model of step response between pulse current and weld pool width, the simulations on three controllers of PID, fuzzy and nine-point controller used to control aluminum alloy MIG weld pool width were studied. The simulation results show that nine-point controller not only has the best stability and robust than PID and fuzzy controller, but also assure the control accuracy and provides the theoretical basis to realize the intelligent control for aluminum alloy pulsed MIG welding process.

**Key words:** aluminum alloy; metal inert gas welding; nine-point controller; intelligent control; simulation

### **Effect of brazing residual stress on creep for stainless steel plate-fin structure** JIANG Wenchun, GONG Jianming, TU Shandong, CHEN Hu (College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p5-8

12

**Abstract:** The effect of residual stress on creep for microminaturized nickel base brazed stainless steel plate-fin structure was analyzed by finite element method with ABAQUS code. The results show that because of mismatch of mechanical properties between filler metal and base metal, the welding residual stress was generated inevitably, which has great influence on the creep deformation and life. The residual stress can not be ignored in the strength design and should be controlled during the manufacture of plate-fin structure. The stress and strain is concentrated in the fillet where the creep crack will initiate, propagate and result in the failure. The strain and stress in plate is larger than that in fin, so the cracking susceptibility of plate is larger than that of fin. The present work provides a reference for strength design at high temperature for plate-fin structure.

**Key words:** stainless steel plate-fin structure; brazing residual stress; creep; finite element

### **Effect of processing parameters on sheet-tube indirect spot welding process** YANG Honggang, ZHANG Yansong, CHEN Guanlong (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p9-12

**Abstract:** In sheet-tube indirect spot welding, it is difficult to assure welding quality because the welding deformation is too

large. The expansion and welding deformation were investigated and the influence of different welding parameters (welding current, electrode force and welding time) on indirect spot welding process was analyzed through electrode displacement. The experiment result shows that the course of the expansion and welding deformation are coupled to each other in the welding stage; in the holding stage, welding deformation gets larger under the action of applied electrode force. Maximum welding deformation of sheet-tube indirect spot welding process is almost linear with electrode force and input welding energy. Ladder-type occurs in the electrode displacement curve when the expulsion happens, so the expulsion can be judged according to the slope coefficient of electrode displacement. The result provides a theoretical guidance for on-line monitoring and control of welding quality in sheet-tube indirect spot welding process.

**Key words:** indirect spot welding; electrode displacement; welding deformation

### **Pure copper coating deposited by automatic plasma welding with melting strip electrode technology** WANG Kehong, LI Jianyong, JI Dayuan, ZHANG Deku (Department of Material Science and Engineering, Nanjing University Science and Technology, Nanjing 210094, China). p13-16

**Abstract:** For tubular workpiece surface deposited by Cu, the process of deposition by automatic plasma welding with melting strip electrode was designed and researched. The Cu strip electrode enters the welding region with the passive automatic feed-in manner. The plasma arc burns between the tungsten, and copper strip and the protective agent is blown into the welding region. The plasma arc makes the copper strip melt, and the Cu deposited layer was formed on the base metal surface of steel. The welding process is stable and the weld appearance is excellent. The detected results show that the deposited layer of pure copper with 1-6 mm thickness can be gotten. The pure copper and the base metal can be welded together without the base metal being molten. The shear strength exceeds 150 MPa, which is greater than the strength of Cu layer. The bonding quality is excellent and there is no welding defects such as gas pore, incomplete fusion and slag inclusion. The SEM and EDAX results show that metallurgical bonding by diffusion is formed between the deposited pure copper layer and the base metal. And within the distance of 10-30 μm from the side of the deposited copper layer interface, the content of Fe decreases to less than 1%.

**Key words:** deposited welding; melting strip electrode; plasma arc; copper strip; automatic welding

### **Numerical simulation on temperature field in laser welding of thin aluminum alloy plate with different thickness** YU Shurong<sup>1,2</sup>, XIONG Jinhui<sup>1</sup>, FAN Ding<sup>1,2</sup>, CHEN Jianhong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys, The Ministry of