

复杂薄壁空间曲线焊缝的变形控制

王俊恒¹, 高洪明¹, 张广军¹, 谢美蓉², 吴 林¹

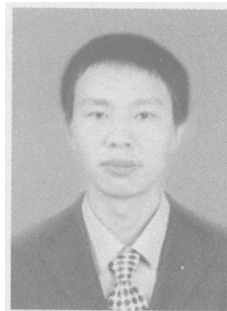
(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘 要: 根据某产品空间曲线焊缝壁薄、密集、受热易变形, 对管间隙及错边量要求高的特点, 对其结构及其受力受热情况, 及弧焊变形机理进行了深入地研究, 并提出了抑制其变形的“分段线性控制”策略。依据焊缝间隙与焊接电流的对应关系, 配合机器人虚拟 ARC-ON/OFF 信号与 PLC 电流分段线性控制信号, 实现了连续焊接时电流的分段线性控制。结果表明, 该控制策略行之有效, 成功地应用于该焊件的实际生产, 提高了产品的质量及生产效率。

关键词: 空间曲线焊缝; 弧焊机器人; 可编程控制器; 电流分段线性控制

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)03-077-04



王俊恒

0 序 言

随着经济、科技的发展, 各行业产品趋向个性化, 产品更新、改型加快, 生产批量越来越小, 质量要求越来越高, 采用手工或刚性自动化设备, 很难适应产品多变的特点, 因而柔性制造技术日益受到关注, 机器人则在该领域内发挥了得天独厚的优势^[1,2]。

某产品由数百根壁厚仅为 0.32 mm 的不锈钢小截面方管缠附到锥体模胎之上, 采用焊接方法将其固连在一起而形成。该焊件对管间隙及错边量有很高要求, 然而以下各因素造成其对弧长变化及电弧位置十分敏感, 易导致焊偏、焊穿或未焊透等现象。

(1) 焊缝的曲率连续变化。

(2) 管壁薄, 易变形, 造成错边、管间隙变化及焊穿等现象。

(3) 型腔结构决定了焊接热量只能通过水平和竖直的薄壁进行传导, 且不锈钢自身导热性差, 线膨胀系数大, 易造成热聚集。

该焊件的生产过去一直采用手工 TIG 焊接方法, 生产效率低、周期长, 人为因素影响大, 质量不稳定, 返修率高。

针对该焊件热输入敏感、生产效率低下等问题, 文中对该结构焊件的弧焊机理进行了深入研究, 并考虑焊件结构等诸多因素, 设计制造一个热输入可控、动态性能稳定的弧焊机器人系统。

1 空间焊缝弧焊机器人系统组成

该弧焊机器人系统组成包括弧焊机器人、变位机及行走机构、可编程控制器 (programmable logic controller, 简称 PLC) 中央控制系统、激光跟踪传感器、模胎、数字焊接电源以及其它附属设备等。

依据功能不同, 将系统划分为位姿调整系统、视觉系统和中央控制系统等子系统。位姿调整系统由首钢 Motoman-UP20 机器人、自行设计研制的龙门行走机构、旋转倾斜变位机及机器人 XRC 控制柜组成。该系统使弧焊机器人、龙门行走机构与变位机协调运动, 调整焊枪及激光跟踪传感器与焊缝的相对位置, 使空间螺旋焊缝焊接位置始终处于船形焊位置, 并且保持激光跟踪传感器与焊缝的相对方位不变。视觉系统由三条纹激光跟踪器和计算机组成, 在密集的空间螺旋焊缝中准确地识别和跟踪目标焊缝, 并将焊缝形变信息传送给工业控制计算机。中央控制系统由 PLC 控制柜、rob 5000 和人机界面等组成。该系统是控制系统的核心, 协调各子系统, 使弧焊机器人系统协调工作; 监测焊接之前及焊接过程中各子系统状态, 并对异常事件进行处理; 良好的人机界面, 动态显示焊接过程中的各种主要参数 (如电流、电压和横向位移波形以及焊缝各分段焊接时间等), 以便异常情况发生时, 及时进行人工干预, 同时还可以采集并存储相关数据以便为后续研究、焊件故障的诊断和改良提供依据。

2 复杂薄壁空间曲线焊缝变形控制

2.1 小截面方管变形机理

小截面方管形成的空间螺旋焊缝,在焊接过程中,由于受热不均,受热膨胀部分将受到周围低温部分的拘束,产生沿焊缝切线方向的纵向应力 R_l 和垂直于焊缝的横向应力 R_t ,如图 1 所示。其中 R_{ll}, R_{lr} 分别为左、右侧方管中的纵向应力; R_{tl}, R_{tr} 分别为左、右侧方管中的纵向应力。

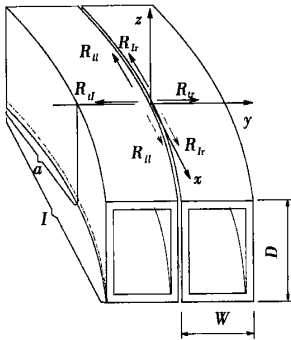


图 1 小截面方管热应力模型示意图

Fig 1 Thermal stress model of thin rectangular tubes

假设方管宽为 W , 高为 D , 内腔宽为 W_{in} , 高为 D_{in} , 所焊长度为 l , 已经焊接的长度为 a , 纵向应力积分区域为 A_{ll}, A_{lr} , 横向应力积分区域为 A_{tl}, A_{tr} , 则有

$$F_{ll} = \int_{A_{ll}} R_{ll} dA = \int_{A_{lr}} R_{lr} dA = F_{lr} \quad (1)$$

理想情况下纵向力 F_l 可表示为

$$F_l = F_{ll} + F_{lr} \quad (2)$$

由于焊缝相对于方管处于偏心位置,纵向作用力产生相对于方管形心的一弯矩 M_l ,可表示为

$$M_l = F_l \times D/2 \quad (3)$$

在力和弯矩的作用下,焊缝两侧小截面方管将产生相同的纵向伸长和向上挠曲突起。其伸长 Δl_{ll} 和挠度曲线方程表达式为

$$\Delta l_{ll} = \int_l \frac{F_{ll} dx}{E(DW - D_{in}W_{in})} = \int_l \frac{F_{lr} dx}{E(DW - D_{in}W_{in})} = \Delta l_{lr} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_{ll} = \frac{M_{ll}x}{6EI_y l} [l^2 - 3(l-a)^2 - x^2], & 0 \leq x \leq a; \\ v_{ll} = \frac{M_{ll}x}{6EI_y l} \{-x^3 + 3l(x-a)^2 + [l^2 - 3(l-a)^2]x\}, & a \leq x \leq l. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{lr} = \frac{M_{lr}x}{6EI_y l} [l^2 - 3(l-a)^2 - x^2], & 0 \leq x \leq a; \\ v_{lr} = \frac{M_{lr}x}{6EI_y l} \{-x^3 + 3l(x-a)^2 + [l^2 - 3(l-a)^2]x\}, & a \leq x \leq l. \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_y 为横截面 y 轴的惯性矩。

$$I_y = \frac{DW^3}{12} - \frac{D_{in}W_{in}^3}{12} + (\frac{W}{2})^2(DW - D_{in}W_{in}).$$

同理,横向应力 F_t 可表示为

$$F_{tl} = \int_{A_{tl}} R_{tl} dA = \int_{A_{tr}} R_{tr} dA = F_{tr} \quad (7)$$

横向应力产生的扭矩为

$$M_t = M_{tl} = F_{tl} \times D/2 = F_{tr} \times D/2 = M_{tr} \quad (8)$$

在横向力和扭矩作用下,焊缝两侧小截面方管都将产生大小相等、方向相反的横向弯曲和扭转(表现为焊缝间隙),根据推导可得横向弯曲曲线和扭转角 φ 为

$$\begin{cases} v_t = \frac{F_t(l-a)x}{6EI_x l} [l^2 - x^2 - (l-a)^2], & 0 \leq x \leq a; \\ v_t = \frac{F_t(l-a)}{6EI_x l} \{ \frac{l}{l-a} (x-a)^3 + [l^2 - (l-a)^2]x - x^3 \}, & a \leq x \leq l. \end{cases} \quad (9)$$

$$\varphi = \int_0^l \frac{M_t}{GI_p} dx \quad (10)$$

式中: I_x 为横截面对 x 轴的惯性矩, I_p 为横截面的极惯性矩。

$$I_x = \frac{WD^3}{12} - \frac{W_{in}D_{in}^3}{12} + (\frac{D}{2})^2(WD - W_{in}D_{in}),$$

$$I_p = I_x + I_y.$$

焊接第一道焊缝时,方管受热膨胀,但受到周围低温方管及方管端部的约束,向管间隙方向膨胀,焊缝间隙减小,形成类似“凹透镜”形状的两端大,中间小的间隙。第一道焊缝焊接完毕,方管横向收缩,造成第二道及其后焊缝形成类似“凸透镜”形状的间隙。

在焊接过程中,热源会因为各种因素而偏离焊缝中心,造成焊缝两边热输入的不一致。因此,焊缝两边纵向伸缩量不同,向上挠曲不一致,形成错边,影响焊接过程的稳定,甚至使焊接过程中断。

根据上述模型,应用有限元软件 Marc 对该焊件的焊接过程进行了模拟。为减小高斯热源在三维热传导分析中带来的不必要的误差,文中采用 Goldak 提出的双椭球热源模型^[3],获得了更满意的结果。

前半部分椭球模型定义为

$$q(x, y, z, t) = [\frac{6\sqrt{3}f_0 Q}{a_1 b_1 c_1 \pi \sqrt{\pi}}] e^{-3(x/a_1)^2} e^{-3(y/b_1)^2} e^{-3(z/c_1)^2} \quad (11)$$

后半部分椭球模型定义为

$$q(x, y, z, t) = \left[\frac{6\sqrt{3}f_b Q}{a_1 b c_2 \pi \sqrt{\pi}} \right] e^{-3(x/a_1)^2} e^{-3(y/b)^2} e^{-3(z/c_2)^2} \quad (12)$$

式中: a_1, b 分别是椭球模型的 x, y 半轴长度; c_1, c_2 分别是前后椭球体 z 向的半轴长度; f_a, f_b 是热源集中系数, $f_a + f_b = 1$; Q 是热输入量, $Q = \eta UI$ (η 是电弧的热效率)。

根据焊件的实际热物性参数及高温部分经外推得到的参数,界定了 Marc 软件所需材料特性。并根据其实际的拘束及传热情况,对焊件施加了边界条件。

模拟结果如图 2 所示。该模拟结果与实际焊接结果契合良好。

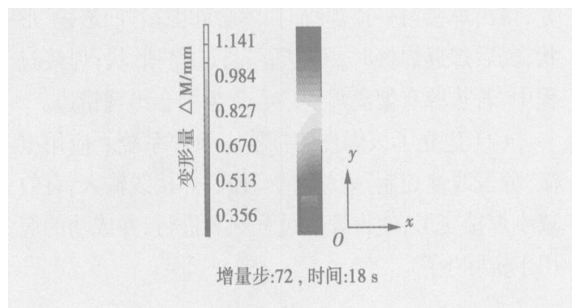


图2 焊接变形仿真效果图

Fig 2 Simulation of welding deform

2.2 电流分段线性控制

为了减小焊接变形量,模拟上添加了几道卡箍,以增加对小截面方管的拘束。但是,仍然无法使焊缝间隙保持均匀一致。如果采用恒值小电流焊接,在间隙较大的地方,熔池无法形成,焊接将被迫中断。因此,为保证焊接过程的稳定性,须精确控制热输入,根据间隙大小及时调整焊接电流。

2.2.1 电流的控制

电流的调整要求准确及时。机器人示教盒有调节电流功能,但是采用示教盒进行电流调节有以下不足。

(1) 电流调节过程繁琐,步骤较多。

(2) 人机界面中的电流显示为参考值,需要标定显示电流值与真实电流值之间的关系,此转换过程造成电流调节不便。

(3) 电流调节幅度不可控,且不能直观显示调节幅度等。

文中采用 PLC 进行电流的控制。电流的调节通过 PLC 中央控制系统的人机界面(图 3)完成,操

作简单。人机界面上通过数字电流表动态显示电流值,并显示电流同时间的变化曲线(图 3a),使调节的幅度直观可控。调节电流时,电流变化的步长为某一确定值,可以根据实际情况进行调节(图 3b)。PLC 可以自动调节电流,但有人工干预时,人工干预优先。

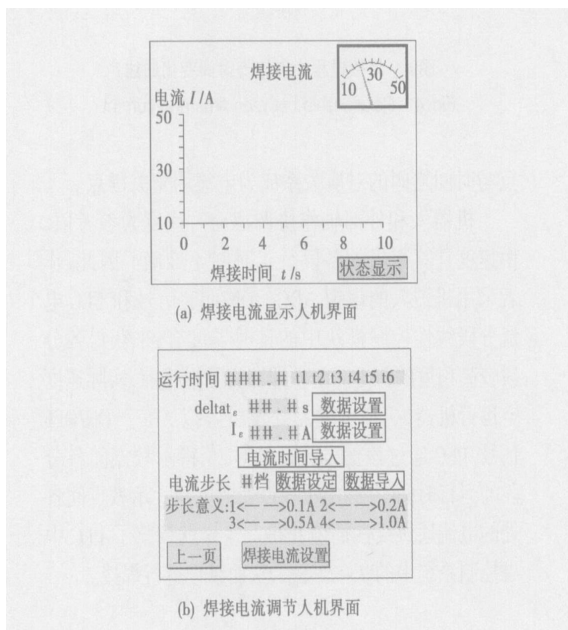


图3 PLC 电流控制人机界面

Fig. 3 User interface of PLC current control

2.2.2 电流分段控制策略

该焊件的间隙变化有两种,一是同一条焊缝间隙随着焊接的进行不断变化,一是不同焊缝间隙不同。若想得到良好的焊缝,必须精确控制线输入 q_v ,

$$q_v = \frac{\eta UI}{v} \quad (13)$$

式中: η 为电弧热效率; v 为焊接速度; I 为焊接电流; U 为电弧电压。

当机器人和外部轴作协调运动时,设定的行走速度为参考值,不准确。并且电流 I 也是随着间隙而变化的,因此,热输入的控制比较困难。

单条焊缝焊接时,间隙的变化与时间存在一定规律,因此电流可以根据时间的变化进行调节,如图 4 所示。

不同焊缝间隙不同,当间隙变化不大时,可以不作调整或少作调整,但是当间隙变化过大,焊接工艺参数须重新调整且需要重新示教。

重新示教过程中,不仅需要考虑焊缝曲率的变化,同时还要把间隙变化比较大的点作为示教点以方便电流的调整。电流是随时间变化的,因此,示教

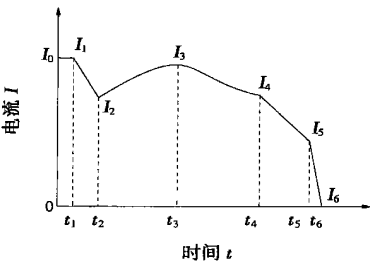


图 4 焊接过程中电流随时间变化曲线
Fig. 4 Relationship between time and current

点与时间之间的对应关系成为电流调整关键点。

机器人和外部轴作协调运动时速度为参考值，由速度计算得出的各段行走时间不准确。因此，作者采用机器人的虚拟 ARC - ON/OFF 信号和 PLC 电流分段线性控制模块中的计时器配合，来获得各分段较高精度的行走时间。即在实际焊接前，实际速度空运行机器人，在示教点处发出虚拟 ARC - ON/OFF 信号，PLC 通过该信号进行计时，获得示教点间各分段的运行时间，并给出示教点处的电流。示教点间各处的电流通过线性插值获得。这样就调整了 PLC 中央控制系统中的 $I-t$ 关系，从而继续进行焊接。

3 试验结果及讨论

对该焊件进行了焊接试验，试验条件如下：焊接方法采用 TIG，焊接电流为 16.5 ~ 22.5 A，电弧电压为 10.5 ~ 12.5 V，焊接速度为 2 ~ 4 mm/s。焊接分段进行，焊缝的长度随曲率的减小而依次增加，各段长度分别为 60, 120, 240, 380 mm，从曲率大的一端起焊。试验结果如表 1 所示。

空间曲线焊缝曲率大的一端，曲率及曲率变化较大，激光跟踪困难，造成焊枪偏离接缝的几率较大，易造成焊偏、错边及焊穿等问题。因此，该段设置的拘束较大，焊缝长度短，并且由于电流调整得当及时，焊接过程平稳，焊缝质量良好。

表 1 试验结果
Table 1 Experiment results

焊缝长度 <i>l</i> /mm	偏离中心最大值 <i>d</i> /mm	中断 次数	焊缝 质量
60	0.41	0	良好
120	0.38	0	良好
240	0.34	0	良好
380	0.24	0	良好

随着曲率的变小，焊缝逐渐变得平直，激光跟踪相对容易，焊接过程相对更加平稳，因此，各段焊缝长度有所增加，焊接质量也有所提高。

4 结 论

- (1) 通过对复杂空间焊缝结构变形机理的研究，得出焊接第一道焊缝时，焊缝间隙呈“凹透镜”形状，其后焊缝焊接时，间隙呈“凸透镜”形状；焊接过程中，若热源有偏离焊缝中心现象则会出现错边。
- (2) 建立了该焊件的机器人弧焊系统。应用电流“分段线性控制”策略，精确控制焊接线输入，有效减小焊接变形，使得焊接过程顺利进行，并成功的应用于实际生产。

参考文献:

[1] 哈恩晶. 焊接机器人的应用现状与发展趋势[J]. 机械工人·热加工, 2004(5): 16-18.

[2] 刘大胜, 李庆杰, 曲道奎. 焊接机器人的发展现状与趋势[J]. 机械工人·热加工, 2001(9): 6-7, 18.

[3] GoHak J, Chakravarti A, Bilby M. A new finite element mode for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.

作者简介: 王俊恒, 男, 1973 年出生, 博士研究生。主要从事焊接自动化、机器人技术、焊接结构及工艺等领域的工作。

Email: jhenrysc@hit.edu.cn

tent is 24.5%—25.5%, B content is 1.30%—1.40%, W content is 3.9%—4.2%, V content is 3.0%—3.2%.

Key words: alloy element; iron-base; hardfacing alloy; grinding abrasion

Effect of second phase particles on γ grain size and toughness and strength of CGHAZ in micro-calcium steel

JIA Kun-ning, GAO Cainu, DO Linxiu, WANG Guodong (The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China). p73—76

Abstract: The thermal-stable particles of oxide containing Ca can be formed in micro-calcium steel which can be obtained by appending Si-Ca powder into carbon steel. The microstructure, γ grain size, strength and toughness of coarse grain heat affected zone (CGHAZ) in micro-calcium and no micro-calcium steels were studied by SEM, microscope, tensile test and series impact experimental. The research show that the second phase particles have strong pinning force to γ grain boundary of CGHAZ in micro-calcium steel. It can retard γ grain growth in the course of welding, and fine γ grain in the CGHAZ, and improve the strength and toughness of CGHAZ in micro-calcium steel.

Key word: micro-calcium; γ grain boundary; γ grain size; toughness

Deformation control of complex space curve welded joint

WANG Junheng¹, GAO Hongming¹, ZHANG Guangjun¹, XIE Meirong², WU Lin¹ (1. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076, China). p77—80

Abstract: A type work-piece has some features such as thin wall, dense space curve welded joint, easy to deform when heated, a high demand of gap and unfitness and so on. According to the structure characteristic and the states of heating and stress for the welding parts, the distortion mechanism of the work-piece has been further investigated and subsection linear control strategy for current to suppresses the distortion has been proposed. Based on the relationship between the gap and the welding current, the subsection linear control strategy for the current has been implemented by using the signals of virtual ARC_ON/OFF companied by the current control signals produced by PLC. It has been approved that the control strategy can be successfully applied in the actual welding production and improves the quality and productivity of the work-piece.

Key words: space curve welded joint; arc welding robot; PLC; subsection linear current control

Analyze and design of RC snubber circuit in full-bridge inverter main circuit

TIAN Songya, LI Wangang, SUN Yan, Wu Dongchun (The College of Mechanical & Electrical Engineering Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China). p81—84

Abstract: A great change of load occurs by freewheeling diode turning on and turning off in freewheeling circuit, it acts great

quality of di/dt on main circuit. Voltage surge happens at the action of transformer leakage, induction of snubber and circuit induction, and hams IGBT by high voltage, and influences IGBT reliable work. If freewheel diode is in state of turning off over high voltage will not produce, and it is good switching trace. Match model of IGBT U_{ce} and U_{ce} voltage equation is derived during turning off, and it shows that the less transformer leakage, the less voltage surge. According to main circuit parameter, R is calculated in good switching trace, and capacitance is calculated at the requirement of resistance power in snubber circuit and switching trace, and model is testified by the experiment. Reliability of main circuit is improved in full bridge inverter.

Key words: full bridge inverter main circuit; switching trace; RC snubber circuit; voltage surge

Microstructure in Fe—Cr—C hardfacing alloys with high C and Cr

YANG Wei, WEI Jianjun, HUANG Zhiqian (Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, China). p85—88

Abstract: The effects of C and Cr on microstructures of Fe—Cr—C hardfacing alloys were studied. While the content of carbon is about 6.0%, the content of chromium changed, and while the content of chromium is about 40%, the content of carbon changed. The results show that C and Cr can both increase quantity of $(Cr, Fe)_7C_3$ primary carbide. With the content of Cr and C increasing, the shape of the primary carbide of Fe—Cr—C hardfacing alloy layers become more and more integrate, and the distributing of the primary carbide also becomes more and more dense. The size of the respective primary carbide gets bigger. The content of Cr in $(Cr, Fe)_7C_3$ primary carbide become more when the content of Cr are increased under the C content of 6.0%; but with the Cr content of about 40% the carbon content increasing makes the content of Cr in $(Cr, Fe)_7C_3$ primary carbide fewer.

Key words: high-chromium cast iron; hardfacing alloy; primary carbide $(Cr, Fe)_7C_3$; microstructure; submerged arc welding

Microstructure and mechanical property of cast iron spray-welding

LEI Ali, FENG Lajun (School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). p89—92

Abstract: In order to avoid chill and quenched structure, spheroidal graphite iron was spray-welded using oxyacetylene spray torch with self-fluxing alloy powder F101 and Ni60. It was also welded using arc welding with cast iron electrode Z308. The tensile strength, hardness and metallurgical structure of samples were inspected. The results indicate that chill, quenched structure and crack were appeared in the welds of arc cold welding. The hardness of fusion zone of using Ni60 alloy powder increased up to 701 HV, and it is badly harder than that of base metal. The hardness of heat-affected zone and weld using F101 alloy powder is almost the same as that of base metal. Metallurgical structures indicate that there exists