

椭圆形轨迹检测及焊枪轨迹规划

上海交通大学(200240) 屈贤良 陈俊梅 杨 霄 余 春 陆 皓

摘要 为了实现油罐车等椭圆形截面罐体的自动焊接,提出了一套轨迹检测机构。介绍了该机构的机械结构及检测原理,并完成了自动焊接过程中焊枪的轨迹规划及实际焊接过程中的焊枪轨迹修正方案。采用 ABAQUS 有限元分析软件对实际焊接过程建模分析,结果表明:对于几何参数在一定范围内变化的椭圆形轨迹的焊接过程,检测机构可以实现轨迹的实时检测并为焊枪运动轨迹控制提供了可靠参数。检测机构的设计尽可能减少了控制系统中电机的数量,有效地降低了设备成本。

关键词: 椭圆 轨迹检测 焊枪轨迹规划

中图分类号: TG432

0 前 言

为保证容积和罐体的稳定性,油罐车等大多数液体运输车辆的罐体横截面均设计成椭圆形状,封头与筒体相连接的部位焊缝是椭圆形的轨迹。对于这类不规则曲线的焊接问题,目前国内外大多采用焊接机器人实现。Byoung Oh Kam 等人^[1-3]提出两个轮子结构的移动焊接机器人,基于单片机及电位接触传感器实现焊缝的跟踪和控制;S. K. Lee 等人^[4-5]分别采用视觉传感器和激光扫描仪建立不规则焊缝跟踪系统;清华大学与北京石油化工学院装备技术研究所^[6-8]联合研制出一种球罐磁吸附轮式移动焊接机器人,可应用于大型球罐焊接的野外作业。采用焊接机器人可实现罐体自动焊接,但由于弧焊机器人价格昂贵,很多厂家无力购买,使国内这类罐体的生产长期停留在手工焊接的水平上,焊接效率和质量很难保持稳定^[9-10]。文中以 MIG 焊为例提出一套基于 PLC 的轨迹检测及控制机构,通过对椭圆罐体的旋转轨迹进行实时检测控制焊枪的位姿及焊接速度。经模拟计算校核,该机构的检测及控制精度完全满足焊接要求。

1 检测机构系统组成

针对椭圆轨迹焊接的控制要求,所研制的轨迹检测机构主要由两检测轮(A、B)、编码器、角度传感器、弹簧及焊枪连接机构等组成。系统总体结构见图1。

两检测轮上均装有编码器,焊枪固定于两轮的中垂线上且随着固定板摆动,摆动中心位于角度传感

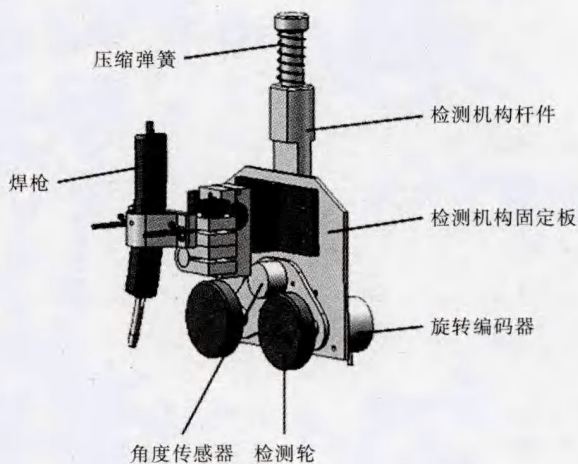


图1 检测机构结构简图

器处,试验平台机械结构可保证两检测轮始终与罐体表面接触。假设焊接过程中两检测轮在罐体表面滚动而不滑动,两编码器输出信号可作为控制量调节焊枪高度及水平位置,从而实现焊枪位姿的控制。

2 焊枪的运动学模型

2.1 椭圆罐体数学模型

根据工程实例建立椭圆罐体数学模型,如图2所示。可知1/4平面的轮廓线分别由3段圆弧拟合而成。

该1/4平面的轮廓线方程:

当 $0^\circ \leq \theta < \theta_2$ 时,

$$\begin{cases} x = R_2 \cos \theta - (R_2 - L_2) \\ y = R_2 \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

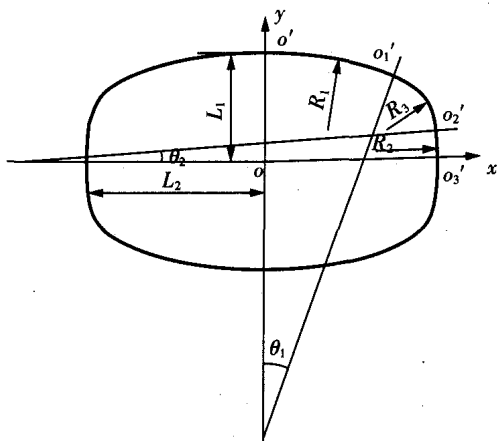


图2 椭圆罐体模型

当 $\theta_2 \leq \theta \leq 90^\circ - \theta_1$ 时,

$$\begin{cases} x = R_3 \cos \theta + (R_1 - R_3) \sin \theta_1 \\ y = R_3 \sin \theta + (R_2 - R_3) \sin \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

当 $90^\circ - \theta_1 < \theta \leq 90^\circ$ 时,

$$\begin{cases} x = R_1 \cos \theta \\ y = R_1 \sin \theta - (R_1 - L_1) \end{cases} \quad (3)$$

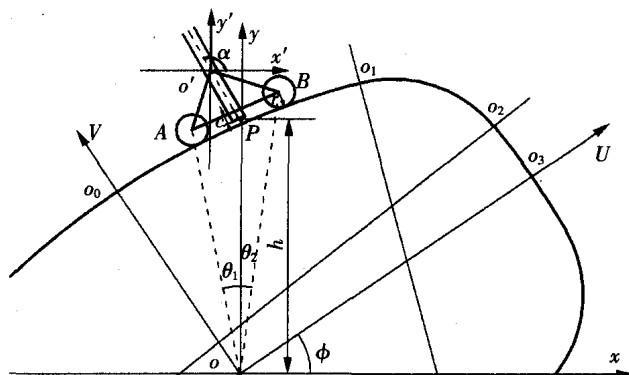
易知,上、下、左、右边的曲率中心分别为 $(0, L_1 - R_1)$ 、 $(0, R_1 - L_1)$ 、 $(R_2 - L_2, 0)$ 、 $(L_2 - R_2, 0)$,而四个角上的曲率中心可表示为:

$$\begin{cases} x = \pm (R_1 - R_3) \sin \theta_1 \\ y = \pm (R_2 - R_3) \sin \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

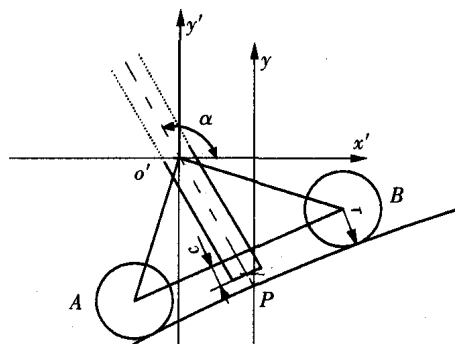
2.2 焊枪运动轨迹数学模型

建立如图3a所示的焊枪运动数学模型,设椭圆罐体逆时针旋转,焊枪所在运动平面的全局笛卡尔坐标为 $\sum O = [O, x, y]$,椭圆罐体旋转 ϕ 角度后的坐

标系为 $\sum O' = [O', U, V]$,检测机构局部坐标系为 $\sum O'' = [O'', x', y']$,P为焊接点,此时焊枪姿态角为 α 。



(a) 罐体旋转数学模型



(b) 检测机构数学模型

图3 焊枪运动模型

如图3b所示,因焊接过程中要求弧长保持恒定,设 $r - c = l_0$ 。检测机构坐标系 $\sum O'' = [O'', x', y']$ 中,焊枪位置(指焊枪端点位置)与焊接点P的坐标变换如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = M_{OO''} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + l_0 \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + l_0 \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' + l_0 \cos \alpha \\ y' - l_0 \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据焊枪运动的数学模型可得出,焊枪的姿态角:

$$\alpha = \theta + \phi \quad (6)$$

式中, ϕ 为罐体逆时针旋转角度,且不同的弧段内 ϕ 与 θ 存在着一定的对应关系。

设焊接速度为 v ,根据椭圆罐体数学模型可得出1/4平面内椭圆罐体旋转过程中焊枪的运动轨迹规划,限于篇幅,不加以详细列出。

3 焊枪轨迹的控制与修正

根据前述的焊枪轨迹规划,基于 PLC 编程可实现

焊枪按照预设的轨迹运动。但实际工程中罐体本身可能存在微小的凹凸缺陷或变形,需根据检测机构输出对焊枪运动轨迹实时修正。

3.1 焊枪姿态角的控制与修正

焊接过程中,检测机构(焊枪姿态)随罐体的旋转左右摆动。笔者认为,实际焊接时,检测机构(焊枪)的摆动角度可直接反应焊接点的法线方向。针对工程实际中不同参数罐体的焊接过程进行模拟计算,结果表明焊枪姿态角的控制可以满足焊接要求。

3.2 焊枪高度的控制与修正

如图4所示,根据检测机构与罐体几何关系可以得到:

$$\begin{cases} |OA|\cos\theta_1 + |OB|\cos\theta_2 = 2(h + c \cdot \sin\alpha) \\ \cos\theta_1 = \frac{|OA|^2 + h^2 - (b - c \cdot \cot\alpha)}{2|OA| \cdot h} \\ \cos\theta_2 = \frac{|OB|^2 + h^2 - (b + c \cdot \cot\alpha)}{2|OB| \cdot h} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $|OA|$, $|OB|$ 分别为检测轮 A, B 中心到罐体旋转中心的距离; h 为焊枪高度; c 为焊枪伸出长度; α 为焊枪姿态角。

根据角度编码器的输出脉冲得出焊枪的摆动角度 $\Delta\alpha_i$, 则:

$$\alpha_n = \alpha_0 + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \cdots + \Delta\alpha_{n-1} = \frac{\pi}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\alpha_i \quad (8)$$

同理,对检测轮编码器 1,2 输出脉冲处理,可分别得出罐体与 A, B 轮相切处的线速度: v_A 和 v_B 。焊接过程中保证焊接速度恒定为 v_0 , 焊接点绝对速度为 v'_0 , 焊接点高度为 h' , 则有:

$$\begin{cases} |OA| = \frac{v_A \cdot [h - (r - c) \sin\alpha]}{v_0 \cdot \sin\alpha} \\ |OB| = \frac{v_B \cdot [h - (r - c) \sin\alpha]}{v_0 \cdot \sin\alpha} \end{cases} \quad (9)$$

将式(8),式(9)代入焊枪初始轨迹规划方程,即可分别得出焊枪高度 h_i 及对应的 θ_1 和 θ_2 。

根据焊枪高度检测值 h 对预设焊枪轨迹进行修正,即可实现焊枪轨迹的闭环控制。

3.3 焊枪水平分量的控制与修正

由于焊枪存在一定的旋转半径,在姿态调节的同时会产生相应的水平分量,设焊枪旋转半径为 R , 水平分量为 Δx , 则有:

$$\Delta x_i = \left| R \left[\sin\left(\alpha_i - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha_{i-1} - \frac{\pi}{2}\right) \right] \right| \quad (10)$$

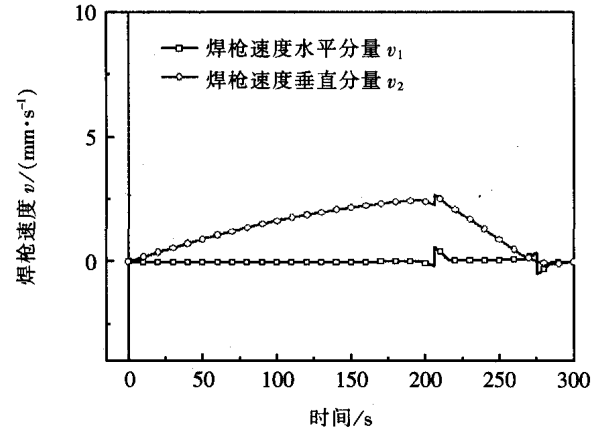
4 轨迹检测仿真计算

4.1 分析电弧稳定性及伺服系统参数调节

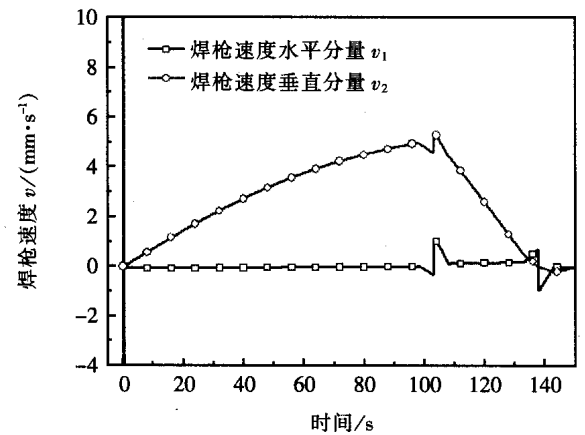
采用 ABAQUS 有限元软件建立椭圆罐体焊接模型,对焊接速度分别为 5 mm/s, 10 mm/s, 15 mm/s 时建模计算,可得出 1/4 平面轮廓曲线内焊枪运动的速度与加速度见图4。

在 1/4 轮廓平面内焊接速度保持恒定时,垂直方向上:焊枪在 R_1 弧段加速,在 R_3 弧初始段产生微小波动且达到极值后减速,到 R_2 弧段上速度基本为 0;水平

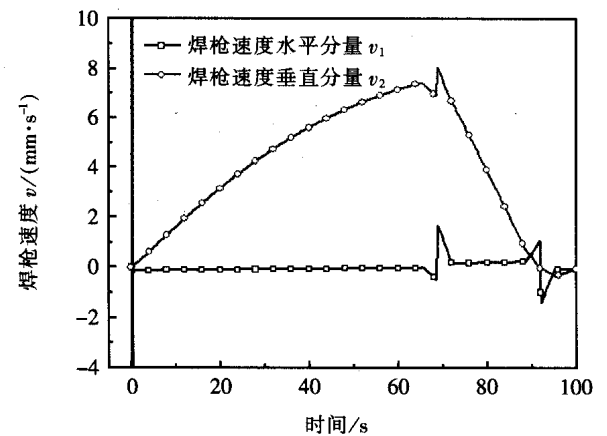
方向速度基本稳定且接近于零,但在 R_2, R_3 弧初始段发生突变,分别达到正向极值和反向极值。从图5中可知:焊接速度越慢,焊枪水平方向速度越稳定且趋向于 0,即电弧越稳定;当焊接速度为 15 mm/s 时,水平振荡速度最大可达到 1.69 mm/s,电弧振荡较为严重。



(a) $v_0 = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$



(b) $v_0 = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$



(c) $v_0 = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

图4 不同焊接速度的焊枪运动参数

工程应用中,在考虑焊接接头质量的同时还需满

足一定的焊接效率,故模拟计算中均取焊接速度 $v_{\text{焊}} = 10 \text{ mm/s}$ 。根据图 4b 中焊枪运动的速度和加速度值,可调节伺服电机的运行速度和加速度。

4.2 椭圆半径对焊枪姿态角控制精度的影响

针对工程实际,分别建立长短轴相差较大(模型 1)及长短轴相近(模型 2)的无表面缺陷椭圆罐体模型。模型的具体参数见表 1,模拟计算结果见图 5。

表 1 模型几何参数						mm
椭圆罐体	L_1	L_2	R_1	R_2	R_3	
模型 1	735	1 650	1 650	400	1 650	
模型 2	1 140	1 235	2 500	2 500	700	

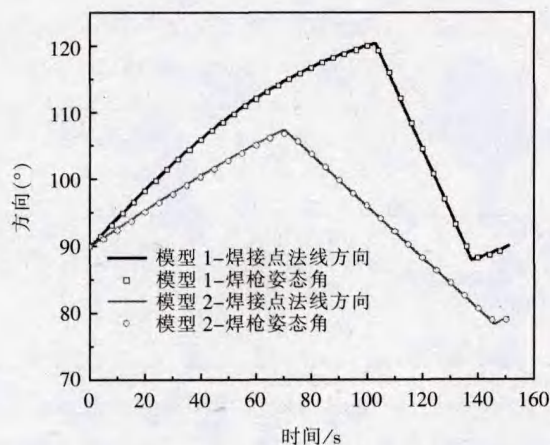


图 5 无表面缺陷罐体模型计算结果分析

如图 5 所示,检测机构(焊枪)的姿态与该焊接点的实际法线方向十分接近,只在 R_1 与 R_3 圆弧过渡处有少许误差;模型 1 中最大误差为 0.59° ,模型 2 中最大误差为 0.66° 。可见,对于无缺陷的理想椭圆形轨迹,检测机构控制的焊枪姿态完全满足实际焊接要求。

4.3 表面凹凸缺陷初的检测精度及轨迹修正方案

实际工程中罐体表面可能存在一定的凹凸缺陷,针对不同的缺陷尺寸作如下分析。

4.3.1 缺陷长度 $\delta < b + r$ 时

此类缺陷尺寸很小,焊枪姿态及水平分量调节可忽略不计,直接利用自动电弧电压控制系统(AVC)调节焊枪高度即可满足焊接要求。

稳态焊接时,电弧电压与弧长成正比,因此可通过控制电弧电压来保持弧长恒定^[11]。设缺陷处垂直方向扰动为 ΔU_i ,则有 $\Delta U_i = U_a - U_g$,其中: U_g 为稳态弧

压, U_a 为 AVC 系统弧压检测值。AVC 反馈控制系统中:

$$\Delta U_i = K_p \Delta U_i(t) + K_i \int_0^t \Delta U_i(\tau) d\tau + K_d \frac{d\Delta U_i(t)}{dt} \quad (11)$$

式中: K_p , K_i , K_d 分别为比例、积分、微分参数。

伺服系统传递函数:

$$G_s = \frac{L}{U_a} = \frac{K_a K_m K_t}{s(s + a_m + K_a K_m K_t)} \quad (12)$$

式中: L 为焊枪垂直位移; U_a 为弧压检测值; K_a 为功率放大增益; K_m , a_m 为伺服电机物理特性常量; K_t 为系统反馈增益^[12]。根据式(12)可初步确定反馈控制系统 K_p , K_i , K_d 值,再根据实际试验稍作调节,使得焊接过程中弧长保持恒定。

4.3.2 缺陷长度 $\delta \geq b + r$ 时

以模型 1 为例,设 $v_{\text{焊}} = 10 \text{ mm/s}$,凹陷深度 $h_0 = 20 \text{ mm}$,长度 $\delta = 95 \text{ mm}$;检测机构参数: $b = 55 \text{ mm}$, $r = 35 \text{ mm}$ 。模型 1 的计算结果见图 6,可见检测机构自身的摆动即可对焊枪姿态做出较大程度的改善,水平方向上亦可根据式(10)控制焊枪位置,高度调节与式(1)中相似,不作赘述。

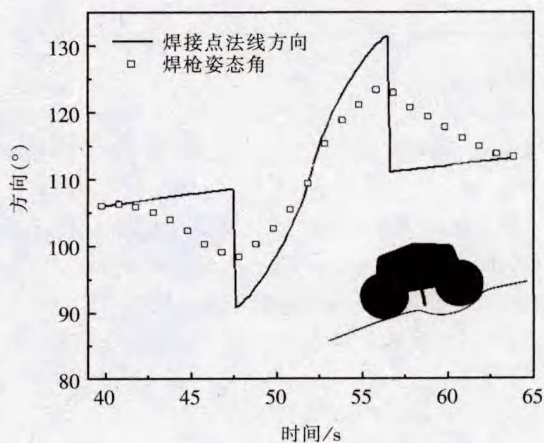


图 6 模型 1-凹陷处实际法向与焊枪姿态角对比

5 结 论

针对油罐车等液体运输车辆的椭圆形轨迹的自动焊接过程,提出了一套轨迹检测机构以及相应的焊枪轨迹规划,并采用 ABAQUS 有限元分析软件对焊接过程进行了模拟验证。计算结果表明:基于检测机构的输出值及 AVC 系统的辅助作用,可实现椭圆形轨迹焊接的实时检测与控制,并为实际试验过程提供了可靠参数。

参 考 文 献

- [1] Byoung Oh Kam, Yang Bae Jeon. Motion control of two - wheeled welding mobile robot with seam tracking sensor [J]. ISIE, 2001; 850 - 856.
 - [2] Trong Hieu Bui, Tan Lain Chung. Adaptive tracking control of two - wheeled welding mobile robot with smooth curved welding path [J]. KSME International Journal, 2003, 17 (11): 1682 - 1692.
 - [3] Ngo Manh Dung, Vo Hoang Duy. Two - wheeled welding mobile robot for tracking a smooth curved welding path using adaptive sliding - mode control technique [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2007, 5 (3): 283 - 294.
 - [4] Lee S K, Na S J. A study on automatic seam tracking in pulsed laser edge welding by using a vision sensor without an auxiliary light source [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2002, 21 (4): 302 - 315.
 - [5] Xu Peiquan, Xu Guoxiang, Tang Xinhua. A visual seam tracking system for robotic arc welding [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2008, 37: 70 - 75.
 - [6] 王军波, 孙振国, 陈 强, 等. 基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝跟踪 [J]. 焊接学报, 2001, 22 (2): 31 - 34.
 - [7] 张 轲, 吕学勤, 吴毅雄, 等. 移动焊接机器人的研究现状及发展趋势 [J]. 焊接, 2004 (8): 5 - 9.
 - [8] Suga Yasuo, Muto Akifumi. Automatic tracking of welding line by autonomous mobile robot for welding of plates (Tracking of linear and angled welding lines) [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part C), 1997, 612 (63): 2918 - 2924.
 - [9] 范文利, 姜洪奎, 陈继文, 等. 基于 PLC 的平面曲线焊接控制系统 [J]. 机电产品开发与创新, 2009, 22: 131 - 134.
 - [10] 张忠厚, 李发跃. 椭圆形焊缝全自动埋弧焊装置的设计 [J]. 焊接技术, 1990, 32 (4): 33 - 39.
 - [11] Cook G E. Robotic arc welding: research insensory feedback control [J]. IEEE Transactions on Industry Electron, 1983, 30 (3): 252 - 268.
 - [12] Jon B Bjorgvinsson, George E Cook. Microprocessor - based arc voltage control for gas tungsten arc welding using gain scheduling [J]. IEEE Transactions on Industry Electron, 1993, 29 (3): 250 - 255.
-
- 作者简介: 屈贤良, 1989 年出生, 硕士研究生, 研究方向为焊接过程数值模拟。
-
- [上接第 22 页]
- [30] Maksimov S Y. Underwater arc welding of higher strength low-alloy steels [J]. Welding International, 2010, 24 (6): 449 - 454.
 - [31] Van Den Brink S H. Cold cracking susceptibility of welds obtained by wet underwater welding [C]. Proc. Conf. on "Underwater welding". Trondheim, Norway, 1983: 271 - 276.
 - [32] Ibarra S, Grubbs C E. Underwater wet welding of high strength offshore steels [C]. Proc. 21st Annual Offshore Technology Conf. Houston, TX, USA, 1989.
 - [33] Ibarra S, Reed R L, Smith J K, et al. The structural repair of a north sea platform using underwater wet welding techniques [C]. Proc. 1st Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Edinburgh, UK, 1991: 339 - 346.
 - [34] Bailey N. Welding underwater: a metallurgical appraisal [C]. Proc. 1st Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Edinburgh, UK, 1991: 331 - 338.
 - [35] Pessoa E C P, Bracarense A Q, Liu S. Exothermic additions in a tubular covered electrode and oxidizing reactions influence on underwater wet welding [C]. Proc. of the 26th International Conf. on OMAE2007. San Diego, California, USA, 2007: 1 - 10.
 - [36] Bracarense A Q. Development of tubular coated electrodes for underwater wet welding [J]. Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, 2009, 32 (2): 89 - 97.
 - [37] Savich. Structure of weld metal performed by underwater welding [J]. Avtomaticheskaya Svarka, 1975 (10): 24.
 - [38] Richardson I M. Arc welding under water [J]. Welding Design & Fabrication, 1991 (3): 48 - 55.
 - [39] Polhonya I K, Gorpenyuk V N, Kononenko V Y. Some peculiarities of arc burning and metal transfer in wet underwater self-shielding flux-cored wire welding [R]. Welding under Extreme Conditions IIW, 1989: 151 - 160.
 - [40] Gretysky Y Y, Maksimov S Y, Greysky. Increase in stability of arc burning under water in flux-cored wire welding [J]. Scientific and Technical, 2004 (2): 9 - 12.
 - [41] Lizunkova Y, Hassel T, Klotz J, et al. Development of filler wire for underwater welding as a repair tool for adaptation on AUV [C]. OCEANS 09 IEEE Bremen: Balancing Technology with Future Needs, 2009.
-
- 作者简介: 刘 多, 1982 年出生, 博士, 讲师。主要从事水下焊接、新材料及异种材料连接研究, 已发表论文 18 篇。