

大型钢制球罐的高效自动焊关键技术研究*

蒋力培 焦向东 薛 龙 李明利
(北京石油化工学院机械系 北京 102600)

摘要: 就大型钢制球罐自动焊的关键技术进行了深入研究, 采用 CCD 光电测控技术解决了球罐多层多道焊的实时跟踪难题, 采用柔性磁轮式机构解决了焊车在球罐上无导轨全位置自由行走的难题, 并试验研究了用 CO₂ 气体保护药芯焊丝焊(FCAW)进行球罐全位置多层多道焊的工艺技术。在此基础上, 研制成了一种 5 自由度的全位置焊接机器人, 能对球罐内外纵缝、横缝及仰缝进行无导轨全自动焊接, 达到了高效率、高质量、无人实时操作和低劳动强度。

关键词: 球罐 自动焊 高效焊 焊接机器人

中图分类号: TG441.4

0 前言

随着我国经济的高速发展, 石化用球罐等容器的体积容量以及数量也正在快速增加, 按目前的增长速率估计, 仅石化部门每年要新建球罐容量几十万 m³。但是, 目前国内球罐焊接生产的现况还是主要依靠手工焊, 其效率低、工期长、成本高、工人劳动强度大和技术培训周期长, 因而迫切需要发展推广自动焊接技术来提高施工的速度与焊接质量, 并进而提高我国球罐焊接制造业的国际竞争力。

近年来一些企业已引进国外的轨道式自动焊机, 并试验研究用 CO₂ 气体保护药芯焊丝焊(FCAW)进行全位置多层多道焊的先进工艺方法^[1]。这些引进的轨道式自动焊机, 能明显提高焊接效率, 但还有以下问题: 安装导轨麻烦费时; 焊工要密切注视焊缝熔池, 不断调节焊枪进行人工跟踪焊缝等等。这也可能是轨道式自动焊机至今未能在我国广泛应用的主要原因。

为了解决上述问题, 我们与中石化第十建设公司合作, 以发展适合国情的高效自动焊设备与工艺, 其研制目标主要为以下两方面。

(1) 全自动完成球罐的焊接过程, 在多层焊接时由焊机进行实时跟踪。鉴于在野外焊接球罐时施工环境恶劣, 实现全自动焊接不但能保证焊接质量, 降低劳动强度和施工成本, 而且能大幅度降低操作技术难度, 解决球罐焊工培养困难, 流失严重等问题。

(2) 实现无导轨全位置焊接球罐焊缝, 即焊机无需导轨支持就能直接在球罐表面上进行全位置自动行走与焊接。这一方面可简化焊前准备工作, 提高生产效率, 另一方面可节省导轨所耗费的大笔费用。

在研究球罐高效自动焊设备与工艺的过程中, 需要解决的关键技术问题是自动跟踪控制技术、无导轨全位置行走机构以及全位置药芯焊丝焊接工艺。下面就简要介绍这些技术的研究情况与在此基础上研制成的全位置焊接机器人。

1 无导轨全位置行走机构研究

1.1 技术难点与方案分析

众所周知, 大型钢制球罐的直径一般在 10 m 以上(常用的 1 000 m³ 球罐, 直径为 12.4 m), 壁厚在 18~42 mm, 需要在球罐内外进行双面多层多道焊, 想要不用导轨支持就能直接在球罐表面上进行全位置自动行走与焊接, 这在国内外尚无先例。可以借鉴的机构有磁性履带式爬壁机器人(如哈尔滨工业大学机器人研究所的爬壁机器人), 真空吸附式爬壁机器人与毛毛虫式爬壁机器人。其中, 磁性履带式爬壁机器人最接近可行方案, 但尚有难以解决的问题。

(1) 磁性履带式爬壁机器人是间接受力机构, 当爬行坡度大于 90° 时, 其运动就不稳定可靠, 更不可能在仰焊位置工作。即磁性履带式爬壁机器人难以实现在球罐上全位置行走。

(2) 球罐多层焊时要求焊车不断启停以配合焊枪摆动, 按 30 cm/min(5mm/s) 焊速计, 若每分钟摆动 30 次, 则焊车差不多每秒要停 1 次, 或每移动 5 mm 停 1 次, 而且要移动均匀。由于履带的每段长度要大于 20 mm, 上述运动要求对于磁性履带式爬

* 国家 863 高技术计划基金资助项目(563-512-9913-02)。20021230 收到初稿, 20030306 收到修改稿

要大于 20 mm，上述运动要求对于磁性履带式爬壁机器人来说又是一个难题。

(3) 球罐自动焊时还要求焊车行走机构必须能在球面上迅速拐弯或纠偏，以便跟踪焊缝，这也是磁性履带式爬壁机器人很难做到的。

为此，考虑采用磁轮式行走机构方案，但磁轮机构主要有以下两个难题。

(1) 轮与球罐的接触面积很小，其磁力能否足够？如采用四轮机构的话，就只有四条线与球面接触，实际上还可能仅仅是若干个切点接触。

(2) 为了增加磁吸力，可以考虑增加磁轮，但如何保证各轮在任何时刻同时接触球面(这要比四轮同时接触平面或柱面更难)？

试验表明，采用高磁密材料制成的永磁轮有极大的磁吸力，我们研制的 4 个永磁轮机构吸力已超过 2 000 N，在垂直面上的负荷力超过 500 N。若采用六轮机构反而增加工作的不协调性。

据此，最后确定采用柔性磁轮式行走机构研制方案，其研制要点是设计柔性的四轮连接结构，保证四轮在任何情况下同时接触球面，使其工作稳定可靠。

1.2 柔性磁轮式爬行机构结构组成与工作原理

如图 1 示，研制的四轮柔性机构采用行车式车体结构，主要由底架 1 与左右二侧磁轮座 5 组成，底架与二侧磁轮座间通过铰链机构 2 连接。左右磁轮座中的前后磁轮 3 由各自的伺服电动机通过减速器驱动。

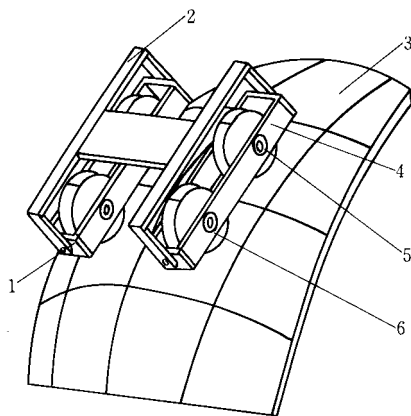


图 1 柔性磁轮机构原理图

1. 铰链机构 2. 底架 3. 球板 4. 磁轮座 5. 磁轮轴承 6. 磁轮

此行走机构的基本工作原理为：①四轮柔性连接，左右二侧轮架能相对偏转自动保证同时接触球罐表面。②各轮与钢板封闭磁路，磁力达到 2 000 N 以上。③四主动轮结构，保证全位置行走均匀可靠。④左右磁轮可进行差动工作，可实现迅速拐弯，甚至原地转动。

此行走机构的力学分析可简化为图 2 的情况，通过推导可得到机构在全位置稳定运行的基本条件为

$$F_m > \frac{W}{4\mu_s}$$

式中 F_m ——磁轮吸力
 W ——焊车重力
 μ_s ——钢板与磁轮间的静摩擦因数

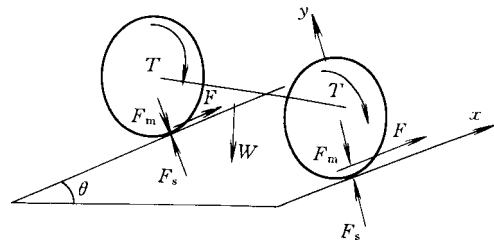


图 2 磁轮机构受力分析

F_m ——磁轮吸力 F_s ——球板支反力
 F ——磁轮摩擦力 W ——焊车重力
 T ——磁轮转矩 θ ——球板坡度

试验结果表明，研制的磁轮机构吸力超过 2 000 N，能满足全位置工作条件。

2 多层焊自动跟踪系统研究

2.1 技术难点与可行方案分析

焊缝实时跟踪技术是国内外学者的研究热点，其研究方案主要有：基于 CCD 传感器直接检测弧焊区的视觉跟踪法；采用接触传感器的记忆跟踪法；采用旋转电弧传感器的实时跟踪法，以及示教跟踪法等等 [2~4]，但要想将上述跟踪方法用来对球罐全位置多层多道焊缝进行实时跟踪，尚有以下技术难点：①焊接电弧强烈干扰，难以检测焊接熔池实际位置。②多层焊跟踪时，难以检测第一层焊缝之后的各层焊缝图像。③多道横焊跟踪更困难，由于是不摆逐道迭加焊，则第一道焊缝后，就难以实时检测以后各道的焊缝位置。④球罐焊缝是弧形曲线，若用导轨焊机自动跟踪法，导轨不可能与焊缝完全平行，只有采用记忆跟踪法。研究表明，导轨焊机记忆跟踪法虽然能达到一定的精度，但存在有需要标定起点，不能中间断点复位等问题。

为此，研究了一种用 CCD 光电跟踪焊缝轨迹线的可行方案，其结构组成与工作原理如图 3 示。

2.2 焊缝轨迹光电跟踪系统结构组成与工作原理

如图 3 示，此系统主要由 CCD 传感器、微机测控系统及步进电机驱动的滑块机构组成，系统通过 CCD 光电传感器识别在球罐表面的坡口平行轨迹线 1，由滑块 4 带动焊枪 7 实时跟踪焊缝 8。由于是依照坡口平行线实行非接触跟踪，在多层多道

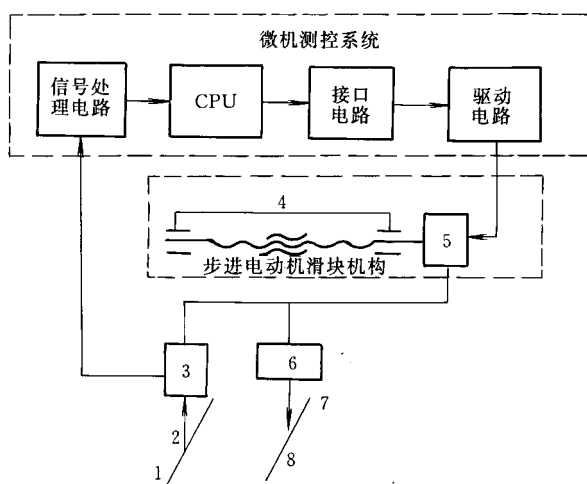


图3 CCD光电跟踪系统原理图

1. 坡口轨迹线 2. 光信号 3. CCD光电头 4. 滑块机构
5. 步进电动机 6. 焊枪摆动机构 7. 焊枪 8. 焊接坡口

焊接的情况下也能进行重复自动跟踪。

试验研制的光电传感器主要由自带光源的CCD光电头3与信号处理电路两部分组成。信号处理电路包括：驱动电路、二值化电路与模拟量信号处理电路。在光源照射下，焊缝轨迹线在光电头中CCD芯片表面成像产生光电信号，此信号经过信号处理电路就成为焊缝轨迹线负脉冲信号，如图4示。图中，下方的电压波形曲线 u_1 为CCD光电头直接输出的电压脉冲信号，上方的电压波形曲线 u_2 为二值化处理后的传感器输出的电压脉冲信号。

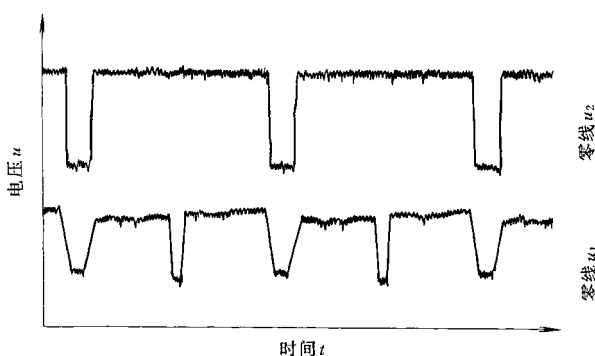


图4 光电传感器输出信号实测波

系统所采用的滑块机构为高精度直线型螺旋滑块机构，位移精度0.023 mm，最高滑移速度350 mm/s。滑块机构由永磁式二相步进电动机驱动，采用微细步驱动器后，电动机分辨率可达5 000~20 000步/r。研制结果表明，系统跟踪精度可达到 ± 0.5 mm。

3 全位置CO₂气体保护药芯焊丝工艺研究

在上述工作基础上，研制了球罐全位置焊接机

器人成果样机，并用此样机进行了全位置CO₂气体保护药芯焊丝自动焊工艺研究，得到了满意的结果。

3.1 焊接工艺评定试验

按JB4708—1992标准做了立焊与横焊工艺试验。在焊接过程中，机器人工作稳定，自动跟踪性能可靠。试件焊缝成形美观，经X射线检验与力学性能检测，焊缝质量良好，符合标准要求。

3.1.1 试验方法

采用药芯焊丝CO₂气体保护焊。焊丝为北京钢铁研究院生产的GL-YJ502(Q)气保护药芯焊丝，丝径1.2 mm。试板为16MnR钢，长550 mm、宽300 mm，X形坡口。焊接规范为：电弧电压25 V，电弧电流135~150 A，焊速20~30 cm/min。立焊时，正面第一、二层焊缝采用之字摆动焊，第三层(盖面焊)采用弓字摆动焊，摆幅分别为4 mm、8 mm和14 mm；反面焊时，先清根，第一层采用之字摆动焊，第二层(盖面焊)采用弓字摆动焊，摆幅分别为3 mm与12 mm；横焊时，正面焊六道焊缝，反面焊四道焊缝，均为不摆动直焊。

3.1.2 试验结果

试件由燕山化机厂进行了质量检验。X射线片结果为：横焊缝全部达到I级片，立焊缝2/3达到I级片，1/3达到II级片。力学性能试验的拉伸、侧弯、冲击等试验结果均符合JB4708—1992标准要求。

3.2 现场工艺试验

为了考核与改进球罐焊接机器人的性能，成果样机先后在中石化第十建设公司的球罐焊接工地与试验车间进行了现场焊接试验。试验采用美国林肯公司生产的全位置药芯焊丝。通过对球罐内外纵缝、横缝等全位置焊缝的试焊表明用全位置机器人进行CO₂气体保护药芯焊丝自动焊能达到高效、优质，其焊缝成形美观，劳动强度低，是较理想的球罐全自动焊接工艺方法与设备(如图5所示)。



图5 球罐全位置焊接机器人成果样机在现场施焊照片

4 全位置球罐智能焊接机器人产品样机

在球罐全位置焊接机器人样机成果鉴定后,通过不断改进其性能与可靠性,目前已完成 BIPT—3 型产品样机研制工作,可望进行小批量生产。图 6 为产品样机的外观与内部组成照片。



(a) 产品样机外观照片



(b) 产品样机内部结构照片

图 6 BIPT—3 型全位置焊接机器人产品样机照片

4.1 BIPT—3 机器人的创新点

这种球罐焊接机器人的主要创新点是:由柔性磁轮机构直接吸附在球罐表面进行全位置自动行走与焊接,其 CCD 光电跟踪系统能依照焊缝平行线在多层多道焊接进行重复自动跟踪,从而实现了无导轨自动焊接全位置焊缝与多层多道焊接的自动跟踪。

由于以上重要创新,使得球罐焊接机器人的生产效率比当前引进的美国 BUG—O 等焊机提高 1 倍,比手工焊提高了 3~5 倍。此外,由于机器人可直接在球罐表面进行全位置自动跟踪焊接,无需安装磁性轨道,无需人工跟踪,能大幅度降低劳动强度、操作难度和设备成本。

4.2 结构组成与功能

机器人通过产品化开发,实现了模块化制造,

主要由以下四部分组成。

4.2.1 柔性磁轮式行走机构

柔性磁轮式行走机构包括左右二组磁轮、主板、十字链轴式联接机构与交流伺服电动机驱动机构。此机构的各个磁轮在 x 、 y 方向上有一定的自由度,能保证各磁轮与球罐表面紧密接触,磁力稳定可靠,在球罐表面的各种空间位置都能稳定爬行,包括前进、后退、拐弯等各种运行方式。焊车速度为 0~80 cm/min。

4.2.2 光电实时跟踪系统

CCD 光电轨迹跟踪系统主要由 2 个 CCD 光电传感器与一个步进电动机驱动的横向滑块机构组成,在焊接过程中系统通过 CCD 光电传感器识别在球罐表面的坡口平行线,由滑块带动焊枪左右随动,进行长度方向上的焊缝轨迹跟踪。CCD 传感器的识别精度为 0.03 mm,轨迹跟踪精度设定为 0.5 mm。

4.2.3 焊枪摆动机构

焊枪摆动机构主要由一个摆动中心传感器、一个步进电机驱动的滑台机构及焊枪夹持机构组成。滑台的有效行程为 50 mm,焊枪的摆幅设定为 40 mm,摆速设定为 0~200 cm/min。

4.2.4 微机智能控制系统

微机智能控制系统主要由 S7—200 型 PLC 微机控制器与各传感器、电动机的接口电路组成。系统软件能根据控制盒面板上各旋钮、开关的设定值来综合协调控制上述三个机构的动作,其主要功能有:在多层多道焊接时进行光电实时跟踪,使焊枪摆动中心对准坡口中心;在焊后回车时进行左右实时跟踪,使焊车中心与焊缝坡口中心保持一致;在焊前准备时可调节焊枪的左右、上下位置,调试焊枪在各种摆动方式下的摆幅、摆速及滞时等参 数值。

5 结论

(1) 研制的全位置焊接机器人解决了球罐焊接的自动跟踪,不用安装导轨等关键技术问题,能大幅度提高生产效率与降低劳动强度。此设备还可能推广应用于大型钢制储罐、管道及船舶的自动焊生产。

(2) CO₂ 气体保护药芯焊丝自动焊用于球罐全位置焊接,能保证质量,提高效率。

(3) 进一步发展球罐高效自动焊的关键将是研究如何解决不清根双面焊技术与 CCD 视觉直接跟踪焊缝等技术难点,以进一步节省人力、物力与工时。

参 考 文 献

- 1 王学文, 何伟. 大型球罐自动焊接技术的推广和应用. 化工施工技术, 1999, 21(4): 22~24
- 2 高向东, 黄石生. 基于视觉传感的焊缝控制系统. 焊接技术, 2000, 29(1): 1~3
- 3 何景山, 杨春利, 林三宝, 等. 无辅助光源图像法 TIG 焊焊缝跟踪传感系统. 焊接学报, 2000, 21(1): 37~40
- 4 陈武柱, 王勇, 林青松. 焊缝自动跟踪技术的现状及新发展. 焊管, 1992, 15(5): 1~10

**KEY POINTS OF HIGH EFFICIENT
AUTOMATIC WELDING TECHNIQUE
FOR LARGE SCALE SPHERICAL
STEEL TANK**

*Jiang Lipei Jiao Xiangdong Xue Long Li Mingli
(Beijing Institute of Petro-chemical Technology)*

Abstract: Through studying on the key technique of high efficient automatic welding for large scale spherical steel tanks, an automatic tracking system with CCD photo-detectors is developed to solve the problem of tracing multi-layer or multi-pass seams on real-time and an all-position welding carriage without rail, which can walk on the surface of spherical tanks, is created by using a flexible magnetic wheel mechanism. Moreover, the all-position welding technology is investigated with CO₂ shielded flux cored arc welding (FCAW). Based on the above research work, an all-position welding robot with 5 degrees of freedom is developed to improve the automatic welding efficiency and quality of spherical tanks.

Key words: Spherical tank Automatic welding

High efficient welding Welding robot

作者简介: 蒋力培, 男, 1942 年出生, 北京石油化工学院教授, 装备技术研究所所长, 中石化集团公司学科带头人, 中国焊接学会理事, 熔焊工艺与设备专业委员会副主任。长期从事焊接智能化、自动化及光机电一体化技术的研究。