

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.06

精密金属波纹管低成本焊机研制

张全厚¹, 邓艳秋², 吕威³, 于翔麟¹, 刘昕¹

1. 沈阳仪表科学研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110168
2. 中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110179
3. 北京航天动力研究所, 北京 100176

摘要: 针对特种领域多规格小批量精密金属波纹管环缝焊接中, 现有自动化设备成本高、简易焊机无法兼容扁波、直壁及扩口等多接口形式的问题, 本文研制了一种低成本多功能环缝焊机。该设备以旋转变位装置为核心, 通过1/4圆弧条形孔与锁紧杆配合, 实现卧式与立式工位90°快速切换, 可适配不同接口形式的焊接需求; 采用直流电机+齿轮传动替代伺服驱动系统, 在降低成本的同时, 通过齿轮机构缩小转速调节范围, 提升控制精度; 配备X-Y向可调焊枪支架与滑动平台-顶尖组合定位系统, 确保0.3~0.5 mm级组对精度, 避免薄壁多层结构焊接分层缺陷。试验验证显示, 焊接组件经荧光渗透、氦质谱漏率及金相检测, 均符合JB/T 11620标准要求; 设备连续运行5年稳定性良好, 综合成本较同类自动化设备降低40%以上。本研究通过“工位可调+低成本驱动+精准定位”的集成设计, 突破了传统焊机通用性与经济性难以兼顾的瓶颈, 为小批量多规格波纹管焊接提供了高效解决方案, 其结构创新对同类非标焊接设备研发具有参考价值。

关键词: 精密金属波纹管; 环缝焊机; 旋转变位; 低成本设计; 多接口焊接

中图分类号: TG439.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)08-0063-05

Development of Low-cost Welding Machine for Precision Metal Corrugated Pipes for Valves

ZHANG Quanhou¹, DENG Yanqiu², YU Xianglin³, ZHANG Bo¹, LIU Xin¹

1. Shenyang Academy of Instrumentation Sciences Co., Ltd., Shenyang 110168, China
2. China Energy Engineering Group Liaoning Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110179, China
3. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100176, China

Abstract: In view of the high cost of existing automation equipment and the incompatibility of simple welding machines with flat, straight-walled, and expanded port forms in the multi-specification small-batch precision metal bellows seam welding in special fields, this paper develops a low-cost multifunctional seam welding machine. The equipment, with a rotating position-changing device at its core, realizes 90° quick switching between horizontal and vertical positions through the cooperation of a 1/4 arc slot hole and a locking rod, adapting to different port form welding needs; DC motor + gear drive replaces the servo drive system, reducing costs while increasing control accuracy by narrowing the speed adjustment range through the gear mechanism; equipped with an X-Y adjustable welding torch holder and a sliding platform - top combination positioning system to ensure 0.3-0.5 mm level pairing accuracy, avoiding delamination defects in thin-walled multilayer structure welding. Test verification shows that the welded components meet the JB/T 11620 standard requirements through fluorescent penetrant, helium mass spectrometry leak rate, and metallographic tests; the equipment has good stability after continuous operation for 5 years, and the comprehensive cost is reduced by more than 40% compared to similar automation equipment. This research, through the integrated design of "adjustable position + low-cost drive + precise positioning," breaks through the bottleneck that traditional welding machines are difficult to balance universality and economy, providing an efficient solution for small-batch multi-specification bellows welding. Its structural innovation has reference value for the

收稿日期: 2024-07-13 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 中国机械工业集团青年科技基金项目(PK2010-112); 沈阳市中青年科技人才项目(RC220513)

作者简介: 张全厚(1989—), 硕士, 高级工程师, 主要从事精密金属波纹管研发及非标设备设计。E-mail: zhangquanhou@163.com。

research and development of similar non-standard welding equipment.

Keywords: precision metal bellows; ring seam welder; rotational position changing; low-cost design; multi-interface welding

引用格式:张全厚,邓艳秋,吕威,等.精密金属波纹管低成本焊机研制[J].电焊机,2025,55(8):63-67.

Citation:ZHANG Quanhou, DENG Yanqiu, YU Xianglin, et al. Development of Low-cost Welding Machine for Precision Metal Corrugated Pipes for Valves[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 63-67.

0 引言

在核电^[1]、航天^[2]等特种领域,精密金属波纹管组件出厂前需要完成波纹管与法兰的环缝焊接,且焊缝性能要求高。这类组件需通过严苛的性能验证:出厂前需完成液压、气密试验,焊缝需经荧光渗透检测及氦质谱漏率检测。每批产品要抽取型式试验件进行爆破试验间接检验焊缝强度,爆破试验后还需对焊缝剖切进行金相检测。一般耐压等级高的波纹管是由薄壁多层管坯成形制造。限于制造工艺,波纹管端部车口后,层间存有微小间隙。如果焊接方法不当,波纹管在焊接过程会出现分层,引起焊接缺陷。为了解决上述问题,王燕丽^[3]、王宜建^[4]等开发的自动焊接系统虽适用于大口径波纹管填料焊接,但阀用波纹管组件通径多 ≤ 80 mm,且采用氩弧自熔焊(无填充材料)对组对精度要求高,上述系统难以适配。任明辉^[5]等提出的微束等离子焊接方法虽解决了0.2 mm壁厚的不锈钢单层波纹管焊接的技术难题,但焊接效率低,且未明确多层波纹管焊接是否可行。乔红超^[6]等基于激光轮廓跟踪的自动焊接系统虽能保证焊缝质量,但集成激光传感器与伺服驱动模块后,设备系统复杂,制造成本较高;另外根据使用场合不同,波纹管端部接口形式分为直壁、扩口及扁波结构,不同结构焊接时焊枪和工件的位置是不同的,常规环缝焊接装置往往无法覆盖不同波纹管接口形式。如专利名称为“波纹管外缘焊接机”^[7]公开的焊接装置不具备变位能力,无法实现直壁及扩口接口产品的焊接。专利名称为“一种波纹管外圈焊接设备及其使用方法”^[8]公开的焊接装置也不具备变位能力,同时驱动装置采用伺服电机,焊接装置成本高,控制系统复杂,设备维修难度高。公开的使用方法着重强调外圈焊接设备的使用,并未提出产品焊接的通用方法。专利名称为“一种波纹管法兰自动焊接机”^[9]公

开的焊机只适合波纹管接口为直壁及扩口结构,同时未公开相应的焊接方法。综上所述,针对特种领域多规格小批量精密波纹管环缝焊机自动化设备定制成本高,同时简易焊机无法实现单一焊接设备实现多种波纹管接口形式的焊接需求。为此,本文研制了一种半自动焊机,通过低成本设计、立式-卧式工位切换及通用焊接工艺,解决设备经济性与功能通用性的矛盾,满足多规格小批量生产需求。

1 环缝焊机结构方案设计

针对阀用波纹管焊接的使用要求,焊机设计时考虑了工件自动旋转,焊接速度可调及工件变位等功能,整体结构如图1所示。

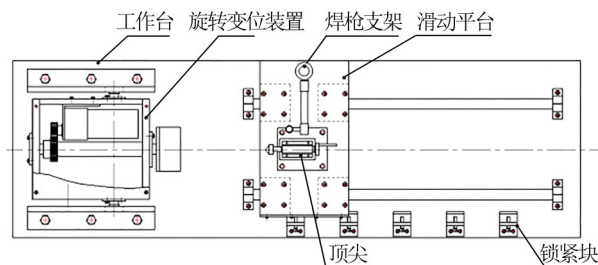


图1 阀用波纹管焊机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bellows welding machine structure for valves

旋转变位装置是焊机的核心部件,该部件可完成工件夹持、工件旋转及工件变位功能。焊枪支架固定在滑动平台上,通过X-Y方向位置调节机构实现焊枪与焊道的精准对位。针对扁波结构焊接时的工件长度差异,滑动平台可进行粗定位,经锁紧块固定后,通过顶尖微调波纹管与法兰的接触预紧力,保障组对稳定性;通过旋转变位装置的固定位置调整,可将卧式工位切换为立式工位,从而适配直壁及扩口结构的焊接需求。

1.1 关键部件结构设计

旋转变位装置是焊机的核心部件,其结构示意

图如图2、图3所示。

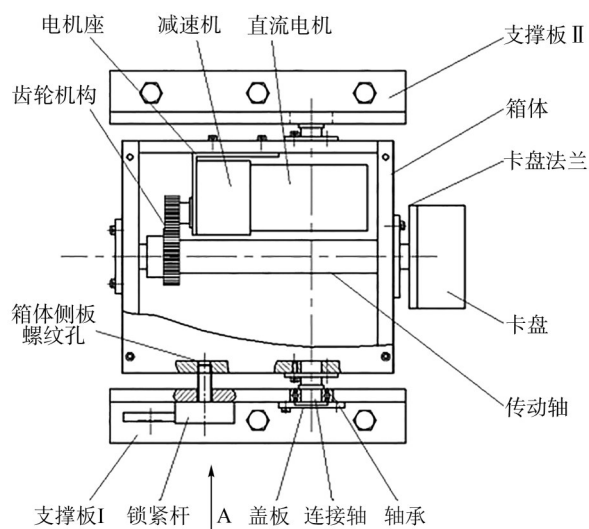


图2 旋转变位装置结构示意图

Fig. 2 Diagram of the rotational position changing device structure

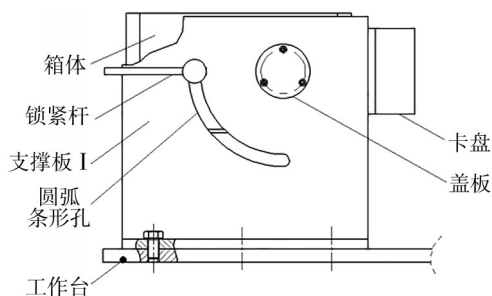


图3 旋转变位装置A向示意

Fig. 3 Schematic diagram of the rotational position changing device from direction A

针对焊接过程对转速的精确要求,首先通过直流电机转速与减速机减速比的匹配完成传动系统的初步参数设定,再利用齿轮机构的参数优化实现环缝焊机最大转速范围的精确控制。传动轴的两端装配轴承,传动轴上加工台肩以限制轴承向中心滑动,箱体两端的盖板则约束轴承向两侧的轴向位移;为避免盖板与轴承内圈的直接接触摩擦,盖板中心设有凹槽,有效降低了机械磨损风险。在连接结构设计中,传动轴与卡盘法兰采用止口定位配合,传动轴端部预制螺纹盲孔,通过螺钉实现两者的刚性锁紧;卡盘与卡盘法兰同样通过螺钉连接,确保工件夹持的同轴度与稳定性。箱体与支撑板I、支撑板II的连接通过连接轴实现;支撑板I和II开设通孔,内置轴承并通过连接轴台肩与盖板形成双向限位;连接轴与箱体采用螺钉紧固,保障整体结构

的刚性连接。以支撑板I的通孔为圆心加工1/4圆弧条形孔,箱体与支撑板I对应平面上设有螺纹通孔,且两者通孔处于同一水平线。锁紧螺杆穿过支撑板I面板上圆弧条形孔与箱体螺纹孔连接,其台肩结构在锁紧状态下与支撑板I表面产生摩擦力可以固定旋转变位装置。当旋转变位装置需要变位时,减小锁紧螺杆的锁紧力矩即可。焊枪支架设有立杆和横杆,横杆与立杆通过齿轮齿条机构传动;横杆端部装配焊枪夹持架,借助齿轮齿条的啮合特性,可实现焊枪在X-Y两个方向的任意移动。

工作台设有光轴直线导轨机构,该机构由光轴、光轴支座及滑块组成,滑动平台与光轴支座通过螺钉连接。滑动平台对应锁紧块的端面设置侧板,侧板与滑动平台采用螺钉连接固定;锁紧块预制螺纹通孔,调节螺钉穿过该通孔后与滑动平台端面的侧板形成间隙配合。当滑动平台带动顶尖完成工件粗定位后,通过增大锁紧块螺钉的旋转力矩,可实现滑动平台的可靠锁止。滑动平台与顶尖采用螺栓固定连接,顶尖具备伸缩与锁紧功能。在波纹管与法兰组对完成后,借助顶尖可对两者进行最终定位。基于上述设计方案所制造的焊机,其装配过程实物如图4所示。



图4 焊机装配过程实物

Fig. 4 Physical diagram of the welding machine assembly process

该焊机组装完成后已连续稳定运行5年以上,其间仅更换个别易损电气元器件,未出现结构性故障。设备除局部漆面因长期使用发生磨损外,整体结构及功能仍保持良好。

1.2 焊机使用方法介绍

波纹管焊接的质量不仅依赖于设备性能,焊接方法同样至关重要。为推动该焊机在波纹管焊接领域的广泛应用,现将具体焊接方法详述如下。

(1)波纹管接口预处理。取液压成形后的波纹

管,运用车床车口,车削后波纹管接口形式为扁波结构、扩口结构或直壁结构。

(2)扁波接口对应法兰处理(若为扁波接口):当波纹管接口形式为扁波时,运用车床车削法兰焊接面。为确保焊接质量,法兰焊接坡口外径与波纹管扁波接口外径值差值应控制在1 mm以内。较为理想的状态是法兰焊接坡口外径大于波纹管扁波接口外径0.3~0.5 mm。进一步地,法兰焊接坡口端面厚度宜为波纹管壁厚的1~1.2倍,焊接端面需保持锐边,焊接坡口采用60°V形坡口,且坡口深度为波纹管壁厚的1~1.5倍。

(3)焊接部位清洁。采用浸沾酒精的清洁布,仔细擦拭波纹管及法兰焊接部位,以去除油污、杂质等,保证焊接区域清洁。

(4)旋转变位装置调整与工件夹持(针对法兰)。释放锁紧杆,将旋转变位装置的传动轴调整至水平状态,随后锁紧锁紧杆,利用卡盘夹持法兰。

(5)焊接夹具准备与安装(针对波纹管)。使用黄铜制作的焊接夹具(见图5)夹持波纹管端波,该焊接夹具为分半结构。夹具端面厚度应控制在波纹管波谷宽度的1~1.1倍。焊接夹具与波纹管波谷接触处内径不应小于成形模具内径,最佳范围是大于成形模具内径0.2~0.5 mm。同时,焊接夹具与波纹管波峰接触处内径应大于波纹管外径,优选大于波纹管外径上公差0.2~0.5 mm。此外,夹具端面外径需小于波纹管扁波接口外径,理想情况是夹具端面外径加上2倍波纹管环缝熔深后,与波纹管扁波接口外径数值相差在0.5~1.5 mm范围内。

(6)滑动平台粗定位:减小锁紧块螺钉的锁紧

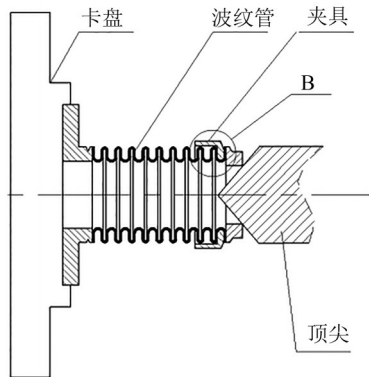


图5 波纹管卧式焊接示意

Fig. 5 Schematic diagram of horizontal bellows welding

力矩,依据波纹管长度,对滑动平台的位置进行粗调,粗调后增大螺钉锁紧力矩,将滑动平台固定。

(7)同轴度调整与顶尖终紧:精确调整法兰、波纹管及顶尖的同轴度,完成调整后,利用顶尖对波纹管组件进行最终紧固。以目视波纹管端口管坯不分层作为判断依据,确定合适的锁紧力矩。

(8)焊枪位置调整:调节焊枪支架,使焊枪处于与焊道适宜的焊接位置,确保钨针与焊道之间的距离维持在1~2 mm。

(9)焊接启动与转速调节:启动直流电机及氩弧焊接电源,在焊接过程中,密切观察熔池变化,通过直流电机控制器微调焊接转速,焊接转速的最大调整范围不应超过设定转速的20%。

(10)特殊接口结构处理(扩口及直壁结构):当波纹管接口形式为扩口及直壁结构时,为避免焊接过程中波纹管管坯分层,在焊接内法兰或外法兰时,需制作相应的外环(见图6)或内环与法兰配合组焊。所制造的法外环与内环厚度应等于波纹管壁厚,且法兰外环与内环和波纹管扩口或直壁之间的间隙值,应为套管间隙的10%~30%。

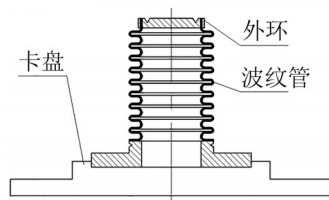


图6 波纹管立式焊接示意

Fig. 6 Schematic diagram of vertical bellows welding

(11)旋转变位装置二次调整(针对特定情况):释放锁紧杆,将旋转变位装置旋转90°,之后再次对锁紧杆进行锁紧操作,利用卡盘夹持波纹管。

(12)完成焊接:重复执行步骤(8)和(9),即可完成波纹管环焊缝的焊接工作。

2 焊缝性能检测

波纹管焊接后,对其焊缝性能进行全面检测,结果显示焊缝外观及内部均无缺陷,焊缝质量符合JB/T 11620《核级阀门用金属波纹管》标准^[10]要求。图7为焊缝荧光检测及金相检测结果。从检测图像中可清晰观察到焊缝成形良好,熔合线清晰连续,

无裂纹、气孔、未熔合等常见焊接缺陷,进一步验证了该焊接工艺及设备在波纹管焊接应用中的可靠性与稳定性。

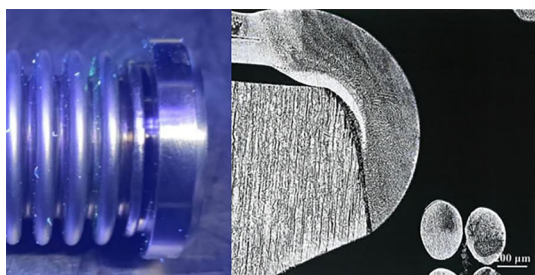


图7 波纹管焊缝荧光检测及宏观金相检测

Fig. 7 Fluorescent and macroscopic metallographic inspection of the bellows weld seam

3 结论

本文针对波纹管焊接需求,设计了一款专用焊机并提出了配套焊接方法,经实践验证与性能检测,取得了以下成果:

(1)在设备结构方面,核心旋转变位装置通过合理的轴承限位、连接方式及变位锁紧设计,实现了稳定可靠的旋转与角度调节功能;焊枪支架的齿轮齿条机构确保了焊枪在 X - Y 方向的灵活移动与精准定位;工作台的光轴直线导轨及顶尖定位系统,满足了工件粗定位与最终定位的精度要求。设备经5年以上连续运行,除个别电气元器件更换外无其他故障,整体状态良好,充分体现了结构设计的合理性与可靠性。

(2)焊接方法上,针对波纹管不同接口形式(扁波、扩口、直壁)制定了相应的预处理、装夹及焊接工艺参数,通过黄铜夹具的精准设计、同轴度控制及焊接过程转速微调等措施,有效保障了焊接质量。

(3)焊缝性能检测结果表明,焊接后的波纹管焊缝外观及内部均无缺陷,完全符合JB/T 11620《核级阀门用金属波纹管》标准要求,荧光检测与金相检测显示焊缝成形良好、熔合线清晰,无裂纹、气孔等缺陷。

综上,该焊机及配套焊接方法能够稳定高效地实现波纹管与法兰的高质量焊接,具备良好的工程实用性与推广价值,为核级及其他高精度要求的波纹管焊接提供了可靠的技术方案。

参考文献:

- [1] 陈立苏,许晓丹,吴健伏,等.核安全级波纹膨胀节设计[J].压力容器,2012,29(1):21-26.
CHEN L S, XU X D, WU J F, et al. Application and Design Produce Characteristics of the Nucleus Safety Level of Expansion Joints[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(1): 21-26.
- [2] 黄世璋,阮波,高效伟.超临界压力低温甲烷波纹管内强化换热数值研究[J].航空学报,2017,38(5):120515.
HUANG S Z, RUAN B, GAO X W. Numerical investigation of heat transfer enhancement of cryogenic-propellant methane in corrugated tubes at supercritical pressures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(5): 120515.
- [3] 王燕丽,单根立,齐席娟,等.微机控制波纹管焊接系统的研究[J].机械与电子,2007(10):27-29.
WANG Y L, SHAN G L, QI X J, et al. Research and Development of Microcomputer Controlling the Automatic Welding-machine of Pipes [J]. Machinery & Electronics, 2007(10): 27-29.
- [4] 王宜建,赵云伟,赵辉.波纹管自动焊接系统研发[J].机电工程技术,2010,39(9):22-23.
WANG Y J, ZHAO Y W, ZHAO H. The Research and Development of the Automatic Welding-Machine of Pipes [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(9): 22-23.
- [5] 任明辉,王春炎,田鑫,等.波纹管的微束等离子焊接与制造技术[J].焊接,2012(7):51-54.
REN M H, WANG C Y, TIAN X, et al. Microbeam plasma welding and manufacturing technology of metal bellows[J]. Welding & Joining, 2012(7): 51-54.
- [6] 乔红超,赵吉宾,高宇.波纹管自动焊接系统的研制[J].焊接,2013(10):31-35.
QIAO H C, ZHAO J B, GAO Y. Development of automatic welding system of bellows [J]. Welding & Joining, 2013(10): 31-35.
- [7] 陈珠献.波纹管外缘焊接机:CN209424777U[P]. 2019-09-24.
- [8] 张利平.一种波纹管外圈焊接设备及其使用方法:CN112658541B[P]. 2023-02-10.
- [9] 庞云龙,晋红霞.一种波纹管法兰自动焊接机:CN216097296U[P]. 2022-03-22.
- [10] 工业和信息化部. JB/T 11620-2013,核级阀门用金属波纹管[S]. 北京:机械工业出版社,2014.