

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.10

大型抽水蓄能机组球阀活门阀轴的机器人窄间隙焊接技术应用研究

刘 强, 金 宝, 冯 涛, 尹 襄, 彭谢宜

东方电气集团 东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘 要: 随着抽水蓄能机组单机容量的不断增大, 高水头大型球阀活门阀轴的制造难度越来越大, 质量要求也越来越严格。为实现大型抽水蓄能球阀活门的机器人焊接, 降低人工劳动强度, 对活门阀轴焊接结构进行了创新设计, 将常规的双面X型坡口设计为窄间隙I型坡口+人工坡口X型坡口, 通过窄间隙焊枪设计及工艺试验, 并集成机器人窄间隙焊接系统, 开发出了一套成熟的机器人窄间隙MAG焊接与人工焊接相结合的焊接工艺, 成功应用于大型球阀活门阀轴的焊接, 提高了活门阀轴的焊接效率及质量可靠性, 降低了劳动强度。焊接总量减少70.6%, 焊接效率提高了5倍, 焊接质量完全满足要求, 避免了超厚板的焊后返修。

关键词: 机器人焊接; 窄间隙焊接; 抽水蓄能; 球阀活门阀轴

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0077-05

Research on the Application of Robotic Narrow Gap Welding Technology for the Valve Shaft of Large-scale Pumped Storage Units' Ball Valves

LIU Qiang, JIN Bao, FENG Tao, YIN Xiang, PENG Xieyi

Dongfang Electrical Group Dongfang Motor Co., Ltd., Deyang 618000, China

Abstract: With the continuous increase in the single unit capacity of pumped storage units, the manufacturing difficulty of high-head large-scale ball valve valve shafts is increasing, and the quality requirements are becoming more stringent. To achieve robotic welding of large-scale pumped storage ball valves and reduce manual labor intensity, an innovative design of the valve shaft welding structure was carried out, transforming the conventional double-sided X-groove design into a narrow gap I-groove + artificial X-groove. Through the design of narrow gap welding torches and process tests, and the integration of robotic narrow gap welding systems, a mature set of robotic narrow gap MAG welding combined with manual welding technology was developed. It has been successfully applied to the welding of large-scale ball valve valve shafts, enhancing the welding efficiency and quality reliability of the valve shaft and reducing labor intensity. The total welding amount decreased by 70.6%, welding efficiency increased fivefold, and the welding quality fully met the requirements, eliminating the need for post-welding repair of over-thick plates.

Keywords: robot welding; narrow-gap welding; pumped storage; ball valve gate shaft

引用格式: 刘强, 金宝, 冯涛, 等. 大型抽水蓄能机组球阀活门阀轴的机器人窄间隙焊接技术应用研究[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 77-81.

Citation: LIU Qiang, JIN Bao, FENG Tao, et al. Research on the Application of Robotic Narrow Gap Welding Technology for the Valve Shaft of Large-scale Pumped Storage Units' Ball Valves[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 77-81.

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”的提出, “风光水储”等清洁能源得到迅猛发展^[1-2]。抽水蓄能电站起着对

整个电力网络调峰填谷的作用, 是保障电力网络正常运行的重要部分, 已越来越受到人们的重视^[3]。球阀是机组的核心部件, 其位于水轮机的入口处, 用于在发电机组检修或机组调节系统失灵时进行

收稿日期: 2024-09-25 修回日期: 2025-05-06

作者简介: 刘 强(1976—), 男, 工程师, 主要从事发电装备制造工艺研究。E-mail: Liuq637@126.com。

断流保护^[3]。球阀由活门阀轴与阀体组成,其中活门阀轴中的活门为球形结构,阀轴为圆柱形结构,如图1所示。低水头球阀的活门阀轴一般采用整体铸造或单件铸造后采用螺栓把合结构。

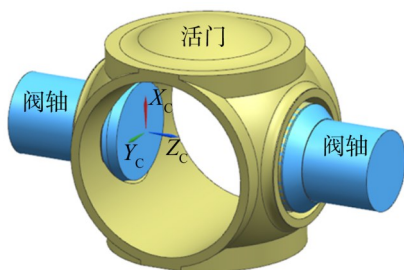


图1 活门阀轴结构三维图

Fig. 1 3D structure of valve shaft

然而,随着抽水蓄能电站机组容量的增加和水头的提高,活门在工作时承受的水压力、阀轴在启停时承受的扭矩越来越大,活门阀轴的制造质量要求越来越高。为保证活门阀轴的制造质量,活门单独铸造,阀轴采用锻件,再采用焊接连接。传统的活门阀轴焊接方法是开X型坡口,进行多层多道人工焊接,最大焊接厚度超过500 mm,焊量达1 600 kg。这种焊接方法不仅焊接量巨大,且需要在半封闭空间进行操作,作业环境恶劣。焊接位置一般为立焊与横焊,焊接质量不稳定,返修量较大。活门阀轴人工焊接实拍如图2所示。



图2 活门阀轴人工焊接实拍

Fig. 2 Manual welding of valve shaft

机器人焊接因其质量稳定、焊缝均一,并可大幅改善劳动条件,已在汽车、工程机械等批量化产品制造中得到广泛应用^[4-5]。但是球阀活门和阀轴焊接深度大,达500 mm以上,采用常规机器人焊接,焊接坡口为X型坡口,焊接层数需100层以上,每层所需焊道数随着截面增加而不断增多,且需根据坡

口深度进行调整,机器人焊接排道难度极大,极大的焊接量导致焊接周期长,且随着焊接道数的增加,焊接质量风险极高。目前,世界各国都加强了对高效焊接工艺的研究开发和推广应用,尤其针对厚板焊接结构提高焊接生产效率尤为重要。焊接生产效率,从某种角度上讲,是由单位时间内填充金属的熔化量—熔敷率来衡量的。要实现厚板焊接高效化,减少接头截面积无疑是直接的方式。

由于窄间隙焊接采用近似I型坡口,每层一道或两道焊接,一方面可减小厚板、超厚板截面50%~80%,大幅降低焊接量,稳定焊接质量^[6-8];另一方面,可简化并固定机器人焊接排道,且焊缝道数的减少可大幅降低焊缝缺陷的风险。因此本文对活门阀轴的焊接结构进行设计(创新坡口设计),并开发适用于机器人窄间隙焊接的焊炬,降低活门阀轴的焊接量,提高活门阀轴焊接效率。

1 活门阀轴窄间隙坡口设计

以某高水头抽蓄活门阀轴为例,活门阀轴由一件活门和两件阀轴组成,其中活门为铸件A148,阀轴为锻件20Mn,活门为球形结构,阀轴为圆柱形结构,阀轴插装至活门,整体外形尺寸约为4 400 mm×3 000 mm×2 200 mm,质量约为60 t。活门阀轴连接后可分为两部分,一部分是圆柱部分,另一部分为马鞍形部分。传统焊接坡口为双面X型大坡口,为减少焊接量,对焊接结构进行创新设计,如图3所示。将圆柱部分 $L_1=360$ mm,设计为近似I型窄间隙坡口,坡口根部 $a=15$ mm,坡口上部 $b=17$ mm,采用机器人窄间隙MAG焊,焊量为115 kg;马鞍形部分 $L_2=140$ mm,设计为常规V型坡口,采用人工焊接,焊量为120 kg。单侧机器人窄间隙焊接+人工焊接的总焊量为235 kg,活门阀轴焊接总量为470 kg,较传统工艺降低70.6%。采用机器人+人工的联合制造方式,充分发挥机器人焊接质量稳定和人工机动性强的优势。

2 窄间隙焊枪结构设计

为适配深窄坡口(间隙15 mm)的焊接需求,设

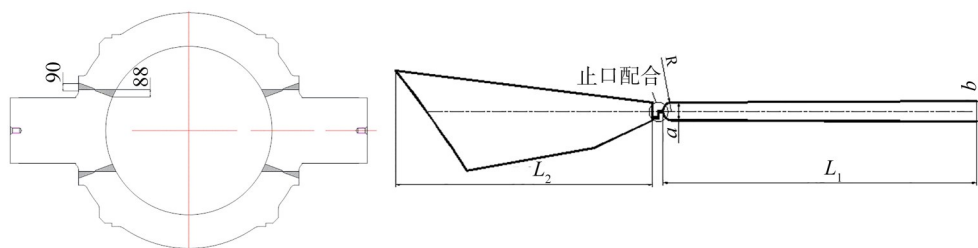
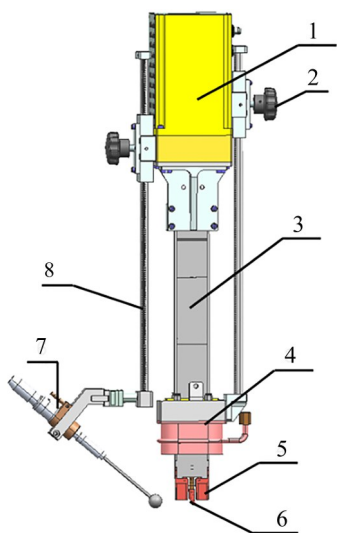


图3 活门阀轴窄间隙坡口设计

Fig. 3 Narrow gap welding groove structure of valve shaft

计一种分体式双喷嘴伺服摆窄间隙焊枪,如图4所示。该焊枪通过模块化结构与二维力学跟踪系统的协同设计,解决了传统焊枪在深窄坡口中的电弧稳定性差、侧壁熔合不良等问题。焊枪结构主要包含焊枪本体、主导电杆、导电嘴、喷嘴、二次保护罩、导电嘴旋转控制部分、力学跟踪器及跟踪器升降杆等。



1—导电嘴旋转控制部分;2—跟踪器升降杆旋钮;3—焊枪本体;4—二次保护罩;5—喷嘴;6—导电嘴;7—力学跟踪器;8—跟踪器升降杆。

图4 窄间隙焊枪结构

Fig. 4 Structure of narrow gap welding torch

焊枪主体采用扁形结构,厚度不大于I型窄间隙坡口宽度,确保在深窄空间内的灵活运动。导电嘴与主旋转杆呈15°的偏心,焊接时通过伺服电机驱动主旋转杆旋转,从而带动导电嘴左右摆动,摆动幅度根据坡口宽度进行调整,保证摆动后导电嘴与两侧壁的距离为2~3 mm,实现深窄坡口单层一道焊的均匀熔合。

气体保护焊时,若保护气体无法排开熔池中心的空气,极易出现气孔类缺陷,因此,气体保护显得

尤为重要。传统气体保护焊焊枪采用圆筒式喷嘴,喷嘴喷出的气体形成圆柱式保护罩对熔池进行保护。由于窄间隙焊枪的特性,其喷嘴无法形成圆柱形保护罩对整个熔池进行保护,为保证焊接过程保护效果,该焊枪设计一次保护和二次保护,其中一次保护的喷嘴采用分体式喷嘴,即焊枪左右各设置一个喷嘴,喷嘴尺寸为20 mm×8 mm,焊接过程中同时对熔池进行保护。焊接至表面深度30 mm时,增加二次保护,二次保护罩尺寸为50 mm×30 mm。

由于加工与装配偏差,焊道轨迹始终存在一部分误差,为保证焊接质量,设计力学跟踪系统,如图5所示。采用二维力学跟踪器对焊道进行跟踪,当机器人轨迹偏离一侧时,跟踪头两侧受力不一致,传感器反馈至执行结构后,焊枪自动偏移一定距离,使焊枪始终位于焊道中心,保证电弧摆动时左右侧壁熔合可靠。

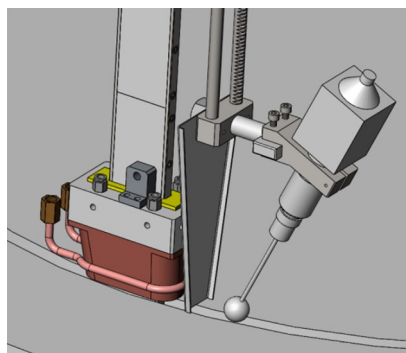


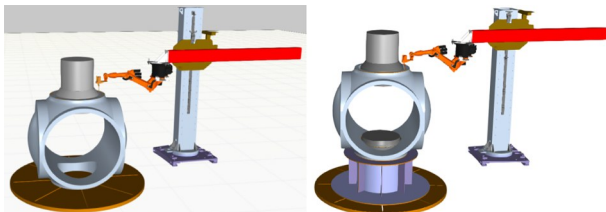
图5 力学跟踪系统示意

Fig. 5 Schematic Diagram of Mechanical Tracking

3 活门阀轴机器人窄间隙焊接系统设计

球阀活门与阀轴装配后,尺寸大,质量重,采用常规的六轴机器人,焊接可达性无法满足。为实现大型球阀活门阀轴的高效、高质量焊接,设计了一套机器

人窄间隙焊接系统,包括十字操作架、六轴机器人本体、窄间隙焊枪、脉冲电源、150 t平面转台、活门阀轴装焊工装及外围设备,该系统可实现高5 m、直径7 m的工件焊接。如图6所示,第一件阀轴与活门装配后,活门置于150 t平面转台,通过转台转动配合机器人进行焊接;第二件阀轴与活门装配后,活门置于装焊工装,转台带动工装,并配合机器人焊接。



(a) 第一件阀轴与活门焊接 (b) 第二件阀轴与活门焊接

图6 活门阀轴机器人窄间隙焊接系统

Fig. 6 Valve shaft robot narrow gap welding system

4 机器人窄间隙焊接工艺研究

4.1 焊接工艺参数

采用机器人窄间隙焊接可大幅降低焊接量,提高机器人焊接效率,但是窄间隙MAG技术存在较大的工艺难点:(1)窄间隙焊接过程的飞溅很容易粘在侧壁与喷嘴,易阻碍焊枪的正常运行;(2)由于窄间隙MAG电弧张角较小,电弧集中在坡口底部,在较低热输入下容易产生侧壁熔合不良;(3)由于喷嘴位于焊枪两侧,气体保护相较常规枪差。

为保证焊接质量,选用脉冲电源,采用熔滴喷射过渡稳定焊接过程,减小飞溅,焊接参数为:电流240~350 A,电压28~35 V,焊接速度20~30 cm/min。焊丝规格 $\phi 1.2$ mm,保护气体80%Ar+20%CO₂,气体流量20~25 L/min。为保证侧壁熔合良好,通过导电嘴摆动,使焊丝距离两侧壁2~3 mm,并设置侧壁停留时间,使电弧有足够的时间将侧壁熔合。焊枪在深坡口焊接时,坡口与喷涂形成了一个相对狭小的保护区,可将坡口内的熔池保护好,但是随着坡口逐渐变浅,坡口与喷嘴的联合保护效果变差,此时,通过增加二次保护,增强熔池区的气体保护。

4.2 模拟试验件的焊接

通过对窄间隙焊接规范的研究,得出智能化窄间隙焊接的焊接参数及其规律。为确保产品焊接

质量,对超厚截面环形焊道的焊接进行试验,为此设计出模拟试验件的焊接,如图7所示,采用机器人窄间隙焊枪进行一层一道多层焊接,焊接过程中采用力学传感器跟踪坡口中心,使焊枪始终位于坡口的中心,通过导电嘴的摆动,使电弧指向侧壁,保证侧壁的熔合。试验件焊接完成后,对其进行UT探伤和金相检查。UT探伤合格率100%,宏观金相未发现侧壁熔合不良现象,如图8所示。

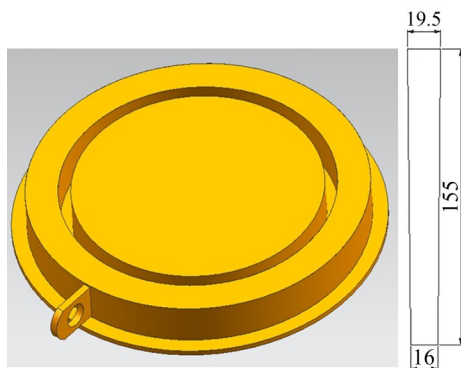


图7 模拟试验件结构

Fig. 7 Structure of simulated test piece



图8 模拟试验件焊接及检测

Fig. 8 Simulation test piece welding and testing

5 智能化窄间隙焊接技术在产品中的应用

机器人窄间隙焊接系统及其技术研发完成后,在敦化、长龙山等超高水头抽水蓄能机组的活门阀轴焊接中进行应用,如图9所示。其焊接过程稳定,降低了焊接量70%,提高活门阀轴焊接效率5倍,极大的改善了焊接作业环境。焊后对活门阀轴进行UT探伤,合格率100%,取得了良好的经济效益,达到预期结果。

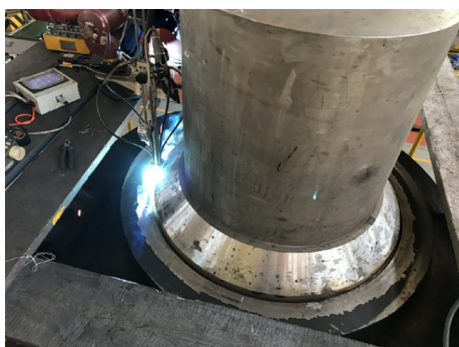


图9 敦化机组活门阀轴智能化窄间隙焊接

Fig. 9 Intelligent narrow gap welding of valve shaft for dunhua

6 结论

针对大型抽水蓄能机组球阀活门阀轴的焊接难题,提出了机器人窄间隙焊接技术解决方案,并取得了显著成果。主要创新点如下:

(1)通过活门阀轴的焊接结构设计,即将传统双面X型坡口改为窄间隙I型坡口与人工坡口X型坡口相结合的设计,有效降低了焊接量,提高了焊接效率。

(2)针对深窄坡口的焊接需求,设计了分体式双喷嘴伺服摆窄间隙焊枪,有效解决了传统焊枪在深窄坡口中电弧稳定性差、侧壁熔合不良等问题,实现了均匀熔合。

(3)开发了机器人窄间隙焊接工艺,包括十字操作架、六轴机器人本体、窄间隙焊枪、脉冲电源等,实现了大型球阀活门阀轴的高效、高质量焊接。

(4)针对窄间隙MAG焊接的难点,进行了焊接工艺参数优化,并通过模拟试验件焊接验证了工艺的可行性,确保了焊接质量。

(5)该技术成功应用于敦化、长龙山等超高水头抽水蓄能机组的活门阀轴焊接,实现了焊接量降低70%,焊接效率提高5倍,焊接质量合格率100%的目标,取得了良好的经济效益。该技术可推广应用于所有环形焊道的焊接,为超厚板焊接提供技术方向,具有一定的理论意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 叶林,屈晓旭,么艳香,等.风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J].电力系统自动化,2018,42(04):158-164
- YE L, QU X X, ME Y X, et al. Analysis of day-time scale

operation characteristics of wind-water multi-energy complementary power generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(04): 158-164.

- [2] 张倩文,王秀丽,李言. 含风-光-水-储互补电力系统的优化调度研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(05): 581-586.
- ZHANG Q W, WANG X L, LI Y, et al. Study on optimal dispatching of wind-light-water-storage complementary power system [J]. Power & Energy, 2017, 38(05): 581-586.
- [3] 张明学. 球阀运行可靠性设计研究[J]. 中国设备工程, 2024(13): 142-145.
- ZHANG M X. Study on reliability design of ball valve operation [J]. China Plant Engineering, 2024(13): 142-145.
- [4] 谭一炯,周方明,王江超,等. 焊接机器人技术现状与发展趋势[J]. 电焊机, 2006, 36(3): 6-10.
- TAN Y J, ZHOU F M, WANG J C, et al. Development trend and situation of technology of welding robot [J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(3): 6-10.
- [5] 陈歆. 焊接机器人技术的应用研究[J]. 价值工程, 2012, 31(13): 39-39.
- CHEN X. Research on the Application of Welding Robot Technology [J]. Value Eng., 2012, 31(13): 39-39.
- [6] 赵博,范成磊,杨春利,等. 窄间隙GMAW的研究进展[J]. 焊接, 2008(2): 11-14.
- ZHAO B, FAN C L, YANG C L, et al. Research progress of narrow gap GMAW [J]. Welding & Joining, 2008(2): 11-14.
- [7] 姜煌,李兴宇. 窄间隙自动焊技术的应用与推广[J]. 浙江电力, 2018, 37(5): 85-89.
- JIANG H, LI X Y. Application and popularization of narrow gap automatic welding technology [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(5): 85-89.
- [8] 金宝,冯涛,钟磊,等. 大型抽水蓄能机组座环机器人窄间隙焊接技术应用研究[J]. 电焊机, 2021, 51(12): 75-79+130.
- JIN B, FENG T, ZHONG L, et al. Application research on robot narrow gap welding technology in welding large pumped storage stay ring [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(12): 75-79+130.
- [9] 郭中才,冯涛,钟磊,等. 大型抽水蓄能球阀机器人窄间隙焊接工艺研究与应用[J]. 电焊机, 2022, 52(09): 60-65.
- GUO Z C, FENG T, ZHONG L, et al. Research and application of robotic narrow gap welding technology for large pumped storage ball valve [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(09): 60-65.