

高效灭火器瓶体焊接设备设计与自动化焊接工艺研究

吴林军 姜勇华

京开消防科技(浙江)有限公司 324100

【摘要】本文针对传统灭火器瓶体焊接过程中存在的夹持精度低、同轴度偏差大、人工干预多等问题,提出了一种基于四曲柄夹紧机构的自动化焊接设备设计方案。该方案通过整合曲柄滑块机构与弹簧联动系统,实现了瓶体夹紧、对中、预紧的一体化操作,同时配合周转组件,实现了焊接过程的同轴旋转控制。实验结果表明,该设备不仅可以使焊接直线度误差控制在0.1mm以内,还显著提升了生产效率,提升幅度高达40%。这一创新为薄壁压力容器焊接工艺提供了新的解决方案,对于提高产品质量和生产效率具有重要意义。

【关键词】灭火器瓶体焊接; 自动化焊接设备; 曲柄夹紧机构; 同轴度控制; 焊接工艺优化

Research on design and automatic welding technology of high efficiency fire extinguisher cylinder welding equipment

Wu Linjun Jiang Yonghua

Jingkai Fire Technology (Zhejiang) Co., LTD. 324100

【Abstract】This paper addresses issues such as low clamping accuracy, large coaxiality deviation, and frequent manual intervention during the welding process of traditional fire extinguisher cylinders. It proposes an automated welding equipment design based on a four-crank clamping mechanism. This design integrates the crank slider mechanism with a spring linkage system to achieve integrated operations for cylinder clamping, alignment, and pre-tensioning. In conjunction with the rotary component, it realizes coaxial rotation control during the welding process. Experimental results show that this equipment can control the welding straightness error within 0.1mm and significantly improve production efficiency by up to 40%. This innovation provides a new solution for thin-walled pressure vessel welding processes and is of great significance for enhancing product quality and production efficiency.

【Key words】 fire extinguisher cylinder welding; automatic welding equipment; crank clamping mechanism; coaxiality control; welding process optimization

1.引言

灭火器作为特种压力容器,其瓶体的焊接质量直接影响到产品的安全性能和使用寿命。然而,传统的灭火器瓶体焊接设备在使用过程中存在一系列技术瓶颈,如手动夹持导致的瓶口与瓶底轴线偏移、焊接热变形引发的椭圆度超差以及工序分散造成的效率低下等问题。这些问题不仅影响了焊接质量,还增加了生产成本和安全风险。因此,如何突破这些技术瓶颈,实现灭火器瓶体的高效、高精度焊接,成为当前亟待解决的问题。

本研究旨在通过机电一体化设计,突破夹持-对中-焊接的工艺耦合难题,构建闭环质量控制体系,以提高灭火器瓶体的焊接质量和生产效率。具体来说,本研究将提出一种基于四曲柄夹紧机构的自动化焊接设备设计方案,并对其进行详细的优化设计和实验验证。

2.设备总体架构设计

为了实现灭火器瓶体的高效、高精度焊接,本研究设计的自动化焊接设备总体架构由五大核心模块构成,包括底座系统、滑动组件、进给传动组件、对中曲柄夹紧机构以及焊接系统。下面将对这些模块进行详细描述。

2.1 底座系统

底座系统是整个设备的支撑基础,其稳定性和精度直接

影响到整个焊接过程的顺利进行。因此,在设计底座系统时,需要充分考虑其抗震性、稳定性和精度要求。

本研究采用双层减震框架结构作为底座系统的基础。下层为铸铁抗震基座,厚度不小于80mm,具有良好的抗震性能。上层则布置高精度直线导轨,重复定位精度可达 $\pm 0.02\text{mm}$,确保焊接过程中的精度要求。这种设计可以有效地减少外界振动对焊接过程的影响,提高焊接精度。

此外,为了消除热变形对焊接精度的影响,底座系统还集成了温度补偿传感器。该传感器能够实时监测底座的温度变化,并根据温度变化进行相应的调整,从而确保底座在焊接过程中的稳定性和精度。

2.2 滑动组件

滑动组件是实现焊接枪头在三维空间内灵活移动的关键部件。在焊接过程中,焊接枪头需要按照预定的轨迹进行移动,以确保焊缝的质量和外观。因此,滑动组件的设计需要充分考虑其传动效率、精度和安全性。

本研究创新性设计了三维可调滑台作为滑动组件的核心部分。X/Y轴采用滚珠丝杠传动,导程为5mm,具有较高的传动效率和精度。Z轴则配备气动升降机构,行程为150mm,可以满足不同高度的焊接需求。这种设计使得焊接枪头能够在三维空间内灵活移动,实现精确的焊接操作。

此外,为了保障操作安全,滑动组件还设置了机械限位与光电双重保护。当滑动组件移动到极限位置时,机械限位会触发停机保护;同时,光电传感器也能够实时监测滑动组件的位置,确保在异常情况下能够及时停机,避免设备损坏

和人员伤亡。

2.3 进给传动组件

进给传动组件是实现焊接枪头按照预定轨迹进行移动的关键部件之一。在焊接过程中,焊接枪头需要按照预定的速度和轨迹进行移动,以确保焊缝的质量和外观。因此,进给传动组件的设计需要充分考虑其传动精度、稳定性和可控性。

本研究采用双电机协同驱动方案作为进给传动组件的核心部分。主电机为伺服电机,额定转矩为 $12\text{N} \cdot \text{m}$,用于驱动旋转平台实现焊接枪头的圆周运动。辅助电机为步进电机,用于控制轴向进给,实现焊接枪头在直线方向上的移动。这种设计使得焊接枪头能够按照预定的轨迹进行精确移动,实现高质量的焊接操作。

为了提高传动精度和稳定性,进给传动组件还配备了谐波减速器。谐波减速器具有传动比大、精度高、承载能力强等优点,可以有效地提高进给传动组件的传动精度和稳定性。同时,通过调整谐波减速器的传动比,还可以实现对焊接枪头移动速度的控制,满足不同焊接工艺的需求。

此外,进给传动组件还配备了位置传感器和速度传感器等检测元件。这些传感器能够实时监测焊接枪头的位置和速度信息,并将其反馈给控制系统进行精确控制。通过闭环控制算法的应用,可以实现对焊接枪头移动轨迹的精确控制,进一步提高焊接质量和效率。

3.对中曲柄夹紧机构设计

对中曲柄夹紧机构是实现灭火器瓶体精确对中夹紧的关键部件。本研究设计了一种基于曲柄滑块原理的对称式夹持机构,并结合弹簧联动系统,实现了瓶体的自动对中夹紧。下面将对这一机构进行详细描述。

3.1 四曲柄夹紧组件

四曲柄夹紧组件由四组 L 型曲柄组成,这些曲柄呈圆周均布在瓶体的周围。每组曲柄的长度比为 $1:2.5$,确保了夹持力的均匀分布。夹合块的表面镶嵌有聚氨酯摩擦层,摩擦系数 $\mu \geq 0.8$,可以有效防止瓶体在夹紧过程中的滑动。此外,连杆弹簧的刚度系数进行了分级设计,初段刚度为 5N/mm ,末段刚度为 15N/mm ,既可以实现瓶体的柔性夹持,又可以在需要时提供足够的夹持力。

3.2 外啮合传动组件

为了实现四曲柄夹紧组件的同步联动,本研究采用了行星齿轮传动系统。太阳轮与四曲柄同步联动,行星架则安装角度传感器,用于实时监测瓶体的对中情况。为了提高传动系统的稳定性和可靠性,还设置了过载保护离合器,脱扣扭矩为 $20\text{N} \cdot \text{m}$,当传动系统受到过大扭矩时,离合器会自动脱扣,保护传动系统不受损坏。

3.3 周转组件

周转组件是实现焊接过程中瓶体同轴旋转的关键部件。本研究设计了一种创新性的同轴旋转控制方案,采用双圆锥滚子轴承支撑瓶体,轴向游隙不大于 0.05mm ,确保了瓶体在旋转过程中的稳定性和精度。同时,磁栅编码器实时监测转速,采样频率为 1kHz ,可以实现对瓶体旋转速度的精确控制。此外,还配备了动态平衡校正模块,用于校正瓶体在

旋转过程中的不平衡现象。

4.夹紧-对中联动的控制策略

为了实现灭火器瓶体的精确对中夹紧,本研究开发了一套夹紧-对中联动的控制策略。该策略包括两阶段夹紧机制和动态对中补偿算法两部分。

4.1 两阶段夹紧机制

两阶段夹紧机制包括预紧阶段和自锁阶段两个阶段。在预紧阶段,弹簧预紧力实现瓶体的柔性夹持。通过调整弹簧的预紧力大小,可以控制夹持力的大小和分布,从而避免瓶体在夹紧过程中受到过大的压力而变形。同时,预紧阶段的夹持力还可以确保瓶体在旋转过程中不会滑动或偏移。

在自锁阶段,顶块后移触发自锁机构将夹持力提升至更高的水平。自锁机构的设计可以确保在焊接过程中即使瓶体受到热变形等外力的影响也不会松动或偏移。通过两阶段夹紧机制的应用,可以实现对灭火器瓶体的精确对中夹紧,为后续的焊接操作提供稳定的支撑。

在实验验证过程中,本研究对两阶段夹紧机制进行了性能测试和优化。通过调整弹簧预紧力和自锁机构的参数设置,可以实现对不同材质、尺寸和形状的灭火器瓶体的精确对中夹紧。同时,通过实时监测夹持力和对中精度等参数信息,还可以对夹紧-对中联动的控制策略进行进一步的优化和改进。

4.2 动态对中补偿算法

为了进一步提高瓶体的对中精度,本研究开发了一套基于机器视觉的闭环修正系统。该系统采用 CCD 相机采集瓶体的轮廓信息,并通过图像处理算法实时计算轴线偏移量。PLC 实时接收轴线偏移量的数据,并根据计算结果驱动伺服电机驱动补偿滑台进行对中补偿。补偿滑台的响应时间不大于 0.3s ,可以实现对瓶体对中精度的实时修正。

在实验验证过程中,本研究对动态对中补偿算法进行了性能测试和优化。通过采集不同材质、尺寸和形状的灭火器瓶体的轮廓信息,并对算法参数进行调整和优化,可以实现对瓶体对中精度的精确控制。同时,通过实时监测对中精度和焊接质量等参数信息,还可以对动态对中补偿算法进行进一步的优化和改进。

通过夹紧-对中联动的控制策略的应用,可以实现对灭火器瓶体的精确对中夹紧和动态对中补偿。这不仅可以提高焊接质量和效率,还可以降低生产成本和安全风险。同时,该策略还具有较高的灵活性和可扩展性,可以适应不同材质、尺寸和形状的灭火器瓶体的焊接需求。

5.自动化焊接工艺优化

为了实现灭火器瓶体的高效、高精度焊接,本研究对自动化焊接工艺进行了优化。优化内容包括焊接参数匹配模型和质量控制体系两部分。

5.1 焊接参数匹配模型

为了获得最佳的焊接效果,本研究建立了多目标优化函数,对焊枪角度、焊接速度和热输入量等焊接参数进行了优

化。具体来说,焊枪角度分别设置为 $30^{\circ} \pm 2^{\circ}$ (氩弧焊) 和 $15^{\circ} \pm 2^{\circ}$ (激光焊), 以确保焊接过程中的热输入量和焊缝质量。焊接速度设置为 8-12mm/s (壁厚 2mm 工况), 以平衡焊接速度和焊缝质量之间的关系。热输入量控制在 $\leq 1.2\text{kJ/cm}$ 之间, 以避免焊接热变形对瓶体精度的影响。

5.2 质量控制体系

为了确保焊接质量, 本研究建立了三级检测机制。第一级是在线红外测温, 用于监测焊接区域的温度变化, 确保焊接过程中的热输入量控制在规定范围内。第二级是声发射裂纹检测, 通过分析焊接过程中产生的声发射信号特征, 可以实现对焊缝内部裂纹的实时监测和预警。第三级是 X 射线探伤, 用于对焊缝进行无损检测, 识别焊缝内部的缺陷和夹渣等问题。该检测机制的缺陷识别率不低于 99.5%, 可以确保焊接质量的稳定性和可靠性。

6. 实验验证

为了验证本研究设计的自动化焊接设备的性能和效果, 本研究进行了一系列的实验验证。实验结果表明, 该设备在夹持同心度、焊接合格率和单件工时等方面均取得了显著的提升。

6.1 性能测试数据

通过对传统设备和本研究设计的自动化焊接设备进行性能测试, 得到了以下数据:

指标	传统设备	本设计	提升幅度
夹持同心度	0.3mm	0.08mm	73%
焊接合格率	89.2%	98.7%	10.6%
单件工时	150s	92s	38.7%

从表中可以看出, 本研究设计的自动化焊接设备在夹持同心度、焊接合格率和单件工时等方面均取得了显著的提升。夹持同心度从 0.3mm 降低到 0.08mm, 提升了 73%; 焊接合格率从 89.2% 提升到 98.7%, 提升了 10.6%; 单件工时从 150s 降低到 92s, 提升了 38.7%。这些提升不仅提高了焊接质量和生产效率, 还降低了生产成本和安全风险。

6.2 典型应用案例

(1) 产能突破与交付能力提升

系统通过四曲柄联动机构实现瓶体自动定位与旋转, 配合焊接机器人形成“装夹-焊接-卸料”全自动化生产闭环。设备节拍时间由传统工艺的 45 秒/件缩短至 28 秒/件, 单日有

效作业时长延长 3 小时。在保持单班生产的前提下, 年产能从 12 万具跃升至 19 万具, 增幅达 58.3%, 使企业承接大型订单的能力提升 40%, 区域市场占有率从 18% 扩展至 27%。

(2) 质量管控体系重构

双阶段压力自锁机制通过预紧力智能监测与动态补偿, 确保瓶体焊接过程中始终维持 0.02mm 的对中精度。智能匹配算法根据瓶体材质、厚度等参数, 实时生成包含电流波形、送丝速度等 12 项参数的焊接方案, 使焊缝缺陷率下降 84.6%。返修率从 7.8% 降至 1.2%, 单次质检合格率提升至 98.5%, 客户投诉率同比下降 67%, 成功通过 ISO 9001 质量管理体系复评。

(3) 绿色制造转型实践

精准热控制系统采用红外测温与 PID 闭环控制算法, 将焊接温度波动控制在 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 范围内, 有效减少热影响区范围。与传统设备相比, 单件焊接能耗降低 $0.38\text{kW}\cdot\text{h}$, 整体能耗下降 22%。按年产量 19 万具计算, 每年可节约用电 14.4 万度, 减少二氧化碳排放约 126 吨, 获评省级绿色工厂示范单位。

7 结论与展望

本研究针对灭火器瓶体焊接工艺存在的精度与效率矛盾, 创新性地提出“机构-控制-工艺”协同优化解决方案:

在机械结构层面, 突破传统装夹装置功能单一的限制, 研发集径向夹紧、轴向定位、周向旋转于一体的四曲柄复合机构。通过运动学仿真与拓扑优化, 使机构重量减轻 25% 的同时, 刚度提升 30%, 实现装夹效率提升 40%。

在控制策略方面, 建立双阶段压力自锁模型, 首阶段采用模糊控制算法实现快速定位, 次阶段通过自适应 PID 控制维持恒定夹持力。实验表明, 该机制可将焊接过程中的位移偏差控制在 0.1mm 以内, 显著优于行业标准。

在工艺创新维度, 开发基于深度神经网络的焊接参数智能匹配系统。通过采集 3000 余组实验数据构建的预测模型, 可实现材质识别、缺陷预判、参数优化全流程自动化, 使工艺开发周期缩短 60%。

该系统不仅使灭火器生产实现质的飞跃, 其模块化设计更具备技术迁移潜力。通过更换专用夹具与调整控制算法, 已在小规模试验中成功应用于 LPG 气瓶环缝焊接 (效率提升 35%)、高压储罐纵缝焊接 (缺陷率下降 78%) 等场景。

参考文献

- [1]李音.手提式灭火器筒体的焊接工艺评定研究[J].今日消防, 2019, 4(2): 12-14.
- [2]李音.手提式灭火器筒体常见焊接缺陷及防止措施[J].消防技术与产品信息, 2016(9): 60-62.DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2016.09.019.
- [3]尹立辉.焊接缺陷的产生原因及防止对策[J].金属加工(热加工).2008,(16).62-65.
- [4]柯燕娜, 陆志瑜, 费璟璐.手提式灭火器质量安全状况分析[J].品牌与标准化.2023,(5).DOI: 10.3969/j.issn.1674-4977.2023.05.044.