

钢筋预埋件自动埋弧螺柱焊接装置研制及应用

严翔, 郑秀华, 陈香泉, 朱称生, 邓刚, 曾凡勇

中国核工业第二二建设有限公司 湖北武汉 430051

摘要: 针对核电站钢筋预埋件T形接头采用手持式埋弧螺柱焊存在焊接技能要求高、焊接质量稳定性差等问题, 提出采用伺服电动机驱动的自动埋弧螺柱焊接技术, 从焊接电源选型、埋弧螺柱焊枪设计、控制系统设计方面进行了专用装置研制, 开展了 $\phi 20\text{mm}$ 和 $\phi 28\text{mm}$ 钢筋的焊接工艺评定和批量模拟焊接试验, 并在核电站中实现了批量应用。结果表明: 自动埋弧螺柱焊接接头的无损检测和理化性能指标均满足标准要求。相比手持式埋弧螺柱焊接, 自动埋弧螺柱焊接在焊接效率、焊接质量和成本方面具有明显优势, 在核电站钢筋预埋件焊接中具有广泛的应用前景。

关键词: 钢筋预埋件; 埋弧螺柱焊; 设备研制; 工艺试验; 推广应用

Research and application of automatic submerged arc stud welding device for reinforcement embedded parts

YAN Xiang, ZHENG Xiuhua, CHEN Xiangquan, ZHU Chensheng, DENG Gang, ZENG Fanyong

China Nuclear Industry 22ND Construction Co., Ltd., Wuhan 430051, Hubei, China

Abstract: In response to the issues of high welding skill requirements and poor stability of welding quality encountered in the T-joint welding of nuclear power reinforcement embedded parts using handheld submerged arc stud welding, this paper proposes the use of servo motor-driven automatic submerged arc stud welding technology. The development of specialized equipment was carried out from the aspects of welding power source selection, submerged arc stud welding gun design, and control system design. Welding procedure qualification and batch simulation welding tests were conducted for rebars with diameters of $\phi 20\text{mm}$ and $\phi 28\text{mm}$, and batch applications were achieved in nuclear power projects. The results indicate that the non-destructive and physicochemical performance indicators of the automatic submerged arc stud welded joints meet the standard requirements. Compared to handheld submerged arc stud welding, automatic submerged arc stud welding has significant advantages in terms of welding efficiency, welding quality, and cost, demonstrating broad application prospects in the welding of nuclear power reinforcement embedded parts.

Keywords: reinforcing bar embedded parts; submerged arc stud welding; equipment development; process testing; popularization and application

1 序言

华龙、AP、CAP系列核电站堆型中T形接头钢筋预埋件大量存在, 传统方式主要为手工焊接, 效

率低, 自动化程度低, 焊后打磨工作量巨大, 工作强度高。埋弧螺柱焊(见图1)因具有焊接时间短、焊接过程烟尘较少、对环境风速不敏感等优点而被

视为高效可靠的焊接工艺^[1, 2]。

传统的埋弧螺柱焊枪是由螺柱焊枪改制而来，其采用电磁弹簧设计结构^[3]，通过手持焊枪按动开关启动焊接过程，如图2所示。

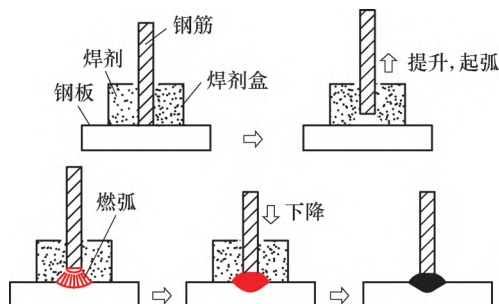


图1 埋弧螺柱焊原理



图2 传统手持式埋弧螺柱焊

对于钢筋焊接而言，由于钢筋预埋件的结构、工艺和使用环境差异，导致传统的手持式埋弧螺柱焊仍存在较多不足，主要包括以下几个方面。

1) 完全依靠手工对钢筋进行定位，钢筋轴线与钢板垂直度偏差较大。

2) 采用钢筋套入式固定和夹持，仅适用于直钢筋，对于带弯头或锚固头的钢筋，适应性差，且仅适合长度较短的钢筋。

3) 采用电磁加弹簧方式实现钢筋的提升和下压，无法精确控制钢筋提升量和下压量，且下压过程均是采用冲击的方式，焊接质量的不确定性较大；随着使用时间增长，弹簧性能下降，会影响焊接质量。

4) 钢筋下料的长度需精度较高，每一根钢筋焊前准备工作较繁琐，需要精准控制钢筋的伸出量和提升量，对人工操作要求较高。

5) 焊接工艺窗口较窄，对人工技能要求较高。据统计，采用手持式埋弧螺柱焊枪焊接钢筋预埋件

的一次合格率约为50%，焊后需要打磨和返修，严重影响了焊接效率与质量。

采用伺服电动机驱动控制埋弧螺柱焊接过程中钢筋的提升与下降等参数，可免除焊接过程人工的干预和影响，可精确控制钢筋的提起、稳定燃烧、下降及各动作的速度等重要参数，对于改善钢筋预埋件的埋弧螺柱焊接质量具有重要意义。

2 总体思路

传统手持式埋弧螺柱焊存在需要手工持续把持焊枪、焊接过程无法精确控制的问题，导致焊接质量一致性差。为此，本文设计了一种自动埋弧螺柱焊接装置（见图3），主要由焊接电源、控制系统和埋弧螺柱焊枪组成。焊接电源应能输出稳定的焊接电流，保证电弧稳定燃烧。控制系统分别与埋弧螺柱焊枪和焊接电源相连，通过控制系统可控制起弧、焊枪提升、焊枪下压、停弧、复位及急停等动作；埋弧螺柱焊枪是焊接过程的直接执行机构，考虑到该装备的研制是替代传统的手持式焊枪，因此设备质量不能太重，需具备良好的便携性，且能满足不同长度钢筋的稳定夹持与焊接。

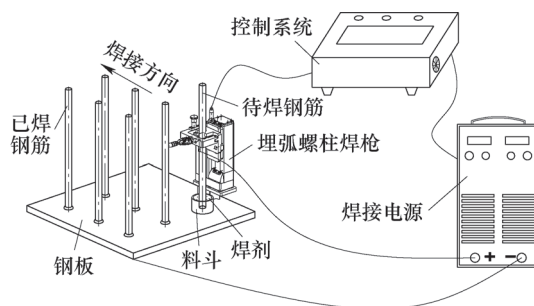


图3 自动埋弧螺柱焊接装置

3 设备研制

3.1 焊接电源选型

焊接电源拟采用已有的埋弧焊接电源，计划对不同品牌型号焊接电源进行适配，通过对奥太MZ1250埋弧焊电源、林肯DC1000埋弧焊电源、斯达特3150埋弧螺柱焊电源进行对比试验，结果表明均可满足焊接需求，但斯达特3150为专用电源，需要在标准产品基础上进行改制。

3.2 埋弧螺柱焊枪设计

根据埋弧螺柱焊的功能需求，对焊枪的各部分执行结构进行了设计制作，适用范围为：钢筋直

径20~40mm, 钢筋长度 $\leq 700\text{mm}$, 整体焊枪质量 $\leq 20\text{kg}$ 。

埋弧螺柱焊焊枪主要由动力机构、运动机构、固定机构3部分组成, 其详细结构如图4所示。

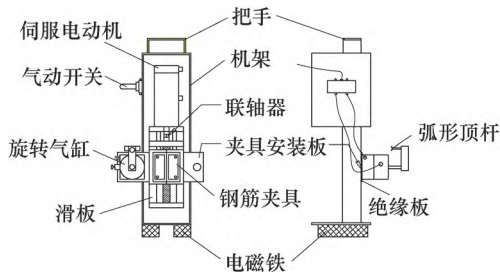


图4 埋弧螺柱焊焊枪结构

1) 埋弧螺柱焊枪的动力机构包括伺服电动机, 以及与伺服电动机相连的联轴器和滑板。伺服电动机具有高精度、快速响应和高过载能力的特点, 同时还可实现闭环控制, 可精确控制钢筋的提升下降距离以及速度。本设计采用信捷MS6H-60CS30BZ1-20P4型伺服电动机。

2) 运动机构采用了螺纹传动机构, 可将伺服电动机的旋转运动转化为直线运动, 丝杠与电动机采用联轴器相连, 通过伺服电动机的正转反转实现夹具的上升和下降。

3) 固定机构包括安装在焊枪底部的电磁铁, 设计采用了150kg吸力级别的电磁铁, 焊接过程可将整个焊枪牢固地吸附在预埋件钢板上。设计有采用旋转气缸气动顶紧的钢筋夹具, 且钢筋夹具配备有弧形顶杆, 配合V形夹块可实现不同直径钢筋的稳固夹持。

整体埋弧螺柱焊枪的设计不仅需要满足螺纹钢的稳定夹持, 防止焊接过程打火, 还需保证钢板与钢板的直角偏差不超过 2° [4]。

3.3 控制系统设计

控制系统需要实现对焊枪(伺服电动机)和焊接电源的控制, 同时需要将焊接过程进行集成, 实现焊接工艺的管理。控制系统的设计按照焊接流程进行, 如图5所示。

焊枪就位后, 开启电磁铁电源, 实现磁铁吸附功能; 人工钢筋上料, 就位后开启旋转气缸电磁阀实现钢筋夹持; 在控制系统上设置和保存对应工艺参数。工艺参数设置主要包括提升速度、提升距离、焊接时间、下降速度及下降距离; 设置完成

后, 启动焊接, 此时按照通电起弧、钢筋提升、燃弧等待、钢筋下压、停弧焊接结束流程, 完成单根钢筋的焊接; 手动关闭旋转气缸, 钢筋松开, 将焊枪移动到下一待焊位置, 电动机复位, 循环进行下一根钢筋的焊接。另外, 考虑到现场操作的便利性, 设计了无线遥控器实现远程起弧、复位和急停等关键功能控制。

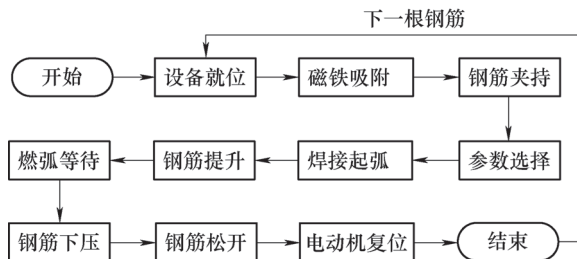


图5 焊接流程

图6所示为研制的自动埋弧螺柱焊枪及控制系统。整体埋弧螺柱焊枪质量为15kg, 同时设计了防撞外壳和把手, 方便设备携带, 增加了设备的操作性。



图6 自动埋弧螺柱焊枪及控制系统

4 工艺试验及推广应用

利用研制的自动埋弧螺柱焊接装置进行了焊接试验, 以验证整套设备的实用性、稳定性和可靠性。

针对 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 28\text{mm}$ 的HRB400E钢筋进行了埋弧螺柱焊接工艺评定, 焊接电源型号为林肯DC1000, 钢板材质为Q390B, 厚度为26mm, 焊接位置为1S, 焊剂采用10~60目的CHF101PR, 焊接电流极性为直流反接, 主要焊接参数见表1。焊后进行了目视检测、弯曲试验、拉伸试验和宏观金相观

察,结果均满足标准要求(见表2)。试样的宏观金相如图7所示。分析认为,螺柱焊接头质量较高的主要原因在于:螺柱焊接过程电流密度高,可以充分对钢筋进行熔化,保证熔深;焊剂可对熔池形成有效保护,发生冶金反应,减缓冷却速度,改善焊缝成形;自动埋弧螺柱焊接可以精确控制焊接电流和持续焊接时间,确保热输入量既能充分熔化金属,也可避免过热。电弧熄灭后,通过一定的下压促使熔融金属挤压结合面,排出气体,形成致密接头。

表1 主要焊接参数

钢筋直径 /mm	焊接时间 /s	焊接电流 /A	提升高度 /mm	下降距离 /mm
20	7~9	860±43	6~9	12~16
28	9~11	980±49	9~12	13~17

表2 焊后检测项目

检测项目	试样数量 /个	验收标准 及要求	试验结果
目视检测	10	AWS D1.1—2000 《钢结构焊接规范》 必须在整个360° 范围内呈现飞边	合格
拉伸试验	2	AWS D1.1—2000 抗拉强度≥500MPa, 即不小于其母材屈服 强度的1.25倍	合格 φ 20mm: 639MPa、636MPa φ 28mm: 623MPa、623MPa
弯曲试验	10	AWS D1.1—2000 将钢筋弯曲90°, 断裂发生在钢板上或 钢筋上,且不在焊缝 上为合格	合格
宏观金相	2	AWS D1.1—2000 1) 焊缝及热影响区 无裂纹 2) 相邻焊层之间以及 焊缝金属与母材之间 完全熔合 3) 无未焊透 4) 焊缝处不应有焊 瘤 5) 实体部分的咬边 深度不超过1mm 6) 气孔直径之和在 25mm线性范围内不超 过10mm, 150mm焊 缝长度范围内不超过 14mm	合格



a) φ 20mm



b) φ 28mm

图7 试样的宏观金相

完成焊接工艺评定后,针对φ 20mm、φ 28mm规格的钢筋开展了批量模拟焊接试验(见图8),每种规格钢筋连续焊接100根,焊接参数与工艺评定的相同,焊后全部进行目视检测及10%弯曲试验抽检,结果全部满足要求,证明了设备和工艺的稳定性。



图8 批量模拟焊接试验

2024年7月,该设备正式用于三门核电3号机组钢穹顶制作φ 28mm的HRB400E钢筋,已完成了3000余根钢筋焊接,无损检测一次合格率达到98%。焊接效果达到预期,且焊后无需打磨。

采用自动埋弧螺柱焊设备焊接具有以下显著优点。

1) 焊缝成形均匀美观,焊接质量一致,可明显减少焊后手工打磨工作量,基本无需打磨。

- 2) 焊接过程无需人工手持焊枪，焊工劳动强度大幅降低。
- 3) 操作简单，无埋弧螺柱焊经验的操作工，仅需培训2~4h即可掌握设备操作技巧。
- 4) 相比于机器人工作站式自动螺柱焊装备^[5]，便携式的自动埋弧螺柱焊设备性价比更高，且更加灵

活，不仅适用于车间，也可适用于现场焊接。

5) 与传统的手工埋弧螺柱焊及焊条电弧焊相比，自动埋弧螺柱焊在焊接效率、焊接质量、焊后打磨及焊后检测等方面具备明显的优势，效果对比见表3。焊条电弧焊与自动埋弧螺柱焊焊后外观对比如图9所示。

表3 3种焊接方式效果对比

项目	自动埋弧螺柱焊	手持式埋弧螺柱焊	焊条电弧焊
焊接效率	ϕ 28mm约40s/根（含夹持试件、填焊剂、焊接），直径越小时间越短	120s/根	300s/根
焊接质量	一次合格率98%	一次合格率50%	—
焊后打磨	焊后无需打磨	焊接质量稳定性依赖于焊工技能	每个接头均需打磨
焊后检测	VT	VT	VT、PT

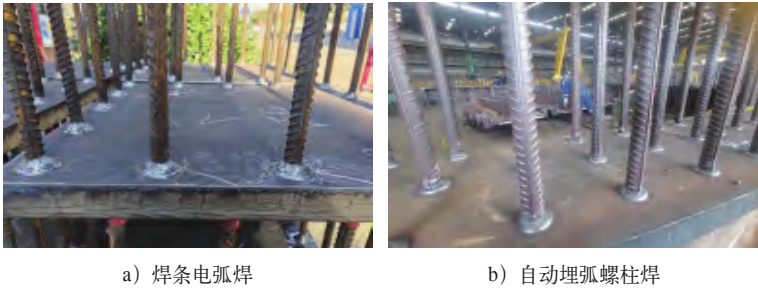


图9 焊后外观对比

据初步预估，相比于传统手持式埋弧螺柱焊和焊条电弧焊，采用自动埋弧螺柱焊单根预埋件钢筋可节约施工成本约20元。AP、CAP堆型核电单个机组预埋件T形接头钢筋总量约为11万根（ ϕ 20~ ϕ 28mm），因此在徐大堡核电一期、三门核电二期等核电堆型中具有潜在的焊接需求。综上可知，自动埋弧螺柱焊接技术的应用可获得良好的经济效益和社会效益。

5 结束语

- 1) 研制了一套便携式自动埋弧螺柱焊设备，包括焊接电源、埋弧螺柱焊枪和控制系统。
- 2) 埋弧螺柱焊枪采用伺服电动机驱动方式，可精确控制钢筋的提升距离、下降距离及焊接速度等参数，降低焊工技能经验要求，保证焊接质量。
- 3) 焊枪底座采用电磁吸附方式进行固定，焊接过程无需人工手持焊枪；设计了竖向V形夹具+自动气动顶紧装置，便于钢筋夹持。
- 4) 针对不同直径钢筋，开展了焊接工艺评定和

批量模拟试验，各项检测指标满足标准要求。研制的整套设备已在部分核电站中实现了应用。

参考文献：

[1] 张晓冬，张国范，刘金平，等. 钢筋预埋件焊接技术综述[J]. 金属加工（热加工），2023（1）：26-31.

[2] 许红梅，别刚刚，许开勋. 焊剂碱度对核电站预埋件埋弧螺柱焊焊接性能的影响[J]. 焊接技术，2017，46（8）：69-74.

[3] 池强，张建勋，付继飞，等. 步进式电弧螺柱焊枪及控制系统的研究[J]. 西安交通大学学报，2004（5）：461-464.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋焊接及验收规程：JGJ 18—2012[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

[5] 别刚刚，王暖暖. 自动埋弧螺柱焊装置研发及应用[J]. 焊接技术，2023，52（11）：92-95.

（收稿日期：20250219）