

集合管拔口焊缝基于管管密封焊机的自动化焊接技术

冯志刚，谢磊，丁小飞

江苏氢枫工业装备有限公司，江苏宜兴

摘要： 我公司生产的镁基固态储氢罐在制造过程中，涉及到大量的换热管和集合管焊接接头，且因产品本身的特性，换热管排列间距较小。对于目前传统的焊接方式，不管是集合管开孔承插焊缝或集合管拔口对接焊缝，都将会产生较大的焊接工作量及焊接成本，且焊接效率低下，另外对焊工技能要求较高，焊接质量稳定性无法保证。为此借助现有的管管密封焊机，设计了专用的连接保护工装，安装于管管密封焊枪上，焊接时通过该工装使焊枪固定于集合管拔口焊缝处实现全位置焊接，方便固定及定位焊缝，且在内部形成密闭式的空间，使焊缝得到更好的氩气保护氛围，获得了高质量的焊接接头。通过实现全位置自动焊技术，保证焊接过程稳定性，提高了焊接质量，且降低了劳动强度及生产成本，缩短生产周期。为集合管拔口焊缝的推广提供了宝贵的经验。

关键词： 镁基固态储氢罐；集合管拔口焊缝；全位置焊接；自动焊技术

Automatic Welding Technology Based on Pipe Sealing Welding Machine for Extraction Weld of Collecting Pipe

Zhigang Feng*, Lei Xie, Xiaofei Ding

Jiangsu Hydrexia Industrial Equipment Co., LTD, Yixing, Jiangsu

Abstract: The manufacturing process of magnesium solid state hydrogen storage tank produced by our company involves a large number of welding joints of heat exchange tubes and collecting tubes, and because of the characteristics of the product itself, the heat exchange tube arrangement spacing is small. For the current traditional welding methods, whether it is the collector hole socket weld or the collector plug butt weld, it will produce a large welding workload and welding cost, and welding efficiency is low, in addition to high requirements for welder skills, welding quality stability cannot be guaranteed. Therefore, with the help of the existing pipe sealing welding machine, a special connection protection tool is designed and installed on the pipe sealing welding gun. During welding, the welding gun is fixed at the welding seam of the collection pipe to achieve all-position welding, which is convenient to fix and position the welding seam, and a closed space is formed inside, so that the welding seam can get a better argon protection atmosphere and obtain a high-quality welding joint. By realizing the all-position automatic welding technology, the welding process stability is guaranteed, the welding quality is improved, the labor intensity and production cost are reduced, and the production cycle is shortened. It provides valuable experience for the popularization of the drawing weld of the collecting pipe.

Keywords: Magnesium solid state hydrogen storage tank; Extraction weld of collecting pipe; All-position welding; Automatic welding technology

作者简介：冯志刚（1993-），男，陕西宝鸡人，工程师。通讯地址：江苏省宜兴市新街街道环科园西沅大道59号。

1 引言

镁基固态储氢罐因其高储氢密度和安全性，成为氢能储存领域的研究热点。其核心结构由多根换热管与集合管通过焊接连接而成，而集合管和换热管连接焊缝的焊接质量直接影响设备的密封性与耐久性。传统焊接工艺（如承插焊或手工对接焊）存在以下问题：

效率低下：换热管排列密集，焊工操作空间受限，耗时耗力；

成本高昂：依赖高技能焊工，人力与时间成本居高不下；

质量波动：人为因素导致焊缝一致性差，易出现气孔、未熔合、未焊透等缺陷。

为解决上述问题，本研究基于管管密封焊机，结合自主研发的连接保护工装，开发了一种全位置自动化焊接技术。通过优化焊接路径与保护气体环境，显著提升了焊接质量与效率，为镁基储氢罐的批量化生产奠定了基础。

1.1 镁基固态储氢罐的技术背景

随着全球能源结构向低碳化转型，氢能因其清洁、高效的特点成为未来能源体系的重要组成部分。镁基固态储氢罐内部充装镁合金，通过化学吸附方式存储氢气，具有储氢密度高（理论值达7.6 wt%）、安全性好（常温常压下稳定）等优势，被视为车载储氢和固定式储氢的理想选择。然而，其复杂的内部结构对制造工艺提出了极高要求，尤其是换热管与集合管之间的连接焊缝需兼具高强度和密封性。

1.2 焊接工艺的技术挑战

镁基储氢罐的集合管和换热管材质均为S31608奥氏体不锈钢，集合管规格为 $\Phi 89\text{mm} \times 3\text{mm}$ ，换热管规格为 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，密集排列的换热管间距仅为100 mm（图10）。传统焊接方法存在以下瓶颈：

空间限制：狭窄的操作空间导致焊枪难以精准定位，手工焊易出现焊缝偏移；

焊工技能：集合管和换热管的壁厚均很薄，手工焊容易出现烧穿问题，且依赖于焊工的操作技能，焊工的稳定性直接影响到焊接质量；

热输入控制：不锈钢导热性差，焊接过程中热输入集中时易产生热变形和残余应力；

气体保护不足：开放式焊接环境中，氩气易被气流干扰，导致焊缝氧化和产生气孔、咬边等缺陷。

1.3 研究目标与创新点

本研究旨在开发一种全自动化的焊接技术，通过以下创新解决上述问题：

自动焊机选择与改造：选用管管密封焊自动焊机代替人工手工焊接；

设计连接保护工装：集成定位、气体保护和散热功能，提升焊接稳定性；

智能化检测：结合数字射线检测（DR）技术与传统X射线检测实现焊缝质量的实时监控。

2 焊接设备与工装设计

2.1 管管密封焊自动焊机

2.1.1 焊接电源

选用XD-20W型号全数字化逆变焊接电源，其主要参数如下：

输入电压：AC220V $\pm$ 10%；

空载电压：65V；

输入电流：5-200A；

电源频率：50Hz；

设备功率：4.5KVA；

冷却方式：水冷；

暂载率：60%（200A），100%（150A）。

2.1.2 焊枪

选用XD-80型号封闭式焊枪，可实现360°管道全位置连续焊接，焊接时焊枪固定不动，封闭式枪体内安装有钨针的导轨自动旋转实现焊接，焊枪主要参数如下：

焊接方式：GTAW自熔；

钨针类型及尺寸：WC20， $\Phi 2.4\text{mm}$

焊接管径范围： $\Phi 10\text{mm} \sim \Phi 76\text{mm}$ ；

焊接最大壁厚：3mm；

焊枪旋转速度：0.2~0.5rpm；

焊枪冷却方式：焊枪内壁水冷循环；

2.1.3 焊接控制系统

选用德国西门子PLC控制平台，触摸屏+数字

按钮菜单式人机界面，其主要控制功能有：焊接电流显示及控制、钨极旋转速度控制和显示、焊接参数编程及储存、焊接安全保护控制等[1,2]。

2.2 连接保护工装

工装结构如图1所示，设计该连接保护工装的核心技术为：由两个half式的壳体组成该工装，该组合工装一侧端面为平面，且加工有螺纹孔，和改造后的XD-80封闭式焊枪连接；另一侧为贴合集合管曲面的相贯线形状的结构，该曲面结构和集合管严密贴合。通过该工装连接固定焊枪并定位焊缝，且在内部形成密闭式的空间，使焊缝得到良好的氩气保护氛围。

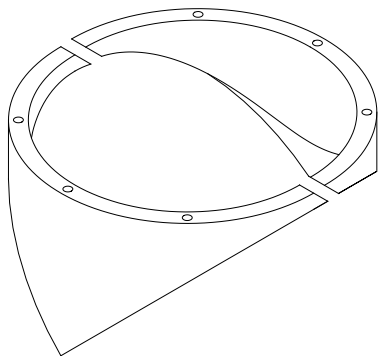


图1 连接保护工装结构

3 自动化焊接技术开发与验证

3.1 自动焊焊接接头质量

3.1.1 选材及坡口设计

选用 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的S31608不锈钢管进行管对接焊接，不锈钢管的化学成分和力学性能如表1、表2所示。对接焊缝焊接接头坡口设计为I型坡口（如图2所示）；钢管对接接头组对前，检查坡口端面及内外表面无水渍、油污、锈蚀等杂质，组对间隙控制在0.5mm以内。

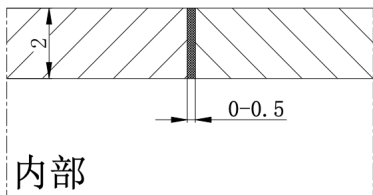


图2 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 不锈钢管对接接头

3.1.2 直管对接焊接接头焊接工艺

使用上述XD-20W/XD-80管管密封焊自动焊机进行焊接，通过调整焊接电流、运行速度、保护

气体等参数进行试焊对比，获得 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的S31608不锈钢管对接焊缝的最终优选焊接参数，具体详见表3。

3.1.3 直管对接焊接接头检查

外观检查：焊缝宽度均匀，表面光滑，无明显凹凸不平，无咬边、气孔等缺陷，焊缝表面银白色，无氧化变色或局部发黑现象，成型美观（如图3所示）。

无损检测：焊接接头按照NB/T47013.2-2015 100% RT-II（AB）检测合格。

力学性能检测：焊接接头进行拉伸试验，拉伸试样如图4所示，其力学性能良好，结果如表4所示。



图3 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 不锈钢管对接焊缝外观

图4

$\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 不锈钢管对接焊缝拉伸试样

3.2 自动化焊接实施方案

3.2.1 焊接接头设计

将集合管和换热管的连接焊缝设计为集合管拔口，通过拔口设备及工装控制，保证 $\Phi 89\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的集合管拔口尺寸为 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，该拔口和 $\Phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的换热管焊对接焊缝，焊接接头结构如图5所示。通过设计的连接保护工装配合改造管管密封焊自动焊枪，实现自动化焊接。

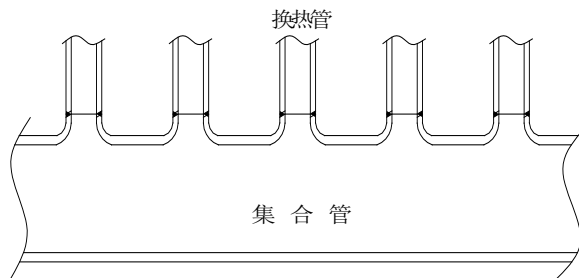


图5 集合管和换热管焊接接头结构

3.2.2 试件焊接及焊缝质量检查

模拟产品焊接接头，制备符合上述焊接接头设

表1 S31608不锈钢管化学成分								
材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
S31608	0.08	1.00	2.00	0.035	0.015	16.00~18.00	10.00~14.00	2.00~3.00

表2 S31608不锈钢管力学性能			
材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/A%
S31608	520	205	35

表3 焊接参数					
焊接电流 (A)	基值电流 (A)	电弧电压 (V)	保护气体	保护气体流量 (L/min)	焊接速度 (cm/min)
85A	28A	10	Ar (≥99.99%)	13	9

表4 S31608不锈钢直管对接接头力学性能			
材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/A%
S31608	609.4	247.8	49.2

计的集合管拔口对接焊缝试件，通过设计的连接保护工装配合改造的管管密封焊自动焊枪，进行自动焊焊接，焊缝质量检查结果如下：

外观检查：检查焊缝内外表面，焊缝宽度均匀，表面光滑，无明显凹凸不平，无咬边、气孔等缺陷，焊缝表面银白色，无氧化变色或局部发黑现象（如图6、7所示）。

射线检查：焊接接头按照NB/T47013.2-2015 100% RT- II （AB）检测合格（如图8所示）。

熔合线检查：焊接接头线切割制备样品，观察焊缝与母材之间的熔合线区域（如图9所示）较为均匀，表明焊缝与母材之间的过渡区域组织稳定，化学成分及应力分布均匀，减少局部应力集中，避免脆性断裂，提高焊接接头的强度和韧性。

4 自动化焊接技术应用与优势

4.1 自动化焊接技术应用

使用上述改造的管管密封焊自动焊枪配套连接保护工装，对镁基固态储氢罐的集合管拔口和换热管对接焊缝进行焊接（如图10、11所示），焊接参数按照上述表3要求。

4.2 自动化焊接技术优势

高质量：自动焊设备通过精确的编程和控制系统，能够精准控制焊接参数，形成稳定的燃烧电弧，热量集中，形成均匀的焊缝熔合区，焊缝化学成分和应力分布均匀，焊件不易变形；连接保护工装固定焊枪并精准定位焊缝，保证焊缝全焊透；连接保护工装与焊件之间形成封闭空间，使焊接处于

良好的氩气保护氛围内，有效隔绝空气对电弧和熔池产生的不良影响，获得成型美观，无气孔、咬边、氧化发黑的高质量焊接接头。

高效率：自动焊设备能够连续焊接，不受疲劳和时间限制，与手工焊接相比，大大提高了生产效率；自动化焊接技术通过程序控制，可获得一致性较高的高质量焊缝，避免了焊工技能不稳定性产生的缺陷，缺陷返修浪费时间。

低成本：自动焊减少了对手工焊工的依赖，降低了人工成本；自动焊焊接获得高质量的焊缝，降低了返修成本；自动焊可大大提升生产效率，缩短工期，降低了项目成本。

高安全：自动焊改善劳动条件，减少了焊工直接接触高温、电弧、有害气体的机会，降低了对工人身体的伤害；自动焊降低劳动强度，使工人能够更加轻松、安全的工作[3-5]。

5 结语

本文针对镁基固态储氢罐集合管和换热管的焊接开展了自动化焊接技术的研究，通过实现全位置自动焊，显著提高了焊接质量和生产效率，降低了生产成本和安全隐患，为镁基固态储氢罐的批量化生产奠定了基础。同时，该技术可适用于多种材料与复杂结构的焊接，为其实现自动化焊接提供了有效的方法和经验，具有重要的意义。

参考文献

[1] 焊接冶金学：基本原理/杜则裕主编[M]. 北京：机械工业出版社，2018. 6.



图6 集合管拔口焊缝外部成型良好

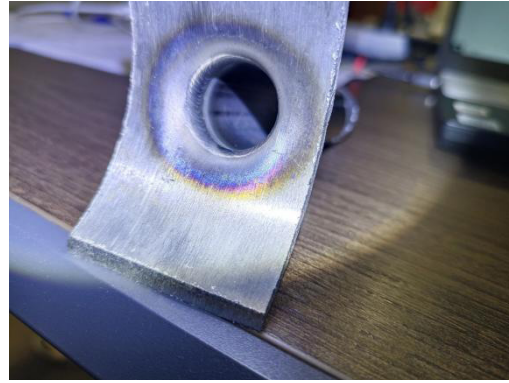


图7 集合管拔口焊缝内部成型良好

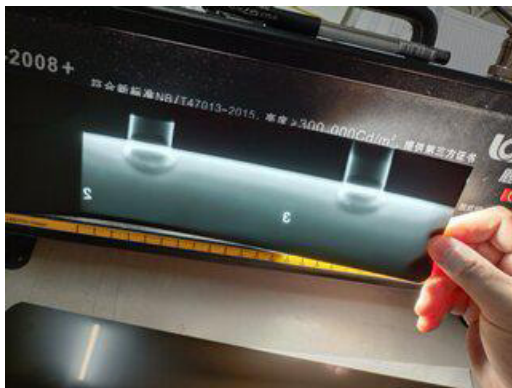


图8 集合管拔口焊缝射线检测合格



图9 集合管拔口焊缝熔合线检查



图10 镁基固态储氢罐集合管拔口和换热管对接焊缝



图11 使用管管密封焊机配套连接保护工装进行焊接

- [2] 现代焊接工程手册. 管道卷/李颂宏、李建军主编主编[M]. 化学工业出版社, 2016. 1.
- [3] 刘鹏, 魏伟. 自动化焊接技术在机械制造中运用分析主编[J]. 中国金属通报. 2024 (10).

- [4] 邹建新, 张嘉祺, 赵颖燕, 林羲, 丁文江. 高容量镁基储氢合金材料研究与应用进展[J]. 金属学报. 2025, 61 (03).
- [5] 贾海平, 王雅仪, 葛丽莎, 何金新, 吴涛, 苗健. 储氢装备关键技术研究进展[J]. 西安工业大学学报. 2024, 44 (04).

Copyright © 2025 by author(s) and Global Science Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access