

在役核电站蒸汽发生器返修堵管 自动焊工艺研究

周政¹, 方江², 赵亮², 张晓冬³, 马威¹, 张国范³, 王登星³

1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司 湖北武汉 430000

2. 中核核电运行管理有限公司 浙江海盐 314300

3. 核工业工程研究设计有限公司 北京 101300

摘要: 为解决传热管因发生破损而导致放射性介质从一回路泄漏的问题, 提出了一种蒸汽发生器传热管自动焊接堵管的工艺, 采用堵头“自熔环”结构及分段式自熔焊接方法, 通过对传热管堵管返修焊接参数的调整及热输入控制, 得到了一套最优的堵管返修自动焊工艺参数, 该套工艺下的堵管焊缝具有良好的根部熔合情况、表面成形效果及力学性能。

关键词: 在役核电; 返修; 蒸汽发生器; 传热管; 堵头; 自动焊工艺

Study on automatic welding process of repair the blocking pipe for steam generator in in-service nuclear power plant

ZHOU Zheng¹, FANG Jiang², ZHAO Liang², ZHANG Xiaodong³, MA Wei¹,

ZHANG Guofan³, WANG Dengxing³

1. China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China

2. CNNC Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Haiyan 430000, Zhejiang, China

3. Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China

Abstract: In order to prevent leakage of radioactive material from the primary circuit due to the damage of heat transfer tubes, an automatic welding technology for repairing these tubes in steam generator is proposed in this paper. Using the “self-melting ring” structure and the segmented welding approach, a set of automatic welding process parameters are obtained by optimizing the welding parameters and the heat input. Through this process, the welds of the tubes have good root fusion, surface forming and mechanical properties.

Keywords: nuclear power in service; steam generator; heat transfer tube; repairing; plugging; automatic welding process

1 序言

为了应对全球气候变化带来的严峻挑战, 能源低碳化转型已经是世界各国共识及中长期目标^[1],

中国也在2020年提出了“双碳目标”, 其中煤炭作为我国能源体系结构中的主要基础性能源, 已经开始在以煤、油、气、电、核, 以及新能源和可再生

能源的多样化能源体系中消费比重逐年下降，能源的利用向着清洁化、低碳化的方向发展。而核能作为清洁能源与其他能源相比，具备能量密度高、单机功率大、换料周期长，以及可长期稳定运行等突出优势，在未来能源转型中核能高速发展将是中国乃至全球应对能源战略及气候安全最重要的战略选择。

蒸汽发生器是核一级设备，其功能是利用反应堆一回路的的热量使二次侧的水沸腾，通过产生蒸汽来驱动汽轮机产生电力^[2, 3]。其安全功能在于作为放射性一次侧与非放射性二次侧之间的屏障。其中，蒸汽发生器传热管是一回路压力边界的重要组成部分，但在核电运行过程中，由于传热管长期受高温、高压、高辐射剂量介质冲刷，会形成裂纹、腐蚀或磨损等缺陷，严重时会导致放射性介质从一回路的泄漏，形成安全事故，因此传热管的堵管修复通常被列为核电厂每次换料大修关键路径上的主要工作之一。

国外发达国家在传热管堵管领域已经研制了多种形式的堵头结构，形成了比较成熟的工艺^[4]。我国由于核电站发展较晚，因此核电站蒸发器的大面积检修工作还未开始，运行的核电站中也只有为数不多的几个在国外技术支持下的堵管实例。堵管维修的常用方法为机械堵管及焊接堵管两种。前者主要依靠残余应力将堵头和传热管紧密结合，一旦应力松弛或消失会导致堵管失效，存在二次泄漏风险，更适合预防性堵管。匡良明^[5]认为，最佳的胀管情况是当管板的塑性区达到管桥中间时，既能获得尽可能大的胀管压力，又不会与邻近接头胀管的塑性区域发生干涉，并且还有一定增压余量供个别

不合格接头进行补胀；焊接堵管为利用焊接方法将堵头材料与需要修复的本体母材熔合达到一定的强度和密封性能^[6]，作为永久性堵管，其在核电维修领域内将具有更高的研究价值。

目前，国内在重水堆SG传热管堵管返修均采用手工焊接返修，SG服役环境为辐照环境，多数情况下人员不可达或可持续工作时间较短。而对于一些服役年限较长的电站而言，环境中的辐照剂量更高，采用人员手工焊接堵管风险更大。国外西屋公司已开展了焊接堵管设备研究并将其搭载在管孔爬行机器人上，实现了自动焊接堵管维修，缩短了维修时间，提高了维修效率。国内针对此技术的研究较少，因此有必要对在役核电站SG堵管自动焊技术展开研究。

2 自动焊工艺试验准备

2.1 试验材料

母材管板堆焊层材料为Alloy600合金，具有稳定的奥氏体组织，无铁磁性，同时具有良好的耐蚀性和高温强度、较好的抗氧化性，以及良好的可加工性和焊接性。奥氏体镍铬不锈钢导热系数小、线膨胀系数大，具有较高的热裂纹敏感性，在焊缝及靠近焊缝区都有产生热裂纹的可能。

表1 Alloy600 合金的化学成分（质量分数）（%）

Ni	Cu	Fe	Mn	C	Si	S	Cr
≥67	≤0.5	6~10	≤1.0	≤0.15	≤0.5	≤0.015	14~17

传热管为Incoloy800合金无缝钢管，规格为φ 15mm×1.5mm。堵头材质为Incoloy800合金，由棒材经数控加工生产制造，具体化学成分见表2。

表2 Incoloy800合金化学成分（质量分数）（%）

Ni	Cu	Fe	Mn	C	Si	S	Cr	Al	Ti
30.0~35.0	≤0.75	≥39.5	≤1.5	≤0.10	≤1.0	≤0.015	19.0~22.0	0.15~0.60	0.15~0.60

2.2 试验设备

工艺试验选用华恒TP系列管板自动焊设备，主要由焊接电源（含水冷系统）、管板自动焊机头等几部分组成，焊接电源为i-ARC 500N，管板自动焊设备分别如图1、图2所示。

2.3 传热管堵头设计

在役传热管与堵头之间为角焊缝结构，若采

用自熔焊方式，则因焊缝填充量少而导致焊接质量无法满足要求；若采用填丝焊接，则一方面会增大设备尺寸，增大设计、安装等难度；另一方面，堵管焊接位置为仰焊，采用填丝焊接会影响熔池稳定性，进而影响焊接质量。因此，本项目设计一种带熔化环的堵头结构，以熔化环作为焊接填充材料，既可使用自熔焊设备实施，又能保证较优的焊接质



图1 焊接机头



图2 焊接电源

量。

堵头熔化环尺寸为一个宽1.5mm、高1.5mm的凸台，距堵头端部2.3mm，堵头胀接定位后，实施焊接。堵头的壁厚为1mm，总长度为50mm。在堵头一侧加工一个胀管区域，与蒸汽发生器的传热管第一次液压胀管区配合，其长度约为15mm，为保证堵头可以无障碍地进入传热管，考虑偏差后的堵头最大外径为13.3mm。另外，在堵头端部加工30°的倒角，方便堵头初始进入传热管，堵头的具体尺寸见表3。设计加工堵头如图3所示。

表3 堵头的具体尺寸 (mm)

熔化环宽	1.5
熔化环高	1.5
堵头胀壁厚	1
堵头胀接区长度	15
堵头胀管区外径	13.3
堵头非胀管区外径	13.3
堵头总长度	50

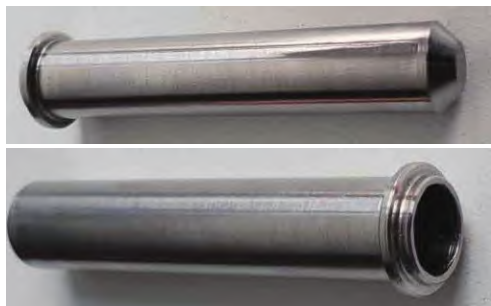


图3 设计加工堵头实物

3 工艺开发过程

3.1 工艺试验介绍

本工艺试验通过制作蒸汽发生器管板模拟体，

并在管板上通过加丝焊接方式形成管子管板原始密封焊缝，并在密封焊缝上完成坡口加工及堵管返修，原始焊缝为Incoloy800无缝钢管采用镍基合金焊丝形成的角焊缝，凸出管板平面3.8~5.3mm，堵头焊缝为整体凸出管板平面5.2mm的密封角焊缝，通过机械加工切削掉部分管口并对其进行坡口加工并打磨，然后进行堵头组对定位焊及焊接，采用预置自熔环形式，以自熔环作为填充金属，采用TIG自熔自动焊技术实现仰角位置角焊缝焊接。堵头装配如图4所示。组对定位效果及仰焊位置焊接可行性验证如图5所示。

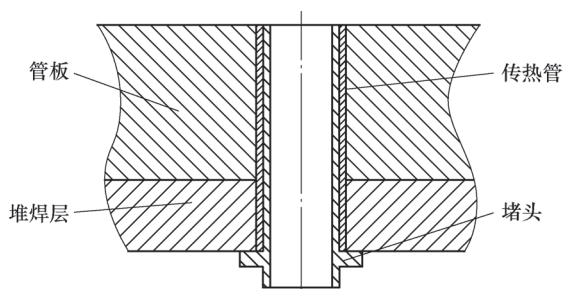


图4 堵头装配示意



a) 组对定位效果 b) 仰焊位置焊接可行性验证

图5 组对定位效果及仰焊位置焊接可行性验证

3.2 工艺范围确认

在初步进行前期工艺摸索时，焊缝成形均匀、致密、过渡光滑，且焊缝表面无气孔、焊瘤、咬边及裂纹等缺陷，管壁无烧伤、烧穿、气孔及裂纹等现象，证明了带自熔环的TIG自熔焊的焊接可行性。前期摸索的焊接参数见表4，获得的焊缝外观形貌如图6所示。对弧长（即焊接半径）进行了相应调整，获得了焊接效果最佳的焊接半径。为增强焊缝根部熔透效果，增加焊接行进角度，并以100~200mm/min线速度进行焊接试验，焊接保护气为氩氮混合气。初步试验的主要目的为缩小工艺试验模

索范围, 针对工艺开发试件, 分别进行了焊接电流为90A、100A、110A的3组试验。不同焊接电流下获得的焊缝宏观金相如图7所示。50倍显微镜下焊缝根部宏观金相如图8所示。

表4 前期摸索的焊接参数

序号	峰值电流 /A	基值电流 /A	焊接速度 / (mm/min)	行走角度 / (°)
1	90	35	150	15
2	100	35	150	15
3	110	35	150	15

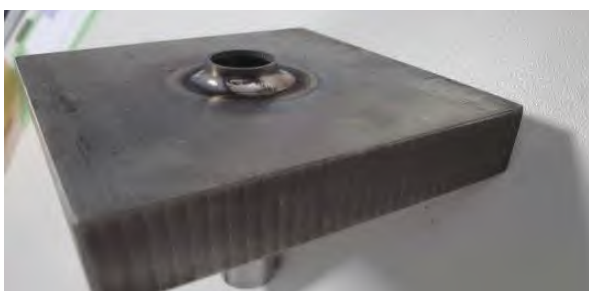
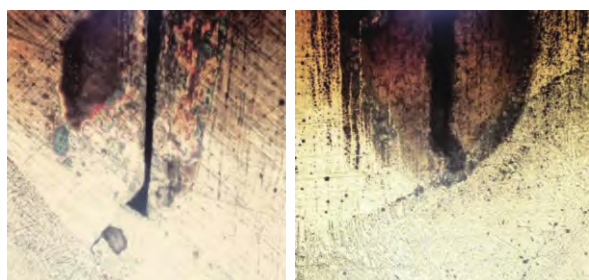


图6 前期焊接工艺获得的焊缝外观形貌



a) 90A b) 100A

图7 不同焊接电流下的焊缝宏观金相



a) 90A (50×) b) 100A (50×)

图8 焊缝根部宏观金相

由图8可知,当焊接电流为90~110A时,根部熔合效果均符合要求(根部未熔合 $<0.5\text{mm}$)且可明显地看出,电流越大,根部熔合效果越好,但当焊接电流 $\geq 110\text{A}$ 时,管口会因焊接过程中的热输入过高而导致管口烧穿。因此,后续需进一步探索的焊接工艺仍采用焊接电流100~110A。

3.3 焊接工艺开发

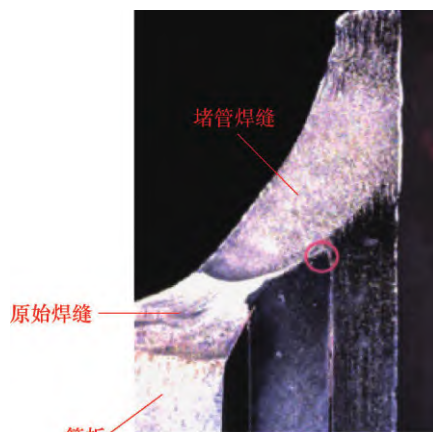
在确认工艺范围之后,通过正交试验法进一步对关键参数进行细化开发,见表5。对焊接电流及焊接速度设计二因素三水平的正交试验,根据前期初步摸索的焊接参数将焊接电流设定3个水平值为103A、105A、107A,焊接速度设定3个水平值为140mm/min、150mm/min、160mm/min。焊接试验利用脉冲TIG自动焊接,焊接结束后对试件进行焊缝表面形貌及宏观金相观察,如图9~图15所示。初

表5 正交试验

组别	焊接电流 /A	焊接速度 / (mm/min)	焊缝形貌
1	103	150	表面成形良好，根部熔合不良
2	107	140	起弧烧穿
3	105	150	表面成形良好，根部熔合良好
4	105	160	表面成形良好，根部熔合一般
5	103	160	表面成形良好，根部熔合不良
6	105	140	焊缝尾部烧穿
7	103	140	焊缝尾部烧穿
8	107	150	起弧烧穿
9	107	160	起弧烧穿



a) 宏观金相

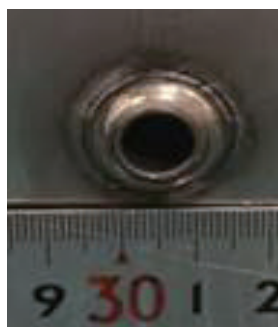


b) 焊缝成形

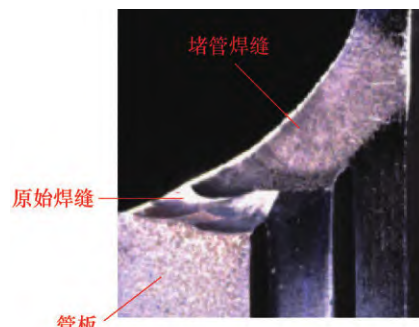
图9 第1组宏观金相及焊缝成形



图10 第2组焊缝成形



a) 宏观金相



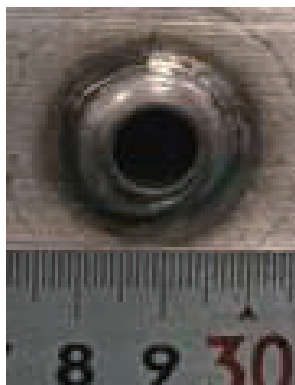
堵管焊缝

原始焊缝

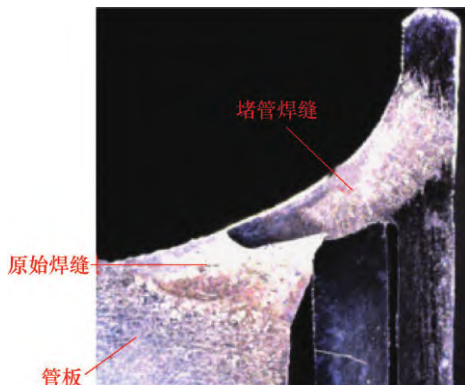
管板

b) 焊缝成形

图11 第3组宏观金相及焊缝成形



a) 宏观金相



堵管焊缝

原始焊缝

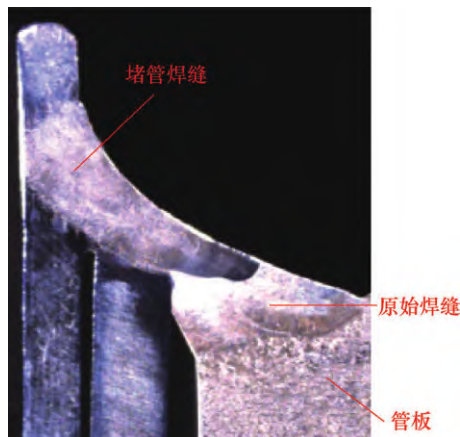
管板

b) 焊缝成形

图12 第4组宏观金相及焊缝成形



a) 宏观金相



堵管焊缝

原始焊缝

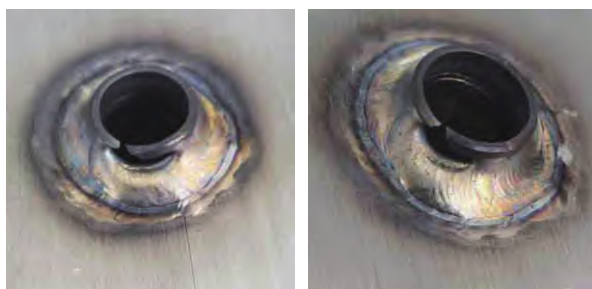
管板

b) 焊缝成形

图13 第5组宏观金相及焊缝成形

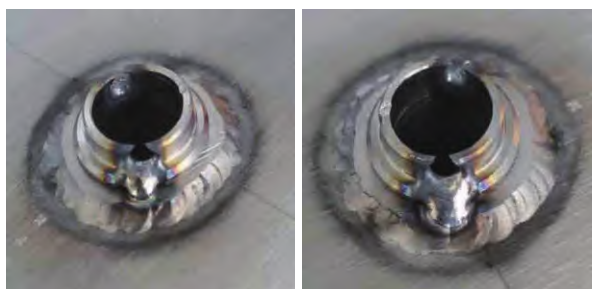
步归纳正交试验数据可以得出，当采用107A的焊接电流时，3个焊接试样全部起弧烧穿，采用较大的电流时，起弧管壁烧穿；当采用140mm/min的焊

接速度时，3个焊接试样在起弧或尾部烧穿；当采用较小焊接速度时，焊接热量累积在焊道尾部烧穿。



a) 第6组 b) 第7组

图14 第6、7组焊缝成形



a) 第8组 b) 第9组

图15 第8、9组焊缝成形



图16 不同焊接电流下的焊缝成形

选择适中焊接电流105A，钨极与自熔环距离0.5mm，然后改变焊接速度为200mm/min、250mm/min、300mm/min，探究不同焊接速度对焊缝成形和熔深的影响。通过宏观金相结果发现，焊接速度越快，焊缝熔深越小，但3个参数的熔深均满足要求。

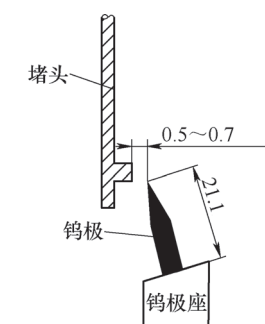
最后，对钨极与自熔环距离范围进行确定。通过改变钨极与自熔环距离，得到钨极与堵头间距可调节范围，降低现场施工时对钨极安装精度的要求。当钨极与堵头距离为0.4mm时，堵头管口有少量熔塌现象产生，因此考虑降低焊接电流或增加焊接速度，可以避免管口熔塌产生。而当钨极与堵头距离为0.8mm时，焊缝一半未熔合，因为距离太远，导致电弧不集中，所以自熔环无法和传热管管板形成有效连接。最终固化钨极尖与堵头自熔环台阶面相对位置，钨极尖与堵头自熔环台阶面下端齐平，即保证钨极座根部与钨极尖距离为21.1mm，而堵头自熔环与钨极水平距离为0.5~0.7mm（见图

4 焊接工艺优化

结合上述正交试验组的焊接效果，在对引起管口塌陷问题进行整理和总结后，确定引起堵头管口烧塌的主要原因是钨极与管口间距较大。随后对钨极距离进行了调整，最大程度地降低因钨极与堵头距离而引起的焊缝成形差异，并将焊接速度及焊接电流做了进一步调整。

为更好覆盖因现场实际焊接环境因素而造成的误差，对3个关键变量参数范围进一步拓宽，结合焊后试件的宏观金相照片，开发出一套适用性强、稳定性高的焊接参数数据库。采用控制变量法进行试验，首先对焊接电流范围进行确定，分别采用焊接电流为90A、100A、110A和120A进行试验，而焊接速度、钨极与自熔环距离均保持不变，随着焊接电流增大，焊缝熔深越大。不同焊接电流下的焊缝成形如图16所示。

17)。



a) 钨极间距



b) 堵头

图17 堵头与钨极间距示意

5 工艺试验结果

结合上述工艺开发优化试验，采用表5中第3组焊接参数连续进行5组焊接堵管试验，验证工艺稳定性，经过一系列的无损检测及理化试验，结果均满足要求，见表6。

表6 无损检测及理化试验情况统计

序号	检测方法	结果	备注
1	渗透检测	合格	要求无表面缺陷
2	氦检漏 / (Pam ³ /s)	0.01 × 10 ⁻¹⁰	要求 ≤ 3 × 10 ⁻⁷
3	宏观金相	合格	—
4	残余应力/MPa (原始焊缝)	横向最小: 353.20 纵向最小: 337.77	—
5	残余应力/MPa (试件)	横向最大: 267.36 纵向最大: 324.81	均小于原始焊缝最小残余应力
6	推脱力/kN (3组)	最高: 51.81 最低: 26.37	要求 ≥ 4

6 结束语

对焊缝外观成形、宏观金相、焊缝熔深及焊脚尺寸进行综合分析，可得出以下结论。

1) 焊缝宽度（即焊脚尺寸）受焊接电流及焊接速度影响。在管板角焊缝焊接过程中，钨极与管壁夹角一定的情况下，电流增大，焊脚尺寸相应增大，同时焊接速度越快，焊脚尺寸越小。

2) 焊缝熔深受焊接电流及焊接速度影响。焊接电流越大，焊缝熔深越大，同时根部熔合情况越好；焊接速度越慢，焊缝熔深越大，同时根部熔合

情况越好。但当焊接电流过大时，一般在起弧预熔阶段就会导致管壁烧穿；当焊接电流一定、焊接速度过慢时，因焊接过程热输入累积过高而导致焊缝尾端（焊接电流略大时为中部）管壁烧穿。因此，焊接电流过大或焊接速度过慢均无法得到合格的焊缝成形效果。

3) 在较为狭窄的工艺窗口中，对焊接电流及焊接速度做进一步细化匹配，可得到更优的焊缝根部熔合及焊缝质量。

参考文献：

[1] 《防灾博览》编辑部. 实现能源转型 共创零碳未来[J]. 防灾博览, 2022 (2) : 2-5.

[2] 刘福广, 杨二娟, 李勇, 等. 核电蒸汽发生器堵管技术研究进展及其在高温气冷堆的应用前景[J]. 热力发电, 2022, 51 (6) : 74-81.

[3] 沈天阔. 核电站蒸汽发生器管板镍基合金堆焊质量的控制[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (7) : 29-32.

[4] 程檀. 蒸汽发生器传热管机械堵头的安装及拆除[J]. 设备管理与维修, 2020 (21) : 124-126.

[5] 匡良明. 静压胀管接头性能分析[J]. 石油化工设备, 1999 (2) : 33-37.

[6] 尹名. 浅论核电厂蒸汽发生器堵管处理及其发展方向[J]. 科技创新导报, 2014, 11 (14) : 52-23, 55.

MW 20241215

《金属加工（热加工）》2025年第4期广告目次

单位名称	查询编号	位置	单位名称	查询编号	位置
易孚迪感应设备（上海）有限公司	1492	封面	第 23 届北京国际热处理展览会	8149	前彩 2
伊达新技术电源（昆山）有限公司	1925	封二	北京中孚悦达真空科技有限公司	5378	前彩 3
盐城高周波热炼有限公司	5326	封三	中国国际金属成形展览会	5699	前彩 4
北京金威焊材有限公司	1161	封底	第二十八届北京·埃森焊接与切割展览会	1380	V
恒进感应科技（十堰）股份有限公司	1468	前彩 1			