

STEP 系列压水堆燃料组件上管座 TIG 焊接工艺研究

付思特¹, 余璇², 盛国福¹, 余国严¹, 王惠生¹, 钟建伟¹, 蔡贵川¹

(1. 中广核铀业发展有限公司, 广东 阳江 529941; 2. 广东省环境科学研究院环境风险与损害鉴定评估研究所, 广东 广州 510045)

摘 要: STEP 系列压水堆燃料组件是我国自主设计研发, 拥有完全自主知识产权的燃料组件, 包括上管座、骨架、燃料棒等部分。上管座焊接是压水堆燃料组件制造的核心工艺, 是决定上管座力学性能、外形尺寸合格性的核心工序。对某型号燃料组件上管座开展焊接工艺试验, 上管座部件的焊接接头为无坡口对接形式, 采用先手工组对点焊, 后匀速自动焊接的焊接工序。对上管座试样进行外观、金相、晶间腐蚀、渗透等检验, 探索出满足技术条件要求的焊接工艺参数。针对熔深、热变形量等工艺难点进行分析, 提出工艺优化改进的思路。

关键词: 燃料组件; 上管座; 焊接工艺

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20201169

中图分类号: TG444⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)05-0119-04

TIG Welding Process of Top Nozzle of STEP Series PWR Fuel Assembly

FU Site¹, YU Xuan², SHENG Guofu¹, YU Guoyan¹, WANG Huisheng¹,
ZHONG Jianwei¹, CAI Guichuan¹

(1. CGN Uranium Resource Company LTD, Yangjiang 529941, China; 2. Institute of Environmental Risk and Damage Assessment, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: STEP series PWR fuel assembly is independently designed and developed by China, with full independent intellectual property rights. The STEP series fuel assembly consists of top nozzle, skeleton and fuel rods. Top nozzle welding is the key manufacturing process for PWR fuel assembly, which decides the mechanical properties and physical dimension of the top nozzle. Welding process test for the top nozzle of a fuel assembly was carried out. The welding joint of the top nozzle part was the form of no groove butt joint, the welding process with first manual spot welding then automatic welding with constant velocity was adopted. The appearance, metallography, intergranular corrosion and penetration of the top nozzle samples were tested, and the welding process parameters which meet the technical requirements were explored. The process difficulties such as melting depth and thermal deformation were analyzed, and the idea of process optimization and improvement was put forward.

Key words: fuel assembly; top nozzle; welding process

根据公开的学术报道, 世界主要核燃料组件制造厂的上管座焊接工艺主要包括真空电子束焊接(EBW)及惰性气体保护焊接(TIG)两类^[1]。真空电子束焊接为较晚出现的新工艺, 是在真空环境中使用经过汇聚的高速电子流冲击焊缝处, 从而使焊缝母材熔合。电子束作为热源, 具有焊接热应力变形较小、能量密度高等优点, 但易出现焊缝熔深重复稳定

性差、焊缝成型缺陷等问题, 目前国内某制造厂采用电子束焊接工艺生产 300 MW 燃料组件上管座, 供应秦山一期等压水堆核电站^[2-3]。惰性气体保护焊接工艺本身较为成熟, 并具有熔深重复稳定性好、焊缝成型性好、不易出现未熔合或未焊透等优点。

上管座部件结构见图 1, 其制造过程包括两块板(框板、连接板)的铣削成形、手工组对点焊、自动 TIG 焊接、消除应力热处理、精加工等工序。上管座焊接是决定上管座机械性能、外形尺寸合格性的核心工艺, 操作步骤按照先后顺序依次为: 初始空腔高度测量→连接板及框板在组对点焊夹具上的固定→表

收稿日期: 2020-05-20

作者简介: 付思特(1993-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 主要研究方向: 核燃料组件零部件焊接工艺; 电话: 15692079626;
E-mail: fusite@cg npc.com.cn

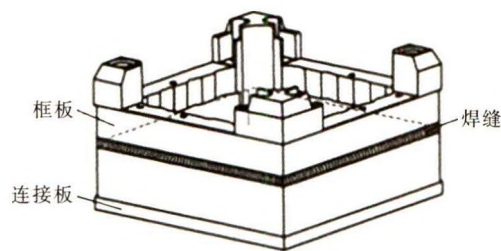


图 1 上管座结构
Fig.1 Structure of top nozzle

面清洗→手工组对点焊→空腔高度测量→表面清洗
→自动 TIG 焊接→空腔高度测量。

在上管座焊接过程中，存在难以确定最适宜焊接工艺参数的问题，主要工艺难点在于：过小的焊接能量会导致熔深不足，过大的焊接能量会导致热变形量过大，二者均会导致产品的不合格^[4]。

本研究选择采用惰性气体保护焊接，开展 STEP 系列压水堆燃料组件上管座焊接工艺试验，并对试样进行外观及理化检验。通过对试验结果进行分析总结，为 STEP 系列燃料组件制造工艺的定型和优化提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

上管座焊接试样为实际工件 1:1 试样，材料为国产核级 304L 不锈钢。

1.2 试验过程及数据

1.2.1 空腔高度测量

框板按照装配位置放置在连接板上方，框板上表面与连接板流水孔面及四壁即构成上管座内部空腔。通过测量焊接前后的空腔高度变化，可以得到上

管座在垂直方向上的热变形量。热变形量过大易导致精加工余量不足或平面度超差，从而导致产品报废。因此，通常要求手工点焊及自动焊接的总变形量不得超过±0.5 mm。空腔测量的工具为经过校准的方形不锈钢量块，测量误差小于 0.01 mm，且在测量者接触量块使其受热时的变形量可忽略不计。在四壁的两端及中央、四个角部各取一个测量点，共计 16 个点（见图 2），作为表征产品热变形量的参考点。

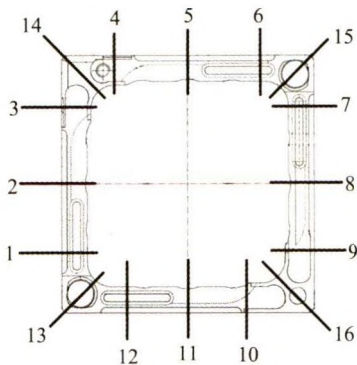


图 2 空腔高度测量位置示意图
Fig.2 Inner space height measurement positions

1.2.2 手工组对点焊

将框板和连接板在组对点焊夹具上固定。工件为无坡口对接。焊工手持焊枪在框板和连接板 4 个侧面的连接处各选取 2 个边角及 1 个中间处进行点焊，共 12 个焊点。点焊位置顺序为依照对边对角线原则，以图 2 为例，如先点焊位置 10，则下一处点焊位置 4，之后可点焊位置 1 或位置 7……，采用这一方法的目的在于最大限度平衡热应力，减小工件单向变形。由于点焊的主要目的为固定连接，对熔深无要求，因此在合理的范围内使焊接电流尽量小，有利于减小工件热变形量。手工点焊参数见表 1。

表 1 手工点焊参数 Tab.1 Manual spot welding parameters

保护气体	气体流量 /(L·min ⁻¹)	电极直径 /mm	喷嘴直径 /mm	焊接电流 /A	电源极性	焊接位置	引弧方式	点焊时间 /s	电流缩减时间 /s
氩气	8	2.4	8	60	直流正接	立焊	高频	1	0.2

1.2.3 自动 TIG 焊接

将点焊后的上管座部件放置在自动焊接机器人的变位机工作台上，通过执行预先编辑好的焊接程序和焊接参数实现对上管座一周焊缝的全自动焊接。

程序编辑的过程为：通过示教器上的三维平动及三维转动共六个方向的控制按钮控制焊枪移动，并编程记录各步的焊枪移动信息（包括平动及转动）。控制焊枪移至工件一端起弧位置处的正上方，编辑起弧指令，控制焊枪沿焊缝方向移动至另一端

收弧位置处，编辑收弧指令。焊枪尖端距离工件表面的距离控制在 0.5 mm 左右。完成工件一个面的焊接程序编辑后，通过控制变位机翻转工件，编程记录翻转命令。重复上述对一个面的焊接程序编辑过程，直至完成全部四个面的编辑后，将焊枪复位至原点，即结束程序。

完成程序编辑后，需使用手动模式，操控机器人逐行慢速执行程序，观察焊枪移动轨迹是否符合预设，当焊枪尖端距离工件过近以致存在撞枪风险或

距离过远以致存在无法起弧风险时, 返回上一步重新编辑该程序, 如此直至对程序逐行检验完毕。

全部确认无误后, 进行匀速自动 TIG 焊接, 焊接顺序同样遵照对边原则, 以最大限度平衡热应力, 见图 3。焊接完成后, 使用钢刷刷去焊缝旁氧化层, 使焊缝呈现金属色泽。待冷却后取下工件, 进行空腔高度测量及表面清洗, 即完成了上管座 TIG 焊接的全部工序。

为确定合适的自动焊接参数, 在保持其余参数不变的条件下, 在一定范围内调节焊接峰值电流大小(基值电流、起弧电流、收弧电流, 与峰值电流均呈比例关系, 设定比例后, 调节峰值电流, 各参数随之相应变化), 对每组参数进行多次焊接试验, 并选取

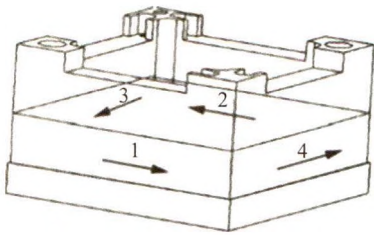


图 3 自动 TIG 焊接方向及顺序
Fig.3 Diagram of automatic TIG welding direction and sequence

有代表性的 4 组参数, 见表 2。

1.3 焊接后检验结果

1.3.1 外观

对上述焊接试样焊缝放大 3 倍进行外观检验,

表 2 自动 TIG 焊接参数 Tab.2 Automatic TIG welding parameters

试样编号	峰值电流 /A	基值电流 /A	钨极距工件距离 /mm	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	氩气流量 /(L·min ⁻¹)	起弧电流 /A	起弧时间 /s	收弧电流 /A	收弧时间 /s
1	190	47.5	0.5	0.12	10	57	0.03	47.5	0.05
2	200	50	0.5	0.12	10	60	0.03	50	0.05
3	210	52.5	0.5	0.12	10	63	0.03	52.5	0.05
4	220	55	0.5	0.12	10	66	0.03	55	0.05

焊缝均无裂纹、未熔合或未焊透。焊缝外观照片如图 4 所示。

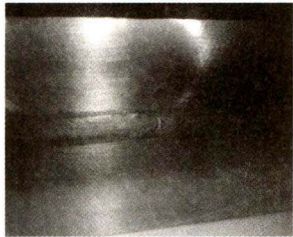


图 4 焊缝外观照片
Fig.4 Weld appearance photo

1.3.2 热变形量

经检查, 随着焊接电流增大, 4 组样品对应的热变形量相应逐渐增大。当焊接电流为 190 A 时, 热变形量最大处为 -0.38 mm; 当焊接电流为 220 A 时, 热变形量最大处为 -0.49 mm。此结果表明, 热应力导致上管座空腔高度收缩, 4 组试样的热变形量均符合技术要求, 但电流为 220 A 时热变形量已接近允许的下限值(±0.5 mm)。

1.3.3 金相检验

对焊接试样 1~4 进行金相检验, 放大 50 倍检查, 结果见表 3。技术条件规定金相合格标准为: 熔深 ≥ 2.5 mm; 无裂纹。试验结果表明, 当焊接电流小于等于 200 A 时, 熔深小于技术条件规定的最小熔

表 3 金相检验记录
Tab.3 Metallographical inspection results

样品编号	熔深 /mm	有无裂纹	结论
1	2.06	无	未达标
2	1.92	无	未达标
3	2.82	无	达标
4	2.57	无	达标

深值; 当焊接电流为 210 A 时, 熔深达标, 最大熔深值约为 2.82 mm; 继续增大焊接电流, 熔深值变化不大, 但试样热变形量增大, 因此继续增大焊接线能量密度不会进一步增大熔深, 只会使焊缝宽度变宽。

1.3.4 晶间腐蚀

依据 ASTM A262-2015 标准方法 E, 对上述 4 组焊接试样进行晶间腐蚀试验, 试验过程如下:

试样在 675℃ 保温 1 h, 空冷后, 对试样表面打磨、清洗、干燥。在带冷凝管的锥形烧瓶底部平铺一层铜屑(纯度 ≥ 99.5%), 然后放置试样与铜屑接触, 但试样间互不接触, 加热并通冷却水使腐蚀溶液保持微沸状态, 连续试验 16 h。腐蚀液为硫酸-硫酸铜溶液。最后, 将试样取出洗净并干燥, 采用金相法进行检验, 观察是否有晶间腐蚀裂纹、拍照记录。

对试样晶间腐蚀形貌放大 100 倍检查, 4 组试样焊缝区域均未发现晶间腐蚀裂纹, 结果合格。检查

结果照片见图 5。

1.3.5 渗透检验

依据《CPR-TB-PT-002- 核安全二、三级部件液体渗透检验程序 /D》,对 4 组试样进行渗透试验。经检验,4 组试样试验结果均无渗透显示,结果合格。

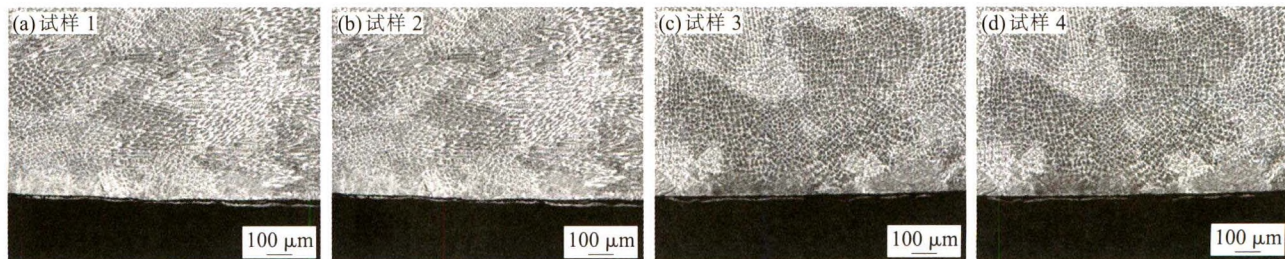


图 5 晶间腐蚀照片

Fig.5 Intercrystalline corrosion photographs

术要求, 熔深及热变形量成为焊接参数是否合格的决定性指标。

熔深、热变形量均与焊接能量直接相关,受焊接电流、焊接速度、钨极距离等多个焊接参数影响。理论上,焊接电流越大、焊接速度越慢、钨极距离越近,焊接能量越高,熔深越深,热变形量越大。然而实际中,不可能通过调节以上三个变量使熔深无限制增大。

首先,由于氩弧焊自身工艺的限制,钨极距离必须控制在合适的范围,离工件过远无法起弧,离工件过近,钨极会与工件粘连,均无法完成焊接。其次,焊接电流的增大与焊接速度的减小均会导致热变形量增大,在 S 孔外壁(即图 2 中标号 13 及 15 处)等薄壁段甚至有熔透工件风险。为了避免这些风险,焊接电流必然存在上限值,焊接速度必然存在下限值。焊接速度同样不可过快,否则会出现未焊透甚至未熔合等不合格现象。

从 1.3.2 节数据分析可知,当熔深已不随焊接能量的增大而显著增加时,热变形量仍有进一步增大至超出合格限值的可能。因此最合适的焊接工艺参数必然是使熔深满足要求时热变形量最小的参数,也即:熔深合格时,焊接能量越小越好。峰值电流为 210A 的试样 3,总热变形量稳定在 0.4~0.5 mm,且多次重复试验结果均较稳定,因此试样 3 对应的焊接参数为最优的焊接参数。

2.2 工艺改进思路

当前工艺方案为匀速焊接,对于 S 孔外壁等薄

2 分析与讨论

2.1 技术难点分析

从 1.3 节可知,在焊接参数设置合适的情况下,焊接试样的外观、晶间腐蚀、渗透检验结果均满足技

壁处较为不利,可能出现熔透现象。因此下一步的工艺改进思路是:在不同位置采用不同的焊接速度,在薄壁处、收弧段提高焊接速度,从而使同一焊接电流对不同壁厚处的热变形量影响较稳定。

3 结语

本文介绍了 STEP 系列压水堆燃料组件上管座焊接工艺研究的相关工作,初步探索出满足技术要求的合格焊接工艺参数,并提出工艺改进思路,为 STEP 系列燃料组件制造工艺的定型和优化提供了依据。

致谢:

感谢北京师范大学李玉德教授、吴先映研究员,中国科学院大学石桂欣博士对本文作者的指导与帮助。

参考文献:

- [1] 李莎. 燃料组件上管座单元件国产化焊接工艺研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(z1): 110-112.
- [2] 秦国鹏, 张丽英. 国产 AISI304L 上管座电子束焊接工艺研究[C]// 中国核学会. 中国核学会 2015 年学术年会论文集. 2015: 127-133.
- [3] 谭兰衍. 300MW 燃料组件上管座电子束焊接成型缺陷的控制[C]// 四川省机械工程学会. 四川省机械工程学会第三届学术年会论文集. 四川省机械工程学会, 2018: 194-197.
- [4] 张丽英, 秦国鹏. TVS-2M 燃料组件上管座制造技术研究[C]// 中国核学会. 中国核学会 2015 年学术年会论文集. 2015: 162-168. 