

奥氏体不锈钢 T 型接头激光焊工艺研究

荣华

(西安核设备有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 乏燃料贮存格架安装于核电厂燃料厂房乏燃料贮存水池内, 用于贮存达到规定限值的乏燃料组件。硼铝乏燃料贮存格架为核电站新型的贮存格架, 每台贮存格架由一定栅距排列的垂直方形贮存小室构成, 其中贮存套管之间为薄板奥氏体不锈钢连接焊缝。文章对激光焊焊接技术焊接贮存套管之间薄板奥氏体不锈钢 T 型接头的连接焊缝进行研究。采用激光焊设备验收试验基础上优化后的焊接工艺参数分别进行对接试件、模拟试件的焊接, 焊后制备力学性能、化学成分分析、宏观、微观金相试样, 结果证明可获得满足要求的相应质量准则的焊缝, 同时验证了激光焊接头及配套设备与产品结构的适应性, 尤其是与产品结构相同的模拟试件的焊缝成形、位置可影响焊接稳定性。

关键词: 方案; 分析; 试验; 试件; 成形; 性能

中图分类号: TG 457.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-817X (2024) 05-0047-004

激光焊接是将细聚焦的高能激光束作为热源进行焊接的一种高效精密的焊接方法, 是最有发展前景的高效率、高质量的焊接技术之一。其优点主要包括能量密度高、焊接速度快, 焊缝熔深宽比大、热影响区窄、焊接变形小, 光纤激光焊更是具有柔性化的光线传输优势, 已被广泛应用于航空航天、核电行业等领域^[1]。

乏燃料贮存格架广泛应用于核电站乏燃料在堆贮存、中间离堆贮存及后处理厂贮存等环节。随着我国核电行业的快速发展, 乏燃料贮存格架具有巨大的市场应用前景。本文对核电乏燃料贮存格架中奥氏体不锈钢 T 型接头长焦距激光焊进行工艺试验的研究, 探究影响焊接质量的主要工艺参数, 掌握各参数的一些变化规律, 通过调整并确定最佳焊接参数获得满意的焊接质量, 保证乏燃料贮存格架产品焊接质量的可靠性和稳定性^[2]。

1 试验方案分析

乏燃料贮存格架主材多为小于 3 mm 的奥氏体不锈钢薄板, 通常采用钨极氩弧焊进行焊接, 但由于乏燃料贮存格架设计结构紧凑, 操作空间有限, 传统钨极氩弧焊焊接方法和焊接工艺无可利用的操作空间,

无法确保其焊接质量, 激光焊则可利用一定距离焦距远距离实施焊接, 且能量集中、热影响区小, 可有效控制产品整体焊接变形量, 同时可获得更美观的焊缝表面成形。

每台乏燃料贮存格架由按一定栅距排列的垂直方形贮存小室构成, 贮存小室之间通过水口板相互焊接连接, 如图 1 所示。贮存套管内腔宽度约 224 mm, 激光焊接头中约有 200 mm 距离用于准直激光光束, 采用 3D 模拟结果显示, 要确保焊接位置可达且不与贮存套管相互干涉, 需采用聚焦焦距 500 mm 激光焊接头满足图 1 所示焊缝的焊接。

激光焊焊接时, 光束的聚焦特性对焊接质量有一定影响, 采用短焦距可获得较高的能量密度, 光斑小, 对工件配合间隙要求更高。长焦距能量密度低, 为了达到深熔小孔效应, 需要更高的激光输出功率, 500 mm 焦距为长焦距激光焊, 一般很少用, 且用于 T 型接头的焊接, 熔合情况及焊缝成型质量均存在诸多不确定性, 需要通过焊接试验对设备进行验证, 对工艺参数进行优化后, 方可用于产品制造。

2 试验制备

试验材料为厚度 2.5 mm, 牌号 022Cr19Ni10 的奥氏体不锈钢板, 试验分为 2 组: 第 1 组为平板对接试验, 以验证按照预定焊接工艺施焊的焊缝能满足相应质量准则, 特别是验证试件的力学性能。第 2

收稿日期: 2024-01-10

作者简介: 荣华 (1984—), 女, 工程师, 主要从事核电产品的焊接工艺审核工作。

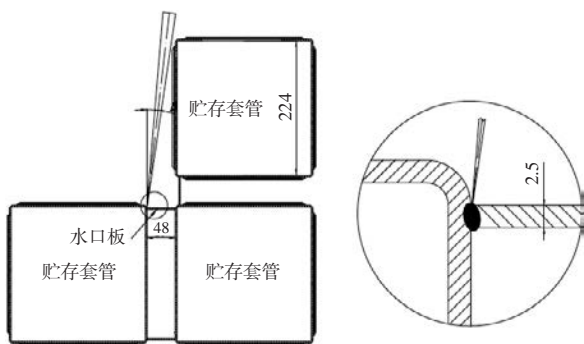


图 1 T型接头激光焊光束入射示意图

Fig.1 T-joint laser welding beam incident schematic diagram

组为模拟件试验，以验证激光焊接头及配套设备与产品结构的适应性，确定采用预定焊接工艺能获得满足相应质量准则的焊缝，主要是焊缝成形、位置可影响焊接稳定性。

对接接头试板尺寸为 600 mm×150 mm× 2.5 mm，模拟件采用厚度 2.5 mm 板压制而成的方形贮存套管与厚度 170 mm×48 mm×2.5 mm 的水口板相互焊接连接。光纤激光焊一般采用氩气、氦气或者氮气做保护气体，受到气体电离能以及等离子体维持阈值等因素的影响，焊缝熔深氦气最大、氮气次之、氩气熔深最小。但乏燃料贮存格架材料为奥氏体不锈钢，采用氮气保护易造成焊缝增氮，影响焊缝性能^[3]，氦

表 1 方管与底板对接焊评定试件型式

Tab.1 Evaluation specimen type of butt welding between square tube and bottom plate

评定型式	试件型式	试件型式示意图
对接试件	2.5	
模拟试件	2.5	

气成本较高，最终确定采用 99.99% 氩气作为保护气体。在激光焊设备验收试验基础上优化后焊接工艺参数见表 2、表 3。

表 2 对接试件工艺参数

Tab.2 Process parameters of butt specimen

射束轴线角度 / (°)		束能量分布	工作方式	组对间隙 /mm	激光功率 /W	聚焦状态 /mm	焊接速度 / (m/s)	保护气体 / MPa
α ^①	β ^②							
90	90	高斯分布	连续	0~0.3	2 200~2 600	+10	0.017	0.3
110	90				2 500~2 900			

① 射束轴线与已焊接完焊缝的夹角。

② 射束轴线与试件表面的夹角。

表 3 模拟试件工艺参数

Tab.3 Process parameters of simulated specimen

射束轴线角度 / (°)		束能量分布	工作方式	组对间隙 /mm	激光功率 /W	聚焦状态 /mm	焊接速度 / (m/s)	保护气体 / MPa
α	β							
90	6	高斯分布	连续	0~0.3	2 200~2 600	+10	0.017	0.3
110	6				2 500~2 900			

3 试验结果及分析

3.1 焊缝成形

有试验研究结果显示，对于 T 型接头激光焊，入射角度 β 在 30°~45° 范围内，焊接接头熔深、成

形及性能易保证。受产品结构限制，入射角度 β 最大可调整至 6°，大于 6° 时，激光光束光路与产品部件相干涉，激光功率衰减易造成接头未焊透，同时有损伤部件的风险，模拟试件入射角度 β 取 6°，如图 2 所示。

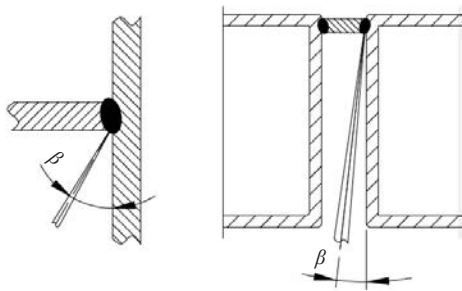


图 2 模拟试件光束入射角度示意图

Fig.2 The schematic diagram of beam incident angle of simulated specimen

按拟定焊接工艺参数完成的对接试件及模拟试件焊缝外观金相照片见图 3、图 4。照片显示焊缝表面成型良好，焊缝结果显示无裂纹、未焊透、熔敷金属与母材熔合良好、焊道之间熔合良好，未见气孔等缺陷。按表 2、表 3 焊接工艺参数施焊的对接试件及模拟试件均可获得满意的焊缝成形，符合相关设计要求。

3.2 试件性能

对接试件按照 NB/T 20003.7—2010 标准进行目视检测^[4]、按照 NB/T 20003.4—2010 进行渗透检测^[5]

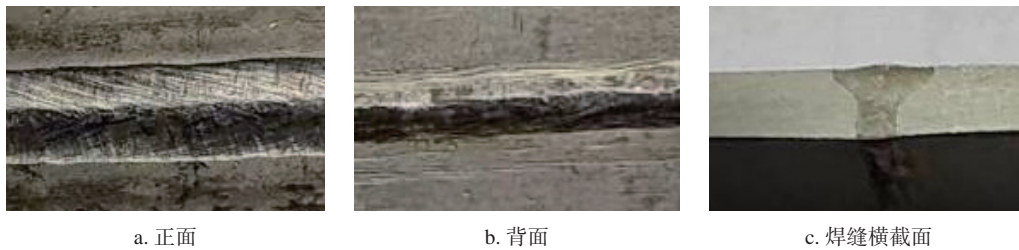


图 3 对接试件焊缝

Fig.3 Butt specimen welds



图 4 模拟试件焊缝

Fig.4 Simulated specimen weld

及 NB/T 20003.3—2010 进行射线检测^[6]，均验收合格。模拟试件按相关标准进行目视检测、渗透检测，均验收合格。焊后切取试样进行各项物理性能性试验，试验项目、试验方法以及试验结果见表 4。

表 4 对接及模拟试件试验项目

Tab.4 Docking and simulation test items

试验项目	试样数量	试验结果	备注
接头拉伸试验	2 件	合格	全厚度、横向、室温（仅对接焊）
接头拉伸试验	2 件	合格	全厚度、横向、80℃（仅对接焊）
面、背弯试验	各 2 件	合格	全厚度、横向、室温（仅对接焊）
晶间腐蚀试验	对接 1 件 模拟件每组参数各 1 件	合格	焊态
晶间腐蚀试验	对接 1 件 模拟件每组参数各 1 件	合格	焊态
宏观金相检查	对接 1 件 模拟件每组参数各 1 件	试样检查面焊缝与热影响区无裂纹、未焊透、熔敷金属与母材的未结合，或焊道之间的未结合，未熔合及超过射线照相检测标准规定尺寸的气孔和夹渣等缺陷	
微观金相检查	对接 1 件 模拟件每组参数各 1 件	焊缝及热影响区未见影响试件性能的显微裂纹和沉淀物（×200）	

3.3 试验结果分析

通过两组试验结果分析,焊缝外观成形及各检验项目均可满足要求,T型接头部分试样焊缝背面存在根部缩沟,经检测根部缩沟深度在标准允许范围内,分析原因影响因素可能有以下几个方面:

(1)组对间隙太大,激光焊焊接质量对试件组对间隙特别敏感,原因为激光光束聚焦光斑直径有限,为实现特殊产品结构的焊接,激光焊接头焦距、光纤芯径等参数会进行适应性调整,以上参数影响光束聚焦光斑直径。乏燃料贮存格架用激光焊接头聚焦光斑直径0.375 mm,间隙较大时,例如0.3 mm时,受试件平面度及直线度影响,焊缝全长范围内光斑覆盖性变差,则导致部分区域焊缝熔池冷却时无足够焊缝金属补充,形成缩沟。

(2)试验焊接位置为立焊,受重力影响,熔池极易下淌,激光焊焊接速度快,焊缝背面熔池无焊缝金属补充,形成缩沟。

(3)同样试验条件下,除平焊位置外,T型接头较对接接头更易产生根部缩沟。

4 结语

通过按拟定焊接工艺参数进行对接试件及模拟试件焊接,确定可获得满足要求的相应质量准则的焊

缝,同时验证了激光焊接头及配套设备与产品结构的适应性,尤其是与产品结构相同的模拟试件的焊缝成形、位置可影响焊接稳定性。

随着试件组对间隙的增大,焊缝产生根部缩沟等缺陷的可能性增加,试验结果显示试件及产品组对间隙 ≤ 0.2 mm时,可保证焊缝质量,当组对间隙为0.2~0.3 mm时,可先采用小功率激光焊或钨极氩弧焊不加丝自熔方式消除组对间隙,然后再采用大功率激光焊进行焊接,即可保证焊缝质量。奥氏体不锈钢T型接头激光焊工艺技术的研究,为核电站同类产品的焊接提供了借鉴。

参考文献

- [1] 李亚江,李嘉宁.激光焊接/切割/熔敷技术[M].北京:化学工业出版社,2016.
- [2] 国家核安全局.核动力厂燃料装卸和贮存系统设计:HAD 102/15[S].北京:化学工业出版社,2007.
- [3] 李耿,张林,高明,等.保护气体对不锈钢光纤激光焊接的影响[J].热加工工艺,2011,40(23):126-129.
- [4] 国家能源局.核电厂核岛机械设备无损检测第7部分:目视检测:NB/T 20003.7—2010[S].北京:化学工业出版社,2010.
- [5] 国家能源局.核电厂核岛机械设备无损检测第4部分:渗透检测:NB/T 20003.4—2010[S].北京:化学工业出版社,2010.
- [6] 国家能源局.核电厂核岛机械设备无损检测第3部分:射线检测:NB/T 20003.3—2010[S].北京:化学工业出版社,2010.

Research on Laser and Welding Process of Austenitic Stainless Steel T-joint

Rong Hua

(Xi'an Nuclear Equipment Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: The spent fuel storage grid is installed in the spent fuel storage pool of the nuclear power plant fuel plant, which is used to store the spent fuel assemblies that reach the specified limit. boron and aluminum spent fuel storage racks are new storage rack in nuclear power plant. each rack is composed of vertical square storage cells arranged in a certain spacing. the storage sleeves are connected by thin Austenitic stainless steel welding seams. in this paper, laser beam welding technique is used to weld the T-joints of thin plates between storage casings. the laser beam welding process parameters optimized on the basis of acceptance test of laser beam welding equipment were used to weld the jointed specimen and the simulated specimen. at the same time, the adaptability of the laser beam welding head and the matching equipment to the product structure is verified, especially the weld formation, position and welding stability of the simulative specimen which has the same product structure.

Keywords: scheme; analysis; testing; test-piece; forming; performance