

放射源密封中焊接新工艺探索

郝晓华 李 龙 温 毅 李哲宇 邵晓宙 (中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 针对放射源密封的工艺, 一般采用金属包壳单层或多层封装, 源壳的接头多采用端接形式, 常用的焊接工艺有 TIG 焊、激光焊。本文结合两种焊接工艺的优缺点, 分析了近年来的新型焊接工艺 A-TIG 焊、CMT 焊以及激光电弧复合焊在放射源密封中应用的可能性, 得到激光电弧复合焊在放射源密封焊接中较传统焊接工艺优势明显, 并提出在焊接过程的检验中应用先进检测技术, 综合以上, 设计了激光电弧复合焊接新工艺的应用方案。

关键词: 放射源密封; 焊接; 激光电弧复合焊

0 引言

遍及工、农、医、国防和科研领域使用各种放射源, 安全、可靠地密封放射源是制源工艺的关键。20 世纪 60 年代以来我国的制源工艺采用小电流氩弧焊密封工艺, 沿用至今, 近些年来出现了针对 I-125 的激光焊接工艺应用。随着焊接技术的不断发展, 焊接理论与工艺有了较大的突破。为了补足现有工艺的弱项, 针对放射源密封的特点, 本文讨论了几种先进焊接工艺的特点与适用性。

1 现有放射源密封技术

放射源大多呈圆柱状, 密封 α 、 β 、 γ 和中子源普遍使用钨极-惰性气体保护焊 (TIG)。钨极氩弧焊密封是依靠源盖和壳体金属的本身熔化来实现, 源壳特点为体积较小和薄壁 (0.5~1mm), 接头厚度常设计成等厚度或源盖接头厚度为壳体接头厚度的 0.5~1 倍。焊接采用“边缘接”或“端接”形式。

最为常见的放射源有钴 60, 放射性极强, 需在封闭的防辐射热室中借助遥控的手段将此元素放到符合核反应的不锈钢容器内, 通过机械手臂进行钨极氩弧焊端接密封封装。密封放射源封装层数放射源封装多为双层结构, 超级伽玛刀源封装层数为 3 层; 工农业辐照用非标钴 60 γ 源和仪表刻度用钴 60 γ 源则为单层封装。

I-125 微型密封源是一种近距离治疗用放射源。I-125 密封源采用激光焊接机技术, 以 PLC 为控制核心, 控制着激光焊接机激光脉冲的发出或停止; 控制保护气体的输出或关停; 控制并驱动步进马达带动金属钛管支架旋转或停止。密封容器钛管焊接前长 $6.35 \pm 0.03\text{mm}$ 、直径 0.8mm、壁厚 0.05mm, 要求将热源封装在钛管内。焊好的密封源两端焊接密封成半椭圆球形, 表面圆滑, 无毛刺, 不泄漏, 无高温化学反应后产生的蓝边 (见表 1)。

2 缺点劣势

2.1 钨极-惰性气体保护焊缺点劣势

2.1.1 焊接质量关键取决于钨极是否对准

试焊前应仔细检查焊台、冷却套与源壳的同轴度。启动高频引弧, 观察钨极尖端在源壳转动后是否始终对准焊缝中心, 对非等厚度焊接以及电弧来说, 可略偏向厚度较大的一侧。

2.1.2 散热冷却

钴 60 在封闭的防辐射热室中借助遥控密封封装焊接不锈钢容器内, 焊接过程中会产生大量的热量, 容易加热包壳内的空气, 很容易造成焊接封装不充分的现象, 由于空气温度高, 焊接封装容易形成气孔、过烧、塌陷和氧化等缺陷。源壳在焊封过程中的散热冷却尤为重要。目前, 多选用热容量大、导热系数高的黄铜材料作冷却套。

2.1.3 耐辐照设备

钴 60 需在热室条件且稳定性较强的自动焊设备, 以耐辐照为焊接重点。

2.1.4 源强不同实时调整

实际生产中放射性物质钴 60 圆柱体源强不同, 衰变产生的热量不同 (约为 $150\text{W}/10000\text{Ci}$); 因钴 60 伽玛刀源、无损检测用钴 60 γ 源以及仪表刻度用钴 60 γ 源源强活度大部分低于 300Ci 以下, 放射源自身衰变释放热量对上述实验求得的焊接电流影响较小; 而工农业辐照用钴 60 γ 和钴 60 远距离治疗源源强活度大部分高于 3000Ci 以上, 对奥氏体不锈钢产生不同影响不可忽视, 需在生产焊接中进行调整。

2.2 激光焊接缺点劣势

激光焊接脉冲功率大小、脉冲数、脉冲宽度、能量输出的稳定性、焊接时工件的旋转速度、工件的旋转轴向跳动、保护气体的种类, 吹气方向、压力、流量、喷嘴大小、与焊点的距离、焊点在工件上的焊接位置等。因此激光电压的微小波动或其他条件的微小变化等都可能将管壁击穿、形成焊瘤、焊花、焊接面穿孔、焊接面歪斜、烧焦、蓝边等, 从而焊接失败, 废品增加。

3 新工艺

3.1 活性焊剂钨极氩弧焊

活性剂钨极氩弧焊 (Activating flux TIG welding, A-TIG), 它主要是在被焊工件表层涂敷一层特殊研制的很薄的活性焊剂, 再进行 TIG 焊接。A-TIG 焊接技术最大的优点在于对熔深的增加效应上。该技术可以在保持 TIG 焊接强度、抗晶间腐蚀性能等优点的前提下, 增加焊接深深、减小变形、消除气孔、提高生产效率。

A-TIG 焊技术在现有焊接装备的前提下, 采用活性剂技术, 获得了大熔深、高效率、高质量的优点, 与先

进的激光焊、电子束焊接相比，而成本却较低。

焊剂起到表面活性剂的作用，改变了熔池的表面张力，导致熔池表面凹陷，它增加了熔池表面的曲率半径，形成一个微小的空洞，支撑电弧压力，导致在不同等级的钢中在低电流下熔透。

A-TIG 焊接优势在于采用活性剂技术，改变了熔池形成过程，其改造成本低，增加焊接熔深、减小变形、消除气孔、提高生产效率。未能改变钨极对准的缺点。

3.2 CMT 焊接技术

CMT 技术是福尼斯公司开发的一种焊接工艺，具有焊接时无飞溅、低热输入、焊接速度快、优异的搭桥能力。

冷金属过渡在焊接过程中基本经历如下过程：

- ①电弧引燃、熔滴形成；
- ②熔滴接触熔池，电弧熄灭，电流减小；

③电流短路，焊丝回抽，熔滴脱落，短路电流保持最小值；

④焊丝前端重新引弧，并加热使之熔化形成熔滴向熔池过渡，整个“冷-热”循环过程重复进行，直至停止焊接。

这种工艺将热输入量降到最低，成形时无飞溅、焊接速度快、焊接成形质量高。但其焊丝伸出、回抽，不断引弧、实时监控焊丝熔滴状态机构，过于复杂，需耐辐照器件较多，不适宜在热室中使用。

3.3 激光电弧复合焊接

激光电弧复合焊接的原理为：激光与电弧同时作用于金属表面同一位置，焊缝上方因激光作用而产生光致等离子体云，等离子云对入射激光的吸收和散射会降低激光能量利用率，外加电弧后，低温低密度的电弧等离子体使激光致等离子体被稀释，激光能量传输效率提高；

表 1 典型放射源密封工艺

焊接方式	钨极 - 惰性气体保护焊 (TIG)	激光焊
密封源项	钴 60	I-125
焊接设备	自动氩弧焊机	激光焊机
保护气	氩气	氩气
防护设施	热室	手套箱
焊接方式	端面自动环焊	柱面环焊
包壳	奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti	钛合金
配合	0.02~0.05mm	
焊接壁厚	0.5~1mm	0.05mm
散热措施	黄铜冷却套	
源强	300~3000Ci	0.6~0.9mCi
封装层数	单层 / 多层	单层
质量控制	表面检测	视频监控
	污染擦拭	
	泄漏探测 (鼓泡试验 / 浸渍试验)	

表 2 焊接检测方法对比

检测方法	高速摄像视觉检测	光谱分析	红外温度场在线检测	声信号在线检测	电流电压
设备	高速摄像机	光纤探头、光谱分析仪	红外成像仪	声信号传感器	电流电压传感器
方式	不同波段的滤光片拍摄焊接的正面金属蒸汽和背部熔池	特定空间点的辐射信息通过光纤传递到光谱仪	热辐射成像	监测焊接过程声发射信号	电流电压实时检测
方法	人工观察	信号分析	信号处理，热图像的解析	声信号的处理	信号分析
观察现象	焊接过程中的熔滴爆破过程和匙孔的生成和塌陷过程	离子成分组成、电弧弧长、电弧温度场	缺陷部位使被检测表面产生温差	提取焊接缺陷特征	获取焊接的熔滴过渡频率，分析不同熔滴过渡模式下的激光和电弧之间的相互影响
耐辐照性能	耐辐照高速摄像机成本较高且一定时间需更换	光纤信号在辐照作用下产生感生损耗影响测量精度	非接触式测量，辐照剂量低	动圈式机械结构耐辐照性能好	热室或手套箱外部测量

同时,电弧对母材进行加热,使母材温度升高,母材对激光的吸收率提高,焊接熔深增加。另外,激光熔化金属,为电弧提供自由电子,降低了电弧通道的电阻,电弧的能量利用率也提高,从而使总的能量利用率提高,熔深进一步增加。激光束对电弧还有聚焦、引导作用,使焊接过程中的电弧更加稳定。

激光-TIG复合焊接的优点:

①可将入热量降到最低的需热量,热影响区金相变化范围小,且因热传导所导致的变形亦最低;

②可降低厚板焊接所需的时间甚至可省掉填料金属的使用;

③不需使用电极,没有电极污染或受损的顾虑。且因不属于接触式焊接制程,机具的耗损及变形接可降至最低;

④激光束易于聚焦、对准及受光学仪器所引导,可放置在离工件适当距离,其他焊接法则因受到上述的空间限制而无法发挥;

⑤工件可放置在封闭的空间(经抽真空或内部气体环境在控制下);

⑥激光束可聚焦在很小的区域,可焊接小型且间隔相近的部件。

激光-TIG复合焊接将激光与TIG焊相结合,激光束对电弧聚焦、引导作用,激光能量传输效率提高,电弧的能量利用率也提高,可将入热量降到最低的需热量。激光焊机与TIG焊接均有在热室中使用先例,耐辐照特性可满足。

3.4 检测技术

激光-电弧焊接实时检测技术随着传感器技术的不断进步和人工智能技术的出现而不断发展。激光-电弧复合焊的过程信息包括电弧、熔池、熔滴、匙孔、金属蒸汽、金属等离子体、飞溅等。通过传感器把这些现象的光、电、热、声等信息收集起来,从而实现激光电弧复合焊的过程检测。常见的用于焊接过程检测的传感器包括高速摄像机、光谱分析仪、温度场传感器、电流电压传感器等(见表2)。

多传感器多信息融合的同步分析是目前焊接自动化和在线控制的发展趋势。应用到激光-电弧焊接密封放射源的这一特殊场合中,红外温度场在线检测、声信号在线检测与电流电压三种方式可将电、热、声等信息收集起来,进一步结合已有数据、专家系统、源强信号,通过算法实现激光电弧复合焊的过程检测及实时调整。

应用方案设计(见图1)。

在分析了现有放射源密封技术,以及其存在的缺点劣势,结合焊接新工艺的发展,得出激光-电弧复合焊接在两种热源相结合条件下集成两种热源优点,同时避免了单一热源焊接时存在的一些缺陷,适用于放射源密封。

同时,分析了多种检测技术的应用,研究其在辐照条件下的适用性,得出采用红外温度场在线检测、声信

号在线检测与电流电压三种方式可将电、热、声等信息收集。

放射源密封焊接新工艺方案中,复合焊接设备放置与密封手套箱中,留有视窗。焊前准备与焊封实施均在内部实现。电、热、声、源强等信息传到箱体外侧,结合已有经验数据与专家系统,通过算法(常用为神经网络控制)实现激光电弧复合焊的过程检测及实时调整。

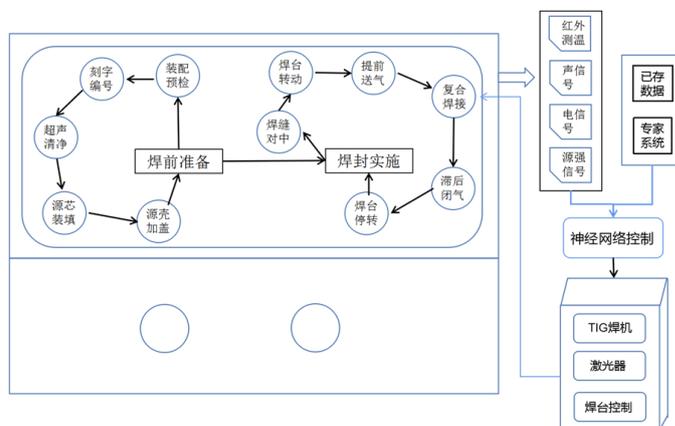


图1 放射源密封焊接新工艺方案

参考文献:

- [1] 吴朝峰,杨有成.密封放射源焊接自控氩弧焊机及其焊接工艺研究[J].核动力工程,1989(01):83-88.
- [2] 李波,罗宁,曾俊杰,吴建荣,贾致军,王磊,孙志中,陈云明,张劲松.(125)I生产工艺研究进展与展望[J].同位素,2020,135(06):46-53.
- [3] 庄湘春.Co~(60)小型密封放射源的自动氩弧焊[J].焊接,1985(02):14-17.
- [4] 杨文通,聂应新,岳建昌,等.I-125微型密封源激光焊接机的研制[J].制造技术与机床,2005(03):54-55.
- [5] 徐鹏程.放射性碘-125密封籽源生产用激光焊接系统[J].中国新技术新产品,2016,000(006):8-9.
- [6] 张满,李年莲,吕建强,等.CMT焊接技术的发展现状[J].焊接,2010(12):25-27.
- [7] 刘秀航,高向东,孙友松,肖小亭,卢新钊.激光-电弧复合焊接技术研究现状[J/OL].热加工工艺,2020.
- [8] 马然,董韶喆,吴世凯,等.薄板钛合金光纤激光-钨极惰性气体保护电弧复合焊接工艺研究[J].中国激光,2014,41(5).
- [9] 张文朝,李志勇,等.激光对TIG电弧温度分布影响的数值模拟[J].热加工工艺,2013,42(007):180-182.
- [10] 杨晓冬.核电站关键部件的智能制造焊接解决方案探究[J].科技视界(17):2.
- [11] 董俊华.激光焊接特性转变过程的光学特征信号检测[J].热加工工艺,2008,37(011):63-65,68.
- [12] 王攀锋,赵颖,王方洋.薄壁筒形壳体组合焊接检测技术[J].航空精密制造技术,2018,054(004):40-44.

作者简介:

郝晓华(1994),男,汉族,山西沁源人,中国辐射防护研究院,硕士,研究方向:机械设计与加工工艺。