

文章编号: 1002-025X(2018)04-0150-04

金属钎电子束焊接几何缺陷控制工艺

陶海燕¹, 陈路², 王世忠², 樊宝全², 兰光友²

(1. 华龙国际核电技术有限公司, 北京 100089; 2. 中国核动力研究设计院 第四研究所, 四川 成都 610213)

摘要: 针对钎开展了电子束焊接研究, 发现在焊缝表面存在凹陷及内部存在钉尖的几何缺陷, 分析了焊缝表面凹陷及飞溅的成因, 认为焊缝间隙是导致焊缝凹陷的主要原因。通过控制零部件组装配合量解决了焊缝凹陷过大的问题, 明显控制了飞溅, 进一步通过改进清洗工艺彻底消除了飞溅缺陷。对焊缝内部的钉尖及根部气孔的成因进行了机理分析, 认为电子束焊接的成形机制及锁底焊缝结构是导致内部缺陷产生的主要原因。通过试验得到了聚焦电流对焊缝根部钉尖尺寸的影响规律, 采用上聚焦的方式焊接可以使钉尖得到有效的控制, 再通过引入圆波扫描电子束焊接彻底解决了钉尖及根部气孔缺陷。焊后对焊缝进行了表面检验、渗透检验、金相检验、腐蚀性试验等, 各项检测指标均满足要求。

关键词: 钎; 电子束焊接; 焊接缺陷; 腐蚀性能

中图分类号: TG441.7 **文献标志码:** B

DOI: 10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2018.04.041

0 前言

金属钎是一种良好的控制材料, 不仅对热中子和超热中子都有高的吸收截面, 其吸收中子后的子体还能有效地再吸收中子, 而且是长寿命中子吸收体, 具有良好的耐腐蚀性能、抗辐照性能、机械加工性能和热稳定性能等优点^[1]。钎与锆的化学性质相似, 在高温下易氧化, 必须采用能量集中的焊接热源, 以提高焊接接头的加热和冷却速度, 有利于缩短过热区金属在高温下的停留时间。故利用真空电子束焊接钎材, 研究焊缝性能, 分析焊接缺陷, 探究抑制缺陷的方法。

1 试验材料及方法

试验所用原材料均经化学成分、力学性能检测, 符合 ASTM B776 钎材标准。钎管与钎端塞为锁底焊缝, 钎管内径与钎端塞配合面外径之间为过渡配合。钎管及钎端塞经超声波清洗、烘干, 使用专用横向自动压塞机将钎端塞压入钎管, 组装后环焊缝在 EBK-06H 型真空电子束焊机内进行, 如图 1 所示。钎属高熔点难熔金属, 熔点高达 2 222 °C, 根据电子

束表面聚焦斑点越小, 其穿透力越强的原理, 为保证钎管和钎端塞环缝的熔深和表面质量, 采用先表面聚焦焊, 再表面散焦焊的焊接方式, 聚焦焊能保证焊缝的熔深, 而散焦焊能使焊缝表面更平滑美观。将工艺参数分 2 段进行设定, 第 1 段聚焦焊接, 保证焊透, 第 2 段散焦焊接盖面保证焊缝表面成形良好。所选取的焊接工艺参数见表 1。焊后对焊缝进行 VT, PT 检验、耐蚀性试验、金相检验, 焊接试样每隔 60° 进行金相取样, 金相试样经研磨抛光后, 采用 HF:HNO₃:H₂O=1:4.5:4.5 的混合溶液腐蚀 10 s, 使用 Leica DMI5000M 型金相显微镜进行观察。

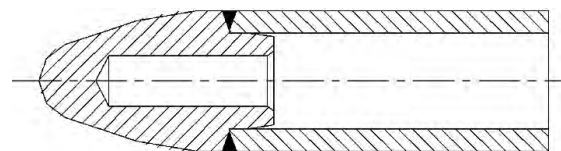


图 1 钎管与钎端塞焊接结构示意图

表 1 钎管与钎端塞环缝焊接工艺参数

焊接分段	高压/kV	束流/mA	聚焦/mA	转速/(r·min ⁻¹)	转角/(°)
第 1 段	55	18~20	732 (表面焦)	10	380
第 2 段	55	20~22	790	10	720

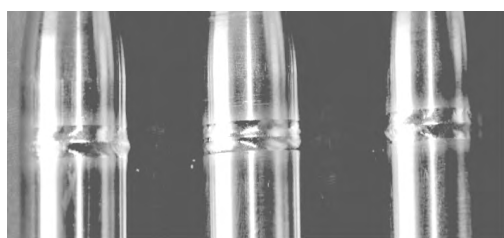
2 结果与讨论

2.1 表面飞溅及凹陷

在所焊接的钎材试样中, 发现部分焊缝出现了表面凹陷及焊缝周边存在飞溅的现象较为严重。根

收稿日期: 2017-12-14

据设计要求, 钎控制棒产品的焊缝经修磨后凹下量不允许大于 0.05 mm, 个别焊缝在未修磨前的凹下量最大值 (S_{\max}) 已经超过了 0.05 mm, 其凹陷呈现出焊缝中间高, 两侧下凹, 如图 2 所示, 对焊缝的力学性能将产生一定影响。此外, 焊缝周边的飞溅以熔化的金属呈小球状逸出熔池表面的方式存在, 散布在焊缝周围 1~2 mm 的范围内, 如图 3 所示。飞溅在一定程度上造成了焊缝不饱满, 可能会对焊缝力学性能产生影响, 影响产品表面质量, 清除时会有损伤产品的风险。



凹下量 0.08 mm 凹下量 0.1 mm 凹下量 0.05 mm

图 2 环焊缝凹陷

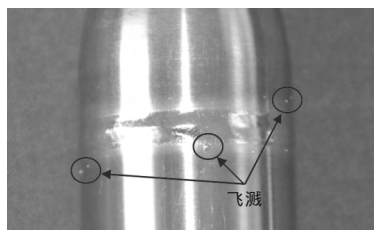


图 3 环焊缝表面飞溅

观察发现焊缝存在凹陷往往也伴随着飞溅的出现, 焊缝凹陷越严重, 飞溅数量和尺寸越大。认为除焊接工艺参数外, 焊缝间隙也会影响焊缝凹陷, 焊缝间隙过大, 熔池未能完全填满间隙, 金属在电子束作用下发生蒸镀, 能够填充在间隙中的液态金属量减少, 液态金属凝固后便形成凹陷。钎管内径与钎端塞配合面外径之间的配合量影响着焊缝间隙。钎管内径与钎端塞配合面外径的设计配合量 (t) 为 $-0.017 \text{ mm} \leq t \leq +0.012 \text{ mm}$, 属过渡配合。经统计, 试样的配合量与焊缝表面成形见表 2。焊接面配合量直接导致了焊缝表面凹陷及飞溅程度不一。当 $-0.005 \text{ mm} \leq t \leq +0.005 \text{ mm}$ 时, 焊缝大多未出现凹陷, 或凹下量很小, 而 $t \leq -0.005 \text{ mm}$ 或 $t \geq +0.005 \text{ mm}$ 时, 焊缝凹下量均超过了 0.05 mm。由于钎管壁厚较厚, 过盈配合量过大, 则钎端塞无法被完全压入钎管, 造

成焊接面贴合程度不一, 肉眼无法分辨其贴合程度, 焊后造成焊缝凹下量不满足要求; 间隙配合量过大, 则有可能在工件旋转对焊时松动, 造成焊接面贴合不紧密, 或者焊接过程中由于焊缝收缩将未焊接部位的间隙拉大, 造成局部贴合不良, 导致焊缝凹下量过大。钎管内径和钎端塞配合面外径之间的配合量控制在 $-0.005 \text{ mm} \leq t \leq +0.005 \text{ mm}$ 以内, 可解决焊缝凹下量过大的问题。

表 2 环焊缝零部件尺寸统计与焊后表面成形 (相同的焊接工艺条件)

编号	配合量 t/mm	焊缝凹下量 S_{\max}/mm	飞溅情况
1	+0.002	0.01	4 处, 尺寸较小
2	-0.002	无凹陷	无飞溅
3	+0.002	无凹陷	3 处, 尺寸较小
4	+0.011	0.1	7 处, 尺寸较大
5	+0.005	0.02	1 处, 尺寸较小
6	-0.001	无凹陷	无飞溅
7	+0.007	0.08	3 处, 尺寸较大
8	-0.009	0.05	3 处, 尺寸较大
9	-0.003	无凹陷	4 处, 尺寸较大

从表 2 的结果中可知, 通过焊缝间隙控制使飞溅得到一定改善, 但未根除。相关资料报道^[3], 飞溅产生往往与母材金属的气体元素含量较多有关, 提高金属的纯度是解决飞溅缺陷的途径之一, 但改善钎材质纯度不可行。此外, 飞溅的产生还与焊接面清洁度有关, 电子束焊接本身对油污、氧化物、水分等敏感性较强, 加之钎叉又是一种化学性质较活泼的金属, 若清洗不彻底, 即便存在极少量的油渍等杂质, 在高温下其也会与金属反应产生气体, 气体由于温度升高而体积膨胀, 从熔池中逸出, 在高真空压力过大的环境下急速膨胀形成飞溅。对零部件清洗的原有方法是沿用钎合金电子束焊接前的清洗工艺: 去离子水冲洗, 烘干, 丙酮擦拭焊接面; 针对钎重新制订了清洗工艺: 以 A 级水为介质, 在 40~50 °C 下, 添加除油剂对工件进行高温超声波清洗 30 min, 然后使用 A 级水冲洗, 再使用丙酮脱水, 重点擦拭焊接面, 最后烘干。事实证明, 改进清洗工艺后, 彻底消除了飞溅。

2.2 钉尖及根部气孔

经金相观察发现, 使用表 2 的焊接工艺参数实现了焊透, 但绝大多数样品焊缝根部存在类似于气

孔的缺陷,如图4所示。根据以往焊接类似结构合金的经验,在保证熔深的前提下,适当降低焊接速度,减小焊接束流,加速气泡逸出熔池的方法进行焊接试验,通过观察发现该根部缺陷并未得到改善。经分析认为,该种根部缺陷形貌和出现的位置与电子束焊接中常出现的钉尖(spiking)和伴随其发生的根部气孔(root porosity)极为相似,即为非熔透焊缝的根部形成的狭长空腔将焊缝金属和母材分割开,通常出现在焊缝根部,导致熔深不均匀,影响焊缝有效熔深评估,同时也相当于引入了开裂源,对钎控制棒在堆内高温高压的复杂工况下长期运行的安全性存在隐患。

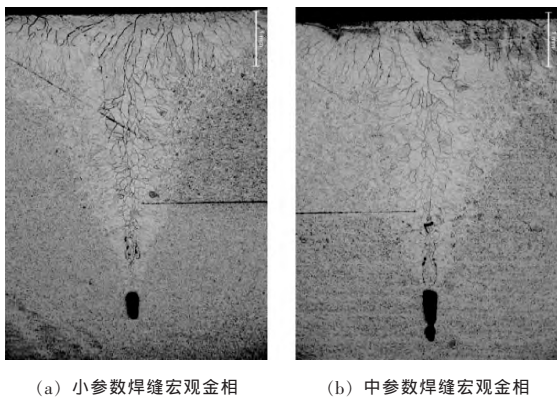


图4 环焊缝宏观金相

据相关文献报道,导致钉尖及根部气孔的产生可能与电子束焊接形成机制有关,往往在深熔焊过程中出现^[4]。在非熔透焊缝电子束焊接时,焊缝底部的某些区域的熔化超过了正常熔深,束流作用于焊缝底部,汽化金属推动液态金属向上运动,阻碍上方液态金属的向下流动与填充,形成钉尖。另外,随着金属蒸汽的液化和小块凝聚,钉尖根部变得圆滑,形成了如同气孔的形貌,根部气孔与常规气孔的形成机制不同,钉尖是导致根部气孔出现的直接原因。由于脉冲作用下的电子束并不稳定,焊缝中的钉尖缺陷深浅形状并不一致^[5]。

一般情况下,钉尖是非熔透型电子束焊接厚件中常见的一种缺陷,某些资料也指出钉尖及根部气孔也会存在于电子束锁底焊缝中^[6]。根据钉尖和根部气孔形成特点,相关文献指出,电子束的聚焦位置对钉尖的产生有一定影响^[7]。在焊接工作距离确定的

情况下,通过改变聚焦焊接过程中的聚焦电流值来实现束斑位置的调节进行试验,焊缝熔深与钉尖长度的测量结果如图5所示。

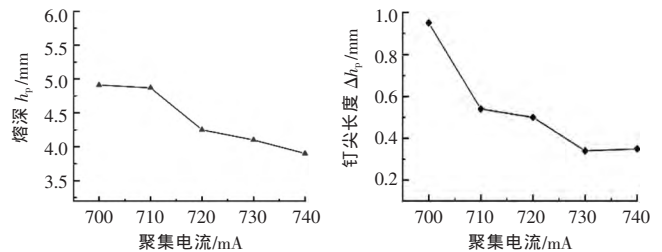


图5 焊缝熔深及钉尖长度与聚焦电流的关系

由图5可知,聚焦电流的变化直接影响钉尖长度及形貌,钉尖长度 Δh_p 随聚焦电流增大而减小,即电子束在焊缝根部的能量密度越大,钉尖效应越严重,下聚焦、全聚焦、上聚焦的聚焦方式下钉尖长度逐渐减小。但将聚焦电流增大至740 mA时仍未将钉尖消除,若继续增大聚焦电流,可能无法将焊缝焊透,若通过继续增加焊接束流提供更多的热输入增大焊缝熔深,可能由于过热或过烧影响组织。故在保证熔深和焊缝组织的前提下,适当提高电子束焦点位置,降低能量密度,使焊缝熔深根部的形貌由尖状改为较平滑的碗状,明显地改善了焊缝根部钉尖长度,但无法完全消除。

此外,改善熔池内部液态金属的流动方式,也可能从电子束焊接成形机制上对钉尖有所改善,增强电子束在熔池内部对液态金属的搅拌扰动作用,打乱液态金属的固有流动方式,在钉尖形成初期便填充在其中。故在聚焦焊接中固定热输入,采用适当的上聚焦方式,引入圆波扫描,通过变化扫描频率进行焊接。从表3中的试验结果可知,随着扫描频率的提高,钉尖长度减小,当扫描频率高于200 Hz时,钉尖彻底消失。但当扫描频率为400 Hz时,焊缝出现咬边现象,这说明在聚焦焊接中对熔池的搅拌作用过大,导致焊缝表面成形不规则,咬边严重,依靠散焦焊无法完全将其修饰平整光滑。事实证明,在保证熔深及表面成形的前提下,采用上聚焦方式圆波扫描电子束焊接,在适当的扫描频率范围内可以完全消除钉尖及根部气孔。

表3 铅管与铅端塞环缝电子束焊接工艺参数

频率/Hz	50	100	200	300	400
钉尖长度 Δh_p /mm	0.27	0.10	—	—	—
表面成形	良好	良好	良好	良好	咬边

2.3 焊缝检验结果

通过工艺调整消除了焊缝缺陷,焊后对焊缝进行目视、渗透检验,无表面裂纹等缺陷。金相检验结果显示,熔深最小 3.60 mm,最大 4.21 mm,将环焊缝焊透,无有害相析出。在压力 18.5 MPa, (360±5) °C 的水中进行 672~680 h 的腐蚀试验,试验后焊缝表面呈彩虹状干涉膜,无棕色和白色腐蚀产物,如图 6 所示。



图6 铅环焊缝腐蚀试验结果

3 结论

(1) 通过对铅材电子束环焊缝凹下量过大及出现大量飞溅进行了试验研究,铅管内径与铅端塞配合面外径之间的配合量控制在 $-0.005 \text{ mm} \leq t \leq +0.005 \text{ mm}$ 范围内,可以彻底解决焊缝凹下量过大的问题,并对焊缝飞溅有明显改善,通过零部件清洗工艺的改进可以彻底消除飞溅。

(2) 对铅材电子束环焊缝内部的钉尖及根部气

孔进行了成因分析,认为电子束焊缝成形机制与锁底焊缝结构是导致该缺陷出现的主要因素,通过试验得到了聚焦电流对焊缝根部钉尖尺寸的影响规律,适当改变深熔焊聚焦电流采用上聚焦的方式焊接,可以使钉尖得到有效控制,在此基础上采用圆波扫描电子束焊接,彻底消除了钉尖及根部气孔缺陷。

(3) 在对焊接缺陷控制技术研究的基础上重新调整焊接工艺,焊后样品经表面检验、金相检验、耐腐蚀性能试验等,各项指标均满足要求。

参考文献:

- [1] 杨文斗. 反应堆材料学[M]. 北京: 原子能出版社, 2006.
- [2] 乔红超. 铝合金电子束焊接性能及缺陷分析[J]. 焊接, 2013 (9): 41-44.
- [3] 潘际奎 主编. 焊接手册: 第1卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [4] 周琦, 刘方军. 电子束深熔焊熔质密度分布与熔池流动行为[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 17-20.
- [5] 蔡闰生, 任华友, 袁平生, 等. 电子束焊链状气孔与钉尖缺陷的判别[J]. 无损探伤, 2013, 37(5): 24-26.
- [6] ARMSTRONG R E. Control of spiking in partial penetration electron beam welding[J]. Weld. J, 1970(49): 8.

作者简介: 陶海燕 (1984—) 男, 硕士, 助理研究员, 现就职于华龙国际核电技术有限公司, 目前主要研究核燃料设计、高能束焊接工艺、结构、焊接及结构数值模拟, 已公开发表硕士论文 1 篇, 核心期刊论文 4 篇。

·小知识·

电焊机安全操作规程

1. 工作前认真检查工具, 设备是否完好, 焊机接地是否可靠地接地, 焊机的修理应由电器保养人员进行, 其他人员不得拆修。
2. 工作前应认真的检查工作环境, 确认为正常安全方可开始工作, 工作前穿戴好劳动防护用品。
3. 高空焊接时需佩戴安全带, 安全带记挂时, 一定要远离焊接部位和地线部位, 以免焊接时把安全带烫断。
4. 接地线要牢靠安全, 不准用脚手架、钢丝绳、机床等作接地线。一般原则是焊接点的就近点, 带电设备放置地线一定要小心, 不可把设备导线和地线连接, 以免烧毁设备或发生火灾。
5. 接拆电焊机电源线或电焊机发生故障时, 应会同电工一起进行修理, 严防触电事故。
6. 在靠近易燃地焊接, 要有严格的防火措施, 必要时须经安全员同意后方可工作, 焊后应认真检查, 确认无火源, 才能离开现场。
7. 焊接密封容器时管子应先开好放气孔, 修补已装过油的容器, 应清洗干净, 打开入口盖或放气孔方可进行焊接。
8. 在已使用过的罐体上进行焊接作业时, 必须查明是否有易燃、易爆气体或物质, 严禁在未查明情况之前动火焊接。
9. 焊钳、电焊线应经常检查、保养, 发现有损害应及时修补或更换。
10. 焊接吊钩, 加强脚手架和重要结构应有足够的强度, 并敲去焊渣认真检查是否安全可靠。
11. 在容器内焊接时, 应注意通风, 把有害气体和物质排出去以防中毒, 排完后方可进入内部进行焊接; 在狭小容器内焊接应由俩人, 以防触电事故发生; 容器内油漆未干时, 有可燃物质散发时不准施焊。
12. 雨天或在潮湿的地方焊接时, 一定要注意良好的绝缘, 手脚沾水或衣服和鞋潮湿不得进行焊接, 必要时可在脚下放置干燥的木材。
13. 工作完毕, 必须先断开电源, 关闭焊机, 认真检查工作现场灭绝火种, 方可离开现场。

(摘自: 中国焊接信息网-焊接商务频道信息中心)