

规避母材缺陷的核电常规岛容器焊缝质量提升方法分析

崔振海 孙福成 关浩洋 李永奇
(中广核工程有限公司设备采购与成套中心 广东 深圳 518124)

摘要: 当前国内核电常规岛设备供应商总体上在火电设备设计制造领域都有着丰富的经验,并习惯于火电的思维模式,因此在材料验收、工艺制订、无损检测等各工艺环节,常常以火电的经验开展核电设备制造活动,从而导致制造类不符合项的情况频繁发生。对于制造厂及设备监理方而言,持续提升核电设备质量,从而保证设备安全运行是一个现实的课题。本文从在运核电机组常规岛容器设备焊缝质量现状入手,结合当前制造厂普遍采用的检测方式,以母材验收与下料环节为突破口,以设备监理的视角,把日常工作容器中焊缝质量隐患识别及预防措施作为研究对象,形成可操作的焊缝缺陷规避的方式方法,供相关企业、部门参考运用。

关键词: 核电; 常规岛; 压力容器; 焊接; 缺陷; 规避

0 引言

核电常规岛容器设备包括除氧器、凝汽器、汽水分离再热器、高低压加热器以及其他泵阀连接管道、集箱等。设备材料多采用低碳合金钢,母材以轧钢板、无缝钢管及封头类锻件为主;设备制造过程以焊接工艺为核心,辅理化性能试验、坡口加工、无损检测、热处理、压力试验等工艺和检查环节。以合格母材为基础焊接完成的压力容器,全部承压焊缝的焊接质量构成设备最终质量,是安全特性的最关键因素。根据当前某在运核电机组大修检查的经验反馈,常规岛容器焊缝通过无损探伤发现的超标缺陷较多,虽经过专业返修保证了电站的安全运行,但由此暴露出的工程建造阶段特别是设备制造过程的质量隐患需要给予充分的重视与排除。当前国内对于焊接质量提升的研究及相关文献已十分丰富,本文侧重从母材缺陷对焊缝质量影响及规避方法进行分析讨论。

1 母材验收标准

以某电站常规岛集箱为例,设备采购技术规范书要求的母材无缝钢管超声波探伤(UT),按照 GB/T 5777-2019^[1],对比试样人工缺陷刻槽深度等级按 L2 级执行,刻槽深度与公称壁厚之比为 5%。另要求刻槽最小深度应为 0.2mm、最大深度应为 1.0mm。

容器母材磁粉探伤(MT)按 NB/T 47013-2015 中

的 II 级合格执行验收,线性缺陷磁痕 $\leq 4.0\text{mm}$,圆形缺陷磁痕 $\leq 4.0\text{mm}$ 且在评定框内不大于 2 个,见表 1。

表 1 焊接接头以外其他部件 MT 质量分级

等级	线性缺陷磁痕	圆形缺陷磁痕(评定框尺寸 2.5mm^2 ,其中一条矩形边长最大为 150mm)
I	不允许	$D \leq 2.0$,且在评定框内不大于 1 个
II	$L \leq 4.0$	$D \leq 4.0$,且在评定框内不大于 2 个
III	$L \leq 6.0$	$D \leq 6.0$,且在评定框内不大于 4 个
IV	大于 III 级	

注: L 表示线性缺陷磁痕长度(mm); D 表示圆形缺陷磁痕长径(mm)。

2 焊缝验收标准

仍以上述电站常规岛集箱为例,设备采购技术规范书要求的焊缝超声波探伤(UT)按照 NB/T 47013-2015^[2]I 级进行验收,见表 2。

容器焊接接头磁粉探伤(MT)按照 NB/T 47013-2015^[1]I 级进行验收,即线性缺陷磁痕 $\leq 1.5\text{mm}$,圆形缺陷磁痕 $\leq 2.0\text{mm}$,且在评定框内不大于 1 个,见表 3。

3 质量缺陷

在工程实际中,压力容器的焊接区域(包括焊接热影响区)属于设备整体机械性能薄弱的环节。由于压力容器能否在设计压力以下安全运行主要依靠承压焊缝质量是否过关,因此针对焊缝必须执行严格的验收考核标准以保证压力容器的安全运行。

在焊接热影响区中,相比于过热区(1100°C 以上)、

表 2 压力容器本体焊接接头 UT 质量分级

等级	工件厚度 <i>t</i> /mm	反射波幅 所在区域	允许的单个缺陷 指示长度/mm	多个缺陷累计长度 最大允许值/ <i>L'</i>
I	≥ 6 ~ 100	I	≤ 50	—
	> 100		≤ 75	—
	≥ 6 ~ 100	II	≤ <i>t</i> /3, 最小可 为 10, 最大不 超过 30	在任意 9 <i>t</i> 焊缝长 度内, <i>L'</i> 不超 过 <i>t</i>
	> 100		≤ <i>t</i> /3, 最大不 超过 30	—
II	≥ 6 ~ 100	I	≤ 60	—
	> 100		≤ 90	在任意 4.5 <i>t</i> 焊缝 长度内, <i>L'</i> 不超 过 <i>t</i>
	≥ 6 ~ 100	II	≤ 2 <i>t</i> /3, 最小可 为 12, 最大不 超过 40	—
	> 100		≤ 2 <i>t</i> /3, 最大不 超过 75	—
III	≥ 6	II	超过 II 级者	
		III	所有缺陷 (任何缺陷指示长度)	
		I	超过 II 级者	—

注: 当焊缝长度不足 9*t* (I 级) 或者 4.5*t* (II 级) 时, 可按比例折算。当折算后的多个缺陷累计长度允许值小于该级别允许的单个缺陷指示长度时, 以允许的单个缺陷指示长度作为缺陷累计长度允许值。

表 3 焊接接头 MT 质量分级

等级	线性缺陷 磁痕	圆形缺陷磁痕 (评定框尺寸为 35mm × 100mm)
I	<i>L</i> ≤ 1.5	<i>D</i> ≤ 2.0, 且在评定框内不大于 1 个
II	大于 I 级	

注: *L* 表示线性缺陷磁痕长度, 单位 mm; *D* 表示圆形缺陷磁痕长径, 单位 mm。

相变重结晶区 (850 ~ 1100℃), 不完全重结晶区 (部分相变区) (700 ~ 850℃) 由于大粗晶区增宽, 出现淬硬组织, 韧性和塑性下降, 硬度上升。因此在焊接热影响区中, 不完全重结晶区又是力学性能最差区域。通过焊后适当的热处理, 可在一定程度上将这些不利热影响降至可以接受的程度, 而如果母材中存在缺陷, 则另当别论。

对于压力容器的非焊接区域, 母材执行低于焊缝的验收标准, 能够较好地控制设备的材料采购成本, 从而有效降低整体工程造价。然而对于母材的焊接区域而言, 如果仍执行低于焊缝验收的标准, 则会带来较高的质量风险^[3]。例如, 按照上述 MT 标准验收合格的母材, 势必会有一定数量的“非超标”缺陷流转到焊接区及焊接热影响区域, 从而在焊缝成形后形成超标缺陷。

在母材与焊缝验收过程中执行标准不相同, 也存在类似的质量风险。以 UT 探伤为例, 母材验收执行的是 GB/T 5777-2019, 而焊缝检验时则执行 NB/T 47013-

2015。由于在不同标准中缺陷当量对比换算专业性和技术上过于复杂, 在这种情况下, 带有缺陷的母材进入施焊环节, 对于设备采购方或设备监理方而言, 设备承制方会有较为广阔的“合理”的解释与发挥的空间, 从而将质量隐患带入设备制造的后续环节当中。

考虑到实际检测环境及操作者的人因影响、焊缝成形后实现缺陷 100% 检出率只是理论上的存在, 实际操作中即便是采用多种无损检测手段, 也难免漏检现象发生^[4]。另外, 如在焊缝检查过程中发现母材中既有的超标缺陷, 导致制造类不符合项 (NCR) 发生后, 对这类 NCR 的评估、定性、返修、处理费时、费力, 流转审查程序也相对繁杂, 因此焊前规避母材缺陷的办法更具有重要性和潜在的经济性。

通常在压力容器焊接制造过程中, 制造厂一般要将待焊部件采用临时焊接的方式进行初步定位, 然后再正式施焊, 这种正式施焊前产生的临时焊缝质量通常与正式焊缝存在较大的质量差距。由于各制造厂质量控制水平参差不齐, 控制好的工厂会在正式焊接完成后去除临时焊缝, 并重新按照评定合格的焊接工艺完成最终焊缝成形。然而也存在一些工厂 (或操作者) 不去除临时焊缝, 而是将其带入到最终焊接接头成为正式焊缝的一部分。这种临时焊缝所具有的质量风险与母材质量缺陷具有异曲同工之处, 由于其性质上更倾向于工厂或焊接操作者的主观故意行为, 因此更需要工厂质量管理者、采购方 (或设备监理方) 给予足够的重视, 主动识别风险并予以及早规避。

4 风险规避

根据前述针对压力容器母材缺陷以及临时焊接接头缺陷对于承压焊缝最终质量影响程度的定性分析, 质量隐患总体可以划分为客观类和主观类。主观类隐患来自人因故意, 如临时焊缝不予去除的行为、为节约材料成本利用标准差异打擦边球导致母材超标缺陷混入焊接工序的行为造成的质量隐患; 客观类隐患是指因工厂制造工艺水平不足、技术人员技能不高而未能提前识别并规避掉的质量隐患, 如标准理解不深、检测手段不足造成的质量隐患。排除主观类质量隐患更多依赖于内部管理与外部监督, 以下重点讨论非主观类别的隐患规避方法。

在材料采购验收阶段, 包括材料分包商的出厂检验以及设备厂的入厂复验, 应该分别设置无损探伤环节, 探伤方式至少包括超声波检验和磁粉检验, 并且要求检测后必须出具探伤报告。按照母材验收标准不合格

的材料严格拒收；对于验收合格但包含有探伤类非超标缺陷的，务必在探伤报告中详细记录缺陷的详细位置坐标并配以草图标注、如实记录缺陷日当量及性质（MT 线形或圆形，UT 体积形或面积形），对于线性缺陷及面积形缺陷需要给予特别说明^[5]。

在焊接下料前，需要核对母材探伤报告，如有可能，尽量选择无缺陷的母材；如别无选择，应避免母材缺陷位置作为焊接区域，视焊接方法与母材壁厚不同，最少要保证缺陷位置距焊缝边缘超过 10mm 范围^[6]。

如果母材中非超标缺陷无法避开焊接区域，分为两种情况，一种情况是通过焊接坡口加工，可以将母材去除，这是比较理想的处理方式；另外一种情况是加工坡口后，母材缺陷仍在焊接区域，这种情况务必特别关注，比较稳妥的处理方法是在坡口表面及坡口边缘外 10mm 范围（焊条电弧焊）或 20mm 范围（埋弧焊、等离子弧焊、气体保护焊），增加一次无损探伤检验，探伤方式建议采用渗透探伤（PT）+磁粉探伤（MT）+超声波探伤（UT）；与之前材料探伤合格标准不同，坡口探伤的验收标准需要按照焊缝的合格标准（质量 I 级）执行。

定位焊缝熔入焊接接头的情况应该尽量避免，替代方法可采用辅助工装固定的方式，这种方法的好处是可以同时增加防止焊接变形的工艺手段。在不得不采用定位焊缝熔入焊接接头的方式时，工艺制订时建议增加质量控制点，需要在采购方（或监理方）见证下去除定位焊缝并按照评定合格的焊接工艺完成最终的焊缝成形及后续的焊缝质量检验。

5 结语

本文以核电站常规岛集箱设备为例，从压力容器母

材与焊缝验收所执行的标准差异对比入手，结合工程实际，对直接或间接影响压力容器最终承压焊缝质量的隐患进行分类、分析，重点针对非主观类别的质量隐患，按照质量保守原则，在材料验收、焊接下料、焊接实施、无损检验等各个工艺环节给出规避风险的预防措施建议。将工程实践中常被忽视的定位焊接缺陷，按照母材缺陷进行分析讨论，从而最大限度排除压力容器承压焊缝正式施焊前的各种质量隐患。本文所推荐的隐患识别与规避方法，其适用性、可操作性乃至有效性在实际的工程实践中均得到了验证，国内各设备制造单位、设备采购单位、设备工程监理单位以及设备运营单位可根据自身情况酌情参考。

参考文献：

- [1] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会．无缝和焊接（埋弧焊除外）钢管纵向和 / 或横向缺欠的全圆周自动超声检测：GB/T 5777-2019[S]．北京：中国标准出版社，2019.
- [2] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会．承压设备无损检测：NB/T 47013-2015[S]．北京：新华出版社，2015.
- [3] 刘鹏，赵宝中，曾志，等．焊接质量控制及缺陷分析检验 [M]．北京：化学工业出版社，2020.
- [4] 张应立．焊接常见缺陷及处理 [M]．北京：化学工业出版社，2018.
- [5] 李亚江，王娟．焊接缺陷分析与对策 [M]．北京：化学工业出版社，2014.
- [6] 杰克·巴克霍夫．全面焊接管理 [M]．北京：机械工业出版社，2007.