

# 焊接残余应力对锅炉厚壁部件服役寿命的影响及控制对策

罗召鹏

华电伊犁煤电有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16911

**[摘要]** 锅炉厚壁部件属于能源系统中核心承压元件,焊接工艺不可避免会引入焊接残余应力,对其部件强度、疲劳寿命、尺寸稳定性及抗腐蚀性能产生显著负面影响,威胁其服役寿命。基于此,本文详细阐述了焊接残余应力的产生机理内容,深入分析了其对锅炉厚壁部件结构强度、疲劳性能等方面具体影响,系统探讨了从设计优化、焊接工艺控制到运行管理多层次、多方面的控制对策。目的是为保障锅炉厚壁部件长期安全运行提供理论依据和技术指导。

**[关键词]** 焊接残余应力; 锅炉; 厚壁部件; 服役寿命; 影响机制; 控制对策

**中图分类号:** TK229.8 **文献标识码:** A

## The Impact of Welding Residual Stress on the Service Life of Thick-Walled Boiler Components and Corresponding Mitigation Strategies

Zhaopeng Luo

Huadian Yili Coal and Electricity Co., Ltd.

**[Abstract]** Thick-walled boiler components serve as critical pressure-bearing elements within energy systems. The welding process inherently induces residual stresses, which adversely affect the mechanical strength, fatigue life, dimensional stability, and corrosion resistance of these components, thereby compromising their operational service life. This study systematically examines the formation mechanisms of welding residual stress, provides an in-depth analysis of its effects on structural integrity and fatigue performance, and presents a comprehensive framework for mitigation strategies. These strategies encompass multiple stages, including design optimization, welding process control, and operational management practices. The findings aim to offer theoretical insights and practical guidance for ensuring the long-term safety and reliability of thick-walled boiler components.

**[Key words]** Welding residual stress; Boiler; Thick-walled components; Service life; Influence mechanism; Control measures

### 引言

锅炉厚壁部件具有壁厚大、结构复杂、载荷工况苛刻等特点。和薄壁部件相比,厚壁部件因热容量高,在启停或变负荷时内外壁温差明显,热应力梯度陡峭,厚壁部件应力分布因热应力梯度陡峭而变得复杂<sup>[1]</sup>。同时,它用大锻件或厚板制造,可能存在内部缺陷。厚壁部件采用的材料经多次锻压或轧制,可能有内部问题,而且焊接修复或制造难度大、成本也高。目前,焊接是连接厚壁部件各部分的主要方式,易引入残余应力与变形,在焊缝及热影响区形成疲劳裂纹、应力腐蚀及蠕变破坏。

#### 1 焊接残余应力的产生机理

##### 1.1 非均匀加热与热膨胀

焊接开始时,热源(电弧、激光、电阻热等)集中作用在焊缝区域,让焊缝区域温度急剧升高,进而发生显著的热膨胀<sup>[2]</sup>。并且,焊缝周围的母材温度相对较低,具有一定刚性和约束作用。这

种温度梯度使得高温区的金属在试图膨胀时受到周围冷金属阻碍,从而在焊缝及其热影响区(HAZ)产生压缩塑性应变。而在稍远的高温梯度区域,则可能产生拉伸弹性或塑性应变<sup>[3]</sup>。

##### 1.2 熔池凝固与冷却收缩

焊接热源离开后,熔池金属快速冷却并凝固。冷却过程中,金属从液态转变为固态且体积收缩。固态金属在降温的时候遵循热胀冷缩规律继续收缩。这些收缩变形会受到周围已固结或冷却较快形成金属约束。同时,焊缝金属通常较厚或者填充量大,使得收缩量显著。其受到的约束更强进而致使焊缝及其附近区域产生拉应力<sup>[4]</sup>。并且远离焊缝的母材区域会因受热膨胀和冷却收缩作用被约束,因此,该区域处于压应力状态是热胀冷缩与约束共同影响的结果。

##### 1.3 相变引起的体积变化

对于碳钢和低合金钢这类固态相变材料而言,焊接过程中

的快速加热与快速冷却会促使奥氏体和铁素体、珠光体、贝氏体或者马氏体等组织间产生相变,不同的组织相变过程伴随着体积变化。例如,奥氏体向马氏体转变时伴有体积膨胀现象,向珠光体或者贝氏体转变时则会伴有体积收缩现象,这种由相变所引起的体积变化会进一步加剧焊件内部的应力场<sup>[5]</sup>。

#### 1.4 应力松弛与自平衡

当温度进一步降低,且冷却过程完成之后,材料会渐渐失去塑性变形的能力。在冷却的过程中,局部区域有可能发生应力松弛,以此来适应整体的变形协调状况<sup>[6]</sup>。等整个焊件冷却到室温,并且达到热力学平衡状态时,内部残余应力就会形成一个自相平衡的应力场。这种残余应力场一般以较高拉应力的形式存在于焊缝金属和热影响区,而母材区域则可能存在压应力或者较低的拉应力<sup>[7]</sup>。

### 2 焊接残余应力对锅炉厚壁部件服役寿命的影响

#### 2.1 降低疲劳强度,加速裂纹萌生与扩展

焊接残余应力通常以拉应力形式存在于焊缝及热影响区。其分布和焊接工艺、坡口形式以及拘束条件紧密相关。例如,厚板对接接头采用V型坡口时,根部因多层焊接角变形累积易产生高值拉伸残余应力,X型坡口通过双面对称焊接能在根部形成压应力,进而显著抑制裂纹萌生,当部件承受交变载荷时,残余拉应力和工作应力叠加会使局部应力峰值超过材料疲劳极限,促使微裂纹在焊趾、熔合线等应力集中部位快速扩展。李瑶<sup>[8]</sup>实验发现残余拉应力可使低碳钢焊接接头疲劳强度降低30%~50%,通过喷丸强化引入表面压应力能让疲劳寿命提升2~3倍。

#### 2.2 削弱抗脆断能力,诱发低应力脆性破坏

锅炉厚壁部件在启停或者变负荷的过程中,内外壁温差会导致热应力梯度变得十分陡峭。和焊接残余应力相互耦合后,形成三向拉伸应力状态。对于高强度钢或者在低温工况的情况下,材料塑性变形能力会明显下降。残余应力就会成为裂纹扩展的主要驱动力。例如,薛河<sup>[9]</sup>实践分析某电厂超高压汽包由于焊缝根部存在未熔合的缺陷,在残余拉应力和启停热应力共同作用之下,运行仅2万小时就发生了脆性断裂。断裂面呈现出典型的解理特征,当残余应力水平超过材料屈服强度的60%时,即便工作应力远低于设计数值,依然有引发脆性断裂的危险。

#### 2.3 促进应力腐蚀开裂,缩短腐蚀环境服役周期

应力腐蚀开裂(SCC)是拉应力和腐蚀介质协同作用产生的结果。焊接残余应力通过以下机制加速SCC进程:一是应力叠加效应,残余拉应力和工作应力叠加之后,局部应力超过SCC临界阈值,从而促使裂纹快速萌生。例如,某核电站厚壁管道在含氯离子环境中服役时,焊缝区因为残余应力集中,仅仅3年就出现穿透性裂纹,而母材区没有发生腐蚀<sup>[10]</sup>。二是电化学腐蚀加速,残余应力致使焊缝区晶格畸变,提高了金属活性,进而加速阳极溶解反应。实验显示,残余应力可让不锈钢在海水中的腐蚀速率提升10倍以上。三是氢致开裂风险,残余应力诱导氢原子向高应力区聚集,形成氢脆敏感区。对于P91马氏体钢等氢敏感材料,残余应力和氢的协同作用可使其断裂韧性降低。

#### 2.4 影响尺寸稳定性,制约机械加工精度

焊接残余应力会通过以下途径对部件尺寸稳定性产生影响:一是应力松弛变形,在长期服役过程中,残余应力会随时间缓慢释放,进而使部件产生蠕变变形。例如,电厂高温再热器出口联箱在运行5年之后,由于残余应力松弛,使得管座间距偏差超出标准,引发了泄漏事故<sup>[11]</sup>。二是机械加工变形,在切削加工去除材料的时候,残余应力重新分布,会导致工件出现翘曲情况。对于厚壁部件而言,加工后尺寸偏差达到设计值1%~2%,就会影响装配精度。三是热处理变形,在焊后热处理过程中,残余应力和温度梯度相互耦合,会引发不均匀收缩。

### 3 焊接残余应力的控制对策

#### 3.1 优化焊缝设计

焊缝设计直接影响焊接残余应力分布与大小,通过优化坡口形式、焊接顺序和接头结构,能有效控制应力集中的情况,以厚板对接接头为例,V型坡口容易在根部产生高值拉伸残余应力,而X型坡口依靠双面对称焊接可在根部形成压应力抑制裂纹萌生<sup>[12]</sup>。另外,采用窄间隙坡口能够减少填充金属的用量,降低热输入量进而减小收缩变形情况。在焊接顺序方面,对称分段退焊法可平衡热膨胀与收缩,避免出现局部应力集中的现象。对于复杂结构来说,可通过合理布置焊缝位置,避免交叉焊缝或密集焊缝导致应力叠加。同时优化接头结构,比如增加过渡圆角减少拘束度,降低焊接过程刚性约束以减少残余应力生成。最后,设计阶段还应结合数值模拟技术对焊缝应力分布预测,指导设计参数调整实现源头控制残余应力目标<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 改进焊接工艺

焊接工艺参数对残余应力的影响十分显著,通过调整热输入、焊接速度和层间温度可优化应力分布状况。可采用低热输入焊接方式(脉冲TIG焊)可以减小熔池的体积大小,降低冷却收缩的具体数量,进而减小残余拉应力的数值。并根据材料的厚度与结构的特点,精确控制焊接速度的快慢。此外,采用多层多道焊,合理安排每道焊缝的焊接顺序,平衡收缩变形的状况。对于厚壁部件,还可结合预热与后热的工艺手段,通过预热能够降低温度梯度的大小,减少热应力的产生;通过后热促进氢的扩散过程,避免冷裂纹的出现。

#### 3.3 强化无损检测

无损检测属于控制焊接残余应力的重要环节,能够及时发现内部缺陷避免缺陷与残余应力耦合引发早期失效。超声波检测因其分辨率高,适用厚壁部件检测。针对表面缺陷,磁粉检测和渗透检测灵敏度高,能够检测出微小裂纹。此外,衍射时差法可定量评估残余应力分布有助于制定针对性检测方案,确保早发现、早处理缺陷。

#### 3.4 实施应力消除处理

应力消除处理通过热处理或者机械方法能够显著改善应力状态。热处理当中,焊后整体退火是把工件加热到再结晶温度以下,保温一定时间之后缓慢冷却,可促进应力松弛并降低残余拉应力<sup>[14]</sup>。针对厚壁部件而言,局部退火需严格控制温度均匀性,

防止因温度梯度而导致新的应力生成。对于大型结构, 振动时效 (VSR) 法借助机械振动让工件产生微小塑性变形来实现应力释放。其优点是设备简单且周期短。对于表面残余应力, 喷丸强化可引入压应力层来抵消拉应力, 进而提升疲劳强度。

#### 4 应用案例: 大型超临界锅炉汽包

##### 4.1 部件概况

选取某600MW超临界机组锅炉汽包为应用部件, 汽包材质选用SA-516Gr. 70低合金钢且筒壁厚约180mm, 其内部设置有复杂焊缝像封头拼接焊缝和管座角焊缝等, 汽包需要承受高温高压的工作环境, 并且会频繁经历启停以及变负荷操作, 疲劳损伤属于主要失效模式之一。

##### 4.2 残余应力控制措施

(1) 焊前预热: 依据材料特性和壁厚情况, 采用燃气加热的方法把焊缝及其附近区域预热到150°C左右, 目的是减小焊接过程中产生的温差应力、降低冷却速度并减少冷裂纹风险。

(2) 优化焊接工艺: 选用低氢型焊条, 采用多层多道焊工艺且严格控制焊接热输入在 $\leq 1.8\text{kJ/mm}$ 和层间温度在 $\leq 250^\circ\text{C}$ , 对于筒体环焊缝要采用对称分段退焊法也就是从焊缝中心向两端交替进行焊接, 以此平衡焊缝收缩变形并减少整体弯曲应力。

(3) 焊后热处理 (PWHT): 整体热处理方式, 将汽包缓慢加热到约620°C (低于材料的Ac1温度) 并保温约4小时, 让材料内部发生塑性变形来松弛残余应力, 随后再缓慢冷却到室温, PWHT是降低厚壁承压部件残余应力的最有效方法。

##### 4.3 效果评估

采用现场贴片应力释放法对PWHT前后汽包开展残余应力检测, 检测结果表明焊缝及其热影响区峰值残余拉应力, 从焊后的300-350MPa以上降低至PWHT后的80-100MPa以下, 实际运行跟踪情况显示该汽包在频繁启停工况下疲劳损伤速率显著降低, 单次冷态启停的疲劳寿命损耗从未控制时接近100%降低至约20%-25%, 有效延长了汽包运行寿命并保障了机组安全稳定运行。

#### 5 结束语

焊接残余应力的产生核心在于焊接时材料极端热循环及引发物理冶金变化。致使锅炉厚壁部件服役寿命影响降低。本文建议优化焊缝设计像坡口形式和焊接顺序从源头减少应力集中, 改进焊接工艺如低热输入焊接与层间温度控制来降低应力生成, 强化无损检测利用超声波和TOFD技术及时发现缺陷与应力异常, 实施应力消除处理例如整体退火和振动失效来实现应力松弛。

#### [参考文献]

- [1] 魏佳贵, 衡鑫, 阴艺, 等. 电厂锅炉超厚壁集箱材料选择与焊接工艺优化[J]. 模具技术, 2024, (05): 88-94.
- [2] 曹宇光, 王宇, 赵前坤, 等. 焊接残余应力对含裂纹环焊缝管道承载能力的影响[J]. 焊接学报, 2025, 46(10): 15-23.
- [3] 梁伟, 李希贤, 邓德安. 焊接变形对大型薄板结构承载能力的影响研究[J/OL]. 机械工程学报, 1-11 [2025-11-07].
- [4] 郑文健, 胡铭汇, 余洋, 等. 高镁铝合金焊接接头软化行为对焊接残余应力的影响研究[J/OL]. 机械工程学报, 1-10 [2025-11-07].
- [5] 张豪, 张紫辰. 波形钢腹板/平钢板焊接接头构件温度场及残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程材料, 2025, 49(9): 116-123.
- [6] 李冠楠, 毛峙淑, 王重阳, 等. 外部拘束对NM450TP钢T字接头焊接残余应力的影响[J/OL]. 机械工程学报, 1-12 [2025-11-07].
- [7] 刘小光, 朱伟庆, 周波, 等. 厚板T型接头焊接残余应力的形成机制与演变过程[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(4): 179-189.
- [8] 李瑶. 工程机械板焊件对接焊缝区断裂性能预测方法研究[D]. 长安大学, 2023.
- [9] 薛河, 贾宇磊, 路景智, 等. 残余应力对压痕硬度的影响分析[J]. 机械设计与制造, 2025(1): 95-98.
- [10] 陈明亚, 余伟炜, 韩姚磊, 等. 核电厂厚壁承压管道异种钢焊缝的焊接残余应力数值仿真研究[J]. 机械强度, 2025, 47(8): 59-65.
- [11] 王小龙. 电厂锅炉高温再热器联箱技术改造暨裂纹分析与处理[J]. 中国航空, 2024(24): 45-47.
- [12] 高海洋. 疲劳裂纹扩展和焊接残余应力的耦合影响研究[D]. 江苏科技大学, 2024.
- [13] 金宇华. 爆炸消除焊接残余应力的参数研究及数值模拟[D]. 武汉科技大学, 2019.
- [14] 李明. 基于固有应变法的厚壁压力容器焊接残余应力研究[D]. 北京工业大学, 2018.

#### 作者简介:

罗召鹏(1984--), 男, 汉族, 山东省日照市人, 本科, 工程师, 研究方向: 锅炉。