

特殊热处理在过热器弯头焊接残余应力控制中的应用分析

崔广军¹ 崔梦尧²

1. 国能浙江余姚燃气发电有限责任公司 浙江余姚 315400

2. 芜湖职业技术大学 安徽芜湖 241000

摘要: 过热器弯头在高温蒸汽条件下长期承受热循环与复杂应力场, 其焊接部位残余应力若积聚过高, 往往诱发蠕变裂纹提前萌生、界面组织发生失稳并引出服役变形等隐患, 因此如何稳定而可控地释放应力、维持接头组织的均匀性, 是影响弯头服役寿命与运行安全的关键环节。特殊热处理因加热方式更灵活、温控更可调、对应力释放规律契合度更高, 而在工程现场逐渐展现出较强适应性, 由此形成了区别于传统处理模式的实用价值。围绕热过程中的组织演化、应力松弛机理及参数敏感性特征进行分析, 可为焊接质量的提升与高温部件的寿命延展提供可靠技术支点。

关键词: 过热器弯头; 焊接残余应力; 特殊热处理; 应力控制; 耐热钢

引言

高温锅炉系统中的过热器弯头在长期运行中往往处于温度梯度显著、内部压力持续波动的状态, 加之弯曲结构的几何不均使应力集中更易出现, 使得焊缝区域在服役早期便形成较高残余应力并随运行时间积累, 其潜在风险随之加深。焊接过程中产生的热循环不均、相变伴生的体积变化以及冷却速率差异, 是弯头残余应力形成的主要来源, 若缺乏有效调控, 热疲劳、腐蚀裂纹及蠕变损伤往往在局部率先显现。为了降低上述风险, 现场工程逐渐引入更具针对性的特殊热处理方式, 使加热分布、温度梯度与应力松弛过程得以更精细地掌控, 由此提升焊接接头的稳定性与运行可靠性, 为高温部件的安全服役奠定必要基础。

一、过热器弯头焊接残余应力的形成机理与危害分析

(一) 焊接热循环与组织变化导致残余应力形成的机理分析

过热器弯头在焊接加热与冷却的不断交替中, 其局部温度场与组织状态往往呈现剧烈波动, 而由此产生的非均匀膨胀与收缩便使残余应力在短时间内迅速积聚, 这一过程在壁厚变化显著的弯曲段尤为突出, 热影响区的相变速率、晶粒取向以及塑性变形能力相互交织, 使焊缝及邻区形成具有明显梯度分布的不稳定应力场。高温区位错密度的提升与低温区弹性回复的叠加, 使拉伸

与压缩应力在截面内同时存在, 材料内部的组织演化也因相界迁移、碳化物重新分布而进一步放大应力差异^[1]。当温度梯度未能顺利过渡时, 局部结构甚至会在冷却区间出现轻微约束性变形, 这些细微畸变积累至一定程度便成为后续残余应力难以释放的源头。

(二) 残余应力对过热器弯头服役性能的影响分析

在高温蒸汽长期侵蚀和压力周期反复叠加的运行环境中, 残余应力的存在往往使焊接区域的力学响应更加敏感, 局部拉伸应力与外载荷叠加后易使晶界处的微裂纹提前萌生, 而高温下蠕变与氧化作用的耦合又会促使这些裂纹沿组织弱化方向扩展, 使接头变得更为脆弱。残余应力若在截面内部形成封闭性分布, 会使原本均匀受力的通道发生偏移, 使弯头出现局部塑形变形、壁厚应力迁移等变化, 由此造成流动介质冲刷路径与温度场分布的改变, 在炉膛运行中形成连锁性影响。此外, 当残余应力与工作应力方向重叠时, 腐蚀疲劳的发生几率显著升高, 在应力集中一旦跨越材料可承受阈值后, 裂纹扩展速度便呈指数式提升, 使运行风险加重。残余应力隐藏性强、可积累、难直接察觉, 但其对整体寿命与结构稳定性的影响始终深远, 因此在工程应用中对其加以有效控制, 已是提升焊接部件安全性的必要环节。

二、特殊热处理技术在残余应力控制中的作用机理与参数特性

(一) 分区控温衔接热流的机理逻辑

在焊接接头区域形成的温度梯度往往呈陡峭态势,

弯头壁厚变化又强化了这一不均匀分布,使热影响区与基体之间的热流通道更为复杂,而分区控温的引入正是依托对温度场流动方向的梳理,使加热过程不再受制于整体升温,而是围绕焊缝中心、热影响区、弯曲段三个关键区域进行差异化布局,借助温度缓冲区削弱热收缩的集中效应,使组织转变、体积变化与塑性松弛过程更为协调。温度场一旦趋于平稳,应力释放路径便随之清晰,传统整体加热模式中易出现的局部过热与组织粗化现象亦显著降低。分区控温在厚壁弯头上尤其意义,例如壁厚36 mm以上的P92材料,其相变区域与塑性区位置往往并不重叠,若加热区与控制区不能形成有效过渡,内部残余应力便会在降温阶段重新积聚,因此分区控温的精细化调整,实质上是对应力场进行再构型,使热处理后的组织与应力状态朝更加稳定的方向收敛^[2]。

(二) 局部加热稳控组织的作用路径

局部加热技术因可在焊缝邻域形成高能密度的定向热源,使材料内部的组织演化更具指向性,在弯头这种曲率复杂、壁厚不均的结构中显得尤为契合。感应加热、红外加热等方式能够借助可控热流实现对局部区域的精准干预,使位错滑移、碳化物重新分布、相界迁移等微观过程在受控温度范围内顺利进行,由此建立更为有序的组织结构。局部加热在应力控制方面也表现出良好稳定性,例如在某电厂检修中,弯头焊缝处的局部加热处理使残余拉伸应力下降近40%,并在随后的运行巡检中未出现周期性形变,表明局部加热在释放高峰残余应力的同时,也改善了组织的均匀程度。其优势还体现在能耗低、响应快、可在狭窄空间操作等方面,为特殊热处理在大型锅炉检修环境中的推广奠定基础。

(三) 温度梯度调和应力的关键参数

特殊热处理的参数设定常与材料本身的导热特性、相变温区、热膨胀系数密切相关,而温度梯度与升降温速率又是决定应力释放效率的核心因素。当升温速度偏快,热膨胀差异会在短时间内迅速放大,使组织无法及时缓冲;而温度过低又难以驱动应力松弛机制启动,因此在实践中热处理窗口的设定需结合材料的蠕变速率、碳化物溶解特性与晶粒稳定区。例如对T91材料而言,保温区间若在730–760℃之间维持足够时间,可在不引发晶粒粗化的前提下增强位错迁移,同时改善热影响区硬度分布。在降温曲线中,冷却速率控制往往与残余压应力的形成高度相关,若梯度过于陡峭,组织再次产生新的应力峰值,因此采用分段降温与缓冷结合的模式更

能使应力释放与组织恢复保持同步过程,这一逻辑在弯头焊缝这种多曲面结构中显得尤为重要。

(四) 微观演化驱动应力松弛的深层机制

特殊热处理的核心价值不仅体现在外部温度的控制,更体现在内部组织的再平衡过程,当热能输入促使位错密度下降、亚晶结构重新排列时,材料原有的畸变状态便逐步缓解,使宏观残余应力随之下降,而相变行为、碳化物演化以及晶界扩散的参与,又进一步推动了应力的松弛与再分布^[3]。在某些耐热钢中,热处理促使亚稳态碳化物发生细化,使组织稳定性提高,由此延缓高温环境下的微裂纹萌生;在焊接接头中,这种结构调整还可弱化热影响区的软化趋势,使材料在服役过程中保持更均衡的载荷响应。微观机制的积极作用往往在宏观层面呈现为硬度均匀、尺寸稳定和裂纹敏感性降低的综合表现,这些变化相互叠加,使特殊热处理成为调和残余应力、延展弯头寿命的重要路径,也使其在复杂运行工况下的长期可靠性更具说服力。

三、特殊热处理在过热器弯头焊接工程中的应用路径与实施策略

(一) 工序统筹与流程贯通的应用路径

在过热器弯头的焊接处理中,特殊热处理往往不是孤立环节,而是与焊接准备、温度控制、接头整形及应力评估形成紧密衔接的体系,使整个流程呈现出目标一致、节奏统一的技术特征。加热结构的布置、测温点的分配、控温区的划分均需在焊接计划之初同步考虑,使热输入的分布、组织的变化轨迹与应力松弛的节奏能够互相匹配,由此构成较为完整的应力调控路径。弯头几何的曲率变化常形成热流绕行与应力集中区域,加热设备若无法根据这些结构特征进行合理配置,热处理过程便难以达到稳定效果,因此提前建立热场模型、确定关键控温区、使局部与整体行为保持协调,是应用路径的基点。

在实际实施中,温度曲线的设定既关涉应力释放的幅度,也影响组织恢复的均匀性,因此加热、保温、降温三个阶段的节奏往往需要借助过程分析来把握。当温度升至材料的应力释放区间后,组织内部的位错开始活化、晶界迁移逐步加深,应力峰值随之下降,而保温阶段的延续便使这一趋势得到巩固,若降温阶段的梯度配比不合理,前一阶段的积极效果便会被部分抵消,因而降温行为与先前过程的耦合程度对最终效果尤为关键。为了更直观呈现各阶段在特殊热处理中的作用关系,可

见表1所示。

表1 特殊热处理过程中关键阶段的功能侧重与作用特点

阶段	热行为特征	对应机制	作用侧重点
加热阶段	温度上升、梯度建立	位错活化启动、相变预准备	减弱局部应力集中、构建可控热场
保温阶段	温度稳定、组织缓变	晶界迁移、碳化物调和	巩固应力释放、提升组织均匀性
降温阶段	温度回落、梯度缓解	应力再分布、结构稳定化	防止二次应力生成、保持尺寸稳定

这一路径既强调加热过程的动态协调，也凸显结构性控制的重要性，使特殊热处理从“局部行为”走向“整体调节”，为弯头焊接质量的提高奠定了坚实基础。

（二）温控协同与场景适配的实施策略

热处理的实施不仅依赖温度的准确控制，更需要热场、应力场与组织场在动态过程中保持协调，使工艺参数与结构特征之间建立起可相互作用的匹配关系。随着加热设备性能的提升与监测手段的不断完善，温控系统逐渐从手动调节向自动连续调节过渡，焊缝及其周边区域的温度分布因而更加清晰，温度响应速度也更具连续性。在复杂结构上，热场难以自然形成均匀状态，若温度扰动未被及时感知，处理效果便会出现波动，而借助更多实时监测点、构建热场数据的动态反馈链条，弯头局部与整体之间的温度协调便得以维持。

实施策略的重点往往在于调整节奏、改善一致性，使过热器弯头在应力释放过程中保持稳定路径。当控温算法与加热装置形成闭环调节时，温度偏移便能在较短时间内获得修正，使热输入方向、幅度与节奏逐渐贴近目标区间。场景的多样性亦促使策略不断延展，例如在狭窄空间中可采用低包络加热装置，以避免大面积热扩散；在壁厚差异显著的段落中则需分区设定不同加热功率，使两侧区域的组织变化保持同步趋势。策略的核心始终围绕保持稳定性、提升均匀性与构建可复制性，使热处理在不同工程条件下都能发挥可预期的积极作用。

（三）智能监测与过程可视的强化机制

随着监测技术的进步，特殊热处理的可控性与透明度显著增强，温度场与应力场的变化得以更精准呈现，使控制行为更具针对性、预测性与适应性。数字温控平台使温度分布以连续曲线形式展现，而红外成像等工具能将表面温度场的变化直观映射，使操作人员能在热处理过程中及时识别异常点位；应力监测传感器则借助材

料的热响应变化推断内部应力释放趋势，使热处理不再停留于经验判断，而是具有可量化的控制依据^[4]。

强化机制的价值在于赋予过程更多主动性，使系统能够在出现偏离征兆时快速响应，而不是在结果显现后才调整操作方向。智能分析模块能够对历史数据进行拟合，识别应力释放的最优窗口，使保温时间、加热功率与降温速率的配置更具精准性；可视化界面又使复杂热行为得以以图示方式呈现，便于现场人员判断节奏是否合理、热场是否稳定；过程中的异常值自动标注机制还能减少监测盲区，使热处理质量保持稳健状态。随着系统功能不断完善，特殊热处理逐渐形成从“被动执行”向“主动调控”的演进趋势，使过热器弯头焊接部位的应力状态更易掌控，材料的组织稳定性也随之增强，为高温部件的长期运行提供更坚实的保障。

结语

在高温部件不断迈向更高效率、更长寿命的要求下，特殊热处理在焊接残余应力调控中的价值愈发凸显，材料内部的组织趋稳、应力场的重塑与热过程的可控性相互交织，使弯头这种结构复杂的受热元件获得更稳健的服役基础，而随着温控技术的精细化、监测手段的实时化与工艺路径的智能化，热处理正逐步形成一种兼具可预测性与适应性的调节能力，使焊接接头在高温环境中的可靠性与耐久性不断提升，未来若在工况模拟、参数自适应与数字孪生等领域进一步深化，其在能源装备中的应用空间仍将不断延展，亦将持续推动高温压力系统向更安全、更高性能的方向稳步发展。

参考文献

- [1]姜保米, 吴志祥. 电站锅炉过热器系统典型部件焊接工艺[J]. 焊接技术, 2024, 53(02): 74-78.
- [2]王振宇, 乔长伟, 刘永峰. T91/92钢集箱接管焊接接头热处理质量标准控制[J]. 河南电力, 2020, (S2): 71-74.
- [3]吴多浩. 不锈钢焊接结构残余应力检测及力学性能研究[J]. 安装, 2026, (01): 88-90.
- [4]李巍, 曹小龙, 李聚涛, 等. 热处理对GTAW焊接合金钢残余应力松弛的作用[J]. 模具制造, 2026, 26(01): 126-128+131.