

探究金属热处理在热能动力工程中的应用

马永泉 朱广栋 尚国强
山东电力工业锅炉压力容器检验中心有限公司 山东 济南 250003

摘要：金属热处理在热能动力工程中应用广泛，通过调控金属内部组织结构，显著提升材料机械性能、耐热性与耐蚀性。在火力发电领域，锅炉管材采用调质处理与抗氧化涂层协同设计，可延长使用寿命；汽轮机叶片经等温淬火与晶界强化处理，满足冷热循环需求。核能装备中，反应堆压力容器通过回火脆性控制技术确保服役安全，蒸汽发生器传热管则采用冷加工+热处理复合工艺提升耐蚀性。

关键词：金属热处理；热能动力工程；应用

引言：热能动力工程作为现代工业的关键领域，涵盖火力发电、核能利用及工业余热回收等，其设备运行的稳定性与安全性高度依赖材料性能。金属热处理通过精准调控材料的组织结构与性能，成为提升设备可靠性的核心技术创新。面对高温氧化、热疲劳、辐照损伤等复杂工况，如何优化热处理工艺以实现材料高强度、高韧性与耐环境腐蚀的平衡，成为保障热能动力装备长效服役的核心挑战，也推动着该领域技术不断革新。

1 金属热处理技术基础与工程需求

1.1 热处理技术分类与原理

(1) 整体热处理：退火通过缓慢加热保温再缓冷，调控晶粒大小与内应力，实现组织软化；正火冷却速度快于退火，获得细珠光体组织，提升材料强度；淬火利用快速冷却使奥氏体转变为马氏体，显著提高硬度；回火则降低淬火内应力，调整马氏体组织，平衡硬度与韧性，四者通过温度与冷却速度协同实现组织调控。(2) 表面热处理：渗碳通过高温下碳原子渗入表层，形成高碳马氏体，增强表面硬度与耐磨性；渗氮利用氮原子形成高硬度氮化物，兼具耐蚀性；激光熔覆借助高能激光使涂层与基体快速熔凝，形成致密强化层，实现表面性能提升。(3) 新型技术：形变热处理结合塑性变形与热处理，细化晶粒并引入位错，改善力学性能；磁场辅助热处理通过磁场调控原子扩散与相变过程，优化微观结构，提升材料综合性能。

1.2 热能动力工程的特殊环境要求

(1) 高温氧化与热腐蚀：锅炉受热面管材在高温烟气中，易发生氧化反应生成氧化膜，且烟气中腐蚀性介质会加速腐蚀，影响管材寿命。(2) 热疲劳与蠕变：汽轮机转子、叶片长期处于冷热交替环境，产生热疲劳裂纹；同时在高温高压下，材料发生缓慢塑性变形即蠕变，导致部件失效。(3) 应力腐蚀开裂：核电压力容器

受内部介质腐蚀与结构应力共同作用，易产生裂纹，威胁设备安全。

1.3 材料-工艺-性能匹配模型

(1) 相变动力学与TTC参数设计：基于相变动力学规律，通过设计温度、时间、成分(TTC)参数，精准控制相变过程，实现预期组织与性能。(2) 残余应力分布影响：热处理后材料内部的残余应力分布，会影响其在热循环中的稳定性，合理调控残余应力可提升材料抗热疲劳等性能。

2 金属热处理在热能动力工程中的应用分析

2.1 火力发电设备

(1) 锅炉管材(T91/T92钢)的调质处理与抗氧化涂层协同设计：T91/T92钢作为锅炉受热面核心管材，需通过“淬火+高温回火”调质处理，细化马氏体组织并析出碳化物，提升高温强度与抗蠕变能力。同时，为应对高温烟气腐蚀，在调质后采用等离子喷涂制备Al₂O₃-TiO₂抗氧化涂层，热处理与涂层协同作用，使管材寿命延长30%以上。(2) 汽轮机叶片的等温淬火工艺与晶界强化机制：汽轮机叶片多采用马氏体不锈钢，通过等温淬火工艺，在贝氏体转变区保温，获得强韧性优异的贝氏体组织，避免传统淬火易产生的裂纹缺陷。同时，配合微量硼元素添加，通过热处理促进硼在晶界偏聚，强化晶界结合力，提升叶片抗热疲劳性能，满足机组启停时的冷热循环需求^[1]。(3) 案例：某超临界机组高压加热器爆管事故的热处理溯源：该机组高压加热器管(20G钢)爆管后检测发现，管材热处理时存在保温时间不足问题，导致珠光体组织不均匀，局部晶粒粗大。在长期高温高压运行中，粗大晶粒区域率先发生蠕变变形，最终引发爆管。后续通过优化“正火+回火热处理工艺，严格控制保温温度与时间，同类事故发生率降至零。

2.2 核能装备

(1) 反应堆压力容器低合金钢的回火脆性控制：反应堆压力容器用SA508Gr.3钢，需通过“调质+稳定化热处理”控制回火脆性。在620-650℃回火后，缓慢冷却至300℃以下，抑制磷、锡等有害元素在晶界析出；同时添加钼元素，通过热处理促进钼形成碳化物，阻碍有害元素偏聚，确保容器在服役周期内无脆性断裂风险。(2) 蒸汽发生器传热管的冷加工+热处理复合工艺：传热管采用Inconel690合金，先通过冷拔加工提升强度，再进行1050-1100℃固溶处理，消除冷加工内应力并溶解析出相，恢复合金塑性；最后经700℃时效处理，析出 γ 相，实现强度与耐蚀性的平衡，满足核电站一回路高温高压水环境要求。(3) 模拟辐照环境下热处理对材料肿胀的抑制作用：在模拟反应堆辐照环境的试验中，对316LN不锈钢进行“低温时效(400℃)+高温退火(1050℃)”处理，发现热处理可促进辐照产生的空位与间隙原子复合，减少空位团聚集，使材料辐照肿胀率从5%降至1.2%，显著提升材料抗辐照性能。

2.3 工业余热利用装置

(1) 换热器用不锈钢的固溶处理与晶间腐蚀防护：换热器304不锈钢管易因碳化物析出产生晶间腐蚀，通过1050-1100℃固溶处理，将碳化物重新溶解于奥氏体中，随后快速冷却，抑制碳化物在晶界析出。同时，配合钛元素微合金化，热处理时钛优先与碳结合，进一步降低晶间腐蚀风险，适应余热回收系统中复杂的介质环境^[2]。(2) 生物质锅炉耐热铸铁的孕育处理优化：生物质锅炉炉排采用HT300耐热铸铁，传统孕育处理易导致石墨形态不规则。通过优化“硅铁孕育+低温退火”工艺，在浇注前加入0.8%硅铁孕育剂，促进石墨球化；随后在650℃退火，消除铸造内应力，使铸铁的高温硬度(500℃)提升至HB220以上，抗生物质灰渣腐蚀能力增强25%。

3 金属热处理工艺优化与技术创新

3.1 多尺度数值模拟方法

(1) 宏观尺度：ANSYS热力耦合场模拟淬火变形：借助ANSYS软件构建工件三维模型，耦合温度场与应力场，模拟淬火过程中热量传递与应力演化规律，精准预测工件变形量。例如对大型轴类零件，通过模拟优化冷却水路布局，将淬火变形量控制在0.1mm以内，减少后续加工余量。(2) 微观尺度：PhaseField模型模拟相变组织演化：基于PhaseField(相场)理论，建立微观组织演化数学模型，模拟奥氏体向马氏体、珠光体等相变过程中晶粒生长、相界面迁移规律。可预测不同冷却速度下的组织形态，为工艺参数调整提供微观层面依据，如优化弹簧钢淬火工艺，使马氏体含量提升至95%以上^[3]。

(3) 案例：某汽轮机缸体热处理残余应力场的仿真验证：针对30Cr2Ni4MoV钢汽轮机缸体，采用多尺度模拟先通过宏观热力耦合模拟预测残余应力分布，再结合微观相场模型分析组织对residualstress的影响。仿真结果与实际钻孔法测量值误差小于8%，验证了模拟可靠性，据此优化回火温度，使缸体残余应力降低30%。

3.2 智能控制技术应用

(1) 基于红外测温的实时淬火温度闭环控制：在淬火工位安装红外测温仪，实时采集工件表面温度数据，通过PLC系统与预设温度曲线对比，自动调节冷却介质流量与压力，实现淬火温度±5℃精准控制，解决传统工艺温度波动大导致的组织不均问题。(2) 机器学习算法在热处理参数预测中的应用：以历史工艺数据(温度、时间、冷却速度)与性能指标(硬度、韧性)为样本，训练BP神经网络模型，可预测不同参数组合下的材料性能。某车企应用该技术，将齿轮热处理工艺参数调试周期从7天缩短至2天，性能合格率提升至98%。(3) 工业4.0背景下的热处理生产线数字化改造：通过物联网连接加热炉、冷却设备、检测仪器，构建数字化管理平台，实现工艺参数实时监控、生产数据追溯与远程运维。某重工业企业改造后，生产线能耗降低15%，设备故障率下降20%。

3.3 绿色热处理技术

(1) 真空低压渗碳技术的节能效应：相比传统气体渗碳，真空低压渗碳在0.1-1mbar低压环境下进行，碳势控制更精准，渗碳时间缩短20%-30%，且无需使用甲醇、丙酮等渗剂，能耗降低25%，同时减少有害气体排放。(2) 感应加热替代传统盐浴炉的减排潜力：感应加热通过电磁感应使工件自身发热，加热效率达85%以上，较盐浴炉(效率约40%)节能50%；且无盐浴废渣、有害蒸汽产生，某轴承厂替代后，年减少固废排放120吨，VOCs排放降低90%。(3) 热处理废热回收系统的设计实践：在加热炉排烟管道安装余热锅炉，回收烟气余热产生蒸汽，用于车间供暖或生产用汽；同时在冷却水池设置换热器，回收冷却水余热预热淬火介质。某热处理厂应用后，年回收余热折合标准煤800吨，减排CO₂约2000吨。

4 金属热处理在热能动力工程应用中的关键问题与解决策略

4.1 工艺稳定性挑战

(1) 大型工件热处理中的温度均匀性控制：核电蒸发器管板多为直径3-5m、厚度超1m的低合金钢制大型构件，热处理时易因受热面积大、热量传递不均，导致内外温差达50-80℃，引发组织不均与残余应力集中。若温

度偏差超标，管板与传热管的焊接部位易出现应力腐蚀隐患，威胁核电设备安全运行。（2）解决方案：分区加热与气流循环优化设计：采用多区温控加热炉，将炉腔划分为中心、过渡、边缘3-5个独立加热区，通过热电偶实时采集各区域温度，利用PLC系统精准调节每个加热区的功率，使管板内外温差控制在 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 以内；同时在炉内加装导流风扇与气流导向板，优化热气流循环路径，减少局部温度死角，某核电设备厂应用该方案后，管板热处理合格率从78%提升至99%。

4.2 材料性能矛盾平衡

（1）高强度与高韧性不可兼得的解决路径：马氏体时效钢在热能动力设备核心部件（如高压阀门阀芯）中应用广泛，传统淬火+回火热处理虽能通过析出金属间化合物提升强度（抗拉强度可达1800MPa以上），但会导致韧性下降（冲击功低于30J），在低温或冲击载荷下易断裂。（2）复合热处理工艺（深冷处理+回火）的创新应用：采用“淬火→深冷处理→分段回火”复合工艺，淬火后将工件置于-196℃液氮中保温2-4h，促进残余奥氏体向马氏体转变，同时细化析出相；随后进行200℃低温回火与450℃中温回火，低温回火消除深冷应力，中温回火调控金属间化合物析出形态与分布。该工艺使马氏体时效钢冲击功提升至65J以上，同时保持1700MPa的高强度，满足阀芯“耐高压+抗冲击”的双重需求^[4]。

4.3 检测与评价标准

（1）非破坏性检测技术：传统破坏性检测（如钻孔法）会损伤热能设备部件，而X射线衍射技术可通过分析晶体衍射峰位移，无创测定工件表面及亚表面（深度0-50 μm）的残余应力，分辨率达 $\pm 5\text{ MPa}$ 。在锅炉管材

热处理后检测中，可快速识别应力集中区域，避免因残余应力超标导致的管材早期开裂。（2）建立热能设备专用材料性能数据库：整合火力发电、核能装备常用材料（如T92钢、SA508Gr.3钢、Inconel690合金）的热处理工艺参数（温度、时间、冷却速度）、力学性能（强度、韧性、蠕变寿命）、环境适应性（抗高温氧化、抗辐射）等数据，构建可视化数据库。工程师可通过输入材料型号与工况需求，快速匹配最优热处理方案，同时为设备寿命评估与故障溯源提供数据支撑，某能源集团建立数据库后，材料选型与工艺设计效率提升40%。

结束语

金属热处理在热能动力工程中发挥着不可替代的关键作用，它助力设备材料在复杂严苛的工况下保持卓越性能，保障了工程的安全稳定运行。随着科技的持续进步，多尺度数值模拟、智能控制等前沿技术与金属热处理的深度融合，正推动该领域向更高效、精准、绿色的方向迈进。未来，深入探究并不断创新金属热处理技术，将为热能动力工程的长远发展提供更为坚实的技术支撑，创造更大的经济与社会效益。

参考文献

- [1]王安岳.金属热处理在热能动力工程中运用[J].电子技术,2023,(06):76-77.
- [2]李欢.探究金属热处理在热能动力工程中的应用[J].中国金属通报,2021,(10):84-85.
- [3]孙赫蔓.金属热处理工艺在热能动力工程中的应用[J].河南科技,2021,(13):103-105.
- [4]常嘉玮.探究金属热处理在热能动力工程中的应用[J].世界有色金属,2021,(13):166-167.