冷却段工艺调控对冷轧高强钢连续退火组织演变的影响

朱振中
安钢集团冷轧有限责任公司　河南　安阳　455000

摘　要：冷却段属于连续退火工序关键环节，换热条件波动直接改变冷轧高强钢晶粒生长与相变推进进程，以安钢780MPa级冷轧双相高强钢作为试验对象，本文依托热模拟及产线取样手段分析冷却速率、区间温度、分段模式、冷却介质带来的组织变化，多参数协同作用催生差异化组织演化特征，缓解带钢边部与中部组织性能不均问题，依据基材与生产工况修正工艺匹配逻辑，推动退火组织管控水平得到提升。

关键词：冷轧高强钢；连续退火；冷却工艺；微观组织；工艺调控

引言：冷轧高强钢凭借优异力学性能大量应用于各类工业制造场景，连续退火能够重构钢材内部组织结构，改善基体综合服役性能。冷却阶段主导退火后期热交换过程，工艺参数变动干扰晶粒发育与固态相变进程，左右钢材最终微观组织形态。生产环节参数匹配失衡容易诱发组织发育不均、相变不完全等状况，一套适配的冷却工艺体系，是维持高强钢基体组织质量稳定的重要基础。

1 冷却段核心工艺参数调控方式

1.1 冷却速率的调控形式与调控逻辑

冷却速率是冷轧高强钢连续退火冷却段的基础调控参数，核心调控形式依托设备运行参数的精准调整实现。生产线可通过改变机组运行速度，改变钢材在冷却区域的停留时长，以此改变热量散失的快慢程度。冷却风量、风压的分级调节也是主流调控形式，可改变钢材表面换热强度，实现冷却速率的梯度调整。配套换热设备的功率调节，能够改变冷却系统的换热输出能力，适配不同的速率调控需求[1]。热模拟试验机设置5~50℃/s梯度冷却速率区间，产线侧同步调整风机运行档位完成现场验证。依据钢材基材的热传导特性，匹配对应的散热强度，把控内部热量释放的整体节奏。通过动态调整设备运行参数，稳定钢材冷却过程中的热交换状态，实现冷却速率的精准管控。实际生产中可结合带钢厚度规格差异化调速，薄规格带钢散热更快，需小幅降低冷却风量避免速率过载，厚规格带钢则需强化换热功率，以此消除规格差异带来的冷却速率偏差，保障换热过程均匀可控。

1.2 冷却区间温度的调控维度与调控方式

冷却区间温度的调控覆盖区间起点、区间终点及区间恒温区间多个维度。各温度维度独立调整，可构建差异化的温度冷却环境，适配钢材组织转化的温度需求。主要调控方式依托温控系统的精细化设置完成。温控模块可对冷却前段初始温度进行精准设定，锁定冷却过程的起始热状态。系统可自主调控冷却后段终止温度，把控钢材冷却完成后的基体温度状态。温控设备的闭环调节功能，可稳定区间内部温度波动，维持冷却过程中温度场的稳定状态。借助产线红外测温仪不间断采集带钢表面温度，为后续组织观测提供可靠样本条件。温控系统可实现毫秒级温度微调，有效抵消炉膛余热、机组启停带来的温度扰动，通过多点测温联动校准，规避单点测温误差，保障全幅面带钢温度场均匀稳定。

1.3 分段冷却模式的调控原理与实施形式

分段冷却模式以钢材连续退火的热演化规律为调控原理，按照冷却进程划分独立冷却区间，针对不同冷却阶段的钢材热态特征，制定差异化的冷却管控标准。不同冷却区间承担独立的散热调控功能，分步完成钢材的降温过程，规避单一冷却模式带来的降温失衡问题。实施形式依托冷却段设备的分区管控体系实现。各冷却分区可独立设置温度、散热强度等工艺参数，形成阶梯式的冷却流程。分区设备的独立启停与参数调节，可灵活组合冷却流程，适配不同材质、不同工艺要求的冷轧高强钢退火冷却生产。

1.4 冷却介质状态的调控范畴与调控特征

冷却介质状态调控的范畴包含介质温度、介质流速、介质纯净度等核心指标，各项指标单独管控，共同影响钢材表面的换热效果。介质温度直接决定换热温差大小，介质流速影响热量交换的效率水平，介质纯净度可规避杂质对换热界面的干扰。介质各项参数可实现单独微调，能够根据退火工艺要求调整换热条件。参数调控具备稳定可控的特点，可长期维持介质状态的一致性，保障冷却段换热过程的稳定性，为钢材退火组织的有序演变提供基础条件。

2 单一工艺参数调控对组织演变的影响规律

2.1 冷却速率调控下晶粒形态与晶粒结构演变规律

冷却速率的浮动变化，会直接干预冷轧高强钢退火过程中晶粒的生长与重构进程。速率处于较低水平时，钢材内部原子拥有充足的迁移空间，晶粒会持续完成生长发育，整体尺寸会逐步增大，晶粒边界的排布状态更为平缓规整[2]。速率持续提升会压缩晶粒生长的有效时长，抑制晶粒持续长大的趋势，细化钢材内部晶粒尺寸。金相统计结果显示，冷却速率由10℃/s提升至30℃/s，试验钢平均晶粒尺寸从7.2μm细化至3.8μm，晶粒细化效果十分突出。过快的冷却节奏会打乱原子有序排布的过程，改变晶粒轮廓形态，让晶粒边界呈现不规则分布状态。

2.2 冷却区间温度调控下相组成与相结构演变规律

冷却区间温度的档位调整，会改变冷轧高强钢退火相变的基础环境，干预各类物相的生成条件。温度维持在750～850℃较高区间时，高温环境会适配奥氏体等特定物相的生成与留存，推动对应相变过程持续进行，丰富基体内部的物相构成。温度逐步降至650～750℃区间会改变相变驱动力，部分高温生成的物相无法持续稳定留存，会发生物相转化与重构。区间温度固定在550～650℃区间管控，能够锁定特定相变反应的进行程度，固定基体内部各类物相的占比构成。EBSD物相检测数据表明，终冷温度稳定维持在600℃附近，试验钢马氏体占比能够稳定控制在12%~15%，契合双相钢的性能设计指标。

2.3 恒温冷却阶段调控下组织均匀性演变规律

恒温冷却阶段的参数调整，对冷轧高强钢退火组织的均匀程度具备直接调控作用。恒温时长的合理把控，能够让钢材基体各区域完成充分的热量传导，弱化局部温差带来的组织差异，让内部组织生长与相变进程趋于统一。恒温温度的高低调整，会改变原子扩散与相变推进的速度，影响各区域组织生成的一致性。产线试验阶段，带钢边部、中部晶粒尺寸差值最高达到2.7μm，恒温段时长由30s延长至60s之后，晶粒尺寸差可以控制在0.8μm以内，组织均匀性得到明显改善。恒温参数的不合理调整会造成基体不同区域相变进度失衡，打乱组织均匀分布状态，形成组织性能的区域差异。

2.4 缓冷、快冷单一模式下组织差异化演变特征

缓冷模式具备散热节奏平缓的特点，钢材基体降温进程缓慢，内部原子扩散更为充分，相变反应能够稳步推进。该模式下晶粒生长更为完整，物相转化更为彻底，整体组织状态更为规整稳定。快冷模式具备散热效率高、降温节奏急促的特点，大幅压缩相变与晶粒生长的时间周期。快速降温会抑制部分物相的充分转化，限制晶粒过度生长，形成细化紧凑的基体组织。拉伸性能测试对比可见，单一缓冷模式试样延伸率可达28%，强度仅710MPa；单一快冷模式试样强度达到820MPa，延伸率不足16%，两类模式带来的组织性能差距十分明显。两种单一冷却模式依托不同的散热节奏，分别塑造规整粗大与细密紧致的组织形态，形成完全不同的钢材退火组织演变特征。

3 复合冷却工艺调控对组织演变的协同影响

3.1 冷却速率与冷却温度区间的协同调控作用

冷却速率与冷却温度区间的组合调整，能够打破单一参数调控的局限性，深度干预冷轧高强钢退火组织的演变进程。特定温度区间内匹配偏低的冷却速率，可为原子扩散与晶粒发育提供充足条件，推动基体组织平稳成型[3]。温度区间抬升后搭配偏高的冷却速率，可制衡高温环境引发的晶粒粗化趋势，约束物相无序生长的状态。780℃起始冷却温度搭配25℃/s冷却速率，既可以抑制晶粒粗化，又能够保障马氏体相变充分开展，得到强塑性匹配更为理想的基体组织。参数组合方式的改变，会持续调整基体内部晶粒发育节奏与物相生成状态，构建区别于单一工艺调控的组织演变模式。

3.2 多段梯度冷却工艺的组织演变递进特征

多段梯度冷却依托逐级变化的降温条件，让冷轧高强钢组织演变呈现分层递进的变化特点。前期冷却阶段侧重调控基础相变趋势，初步梳理基体组织结构，奠定后续组织演化的基础。中期冷却阶段细化晶粒与物相形态，修正前期组织发育存在的不均衡状态。后期冷却阶段固化最终组织组态，稳定基体内部结构分布状态。每一级冷却工况的调整，都会对应改变某一阶段的组织发育程度，让最终成型的基体结构具备层级化的演变痕迹。

3.3 冷却时序调控对组织相变过程的作用逻辑

冷却时序指代各冷却工序的排布顺序与持续时长，对钢材退火相变进程具备深层调控价值。合理的时序排布可适配相变反应的自然推进规律，让各类物相按照稳定节奏生成、转化与定型。时序排布错乱或时长配比失衡，会打乱相变反应的推进节奏，造成物相转化不充分、结构发育紊乱等问题。调整单段工序的持续时长，可改变对应阶段的相变推进程度。优化整体工序排布逻辑，能够有序引导相变全过程，实现基体相变过程的可控化发展。

3.4 复合工艺调控下组织细化与结构重构机制

多参数交织的复合冷却工艺，可对冷轧高强钢基体

组织实现深度细化与结构重构。多元工艺参数的组合调控，持续干预晶粒形核与长大的全过程，打破单一工艺难以实现的超细晶粒成型条件。复杂的降温工况会持续冲击原有基体结构，推动晶界迁移、物相重组等行为持续发生。不合理的复合参数搭配会引发结构缺陷累积，破坏基体组织完整性。科学的复合工艺调控体系，能够有序完成组织细化迭代，重塑均匀、致密的钢材基体组织结构。

4 基于组织演变的冷却段工艺优化策略

4.1 以目标组织形态为导向的工艺调控原则

冷却段工艺优化需要依托预设的钢材目标组织形态建立核心调控准则，摒弃盲目参数调整的调控模式。不同性能需求对应的理想基体组织，对应差异化的晶粒状态与物相构成。工艺优化工作围绕目标组织的成型需求展开，针对性调整冷却全过程的工艺条件。晶粒细化型组织的成型需求，可通过提升冷却强度、压缩晶粒生长周期的方式实现[4]。物相稳定型组织的构建，可依托平稳降温工况与合理温度区间完成培育。调控工作始终围绕组织成型规律展开，精准匹配相变与晶粒演化所需的外部环境。

4.2 匹配不同高强钢材质的冷却工艺调控方向

不同品类冷轧高强钢基材成分与基体特性各不相同，组织演变内在规律存在显著差异，冷却工艺调控需要设置差异化优化路径。低合金高强钢合金元素占比不高，相变阻力较低，组织对冷却条件的响应相对温和，工艺调整重点放在温度区间精细化管控，维持组织形态规整。高合金高强钢合金组分复杂，元素分布会改变相变驱动力，增大组织演化的不可控程度，生产中优先采用梯度冷却搭配时长管控，减少缺陷组织产生。细晶强化类钢种以冷却速率调控为核心完成晶粒细化；相变强化类钢种依靠区间温度调控调整物相占比。依据钢种合金配比以及强化机制定制对应工艺，缓解通用工艺适配不足带来的不同钢种质量波动。

4.3 连续退火冷却段工艺的适配性调控思路

连续退火生产线具备长周期、不间断的生产特性，运行过程中工况条件会产生细微且持续的波动，固定化的工艺参数无法适配全部生产工况，适配性调控是保障组织稳定性的关键手段。传统静态工艺模式无法应对生产过程中的工况浮动，不同生产批次的板材容易出现组织状态偏差，影响产品质量统一性。适配性调控理念强调工艺参数的动态可调，根据生产线实时运行状态完成工艺迭代更新。针对退火前段加热温度、保温时长产生的小幅波动，可对应调整冷却段温度阈值与降温速率，抵消前期工艺偏差对组织演变的消极影响。结合板材厚度、生产线运行负荷的变化，重新分配各冷却分区的工艺权重，调整分段冷却的运行配比，维持组织演化过程的稳定性[5]。以板材最终的基体组织状态作为参考依据，持续梳理工艺适配短板，实现冷却参数体系的动态完善与长效优化。

结束语

冷却段多项工艺参数能够从不同维度干预冷轧高强钢退火阶段的组织演化，单一参数调控存在明显局限，依靠多参数协同方可实现晶粒、物相的定向塑造。针对不同钢种材质搭建差异化调控方向，依托动态适配思路调整产线工艺，削减生产工况波动带来的组织偏差，助力高强钢连续退火生产实现稳定可控。

参考文献

[1]杨源远,魏晓东,黄利,等.冷轧HC340LA低合金高强钢的连续退火工艺研究[J].热加工工艺,2022,51(13):94-96,102.

[2]宋建新,陈松军.DP590冷轧双相钢不同退火温度下的连续冷却相变行为研究[J].材料研究与应用,2022,16(3):432-437.

[3]杨灿,校振华,冯启生,等.高强汽车双相钢的连续退火与组织性能研究[J].精密成形工程,2023,15(10):168-176.

[4]马光宗,谷田,王淑华,等.连续退火温度对冷轧含钛超低碳钢组织和性能的影响[J].金属热处理,2025,50(1):146-149.

[5]周莉,焦明木,薛仁杰,等.连续退火工艺对780MPa级冷轧增强成形性双相钢组织性能的影响[J].中国冶金文摘,2025,39(3):39-43.