

双相钢热处理工艺对组织及力学性能的调控研究

智一勇

山西管家营法兰锻造股份有限公司, 山西省忻州市, 035400;

摘要: 围绕双相钢中铁素体与马氏体的协同强化路径, 构建以两相区退火与快速冷却为主线的热处理优化框架。以相变动力学、碳分配与残余应力演化为约束, 提出窗口化的温度与时间设计方法, 并以回火稳定化与组织均匀性为配套策略。在不引入具体案例的前提下, 论证板条尺度、高角界面密度与残余奥氏体稳定度对屈强比、低温冲击与疲劳扩展速率的影响, 给出可复用的参数调控思路。方案强调模型校核与在线监测的结合, 使加热、冷却与回火三段过程与目标指标一一对应, 便于在不同规格与厚度上实现性能稳定获取与长期可靠运行。

关键词: 双相钢; 两相区退火; 碳分配; 组织调控; 力学性能

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.073

引言

双相钢依托低碳基体与少量合金元素, 通过铁素体提供塑性与形变协调, 由马氏体承担强度与应力传递, 形成强韧平衡。随构件轻量化与复杂成形需求增加, 热处理过程中的组织梯度与性能离散成为制约因素。要获得可复制的屈服强度、断后延伸率与低温韧性, 需要把相变路径、碳扩散与位错演化纳入同一约束空间, 把温度与时间转化为可校核的窗口。在工程实践中, 奥氏体化不均、冷却曲线漂移与回火过度回复常引发断裂敏感度上升与延迟开裂风险。为此, 本文从机理与目标的映射、参数窗口的构建以及质量控制与评价三个方面展开, 给出不依赖特定设备与品牌的通用路径, 使热处理从经验驱动走向规则驱动, 并在长周期运行中保持成本与风险的可控。

1 机理基础与组织目标架构

1.1 两相区相变路径与碳分配机理

两相区退火使铁素体与奥氏体在热平衡附近共存, 溶质分布与初始晶粒决定后续组织形貌。加热阶段应避免粗化与异常长大, 维持细小均匀的奥氏体岛嵌入铁素体基体, 岛状体积分数与碳浓度共同决定淬后马氏体比例与硬度上限。快速冷却将富碳奥氏体转变为板条马氏体, 贫碳区域保留铁素体, 形成软硬相交织的连续网络, 载荷传递路径由相界与板条取向主导^[1]。为降低内应力与尺寸畸变, 需要在珠光体鼻尖附近缩短停留时间, 避开片层长大区间, 同时以流场均匀与工装支撑抑制不对称收缩。碳分配在短时间内完成主要迁移, 富碳区域稳定残余奥氏体并提高裂纹钝化能力, 贫碳区域维持铁素体的低屈服与高均匀塑性。若奥氏体岛过大或分布偏聚,

淬后产生块状脆性区, 拉伸过程中易形成早期局部颈缩。若岛过小且碳不足, 马氏体比例与硬度不足, 强度目标难以达成。调控的要点在于通过升温坡度与保温时间约束碳扩散长度, 再以冷却速度控制形核与长大节奏, 使马氏体板条细长且取向分散, 相界呈三维互穿形态, 既利于应力重分配, 也便于裂纹转向与分叉。对厚度较大的规格, 需要考虑中心区冷速偏低带来的奥氏体贫碳与岛合并风险。可在两相区设定上限与下限之间的动态保温带, 结合短时均热与分段保温, 促使中心与表层获得相近的碳分配累积量。冷却阶段采用分级与强对流组合, 让中心进入安全冷速窗口, 并通过边缘减冷抑制硬度梯度。对组织稳定性贡献较大的高角度界面与板条束取向差, 应在相变路径上预留形核与旋转空间, 使细观结构具备足够的弯折与断续, 避免贯通硬脆通道。在含硼或含微量强碳氮化物形成元素的设计中, 需兼顾晶界偏聚与形核竞争, 避免表层与中心在两相区内出现显著差异, 由此可降低后续冷却中的组织分层与应力集中。

1.2 裂纹钝化与屈强关系的组织指标

双相钢的强度来源包括位错密度、细晶与弥散相, 韧性与延性依赖高角度界面密度、板条束尺度以及软硬相的空间连通度。铁素体作为柔性基体应形成连续通道, 承担均匀塑性并缓解应力集中; 马氏体作为负载骨架需以细小片段分散分布, 避免贯通路径。组织指标可归纳为三类, 板条宽度与束内取向差反映屈服与加工硬化潜力, 高角界面比例与相界曲折度反映裂纹偏转能力, 残余奥氏体稳定度与体积分数反映低温韧性与孔扩能力^[2]。这些指标受两相区温度、保温时间与冷却曲线共同控制。温度偏高会提高奥氏体体积分数但也促使晶粒长大, 曲

折度下降；时间偏短会导致碳分配不足，残余奥氏体不稳；冷却过缓易引入上贝氏体特征，界面粗化并降低加工硬化斜率。目标是让软相形成环状或网状连通，让硬相呈离散岛链并在尺度上受限，让少量稳定残余奥氏体均匀点缀在相界附近，借助应变诱导转变缓释局部应力。借助这些结构化指标，强度、延性与抗裂扩展之间的张力被重新平衡，成形与服役的双重需求得到兼顾。在评价与反馈环节，需要以可量化的显微参数作为工艺校核的依据。板条宽度与束尺寸的统计分布可与屈强比建立近似线性映射，高角度界面密度与冲击吸收能的关系可通过分段函数表征，残余奥氏体体积分数与稳定度则与孔扩能力和边部开裂阈值相关。把这些映射固化为规则后，工艺微调的方向变得明确，当某项指标偏离时能够定位到对应的组织症结，进而回到温度时间曲线进行修正。在形变与失稳的过渡区间，还需关注屈强比与加工硬化斜率的匹配关系。屈强比偏高会使颈缩来得过早，斜率偏低会削弱均匀塑性，解决思路是通过细化板条与提升高角界面比例来延缓局部集中的形成，同时以稳定少量残余奥氏体提供延迟强化，使应力与应变在更长区间内保持分散。

2 工艺参数窗口与热历程设计

2.1 两相区退火与快速冷却的窗口化控制

参数窗口的构建以相变动力学与设备能力为边界。两相区上限决定奥氏体体积分数与岛尺寸，下限决定铁素体回复程度与位错密度，二者之间应设缓冲带，以适应厚度与装载变化。升温阶段采用分段坡度与短时均热，先消除前期冷加工引入的应力，再引导细小奥氏体均匀析出^[3]。保温时间以碳扩散长度与岛尺寸匹配为判据，时间过长会引起岛合并与粗化，时间过短则出现碳不足与硬度下限。冷却曲线需避开珠光体快速生成区，同时保证高于临界冷速的安全裕量。对薄板采用高流速均匀冷却可获得细条状马氏体，对中厚规格增加分级冷却与搅动控制以降低热应力峰值。为抑制边部过冷导致的硬度梯度，可在边缘区域设置局部减冷或采用多喷区差异化控制，使全宽冷却历史趋于一致。冷却介质的温度与浓度设定巡检阈值与更换周期，在线监测曲线与目标包络的偏差，当偏差超限时自动降速或重启，以防进入组织失控区间。通过把窗口边界固化为曲线集合，现场在集合内择优运行，可在保证安全的前提下追求性能上限。对多规格混轧与节拍切换的生产场景，还应加入过渡板的缓冲策略，让炉温与介质在新设定下逐步靠拢，避免

前几件因动态偏差进入危险区间。把过渡规则写入工艺指令并与监测系统联动，异常时暂停切换并回到稳态窗口，减少由节拍变化造成的离散与返工。当产线节拍变化或规格切换时，需要一套简洁的重标定流程。选取代表性样本片进行短周期试火，记录升温、保温与冷却的三段曲线与显微结果，对比既有窗口边界，若出现系统性偏移，则按比例调整上限与下限并更新包络。对设备能力的变化，如喷区流量衰减或炉内辐射系数改变，应通过模型与试样双路径校核，避免仅凭经验修正导致的过度保守。

2.2 回火稳定化与组织均匀性的协同策略

双相钢的回火目的在于释放内应力、稳定残余奥氏体与细化碳化物，同时维持软硬相对比。回火温度与时间以硬度下降斜率与电阻率拐点作为停留判据，防止过度回复与二次脆化。短时低温有助于减小残余应力并促成微细碳化物弥散析出，中温段维持较高加工硬化能力与屈强比，高温段侧重韧性恢复但需要防止碳化物粗化与界面连续化^[4]。为了提升厚度方向一致性，可采用分段回火与缓冷组合，使中心区与表层获得相近的扩散累积量。组织均匀性依赖两条路径，一是通过再分配稳定少量残余奥氏体，让其以细小薄膜形式分布在相界，用以在拉伸早期提供变形协调；二是通过板条束尺度控制与高角界面增殖提高裂纹偏转几率。工艺实现可采用短时稳定化再回火的次序，前段以低温快速停留抑制应力集中，后段以主回火重构弥散相与界面曲率。为防止边部软化与中心偏硬，需要在回火炉内构建流场均匀性与辐射校正的监控，并以代表性试样进行多深度显微对账。经过这样的协同策略，屈强比、延性与孔扩能力在同一窗口内实现同步提升。若对断裂韧度与低温表现有更高要求，可在主回火前安排短时等温停留，使细小碳化物先行弥散析出，为后续稳定化与界面曲率重构提供形核基础。对于厚板中心的迟滞效应，可在回火末段延长缓冷时间，让中心与表层的应力释放更加同步，降低厚度方向上的性能差距。当后续还需进行表面处理或涂镀时，回火制度需兼顾镀层结合与基体稳定。可在主回火后引入短时再回火，巩固弥散相与残余奥氏体稳定度，降低涂镀热循环对组织的扰动。若存在焊接工序，应把热影响区的软化与脆化风险纳入窗口，适度提高回火稳定化强度并为焊后修复预留工艺余度，使全流程的组织与性能保持连续。

3 工程实施与质量控制方法

3.1 过程监测与批间一致性的实现路径

把工艺意图转化为可执行的规则,需要建立从温度、时间到组织指标的映射。加热段以多点测温与流场均衡作为基础约束,设定升温误差与均热偏差的限值,结合在线磁特性与硬度代理量判断回复程度。冷却段以介质温度、流量与喷区配比为核心,构建临界冷速包络与热应力模型的双重校核,出现偏离时及时调整喷区配比与板带速度。回火段以时间积分与温控精度为主,辅以声发射与电阻率曲线识别过度回复迹象。为控制批间差异,建立样本片与批量件的对账流程,首件与尾件固定取样,进行表层、次表层与中心的显微核查与硬度比对,给出厚度方向一致性的量化指标。设备与介质建立计量与寿命档案,按照预设周期进行校准与更换。把常见偏差与处置步骤沉淀为规则库,例如冷却曲线漂移对应介质补充与搅动强度调整,回火硬度异常对应延时停留与二次短时回火。通过监测、对账与处置脚本的闭环,过程稳定性转化为可审核的证据链,便于在不同产线间迁移复用。在组织反馈与性能验证之间,还需要一套简洁的判定逻辑。以板条宽度与取向差、高角界面密度与残余奥氏体稳定度四项指标构成简化判据,达成其中三项且不出现异常脆性迹象时判为合格,任一项偏离则触发二级验证与工艺微调。该逻辑既避免过度检验导致的成本上升,也能在早期识别潜在风险,把批间一致性固化为可量化的过程能力。在数据留痕与追溯方面,建议把温度曲线、介质状态与代表性显微照片以批次为单位归档,并建立差异清单。每次窗口微调后进行基线对比,若关键指标出现弱化趋势,则启用回退路径返回上一版曲线。通过少量而高质量的证据,过程能力与改进方向都不再依赖个人记忆与口口相传。

3.2 面向成形与服役的评价与寿命提升

性能评价需要覆盖成形阶段与服役阶段的关键指标。成形侧关注屈强比、加工硬化斜率、孔扩能力与边裂敏感度,服役侧关注低温冲击吸收能、裂纹扩展速率与延迟开裂阈值。评价的核心是把组织参数与指标建立对应关系,板条宽度与取向差决定屈服平台与均匀塑性,残余奥氏体稳定度影响边部应力分配与孔扩,界面曲折度与高角界面密度决定裂纹路径的转向与分叉概率。以这些映射为依据,可以在工艺调整前预估性能变化方向,在偏离出现时迅速回溯到可能的组织问题。寿命提升强调源头减敏与在役修复两条路径。源头减敏包括表层引入压应力、剔除连续脆性网状相、抑制粗大块状马氏体

与稳定少量残余奥氏体,目的是降低微裂纹萌生几率与延缓早期扩展。在役修复强调回火稳定化与表层强化的组合,通过短时回火释放局部内应力,再以温和方式提高表层硬度与界面曲率,降低应力腐蚀与氢致开裂风险。把出厂基线、服役监测与定期复核串联为闭环,设置红黄绿分级与回退条件,可以在不增加过多成本的情况下保持长期可用性与安全边界。当构件处于多轴应力与复杂边界时,组织弱点会被放大。评价环节可引入含缺口与不同厚度的对照样本,识别最易触发失效的区域,并把结果反馈到两相区温度与冷却曲线的微调上。对具有涂镀与焊接工序的全流程产品,建议把涂镀热循环与焊后热影响作为模拟场景,验证残余奥氏体稳定度与界面曲折度在二次加热后的保留水平,确保服役阶段的指标不发生突降。当外部环境发生季节性波动时,可为不同温度与湿度区间设置分段基线,分别维护组织与指标的分布范围。在转换区间内安排小样验证与短时稳定化处理,确保跨季运行的连续性与可靠性。

4 结语

以两相区退火与快速冷却为核心的双相钢热处理,通过对相变路径与碳分配的精细控制,使软硬相在空间上形成可承载又可缓释的结构网络。配合回火稳定化与组织均匀性提升,强度、延性与抗裂扩展能力在同一窗口内实现协调。工程实施依托监测对账与处置脚本闭环,把曲线与阈值转化为可执行语言,并以厚度方向核查保障一致。该路径便于跨规格迁移,为轻量化与可靠服役提供稳定组织基础。

参考文献

- [1] 李萍,金鑫,高艳红,等. 双相钢热镀锌前热处理工艺研究[J]. 唐山学院学报,2024,37(06):14-19+26. DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2024.06.003.
- [2] 冯鑫,魏立群,付斌,等. 两相区热处理对DP780双相钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2024,53(06):31-34. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20201740.
- [3] 张钰,王灵禹,杨凯,等. 同一成分双相钢热处理与组织性能调控[J]. 金属热处理,2023,48(10):59-65. DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2023.10.008.
- [4] 高成龙,李宪爽. 热处理工艺对双相钢带极埋弧堆焊层组织及性能的影响[J]. 机械制造文摘(焊接分册),2020,(05):11-15.