

# 冶金工程中金属材料的热处理工艺探索

熊家祥

首钢京唐钢铁联合有限责任公司 河北 唐山 063200

**摘要:** 金属钢板铸轧成型后, 普遍存在晶粒紊乱、组织偏析、残余应力集中等微观缺陷, 制约材料服役性能。热处理可通过可控温变调控固态相变, 重塑微观晶格, 优化钢板综合力学性能。本文结合冶金连续化钢板生产特点, 阐述热处理相变机理与主流工艺原理, 分析核心工艺参数的调控规律, 探究多工序协同控制方法, 从多维度提出工艺优化路径, 为冶金钢板热处理技术提质升级提供参考。

**关键词:** 冶金工程; 金属钢板; 热处理工艺; 组织相变; 工艺优化

**引言:** 金属钢板是冶金工业核心用材, 其微观组织直接决定力学性能与服役寿命。冶炼、铸轧等成型工序易使钢板坯料产生晶粒粗大、组织不均、应力残留等缺陷, 单一塑形加工难以精准优化钢板性能。热处理可通过温控相变改善钢板微观结构、弥补成型性能短板。结合冶金钢板规模化生产实际工况, 探究热处理工艺的钢板适配规律与技术优化方向, 可有效推动冶金钢板加工工艺向精细化、高端化升级。

## 1 金属钢板热处理工艺基础原理与冶金适配特性

### 1.1 金属钢板组织结构相变基础原理

冶金铸轧成型金属钢板普遍存在晶格排布杂乱、组织无序等问题, 先天结构缺陷直接影响钢板力学性能与服役稳定性。热处理依靠精准温控为原子扩散提供能量, 驱动晶格重组与固态相变, 是实现金属钢板微观组织优化的核心手段。以铁碳合金钢板为例, 结合铁碳相图可精准判定相变临界温度。常温下钢材以稳定的珠光体组织为主, 原子排布规整。随加热温度升高, 金属原子活性增强, 晶格结合力弱化, 原始组织逐步解体。当温度进入奥氏体相变区间, 钢板通过晶粒形核、晶界迁移与碳原子扩散, 逐步形成晶粒细小、分布均匀的奥氏体组织<sup>[1]</sup>。合理控制温变过程, 稳定晶粒形核与长大规律, 可有效改善铸轧带来的无序组织结构, 为钢板性能调控奠定良好基础。

### 1.2 热处理温度与保温机制对金属晶格的影响规律

加热温度与保温时长是管控钢板热处理相变质量、调控晶格形态的两大核心参数。加热温度决定原子活化程度与相变推进效率, 低温仅能释放少量应力, 无法触发完整相变; 温度升至专属相变区间时, 晶粒形核速率加快, 晶格重构效果显著。保温工序可均衡钢板表层

与芯部温度, 保障原子充分扩散, 确保全域晶粒转变均匀。保温时长不足会造成相变不彻底、缺陷残留, 时长过久则会引发晶粒异常长大、晶格粗化, 弱化钢板力学性能。

### 1.3 冶金生产场景下热处理工艺的适配属性

冶金钢板生产具备规模化、连续化、大批量作业特征, 钢坯经冶炼、浇注、轧制形成的成品钢板, 普遍存在组织偏析、晶粒粗大、残余应力富集等缺陷。热处理可嵌入冶金钢板产线后端, 针对性修正铸轧成型结构缺陷, 适配冶金连续生产节奏。相较于常规机械热处理, 冶金配套钢板热处理工艺兼容性更强, 可依托轧制余热实现工序无缝衔接, 在保障钢板生产效率的同时完成组织改性, 契合冶金工业稳质、增效、降耗的核心生产需求, 具备良好的现场适配性与工程实用性。

### 1.4 金属钢板成分对热处理相变过程的影响机制

金属钢板基体成分与合金元素是影响相变规律的核心内因, 直接决定晶格稳定性与相变临界条件。不同合金元素的原子特性存在差异, 可对原子扩散产生抑制或促进作用。其中, 铬、钼等合金元素可显著提升钢板晶格结构稳定性, 抬高相变温度阈值, 增强钢材淬透性; 钒、铌等微量元素可作为晶粒形核核心, 有效细化钢板晶粒、加快相变反应速率, 提升组织致密性。钢板元素配比不同, 相同工艺参数下的相变效果存在明显差异。依托成分特性定制差异化钢板热处理方案, 可实现相变过程可控, 精准优化金属钢板组织结构与使用性能。

## 2 冶金工程常用金属钢板热处理主流工艺类型

### 2.1 金属钢板正火工艺与工艺实施逻辑

正火是冶金钢板生产中应用最普遍的组织规整工

艺,其加热制度与退火工艺相近,均需将钢板加热至完全相变温度区间,实现充分奥氏体化。两类工艺的核心区别体现在冷却方式与冷却速率上:正火采用自然空冷方式,冷却速度明显快于退火炉内缓冷<sup>[2]</sup>。较快的冷却速度能够抑制奥氏体晶粒过度长大,快速锁定细密均匀的微观组织。该工艺流程简单、无需长时间密闭保温,生产效率较高,适配冶金钢板大批量、连续化生产模式。正火处理后的普通结构钢板晶粒排布规整、组织均匀性显著提升,硬度与强度处于合理区间,能够有效修正铸锻工序带来的粗大组织与成分偏析问题,统一批量钢板基础性能,满足通用钢结构的用材标准。正火空冷的冷却速率受环境温度、风速、板材堆放密度影响较大,工业生产中需搭建标准化风冷工位,稳定冷却条件,避免环境因素导致的板材组织与性能离散性超标。

## 2.2 金属钢板淬火工艺与工艺实施逻辑

淬火属于典型的强化型热处理工艺,主要用于提升金属钢板硬度、结构强度与耐磨性能,广泛应用于高端承重、耐磨冶金钢板构件加工。工艺过程分为高温加热、恒温保温、快速冷却三个阶段,对参数控制精度要求较高。高温加热阶段将钢板升温至完全相变温度,实现组织充分奥氏体化;恒温保温阶段保证钢板表层与芯部相变同步,消除截面性能差异。随后通过水冷、油冷等介质快速降温,大幅缩短晶粒生长时间,抑制粗大晶粒生成,在钢板内部形成致密稳定的马氏体强化组织,显著提升钢板承载能力与耐磨性。实际生产中,需根据钢板材质、厚度及性能要求合理选择冷却介质与降温速率,参数控制不当易出现晶粒畸变、钢板变形、开裂等质量缺陷。水冷降温速率快、成本低,适用于普通高强钢板,油冷降温更温和均匀,可有效规避高硬度特种钢板开裂风险,生产中需根据板材用途精准匹配冷却介质。

## 2.3 金属钢板回火工艺与工艺实施逻辑

回火一般不单独使用,多作为淬火后的配套稳定化工序,用于弥补淬火工艺的性能缺陷。钢板淬火后内部形成的马氏体组织处于亚稳定状态,板材内部残余应力集中,整体韧性偏低、脆性偏大,长期服役存在安全隐患。回火通过中低温加热与恒温保温,促进内部不稳定组织逐步转变为平衡组织,有效释放淬火残余应力。按照加热温度可分为低温、中温、高温回火:低温回火可最大程度保留淬火高硬度与高耐磨性,优化钢板组织均匀性;中高温回火重点改善钢板塑性与韧性,实现强度、硬度与韧性的合理匹配。该工艺能够彻底改善淬火带来的结构不稳定性,稳定钢板组织结构与综合力学性

能,提升冶金钢板服役可靠性。回火温度的小幅波动会直接改变钢板强韧配比,精准控温可实现钢板性能的精细化调控,有效解决淬火钢板脆性大、易疲劳、应力松弛等服役隐患,延长构件使用寿命。

## 3 冶金钢板热处理工艺关键影响因素与调控逻辑

### 3.1 加热参数对金属钢板组织转变的影响

加热是触发金属钢板固态相变、实现组织改性的前提,加热温度的合理选取直接决定相变效果与组织质量。温度低于相变临界值时,金属原子活化程度不足,扩散能力较弱,晶格重构难以有效进行,仅可释放少量残余应力,无法改善钢板原始组织缺陷。温度处于合理相变区间时,钢板原始粗大晶粒逐步溶解,新的细密晶粒持续形核长大,微观组织得到全面重塑。若加热温度过高,晶粒会出现异常长大、组织粗化松散等问题,直接降低钢板强度、韧性等核心力学指标<sup>[3]</sup>。因此,结合钢板成分与目标性能精准设定加热温度区间,可为后续冷却定型与性能控制提供有力支撑。

### 3.2 保温时长对钢板内部结构均匀性的作用机制

保温工序的主要作用是均衡钢板截面温度、完善全域相变反应,是解决钢板内外组织性能不均的关键环节。钢板升温过程中受导热特性影响,表层温度高于芯部温度,形成明显温度梯度,保温时间不足会导致表层相变充分、芯部相变滞后,造成组织差异。充足的恒温保温时间可让热量充分渗透钢板芯部,统一整体相变环境,保证全域原子充分扩散、晶粒有序重排,有效弱化冶金成型带来的钢板组织偏析与局部缺陷。保温时长过短会造成相变不彻底、缺陷残留;保温时长过长则会造成能源浪费与钢板晶粒粗化。

### 3.3 冷却速率与水冷工艺的调控逻辑

冷却过程直接决定钢板热处理最终组织形态与力学性能,冷却速率是控制晶粒尺寸、调整内应力水平、规避成型缺陷的核心参数,其中水冷是冶金钢板生产线应用最广泛的强冷工艺。水冷换热效率高、降温速率可调,能够快速锁定高温细化奥氏体组织,抑制晶粒二次长大,显著提升钢板硬度与耐磨性。冷却速率对钢板性能取向影响显著:快速冷却利于提升钢板硬度与强度,慢速冷却利于释放内应力、改善钢板塑性与韧性。现场生产需根据钢板厚度、材质及性能需求合理调控水冷强度与降温梯度,可通过预冷处理、分级水冷、介质恒温调控等方式,有效解决快速冷却引发的晶粒畸变、钢板变形、开裂等问题,保障热处理钢板成品质量稳定。

### 3.4 在线淬火结合离线回火的多工序协同调控思路

单一热处理工艺难以同时满足钢板高强度、高韧性、低残余应力的综合要求,无法适配高端冶金钢板用材标准。在线淬火+离线回火的多工序协同工艺,是目前冶金钢板规模化生产中优化材料综合性能的有效手段。在线淬火依托轧制余热完成钢板快速降温强化,实现轧制与热处理工序无缝衔接,生产效率高、能耗低,可获得高硬度、高致密的强化组织,但容易造成钢板应力集中、韧性下降。后续配套离线回火处理,可有效消除钢板淬火残余应力,优化亚稳定组织结构,改善钢板塑性与韧性。两道工序优势互补、协同调控,分步实现钢板晶粒细化、强度提升、韧性改良与应力释放,有效弥补单一工艺的性能短板,精准调控钢板综合力学性能,满足高端工业钢板构件的加工要求。

#### 4 冶金工程钢板热处理工艺的优化路径与发展方向

##### 4.1 热处理工艺流程的精简与优化思路

传统冶金钢板热处理工序繁杂、部分作业环节重复,多次无效加热、保温不仅延长生产周期、降低作业效率,还会增加钢板高温滞留时间,引发晶粒粗化、性能波动等问题。工艺流程优化以删减冗余工序、压缩无效作业、重构一体化钢板生产流程为核心思路。结合钢板初始组织状态、成型缺陷及目标性能,整合参数相近的加热、保温工序,取消重复性热加工环节,缩短钢板整体受热时长,降低高温对晶粒组织的负面影响<sup>[4]</sup>。优化后的工艺流程更加简洁高效,可减少现场人为干预,降低设备能耗与生产成本,实现冶金钢板热处理生产规范化、高效化运行。

##### 4.2 精细化热处理工艺的应用拓展方向

传统钢板热处理多采用统一固化的工艺参数,难以适配不同批次、不同厚度、不同成型状态的钢板,容易出现产品性能离散、改性不充分等问题。精细化钢板热处理以参数精准管控、差异化定制加工为发展核心,推动热处理从粗放式量产向钢板定制化提质转型。依托智能温控设备实现加热温度、保温时长、冷却速率的高精度调控,针对钢板个性化组织缺陷制定对应改性方案。通过推广分区加热、梯度冷却等精细化手段,解决厚板与异型钢板截面组织不均的行业难题。精细化工艺能够充分挖掘钢板性能潜力,满足高端精密冶金钢板的技术标准,是未来热处理技术升级的主要方向。

##### 4.3 节能环保型热处理工艺的革新路径

传统钢板热处理设备能耗偏高,长期连续高温作业

存在热量散失大、能源利用率低、资源消耗多等问题,与当前冶金行业绿色低碳发展理念不符。节能环保工艺革新以提升能源利用率、降低钢板生产损耗、减少污染物排放为主要目标。通过优化升温制度、采用阶梯式加热曲线,替代传统持续高温作业模式,有效降低设备能耗。配套新型保温结构与高效换热设备,减少钢板热处理过程热量损耗。优化冷却介质循环系统,提升介质重复利用率,降低耗材消耗与废水、废渣排放。通过多维度节能改造,实现钢板热处理质量提升与绿色降耗的双向发展。

##### 4.4 适配新型冶金板材的热处理工艺迭代方向

随着冶金技术不断发展,高强合金钢板、复合金属板材、特种耐蚀耐磨钢板不断投入产业化应用。这类新型板材的成分特点、相变规律、组织特性与传统碳钢板存在较大差异,原有固化的热处理参数体系难以适配改性需求,容易出现相变不充分、性能提升效果差等问题。工艺迭代需围绕新型板材的成分特性与相变机理,重新确定合理的加热区间、保温规范与冷却制度,建立专属钢板热处理参数体系。同时根据特种钢板的表面强化、耐蚀、耐磨等特殊性能要求,开发针对性的表面热处理与整体改性工艺,持续完善热处理技术体系,适配冶金新型板材、新产品的工业化生产需求。

#### 结束语

热处理是优化冶金钢板微观组织与力学性能的核心工艺,可有效消除铸轧成型引发的各类结构缺陷。精准管控加热、保温、冷却核心参数,落实多工序协同调控模式,可稳定钢板综合性能。顺应冶金高端化、绿色化发展趋势,持续优化钢板热处理工艺体系、适配新型板材,可有效提升冶金用材品质,推动行业工艺转型升级。

#### 参考文献

- [1] 张浩. 冶金工程中金属材料的热处理工艺探索 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(6): 19-21.
- [2] 王雷. 冶金工程中金属材料的热处理工艺及应用分析 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(2): 103-105.
- [3] 李锦涛, 郑雯婕. 冶金工程中金属材料的热处理工艺分析 [J]. 科海故事博览, 2025(22): 73-75.
- [4] 姚倩. 冶金机械加工中金属材料热处理的性能改善 [J]. 冶金与材料, 2026, 46(3): 190-192.