

新型高强韧钢锻造工艺及其组织性能控制研究

乔东杰

山西管家营法兰锻造股份有限公司，山西省沂州市，034000；

摘要：高强韧钢通过成分设计与热加工协同调控，在保证强度的同时保持足够的断裂韧度与抗疲劳能力。锻造阶段的温度场、应力应变场与变形路径决定了晶粒尺寸、位错密度与析出相形貌，从而影响强韧匹配。为获得稳定组织，应围绕均温、道次压下、应变速率与冷却方式构建可操作的工艺窗口，并以过程监测与组织表征验证其有效性。本文聚焦新型高强韧钢的锻造工艺，阐明组织演化机理，提出性能控制与质量闭环方案。文章提出基于参数窗口与组织指纹的映射方法，构建从原材到热处理的分阶段控制要点，并给出面向生产现场的检测分层与数据回写框架，以实现强韧平衡的稳定复制与放大。

关键词：高强韧钢；锻造工艺；组织演化；性能控制；质量管理

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.064

引言

高强韧钢服务于高可靠装备，对承载安全与寿命具有决定意义。传统强化路径若仅追求强度，常引发脆化与早期失效；若片面提高韧性，又会牺牲承载极限。锻造能够通过热力耦合与大塑性变形重塑流线、细化晶粒、促成析出相弥散分布，是实现强韧均衡的关键环节。工程实践需要一套从原材纯净化、加热均温、分级变形到受控冷却与后续热处理的系统工艺，并以检测与数据反馈稳定波动。围绕这一目标，本文构建理论到工艺再到质量控制的完整链条，强调参数窗口与组织性能之间的可追溯映射。研究思路遵循由微观机制到工艺路径再到质量验证的递进逻辑，先明确目标组织与行为模式，再约束温度、应变与时间的可行区，最终以检测与性能结果确认是否命中。为减少描述与现场之间的距离，文中力求将抽象原理转化为可落地的工艺指引与检查清单，便于在不同设备与规模下复用与扩展。

1 工艺设计的理论基础与组织演化机理

1.1 目标性能与成分体系的协同设计原则

高强韧的实现依赖多尺度机制协同作用。固溶强化与细晶强化提供基体强度，析出与位错缠结提升屈服与抗滑移阻力，稳定的晶界与相界为裂纹扩展设置弯折路径，塑性相与硬质相的比例与连通性决定了断裂形貌的微观能量耗散^[1]。成分体系应控制杂质与有害元素，降低脆性偏析，适度引入形成碳氮化物的微量元素以构建弥散强化点位，避免连续膜状析出削弱界面结合力。

在宏观层面，性能目标可分解为屈服水平、断裂韧度、疲劳阈值与耐冲击能力等指标的统筹，进而倒推晶

粒尺度、孪晶密度、析出粒径与间距的区间。由此得到的组织指纹需要与热加工可达的再结晶分数、应变能存储与回复速率相匹配。为确保不同截面与复杂几何的一致性，应以热传导与流变模型给出温度与流动应力的均衡解，通过分区加热与道次压下的空间分配降低内外差异，使心部与表层在相近的应力三轴度下完成致密化与细化。在杂质控制方面，应以洁净化冶炼与精炼脱氧降低大尺寸夹杂，结合连铸过程的保护措施减少二次氧化与卷渣。为兼顾强度与塑性，可通过多元微合金策略在高温下形成细小碳氮化物，既抬升高温强度，又在后续回火阶段保持弥散稳定。晶界工程需要提高大角界比例并抑制连续沿界析出，使裂纹在扩展时持续转向而消耗能量。为保证厚截面部位的组织均匀，应控制中心偏析与带状组织，利用多道次再分配与中间保温实现成分与温度的再均衡。性能评价不应孤立看待单个指标，而是以断裂韧度、低温冲击、疲劳阈值与耐磨等组合约束形成统筹目标，再通过可达的工艺窗口反推组织与成分的协同范围。

1.2 热力耦合与动态再结晶控制路径

高温变形中，动态回复与动态再结晶共同调节位错密度并重置晶界网络。再结晶形核受控于临界应变与临界温度，外加应变速率影响形核驱动力与形核位置，过快会推高流动应力并缩短扩散时间，过慢则易产生表面滞留与氧化皮压入。稳定的再结晶可抑制织构单一化，避免局部取向受限导致的滑移困难，从而减少脆性裂纹的萌生几率^[2]。

热接触条件决定表层温降与心部升温差值。通过延长均温、提高接触润滑稳定性与优化模具热平衡，可获

得更平缓的温度梯度。配合小道次多循环与穿插整形的路径设计,让有效应变在体积内充分积累,使空穴闭合、夹杂压实、晶粒细化同步发生。为防止转角区的流线折返与剪切带局部应变过度,应在关键几何处设置过渡半径与导向斜面,并在线测温与载荷曲线监控验证再结晶进程。再结晶晶核可来源于形变带、孪晶界与夹杂邻域的高能区域,其演化速度受位错密度与驱动力控制。若临界应变难以被跨越,组织将停留在回复主导的状态,晶粒虽能消除部分内应力,却难以达到理想的细化水平。为此需要以应变路径渐进提升的方式叠加驱动力,让形核与长大连续推进。心部的再结晶常滞后于表层,可通过延长均温与适度降低道次压下的瞬时强度差来缩小时间差。为抑制组织单向集聚,可设置交错方向的拔长与镦粗,使取向在空间上得到重新分布。若在线监测显示载荷波形出现周期性锯齿,可判断局部出现不稳定流动,应立即调整润滑与接触压力并修正速度,以恢复再结晶的稳定推进。

2 新型高强韧钢锻造工艺路线与关键参数窗口

2.1 均温加热与分级塑性变形工艺

原材纯净度与初始组织决定可加工性与缺陷敏感性。加热阶段需要在避免过烧的前提下实现心部与表层的温差收敛,可采用分区加热与长时均温的组合,并在装炉前完成表面除鳞以降低氧化皮压入风险。均温结束后进入预成形道次,目标是建立均匀的应变种子并修整截面,随后实施主体压下,使有效应变跨越再结晶临界值,最终以整形道次消除几何缺陷与流线扭曲^[3]。

分级变形强调小道次高频率与压下量的梯度分配。对于厚截面锻件,可先行径向约束以提高三轴压应力,再叠加轴向塑性流动促进致密化。应变速率的设置以避免热失稳与接触过冷为原则,必要时通过中间保温重置温度场与应变能。路径规划应减少急转与反向变形,关键部位辅以导向与防滑措施,确保流线连续且沿承载方向取向有序。预成形阶段还承担着消除原材缩孔与疏松的任务,需要在高三轴压应力环境下完成孔洞闭合。主体压下应避免一次性大幅度塑性集中,以免在转角与截面突变处诱发剪切带与折叠。对细长比大的构件,可采用分段加热与交替拔长的方式控制弯曲与翘曲。润滑应选择高温下化学稳定且膜厚可控的种类,并定期清理表面氧化物,减少纳入效应。为提升过程确定性,可引入测温、位移与载荷的三合一记录,形成可追溯的能量谱图,用于判断每一击打是否落在目标窗口之内。模具结构与圆角半径对流线连续性有决定作用,过小的转角

会诱发回折与折叠,可通过增设过渡圆角与导向斜面改善塑性流动。尺寸预留需考虑后续热处理与机加工余量,并以试样验证变形量与回弹。为保持温度一致,可在等待与转运阶段采用保温覆盖与短程调度,减少不必要的辐射散热。关键道次安排驻留时间以恢复导热平衡,随后再施加下一次压下,使再结晶与致密化有序推进。

2.2 受控冷却与热处理一致性控制

锻后冷却关系到相变动力学与残余应力演化。受控冷却需兼顾硬度与韧性,避免形成连续网状脆性组织与大尺寸板条^[4]。可采用分级冷却与延时冷却配合的方式,先迅速越过脆性转变温区,再以缓冷或等温段促进扩散与碳氮化物的弥散析出,从而获得细小而稳定的混合组织。对于含氢敏感的成分体系,应在高温阶段控制含氢来源,并在锻后安排扩散消除与缓冷流程,降低白点风险。

热处理的一致性依赖温度场均匀与介质稳定。通过对炉温曲线与介质冷却特性进行标定,可将热处理窗口与前续锻造窗口对齐,避免组织反复粗化。为控制晶粒增长与二次析出粗化,可设置两段式回火,使位错回复与析出钉扎相互制衡。针对复杂几何与不同厚度,需建立基于传热与相变的仿真模型,指导冷却路径与保温时间的局部调节。不同厚度与几何部位对冷却速率的需求并不一致,边缘易冷而中心缓冷,若不校正会造成组织与残余应力的空间不均。可在关键截面设置导流与隔热装置,使冷却边界更为一致。回火制度应根据初始组织差异进行分段设计,先进行稳定化阶段消除应力与可动位错,再进行析出强化阶段形成弥散点位。若发现二次硬化峰值偏移,说明碳氮化物发生粗化或溶解不足,需要回溯前续加热与压下历史进行修正。对于对低温冲击敏感的应用,可在回火后安排短时等温稳态,使亚结构与析出达到新的平衡。冷却介质的流动状态影响界面传热,静止易形成蒸汽膜而导致冷速失控,需通过搅拌与导流稳定换热。对畸变敏感的零件,可配合柔性夹持与对称浇淋,减少不均匀收缩。回火过程中要避免脆化温区的长时停留,必要时以分段升温与短时保温穿越风险区。若出现硬度分散偏大,可检查炉内温差与装载密度,并对介质老化进行评估与更新。

3 组织性能表征与过程质量闭环控制

3.1 晶粒细化、析出调控与韧性提升机制

细晶组织通过提高裂纹扩展的弯折频率与裂尖钝化速率,显著提升断裂韧度与冲击吸收能力。弥散而稳

定的碳氮化物能够钉扎位错与晶界，延缓软化与回复，提升高温持久稳定性。为避免连续膜状析出削弱界面，需要控制形核密度与长大速率，使粒径与间距落在有利于弯曲扩展与滑移协调的区间。

在疲劳载荷作用下，裂纹多由夹杂与弱界面萌生并沿应力最大方向扩展。通过减小夹杂尺寸与圆整形貌，可降低局部应力集中；通过保持多取向的亚结构与适量孪晶，可提升滑移系协同能力并分散能量释放。综合来看，晶粒、析出、位错、孪晶与夹杂共同构成强韧平衡的结构基元，必须与锻造与热处理窗口严格耦合，方可获得稳定可复制的性能。在高应变速率与低温环境下，裂尖的动态钝化能力决定安全裕度。通过提高界面粘结强度与引入多级能量耗散单元，可显著降低失效几率。细小均匀的二次相能在裂尖附近提供微型桥联效应，延缓贯通。为兼顾耐磨与抗冲击，可在表层形成略高硬度与高残余压应力的梯度，心部保持较高的塑韧性，使外部冲击能在表层被分散而不向内传递。对长期服役的构件，还需关注时效引起的组织缓慢演化，可通过周期性低温回火与应力均衡处理恢复韧性与稳定性。断口形貌可作为组织优化的验证手段，细密而均匀的韧窝与撕裂棱表明塑性耗能充分，而沿界解理与脆性台阶提示界面弱化与夹杂主导。提高裂纹路径的弯曲度与分叉概率，是提升韧性的有效方式，可通过细晶、多相与多取向共同作用实现。疲劳阶段应关注裂纹萌生寿命与稳定扩展速率这两项，前者依赖表层质量与残余应力，后者受微观组织均匀性与阻滞点密度支配。

3.2 全流程检测与数字化质量控制策略

质量控制的核心在于可观测与可追溯。锻前以原材纯净度、夹杂等级与表面质量作为放行依据；锻中以测温、载荷曲线与变形能量作为过程判据；锻后以组织与硬度映射确认窗口是否命中。无损检测方面，可用超声体波与相控成像识别体积型缺陷，用磁粉或渗透巡检表面开口缺陷，用电磁感应方法快速筛查近表面不连续体，并以数字成像方式对厚截面关键部位进行复核。

为减少波动，需要将检测结果回写至工艺数据库，形成参数与缺陷类型、位置与尺度的对应关系。配合统计过程控制与规则引擎，可在异常趋势出现时优先调整道次压下与应变速率，再评估温度与冷却制度的修正幅度。通过构建覆盖原材、加热、成形、冷却与热处理的质量台账，结合可视化看板与追溯编码，实现从源头预

防到过程稳态维护的闭环运行。数据平台应将工艺参数、检测结果与组织表征以同一编码贯通，建立参数到缺陷概率与性能波动的映射。对关键特征设置预警阈值，例如有效应变下限、再结晶分数下限与冷却时间上限，一旦触发即启动纠偏方案。判废与返修应分级管理，轻微偏差可通过二次整形与补充回火修正，重大缺陷则直接报废，防止带伤流入下游。通过质量例会与偏差进行根因分析，逐步收敛窗口并固化为标准作业文件，形成可复制的经验体系。在预测层面，可基于组织参数与过程信号建立缺陷与性能的概率模型，以早期信号推断后续风险，并将放行标准转化为可计算的阈值组合。人员能力同样关键，需建立检测与工艺两条能力分级与复训体系，定期对灵敏度与判读一致性进行比对。现场改进以小步快跑为宜，每次仅调整一到两项参数并记录成效，以免多因素耦合掩盖真实因果。

4 结语

通过从理论到工艺再到质量控制的系统梳理，可以在不牺牲韧性的前提下获得高强度与高可靠性的综合性能。均温与分级变形保证流线连续与空穴闭合，受控冷却与匹配热处理塑造稳定细化的混合组织，检测与数据反馈构建可追溯的工艺窗口。面向复杂构件与严苛服役环境，应持续优化纯净化水平与多尺度协同设计，并以数字化手段缩小波动，使高强韧钢锻造走向标准化与可复制化。未来可将组织表征、过程信号与性能数据在同一平台融合，形成可进化的经验图谱，为新成分与新结构的快速开发提供路径。

参考文献

- [1] 刘杨, 王刚, 王岭, 等. 高强韧钢淬火-配分工艺中碳配分计算模型的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(08): 233-241.
- [2] 李朝阳, 郭呈宇, 康永林, 等. 船用高强韧钢二次淬火过程对屈强比的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(10): 1478-1482.
- [3] 马博文, 余万华, 周来. 高强韧钢弯曲回弹性能数值模拟[J]. 中国冶金, 2018, 28(S1): 51-57. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.2018s010.
- [4] 袁泽喜, 刘俊, 童明伟, 等. 高强韧钢拉伸试验孔洞百分率测试与韧断机制[J]. 物理测试, 2016, 34(04): 7-11. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0777.20150074.