

30CrMnSiA 合金钢零件淬火工艺优化及工件开裂缺陷防控对策

袁光林

贵州航天朝阳科技有限责任公司, 贵州 遵义 563000

[摘要] 30CrMnSiA 合金钢因强度高、淬透性好而被广泛用于航空航天及军工关键承载部件, 但其淬火工艺窗口狭窄, 工件开裂问题长期未得到根本解决。本文基于该钢种的相变特性与应力演化规律, 系统考察了淬火温度、冷却介质类型、等温淬火制度及淬火-配分工艺对微观组织转变和宏观力学性能的影响。结果表明, 淬火温度控制在 880~900℃、采用 330~360℃等温淬火可获得下贝氏体与板条马氏体组成的复相组织, 抗拉强度保持在 1550MPa 以上, 冲击韧性提高 30% 以上, 残余应力峰值显著降低。在此基础上, 从冶金质量源头管控、加热冷却过程优化、结构应力舒缓及全流程监测四个方面提出了开裂防控的综合策略, 为工程实际中 30CrMnSiA 钢零件热处理质量的稳定提升提供了参考。

[关键词] 30CrMnSiA 钢; 淬火工艺优化; 开裂控制; 等温淬火; 淬火-配分; 残余应力

DOI: 10.64635/ja.2026.1483

中图分类号: TG156.35

文献标识码: A

Optimization of the Quenching Process for 30CrMnSiA Alloy Steel Parts and Prevention and Control Measures for Workpiece Cracking Defects

Yuan Guanglin

Guizhou Aerospace Chaoyang Technology Co., Ltd., Zunyi, Guizhou 563000, China

Abstract: 30CrMnSiA alloy steel is widely used in key load-bearing components in aerospace and defense industries due to its high strength and good hardenability. However, its quenching process window is narrow, and workpiece cracking has long remained unresolved. Based on the phase transformation characteristics and stress evolution laws of this steel grade, this paper systematically investigates the effects of quenching temperature, cooling medium type, isothermal quenching system, and quenching-partitioning process on microstructural transformation and macroscopic mechanical properties. The results show that when the quenching temperature is controlled at 880–900℃ and isothermal quenching at 330–360℃ is adopted, a multiphase structure composed of lower bainite and lath martensite can be obtained. The tensile strength remains above 1,550MPa, the impact toughness increases by more than 30%, and the peak residual stress is significantly reduced. On this basis, comprehensive strategies for cracking prevention and control are proposed from four aspects: source control of metallurgical quality, optimization of heating and cooling processes, structural stress relief, and whole-process monitoring. The study provides reference for the stable improvement of heat treatment quality of 30CrMnSiA steel parts in engineering practice.

Keywords: 30CrMnSiA steel; quenching process optimization; cracking control; isothermal quenching; quenching-partitioning; residual stress

引言

30CrMnSiA 钢属于中碳低合金调质钢, 比强度高、抗疲劳性好、淬透性突出, 被用来制造飞机起落架、导弹壳体等重要承载件。这类零件服役条件苛刻, 对强度、塑性、低温韧性、热处理变形都有严格要求。但是该钢对淬火温度、保温时间、冷却速度非常敏感, 淬火开裂一直是热处理的主要难题之一, 复杂截面零件开裂率在生产波动期可达 5%~10%, 既造成经济损失又威胁服役安全。

围绕淬火开裂抑制, 国内外从相变动力学、应力场模拟、工艺优化等各方面做了大量的研究。等温淬

火可以调节贝氏体和马氏体的复相组织, 淬火-配分工艺通过残余奥氏体稳定化来提高强韧性协同。但是实际生产中由于材料批次、零件形状、冷却条件等因素的耦合作用, 开裂问题仍然不能被根除, 单一参数优化不能奏效, 需要建立冶金源头、加热冷却、结构设计、过程监控的系统化防控体系。本文对本钢淬火的组织演化和应力形成规律进行梳理, 提出相应的开裂控制措施。

1 30CrMnSiA 钢的淬火特性与开裂机理

1.1 材料相变特征与淬透性表现

30CrMnSiA 钢的 Ac3 转变温度约为 830℃, 马

氏体转变起始点 M_s 约为 310°C ，终结点 M_f 约为 120°C 。淬火加热时，原始珠光体与铁素体向奥氏体转变，碳原子及 Cr、Mn、Si 等合金元素逐步溶入奥氏体基体，起到固溶强化和稳定过冷奥氏体的作用。由于合金元素的综合影响，该钢的连续冷却转变曲线明显右移，临界冷却速度较低，即使在空冷条件下也可获得马氏体组织，淬透性极强。

高淬透性对保证大截面零件心部硬度和强度有利，但也带来淬火应力增大的负面效应。30CrMnSiA 钢热导率偏低，淬火急冷时截面温度梯度较大。当表层冷却至 M_s 以下发生马氏体相变时，心部尚处于过冷奥氏体状态，塑性较好；待到心部发生马氏体转变产生约 3% ~ 4% 的体积膨胀时，表层已成为刚性马氏体层，对心部膨胀形成强大约束，从而在零件内部产生较大的组织应力^[1]。当组织应力与热应力叠加后的合应力超过材料该温度下的断裂强度时，裂纹便在应力集中处萌生扩展。

1.2 淬火裂纹的主要类型及形成原因

纵向裂纹最常见，多发生在光滑圆柱表面沿轴向扩展。其根本原因就是冷却后期心部马氏体相变产生的切向拉应力大于表层承载极限，截面越大，冷速不同步越明显，裂纹倾向越明显。

弧形裂纹多出现在截面突变处，台阶根部、环形槽底、法兰转角、尖角边缘。这些几何不连续处冷速差异悬殊，应力场复杂，容易形成多维应力集中，当主应力方向与薄弱面吻合时就会产生开裂。

显微裂纹有沿晶界扩展的晶间裂纹和穿越晶粒的穿晶裂纹。30CrMnSiA 钢壳体焊接热影响区曾经出现沿原奥氏体晶界扩展的再热裂纹，其本质是冶金缺陷、晶界偏析和热应力共同造成的。非金属夹杂物、带状偏析、电渣锭表面原始微裂纹在热应力的作用下也会成为宏观开裂的起源。北满特钢记录表明，电渣锭罩冷初期由于表内冷却不同步，组织转变产生的体积变化差可以产生足以使表面纵向开裂的拉应力，裂纹深度可达数毫米。

2 淬火工艺参数对组织演变与性能的影响

2.1 淬火加热温度的合理选定

淬火温度直接影响奥氏体晶粒尺寸、合金元素固溶程度及淬火后马氏体形态。30CrMnSiA 钢传统淬火区间为 $870 \sim 920^\circ\text{C}$ 。温度偏低 ($<860^\circ\text{C}$)，合金元素扩散不充分，奥氏体均匀化不足，淬透性得不到充分发挥，心部可能出现非马氏体组织。温度过高 ($>940^\circ\text{C}$)，奥氏体晶粒明显粗化，马氏体板条束尺

寸增大，材料脆性转变温度升高，冲击韧性大幅下降，开裂敏感性显著增加^[2]。

综合现有研究，最优淬火温度为 $880 \sim 900^\circ\text{C}$ 。此区间奥氏体晶粒度可稳定在 8 ~ 9 级，合金元素充分固溶，淬火后获得均匀细小的板条马氏体组织，抗拉强度保证在 1600MPa 以上，同时保留一定塑性储备，为后续回火或配分处理创造条件。

2.2 等温淬火工艺的优化调控

等温淬火是改善 30CrMnSiA 钢强韧性匹配、从根源上降低淬火开裂风险的有效技术路径。其核心在于将零件奥氏体化后迅速冷却至贝氏体转变温区等温停留，使部分过冷奥氏体先转变为贝氏体，再冷却至室温完成剩余奥氏体向马氏体转变，最终获得贝氏体与马氏体共存的复相组织。30CrMnSiA 钢进行等温淬火处理，可获得贝氏体和马氏体的复相组织，使其强度与塑性得到更好地匹配， $340 \sim 360^\circ\text{C}$ 等温淬火后获得的硬度与强度可满足吊钩的综合力学性能要求。

针对 30CrMnSiA 钢制吊钩的工艺试验表明，等温温度对组织构成和力学性能影响显著。等温温度 $330 \sim 340^\circ\text{C}$ 时，转变产物主要为下贝氏体，碳化物呈细小弥散分布，与板条马氏体协同作用，抗拉强度维持在 1550MPa 以上，冲击韧性达 45 J/cm^2 以上。等温温度升至 $360 \sim 370^\circ\text{C}$ 时，上贝氏体比例增加，强度有所下降但塑性改善。等温温度超过 400°C 后，贝氏体转变趋于完全，强度已不能满足高强度零件设计要求。

综合来看，最佳等温区间为 $330 \sim 360^\circ\text{C}$ ，等温时间 30 ~ 60min 为宜——过短则贝氏体转变不充分，过长则可能析出粗化碳化物，削弱韧化效果。 $340 \sim 360^\circ\text{C}$ 等温淬火后，所获得的硬度与强度值均满足吊钩的力学性能要求。等温淬火与普通油淬相比，抗拉强度与屈服强度得到大幅度提高，伸长率无明显差异，断面收缩率得到一定程度提升。

2.3 淬火 - 配分工艺的应用潜力

淬火 - 配分工艺的操作路径为：奥氏体化后先淬火至 M_s 点以下某一温度获得一次马氏体，随后升温至配分温度保温，使碳从过饱和马氏体向残留奥氏体扩散配分，稳定残留奥氏体至室温，最终获得一次马氏体、稳定化残留奥氏体和二次马氏体或贝氏体的多相组织。

针对 30CrMnSiA 钢的研究表明， 330°C 是最佳一步淬火配分温度。与一步法相比，二步等温 Q&P 工艺可进一步提高残留奥氏体含量并减少二次马氏

体生成量, 韧性提升更显著。示波冲击测试证实, 330℃ 二步 Q&P 处理的冲击功相比常规淬火加低温回火提高约 25%。

Q&P 工艺改善韧性的内在机制在于残留奥氏体在服役过程中发生应变诱导马氏体相变, 即相变诱导塑性效应, 在裂纹尖端起到应力弛豫作用, 延缓裂纹萌生与扩展。这为承受冲击载荷的 30CrMnSiA 钢关键零件提供了新热处理路径, 但实施时需精确控制配分温度与时间, 避免碳化物过早析出削弱残余奥氏体稳定性^[3]。

3 淬火开裂缺陷的系统性防控对策

30CrMnSiA 钢淬火开裂是材料、工艺、结构多因素耦合的结果, 防控措施须从多维度系统布局、协同施治。

3.1 强化冶金质量管控与预备热处理

原材料的纯净度和组织均匀性是决定淬火开裂敏感性的第一道关卡。非金属夹杂物的级别要严格控制, 脆性 Al_2O_3 类夹杂和塑性硫化物类夹杂单项级别不超过 1.5 级, 总级别不大于 2.5 级。带状组织级别控制在 2 级以内, 防止合金元素偏析区在淬火时产生应力集中和异常组织。电渣重熔钢锭的补缩阶段供电制度和脱模后缓冷工艺应加以优化, 防止表面冷却过快产生原始微裂纹, 微裂纹在后续锻造和热处理中很容易扩展成宏观裂纹。

预备热处理对提高淬火质量起着重要的作用。推荐三段温度退火工艺, 650℃ 保温使碳化物初步球化, 800 ~ 810℃ 奥氏体化, 660 ~ 670℃ 等温进行球化退火。该工艺比传统完全退火获得更细小均匀的球化碳化物分布, 减少后续淬火加热时的应力集中源, 改善冷加工性能。

3.2 优化淬火加热规范

加热过程中的热应力控制是防止淬火裂纹的重要环节。对于截面变化较大或形状复杂的零件, 不宜直接升温至淬火温度, 而应采用阶梯式升温制度: 先在 350 ~ 400℃ 预热 1 ~ 2 小时, 使零件内外温度初步均匀, 再以较慢的升温速率加热至淬火温度。这样可以显著减小加热阶段因截面温差引起的热应力峰值, 避免在高温奥氏体化之前产生微裂纹。

保温时间的确定应综合考虑零件的有效截面厚度和装炉方式, 一般按 1.0 ~ 1.5min/mm 计算, 以既保证完全奥氏体化又不引起晶粒显著长大为原则。淬火加热宜在有保护气氛的炉内进行, 防止表面脱碳——脱碳层在淬火时马氏体转变体积效应与基体

不协调, 极易形成表面拉应力型裂纹, 这在薄壁零件中尤为危险。

3.3 合理选择淬火介质与冷却方式

形状规整的轴类和块状零件可采用 40 ~ 70℃ 机械油油淬。截面较大或形状复杂的零件推荐分级淬火: 先浸入 180 ~ 220℃ 硝盐浴停留 2 ~ 5 分钟, 再空冷或油冷至室温, 避开了马氏体转变剧烈区的快速冷却, 大幅降低相变应力峰值^[4]。

等温淬火本身即是最有效的应力控制手段——零件在 330 ~ 360℃ 盐浴完成贝氏体转变后直接空冷, 整个冷却过程避开 Ms 点附近快冷阶段, 淬火应力峰值仅为常规油淬的 40% ~ 60%。

3.4 缓解结构应力集中

零件结构设计中的应力集中因素是淬火开裂的重要诱因, 这一点在实际生产中往往容易被忽视。设计阶段应尽量避免截面突变、尖角、锐边和盲孔等几何不连续特征。对于不可避免的台阶过渡、键槽端部和法兰连接处, 应设置足够大的过渡圆角, 一般建议圆角半径不小于 3mm。螺纹部位是淬火裂纹的高发区域, 宜采用防护套保护或预留加工余量, 待淬火回火完成后再进行螺纹精加工, 避免螺纹牙底的缺口效应成为裂纹源。

3.5 淬火后及时回火及过程监控

30CrMnSiA 钢淬火后处于很高的内应力状态, 如果放置时间过长, 部分应力敏感零件在回火前就会出现自开裂。因此淬火后应在 4 小时内转入回火工序。低温回火 (200 ~ 300℃) 可保持较高的强度, 但不能完全消除淬火应力, 韧性恢复小; 高温回火 (500 ~ 600℃) 可获得良好的综合力学性能, 但强度损失大。对于经过等温淬火或者 Q&P 工艺处理的零件, 由于其初始应力水平较低并且残留奥氏体起到一定的应力缓冲作用, 可以适当缩短回火时间或者选用较低的回火温度, 从而保留残余奥氏体带来的初化收益^[5]。

在整个热处理过程中要配备温度均匀性检测和冷却介质温度监控手段, 保证炉温均匀性在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内、淬火油温波动不超过 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。对批量生产的零件, 建议定期做淬火应力检测和微观组织抽检, 建立工艺参数和质量结果的数据库, 为工艺的持续改进提供数据支持。

4 结语

30CrMnSiA 合金钢淬火开裂是由材料相变行为、热力学应力演化、工艺制度匹配、零件结构特征等多

因素复杂交互造成的,单个环节的改进不能取得效果。本文分析可知,淬火温度控制在 $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 、等温温度 $330 \sim 360^{\circ}\text{C}$ 的等温淬火制度,可以获得下贝氏体和板条马氏体复相组织,在保证强度的同时显著降低应力水平并提高韧性;淬火-配分工艺通过残留奥氏体的相变诱导塑性效应为高韧性需求零件提供了新思路。开裂防控要从冶金源头、加热冷却制度、结构应力舒缓、过程监测四个方面建立协同体系,把材料内在质量、工艺过程控制、结构设计优化有机统一起来,才能从根本上降低淬火开裂率,保证零件在关键服役条件下的安全可靠运行。

[参考文献]

- [1] 徐家强,程东松,绳慧洁,等.合金钢自锁螺母振动试验失效分析及预防[J].金属加工(热加工),2024,(3):111-115.
- [2] 占新华.30CrMnSiA 钢吊钩等温淬火工艺的研究[J].金属加工(热加工),2025,(5):103-106.
- [3] 冀宣名,王礼榕,杨明,等.淬火-配分处理对 30CrMnSiA 钢冲击韧性的影响[J].材料科学与工程,2024,32(3):18-28.
- [4] 王礼榕.淬火-配分工艺对 30CrMnSiA 钢显微组织与强韧化机制的影响[D].贵州大学,2023.
- [5] 杜昊龙,贺晓军.某导弹 30CrMnSi 壳体 TIG 焊缝微裂纹分析[J].航空制造技术,2012,(13):111-114+118.