

冶金工程中金属材料的热处理工艺及应用分析

李洋洋

渭南职业技术学院, 中国·陕西 渭南 714000

摘要: 热处理作为冶金工程的核心工艺之一, 通过精确控制金属材料的加热、保温和冷却过程, 实现对材料内部微观组织结构的定向调控, 从而赋予材料特定的力学性能、物理性能及化学性能。论文系统阐述退火、正火、淬火、回火等主要工艺的原理、操作要点及其在关键工业领域的应用, 并探讨其发展趋势。

关键词: 热处理工艺; 冶金工程; 金属材料; 应用

Analysis of Heat Treatment Processes and Applications for Metallic Materials in Metallurgical Engineering

Li Yangyang

Weinan Vocational Technical College, Weinan, Shaanxi, 714000, China

Abstract: Heat treatment, as one of the core processes in metallurgical engineering, achieves directional control of the internal microstructure of metal materials by precisely controlling the heating, insulation, and cooling processes, thereby endowing the materials with specific mechanical, physical, and chemical properties. The paper systematically elaborates on the principles, operational points, and applications of the main processes such as annealing, normalizing, quenching, and tempering in key industrial fields, and explores their development trends.

Keywords: Heat treatment process; Metallurgical engineering; Metallic materials; Application

0 前言

金属材料性能不仅取决于其化学成分, 更由其微观组织结构决定。热处理正是利用固态相变原理, 在不改变材料形状的前提下, 通过温度—时间参数的精确设定, 改变原子扩散速率和相变驱动力, 诱导材料发生期望组织转变, 从而优化其综合性能。该工艺对提升机械装备寿命、保障工程结构安全、实现轻量化设计具有不可替代的作用。

1 热处理工艺原理及操作要点

1.1 退火

将金属材料加热至适当温度, 通常为临界温度以上, 保温一定时间后, 随炉缓慢冷却。在退火过程中, 材料发生回复和再结晶, 从而消除内应力, 使晶粒细化, 组织均匀化。退火工艺主要分为完全退火、球化退火、去应力退火三种, 其主要类型及应用各有侧重: 完全退火常用于亚共析钢, 能细化晶粒、消除过热组织, 像 45 钢经完全退火后, 硬度降至 HB170-200, 有效改善切削加工性能; 球化退火主要针对共析钢和过共析钢, 如工具钢、轴承钢等, 通过该工艺可使渗碳成球状分布, 降低硬度并提升塑性和韧性, 以 T10 钢为例, 球化退火后获得的均匀球状珠光体组织, 能为后续淬火赋予良好的力学性能基础; 去应力退火则适用于铸件、锻件、焊接件, 可消除加工过程中产生的内应力, 稳定尺寸, 预防变形和开裂, 例如大型机械零件的焊接件经去应力退火后, 内应力可降低 30%~50%。

1.2 正火

正火工艺是将材料加热至临界温度以上 30°C ~50°C, 保温后置于空气中冷却的热处理方式主要作用有细化晶粒、均匀组织、提高综合力学性能。在实际应用中, 正火工艺具有显著优势: 针对低碳钢, 如 20 钢, 通过正火处理可将硬度提高至 HB140-160, 有效改善切削加工性能, 解决因硬度不足导致的粘刀问题; 对于中碳钢, 如 40Cr 钢锻件, 正火能够消除网状渗碳体, 细化晶粒, 使晶粒尺寸从 4 级优化至 6~7 级, 实现组织均匀化; 此外, 正火还常作为预先热处理工艺, 为后续淬火处理创造适宜的组织条件, 保障整体热处理效果, 在金属材料加工中发挥着重要的过渡与优化作用^[1]。

1.3 淬火

淬火工艺是将材料加热至奥氏体化温度, 保温后以大于临界冷却速度快速冷却, 使奥氏体转变为马氏体或贝氏体等非平衡组织, 从而获得高硬度和高强度的热处理方式。该工艺的关键在于精准控制三大参数: 加热温度因钢种而异, 亚共析钢通常加热至 Ac3 以上 30°C ~50°C, 过共析钢则加热至 Ac1 以上 30°C ~50°C, 如 35 钢淬火温度约为 850°C, T8 钢为 780°C 左右; 保温时间需综合考量材料成分、尺寸及加热方式, 以此保障奥氏体均匀化; 冷却介质的选择同样重要, 水冷却速度快, 适用于低碳钢, 油冷却速度相对较慢, 更适合高碳钢与合金钢, 此外还有浴等特殊介质。淬火工艺广泛应用于各类金属制品制造: 在工具钢领域, 车刀、钻头经淬火后硬度可达 HRC60 以上, 满足严苛的切削加工需

求; 轴承钢如 GCr15 经淬火回火处理后, 兼具高硬度、耐磨性与疲劳强度, 成为滚动轴承制造的理想材料, 常用于冷作模具生产, 通过淬火工艺的合理运用, 显著提升金属材料性能与应用价值^[2]。

1.4 回火

回火工艺是对淬火后处于高硬度、高脆性状态的钢件, 进行低于临界温度的加热处理, 通过促使马氏体分解, 析出弥散分布的碳化物, 从而降低钢件脆性, 调整硬度与韧性, 最终获得所需综合力学性能的重要工序。根据回火温度的不同, 该工艺可分为三类, 且应用场景各有侧重: 低温回火 (150°C ~250°C) 主要适用于工具钢、轴承钢等材料, 在保持高硬度 (HRC58-64) 的同时有效降低淬火应力和脆性, 像钳工常用的丝锥经低温回火后, 既能维持高硬度以满足切削需求, 又显著提升抗折断性能; 中温回火 (350°C ~500°C) 多用于弹簧钢、热作模具钢, 经处理后材料可获得较高的屈服强度 ($\sigma_s \geq 800\text{MPa}$) 与弹性极限, 同时具备一定韧性, 如 65Mn 弹簧钢经中温回火后, 能够承受较大弹性变形, 满足弹簧反复受力的工作要求; 高温回火 (500°C ~650°C), 即调质处理, 常用于中碳钢和中碳合金钢, 如 40Cr、35CrMo 等, 通过该工艺可使材料的强度、塑性、韧性达到合理匹配, 以汽车半轴为例, 经调质处理后, 其抗拉强度可达 900MPa 以上, 伸长率 $\delta \geq 12\%$, 从而具备良好的综合力学性能, 胜任复杂工况下的使用需求^[3]。

2 金属材料热处理工艺的应用领域

2.1 航空航天领域

在航空航天领域, 金属材料需要具备极高的比强度、优异的疲劳性能、断裂韧性及高温性能, 而热处理工艺通过微观组织精准调控, 成为实现这些目标的核心技术手段。在高温合金涡轮部件方面, 针对发动机涡轮盘、叶片等热端部件 (如 Inconel 718、CMSX-4 单晶合金), 采用 1150°C ~1200°C 固溶处理溶液 γ' 强化相及碳化物以实现成分均匀化, 再经 720°C \times 8h+620°C \times 8h 阶梯时效处理, 分阶段析出纳米级 γ' 、 γ'' 相形成共格强化网络, 使部件在 750°C 下持久强度提升 40% 以上, 晶界碳化物形态受控, 延缓高温裂纹扩展; 超高强度钢起落架常采用 300M 钢, 经真空脱气冶炼降低氢氧含量, 870°C 油淬获得高硬度板条马氏体, -73°C 深冷处理转化残余奥氏体, 再经分级回火实现强度与断裂韧性协同优化, 辅以表面喷丸强化与渗氮复合处理, 疲劳寿命提升 5~8 倍; 钛合金主承力结构以 Ti-6Al-4V 为代表, 通过 β 相区锻造消除织构各向异性, 固溶时效调控初生与次生 α 相含量和尺寸, 使材料室温抗拉强度 $\geq 1100\text{MPa}$, 400°C 高温强度保持率 $> 85\%$ 。此外, 新兴技术不断延伸, 激光粉末床成形镍基合金经热等静压及时效处理, 可消除气孔缺陷提升高温低周疲劳性能; 钛基复合材料的扩散焊接工艺能增强界面结合强度, 为航空航天轻量化构件应用提供新

方向。

2.2 汽车制造领域

汽车工业对金属零部件性能有着轻量化、高安全性、耐磨性、长疲劳寿命及成本可控的多维平衡需求, 热处理工艺通过差异化设计实现关键部件性能精准优化。在齿轮传动系统中, 20CrMnTi 材料经可控气氛渗碳、直接淬火、深冷处理及低温回火, 形成隐晶马氏体 + 碳化物组织, 使齿轮接触疲劳寿命超 10^7 次, 抗弯强度提升 30%; 发动机曲轴与连杆领域, 材料从 42CrMoA 向非调质钢 F38MnVS 演进, 结合感应淬火、氮碳共渗和异步控温回火, 抗拉强度 $\geq 1000\text{MPa}$, 疲劳极限 $\sigma_{-1} \geq 450\text{MPa}$; 悬架弹簧系统将 60Si2MnA 优化为 55CrSi, 配合盐浴淬火、双级回火与预压应力处理, 弹性极限提升至 1600MPa, 疲劳寿命超 50 万次; 车身轻量化组件采用 DP780 双相钢、TRIP800 钢、MS1500 马氏体钢等, 分别经临界区退火、贝氏体区等温、直接淬火等工艺, 实现强度与成形性的提升; 针对新能源车, 电机轴的无取向硅钢经氢气退火降低铁损, 电池壳体的 6 系铝合金通过 T6 处理增强强度, 一体化压铸件经热等静压消除孔隙, 全方位满足汽车制造各环节的严苛性能要求^[4]。

2.3 工具模具制造领域

在工具模具制造领域, 材料需兼具极高硬度 (≥ 60 HRC)、优异耐磨性、红硬性 (600°C 硬度 > 54 HRC)、微米级尺寸稳定性及适度韧性。高速钢刀具 (如 M42 钻头) 通过阶梯式三次淬火 (1180°C ~1220°C 梯度升温抑制晶粒粗化) 与三重高温回火 (560°C \times 1.5h \times 3 次), 驱动 MC 型 (V-rich) 与 M₂C 型 (W/Mo-rich) 碳化物弥散析出 (尺寸 50~200nm), 实现二次硬化, 红硬性提升至 600°C /62 HRC; 冷作模具钢 Cr12MoV 采用真空高压气淬 (1020°C \times 30min, 6bar N₂), 结合分级回火 (180°C \times 2h+510°C \times 4h), 在保留高硬度的同时 (58~61 HRC) 提升韧性, 并通过液氮深冷 (-196°C \times 24h) 将残余奥氏体降至 $< 3\%$, 保障精密冲压模具的尺寸精度 (公差 $\pm 0.01\text{mm/m}$); 热作模具钢 H13 (4Cr5MoSiV1) 经奥氏体预处理 (1050°C \times 30min 细化碳化物) 与优化淬回火 (1030°C 油淬 +590°C \times 4h \times 2 次), 析出纳米级 M₆C/M₂₃C₆ 碳化物 (体积分数 $> 8\%$), 赋予其高温屈服强度 (600°C /850MPa) 及抗热疲劳性能 (热循环 $> 10^5$ 次无龟裂), 满足压铸模 1600°C 熔铝工况需求。

2.4 能源与重工装备领域

在能源与重工装备领域, 大型构件的性能保障始终是行业关注的核心, 尤其是在高温高压服役环境与极端工况下, 实现装备的长寿命与高可靠性成为关键挑战。以发电设备为例, 其转子和汽轮机叶片多采用大型合金钢锻件制造, 需经历复杂且严谨的热处理工艺, 包括去氢和均匀化退火、喷淋或浸液淬火, 以及高温回火调质处理, 通过多道工序协同作用, 确保构件具备优异的整体强韧性与抗蠕变性能。在

石油钻采领域,设备长期承受高应力、磨损与腐蚀等多重考验,为增强关键部位性能,如钻杆接头和齿轮等,常用渗碳、碳氮共渗或表面淬火技术进行强化处理。而在风电行业,大型轴承作为核心部件,通常选用高铬轴承钢(GCr15SiMn)制造,需依次完成精密球化退火以优化预备组织、淬火处理、低温回火,以及稳定化处理等流程,从而保障轴承拥有高且均匀的硬度、出色的尺寸稳定性和卓越的接触疲劳寿命,支撑风电设备的稳定运行。

3 金属材料热处理工艺的发展趋势与实施路径

3.1 发展趋势

随着制造业的升级与转型,冶金工程中金属材料热处理工艺正朝着精密化、智能化、绿色化及复合化方向发展,同时也面临着诸多挑战。在精密化与智能化层面,借助计算机模拟技术对相变动力学、温度场及应力场进行深度解析,从而精准优化工艺参数,结合传感器与人工智能技术实现热处理过程的在线实时监控与自适应调控,提升生产效率与产品质量稳定性;节能与环保方面,大力推广真空热处理、离子渗氮/渗碳等少无氧化工艺,减少材料氧化损耗与环境污染,积极研发高效环保型淬火介质替代传统淬火油,并通过优化感应加热、激光加热等新型加热方式,显著提高能源利用效率;表面工程复合技术领域,将热处理与物理/化学气相沉积(PVD/CVD)、热喷涂、激光熔覆等表面处理技术有机结合,赋予材料表面耐磨、耐蚀、耐高温等多种功能特性;面对高熵合金、金属基复合材料、增材制造金属等新型材料不断涌现,如何深入研究其组织结构与性能特点,探索并建立与之适配的热处理制度,成为当前行业亟待解决的关键问题,也是推动热处理工艺持续创新发展的重要方向。

3.2 实施路径

3.2.1 加强对金属材料预处理变形的控制

在金属材料热处理实践中,需依据材料特性与加工要求合理选用正火处理。为确保热处理过程中材料组织均匀性,规避严重变形问题,应针对材料结构差异制定个性化处理工序,并做好预处理准备。尽管这一做法可能会使热处理成本有所增加,但从整体效果来看,能显著提升金属材料的处理质量,实现精细化管理目标,为后续加工及优化奠定坚实基础。

3.2.2 选择适宜的冷却方式

冷却是金属材料热处理的关键环节,不同冷却方式直

接影响材料变形概率,需根据实际工况科学选用并严格把控细节。分级淬火冷却与等温淬火冷却是常用工艺:前者借助盐液辅助降低材料内应力,虽需特定介质支持,却能满足高精度加工需求;后者虽会增加公共成本,但可通过精准控温实现更高精度。在实际应用中,需依据材料特性与精度要求,在工艺可行性与成本控制间寻求平衡,以优化冷却效果并保障热处理质量。

3.2.3 规范加工工序和细节

在金属材料热处理过程中,需从整体出发规范加工工序与细节,以保障工艺顺利实施并降低风险隐患。首先,应依据材料特性选用适配的机械设备,科学规划机械加工工序,必要时结合材料实际情况灵活调整。由于机械加工中存在余量,需严格控制材料变形量,确保其处于允许范围。待热处理完成后,可通过二次加工并采取反变形措施,进一步提升金属材料的热加工质量,实现从设备选型、工序规划到后期处理的全流程精细化管控。

3.2.4 提高人员技能水平

金属材料热处理质量与操作人员的技能水平、综合素质密切相关。为适应行业发展需求,提升热处理加工效果,需强化操作人员技能培训体系建设,通过系统化、科学化的指导,确保其熟练掌握热处理工艺要点。同时,依据金属材料热处理的技术规范与质量标准,优化操作流程,并建立严格的考核机制,以此规范操作人员行为,促进其专业能力提升,从人力资源层面保障热处理加工的精准性与稳定性。

4 结语

热处理工艺在冶金工程中对于金属材料性能的提升和应用拓展具有不可替代的作用。在实际应用中,需根据金属材料的种类、成分和使用要求,合理选择热处理工艺参数,以获得最佳的处理效果。

参考文献:

- [1] 曾凡.金属材料热处理工艺优化研究[J].造纸装备及材料,2025,54(5):58-60.
- [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] 何卫东.金属热处理工艺对材料性能的影响研究[J].世界有色金属,2025(3):7-9.
- [4] 陈正楠.金属材料热处理工艺与技术现状分析[J].冶金与材料,2023,43(1):101-103.