

热处理工艺优化对合金组织力学性能的影响

何勇

天津象屿铝业有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i4.21751

[摘要] 热处理可调控合金相变、析出行为与晶粒尺寸,是优化微观组织、提升力学性能的关键方式。本文系统分析固溶温度、时效制度、冷却速率等工艺参数对合金组织演化的作用机制,探究等轴 α 相含量、次生相形貌、晶粒尺寸等组织参量与强度、塑性、韧性的内在联系。试验证实,热处理优化的核心是精准把控相变热力学与动力学,协同多种强化机制,突破强度塑性无法兼顾的技术瓶颈。结合定量组织性能模型与循环热处理等新型工艺,本文分析其在航空动力构件、增材制造合金中性能预测与精准调控的应用潜力,为新型合金热处理工艺研发提供完善的理论依据与工程实践参考。

[关键词] 热处理工艺; 力学性能; 固溶时效; 析出强化; 构效关系

中图分类号: TG156 文献标识码: A

The influence of heat treatment process optimization on the microstructural and mechanical properties of alloys

Yong He

Tianjin Xiangyu Aluminum Industry Co., Ltd.

[Abstract] Heat treatment enables the regulation of alloy phase transformations, precipitation behavior, and grain size, making it a key approach for optimizing the microstructure and enhancing mechanical properties. This study systematically analyzes the underlying mechanisms by which process parameters—such as solid solution temperature, aging conditions, and cooling rate—influence the microstructural evolution of alloys, and investigates the intrinsic relationships between microstructural parameters (e.g., the content of the α phase, the morphology of secondary phases, and grain size) and properties such as strength, ductility, and toughness. Experimental results demonstrate that the core of effective heat treatment optimization lies in the precise control of both the thermodynamics and kinetics of phase transformations, the synergistic utilization of multiple strengthening mechanisms, and the overcoming of the technical bottleneck where achieving both high strength and good ductility is challenging. By integrating quantitative microstructure–property models with advanced processes such as cyclic heat treatment, this paper explores their potential for performance prediction and precise control in aerospace power components and additive manufacturing alloys, thereby providing a comprehensive theoretical foundation and practical engineering reference for the development of novel heat treatment processes for alloys.

[Key words] heat treatment process; mechanical properties; solid solution aging; precipitation strengthening; structure–property relationship

1 引言

合金的整体力学表现,涵盖了屈服强度、延伸率、冲击韧性、疲劳耐久度等一系列关键指标,这些性能的底层根源,全来自材料内部显微组织的组成形态和空间排布状态,而热处理技术就是能低成本、高精度调整这类微观结构的主流实用方法。航空领域一直盯着钛合金的高比强度做文章,就是为了给构件实现轻量化减重,能源化工行业对镍基耐热合金的长期高温服役温

度上限,更是卡了极严的硬性要求,只有靠量身定制的精细化热处理工序,才能把材料本身藏着的力学潜力完完全全激发出来。以往针对热处理技术的相关研究大多单独分析某一项工艺参数带来的性能变化,未能完整梳理“工艺条件—显微组织—力学特性”跨尺度链条的内在作用机理。伴随材料基因工程思路的不断落地,定量化组织性能对应模型的搭建,给合金力学指标精准预判、反向推导热处理方案带来全新研究思路。除此之外,循环

热处理、低温深冷改性等创新工艺,在细化晶粒、调控多相尺寸、同步提升强度与塑性层面具备独特优势。本文从头到尾捋清了热处理参数调整,是怎么一步步改变合金内部显微组织进而把力学性能提上来的,重点拆解了固溶、时效这两个阶段里,相变热力学和动力学的具体调控规律,再搭配定量拟合模型和当下最新的热处理工艺,把能让材料性能大幅往上提的可行路径掰扯明白。最后得出的这些结论,既能给工程上常用的关键合金热处理方案做正向设计、迭代优化,也能帮着压缩整个研发的试错周期,同时补上实打实的理论依据和落地能用的实操指引。

2 热处理工艺对微观组织的调控机制

2.1 固溶处理与时效析出

固溶处理的核心目标是让合金内能够溶解的第二相颗粒完全溶入基体金属,以此得到成分均匀、处于过饱和状态的单一固溶基体,为后续时效工序中弥散分布的强化相生成铺垫物质与结构条件。针对 $\alpha+\beta$ 双相钛合金体系,固溶加热区间的选取会直接左右 α 相向 β 相的转化程度,同时改变保留下来的等轴初生 α 相占比。实测数据显示,TC11钛合金在950~980℃调固溶温度, α 相占比、 β 晶粒尺寸都会明显变化,直接影响室温拉伸强度和伸长率。升温后 β 稳定组分占比上升、等轴 α 相减少,该组织变化虽能优化合金塑性变形能力,但通常会让材料强度小幅下降。除此以外,固溶工序结束后的冷却速率也是定型室温微观组织的核心条件,水淬这类急速冷却手段能够有效阻碍降温阶段次生 α 相生成,最大限度将亚稳态 β 相保留至常温,为后续时效工序提供更强的析出强化动力,同时拓宽相变调控的调整空间。

时效处理的核心原理是依靠恒温保温阶段原子扩散运动,让过饱和固溶基体析出大量细密分散的次生增强相,像钛合金内部针状次生 α 相、镍基耐热合金的 γ' 、 γ'' 金属化合相均属于此类,这类析出颗粒能够束缚位错移动,大幅提升合金抵御塑性变形的综合性能。选用GH4169镍基高温合金作为研究对象,试样完成975±10℃保温1小时固溶操作,再配套720℃保温8小时、620℃保温8小时两段式时效工艺后,晶粒内部生成大量和基体保持共格关系的 γ'' 析出相。该物相具备特殊体心四方晶体构型,且晶格错配数值较高,可生成极强的共格应变强化效果,让合金在常温以及650℃以内高温环境下,同时拥有最优抗拉强度与抗持久蠕变特性。但需警惕的是,长期暴露于高温环境或时效温度控制失当时,亚稳态的 γ'' 相将发生向稳态 δ 相的不可逆转变, δ 相以粗大片状形态沿晶界或晶内析出,其与基体的共格关系完全丧失,导致强化效果急剧衰退并伴随韧性明显劣化。对于Ti-6Al-7Nb生物医用钛合金,930℃固溶加600℃时效处理后,亚稳定 β 相解析出的亚微米级片层状次生 α 相可产生显著的沉淀强化增益,而合理保留的等轴初生 α 相则有效维持了合金的变形均匀性与断裂韧性。

2.2 冷却速率与相变路径

冷却速度属于热处理环节重要的动力学调控指标,它会改变扩散主导相变的发展程度与演化路径,最终确定合金常温下

的微观形貌与各类物相占比。选用随炉冷却这类低速降温手段时,高温留存的过冷奥氏体拥有充足时间完成碳元素远距离迁移与组分重分布,推动铁素体、珠光体这类平衡稳定相充分析出并持续粗化,生成晶粒粗大的平衡显微组织。与之相对,水淬、油淬这类急速冷却手段能够大幅限制原子扩散行为,让相变脱离平衡演化规律,依靠无扩散切变反应生成马氏体、贝氏体等亚稳态组织,材料内部大量晶格缺陷与精细亚结构,为后续力学性能优化创造结构条件。以中碳工程用钢作为研究对象,淬火得到的马氏体拥有出色硬度与强度,却存在韧性不足的缺陷;配套回火工序在适宜温度恒温保温,能够调控马氏体分解、碳化物析出形貌以及位错恢复、消失过程,在较大区间内自由调配材料强度与韧性。值得重点说明的是,250~400℃中温贝氏体等温淬火,能够制备出贝氏体铁素体板条搭配薄膜残余奥氏体的复合组织;在外力形变时残余奥氏体产生相变诱导塑性,有效延缓试样颈缩现象,同步兼顾材料强度与塑性两项性能。

2.3 组织特征参量的定量表征

搭建微观组织指标和宏观力学性能的定量对应模型,是热处理工艺摆脱传统经验、依靠数据精准调控的先决条件。TC11钛合金相关试验证实,初生等轴 α 相占比、晶粒规格以及 β 基体内部片层 α 相尺寸,是左右材料屈服强度与伸长率的核心微观指标。利用多元非线性回归、响应面、支持向量回归等机器学习手段,能够搭建高精度室温拉伸性能预测模型。该模型既能量化各组织要素的作用占比,也能反向推算适配目标强塑性的理想微观结构,精准划定热处理工艺区间,大幅缩减反复试验造成的资源损耗。下表归纳各类合金微观组织对力学性能的变化规律。

表1 典型合金热处理组织参量与力学性能关系

合金体系	关键组织参量	工艺调控方向	强度影响	塑性影响
$\alpha+\beta$ 钛合金	等轴 α 相含量	提高固溶温度	降低	提高
$\alpha+\beta$ 钛合金	次生 α 相片层厚度	降低时效温度	提高	降低
镍基高温合金	γ'' 相体积分	优化时效制度	显著提高	轻微降低
中碳钢	回火马氏体+碳化物	控制回火温度	中温回火峰值	高温回火改善

3 组织-性能关联与工艺优化策略

3.1 强化机制与韧性调控

材料的强度是靠固溶、细晶、析出、位错这四类强化效果一起搭伙撑起来的,热处理优化说白了就是把这几类强化的作用效果给平衡好。钛合金主要靠晶粒细化和析出相来实现强化,可析出相要是太多了,反而会把塑性给拖垮。相关试验也能看出来,调整Ti-6Al-7Nb的时效温度,把次生 α 相的形貌拿捏到位,就能同时拿到高的强度和不错的延伸性能。高温合金的强韧性全由 γ' 、 γ'' 相的尺寸、模样和含量说了算,20纳米以下的 γ'' 相是靠着共格应变给基体提强度;一旦过时效变粗转成了 δ 相,强化效果和材料韧性都会掉一大截,所以时效工艺设计的时候,最关键的就是要躲开过时效的情况。

3.2 定量模型指导下的工艺优化

长久以来,传统热处理工艺研发普遍采用经验式试错手段,依靠大批量正交试验不断摸索可行工艺区间,该模式不仅研发周期久、物料人力成本高昂,还无法完整阐明工艺参数和材料性能变化的内在作用逻辑。与之对比,依托定量组织-性能关联模型的逆向设计思路,为工艺优化开辟了一套更科学可行的技术方案。以TC11钛合金工艺研发工作为例,科研人员完整采集不同固溶温度、时效温时搭配下的各类微观检测数据,将等轴 α 相体积占比、 α 片层长宽比例等核心组织指标设为输入变量,以屈服强度、断裂伸长率作为输出目标,搭建拟合精度优异的二次多项式回归模型。这模型能量化组织对强塑性的耦合影响,还能反推最优组织和工艺,大幅缩短研发耗时、提升可控性。

3.3 新兴热处理技术的发展

循环热处理(简称CHT)属于新型改性工艺手段,该方法多次执行快速升温与急速降温循环以诱发循环固态相变,依托每一轮相变过程晶粒重形核、长大过程受约束的冶金机理,持续细化晶粒并均匀化内部微观结构,为破解材料强度与塑性难以同步提升的固有难题提供了新颖可行的研究思路。

钢材热处理实操过程中,该工艺在Ac3临界温度区间反复完成奥氏体化与淬火工序,能够打碎原始晶界结构、遏制晶粒粗化趋势,大幅缩减后续相变生成的马氏体、贝氏体板条尺寸,同时让薄膜形态的残余奥氏体均匀填充在板条缝隙之间,同步提升材料强度与低温抗冲击性能。增材成型合金原始显微结构具备独特的非平衡凝固特点,存在密集胞状亚晶边界、远高于常规铸锻材料的位错密度以及更严重的元素偏析问题,通用热处理方案难以适配,必须结合其独特的组织遗传特征重新改良工艺参数。现有试验数据显示,激光沉积Inconel718合金用1020℃固溶加4小时时效的优化工艺,既能保住细晶优势,又能让 γ'' 强化相均匀大量析出,屈服强度达1171.2MPa,伸长率稳在11.7%,综合性能突出。这说明摸透增材合金微观组织演变规律,定制专属热处理流程,是挖足材料性能上限、拓宽工程应用的核心。

4 结束语

靠热处理手段来调整合金的力学性能,往根上说是一套完整的微观组织调控体系,核心思路就是把固溶温度、时效制度、冷却速度这些关键参数给安排明白,精准拿捏析出相的种类、尺寸、空间分布还有基体晶粒的大小和形貌,最后让强度、塑性、韧性这三类力学指标凑到一块儿,达到最协调的平衡状态。

量化组织性能对应模型的研发完善,推动热处理工艺优化摆脱传统反复试验的经验模式,转向依托理论预判、数据支撑的现代化技术思路。后续该领域的科研工作可聚焦三大研究方向:(1)应力、温度多场共同作用环境下,热处理全程微观结构演变动力学规律,以及该过程影响材料性能的量化分析方法;(2)将机器学习、深度神经网络等多目标优化算法深度结合至热处理逆向工艺设计,快速压缩并精准确定可行工艺区间;(3)针对增材制造工艺独有的非平衡凝固微观特征,研发适配的合金材料与配套热处理流程,充分发挥快速凝固产生的细晶、过饱和固溶体等独有结构优势。(4)循环热处理、电磁场辅助热处理等新型工艺在更广泛合金体系中的适用性验证及其微观强化机理的深入阐明,为下一代高性能合金的工艺创新提供理论储备。

[参考文献]

- [1]江龙,赵文普,张超群.热处理工艺对TC21钛合金室温和高温力学性能的影响[J].金属热处理,2025(02):11.
- [2]张生浪,田涛.热处理工艺参数对低合金油套管钢性能的影响研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(8):62-64.
- [3]面向航空发动机高压压气机盘/叶片的TC11钛合金显微组织-力学性能定量关联机制及热处理工艺优化研究[EB/OL].科辉钛业,2025-11-10.
- [4]李锡刚.C919应急断离保险销制备工艺与性能研究[J].科技创新与应用,2026,16(20):15-18.
- [5]洪兵,毕文亚,张晓昭,等.不同热处理工艺对GH4169合金力学性能及微观组织的影响[J].物理测试,2026(01):47.
- [6]李志刚,王敏.铝合金连续热处理生产线工艺配置探讨[J].有色金属加工,2026,55(4):16-20.
- [7]Rossi,etal.Areviewofheattreatmentsapplied to low and medium and high carbon steels used in cold drawn[J].Discover Materials,2025.
- [8]张瑞林.点式锻压激光沉积Inconel718合金热处理工艺优化[J].兵器材料科学与工程,2026(01):18.
- [9]李岩.热处理工艺优化在金属材料性能提升中的应用研究[J].模具制造,2026,26(5):147-149.

作者简介:

何勇(1982—),男,汉族,江西南昌人,本科,高级工程师,从事金属压力加工方向的工作和研究。