

改善金属材料疲劳性能方法综述

苑文广

中国电子科技集团公司第四十九研究所 黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 疲劳损伤是限制金属构件服役寿命、降低结构运行稳定性的关键因素, 各类循环载荷与复杂服役环境均会加速材料性能劣化。本文结合金属材料的疲劳行为特点与损伤形成条件, 系统梳理内外因素对疲劳性能的影响规律, 逐层阐释微观结构、循环应力、外部环境主导的疲劳损伤演化机制, 归纳成分优化、组织调控、表面改性、工艺优化四类主流改良方式, 结合行业技术迭代现状总结改良工艺的发展方向, 可为金属材料抗疲劳性能优化与工程应用提供系统的理论参考。

关键词: 金属材料; 疲劳性能; 损伤机理; 组织调控; 工艺改良

引言: 金属材料凭借优异的综合力学性能, 广泛应用于机械制造、航空航天、轨道交通等诸多工业领域。工业服役场景中, 金属构件长期承受交变载荷与复杂环境耦合作用, 极易产生渐进式疲劳损伤, 引发结构失效问题, 大幅降低设备运行可靠性。明晰金属材料疲劳损伤的演化规律, 掌握各类技术手段对疲劳性能的优化原理, 能够有效解决构件疲劳失效难题, 对提升工业金属构件服役稳定性、延长设备使用周期具备重要的现实意义。

1 金属材料疲劳行为与影响要素

1.1 金属材料疲劳行为主要特征

金属材料在循环往复的载荷作用下, 会逐步产生结构损伤并引发性能衰减, 这类疲劳行为具备独特的变化规律与表现形式^[1]。疲劳损伤的发展进程较为缓慢, 整体演变需要经历多次载荷循环作用, 不会在单次受力状态下直接出现结构失效。损伤发育存在明显的阶段性, 从微观结构异变、微裂纹产生, 逐步过渡到裂纹拓展与整体结构破坏, 整个过程循序渐进且具备较强的隐蔽性。材料发生疲劳失效前, 不会出现显著的塑性变形, 结构外观保持相对完整, 难以通过直观观察提前预判损伤隐患。不同金属材质的疲劳表现存在差异化特征, 晶粒结构、材质纯度的不同, 会让材料耐受循环载荷的能力出现明显区别, 形成各不相同的疲劳演化节奏。

1.2 金属材料疲劳损伤形成条件

金属材料疲劳损伤的出现需要满足特定的受力与环境条件, 多重条件叠加会推动结构损伤持续发育。交变循环载荷是诱发疲劳损伤的核心前提, 持续性的反复受力会让材料内部晶体结构产生滑移与错位, 逐步积累微

观损伤。载荷波动幅度与作用频次维持在对应区间, 才能持续推动微裂纹的生成与延伸。材料自身存在的微观缺陷会加速损伤发育, 晶体空位、界面夹杂、表面细微划痕等结构瑕疵, 都会成为疲劳损伤萌生的核心点位。外部环境的温度、湿度、介质状态也会改变损伤发育速度, 复杂环境会腐蚀材料表层结构, 弱化结构承载能力, 为疲劳损伤的形成与拓展创造有利条件。

1.3 金属材料疲劳性能主要影响要素

金属材料疲劳性能的稳定状态, 受到内部结构与外部工况的多重作用。内部因素集中体现在材料自身的微观组织结构, 晶粒尺寸、晶体排布方式、内部杂质含量都会决定结构抗疲劳承载能力。制备工艺带来的残余应力、结构致密程度, 也会改变材料疲劳耐受上限。外部因素涵盖日常运行的载荷状态, 载荷大小、循环频次、受力形式的变动, 都会干扰疲劳损伤的积累速度。运行环境的腐蚀介质、温度变化、气压条件, 会持续侵蚀材料表层与内部结构, 破坏结构稳定性。多重要素相互作用, 共同决定金属材料疲劳性能的整体状态与衰减速度。

2 金属材料疲劳损伤演化机理

2.1 微观结构引发的疲劳损伤机制

金属材料内部微观结构的排布状态, 是决定疲劳损伤萌生与发展的内在核心。材料晶粒尺寸、晶界分布、相组织形态都会对内部受力传递产生直接影响^[2]。金属材料承受循环载荷作用时, 晶粒内部会出现局部应力集中现象, 晶体滑移带会在反复受力过程中持续发育、逐步累积。晶界位置的结构差异性, 会阻碍应力传导路径, 造成局部应力堆积, 催生微观尺度的结构形变。材

料内部存在的夹杂、空位、析出相等原生结构缺陷,会打破内部结构受力均匀性,成为疲劳损伤的优先萌发点。微观结构的不均匀形变会持续累积,逐步形成稳定的微观裂纹,推动材料内部损伤从隐性状态逐步转向显性状态,完成疲劳损伤的初始演化过程。

2.2 循环应力下裂纹萌生与扩展机制

循环应力的持续作用,是金属材料裂纹萌生、延展直至结构失效的主要动力。交变载荷反复作用于材料表层与内部结构,会持续放大微观结构的应力集中效应,促使局部晶体发生不可逆塑性滑移。长期塑性滑移积累会在材料表层形成滑移挤出带与侵入带,结构连续性遭到破坏,初始微裂纹随之产生。微裂纹形成后,循环应力的持续冲击会不断推动裂纹尖端拓展撕裂,逐步扩大裂纹延展范围。裂纹扩展会沿着晶体薄弱界面、缺陷密集区域持续延伸,逐步贯通局部结构区域。随着载荷循环次数不断增加,裂纹尺度持续扩大,破坏材料整体结构完整性,最终造成金属材料承载性能大幅下降,引发结构疲劳失效。

2.3 外部服役环境诱发疲劳劣化机制

金属材料服役过程中接触的外部环境,会从外部层面加速疲劳损伤演化进程,诱发材料性能持续劣化。潮湿空气、酸碱介质、腐蚀性气体等环境介质,会持续侵蚀材料表层结构,破坏表层致密性,生成腐蚀坑与表层缺陷。这类表层缺陷会改变局部受力结构,加剧应力集中程度,为微裂纹萌生提供有利条件。高低温交替变化的工况会引发材料热胀冷缩形变,产生附加内应力,叠加机械循环载荷共同作用于材料结构,加速内部损伤累积。复杂服役环境会持续弱化材料结构稳定性,加快裂纹萌生速度与扩展速率,缩短材料疲劳寿命,让金属材料在常规载荷工况下出现更为显著的疲劳性能劣化现象。

3 金属材料疲劳性能主要改良方法

3.1 合金成分优化改良方法

合金成分优化是从材料本源提升疲劳抗力的基础手段,依托元素掺杂、杂质管控、配比调整的方式改善基体组织结构,弱化疲劳损伤发育速度。金属基体内部的元素配比状态,直接影响晶粒成型质量、相组织分布以及位错运动阻力。合理添加镍、铬、钼等合金元素,能够形成稳定的固溶强化体系,提升基体结构的整体强度与形变抗力^[3]。适量添加稀土元素可以吸附材料内部游离杂质,细化非金属夹杂颗粒,可将夹杂平均粒径控制在 $0.8\mu\text{m}$ 以内,减少缺陷聚集带来的应力集中问题。严

格控制硫、磷等有害杂质含量,降低晶界偏聚现象发生概率,规避疲劳荷载作用下的沿晶开裂问题。科学调整碳元素含量可以稳定碳化物析出形态,避免粗大脆性相破坏结构连续性。合理的成分改良方式能够优化材料内部力学稳定性,延长裂纹萌生周期,全面提升金属材料抗疲劳服役能力。

3.2 微观组织调控改良方法

微观组织状态决定金属材料在循环荷载环境下的损伤演化规律,组织调控技术可以通过工艺手段重塑内部结构形态,改善疲劳耐受性能。常规调控方式包含热处理、时效强化、晶粒细化等技术手段,能够有效改善晶粒尺寸、晶界形态与析出相分布。合理的固溶热处理可以均匀化内部组织,消除铸锻成型留存的组织偏析问题。低温时效处理能够催生弥散分布的纳米析出相,有效钉扎晶体位错运动,大幅抑制循环形变带来的结构滑移。工艺参数精准调控后,材料平均晶粒尺寸可细化至 $8\mu\text{m}$ 级别,细腻均匀的晶粒结构可以分散局部应力负荷,降低单点应力堆积强度。有序的组织结构可以延缓微裂纹萌生与扩展速度,减少反复荷载带来的塑性损伤累积,维持材料长期服役过程中的结构稳定性。

3.3 材料表面改性改良方法

金属材料多数疲劳失效问题起源于表层损伤,表层缺陷、表面粗糙度、表层应力状态都会直接影响疲劳寿命。表面改性技术通过重构表层组织结构、优化表面硬度、引入残余压应力,实现疲劳性能提质升级。常见技术类型包含喷丸强化、激光重熔、离子渗氮、涂层改性等多种方式,适配不同金属材质与服役工况。标准喷丸工艺可在材料表层构建深度 0.3mm 至 0.5mm 的压应力层,抵消循环荷载产生的拉应力损伤。激光改性技术可以快速熔凝表层金属,细化表层晶粒结构,表层显微硬度可提升 40% 以上。离子渗氮工艺能够生成致密氮化物强化层,有效抵御环境介质侵蚀与机械摩擦损伤。改性处理可以消除表层微细划痕、孔洞等缺陷,阻断表层微裂纹萌生路径,显著提升金属材料的疲劳服役上限。

3.4 成型加工工艺优化方法

成型与加工流程产生的结构缺陷与残余应力,会持续影响金属材料疲劳性能的稳定性。工艺优化通过调整成型参数、规范加工流程、优化后处理方式,减少工艺性损伤带来的疲劳隐患。熔炼阶段的工艺优化可以提升材质纯净度,减少内部气孔、疏松等体积缺陷,将材料内部孔隙率控制在 0.5% 以下。精密锻造成型能够压实内部松散结构,提升整体致密程度,优化内部应力分布状

态。精加工阶段调整切削参数、控制加工进给量,可以降低表层加工刀痕与塑性流变层厚度,减少表层应力集中点位。后续整形与去应力处理可以释放成型留存的残余内应力,规避残余应力与交变荷载叠加引发的加速损伤。标准化、精细化的加工体系可以从工艺层面规避疲劳诱因,保障金属材料在循环荷载工况下保持稳定的力学性能。

4 金属材料疲劳性能改良方法发展趋势

4.1 微观尺度精准调控发展趋势

金属材料疲劳性能的改良重点逐步从传统宏观工艺调整转向微观维度的精细化治理,通过靶向干预内部结构实现疲劳性能提质。以往改良方法多依靠整体热处理与粗放化成分调整,只能实现大范围结构优化,无法精准处理微小缺陷与应力薄弱区域,整体改良精度较为有限。现阶段改良方法发展聚焦晶粒形态、析出相分布、位错组态等微观核心要素,依托高精度检测与可控加工手段完成定向调控。方法应用过程中可精准修正内部结构缺陷,缓解局部应力集中问题,从根源抑制微裂纹的萌生与扩展。精细化调控模式摆脱传统工艺的粗放治理模式,提升结构改良的针对性与有效性^[4]。这类方法升级方式能够精准优化材料内部薄弱结构,稳定循环载荷下的结构稳定性,为金属材料疲劳性能的精准优化提供全新改良路径。

4.2 多工艺复合改良发展趋势

单一的改良方法存在明显优化局限,仅能针对材料单一结构层面完成改良,无法全面解决复杂的疲劳损伤问题,难以满足高端装备的长效服役标准。单一方法改良模式往往只能改善基体组织结构或优化表层性能,无法覆盖疲劳损伤的多元诱因。多工艺复合改良思路成为现阶段方法升级的主流方向,整合成分优化、组织调控、表面强化等多种改良手段。不同方法的应用优势可以互补兼容,分别从基体内部结构、表层防护性能、残余应力分布等多个维度完成全方位改良。复合工艺体系能够弥补单一方法遗留的结构短板,消除多元疲劳诱发因素。持续迭代的工艺组合模式可以适配不同材质、不同设备的改良需求,大幅提升疲劳改良工作的全面性与稳定性。

4.3 复杂工况适配改良发展趋势

工业设备的服役环境持续趋于复杂,温度交变、介质腐蚀、高频交变载荷叠加的工作状态,会大幅加速金属材料的疲劳劣化进程。常规改良方法仅适配温和稳定的基础工况,改良后的材料在极端环境中依旧存在寿命

不足、性能衰减过快的问题,难以适配高端工业装备的严苛运行条件。当下改良方法的优化重心,逐步转向工况适配性的专项调整,结合复杂环境下的疲劳损伤规律设计针对性改良方案。通过调整组织结构与表层防护体系,强化材料抗腐蚀、抗高温形变、抗高频疲劳的综合能力,有效延缓极端工况下的损伤累积速度。针对性的改良设计可以有效提升材料环境耐受能力,拓展金属材料的工业服役场景与使用周期。

4.4 绿色低碳改良工艺发展趋势

工业绿色发展理念持续渗透材料加工领域,传统高能耗、高污染的疲劳改良工艺逐步面临淘汰升级。早期热处理、强化处理工序流程繁琐,能源消耗量大,加工过程会产生各类污染物,不符合现代工业发展要求。新型改良方法聚焦节能化、洁净化、高效化的工艺升级,精简冗余加工工序,采用低温处理、洁净熔炼、绿色表面改性等新型工艺模式。全新工艺体系可以在稳定保障材料抗疲劳改良效果的基础上,降低资源消耗与环境负面影响^[5]。工艺升级过程着重平衡加工质量与能耗控制,弱化传统改良模式对生态环境的负担。绿色低碳的改良模式兼顾工程应用价值与生态发展需求,是金属材料疲劳改良方法长期发展的主流方向。

结束语

金属材料疲劳性能的提升依托多维度改良方法的协同优化,材料内部结构、表层状态与加工工艺都会改变疲劳损伤的累积速度。通过梳理疲劳行为特征与损伤演化机理,整合现阶段成熟的疲劳改良方法,结合工业生产的应用需求优化实施路径,能够有效改善金属材料的抗疲劳服役能力。持续优化改良方法体系、适配复杂工业工况,可以稳步提升金属构件的运行稳定性,满足各类高端工业设备的使用要求。

参考文献

- [1] 任绪凯,沈永祥,石树江,等.改善金属材料疲劳性能方法综述[J].内燃机与配件,2025(5):129-131.
- [2] 高瑞泽,王亚强,张金钰,等.梯度结构金属材料的制备方法和力学性能研究进展[J].材料导报,2024,38(15):13-24.
- [3] 刘立伟.数据驱动技术在高性能金属材料疲劳寿命预测中的应用[J].冶金与材料,2025,45(9):55-57.
- [4] 宋建辉,虞筱琛,祝颖丹,等.纤维增强复合材料-金属混合连接接头疲劳性能研究进展[J].复合材料科学与工程,2024(9):105-112.
- [5] 王亚蒙.热处理工艺对金属材料抗疲劳性能影响分析[J].世界有色金属,2022(9):10-12.