

机械零件表面粗糙度对疲劳强度的影响分析

冉高林

广东粤水电装备集团有限公司 广东 广州 511458

【摘要】：针对机械零件表面粗糙度工艺缺陷引发疲劳失效及强度衰减问题，剖析了微观凹凸结构应力集中效应、裂纹扩展影响机理及不同粗糙度等级的性能差异。采用机械加工工艺参数优化调控、表面改性处理弱化损伤及差异化工况下粗糙度参数选配等策略实施系统性优化，并通过疲劳性能测试与数据对比分析验证效果。结果表明，优化方案可有效抑制表面微裂纹萌生、降低疲劳强度离散度，使裂纹源由表面转移至次表层，显著提升构件疲劳极限与服役可靠性。该研究为关键零部件表面完整性控制提供了量化依据，在降低全生命周期成本、支撑损伤容限设计及再制造工程等领域具有重要应用价值。

【关键词】：表面粗糙度；疲劳强度；应力集中；表面完整性；工艺优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.002

引言

机械零件在交变载荷服役环境下，表面微观几何形貌作为应力传递与损伤累积的初始界面，其状态直接决定构件抗疲劳性能。随着高端装备向高可靠、长寿命方向发展，传统仅关注尺寸精度而忽视表面完整性的设计理念已难以满足工程需求。加工过程中形成的非理想轮廓不仅诱发局部应力畸变，还为环境介质侵蚀提供通道，导致实际疲劳强度显著低于理论预测值。尽管现有研究揭示了粗糙度与疲劳性能的关联规律，但针对多工况耦合条件下参数选配及系统性优化验证仍显不足。深入剖析表面形貌对疲劳损伤的作用机制并构建可落地的调控体系，成为突破关键零部件寿命瓶颈的迫切任务。

1 表面粗糙度与零件疲劳失效现存问题

1.1 零件表面粗糙度工艺缺陷现状

机械加工过程中刀具刃口磨损、机床主轴径向跳动及切削液冷却不均等因素共同作用，使零件表面形成非理想微观几何形貌，具体表现为犁沟痕迹过深、波峰间距不均及表层金属撕裂等缺陷。车削与铣削工序中进给速度与转速匹配失当易诱发再生型颤振，在已加工表面留下周期性振纹；磨削阶段砂轮修整不及时则导致磨粒钝化，引发局部高温烧伤与微裂纹萌生。热处理后未实施精细光整的零件常残留氧化皮与脱碳组织，进一步破坏表面完整性。当前多数生产线依赖离线抽检评估粗糙度，无法实时捕捉工艺波动，致使同批次零件表面质量离散度显著偏高，大量精密构件因微观形貌超差被迫返修或降级使用，工艺稳定性不足已成为制约关键零部件疲劳寿命提升的现实障碍。

1.2 粗糙表面引发疲劳失效的主要隐患

机械加工遗留的微观峰谷结构在交变载荷作用下极易形成应力集中区域，使局部实际应力远超名义计算值。表面轮廓中的深谷与尖锐凹槽相当于预制微裂纹，显著降低材料抵抗循环损伤的能力。这些几何不连续处会优先诱发塑性滑移带，加速位错堆积与挤出挤入现象，促使微裂纹在远低于光滑试样疲

劳极限的应力水平下萌生。粗糙峰顶在接触或装配过程中易产生附加残余拉应力，进一步削弱表层抗裂性能。环境介质如腐蚀因子更易在凹陷处滞留，与机械载荷协同作用加剧表面损伤演化。这种由形貌缺陷主导的早期失效机制往往难以通过常规强度校核预测，导致零件在实际服役中突发断裂，严重影响装备可靠性与安全性。

1.3 疲劳强度衰减带来的工程危害

疲劳强度的显著衰减，会让机械零件在远低于设计额定载荷工况下出现早期断裂，直接危害整套装备运行安全与工作稳定性^[1]。轴类、齿轮、紧固连接件等核心承力部件，受表面粗糙度影响极易出现力学强度退化，往往未显现明显塑性形变便骤然失效，极易引发设备非计划停机，极端情况下还会酿成重大安全事故。此类力学性能持续劣化，倒逼工程设计不断加大安全系数，随之造成结构冗余偏大、原材料无谓损耗以及设备自重增加，与轻量化、高效率的现代设计理念相悖。航空航天、轨道交通、重型机械等高精密高可靠应用场景中，疲劳寿命波动不定，不仅压缩设备检修间隔，还持续拉高全周期运维开支。现行行业规范针对表面粗糙度的强度量化修正体系尚不健全，致使零件实际服役表现和理论设计数值存在客观偏差，长期留存不可忽视的安全隐患。

2 表面粗糙度对疲劳强度的影响机理

2.1 微观凹凸结构的应力集中效应

机械零件表面经加工后形成的微观峰谷形貌会在交变载荷作用下产生显著的几何不连续效应，导致名义应力在谷底区域发生剧烈放大（见图1）。这种由表面轮廓曲率半径过小引起的应力梯度变化，使得实际局部应力远超材料屈服极限，即便整体仍处于弹性变形阶段^[2]。高应力区促使位错在晶界或夹杂物附近塞积并形成滑移带，进而诱发微塑性应变累积。随着循环次数增加，滑移带逐渐挤出侵入表面，形成驻留滑移带并演化为微裂纹源。粗糙度参数中的轮廓最大高度与平均间距共同决定了应力集中系数的分布特征，较深的沟槽和尖锐的谷底

更易成为疲劳损伤的优先起始位置，显著缩短裂纹萌生寿命，削弱构件抗疲劳性能。

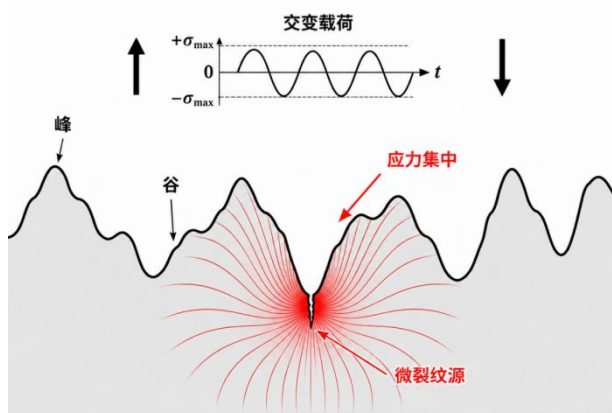


图1 表面微观形貌的应力集中与微裂纹萌生示意图

2.2 表面粗糙度对疲劳裂纹扩展的影响

表面微观几何特征通过改变裂纹尖端应力场分布直接影响扩展行为，粗糙峰谷结构使裂纹前沿承受非均匀载荷，诱发局部混合模式加载状态。当裂纹穿越加工痕迹时，沟槽边缘产生的应力集中会促使裂纹偏转或分叉，增加实际扩展路径长度并消耗额外断裂能。同时，表面塑性变形引入的残余应力场可与外加载荷叠加，改变裂纹面闭合效应，进而调节有效应力强度因子幅值。较深的轮廓谷底易成为二次裂纹萌生点，其与主裂纹相互作用导致扩展速率波动。此外，表面纹理方向与主应力轴的夹角决定了裂纹扩展阻力大小，平行纹理提供低能量通道加速贯通，而交叉纹理则通过机械互锁抑制裂纹前进，这种几何-力学耦合效应使粗糙度成为控制疲劳裂纹稳定扩展阶段的关键因素。

2.3 不同粗糙度等级的疲劳性能差异

精密加工制备的低粗糙度表层具备均匀规整的微观形貌结构，构件整体应力集中系数可维持在较低区间，疲劳裂纹萌生需要耗费大量载荷循环周期，材料内部固有缺陷逐步成为结构失效的主要诱因。中等粗糙度工况下工件表面沟槽的深度与间距明显提升，局部区域塑性应变持续堆积，裂纹易在轮廓谷底位置生成并顺着材料剪切带持续拓展，结构疲劳寿命对表层状态的感知特性大幅提升。高粗糙度表层存在大量尖锐峰谷结构与深度划痕，外部载荷作用下会出现剧烈应力畸变现象，多区域裂纹会提前萌生并相互竞争拓展，构件有效承载截面快速缩减，疲劳极限出现明显下降。不同粗糙度对应的力学性能不存在线性变化规律，特定临界阈值的存在使表层几何不连续性或基体组织、残余应力分别主导损伤演化过程，微观形貌与力学响应的动态耦合作用造就了这一非线性变化特征。

3 基于疲劳强度提升的表面粗糙度优化策略

3.1 机械加工工艺参数优化调控粗糙度

切削速度、进给量与背吃刀量的匹配关系直接决定加工表面微观形貌特征，提高切削速度可抑制积屑瘤生成并减少鳞刺高度，使轮廓算术平均偏差显著降低。进给量增大导致残留面积高度呈平方级增长，需结合刀具主偏角与刀尖圆弧半径进行补偿设计，以平衡效率与表面质量^[3]。背吃刀量过小时易引发弹性让刀与摩擦挤压，反而恶化表面完整性，应避开材料硬化层临界厚度区间。冷却润滑方式影响切屑排出与热变形程度，高压内冷可有效冲刷磨粒并稳定切削区温度场，避免热致表面损伤。刀具磨损状态实时监测与自适应补偿机制能维持刃口锋利度，防止因钝化引起的表面撕裂与毛刺再生。工艺系统刚度不足时，振动模态耦合会在表面留下周期性振纹，需通过阻尼减振或转速避让策略消除谐振源，确保粗糙度控制精度满足疲劳性能要求。

3.2 表面改性处理弱化疲劳损伤影响

喷丸、滚压等机械强化手段在零件表层引入残余压应力场，有效抵消交变载荷下的拉应力峰值，延缓微裂纹萌生与扩展速率。激光冲击强化利用高能脉冲诱导塑性变形，形成深度达毫米级的稳定压应力层，同时细化晶粒并提升表面硬度，显著改善高周疲劳性能。化学热处理如渗氮、碳氮共渗不仅提高表面耐磨性，还因相变体积膨胀产生附加压应力，增强抗疲劳剥落能力。电化学抛光或磨粒流加工可去除原始加工痕迹中的尖锐谷底，降低应力集中系数，使表面轮廓更趋平滑连续。涂层技术如类金刚石薄膜或梯度功能涂层兼具低摩擦与高结合强度特性，阻断环境介质侵蚀路径，抑制腐蚀疲劳耦合效应。各类改性工艺需依据材料属性、服役工况及原始粗糙度水平进行适配选择，避免过度处理引发新缺陷或残余拉应力反转，确保表面完整性与疲劳寿命协同提升。

3.3 差异化工况下粗糙度参数选配方法

高周疲劳服役工况对构件表面轮廓精度有着严苛标准，轮廓算术平均偏差与均方根粗糙度需维持低位数值，弱化微观缺口位置形成的应力集中现象，工程选材阶段可选取轮廓算术平均偏差不超 $0.4\ \mu\text{m}$ 的精加工成型表面，搭配深度契合的残余压应力结构层，规避浅层拉应力相互叠加引发的构件微裂纹初生问题。构件承受低周疲劳作用力或是冲击荷载时，轮廓最大高度参数调控至 $6.3\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 区间，表层储油性能与界面摩擦适配特性均可得到改善，轮廓偏斜度保持负值状态能改变表面峰谷排布形态，谷底占比提升可削减尖锐凸起结构带来的塑性应变局部化影响。腐蚀疲劳共同作用的复杂环境中，轮廓算术平均偏差划定限值之外，波纹度和粗糙度数值比例也需纳入管控范围，表面长波起伏形态易催生大范围应力梯度，各向同性纹理排布模式能够削弱腐蚀介质定向渗透概率，多维受力状态

里构件表层完整程度与长期使用性能可实现协同调控。

4 优化方案的性能检验与效果分析

4.1 粗糙度优化后的零件疲劳性能测试

针对经表面粗糙度优化处理的机械零件,需开展系统的旋转弯曲或轴向加载疲劳试验以验证其性能提升幅度^[4]。测试过程应严格遵循相关国家标准设定应力水平与循环基数,采用升降法精确测定优化后试样的条件疲劳极限,并与原始加工状态试样进行对比分析。除常规 $s-n$ 曲线绘制外,还需借助断口扫描电镜观察裂纹萌生位置是否由表面转移至次表层,以此判断粗糙度改善对缺陷敏感性的抑制效果。同时结合表面残余应力与显微硬度检测数据,排除其他强化因素的干扰,单独量化粗糙度参数变化对疲劳寿命的贡献率。测试样本数量须满足统计学要求,确保所得疲劳强度分散带具有工程可信度,为后续工艺参数定型提供可靠依据。

4.2 优化前后疲劳强度数据对比分析

原始加工态与表面粗糙度优化后的疲劳试验数据经配对统计检验,采用双样本 t 检验或 $welch$ 检验判定两组条件疲劳极限差异的显著性水平。除均值比较外,同步计算疲劳强度变异系数与置信区间,评估优化工艺对数据离散程度的改善效果。通过绘制重叠概率密度曲线直观呈现分布偏移趋势,结合 $weibull$ 模量变化量化可靠性提升幅度。进一步建立 ra 、 rz 与疲劳强度的多元回归模型,获取单位粗糙度降低对应的强度增益斜率,识别边际效益递减拐点。引入协方差分析剔除材料批次、热处理状态等混杂变量干扰,确保对比结果真实反映表面形貌改变的独立作用,为后续工艺参数精细调整提供可靠的定量依据。

参考文献:

- [1] 刘炜.精密加工中表面粗糙度对零件疲劳强度的影响分析[J].中国机械,2025,(08):58-61.
- [2] 赵静.表面质量对加工零件性能影响及工艺优化思路[J].农机使用与维修,2022,(11):29-31.
- [3] 王岩,郝庆波.提高机械零件疲劳强度和耐磨力的对策研究[J].新型工业化,2020,10(01):88-92.
- [4] 李选祥,郭佳乐,黄莉.精密机械零件加工中的表面质量控制与提升技术研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(03):141-143.
- [5] 王军歌.表面粗糙度对机械零件使用性能的影响分析[J].冶金管理,2021,(15):37-38.

4.3 粗糙度优化方案的实际应用价值

将表面粗糙度控制策略嵌入产品全生命周期成本模型,可精准量化精加工工序额外投入,与构件疲劳寿命提升后维护频次下降、备件物料消耗缩减之间的经济平衡关系^[5]。在航空发动机涡轮盘、风电主轴轴承这类安全核心部件中,该优化手段能够切实助力损伤容限设计准则落地执行,保障结构在标准检修周期内具备优异的抗裂纹萌生能力,有效规避构件提前失效造成的突发停机事故。量产汽车传动轴零部件依托稳定的低粗糙度加工区间,可收紧制造公差范围,显著改善装配匹配度,优化整车振动与噪声表现。再制造场景下,对服役构件修复后的表面粗糙度进行科学调控,可复原并进一步强化构件原有疲劳性能,拉长装备服役年限,贴合绿色制造与资源循环发展理念,也能为行业构建完善的表面完整性技术标准提供可靠实践参考。

5 结语

机械零件表面粗糙度与疲劳强度呈现复杂非线性耦合关联,微观形貌会借助应力集中、裂纹萌生与扩展调控等作用,直接影响构件服役表现。表面完整性欠缺是当下关键零部件寿命提升的主要阻碍,需从加工参数优化、表面改性、工况匹配选型等层面开展系统化调控。实践检测证实,合理把控表面粗糙度,既能有效提高构件疲劳极限、缩减寿命离散偏差,还可压降设备全生命周期成本,助力损伤容限设计落地,赋能零部件再制造产业发展。后续需深入探究表面完整性多参数协同作用机理,健全以服役性能为核心的粗糙度设计标准,促进加工工艺与疲劳可靠性设计融合进阶,切实保障高端装备长期稳定可靠运行。