

# Residual Stress of Mechanical Materials Fatigue Durability Detection Technology

Qian Liang<sup>1,2</sup> Li Xia<sup>1</sup> Jiangtao Cao<sup>1</sup>

1. 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

## Abstract

Residual stress is the material in the manufacturing and use due to external forces, temperature changes and other factors, in the load removed still exist after the internal stress, will affect the material properties, it has macro, micro and submicro three categories, the formation of the reasons include machining, heat treatment, welding and phase change, these factors will cause local stress concentration, the fatigue life, fracture toughness and corrosion resistance of the material are affected, and the fatigue durability is the bearing capacity of the material under repeated loading, which is evaluated by stress-life (S-N) curve, strain-life ( $\epsilon$ -N) curve and modern detection techniques such as digital image correlation method (DIC) and laser speckle interferometry (LSI). Therefore, understanding residual stress and fatigue properties is particularly important for improving material design and application.

## Keywords

residual stress; fatigue durability; stress-life curve; strain-life curve; digital image correlation method; laser speckle interferometry

## 残余应力的机械材料疲劳耐久性检测技术

梁谦<sup>1,2</sup> 夏立<sup>1</sup> 曹江涛<sup>1</sup>

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050081

2. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150001

## 摘要

残余应力就是材料在制造和使用由于外力、温度变化之类的因素, 在载荷去掉后还依然存在的内应力, 会影响材料性能, 它有宏观、微观和亚微观这三类, 其形成原因包含机械加工、热处理、焊接以及相变等, 这些因素会致使局部应力集中, 从而影响材料的疲劳寿命、断裂韧性以及耐腐蚀性, 而疲劳耐久性是说材料在反复加载下的承载能力, 其评估是通过应力-寿命(S-N)曲线、应变-寿命( $\epsilon$ -N)曲线以及像数字图像相关法(DIC)、激光散斑干涉法(LSI)等现代检测技术来进行的, 所以理解残余应力和疲劳性能对于提升材料设计 and 应用特别重要。

## 关键词

残余应力; 疲劳耐久性; 应力-寿命曲线; 应变-寿命曲线; 数字图像相关法; 激光散斑干涉法

## 1 引言

残余应力是机械材料在制造和使用过程中普遍存在的, 它对材料的疲劳寿命和耐久性有深远影响, 且随着现代工业对材料性能要求持续提高, 精确检测和评估残余应力对于提升材料的疲劳耐久性特别关键, 本研究就是要探讨残余应力的形成机理、检测技术以及它对材料疲劳耐久性的影响, 以此给工程实践提供理论支持和技术参考。

## 2 残余应力的基本概念与形成机理

### 2.1 残余应力的定义与分类

残余应力指的是材料在制造、加工或者使用时, 因为

外力、温度变化、相变这些因素起作用, 在外部载荷去掉后还滞留在材料内部的应力, 这种应力虽不会让整体变形, 但可能致使局部区域应力集中, 对材料性能有显著影响, 按其特征, 残余应力一般分三类: 第一类是宏观残余应力, 通常在材料的整体结构中分布, 常见于大尺度构件内; 第二类是微观残余应力, 存在于材料的晶粒之间, 往往是由于不同晶粒间塑性变形不均匀而产生的; 第三类是亚微观残余应力, 主要集中在晶粒内部或者晶界处, 常常是因为局部微区的相变或热处理而引起。

### 2.2 残余应力的形成原因

残余应力形成原因复杂多样的, 主要是因为机械加工、热处理、焊接还有相变过程, 如机械加工时切削力和摩擦力作用在材料表面, 还伴随局部温度升高, 就容易有塑性变形从而产生残余应力, 热处理过程中加热和冷却速度不一样,

【作者简介】梁谦(1990-), 男, 中国河北井陘人, 硕士, 工程师, 从事电子装备工艺设计及动力学分析研究。

会在材料内部产生热应力，再加上材料相变时体积变化影响，就使残余应力逐渐累积，焊接的时候因为焊缝局部区域受热不均，冷却时不同区域收缩速度不一样，就会在焊缝及其邻近区域形成残余应力。另外，在相变过程中尤其是马氏体相变，体积急剧变化是残余应力形成的重要因素，这种应力对材料后续加工和使用影响很大。

### 2.3 残余应力对材料性能的影响

拉应力残余应力跟外加循环载荷一起作用的话，会加快疲劳裂纹的萌生和扩展，很明显降低材料的疲劳寿命，反过来，压应力残余应力可以延缓裂纹形成，让疲劳寿命延长。其次就是残余应力对断裂韧性有直接影响，拉应力残余应力会弄出应力集中点，促使裂纹扩展，让韧性降低，而压应力残余应力能让材料抗裂能力增强。残余应力还会影响材料的耐腐蚀性，尤其在腐蚀性环境里，拉应力残余应力容易造成应力腐蚀开裂，材料表面的拉应力会促使裂纹沿着晶界扩展，加速失效，不过压应力就能减缓这个过程，增强耐腐蚀性能。

## 3 机械材料疲劳耐久性检测的基本原理

### 3.1 疲劳耐久性的概念与评估标准

疲劳耐久性说的是材料在反复加载这样的条件下，能承受多次循环且不被破坏的能力，这是评估材料在实际工作环境中长期可靠性的关键指标，而疲劳耐久性的评估一般是靠应力—寿命（S—N）曲线和应变—寿命（ $\epsilon$ —N）曲线来进行的，像应力—寿命曲线能反映出在不同应力水平下材料的疲劳寿命，通常低应力水平时材料疲劳寿命长，高应力水平时寿命就会明显缩短，应变—寿命曲线是通过测量材料在不同应变幅值下的疲劳寿命来评估的，尤其适合高应变范围的材料，评估标准包含材料的疲劳极限，就是在规定循环次数下材料不发生疲劳破坏的最大应力值，还有材料的疲劳寿命，也就是材料在特定应力水平下的寿命长度。

### 3.2 疲劳裂纹的形成与扩展

疲劳裂纹的形成是逐步累积的，一般有裂纹萌生、裂纹扩展以及最终断裂这三个阶段。一开始疲劳裂纹往往是从材料的缺陷或者表面那些微小的应力集中区域开始的，像材料内部的微裂纹、表面的划痕，还有焊接接头处的应力集中点之类的，这些初始裂纹在反复循环加载的情况下会慢慢扩展。裂纹扩展的过程通常是裂纹沿着材料内部逐步延伸，形成二维或者三维的裂纹面，而且裂纹扩展速度和应力幅值、加载频率以及材料的微观结构是有关系的。材料的疲劳裂纹扩展遵循 Paris 定律，这个定律描述了裂纹扩展速率和裂纹尖端应力强度因子范围的关系。裂纹会扩展到材料的关键截面，从而导致材料突然断裂，这个阶段就叫断裂阶段。

### 3.3 材料疲劳性能的检测方法

要想准确地评估材料的疲劳性能，常用的检测办法有应力—寿命（S—N）测试、应变—寿命（ $\epsilon$ —N）测试，还

有能量法以及断裂力学法。应力—寿命测试是通过给材料施加不同的应力幅值，然后记录下材料的疲劳寿命，这样就能绘制出 S—N 曲线，用来评估材料在各个应力水平下的耐久性呢；应变—寿命测试就适合高应变范围的材料，是通过测量材料在不同应变幅值下的疲劳寿命，从而得到  $\epsilon$ —N 曲线。能量法是通过测量材料在疲劳过程中吸收的能量来评估它的疲劳性能，而断裂力学法是关注裂纹尖端的应力强度因子，来评估裂纹扩展的可能性。像先进的检测技术，如数字图像相关法（DIC）和激光散斑干涉法（LSI）也被广泛运用，这些方法能实时监测材料表面的微小变形和裂纹扩展，给材料疲劳性能的评估提供了更精确的数据。

## 4 机械材料疲劳耐久性检测的基本原理

### 4.1 疲劳耐久性的概念与评估标准

疲劳耐久性说的是机械材料在历经周期性或重复性载荷作用时能承受的最大循环次数且不出现显著损伤或破坏的这种能力，这一性能在工程应用中特别重要，因为好多材料在实际运用中常受到反复加载，像航空航天、汽车制造以及结构工程等领域都是如此，疲劳耐久性不但决定了材料的使用寿命，还直接关系到结构的安全性与可靠性，为科学评估材料的疲劳耐久性，工程师通常会用一系列标准和测试方法，像评估疲劳耐久性常用的标准就有应力—寿命（S—N）曲线和应变—寿命（ $\epsilon$ —N）曲线，这两种曲线分别是用来描述不同应力水平和应变幅值下材料疲劳寿命的，应力—寿命曲线是通过在不同应力幅值下做疲劳测试画出来的，横坐标通常为应力幅值或应力范围，纵坐标是材料疲劳寿命也就是在该应力水平下能承受的循环次数，这 S—N 曲线能直观反映材料在不同应力水平下的耐久性，通常高应力水平下材料疲劳寿命会显著降低，而在低应力水平下就能承受更多循环次数。

应变—寿命曲线则是用于高应变范围的疲劳性能评估，是在这种测试里让材料在不同应变幅值下进行疲劳循环并记录疲劳寿命，它和 S—N 曲线类似但横坐标是应变幅值不是应力幅值，应变—寿命曲线对评估高应变条件下的疲劳行为很重要，尤其在高温或塑性变形显著的环境下，对一些特定材料或使用环境可能还需要其他评估标准，如疲劳极限或疲劳强度等。疲劳耐久性的评估还涉及疲劳极限和疲劳强度的概念，疲劳极限是指理论上材料能在无限循环次数下承受的最大应力幅值，也就是材料在该应力水平下不会发生疲劳破坏的临界值，疲劳强度则是在特定循环次数下材料能承受的最大应力幅值，通过确定疲劳极限或疲劳强度能帮工程师制定合理的设计规范和材料选择标准，以确保结构在实际工作条件下的长期稳定性和安全性。除了传统的 S—N 曲线和  $\epsilon$ —N 曲线，现代疲劳测试还引入了更多技术和方法，如累积损伤理论、断裂力学方法以及高频疲劳试验等，这些方法提供了更精确的疲劳寿命预测手段，还能在更广泛的加载条

件下进行评估,累积损伤理论是通过综合考虑材料在不同加载条件下的损伤来预测疲劳寿命,断裂力学方法则关注裂纹的形成和扩展,通过分析裂纹尖端的应力强度因子来评估材料的疲劳性能。

#### 4.2 疲劳裂纹的形成与扩展

疲劳裂纹的形成与扩展是材料经历反复循环载荷时常见的破坏模式,这一过程有裂纹的萌生、扩展以及最终断裂三个阶段,每个阶段都有特定机制和影响因素,其萌生阶段通常在材料微观缺陷或应力集中区域如内部气孔、夹杂物、表面划痕或焊接缺陷处发生,这些缺陷处因应力集中使得材料在循环载荷作用下首先出现微裂纹,且在初期不显著但会随载荷作用逐渐发展。

在裂纹萌生初期其扩展速度较慢即“早期扩展”阶段,这一过程受材料应力幅值、加载频率和微观结构特性等多种因素影响,应力幅值是主要驱动力,高应力幅值会加快扩展速度而低应力幅值会使其减缓,加载频率的影响也不可忽视,高加载频率会增加材料内部分子间疲劳积累从而加速扩展,裂纹扩展遵循疲劳裂纹扩展基本规律,其中 Paris 定律是广泛应用的描述裂纹扩展速率与裂纹尖端应力强度因子范围关系的模型,表明裂纹扩展速率与应力强度因子范围幂次方成正比为预测裂纹扩展速率提供理论基础,在扩展过程中材料微观结构特性如晶粒尺寸、晶体结构和相分布等也会对其行为产生显著影响。

当裂纹扩展到一定程度材料会进入“最终断裂”阶段,此时裂纹已扩展到关键承载截面会导致断裂,最终断裂通常伴有显著塑性变形和断裂面明显特征,疲劳断裂过程中材料表面常出现疲劳条纹反映裂纹扩展过程中的应力变化,断裂面上通常可观察到典型断裂特征如疲劳条纹、夹杂物引起的断裂点等能提供裂纹扩展重要信息。此外,材料微观结构和环境因素也会影响疲劳裂纹扩展行为,如在腐蚀性环境中其扩展速度通常会加快是因为应力腐蚀开裂作用会导致裂纹沿晶界扩展进而加速材料失效。

#### 4.3 材料疲劳性能的检测方法

材料疲劳性能的检测方法是为评估材料在反复循环载荷条件下的耐久性以确保其在实际应用中的可靠性,包括应力—寿命(S—N)测试、应变—寿命( $\epsilon$ —N)测试、能量法、断裂力学法以及现代检测技术如数字图像相关法(DIC)和激光散斑干涉法(LSI)等。

其中应力—寿命(S—N)测试是常用疲劳性能检测方法之一,它通过施加不同幅值的循环应力对材料样本进行疲

劳试验并记录在这些应力水平下的疲劳寿命,结果常绘制为S—N曲线,X轴是应力幅值,Y轴是疲劳寿命对数值,能清晰反映材料在各种应力水平下的耐疲劳特性为工程设计提供重要数据支持,高应力时材料疲劳寿命短,低应力时能承受更多循环而不破坏。应变—寿命( $\epsilon$ —N)测试适用于高应变范围材料的疲劳性能评估,通过施加不同应变幅值的循环加载记录材料疲劳寿命绘制应变—寿命曲线,特别适用于高应变条件下的疲劳研究如航空航天和汽车工业,该曲线提供了材料在高应变范围内的耐疲劳性能信息对高变形环境下的材料设计很重要。

能量法是评估材料疲劳性能的补充方法,通过测量材料在疲劳过程中吸收的能量评估其耐久性,基于材料在疲劳加载过程中能量耗散特性,能量耗散变化可揭示疲劳过程中的损伤情况,适用于研究材料在复杂加载条件下的疲劳行为尤其当传统S—N和 $\epsilon$ —N测试难提供全面数据时;断裂力学法用于深入分析材料裂纹扩展行为,通过测量裂纹尖端的应力强度因子(K)可预测裂纹扩展速度及其对材料疲劳性能的影响,核心在于计算裂纹尖端的应力强度因子并与材料断裂韧性比较。

现代检测技术如数字图像相关法(DIC)和激光散斑干涉法(LSI)为疲劳性能检测提供高精度数据,这些技术通过高分辨率图像和干涉测量实时监测材料表面变形和裂纹扩展,DIC技术利用数字图像处理获取材料在载荷作用下的表面变形信息并分析变形场变化评估疲劳性能,LSI技术通过测量材料表面的光学干涉效应能准确捕捉材料在疲劳加载下的微小变形和裂纹扩展。

## 5 结语

本研究深入探讨残余应力对材料疲劳性能的影响,揭示其在不同加工过程中的形成机制与对材料性能的潜在威胁,还通过综合应用应力—寿命曲线、应变—寿命曲线以及先进检测技术,让我们能更准确地评估和优化材料的耐久性,未来研究得进一步探索残余应力的优化控制策略来提升材料的可靠性和使用寿命,进而推动工程材料科学发展。

#### 参考文献

- [1] 刘佳,秦世斌.残余应力的机械材料疲劳耐久性检测技术[J].黑龙江科技信息,2021(18):7-8.
- [2] 李富凯.残余应力场中材料的疲劳行为[J].西安矿业学院学报,1998(2):154-157.
- [3] 胡奈赛,张定铨,何家文.残余应力对材料疲劳性能影响的某些进展[J].机械强度,1990,12(1):8.