

金属材料疲劳裂纹扩展行为的微观观测研究

唐振海 潘丽娟

武汉国检检测技术有限公司 湖北 武汉 430200

【摘要】：为了研究金属材料疲劳失效的内在机理，明确微观组织结构对于裂纹扩展的影响规律，本文以常用的碳素结构钢为试件，用疲劳拉伸试验和微观观察相结合的方法，对循环载荷作用下疲劳裂纹从萌生到断裂的过程进行微观特征的分析。用光学显微镜和扫描电子显微镜对样品裂纹形貌、断口组织和晶粒变形情况进行观察，得到裂纹扩展各个阶段的微观变化。试验结果表明，金属材料疲劳裂纹多产生于材料表面晶粒边界和内部夹杂缺陷的地方，循环载荷引起的位错堆积就是裂纹萌生的主要原因。裂纹的低速扩展阶段受到晶体结构的限制，扩展路径弯弯曲曲，高速扩展阶段裂纹穿晶扩展到达脆性临界尺寸的时候就出现断裂的特征，在断裂过程中会有规整的疲劳辉纹出现。晶粒变细可以减缓裂纹的发展速度，提高疲劳韧性。本次研究可以给金属构件疲劳寿命评价、材料改性改进提供微观理论基础。

【关键词】：金属材料；疲劳裂纹；扩展行为；微观观测；组织结构

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.009

1 引言

金属构件在机械运转、交通运输、能源装备等众多领域长时间处在交变循环的载荷之下，疲劳断裂是它的最常发生的一种失效方式。大部分的疲劳断裂事故都没有明显的塑性变形，突发性强，很容易导致设备损坏和安全事故。宏观力学性能分析只能判断出材料的疲劳强度，不能解释裂纹的产生、扩展的微观原因。随着微观观测技术的发展，对晶粒、位错尺度的研究也成了分析金属疲劳机理的重要方法。目前行业内对于金属疲劳的研究大多集中于宏观疲劳寿命的计算上，对于微观组织和裂纹扩展之间的关系研究不够深入，晶粒形态、内部缺陷、析出相等微观因素对裂纹走向、扩展速率的影响规律还不清楚。本文利用常规检测设备进行疲劳试验，对不同的疲劳实验阶段裂纹的微观发展过程进行观察，并研究其影响因素，丰富金属材料疲劳微观失效理论，给工业构件选材、结构改进和疲劳保护提供技术支持。

2 试验材料与试验方法

(1) 试验材料：本次试验采用的是普通碳素结构钢，该材料成本低、应用范围广，具有典型的金属塑性变形和疲劳失效的特征。材料原始组织主要是铁素体和珠光体，有少量的非金属夹杂，晶粒排列没有明显的定向性。采用线切割加工标准板式疲劳试样，试样表面用砂纸磨平抛光，去掉加工的划痕和氧化层，避免试样的表面缺陷影响试验观测结果。试样厚度一致、边缘没有毛刺，可以保证载荷作用下应力分布均匀。

(2) 试验设备：试验使用电液伺服疲劳试验机进行交变载荷加载，载荷控制精度好，可以稳定的设置循环应力、加载频率和应力比。微观观测使用光学显微镜观察试样表面裂纹扩展轨迹，用场发射扫描电子显微镜观察断口微观形貌、晶粒变

形和疲劳纹路。用图像分析软件测量裂纹长度、辉纹间距和晶粒尺寸，准确地记录下试验数据。

(3) 试验流程：试验将处理过的试样固定到疲劳试验机工装上，设置恒定循环载荷和加载频率，用正弦波交变应力加载。试验过程中定时停机，取回试样做微观观察，记录裂纹萌生处、扩展长、形貌变。试样的断裂后，去除掉断口表面的杂质，使用扫描电子显微镜观察断口分层情况，了解裂纹各个扩展阶段的微观特点，把试验的数据整理出裂纹扩展速率的变化趋势。

3 试验结果与微观观测分析

3.1 裂纹萌生阶段微观特征

交变载荷作用于试样表面的时候，最先出现的变形就是局部滑移。循环应力反复拉扯造成晶粒内部位错不断运动、堆积，在晶粒边界、表面划痕、非金属夹杂处产生应力集中。位错聚集导致晶格发生微小的畸变，产生微小的空洞，随着这些空洞的不断增多就会形成一些微米级别以上的初始裂纹。从观察结果可知，在本次试验中，所有的初始裂纹都是在试样表面晶粒交界处产生，没有出现穿晶萌生的现象。本阶段裂纹尺寸很小，扩展速度很慢，微观形貌是短小而曲折的线状结构。晶粒边界的界面阻力会阻止位错运动，增大了界面应力集中，使裂纹更容易在晶界处产生。材料内部夹杂和基体组织结构差别大，受力后容易造成界面分离，也会引发微裂纹的产生。

3.2 裂纹稳态扩展阶段微观特征

初始裂纹产生以后，在循环次数增多的过程中，就会步入到稳态扩展阶段。该时期裂纹的发展速度很慢，晶体排列的方向改变时，裂纹就会从晶粒间弯曲伸长，形成半径很小的弧形。

从光学显微镜的观察可以发现,裂纹多沿着晶粒的边界发展,并且有的地方穿透晶粒产生穿晶裂纹。塑性变形集中在裂纹尖端,裂纹尖端附近形成明显的滑移带,晶格的变形程度远远大于其它地方。裂纹稳态扩展如图2所示。

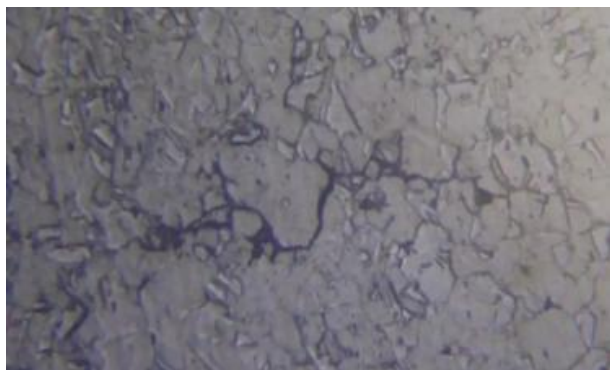


图2 裂纹稳态扩展

扫描电镜观察可知,在这一时期里裂纹的断面十分平整,逐渐形成一条条规则的疲劳辉纹,辉纹间距也反映了裂纹扩展的速度。应力幅值不变时,如果有同样的辉纹间隔的话,那么裂纹的长大就会很慢。晶界对裂纹的扩展起到阻碍作用,粗大晶粒区的裂纹发展比较容易,扩展的速度也较快,细小晶粒区的裂纹容易产生偏转并扩展得慢。

3.3 裂纹失稳断裂阶段微观特征

当裂纹长度达到临界尺寸的时候,试样的有效承载面积就会大大减少,裂纹尖端的应力强度也会显著增大,裂纹会进入到失稳扩展的阶段。本阶段裂纹扩展速度急剧增加,不再被晶粒结构所限制,快速穿过许多晶粒,裂纹宽度越来越大。最终的试样发生瞬时断裂,断裂位置没有明显的塑性收缩。断口的微观形貌观察发现,在失稳阶段,断口上到处都是韧性窝和撕裂棱,断面很粗糙,有无数个小颗粒嵌入。疲劳辉纹排布变得杂乱无章、间距增大,并且有裂纹从其中分支出来。断裂末端有明显的剪切唇,是典型的韧性疲劳断裂。由于载荷波动、晶粒缺陷的产生都会引发裂纹分支的出现,分支裂纹可以将主裂纹的应力分散开来,从而在某种程度上推迟了断裂的时间。

4 影响疲劳裂纹扩展的微观因素

4.1 晶粒组织结构

晶粒尺寸直接影响裂纹扩展的难度,细小的晶粒金属中晶

界的数目多,裂纹在蔓延的时候不断偏向,消耗了断裂的能头,减缓了扩展的速度。粗晶粒金属的晶界少,裂纹通行阻力小,容易发生迅速断裂。另外晶粒排列均匀也会造成应力分布的变化,散乱排列的晶粒会把集中产生的应力分散掉,减小微裂纹聚集。晶粒组织结构影响如图3所示。

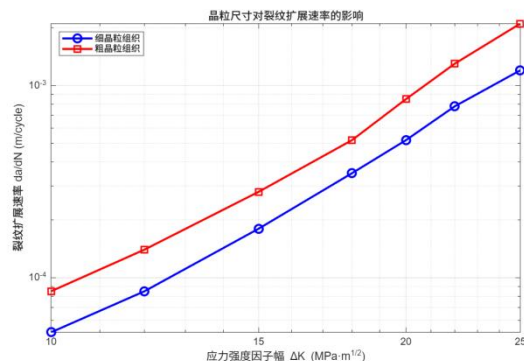


图3 晶粒组织结构影响

4.2 内部夹杂与缺陷

基于本次试验全过程的微观观测结果,结合试样不同阶段裂纹萌生、扩展的微观特征,可明确内部夹杂与材料固有缺陷对疲劳裂纹扩展的影响机制。试验前期对试样原始组织的金相观测显示,碳素结构钢基体中存在少量非金属夹杂与微小空洞缺陷,这类缺陷会直接破坏金属晶格的连续性与完整性。在交变循环载荷加载过程中,通过光学显微镜实时观测发现,缺陷位置会率先出现局部应力集中现象,位错运动在缺陷处受阻并大量堆积,进而诱发微小空洞萌生、聚合,最终形成初始微裂纹,这也是试验中多数微裂纹优先产生于缺陷区域的核心原因。

结论:本文用疲劳试验和微观观察技术对碳素结构钢的疲劳裂纹萌生、扩展和断裂全过程进行系统的考察,得出如下结论。一是金属疲劳裂纹主要是由晶界、表面缺陷、夹杂处的位错堆积和应力集中所导致,其产生的根本原因就是位错堆积和应力集中。二是裂纹的扩展分为萌生、稳定和失稳三个阶段,萌生阶段裂纹细小曲折,稳态阶段沿晶或穿晶扩展,形成均匀的疲劳辉纹,失稳阶段裂纹迅速伸展,断口粗糙并且有大量的韧窝。三是微观组织结构对裂纹扩展有较大的影响,细化晶粒、降低内夹杂物可以减小裂纹扩展,提高疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 聂鹏,杨世源,郭永强,等.氢环境下金属材料的疲劳寿命预测:从裂纹的角度[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(04):44-67.
- [2] 刘斌超,王秋懿,杨蓉,等.材料因素对金属疲劳裂纹扩展的影响[J].航空科学技术,2022,33(03):77-85.
- [3] 张亚军,张欣耀,张云浩.金属材料疲劳裂纹扩展速率 Paris 模型中材料常数的相关性[J].材料开发与应用,2021,36(04):1-8.