

文章编号: 1001-4888(2023)01-0001-08

基于数字图像相关的激光修复镍基合金 疲劳损伤表征方法研究^{*}

赵健宇, 谢惠民

(清华大学 航天航空学院 应用力学教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 开展激光修复镍基合金的疲劳试验, 对研究修复材料疲劳性能及分析其失效行为具有重要意义。疲劳过程中, 试件产生局部损伤, 会导致材料力学性能恶化。如何建立光学变形场与疲劳损伤参数的定量关系实现对疲劳损伤的有效表征, 是实验力学领域备受关注的问题。从激光修复镍基合金疲劳失效行为研究的需求出发, 本文建立了基于单相机三维数字图像相关的疲劳力学测试系统, 并设计了包含“修复基体—修复边界—修复区”的组合型拉伸疲劳试件, 在建立的测试系统下可同时测量和表征试件三种区域的全场变形。利用所建立的测试系统, 实现了激光修复材料在拉—拉疲劳过程中的全场变形在线测量, 得到了不同疲劳周次下的试件基体、修复边界和修复区的位移场与应变场; 根据测量得到的应变场提出了疲劳中以试件历经不同循环周次后的残余应变为损伤参量的表征方法, 并获得了修复镍基合金试件疲劳过程中残余应变场的演化规律。试验结果表明, 在疲劳过程中, 试件残余应变场内存在应变集中现象, 应变集中幅值随疲劳周次的提高而增加, 试件残余应变集中区域内的应变集中值远高于非应变集中区域, 因此根据该结果可有效地预测疲劳裂纹萌生的时机与位置。

关键词: 激光修复镍基合金; 三维数字图像相关; 残余应变; 疲劳裂纹萌生

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-054

0 引言

GH4169 镍基合金具有耐高温、抗腐蚀等优异的力学性能, 目前已被广泛应用于航空发动机和燃气轮机的叶片等关键部件^[1]。叶片部件工艺难度大、造价昂贵、生产周期长, 因此具有较高的维护成本。恶劣的服役环境容易使叶片部件产生裂纹等缺陷, 从而影响部件的服役寿命, 导致叶片等关键部件在使用过程中产生高额维护成本^[2]。

近年来, 随着激光修复技术的迅速发展, 该技术已被应用于航空发动机、燃气轮机的叶片等关键热端部件的损伤修复, 并产生了较大经济效益, 因此该技术的推广与应用具有重大战略意义^[3-5]。激光修复技术以高功率激光为热源, 使金属原料迅速熔化并填充到零部件待修复区域, 随着激光路径逐层凝固成型, 从而实现损伤部件的修复^[6]。在修复完成后, 被修复的构件可以分为修复区、热影响区和基体三部分^[7]。在激光修复过程中, 修复材料内部会产生多种类型的缺陷, 包括气孔、欠熔融孔洞、夹杂、裂纹等^[8]。修复构件各组成部分的性能非均匀性以及修复区的缺陷均会影响构件的服役性能^[9]。由于服役过程中受到高温环境下的循环载荷, 因此疲劳断裂是热端修复部件最常见的失效形式之一。为了提高

^{*} 收稿日期: 2022-03-06; 修回日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(项目号: 12032013 和 11972209)资助

通信作者: 谢惠民(1965—), 男, 博士, 教授。Email: xiehm@mail. tsinghua. edu. cn

修复材料的服役寿命以及可靠性,开展其疲劳性能及失效行为的研究具有重要意义^[10]。

疲劳过程中,材料的力学行为具有较强的局部效应,疲劳裂纹通常在应力集中区域内萌生、扩展^[11],因此通过变形监测可以预测裂纹产生的位置、分析裂纹扩展的过程。传统的电测法应用于局部变形测量时,对应变梯度较大的区域测量误差大,同时还可能在测量中出现数据漂移问题,要进行长时疲劳加载条件下的应变监测有较大的困难。数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)是一种新型的变形场测量技术,测量中通过对试件变形前后的数字散斑图像进行相关性分析,可以得到测试区域的位移场和应变场^[12]。DIC 方法具有非接触全场变形测量的优点,且测量装置简单、环境鲁棒性好,目前该方法已被广泛应用于材料的疲劳力学行为研究中。Rupil 等^[13]基于数字图像相关法提出了一种在疲劳试验中试件表面微裂纹自动检测和量化的方法,结果表明该方法能够检测张开位移超过 0.6mm 的疲劳裂纹。Duan 等^[14]利用数字图像相关法研究镍基合金疲劳裂纹扩展时的裂纹闭合效应,提出了裂纹张开率的疲劳参数表征方法,与裂纹张开位移表征法相比,对裂纹闭合效应的表征更具可靠性和有效性。Kopec 等^[15]结合数字图像相关法与电子散斑干涉法,通过测量试件在不同疲劳加载周次后的全场应变,分析了金属材料的疲劳失效行为,结果表明数字图像相关法和电子散斑干涉法等光测方法可有效地表征局部变形场。

本文以激光修复镍基合金疲劳试件为对象,基于旋转法记录圆棒试件完整曲面图像,利用 DIC 系统测量疲劳过程中不同加载周次后的试件表面应变,并根据全场应变测量结果对试件进行疲劳损伤状态的分析与表征,从而实现裂纹萌生时机与位置的预测。

1 疲劳残余应变测量

在对试件疲劳过程的表面变形数字图像相关测量中,我们以试件表面的散斑为变形载体,采集试件表面图像进行相关计算,从而分析试件全场变形。测试过程中,首先在试件表面制备散斑图案,然后拍摄在初始状态下和不同疲劳周次后试件表面的散斑图像,并通过 DIC 分析计算试件不同疲劳周次加载后相对初始状态时的位移场和应变场。试件经历疲劳循环加载—卸载,相较于初始状态,产生塑性应变 ϵ_t ,该塑性应变由两部分构成,分别是试件首次加载卸载后由于屈服产生的塑性应变 ϵ_p ,以及试件经过循环加载后产生的非弹性应变 ϵ_f ^[16]。研究试件循环加载后的非弹性应变 ϵ_f ,需要在总应变 ϵ_t 中减去塑性应变项 ϵ_p :

$$\epsilon_t = \epsilon_p + \epsilon_f \quad (1)$$

对试件进行拉—拉应力疲劳加载时,在疲劳过程中试件载荷幅值低于屈服强度。不考虑疲劳后期试件裂纹萌生后承载区域面积减少的情况,疲劳过程中试件受到的应力幅值保持不变,试件仅在第一次加卸载过程中可能产生塑性变形 ϵ_p 。采集试件在平均疲劳载荷幅值下的图像用于 DIC 分析,选取试件经历过一次完整循环加卸载后在平均载荷时的图像作为参考图像,疲劳过程经历不同疲劳周次后的平均载荷图像作为变形图像,将数字图像相关法计算得到的变形场定义为疲劳过程中残余变形场。疲劳试验过程中,通过数字图像相关法分析试件表面残余位移场和应变场,并根据残余应变场内局部应变集中现象,评价试件疲劳损伤状态并预测裂纹萌生区域,在此基础上判断试件损伤危险点。对于圆棒型疲劳试件,由于 DIC 测量系统的成像视场有限,拍摄时仅能得到圆棒试件正面图像,无法直接得到圆棒试件侧面及背面区域图像,只能分析正面区域的位移与变形,无法分析视场外区域的变形,因此,单次采集的正面散斑图像仅可以评估该视场内的疲劳损伤和裂纹萌生区位置。当实际裂纹萌生区与观测区在视场之外时,无法获得相关数据。为了突破上述局限,针对具有高曲率的圆棒试件,需要提出一种获得试件全表面图像的方法,以实现全表面变形场的表征和测量。

2 试验方法

2.1 镍基合金修复试件

利用定向能量沉积法(Direct Energy Deposition, DED),对含有梯形槽的镍基合金构件进行激光沉积修复,以填补该梯形槽。修复构型为一块 80mm×45mm×12mm 的锻造 GH4169 镍基合金基材,

在表面中间切割出一块梯形槽区域,槽底部宽 4mm,顶部宽 10mm,长 45mm,深 4mm。修复基体材料以及填充材料均为 GH4169 镍基合金。构件的激光沉积修复在北京京仪仪器仪表研究总院有限公司完成,激光器型号为 LDF 3000-60 VGP(激光波长为 1064nm,由德国 Laser line GmbH 公司制造),具体修复工艺参数见表 1。修复过程中激光扫描路径为“Z”型,激光光源沿着槽的长度方向进行单道沉积,完成单道激光路径后回到初始端继续按扫描路径进行激光沉积。完成激光修复后,沿着修复构件长度方向切割材料,获得包含修复区域的长方体材料,再通过车削加工方式制备疲劳试验所需的圆棒型试件(如图 1 所示),试件标距段直径 2mm、长 12mm,夹持段直径 4mm,试件全长 80mm。在试件标距段内,从中心到两端分别为修复区、修复边界和基体区,可以在试验过程中对比分析三个区域的疲劳性能。对试件依次采用 600、1500、2000 目砂纸进行表面抛光,使其表面粗糙度满足疲劳试验标准。试件抛光后,在其表面喷漆制备散斑并用于 DIC 分析。

表 1 激光沉积工艺参数
Tab. 1 Laser deposition process parameters

激光功率/W	层高/mm	间隔/mm	扫描速率/(mm/s)	光斑直径/mm
1000	1	1.5	6	3

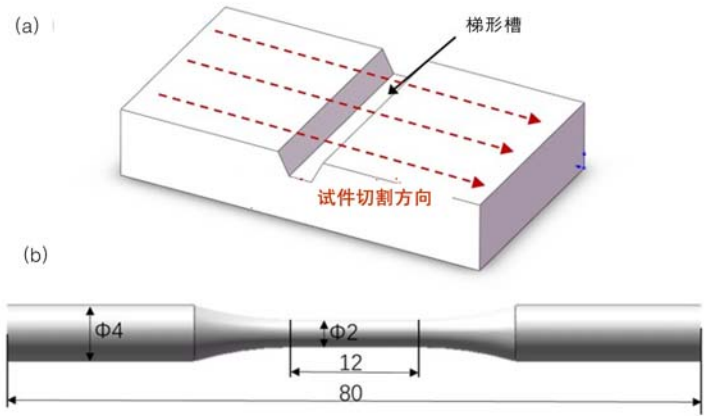


图 1 (a)修复构件示意图;(b)疲劳试件尺寸(单位: mm)

Fig. 1 (a)schematic diagram of repaired components; (b)design of fatigue test specimen(unit: mm)

2.2 试验设备

本试验采用的是集成化双棱镜单相机三维数字图像相关系统^[17],基于双棱镜的折射原理,该系统可以将同一物体不同视角的观测图像成像于 CCD 靶面。本研究中使用 Instron E3000 型疲劳试验机进行单轴拉-拉疲劳试验,试验中,为了拍摄圆棒型试件的全表面的图像,我们将相机位置固定,按设定角度间隔依次利用试验机的夹具旋转试件,分别拍摄试件在不同观察角度下的图像。对于测量中采用的直径 2mm 的圆棒试件,为了减少图像边缘区域在相关计算中引入误差,仅选取单次采集图像中试件表面中对应 90°成像角度的局部区域用于 DIC 分析,因此试件的全表面完整分析需要进行四次间隔 90°成像。试验中,利用双棱镜单相机系统配合试件旋转采集图像的方案,在试验过程中保持图像采集系统固定,通过加载装置旋转试件实现多角度图像采集。

2.3 试验流程

设计试验流程如图 2 所示,在图像采集装置布置完毕后,首先对试件进行准静态单轴拉伸,当载荷超过 650MPa 后卸载至零,再加载至疲劳过程平均载荷。然后,将试件依次逆时针旋转 90°、180°、270°、360°,记录试件平均载荷下四个角度的表面图像,分别作为后续 DIC 分析过程中的各个成像角度下的参考图像。旋转试件时,对试件完全卸载并放松一端夹具,完成旋转后再重新夹紧试件并加载至平均载荷。随后,对试件施加疲劳载荷,并在给定的疲劳周次下,记录平均载荷下的试件表面散斑图,作为变形图像。对试件单面图像序列进行实时 DIC 分析,根据轴向残余应变分析试件损伤状态,如出现明显的

应变集中现象,定位主要损伤区的轴向位置,并对试件进行整周全表面图像采集。将试件不同角度的散斑图分别与对应角度下的参考图像进行相关计算,定位试件主要损伤区,并以主要损伤区所在表面作为实时观察表面,对试件继续进行疲劳试验,持续记录试件主要损伤区的表面图像,观察试件裂纹萌生与扩展行为。疲劳光学测量系统如图 3 所示,在测量系统正前方设置一分光棱镜将观察光路一分为二,其中一路用于单相机双棱镜 3D-DIC 装置分析试件表面变形;另外一路用于长焦显微镜测量系统,用于观察试件应变集中区域的微区形貌,记录表面裂纹的扩展行为。

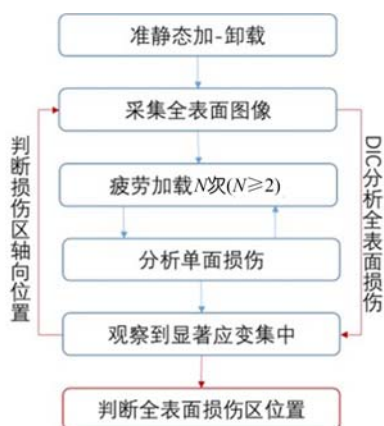


图 2 试验流程

Fig. 2 Flow chart of experiment

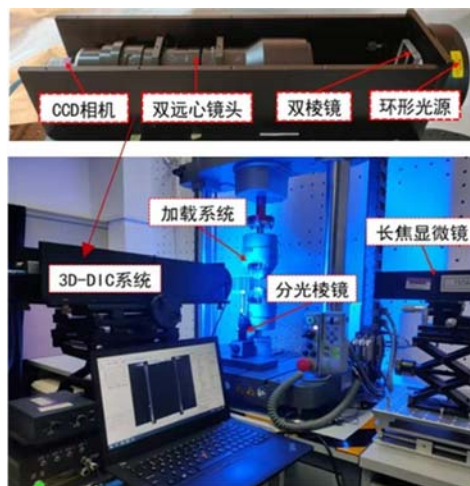


图 3 疲劳光学测量系统

Fig. 3 Fatigue optical measurement system

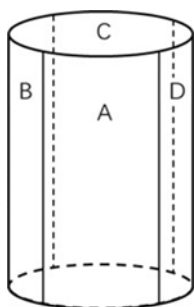


图 4 试件标距段表面区域划分

Fig. 4 Division of the surface area of the specimen gauge

3 试验结果和讨论

3.1 试验结果

对激光修复的镍基合金试件进行疲劳试验,试件在幅值 650MPa、频率 10Hz、载荷比 0.1 的正弦波型载荷下循环加载超过 341500cycle(周次)。通过旋转试件的方式,从四个角度采集试件表面图像,根据采集顺序标记为 A、B、C、D 四个面(图 4),分别对应试件沿周向划分的四个区域。试件疲劳加载前,采集试件在平均载荷下四个区域的表面图像作为后续 DIC 分析中的初始图像,然后,选择 A 面为主要观察面,对试件进行疲劳加载,记录试件不同加载次数后,在平均载荷下的 A 面图像,并通过 DIC 方法实时分析 A 面残余变形场。试件疲劳加载 320000cycle 后(图 5),观察到 A 面轴向残余应变场内存在明显的应变集中现象,并且随着疲劳加载次数的提高,该区域应变集中程度远超其他区域,因此判断此应变集中区域与试件主要疲劳损伤区域的轴向位置相对应。在试件疲劳加载 330000cycle 后,旋转试件并采集不同区域表面图像进行 DIC 分析,以寻找试件主要损伤区。计算试件表面 A、B、C、D 四区域的轴向残余应变场,如图 6 所示。在试件表面不同区域内观察到不同程度的轴向残余应变集中现象,分别位于 A 面的右侧、B 面的中间、C 面的左侧以及 D 面的中间,在 D 面内应变集中值高于试件其他区域。判断试件主要损伤区位于 D 面,因此选择 D 面作为主要观察面,研究试件后续疲劳过程表面变形,同时将长焦显微镜聚焦于 D 面的应变集中区,观察疲劳裂纹的萌生与扩展过程。试件循环加载 341500cycle 后,在 D 面应变集中区域观察到明显疲劳裂纹(图 7),裂纹萌生于试件表面中间区域。通过旋转试件的方式实现圆棒试件的完整曲面图像采集,将试件全表面图像用于 DIC 方法分析试件疲劳过程中表面残余变形,并根据应变集中现象判断试件疲劳损伤,成功确定了裂纹萌生的时机与位置。

试验后观察裂纹萌生区位置,可见试件裂纹萌生区靠近修复边界。在试件疲劳过程中,试件修复边

界区域内始终存在应变集中现象,说明疲劳损伤优先在修复边界附近区域累积。根据多次试验结果发现,试件仅在两处修复边界其中一侧萌生裂纹,因此推测在两处修复边界内,损伤累积存在着竞争关系。当修复边界一侧区域内损伤优先累积超过临界值时,损伤在此区域迅速累积形成主要损伤区,随后裂纹萌生并在附近区域扩展。

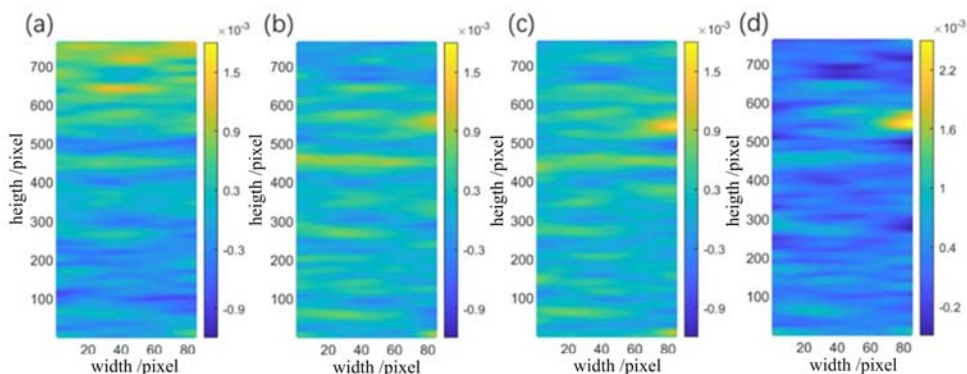


图 5 试件疲劳过程 A 面轴向残余应变场: (a)300000cycle; (b)320000cycle; (c)325000cycle; (d)330000cycle

Fig. 5 Axial residual strain field at plane A of specimen fatigue process:

(a)300000cycle; (b)320000cycle; (c)325000cycle; (d)330000cycle

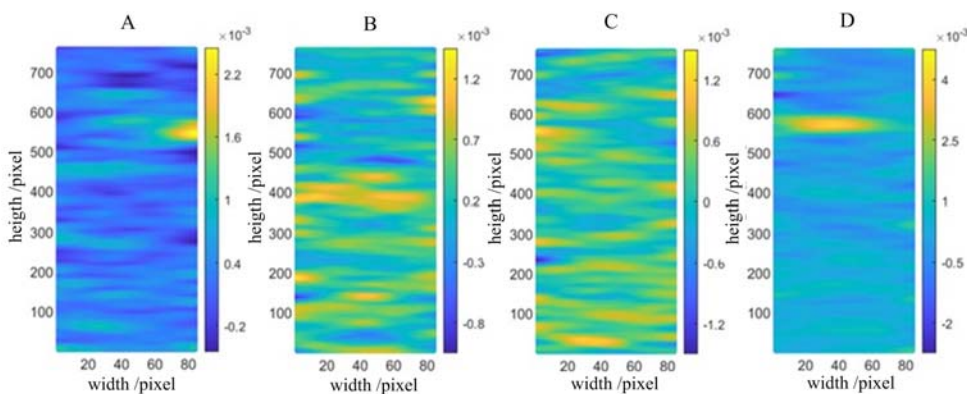


图 6 试件疲劳 330000cycle 后表面不同区域轴向残余应变场

Fig. 6 Axial residual strain field in different regions of the specimen surface after 330000cycle of fatigue

3.2 讨论

通过旋转试件的方式将试件表面划分为四个区域,依次采集表面图像最终得到试件完整曲面的图像。试验前在试件表面设置标记,并在试验过程中追踪标记,可以精确控制试件的旋转角度,以保证试件在旋转前后观察区域互相对应。在本文试验中,试件表面已通过喷涂的方式制备出散斑以用于 DIC 分析,因此试件表面具有高辨识度的散斑图案可作为标记。旋转采集试件图像时,可以根据散斑场相关计算结果校准旋转角度,以保证试件在经过多次旋转后图像采集区域始终保持前后对应。

试件疲劳加载 341500cycle 后,在 D 面观察到明显表面裂纹,通过 DIC 计算试件表面四个区域在局部出现裂纹后的横向残余应变场(图 8)、切向应变场(图 9)和轴向应变场(图 10)。在试件表面四个区域中,D 面为裂纹萌生区域所在面,A、C 面与 D 面相邻,位于 D 面左右两侧,B 面与 D 面相对。在试件表面四个区域的横向、切向与轴向残余应变场内,均能观察到局部应变集中现象出现于相同的轴向位置,不同方向的应

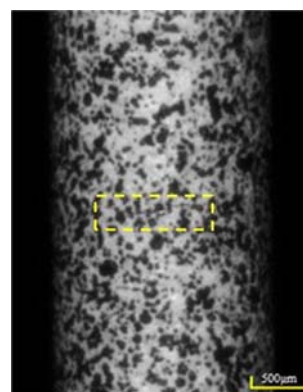


图 7 试件表面裂纹萌生现象

Fig. 7 Crack initiation on specimen surface

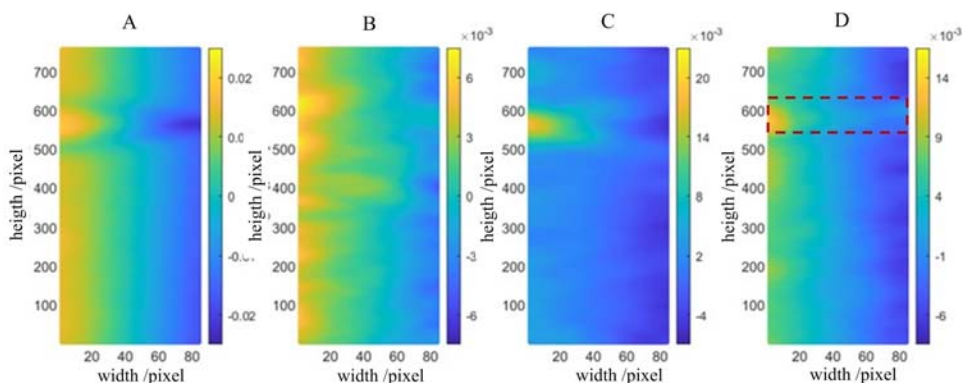


图 8 试件疲劳 341500cycle 后不同表面横向残余应变场

Fig. 8 Transverse residual strain fields on different surfaces after 341500cycle of fatigue

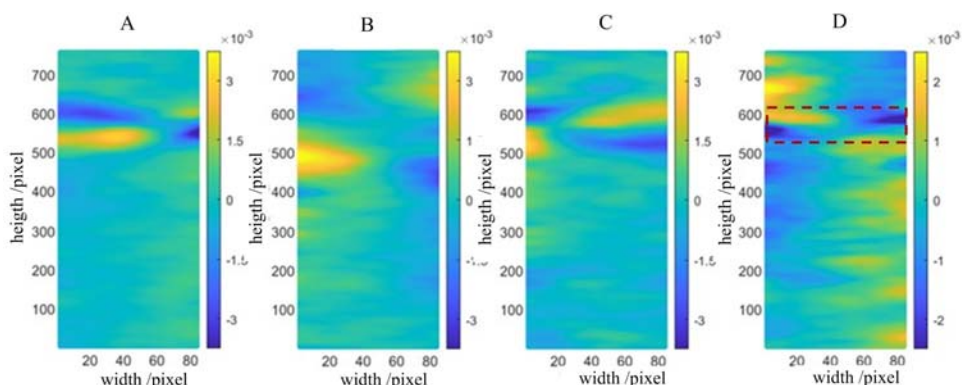


图 9 试件疲劳 341500cycle 后不同表面切向残余应变场

Fig. 9 Shear residual strain fields on different surfaces after 341500cycle of fatigue

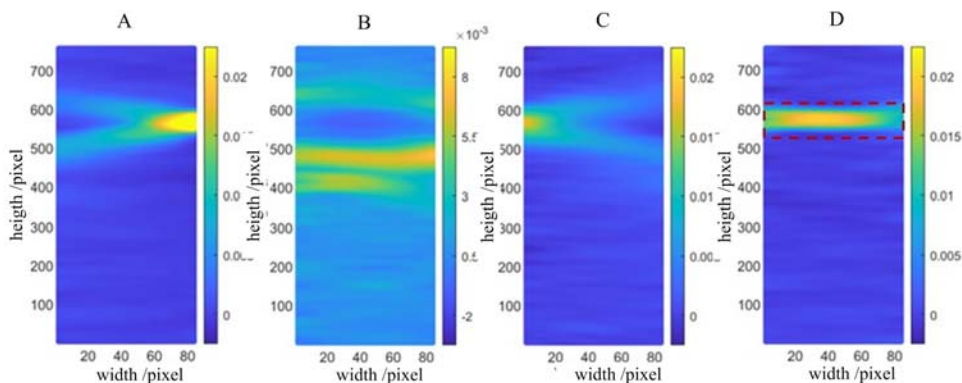


图 10 试件疲劳 341500cycle 后不同表面轴向残余应变场

Fig. 10 Axial residual strain fields on different surfaces after 341500cycle of fatigue

变集中程度存在差异,并且试件表面四个区域内应变分布规律也各不相同。试件表面的应变集中现象沿轴向较为明显,在 D 面裂纹萌生区域观察到了最明显的轴向应变集中,应变集中幅值超过 $20000\mu\epsilon$ 。在 A 面和 C 面的轴向应变场内,可以观察到由应变集中点引出的两个带状应变集中区域,总体呈射线状。在裂纹萌生区域的背面 B 面,轴向应变场内存在两条局部应变集中区,分布于裂纹区域上下两侧,与 A、C 面内应变集中区相连。试件的横向应变在不同表面内仍存在应变集中现象, A、C 面内横向应变场同样存在带状应变集中区。分析各表面的切应变场可发现,仅在包含试件裂纹的环向区域观察到了较大的切应变,切应变在裂纹区域的上下两侧符号相反。裂纹萌生后,试件表面各方向的残余应变场均存在应变集中,其中轴向应变场内应变集中现象最为明显,试件在沿着疲劳加载方向的应变场对疲劳损伤更加敏感。在疲劳宏观裂纹萌生前,试件表面全场残余应变均值较低,试件的整体力学性能无明显

变化,结合 DIC 技术分析试件在疲劳过程中轴向残余应变场演化规律,可以及时观察到应变集中现象,并判断试件损伤程度。根据本文测量结果,试件在不同区域和不同疲劳历史下,应变集中的幅值存在较大差异。在图 5(c)中,试件经过循环加载 325000cycle 后在 A 面的轴向残余应变场内观察到了应变集中现象,应变集中幅值约为 $1500\mu\epsilon$ 。试件继续加载 5000cycle 后,在 A 面同一区域(图 5(d))观察到应变幅值约为 $2200\mu\epsilon$ 。在表面观察到主要损伤区后,试件表面残余变形随循环周次增加变化明显,为了研究试件完整残余应变演化规律,需适当提高图像采集频率,后续工作中将对这一方面深入开展研究。

4 结论

本文将数字图像相关方法和疲劳加载系统结合,研究了激光修复镍基合金材料的疲劳力学行为,利用数字图像相关法实现了试件疲劳过程表面全场变形的原位监测,并根据残余应变评价了试件疲劳损伤的程度。主要结论如下:

(1) 针对圆棒型试件疲劳损伤测试与表征的需求,提出旋转法图像采集方法,实现了试件变形前后表面全场散斑图像的采集,并且结合数字图像相关法实现了试件全表面变形的定量测量与表征。该图像采集方法具有光路简单、试验成本低、测量效率高等优点。

(2) 在疲劳试验中,利用数字图像相关法测量了试件不同加载周次下的全场残余应变,并分析了试件的损伤累积过程。试验结果表明,随着循环周次的增加,试件应变集中程度呈现上升趋势,特别是在疲劳过程后期,应变集中幅值显著增加。根据应变集中现象可以准确定位试件主要损伤区以及疲劳裂纹萌生的时机与位置。

(3) 在利用所设计的“修复基体—修复边界—修复区”组合型拉伸疲劳试件进行加载试验过程中,可观察到修复边界处容易产生应变集中并诱发裂纹萌生,因此,在研究修复材料的力学性能时,需要考虑修复边界局部区域对修复体结构强度的影响。

参考文献:

- [1] Zhu S P, Liu Q, Lei Q, et al. Probabilistic fatigue life prediction and reliability assessment of a high pressure turbine disc considering load variations[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(10):1569—1588.
- [2] Wilson J M, Piya C, Shin Y C, et al. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 80:170—178.
- [3] 陈少峰, 李金国, 梁静静, 等. 激光修复在高温合金叶片及构件用装备中的应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1354—1360 (CHEN Shaofeng, LI Jinguo, LIANG Jingjing, et al. Application and development of laser repair in superalloy blades and equipment for components[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1354—1360 (in Chinese))
- [4] Stefan K, Ludger O, Irene A, et al. Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017, 19:196—199.
- [5] Paul G. Principles of directed energy deposition for Aerospace Applications[C]. NASA Marshall Space Flight Center, 2021.
- [6] Saboori A, Aversa A, Marchese G, et al. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16):3316.
- [7] Xu Z, Ouyang W, Jia S, et al. Cracks repairing by using laser additive and subtractive hybrid manufacturing technology[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142(3):1—13.
- [8] Zerbst U, Bruno G, Buffière J-Y, et al. Damage tolerant design of additively manufactured metallic components subjected to cyclic loading: state of the art and challenges [J]. Progress in Materials Science, 2021, 121:100786.
- [9] Wang K, R Bao, Zhang T, et al. Fatigue crack branching in laser melting deposited Ti - 55511 alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 124:217—226.
- [10] Nezhadfar P D, Johnson A S, Shamsaei N. Fatigue behavior and microstructural evolution of additively manufactured Inconel 718 under cyclic loading at elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2020,

- 136:105598.
- [11] 魏良宝, 蒋明. 基于三维数字图像相关的低周疲劳试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3):410—418 (WEI Liangbao, JIANG Ming. Experimental study on low cycle fatigue based on 3-D digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):410—418 (in Chinese))
- [12] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6):555—567 (PAN Bing, XIE Huimin, LI Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6):555—567 (in Chinese))
- [13] Rupil J, Roux S, Hild F, et al. Fatigue micro crack detection with digital image correlation[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2011, 46(6):492—509.
- [14] Duan Q Y, Li J Q, Li Y Y, et al. A novel parameter to evaluate fatigue crack closure: crack opening ratio[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 141:105859.
- [15] Kopec M, Brodecki A, Kukla D, et al. Suitability of DIC and ESPI optical methods for monitoring fatigue damage development in X10CrMoVNb9-1 power engineering steel[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(4):167.
- [16] Wang Z, Wu W, Liang J, et al. Creep-fatigue interaction behavior of nickel-based single crystal superalloy at high temperature by in-situ SEM observation[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 141:105879.
- [17] Lifu Wu, Jianguo Zhu, Huimin Xie. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral tele centric lens and a bi-prism: validation and application[J]. Applied Optics, 2015, 54:7842—7850.

Study on fatigue damage characterization method of laser repair nickel-based alloy based on digital image correlation

ZHAO Jianyu, XIE Huimin

(AML, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fatigue tests on nickel super alloy repaired by laser is of great significance to study the fatigue behavior and conduct failure analysis for the repaired materials. During the fatigue process, local damage of material may lead to the reduction of mechanical properties of materials. In order to meet the needs of fatigue failure analysis of laser repairing materials, how to establish the relationship between the measured deformation field and damage parameter has drawn great attention in the field of experimental mechanics. Aiming at this issue, a fatigue testing system based on single camera 3D digital image correlation is established, and an integrated tensile specimen including nickel super alloy, repaired material and interface is designed and manufactured to measure the full-field deformation of the three regions simultaneously. By using the developed measurement system, the in-situ full-field deformation of the specimen during a tension-tension fatigue process is measured. The displacement field and strain field at different fatigue cycles are characterized. A fatigue damage analysis method with the residual strain of specimens after different cycles as the damage parameter is proposed. The evolution rules of residual strain field during fatigue of laser repair nickel-based alloy are analyzed. From these results, we find that there is a strain concentration zone during the fatigue process, and the strain concentration amplitude increases with the number of cycles, which is far more than that in the non-strain concentration area. The proposed method can offer an effective prediction for fatigue time and location of crack initiation.

Keywords: laser repair nickel-based alloy; 3D digital image correlation; residual strain; fatigue crack initiation