

引文格式: 张廷连, 袁荒. 激光重熔镍基高温合金非均质材料性能研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(11): 36-43, 81.

ZHANG Tinglian, YUAN Huang. Investigation of heterogeneous mechanical properties of laser remelting nickel-base superalloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(11): 36-43, 81.

# 激光重熔镍基高温合金非均质材料性能研究\*

张廷连<sup>1</sup>, 袁荒<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;

2. 清华大学航空发动机研究院, 北京 100084)

**[摘要]** 通过多尺度试验表征与有限元模拟, 系统研究了激光重熔镍基高温合金的微观组织演化、力学性能失配及其对疲劳性能的影响机制。基于纳米压痕测试与疲劳试验, 结合改进的压痕反演算法, 量化了重熔区、重熔影响区及基材的力学参数空间分布。结果表明, 重熔区因非平衡凝固形成粗大柱状晶与 Laves 相, 导致其强度显著低于基材, 但枝晶-胞状亚结构通过晶界钉扎作用抑制了宏观性能各向异性; 重熔影响区虽存在高位错密度与孪晶界增殖, 但是残余拉应力导致其名义硬度测量值低于真实性能; 疲劳分析揭示了非均质材料中的应力屏蔽效应, 即高应力水平下重熔区的循环软化与平均应力松弛显著降低裂纹驱动力, 使疲劳失效转移至基材。本研究为激光修复构件的性能调控提供了跨尺度理论框架。

**关键词:** 激光重熔; 强度失配; 屏蔽效应; 疲劳性能; 镍基高温合金

中图分类号: V252; TG1

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.11.036



张廷连

博士后, 研究方向为高温材料结构强度理论和完整性评估。

增材制造和激光制造因其加工效率高、非接触特性广泛应用于以航空发动机为代表的先进零部件制造<sup>[1-4]</sup>, 包括激光打孔<sup>[5-6]</sup>、激光熔覆<sup>[7-8]</sup>、激光修复<sup>[9]</sup>、直接激光沉积<sup>[10-11]</sup>、激光焊接<sup>[12]</sup>、选区激光熔化<sup>[13-14]</sup>等。不同激光加工工艺用途不同, 但引起的材料微观结构和力学性能变化相似。以使用最为广泛的镍基高温合金 Inconel 718 为例, 激光能量密度因高斯分布特性使材料经历非均匀加热-熔化-凝固-冷却过程, 呈现组织不均匀特点并伴有气孔、凝固裂纹、未熔合等冶金缺陷<sup>[15-16]</sup>。激光重熔作为激光表面改性技术的重要分支, 通过精确调控激光能量输入, 可实现材料表层快速熔凝与组织细化, 具备不同激光加工工艺共性关键特征, 通常会产生非均质材料, 包括重

熔区、重熔影响区/热影响区和未受影响的基材。很多学者从微观结构形貌<sup>[17-18]</sup>、力学性能<sup>[19]</sup>、疲劳性能<sup>[20-21]</sup>、裂纹扩展行为<sup>[22]</sup>等方面对激光重熔材料进行了广泛的研究。沉积态 Inconel 718 由于晶粒粗化、元素偏析、强化相减少等原因, 通常表现出较低的硬度/强度, 即强度失配<sup>[23-24]</sup>, 使得疲劳性能较差。而重熔影响区由于位错强化、孪晶密度增加、 $\delta$ 相退化等被认为是加工硬化的<sup>[25-26]</sup>。因此, 激光制造材料呈现强度失配的非均质材料体系, 表现为微结构、延性以及强度的不兼容<sup>[27-28]</sup>。热处理被认为可以通过改善重熔区的微观组织来提高其机械强度, 但降低了其延性<sup>[29-32]</sup>。更为重要的是, 热处理后多区域的力学性能也发生了变化, 材料失配现象无法消除。综上所述,

\* 基金项目: 国家自然科学基金(92160204); 国家科技重大专项(HT-J2022-IV-0011-0025)。

如何量化局域材料的强度失配程度并建立其与材料复杂微观结构的关联,对于厘清激光加工制造材料疲劳损伤和结构完整性的影响显得尤为关键<sup>[33-34]</sup>。本研究通过激光重熔处理制备了含重熔区的非均质材料体系,进行详尽的微观组织表征、纳米压痕测试和疲劳性能分析,确定了激光重熔镍基高温合金结构完整性评估的一般性框架,揭示激光重熔镍基合金中“微观异质性→力学失配→疲劳损伤演化”的跨尺度作用机制。

## 1 试验及方法

本研究选用了德国 ThyssenKrupp VDM 公司生产的锻造镍基高温合金 Inconel 718 (IN718) 作为研究对象,其化学成分如表 1 所示,表中未列出质量分数低于 0.1% 的次要成分。材料经过 ASTM B637 标准的固溶时效处理,晶粒大小约为 15  $\mu\text{m}$ ,表现出各向同性的微观组织和力学性能。

针对锻造 IN718,采用脉冲激光熔化工艺制备含重熔区 (Remelting zone, RZ) 的非均质材料。试验设备为 500 W 毫秒 Nd:YAG 激光器,工作模式为脉冲激光模式,单脉冲能量设定为 50 J,脉冲宽度为 30 ms,离焦量为 0。试验设计了单次重熔试验,并通过移动激光束施加脉冲进行多次重熔试验,形成 150  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$  不同间距的重熔轨迹,以研究激光覆盖区域对微观组织和力学性能的影响<sup>[35]</sup>。如图 1 所示,试样在完成一次重熔试验后,移动激光束偏移  $\Delta x$  后施加第二次脉冲激光。重熔区的几何尺寸受激光能量密度和脉冲宽

度等工艺参数影响显著。尽管不同参数下 RZ 的物理化学过程及其微观结构和力学特性存在细微差异,其主要演化规律基本一致,本研究采用高能量密度的激光脉冲以获得足够体积的重熔区。

为分析激光重熔材料的微观结构,试样沿纵剖面切割并制备金相分析切片。切片经过 1000 目、2000 目和 4000 目砂纸依次抛光后,置于由 90 mL 甲醇和 10 mL 高氯酸组成的电解液中,在 20 V 下进行约 30 s 的电解抛光。随后,样品通过扫描电子显微镜 (SEM)、能量色散系统 (EDS) 和电子背散射衍射 (EBSD) 等表征手段观察表面微观组织特征。SEM-EDS 表征使用蔡司场发射扫描电子显微镜,工作电压为 15 V;EBSD 表征采用牛津仪器 Symmetry 探测器,电压为 20 V,步长为 0.4  $\mu\text{m}$ ,数据分析使用 CHANNEL5 软件。

为评估激光重熔试样不同区域的力学性能,使用带有 Berkovich 三棱锥压头的纳米压痕仪进行压痕测试。压入深度设为 2  $\mu\text{m}$ ,以消除压痕尺寸效应;加载应变速率为 0.05  $\text{s}^{-1}$ ,以实现准静态加载。为减少单次测试的离散性误差,每个区域至少进行 3 次压痕测试,以确保数据的可靠性。

为研究激光重熔区对非均质材料疲劳性能的影响,针对具有 RZ 的非均质材料试样开展了疲劳试验。为排除表面微裂纹的影响,试样加工时去除了 RZ 表面约 0.1 mm 的材料。疲劳试验在 MTS 伺服液压疲劳试验机上进行,采用应力控制模式,参考 ASTM E466 标准,加载频率为 5 Hz。

试验在不同名义应力水平下进行,保持应力比为 0.1,以量化应力水平对疲劳损伤的影响。此外,通过改变应力比分析不同应力分配对非均质材料疲劳性能的影响。试验结束后,统计失效断裂试样的位置,以明确非均质材料的疲劳失效机制。

为建立适用于描述重熔区材料疲劳寿命的评估模型,本研究对非均质结构的局域多轴应力应变分布及演化进行了有限元计算。采用发展的非均质材料本构模型及其参数<sup>[15]</sup>,通过 UMAT 输入 RZ 和 BM 的相应本构模型参数,关键参量为屈服强度失配因子。该本构模型及其模型参数已经在与本研究相同的激光重熔 IN718 合金中得到试验验证<sup>[15,22]</sup>。有限元网格采用 C3D8 单元,最小网格尺寸为 10  $\mu\text{m}$ ,并在 RZ/BM 边界进行网格细化,以捕捉强度失配引起的应力应变梯度。建模时利用几何和载荷对称性,仅对试件的 1/4 结构进行模拟。此有限元模拟为理解 RZ 区域力学行为及疲劳失效提供了重要依据,同时有助于预测激光重熔非均质材料的疲劳寿命。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观结构

激光加工制造会显著改变材料的微观结构,同时可能引入冶金缺陷

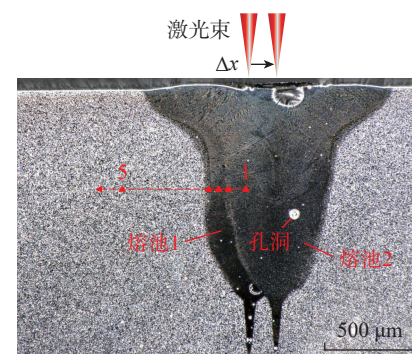


图 1 脉冲激光重熔 IN718 试样熔池形貌和缺陷分布

Fig.1 Molten pool morphology and defect distribution of IN718 specimen melted by pulsed laser remelting

表 1 Inconel 718 元素成分(质量分数)

Table 1 Elemental compositions of Inconel 718 (mass fraction)

%

C	Mn	Si	P	Cr	Mo	Ni
0.02	0.05	0.06	0.007	18.53	3.06	53.44
Nb	Ti	Al	Cu	Fe	Co	—
5.3	0.99	0.56	0.04	17.71	0.023	—

陷。由于激光能量密度呈高斯分布,其作用区域可分为熔化区、过渡区和烧蚀区。峰值能量集中于烧蚀区,并沿远离激光光斑中心的方向逐渐衰减。在激光束作用下,固体金属吸收激光热量发生熔化,形成球冠状熔池。图1显示了脉冲激光重熔立方体材料后形成的典型微观结构。随着激光能量的累积,一部分熔融金属液体汽化并形成微孔,而剩余部分则重新凝固结晶,生成重熔区。重熔区

与基体材料(Base material, BM)因冶金状态的差异而形成明显的边界,但未观察到传统意义上的热影响区(Heat affected zone, HAZ)。重熔区的几何形状呈轴对称分布,与激光束的高斯能量特性密切相关。镍基合金会因激光束的移动形成多个熔池,熔池间的重叠使得材料的微观结构更加复杂。激光制造形成的重熔区通常伴随多种类型的冶金缺陷,其中一种典型缺陷是孔洞(图1)。这些

孔洞的最大直径约为  $40\ \mu\text{m}$ ,其形成与激光重熔过程中空气的混入以及凝固过程的不均匀性密切相关。孔洞缺陷在疲劳载荷作用下易成为裂纹的萌生源,加速裂纹的形核和扩展,从而显著降低激光加工镍基高温合金的疲劳性能。因此,需要进一步优化激光加工参数和工艺策略,以减少孔洞缺陷对材料性能负面影响。

材料的强度通常由其微观结构决定。如图2所示,通过电子背散

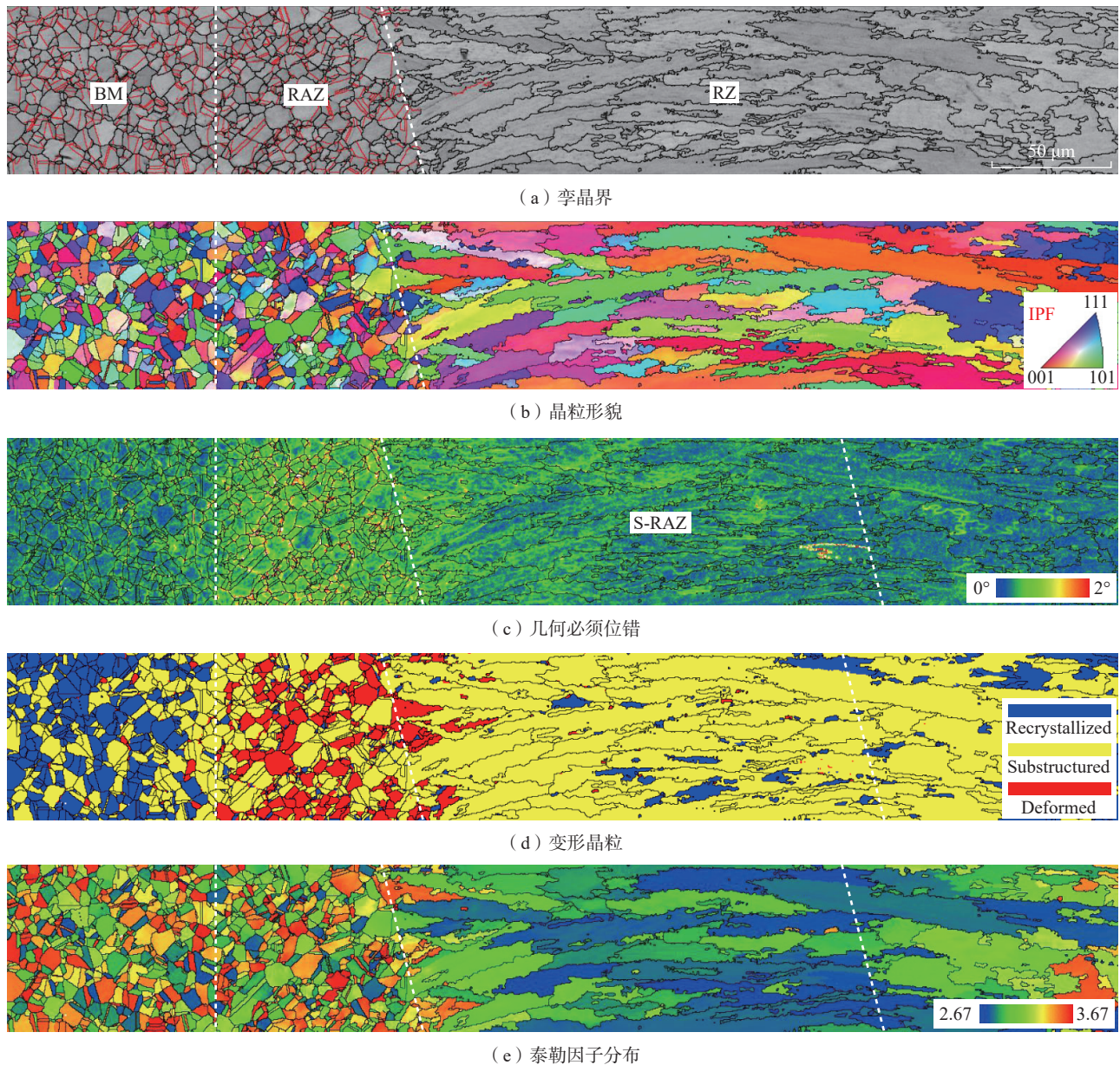


图2 EBSD表征的脉冲激光重熔IN718试样微观组织结构

Fig.2 Microstructure of pulsed laser remelted IN718 sample characterized by EBSD

射衍射 (EBSD) 对激光重熔 IN718 试样的分析表明, 试样可划分为具有显著梯度特征的重熔区 (RZ)、重熔影响区 (Remelting-affected zone, RAZ)、二次重熔影响区 (Secondary RAZ, S-RAZ) 及基材 (BM)。在 RZ 区, 激光诱导的快速非平衡凝固过程 (加热-熔化-凝固-冷却) 促使形成长度超过  $100\ \mu\text{m}$  的拉长柱状晶 (图 2 (b) IPF 图谱), 同时完全抑制孪晶界 (Twin boundary, TB) 的形成 (图 2 (a))。晶粒平均取向差 (Grain average misorientation, GAM) 分析显示该区域以低角度晶界为主 (图 2 (d)), 结合泰勒因子 (Taylor factor) 相对较低的分布特征 (图 2 (e)), 表明其位错运动阻力较小。在 RAZ 区, 该区域虽未经历熔化, 但受激光短时高温时效效应影响发生显著演变: 首先, 其保持与 BM 相同的等轴晶粒形貌 (图 2 (b)), 与传统 HAZ 的典型组织形成本质区别; 其次, 几何必要位错 (Geometrically necessary dislocations, GND) 密度显著高于基材 (图 2 (c)), 反映出晶格畸变的显著加剧; 此外, 孪晶界密度明显提升 (图 2 (a)), 同时 GAM 分布表明亚晶粒与母晶粒间存在较大取向差 (图 2 (d))。上述特征表明, RAZ 通过高位错密度、孪晶界增殖与亚结构演化的协同作用, 实现了优于 RZ 的加工硬化能力。对于 S-RAZ, 其泰勒因子值在整个区域中最低 (图 2 (e)), GND 密度介于 RZ 与 RAZ 之间 (图 2 (c)), 晶粒形貌虽与 RZ 相似但取向差分布更接近 RAZ, 显示出多重热循环的叠加效应。微观结构的空间异质性直接导致力学性能梯度: RZ 因粗大柱状晶结构成为强度薄弱区, RAZ 通过高位错密度、孪晶协同与亚结构强化实现性能优化, 而 S-RAZ 的特殊取向特征可能影响材料的变形响应模式。

图 3 通过扫描电镜 (SEM) 表征了激光重熔 IN718 试样中富铌析

出相的分布特征。如图 3 (a) 所示, 试样可划分为 BM、RAZ、RZ 以及二次/三次重熔影响区 (S-RAZ/T-RAZ)。图 3 (b) 和 (c) 是采用背散射电子 (angular Backscatter Electron Detector, aBSD) 表征的不同富铌析出相和沉淀物, 图 3 (d) 和 (e) 是 BM 中  $P_1$  点和 RZ 中  $P_2$  点的 EDS 元素质量分数测量结果。EDS 分析结果表明, BM 中主要分布针状  $\delta$  相; 在 RAZ 区, 部分  $\delta$  相发生溶解; 而在 RZ 区, 则出现长链状 Laves 相 (Ni, Cr, Fe)<sub>2</sub> (Nb, Mo, Ti)。Laves 相的存在不利于合金的拉伸延展性和疲劳性能<sup>[8]</sup>。Laves 相的析出伴随着铌元素的局部偏析, 而铌是形成强化相  $\gamma'$  (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)) 和  $\gamma''$  (Ni<sub>3</sub>Nb) 的关键元素。因此, Laves 相的形成必然会减少 RZ 中强化相的含量, 从而进一步降低 RZ 的力学性能。此外, 尽管 RZ 表现出明显的晶粒非均匀性, 每个晶粒内部却充满了枝晶-胞状微结构。这些微结构能够有效阻碍位错运动, 主要通过枝晶界和胞

状亚晶界限制位错滑移<sup>[36]</sup>。因此, 尽管 RZ 内部存在微观的非均匀性和各向异性, 这些效应在宏观尺度上被显著削弱, 表现为整体性能的相对均匀性。此外, S-RAZ/T-RAZ 中胞状晶分布更加均匀, 形成连续网状结构, 这种微观形貌的优化有助于改善材料性能的宏观均匀性。上述结果表明, 激光重熔过程中热-力条件的空间梯度差异, 通过调控析出相演化与亚结构特征的协同作用, 最终决定了材料力学性能的分区响应机制。

## 2.2 力学性能

图 4 展示了激光重熔 IN718 试样不同区域的纳米压痕载荷-位移曲线及反演应力-应变曲线。如图 4 (a) 所示, 压痕载荷-位移 ( $P-h$ ) 曲线包括加载、保载和卸载 3 个阶段。在相同的最大压入深度下, 可通过峰值载荷对材料硬度进行定性评估。结果表明, 基材 (BM) 的显微硬度显著高于 RZ 等其他区域。RZ 由于强化相含量的减少, 表现出明显的力学性能软化。而 RAZ 尽管因塑性

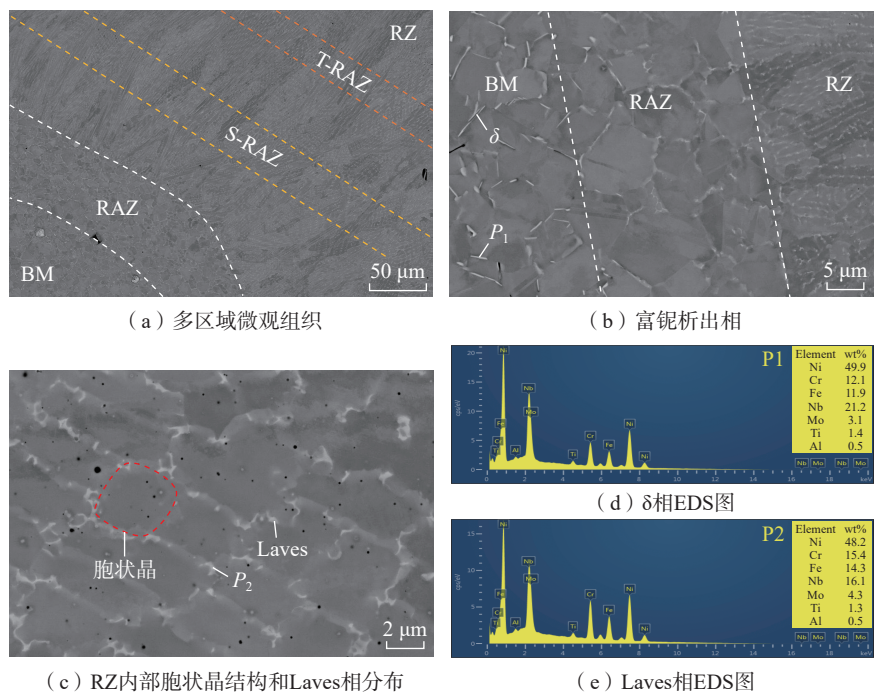


图 3 脉冲激光重熔 IN718 试样富铌析出相分布图

Fig.3 Distribution of niobium-rich precipitation phase in IN718 sample remelted by pulsed laser

变形引入位错强化,却未表现出预期的高强度。这一现象主要归因于RAZ中存在的残余拉应力,导致测得的名义压痕载荷下降。此外,压痕卸载曲线的初始卸载刚度与材料的杨氏模量密切相关。虽然压痕测试能够直接确定材料的显微硬度和杨氏模量,但其难以表征材料的完整弹塑性力学特性。进一步的分析需结合压痕反演算法,以全面理解激光重熔区域的力学行为。

图4(b)展示了基于压痕反演分析得到的脉冲激光重熔IN718试样不同区域的单调应力-应变曲线。该压痕反演分析算法通过引入Oliver等<sup>[37]</sup>提出的半解析方程对Dao等<sup>[38]</sup>的反演分析模型进行修正,用于从压痕载荷-位移曲线中提取材料弹塑性特性<sup>[39]</sup>。结果显示,RZ的反演应力-应变曲线表明其杨氏模量和应变硬化指数与BM相近,但屈服强度显著降低。表2总结了基于反演应力-应变曲线确定的激光重熔材料的基本力学性能,包括杨氏模量 $E$ 、压痕硬度 $H$ 、初始屈服强度 $\sigma_y$ 、强化系数 $R$ 和应变硬化指数 $n$ 。可以发现,不同区域间的力学性能分散较小,RZ与BM的元素组成一致也决定了两者杨氏模量相近,RZ屈服强度和压痕硬度显著低于BM。

重熔区的力学性能显著依赖于其微观组织特征。压痕反演技术用于确定材料的微观力学性能,但晶界强化和孪晶界强化的差异往往无法完全通过压痕反演反映。这是因为晶界和孪晶界的强化作用主要发生在晶粒尺寸和更微观尺度下,通常涉及多晶界和多孪晶界的集聚效应。而在RZ,拉长型柱状晶粒内部含有大量枝晶胞状晶微结构,这些亚晶界能有效阻碍位错运动,从而减弱晶界强化对RZ屈服应力的影响。由于亚晶界特征尺度约为 $1\ \mu\text{m}$ ,能够被压痕测试敏感捕获并体现在压痕反演曲线上。RZ压痕反演屈服强度

的下降主要归因于强化相含量的显著减少。激光重熔处理引发非平衡的熔化凝固过程,导致熔池内部和表面发生显著的元素偏析。这种偏析使铝、钛偏析形成氧化物,铌、钼偏析形成Laves相和富铌化合物,从而大量消耗生成强化相 $\gamma'$ ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ )和 $\gamma''$ ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ )所需的关键元素。这导致重熔区初始态的强化相含量相比BM材料明显减少。此外,强化相对材料强度的影响主要体现在纳米尺度,这种特征同样能被压痕测试很好地表征。因此,压痕测试及反演分析进一步证实激光重熔区的性能退化主要与元素偏析及Laves相析出导致的强化相含量降低有关。同时,由于RZ内部丰富的枝晶-胞状微结构,晶粒尺寸和形貌差异对性能不均匀性和各向异性的影响被显著削

弱。激光重熔材料性能的软化现象,应在激光加工镍基高温合金的研究与应用中受到更多关注。

RAZ区域因几何特性引发位错密度增加、孪晶界密度提升及 $\delta$ 相部分溶解等微结构变化,从而表现出加工硬化特性。尽管RAZ的晶体结构和形貌与BM一致,同时具有位错密度增加等强化特征,按理屈服应力应高于基体材料。然而,如图4所示,RAZ的反演应力-应变曲线并未显示出优于BM的拉伸力学性能。根据表2的统计结果,RAZ的杨氏模量与BM相近,而显微硬度和屈服应力甚至低于BM。这种反常的“软化”现象实际上与RAZ中的残余应力密切相关。在存在残余应力的材料中,压痕测得的显微硬度为耦合残余应力影响的名义压痕硬度。具体而言,

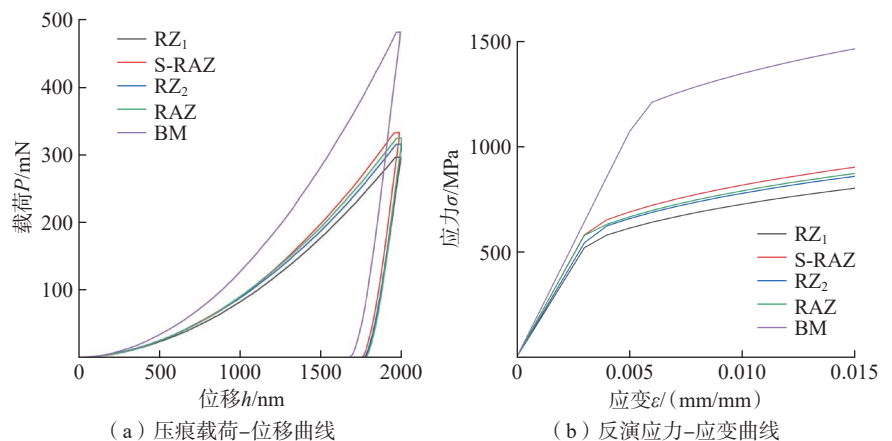


图4 脉冲激光重熔IN718试样不同区域纳米压痕载荷-位移曲线和反演应力-应变曲线  
Fig.4 Nanoindentation load-displacement curves and inverse stress-strain curves of different regions of IN718 specimen remelted by pulsed laser

表2 压痕反演分析确定的试样不同区域材料力学性能  
Table 2 Mechanical properties of materials in different regions of the specimen determined by indentation inversion analysis

区域	杨氏模量 $E/\text{GPa}$	压痕硬度 $H/\text{GPa}$	初始屈服强度 $\sigma_y/\text{MPa}$	强化系数 $R/\text{MPa}$	应变硬化指数 $n$
RZ <sub>1</sub>	173	3.36	547	2244	0.245
S-RAZ	194	3.82	617	2517	0.245
RZ <sub>2</sub>	181	3.58	593	2374	0.242
RAZ	193	3.65	590	2444	0.246
BM	214	5.75	1190	3493	0.207

在拉应力作用下,名义压痕硬度低于材料的真实硬度;在压应力作用下,则名义压痕硬度会高于真实硬度。由于屈服强度与显微硬度之间存在正相关性,RAZ的高拉伸残余应力降低了压痕测量的硬度值,从而未体现出预期的屈服强度提升。因此,为准确评估RAZ的固有力学性能,需通过热处理工艺释放残余应力。

激光重熔IN718各区域的力学性能特性及其主导机制可归纳如下:RZ因Laves相析出导致的强化相含量减少,屈服强度和显微硬度显著低于基材,但枝晶-胞状亚结构通过晶界钉扎效应部分补偿了强度损失,使其宏观变形呈现出相对均匀性;RAZ虽因位错密度增加表现出加工硬化趋势,但残余拉应力导致名义硬度测量值低于真实性能;S-RAZ/T-RAZ的泰勒因子最低且位错密度介于RZ与RAZ之间,显示出多重热循环的过渡态特征,其网状胞状结构可能改善疲劳性能;BM则通过 $\delta$ 相钉扎与等轴晶的协同作用维持高硬度和强度。上述梯度力学行为的本质源于热历程差异诱导的析出相演化与亚结构重构,其中残余应力场与区域间强度失配是调控非均质材料力学响应的关键因素。总体而言,激光重熔处理主要引起RZ与BM之间的强度失配,可通过屈服强度失配因子表征两者的强度差异,以分析非均质材料的力学行为及损伤演化。脉冲次数主要影响区域的几何尺寸失配,而对区域间强度失配的程度影响较小。

### 2.3 疲劳性能

表3给出了激光重熔试样的疲劳试验配置和结果<sup>[40]</sup>,其中 $S_{\max}$ 表示施加的最大公称应力。可以发现,含有RZ的试样疲劳寿命在低应力水平下低于BM,但在高应力水平下与BM相当。最重要的是,即使RZ具备较低的屈服强度,但在更高的应力幅或更大的加载比下,非均质材料在RZ处没有断裂,即发生屏蔽效应。

屏蔽现象意味着较软的材料对强度不匹配材料的宏观疲劳性能影响不大,对于理解不匹配材料的循环塑性行为很重要,这为指导梯度材料的性能调制提供了新的视角。因此,必须量化非均质材料中的应力和应变状态,以识别疲劳损伤指标的差异。

图5给出了不同应力比下的RZ内部特征点拉应力-应变滞回环随循环数演化。其中, $R=0.1$ 对应 $S_{\max}=1125$  MPa, $R=-0.1,0.3,0.5$ 对应 $S_{\max}=1100$  MPa。随着循环数的增加,滞回曲线表现出平均应力减小、平均应变增大的演化规律,直到趋于稳定。随着塑性应变的循环积累,每个循环内的塑性耗散功显著增大。平均应力的松弛导致重熔区棘轮<sup>[41-42]</sup>。尽管整体疲劳受载荷控制,但RZ区

的疲劳载荷处于应力控制和应变控制的中间模式,在这种模式下,平均应力松弛和应变棘轮同时出现,导致RZ循环稳定后应力比为-1。由于强度失配,RZ在单轴疲劳载荷作用下处于多轴应力状态,但剪应力几乎为0,另外两个主应力相对较小。对于主拉应力而言,平均分量在约200循环后完成释放,即平均应力松弛;幅值分量在1000循环后趋于稳定,即循环软化。

同时,不同应力比下( $R=-0.1,0.3,0.5$ ),RZ内部均发生了不同程度的循环软化和完全的平均拉应力释放。因此,尽管整体加载比为0.1,但循环塑性变形的累积导致欠匹配材料中的应力重新分布,使较软RZ的最终应力比达到-1,等效应力幅

表3 激光重熔试样疲劳试验配置和结果

Table 3 Fatigue experiment configurations and results of laser remelted specimens

试样编号	应力比R	最大应力 $S_{\max}$ /MPa	疲劳寿命 $N_f$ /cycles	断裂位置
BM-1	0.1	1180	52673	BM
BM-2	0.1	1154	60951	BM
BM-3	0.1	1125	60911	BM
BM-4	0.1	1020	131002	BM
BM-5	0.1	990	105403	BM
BM-6	0.1	884	220616	BM
BM-7	0.1	750	512703	BM
BM-8	0.1	720	1767770	No
RZ-1	0.1	1240	35068	BM
RZ-2	0.1	1240	37070	RZ
RZ-3	0.1	1125	59048	RZ
RZ-4	0.1	990	90393	RZ
RZ-5	0.1	884	112814	RZ
RZ-6	0.1	750	332179	RZ
RZ-7	0.1	660	496969	RZ
RZ-8	-0.1	1100	27339	RZ
RZ-9	0.3	1100	115239	BM
RZ-10	0.3	900	290492	BM
RZ-11	0.5	1100	333801	BM
RZ-12	0.5	900	1232879	No

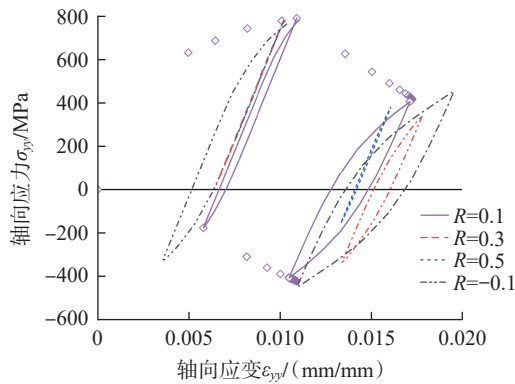


图5 不同应力比下的RZ内部特征点拉应力-应变随循环数演化

Fig.5 Evolution of tensile stress-strain relations with cycles of the critical point inside RZ upon different stress ratios

值较低。这种转变显著改善了RZ的疲劳载荷配置。尽管如此,由于施加的疲劳载荷低于屈服应力,较强的BM整体保持弹性。因此,一旦RZ中的受载状态小于BM,强度失配材料中较软的RZ将被屏蔽,即多层试件在RZ处不断裂。

### 3 结论

本研究通过多尺度试验与数值模拟相结合,系统揭示了激光重熔镍基高温合金IN718的微观组织梯度演化规律及其对力学与疲劳性能的跨尺度影响机制,主要结论如下。

(1) 微观组织梯度特征: 激光重熔形成重熔区(RZ)、重熔影响区(RAZ)及二次重熔区(S-RAZ)的梯度异质结构。RZ内快速非平衡凝固导致粗大柱状晶与Laves相析出,RAZ因短时高温时效诱发高位错密度与孪晶界增殖,S-RAZ则呈现过渡态网状胞状晶,揭示了“熔凝-时效-叠加”的跨尺度组织演化规律。

(2) 力学性能失配机制: RZ因强化相含量减少导致屈服强度显著降低,但枝晶-胞状亚结构通过晶界钉扎效应抑制宏观性能各向异性;RAZ虽存在加工硬化趋势,残余拉应力导致其名义硬度测量值低于真实性能,表明力学表征需解耦残余应力影响。

(3) 疲劳性能调控效应: 发现非均质材料中的应力屏蔽效应——高应力水平下,RZ的循环软化与平均应力松弛显著降低裂纹驱动力,使疲劳失效转移至高强度基材,为利用性能失配优化疲劳寿命提供了新策略。

本研究创新性建立了“组织梯度-强度失配-屏蔽效应”的跨尺度关联模型,但试验未涵盖多次重熔交互作用及高温环境的影响。未来工作需结合同步辐射光源(如原位X射线成像)解析熔池动态行为与亚结构演化,并开发集成晶体塑性性与相场法的多尺度本构模型,实现疲劳损伤的跨尺度预测;同时探索机器学习驱动的工艺优化,以抑制元素偏析并提升激光修复可靠性。

### 参考文献

[1] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.  
WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.  
[2] 吴圣川, 胡雅楠, 杨冰, 等. 增材制造材料缺陷表征及结构完整性评定方法研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 3-34.  
WU Shengchuan, HU Yanan, YANG Bing, et al. Review on defect characterization and structural integrity assessment method of

additively manufactured materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 3-34.

[3] BALBAA M, MEKHIEL S, ELBESTAWI M, et al. On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses[J]. Materials & Design, 2020, 193: 108818.

[4] LUO Y W, MA T, SHAO W W, et al. Effects of heat treatment on microstructures and mechanical properties of GH4169/K418 functionally graded material fabricated by laser melting deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 821: 141601.

[5] GAUTAM G D, PANDEY A K. Pulsed Nd : YAG laser beam drilling: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 183-215.

[6] ZHANG T L, YUAN H, CAI M. Effects of recast layer on fatigue performance of laser-drilled holes in nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 311: 117821.

[7] KHORRAM A, DAVOODI JAMALOEI A, JAFARI A, et al. Microstructural evolution of laser-clad 75Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>+25(80Ni<sub>20</sub>Cr) powder on Inconel 718 superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284: 116735.

[8] SUI S, CHEN J, ZHANG R, et al. The tensile deformation behavior of laser repaired Inconel 718 with a non-uniform microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 688: 480-487.

[9] OH H S, KANG J Y, TASAN C C. Enhancing damage-resistance in low carbon martensitic steels upon dual-pass laser treatment[J]. Scripta Materialia, 2021, 192: 13-18.

[10] JOHNSON A S, SHAO S, SHAMSAEI N, et al. Microstructure, fatigue behavior, and failure mechanisms of direct laser-deposited inconel 718[J]. JOM, 2017, 69(3): 597-603.

[11] STEVENS E L, TOMAN J, TO A C, et al. Variation of hardness, microstructure, and Laves phase distribution in direct laser deposited alloy 718 cuboids[J]. Materials & Design, 2017, 119: 188-198.

[12] HUANG W K, WANG H L, RINKER T, et al. Investigation of metal mixing in laser keyhole welding of dissimilar metals[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109056.

[13] WANG Y C, LEI L M, SHI L, et al. Scanning strategy dependent tensile properties of selective laser melted GH4169[J]. Materials

Science and Engineering: A, 2020, 788: 139616.

[14] ZHAI Y W, LADOS D A, BROWN E J, et al. Understanding the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V and Inconel 718 alloys manufactured by laser engineered net shaping[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 334-344.

[15] ZHANG T L, YUAN H. Multiscale plasticity behavior and fatigue performance of laser melting multi-layer nickel-based superalloys upon heat treatments[J]. International Journal of Plasticity, 2022, 158: 103404.

[16] SUI S, CHEN J, FAN E X, et al. The influence of Laves phases on the high-cycle fatigue behavior of laser additive manufactured Inconel 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 695: 6-13.

[17] WANG L Y, WANG Y C, ZHOU Z J, et al. Small punch creep performance of heterogeneous microstructure dominated Inconel 718 fabricated by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109042.

[18] PEI C H, YUAN H, LI B, et al. Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 268: 108450.

[19] JIN S Z, SUN J Y, YUAN H. Anisotropic cyclic plasticity modeling for additively manufactured nickel-based superalloys[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45(8): 2371-2387.

[20] JIN S Z, PEI C H, YUAN H, et al. Multi-axial fatigue life assessment of additively manufactured nickel-based superalloys[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163: 107049.

[21] NARAGANI D P, PARK J S, KENESEI P, et al. Void coalescence and ductile failure in IN718 investigated via high-energy synchrotron X-ray tomography and diffraction[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 145: 104155.

[22] ZHANG T L, YUAN H. Shielding effects on fatigue and crack growth of the recasting zone induced by laser manufacturing in a nickel-based superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 154: 106523.

[23] HOSSEINI E, POPOVICH V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100877.

[24] ZHANG T L, YUAN H, YANG S. Microstructural characterization and fatigue

performance of the recast material induced by laser manufacturing of a nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293: 117087.

[25] SONG L B, ZHAO L, DING L P, et al. Microstructure and loading direction dependent hardening and damage behavior of laser powder bed fusion AlSi10Mg[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 832: 142484.

[26] ZHANG T L, YUAN H. Characterization of the recasting-affected zone in the nickel-based superalloy upon single-pulse laser treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 826: 141897.

[27] VAN LOOCK F, THOULESS M D, FLECK N A. Tensile fracture of an adhesive joint: The role of crack length and of material mismatch[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 130: 330-348.

[28] TSUTSUMI S, FINCATOR R, LUO P J, et al. Effects of weld geometry and HAZ property on low-cycle fatigue behavior of welded joint[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 156: 106683.

[29] LUO S C, HUANG W P, YANG H H, et al. Microstructural evolution and corrosion behaviors of Inconel 718 alloy produced by selective laser melting following different heat treatments[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100875.

[30] SCHNEIDER J, LUND B, FULLEN M. Effect of heat treatment variations on the mechanical properties of Inconel 718 selective laser melted specimens[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 248-254.

[31] ZHANG T L, YUAN H. Effects of heat treatments on microstructure and mechanical properties of laser melting multi-layer materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 848: 143380.

[32] LI X, SHI J J, CAO G H, et al. Improved plasticity of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting through a novel heat treatment process[J]. Materials & Design, 2019, 180: 107915.

[33] SONG W, WANG P, WAN D, et al. Fatigue crack growth behavior of Ni-Cr-Mo-V steel welded joints considering strength mismatch effect[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151: 106389.

[34] 王迪, 邓国威, 杨永强, 等. 金属异质材料增材制造研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 186-198.

WANG Di, DENG Guowei, YANG

Yongqiang, et al. Research progress on additive manufacturing of metallic heterogeneous materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 186-198.

[35] MORAR N I, ROY R, MEHNEN J, et al. Investigation of recast and crack formation in laser trepanning drilling of CMSX-4 angled holes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9): 4059-4070.

[36] VOISIN T, FORIEN J B, PERRON A, et al. New insights on cellular structures strengthening mechanisms and thermal stability of an austenitic stainless steel fabricated by laser powder-bed-fusion[J]. Acta Materialia, 2021, 203: 116476.

[37] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.

[38] DAO M, CHOLLACOOP N, VAN VLIET K J, et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 2001, 49(19): 3899-3918.

[39] ZHANG T L, SUN J Y, YUAN H. Cyclic plasticity modeling and fatigue life assessment of the recasting material of a nickel-based superalloy induced by laser manufacturing[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 147: 106154.

[40] ZHANG T L, YUAN H. Stress shielding in laser melting multilayered nickel-base superalloys under monotonic and cyclic loadings[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 167: 107349.

[41] RITCHIE R O. The conflicts between strength and toughness[J]. Nature Materials, 2011, 10(11): 817-822.

[42] TALEB L, KELLER C. Experimental contribution for better understanding of ratcheting in 304L SS[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 146: 527-535.

通信作者: 袁荒, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高温材料结构损伤力学、断裂力学和疲劳。

(下转第 81 页)

## Research on Influence of Tool Path Strategies on Machining Performance in Milling Inconel 718 With Straight Slot Features

LÜ Wenjun<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhanqiang<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Bing<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Ming<sup>5</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. State Key Laboratory for High-End Equipment and Advanced Technology of Metal Forming, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Jinan 250061, China;

4. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong University, Weihai 264209, China;

5. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** Inconel 718, as a typical difficult-to-cut material, exhibits high hardness, high strength, and low thermal conductivity. The tool is subjected to significant cutting forces and high cutting temperatures during the cutting process, which not only accelerate tool wear but also adversely affect the dimensional accuracy and surface quality of the machined parts. The straight slot features are widely present in aero-engine components, and the surface quality after finish machining decisively affects the service life and overall performance of the parts. A comparative analysis was conducted on the cutting performance of single-pass and multi-pass finish milling processes when machining straight slots of Inconel 718. The effects of different process methods on cutting force, surface topography, and material removal rate were investigated through theoretical derivation and milling experiments. The research findings indicate that single-pass finish milling of straight slots can effectively reduce the peak cutting force and the duration of force application, minimize milling tool deformation, achieve superior slot wall quality and floor surface accuracy, and enhance machining efficiency. Single-pass finish milling demonstrates significant advantages.

**Keywords:** Slot features; Cutting performance; Single-pass milling; Multi-pass milling; Inconel 718

(责编 阳光)

(上接第 43 页)

## Investigation of Heterogeneous Mechanical Properties of Laser Remelting Nickel-Base Superalloys

ZHANG Tinglian<sup>1</sup>, YUAN Huang<sup>1,2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute for Aero Engines, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**[ABSTRACT]** This study systematically investigated the microstructural evolution, mechanical property mismatch, and their effects on fatigue performance in laser-remelted nickel-based superalloys through multiscale experimental characterization and finite element simulations. By combining nanoindentation tests, fatigue experiments, and an improved indentation inverse analysis algorithm, the spatial distribution of mechanical parameters in the remelting zone (RZ), remelting-affected zone (RAZ), and base material (BM) was quantified. The results demonstrate that the RZ, characterized by coarse columnar grains and Laves phase formation due to non-equilibrium solidification, exhibits significantly reduced strength compared to the BM. However, dendritic-cellular substructures within the RZ mitigate macroscopic performance anisotropy through grain boundary pinning effects. Although the RAZ shows elevated geometrically necessary dislocation (GND) density and twin boundary proliferation, residual tensile stresses lead to underestimated nominal hardness measurements. Fatigue analysis reveals a stress shielding effect in the heterogeneous material system: cyclic softening and mean stress relaxation in the RZ under high-stress conditions substantially reduce crack driving forces, shifting fatigue failure initiation to the BM. This work establishes a cross-scale theoretical framework for optimizing the performance of laser-repaired components.

**Keywords:** Laser remelting; Strength mismatching; Shielding effect; Fatigue performance; Nickel-based superalloy

(责编 阳光)