

激光选区熔化 24CrNiMo 合金钢的组织 and 热疲劳性能

任莉莎, 陈辉*, 陈勇, 钱俊, 杨雄

西南交通大学材料科学与工程学院, 材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031

摘要 采用激光选区熔化技术制备 24CrNiMo 合金钢, 研究不同扫描策略下成形件的显微组织、相组成和热疲劳性能。结果表明: 24CrNiMo 合金钢的显微组织由粒状贝氏体、马氏体和少量残余奥氏体构成。不同扫描策略下成形件的相组成均为 α -Fe 和少量 γ -Fe, 扫描策略对成形件相组成的影响较小。与旋转扫描策略相比, 0° 直线扫描策略下晶粒的生长具有较强的取向性; 旋转扫描策略改变了相邻层间的散热方向, 破坏了晶粒的外延生长模式, 晶粒取向随机, 显示出弱织构; 0° 直线扫描路径与热疲劳缺口的方向平行时, 该扫描策略下的成形件具有最大的裂纹扩展速率, 最终裂纹长度可达到 1162 μm 。热应力和氧化作用是热疲劳裂纹扩展的重要原因。

关键词 激光技术; 24CrNiMo 合金钢; 激光选区熔化; 扫描策略; 热疲劳性能

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2202004

1 引言

24CrNiMo 钢是一种低合金高强钢, 具有较高的强度、良好的韧性和热稳定性, 通常被用于制造高速列车制动盘^[1]。制动盘一般采用铸造和锻造工艺生产, 具体的加工工艺流程为模铸、锻造、热处理、机械加工等, 存在加工周期长、成本高、材料利用率低等问题^[2-3]。激光选区熔化(SLM)技术是金属材料增材制造中的一种主要技术途径, 具有加工工艺简单、无需模具、成形精度高、制作周期短等特点^[4], 能够高效地生产结构复杂的零件, 已被广泛应用于航空航天、医疗、能源等工业领域^[5-7]。

SLM 技术对制造领域的快速发展具有巨大的推动作用, 国内外学者在 SLM 技术制备合金钢方面进行了大量研究。杨晨等^[8]进行了 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的工艺研究, 探讨了激光功率、激光扫描速度对成形件组织、致密度、硬度和拉伸性能的影响; 结果表明, 在合适的激光成形参数下, 试样的致密度能够达到 99.93%, 其综合力学性能明显优于铸态合金钢。宗学文等^[9]研究了体激光能量密度对 SLM 316L 不锈钢各向异性的影响, 结果表明, 在一定的参数范围内, 随着体激光能量密度增加, 成

形件 X 和 Y 向(激光扫描层)的各向异性增大, Z 向(沉积方向)的熔合线向水平方向拉长, 晶粒生长取向更加明显。Liu 等^[10]研究了单向扫描和 45° 旋转扫描策略对 SLM 成形铁素体/马氏体钢组织和力学性能的影响, 结果表明, 扫描策略能够改变晶粒的尺寸, 晶粒结构的变化使拉伸断裂模式发生改变, 出现不同的强度和延伸率。Riemer 等^[11]采用 SLM 技术制备了沉积方向不同的 316L 不锈钢试样, 并对其裂纹扩展行为进行了研究; 结果发现, 裂纹扩展行为主要受凝固组织的影响, 裂纹沿晶粒长轴方向具有更高的扩展速率。综上所述, 国内外学者对 SLM 技术的研究主要集中在成形工艺以及成形件的基本力学性能方面, 而针对成形件热疲劳性能的研究极少。

高速列车停车制动时, 制动盘和闸片之间产生的摩擦较大, 制动盘表面温度迅速升高, 与其内部产生了较大的温度梯度, 从而使得制动盘内形成了较大的热应力; 当制动盘内的热应力大于其本身的疲劳极限时, 就会造成损坏。热疲劳失效已成为高速列车制动盘的主要失效形式之一^[12]。本文研究了 4 种扫描策略下 SLM 制备的 24CrNiMo 合金钢的微观组织和热疲劳性能, 通过统计裂纹扩展速率和分析裂纹扩展机理, 建立了扫描策略与热疲劳裂纹

收稿日期: 2021-02-21; 修回日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-05-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFB11000202)

通信作者: *xnrpt@swjtu.edu.cn

扩展之间的联系, 以为为工艺参数选择提供参考。

2 试验材料及方法

试验用 24CrNiMo 粉末采用雾化法制备, 粉

末的化学成分如表 1 所示。粉末形貌如图 1(a) 所示, 大部分粉末呈近球形, 有少量不规则粉末及卫星球黏附。粉末的粒径分布如图 1(b) 所示, 中值粒径 $D_{50} = 44 \mu\text{m}$ 。

表 1 24CrNiMo 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of 24CrNiMo powder

Element	Ni	Mo	Si	Cr	Mn	C	S	Fe
Mass fraction / %	1.81	0.47	0.21	1.12	0.72	0.23	0.0031	Bal.

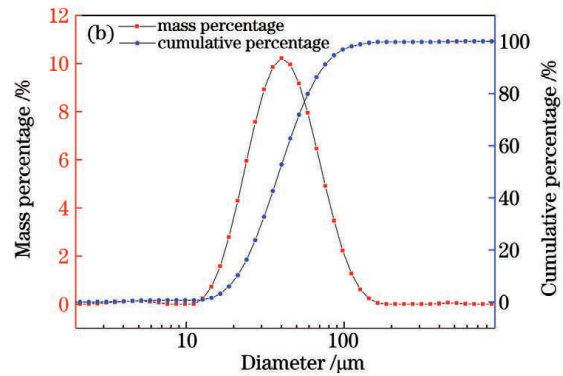
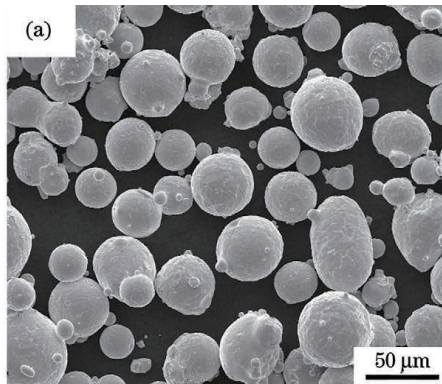


图 1 24CrNiMo 粉末的形貌及粒径分布。(a)形貌;(b)粒径分布

Fig. 1 Morphology and particle size distribution of 24CrNiMo powder. (a) Morphology; (b) particle size distribution

采用 EP-M250 激光选区熔化设备进行 24CrNiMo 合金钢成形件的制造, 选用 Q235 钢板作为基板。试验前, 将基板表面打磨光滑, 并用酒精擦拭基板表面。成形工艺参数如下: 激光功率 360 W,

扫描速度 600 mm/s, 扫描间距 0.11 mm, 层厚 70 μm。4 种不同的扫描策略分别命名为 0° 直线扫描、45° 旋转扫描、90° 旋转扫描和 67° 旋转扫描, 如图 2 所示。

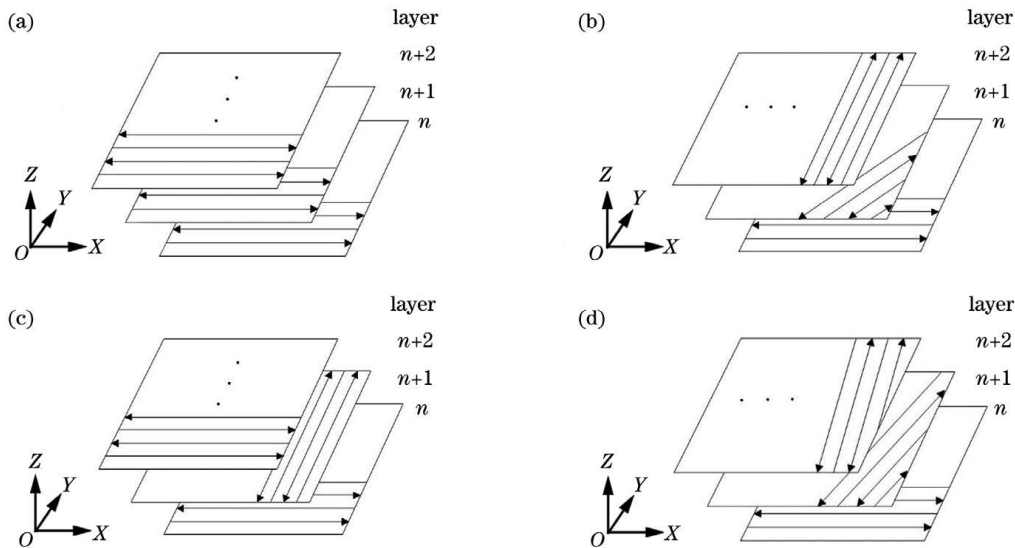


图 2 扫描策略示意图。(a)0° 直线扫描;(b)45° 旋转扫描;(c)90° 旋转扫描;(d)67° 旋转扫描

Fig. 2 Schematics of scanning strategies. (a) 0° linear scanning; (b) 45° rotating scanning; (c) 90° rotating scanning; (d) 67° rotating scanning

制备尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm 的试样进行致密度测试和组织观察。采用阿基米德排水法测

定试样的致密度。选择成形件的 YOZ 面进行研磨、抛光, 并用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀, 然后利用光

学显微镜(OM)和 QUANTA FEG250 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的表面形貌。采用 Smartlab (9K)X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析。

热疲劳性能测试使用实验室自制的试验装置进行。该装置如图 3 所示,其主要部件有控制器、电磁铁、管式炉和水槽,控制器对炉温和电磁铁的位置进行精确控制。试样固定在金属杆上,在电磁铁的控制下,试样随着金属杆上下往复运动。试样悬吊在电阻炉内时受热升温,浸没在流动水中时降温冷却,

一次升温降温过程构成一次热疲劳循环。按照 HB 6660—2011《金属板材热疲劳试验方法》,制备如图 4 所示的带有 V 形缺口的平板试样进行热疲劳测试。为了模拟制动盘的实际工况,选择 650 °C 为加热温度,进行室温至 650 °C 之间的冷热循环试验。在每个循环中,试样先被加热 80 s,与炉内温度达到平衡,之后浸入流动水中 10 s,冷却至室温。经历 2000 次循环后终止试验。每循环 100 次测量裂纹的长度,并用扫描电镜观察最终的裂纹形貌。

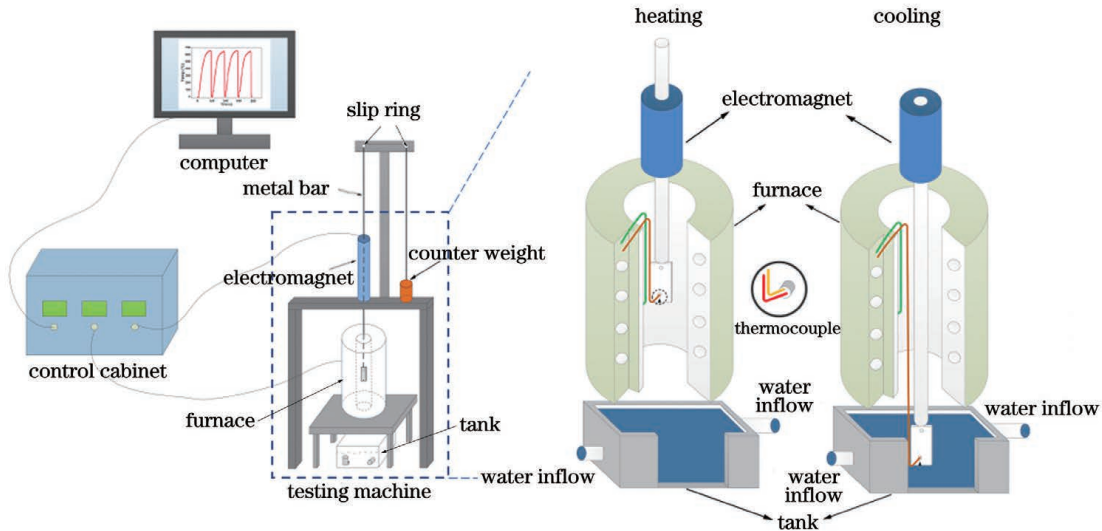


图 3 热疲劳试验装置示意图

Fig. 3 Schematics of thermal fatigue test equipment

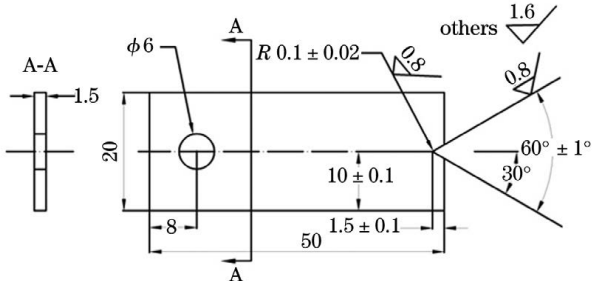


图 4 热疲劳试样的尺寸

Fig. 4 Size of thermal fatigue test specimen

3 分析与讨论

3.1 致密度

测量了不同扫描策略下 24CrNiMo 合金钢 SLM 成形件的致密度,测量结果显示,0°直线扫描策略下成形件的相对密度为 99.82%,45°、90°、67° 旋转扫描策略下成形件的相对密度分别为 99.86%、99.85%、99.88%。4 种扫描策略下成形件的致密度波动较小,说明扫描策略对致密度的影

响较小。Montero-Sistiaga 等^[13]采用 SLM 工艺,在低激光功率(400 W)条件下以 0°、45°、90° 旋转扫描策略成形了 316L 不锈钢,并测得成形件相对密度的波动范围为 99.7%~99.8%,从而得出了扫描策略对 SLM 316L 成形件致密度的影响可以忽略的结论。本文获得了与其类似的结论。

3.2 微观组织

在 SLM 成形过程中,激光扫描策略会影响成形件的热循环过程,从而影响成形件的组织演化。图 5 为不同扫描策略下 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的组织形貌,可以看出,不同扫描策略下熔池的形貌变化很大:在 0° 直线扫描策略下,熔道逐层堆积,熔池呈周期性排列,呈现出规则的鱼鳞状;在 45° 旋转扫描策略下,下一层熔道相对于上一层旋转 45°,熔池交错排列,每四层组成一个循环周期;在 90° 旋转扫描策略下,层与层之间的熔道相互垂直,鱼鳞状熔池和带状熔池交替出现;在 67° 旋转扫描策略下,相邻层的熔道不再重叠,熔池随机排列。

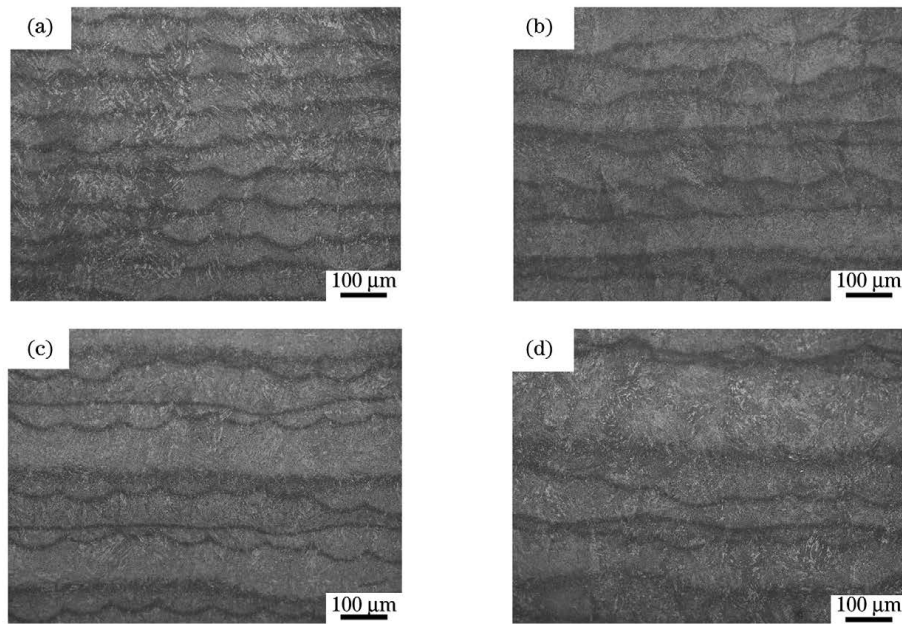


图 5 不同扫描策略下 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的 OM 形貌。(a)0°直线扫描;(b)45°旋转扫描;(c)90°旋转扫描;(d)67°旋转扫描

Fig. 5 OM morphologies of 24CrNiMo alloy steel formed by selective laser melting (SLM) under different scanning strategies. (a) 0° linear scanning; (b) 45° rotating scanning; (c) 90° rotating scanning; (d) 67° rotating scanning

采用 SEM 对 0° 直线扫描策略下单个熔池范围内的组织进行观察,结果如图 6 所示。可以看出,该扫描策略下的熔池主要由粒状贝氏体(GB)、马氏体(M)和少量残余奥氏体(RA)构成。24CrNiMo 合金钢属于亚共析钢,其在凝固过程中析出铁素体和富碳奥氏体,随着铁素体增多,富碳

奥氏体被包裹在铁素体中构成粒状贝氏体^[14]。在 SLM 成形过程中,熔池的冷却速度可以达到 10^6 K/s^[15],极易形成马氏体组织,而未发生转变的奥氏体则保留下来成为残余奥氏体。重熔区受到二次加热的影响,晶粒沿垂直于熔池边界方向(散热快的方向)长大。

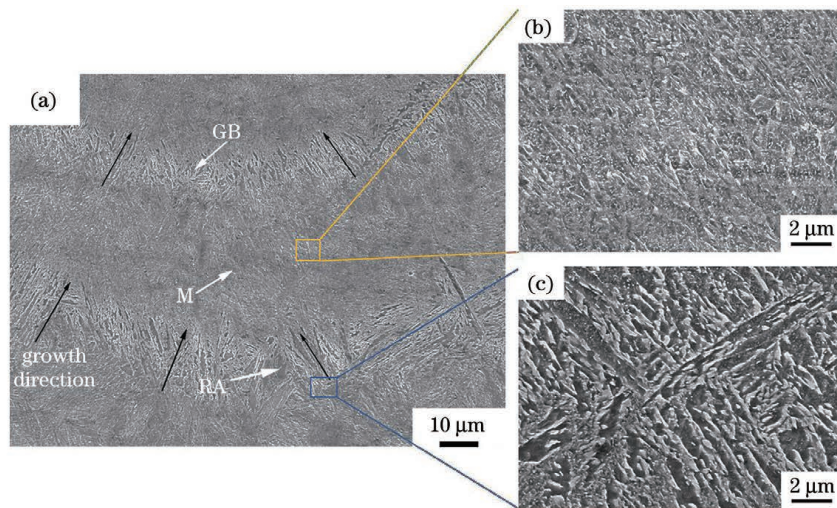


图 6 0°直线扫描策略下 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的显微组织。(a)熔池;(b)熔池内部;(c)重熔区

Fig. 6 Microstructures of 24CrNiMo alloy steel formed by SLM under 0° linear scanning strategy. (a) Molten pool; (b) inside of the molten pool; (c) remelting zone

图 7 所示为 0° 直线扫描策略和 67° 旋转扫描策略下 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的反极图(IPF)。

沿成形件的 X-Y 截面进行观察可以发现,0° 直线扫描策略下成形试样的组织呈周期性分布。图 7(a)

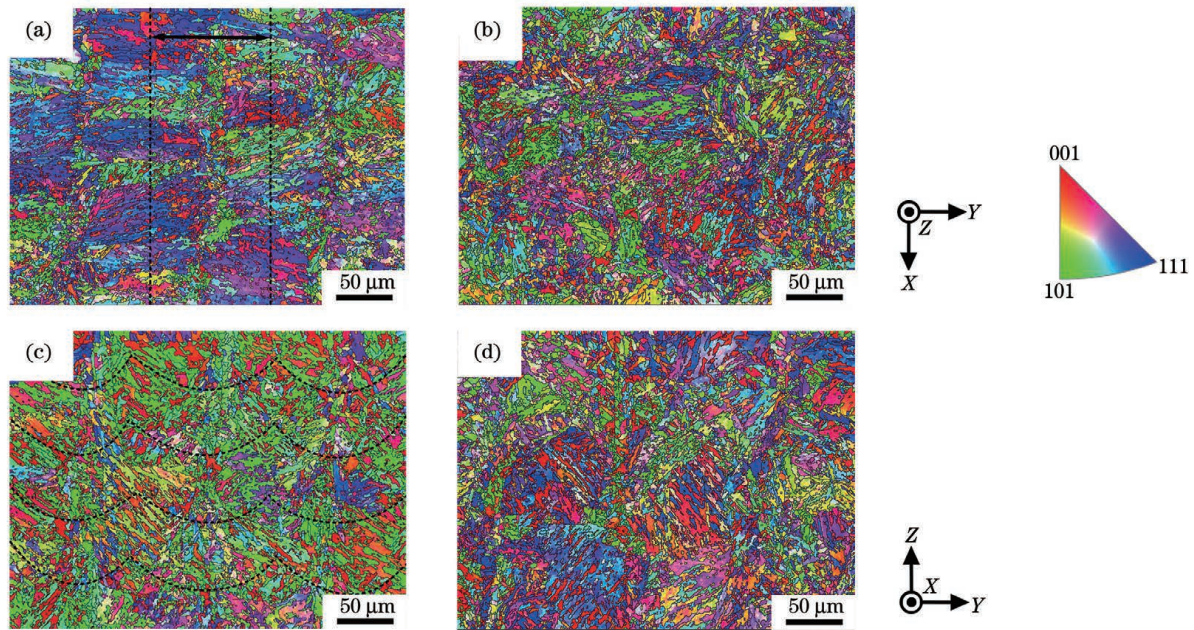


图 7 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的 IPF 图像。(a)X-Y 截面,0°直线扫描;(b)X-Y 截面,67°旋转扫描;(c)Y-Z 截面,0°直线扫描;(d)Y-Z 截面,67°旋转扫描

Fig. 7 IPF images of 24CrNiMo alloy steel formed by SLM. (a) X-Y section, 0° linear scanning; (b) X-Y section, 67° rotating scanning; (c) Y-Z section, 0° linear scanning; (d) Y-Z section, 67° rotating scanning

中所示的两条黑色虚线之间的区域为一个熔道,晶粒沿热流方向垂直于扫描方向生长,并在熔池中心相交,由于后一熔道对前一熔道具有热作用,因此相邻熔道的晶粒呈外延生长方式^[14,16-17];在 67°旋转扫描策略下,相邻层的组织交叉分布,呈现出较为混乱的组织。沿成形件的 Y-Z 截面进行观察可以发现:0°直线扫描策略下的熔池形貌比较清晰,晶粒垂直于熔池底部向中心生长,各种取向的晶粒在熔池中心交汇,产生明显的组织界线;在 67°旋转扫描策略下,同一断面的熔池难以识别,晶粒取向随机分布。进一步分析晶粒的取向分布后可以发现,不同扫描策略下的晶体学织构具有明显差异:0°直线扫描策略下的试样表现出了相对明显的择优取向,而 67°旋转扫描策略下的试样显示出了弱织构,晶粒在各个方向上均匀生长。这是因为 0°直线扫描策略下的路径较为单一,层与层之间的散热方向保持不变,晶粒沿着立方晶胞择优取向生长;当扫描方向在相邻层之间旋转 67°时,层与层之间的散热方向不断地发生变化,破坏了晶粒的外延生长模式,使晶粒生长方向变得随机。

3.3 物相分析

SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的 XRD 图谱如图 8 所示。不同扫描策略下试样的相组成比较相似,均主要由体心立方结构的 α -Fe 相构成,同时含

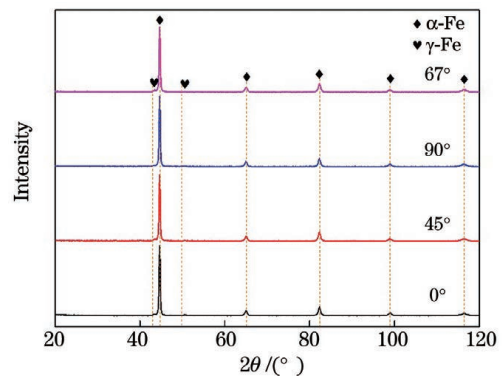


图 8 不同扫描策略下 SLM 成形 24CrNiMo 合金钢的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of 24CrNiMo alloy steel formed by SLM under different scanning strategies

有少量面心立方结构的 γ -Fe 相。SLM 工艺具有快速冷却的特点,部分 Cr、Ni 和 Mo 等合金元素会固溶于 α -Fe 中,导致 α -Fe 和 γ -Fe 相的 2θ 位置右移至更高的布拉格角。

激光扫描方式会影响和改变组织的形貌,而微观组织的改变会直接影响试样的性能^[18-19]。接下来针对 24CrNiMo 合金钢制动盘的服役工况,对不同扫描策略下 SLM 成形件的热疲劳性能进行研究。

3.4 热疲劳性能

图9(a)所示为试件在进行热疲劳试验前后的

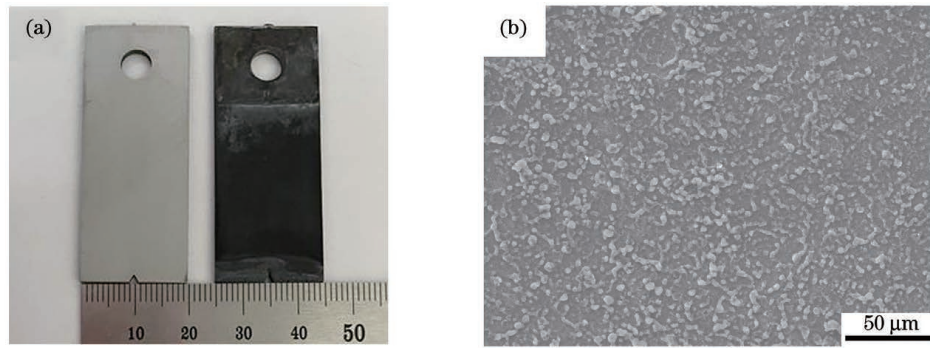


图 9 热疲劳氧化现象。(a)试验前后试样宏观形貌的对比;(b)氧化层形貌

Fig. 9 Oxidation phenomenon during thermal fatigue. (a) Macroscopic features comparison of the sample before and after thermal fatigue test; (b) oxidation morphology

对比图,可以看出,热疲劳试验后,试样表面明显被氧化。24CrNiMo 合金钢属于铁基材料,Fe 元素在高温下易与空气中的氧气发生反应,生成的氧化物附着在试样上。试样中含有 Cr 元素,氧化后会生成致密的 Cr_2O_3 氧化膜,但由于试样中的 Cr 元素含量较少,不能形成足够的 Cr_2O_3 氧化膜,因此,暴露在高温和空气中的试样继续被氧化。在淬火过程中,疏松的氧化膜在水的冲击下松动,并在随后循环过程中的热应力作用下剥落,形成如图 9(b)所示的氧化层形貌。

图 10 是热疲劳主裂纹扩展长度与循环次数的关系图。对于采用 0° 直线扫描策略成形的试样,沿其横向和纵向分别开 V 型缺口制备热疲劳试样,对两种热疲劳试样均进行热疲劳测试。从热疲劳裂纹扩展动力学曲线图中可以看出,裂纹长度随循环次数的增加呈现出近线性增加的规律。当热疲劳试样缺口方向与激光扫描路径平行 ($0^\circ //$) 时,裂纹长度增长得最快,试验终止时,裂纹长度达到了 $1162 \mu\text{m}$ 。采用层与层旋转一定角度的扫描策略,能够减缓裂

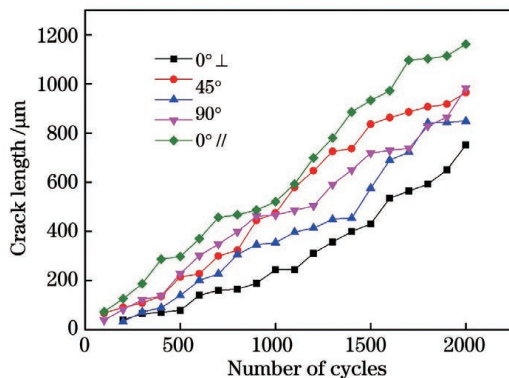


图 10 不同扫描策略下试样热疲劳裂纹扩展的动力学曲线
Fig. 10 Kinetic curves of thermal fatigue crack propagation of thermal fatigue specimens under different scanning strategies

纹的扩展。当热疲劳试样缺口方向与激光扫描路径垂直 ($0^\circ \perp$) 时,裂纹扩展得最短(为 $751 \mu\text{m}$),热疲劳裂纹扩展速度整体较为缓慢。

采用 SEM 对循环 2000 次后的裂纹进行观察,结果如图 11 所示。 $0^\circ //$ 试样上的主裂纹平直向前扩展,在一定循环次数下,主裂纹边缘处分裂出二次裂纹,二次裂纹与其他的细小裂纹交汇,沿新的裂纹路径扩展。 45° 旋转扫描策略成形试样上的主裂纹曲折扩展,同时主裂纹上扩展出了二次裂纹。 90° 旋转扫描策略成形试样上的裂纹呈树枝状扩展,由主裂纹分裂出许多二次裂纹。 67° 旋转扫描策略成形试样上的主裂纹分裂出了一些二次裂纹,部分二次裂纹继续扩展,与微裂纹相连,并在之后的冷热循环过程中继续扩展,呈现出网状裂纹形貌。 $0^\circ \perp$ 试样上的裂纹在萌生阶段于缺口处出现分支,在热应力作用下,主裂纹和二次裂纹继续扩展。

热疲劳试验过程中产生的主裂纹宽度可以达到 $101 \mu\text{m}$,在裂纹不断向前延伸的同时裂纹宽度也在不断增加。热疲劳裂纹扩展的动力主要来源于冷热循环产生的热应力。在加热过程中,试样表面受热辐射升温产生膨胀,但试样内部温度较低,抑制表面膨胀,产生压应力;在淬火冷却过程中,热疲劳试样缺口附近的温度迅速下降,远离缺口处的温度较高,对低温处的收缩产生阻碍作用,试样内部产生拉应力^[20]。在连续的升温、降温循环过程中,试件经历压-拉循环热应力作用,在缺口尖端应力集中处产生塑性积累,当应力超过材料强度时,材料出现损伤。

图 12(a) 为 0° 直线扫描策略成形试样上热疲劳裂纹的扩展形貌,热疲劳裂纹主要沿着熔池中心扩展。从图 7(a)、(c) 中可以看出,熔池凝固时,沿各个取向生长的晶粒在熔池中心相交,在熔池中心形

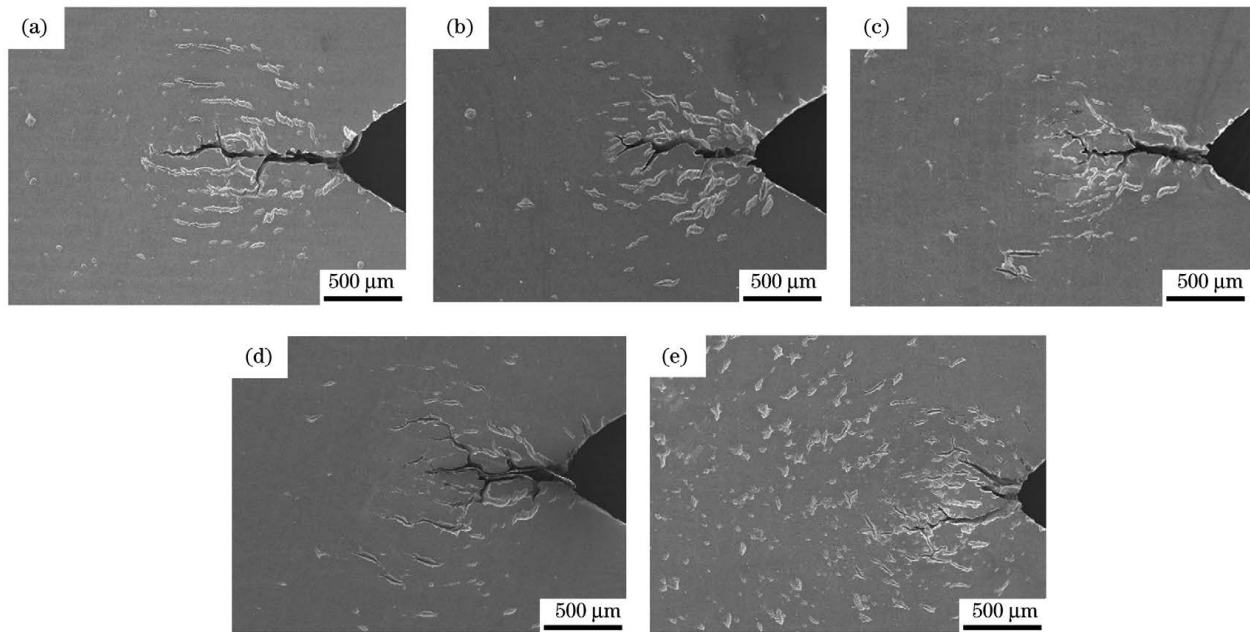


图 11 不同扫描策略成形试样的热疲劳裂纹扩展形貌。(a)0°直线扫描,激光扫描路径平行于缺口方向;(b)45°旋转扫描;(c)90°旋转扫描;(d)67°旋转扫描;(e)0°直线扫描,激光扫描路径垂直于缺口方向

Fig. 11 Morphologies of thermal fatigue crack propagation of specimens formed with different scanning strategies. (a) 0° linear scanning (laser scanning path is parallel to the notch direction); (b) 45° rotating scanning; (c) 90° rotating scanning; (d) 67° rotating scanning; (e) 0° linear scanning (laser scanning path is perpendicular to the notch direction)

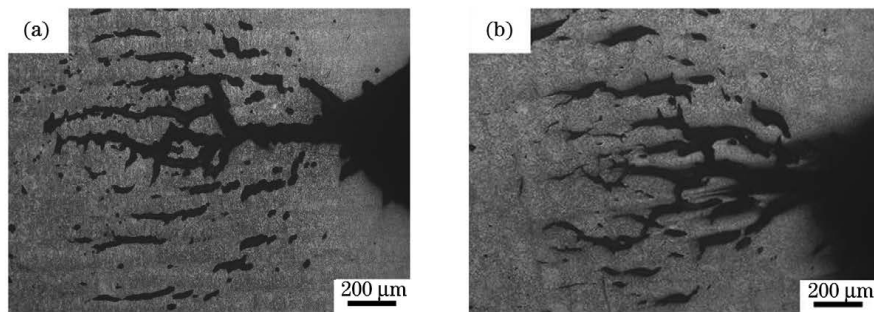


图 12 热疲劳裂纹扩展的典型形貌。(a)0°直线扫描;(b)67°旋转扫描

Fig. 12 Typical morphologies of thermal fatigue crack propagation. (a) 0° linear scanning; (b) 67° rotating scanning

成组织界线,具有组织不均匀性。同时,熔池中心作为最后的凝固区域,常常伴随有成分偏析和应力集中现象,使其成为薄弱区域。在热应力作用下,热疲劳裂纹沿着所需能量较小的区域扩展。45°、90°、67°旋转扫描策略对热疲劳裂纹扩展具有相似的影响,图 12(b)为 67°旋转扫描策略成形试样上热疲劳裂纹的扩展形貌,裂纹沿缺口尖端扩展,易在扩展过程中发生转向,生成二次裂纹。从图 7(b)、(d)中可以看出,在 67°旋转扫描策略下,晶粒生长方向随机,没有明显的组织界线和熔池薄弱区。随机分布的晶粒取向对热疲劳裂纹扩展具有一定的阻碍作用,裂纹遇到容易扩展的取向时便发生偏转。基于晶界取

向差对热疲劳裂纹扩展进行分析;图 7(a)、(b)中大角度晶界的比例分别为 32.67%和 36.55%,如图 13(a)、(b)所示。与 0°直线扫描试样相比,67°旋转扫描策略成形试样中的大角度晶界比例增加了 11.88%。大角度晶界具有较高的晶界能,使裂纹扩展所需的能量增加。因此,在不同的冷热循环次数下,旋转扫描策略成形试样具有比 0°直线扫描试样更低的热疲劳裂纹扩展速率。

在图 12 中还可以发现主裂纹附近分布着许多细小裂纹,主要为表面裂纹,这些裂纹独自萌生扩展。在图 14(a)中可以观察到许多腐蚀坑。在 650 °C 的高温下,暴露在空气中的试样表面发生氧

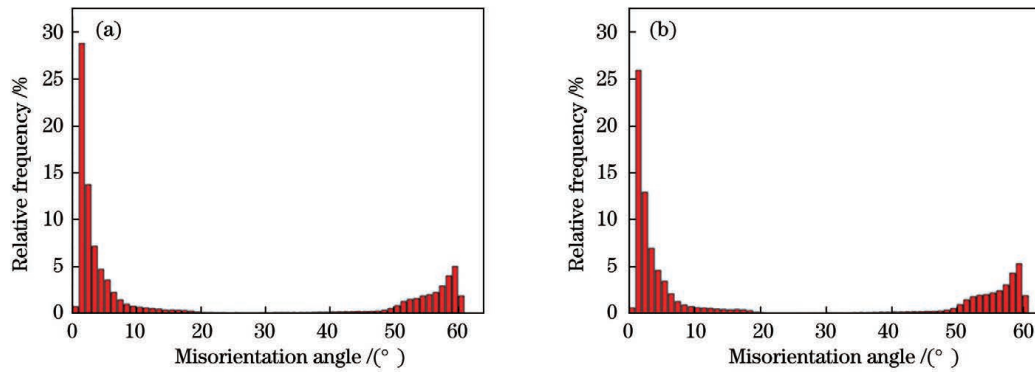


图 13 晶界取向差分布。(a) X-Y 截面, 0° 直线扫描; (b) X-Y 截面, 67° 旋转扫描

Fig. 13 Grain boundary misorientation distributions. (a) X-Y section, 0° linear scanning; (b) X-Y section, 67° rotating scanning

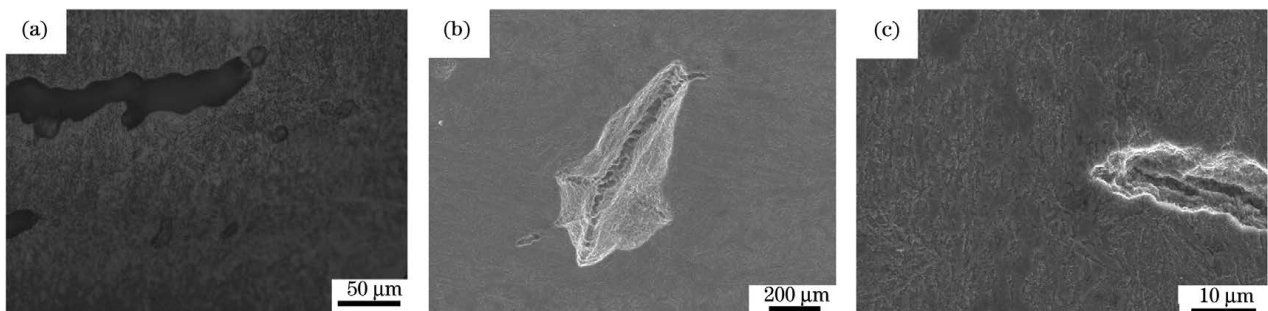


图 14 热疲劳裂纹形貌。(a) 氧化腐蚀; (b) 独立生长裂纹; (c) 裂纹尖端

Fig. 14 Morphologies of thermal fatigue crack. (a) Oxidation corrosion; (b) independent growth crack; (c) crack tip

化,氧化物和基体的热膨胀系数具有较大差异,在随后的冷热循环过程中,在较大的热应力作用下,裂纹产生并扩展,形成如图 14(b)所示的裂纹。环境中的氧离子吸附在主裂纹和细小裂纹表面,使裂纹及其周围发生一定程度的氧化和腐蚀^[21];在冷热循环过程中,疏松的氧化膜破碎和重建,裂纹宽度和深度增大,形成如图 14(c)所示的裂纹尖端形貌。

4 结 论

本文采用 SLM 制备了 24CrNiMo 合金钢,研究了扫描策略对成形件组织和热疲劳性能的影响,得到的结论如下:

扫描策略变化会改变熔池形貌;不同扫描策略下成形件的组织均由粒状贝氏体、马氏体、残余奥氏体组成,相组成均为 α -Fe 和 γ -Fe。0° 直线扫描策略下的晶粒具有较强的取向性,旋转扫描方式对晶粒的外延生长具有一定的破碎作用,使晶粒的取向性减弱。

当激光扫描路径与热疲劳试样缺口方向平行时,裂纹长度增长得最快,最终达到 1162 μm 。熔池中心具有较大的组织不均匀性,热疲劳裂纹易在此

处扩展和偏转。热疲劳裂纹的扩展是热应力与高温氧化共同作用的结果。

参 考 文 献

- [1] Yuan M Y, Chen Y, Wang S, et al. Study on selective laser melting process of 24CrNiMo alloy steel[J]. *Engineering & Test*, 2019, 59(2): 18-21. 袁梅彦, 陈勇, 王森, 等. 24CrNiMo 合金钢的激光选区熔化成形工艺研究[J]. *工程与试验*, 2019, 59(2): 18-21.
- [2] Tang C J, Chen Y B, Zuo L L, et al. Application status and research progress of brake disc materials for high-speed train[J]. *Materials Review*, 2018, 32(S1): 443-448. 汤村江, 陈蕴博, 左玲立, 等. 高速列车制动盘材质应用现状和研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(S1): 443-448.
- [3] Wang X C. Research on casting technology of brake discs for railway locomotives [J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2019, 50(17): 122. 王向才. 铁道机车制动盘铸造工艺研究[J]. *南方农机*, 2019, 50(17): 122.
- [4] Li N, Huang S, Zhang G D, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review

- [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(2): 242-269.
- [5] Zhao Z G, Bai L, Li L, et al. Status and progress of selective laser melting forming technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(19): 46-49.
赵志国, 柏林, 李黎, 等. 激光选区熔化成形技术的发展现状及研究进展[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(19): 46-49.
- [6] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- [7] Zhang X J, Tang S Y, Zhao H Y, et al. Research status and key technologies of 3D printing [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(2): 122-128.
张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 122-128.
- [8] Yang C, Dong Z H, Chi C T, et al. Microstructure and mechanical properties of 24CrNiMo alloy steel formed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0502008.
杨晨, 董志宏, 迟长泰, 等. 选区激光熔化成形24CrNiMo合金钢的组织结构与力学性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0502008.
- [9] Zong X W, Gao Q, Zhou H Z, et al. Effects of bulk laser energy density on anisotropy of selective laser sintered 316L stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502003.
宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 体激光能量密度对选区激光熔化316L不锈钢各向异性的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502003.
- [10] Liu C Y, Tong J D, Jiang M G, et al. Effect of scanning strategy on microstructure and mechanical properties of selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 766: 138364.
- [11] Riemer A, Leuders S, Thöne M, et al. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 120: 15-25.
- [12] Li J S, Li H P, Lin H T. Crack investigation and analysis on the brake disc of high speed train [J]. *Railway Locomotive & CAR*, 2005, 25(6): 3-5.
李继山, 李和平, 林祐亭. 高速列车制动盘裂纹现状调查分析[J]. *铁道机车车辆*, 2005, 25(6): 3-5.
- [13] Montero-Sistiaga M L, Godino-Martinez M, Boschmans K, et al. Microstructure evolution of 316L produced by HP-SLM (high power selective laser melting) [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 402-410.
- [14] Qiao B. The principles of granular bainite [J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 1998, 7(2): 13-16.
乔斌. 粒状贝氏体的形成[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 1998, 7(2): 13-16.
- [15] Khairallah S A, Anderson A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2627-2636.
- [16] Wan H Y. Microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Inconel 718[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 43-46.
万宏远. 选区激光熔化成形 Inconel 718 合金组织结构与力学行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 43-46.
- [17] Zhang C C, Feng K, Kokawa H, et al. Cracking mechanism and mechanical properties of selective laser melted CoCrFeMnNi high entropy alloy using different scanning strategies [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 789: 139672.
- [18] Wang Q, Zhang Z H, Tong X, et al. Effects of process parameters on the microstructure and mechanical properties of 24CrNiMo steel fabricated by selective laser melting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106262.
- [19] Hu H, Zhou Y, Wen S F, et al. Selective laser melting of TiB₂-reinforced S136 die steels [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1202010.
胡辉, 周燕, 文世峰, 等. 激光选区熔化成形 TiB₂ 增强 S136 模具钢 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1202010.
- [20] Cen S B. Study on thermal fatigue performance and life prediction of cast steel brake disc of high speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016: 32-40.
岑升波. 高速列车铸钢制动盘热疲劳性能研究及寿命预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 32-40.
- [21] Li M S. Corrosion of metals at high temperatures [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 349.
李美栓. 金属的高温腐蚀[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 349.

Microstructures and Thermal Fatigue Performance of 24CrNiMo Alloy Steel Formed by Selective Laser Melting

Ren Lisha, Chen Hui^{*}, Chen Yong, Qian Jun, Yang Xiong

Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract

Objective The 24CrNiMo alloy steel has good strength and toughness matching, as well as thermal stability, making it a suitable material for manufacturing high-speed train brake discs. Traditional alloy steel brake disc manufacturing techniques have a complex manufacturing procedure and a long processing cycle, which cannot meet the increasingly complex design requirements. Selective laser melting allows for the free design and production of parts with complex structures, high forming precision and good surface quality, significantly shortening the product development and production cycle. The fabrication of the 24CrNiMo alloy steel using advanced selective laser melting technology has some research value. The process parameters of the selective laser melting technology are critical to the brake disc's performance. Scanning strategy is an important process parameter for selective laser melting (SLM) brake disc manufacturing. This study aims to analyse the effect of scanning strategy on the microstructure and thermal fatigue performance of SLM formed parts of 24CrNiMo alloy steel. During long-term service, high-temperature thermal fatigue will crack the brake disc. When the crack reaches a certain length, the brake disc will fail. It is necessary to investigate and evaluate the high-temperature performance of SLM formed parts made of 24CrNiMo alloy steel before they can be used in actual production.

Methods To analyse the microstructure and properties of SLM parts under different scanning strategies, EP-M250 selective laser melting equipment was used to fabricate 24CrNiMo alloy steel samples under four scanning strategies: 0° linear scanning, 45° rotating scanning, 90° rotating scanning, and 67° rotating scanning. The Archimedes drainage method was used to determine the density of samples under various scanning strategies. The optical microscope and scanning electron microscope were used to analyse the microstructure of the formed parts. For phase analysis of the formed parts using different scanning strategies, an X-ray diffractometer was used. The scanning strategy's effect on the microstructure of formed parts was investigated. A thermal fatigue test device was used to evaluate the thermal fatigue performance of the formed parts with different scanning strategies on a flat specimen with a V-shaped notch.

Results and Discussions The grain orientation distribution reflects the effect of the laser scanning strategy on the microstructure of SLM samples. The grain growth under the 0° linear scanning strategy has a strong orientation when compared to the rotating scanning strategy. The grains growing along each orientation intersect at the centre of the molten pool during solidification, and the microstructure boundary is formed at the centre of the molten pool [Fig. 7 (a) and (c)]. The rotation scanning strategy shifts the direction of heat dissipation between adjacent layers, disrupting grain epitaxial growth. The grain orientations are random, and the texture is poor [Fig. 7 (b) and (c)]. When the 0° linear scanning path is parallel to the direction of the thermal fatigue notch, the molten pool's centre has high microstructure heterogeneity and becomes a weak area, and the thermal fatigue specimen has a high crack growth rate. Under rotating scanning strategy, the grain orientation is random, and the formed part had no obvious microstructure boundary and molten pool weak zone, which hinders thermal fatigue crack growth. Under different cycles, the rotating scanning strategy sample has a lower thermal fatigue crack growth rate than the 0° linear scanning sample (Fig. 10).

Conclusions In this study, the 24CrNiMo alloy steel was fabricated by SLM technology. The effects of scanning strategy on microstructure, phase composition and thermal fatigue properties of the formed parts were studied. The change of scanning strategy changes the morphology of the molten pool. Under different scanning strategies, the microstructure of SLM formed part of 24CrNiMo alloy steel consists of granular bainite, martensite, and residual austenite. The phase compositions of the formed parts using various scanning strategies are alpha-Fe with a trace of gamma-Fe. The grains have a strong orientation when using the 0° linear scanning strategy. The rotation scanning

strategy has a crushing effect on the crystal grain's prolonged growth, and the orientation is weakened. When the laser scanning path is parallel to the notch direction of the thermal fatigue samples, the crack length increases fastest and finally reaches 1162 μm . The molten pool's centre has a high degree of microstructure heterogeneity, making it easy for the thermal fatigue crack to spread. Crack propagation is hampered by the random distribution of grain orientation in rotating scanning mode. Thermal fatigue crack propagation is caused by the combined action of thermal stress and high-temperature oxidation.

Key words laser technique; 24CrNiMo alloy steel; selective laser melting; scanning strategy; thermal fatigue performance

OCIS codes 140.3390; 160.3900