

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.4121

激光粉末床熔融镍基高温合金开裂行为研究

李鑫¹, 程向¹, 胡鹏飞¹, 刘壮壮^{1,2}

(1. 北京科技大学新材料技术研究院材料先进制备技术教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学新材料技术研究院现代交通金属材料与加工技术北京实验室, 北京 100083)

摘要: 增材制造专用镍基高温合金研发需要经历成分设计-制粉-打印-表征, 该过程周期长、成本高, 严重限制了增材制造用新型合金的快速研发和应用。针对这一问题, 本文提出以激光扫描合金块体材料评价其粉末材料打印性的思路, 避免成分设计过程多次制粉。以 4 种典型镍基高温合金(Inconel 718, Hastelloy X, CM247LC, Inconel 939)为研究对象, 采用激光扫描合金粉体和块体材料, 研究不同合金在激光扫描其粉体和块体过程中的开裂关联性。结果表明, 裂纹敏感性低的 Inconel 718 合金, 激光扫描粉体和块体试样中均未发现裂纹; 裂纹敏感性高的 CM247LC 和 Inconel 939 合金, 激光扫描粉体试样中存在由于凝固末期枝晶间液相补给不足, 在热收缩拉应力下形成的凝固裂纹和热循环过程残余应力导致的固态裂纹, 而激光扫描块体试样中仅存在凝固裂纹, 表明两种状态试样裂纹类型不同, 但开裂趋势一致; 裂纹敏感性介于上述合金之间的 Hastelloy X 合金, 激光扫描粉体试样可在一定工艺窗口范围内实现无裂纹, 而激光扫描块体试样时, 在本文采用的所有参数下均存在裂纹, 两种状态试样开裂趋势存在差异, 但均为凝固裂纹。

关键词: 镍基高温合金; 激光粉末床熔融; 铸造; 开裂行为

中图分类号: TG146.1+5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)08-0763-09

Study on the Cracking Behaviour of Nickel-based Superalloys via Laser Powder Bed Fusion

LI Xin¹, CHENG Xiang¹, HU Pengfei¹, LIU Zhuangzhuang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing (MOE), Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Laboratory of Metallic Materials and Processing for Modern Transportation, Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The research and development of nickel-based superalloys specifically for additive manufacturing involves a lengthy and costly process of composition design, powder production, printing, and characterization. This significantly hinders the rapid development and application of new alloys for additive manufacturing. To address this issue, this paper proposed evaluating the printability of alloy powders by laser scanning ingot materials, thereby avoiding multiple powder productions during the composition design process. Focusing on four typical nickel-based superalloys (Inconel 718, Hastelloy X, CM247LC, and Inconel 939), the correlation of cracking in both alloy powders and ingot materials during laser scanning was investigated. The results indicate that for the low crack sensitivity Inconel 718 alloy, no cracks are observed in either the laser-scanned powder or the ingot samples. In contrast, the high crack sensitivity alloys CM247LC and Inconel 939 exhibit solidification cracks in the laser-scanned powder samples due to insufficient interdendritic liquid phase feeding at the end of solidification under thermal contraction tensile stress and solid-state cracks due to residual stress during thermal cycling. However, only solidification cracks are found in the laser-scanned ingot samples, indicating that the types of cracks differ between the two states, but the cracking trends are consistent. For the Hastelloy X alloy, which has intermediate crack sensitivity, crack-free laser-scanned powder samples can be obtained within a certain process window, whereas all the parameters used for the laser-scanned ingot samples result in cracks, showing differences in cracking trends between the two states but with both exhibiting solidification cracks. These findings suggest that analysing the cracking

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4600302); 国家自然科学基金(No.52104368)

作者简介: 李鑫, 2000年生, 硕士生。研究方向为镍基高温合金激光增材制造。Email: m202311380@xs.ustb.edu.cn

通讯作者: 刘壮壮, 1987年生, 教授。研究方向为高性能金属材料激光增材制造。Email: liuzhuangzhuang@ustb.edu.cn

引用格式: 李鑫, 程向, 胡鹏飞, 刘壮壮. 激光粉末床熔融镍基高温合金开裂行为研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(8): 763-771.

LI X, CHENG X, HU P F, LIU Z Z. Study on the cracking behaviour of nickel-based superalloys via laser powder bed fusion[J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 763-771.

behavior of laser-scanned ingot alloy materials provides a reference for understanding the cracking behavior of the corresponding alloy powders during laser powder bed fusion (L-PBF) formation.

Key words: nickel-based superalloy; laser powder bed fusion; casting; cracking behaviour

镍基高温合金在 600 °C 以上具有高强度、抗蠕变、抗疲劳及抗氧化腐蚀的优异综合性能,是航空发动机和燃气轮机高温结构部件的关键材料^[1-3]。传统的加工工艺如铸造、锻造、粉末冶金等,在制备复杂结构部件时存在制造难度大、构件质量不高和产品合格率低等诸多挑战^[4]。增材制造(additive manufacturing, AM)是一种新兴技术,通过将三维模型转为二维切片逐层成形,可实现复杂形状结构件一体化制造^[5-6],具有生产周期短、材料利用率高、数字化、自动化、个性化等优势,被认为是一种“变革性”的设计、制造一体化的技术^[7]。其中,激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, L-PBF)技术具有高精度、高质量、高致密度等优势,是金属增材制造领域最具代表性、应用最为广泛的技术之一^[8-11],能够满足航空发动机和燃气轮机热端核心部件的复杂形状和高精度的技术要求。然而,L-PBF 技术高的冷却速率以及快冷快热的热循环模式使得成形过程中熔池内部温度梯度大,成形构件残余应力高,容易产生裂纹和孔隙等缺陷^[12]。仅有少数中低温服役温度的镍基高温合金能够在 L-PBF 成形过程中不发生开裂,如 Inconel 718、Inconel 625 和 Hastelloy X,而更高服役温度下的镍基高温合金如 CM247LC 和 Inconel 939 在 L-PBF 成形过程中存在严重的开裂问题,难以满足航空发动机和燃气轮机中热端部件苛刻服役行为的要求,亟需开发适用于增材制造的无裂纹镍基高温合金。目前,增材制造用镍基高温合金的研发主要采用传统的试错法^[13-14],从合金设计、粉体制备到 L-PBF 成形性验证,整个研发过程周期长、粉体利用率低、成本高,严重限制了增材制造镍基高温合金部件的快速研发和应用。

针对上述问题,本文选取了 L-PBF 成形过程中开裂行为不同的 4 种典型镍基高温合金(Inconel 718^[15]、Hastelloy X^[12]、CM247LC^[16]、Inconel 939^[17])为研究对象,采用激光扫描合金粉体和块体试样,研究各种合金的粉体和块体试样在激光扫描成形过

程中裂纹形成机理及其关联性,探索通过激光扫描块体材料研究该合金粉体材料在 L-PBF 成形过程开裂行为的可行性,从而降低增材制造高温合金的研发成本与周期。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验采用的 CM247LC、Inconel 939 和 Inconel 718 氩气物化球形粉末由中航迈特粉冶科技有限公司提供,Hastelloy X 氩气物化球形粉末由赫格纳斯股份有限公司(瑞典)提供。化学成分通过电感耦合等离子体光学发射光谱法(ICP-OES)和燃烧分析法(用于碳)进行测量,具体化学成分见表 1。

1.2 试样制备

采用激光粉末床熔融设备 BLT-A300 制备尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的粉体试样。使用 XJH-15KW-B 分体式高频感应加热设备熔炼合金粉末,浇铸得到块体试样,经机加工切割、磨削后使用 BLT-A300 设备对块体试样进行激光扫描得到激光扫描块体试样。激光扫描粉体试样和激光扫描块体试样如图 1 所示,工艺参数如表 2 所示。

L-PBF 成形过程参数设置主要包括激光功率、扫描速率、扫描间距和铺粉层厚,激光扫描块体试样不考虑层厚影响。体能量密度 E ^[18]通常用来表示单位时间内作用于特定体积粉末上的激光能量可由上述参数计算得出:

$$E = \frac{P}{VHT} \quad (1)$$

式中, E 为体能量密度, J/m^3 ; P 为激光功率, W ; V 为扫描速率, mm/s ; H 为扫描间距, mm ; T 为铺粉层厚, mm 。

1.3 组织分析

采用电火花切割将试样沿图 1 中的红色虚线切开,经机械打磨、机械抛光、化学腐蚀后使用 Axio Imager A2m 光学显微镜和 GeminiSEM 500 热场发

表1 合金粉末化学成分
Tab.1 Chemical compositions of the alloy powders used in this study

	Ni	Co	W	Ta	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	Hf	C	B	Zr
CM247LC	Bal.	9.33	9.74	3.22	8.25	5.56	0.75	0.51	-	-	1.34	0.052	0.018 0	0.005 2
Inconel 939	Bal.	19.28	2.21	1.54	21.94	1.98	4.00	0.08	1.12	-	-	0.150	0.006 8	0.10 00
Inconel 718	Bal.	0.05	-	-	19.28	0.50	0.98	2.97	5.43	19.30	-	0.030	0.004 0	-
Hastelloy X	Bal.	1.50	0.60	-	21.70	0.06	0.10	8.90	-	17.90	-	0.060	0.002 0	-

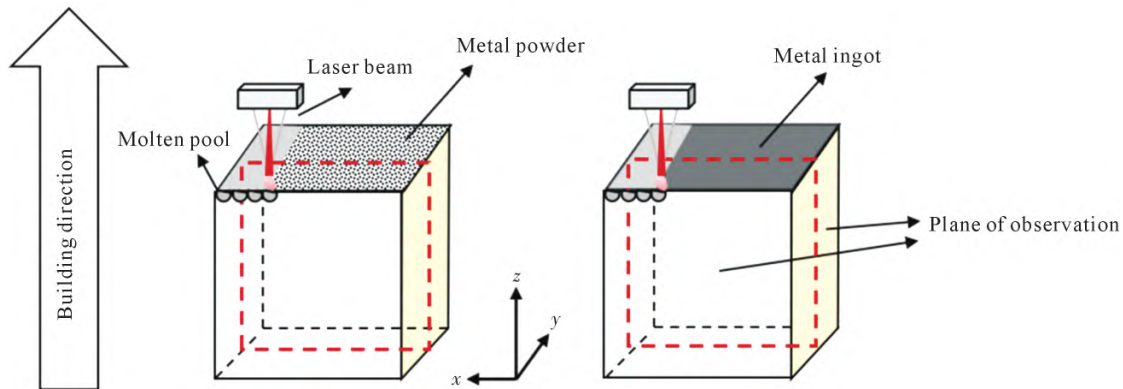


图1 激光扫描粉体试样和激光扫描块体试样结构示意图

Fig.1 Schematic structure of the laser scanning powder sample and laser scanning ingot sample

表2 激光扫描工艺参数

Tab.2 Processing parameters during L-PBF in this study

Material	Sample number	Laser power, <i>P</i> /W	Scanning speed, <i>V</i> /(mm·s ⁻¹)	Hatch spacing, <i>H</i> /mm	Layer thickness, <i>T</i> /mm	Energy density, <i>E</i> /(J·m ⁻³)
Inconel 718	1	275	960	0.10	0.04	71.6
	2	215	960	0.10	0.04	56.0
	3	155	960	0.10	0.04	40.4
Hastelloy X	1	300	900	0.09	0.04	92.6
	2	300	1 000	0.09	0.04	83.3
	3	280	900	0.09	0.04	86.4
	4	280	1 000	0.09	0.04	77.8
CM247LC	1	150	750	0.06	0.03	111.1
	2	150	1 000	0.06	0.03	83.3
	3	150	750	0.08	0.03	83.3
	4	150	1000	0.08	0.03	62.5
Inconel 939	1	250	750	0.10	0.04	83.3
	2	250	1 050	0.10	0.04	59.5
	3	300	750	0.10	0.04	100.0
	4	300	1 050	0.10	0.04	71.4

射扫描电子显微镜对激光扫描粉体和块体试样的微观组织和裂纹进行表征。其中 CM247LC 和 Inconel 939 所用的腐蚀剂为 0.3 g MoO₃+10 mL HNO₃+10 mL HCl+15 mL H₂O, Inconel 718 和 Hastelloy X 所用的腐蚀剂为 40 mL HCl+40 mL C₂H₆O+2 g CuCl₂。

2 实验结果及讨论

Inconel 718 合金是沉淀强化镍基高温合金,主要强化相为 γ' -Ni₃Nb 和 γ' -Ni₃(Al, Ti)相,其 Nb 含量较高,Al、Ti 含量较低, γ' 相起主导作用,裂纹敏感性低,可焊性较好^[9]。腐蚀后在光镜下观察激光扫描粉体和激光扫描块体 Inconel 718 合金试样的开裂情况,结果如图 2 所示。图 2a 和 d、b 和 e、c 和 f 所示样品打印参数分别对应表 2 中 Inconel 718 合金的 1~3 号参数,两种试样均未发现裂纹。激光扫描粉体试样中存在一些未熔合孔隙,能量密度较高时金属粉末熔融充分,孔隙率较低;能量密度较低时金属粉末熔融不充分,熔体流动性变差,孔隙率

升高。图 3 为高倍扫描电镜下的微观组织形貌,激光扫描粉体试样熔池内部为典型的柱状晶组织。如图 3a 所示,大多数枝晶呈外延生长而跨越多个熔池,放大后可观察到晶间存在不规则分布的白色析出相颗粒。Zhang 等^[20]研究表明,这些白色析出相颗粒为 Laves 相。激光扫描块体试样表面发生了重熔,微观组织显著改变。如图 3b 所示,橘黄色虚线为熔池底部,重熔部分表现出与激光扫描方向垂直的“鱼鳞状”熔池形貌,与基体相比重熔部分仅能观察到块状析出相,表明在重熔过程中析出相形貌和类型发生了改变。为了进一步判断基体析出相的类型,从图 3b 中选取一块区域进行 EDS 分析,结果如图 4 所示。初步判断析出相由块状碳化物和富含 Nb、Mo、Ti 元素的 Laves 相组成。

Hastelloy X 合金是固溶强化镍基高温合金,主要依靠 W、Mo 等元素进行强化,属于可焊合金^[21]。但相较于 Inconel 718, Hastelloy X 在 L-PBF 成形过程中的开裂敏感性提高,无裂纹加工工艺窗口较窄。

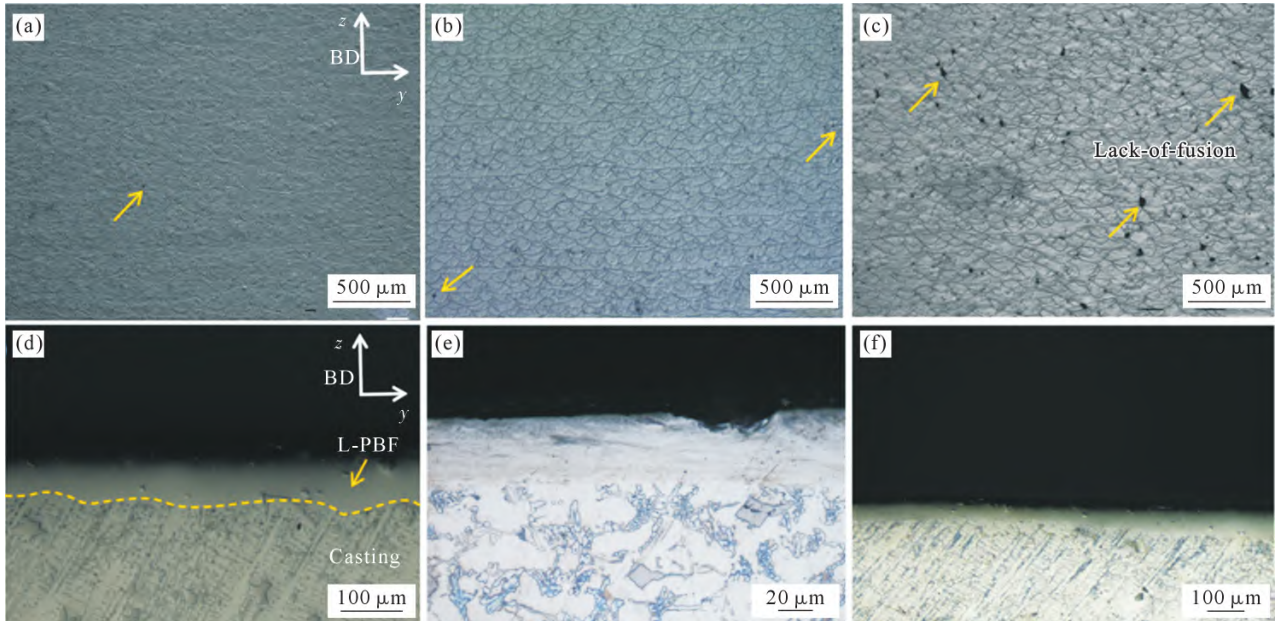


图 2 Inconel 718 合金试样 OM 图:(a~c) 激光扫描粉末试样(yz 面);(d~f) 激光扫描块体试样(yz 面)
 Fig.2 OM images of the Inconel 718 sample: (a~c) laser scanning powder sample (yz plane); (d~f) laser scanning ingot sample (yz plane)

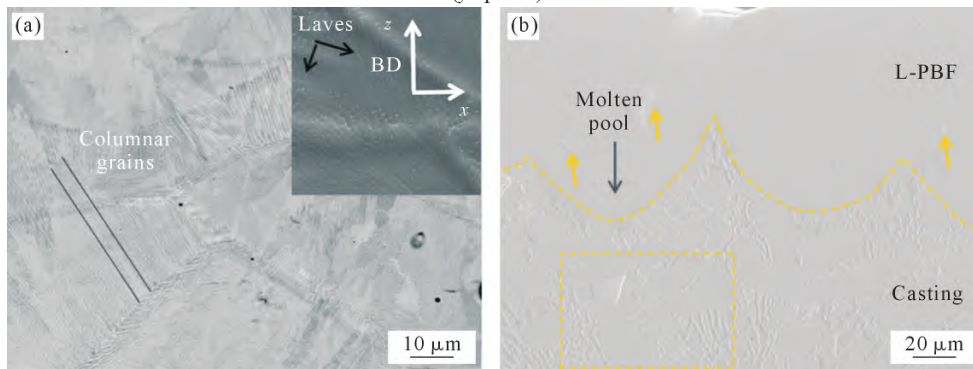


图 3 Inconel 718 合金试样 SEM 图:(a) 激光扫描粉末试样(xz 面);(b) 激光扫描块体试样(xz 面)
 Fig.3 SEM images of the Inconel 718 sample: (a) laser scanning powder sample (xz plane); (b) laser scanning ingot sample (xz plane)

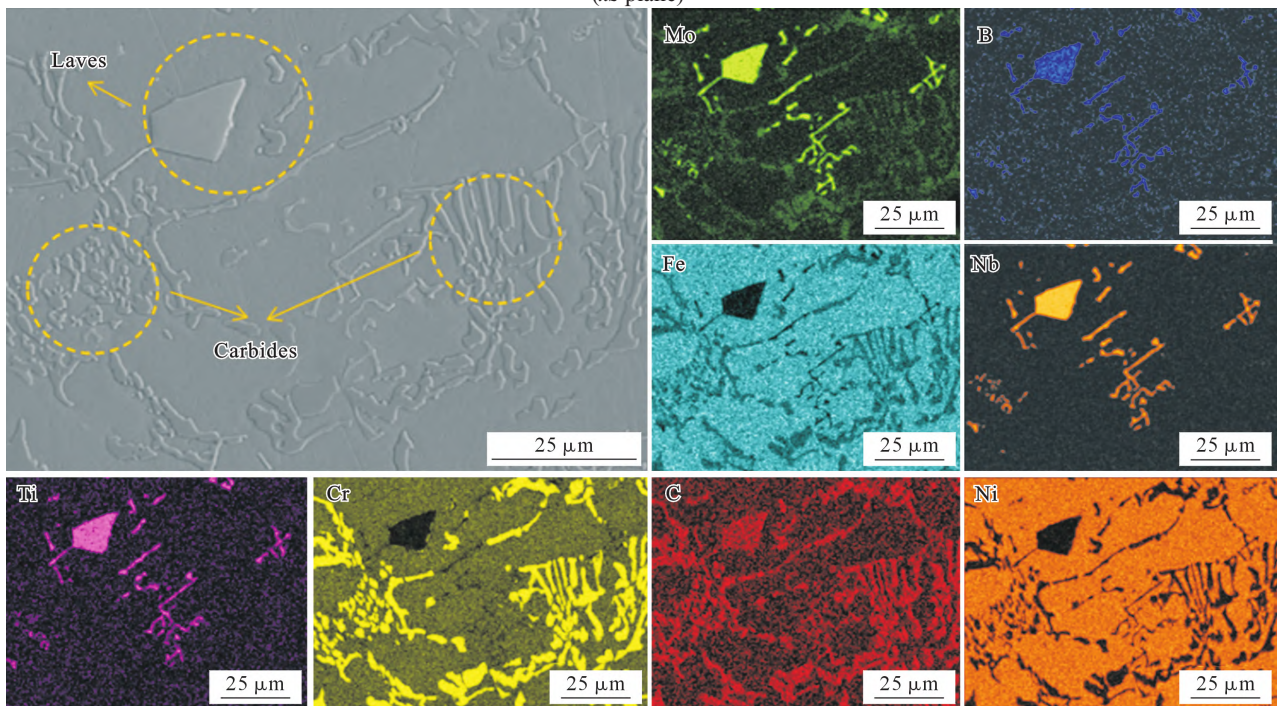


图 4 激光扫描块体 Inconel 718 合金试样 EDS 图
 Fig.4 EDS diagrams of the laser-scanned ingot of Inconel 718

Hastelloy X 合金试样的微观形貌如图 5 所示,其中 a 和 e、b 和 f、c 和 g、d 和 h 样品的打印参数分别对应表 2 中 Hastelloy X 合金的 1~4 号参数。图 5a~d 是抛光后激光扫描粉末体试样的 OM 图像,可以发现仅在 4 号参数下存在裂纹,这表明通过优化工艺参数,Hastelloy X 合金的激光扫描粉末体试样可以实现无裂纹成形。图 5e~h 是腐蚀后块体试样的 OM 图像,4 种工艺参数下激光扫描块体试样均产生了裂纹。使用高倍扫描电镜对裂纹进行表征,结果如图 6 所示。在二次电子信号下,激光扫描粉末体试样中可以观察到明显的胞状和树枝状结构,裂纹内部存在完整的枝晶臂结构。激光扫描块体试样中,裂纹断面光滑平直,一端与试样顶部相连,另一端延伸至基体并在末端发生分裂。从裂纹的形貌来看,两种试样中的裂纹均为凝固末期收缩变形引起的残余拉应力撕裂枝晶间液体而形成的凝固裂纹^[22-23]。除了尺寸较大的凝固裂纹外,在基体内部还能观察到一些由于铸造缺陷引起的微裂纹。

CM247LC、Inconel 939 主要由 γ' -Ni₃(Al, Ti) 强化,其 Al+Ti 含量高、元素种类多、可焊性差,属

于难焊合金^[24]。L-PBF 成形过程中,高的冷却速率($10^4\sim 10^6$ K/s)及循环受热和冷却诱发的残余拉应力,往往会加剧成形过程中 CM247LC 和 Inconel 939 裂纹的产生^[17]。

CM247LC 合金试样的微观形貌如图 7 所示,其中 a 和 e、b 和 f、c 和 g、d 和 h 样品的打印参数分别对应表 2 中 CM247LC 合金的 1~4 号参数。从图 7 中可以看到激光扫描粉末体和激光扫描块体试样在不同参数下均产生了裂纹。使用高倍扫描电镜对试样中的裂纹进行表征,如图 8a 和 b 所示,激光扫描粉末体试样中存在由于凝固末期枝晶间液相补给不足,在热收缩拉应力下形成的凝固裂纹和热循环过程残余应力导致的固态裂纹^[25-26],凝固裂纹沿晶界扩展,裂纹一侧呈现完整的枝晶臂特征,固态裂纹形貌平直、断口光滑,且沿晶界发生偏转。激光扫描块体试样中存在两种形貌的裂纹(图 8d),裂纹一端与熔池顶部相连,另一端延伸到熔池之中,中间部分断口形貌平直,两端发生偏转,偏转部分断口间距变小。图 8c 所示裂纹一端与试样顶部相连,另一端与熔池和基体边界相接,断口光滑,间距较大,扩展过程中

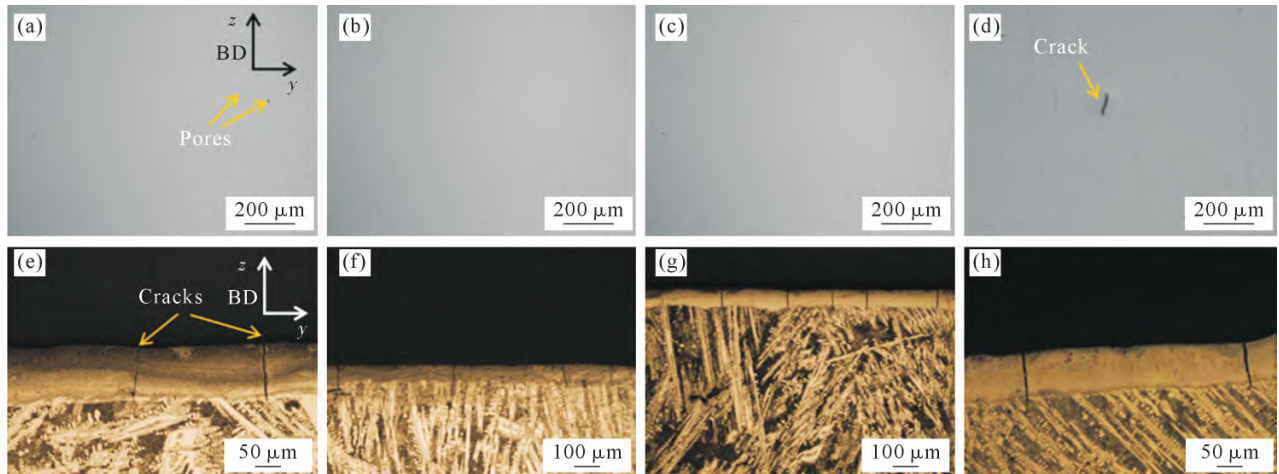


图 5 Hastelloy X 合金试样 OM 图:(a~d) 激光扫描粉末体试样(yz 面);(e~h) 激光扫描块体试样(yz 面)
Fig.5 OM images of the Hastelloy X sample: (a~d) laser scanning powder sample (yz plane); (e~h) laser scanning ingot sample (yz plane)

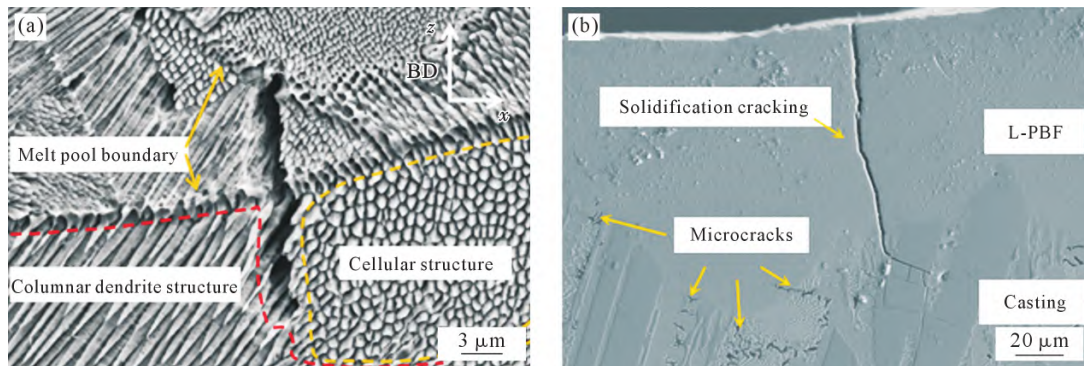


图 6 Hastelloy X 合金试样 SEM 图:(a) 激光扫描粉末体试样(xz 面);(b) 激光扫描块体试样(xz 面)
Fig.6 SEM images of the Hastelloy X sample: (a) laser scanning powder sample (xz plane); (b) laser scanning ingot sample (xz plane)

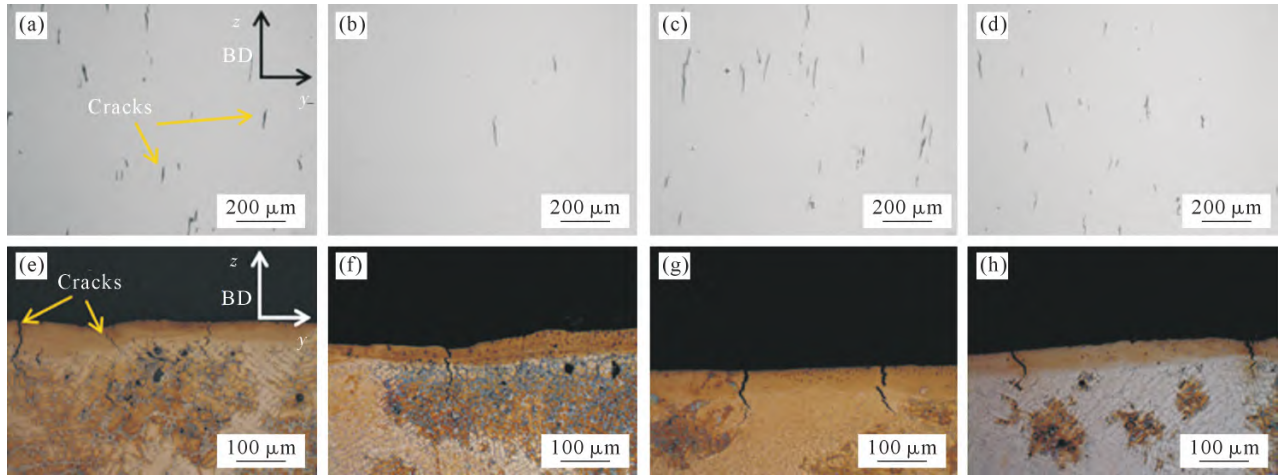


图 7 CM247LC 合金试样 OM 图:(a~d) 激光扫描粉末试样(yz 面);(e~h) 激光扫描块体试样(yz 面)
Fig.7 OM images of the CM247LC sample: (a~d) laser scanning powder sample (yz plane); (e~h) laser scanning ingot sample (yz plane)

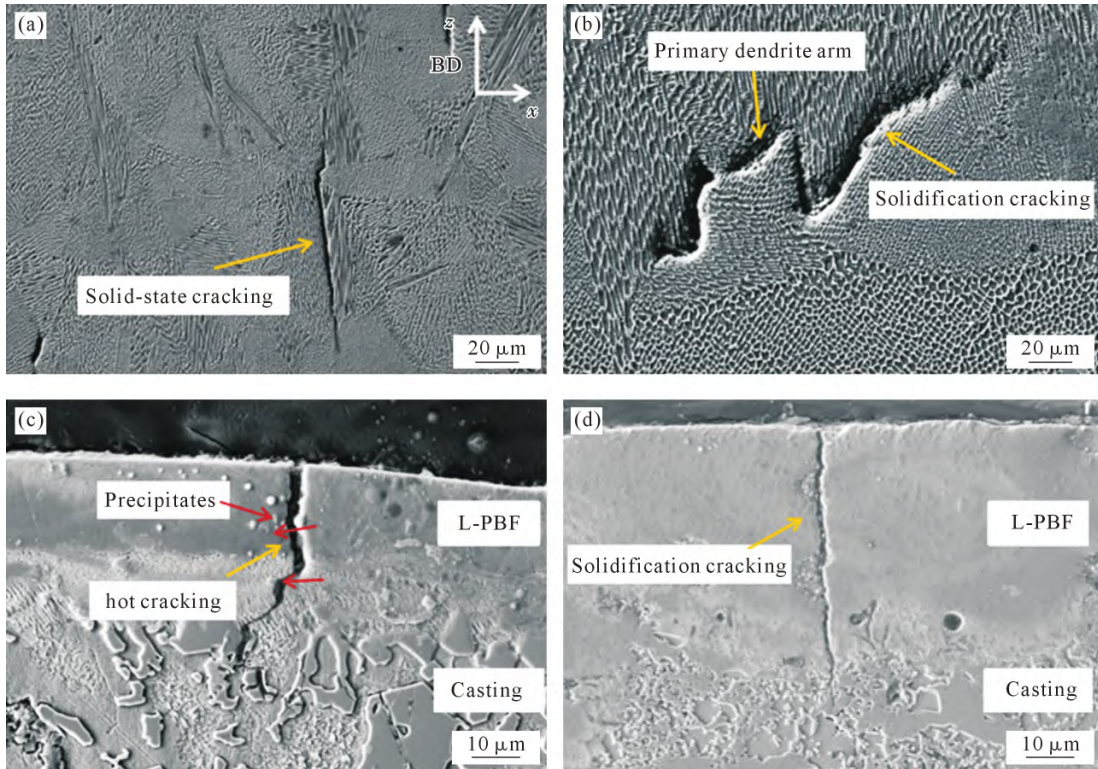


图 8 CM247LC 合金试样 SEM 图:(a, b) 激光扫描粉末试样(xz 面);(c, d) 激光扫描块体试样(xz 面)
Fig.8 SEM images of the CM247LC sample: (a, b) laser scanning powder sample (xz plane); (c, d) laser scanning ingot sample (xz plane)

沿未熔碳化物发生多次偏转。由此可见,激光扫描块体试样中裂纹均由熔池中心形成,沿晶界多次偏转,符合焊接热裂纹中凝固裂纹的形成机制。

Inconel 939 合金试样的微观形貌如图 9 所示,其中 a 和 e、b 和 f、c 和 g、d 和 h 样品的打印参数分别对应表 2 中 Inconel 939 合金的 1~4 号参数。在光镜下两种试样不同参数都存在严重的裂纹和未熔合孔隙。使用高倍扫描电镜对试样中的裂纹进行表征,激光扫描粉末试样,图 10a 中裂纹形貌平直且沿晶界发生偏转为固态裂纹。图 10b 中裂纹沿晶界扩展,一侧表面呈现完整的枝晶臂为凝固裂纹。激光

扫描块体试样中,如图 10c 所示,裂纹沿着与熔池顶部垂直的方向发展,并深入到基体中。熔池内部裂纹断面间距大,深入基体后裂纹发生多次偏转,偏转部分裂纹断面间距小且表面光滑,两侧可以观察到一些块状的析出相。图 10d 显示,裂纹从熔池中心沿温度梯度方向扩展至熔池底部。为进一步探究激光扫描块体试样内的元素分布情况和析出相的类型,对图 10c 进行了 EDS 分析。结果如图 11 所示,块状析出相上富集了 W、Mo 等碳化物形成元素。由于是凝固过程中形成的碳化物,故通过分析可知其为 MC 碳化物,同时在裂纹内部和试样基体

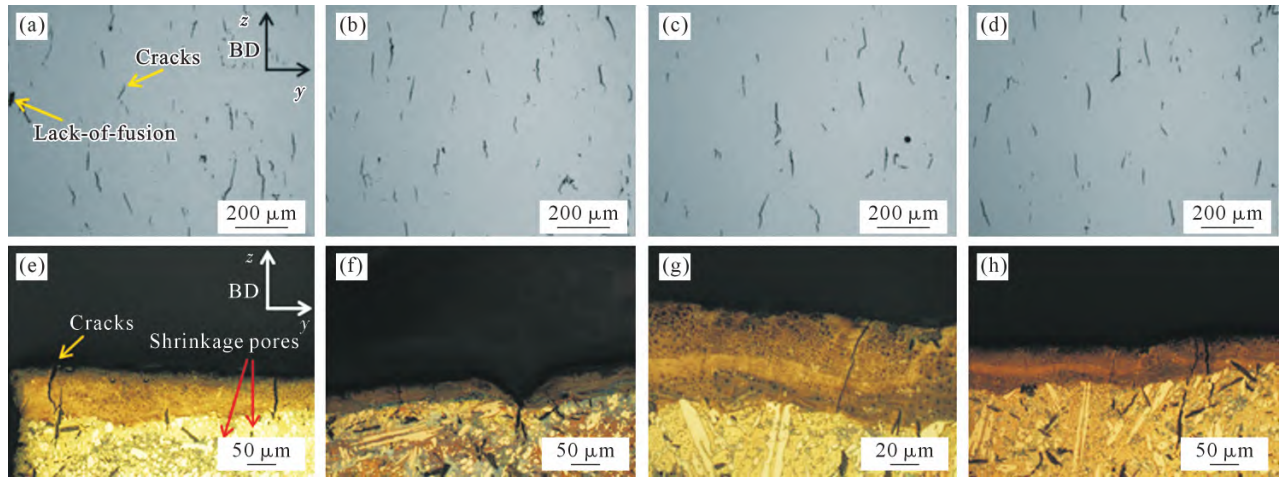


图 9 Inconel 939 合金试样 OM 图:(a~d) 激光扫描粉末试样(yz 面);(e~h) 激光扫描块体试样(yz 面)
Fig.9 OM images of the Inconel 939 sample: (a~d) laser scanning powder sample (yz plane); (e~h) laser scanning ingot sample (yz plane)

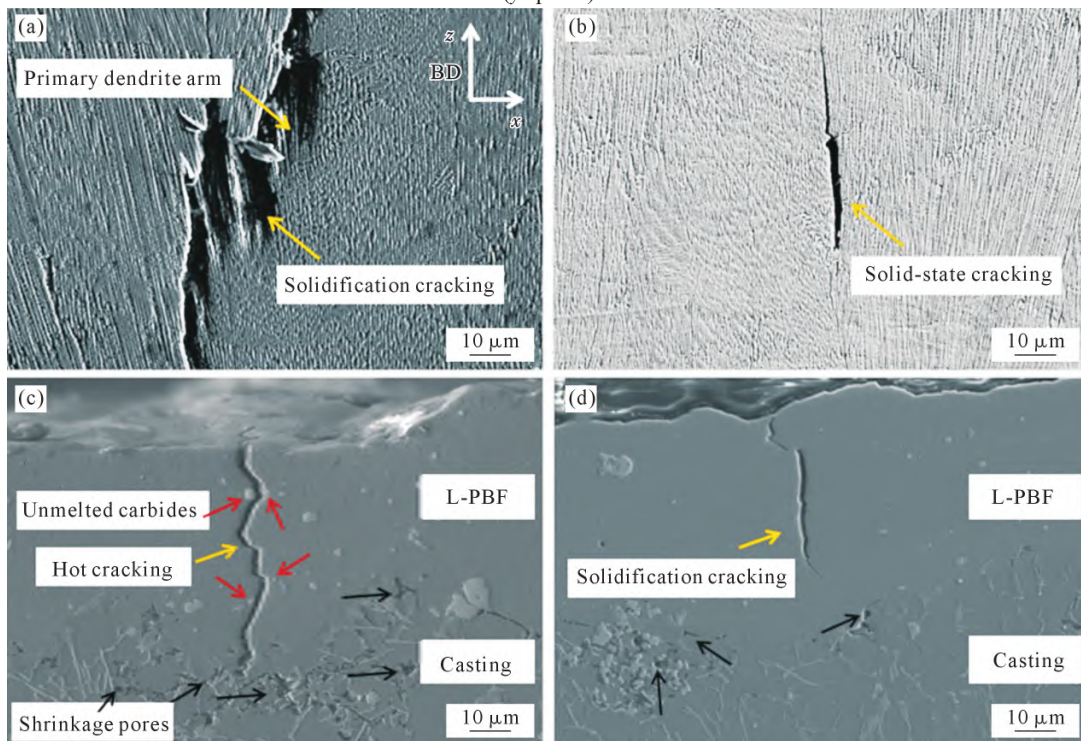


图 10 Inconel 939 合金试样的 SEM 图:(a, b) 激光扫描粉末试样(xz 面);(c, d) 激光扫描块体试样(xz 面)
Fig.10 SEM images of the Inconel 939 sample: (a, b) laser scanning powder sample (xz plane); (c, d) laser scanning ingot sample (xz plane)

中可以发现 C、Cr、W、Mo 等元素的富集。这表明在激光扫描块体试样的过程中，碳化物的熔化造成了局部的元素富集区(如图 11 中裂纹附近富集 C 元素)，凝固末期液相线温度降低，液相稳定性提高，进一步加剧了凝固裂纹的形成。

3 结论

(1)L-PBF 成形过程中，裂纹敏感性低的镍基高温合金，如 Inconel 718，其粉体和块体材料均无裂纹产生，开裂趋势一致。

(2)裂纹敏感性高的镍基高温合金，如CM247LC 和 Inconel 939，其粉体和块体材料均存在裂纹，裂纹

类型及形貌不同，但开裂趋势一致。

(3)裂纹敏感性介于两者之间的合金，如 Hastelloy X，其粉体材料在一定工艺窗口下可实现无裂纹成形，而块体材料在文中采用的所有参数下均存在裂纹，开裂趋势存在差异，但裂纹类型均为凝固裂纹。

参考文献:

[1] ZHANG Z B, YANG Z B, LU S, HARTE A, MORANA R, PREUSS M. Strain localisation and failure at twin-boundary complexions in nickel-based superalloys[J]. Nature Communications, 2020, 11: 4890.
[2] WU X X, MAKINENI S K, LIEBSCHER C H, DEHM G, MIAN-

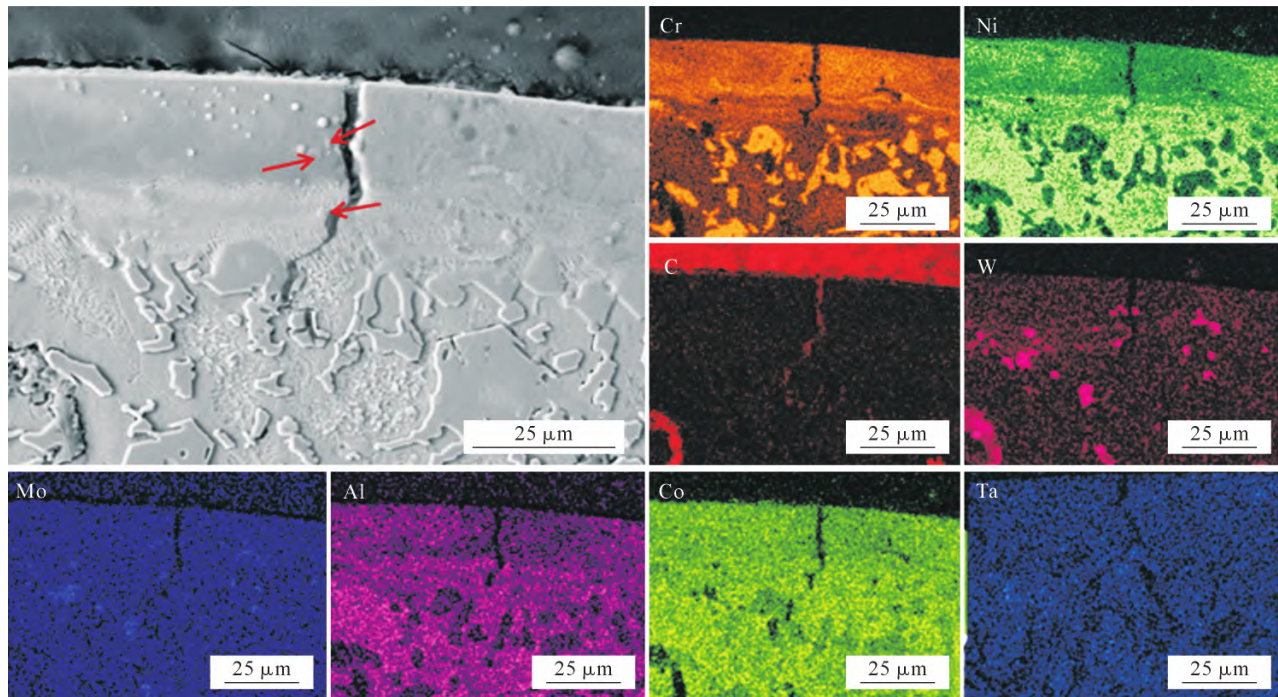


图 11 激光扫描块体 Inconel 939 合金试样 EDS 图
Fig.11 EDS diagrams of the laser-scanned ingot of Inconel 939

- ROODI J R, SHANTHRAJ P, SVENDSEN B, BÜRGER D, EGGELER G, RAABE D, GAULT B. Unveiling the Re effect in Ni-based single crystal superalloys [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 389.
- [3] 唐中杰, 郭铁明, 付迎, 惠枝, 韩昌松. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. *金属世界*, 2014(1): 36-40.
TANG Z J, GUO T M, FU Y, HUI Z, HAN C S. Research present situation and the development prospect of nickel-based superalloy [J]. *Metal World*, 2014(1): 36-40.
- [4] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, NGUYEN K T Q, HUI D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [5] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, EMMELMANN C. Additive manufacturing of metals[J]. *Acta Materialia*, 2016, 117: 371-392.
- [6] GU D D, MEINERS W, WISSENBACH K, POPRAWA R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. *International Materials Reviews*, 2012, 57(3): 133-164.
- [7] LI D C, HE J K, TIAN X Y, LIU Y X, ZHANG A F, LIAN Q, JIN Z M, LU B H. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
- [8] LIU Q, WU H K, PAUL M J, HE P D, PENG Z X, GLUDOVATZ B, KRUZIC J J, WANG C H, LI X P. Machine-learning assisted laser powder bed fusion process optimization for AlSi10Mg: New microstructure description indices and fracture mechanisms[J]. *Acta Materialia*, 2020, 201: 316-328.
- [9] 吴楷, 张敬霖, 吴滨, 谭敏, 冯海波, 张建福. 激光增材制造镍基高温合金研究进展[J]. *钢铁研究学报*, 2017, 29(12): 953-959.
WU K, ZHANG J L, WU B, TAN M, FENG H B, ZHANG J F. Research and development of Ni-based superalloy fabricated by laser additive manufacturing technology [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017, 29(12): 953-959.
- [10] 高亚龙, 赵义瀚, 王晓明, 李岩, 朱秋菊, 张贺新, 赵成志. 镍基高温合金用于燃气轮机燃烧室概述与进展[J]. *铸造工程*, 2023, 47(4): 27-33.
GAO Y L, ZHAO Y H, WANG X M, LI Y, ZHU Q J, ZHANG H X, ZHAO C Z. Progress and overview of Ni-base superalloy used in combustor of gas turbine[J]. *Foundry Engineering*, 2023, 47(4): 27-33.
- [11] 吴宇, 陈冰清, 刘伟, 黄帅, 孙兵兵, 张学军, 陈沛, 黄辰. 增材制造镍基高温合金在航空发动机与燃气轮机中的研究应用进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(1): 31-45.
WU Y, CHEN B Q, LIU W, HUANG S, SUN B B, ZHANG X J, CHEN P, HUANG C. Progress in research and applications of additively manufactured nickel-based superalloy in aero-engines and gas turbines[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(1): 31-45.
- [12] GUO B J, ZHANG Y S, YANG Z S, CUI D C, HE F, LI J J, WANG Z J, LIN X, WANG J C. Cracking mechanism of Hastelloy X superalloy during directed energy deposition additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102792.
- [13] XU J H, GRUBER H, PENG R L, MOVERARE J. A novel γ' -strengthened nickel-based superalloy for laser powder bed fusion [J]. *Materials*, 2020, 13(21): 4930.
- [14] ZHAO Y N, MA Z Q, YU L M, LIU Y C. New alloy design approach to inhibiting hot cracking in laser additive manufactured nickel-based superalloys[J]. *Acta Materialia*, 2023, 247: 118736.
- [15] KIM S, CHOI H, LEE J, KIM S. Room and elevated temperature fatigue crack propagation behavior of Inconel 718 alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 140: 105802.
- [16] HU P F, LIU Z Z, CHEN M M, LI Y H, QI X H, XIE J X. Reducing

- cracking sensitivity of CM247LC processed via laser powder bed fusion through composition modification[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 3074-3088.
- [17] ZHANG B, DING H, MENG A C, NEMATI S, GUO S M, MENG W J. Crack reduction in Inconel 939 with Si addition processed by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 72: 103623.
- [18] LU Z, ZHANG C C, DENG N N, ZHOU H P, FANG R R, GAO K D, SU Y K, ZHANG H B. Influence of selective laser melting process parameters on microstructure and properties of a typical Ni-based superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35: 1673-1687.
- [19] LU Y J, WU S Q, GAN Y L, HUANG T T, YANG C G, LIN J J, LIN J X. Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75: 197-206.
- [20] ZHANG D Y, NIU W, CAO X Y, LIU Z. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 644: 32-40.
- [21] ZHANG M H, ZHANG B C, WEN Y J, QU X H. Research progress on selective laser melting processing for nickel-based superalloy[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29: 369-388.
- [22] HAN Q Q, GU Y C, SOE S, LACAN F, SETCHI R. Effect of hot cracking on the mechanical properties of Hastelloy X superalloy fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105984.
- [23] KITANO H, TSUJII M, KUSANO M, YUMOTO A, WATANABE M. Effect of plastic strain on the solidification cracking of hastelloy-X in the selective laser melting process[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101742.
- [24] 祝国梁, 罗桦, 贺戩, 田雨生, 卫东雨, 谭庆彪, 孔德成. 镍基高温合金增材制造研究进展[J]. *材料工程*, 2024, 52(2): 1-15.
- ZHU G L, LUO H, HE J, TIAN Y S, WEI D Y, TAN Q B, KONG D C. Advances in additive manufacturing of nickel-based high-temperature alloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(2): 1-15.
- [25] ZHANG X, MU Y H, LU N N, LI Q, CHEN S F, ZHOU Y Z, SUN X F, LIANG J J, LI J G. Effect of solid solution elements on cracking susceptibility of Ni-based superalloys during additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 190: 218-228.
- [26] VISIBILE A, GUNDUZ K O, SATTARI M, FEDOROVA I, HALVARSSON M, FROITZHEIM J. High temperature oxidation of Inconel 939 produced by additive manufacturing[J]. *Corrosion Science*, 2024, 233: 112067.