DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6059

粉末床激光熔融成形新型热作模具钢的致密化行为及其组织性能研究

唐源辰[1,2],武恩震[1,2],陆　磊[1],文　翰[1],骆　伟[2],谢信亮[1,2],吴嘉豪[3],崔　然[3]

(1. 南京工业大学 先进轻质高性能材料研究中心,江苏 南京 211816;2. 长三角先进材料研究院,江苏 苏州 215133;3. 清华大学 材料学院,北京 100084)

摘　要:针对传统热作模具钢在粉末床激光熔融(laser powder bed fusion, LPBF)成形过程中易开裂、强韧性不足等问题,将 H13∶316 L 不锈钢粉末按质量比为 6∶1 进行混粉,以实现原位合金化设计,适当降低 C 含量,同时提高 Ni 与 Cr 含量,成功制备了一种打印不开裂的新型热作模具钢。系统研究了激光工艺参数对其致密化行为的影响,并采用 OM、SEM、EBSD 和 XRD 分析了打印态、淬火加双重回火态(QT2)及直接双重回火态(DT2)的组织演化与力学性能。结果表明,当体能量密度大于 60 J/mm^3 时,试样致密度可达 99.5%以上;打印态、QT2 和 DT2 试样中残余奥氏体含量分别为 11.4%、3.6%和 2.6%。DT2 试样获得最佳综合力学性能,其屈服强度、抗拉强度、显微硬度和冲击功分别达到 1 866 MPa、1 974 MPa、632 $HV_{0.1}$ 和 17.8 J。研究表明,直接双重回火可在保留打印态细小马氏体和碳化物组织,获得较高的强度和冲击韧性。

关键词:粉末床激光熔融;热作模具钢;热处理;残余奥氏体;显微组织;力学性能

中图分类号:TG142.7; TG665　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)10-1118-11

Study on the Densification Behavior, Microstructure, and Mechanical Properties of Novel Hot-work Tool Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion

TANG Yuanchen[1,2], WU Enzhen[1,2], LU Lei[1], WEN Han[1], LUO Wei[2],
XIE Xinliang[1,2], WU Jiahao[3], CUI Ran[3]

(1. Key Laboratory for Light-weight Materials, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Materials Academy, JITRI, Suzhou 215133, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To address the severe cracking tendency and inadequate strength-toughness balance of conventional hot-work tool steels fabricated by laser powder bed fusion (LPBF), H13 and 316 L stainless steel powders were blended at a mass ratio of 6∶1 to achieve an in situ alloying design, reducing the C content while increasing the Ni and Cr contents. A novel crack-free hot-work tool steel for LPBF was successfully developed. The effects of laser processing parameters on densification were systematically investigated, and the microstructural evolution and mechanical properties of the as-built, quenched-and-double-tempered (QT2), and directly double-tempered (DT2) samples were characterized by OM, SEM, EBSD, and XRD. The results show that when the volumetric energy density exceeds 60 J/mm^3, the relative density exceeds 99.5%. The retained austenite contents of the as-built, QT2, and DT2 samples are 11.4%, 3.6%, and 2.6%, respectively. The DT2 sample exhibits the best overall mechanical performance, with a yield strength of 1 866 MPa, an ultimate tensile strength of 1 974 MPa, a microhardness of 632 $HV_{0.1}$, and an impact energy of 17.8 J. Direct double tempering preserves the fine martensitic and carbide microstructures of the as-built state, thereby achieving high strength and impact toughness.

Key words: laser powder bed fusion; hot-work tool steel; heat treatment; retained austenite; microstructure; mechanical properties

收稿日期:2026-04-02

基金项目:国家重点研发计划(2024YFB3713303)

作者简介:唐源辰,2000 年生,硕士生.研究方向为金属增材制造.Email: 202461203240@njtech.edu.cn

通信作者:谢信亮,1990 年生,博士,副教授.研究方向为金属增材制造基础及应用技术.Email: xinliang.xie@njtech.edu.cn

引用格式:唐源辰,武恩震,陆磊,文翰,骆伟,谢信亮,吴嘉豪,崔然.粉末床激光熔融成形新型热作模具钢的致密化行为及其组织性能研究[J].铸造技术,2026,47(10):1118-1128.

TANG Y C, WU E Z, LU L, WEN H, LUO W, XIE X L, WU J H, CUI R. Study on the densification behavior, microstructure, and mechanical properties of novel hot-work tool steel fabricated by laser powder bed fusion[J]. Foundry Technology, 2026, 47(10): 1118-1128.

中国知网　https://www.cnki.net

热作模具钢广泛应用于压铸、热锻和挤压等模具,其服役过程长期承受热载荷与机械载荷耦合作用[1],因此材料必须同时具备优良的热疲劳抗力、耐磨性和高温组织稳定性[2]。粉末床激光熔融(laser powder bed fusion, LPBF)为热作模具的制造提供了新的技术路径。与传统减材加工相比,LPBF 不仅能够实现复杂构件的近净成形,还可在模具内部直接集成随形冷却通道,使冷却路径贴合型腔轮廓,从而改善热传输效率、均衡温度分布并缩短工艺周期[3-9]。

传统的 H11、H13、Dievar 等热作模具钢在LPBF成形过程中,高温度梯度和高冷却速率会引起较大的热应力,同时与相变应力耦合作用易导致开裂,形成冷裂纹和凝固裂纹[6]。基于此,研究者提出了面向 LPBF 的适配型热作模具钢设计思路,即通过降低碳含量、调整 Cr、V 等关键合金元素及其配比,降低打印态马氏体硬度、提高马氏体起始温度并改善应力承受能力[10]。Röttger 等[11]指出,传统热作模具钢的合金设计逻辑并不能直接适用于LPBF,面向增材制造的新钢种开发需要同时考虑凝固路径、相变行为及后续热处理工艺。Yuan 等[12]与 Deirmina 等[13]的研究表明,较低碳含量能够显著软化马氏体并提高其成形性,但同时降低材料的强度。因此,通过单一降低碳含量或 Cr、Mo 等合金化元素含量难以实现成形性和性能的同步提升。

传统 H13 及其改性钢通常采用直接回火(direct tempering, DT) 和重新奥氏体化后的淬火+回火(quenching+tempering, QT)工艺以提升其最终性能。前者通过 LPBF 本征热处理效应与后续回火过程调控残余奥氏体分解及析出相演化[14];后者通过重新奥氏体化消除打印态的原始高位错密度结构,获得更均匀的马氏体组织[15]。Yuan 等和 Deirmina 等[12-13]均指出,在保留细马氏体结构和高位错密度的条件下,采用 DT 与 QT 工艺提升热作模具钢的屈服强度与抗拉强度。因此,对于 LPBF 热作模具钢,通过调控后处理对于优化回火组织获得强塑性兼备的力学性能尤为关键。

本文对 H13 和 316 L 粉末进行原位微量合金化设计,适当降低 C 含量,同时提高 Ni 与 Cr含量,开发了一种适用于 LPBF 的新型热作模具钢。围绕该材料,系统研究其致密化工艺窗口,并对比打印态、QT2 和 DT2 条件下的组织演化、相组成以及拉伸性能与冲击性能,揭示不同热处理工艺对 LPBF微观组织及强韧匹配的影响。

1　实验材料与方法

1.1　样品制备

在本研究中,将 H13 和 316 L 不锈钢粉末按质量比为 6:1 进行混粉,开发了一种专为 LPBF 工艺设计的新型热作模具钢。所用 H13 和 316 L 不锈钢粉末化学成分如表 1 中。与标准 H13 合金相比,316L 的镍、铬含量高,有着较低的马氏体转变起始温度,但其中的碳含量较低。新型热作模具钢中碳含量为~0.32%(质量分数,下同),而镍含量为 ~1.55%,铬含量为 ~6.99%,同时改善合金的可打印性,提高强度和冲击韧性[16]。所用粉末形貌如图 1 所示,粉末呈近球形。经筛分后,选取粒径27~57 μm 的粉末作为 LPBF 成形的原料粉末。采用激光粒度仪对图 1 所示混合粉末的粒径分布进行测定,结果显示粉末的粒径分布为 D10=27.59 μm、D50=41.10 μm 和 D90 =56.77 μm。进一步通过 XRD 对粉末物相进行分析,其结果表明,原始粉末以马氏体相为主,并含有少量残余奥氏体。

采用 BLT-S210 LPBF 成形设备制备 3 组不同尺寸的块体试样。成形过程在氩气保护氛围中进行,腔室内氧含量体积分数控制在 0.01%以下。为研究不同打印参数对 LPBF 成形新型热作模具钢成型性的影响,通过调整激光功率 P(200~400 W)与扫描速度 v(760~1360 mm/s),设置了 30 组工艺参数组合,不同参数组合下的体能量密度(volume energy density, VED)由下式计算获得:

$$\mathrm{VED}=\frac{P}{vht} \tag{1}$$

式中,h 为搭接间距,μm;t 为铺粉厚度,μm。设置工艺参数铺粉层厚 t=40 μm,搭接间距 h=100 μm,旋转 67°。在获得成形窗口的基础上,选取激光功率 360 W,扫描速度 960 mm/s,扫描间距 100 μm,层厚 40 μm 的参数组合进行力学性能测试试样品打印。为探究不同热处理工艺对材料组织与性能的影响,

表 1 H13,316 L 与本研究开发的新型高硬热作模具钢化学成分

Tab.1 Chemical compositions of H13, 316 L, and the newly developed high-hardness hot-work tool steel

(mass fraction/%)

Alloy	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Ni
H13	0.368	5.20	1.29	1	0.39	1	-
316 L	0.008	17.23	2.45	0	0.72	0.44	10.88
H13:316L (6:1)	0.320	6.99	1.46	0.86	0.44	0.92	1.55

中国知网　https://www.cnki.net

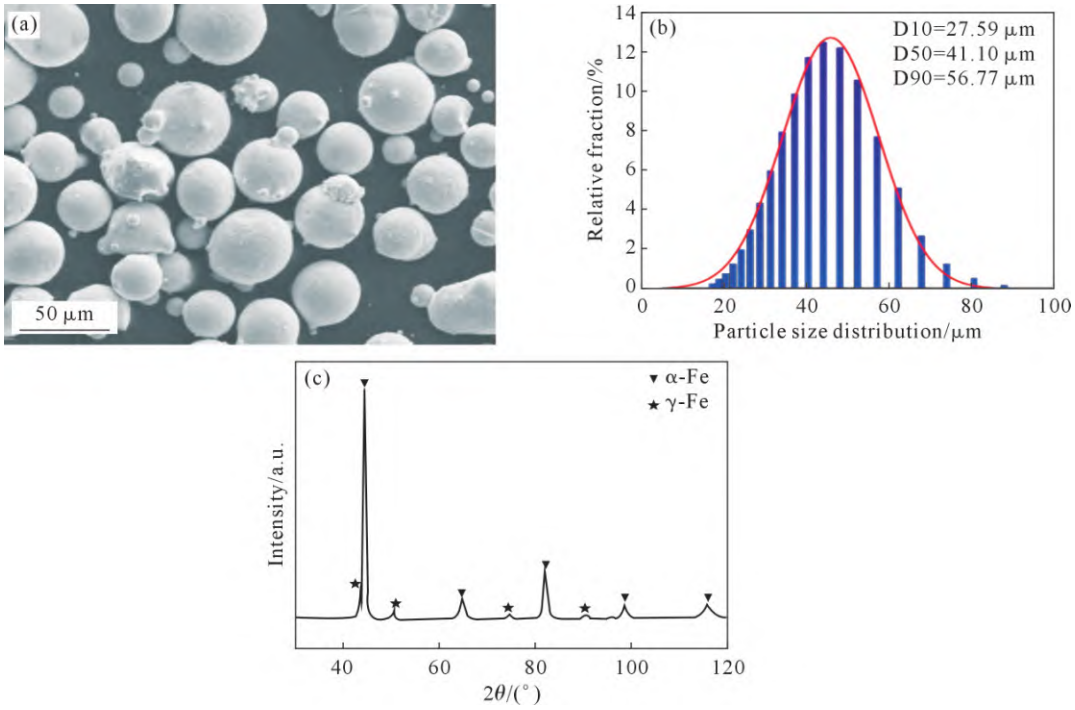


图 1 混合粉末的形貌、粒径分布及物相组成:(a) SEM 像;(b) 粒径分布曲线;(c) XRD 谱

Fig.1 Morphology, particle size distribution, and phase constitution of the blended powder: (a) SEM image; (b) particle size distribution curve; (c) XRD pattern

设计了两种热处理工艺,分别为 1 050 ℃/1 h(油冷)+560 ℃/2 h(空冷)×2 次和 560 ℃/2 h(空冷)×2 次。为避免氧化,两种热处理工艺均在氩气保护的管式炉(OTF-1200X,科晶,中国)中进行。为便于表述,将以上热处理后的样品分别标记为 QT2、DT2。固溶和回火工艺的选择参考传统 H13 等热作模具钢常用热处理制度,其中固溶处理可充分奥氏体化并削弱打印态快速凝固引起的微偏析,为后续油淬获得较均匀马氏体组织提供条件,而 560 ℃回火可促进残余奥氏体分解以及细小碳化物弥散析出。采用双重回火进一步稳定回火马氏体组织并降低残余奥氏体。

1.2 材料表征

金相试样按照标准机械抛光流程制备,采用光学显微镜(OM, ZEISS Axio Observer 3 Materials, 德国)进行显微组织观察。利用 ImageJ 软件统计金相块孔隙率。采用配备电子背散射衍射(EBSD)探测器(Velocity EBSD, EDAX)的场发射扫描电子显微镜(SEM, TESCAN S8000 GMH, 捷克)对粉末形貌、块体试样显微组织及断口形貌进行观察。EBSD 数据采集参数为加速电压 20 kV、束流 10 nA、步长 0.05 μm,并采用 OIM 软件进行后处理与分析。物相分析采用 X 射线衍射仪(XRD, BRUKER D8 DISCOVER PLUS, 德国),Cu-Kα 辐射,扫描范围 2θ=30°~120°,步长 0.02°,每步曝光时间 0.4 s。

1.3 力学性能测试

室温拉伸试验在 MTS C43.504 万能试验机(MTS Systems,美国)上完成。拉伸试样尺寸如图 2c 所示,标距段长度、宽度和厚度分别为 18、2.5 和 1.5 mm。每组测试 3 个平行试样,取平均值。冲击试验采用夏比冲击试验机(JB-300B),试样尺寸如图 2d 所示,总长 50 mm,横截面 10 mm×10 mm,带有深度 2 mm、45° V 型缺口。每组测试 3 个试样,取平均值。使用 Q10CHD MASTER+ 测试仪(QATM,德国)对样品抛光表面进行维氏显微硬度测量。

2 实验结果及讨论

2.1 工艺参数对 LPBF 成形新型热作模具钢致密度的影响

不同激光功率与扫描速度下新型热作模具钢金相照片及致密度统计结果如图 3 所示。参数空间可划分为未熔合区、相对致密区和气孔缺陷区[17]。当激光功率 200~240 W、扫描速度 960~1 360 mm/s 时,对应 VED 为 18.4~60.3 J/mm^3,试样相对致密度普遍低于 99%,且以未熔合缺陷为主。其原因在于能量输入不足导致粉末熔化及对前层重熔不充分,进而造成道间与层间搭接不足[18]。当 VED 增加至62.5~93.0 J/mm^3 时,粉末熔化和前层重熔更加稳定,层间结合显著改善,试样致密度可达 99.5%以上,仅存在少量气孔缺陷,该类气孔主要来源于原始粉末内部

中国知网 https://www.cnki.net

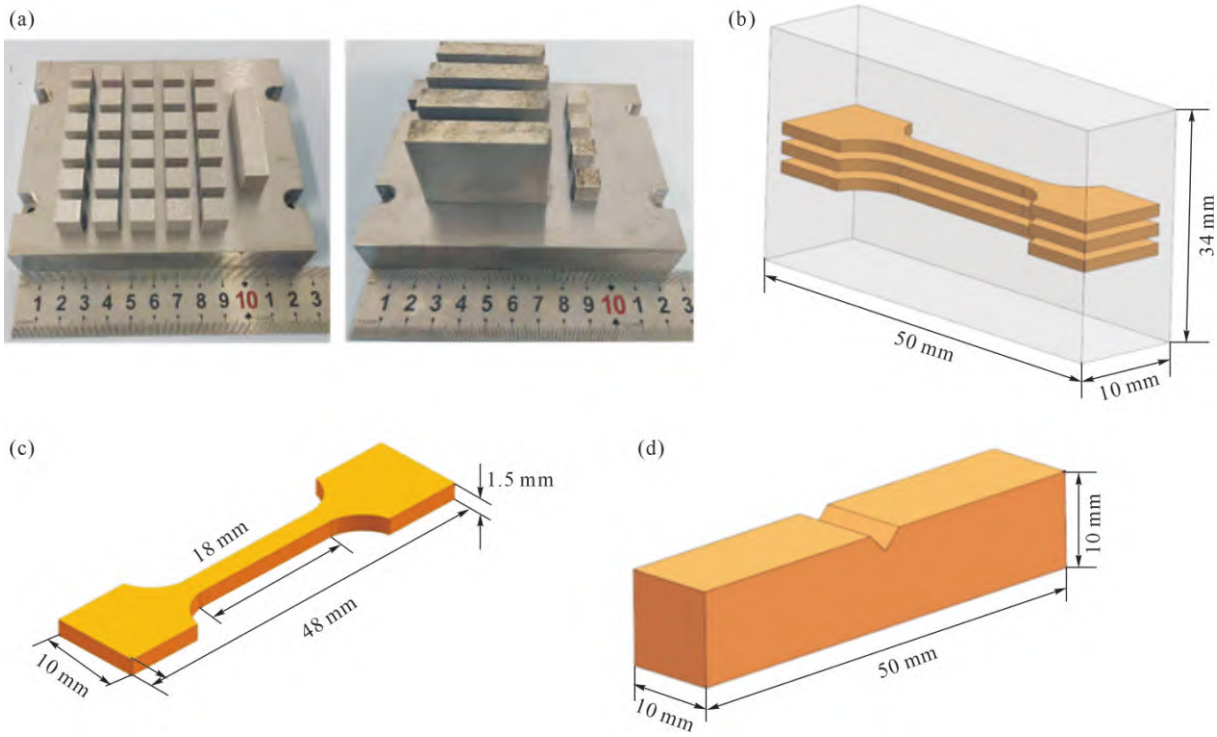


图 2　试样制备与几何尺寸：(a) 金相及力学测试样品；(b, c) 拉伸试样取样位置及尺寸；(d) 夏比 V 型缺口冲击试样尺寸

Fig.2　Specimen fabrication and geometries: (a) samples for OM and mechanical tests; (b, c) sampling location and dimensions of tensile samples; (d) dimensions of the Charpy V-notch impact test

缺陷及卷入熔池残留的气体。进一步提高激光功率并降低扫描速度后，对应 VED 提高至 93.8 J/mm^3 以上，试样致密度达到 99.9%以上。在本实验参数范围内，致密度随 VED 增加而升高，表明该新型热作模具钢具有较宽的成形窗口。此外，在较宽的激光参数范围内并未观察到明显宏观裂纹(冷裂纹)，仅在个别样品中发现少量微裂纹(图 4c)，裂纹密度低于 15 μm/mm^3，说明该材料较传统 H13 具有更低的裂纹敏感性。这主要得益于较低 C 含量减小了马氏体本征脆性，Ni 的引入降低了 M_s 点并有利于缓解热应力，Cr 含量提高则保证了高冷速下的淬透性和组织均匀性。

2.2　热处理工艺对 LPBF 成形新型热作模具钢物相和显微组织的影响

图 5 给出了打印态试样沿打印方向的 SEM 显微组织。打印态组织呈现明显的胞状结构与枝晶并存特征，胞状结构内部及枝晶间基体均表现为板条状，而胞壁或枝间区域可观察到断续分布的亮白色边界相关第二相。已有研究表明，LPBF 成形 H13 等热作模具钢的打印态组织通常包含胞状与枝晶结构、板条马氏体及一定量残余奥氏体，并受到显著本征热处理效应影响[12-13]。

图 6 展示了不同热处理后样品纵截面的 SEM 形貌。QT2 试样原始熔池边界及柱状凝固痕迹基本消失，组织整体趋于均匀；相比之下，DT2 试样纵截面上仍可辨认出沿成形方向延伸的柱状枝晶及局部熔池轮廓。表明 DT2 主要表现为应力释放、残余奥氏体分解及回火析出强化，难以消除 LPBF 形成的胞状与枝晶结构和熔池边界；而 QT2 则通过再奥氏体化—淬火实现了对打印态微观组织的重构[12-13]。这一趋势与 LPBF 成形 H13 中直接回火保留胞状/枝晶特征、淬火后组织明显均匀化的报道一致[12-13]。

结合 H13 及同类 Cr-Mo-V 热作模具钢的回火析出规律，图 5 和 6 中所观察到的亮白色边界第二相可能为富 Cr、Mo、V 的碳化物。结合相关研究，打印态中样品的亮白色第二相以富 V 的 MC 型碳化物为主，可能伴有少量富 Mo 的 M_2C/M_6C 型。对于 DT2 处理后的样品，由于中仍保留胞状与枝晶结构，边界相关第二相多呈链状或定向分布，其碳化物更可能以 Cr 富集的 $M_{23}C_6/M_7C_3$ 型与 V 富集的 MC 型为主，并伴有少量 Mo 富集的 M_2C/M_6C 型[12-13]；而对于 QT2，再奥氏体化显著削弱了原始偏析，后续回火析出位置更多受回火马氏体板条界影响，因此其碳化物类型虽仍可能与 DT2 相同，但分布较 DT2 更为分散[19-21]。

图 7 给出了打印态及两种热处理态试样沿纵截面的 EBSD 结果。由图 7a~c 可见，3 种状态下组织均呈现明显的板条状特征。打印态试样组织细小，平均晶粒尺寸为 2.96 μm；QT2 试样平均晶粒尺寸增大至 3.65 μm，表明再奥氏体化和回火后削弱了打

中国知网　https://www.cnki.net

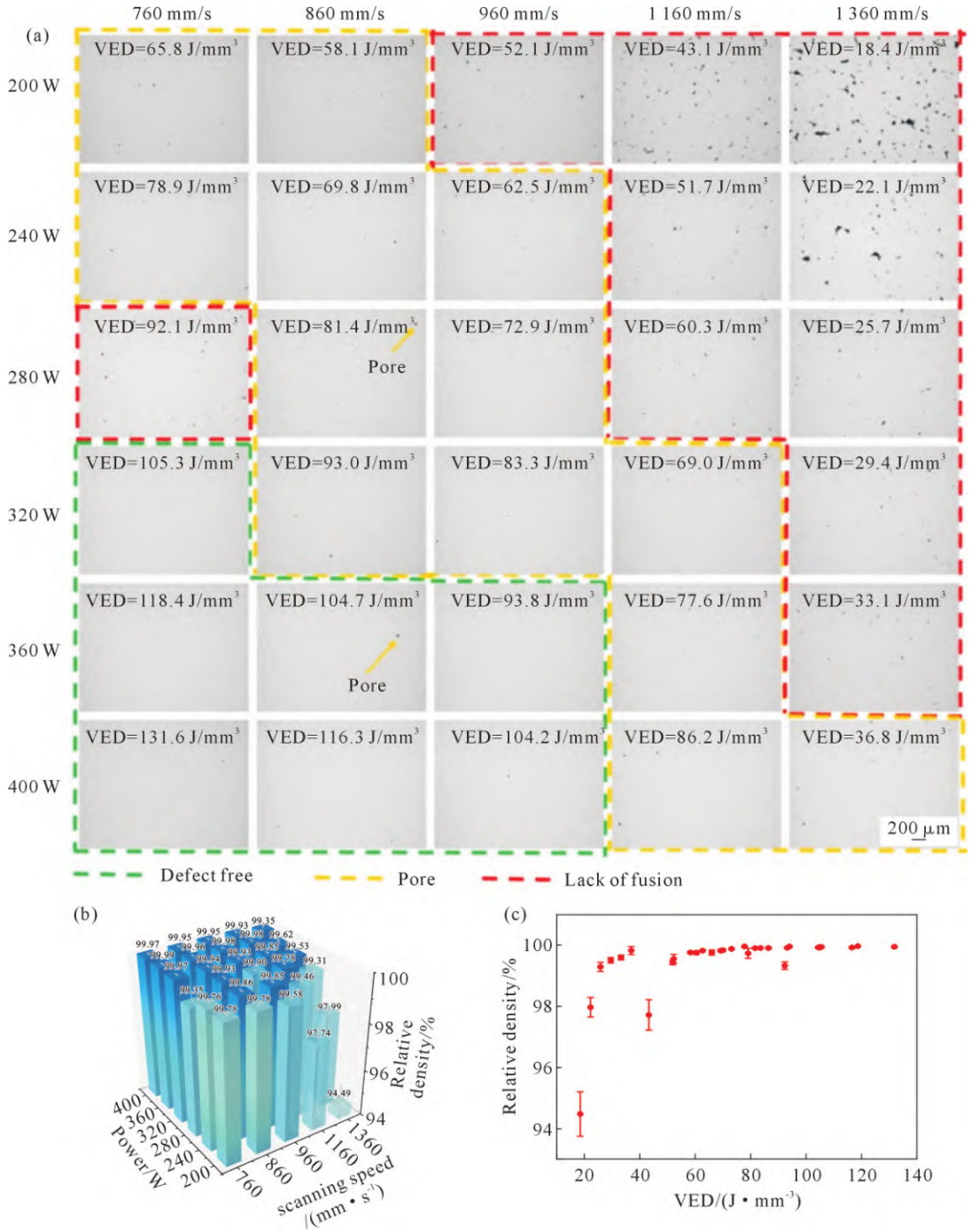


图 3 不同激光功率与扫描速度下新型热作模具钢金相照片及致密度统计结果：(a) 金相图；(b) 相对致密度统计结果；(c) 相对致密度随 VED 变化

Fig.3 Metallographic images and density statistics of novel hot-work tool steel under different laser powers and scanning speeds: (a) OM images; (b) relative density statistics; (c) relative density as a function of VED

印态原始组织特征，并导致马氏体结构相对粗化；DT2 试样平均晶粒尺寸为 3.14 μm，仍保持较细的板条状马氏体。这一趋势与 H13 及低碳热作模具钢中高温再奥氏体化促进组织均匀化、直接回火保留 LPBF 态细小组织特征的报道一致[22]。图 7a_1~c_1 所示相分布图结果显示，打印态、QT2 和 DT2 试样中残余奥氏体含量分别为 11.4%、3.6%和 2.6%。图 8 XRD 结果显示，经 QT2 和 DT2 处理后样品中奥氏体峰明显减弱甚至基本消失，主要由马氏体特征峰组成。打印态中较高的残余奥氏体主要与 LPBF 快速凝固条件下的元素偏聚及多次热循环引起的局部奥氏体稳定化有关；经 DT2 处理后，热激活扩散及析出行为削弱了残余奥氏体稳定性，使样品中奥氏体含量进一步减少。对于 QT2 试样，再奥氏体化首先削弱了打印态胞状结构边界及枝晶处的成分偏析，再经淬火和双重回火使残余奥氏体进一步分解，其含量较打印态大幅下降。已有研究表明，LPBF 成形 H13 样品中残余奥氏体(体积分数)可达约 19%，经淬火

中国知网 https://www.cnki.net

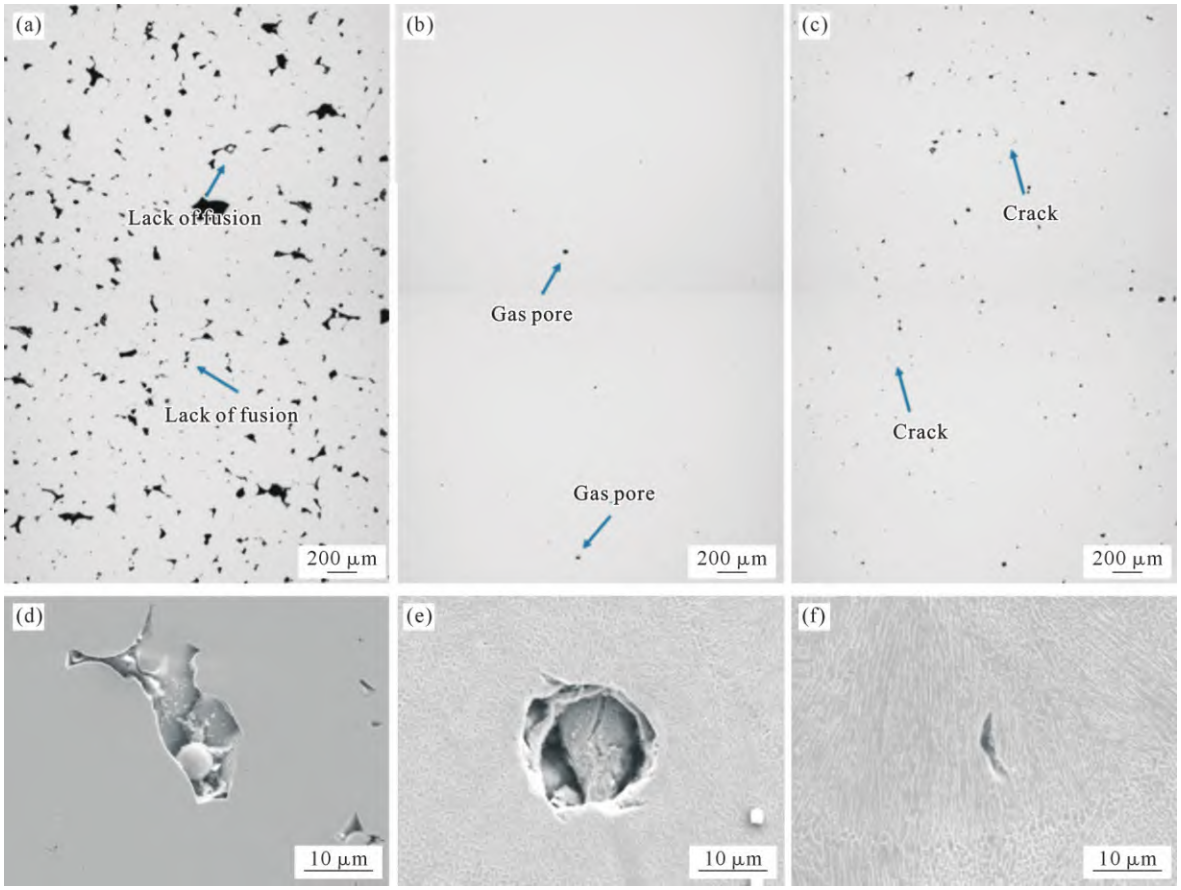


图 4　打印态样品中典型缺陷：(a~c) OM 图；(d~f) SEM 像

Fig.4　Typical defects in printed samples: (a~c) OM images; (d~f) SEM images

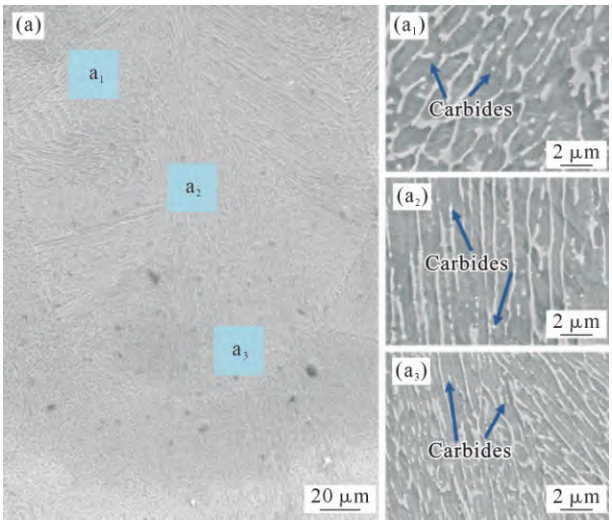


图 5　打印态试样沿打印方向显微组织：(a) 纵截面 SEM 像，(a_1~a_3) 对应区域的高倍图

Fig.5　Microstructure of the printed sample along the printing direction: (a) SEM image of longitudinal section; (a_1~a_3) magnified views of the marked regions

后可降至 2%以下；再奥氏体化处理可通过削弱偏析并提高 M_s/M_f 温度显著降低残余奥氏体含量[23-24]。

2.3　热处理工艺对 LPBF 成形的新型热作模具钢力学性能的影响

图 9 和表 2 表明不同热处理工艺显著影响材料的室温力学性能。与打印态相比，QT2 试样表现为屈服强度提高、抗拉强度下降、塑性略有改善；DT2 试样则同时表现出较高的强度、硬度和冲击韧性，综合力学性能最佳。具体而言，DT2 试样的屈服强度、抗拉强度、显微硬度和夏比 V 型缺口冲击功分别达到 1 866 MPa、1 974 MPa、632 $HV_{0.1}$ 和 17.8 J，表明直接双重回火更有利于获得优良的强韧匹配。

不同热处理态样品力学性能的显著差异主要源于微观组织的差异。QT2 处理后，打印态熔池边界、胞状结构与枝晶结构及细尺度板条马氏体被明显削弱，组织转变为更均匀的回火马氏体和碳化物；残余奥氏体减少和回火析出有利于提高屈服强度，但原

表2 AB、QT2和DT2样品的拉伸性能、维氏硬度及夏比V型缺口(CVN)冲击值

Tab.2 Tensile properties, microhardness, and Charpy V-notch (CVN) impact values of the AB, QT2 and DT2 samples

Sample	YS/MPa	UTS/MPa	Fracture elongation/%	Microhardness ($HV_{0.1}$)	CVN value/J
AB	1 679±18	2 031±3	8.2±1.1	565±23	15.3±4.5
QT2	1 765±15	1 835±14	8.7±0.3	576±7	12.7±3.0
DT2	1 866±21	1 974±9	8.5±0.3	632±15	17.8±1.3

中国知网　https://www.cnki.net

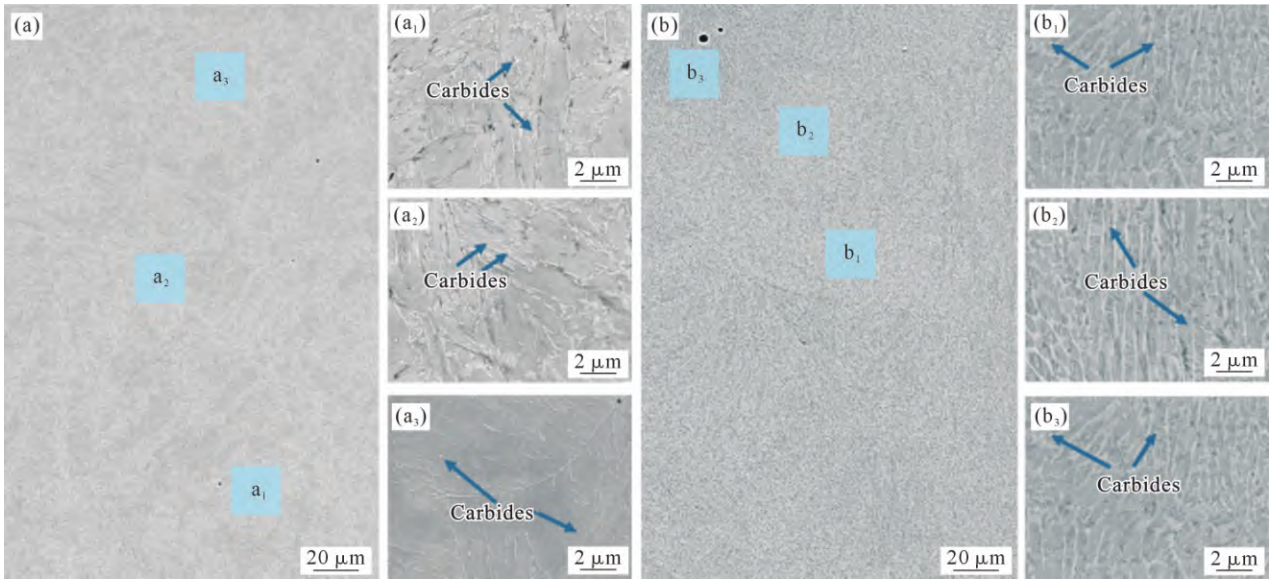


图 6 热处理态试样纵截面 SEM 像：(a) QT2 样品；(a_1~a_3) 对应区域的高倍图；(b) DT2 样品；(b_1~b_3) 对应区域的高倍图

Fig.6 SEM images of the longitudinal section of heat-treated samples: (a) QT2 sample; (a_1~a_3) magnified views of the marked regions; (b) DT2 sample; (b_1~b_3) magnified views of the marked regions

始 LPBF 微观组织及高位错密度的消失削弱了其持续加工硬化能力，导致抗拉强度下降。相比之下，DT2 在分解残余奥氏体和释放残余应力的同时，较大程度保留了打印态形成的细尺度马氏体、胞状边界及高位错结构，因此仍保留较强的细晶强化和位错强化，从而获得高于 QT2 的强度和硬度，但仍保留相当的塑性。上述结果表明，直接双重回火仍保留部分胞状结构，并形成纳米级碳化物，实现强塑性匹配；而当温度继续升高导致胞状结构完全溶解、碳化物粗化时，抗拉强度将明显下降，塑性则相应提高[13, 24-25]。

2.4 LPBF 成形的新型热作模具钢拉伸与冲击断口分析

图 10 展示了打印态及不同热处理态试样拉伸断口形貌。打印态试样断口整体以韧窝和撕裂棱为主，表明其断裂机制主要表现为微孔形核、长大和聚合主导的韧性断裂，仅局部区域可见未完全熔化的原始粉末颗粒。与之相比，QT2 和 DT2 试样的拉伸断口均呈现出韧窝与准解理台阶并存的混合断裂特征。其中，QT2 断口中较大尺寸、较平直的准解理台阶更为明显，而 DT2 断口中细小韧窝分布相对更密集，但仍可观察到局部裂纹和孔洞等损伤特征[22]。Li 等[26]指出，LPBF 成型的 H13 直接回火样品有着高于常规淬回火样品的强度；Fonseca 等[27]则表明，低温直接回火通常对应更高强度但更低断裂韧性，而经奥氏体化–淬火–回火处理后，材料韧性明显改善。

图 11 给出了不同状态试样冲击试验后的断口形貌。3 种状态下的冲击断口均表现出不同程度的准解理特征，说明其冲击断裂均不是完全由韧窝主导的典型韧性断裂。打印态试样断口表面同时存在解理面和分散韧窝，表明其在裂纹快速扩展过程中仍具有一定的冲击吸能能力。DT2 试样经直接双重回火后，断口中仍可观察到准解理面和微裂纹，但其裂纹扩展路径较打印态更加曲折，说明回火后残余应力的释放、残余奥氏体的进一步分解以及较稳定回火马氏体的形成提高了裂纹扩展阻力，因此 DT2 获得了最高的平均冲击功。相比之下，QT2 试样的平均冲击功最低，其断口表面存在未熔合缺陷，说明局部缺陷可作为冲击载荷下的裂纹萌生源；此外，再奥氏体化导致的组织重构虽提高了组织均匀性，却也可能使马氏体层级结构相对粗化，削弱对解理裂纹扩展的阻碍作用[28]。

3 结论

(1)在本研究参数范围内，VED 低于 60 J/mm^3 时缺陷以未熔合为主，VED 为 60~90 J/mm^3 时试样致密度可达 99.5%以上，VED 高于 90 J/mm^3 时致密度可达 99.9%以上，且样品整体未见明显宏观裂纹，新型热作模具钢具有良好的成形性和较宽的成形窗口。

(2)打印态组织呈现典型的胞状结构与枝晶特征，基体以细小板条马氏体为主，并含有 11.4%左右的残余奥氏体及弥散分布碳化物。QT2 处理后原始熔池边界及凝固痕迹基本消失，组织更加均匀但略微粗化；DT2 处理后仍保留打印态胞状/枝晶结构及熔池边界特征，大部分残余奥氏体分解。

(3)打印态因细小马氏体与较高残余奥氏体具备良好加工硬化能力，而 QT2 处理后虽消除偏析、

中国知网 https://www.cnki.net

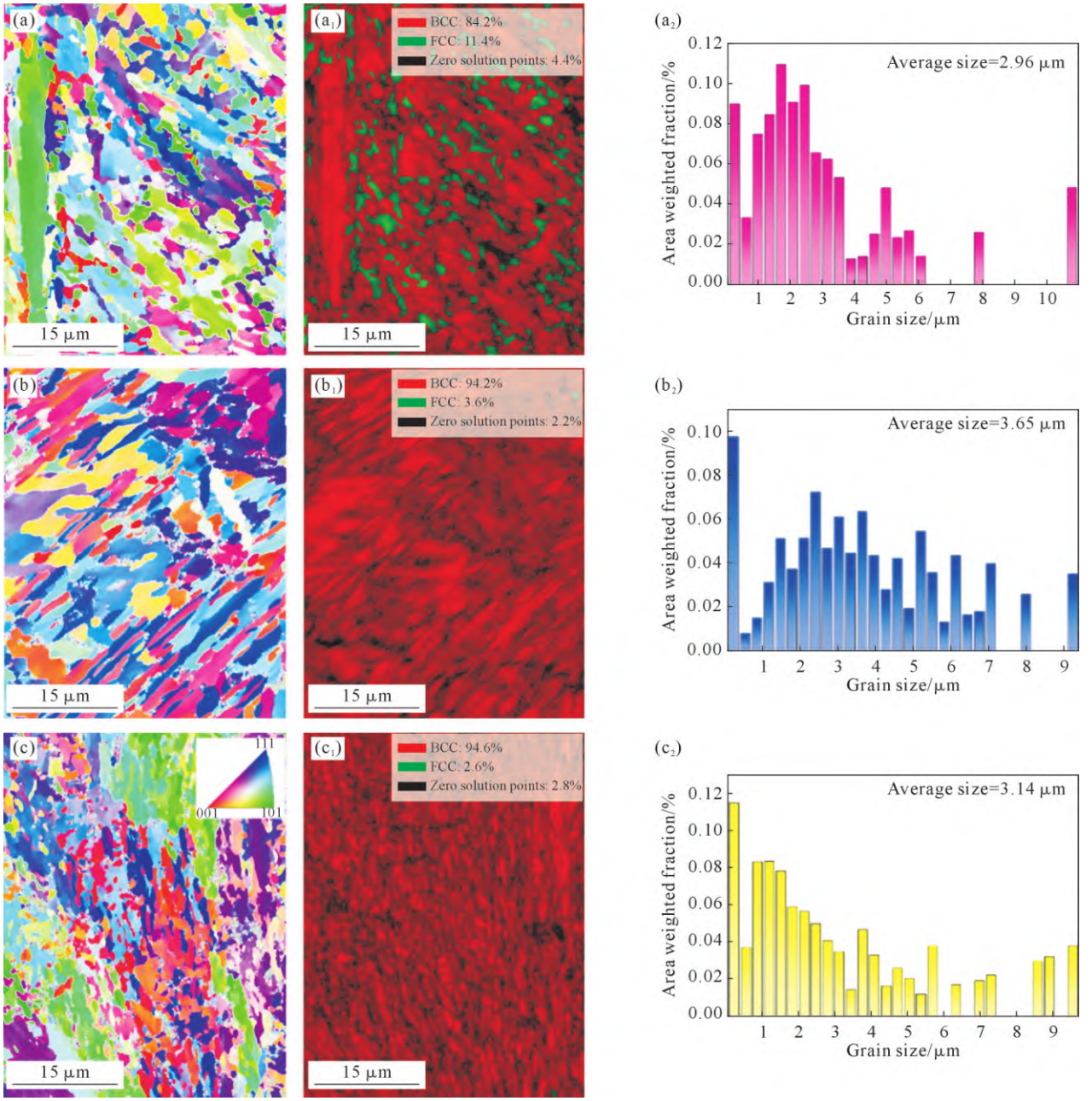


图 7　打印态及不同热处理态试样的 EBSD 结果：(a~c) IPF 图；(a_1~c_1) 相分布图；(a_2~c_2) 晶粒尺寸分布

Fig.7　EBSD characterization of the printed and heat-treated samples: (a~c) IPF maps; (a_1~c_1) phase maps; (a_2~c_2) grain size distributions

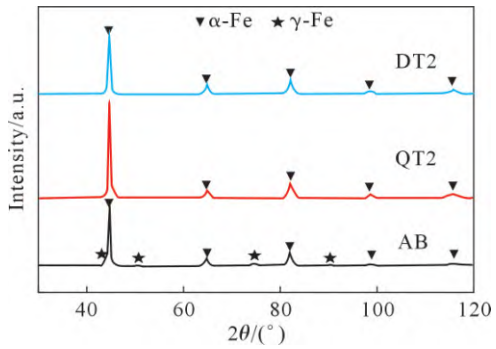


图 8　打印态及不同热处理态试样的 XRD 谱

Fig.8　XRD patterns of the printed and heat-treated samples

均匀组织，却粗化晶粒并削弱位错强化，但是其抗拉强度与冲击韧性均有所降低。DT2 处理则在保留细小马氏体与高位错密度的同时促进碳化物弥散析出，获得最高屈服强度(1 866 MPa)、硬度(632 $HV_{0.1}$)和冲击功(17.8 J)，实现最佳强韧匹配。

本文主要关注室温组织与力学性能，尚未涉及高温强度、热疲劳、耐磨性及长期服役稳定性；后续工作需结合高温性能测试与碳化物精细表征，进一步评估该新钢种的工程应用潜力。

参考文献：

[1] WU L, DAS S, GRIDIN W, LEUDERS S, KAHLERT M, VOLLMER M, NIENDORF T. Hot work tool steel processed by laser powder bed fusion: A review on most relevant influencing factors [J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(7): 2100049.

中国知网　https://www.cnki.net

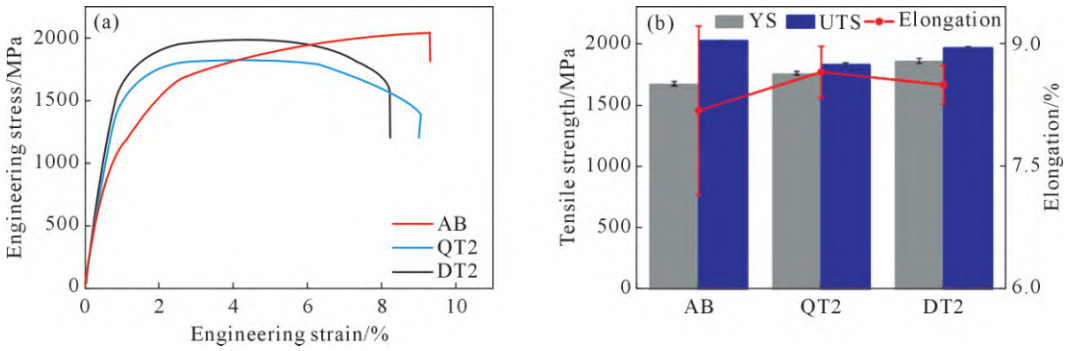


图 9 打印态及不同热处理态样品拉伸性能：(a) 工程应力–应变曲线；(b) 屈服强度、抗拉强度和伸长率统计结果

Fig.9 Tensile properties of the printed and heat-treated samples: (a) engineering stress-strain curves; (b) statistical results of the yield strength, ultimate tensile strength and elongation

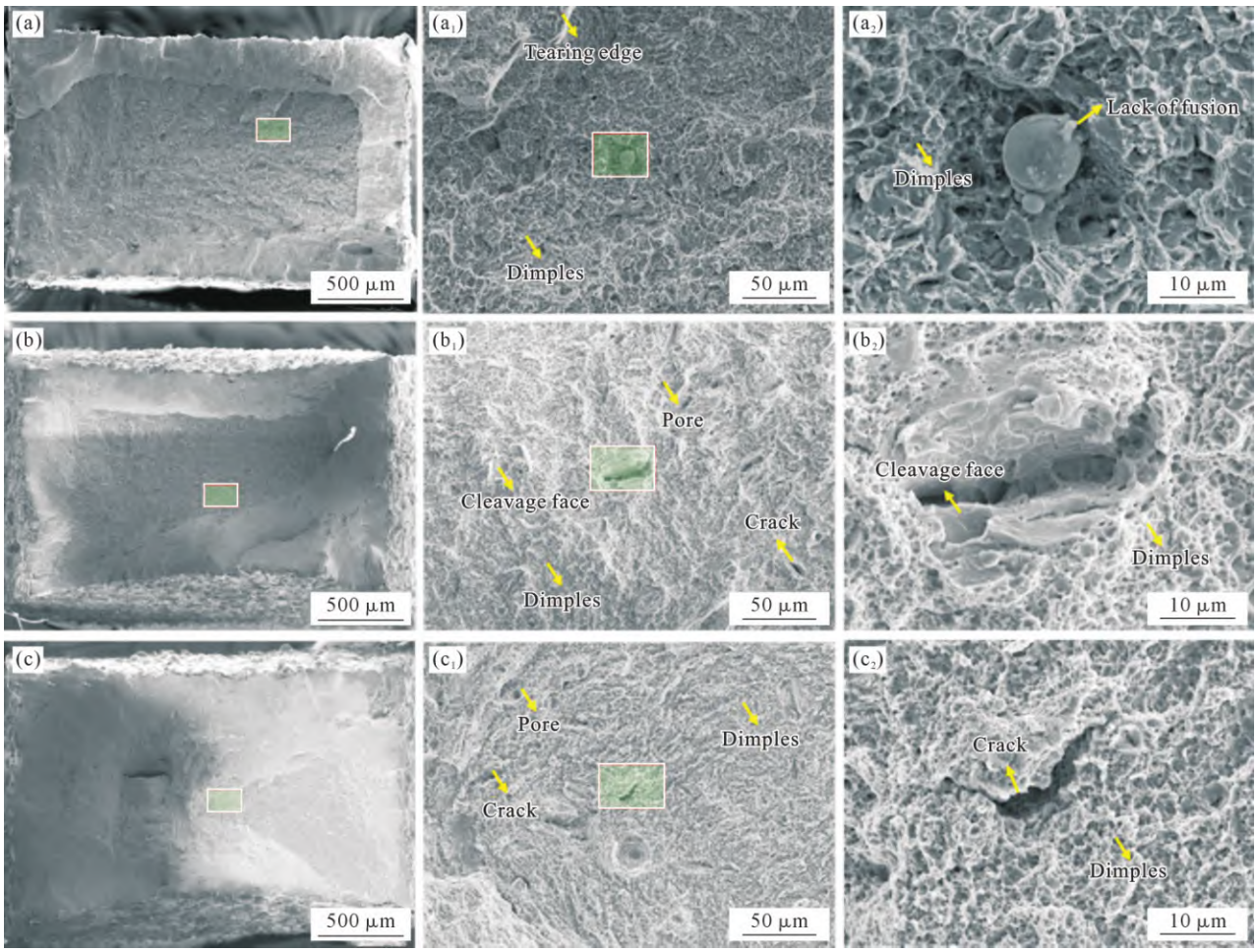


图 10 试样拉伸试验后的断口形貌：(a~c) AB、QT2 和 DT2 试样的断口整体形貌；(a_1~c_1) 图(a~c)局部高倍图；(a_2~c_2) 图(a_1~c_1)局部高倍图

Fig.10 Fracture morphologies of the samples after tensile testing: (a~c) overall fracture surfaces of the AB, QT2, and DT2 samples; (a_1~c_1) magnified images of the marked regions in (a~c); (a_2~c_2) magnified images of the marked regions in (a_1~c_1)

[2] MEDVEDEVA A, BERGSTRÖM J, GUNNARSSON S, ANDERSSON J. High-temperature properties and microstructural stability of hot-work tool steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 523(1-2): 39-46.

[3] MAZUR M, LEARY M, MCMILLAN M, ELAMBASSERIL J, BRANDT M. SLM additive manufacture of H13 tool steel with conformal cooling and structural lattices[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(3): 504-518.

[4] 秦天，葛沈瑜，黄进浩，余俊. 金属增材制造技术的理论研究现状讨论[J]. 材料开发与应用，2016, 31(2): 94-102.
QIN T, GE S Y, HUANG J H, YU J. Discussion of theoretical research on metal additive manufacturing technology[J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(2): 94-102.

[5] TAN C L, WANG D, MA W Y, CHEN Y R, CHEN S J, YANG Y Q, ZHOU K S. Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds[J]. Materials & Design, 2020, 196: 109147.

[6] SANTHOSHSARANG D M, DIVYA K, TELASANG G, SOUNDARAPANDIAN S, BATHE R, PADMANABHAM G. Additively manufactured high-performance conformally cooled H13 tool steel die insert for pressure die casting[J]. Transactions of the Indian Na-

中国知网 https://www.cnki.net

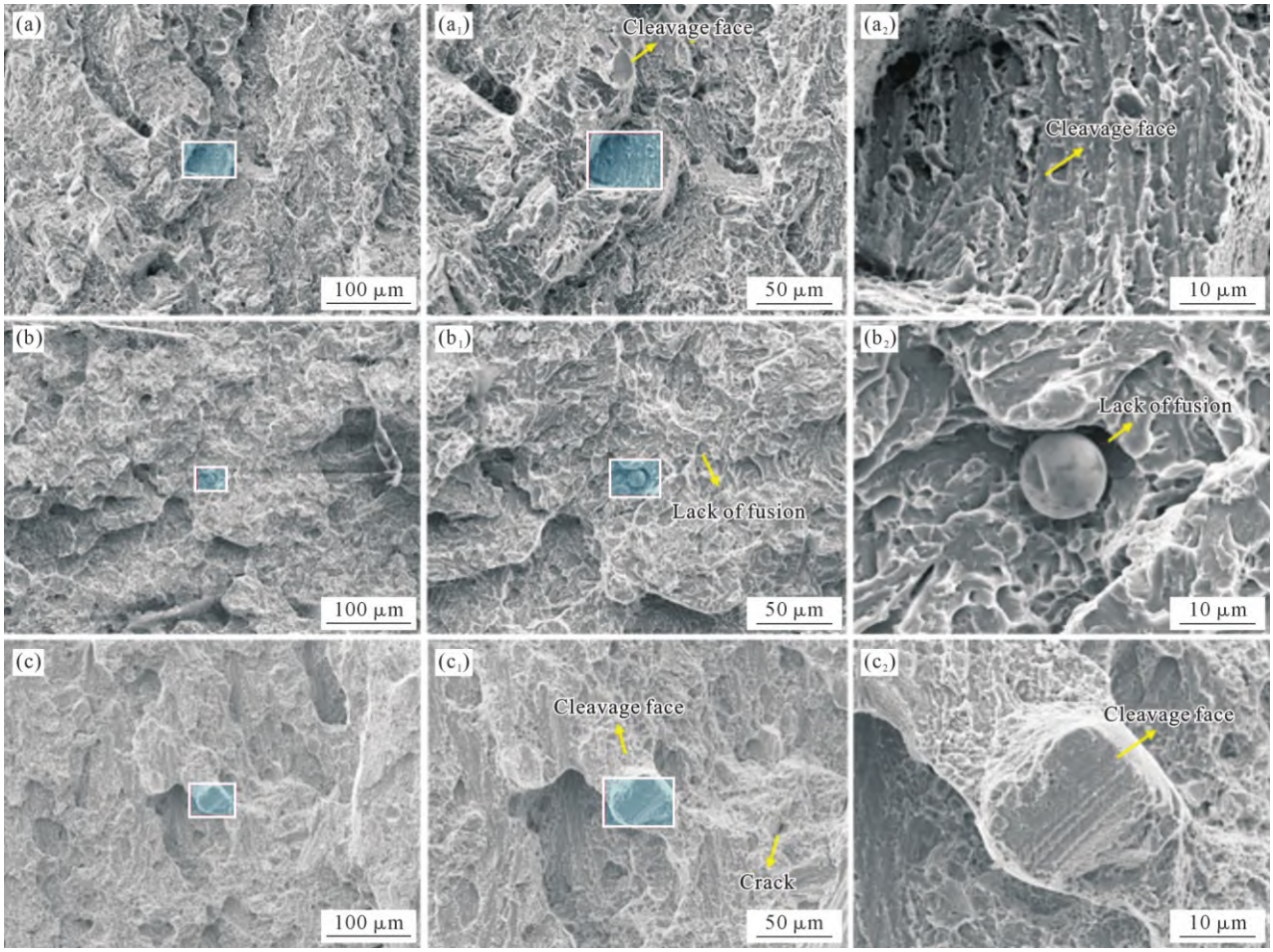


图 11　试样冲击试验后的断口形貌：(a~c) AB、QT2 和 DT2 试样的断口整体形貌；(a_1~c_1) 图(a~c)局部高倍图；(a_2~c_2) 图(a_1~c_1)局部高倍图

Fig.11　Fractographic features of the samples after impact testing. (a~c) overall fracture surfaces of the AB, QT2, and DT2 samples; (a_1~c_1) magnified images of the marked regions in (a~c); (a_2~c_2) magnified images of the marked regions in (a_1~c_1)

tional Academy of Engineering, 2021, 6(4): 1037-1048.

[7] **马明亮，刘苏杭，郭纯，王树军，刘茵琪. 电弧增材制造技术的研究进展**[J]. **铸造技术**，2021, 42(3): 231-233.
MA M L, LIU S H, GUO C, WANG S J, LIU Y Q. Research progress of arc additive manufacturing technology [J]. Foundry Technology, 2021, 42(3): 231-233.

[8] HEARN W, LINDGREN K, PERSSON J, HRYHA E. In situ tempering of martensite during laser powder bed fusion of Fe-0.45C steel[J]. Materialia, 2022, 23: 101459.

[9] **刘佳，高建宝，李志诚，马飒，钟静，张利军. 金属增材制造的相场模拟现状及展望**[J]. **铸造技术**，2023, 44(2): 87-100.
LIU J, GAO J B, LI Z C, MA S, ZHONG J, ZHANG L J. Recent progress and perspectives of phase-field modelling in metal additive manufacturing[J]. Foundry Technology, 2023, 44(2): 87-100.

[10] HEOGH W, YEON S M, KANG D S, PARK S, PARK S, RYU K, SUN J, JI L, SON Y, CHOI K, HA C W. The design and additive manufacturing of an eco-friendly mold utilized for high productivity based on conformal cooling optimization [J]. Materials & Design, 2022, 222: 111088.

[11] RÖTTGER A, BOES J, GROßWENDT F, WEBER S. Description of a new concept for the development of adapted hot-work tool steels for laser-powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2023, 61: 103292.

[12] YUAN M W, CAO Y, KARAMCHEDU S, HOSSEINI S, YAO Y M, BERGLUND J, LIU L B, NYBORG L. Characteristics of a modified H13 hot-work tool steel fabricated by means of laser beam powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831: 142322.

[13] DEIRMINA F, QUARZAGO L, BUTCHER D, BETTINI E, MEHRABAN S, HANN J, PETTERSSON N H, LAVERY N, RÖTTGER A, PELLIZZARI M. General investigations on the heat treatment and thermal fatigue behavior of an experimental hot work tool steel tailored for laser powder bed fusion [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146554.

[14] DEIRMINA F, PEGHINI N, ALMANGOUR B, GRZESIAK D, PELLIZZARI M. Heat treatment and properties of a hot work tool steel fabricated by additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 753: 109-121.

[15] HE Y N, ZHONG M, BEUTH J, WEBLER B. A study of microstructure and cracking behavior of H13 tool steel produced by laser powder bed fusion using single-tracks, multi-track pads, and 3D cubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 286: 116802.

[16] NARVAN M, GHASEMI A, FEREIDUNI E, KENDRISH S, ELBESTAWI M. Part deflection and residual stresses in laser powder bed fusion of H13 tool steel[J]. Materials & Design, 2021,

中国知网　https://www.cnki.net

204: 109659.

[17] 刘杰，陈向阳，范彦斌. 选区激光熔化成形 H13 钢缺陷、组织调控及拉伸性能[J]. 机械工程学报，2018, 54(16): 101-107.
LIU J, CHEN X Y, FAN Y B. Tailoring the defects and microstructure and tensile properties investigation of H13 steel by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 101-107.

[18] 陈洪宇，顾冬冬，顾荣海，陈文华，戴冬华. 5CrNi4Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究[J]. 中国激光，2016, 43(2): 66-73.
CHEN H Y, GU D D, GU R H, CHEN W H, DAI D H. Microstructure evolution and mechanical properties of 5CrNi4Mo die steel parts by selective laser melting additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 66-73.

[19] KAN M, PARK G, JUNG J G, KIM B H, LEE Y K. The effects of annealing temperature and cooling rate on carbide precipitation behavior in H13 hot-work tool steel [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 627: 359-366.

[20] CHOU C Y, PETTERSSON N H, DURGA A, ZHANG F, OIKONOMOU C, BORGENSTAM A, ODQVIST J, LINDWALL G. Influence of solidification structure on austenite to martensite transformation in additively manufactured hot-work tool steels[J]. Acta Materialia, 2021, 215: 117044.

[21] HAGHDADI N, LALEH M, MOYLE M, PRIMIG S. Additive manufacturing of steels: A review of achievements and challenges [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(1): 64-107.

[22] 田春茂，曹裕栋，欧阳迪，周文琰，蔡超，史玉升. 激光增材制造相变诱导型高熵合金的研究进展[J]. 铸造技术，2024, 45(8): 711-725.
TIAN C M, CAO Y D, OU YANG D, ZHOU W Y, CAI C, SHI Y S. Review on laser additive manufacturing of transformation-induced high-entropy alloys [J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 711-725.

[23] 侯英培，万杰，杨海欧，林鑫，陈豫增. 基于高碳奥氏体稳定化的激光定向能量沉积 H13 钢力学性能优化[J]. 铸造技术，2025, 46(11): 1058-1066.
HOU Y P, WAN J, YANG H O, LIN X, CHEN Y Z. Optimization of the tensile properties of H13 steel deposited by laser directional energy based on high-carbon austenite stabilization [J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1058-1066.

[24] SUNY W WANG J L, LI M L, WANY X, LI C H, DAI T, HAO M L, DING H. Thermal and mechanical properties of selective laser melted and heat treated H13 hot work tool steel [J]. Materials & Design, 2022, 224: 111295.

[25] WEN T, YANG F P, WAN J Y, YANG H L, FU J W. Ultrastrong and ductile synergy of additively manufactured H13 steel by tuning cellular structure and nano-carbides through tempering treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 157-168.

[26] LI S H, YANG S Q, ZHAO Y T, DONG Y A, WANG Z M. 2 Gpa H13 steels fabricated by laser powder bed fusion and tempering: Microstructure, tensile property and strengthening mechanism [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 888: 145803.

[27] FONSECA E B, ESCOBAR J D, GABRIEL A H G, RIBAMAR G G, BOLL T, LOPES É S N. Tempering of an additively manufactured microsegregated hot-work tool steel: A high-temperature synchrotron X-ray diffraction study [J]. Additive Manufacturing, 2022, 55: 102812.

[28] WANG J H, WANG S D, LI W T, YAO Y J, WANG X P, YANG Z G, CHEN H. Ultrastrong and ductile additively-manufactured medium-carbon steel via modulating austenite stability[J]. Scripta Materialia, 2024: 239: 115780.

(责任编辑：宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net