

引文格式: 杨永强, 黄坤, 吴世彪, 等. H13模具钢粘结剂喷射增材制造工艺参数对成形质量的影响[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23/24): 90-97, 109.

YANG Yongqiang, HUANG Kun, WU Shibiao, et al. Influence of binder jetting additive manufacturing process parameters on forming quality of H13 mold steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(23/24): 90-97, 109.

H13模具钢粘结剂喷射增材制造工艺参数对成形质量的影响*

杨永强, 黄坤, 吴世彪, 张越, 周瀚翔

(华南理工大学, 广州 510641)

[摘要] 为了探究 H13 模具钢粘结剂喷射成形过程中工艺参数对成形质量的影响, 将打印层厚和粘结剂饱和度作为变量, 进行了粘结剂喷射成形增材制造试验。对坯体相对密度和尺寸精度及烧结后成形件的显微硬度、表面粗糙度和致密度进行了测试, 分析了打印层厚和粘结剂饱和度对成形质量的影响。结果表明, 层厚和粘结剂饱和度能够显著影响制件成形质量。随打印层厚的增加, 坯体的相对密度降低。粘结剂饱和度的增加会导致坯体尺寸精度和相对密度的降低, 引起烧结件表面粗糙度的增大。打印层厚和粘结剂饱和度分别为 75 μm 和 80% 时, 坯体的相对密度达到最大值 55.8%, 但烧结致密度仅为 79.5%。当打印层厚和粘结剂饱和度增加到 150 μm 和 125% 时, 烧结试样获得最高的致密度 95.7%, 此时显微硬度为 785.7HV₁, 弥补 H13 模具钢在粘结剂喷射增材制造领域中成形及烧结工艺参数的空白。

关键词: 增材制造 (AM); 粘结剂喷射增材制造 (BJAM); H13 模具钢; 表面粗糙度; 铺粉层厚; 粘结剂饱和度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.23/24.090



杨永强

教授, 博士生导师, 研究方向为金属 3D 打印技术与医学应用、激光增材制造及加工技术、现代焊接技术。

粘结剂喷射增材制造 (Binder jetting additive manufacturing, BJAM) 是一种基于粉末成形的增材制造技术, 使用喷墨式打印喷头选择性沉积粘结剂实现目标零件的快速成形。粘结剂喷射成形和注塑成形比较类似, 首先通过粘结剂和粉末成形目标形状, 再经过脱脂和烧结的后处理步骤实现零件的致密化和冶金结合。粘结剂喷射成形不需要高功率能源 (激光、电弧和电子束等) 和严苛的保护气氛, 通过改变粘结剂的组分能够调控零件的力学性能、热膨胀性和生物活性等。

H13 模具钢由于其优异的高温强度和耐磨性, 广泛应用于模具制造中, 且能够作为刀具和芯棒等零件的材料, 有助于制造从生物医学到航

空航天的通用部件, 具有广泛的应用价值。在增材制造中的应用成形是 Mazumder 等^[1] 最初采用定向能量沉积 (Directed energy deposition, DED) 工艺实现的, 其优化了工艺参数并研究了显微硬度、屈服强度和极限强度等性能。但 DED 受到粗糙成形表面的限制, 需要对复杂的形状特征进行大量的精加工, 相比 DED 成形, 激光选区熔化 H13 模具钢具有更精细的成形表面。在激光选区熔化增材制造过程中, 由于熔池中高冷却速率诱导的定向凝固和显著的外延生长, 由组织各向异性引起的机械性能各向异性通常被认为是难以避免的^[2-4]。通过激光选区熔化制造工艺优化, 能够有效抑制外延生长和沿热扩散方向的 <100> 织构强度, 一定程度上减

* 基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2018 B090905002)。

小各向异性、结构缺陷(孔隙、欠熔和球化等)及残余应力,获得层次化的精细组织,从而提升H13模具钢的强韧性^[5]。Tan等^[6]对激光选区熔化H13模具钢的各向异性做了进一步研究,发现马氏体组织中存在的非均匀富碳残余奥氏体相引起各向异性性能差异,同时诱导高开裂敏感性,但激光和电弧等高能束输入作用下熔池快速熔凝带来的热应力缺陷仍较难完全克服。

BJAM能够实现H13模具钢复杂零件的批量化、定制化快速成形,因其具有低温成形、可控固结工艺和材料灵活等特性,在商业上具有巨大的应用潜力。烧结过程中采用较慢的升温速率和快速沉积速率能够有效减少微裂纹、抑制热应力和各向异性。Nandwana等^[7]通过BJAM和超固相线液相烧结(SLPS)实现了H13模具钢近全致密化制造,验证了H13模具钢BJAM的可行性,研究结果表明,H13模具钢烧结的工艺窗口为1360~1380℃,能够实现近全致密化而不发生变形,并提出了烧结过程中晶粒的异常生长及凝固相变对微观结构演变的影响机理。为进一步研究凝固相变后其微观结构演变,Liu等^[8]采用原子探针扫描观察到微结构中液体通道内连续共晶碳化物的存在,揭示了材料的脆性断裂是由局部碳化物的富集引起的。为改善H13模具钢的机械性能,丁学锋等^[9]研究了TiC颗粒及Ni包覆TiC颗粒对H13模具钢致密度、微观组织和力学性能的影响,TiC颗粒及Ni包覆TiC颗粒可有效提高材料的综合性能,室温下硬度达到495.5HV,抗拉强度达到1337MPa。

目前对H13模具钢增材制造成形工艺的研究已有较多^[10],主要集中在粉末床熔融及定向能量沉积,对基于BJAM制造工艺的H13模具钢成形性能研究还较少,并缺乏对H13模具钢烧结窗口的可靠预测,无法确定粘结剂饱和度和打印层厚等BJAM工艺参数对坯体成形质量、烧结致密化过程和试样性能的影响。粘结剂喷射成形能够成形复杂精细化结构,实现H13模具钢的定制化快速成形,避免粉末床熔融及定向能量沉积过程中高能束输入下熔池快速冷特性引起的组织定向凝固及热应力缺陷,因此研究优化BJAM的H13模具钢的制造工艺具有重要工程意义。以H13模具钢粉末为打印原料,研究不同打印层厚和粘结剂饱和度的粘结剂喷射成形对致密度、尺寸精度、表面粗糙度及显微硬度的影响,分析H13模具钢BJAM成形、烧结致密化过程,通过对成形组织及性能研究优化BJAM的制造工艺,为模具钢在BJAM成形的商业化应用上提供指导。

1 试验及方法

1.1 制造方法

成形试样尺寸为12mm×12mm×12mm的方块,为了评估打印层厚对“咖啡渍效应”产生的影响效果,采用不同的层厚来打印方块试样。打印过程采用逐层堆叠的方式,因设备不具备在不同区域打印不同层厚的功能,单次打印皆为相同工艺参数。为保证打印过程喷头工作的稳定性,选择在单个喷头的打印幅面内进行试样打印。由于直接粘结的试样强度较低,在试样获取和转移过程中会

发生试样的碎裂,因此每种工艺打印10个方块,通过选取多个样件进行重复测试减小试验误差。

在粘结剂喷射打印过程中,打印测试的层厚分别为75μm、100μm、125μm和150μm。每一层粉末初步粘结成形后都需要经过光固化处理,设备顶部的UV光源释放波长为395nm的紫外光,通过催化粘结剂中的光引发剂发生交联反应,使粉末颗粒相互粘结在一起。前期准备试验中对UV光能量密度值测试对比,结果表明采用1600mJ/cm²能量密度的UV光固化,能有效消除由于层间结合力差导致的层间位移,实现较优的层间结合强度。去除未粘结粉末完成试样的脱粉过程,之后再完成热固化过程。系统参数如表1所示。

测试采用游标卡尺对方块的x、y、z三个方向的尺寸进行测量和统计,通过阿基米德排水法测量试样的密度。试样烧结完成后,采用阿基米德排水法进行样品密度测量,通过超景深显微镜获取试样3D表面形貌。采用金刚石悬浮液对试样抛光处理,通过光学显微镜观测并统计样品中孔隙率,观察平面为垂直构建方向(z轴)的上平面,采用显微硬度计(401MVA)进行硬度测量。

1.2 烧结工艺

在氩气氛围下对H13模具钢坯体、粉末和粘结剂进行了DSC-TGA(STA449F3德国耐驰)测试分析,采用的升温速率为10℃/min,测试结果如图1所示。粘结剂的升温范围为30~800℃,图1(a)表明粘结剂的分解速率在424.8℃时最大,质量稳定后残余5.02%,根据粘结剂成分可以推断残余物应为碳。坯体的升温范围为

表1 系统参数
Table 1 System parameters

UV 能量密度/ (mJ·cm ⁻²)	辊筒平动速度/ (mm·s ⁻¹)	铺粉辊线速度/ (rad·s ⁻¹)	喷头温度/℃	热固温度/℃	X向分辨率/dpi	热固时间/min
1600	30	45	45	190	1270	90

30~1200 ℃,由图 1 (b)可以看出,粘结剂在 380.1 ℃时的分解速率最大,此时坯体的质量损失速率最高,主要为粘结剂中的 1,6-己二醇二丙烯酸酯和三环癸烷二甲醇丙烯酸酯组分分解。当温度升高到 463.3 ℃时进入

第 2 次快速分解阶段,主要为功能性丙烯酸酯、丙烯酸酯低聚物、光聚合引发剂等粘结剂组分分解,随着温度进一步上升到 600 ℃后,坯体质量已经趋于稳定。H13 模具钢粉末的升温范围则选为 30~1400 ℃,图 1 (c)

表明粉末在 1400 ℃时未出现熔融吸热峰,初步判断其完全熔融温度高于 1400 ℃。

坯体的烧结在卧式真空烧结炉中进行,采用脱脂和烧结一体化工艺,烧结真空度为 1.3×10^{-3} Pa。基于 DSC-TGA 测试结果制定了多段烧结工艺,脱脂阶段首先以 5 ℃/min 的升温速率将坯体加热至 435 ℃并保持 2 h,使得大部分粘结剂以较快的速率分解,然后以 10 ℃/min 的升温速率将立方体加热至 600 ℃并保持 1 h,确保残余粘结剂完全分解。随后的烧结阶段以 10 ℃/min 的升温速率将立方体加热至 1300 ℃并保持 2 h。图 2 为试样的烧结升温曲线图。在烧结完成后,将试样在炉内缓冷至室温。采用的烧结温度低于粉末的 DCS-TGA 测试结果,主要原因是脱脂过程中坯体中的残留碳使烧结致密化所需的温度降低,在采用 1400 ℃烧结温度时出现了烧结异常,坯体发生完全熔融,转变为不规则球体。

1.3 试验设备及材料

选用 H13 模具钢雾化球形粉末(中航迈特),对粉末形态、粒度(PSD)和化学成分进行了表征。元素成分及微观组织如表 2 和图 3 (a)所示,粉末具有良好的球形度。图 3 (b)为粉末颗粒粒径分布的 PSD 结果, D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为 17.77 μm 、30.14 μm 和 50.42 μm 。BJAM 成形试验在 LASERADD-BJ420 (广州雷佳增材制造有限公司)上进行,成形设备由铺粉

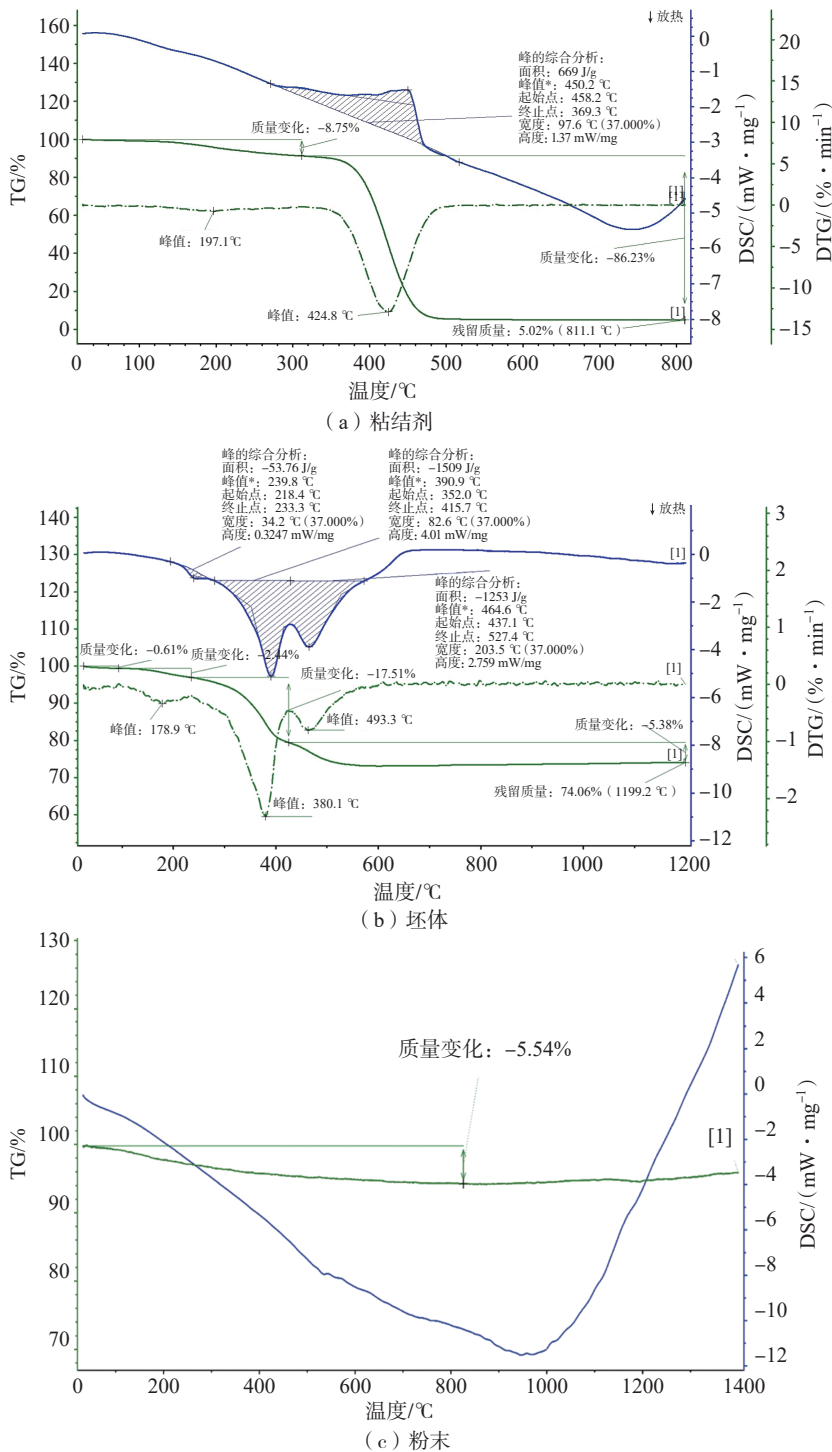


图 1 H13 模具钢粘结剂、坯体和粉末 DSC-TGA 分析曲线

Fig.1 DSC-TGA analysis curves of H13 mold steel binder, green part and powder

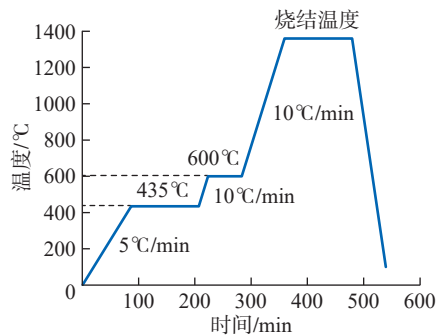


图 2 脱脂烧结温度-时间曲线

Fig.2 Debinding sintering temperature-time curve

系统、墨车系统及喷头自动清洗系统等组成,实物及原理图如图4所示。

2 试验结果与分析

2.1 粘结剂喷射工艺参数对 H13 模具钢坯体成形质量的影响

图5为BJAM打印不同层厚下的小方块坯体外观形貌(其中LT为层厚、BS为粘结层饱和度)。尺寸统计结果表明,粘结剂饱和度的增加会对试样的尺寸精度产生不利影响,当饱和度大于125%时试样完全偏离设计的形状;当粘结剂饱和度低

于50%时,粘结剂饱和度水平不足以在粉末床的粉末间形成足够的粘结颈以保证试样的尺寸和强度^[11-13]。成形失败的样件无法从基板上取下,所以在图5中显示。随着粘结剂饱和度水平的增加,尺寸误差增大,所有方向的尺寸精度显著降低,如图6所示。这主要是由于粘结剂饱和度增大会导致粉末颗粒间的粘结颈的尺寸增大,从而影响尺寸精度^[12]。当粘结剂饱和度从50%增大到125%, x 轴方向和 y 轴方向的平均误差值分别从0.15 mm和0.3 mm增大到0.9

mm和0.7 mm。相较于 x 轴和 y 轴方向的尺寸偏差度,试样沿 z 轴方向(构建方向)能够保持较高的成形精度,平均误差值仅从0.1 mm增大到0.2 mm,其原因是试验采用的铺粉辊在每一层打印后能对上一层的成形层进行进一步的机械预致密,一定程度上修正尺寸偏差,获得完整的平坦表面;另一方面,粘结剂在粉末床渗透过程中沿 x 、 y 轴方向渗透外溢会导致打印区域外的粉末粘结,因此 z 轴方向上通常具有更高的尺寸精度。Xia等^[14]的研究表明了类似的结果,当粘结剂饱和度增加,粘结剂会渗透超过印刷区域导致粘连印刷区域外的粉末,从而影响尺寸精度。在优化后较优的粘结剂饱和度下,打印的样件轮廓更加清晰^[15-16]。

图7为选用不同层厚打印参数获得的坯体相对密度,当打印层厚为75 μm 时相对密度最大,为55.8%。随着打印层厚的增加,致密度逐渐降低,当打印层厚增加到150 μm 时,试样的相对密度降低约9%。坯体致密度的差异主要由粉末层中粘结剂扩散过程分布不均匀引起。在采用相同的粘结剂饱和度时,单独的毛细管诱导渗透过程也无法保证粘结剂在一个打印层的完全均匀分布^[17],而较低的层厚能够在一定程度上减小层间的粘结剂分布差异,从而获得较

表2 H13 模具钢的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of H13 mold steel (mass fraction) %

Cr	Mo	V	C	Si	Mn	P	S	O	Fe
1.805	5.55	0.699	4.41	0.82	0.4	0.012	0.009	0.037	余量

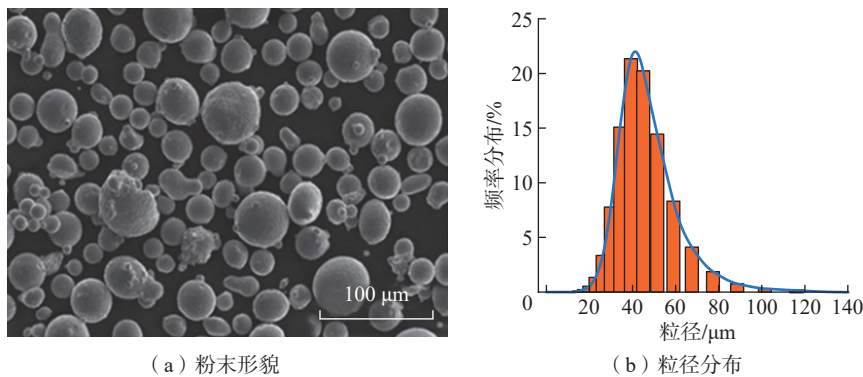


图3 H13 模具钢粉末形貌及粒径分布

Fig.3 Powder morphology and particle size distribution of H13 mold steel

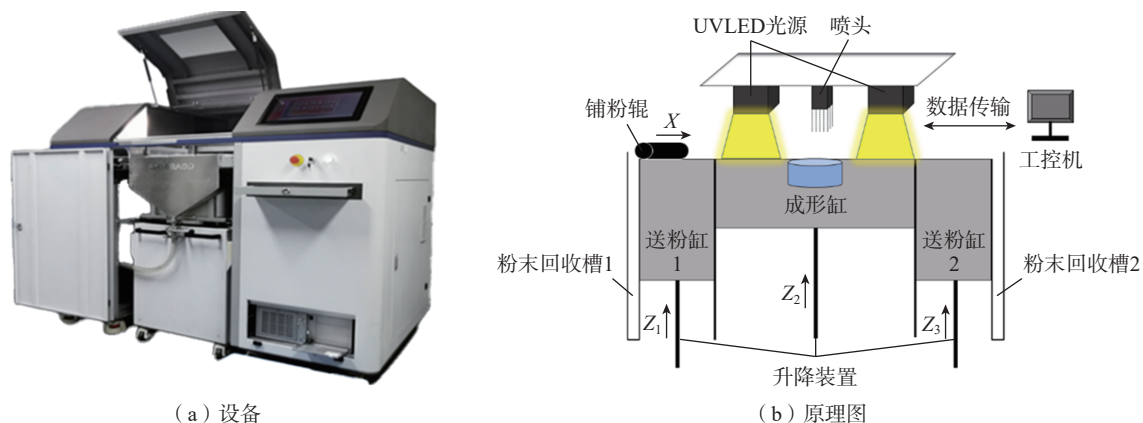


图4 LASERADD-BJ420 设备及成形原理

Fig.4 LASERADD-BJ420 equipment and molding schematic diagram

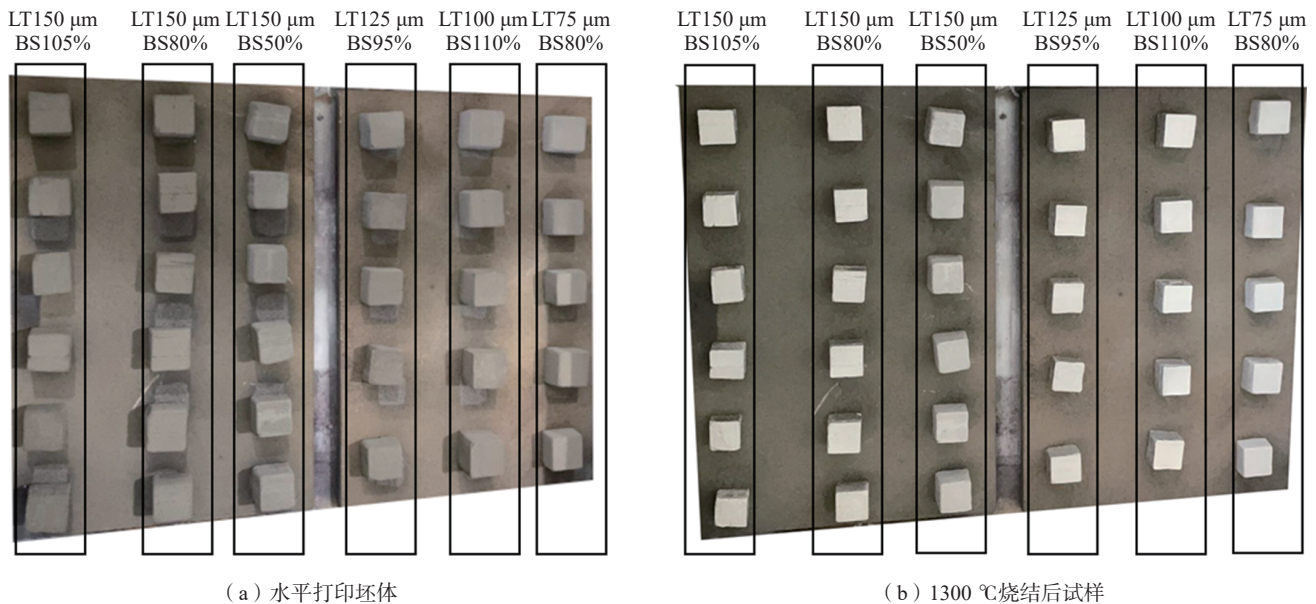


图5 不同层厚及粘结剂饱和度坯体外观形貌
Fig.5 Appearance of green body with different layer thickness and binder saturation

高的坯体相对密度。

2.2 BJAM 工艺参数对 H13 模具钢试样烧结质量的影响

试验初期根据 DSC-TGA 测试结果,将烧结温度定为 1400 °C,烧结后的试样全部熔化成球状,失去了设计形状和尺寸。在烧结阶段,粉末颗粒表面发生始相变,产生一定宽度的液体通道^[7]。由于脱脂阶段粘结剂燃烧挥发过程会残留一部分碳,并在烧结过程中进入相变后的金属流道内^[18],导致坯体中粉末颗粒所需的相变温度点降低。Lecis 等^[18]表述了相同的观点,通过 Thermo-Calc 模拟结果表明,碳含量增加对相变的温度具有多重影响,降低液相形成的阈值温度,并加速合金元素向固态 γ 相和 δ 相的扩散和孔隙填充效应,促进实现超固相线液相烧结。因此将烧结温度选定为 1300 °C,结合烧结结果可以推断坯体在此温度下已进入超固相线液相烧结阶段。图 8 为烧结后试样的致密度分布,随着粘结剂饱和度的增大,样件的致密度增大,当粘结剂饱和度达到 125% 时,烧结致密度达到最高值 95.7%。在粘结剂饱和度为 80% 时,坯体密度的一

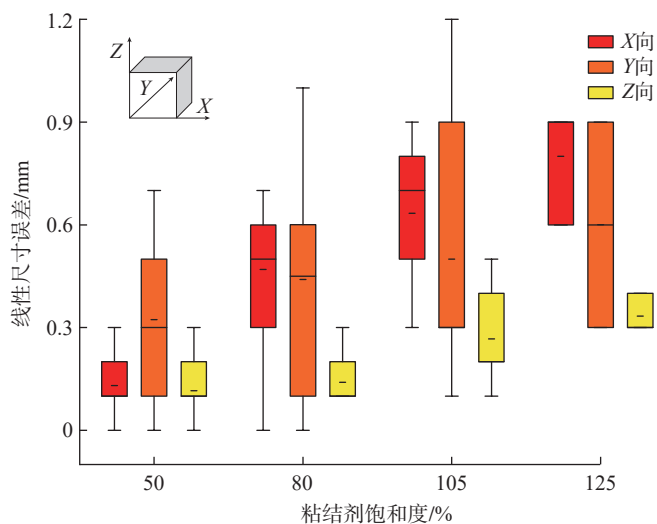


图6 不同粘结剂饱和度下坯体的线性尺寸误差
Fig.6 Linear dimensional error of green parts at different binder saturation

致性导致在烧结过程中产生一致且可重复收缩,表现为致密度上限偏差小。在采用相同的烧结工艺时,粘结剂饱和度越高,其试样的致密化速率越高。而粘结剂饱和度过大(大于 125%)则会导致成形样件因“咖啡渍效应”产生大量缺陷,进而降低零件的尺寸精度,无法保证坯体的正常打印成形。同时, Nandwana 等^[7]的热力学计算模拟结果表明,当试样内液体体积分数大于 40% 时就会导致

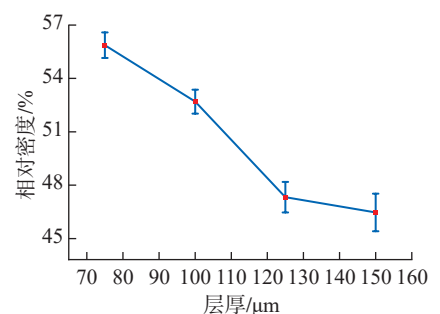


图7 不同打印层厚下坯体的相对密度
Fig.7 Relative density of green parts with different print layer thickness

形状损失,因此需要将粘结剂饱和度控制在一个合理的范围,避免固相线温度过低引起的打印失效。

图9为试样沿不同方向的线性收缩率。可以看出,当层厚相同时,随着粘结剂饱和度的增大,烧结收缩率增加。烧结零件收缩的主要原因是试样内微孔尺寸及数量的减小^[19],试样沿 x 、 y 轴方向上的线性收缩率与沿 z 轴方向上的线性收缩率存在差异,这主要是坯体烧结过程 z 轴方向原子的引力和重力的双重作用所引发。打印层厚和粘结剂饱和度分别为 $150\ \mu\text{m}$ 和 125% 的样件在 $1300\ ^\circ\text{C}$ 下烧结致密度大于 95% 。图10为试样垂直于构建方向平面的微观组织图,能够明显地观察到粘结剂饱和度较小的样件表面存在大量孔隙。当粘结剂饱和度为 80% 时,表面存在一定比例的不规则连通孔隙,这类孔

隙产生的原因是松散粉末床中粘结剂的不均匀渗透,导致粉末床局部区域内粘结剂的缺乏。在烧结过程中,由于粉末处于非完全熔融状态,粉末间隙中的气孔在润湿性较差的烧结环境下难以完成完全致密化过程,导致大量尺寸较小且分布不均连通的孔洞存在,其次不规则的连通孔洞与粉末铺展过程中粉末床密度相关,低颗粒接触率导致烧结后存在更大的孔洞。当粘结剂饱和度增大为 95% 时,不规则连通孔隙逐渐消失,样件进行超固相线液相烧结所产生的液体体积较少,不能有效地填充由于粘结剂燃尽产生的孔隙,因此主要表现

为尺寸较大的均匀孔隙。当饱和度继续增大,脱脂过程所残余碳富集量增大,降低液相形成的阈值温度,促进实现超固相线液相烧结,试样烧结过程中液体体积分数增加,晶界处的液体有效填充由于粘结剂燃尽产生的孔洞,孔洞尺寸减小直至完成全致密。粘结剂饱和度为 125% 样件表面几近于完全致密,致密度达到 95.7% ,表面仅存在少量球形孔隙,由于超固相线液相烧结过程中,相变沿着晶界方向发生,形成烧结颈。烧结同时受制于粘结剂有限的渗透作用,沿横向(x 轴、 y 轴)渗透范围相较于垂直方向(z 轴)更大,样件在构建方

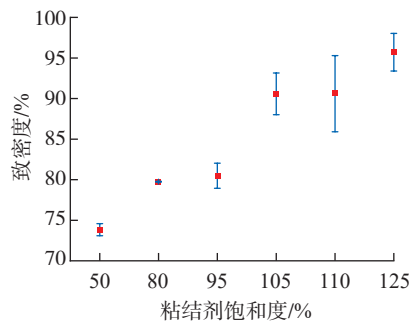


图8 1300 °C烧结温度下不同粘结剂饱和度的烧结试样致密度

Fig.8 Densities of sintered samples at different binder saturation at 1300 °C sintering temperature

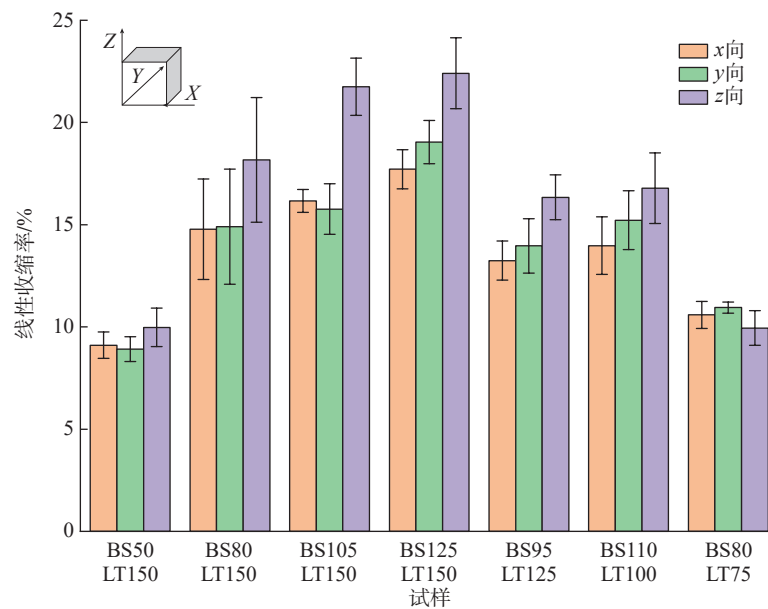


图9 1300 °C烧结温度下试样不同方向的线性收缩率

Fig.9 Three-dimensional linear shrinkage of specimens at 1300 °C sintering temperature

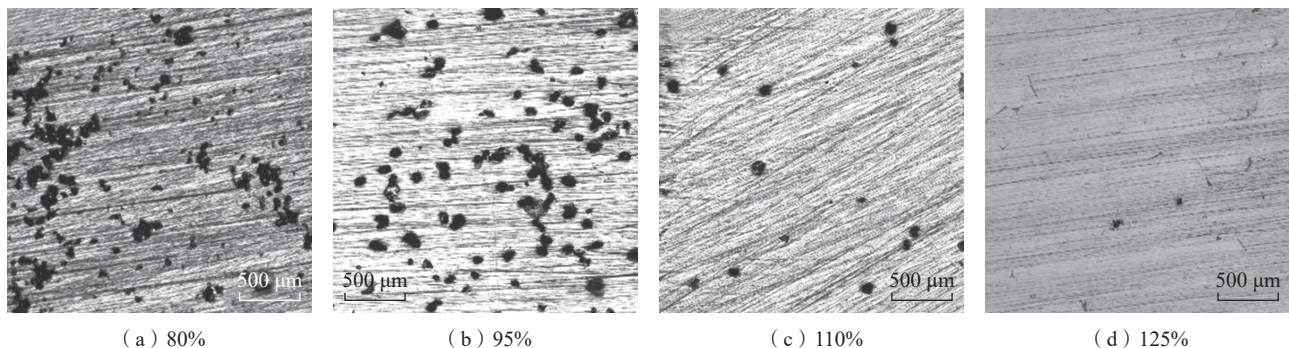


图10 不同粘结剂饱和度烧结试样的微观组织

Fig.10 Microstructure of sintered samples with different binder saturation

向(z轴)的收缩率比垂直构建方向的x轴和y轴收缩率大约3%。

图11为150 μm层厚下不同粘结剂饱和度烧结试样的超景深3D显微形貌,通过样件表面最高点与最低点之间的高度差来表征表面粗糙度^[17](ISO8503—3:1995)。不同粘结剂饱和度对烧结后样件的表面粗糙度具有一定的影响,当粘结剂饱和度从50%增大到105%时,试样顶面的粗糙度增大,高度差从227.83 μm升高到261.53 μm,主要是由坯体中粉末颗粒间的粘结颈增大引起的,粘结颈增大使得坯体在烧结过程中局部区域的C含量增大,降低局

部区域的固相线温度从而加剧局部区域的烧结收缩,导致局部尺寸差异变化和表面粗糙度增大。当粘结剂饱和度和打印层厚工艺参数相同时,烧结样件的表面粗糙度表现为侧面显著大于顶面,由于在压电式喷头将粘结剂喷射到粉末床的过程中,受到速度惯性、重力和毛细管力的三重作用,粘结剂优先发生横向扩散^[11],粘结剂的横向扩散(沿x、y轴方向)和渗透扩散(z轴方向)不均匀会导致粉末床中的粘结剂分布不均^[20],从而表现为表面粗糙度的增大。

对不同粘结剂饱和度试样显微硬度进行测试和统计,如图12所示,

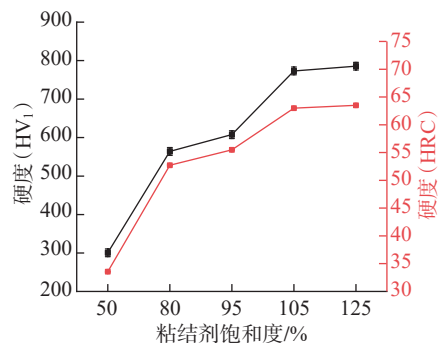


图12 不同粘结剂饱和度的显微硬度值
Fig.12 Microhardness values at different binder saturation

结果表明粘结剂饱和度越高的试样显微硬度值越大,当粘结剂饱和度从50%增加到125%,显微硬度从300.5 HV₁增加到785.7HV₁。烧结样品的压痕硬度极大程度上是由致密度和微观组织形貌所决定的,当试样具有较高的孔隙率时,其显微硬度会受到不同程度的降低^[21]。粘结剂饱和度从50%增加到125%时,样件的显微硬度增加,但增长率整体呈下降趋势,与图8中烧结试样的致密度分布基本一致,显微硬度的变化主要是由于粘结剂饱和度较低时,烧结试样表现出一个较低的致密度。样品中大量存在的孔洞表明烧结过程中熔融金属的润湿性和流动性较差,晶间液体通道较窄,且晶间结合强度较差。随着粘结剂饱和度的增加,烧结试样致密度和显微硬度同步增大。同时,粘结剂饱和度较低时,饱和度的增加能够使试样的收缩率大幅增加;当饱和度进一步增大时,试样的收缩率和致密度差异减小,导致致密度增长率降低。当粘结剂饱和度从80%增大到95%时,烧结试样的组织主要表现为从大量的随机分布连通孔洞转变为数量较小的大尺寸孔洞,但烧结收缩率和致密度增长减缓。因此这一阶段的显微硬度增长率较低。

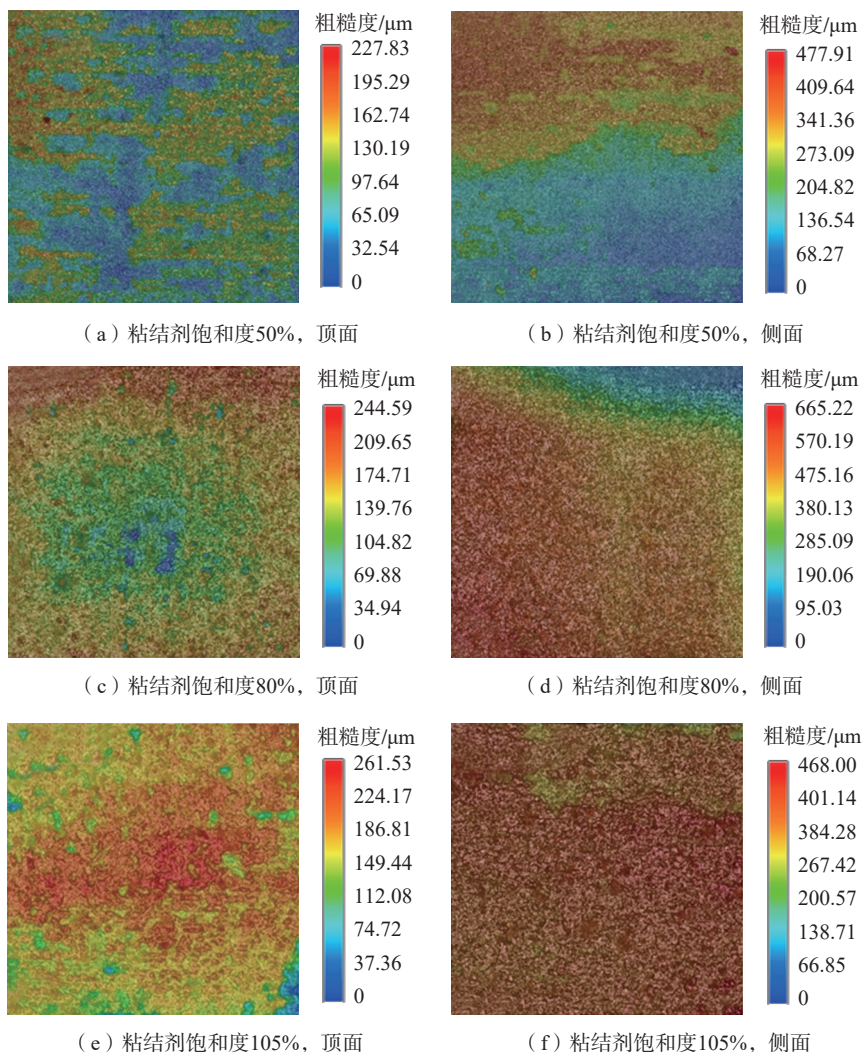


图11 150 μm层厚下不同粘结剂饱和度烧结件的超景深3D形貌

Fig.11 Ultra-depth-of-field 3D topography of sintered parts with different binder saturations at 150 μm layer thickness

3 结论

(1) 当粘结剂饱和度从50%增大到125%时,坯体的尺寸精度降低,

表现为 x 、 y 、 z 轴方向上的尺寸偏差增大,其中 z 轴(构建方向)相较于 x 、 y 轴的尺寸精度更高。主要原因为铺粉过程在垂直 z 轴方向对粉末存在机械预致密过程,且粘结剂在粉末床渗透过程中沿 x 轴和 y 轴方向的渗透外溢更严重。

(2) 坯体的相对密度随着层厚的增加而降低。当打印层厚为 $75\ \mu\text{m}$ 时,坯体的相对密度最大为 55.8% ;当打印层厚增加到 $150\ \mu\text{m}$ 时,试样的相对密度仅为 46.5% ,降低了约 9% 。坯体的相对密度差异主要是由层间的粘结剂分布差引起,较低的层厚能够在一定程度上减少层间的粘结剂分布差异,从而获得较高的坯体相对密度。

(3) 烧结试样的致密度随着粘结剂饱和度的增加而增大。坯体脱脂过程结束后在晶界区域产生游离的富集碳,导致局部区域内的固相线温度降低,加速了试样致密化过程,从而烧结过程中的液体体积分数增多,液体通道宽度增大,因此能够提高试样的致密度。但粘结剂饱和度过大则会导致试样失去设计尺寸精度。采用 125% 的粘结剂饱和度有助于高效稳定制备形状较优的样件,此时烧结致密度最高,达 95.7% 。

(4) 当打印层厚一致时,随着粘结剂饱和度的增大,三向线性收缩各向差异和收缩率均增大。同时,试样的致密度、表面粗糙度和显微硬度增大。同一样件侧面的表面粗糙度相较于顶面显著增大,这和粘结剂沿3个方向的渗透率差异有关。当采用 125% 粘结剂饱和度时,受益于较高的致密度,烧结试样的维氏硬度值为 785.7HV_1 。

参考文献

- [1] MAZUMDER J, CHOI J, NAGARATHNAM K, et al. The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components[J]. *Journal of the Minerals*, 1997, 49(5): 55–60.
- [2] HOLZWEISSIG M J, TAUBE A, BRENNE F, et al. Microstructural characterization and mechanical performance of hot work tool steel processed by selective laser melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2015, 46(2): 545–549.
- [3] YAN J J, CHEN M T, QUACH W M, et al. Mechanical properties and cross-sectional behavior of additively manufactured high strength steel tubular sections[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106158.
- [4] WANG M, LI W, WU Y, et al. High-temperature properties and microstructural stability of the AISI H13 hot-work tool steel processed by selective laser melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(1): 531–542.
- [5] LEI F, WEN T, YANG F, et al. Microstructures and mechanical properties of H13 tool steel fabricated by selective laser melting[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2022, 15(7): 2686.
- [6] TAN Q Y, YIN Y, WANG F, et al. Rationalization of brittleness and anisotropic mechanical properties of H13 steel fabricated by selective laser melting[J]. *Scripta Materialia*, 2022, 214: 114645.
- [7] NANDWANA P, KANNAN R, SIDDEL D. Microstructure evolution during binder jet additive manufacturing of H13 tool steel[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101534.
- [8] LIU J, KANNAN R, ZHANG D L, et al. Multi-scale characterization of supersolidus liquid phase sintered H13 tool steel manufactured via binder jet additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 56: 102834.
- [9] 丁学锋, 易丹青, 王斌, 等. TiC 颗粒及其表面镀镍对 H13 钢烧结行为及组织与性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2014, 19(6): 940–947.
- DING Xuefeng, YI Danqing, WANG Bin, et al. Effects of TiC particles and its surface nickel plating on microstructure sintering properties of sintered H13 steel[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2014, 19(6): 940–947.
- [10] CHEN C J, YAN K, QIN L L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser additively manufactured AISI H13 tool steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(11): 5577–5589.
- [11] MIYANAJI H, MOMENZADEH N, YANG L. Effect of printing speed on quality of printed parts in binder jetting process[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 20: 1–10.
- [12] MIYANAJI H, ZHANG S S, YANG L. A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 124: 1–11.
- [13] SALEHI M, MALEKSAEEDI S, NAI S M L, et al. A paradigm shift towards compositionally zero-sum binderless 3D printing of magnesium alloys via capillary-mediated bridging[J]. *Acta Materialia*, 2019, 165: 294–306.
- [14] XIA M, NEMATOLLAHI B, SANJAYAN J. Influence of binder saturation level on compressive strength and dimensional accuracy of powder-based 3D printed geopolymer[J]. *Materials Science Forum*, 2018, 939: 177–183.
- [15] LANZETTA M, SACHS E. Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2003, 9(3): 157–166.
- [16] SOLTMAN D, SUBRAMANIAN V. Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect[J]. *Langmuir*, 2008, 24(5): 2224–2231.
- [17] MAO Y W, LI J W, LI W, et al. Binder jetting additive manufacturing of 316L stainless-steel green parts with high strength and low binder content: Binder preparation and process optimization[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117020.
- [18] LECIS N, MARIANI M, BELTRAMI R, et al. Effects of process parameters, debinding and sintering on the microstructure of 316L stainless steel produced by binder jetting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 828: 142108.
- [19] RAJABI J, MUHAMAD N, SULONG A B, et al. The effect of nano-sized stainless steel powder addition on mechanical and physical properties of micropowder injection molded part[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 223–232.
- [20] BAI Y, WALL C, PHAM H, et al. Characterizing binder–powder interaction in binder jetting additive manufacturing via sessile drop goniometry[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(1): 011005.
- [21] GAMON A, ARRIETA E, GRADL P R, et al. Microstructure and hardness comparison of as-built inconel 625 alloy following various additive manufacturing processes[J]. *Results in Materials*, 2021, 12: 100239.

(下转第 109 页)

Research Progress of Acoustic Emission Detection Technology in Laser Processing

XIE Xiaozhu^{1,2}, OU Deyi¹, LIU Tao¹, HE Jiale¹, HU Wei¹, LONG Jiangyou¹

(1. Laser Micro/Nano Processing Lab, School of Electromechanical Engineering,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Experiment Teaching, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

[ABSTRACT] As an advanced manufacturing technology, laser processing has been widely used in many industries such as instrument and apparatus, aerospace, medical and health community, and automobile manufacturing due to its powerful processing ability. However, there are still some shortcomings in laser processing, such as unclear processing mechanism, difficult real-time monitoring and unable to feedback on the processing state in time, and lack of classification and characterization of the processing structures or defects. The research shows that it is a reasonable technical solution to combine the detection technology with laser processing to regulate the process. As a dynamic nondestructive detection technology, acoustic emission technology has been proved to be an efficient and flexible detection method among various technologies. Combining acoustic emission technology with laser processing to realize online detection of laser processing has become a research hotspot at home and abroad. In this paper, the research status of introducing acoustic emission technology into laser processing by domestic and foreign scholars is reviewed. The characteristics of acoustic emission technology are briefly described. And the acoustic emission technology principle of laser processing, the laser processing research based on acoustic emission analysis method and the application of acoustic emission technology in laser processing are emphatically analyzed. Furthermore, the future development direction of acoustic emission technology in laser processing is prospected based on the current shortcomings.

Keywords: Laser processing; Acoustic emission (AE); Characteristic parameters; Waveform analysis; Online detection

(责编 晓月)

(上接第 97 页)

Influence of Binder Jetting Additive Manufacturing Process Parameters on Forming Quality of H13 Mold Steel

YANG Yongqiang, HUANG Kun, WU Shibiao, ZHANG Yue, ZHOU Hanxiang

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

[ABSTRACT] In order to exploring the influence of process parameters on the forming quality of H13 die steel, the binder jetting additive manufacturing experiment was carried out with different layer thickness and the binder saturation. The influence of layer thickness and binder saturation on forming quality was analyzed, with testing the relative density and dimensional accuracy of green parts as well as the microhardness, surface roughness and density of sintered parts. The results indicate that the layer thickness and the binder saturation can significantly affect the forming quality of the parts. The relative density of the green part decreases with the increase of layer thickness. Due to the binder saturation increasing, the dimensional accuracy and the relative density of the green part decrease, and the surface roughness of the sintered part increase. When the layer thickness and binder saturation are 75 μm and 80% respectively, the relative density of the green part reaches the maximum value of 55.8%, but the sintering density is merely 79.5%. Once the layer thickness and the binder saturation increased to 150 μm and 125% respectively, the sintered sample obtained the highest density of 95.7%, with the microhardness of 785.7HV₁. It makes up for the vacancy of forming and sintering process parameters of H13 die steel in binder jetting additive manufacturing filed.

Keywords: Additive manufacturing (AM); Binder jetting additive manufacturing (BJAM); H13 mold steel; Surface roughness; Powder layer thickness; Binder saturation

(责编 阳光)