

# 3D打印纯铜坯体热脱脂过程形状优化研究

曹文鑫<sup>1,2</sup>, 赵坤龙<sup>1,2</sup>, 叶之杰<sup>1,2</sup>, 石东萌<sup>2</sup>, 刘同<sup>2</sup>, 吕华港<sup>2</sup>, 王建东<sup>3</sup>, 张宇民<sup>1,2</sup>,  
朱嘉琦<sup>1,2</sup>, 韩杰才<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

(2. 哈尔滨工业大学 郑州研究院, 河南 郑州 450000)

(3. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 铜及其合金因其高导热性在热管理领域展现出巨大的应用潜力, 3D打印技术是拓展其应用场景的关键。脱脂技术是限制其打印技术发展的主要因素之一。本研究建立了粘结剂喷射(binder jetting, BJ)打印坯体的热脱脂质量量化指标, 并对BJ打印坯体内部的粘结剂分布进行了优化, 对不同优化方式的优化结果进行了对比与实验验证。研究发现, 坯体内部的粘结剂分布优化区域的最佳参数为 $S_1/S_0=0.6$ ,  $R_1/R_0=0.4$ ,  $R_2/R_0=0.8$ 。粘结剂空间分布的形状优化结果也呈现出上窄下宽的喇叭形状。对其进行打印验证, 发现其打印效果并无明显差异。对相同整体粘结剂含量的不同粘结剂分布策略的抗压强度进行分析发现, 形状优化相较于未优化时提高了10%。

**关键词:** 间接3D打印; 坯体; 热脱脂; 形状优化; 粘结剂分布

中图法分类号: TF123.9; TG146.1<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)01-0146-07

## 1 引言

相较于较为成熟的不锈钢、钛合金等金属的3D打印技术, 纯铜及铜合金的增材制造研究起步时间较晚<sup>[1-3]</sup>, 主要原因在于铜的高导热性容易导致分层、卷边和零件失效。此外, 纯铜还是一种高反射金属, 传统的选择性激光熔化技术难以对其进行加工成型<sup>[3-6]</sup>。相较于其他需要较大能量输入的3D打印技术, 粘结剂喷射工艺(binder jetting, BJ)在纯铜打印领域展现出了巨大的活力<sup>[7-8]</sup>。然而, 作为一种间接成型工艺, 如何保证脱脂过程中打印件的稳定性以及降低粘结剂残炭污染至关重要。为了减少聚合物残留对于基体材料的不利影响, 常从3个方面考虑<sup>[9-12]</sup>: (1)减少在热脱脂过程中要脱除粘结剂的含量; (2)调节脱脂工艺; (3)对粘结剂进行改性, 采用残炭量相对较少的有机物作为粘结剂的组元, 以上3个方面均可以使残炭量降低。

当前, 关于坯体在脱脂过程的研究主要集中于坯体的有限元分析。Ying等<sup>[13]</sup>分析了粉末注射成型坯体在热脱脂过程中的应力应变情况, 研究了试样大小、表面积和加压气氛对内部应力的影响, 发现在加压气氛中, 坯体的内部应力可以有效减少。Stangle等<sup>[14]</sup>考虑了液态聚合物的毛细管流动和聚合物分解产生的气体在多孔介质中的传输, 模拟了热脱脂过程中产生的内应力, 发现热脱脂

过程中, 从表面到外部大气的对流传质对内部应力的影响很大。Shi等<sup>[15]</sup>开发了一个基于扩散的数值模型来预测坯体热脱脂过程的动力学。该建模考虑了聚合物的分解、液态扩散和气体在多孔外层中的扩散现象。模拟结果表明, 聚合物的分解引起的内压可以很高, 甚至产生的内压最大可达到0.8 MPa。Belgacem等<sup>[16]</sup>使用316L不锈钢原料比较了不同加热速率下坯体的热脱脂动力学, 使用Kissinger和Ozawa方法计算了热重实验的动力学参数, 结合传热方程和粘结剂的热分解动力学对坯体热脱脂过程进行分析, 所得数值模拟结果与实验数据吻合较好。然而上述研究局限于对于热脱脂工艺以及粘结剂成分设计的指导。近来, 新兴的灰度化BJ打印可以通过局部喷墨量的控制, 进而实现对坯体内部的粘结剂分布的控制(如图1所示), 为坯体残炭量最小化研究提供了新的可能<sup>[12,17]</sup>。

形状优化能实现材料的高效利用<sup>[18]</sup>, 它可以根据优化指标, 获得最优的工件形状, 在满足限制条件的前提下, 最大化或最小化优化目标, 达到轻量化目的<sup>[19]</sup>。目前, 限制坯体热脱脂过程粘结剂分布优化发展的主要因素有2个: (1)缺少关于BJ打印坯体的热脱脂理论模型, BJ坯体热脱脂的热-力-气的耦合多物理场过程尚未清晰<sup>[12]</sup>。 (2)目前关于坯体脱脂质量的量化标准报道较少,

收稿日期: 2025-05-08

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M700036, 2023T160156)

作者简介: 曹文鑫, 男, 1989年生, 博士, 研究员, 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150080, E-mail: caowenxin@hit.edu.cn

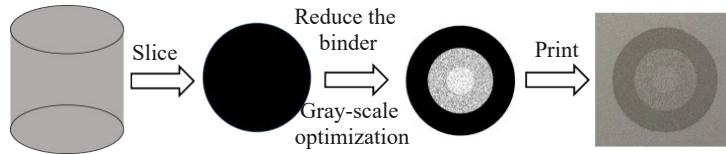


图1 灰度BJ打印原理图

Fig.1 Schematic diagram of gray-scale binder jetting

研究者们多采用烧结后工件的整体质量(如孔隙率的大小,有无开裂、鼓泡、塌陷、变形等缺陷)定性评价脱脂质量<sup>[20]</sup>,主要原因在于脱脂件的强度较差且难以直接观察。综上所述,有效的热脱脂理论模型以及热脱脂质量量化标准的缺乏是限制坯体内部粘结剂分布优化发展的主要原因。

本研究从保证坯体热脱脂过程稳定性的同时减少打印粘结剂使用量出发,采用前期工作建立的基于三乙二醇二甲基丙烯酸酯(TEG-DMA)粘结剂的BJ打印纯铜坯体热脱脂有限元模型,建立坯体热脱脂性能的量化指标,对坯体内部的粘结剂分布策略进行了优化,并对比扫描优化与形状优化方法,进而获得最优的粘结剂分布,并对不同的粘结剂分布策略的热脱脂效果进行了实验验证。

## 2 模型建立

### 2.1 热脱脂过程有限元模型建立

坯体的热脱脂过程是个多物理场过程,涉及到热、力、气等多物理场。本工作采用TEG-DMA作为打印粘结剂,采用粒径分布主要在25~53 μm。平均粒径为36 μm的纯铜粉末作为打印原料。以直径为D(D=2R<sub>0</sub>,R<sub>0</sub>为半径),高度为H的圆柱形坯体为研究对象,采用作者前期的研究工作<sup>[12]</sup>建立多物理场有限元模型评估热脱脂过程中粘结剂含量的变化,并选择5 °C/min的加热速率,分析加热至600 °C的热脱脂变化过程。此外,选择下列公式作为坯体力学性能的控制方程<sup>[21]</sup>:

$$\nabla \sigma + \mathbf{F}_v = 0 \quad (1)$$

$$\sigma = \mathbf{C}\varepsilon + \alpha_T \Delta T \mathbf{I} + \alpha_B p \mathbf{I} \quad (2)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{6} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + \tau_{xy}^2 \quad (3)$$

其中,  $\sigma$  是柯西应力张量(Pa),  $\varepsilon$  是应变,  $\mathbf{F}_v$  表示体积力(N),  $p$  代表孔隙压力(Pa);  $\mathbf{C}$  是弹性矩阵;  $\Delta T$  是温差(°C);  $\alpha_B$  是 Biot-Willis 系数, 该系数没有明确的物理意义, 根据经验一般在0.5~0.8之间取值, 在这里取值为0.6,  $\alpha_T$  是热膨胀系数(°C<sup>-1</sup>),  $\mathbf{I}$  是二阶恒等张量,  $\sigma_i$  是第  $i$  个单元所受应力,  $\sigma_x$  是  $x$  方向所受应力,  $\sigma_y$  是  $y$  方向所受应力,  $\sigma_z$  是  $z$  方向所受应力,  $\tau_{xy}$  是剪切应力。

### 2.2 热脱脂过程扫描优化分析

以坯体边界1/2高度处( $h=1/2H$ )记录点的水平偏

移量( $d$ )作为坯体脱脂质量的指标(如图2a所示),认为该点的偏移量越大,热脱脂的质量越差,反之则热脱脂质量越好。值得注意的是,由于没有考虑到热脱脂过程中铜粉烧结(烧结温度在850~950 °C附近)对于力学性能的影响,本研究认为该点偏移量的大小与热脱脂质量成正相关,将该偏移量的变化作为粘结剂分布优化的指标,指导粘结剂分布策略,而不考虑该点偏移量的绝对值大小。设置扫描优化模型如图2b所示,设置整体圆柱模型分为两部分,即粘结剂饱和度为  $S_0$ (粘结剂占孔隙的体积比设为15%)的深色区域以及上表面半径为  $R_1$ ,下表面半径为  $R_2$  的粘结剂含量为  $S_1$  圆台浅色区域。对其半径值及  $S_1$  的大小进行扫描,确定最优解。

### 2.3 热脱脂过程形状优化分析

与上述的几何模型设置一致,为了减少计算量,形状优化用初始模型设置为二维旋转对称模型ABCD,如图3所示,其中AD表示模型的对称旋转轴。模型可以看作是由粘结剂分布优化区域AGHD和固定粘结剂含量区域GBCH组成。选择红线EF表示可移动形状优化区域边界。值得注意的是,AEFD区域的矩形形状仅代表优化前的区域形态,且AEFD区域初始大小由  $R_1$  控制。选择模型AGHD为自由形状域,模型的上下边界为辊支撑,意味着优化过程中边界的端点E和F能够在模型的上下底线AG和HD上进行移动,EF的形状是本研究中设置的优化对象。

为了保证优化结果的合理性,一般选取优化边界EF

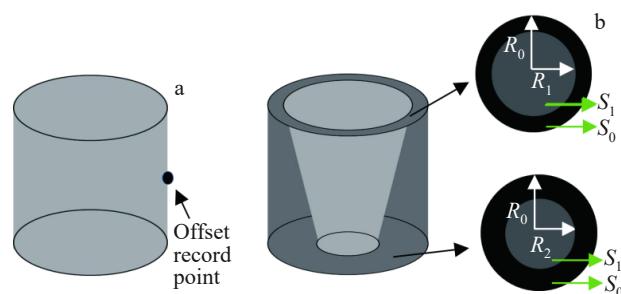


图2 优化指标及扫描优化策略示意图

Fig.2 Schematic diagrams of optimization indicator (a) and scanning optimization strategies (b) ( $S_0$  and  $S_1$  represent different binder contents within the green part)

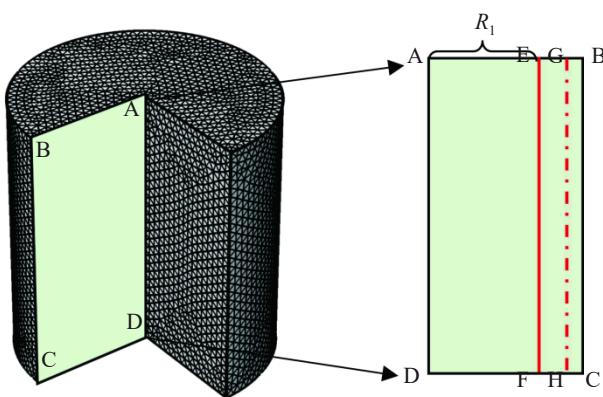


图3 形状优化示意图

Fig.3 Schematic diagram of shape optimization

移动上限为 $d_{\max}$ , 边界的形变范围为 $\pm d_{\max}$ , 基于移动渐近法优化算法设置迭代次数为100次, 优化容差设为 $10^{-6}$ , 目标缩放选择基于初始解, 选定内部的相对墨量为0.6,  $T$ 设为100 °C, 限定优化区域的体积下限为 $V$ (AEFD的初始面积)不变。

### 3 结果与分析

#### 3.1 热脱脂过程扫描优化

首先考虑了最简单的同心灰度化策略( $R_1=R_2$ ), 改变内部优化区域的图形灰度, 相应的是局部粘结剂饱和度的改变, 如图4所示。图中x轴坐标是灰度优化区域相对粘结剂含量, 它代表 $S_1/S_0$ , 这里 $S_0=0.15$ ; y轴代表着灰度优化区域的相对半径 $R_1/R_0$ 。偏移量代表记录点在热脱脂600 °C时的最大偏移量。根据图4发现, 低粘结剂含量以及大的相对半径值 $R_1/R_0$ 会导致坯体的偏移量 $d$ 快速增加。由图可知, 粘结剂含量在0.5~0.9的范围内变化梯度相对较小, 相对半径在0.6以下的范围时对坯体的影响较小。

为了尽量减少粘结剂残余对于坯体性能的影响, 对不同相对半径以及不同粘结剂相对含量对应的粘结剂相

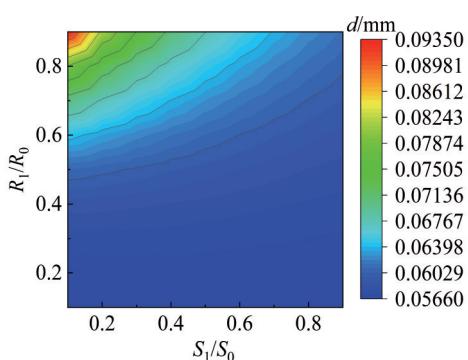


图4 优化区域粘结剂相对含量及相对半径对偏移量d的影响

Fig.4 Influence of relative content and relative radius of the binder in optimized area on the offset  $d$ 

对减少量(相对于未局部粘结剂优化前的打印坯体的粘结剂含量, 饱和度为 $S_0$ 、半径为 $R_0$ 的打印坯体)进行了计算, 如图5所示。优化后粘结剂相对减少量的变化趋势与偏移量的变化趋势是相同的, 随着粘结剂相对含量的增加以及相对半径的减少, 粘结剂的减少量变化趋势也趋缓。将图4中的等高线引入, 如图5中的红线所示。确定了一个变化相对平缓的区域(红线①以下区域), 在这个区域内, 偏移量的减少变得较为缓慢, 有理由相信, 这个区域接近于灰度优化前坯体的力学性能。除此之外, 为了保证坯体的层间结合力, 需要对粘结剂饱和度设置一个下限, 即 $S_1$ 为9%时, 相对粘结剂含量为0.6( $S_1/S_0$ )。为了更多地减少粘结剂的含量, 取黑线②与红线①的交点(0.6, 0.6)作为内部优化区域的打印参数, 即相对饱和度为0.6, 相对半径为0.6。也可以适当地根据打印情况增加相对饱和度, 减小相对半径。

更一般地, 在同心灰度化策略分析基础上, 选取( $S_1/S_0$ ,  $R_1/R_0$ )分别为:(0.6, 0.5)、(0.6, 0.6)和(0.6, 0.7)进行研究, 取圆柱上表面优化区域的半径 $R_1/R_0$ 为 $x$ ( $0.1 < x < 0.9$ ), 为了保证粘结剂减少量, 底面优化区域的半径 $R_2/R_0$ 分别为 $1-x$ 、 $1.2-x$ 、 $1.4-x$ 。对不同的 $x$ 进行了验证, 探索 $x$ 的取值对于不同坯体尺寸(由上至下分别是40 mm×40 mm、20 mm×20 mm、10 mm×10 mm)记录点偏移量的影响来探索相同粘结剂含量下最小偏移量的粘结剂分布方式, 结果如图6所示。整体来看, 随着 $R_1/R_0$ 的增加, 偏移量有整体增加的趋势, 但似乎这个趋势受坯体尺寸的影响较小。这意味着在进行粘结剂分布优化时, 可以适当地增加底部粘结剂灰度优化区域的范围。不能忽视的是当坯体尺寸为40 mm×40 mm和20 mm×20 mm时, 偏移量会略有下降然后上升, 然而对于10 mm×10 mm的坯体来说并没有这样的趋势出现, 这可能与优化区域粘结剂含量随着顶部相对半径 $R_1/R_0$ 的变化导致优化区域粘结剂含量差异有关系, 换句话说, 顶层优化区域相对半径较小时, 优化区域的体积较大, 坯体内部整体的粘结剂含量下降, 导致了过大的偏移量。而且偏移量的极小点对应的

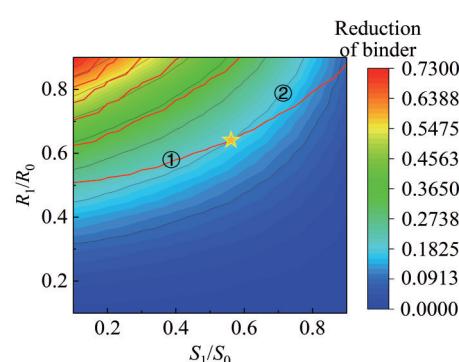
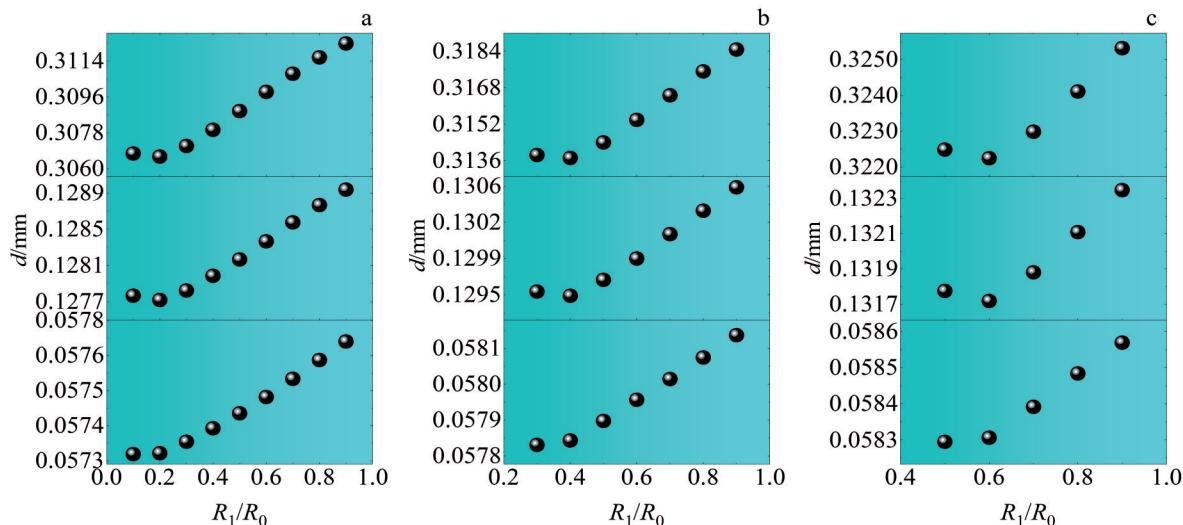


图5 粘结剂的相对减少量

Fig.5 Relative reduction amount of the binder

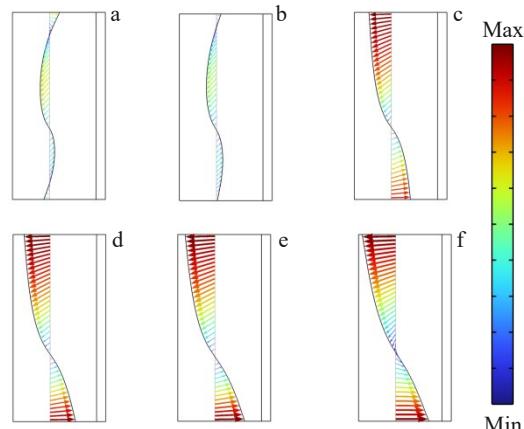
图6 不同( $S_1/S_0, R_1/R_0$ )条件下 $d$ 与 $R_1/R_0$ 之间的关系Fig.6 Relationship between  $d$  and  $R_1/R_0$  under different ( $S_1/S_0, R_1/R_0$ ) conditions: (a) (0.6, 0.5), (b) (0.6, 0.6), and (c) (0.6, 0.7)

相对半径 $R_1/R_0$ 会随着优化区域范围的增加而增加,从图6a的0.2到6b的0.4,最后到6c的0.6。本研究认为这个偏移量的极小点是最佳灰度化策略。值得一提的是,这三个极小点对应的底面优化区域的相对半径 $R_2/R_0$ 都是0.8。这表明底部相对半径为0.8时,是灰度优化区域最优分布策略。结合上述同心灰度化策略的讨论可以得出,基于参数扫描确定的最佳粘结剂分布优化策略为: $S_1/S_0=0.6, R_1/R_0=0.4, R_2/R_0=0.8$ 。

### 3.2 形状优化

为了探索进一步优化粘结剂分布的可能,基于 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 坯体,首先选择扫描优化最优结果( $R_1/R_0$ 为0.4)为形状优化初始条件,对不同 $d_{\max}$ 的优化效果进行了探索。优化结果如图7所示,箭头由优化前边界位置指向优化后对应点,图例颜色代表优化前后偏移量的大小。可以明显看出当 $d_{\max}$ 为0.8和1.0 mm时,形状优化的趋势不太明显,优化结果不太稳定,但还是能看出优化结果倾向于增加优化区域AEFD中靠近下底的区域,即优化边界EF靠近坯体底端的部分偏向于BC。这主要是因为优化移动距离相对较小,导致优化结果趋于局部最佳。随着 $d_{\max}$ 值的增加,形状优化的效果逐渐趋于统一,优化区域AEFD中靠近下底的区域占比逐渐增加,但整体优化结果有趋于稳定的趋势。形状优化后,各偏移量如表1所示。

从表1整体来看,各个 $d_{\max}$ 对应的优化结果偏移量,尽管可以看出明显的优化趋势,但偏移量的绝对值差别

图7 不同 $d_{\max}$ 取值的优化效果对比Fig.7 Optimization effects with different  $d_{\max}$  values: (a) 0.8 mm, (b) 1.0 mm, (c) 1.2 mm, (d) 1.4 mm, (e) 1.6 mm, and (f) 1.8 mm

不是太大,主要原因在于在粘结剂含量减少前坯体本身强度相对较高,重力对于记录点偏移量的影响相对较少。而且模型设置为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 坯体,对于较大尺寸的坯体这种优化效果可能会更加明显。因此本研究更偏向于分析优化效果的相对变化趋势。当 $d_{\max}$ 值从0.8 mm增加到1 mm时,两者之间并没有因为 $d_{\max}$ 的增加而促使优化效果的提升,偏移量不降反增。当 $d_{\max}$ 的值继续增加时,偏移量开始出现逐渐下降的趋势,对应优化区域的形状也均趋向于上窄下宽的喇叭形状。这与上述参数扫描部分的优化结论是类似的。

表1 不同的 $d_{\max}$ 值对应的优化后偏移量Table 1 Optimized offsets corresponding to different  $d_{\max}$  values

$d_{\max}/\text{mm}$	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
Offset/ $\times 10^{-3}\text{ mm}$	8.5372	8.5374	8.5377	8.5373	8.5367	8.5357

除了考虑优化区域的形状外,不能忽略的是优化区域粘结剂含量  $S_1$  对于形状优化的影响。以  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的坯体为例,选取不同的  $S_1/S_0$ ,优化结果如图 8 所示。当  $S_1/S_0$  小于 0.5 时,形状优化结果显示优化边界 EF 靠近坯体上边界 AE 的部分向边界 BC 扩张,反之向坯体内部扩张。主要原因在于当  $S_1/S_0$  过低时,形状优化结果较难收敛,优化限制条件(优化区域体积保持不变)变弱,靠近下底面的优化区域减小,导致记录点偏移量减小。同时,由于优化限制条件的影响,靠近上底面区域的体积占比增加。当粘结剂含量大于 0.5 时,形状优化结果逐渐趋于稳定,饱和度为  $S_1$  的区域形状呈现出一致的优化结果,可以认为优化区域相对粘结剂的含量大小并不影响形状优化结果。

### 3.3 粘结剂分布优化策略实验验证

为了更进一步验证上述优化结果的有效性,本节选取如图 9 中 3 种粘结剂分布策略,进行打印实验验证。

图 9a 和 9b 中区域①与区域②的粘结剂饱和度比值取为 0.6,取 9a 和 9b 中优化区域①体积为  $V_1$ ,未优化区域②部分的体积为  $V_2$ ,由上述分析可知  $V_1/(V_1+V_2)$  可近似为 0.36。设置图 9c 中局部粘结剂含量相同,及有效饱和度设置为 0.2,图 9a 和 9b 中未优化区域②的粘结剂饱和度也设置为 0.2,与之相应的,粘结剂分布优化区域①的饱和度为 0.12(未优化区域的 0.6 倍)。由此不难得出,优化后,粘结剂含量相较于优化前下降了 14.4%。对其进行打印,打印后坯体进行固化处理,固化后打印件如图 10 所示,可以明显看出打印前后坯体的外观并无差别。主要原因在于边界处粘结剂含量固定,保证了 BJ 打印件的精度。因此可以认为粘结剂分布优化对于打印件的精度没有影响。

对不同打印策略的坯体进行热脱脂实验处理,脱脂升温工艺与模拟一致:在氮气气氛下,使用  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

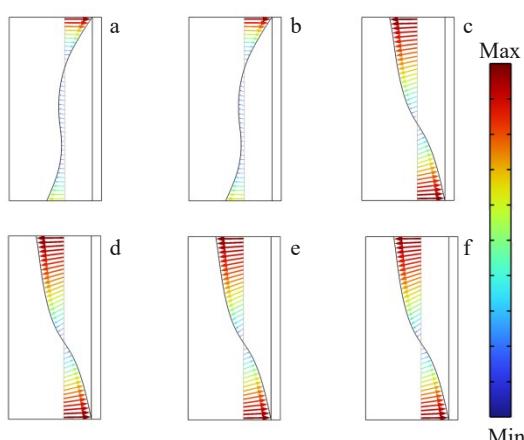


图 8 优化区域不同的  $S_1/S_0$  的优化效果

Fig.8 Optimization effects with different  $S_1/S_0$  values in optimization areas: (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6, (e) 0.7, and (f) 0.8

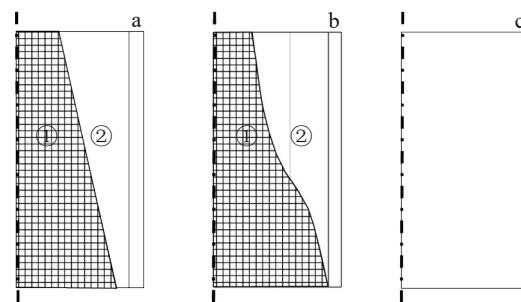


图 9 3 种粘结剂分布策略

Fig.9 Three binder distribution strategies: (a) based on parameter scanning, (b) shape-based optimization, and (c) without optimization

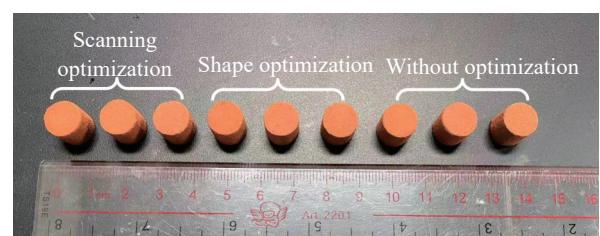


图 10 不同粘结剂分布策略的坯体打印效果

Fig.10 Printing effects of green parts with different binder distribution strategies

的升温速率升温至  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并进行降温处理,无保温时间。脱脂过程中观察不同温度时不同粘结剂分布策略打印出坯体的形变,如图 11 所示。分析发现,不同粘结剂分布策略的打印件,脱脂质量(脱脂过程中坯体的形变)几乎无差别,可认为优化后的打印坯体减少粘结剂含量带来的坯体力学性能的损失不会影响脱脂质量。

为了更进一步对比优化后的粘结剂分布策略与未优化的粘结剂分布之间的差异,设计了整体相同粘结剂含量的两组模型,对比两者在热脱脂质量上的差异(不同粘结剂分布策略打印件的强度差异)。为了保证 3 种粘结剂分布策略下打印坯体整体打印粘结剂用量一致,取无粘结剂分布优化的有效饱和度为 15%,根据整体粘结剂恒定规则,求出 9a 和 9b 中区域①和②对应的有效饱和度分别为 10.5% 和 17.5%。

由于热脱脂质量很难根据观察直接得到,对不同打印件的力学性能进行对比,对打印后的  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  坯体进行抗压强度测试,测试结果如图 12 所示。分析图 12 不难发现,在优化前后其力学性能具有明显的差异,抗压强度可提升 10% 左右,与之相对应的是,形状优化结果与参数扫描优化结果相比,尽管具有一定程度的提升,但优化幅度较小,可能原因在于实际打印过程中粘结剂的渗透,导致两种优化策略之间的差异较小。

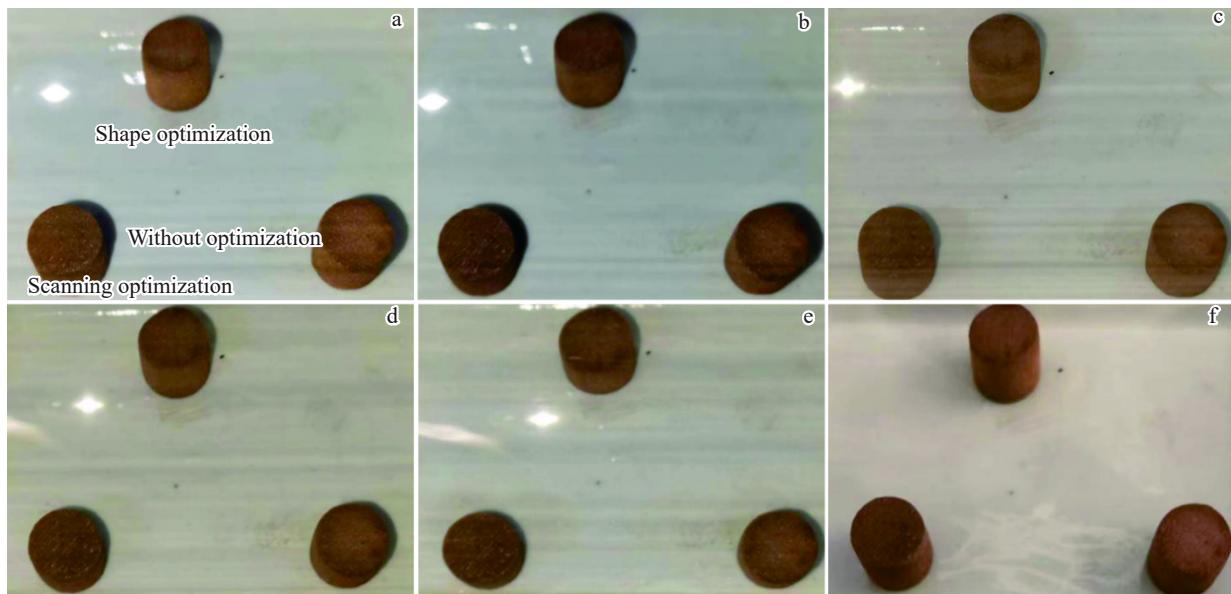


图11 不同脱脂温度时坯体的脱脂效果

Fig.11 Debinding effects of green parts obtained at different debinding temperatures: (a) 350 °C, (b) 400 °C, (c) 450 °C, (d) 500 °C, (e) 550 °C, and (f) 600 °C

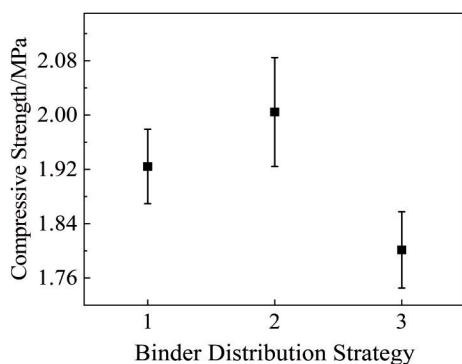


图12 不同粘结剂分布策略的抗压强度

Fig.12 Compressive strength of different binder distribution strategies (1: based on parameter scanning; 2: shape-based optimization; 3: without optimization)

## 4 结论

1) 基于参数扫描的粘结剂分布优化,确定了坯体内部的粘结剂分布优化区域的最佳参数为 $S_1/S_0=0.6$ , $R_1/R_0=0.4$ , $R_2/R_0=0.8$ ,该参数不受坯体尺寸的影响。

2) 形状优化结果受 $d_{\max}$ 值影响较大,粘结剂含量对优化结果影响较小,但在低粘结剂含量条件下,很难得到较优的粘结剂分布策略。在相同的粘结剂含量条件下,形状优化与参数扫描产生类似的上窄下宽优化结果。

3) 两种优化策略优化后,相较于未优化粘结剂分布策略整体粘结剂含量下降了大约14.4%。不同粘结剂分布策略的打印坯体的打印效果并无任何差别,在不同热脱脂温度时的坯体也没有任何差异。相同的粘结剂含量

条件下,形状优化的抗压强度能最优,要比未优化时提升10%左右。

## 参考文献 References

- [1] Constantin L, Wu Z P, Li N et al. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 35: 101268
- [2] Wang Jiandong(王建东), Guan Yao(管瑶), Yang Jinshui(杨金水) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2025, 54(1): 126
- [3] Ikeshoji T T, Nakamura K, Yonehara M et al. *JOM*[J], 2018, 70: 396
- [4] Yadav S, Paul C P, Jinoop A N et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 58: 984
- [5] Liu X, Wang H R, Kaufmann K et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2023, 85: 314
- [6] Wu Shiliang(吴世亮), Wang Sujuan(王素娟), Wang Haitao(王海涛). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2024, 53(4): 1217
- [7] Miyanaji H, Rahman K M, Da M et al. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36: 101587
- [8] Miyanaji H, Ma D, Atwater M et al. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 32: 100960
- [9] Riwani T, Ramkumar P. *Heat Transfer Engineering*[J], 2025, 46(7): 615
- [10] Enneti R K, Park S J, German R M et al. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2012, 27(2): 103
- [11] Yang Xianfeng(杨现峰), Xie Zhipeng(谢志鹏), Liu Guanwei(刘冠伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(S2): 138
- [12] Zhao K L, Ye Z J, Su Z H et al. *Additive Manufacturing*[J],

- 2025, 105: 104793
- [13] Ying S J, Lam Y C, Chai J C et al. *Computational Materials Science*[J], 2004, 30(3-4): 496
- [14] Stangle G C, Aksay I A. *Chemical Engineering Science*[J], 1990, 45(7): 1719
- [15] Shi Z, Guo Z X, Song J H. *Acta Materialia*[J], 2002, 50(8): 1937
- [16] Belgacem M, Thierry B, Jean-Claude G. *Powder Technology*[J], 2013, 235: 192
- [17] Cheng Y L, Li Y T, Yang Y T et al. *Additive Manufacturing*[J], 2022, 56: 102929
- [18] Cui C J, Ma J K, Liu B. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2019, 161: 193
- [19] Ozturk F, Cobanoglu M, Ece R E. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*[J], 2024, 37(9): 3084
- [20] Esan O J, Hansen C J, Peterson A M. *Ceramics International*[J], 2024, 50(6): 9789
- [21] Li J, Zhang C F, Yin R M et al. *Ceramics International*[J], 2019, 45(7): 8166

## Shape Optimization in Thermal Debinding Process of 3D-Printed Pure Copper Green Parts

Cao Wenxin<sup>1,2</sup>, Zhao Kunlong<sup>1,2</sup>, Ye Zhijie<sup>1,2</sup>, Shi Dongmeng<sup>2</sup>, Liu Tong<sup>2</sup>, Lv Huagang<sup>2</sup>, Wang Jiandong<sup>3</sup>, Zhang Yumin<sup>1,2</sup>, Zhu Jiaqi<sup>1,2</sup>, Han Jiecai<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(2. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450000, China)

(3. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Copper and its alloys exhibit great application potential in the field of thermal management due to their high thermal conductivity, while 3D printing technique serves as the key to expand their applications. Debinding technique is one of the main factors restricting the development of 3D printing technique. Quantitative indicators for the thermal debinding quality of binder jetting (BJ) printed green parts are established. The binder distribution inside the BJ-printed green parts is optimized, and the optimization results of different strategies are compared and verified through experiments. The results show that the optimal parameters for the optimized area of the binder distribution inside the green part are  $S_1/S_0=0.6$ ,  $R_1/R_0=0.4$ , and  $R_2/R_0=0.8$ . The shape-optimized result of the binder distribution also shows a flared shape, which is narrower at the top and wider at the bottom. After printing verification, it is found that there is no significant difference in the printing effect. Analysis of the compressive strength of different binder distribution strategies with the same overall binder content reveals that the shape optimization improves the performance by 10% compared with that of the non-optimized case.

**Key words:** indirect 3D printing; green part; thermal debinding; shape optimization; binder distribution

Corresponding author: Wang Jiandong, Ph. D., Associate Professor, College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, P. R. China, wangjiandong@hrbeu.edu.cn; Zhang Yumin, Ph. D., Professor, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, P. R. China, E-mail: zhym@hit.edu.cn