颗粒材料计算力学专题

增材制造中滚筒铺粉工艺参数对尼龙粉体 铺展性的影响研究¹⁾

张江涛* 谭援强*,2) 纪财源* 肖湘武* 姜胜强*

*(华侨大学制造工程研究院,福建厦门 361021) †(湘潭大学机械工程学院,湖南湘潭 411105)

摘要 铺粉工艺是基于粉床的增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术中的关键工序之一. 滚筒铺粉工艺参数包括铺粉层厚 H, 滚筒直径 D, 滚筒的旋转速度 ω 和平移速度 V, 对增材制造工艺中的粉体铺展性具有重要影响. 本文以尼龙粉体为研究对象, 采用离散元法 (discrete element method, DEM) 模拟其滚筒铺展过程, 建立沉积分数、覆盖率和沉积速率 3 个铺展性指标. 采用中心复合设计 (central composite design, CCD) 生成 30 组仿真案例, 通过响应曲面法 (response surface methodology, RSM) 拟合了 3 个铺展性指标的回归模型. 采用方差分析证明了回归模型的准确性和预测的有效性, 并详细分析了工艺参数对粉体铺展性指标的影响规律. 结果表明, 铺粉层厚 H 是最大的影响因素, 平移速度 V 是次要的影响因素, 滚筒直径 D 和滚筒的旋转速度 ω 对粉体铺展性指标影响较小, HV 和 DV 为影响粉体铺展性指标的主要交互因素. 以 3 个铺展性指标为优化目标, 采用期望值法对滚筒铺粉工艺参数进行多目标优化, 获得了预测的最优铺粉工艺参数和粉体铺展性指标组合, 并通过实验验证了粉体铺展性指标的预测结果与实验结果吻合良好. 本文的研究结果可指导增材制造中滚筒铺粉工艺参数的优化.

关键词 增材制造,粉体铺展性,参数优化,离散元法,响应曲面法

中图分类号: TB12 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-240

RESEARCH ON THE EFFECTS OF ROLLER-SPREADING PARAMETERS FOR NYLON POWDER SPREADABILITY IN ADDITIVE MANUFACTURING¹⁾

Zhang Jiangtao * Tan Yuanqiang *, 2) Ji Caiyuan * Xiao Xiangwu † Jiang Shengqiang †

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

[†] (School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract The powder spreading process is one of the key processes in the powder-bed-based additive manufacturing (AM) technology. The roller-spreading parameters include the powder spreading layer thickness H, roller's diameter D, roller's rotational speed ω and translational velocity V, which have a major impact on the powder spreadability in AM processes. In this paper, the nylon powder was taken as the research object, and the discrete element method (DEM) was

²⁰²¹⁻⁰⁵⁻³⁰ 收稿, 2021-07-12 录用, 2021-07-13 网络版发表.

¹⁾ 国家自然科学基金 (11772135)、福建省引导性项目 (2019H0018) 和湖南省自然科学基金项目 (2020JJ5541) 资助.

²⁾ 谭援强, 教授, 主要研究方向: 制造工艺过程模拟及优化、离散元方法及应用、摩擦学及应用. E-mail: tanyq@hqu.edu.cn

引用格式: 张江涛, 谭援强, 纪财源, 肖湘武, 姜胜强. 增材制造中滚筒铺粉工艺参数对尼龙粉体铺展性的影响研究. 力学学报, 2021, 53(9): 2416-2426

Zhang Jiangtao, Tan Yuanqiang, Ji Caiyuan, Xiao Xiangwu, Jiang Shengqiang. Research on the effects of roller-spreading parameters for nylon powder spreadability in additive manufacturing. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(9): 2416-2426

张江涛等: 增材制造中滚筒铺粉工艺参数对尼龙粉体铺展性的影响研究

deployed to simulate the nylon powder spreading process by a roller. The three powder spreadability indicators including the deposition fraction, percent coverage and deposition rate were established. The central composite design (CCD) model was used to generate 30 groups of simulation cases. The regression models of three powder spreadability indicators were fitted by the response surface method (RSM). The analysis of variance was used to prove the accuracy and predicting effectiveness of regression models. In addition, the effect of process parameters on powder spreadability indicators was analyzed in detail. The results showed that the powder spreading layer thickness *H* was a leading influencing factor. The roller's translational velocity *V* was a less important influencing factor. The roller's diameter *D* and rotational speed ω had a slight influence on powder spreadability indicators. Both the *H* and *D* with *V* were determined as the main interactive factors on powder spreadability indicators. The three powder spreadability indicators were taken as the optimization goal, and the multi-objective optimization of roller-spreading parameters and powder spreadability indicators were obtained. Moreover, the optimal results were verified through the experiments. The results showed that the predicted results of powder spreadability indicators were in good agreement with experimental results. The research results in this paper can provide guidance for the optimization of roller-spreading parameters in AM.

Key words additive manufacturing, powder spreadability, parameters optimization, DEM, RSM

引言

基于粉床的增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术在工业上被广泛应用^[1-2], 铺粉工艺是该增 材制造技术的关键工序之一^[3-4], 铺展出平整均匀的 高密度粉床是制备优良性能零件的前提条件. 在薄 层粉末 (粉层厚度通常在 200 μm 以下) 的铺展过程 中, 由于微米级颗粒的粘附团聚和堵塞^[5], 造成粉床 的均匀性和密度较差, 并导致零件表面精度低和内 部孔隙等问题的出现^[6].

粉体的铺展性与粉体的流动性紧密相关但又不 同[7-8]. 粉体流动性的定义在学术界并未统一. 目前 运用较多的粉体流动性的表征方法有:休止角法[9]、 质量流率法^[10]、Hausner 指数法^[8]、剪切法^[11]等.休 止角法和质量流率法适用于自由流动的粉体,由于 增材制造粉体粒径一般小于 100 μm, 而粉末粘附和 粉末对壁面的摩擦导致粉末很难流过流量计的小孔^[8]. 因此,休止角法和质量流率法不适用于增材制造粉 体的流动性表征. FT4 粉体流变仪^[12]和 Revolution 粉体分析仪[13] 可以表征粉体在动态条件下的流动 性,在一定程度上有助于了解粉体的动态流动行为. 但是,粉体的流动行为取决于其颗粒特性(粒径分 布、颗粒形状和颗粒表面纹理)和外部条件(环境湿 度、温度和应力条件). 而现有的测试方法不是针对 薄层粉体铺展过程的,使得它们难以精确预测 AM 过程中的粉体铺展性[14].

量表征已被确定为增材制造的关键技术. Snow 等^[15] 尝试建立粉体铺展性指标,研究表明覆盖率、沉积 速率和雪崩角变化速率可定量评估粉体的铺展性. Cordova 等^[16]通过测量粉层密度来表征粉体的铺展 性. 然而,铺粉实验耗时且需要消耗大量昂贵的粉体 材料,也难以深入揭示粉体铺展过程的微观机理. 离 散元法 (discrete element method, DEM) 在模拟颗粒 物质运动方面具有独特的优势^[17-18],已被用于模拟 增材制造铺粉过程^[19-23]. 国内外学者从颗粒动力 学^[19-20]、粉床质量^[21-22]以及铺粉器的结构优化^[23] 等方面揭示铺粉过程的物理机制.针对粉体铺展性的 研究, Ahmed 等^[19]通过测量粉层空斑来评估粉体的 铺展性, DEM 仿真和实验图像分析的结果吻合良好.

粉体的铺展性指标可分为粉层质量(粉层密度、覆盖率和空斑)和粉体流动形态(沉积速率和雪崩角变化率). Escano等^[24]通过X射线成像研究了粉体铺展过程中的颗粒动力学行为.研究表明在粉体铺展过程,雪崩角几乎没有变化,而这与Snow等^[15]的研究结果相矛盾.粉体铺展性不仅与粉体的粒径粒形有关,而且与铺粉工艺参数密切相关.铺粉器的结构和速度都会影响粉体的铺展性^[5,15].但是,铺粉工艺参数对粉体铺展性的影响研究相对较少.滚筒铺粉工艺参数包括铺粉层厚、滚筒直径、滚筒的旋转速度和平移速度^[3,5].滚筒的铺粉工艺参数相对复杂,通过经验和繁琐的实验来优化铺粉过程是不可取的.因此,有必要优化滚筒铺粉工艺参数来提高粉体的铺展性.随着优化方法的发展,响应曲面法

近几年,粉体流动性和粉体铺展性的测量和定

(response surface methodology, RSM) 和遗传算法等 智能算法被用于优化参数以解决工程问题^[25]. RSM 方法通过多项式拟合因子和响应之间的关系, 分析 单因素和交互因素对响应指标的影响, 并获得最佳 参数, 是一种可靠且有效的优化方法.

本文采用 DEM 模拟尼龙粉末的滚筒铺展过程. 选择铺粉层厚、滚筒直径、滚筒旋转速度和平移速 度作为变量因子.建立沉积分数、覆盖率和沉积速 率 3 个铺展性指标.采用中心复合设计 (central composite design, CCD) 生成 30 组案例,建立 3 个指 标的回归模型.根据方差分析 (analysis of variance, ANOVA),确定单因素及交互作用对响应指标的影响. 最后,以铺展性指标为优化目标,进行了滚筒铺粉参 数的多目标优化,并通过实验验证了优化结果.本研 究有助于优化滚筒铺粉工艺参数以提高粉体铺展性.

1 研究方法

1.1 离散元模型

在 DEM 模型中, 颗粒有两种运动, 即平移运动 和旋转运动, 根据牛顿第二运动定律来描述颗粒的 运动方程^[26]

$$m_i \frac{\mathrm{d} \mathbf{v}_i}{\mathrm{d} t} = \sum_j \left(\mathbf{F}_{ij}^{\mathrm{n}} + \mathbf{F}_{ij}^{\mathrm{t}} \right) + \mathbf{F}_i^{\mathrm{g}} \tag{1}$$

$$I_i \frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t} = \sum_j \left(T_{ij}^{\mathrm{s}} + T_{ij}^{\mathrm{r}} \right) \tag{2}$$

式中 m_i , v_i , I_i 和 ω_i 分别是颗粒i的质量、平移速 度、惯性矩和旋转速度; F_{ij}^n , F_{ij}^t 和 F_i^g 分别是法向 接触力、切向接触力和重力; T_{ij}^s 和 T_{ij}^r 分别是切向 力和滚动摩擦引起的力矩.

Hertz-Mindlin 接触模型考虑了颗粒接触力^[27], 而 JKR (Johnson-Kendall-Roberts) 理论在 Hertz-Mindlin 接触模型的基础上考虑了接触区域内的黏附力^[28]

$$F_{\rm JKR}^{\rm n} = \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 - 4\alpha^{\frac{3}{2}} \sqrt{\pi \gamma E^*}$$
(3)

式中 R*, E*, y 和 a 分别是等效半径、等效杨氏模量、表面能密度和接触半径.

接触半径α和法向重叠δn之间的关系为^[29]

$$\alpha^{4} - 2R^{*}\delta_{n}\alpha^{2} - \frac{4\pi\gamma}{E^{*}}R^{*2}\alpha + R^{*2}\delta_{n}^{2} = 0$$
 (4)

根据式 (3) 和式 (4), 即使颗粒非接触时, 黏附力仍然

存在. JKR 模型提供了颗粒间非接触状态下黏附力的计算方法. 颗粒之间的临界间隙δ_{n,c} 和临界接触半径α_c通过下式计算^[28]

$$\delta_{\rm n,c} = \frac{\alpha_{\rm c}^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_{\rm c}}{E^*}} \tag{5}$$

$$\alpha_{\rm c} = \frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^{*}} \left(\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \tag{6}$$

当颗粒之间的间隙大于临界间隙时,黏附力为零.当 颗粒未接触且间隙小于临界间隙时,JKR 模型提供 了黏附力的最大值 *F*_{pullout},其计算公式为^[28-29]

$$F_{\text{pullout}} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^* \tag{7}$$

关于 JKR 接触模型的信息详见参考文献 [28-29], 为了简洁起见, 本文不予赘述.

1.2 铺粉工艺模型

尼龙粉末是选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 中广泛使用的材料.本文所用尼龙粉 末为湖南华曙高科技有限责任公司产品 (PA3300). 在测试粉体有关参数前,将尼龙粉末放在 80 °C 的 真空炉中干燥 12 h. 通过动态颗粒分析仪 (德国莱驰 科技有限公司, Retsch Camsizer X2) 测量颗粒的粒径 分布,测得粒径 *D*₅₀ 为 49 μm,如图 1 所示.使用扫描 电子显微镜 (日本电子科技有限公司, JSM-IT500LA) 观察粉末的微观形态,如图 2 所示.从图 2中可以看 出尼龙颗粒是近球形的.因此,在 DEM 仿真中将尼 龙粉末简化成球形颗粒.DEM 参数包括物性参数 (颗粒密度、杨氏模量、泊松比和表面能)和接触参 数 (静摩擦系数、滚动摩擦系数和恢复系数).DEM 模型参数的选取详见参考文献 [30-31], 仿真中的 DEM 模型参数如表 1 所示.





图 2 尼龙粉末的微观形貌图 Fig. 2 Micro topography of nylon powders

表1 仿真中的 DEM 参数

Table 1 DEM parameters in simulation

| Parameter | Value |
|---|-------|
| powder density/(kg·m ⁻³) | 1000 |
| powder Young's modulus/MPa | 61 |
| powder Poisson's ratio | 0.35 |
| static friction coefficient of powder-powder | 0.45 |
| rolling friction coefficient of powder-powder | 0.01 |
| restitution coefficient of powder-powder | 0.80 |
| surface energy density of powder-powder/(mJ \cdot m^{-2}) | 0.1 |
| wall density/(kg·m ⁻³) | 7800 |
| wall Young's modulus/GPa | 80 |
| wall Poisson's ratio | 0.30 |
| static friction coefficient of powder-wall | 0.20 |
| rolling friction coefficient of powder-wall | 0.01 |
| restitution coefficient of powder-wall | 0.80 |
| surface energy density of powder-wall/(mJ $\cdot m^{-2})$ | 0.17 |

如图 3 所示,滚筒铺粉模型包含滚筒、送粉缸 和基板.送粉缸和基板的宽度和长度均为 3 mm 和 18 mm.由于 Y 方向上颗粒的流动对模拟结果的影 响很小,因此在 Y 方向的两侧设置周期性边界条件, 以降低计算成本.首先,产生100 000 个颗粒,在送粉 缸的上面形成粉床.其次,滚筒沿 X 轴的正方向以平 移速度 V 并逆时针旋转运动形成铺粉层 (第一层粉 末).送粉缸上升一个铺粉层厚 H,而基板下降一个 相同的铺粉层厚 H.最后,滚筒再次沿 X 轴的正方向 并逆时针旋转运动形成铺粉层 (第二层粉末).



1.3 可铺展性指标

本文采用沉积分数、覆盖率和沉积速率 3 个指标来量化评价粉体的可铺展性.在 SLS 工艺中,通过逐层铺粉、逐层扫描烧结的方式直接制造零件.只有第一层粉末铺展在上基板,而后续的粉层铺展在先前的粉层上.激光每次烧结一层粉末,因此只关注单层粉末的铺展性.故而本文所建立的指标是基于第二层粉末.采用粉层的沉积分数表征粉层密度,沉积分数 φ 的计算公式为

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{4}{3} \pi R_i^3}{LWH} \tag{8}$$

式中, *R_i* 为颗粒 *i* 的半径, *L* 和 *W* 为基板的长度和宽度, *H* 为铺粉层厚, *n* 是第二层铺粉中颗粒的总数量.

当铺粉完成后, 第一层粉末和第二层粉末分别标记为蓝色和橙色, 如图 4 所示. 根据图像灰度阈值计算蓝色和橙色像素的面积^[32]. 橙色像素与蓝色和橙色像素之和的比值定义为覆盖率

$$C = \frac{S_{\text{orange}}}{S_{\text{blue}} + S_{\text{orange}}} \times 100\%$$
(9)

式中, *S*_{blue} 和 *S*_{orange} 分别是第一层粉末和第二层粉 末的像素面积.



图 4 第一层粉末和第二层粉末分别被标记为蓝色和橙色 Fig. 4 The first and the second powder layer are marked by blue and orange colors, respectively

粉末铺展过程中,在滚筒的前面会形成粉堆.铺 展过程分为粉末积累阶段和粉末沉积阶段.如图 5 所示,粉末累积阶段对应于滚筒的初始移动阶段,粉 末不断在滚筒前面累积.粉末沉积阶段对应于滚筒 的持续移动阶段,粉末连续沉积在粉床上,粉堆的面 积随滚筒的移动不断减少,如图 6 所示. 在最后阶段, 由于粉堆被推出计算域,粉堆的质量会随着滚筒的 移动而显著降低. 忽略最后阶段对沉积速率的影响, 粉末沉积速率定义为

$$d_{\rm m} = \rho_{\rm a} W \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}x} \tag{10}$$

式中, ρ_a 粉堆的表观密度^[33], d*A*/dx 是粉堆面积随滚 筒在 *X* 方向上位移的变化率. *d*_m 表征了滚筒前面的 粉堆质量随滚筒在 *X* 方向上位移的变化速率.



图 5 粉堆的质量随滚筒在 *X* 方向上位移的关系 Fig. 5 Mass of the powder pile as a function of roller's displacement in the *X* direction

1.4 响应曲面法

由 Box 和 Wilson^[34]提出的 RSM 是一种优化随 机过程的统计方法,在因子和响应指标之间拟合多 元回归方程来探索响应指标和因子之间的定量规 律.通常,二阶多项式获得的回归方程可用于分析和 优化多元问题,其定义为^[35]



图 6 沉积阶段粉堆随时间的变化 Fig. 6 Changes of the powder pile over time during the powder deposition stage

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i x_i + \sum_{i=1}^k B_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k B_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (11)$$

式中, *y*, *B*₀, *B_i*, *B_{ii}* 和 *B_{ij}* 分别是响应项、常数项、线 性系数、二次项系数和交互项系数. *k*, *x_i* 和 *c* 分别是 变量数、输入因子和随机误差.

根据文献 [3, 5] 和实际工程中滚筒的铺粉工艺 参数,选择铺粉层厚 H,滚筒直径 D,滚筒的旋转速 度 ω 和平移速度 V 作为变量因子.因素和水平如表 2 所示.采用 RSM 的 CCD 模型生成 30 个案例. 沉积 分数 φ 、覆盖率 C 和沉积速率 d_m 的响应指标可通 过方程式 (8) ~式 (10) 计算,响应指标的结果如表 3 所示.

| | Level of process parameters | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----------|--|
| Factor – | -α | -1 | 0 | 1 | $+\alpha$ | |
| H/µm | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | |
| D/mm | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | |
| $\omega/(r \cdot min^{-1})$ | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | |
| $V/(\mathrm{mm}\cdot\mathrm{s}^{-1})$ | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 | |

| 表 2 响应面分析因子及水平 | 表 |
|----------------|---|
|----------------|---|

Table 2 Response surface analysis factors and levels

2 结果和讨论

2.1 方差分析和回归模型

根据表3的数据,对获得的数据进行方差分析

和拟合回归方程,通常认为 P 值小于 0.05, F 值较大则表明该模型显著, R² 预测值越接近于 1,表示模型 预测性越好^[35].采用 Design-Expert 软件对 3 个响应 指标和因子之间的回归模型进行分析,得到 3 个指

| | • | | Table 3 CCD desi | gn table and simula | tion results | | |
|------|--------------|------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------|--|
| Run | Input factor | | | | | Response | |
| Kuli | H/µm | D/mm | $\omega/(r \cdot min^{-1})$ | $V/(\mathbf{mm}\cdot\mathbf{s}^{-1})$ | φ | <i>C/</i> % | $d_{\rm m}/({\rm mg}\cdot{\rm mm}^{-1})$ |
| 1 | 175 | 25 | 200 | 80 | 0.426 6 | 96.20 | 0.223 9 |
| 2 | 175 | 15 | 100 | 160 | 0.381 8 | 93.66 | 0.200 4 |
| 3 | 125 | 25 | 100 | 160 | 0.310 5 | 71.57 | 0.116 4 |
| 4 | 150 | 10 | 150 | 120 | 0.371 0 | 88.52 | 0.166 9 |
| 5 | 150 | 20 | 150 | 120 | 0.385 7 | 89.17 | 0.173 6 |
| 6 | 175 | 25 | 100 | 160 | 0.402 5 | 94.80 | 0.211 3 |
| 7 | 150 | 20 | 150 | 120 | 0.386 2 | 89.58 | 0.173 8 |
| 8 | 150 | 20 | 150 | 200 | 0.299 8 | 78.83 | 0.134 9 |
| 9 | 175 | 25 | 200 | 160 | 0.390 2 | 93.97 | 0.204 8 |
| 10 | 150 | 20 | 150 | 120 | 0.384 2 | 89.69 | 0.172 9 |
| 11 | 125 | 25 | 200 | 80 | 0.350 8 | 77.69 | 0.131 6 |
| 12 | 175 | 25 | 100 | 80 | 0.443 1 | 96.69 | 0.232 6 |
| 13 | 125 | 15 | 200 | 80 | 0.353 0 | 78.05 | 0.132 4 |
| 14 | 150 | 20 | 50 | 120 | 0.408 7 | 91.83 | 0.183 9 |
| 15 | 125 | 15 | 100 | 160 | 0.282 2 | 67.09 | 0.105 8 |
| 16 | 175 | 15 | 200 | 160 | 0.371 9 | 92.75 | 0.195 2 |
| 17 | 150 | 20 | 150 | 120 | 0.390 0 | 89.96 | 0.175 5 |
| 18 | 150 | 20 | 250 | 120 | 0.372 1 | 88.23 | 0.167 4 |
| 19 | 150 | 30 | 150 | 120 | 0.392 1 | 90.34 | 0.176 4 |
| 20 | 125 | 15 | 100 | 80 | 0.364 3 | 79.99 | 0.136 6 |
| 21 | 175 | 15 | 200 | 80 | 0.422 4 | 96.05 | 0.221 8 |
| 22 | 200 | 20 | 150 | 120 | 0.440 6 | 98.29 | 0.264 3 |
| 23 | 150 | 20 | 150 | 120 | 0.383 4 | 89.66 | 0.172 5 |
| 24 | 150 | 20 | 150 | 120 | 0.385 4 | 89.67 | 0.173 4 |
| 25 | 125 | 25 | 200 | 160 | 0.288 2 | 67.44 | 0.108 1 |
| 26 | 100 | 20 | 150 | 120 | 0.269 8 | 62.91 | 0.081 0 |
| 27 | 175 | 15 | 100 | 80 | 0.430 0 | 96.46 | 0.227 9 |
| 28 | 125 | 15 | 200 | 160 | 0.263 0 | 61.95 | 0.098 6 |
| 29 | 125 | 25 | 100 | 80 | 0.378 9 | 81.41 | 0.142 1 |
| 30 | 150 | 20 | 150 | 40 | 0.407 0 | 91.70 | 0.183 1 |

(12)

| 圭 3 | CCD 设计表及仿直结里 |
|------------|--------------|
| 衣り | CCD 设计农区仍具结未 |

 Table 3
 CCD design table and simulation results

标的回归方程

 $C = 0.896\ 2 + 0.102\ 6H - 0.010\ 3\omega - 0.035\ 4V + 0.024\ 3HV - 0.026\ 3H^2 - 0.014\ 6V^2$ (13)

$$\varphi = 0.385 \ 8 + 0.042 \ 6H + 0.006 \ 7D + 0.008 \ 5\omega - 0.029 \ 1V + 0.007 \ 7HV + 0.004 \ 2DV - 0.008 \ 3H^2 - 0.001 \ 7D^2 - 0.008 \ 7V^2$$

 $d_{\rm m} = 0.173\ 6 + 0.046\ 4H + 0.003\ 0D - 0.003\ 7\omega - 0.012\ 7V + 0.001\ 2HV + 0.001\ 8DV - 0.000\ 8D^2 - 0.003\ 9V^2 \tag{14}$

沉积积分数、覆盖率和沉积速率模型的 ANOVA结果如表4所示.3个模型的P值均小于 0.0001,且3个模型的F值均有效,表明这3个模型 是显著的.3个模型的R²预测值都大于0.80,表明 这3个模型具有良好的预测能力.

表 4 回归模型的方差分析

| Indicator | Mean square | F-value | P-value | Predicted R ² |
|------------------|-------------|----------|----------|--------------------------|
| φ | 0.0051 | 320.56 | < 0.0001 | 0.9824 |
| С | 0.0229 | 59.79 | < 0.0001 | 0.8990 |
| d_{m} | 0.0040 | 1 536.29 | < 0.0001 | 0.9964 |

2.2 铺粉工艺参数对粉体铺展性指标的影响

根据方差分析和回归方程中因素系数的大小, 参数 H, D, ω, V, HV, DV, H², D² 和 V² 对沉积分数有 重要影响, 参数 H, ω, V, HV, H² 和 V² 对覆盖率有重 要影响, 而参数 H, D, ω, V, HV, DV, D² 和 V² 对沉积 速率有重要影响. 在 4 个影响因素中, H 是最大的影 响因素, V 是次要的影响因素, D 和 ω 对粉体铺展性 指标影响较小. HV 和 DV 的交互作用对粉体铺展性 指标具有重要影响, 而其他交互作用影响则可以忽 略不计. 因此, 将进一步分析这些因素对粉体铺展性 指标的影响.

当 D 为 20 mm, ω 为 150 r/min 时, HV 对粉体铺 展性指标的影响如图 7 所示,随着铺粉层厚的增加 和平移速度的降低, *q*, *C*和 *d*_m的值显著增加. 铺粉 层厚和平移速度与沉积分数、覆盖率和沉积速率呈 二次抛物线关系,这表明铺粉层厚与平移速度之间 存在交互作用.3个指标从粉层质量(沉积分数和覆 盖率)和粉末流动形态(沉积速率)的角度揭示了粉 体铺展性.通常,较高的沉积分数、覆盖率和沉积速 率意味着良好的铺展性. 当铺粉层厚较小时, 由于机 械拱起和颗粒堵塞[4,22],颗粒难以通过滚筒与粉床之 间的间隙,导致3个指标值减少.穿过滚筒与粉床之 间间隙的颗粒由于其惯性将移动一定距离[22],最后 沉积在粉床上形成铺粉层. 当平移速度增加时, 穿过 间隙的颗粒速度会增加,导致颗粒移动更长的距离, 造成沉积在粉床上的颗粒数减少,导致较差的粉体 铺展性. 这与文献 [5] 的研究结果相一致, 表明本文 研究结果的可信度.



Fig. 7 Interaction effect of H-V on powder spreadability indicators $(D = 20 \text{ mm } \Re \text{ } \omega = 150 \text{ r/min})$

当铺粉层厚较高且平移速度较低时, 沉积分数 和沉积速率值较大. 在低铺粉层厚下, 覆盖率随平移 速度的降低而增加. 但是, 当铺粉层厚在 180-200 μm 时, 平移速度对覆盖率影响很小, 因为覆盖率已经接近 饱和值 100%. 表 3 中覆盖率的 R² 预测值为 0.899 0, 预测精度小于其他两个指标, 主要是由于在较大铺 粉层厚下, 覆盖率接近饱和值 100%. 此时, 该指标将 失去判别精度.

当铺粉层厚较大时,覆盖率的判别精度较低,因此回归模型中 *DV* 对覆盖率的影响并不显著.当 *H*为 150 μm, ω 为 150 r/min 时, *DV* 对沉积分数和沉 积速率的影响如图 8 所示.从等高线图可以看出因 素之间的相互作用.当滚筒的平移速度较高时,沉积





分数和沉积速率两个指标随滚筒直径的增加而增加,但此时平移速度和滚筒直径之间的相互作用比较微弱.在较低的滚筒平移速度下,轮廓线几乎是椭圆形的.表明平移速度和滚筒直径之间的相互作用是显著的.当滚筒直径范围为15-22 mm时,指标可以达到较大值.文献[3]的研究也表明,在一定范围内增加滚筒直径,会加强滚筒对粉末的压实效应,从而提高粉体的铺展性.

2.3 多目标优化

滚筒铺粉工艺参数非常复杂,且参数之间的相 互作用也会影响粉体的铺展性.因此,有必要通过整 合多个铺展性指标来获得最佳的滚筒铺粉参数组 合.由 Derringer 和 Suich^[36]开发的期望值法被用于 多目标优化,该方法以响应变量的满意程度为基础, 将估计的响应变量转化为满意度函数^[36]

$$e_{i} = \begin{cases} 0, & y_{i} \leq l_{i} \\ \left(\frac{y_{i} - l_{i}}{u_{i} - l_{i}}\right)^{wt_{i}}, & l_{i} < y_{i} < u_{i} \\ 1, & y_{i} \geq u_{i} \end{cases}$$
(15)

式中, y_i 是响应变量, $u_i \approx l_i \beta$ 别为响应的最大值和最小值, w_t , 为权重.

在建立单个响应满意度函数的基础上,构造总体满意度函数来衡量所有响应的总体满意度^[36]

$$E = \left(\prod_{i=1}^{N} e_i^{r_i}\right)^{\frac{1}{\sum r_i}}$$
(16)

式中, e_i 是每个响应的期望值, r_i 是 e_i 的权重, N 是响 应的数量.

参数的取值范围都在表 2 的设计范围内, 3 个 指标具有同等的重要性. 在 Design-Expert 软件将沉 积分数、覆盖率和沉积速率设置为最大值, 使用期 望值法, 获得了预测的最优参数组合和最优指标组 合. 最佳参数组合: 铺粉层厚 H 为 198 µm, 滚筒直 径 D 为 22 mm, 滚筒的旋转速度 ω 为 64 r/min, 平移 速度 V 为 135 mm/s. 预测的最佳指标: 沉积分数、 覆盖率和沉积速率分别为 0.444 0, 98.40% 和 0.266 0 mg/mm.

3 实验验证

采用湖南华曙高科技有限责任公司的 HS403P 设备进行沉积分数实验.首先,使用最常见的激光参

数烧结 9 个 15 mm × 15 mm × 15 mm 的尼龙实验包, 壁厚为 2 mm, 如图 9 所示. 考虑到粉末会粘附在实 验包的内表面, 很难将粉末完全收集. 因此, 用精密 天平 (分辨率 0.01 mg) 称量装有粉末的实验包. 然 后, 除去实验包中的粉末, 并超声清洗实验包. 最后, 通过精密天平称量实验包. 通过粉末和实验包的质 量之和减去实验包的质量可以获得粉末的质量. 沉 积分数的计算公式为

$$\varphi = \frac{m_{\rm p}/\rho}{a^3} \tag{17}$$

式中, m_p 是实验包中尼龙粉末的质量, ρ 是尼龙粉末的材料密度, a 是实验包的边长.



图 9 用于测量沉积分数的实验包 Fig. 9 Experimental packages for measuring deposition fraction

由于在商用设备中难以在线监测粉体的铺展过程,因此,基于 SLS 设备的铺粉装置搭建铺粉实验平台,如图 10 所示. 铺粉实验平台包括送粉缸、成型缸和滚筒. 送粉缸上升一个铺粉层厚,而成型缸下降一个相同的铺粉层厚. 缸的上下运动由伺服电机控制. 滚筒的直径为 22 mm,滚筒沿 X 轴的正方向以平移速度 V 并逆时针旋转运动形成铺粉层.

由于相同颜色的粉末将无法区分像素.因此,在



图 10 铺粉实验平台 Fig. 10 Powder spreadability device

开展覆盖率的铺粉实验中, 第一层粉末是白色尼龙粉末, 第二层黑色尼龙粉末. 白色和黑色尼龙粉末来 自同一生产厂家, 具有相似的材料特性, 只是颜色不同. 将摄像机 (杭州海康威视数字技术股份有限公司, MVLMF2528M)固定在基板上, 并从正上方拍摄粉层的表面形态, 如图 11 所示. 通过灰度处理和阈值分割, 使图像变为黑白二值化图像. 最后, 计算黑 色和白色像素的面积, 黑色像素与黑色像素和白色像素之和的比值作为覆盖率.



为了监测铺粉过程的流动形态,将微型摄像头 (中国台湾安鹏科技股份有限公司, AM7013MZT) 安 装在滚筒支架的侧面,并随滚筒在 X 方向上移动.将 微型摄像头调整到合适的位置和放大倍数.在每次 实验中,采集铺粉过程的粉体流动形态,如图 12 所 示.采集粉体不同时刻的流动形态,根据图像分割法 计算粉堆的面积^[37],然后根据式 (10) 计算沉积速率.



图 12 铺粉过程的粉末流动形态 Fig. 12 Powder flow pattern during powder spreading

为了减少实验误差,将每个指标的实验重复 9次以获得平均值.沉积分数、覆盖率和沉积速率 的实验平均值分别为 0.416 1,94.12% 和 0.282 3 mg/ mm,具体结果如表 5 所示.沉积分数、覆盖率和沉

| 2425 | |
|------|--|
| | |

| Table 5 Optimal results for powder spreadability | | | | | |
|--|---------|-------------|--|--|--|
| Scheme | φ | <i>C</i> /% | $d_{\rm m}/({\rm mg}\cdot{\rm mm}^{-1})$ | | |
| predictive value | 0.444 0 | 98.40 | 0.266 0 | | |
| experimental value | 0.416 1 | 94.12 | 0.282 3 | | |
| error/% | 6.28 | 4.35 | 6.13 | | |

积速率的预测结果与实验结果之间的误差分别为 6.28%, 4.35% 和 6.13%. 误差在合理范围内, 表明所 建立的预测模型是可信的.

4 结论

本文采用 DEM 和 RSM 方法优化滚筒铺粉工 艺参数以提高粉体的铺展性,并通过实验验证了优 化结果.主要结论如下:

(1) 通过 RSM 建立了沉积分数、覆盖率和沉积 速率 3 个粉体铺展性指标的回归模型. 根据方差分 析验证了这 3 个模型可用于粉体铺展性的预测和 优化;

(2) 在评价粉体铺展特性时, 铺粉层厚 H 是主要 的影响因素, 滚筒的平移速度 V 是次要的影响因素, 滚筒的直径 D 和滚筒的转速 ω 对粉体铺展性指标 的影响较小. HV 和 DV 为影响粉体铺展性指标的主 要交互因素;

(3) 以粉体铺展性为优化目标,进行了滚筒铺粉 工艺参数的多目标优化,并通过实验验证了优化结 果,粉体铺展性指标的预测结果与实验结果吻合良好.

参考文献

- 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23 (Lu Bingheng. Additive manufacturing—current situation and future. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1): 19-23 (in Chinese))
- 2 李冉, 刘书田. 考虑表面层厚度不确定的稳健性拓扑优化方法. 力 学学报, 2021, 53(3): 1471-1479 (Li Ran, Liu Shutian. Robust topology optimization of structures considering the uncertainty of surface layer thickness. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(3): 1471-1479 (in Chinese))
- 3 Zhang J, Tan Y, Bao T, et al. Discrete element smulation of the effect of roller-spreading parameters on powder-bed density in additive manufacturing. *Materials*, 2020, 13(10): 2285
- 4 Nan W, Pasha M, Bonakdar T, et al. Jamming during particle spreading in additive manufacturing. *Powder Technology*, 2018, 338: 253-262
- 5 Nan W, Pasha M, Ghadiri M. Numerical simulation of particle flow

and segregation during roller spreading process in additive manufacturing. *Powder Technology*, 2020, 364: 811-821

- 6 王超, 徐斌, 段尊义等. 面向增材制造的应力最小化连通性拓扑优化. 力学学报, 2021, 53(4): 1070-1080 (Wang Chao, Xu Bin, Duan Zunyi, et al. Additive manufacturing-oriented stress minimization topology optimization with connectivity. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(4): 1070-1080 (in Chinese))
- 7 Michael VDE, Verbelen L, Puyvelde PV. Assessing polymer powder flow for the application of laser sintering. *Powder Technology*, 2015, 286: 151-155
- 8 Spierings AB, Voegtlin M, Bauer T, et al. Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2016, 1: 9-20
- 9 Al-Hashemi HMB, Al-Amoudi OSB. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*, 2018, 330: 397-417
- 10 Vlachos N, Chang ITH. Investigation of flow properties of metal powders from narrow particle size distribution to polydisperse mixtures through an improved hall-flowmeter. *Powder Technology*, 2011, 205: 71-80
- 11 Ruggi D, Barrès C, Charmeau J, et al. A quantitative approach to assess high temperature flow properties of a PA 12 powder for laser sintering. *Additive Manufacturing*, 2020, 33: 101143
- 12 Lefebvre LP, Whiting J, Nijikovsky B, et al. Assessing the robustness of powder rheology and permeability measurements. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101203
- 13 Pleass C, Jothi S. Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by Selective Laser Melting. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 419-431
- 14 Mussatto A, Groarke R, O'Neill A, et al. Influences of powder morphology and spreading parameters on the powder bed topography uniformity in powder bed fusion metal additive manufacturing. Additive Manufacturing, 2021, 38(6): 101807
- 15 Snow Z, Martukanitz R, Joshi S. On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 78-86
- 16 Cordova L, Bor T, Smit M, et al. Measuring the spreadability of pretreated and moisturized powders for laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101082
- 17 张雪宽,徐骥,孙俊杰等. 竖冷设备中烧结矿石偏析行为的 GPU高性能模拟. 力学学报, 2019, 51(1): 64-73 (Zhang Xuekuan, Xu Ji, Sun Junie, et al. Segregation behavior of sinter in vertically arrange cooler with high perfomance GPU simulation. *Chinese Jounal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 64-73 (in Chinese))
- 18 谭援强,肖湘武,张江涛等. 尼龙粉末在 SLS 预热温度下的离散 元模型参数确定及其流动特性分析.力学学报,2019,51(1):56-63 (Tan Yuanqiang, Xiao Xiangwu, Zhang Jiangtao, et al. Determination of discrete element model contact parameters of nylon powder at SLS preheating temperature and its flow characteristics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 56-63 (in Chinese))
- 19 Ahmed M, Pasha M, Nan W, et al. A simple method for assessing powder spreadability for additive manufacturing. *Powder Technology*, 2020, 367: 671-679
- 20 Fouda YM, Fouda YM, Bayly AE, et al. A DEM study of powder

表 5 粉体铺展性的优化结果

力

spreading in additive layer manufacturing. *Granular Matter*, 2020, 22(1): 1-18

- 21 张江涛, 谭援强, 包涛等. 滚筒振动对铺粉质量影响的离散元模 拟. 中国机械工程, 2020, 31(14): 1717-1723 (Zhang Jiangtao, Tan Yuanqiang, Bao Tao, et al. Discrete element simulation for effects of roller's vibrations on powder spreading quality. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(14): 1717-1723 (in Chinese))
- 22 Chen H, Wei Q, Wen S, et al. Packing quality of powder layer during counter-rolling-type powder spreading process in additive manufacturing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2020, 153: 103553
- 23 Lin WA, Yu A, El A, et al. Effects of spreader geometry on powder spreading process in powder bed additive manufacturing. *Powder Technology*, 2021, 384: 211-222
- 24 Escano LI, Parab ND, Xiong L, et al. Revealing particle-scale powder spreading dynamics in powder-bed-based additive manufacturing process by high-speed x-ray imaging. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-11
- 25 Dehghani MH, Karri RR, Yeganeh ZT, et al. Statistical modelling of endocrine disrupting compounds adsorption onto activated carbon prepared from wood using CCD-RSM and DE hybrid evolutionary optimization framework: comparison of linear vs non-linear isotherm and kinetic parameters. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 302: 112526
- 26 Cundall PA, Strack ODL. Discussion: A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 1980, 130: 331-336
- 27 Mindlin RD. Vibrations of doubly-rotated-cut quartz plates with monoclinic symmetry. *International Journal of Solids & Structures*, 1985, 21(6): 597-607
- 28 Johnson K, Kendall K. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society A*, 1971, 324: 301-313
- 29 Chen H, Wei Q, Wen S, et al. Flow behavior of powder particles in layering process of selective laser melting: Numerical modeling and

experimental verification based on discrete element method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2017, 123: 146-159

- 30 郑军辉. 尼龙粉末选择性激光烧结铺粉工艺数值模拟研究. [硕士论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2016 (Zheng Junhui. Numerical research on powder paving process of nylon powder selective laser sintering. [Master Thesis]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016 (in Chinese))
- 31 Parteli E, Pöschel T. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing. *Powder Technology*, 2016, 288: 96-102
- 32 梅凡民, 雒遂, 陈金广. 一种改进的高浓度风沙图像的动态灰度阈 值分割算法. 力学学报, 2018, 50(3): 699-707 (Mei Fanmin, Luo Sui, Chen Jinguang. An improved algorithm of dynamic graythresholding for segmenting dense aeolian sand particl images. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(3): 699-707 (in Chinese))
- 33 Zhu HH, Fuh JYH, Lu L. The influence of powder apparent density on the density in direct laser-sintered metallic parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 294-298
- 34 Box GEP, Wilson KBJR. On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statal Society*, 1951, 13(1): 1-45
- 35 胡雅琴. 响应曲面二阶设计方法比较研究. [硕士论文]. 天津: 天 津大学, 2005 (Hu Yaqin. A comparative study on the second-order designs in response surface methodology. [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2005 (in Chinese))
- 36 Derringer GC, Suich R. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 1980, 12: 214-219
- 37 洪英, 党宏社, 宋晋国. 基于图像处理的不规则形体表面积测量方法. 计算机测量与控制, 2009, 17(9): 1679-1681 (Hong Ying, Dang Hongshe, Song Jinguo. Method for irregular solid surface area measurement based on image processing. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(9): 1679-1681 (in Chinese))