

砂型增材制造中铺砂过程建模研究*

杨伟东^{①②} 钱致翰^① 线洪萱^① 王媛媛^①

(^①河北工业大学机械工程学院, 天津 300103; ^②国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心, 天津 300401)

摘 要: 为探究影响粉末粘结类 3D 打印工艺成型质量的因素, 文章在砂型打印的砂床铺设阶段, 基于固体力学进行辊子半径和铺砂质量之间的规律进行分析, 得到铺砂质量随辊子半径的变化趋势, 给出了砂床规模给定的情况下辊子半径大小的取值范围。采用离散元仿真软件建立了铺砂阶段的数值仿真模型, 完成了不同尺寸辊子铺砂后砂床质量评价, 通过仿真给出了铺设较高质量砂床的辊子半径取值范围, 其结果与理论计算一致性较高, 证实了理论分析的有效性。

关键词: 3DP 工艺; 铺砂工艺; 辊子; 离散元

中图分类号: TG24 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.06.001

Research on roller size modeling of sand bed laying in 3DP process

YANG Weidong^{①②}, QIAN Zhihan^①, XIAN Hongxuan^①, WANG Yuanyuan^①

(^①School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300103, CHN; ^②National Engineering Research Center for Technological Innovation Methods and Tool, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, CHN)

Abstract: In order to explore the factors affecting the forming quality of powder-bonded 3D printing process, this paper uses the sand bed laying stage of sand mold printing to analyze the law between the roll radius and the sand laying quality based on solid mechanics, and obtains the change of the sand laying quality with the roller radius trend. Through the derived formula, the value range of the roller radius under the specified sand bed scale is given. The discrete element simulation software EDEM is used to establish the numerical simulation model of the sand laying stage, and the quality measurement of the sand bed after sand laying with rollers of different sizes is completed on the constructed sand bed. The results are in good agreement with the calculation results of the proposed theoretical formula, and the validity of the theoretical formula is verified by simulation.

Keywords: 3DP technology; sand laying process; roller; DEM

3DP 工艺用于砂型制造中铺砂过程, 其工艺参数直接影响砂床质量。在其他成型条件不变的前提下, 若砂层铺设均匀性较差、致密度较低, 会使打印制件的表面粗糙度增加, 导致砂型精度和质量下降。因此提高铺砂的均匀性和致密度, 对高精度 3DP 砂型工艺打印具有重要意义。

当铺砂过程砂粒物理特性确定时, 主要通过辊子尺寸及其运动状态的控制, 从而控制铺砂的质量。已有研究中提及影响铺砂质量的参数包括: 辊子的

平移速度、旋转速度以及辊子半径^[1]。对于辊子的平移速度、旋转速度的研究较为完善^[2-3], 但对于辊子半径与铺砂质量的分析研究仅为定性分析。郑军辉^[4]针对辊子半径进行了仿真的定性分析, 而未通过理论分析进行说明。王媛媛^[5]着重研究了辊子的半径大小与砂床质量关系, 但未考虑辊子与砂床接触面的线速度以及砂床规模对砂床质量的影响, 所得结论具有一定的局限性。由以上分析可知, 铺砂工艺参数中的辊子尺寸直接影响砂床质量。因此,

* 国家自然科学基金(52175313); 河北省科技重大专项(21284901Z)



本文通过定量和定性的方法研究辊子半径对铺砂质量的影响,为设计高精度 3DP 砂型打印设备提供理论依据。

1 铺砂辊子尺寸的理论建模

如图 1 所示,在一次铺砂结束后供料箱中的砂床会被抬升一定的高度,成型箱中的砂床下降一个层厚的距离,此时供料箱中砂粒高出铺砂平面一定的高度 h_1 ,成型箱砂床表面低于铺砂平面距离也为 h_1 。假设铺砂过程中辊子的移动为匀速运动状态,同时将砂粒简化为球形颗粒,辊子自转速率为 ω ,平移速度为 v ,铺砂层厚为 h 。

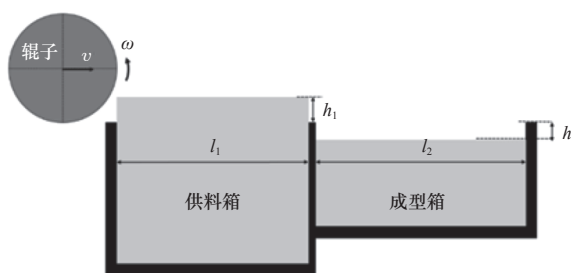


图 1 铺砂设备示意图

在铺砂过程中,辊子通过自身旋转及平移推动前方砂堆前进,并将下方的砂粒压入砂床,使其形成致密的多孔介质结构。如图 2 所示,未过压实的砂堆处于自然堆积状态,位于辊子前下方。设砂堆高度为 H 。以砂堆中与辊子接触的砂粒为研究对象, F_0 为辊子对砂粒的压力,方向为相交处切线的法线方向; F_1 为辊子对砂粒的摩擦力,其方向为辊子切线方向。 F_g 为 F_0 和 F_1 的合力。

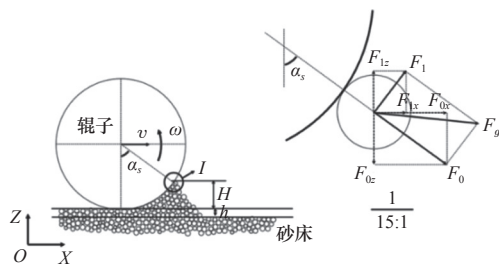


图 2 砂粒受力分析示意图

设 F_g 与 Z 轴正方向夹角为 α_F 。如图 3 所示,当辊子对砂粒的合力方向总共有这 3 种情况, α_F 为钝

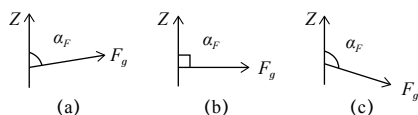


图 3 辊子对砂粒合力方向示意图

角是砂粒能够被辊子压实的条件。为计算方便,定义 F_0 和 Z 轴负方向的夹角为砂粒位置角,如图 4 所示。

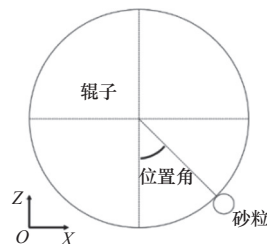


图 4 砂堆位置角定义

假设辊子对砂粒的压力 F_0 一定,不随位置角的变化而变化,则辊子对砂粒的摩擦力不变,辊子对砂粒合力 F_g 的大小不变。如图 5 所示,在位置角减小的过程中, F_g 在 Z 方向的分力向下且分力逐渐增大, F_g 位置角越小的砂粒越容易被辊子压入砂床。

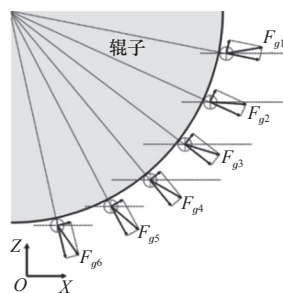


图 5 不同位置角砂粒受力分析示意图

砂堆中与辊子接触的最高处的砂粒的位置角最大,在与辊子接触的砂粒中属于最难被压入砂床的砂粒。因此当砂堆中最高处的砂粒满足压实条件时,砂堆中全部的砂粒均可被辊子压实。定义砂堆中最高处砂粒的位置角为 α_s 。

以辊子前方砂堆为研究对象,砂堆最高处砂粒的位置角为 α_s ,辊子前方砂堆形态示意图如图 6 所示,其高度 H 为

$$H = R_{\text{roll}}(1 - \cos \alpha_s) \quad (1)$$

式中: R_{roll} 为辊子半径。辊子运动过程中,砂堆的堆积角为 β ,其满足:

$$\beta < 90^\circ \quad (2)$$

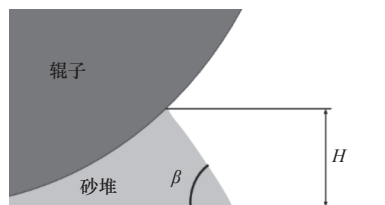


图 6 辊子前砂堆大小示意图

将砂堆截面近似简化为三角形进行计算,则此时砂堆的体积为

$$V_s = \frac{1}{2}H \left(R_{\text{roll}} \sin \alpha_s + \frac{H}{\tan \beta} \right) W \quad (3)$$

式中: W 为供料箱的宽度。新的一层铺砂过程中辊子将供料箱中的砂粒推向成型箱进行压实,在供料箱上方随着辊子的移动,辊子前方的砂量逐渐增多,砂堆高度逐渐增加。辊子运动至成型箱后砂堆砂量逐渐减少,砂堆高度逐渐下降,故砂堆最高点出现在供料箱与成型箱的交界位置,此时砂堆的表观体积与高出供料箱上方砂粒的表观体积相等,计算公式如下:

$$V_s = l_1 h_1 W \quad (4)$$

式中: l_1 为供料箱的长度, h_1 为高出供料箱的砂层厚度,其大小由工艺决定。

由式(1)~(4)可得关系:

$$R_{\text{roll}}^2 (1 - \cos \alpha_s) \left(\sin \alpha_s + \frac{1 - \cos \alpha_s}{\tan \beta} \right) = 2l_1 h_1 \quad (5)$$

当砂床规模固定时,辊子半径 R_{roll} 与 α_s 之间表现为反比关系。辊子半径 R_{roll} 越小则 α_s 越大,辊子半径与位置角直接相关,计算时可通过 α_s 的变化来反映辊子半径 R_{roll} 的取值。

定义 α_s 能够满足压实条件的最大值为 θ_M , α_s 能够达到稳定状态的最小值为 θ_m 。由于砂堆处于辊子前方,故三者的关系为:

$$0 < \theta_m < \alpha_s < \theta_M < 90^\circ \quad (6)$$

对于 α_s 的上限值 θ_M ,可由文献[5]中公式计算:

$$\theta_M = \tan^{-1} \frac{1}{\mu_0} \quad (7)$$

由于 $\theta_M > \alpha_s$,同时 $-\cos \alpha_s$ 和 $\sin \alpha_s$ 在其取值范围内均为递增函数,根据式(5)有:

$$R_{\text{roll}}^2 (1 - \cos \theta_M) \left(\sin \theta_M + \frac{1 - \cos \theta_M}{\tan \beta} \right) > 2l_1 h_1 \quad (8)$$

整理可得辊子半径下限:

$$R_{\text{roll}} < \sqrt{\frac{2l_1 h_1}{(1 - \cos \theta_M) \left(\sin \theta_M + \frac{1 - \cos \theta_M}{\tan \beta} \right)}} \quad (9)$$

由式(9)可计算出在辊子处于匀速运动状态时,对砂粒满足压实条件的最小辊子半径,如加工选择辊子半径小于该数值,砂堆将无法被完全压实。

如图7所示,合力 F_g 与砂粒所受压力 F_0 的夹角为 φ_F , φ_F 在数值上等于 μ_0 反正切函数的值,合力 F_g 在 Z 方向的分量为

$$F_z = -F_g \cos(\alpha_s + \varphi_F) \quad (10)$$

F_z 是与合力 F_g 相关的余弦函数,由余弦函数增减性可以得到 F_z 的变化趋势。令 $\theta_m = 30^\circ - \varphi_F$, θ_m 即为 α_s 的下限值。由于 $\theta_m < \alpha_s$, $-\cos \alpha_s$ 和 $\sin \alpha_s$ 在各自取值范围内均为单调递增函数,根据式(5)有:

$$R_{\text{roll}}^2 (1 - \cos \theta_m) \left(\sin \theta_m + \frac{1 - \cos \theta_m}{\tan \beta} \right) < 2l_1 h_1 \quad (11)$$

整理可得辊子半径上限:

$$R_{\text{roll}} > \sqrt{\frac{2l_1 h_1}{(1 - \cos \theta_m) \left(\sin \theta_m + \frac{1 - \cos \theta_m}{\tan \beta} \right)}} \quad (12)$$

根据某厂家所设计 3DP 砂型打印机尺寸,其供料箱大小 85 mm×610 mm,成型箱大小 210 mm×610 mm,每次铺砂前供料箱上升高度约 1 mm,铺砂辊半径 17.5 mm,长 610 mm。根据式(9)和式(12)可计算得出铺砂辊半径范围为 12~130 mm,该设备采用辊子尺寸符合公式计算区间,过大的辊子对铺砂质量的提升影响很小。由于现有打印设备均已定型,改变其辊子机械尺寸较为困难,故使用仿真方法进一步验证铺砂辊子半径对铺砂质量的影响。

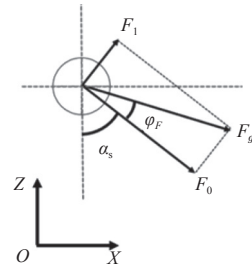


图7 砂粒受力示意图

2 铺砂辊子尺寸的仿真研究

2.1 铺砂过程离散元模型参数标定

离散元法是一种用于研究分析粒子系运动及粒子间相互作用的数值技术^[6]。该方法单独对每个粒子的空间状态和运动行为进行计算,同时计算了粒子与粒子之间相互作用力的影响。近年来离散元法已被广泛应用于化工、农业和矿业等领域的颗粒力学问题^[7]。EDEM 软件是一款基于离散元法的建模软件,可用于离散颗粒间运动和力学行为的仿真和分析^[8-9]。故本文基于离散元方法使用 EDEM 软件对铺砂过程中颗粒间相互作用进行仿真分析。仿真中所用材料参数如表1所示。

2.2 铺砂过程离散元模型选择

离散元法基本原理主要包括运动模型和接触模

表 1 材料间相互作用参数

材料	平均粒径/ μm	密度/(kg/m^3)	恢复系数	钢-砂粒静摩擦系数	砂粒-砂粒静摩擦系数
砂粒	175	2 650	0.5	0.3	0.4

型^[10-11]。运动模型用于计算颗粒的运动状态，包括颗粒自身的位移、速度和加速度等；接触模型用于计算颗粒与颗粒碰撞或接触时产生的颗粒间作用力。

(1) 基于软球模型的基本运动方程

在铺砂过程中，颗粒会产生平移和旋转，其运动控制方程可表示为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^n + F_{ij}^t + F_{ij}^j) + m_i g \quad (13)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (T_{ij} + T_{r,ij}) \quad (14)$$

式中： m_i 为颗粒质量； ω_i 为角速度； v_i 为水平速度； F_{ij}^n 和 F_{ij}^t 分别为颗粒 j 作用在颗粒 i 上的法向和水平方向作用力； F_{ij}^j 为颗粒间非接触力； I_i 是颗粒 i 的惯性矩； g 为重力加速度； T_{ij} 和 $T_{r,ij}$ 分别为颗粒 j 作用在颗粒 i 上作用力产生扭矩和滚动摩擦力产生的扭矩。

(2) 颗粒间接触力方程

基于软球模型，颗粒与颗粒碰撞时，颗粒之间相互接触的部位会产生微小的变形，Hertz认为法向力和法向位移均是非线性的，提出了法向力模型；Mindlin认为法向力、切向力或位移改变的瞬时速率直接影响了力与位移的关系，提出了切向力模型。

根据Hertz接触理论，法向力 F_{ij}^n 、切向力 F_{ij}^t 表示为

$$F_{ij}^n = (-k_n \delta_{ij}^{\frac{3}{2}} - c_n v_{ij} \cdot n) n \quad (15)$$

$$F_{ij}^t = -k_t \alpha - c_t v_{ct} \quad (16)$$

其中： δ 是法向重叠量； k_n 是颗粒的法向弹性系数； c_n 是法向阻尼系数； v_{ij} 是颗粒 i 相对于颗粒 j 的速度； n 为颗粒 i 的中心到颗粒 j 中心的单位矢量； k_t 是颗粒的切向弹性系数； c_t 是切向阻尼系数； α 切向位移； v_{ct} 为滑移速度。

当颗粒的物性参数相同，切向力 F_{ij}^t 可表示为

$$F_{ij}^t = -\mu_s \left| F_{ij}^n \right| \frac{v_{ct}}{|v_{ct}|} \quad (17)$$

上式即为库仑摩擦定律， μ_s 为静摩擦系数， v_{ct} 为滑移速度。

铺砂过程中，随着砂粒位置与接触关系的变化，砂粒间法向重叠量的大小不断改变，其切向弹性系数的数值需不断更新，计算成本较高。为简化模型，

假设砂粒碰撞时不产生变形，弹性系数保持不变来计算。

(3) 颗粒间非接触力方程

Hertz接触力理论由于未考虑颗粒间微小作用力的影响，一般用于研究宏观颗粒间的接触。针对微观颗粒系统领域的研究，Johnson等提出了著名的JKR模型^[12-13]。该模型考虑了微小球体之间的粘附力，更适用于3DP砂型工艺中砂粒间相互作用力的分析。其如式(18)和(19)。

$$F_{JKR} = -4 \sqrt{\pi \gamma_b E^*} a^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R_{\text{ball}}} a^3 \quad (18)$$

$$a^3 = \frac{R_{\text{ball}}}{E^*} \left\{ p + 3\pi \gamma_b R_{\text{ball}} + \sqrt{6\pi \gamma_b p + (3\pi \gamma_b R_{\text{ball}})^2} \right\} \quad (19)$$

式中： a 、 R_{ball} 、 γ_b 、 E^* 、 p 分别是两球体接触半径、等效半径、表面粘附能、等效弹性模量和外载荷。

基于上述理论，选用EDEM软件中的“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型，研究3DP砂型工艺铺砂过程中砂粒间的相互作用。

2.3 铺砂过程离散元模型建立

3DP工艺中铺砂过程涉及到的机械元件包括辊子、供料箱和成型箱^[14]，实际砂床规模较大，包含数百万的砂粒，计算量过大，故仿真中设置小规模砂床进行研究^[15]，仿真工艺参数如表2所示。为了方便对照，给出了相同状态的示意图和仿真图。仿真开始时，先在供料箱中预生成砂粒，然后平台上升一定高度使砂堆高出铺砂平面，成型箱平台下降一个层厚的高度，之后辊子向前运动铺设砂床，直至辊子运动超过成型箱尾部，完成一个层面的砂床铺设。

表 2 铺砂过程的工艺参数

参数	数值
辊子平移速度 $v/(m/s)$	0.1
辊子半径 R_{roll}/mm	5
辊子旋转速度 $\omega/(rad/s)$	40
层厚 h/mm	0.3
供料箱长度 l_1/mm	20
供料箱的宽度 W/mm	20
高出供料箱砂层的厚度 h_1/mm	1
成型箱长度 l_2/mm	30

2.4 辊子尺寸对铺砂质量影响分析

辊子在铺砂过程中的运动包含平移和旋转。辊子与砂粒接触点的速度也会影响铺砂的质量，若辊子自转保持不变，辊子半径增加会使辊子边缘的线速度增加。为了消除多参数的影响造成的误差，本文遵循单一变量原则，控制辊子与砂粒接触点的线速度不变，进行辊子半径的研究。式（9）和（12）中考虑了砂床规模的大小，故对于仿真小规模铺砂装置仍然适用。

仿真中铺砂装置参数设置为供料箱长度 $l_1=20\text{ mm}$ ，供料箱的宽度 $W=20\text{ mm}$ ，高出供料箱的砂层的厚度 $h_1=1\text{ mm}$ ，成型箱长度 $l_2=30\text{ mm}$ ，层厚 $h=0.3\text{ mm}$ ，根据式（9）和（12）可计算出辊子半径 R_{roll} 下限和上限分别为 7.0 mm 和 62.5 mm 。

在辊子半径对铺砂质量影响的研究中，设计一系列不同辊子半径的仿真实验。为保证辊子接触砂粒的边缘线速度保持不变，设置与辊子半径匹配的自转速度，共进行了12组仿真实验（如表3所示）。

表3 辊子半径与自转速度设置

组号	辊子半径 $R_{\text{roll}}/\text{mm}$	自转速度 $\omega/(\text{rad/s})$
1	2.50	80.00
2	4.00	50.00
3	5.00	40.00
4	6.25	32.00
5	7.00	28.50
6	12.50	16.00
7	25.00	8.00
8	40.00	5.00
9	50.00	4.00
10	62.50	3.20
11	70.00	2.85
12	80.00	2.50

图8是成型箱的俯视图，将砂床区域分为24个 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 大小的区域，分别对每个区域表层和中间层的砂粒质量进行测量，仿真结果如图9所示。由于靠近成型箱边缘的砂粒受箱体影响，其致密度会与中间区域不同，为了消除边缘的影响，选择中间8个区域的质量计算均值，将均值与一个区域体积作比，得到的比值即为砂床的平均致密度，最终得到表4中的数据。

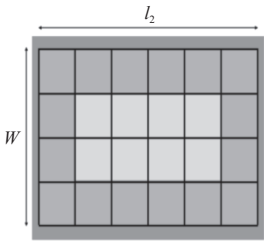


图8 砂层划分示意图

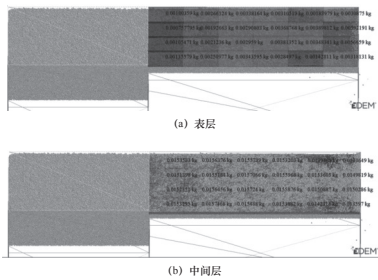


图9 各区域砂粒总质量示意图

表4 不同辊子半径仿真数据

辊子半径 $R_{\text{roll}}/\text{mm}$	表层致密度/ (g/cm^3)	中间层致密度/ (g/cm^3)	平均致密度/ (g/cm^3)
2.50	0.864 1	2.090 0	1.477 1
4.00	0.875 0	2.087 9	1.481 5
5.00	0.944 2	2.065 5	1.504 9
6.25	1.008 1	2.094 8	1.551 5
7.00	1.025 0	2.091 4	1.558 2
12.50	1.107 0	2.101 7	1.604 4
25.00	1.174 4	2.140 4	1.657 4
40.00	1.267 6	2.169 4	1.718 5
50.00	1.291 4	2.162 5	1.727 0
62.50	1.362 5	2.174 8	1.768 7
70.00	1.364 9	2.124 0	1.744 5
80.00	1.365 4	2.177 0	1.771 2

根据表中数据绘制曲线如图10所示。对于砂床表层，辊子半径在 $5\sim 7\text{ mm}$ 时砂床致密度产生突变，辊子半径在 5 mm 以下时砂床致密度较低，铺砂质量较差；辊子半径在 $7\sim 62.5\text{ mm}$ 时，砂床表层致密度随辊子半径的增加而增加；当辊子半径超过 62.5 mm 后，砂床表层致密度随辊子半径增加变化程度较小。根据理论分析得到辊子半径 R_{roll} 下限和上限分别为 7.0 mm 、 62.5 mm ，与仿真中所得结果与公式推论吻合。而中间层致密度变化幅度较小，

砂粒排列较为稳定。得出铺砂辊子的半径变化主要影响了砂床表层的致密度的结论。

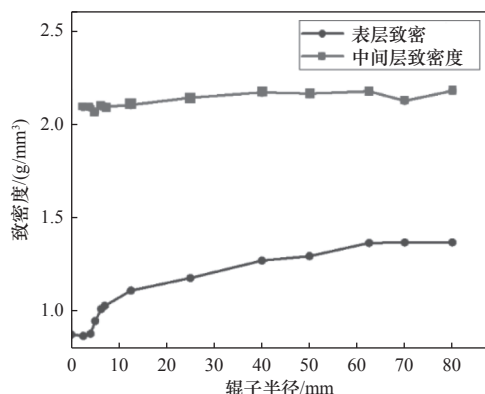


图 10 辊子半径与致密度关系曲线

3 结语

本文在 3DP 砂型工艺中铺砂过程中, 基于理论力学和离散元方法, 充分考虑了砂床大小和成型空间大小的影响, 对辊子半径大小进行了研究。在砂床规模一定的情况下, 经公式推导得到了辊子半径大小的上限和下限。并将该公式用于实际砂型打印设备辊子尺寸计算, 验证了辊子实际尺寸与理论推导结果的一致性, 证明了公式的有效性, 为打印机的设计以及后续仿真实验提供了理论依据。同时为进一步验证提出的公式, 建立了铺砂过程的仿真模型, 得到辊子大小与砂床质量的变化关系曲线, 得到的仿真结果与理论计算结果的变化趋势相吻合, 进一步验证了针对辊子大小所建立数学模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] Kevin J. H, John A. N, Rick J. C. Process limitations of 3D printing model rock[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2018, 3(3): 173-182.
- [2] 张江涛, 谭援强, 纪财源, 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[J]. *力学学报*, 2021, 53(9): 2416-2426.
- [3] 王君, 楼光宇, 曾顺麒, 等. 选择性激光烧结铺粉辊运动参数分析[J]. *机械设计与制造*, 2022(2): 247-251.
- [4] 郑军辉. 尼龙粉末选择性激光烧结铺粉工艺数值模拟研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.

- [5] 王媛媛. 微滴喷射砂型三维打印成型机理研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [6] Kruggel-Emden H, Wirtz H, Scherer V. A study on tangential laws applicable to the discrete element method (DEM) for materials with viscoelastic or plastic behavior[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63: 1523-1541.
- [7] 谭援强, 郑军辉, 张浩, 等. 基于离散元法的锥形筒仓中颗粒流体的数学模拟[J]. *过程工程学报*, 2015, 15(6): 916-922.
- [8] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010: 34-42.
- [9] Michele M, Edmund H. S. Discrete element method (DEM) for industrial applications: comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets[J]. *KONA Powder and Particle Journal*, 2015, 32: 236-252.
- [10] Zhang X K, Xu J, Sun J, et al. Segregation behavior of sinter in vertically arrange cooler with high performance GPU simulation[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 64-73.
- [11] Tan Y Q, Xiao X W, Zhang J T, et al. Determination of discrete element model contact parameters of nylon powder at SLS preheating temperature and its flow characteristics[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 56-63.
- [12] Johnson K L, Greenwood J A. An approximate JKR theory for elliptical contacts[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(7): 1042-1046.
- [13] Chen H, Wei Q S, Wen S F, et al. Flow behavior of powder particles in layering process of selective laser melting: Numerical modeling and 29 experimental verification based on discrete element method[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2017, 123: 146-159.
- [14] 王媛媛, 张思祥, 杨伟东. 3DP工艺中铺粉过程建模与仿真研究[J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47(6): 37-43.
- [15] Kruggel-Emden H, Rickelt S, Wirtz S. A study on the validity of the multi-sphere discrete element method [J]. *Powder Technology*. 2008, 188: 153 - 165.

第一作者: 杨伟东, 男, 1972 年生, 教授, 主要研究方向为增材制造。E-mail: yangweidong@hebut.edu.cn

通信作者: 王媛媛, 女, 1986 年生, 助理研究员, 主要研究方向为增材制造。E-mail: 2012047@hebut.edu.cn

(编辑 李 静)

(收修改稿日期: 2022-02-03)

文章编号: 20230601

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。