

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¹⁾

谭援强^{*、2)} 肖湘武[†] 张江涛^{*} 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 尼龙粉末是增材制造中常用的粉体材料, 温度对其流动性有重要影响. 探索尼龙粉末增材制造预热温度下的流动性是研究选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 工艺中粉体铺展成形的基础. 选取 SLS 技术中的尼龙粉末为原材料, 采用离散元数值方法, 研究尼龙粉末的流动行为, 是增材制造工艺数值模拟和铺粉工艺优化的研究热点. 以 Hertz-Mindlin 模型为基础, 基于 Hamaker 理论模型和库伦定律, 在尼龙粉末的接触动力学模型中引入范德华力和静电力, 建立预热温度下尼龙粉末流动的离散元模型 (discrete element method, DEM), 通过对比相应实验结果, 标定了该模型的参数. 对加热旋转圆筒中尼龙粉末流动过程进行了 DEM 数值模拟, 校核了所建模型的正确性, 并研究了粉体粒径分布对尼龙粉末流动特性的影响规律. 研究表明, 尼龙粉末黏附力是静电力与范德华力的共同作用结果; 随着粉体粒径的增大, 尼龙粉末崩塌角增大, 流动性增强; 相对于高斯粒径分布, 粒径均匀分布的尼龙粉末颗粒流动性更强. 研究结果可指导 SLS 中铺粉工艺的优化.

关键词 选择性激光烧结, 尼龙粉末, 离散元模型, 预热温度, 流动性

中图分类号: TB12 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-18-341

DETERMINATION OF DISCRETE ELEMENT MODEL CONTACT PARAMETERS OF NYLON POWDER AT SLS PREHEATING TEMPERATURE AND ITS FLOW CHARACTERISTICS¹⁾

Tan Yuanqiang^{*、2)} Xiao Xiangwu[†] Zhang Jiangtao^{*} Jiang Shengqiang[†]

^{*}(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

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

Abstract Nylon powder is a commonly used powder material in Additive Manufacturing whose fluidity is closely related to temperature. Exploring powder fluidity at preheating temperature in Additive Manufacturing is the basis for studying the fluidity and spreading properties of powder in selective laser sintering (SLS) process. Choosing nylon powder in SLS technology as a raw material and the flow behavior of nylon powder is studied by discrete element method (DEM),

2018-10-16 收稿, 2018-12-16 录用, 2018-12-17 网络版发表.

1) 国家自然科学基金项目 (11772135, 51605409) 和高层次人才引进项目 (Z16X0110) 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: 谭援强, 肖湘武, 张江涛, 姜胜强. 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, Jiang Shengqiang. 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

which is a hot topic of numerical simulation and powder spreading process optimization in Additive Manufacturing. Based on Hertz-Mindlin model, Hamaker theory model and Coulomb's law, Van der Waals and electrostatic force are introduced to describe the contact dynamics of nylon powder at preheating temperature. The DEM model of nylon powder at preheating temperature was established based on the mechanical parameters and the rationality of the model was verified by comparing with the experimental results. The flow process of nylon powder in a heated rotating roller was simulated by DEM which checked the correctness of the model. The effects of particle size and particle size distribution on the flow characteristics of nylon powder were studied. The results show that the adhesion force of nylon powder is the result of the interaction of electrostatic force and van der Waals force. With the increase of particle size, the collapse angle of nylon powder decreases and the fluidity of nylon powder increases. And the nylon powder fluidity with uniform particle size distribution is stronger than that of Gaussian particle size distribution. The results can guide the optimization of powder spreading process in SLS.

Key words SLS, nylon powder, DEM, preheating temperature, flowability

引言

选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 通过逐层铺粉、逐层扫描烧结的方式直接制造零件^[1]。由于 SLS 具有快捷、方便的特点, 能够制造出传统方法难以实现的复杂形状结构的零件^[2-3], 已成功应用于汽车、航空航天、医疗等领域, 是目前得到广泛推广应用的增材制造技术之一^[4-5]。

SLS 铺粉工艺阶段, 铺覆出平整均匀和高密度的粉床是制备性能优良的成型件的前提^[6]。铺粉质量跟粉体流动特性相关, 粉体流动性越好, 其铺展特性越好。为了减少烧结成型时所需激光功率, 改善烧结件翘曲和残余应力分布, 铺粉工艺一般在预热温度下进行^[7]。预热温度对粉体的流动性有重要影响^[8]。

目前运用较多的粉体流动性的表征方法有: 休止角、流出速度法、Hausner 指数法、Carr 流动性指数法、剪切法^[9-10], 这些参数从不同的角度反映了粉体的流动性。然而现有的测量方法大多数都是在室温的环境下表征粉体的流动性, 对高温下粉体流动性表征的研究相对较少。

SLS 工艺中, 粉体粒径一般小于 100 μm ^[11], 属于细颗粒范畴^[12], 且粉末在预热温度下为干性物料, 颗粒间毛细管力忽略不计, 因此, 预热温度下尼龙粉末颗粒作用力主要为范德华力和静电力。与细颗粒相关的物理过程受到多种作用力的影响, 范德华力属于近程力^[13], 是引起细颗粒团聚和黏附的主导因素。与范德华力相比, 静电力不受作用距离的限制, 属于远程力。近些年来, 离散元法 (discrete element method, DEM) 在增材制造粉体流动和铺粉工

艺数值模拟的研究受到大家的重视, 相关领域的研究人员迅速跟进, 成果不断涌现^[14-16]。而以往数值模拟 SLS 铺粉工艺的研究对粉体颗粒接触模型描述, 大多仅简单的采用 Hertz 接触模型, 忽略了细颗粒间范德华力和静电力, 因此对粉体颗粒接触模型的研究有待进一步深入^[17-19]。

本文选取尼龙粉末为原材料, 建立了 SLS 工艺中 171°C 预热温度下尼龙粉末的 DEM 模型并对其进行了验证, 对加热旋转圆筒中尼龙粉末流动过程进行了 DEM 数值模拟, 研究了粉体粒径对尼龙粉末流动特性的影响规律, 以期为增材制造粉体流动性和粉体铺展提供依据。

1 尼龙粉末离散元模型研究

1.1 尼龙粉末离散元模型

本文在 Hertz-Mindlin 模型基础上, 结合 SLS 铺粉工艺, 综合考虑颗粒的重力、颗粒间 (颗粒与壁面间) 的碰撞力、摩擦力、范德华力、静电力, 来描述 171°C 预热温度下 PA3200 粉末的接触动力学行为。

颗粒流中的粒子可以有两种运动: 平移运动和旋转运动。在运动过程中, 尼龙粉末可能与其周围的尼龙粉末或壁面相互作用, 从而交换动量和能量。单个尼龙粉末的线运动和转动方程给出

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^c + \sum_k F_{ik}^{nc} + F_i^g \quad (1)$$

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (2)$$

式中, F_{ij}^c 为尼龙粉末之间或者尼龙粉末与墙之间的接触力, F_{ik}^{nc} 为尼龙粉末之间或者尼龙粉末与墙之间

的非接触力, F_i^g 为尼龙粉末 i 的自身重力. v_i 和 w_i 分别为尼龙粉末 i 平动和转动速度; M_{ij} 为尼龙粉末间或者尼龙粉末与墙间的转矩.

F_{ij}^c 可以分解为法向接触力 F_{nc} 和切向接触力 F_{tc} . 尼龙粉末 i 在法线方向的接触力 F_{nc} 由法向弹力 $F_{nc,s}$ 、法向阻尼力 $F_{nc,d}$ 以及接触时的范德华 F_{nc}^{vdw} 和静电力 F_{nc}^{ele} 组成

$$F_{nc} = F_{nc,s} + F_{nc,d} + F_{nc}^{vdw} + F_{nc}^{ele} \quad (3)$$

基于 Hamaker 理论计算的范德华力只计入了引力部分. 法向弹力 $F_{nc,s}$ 和法向阻尼力 $F_{nc,d}$ 可以根据 Hertz-Mindlin 模型得到

$$F_{n,s}^c = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2} \quad (4)$$

$$F_{n,d}^c = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \quad (5)$$

式中, E^* 为尼龙粉末的等效弹性模量, R^* 为尼龙粉末的等效半径, m^* 为尼龙粉末的等效质量, β 为阻尼系数, S_n 为法向接触刚度, 表达式如下

$$E^* = \frac{E_p}{2(1 - \gamma_p^2)} \quad (6)$$

$$R^* = \left[\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$m^* = \left[\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{Ine}{\sqrt{In^2 e + \pi^2}} \quad (9)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (10)$$

式中, E_p 为尼龙粉末的弹性模量, γ_p 为尼龙粉末的泊松比, 是材料的固有属性; m_i 和 m_j 分别为尼龙粉末 i, j 的质量, e 为尼龙粉末与尼龙粉末碰撞的恢复系数, δ_n 为法向重叠量, v_n^{rel} 为接触尼龙粉末法向相对速度.

范德华力是细颗粒流中固有特性^[20], 在研究细颗粒流问题时, 经常采用 Hamaker 理论计算细颗粒间的范德华力^[21-22], 可以得到颗粒之间和颗粒与墙面之间的范德华力分别为

$$F_{pp}^{vdw} = -\frac{\partial U_{pp}^0}{\partial Z_0} = -\frac{A_{pp}}{12Z_0^2} \frac{d_i d_j}{d_i + d_j} \quad (11)$$

$$F_{pw}^{vdw} = -\frac{\partial U_{pw}^0}{\partial Z_0} = -\frac{A_{pw} d_i}{12Z_0^2} \quad (12)$$

式中, d_i 和 d_j 是颗粒 i 和 j 的直径, 单位为 m; Z_0 是颗粒间的距离, 单位为 m; A_{pp} 是粉末-粉末的

Hamaker 常数, A_{pw} 是粉末-墙面的 Hamaker 常数, 单位为 eV.

粉体的摩擦带电主要是以粉体的输送为研究对象, 涉及粉体与壁面之间以及粉体之间的摩擦带电. 两个带电颗粒之间的静电力采用库伦定律来计算

$$F_{pp}^{ele} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \mathbf{n}_{ij} \quad (13)$$

式中, q_i 和 q_j 分别是颗粒 i 和 j 的带电量, 单位为 C; r_{ij} 是颗粒 i 和 j 中心之间的距离, 单位为 m; ϵ_0 是真空介电常数; \mathbf{n}_{ij} 为颗粒 i 到颗粒 j 的单位矢量.

带电颗粒与导电面之间的静电力应用镜像理论计算^[24], 可知颗粒与导电平面之间的静电力为

$$F_{pw}^{ele} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i^2}{[2(Z_0 + s)]^2} \mathbf{n}_{pw} \quad (14)$$

式中, 真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m. 修正因子 $s = 2.57$ nm, \mathbf{n}_{pw} 为单位矢量.

绝缘粒子的摩擦带电是一个相对复杂的过程, 在这个过程中, 粒子上的电荷量随着接触时间呈指数增长, 当电荷量的产生速率与耗散速率相等时, 最终达到饱和值. 而 Greason 方程经常被采用来研究绝缘粉末与金属壁面之间的摩擦带电^[23]

$$q_i(t) = q_{is} \frac{1}{1 + \beta/\alpha} \left[1 - e^{-(\alpha+\beta)t} \right] \quad (15)$$

式中, $q_i(t)$ 是颗粒 i 在摩擦运动过程中 t 时刻的带电量; α 和 β 分别是电荷产生和耗散的时间常数, 本文中, 模拟时间较短, 可以近似认为没有电荷耗散, $\beta=0$; q_{is} 为颗粒的饱和电荷

$$q_{is} = q_m \pi d_i^2 \quad (16)$$

式中, q_m 为大气环境下电荷密度常数^[24-25], 其值一般取 2.66×10^{-5} C·m⁻². 将式 (15)、式 (16) 代入式 (13)、式 (14) 中, 可得到颗粒之间和颗粒与墙面之间的静电力分别为

$$F_{pp}^{ele}(t) = \frac{\pi q_m^2 d_i^2 d_j^2}{4\epsilon_0 r_{ij}^2} (1 - e^{-\alpha t})^2 \mathbf{n}_{ij} \quad (17)$$

$$F_{pw}^{ele}(t) = \frac{1}{16\epsilon_0} \frac{\pi q_m^2 d_i^4}{(s + Z_0)^2} (1 - e^{-\alpha t})^2 \mathbf{n}_{pw} \quad (18)$$

1.2 离散元模型参数标定

1.2.1 Hamaker 常数标定

本文基于原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 工作原理, 将普通 AFM 探针制作成

胶体颗粒探针^[26-28], 通过 AFM 实验获得 Hamaker 常数, 实验细节可详见文献 [28].

颗粒之间的黏附力主要是由范德华吸引力和静电力的共同作用结果, 为了减少静电力对黏附力的影响, 在进行 AFM 实验测量之前先对 PA3200 粉末进行静电中和, 此时, 可以认为实验结果中的临界黏附力 $F_c^{pp} = F_{nc}^{vdw}$, 代入式 (11) 可得颗粒之间的 Hamaker 常数为

$$A_{pp} = -\frac{6F_c Z^2}{R^*} \quad (19)$$

经计算可以求得 $A_{pp}=7.21 \times 10^{-20}$ J.

PA3200 粉末与不锈钢之间的黏附力由范德华吸引力和静电力组成, 且静电力不容忽视. 颗粒与壁面的临界黏附力为

$$F_c^{pw} = -\frac{A_{pw} R_i}{6Z^2} - \frac{k_e \pi q_m^2 R_i^2}{\epsilon_0} \quad (20)$$

式中, k_e 为电荷因子, 取值为 0.15. 在本文中, 假设范德华力的作用范围为 50 nm, 可以求得 $A_{pw}=9.72 \times 10^{-20}$ J.

1.2.2 弹性模量标定

采用 AFM 测量了预热温度下尼龙粉末的弹性模量. 图 1 为 PA3200 粉末微球样品预热温度下的典型载荷-压痕深度曲线. 假设载荷直接作用在基面 PA3200 粉末的顶端, PA3200 粉末胶体探针与 PA3200 粉末之间仅存在单向压缩变形, 此时忽略颗粒之间的静电接触力, 根据 1.1 节中尼龙粉末 DEM 接触模型可知载荷 F_z 与压痕深度 δ 之间的关系如下所示

$$F_z = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2} - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_n^{rel} - \frac{A_{pp} R^*}{6Z^2} \quad (21)$$

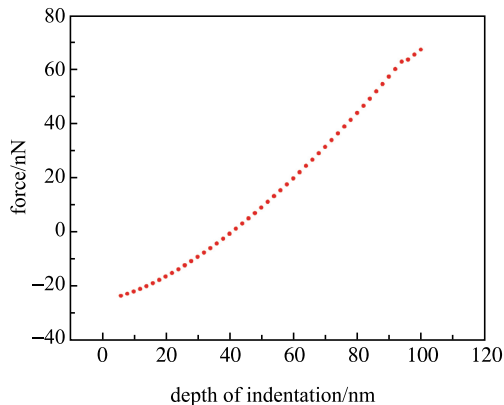


图 1 预热温度下 PA3200 粉末载荷-压痕深度曲线

Fig. 1 The load-depth of indentation curve of PA3200 powder at preheating temperature

其中, 颗粒探针与颗粒的法向相对速度 v_n^{rel} 认为等于探针靠近颗粒时的速度为 1.98 $\mu\text{m/s}$, 法向阻力对载荷的影响非常小, 忽略不计, 由式 (21) 可得

$$E^* = \frac{3(F + F_c)}{4 \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2}} \quad (22)$$

结合式 (6) 可以求得预热温度下尼龙粉末的弹性模量为 61.23 MPa, 此时尼龙粉末的泊松比为 0.35.

1.2.3 内摩擦角标定

采用 ZJ 型应变控制直剪仪、绝缘手套、101-01SB 恒温箱、工业电子温度计以及大功率灯管测量预热温度下尼龙粉末的内摩擦特性, 获得粉末间、粉末与不锈钢的剪切实验结果如图 2 和图 3 所示. 经计算, 在预热温度下 PA3200 粉末间内摩擦系数 $\mu_p=0.4845$ 、内摩擦角为 25.85°; PA3200 粉末与不锈钢壁面之间的内摩擦系数 $\mu_{pw}=0.5121$ 、内摩擦角为 27.12°.

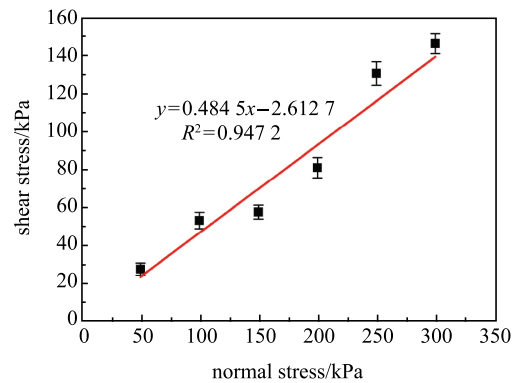


图 2 PA3200 粉末间剪切试验结果

Fig. 2 Shear test results of PA3200 powder

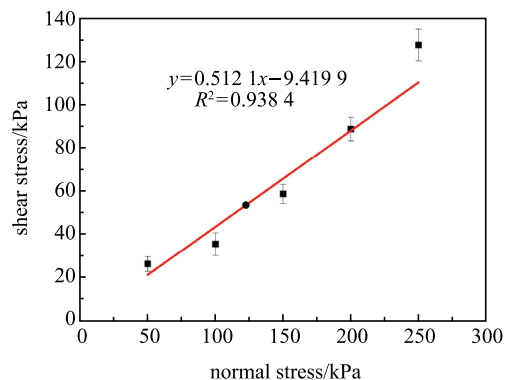


图 3 PA3200-不锈钢壁面剪切试验结果

Fig. 3 Shear test results between PA3200 powder and stainless steel base surface

1.2.4 电荷生成因子标定

绝缘粒子的摩擦电充电是一个相对复杂的过程,在这个过程中,粒子上的电荷量随接触时间呈指数增长,当产生率等于耗散率时^[29-30],粒子上的电荷量最终达到饱和.通过式(15)、式(16)可知

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n q_{is} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (23)$$

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \left(1 - \frac{Q(t)}{\sum_{i=1}^n q_m \pi d_i^2} \right) \quad (24)$$

其中,颗粒的表面积又可以通过比表面积 S_a 与质量 M 的乘积求得,所以电荷生成因子可以表示为

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \left(1 - \frac{Q(t)}{q_m S_a M} \right) \quad (25)$$

为了测量预热温度下 PA3200 粉末与不锈钢壁面摩擦带电量,研制了一套电荷测量装置,如图4所示.具体操作方法为:将 PA3200 粉末填入加热选装圆筒之前先采用高精度天平进行称重,并记录其数值;然后将粉末放入静电消除器中进行静电中和.中和后的粉末在加热旋转圆筒中加热并随着圆筒的低速旋转而流动,这个过程中粉末与筒壁由于不断的摩擦而带电.记录旋转圆筒运动时间,对每组实验进行多次测量,并测量不同运动时间下粉体的带电量.经计算可以得到粉体颗粒电荷质量密度为 $0.023 \mu\text{C/g}$, 电荷生成因子 α 为 0.028 .

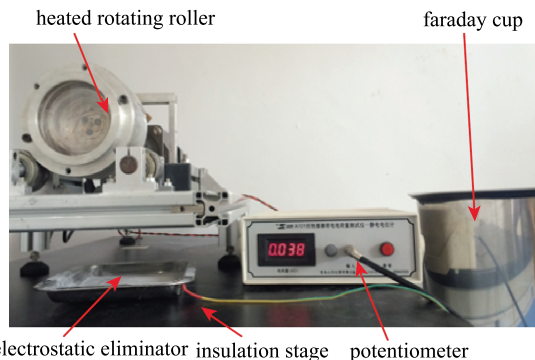


图4 尼龙粉末摩擦带电荷测量装置

Fig. 4 The friction charge measuring device for nylon powder

1.3 试验结果与理论模型比较

为了验证前面建立的预热温度下尼龙粉末 DEM 模型以及测量得到的力学参数的准确性,对于尼龙

粉末间的靠近-接触过程进行离散单元法数值模拟,从而将实验结果与理论模型进行比较,如图5所示.

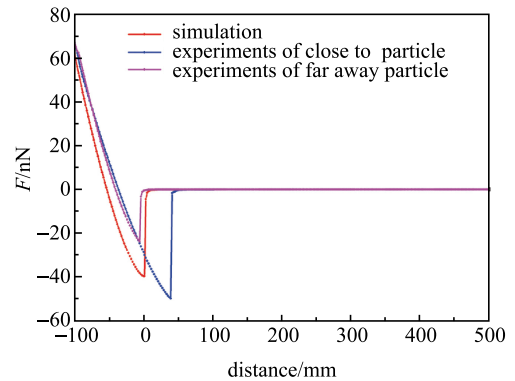


图5 试验结果与理论模型比较

Fig. 5 Comparison between experimental results and theoretical model

在墙面上同一位置生成两个颗粒球,探针下移并黏附其中一个颗粒并使之一一起上移一段距离,再给颗粒探针一恒定的速度向下靠近墙面上的颗粒,使其距离不断减小并发生接触,重叠量不断增大.获取颗粒探针-颗粒之间力-距离曲线如图5所示.结合 DEM 仿真分析结果与试验结果进行分析比较,证实模拟和实验结果二者间趋势一致,说明建立的预热温度下尼龙粉末 DEM 模型以及测量得到的力学参数是可信的.

2 预热温度下尼龙粉末 DEM 的离散元模拟

2.1 尼龙粉末离散元接触参数的确定

基于漏斗法、圆管提升法安息角实验,建立相应的离散元模型,基于 EDEM-API 模块编译适用于热温度下尼龙粉末 DEM 的离散元模拟模型,获取的预热温度下尼龙粉末颗粒 DEM 接触参数如表1所示.工业应用中经常采用 D_{50} 表征粉体粒径,其中 D_{50} 粒径表示累计粒径分布达到 50% 点的直径.

2.2 预热温度下尼龙粉末 DEM 模型的验证

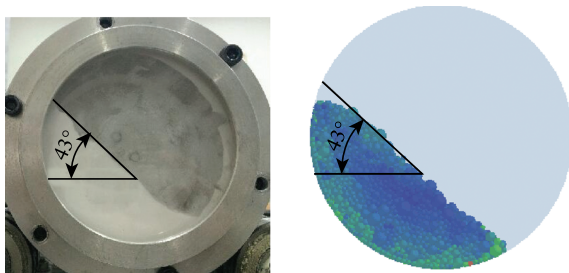
为了验证预热温度下尼龙粉末 DEM 模型的准确性,对加热旋转圆筒中尼龙粉末流动过程进行了 DEM 模拟.为了将数值模拟结果和试验结果进行对比,本文设计了一种可实时控温控速的粉体流动性滚筒测量试验台,滚筒试验台的主要工作原理详见参考文献[31].

对预热温度下尼龙粉末在加热旋转圆筒中的流动过程进行试验和 DEM 数值模拟研究.设置圆筒

的转速为 10 r/min, 尼龙粉末在圆筒中的填充率为 0.3. 尼龙粉末崩塌角试验与仿真结果图 6 所示, 可知, DEM 数值模拟获取的结果能够和实验结果吻合较好, 验证了预热温度下 PA3200 粉末 DEM 模型的可靠性和准确性.

表1 预热温度下尼龙粉末颗粒 DEM 接触参数
Table 1 DEM parameters of nylon powder particles at preheating temperature

Parameters	Values
powder density/(kg·m ⁻³)	1000
powder shear modulus/MPa	61
powder Poisson's ratio	0.35
roller density/(kg·m ⁻³)	7800
roller shear modulus/GPa	80
roller Poisson's ratio	0.3
static friction coefficient of powder-roller	0.51
rolling friction coefficient of powder-roller	0.15
Hamaker constant of powder-roller/J	9.72×10 ⁻²⁰
static friction coefficient of powder-powder	0.48
rolling friction coefficient of powder-powder	0.24
restitution coefficient of powder-powder	0.11
Hamaker constant of powder-powder/J	7.21×10 ⁻²⁰
charge generation factor	0.028
powder D ₅₀ /μm	50



(a) 实验结果 (a) Experimental results
(b) DEM 数值模拟结果 (b) DEM simulation results

图 6 PA3200 粉末崩塌角实验与 DEM 仿真结果

Fig. 6 The avalanche angle experiment and DEM simulation results of PA3200 powder

2.3 粉体粒径对尼龙粉末流动特性的影响规律

尼龙粉末物性参数 (粉末形貌、粉末粒径、粉末粒径分布) 都直接影响其流动性能. 尼龙粉末物性参数难以控制, 采用实验方法难以获取这些参数对粉体流动特性的定量影响. 因此, 本文采用 DEM 仿真研究了预热温度下加热旋转圆筒中尼龙粉末粉体粒径对其流动行为的影响规律. 不同粒径工况下的

DEM 数值模拟结果如图 7 所示.

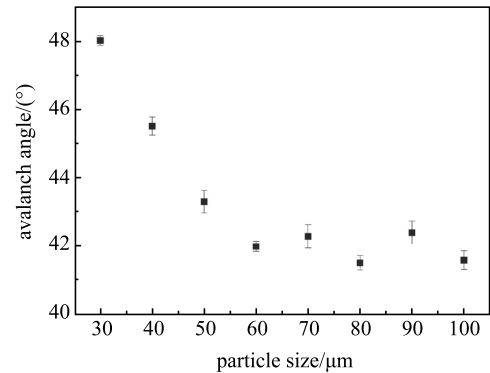


图 7 预热温度下 PA3200 粉粒径对崩塌角的影响

Fig. 7 Effect of particle size of PA3200 powder on avalanche angle at preheating temperature

从图 7 中可知: 在其他参数条件一定的情况下, 随着尼龙粉末粒径的增大, 尼龙粉末在加热旋转圆筒中的崩塌角减小, 粉体流动特性增强. 这主要是因为: 位于筒壁附近的粉末颗粒属于被动流, 颗粒之间没有相对运动, 此时颗粒沿着筒壁上升的高度主要由颗粒与筒壁之间的黏附力决定. 当粉体粒径增大时, 粉体和筒壁之间的黏附力 (范德华力和静电力) 增大, 颗粒和筒壁的黏附力会促使颗粒沿着筒壁转动而上升. 且大颗粒与加热旋转圆筒壁面之间的黏附力较大, 故大颗粒靠近加热旋转圆筒壁面, 小颗粒会在颗粒中心形成团聚. 圆筒中最外层的颗粒属于自由流动层, 其对整个粉体颗粒系统的运动起决定作用 [32-33]. 尼龙粉末之间静电力为斥力, 当粉末粒径增大时, 粉末间的范德华力和静电力都增大, 但是静电力的增大速率要大于范德华吸引力的增大速率, 故此时代颗粒之间的黏附力会减小, 而颗粒之间的黏附力是阻碍颗粒自由流动的主导因素, 因此, 增大尼龙粉末粒径可以改善其流动性能.

通过对不同粒径分布且 $D_{50}=90 \mu\text{m}$ 工况下的尼龙粉末流动特性进行 DEM 数值模拟, 得出粉末粒径分布为均匀分布和高斯分布时的崩塌角分别为 $40.37^\circ \pm 0.26^\circ$ 和 $42.41^\circ \pm 0.33^\circ$. 尼龙粉末粒径分布均匀时, 粉末沿着旋转圆筒壁面上升的最大高度会相对减小, 且颗粒间的团聚行为相对减弱, 粉末崩塌角也减小, 尼龙粉末流动特性增强. 因此, 减小用于 SLS 工艺的尼龙粉末粒径分布范围是提高粉末流动特性的有效手段, 但是, 会增加尼龙粉末制备成本. 所以, 以提高铺粉质量为目的, 通过研究尼龙粉末粒径

分布范围较广时的 SLS 铺粉工艺过程, 并试图降低铺粉质量对粉体粒径分布的依赖程度有利于 SLS 工艺得以顺利推广和铺粉工艺研究中必不可少的关键环节。

3 结 论

本文选取 SLS 技术中的尼龙粉末为原材料, 建立了预热温度下尼龙粉末 DEM 模型并对其进行了验证, 对加热旋转圆筒中尼龙粉末流动过程进行了 DEM 数值模拟, 研究了粉体粒径对尼龙粉末流动特性的影响规律. 研究表明:

(1) 对考虑细观作用力的预热温度下尼龙粉末 DEM 模型进行了研究, 基于 Hamaker 理论模型计算颗粒-颗粒以及颗粒-壁面之间的范德华力, 采用库伦定律计算颗粒之间的静电力, 并基于镜像力模型计算颗粒-壁面的静电力, 并在 Hertz-Mindlin 模型基础上引入了静电和范德华接触力来描述尼龙粉末的接触动力学行为。

(2) 采用实验方法获取了预热温度下尼龙粉末力学特性参数 (Hamaker 常数、弹性模量、内摩擦角以及电荷生成因子), 将这些力学特性参数代入建立的预热温度下尼龙粉末 DEM 模型中, 与实验结果进行对比验证了本模型的合理性。

(3) 在加热旋转圆筒中, 尼龙粉末崩塌角随着粉体颗粒粒径的增大而减小, 粉体流动性增强; 相对于粒径为高斯分布的尼龙粉末, 均匀分布的尼龙粉末颗粒流动性更强, 导致铺粉质量对粉体粒径分布的依赖性较高。

参 考 文 献

- 1 Das S. Physical aspects of process control in selective laser sintering of Metals. *Advanced Engineering Materials*, 2003, 5(10): 701-711
- 2 Kruth JP, Wang X, Laoui T, et al. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 2013, 23(4): 357-371
- 3 Olakanmi EO, Cochrane RF, Dalgarno KW. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 401-477
- 4 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造 (3D 打印) 技术发展. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 99-101 (Lu Bingheng, Li Dichen, et al. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology. *Machine Building and Automation*, 2013, 42(4): 99-101 (in Chinese))
- 5 刘景博, 刘世锋, 刘全明等. 选区激光烧结用粉末材料研究进展. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(4): 111-116 (Liu Jingbo, Liu Shifeng, Liu Quanming, et al. Research progress in powder materials for selective laser sintering. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(4): 111-116 (in Chinese))
- 6 李湘生, 黄树槐, 黎建军等. 激光选区烧结中铺粉过程分析. *现代制造工程*, 2008(2): 99-101 (Li Xiangshen, Huang Shuhuai, Li Jianjun, et al. Investigation on powder paving process of SLS. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008(2): 99-101 (in Chinese))
- 7 李湘生, 史玉升, 黄树槐. 激光选区烧结成形机的粉末预热研究. *机械工程学报*, 2002, 38(3): 94-94 (Li Xiangsheng, Shi Yusheng, Huang Shuhuai. Study on powder preheating of selective sintering laser. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(3): 94-94 (in Chinese))
- 8 Maarup C, Hjuler K, Dam-Johansen K. High temperature cement raw meal flowability. *Powder Technology*, 2014, 253: 686-690
- 9 Krantz M, Zhang H, Zhu J. Characterization of powder flow: Static and dynamic testing. *Powder Technology*, 2009, 194(3): 239-245
- 10 季顺迎, 孙珊珊, 陈晓东. 颗粒材料剪切流动状态转变的环剪试验研究. *力学学报*, 2016, 48(5): 1061-1072 (Ji Shunying, Sun Shanshan, Chen Xiaodong. Shear cell test on transition of shear flow states of granular materials. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1061-1072 (in Chinese))
- 11 Goodridge RD, Tuck CJ, Hague RJM. Laser sintering of polyamides and other polymers. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(2): 229-267
- 12 Yang RY, Zou RP, Yu AB. Computer simulation of the packing of fine particles. *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, 2000, 62(3): 3900-3908
- 13 Li Q, Rudolph V, Weigl B, et al. Interparticle van der Waals force in powder flowability and compactibility. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, 280(1): 77-93
- 14 Steuben JC, Iliopoulos AP, Michopoulos JG. Discrete element modeling of particle-based additive manufacturing processes. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2016, 305:537-561
- 15 Ganeriwala R, Zohdi T I. Multiphysics modeling and simulation of selective laser sintering manufacturing processes. *Procedia Cirp*, 2014, 14: 299-304
- 16 Tan YQ, Zheng JH, Gao W, et al. The effect of powder flowability in the selective laser sintering process. *Springer Proceedings in Physics*, 2016, 188: 629-636
- 17 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
- 18 向召伟, 殷鸣, 邓珍波等. 增材制造技术粉末床的数值模拟与分析. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2016, 48(2): 191-197 (Xiang Zhaowei, Yin Ming, Deng Zhenbo, et al. Simulation and analysis of powder bed for additive manufacturing. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(2): 191-197 (in Chinese))
- 19 Parteli EJR, Pöschel T. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing. *Powder Technology*, 2016, 288: 96-102
- 20 Gady B, Schleeff D, Reifemberger R, et al. Identification of electrostatic and van der Waals interaction forces between a micrometer-

- size sphere and a flat substrate. *Physical Review B Condensed Matter*, 1996, 53(12): 8065-8070
- 21 Jia T, Zhang Y, Chen JK, et al. Dynamic simulation of granular packing of fine cohesive particles with different size distributions. *Powder Technology*, 2012, 218(1): 76-85
 - 22 Hamaker HC. The London—van der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, 1937, 4(10): 1058-1072
 - 23 Greason WD. Investigation of a test methodology for triboelectrification. Electrical overstress/electrostatic Discharge Symposium Proceedings. *IEEE*, 2000, 49: 344-351
 - 24 Hughes FJ. Electrostatics: Principles, problems and applications. *Physics Bulletin*, 1987, 38(11): 424-424
 - 25 Jiang P, Bi H, Liang SC, et al. Hydrodynamic behavior of circulating fluidized bed with polymeric particles. *Aiche Journal*, 1994, 40(2): 193-206
 - 26 魏征, 孙岩, 王冉冉等. 轻敲模式下原子力显微镜的能量耗散. *力学学报*, 2017, 49(6): 1301-1311 (Wei Zheng, Sun Yan, Wang Zairan, et al. Energy dissipation in tapping mode atomic force microscopy. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(6): 1301-1311(in Chinese))
 - 27 Argento C, French RH. Parametric tip model and force—distance relation for hamaker constant determination from atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 1996, 80(11): 6081-6090
 - 28 肖湘武. 考虑细观作用力的尼龙粉末选择性激光烧结铺粉工艺研究. [博士论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2018 (Xiao Xiangwu. Research on Paving Process of Nylon Powder Considering Mesoscopic forces in Selective Laser Sintering. [PhD Thesis]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018 (in Chinese))
 - 29 Pei C, Wu CY, Adams M. DEM-CFD analysis of contact electrification and electrostatic interactions during fluidization. *Powder Technology*, 2016, 304: 208-217
 - 30 Pei C, Wu CY, England D, et al. Numerical analysis of contact electrification using DEM—CFD. *Powder Technology*, 2013, 248(2): 34-43
 - 31 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(1-2): 9-20
 - 32 Xiao X, Tan Y, Zhang H, et al. Experimental and DEM studies on the particle mixing performance in rotating drums: Effect of area ratio. *Powder Technology*, 2017, 314: 182-194
 - 33 闫明, 段文山, 陈琼等. 不同形状混合器中二元颗粒的分聚与混合研究. *力学学报*, 2016, 48(1): 64-75 (Yan Ming, Duan Wenshan, Chen Qiong, et al. The segregation and mixing of binary granular systems in rotating mixer with different cross—sections. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(1): 64-75(in Chinese))