



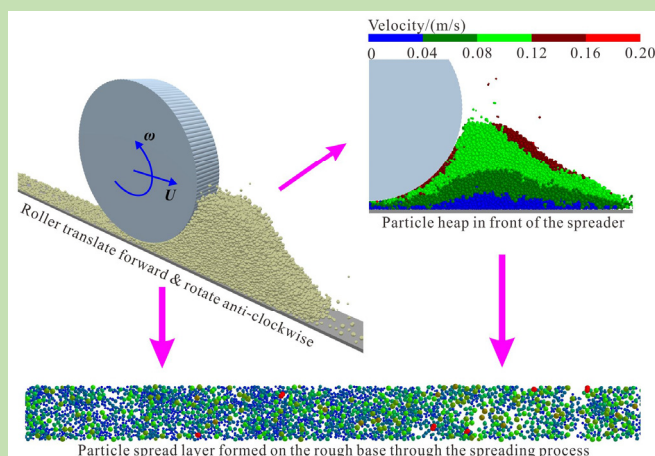
Investigation on the spreading dynamics of metal powder based on discrete element method

Wenguang NAN*, Yiqing GU

School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China

Abstract: The use of Additive Manufacturing (AM) is increasing at a fast rate in wide ranging industries, aerospace, medical technology, transport and energy. One of the manufacturing methods used in this field is based on powder processing, but its major bottleneck is associated with the quality of particle spread layer in the powder spreading process, as its underlying particle dynamics remains unknown, which is sensitive to the type of spreader and the cohesive interaction between particles. Here, the particle dynamics in the powder spreading process for a gas-atomised metal powder was explored by discrete element method (DEM), using the most realistic physical and mechanical properties of the particles. The velocity and trajectories of particle within the heap, and the quality of the particle spread layer, were compared in the blade and roller spreading processes. Their sensitivity to the cohesive interaction between particles were also explored. The results showed that compared to blade spreading, there were several velocity bands in cascading style and particle convection within the heap in the roller spreading process, due to the rotational motion of the roller spreader. Before the formation of particle spread layer in roller spreading, the particles needed to climb upward and slip downward along the edges of heap, resulting in longer trajectories of particles. With the increase of particle surface energy, the total particle volume of spread layer was reduced in both blade and roller spreading. Compared to blade spreading, the total particle volume of spread layer in the roller spreading was smaller and more sensitive to particle surface energy. This could be attributed to the formation mechanisms of particle spread layer, i.e. the ability of particles within the heap entering into the gap region between the rough base and spreader, and the drag effect of particles by the spreader in the gap region.

Key words: additive manufacturing; discrete element method; powder spreading; numerical simulation; metal powder; flowability



收稿: 2020-07-01, 修回: 2020-09-09, 网络发表: 2020-10-21, Received: 2020-07-01, Revised: 2020-09-09, Published online: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51806099)

作者简介: 南文光(1988-), 男, 湖北省黄冈市人, 博士, 助理教授, 研究方向: 颗粒动力学和离散元方法及应用, E-mail: nanwg@njtech.edu.cn.

引用格式: 南文光, 顾益青. 基于离散元方法的金属粉末铺粉动力学研究. 过程工程学报, 2020, 20(11): 1313-1320.

Nan W G, Gu Y Q. Investigation on the spreading dynamics of metal powder based on discrete element method (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(11): 1313-1320, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220210.

基于离散元方法的金属粉末铺粉动力学研究

南文光*, 顾益青

南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816

摘要: 增材制造技术在航空航天、医疗技术及运输和能源中的应用得到快速增长, 其常用方式之一是基于粉末加工。该技术主要瓶颈之一往往与铺粉过程形成的粉层质量有关, 颗粒动力学机制尚不清楚, 且受铺粉装置的类型和颗粒的黏附性影响很大。本工作基于实验测量和表征的单个颗粒的真实物理和力学参数, 采用离散元方法对增材制造常用气雾化金属粉末的铺粉过程进行了数值模拟分析, 比较了刮刀和辊子两种铺粉装置中粉堆内颗粒速度和轨迹及最终铺粉层的质量, 并分析了这些参数对颗粒黏附表面能的敏感程度。结果表明, 相比于刮刀铺粉, 在辊子铺粉过程中, 由于辊子旋转运动的作用, 粉堆内部存在多条拱形速度带和颗粒对流, 且在形成铺粉层之前, 颗粒需要经历爬坡上升和下坡滑落两个过程, 运动轨迹更长。另外, 两种铺粉装置中铺粉层颗粒总体积均随颗粒表面能的增加而降低, 但与刮刀铺粉相比, 辊子铺粉中铺粉层颗粒总体积小, 且对颗粒表面能更加敏感。铺粉装置类型和颗粒黏附性对铺粉层质量的影响可以归因为铺粉层的形成机制, 即颗粒从粉堆中进入铺粉间隙的难易程度及铺粉间隙中刮刀或辊子对颗粒的拖曳作用。

关键词: 增材制造; 离散元; 铺粉; 数值模拟; 金属粉末; 流动性

中图分类号: TB12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2020)11-1313-08

1 前言

增材制造技术由于具有快速成型、不受产品结构限制等一系列优势, 被广泛应用于航空航天、汽车、新能源利用等行业, 成为了一种推动传统制造业转型升级的重要力量^[1-4]。其中, 在以金属粉末为原料的增材制造技术中, 金属粉末通过刮刀或辊子等铺粉装置以薄层形式铺展在工作面上, 进而在高能量激光束作用下选择性熔化, 然后循环铺粉-熔化成三维零件。为了便于能量束对金属铺粉层进行烧结和熔融, 铺粉层一般很薄, 并要求粉体颗粒尺寸细小, 如 15~55 μm , 使颗粒间具有较强的黏附作用。同时, 常用的商用金属粉末一般采用气雾化技术制备得到, 颗粒表面存在突起(即卫星球), 使颗粒间具有较强的摩擦自锁作用。在颗粒黏附和机械摩擦的共同作用下, 颗粒在铺粉过程中的颗粒动力学特性极其复杂, 如铺粉间隙处的瞬态起拱和堵塞效应^[5]、铺粉装置前侧的颗粒剪切带^[6]、粉堆中颗粒的对流现象^[7]等。铺粉层的质量也因此受到众多因素影响, 如铺粉装置类型和颗粒黏附性等, 但相关机制仍不明确。

近年来, 离散元方法(Discrete Element Method, DEM)被广泛用于探究增材制造铺粉过程中颗粒的动力学行为^[5-20], 揭示铺粉层质量的影响机制。Parteli 等^[8]及 Haeri 等^[9]分析了辊子铺粉过程中工艺参数对铺粉层质量的影响, 认为辊子平移速度的增加会导致铺粉层质量

降低。Mindt 等^[16], Lee 等^[17], Fouda 等^[18], Desai 等^[20]也分析了工艺参数对铺粉层质量的影响, 但他们的数值模拟分析中均使用无黏附性的球形颗粒, 没有考虑颗粒间黏附性和颗粒形状的影响, 相关结果不能真实反映实际铺粉过程, 特别是 Fouda 等^[18]使用大小均一的颗粒(容易形成晶体结构)。Haeri^[11]基于离散元数值模拟结果, 对刮刀端部形状进行了优化, 提出了一种超椭圆形面刮刀, 使铺粉层的颗粒体积分数和表面粗糙可优于辊子铺粉装置。Chen 等^[10,19]、Meier 等^[12,13]和 Han 等^[14]分析了刮刀铺粉中颗粒间黏附性对铺粉层质量的影响, 其中, 使用的颗粒为球形颗粒, 颗粒间黏附性采用休止角法进行标定, 发现颗粒间黏附性较大会导致铺粉层质量下降。郑军辉^[15]分析了粒径分布对铺粉层密度的影响, 认为铺粉层均匀性随粒径分布标准差增大而变差。以上研究主要侧重于铺粉层质量的影响因素, 较少从机理上探究颗粒动力学和铺粉层形成机制。Nan 等^[5]对刮刀铺粉离散元数值模拟中所需的单颗粒的所有物理和力学参数进行了实验测量和表征, 如黏附表面能、颗粒形状等, 首次发现狭窄铺粉间隙会导致颗粒的瞬态堵塞行为, 并使工作面上形成空斑, 同时还阐述了其颗粒动力学机理。该发现随后被 Ghadiri 等^[2]和 Ahmed 等^[21]在同样的铺粉系统中进行了实验验证。Nan 等^[6]分析了刮刀铺粉中近壁面处颗粒流的剪切带, 发现不同工艺参数下刮刀前侧颗粒速度均满足高斯函数分布规律, 并基于时间无

量纲数提出了刮刀临界铺粉速度的理论预测公式。Nan 等^[7]首次发现辊子铺粉过程中颗粒会在粉堆中形成循环或对流, 并认为铺粉层中颗粒的分离现象和铺粉间隙中颗粒堵塞行为密切相关。

本工作在前期研究^[2,5-7,21]基础上, 采用离散元数值模拟方法, 进一步揭示铺粉过程中颗粒的动力学行为和铺粉层的形成机制。本工作基于常用不锈钢金属粉末的单个颗粒的真实物理和力学参数, 模拟了辊子和刮刀两种铺粉系统, 并分析了颗粒的速度分布、运动轨迹及铺粉层质量等特性, 揭示了颗粒间黏附性对铺粉层质量的影响机制, 以期进一步完善增材制造过程中金属粉末的铺粉动力学理论, 对实现铺粉层质量的提升具有一定指导意义。

2 模拟方法和条件

2.1 模拟方法

作为离散相, 每个颗粒的平移和旋转运动均可基于牛顿方程计算得到^[22-26]:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum F_{c,i} \quad (1)$$

$$\frac{d(I_i \omega_i)}{dt} = \sum M_{c,i} \quad (2)$$

式中, m_i 和 I_i 分别为颗粒的质量(kg)和惯性矩(kg·m²), v_i 和 ω_i 分别为颗粒的线速度(m/s)和角速度(rad/s), $F_{c,i}$ 为颗粒和颗粒或壁面间的接触力(N), $M_{c,i}$ 为接触力导致的力矩(N·m)。

对于非球形颗粒, 可采用多球元模型^[27]对其形状进行描述, 进而将颗粒间的相互作用过程简化为球形颗粒。本工作中, 颗粒发生接触时的弹性接触力采用 Hertz-Mindlin 模型描述^[23], 黏附作用力采用 JKR 模型^[28]计算, 即法向力 F_n :

$$F_n = \frac{4E^* a^3}{3R^*} - \sqrt{8\pi\Gamma E^* a^{3/2}} \quad (3)$$

式中, Γ 为颗粒间黏附表面能(mJ/m²), E^* 为当量杨氏模量(Pa), R^* 为当量半径(m), a 为接触半径(m), 可利用费拉里方法^[29]对下式进行降阶得到解析解:

$$\alpha = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{2\pi\Gamma a}{E^*}} \quad (4)$$

式中, α 为法向重叠量(m)。法向力 F_n 随 α 的变化如图 1 所示。在卸载过程中, 当 α 为负值时, 由于发生接触的两颗粒需要进一步克服黏附功才能完全脱离, 所以法向力 F_n 并不为 0。颗粒接触力计算的更多信息可参考文献^[23]。同时, 上述模型和模拟方法在金属粉末铺粉数

值模拟中的准确性已在 Ahmed 等^[21]的实验结果(即将实验结果与 Nan 等^[5]离散元模拟得到的铺粉层中空斑分布规律进行对比)中得到了验证。

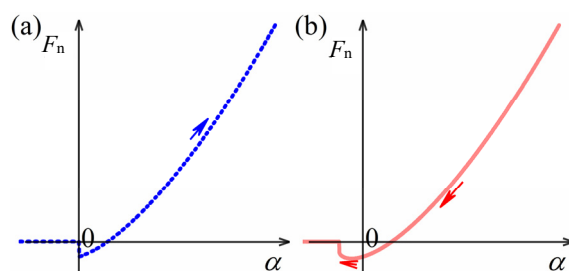


图 1 法向接触力 F_n 在加载阶段(a)和卸载阶段(b)随法向重叠量 α 的变化

Fig.1 Variation of normal contact force F_n with normal overlap α in the loading (a) and unloading (b) processes

2.2 颗粒物理和力学特性

本工作所用颗粒为气雾化 316L 不锈钢粉末, 由英国山特维克公司(Sandvik Osprey Ltd)提供。离散元数值模拟中所涉及的单个颗粒的物理和力学特性已由 Nan 等^[5]实验测量得到, 包括颗粒形状和大小、摩擦系数、恢复系数、杨氏模量和黏附表面能等, 如表 1 所示。其中, 颗粒尺寸由一系列 SEM 高清图像中随机选取的 2500 个颗粒统计分析得到。颗粒尺寸分布范围为 15~55 μm , 基于颗粒数量的 D_{10} , D_{50} 和 D_{90} 分别为 20, 32 和 45 μm 。

表 1 实验测量得到的单个颗粒的物理和力学特性^[5]
Table 1 Physical and mechanical properties of single particle characterized by experiment^[5]

Parameter	Value
Particle diameter, D_{90}/mm	0.045
Particle density, $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7980
Young's modulus, E^*/GPa	211
Poisson's ratio, ν	0.3
Friction coefficient, μ	0.5
Restitution coefficient, e	0.64
Surface energy, $\Gamma^*/(\text{mJ}/\text{m}^2)$	9.0

Note: in the simulation, Young's modulus is scaled down to $E_{\text{sim}}=2.1 \text{ GPa}$ while surface energy is correspondingly scaled to $\Gamma_{\text{sim}}=1.4 \text{ mJ}/\text{m}^2$

将颗粒尺寸划分为 4 种尺寸带, 即 15~25, 25~35, 35~45 和 45~55 μm 。对于每种尺寸带, 随机选取几个颗粒, 并采用球元拼接的方式对其形状进行重构, 共 24 种颗粒形状, 如图 2 所示。每种颗粒形状的概率分布满足总的颗粒尺寸分布(基于颗粒数量), 即 15~25, 25~35 和 35~45 μm 三种尺寸中的 19 种颗粒的概率均为 5%, 而

45~55 μm 中 5 种颗粒的概率均为 1%。由于铺粉间隙小, 铺粉动力学行为受大颗粒影响大, 故采用 D_{90} 作为基本尺度。

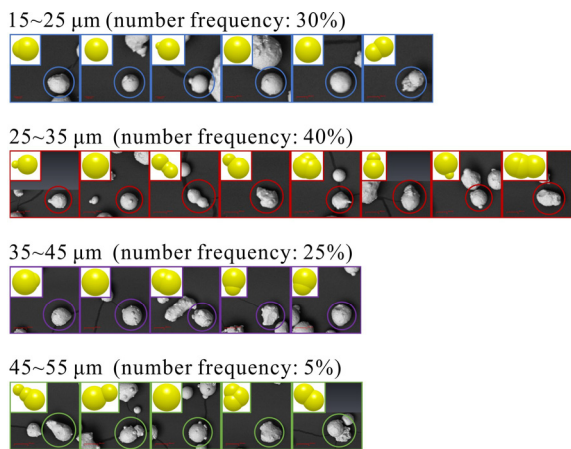


图 2 模拟中基于球元拼接的颗粒形状

Fig.2 Particle shapes used in simulations based on clumped spheres model

为了降低模拟时间, 在模拟过程中, 将杨氏模量缩小为实验值的 1/100, 即 $E_{\text{sim}}=2.1 \text{ GPa}$, 而表面能则基于 Hærvig 等^[30]和 Washino 等^[31]的理论[即式(5), 保证颗粒黏附功不变]进行成比例降低, 即 $\Gamma_{\text{sim}}=1.4 \text{ mJ/m}^2$, 以保证颗粒的动力学特性保持不变。

$$\Gamma_{\text{sim}} = \Gamma \left(\frac{E_{\text{sim}}}{E} \right)^{2/5} \quad (5)$$

式中, Γ 和 E 均为实验值, 如表 1 所示。

2.3 模拟系统

以辊子铺粉过程为例, 模拟系统由辊子(直径为 2 mm)及底板(长度为 $400D_{90}$)组成, 如图 3 所示。模拟系统在 Y 方向尺寸为 $10D_{90}$ 并采用周期性边界条件。为了避免颗粒在底板或辊子表面发生直接滑移, 底板和辊子表面采用圆柱拼接而成(对于底板, 圆柱直径为 D_{90} , 对于辊子, 圆柱直径为 $2D_{90}$; 相邻圆柱间重叠 50%), 以模拟实际粗糙表面。在初始床体(约 21 000 个颗粒)形成后, 将辊子置于设定高度, 以在辊子和工作面间形成一定间隙 δ (即 $2D_{90}=90 \mu\text{m}$)。随后, 辊子沿 X 方向向前移动并逆时针旋转, 将颗粒铺展在辊子后方的工作面上。其中, 辊子线速度为 $U=0.08 \text{ m/s}$, 旋转角速度为 $\omega=60 \text{ rad/s}$, 模拟时间步长为 10^{-8} s 。

为了研究不同铺粉装置对铺粉过程的影响, 本工作还模拟了刮刀铺粉过程, 即将图 3 中辊子更换成刮刀, 并采用相同的线速度 $U=0.08 \text{ m/s}$ 和铺粉间隙 $\delta=2D_{90}$ 。同时, 为了揭示不同铺粉装置对颗粒黏附性的敏感程

度, 本工作还采用了一种虚拟颗粒, 即将表 1 中的颗粒表面能增加到 8 倍: $\Gamma^*=72 \text{ mJ/m}^2$ 或 $\Gamma_{\text{sim}}^*=11.2 \text{ mJ/m}^2$ 。为减小刮刀或辊子初始时刻对粉堆的冲击作用对结果的影响, 下文均对最后 6 mm 铺粉过程进行分析。

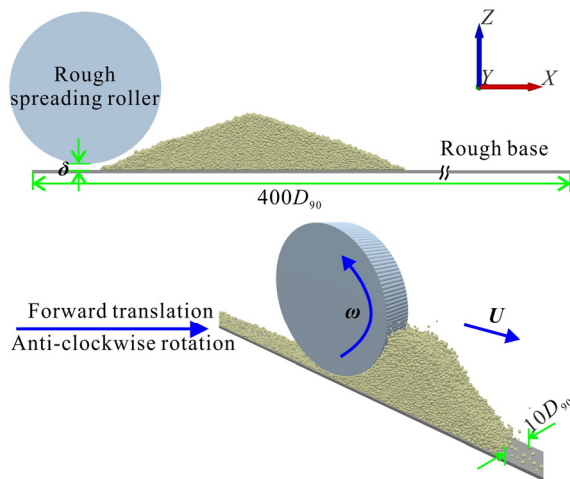


图 3 辊子铺粉中模拟系统示意图

Fig.3 The schematic diagram of the set-up of the simulation system of roller spreading process

3 结果与讨论

3.1 粉堆中颗粒流动形态

图 4 为铺粉过程中粉堆不同位置处颗粒的速度分布。在刮刀铺粉中, 粉堆中颗粒速度分布可以分为三个区域: (1) 速度带 A, B 和 C 位于粉堆底部, 且受粗糙底板的影响, 速度最小, 同时三者间没有明显边界, 混杂在一起; (2) 速度带 D, 位于速度带 A, B 和 C 的正上方, 是速度带的主要组成部分; (3) 速度带 E, 位于粉堆右侧坡面上, 此处颗粒在重力作用下加速滑落, 具有最大速度。在辊子铺粉中, 粉堆主要由速度带 A, B, C 组成, 而速度带 D 和 E 比较狭小, 位于辊子边缘和粉堆右侧坡面处。速度带 A, B 和 C 呈层叠拱形, 边界线类似抛物线形式, 是辊子铺粉过程中粉堆速度分布的最重要特征。该特征主要归因于辊子的旋转运动对粉堆的向上剪切作用。同时, 在辊子旋转运动的作用下, 部分颗粒被抛洒到距离粉堆较远的地方。由此可见, 相比于刮刀铺粉, 辊子铺粉过程中粉堆中颗粒速度分布更复杂, 存在多条拱形速度带, 且具有较大的速度梯度和剪切速率。

当颗粒表面能由 $\Gamma_{\text{sim}}=1.4 \text{ mJ/m}^2$ 增加至 $\Gamma_{\text{sim}}=11.2 \text{ mJ/m}^2$ 时, 颗粒间的黏附作用增强, 颗粒重力作用对颗粒动力学特性的影响减弱。在刮刀和辊子铺粉中, 颗粒在粉堆右侧坡面处的加速滑落趋势被抑制, 速度带 E 基

本消失,同时,右侧坡面形状也不再规则,颗粒呈现出明显的团聚特征。另外,在刮刀铺粉中,速度带 A、B 和 C 的区域的大小进一步被缩减,而在辊子铺粉中,速度带 C 的区域扩大。相比于刮刀铺粉,在辊子铺粉中,由于粉堆内部存在颗粒对流,黏附性对粉堆坡面倾角影响相对要小,粉堆形状变化不大。

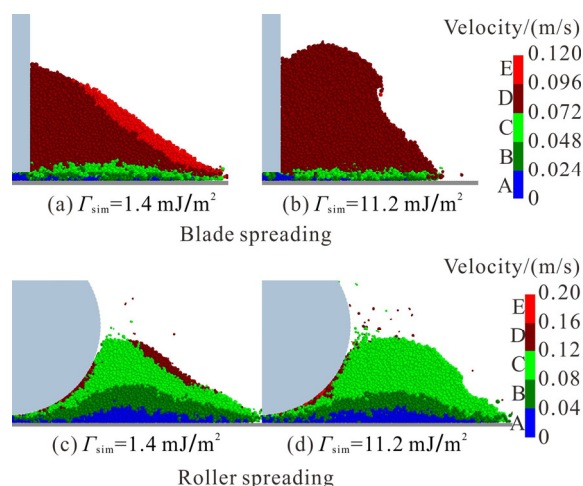
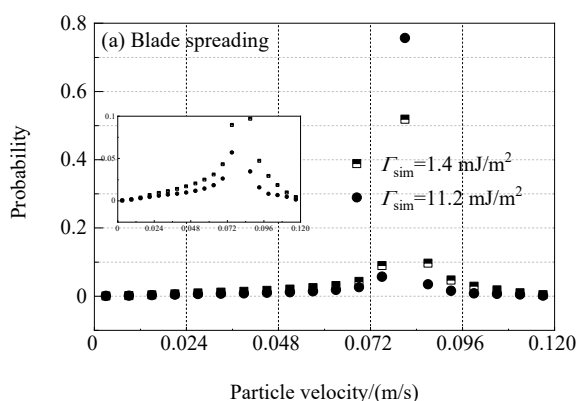


图 4 铺粉过程中粉堆中颗粒速度分布
Fig.4 Velocity distributions of particles within the heap

图 5 为粉堆中颗粒速度的概率分布。对于刮刀铺粉,速度分布呈现出明显的尖峰特征,即速度约为 0.08 m/s 时的概率远大于其他速度。对于辊子铺粉,其速度分布



主要集中在 0.02~0.12 m/s 区间。随颗粒表面能增加,刮刀和辊子铺粉过程中速度的概率分布曲线均变窄,尖峰所对应的概率增加,但曲线形式不受影响。结合图 4 和 5,可以发现,在刮刀铺粉中,刮刀相当于推着整个粉堆向前移动,而颗粒黏附表面能的增加使颗粒间以团聚形式向前运动,速度分布更加趋向集中。在辊子铺粉中,虽然辊子旋转运动所形成的剪切带很窄(3~5 倍颗粒直径,见图 4),但可以通过力链形式对整个粉堆造成影响,使颗粒边向前运动边在粉堆内部循环,速度分布较分散;而颗粒黏附表面能的增加会减弱辊子旋转运动对粉堆的剪切作用,使速度分布趋向集中。

为了描述粉堆中颗粒运动与最终铺粉层间的关系,本工作选取铺粉层末段中的颗粒,并对其在整个铺粉过程中的历史轨迹进行跟踪,如图 6 所示。其中,每条曲线对应一个颗粒的轨迹, x 和 z 坐标均采用 D_{90} 进行无量纲化。在刮刀铺粉过程中,颗粒轨迹较为单一,主要为沿坡面滑落到底板上而形成粉层。在辊子铺粉中,颗粒轨迹均呈现抛物线形态,即颗粒在形成铺粉层之前,需要经过爬坡上升和下坡滑落两个过程,轨迹更长。该特征主要归因于图 4 中颗粒的拱形速度带及辊子旋转运动导致的颗粒对流^[7]。当颗粒表面能由 $\Gamma_{sim}=1.4 \text{ mJ/m}^2$ 增至 $\Gamma_{sim}=11.2 \text{ mJ/m}^2$ 时,刮刀铺粉中颗粒轨迹并没有太大变化,但在辊子铺粉中,颗粒轨迹则显得更集中,表明颗粒成团状运动,且经历较长的低 z 区域(即颗粒在靠近底板处运动)才能形成铺粉层。

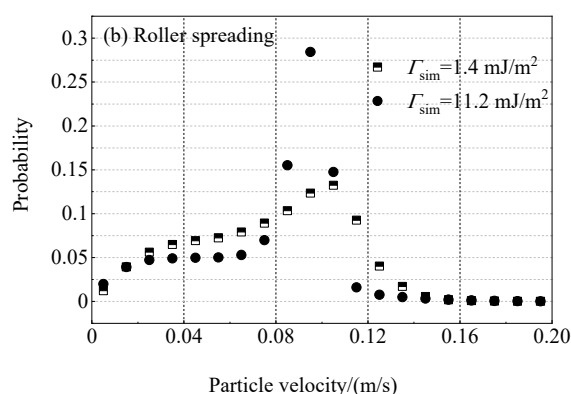


图 5 刮刀铺粉和辊子铺粉粉堆中颗粒速度概率分布
Fig.5 Probability distributions of particle velocity within the heap of blade spreading and roller spreading

3.2 颗粒铺粉层

图 7 为铺粉结束后铺粉层的局部放大图,其中,颗粒采用单个颗粒体积进行着色。相比于刮刀铺粉,辊子铺粉中铺粉层较稀疏,且大颗粒(红色)较少。该特征表明辊子铺粉更易导致颗粒发生分离行为,使铺粉层中颗

粒分布偏离初始分布状态。当颗粒表面能由 $\Gamma_{sim}=1.4 \text{ mJ/m}^2$ 增加至 $\Gamma_{sim}=11.2 \text{ mJ/m}^2$ 时,在刮刀铺粉中,铺粉层变得稀疏但大颗粒数量(红色)增加很多;而在辊子铺粉中,铺粉层中颗粒密集程度大幅度下降,且呈现出一系列大小不一的空斑。其中,空斑主要是由于铺粉间隙

处的瞬态堵塞行为导致^[5]。

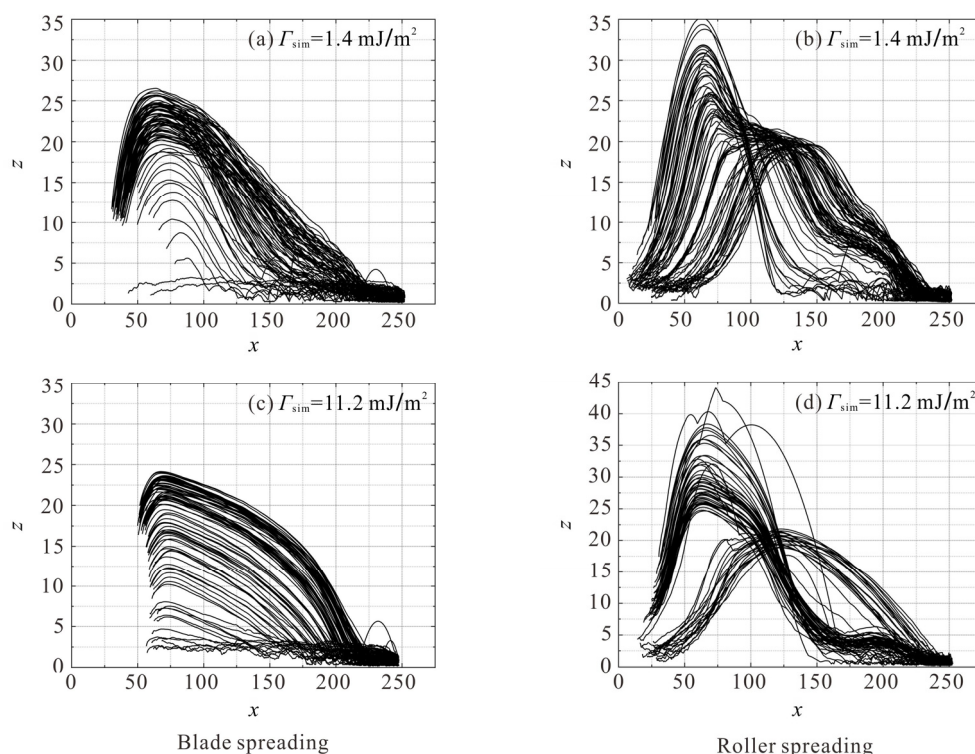


图6 粉堆颗粒瞬时轨迹(x 和 z 采用 D_{90} 无量纲化)

Fig.6 Temporal spatial positions of particles (x and z are normalized by D_{90})

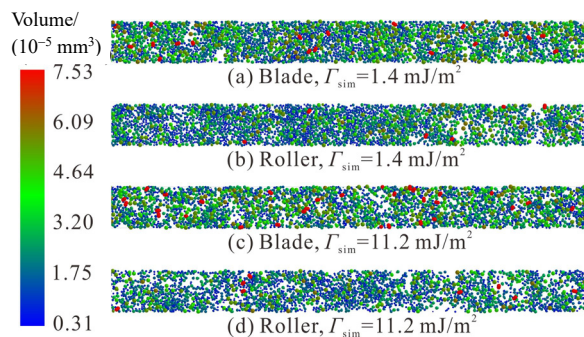


图7 铺粉层局部放大图

Fig.7 Images of the particle spread layer

为了表征铺粉层中颗粒的体积,采用下式对其无量纲化:

$$V_{\text{layer}} = \frac{\sum V_p}{LWD_{90}} \quad (6)$$

式中, V_p 为单个颗粒的体积(m^3), L 为铺粉层的长度(X 方向, m), W 为铺粉层的宽度(Y 方向, m)。图8为不同铺粉装置中铺粉层的颗粒总体积。可以发现,随颗粒表面能增加,颗粒总体积降低。与刮刀铺粉相比,辊子铺粉中铺粉层颗粒总体积要小,且对颗粒表面能更加敏感。这与图7中铺粉层的颗粒分布特征一致。

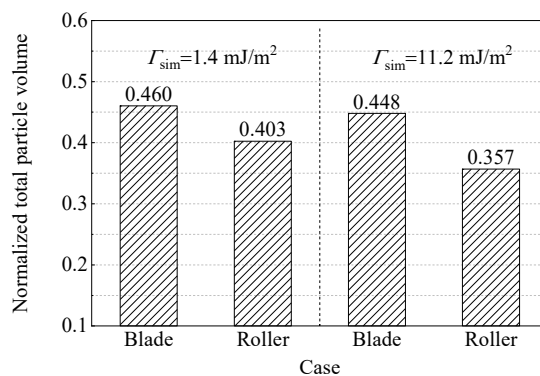


图8 铺粉层中颗粒体积

Fig.8 Total particle volume within the spread layer

为了揭示铺粉装置和颗粒黏附表面能对铺粉层颗粒总体积的影响机制,这里基于 Nan 等^[6,7]提出的理论公式进行进一步阐述。其借用颗粒卸料理论中 Beverloo 方程^[32]的理念,结合铺粉过程中动/静壁面边界效应,认为当铺粉速度不超过临界速度时,铺粉层中颗粒总体积可以由下式给出^[6,7]:

$$V_{\text{layer}} = k_{\text{layer}} \frac{\delta - \delta_c}{D_{90}} \quad (7)$$

式中, k_{layer} 只取决于颗粒的物理属性, 一般小于 1; δ_c 为临界铺粉间隙(m), 一般大于 D_{90} , 以考虑底板与刮刀或辊子的边界影响而形成的有效铺粉间隙($\delta - \delta_c$), 其主要取决于颗粒的物理属性和铺粉装置。

铺粉层的形成主要由两个过程组成: (1) 颗粒在刮刀或辊子及颗粒重力的作用下, 从粉堆中进入铺粉间隙; (2) 在粗糙底板滞留作用和刮刀或辊子拖拽作用的共同竞争下, 铺粉间隙处的颗粒不能很好地跟随刮刀或辊子向前运动, 进而被刮刀或辊子遗留在底板上形成铺粉层。

相比于刮刀, 辊子的旋转运动对粉堆有向上的卷吸作用, 使颗粒难以进入铺粉间隙。同时, 在铺粉间隙处, 由于辊子剪切作用强烈, 辊子铺粉中颗粒平均速度较大, 如图 9 所示, 即颗粒更易跟随辊子向前移动而不被铺展在底板上。在二者共同作用下, 相比于刮刀铺粉, 辊子铺粉中边界效应更强烈, 使有效铺粉间隙降低(即 δ_c 增加), 导致铺粉层颗粒总体积减小。

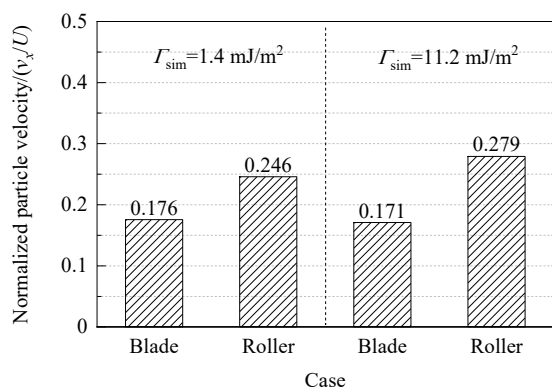


图 9 铺粉间隙中颗粒平均速度

Fig.9 Averaged particle velocity in the spreading gap

随颗粒表面能增加, 颗粒不易发生流动, 铺展性能降低, 使 k_{layer} 降低, 导致刮刀和辊子铺粉装置中铺粉层颗粒总体积减小。其中, 铺展性能指金属粉末能均匀铺展在底板上而不产生空斑的能力^[2]。与刮刀铺粉相比, 在辊子铺粉过程中, 铺粉间隙处颗粒速度对颗粒表面能更敏感, 如图 9 所示。随着颗粒表面能的增加, 颗粒更易跟随辊子向前移动, 即颗粒表面能的增加使辊子对铺粉间隙处颗粒的拖拽作用更强烈, 使 δ_c 也进一步增加, 导致辊子铺粉中铺粉层颗粒总体积对颗粒表面能较刮刀铺粉更敏感。

因此, 对于铺粉层颗粒总体积, 铺粉装置的影响在

于临界铺粉间隙 δ_c , 而颗粒黏附表面能主要在于对 k_{layer} 的直接影响及对临界铺粉间隙 δ_c 的间接影响。

4 结 论

基于单个颗粒的真实物理和力学参数, 对增材制造常用的气雾化 316L 不锈钢粉末的铺粉过程进行了离散元数值模拟, 比较了刮刀和辊子两种铺粉过程中粉堆内部颗粒的动力学特性和铺粉层的颗粒总体积等特性的差异, 并分析了其对颗粒表面能的敏感程度, 主要结论如下:

(1) 相比于刮刀铺粉, 辊子铺粉过程中粉堆内部存在拱形速度带, 且具有较大的速度梯度; 颗粒在形成铺粉层之前, 需要经过爬坡上升和下坡滑落两个过程, 轨迹更长。

(2) 在刮刀铺粉中, 颗粒间的强黏附作用使得颗粒间以团聚的形式向前运动, 速度概率分布曲线呈现明显的尖峰特征; 而在辊子铺粉中, 辊子的旋转运动使粉堆内部存在颗粒对流, 速度分布较分散, 而颗粒黏附表面能的增加会减弱辊子旋转运动对粉堆的剪切作用, 使速度分布趋向集中。

(3) 大颗粒对铺粉装置类型比较敏感, 在辊子铺粉中不容易被铺展在工作面上。同时, 随颗粒表面能增加, 铺粉层颗粒总体积降低。与刮刀铺粉相比, 辊子铺粉中铺粉层颗粒总体积要小, 且对颗粒表面能更敏感。

(4) 铺粉装置类型和颗粒黏附性对铺粉层质量的影响可归因为铺粉层的形成过程和机制, 即颗粒从粉堆中进入铺粉间隙的难易程度及铺粉间隙中刮刀或辊子对颗粒的拖拽作用。

参考文献

- [1] 魏青松. 增材制造技术原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1.
Wei Q S. Principle and application of additive manufacturing technology [M]. Beijing: Science Press, 2017: 1.
- [2] Ghadiri M, Pasha M, Nan W, et al. Cohesive powder flow: trends and challenges in characterisation and analysis [J]. Kona Powder and Particle Journal, 2020, 37: 3–18.
- [3] 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 [J]. 力学学报, 2019, 51(1): 56–63.
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.
- [4] 王昌镇. 钛合金粉末的流动性及激光选区熔化成型研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2017: 1.
Wang C Z. Study on the flowability of titanium alloy powder and the

- selective laser melting [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017: 1.
- [5] Nan W, Pasha M, Bonakdar T, et al. Jamming during particle spreading in additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2018, 338: 253–262.
- [6] Nan W, Ghadiri M. Numerical simulation of powder flow during spreading in additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 801–807.
- [7] Nan W, Pasha M, Ghadiri M. Numerical simulation of particle flow and segregation during roller spreading process in additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2020, 364: 811–821.
- [8] Parteli E J R, Pöschel T. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2016, 288: 96–102.
- [9] Haeri S, Wang Y, Ghita O, et al. Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2017, 306: 45–54.
- [10] 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 [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 146–159.
- [11] Haeri S. Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in additive manufacturing using DEM simulations [J]. *Powder Technology*, 2017, 321: 94–104.
- [12] Meier C, Weissbach R, Weinberg J, et al. Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 484–501.
- [13] Meier C, Weissbach R, Weinberg J, et al. Modeling and characterization of cohesion in fine metal powders with a focus on additive manufacturing process simulations [J]. *Powder Technology*, 2019, 343: 855–866.
- [14] Han Q, Gu H, Setchi R. Discrete element simulation of powder layer thickness in laser additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2019, 352: 91–102.
- [15] 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: 47.
- Zheng J H. Numerical research on powder paving process of nylon powder selective laser sintering [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016: 47.
- [16] Mindt H W, Megahed M, Lavery N P, et al. Powder bed layer characteristics: the overseen first-order process input [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(8): 3811–3822.
- [17] Lee Y S, Nandwana P, Zhang W. Dynamic simulation of powder packing structure for powder bed additive manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 1507–1520.
- [18] Fouda Y M, Bayly A E. A DEM study of powder spreading in additive layer manufacturing [J]. *Granular Matter*, 2019, 22(10): 1–18.
- [19] Chen H, Wei Q, Zhang Y, et al. Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: experiments and computational modeling [J]. *Acta Materialia*, 2019, 179: 158–171.
- [20] Desai P S, Higgs C F. Spreading process maps for powder-bed additive manufacturing derived from physics model-based machine learning [J]. *Metals*, 2019, 9(11): 1176.
- [21] Ahmed M, Pasha M, Nan W, et al. A simple method for assessing powder spreadability for additive manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 671–679.
- [22] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47–65.
- [23] Thornton C. Granular dynamics, contact mechanics and particle system simulations [M]. New York: Springer, 2015: 46–50.
- [24] Nan W, Ghadiri M, Wang Y. Analysis of powder rheometry of FT4: effect of particle shape [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 173: 374–383.
- [25] Nan W, Ghadiri M, Wang Y. Analysis of powder rheometry of FT4: effect of air flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 162: 141–151.
- [26] Nan W, Wang Y, Wang J. Numerical analysis on the fluidization dynamics of rodlike particles [J]. *Advanced Powder Technology*, 2016, 27(5): 2265–2276.
- [27] Favier J F, Abbaspour-Fard M H, Kremmer M, et al. Shape representation of axi-symmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multi-element model particles [J]. *Engineering Computations*, 1999, 16(4): 467–480.
- [28] Johnson K, Kendall K, Roberts A. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical and Physical Sciences*, 1971, 324(1558): 301–313.
- [29] Korn G A, Korn T M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review [M]. New York: Courier Corporation, 2000: 24.
- [30] Hærvig J, Kleinhans U, Wieland C, et al. On the adhesive JKR contact and rolling models for reduced particle stiffness discrete element simulations [J]. *Powder Technology*, 2017, 319: 472–482.
- [31] Washino K, Chan E L, Tanaka T. DEM with attraction forces using reduced particle stiffness [J]. *Powder Technology*, 2018, 325: 202–208.
- [32] Nedderman R M. Statics and kinematics of granular materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 292–297.