

增材制造中金属粉末卡塞动力学离散元模拟研究

南文光^{1,2} 顾益青¹ Mojtaba Ghadiri²

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816;

2. 利兹大学化学和过程工程学院, 利兹 S2 9JT)

摘要 基于金属粉末的增材制造技术在航空航天、新能源和新材料等领域中得到快速应用, 但其产品性能受制于铺粉过程形成的粉层质量。本文基于金属粉末中离散颗粒的真实物理和力学参数, 采用离散元方法对刮刀铺粉过程进行了模拟和分析。结果表明, 粉层中颗粒总体积与铺粉间隙成线性关系, 且临界铺粉间隙为基于颗粒数量的 D_{90} 。同时, 粉层沿铺粉方向容易出现空斑, 空斑的数量随其长度呈指数递减的规律, 且空斑大小与铺粉间隙密切相关。颗粒容易在铺粉间隙处发生卡塞行为, 发生概率随持续时间增加而急剧降低, 且持续时间长的卡塞行为对粉层中空斑的形成起着主导作用。颗粒卡塞瞬间会产生强烈的力链结构, 并通过颗粒迸射过程而在粉层中产生空斑。

关键词 增材制造; 铺粉; 空斑; 卡塞; 离散元

中图分类号: TB12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2022)05-1260-07

Discrete Element Simulation of Metal Powder Spreading in Additive Manufacturing

NAN Wenguang^{1,2} GU Yiqing¹ MOJTABA Ghadiri²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211806, China;

2. School of Chemical and Process Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

Abstract The use of Additive Manufacturing (AM) based on metal powder has been rapidly applied in the fields of aerospace, new energy and new materials, but its product performance is limited by the quality of the powder layer formed during the spreading process. Based on the realistic physical and mechanical properties of an individual particle in the metal powder, the blade spreading process in additive manufacturing is simulated in this work by discrete element method. The results show that the total volume of particles in the spread layer is linear to the spreading gap, and the critical spreading gap size is the number based D_{90} . Meanwhile, empty patches could be found in the spread layer along the spreading direction, and the number of empty patches decreases with its length in an exponential law while the size of empty patches is sensitive to the gap size. Particle jamming could occur at the spreading gap, and its probability decreases sharply with the survival time. The jamming event with longer survival time has more effects on the formation of empty patches in the spread layer. During the survival period of particle jamming in the spreading direction, large force of the contact pair is generated, and then the empty patches in the spread layer is formed through the burst process of particles.

Key words additive manufacturing; powder spreading; empty patches; jamming; discrete element method

0 引言

增材制造技术由于在快速制造复杂或定制形状产品方面的巨大潜力, 在航空航天、新能源和新材料、生物、医学和建筑等领域得到了广泛的应用^[1-3]。作为一种新型的生产技术, 增材制造技术能够直接从计算机辅助设计 (3D CAD) 系统中创建三维对象, 而不需要昂贵的模具和大量的时

间^[4-6]。其中, 在以金属粉末为原料的增材制造技术中, 一般先采用刮刀或滚筒将金属粉末以薄层形式铺展在工作面上, 进而采用激光对该薄层进行选择性的烧结成型, 然后循环铺粉和烧结过程直至形成所需零件。对于常用的雾化金属粉末, 颗粒球形度往往较差, 颗粒表面容易存在突起, 使得颗粒

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51806099)

作者简介: 南文光 (1988-), 男, 助理教授, 博士, 主要从事颗粒动力学应用研究, Email: nanwg@njtech.edu.cn。

在发生接触时容易发生机械咬合。同时, 金属粉末中颗粒尺寸非常细小, 使得颗粒在发生接触时范德华力较强, 导致颗粒间具有较强的黏附性 [7]。另外, 铺粉过程中刮刀或滚筒与工作面间的间隙非常狭小, 和颗粒直径相当。在颗粒黏附和机械咬合的共同作用下, 颗粒在铺粉过程中通过狭小铺粉间隙时容易产生瞬态起拱和卡塞效应, 特别是在铺粉速度比较快的情况下, 导致铺粉过程颗粒动力学行为复杂多变, 最终形成的粉层的质量无法得到精确控制 [8], 进而直接影响到最终产品的性能。

近年来, 离散元方法 (Discrete Element Method, DEM) 被开始应用于铺粉过程的数值模拟研究 [9-14], 以从颗粒微观动力学行为角度揭示粉层质量的影响因素和内在机制。Parteli & Pöschel [9] 以及 Haeri 等 [10] 分析了滚筒铺粉过程中铺粉速度和间隙对粉层质量的影响, 认为粉层质量随着铺粉速度的增加而降低。Mindt 等 [14] 也随后分析了铺粉工艺参数与粉层质量间的相关性, 但其数值模拟分析中均使用无黏附性的球形颗粒, 没有考虑实际颗粒形状和颗粒间黏附性和颗粒对铺粉过程的影响。Haeri [12] 采用离散元数值模拟对刮刀端部形状进行了优化, 认为采用超椭圆型面刮刀可以提高最终粉层中颗粒体积分数和表面粗糙度。Chen 等 [11] 分析了刮刀铺粉中颗粒黏附性对粉层质量的影响, 发现颗粒间黏附性增加会导致粉层质量下降, 但其使用的颗粒为球形颗粒, 而颗粒间黏附性采用休止角法进行标定。郑军辉等 [13] 分析了颗粒粒径分布对铺粉层密度的影响, 认为粒径分布标准差增大会导致粉层均匀性降低。这些研究主要通过离散元方法探究了粉层表面粗糙度和床堆中颗粒动力学特征与铺粉工艺参数间的相关性, 但鲜有结果涉及到实际粉层中的空斑问题。

本文基于常用的气雾化不锈钢金属粉末, 利用粉末中单个颗粒的真实物理和力学参数, 对不同铺粉间隙下刮刀铺粉过程进行了离散元数值模拟。本文首先分析粉层中颗粒总体积变化规律和空斑的分布特征, 然后从颗粒动力学角度揭示粉层中空斑的形成机理, 进而阐明铺粉间隙对铺粉过程中颗粒动力学行为的影响机制, 以期对提升增材制造粉层质量提供一定的理论支撑。

1 模拟方法与计算工况

1.1 离散元方法

铺粉过程中颗粒的动力学特性采用牛顿运动方程进行计算 [15-17]:

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

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

式中, m_i 和 I_i 分别为颗粒的质量和惯性矩; v_i 和 ω_i 分别为颗粒的平移速度和角速度; $F_{c,i}$ 为颗粒与颗粒或壁面间发生接触时的相互作用力; $M_{c,i}$ 是接触力导致的力矩。

对于常用的气雾化金属粉末, 受现有制备工艺的限制, 颗粒球形度较差, 表面存在凸起, 如图 1 所示。为了描述非球形颗粒间的相互作用过程, 本文采用 Favier 等 [18] 提出的多球元模型描述颗粒形状, 进而将实际颗粒间的相互作用过程简化为球形颗粒。颗粒间发生接触时的弹性接触力采用 Hertz-Mindlin 模型 [16,19] 描述, 而黏附作用力采用 JKR 理论 [16,19] 进行计算:

$$F_{JKR} = \sqrt{8\pi\Gamma E^*} a^{3/2} \quad (3)$$

式中, Γ 为黏附表面能; E^* 为等效杨氏模量; a 为接触半径。

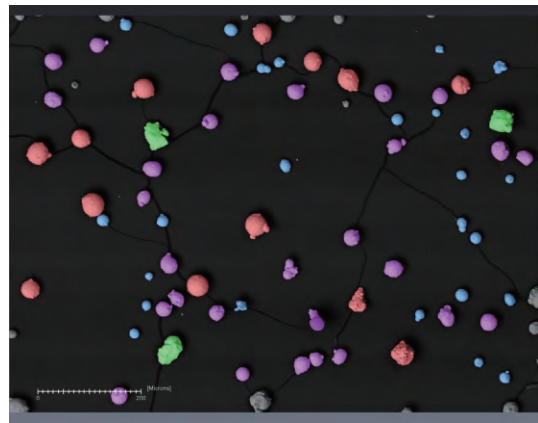


图 1 金属粉末中颗粒的 SEM 图

Fig. 1 SEM image of particles in metal powder

1.2 模拟条件

本文所用颗粒为英国山特维克公司 (Sandvik Osprey Ltd) 提供的气雾化 316L 不锈钢粉末。颗粒的尺寸分布范围为 15~55 μm , 且基于颗粒数量的 D_{90} 为 45 μm 。本文采用 D_{90} 作为本文的基本尺度。为了准确获得金属粉末中颗粒的形状, 本文将高清 SEM 图像 (如图 1 所示) 中颗粒的粒径划分为 4 种尺寸带, 即 15~25, 25~35, 35~45 和 45~55 μm , 并对于每种尺寸带, 随机选取 5~8 个颗粒作为典型颗粒, 进而利用 Avizo Fire 软件采用球元拼接的方式对这些颗粒的形状进行重构, 如图 2 所示。在模拟过程中, 24 种典型颗粒的数量的概率分布如图 3 所示, 以保证数值模拟中这些颗粒的尺寸分布规律与实际金属粉末中的颗粒相吻合。

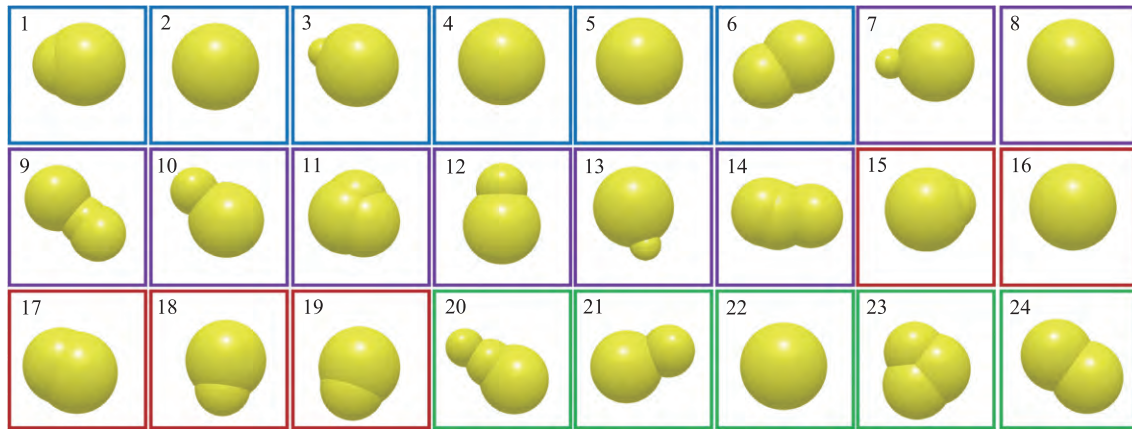


图 2 数值模拟中 24 种典型颗粒的几何形状以及所属尺寸带 (15~25 μm , 25~35 μm , 35~45 μm 和 45~55 μm)
Fig. 2 Shapes of 24 typical particles in simulations and their size ranges (15~25 μm , 25~35 μm , 35~45 μm and 45~55 μm)

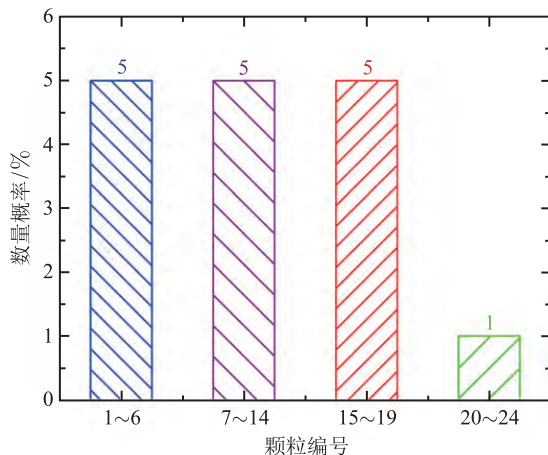


图 3 典型颗粒的数量概率
Fig. 3 Number frequency of representative particles

对于颗粒间的黏附表面能,可采用下落实验法^[20]测量得到,即 $\Gamma_{\text{exp}}=9.0 \text{ mJ/m}^2$;对于颗粒的杨氏模量,可采用压痕法^[21]测量得到,即 $E_{\text{exp}}=211 \text{ GPa}$ 。由于计算时间步长取决于颗粒的杨氏模量,本文在模拟过程中将颗粒杨氏模量缩小为实际值的 1/100,以提高计算速度,减小模拟时间。例如,当颗粒杨氏模量从 211 GPa 减小到 2.1 GPa 时,模拟时间步长可从 10^{-9} s 增加到 10^{-8} s ,进而可使得单个算例的模拟时间可缩小为一周。同时,为了保证颗粒的动力学特性不变,本文采用 Behjani 等^[22], Hærvig 等^[23]和 Washino 等^[24]提出的准则数(式(4)),将黏附表面能从 $\Gamma_{\text{exp}}=9 \text{ mJ/m}^2$ 减小为 $\Gamma=1.4 \text{ mJ/m}^2$:

$$\Gamma = \Gamma_{\text{exp}} \left(\frac{E}{E_{\text{exp}}} \right)^{2/5} \quad (4)$$

式中, Γ_{exp} 和 E_{exp} 为实验测量值, Γ 和 E 为模拟

使用值。模拟过程中颗粒物理和力学特性以及颗粒间相互作用参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 模拟过程中颗粒的物理和力学特性

Table 1 Physical and mechanical properties of particles in simulations

参数	数值
颗粒密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7980
杨氏模量 E/GPa	2.1
泊松比 ν	0.3

表 2 模拟过程中颗粒-颗粒/壁面间相互作用参数

Table 2 Interaction parameters of particle-particle/wall in simulations

参数	数值
摩擦系数 μ	0.5
恢复系数 e	0.64
表面能 $\Gamma/\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$	1.4

刮刀铺粉过程的模拟系统如图 4 所示,主要由刮刀和底板(工作面)组成。模拟系统在 Y 方向采用周期性边界条件,且尺寸为 $10D_{90}$ 。底板的长度为 $400D_{90}$,且在铺粉方向(X 方向)由相互重叠的圆柱拼接而成(圆柱轴向为 Y 方向),以模拟实际过程中工作面的粗糙特征(即粗糙度为 $Ra=0.63$)和避免颗粒在工作面上直接发生滑移。

在初始床体形成后,将刮刀向上移动到指定高度,以与底板间形成一定的间隙 δ ,如图 4 所示。在此基础上,刮刀以固定速度 U 开始向前移动(X 方向),进而将颗粒不断铺展在粗糙底板上,直到在刮刀后方形成长度为 $300D_{90}$ 的粉层。为了探究铺粉工况的影响,模拟过程中的铺粉间隙 δ 变化范围为 $1.5\sim 3.0D_{90}$,而刮刀的铺粉速度 U 固定为 0.08 m/s 。为了减小刮刀运动初始阶段的影响,下文分析结果

均不计入最开始形成的粉层段 (长度为 $100D_{90}$) 以及对应的铺粉过程。

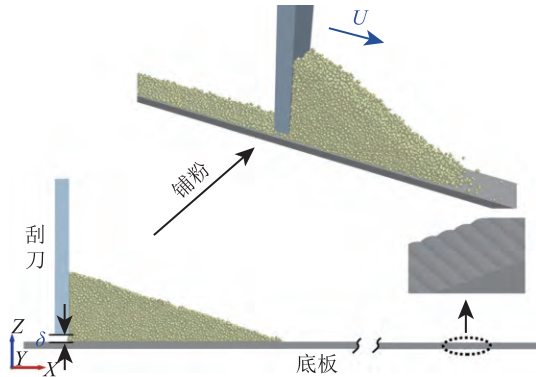


图 4 刮刀铺粉过程模拟示意图

Fig. 4 Simulation diagram of powder spreading process

2 模拟结果

2.1 粉层的基本特征

不同铺粉间隙下粉层的局部放大图如图 5 所示。其中, 颗粒采用颗粒直径进行描色, 即蓝色: $15\sim 25\ \mu\text{m}$, 深灰色: $25\sim 35\ \mu\text{m}$, 浅灰色: $35\sim 45\ \mu\text{m}$, 红色: $45\sim 55\ \mu\text{m}$ 。可以发现, 沿着铺粉方向, 粉层中会出现大小不一的空斑 (即没有被颗粒覆盖的区域), 尤其是在铺粉间隙非常狭小的工况下。当铺粉间隙为 $\delta/D_{90}=1.5$ 时, 粉层中大颗粒非常少, 说明在该工况下, 大颗粒在铺粉间隙处发生了卡塞现象, 无法顺利通过间隙, 进而不能被成功铺展在底板上。随着铺粉间隙增加, 粉层中颗粒分布更加均匀, 空斑减少。当 $\delta/D_{90}=3.0$ 时, 粉层中没有空斑出现。

为了考虑模拟系统中有限尺寸的影响, 这里采用下式对粉层中颗粒的总体积进行无量纲化:

$$V_{\text{layer}} = \frac{\sum V_p}{LWD_{90}} \quad (5)$$

式中, L 和 W 分别为粉层的长度和宽度; V_p 为粉层中单个颗粒的体积。图 6 为粉层中颗粒总体积随铺粉间隙的变化规律。可以发现, 随着铺粉间隙的增加, 粉层中颗粒总体积也随之增加, 并且呈现出线性规律。基于最小二乘法拟合得到的公式, 可以发现, 当 $\delta_c=1.0D_{90}$ 时, 颗粒总体积接近为零。因此, $\delta_c=1.0D_{90}$ 可以认为是临界铺粉间隙, 约为颗粒等效球体积直径 ($33.4\ \mu\text{m}$) 的 1.35 倍。同时, 式 (8) 中 V_{layer} 也是粉层高度的表征参数, 受到粉层中颗粒间空隙、底板粗糙度和刮刀拖曳作用等因素的影响, 粉层高度远小于铺粉间隙。

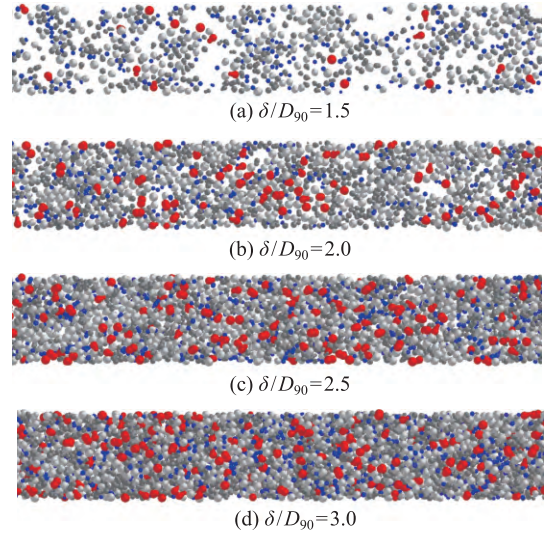


图 5 粉层局部放大图

Fig. 5 Locally enlarged images of spread layer

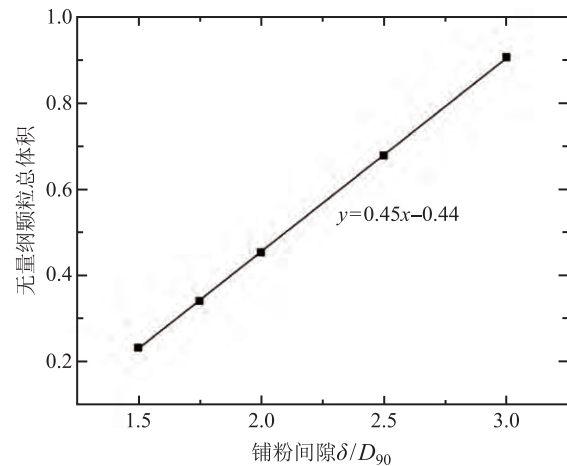


图 6 粉层中颗粒总体积 V_{layer} 随铺粉间隙的变化规律

Fig. 6 Variation of total volume V_{layer} of particles of spread layer with gap size δ

为了分析粉层中空斑的分布规律, 本文将粉层沿铺粉方向 (X 方向) 划分为多个母单元 ($\Delta x = 2D_{90}$, 共 199 个), 且相邻母单元间重叠 50%; 将每个母单元沿 Y 方向划分为一系列子单元 ($\Delta y = 1.25D_{90}$)。对于给定的母单元, 若内部任意子单元中颗粒总体积满足下式, 则表明该母单元为空斑:

$$\frac{\sum V_p}{\Delta x \times \Delta y \times (\delta - \delta_c)} < 0.1 \quad (6)$$

式中, $\delta_c=1.0D_{90}$ 为临界铺粉间隙。因此, 在该检测方法中, 只有沿铺粉方向长度大于 $2D_{90}$ 的空斑才会被考虑。若 i 个空斑所在母单元毗邻, 则认为它们属于同一个空斑, 且其长度为 $L_{\text{ep}} = (i+1)D_{90}$ 。

粉层中空斑数量 N_{ep} 随空斑长度 L_{ep} 的变化规

律如图 7 所示。可以发现, 当 $\delta/D_{90}=1.5$ 时, 空斑最大长度可以达到 $10D_{90}$ (即 0.45 mm) 以上, 且空斑平均长度约为 $(4\sim 5)D_{90}$ 。同时, 空斑数量随着空斑长度呈指数下降趋势, 即空斑长度越大, 则这种类型的空斑在粉层中出现的次数就越少。随着铺粉间隙的增加, 空斑的最大长度急剧降低。例如, 当 $\delta/D_{90}=2.0$ 时, 空斑的最大尺寸仅为 $(4\sim 5)D_{90}$, 然而当 $\delta/D_{90}=1.5$ 时, 空斑平均长度就已经约为 $(4\sim 5)D_{90}$ 。同时, 随着铺粉间隙的增加, 小空斑的数量也急剧降低。这些结果表明, 粉层中空斑出现的概率和平均空斑长度均随着铺粉间隙的减小而急剧增加, 即空斑的分布特征对铺粉间隙极其敏感。图 7 还表明随着铺粉间隙的增加, 粉层中的空斑主要由尺寸较小的空斑组成。

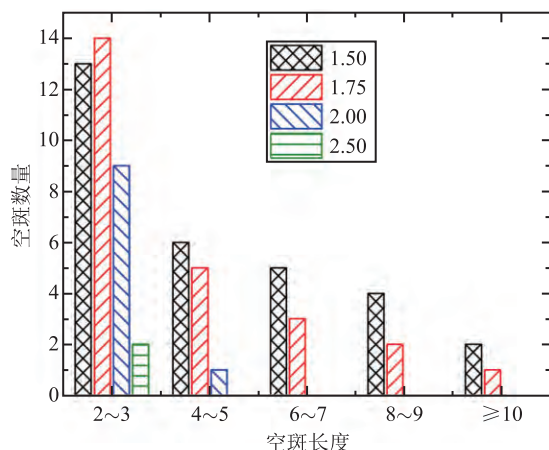


图 7 粉层中空斑数量 N_{ep} 随空斑长度 (L_{ep}/D_{90}) 的变化规律
Fig. 7 Variation of the number N_{ep} with length L_{ep}/D_{90} of empty patches in the spread layer

2.2 空斑的形成机理

铺粉间隙处颗粒的卡塞状态可通过监测铺粉间隙处颗粒的瞬时质量流率进行判断。当某时间段内颗粒质量流率为 0, 则意味着此时铺粉间隙处发生了颗粒卡塞行为。通过计算颗粒卡塞的持续时间 Δt_j , 可获得该空斑发生的概率 P_j :

$$P_j = \frac{N_j \Delta t_j}{t} \quad (7)$$

式中, N_j 为持续时间为 Δt_j 的颗粒卡塞的发生次数, t 为刮刀铺粉总时间。

颗粒卡塞的发生概率 P_j 随持续时间 Δt_j 的变化规律如图 8 所示。其中, Δt_j 采用特征时间尺度 $t_0 = D_{90}/U$ 进行归一化。当 $\delta/D_{90}=1.5$ 时, 颗粒卡塞的发生概率随持续时间呈指数下降规律, 表明持续时间短的颗粒卡塞行为的发生频率较高 (即 N_j

较大), 而持续时间长的颗粒卡塞行为的发生频率低 (即 N_j 较小)。通过比较图 8 和图 7 可以发现, 颗粒卡塞行为的数量远大于粉层中空斑的数量, 即颗粒卡塞的发生频率远大于最终粉层中空斑的产生频率。同时, 当 $\delta/D_{90}=1.5$ 时, Δt_j 具有最大值, 约为 $0.56t_0$ 。随着铺粉间隙的增加, 颗粒卡塞的发生概率和持续时间最大值均呈下降趋势, 导致颗粒卡塞的总概率急剧降低, 即颗粒卡塞行为发生的难易程度对铺粉间隙极其敏感。当 $\delta/D_{90}=3.0$ 时, 虽然粉层中不存在长度超过 $2D_{90}$ 的空斑, 但是颗粒卡塞依然存在。因此, 并不是所有的颗粒卡塞行为都会产生较大的空斑, 只有持续时间大于 $0.2t_0$ 的颗粒卡塞行为才对粉层中空斑的形成才有着决定性的作用。

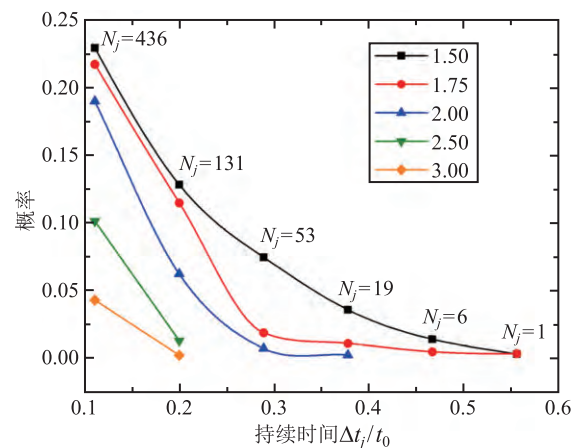


图 8 颗粒卡塞的发生概率 P_j 随持续时间 Δt_j 的变化规律
Fig. 8 Variation of the probability P_j with survival time Δt_j of jamming event

图 9 为刮刀上沿铺粉方向的作用力 F_{bx} 随刮刀所在位置 x 的变化规律。其中, F_{bx} 采用刮刀前侧

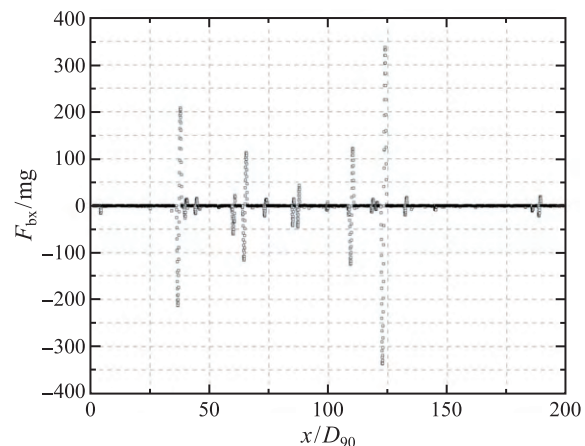


图 9 刮刀作用力 F_{bx} 随刮刀位置 x 的变化规律 ($\delta/D_{90}=1.5$)
Fig. 9 Variation of the blade force F_{bx} with blade position $x(\delta/D_{90}=1.5)$

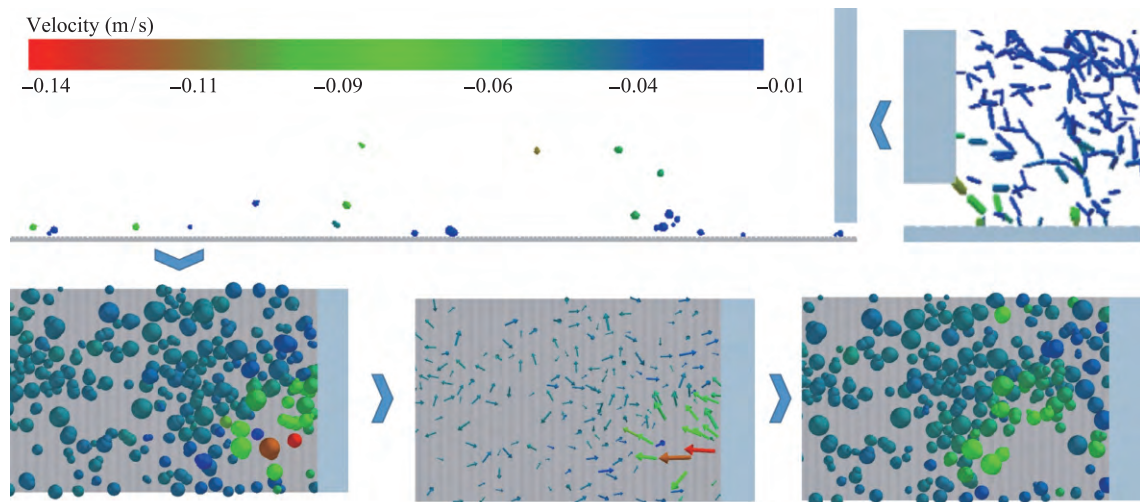


图 10 颗粒卡塞转变为粉层中空斑的演变过程

Fig. 10 Evolution of the particle jamming into empty patches within the spread layer

床堆的重力 (mg) 进行无量纲化, 且 $x=0$ 为本文在结果分析中所用粉层的起始点。可以发现, 在铺粉过程中, 由于铺粉间隙处发生颗粒卡塞行为, 使得颗粒流在这瞬间发生局部停顿, 进而导致颗粒间形成强烈的力链结构, 如图 10 所示, 使得 F_{bx} 在该瞬间发生急剧变化。但需要注意的是, 颗粒卡塞行为由于持续时间短, 并不是造成粉层中空斑的直接原因, 因此, F_{bx} 波峰的数量和强度与粉层中空斑的数量和大小并不吻合。

图 10 为颗粒卡塞转变为粉层中空斑的演变过程。在颗粒卡塞瞬间, 颗粒间会形成强力链结构, 使得处于卡塞状态的颗粒在短时间内蓄积大量的应变能。当刮刀继续向前运动时, 卡塞阶段形成的力链拱桥在刮刀剪切作用下发生坍塌, 使得应变能快速释放, 并传递给周围的颗粒, 进而使得这些颗粒从铺粉间隙区域高速“飞”出 (运动方向和刮刀铺粉方向相反), 并将遇到的“正常”颗粒撞飞, 最终导致颗粒在粉层中分布不均匀, 并形成大量空斑。其中, “正常”颗粒为被刮刀遗留在后方且由于自身惯性和动量依旧沿铺粉方向低速移动的颗粒。

3 结 论

基于金属粉末中离散颗粒的真实物理和力学参数, 本文采用离散元方法对增材制造刮刀铺粉过程进行了数值模拟, 并分析了不同铺粉间隙下粉层中空斑的分布特征和形成机理, 主要结论如下:

- 1) 粉层中颗粒总体积随铺粉间隙增加而线性增加, 且临界铺粉间隙为基于颗粒数量的 D_{90} 。
- 2) 粉层沿铺粉方向容易出现空斑, 空斑的数量随其长度成指数递减的规律, 且空斑大小与铺粉间

隙密切相关。

3) 颗粒容易在铺粉间隙处发生卡塞行为, 发生概率随持续时间增加而急剧降低, 且持续时间长的卡塞行为对粉层中空斑的形成起着主导作用。

4) 颗粒卡塞瞬间会产生强烈的力链结构, 将颗粒从铺粉间隙处沿铺粉反方向进射弹出, 进而通过扰动粉层中正常颗粒而产生空斑。

参 考 文 献

- [1] Frazier W E. Metal Additive Manufacturing: A Review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917–1928
- [2] Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, et al. Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms [J]. International Materials Reviews, 2013, 57(3): 133–164
- [3] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing [M]. New York: Springer, 2015: 1–18
- [4] Debroy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112–224
- [5] Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G, et al. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172–196
- [6] Singh S, Ramakrishna S, Singh R. Material Issues in Additive Manufacturing: A Review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 185–200
- [7] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L, et al. An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part II: Mechanical Behavior, Process Parameter Optimization and Control [J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 12–35
- [8] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A, et al. Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of

- Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones [J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36–45
- [9] Parteli E J R, Poschel T. Particle-Based Simulation of Powder Application in Additive Manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2016, 288: 96–102
- [10] Haeri S, Wang Y, Ghita O, et al. Discrete Element Simulation and Experimental Study of Powder Spreading Process in Additive Manufacturing [J]. *Powder Technology*, 2016, 306: 45–54
- [11] 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 Experimental Verification Based on Discrete Element Method [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2017, 123: 146–159
- [12] Haeri S. Optimisation of Blade Type Spreaders for Powder Bed Preparation in Additive Manufacturing Using DEM Simulations [J]. *Powder Technology*, 2017, 321: 94–104
- [13] 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
ZHENG Junhui. Numerical Research on Powder Paving Process of Nylon Powder Selective Laser Sintering [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016
- [14] 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-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2016, 47A (8): 3811–3822
- [15] Cundall P A, Strack O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies [J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47–65
- [16] Thornton C. Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations [M]. New York: Springer, 2015: 46–50
- [17] Nan W G, Ghadiri M, Wang Y S. Analysis of Powder Rheometry of FT4: Effect of Air Flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 162: 141–151
- [18] 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
- [19] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 15–18
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Introduction to the Mechanics of Particle Materials [M]. Beijing: Science Press, 2009: 15–18
- [20] Zafar U, Hare C, Hassanpour A, et al. Ball Indentation on Powder Beds for Assessing Powder Flowability: Analysis of Operation Window [J]. *Powder Technology*, 2017, 310: 300–306
- [21] Hiroaki M, Higashitani K, Yoshida H. *Powder Technology Handbook* [M]. Third Edition. New York: CRC Press, 2006: 53–65
- [22] Behjani M A, Rahmanian N, Ghani N F A, et al. An Investigation on Process of Seeded Granulation in a Continuous Drum Granulator Using DEM [J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(10): 2456–2464
- [23] Hævig 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
- [24] Washino K, Chan E L, Tanaka T. DEM with Attraction Forces Using Reduced Particle Stiffness [J]. *Powder Technology*, 2018, 325: 202–208