

# 基于颗粒流态化技术的砂型 3D 打印铺砂器的开发与应用研究

李 征, 刘 丰, 明 禹, 王驰腾, 侯俊吉

(北京机科国创轻量化科学研究院有限公司 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 为了解决铺砂过程中的预混砂结桥问题, 本文基于颗粒流态化技术开发了一种新的砂型3D打印铺砂器。利用仿真手段对比分析了三种(平底、圆底、锥底)流化床铺砂器中型砂的流动特性, 在满足铺砂量的要求下, 平底流化床铺砂器对已打印砂面的破坏影响小。基于仿真结果开发了新的平底铺砂器样机并进行了现场应用, 其铺砂质量良好。

**关键词:** 颗粒流态化; 砂型3D打印; 铺砂; 型砂流动性

砂型3D打印技术是将喷墨打印与传统树脂砂型成形工艺相结合的一种砂型增材制造技术, 通过喷头将树脂选择性的喷附在预混固化剂的型砂表面, 树脂与固化剂产生交联反应, 将型砂粘结成指定形状<sup>[1-2]</sup>。当前砂型3D打印铺砂工艺存在型砂流动性差和错层问题<sup>[3-4]</sup>, 铺砂器内预混砂流动性差, 当铺砂器开口较小时, 出砂困难; 当铺砂器开口较大时, 出砂量大导致铺砂过程中移动的型砂破坏已打印砂面, 造成错层现象<sup>[4]</sup>。

为了改善预混砂流动性, 本文将颗粒流态化技术引入到砂型3D打印铺砂工艺中。颗粒流态化技术是令固体颗粒与液体或气体接触而转变成类似流体状态的技术<sup>[5]</sup>, 此时固体颗粒具有流体的特征, 流动性强, 从而有助于解决铺砂过程中的预混砂流动性的问题。

## 1 理论模型

颗粒流态化技术的典型应为流化床, 气-固相流化床操作简便, 便于固相分离, 因此在工业生产中广泛应用。将气体从颗粒固定床底部引入, 当气流速度大于临界流态化速度时, 固定床开始变为流化床(鼓泡床), 当气流速度大于颗粒带出速度时, 流化床逐渐变为输送床<sup>[6]</sup>。在输送床阶段, 颗粒被气流带走, 固定床层消失, 多用于长距离输送领域。本研究的目的在于改善型砂颗粒床层的流动性, 因此须维持型砂颗粒处于流化床阶段。流化床的关键参数为临界流化速度, 对于较细颗粒, 当颗粒直径小于20目时, 可以通过式(1)得到:

$$v_{\text{临}} = 4.08 \frac{d_p^{1.82} (\rho_p - \rho_g)^{0.94}}{\eta_a^{0.88} \rho_g^{0.06}} \quad Re < 10 \quad (1)$$

$Re$ 为雷诺数, 其表达式为:

$$Re = \frac{10^3 d_p v_{\text{临}} \rho_g}{\mu} \quad (2)$$

式中:  $v_{\text{临}}$ 为临界流化速度, m/s;  $d_p$ 为颗粒直径, m;  $\rho_p$ 为颗粒密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_g$ 为气体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\eta_a$ 为气体动力粘度, mPa·s; 本研究中使用的型砂为石英砂, 颗粒密度为2.650 kg/m<sup>3</sup>, 使用空气作为流化介质, 其密度为1.29 kg/m<sup>3</sup>, 动力粘度为1.79e<sup>-5</sup> mPa·s。铸造行业所使用的型砂一般为多筛砂, 即多种直径型砂的混合, 因此

作者简介:

李征(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事砂型3D打印技术及装备研究。电话: 15010096906, E-mail: lizheng0330@163.com

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

08-1045-05

基金项目:

机械科学研究总院技术发展基金资助项目(项目编号: 311908Q9)。

收稿日期:

2021-12-24 收到初稿,

2022-02-15 收到修订稿。

式(1)中的 $d_p$ 为颗粒平均直径,其计算方法为:

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (3)$$

式中: $\bar{d}_p$ 为颗粒平均直径。 $x_i$ 为各筛分颗粒的质量百分比, $d_{pi}$ 为各筛分颗粒的平均直径, $d_{pi} = (d_{i-1} + d_i) / 2$ , $d_{i-1}$ 和 $d_i$ 分别为上下筛目尺寸。本研究中所使用的型砂目数为70/140,其粒度分布如表1所示。

表1 型砂颗粒直径分布

颗粒直径/ $\mu\text{m}$	53~75	75~106	106~150	150~212
质量分数/%	0.11	25.1	57	16.5

根据表1中数据,计算可得本研究中所使用的型砂颗粒平均直径为0.123 mm。将之代入式(1)中可得临界流化速度为0.017 m/s,此时对应雷诺数Re为0.15,满足要求。

## 2 仿真模型

图1为机械科学研究总院开发的砂型打印设备的铺砂槽结构。通过气缸打开开关板,铺砂槽内的预混砂在重力作用下从铺砂槽开口排出。铺砂槽开口为宽度为35 mm的缝隙,当小于此宽度时,铺砂槽内预混砂易发生结桥堵塞现象。为解决此问题,本文以流化床原理为基础设计了三种形式(平底、圆底、锥底)的新型铺砂槽,基本尺寸与图1铺砂器的尺寸一致,如图2所示。

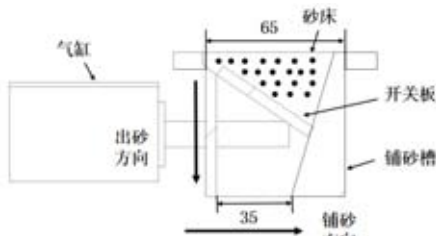
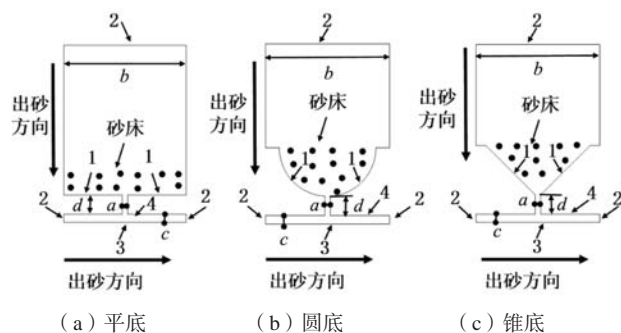


图1 现有铺砂器横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross section of the current sand spreader



1. 入口 2. 出口 3. 成形平台 4. 铺砂槽外壳

图2 新型铺砂器横截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross section of the new sand spreader

如图2所示,新的铺砂槽结构开口位于铺砂槽底部中间位置,开口缝隙宽度为2 mm,远小于当前铺砂槽开口宽度。将空气从入口通入铺砂槽,铺砂槽内砂床将在气流作用下逐渐进入临界流化状态,此时型砂颗粒在气流的作用下从底部开口排出,结桥堵塞问题得到解决。对上述过程进行数值模拟,各模型尺寸见表2。

表2 新铺砂器结构尺寸

Table 2 Dimensions of the new sand spreader

项目	a	b	c	d
尺寸/mm	2	65	3	7

在流化床中,气固两相充分接触,因此多采用双欧拉模型进行仿真,此时气固两相均被视为连续流体进行计算,求解各自的N-S方程<sup>[7]</sup>。设置入口为速度入口边界,改变不同的入口气流速度得到不同的流化床流场分布。流化床出口与大气环境接触,设置出口边界条件为压力出口边界,压力为0。颗粒初初始堆积于铺砂槽内,根据现场经验和已有文献<sup>[8]</sup>,型砂堆积状态下的孔隙度最小为40%,即型砂颗粒所占体积分数为60%。因此,设置初始状态下颗粒相堆积体积分数60%。

本文研究的目的在于通过颗粒流态化技术改善型砂流动性,促使更多的型砂排出铺砂槽。因此,用固相颗粒在铺砂槽底部开口处的质量流量作为型砂流动性的表征参数,设为 $Q_p$ 。同时,根据实际应用,混合固化剂的型砂颗粒之间存在较大的粘结力,会导致型砂“结桥”。当铺砂槽开口尺寸为2 mm时,自然状态下“结桥”现象会导致型砂颗粒不能从铺砂槽开口排出,即此时型砂颗粒的质量流量为0。然而,由于在数值计算中采用了双欧拉模型,固相同样被视为流体,不存在“结桥”现象。因此,在数值模拟中,当入口气流速度为0时,铺砂槽开口位置固相颗粒质量流量并不为0,定义此时的固相颗粒质量流量为 $Q_{p0}$ 。本研究用各入口气流速度相对于入口气流速度为0工况下的铺砂槽开口位置的相对颗粒质量流量来表征颗粒流态化技术对型砂流动性的改善,即:

$$\Delta Q_p = Q_p - Q_{p0} \quad (4)$$

式中: $\Delta Q_p$ 为颗粒相对质量流量,kg/s。

## 3 铺砂过程仿真结果与分析

图3给出了不同铺砂槽结构内的型砂颗粒体积云图,此时铺砂槽内的型砂颗粒堆积高度为0.03 m,通气时间为0.3 s。从图中可以看出,当入口气流速度为0.1 m/s时,铺砂槽内固相颗粒区域出现大量气泡,固定床变为流化床。

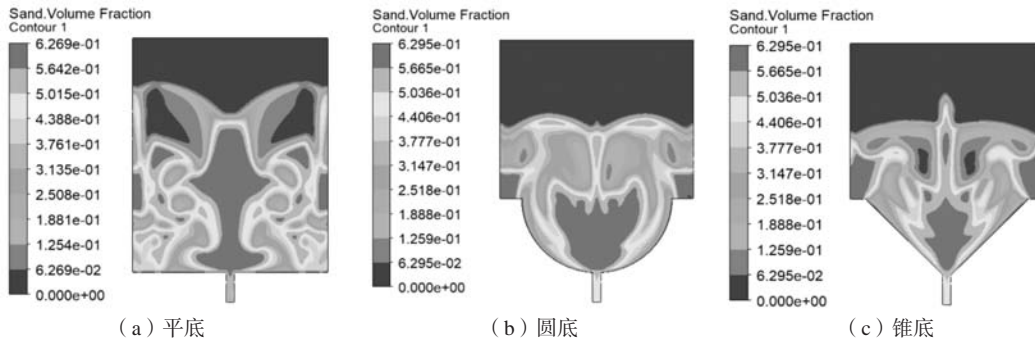
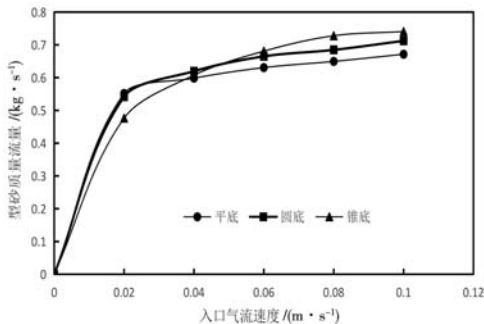


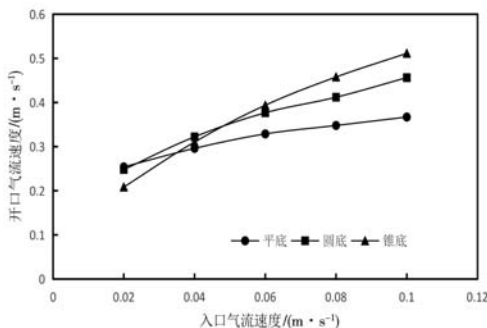
图3 不同铺砂器结构内颗粒相体积云图

Fig. 3 Volume contour of particle phase in different sand spreaders

图4a给出了不同结构铺砂槽内颗粒相对质量流量随着入口气流速度的变化规律，当入口气流速度从0增大到0.02 m/s时，相对颗粒质量流量从0显著增大，当入口气流速度从0.02 m/s增大到0.1 m/s时，相对颗粒质量流量逐渐增大并趋于平稳。原因在于随着入口气流速度的增大，铺砂口开口位置的气流速度同样增大，导致其携带的固相颗粒速度增大。随着入口气流速度从0.02 m/s增大到0.1 m/s时，平底铺砂槽开口位置颗粒相对质量流量增大21.7%，圆底铺砂槽开口位置颗粒相对质量流量增大31.5%，锥底铺砂槽开口位置颗粒相对质量流量增大55.4%。型砂颗粒质量流量的增大表明，更多的型砂颗粒从铺砂槽开口排出，流动性得到改善。



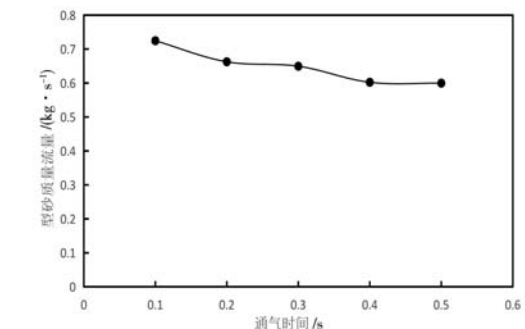
(a) 型砂质量流量



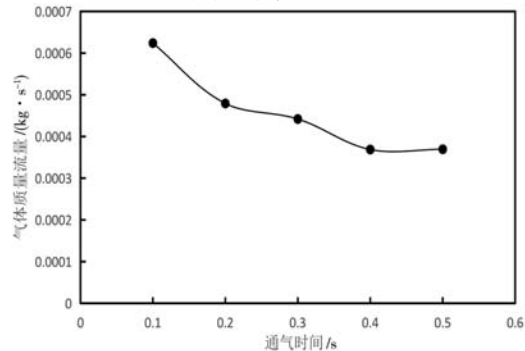
(b) 开口气流速度

图4 不同入口气流速度下的型砂质量流量与开口气流速度  
Fig. 4 Mass flow rates of molding sand and outlet air velocity under different inlet air velocities

图5a给出了颗粒相对质量流量随着通气时间的变化规律，此时铺砂槽为平底，入口气流速度为0.08 m/s，铺砂槽内型砂颗粒堆积高度为0.03 m。从图中可以看出，随着通气时间的延长，颗粒相对质量流量逐渐减小，并趋于平稳。当通气时间从0.1 s增大到0.5 s时，颗粒相对质量流量减小17.3%。原因在于初始状态下，当气流通入固定床层后，气流集中在床层底部，此时铺砂槽开口位置气流速度较大，从而导致较大的型砂颗粒质量流量；随着通气时间的延长，气流逐渐在型砂床内分布均匀，床层进入稳定流化床状态，此时铺砂槽开口位置气流速度减小，从而导致型砂质量降低。如图5b所示，当通气时间从0.1 s增大到0.5 s时，铺砂槽开口位置气体质量流量降低68.9%，并趋于稳定。



(a) 型砂质量流量



(b) 气体质量流量

图5 不同通气时间下的型砂质量流量和气体质量流量  
Fig. 5 Molding sand mass flow and gas mass flow under different ventilation times

图6a给出了颗粒相对质量流量随铺砂槽内型砂颗粒堆积高度的变化规律,此时铺砂槽为平底,入口气流速度为0.1 m/s,通气时间为0.3 s。从图中可以看出,当铺砂槽内型砂堆积高度从0.01 m增大到0.05 m时,铺砂槽开口位置颗粒相对质量流量增大43%。原因在于,当铺砂槽内型砂堆积高度增大时,气流在型砂内的流

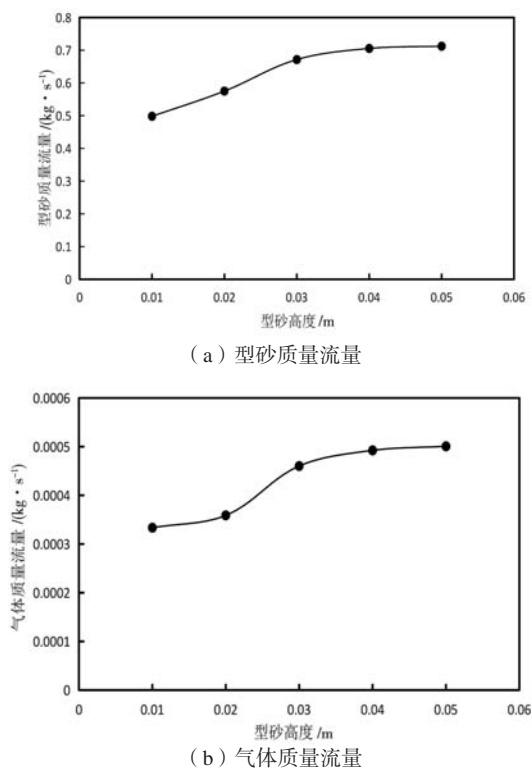


图6 不同型砂堆积高度下的型砂质量流量和气体质量流量  
Fig. 6 Molding sand mass flow and gas mass flow under different molding sand stacking heights

动阻力增大,更多气流集中于铺砂槽底部区域,导致铺砂槽开口位置气流速度增大,造成更大型砂质量流量。如图6b所示,随着铺砂槽内型砂堆积高度从0.01 m增大到0.05 m时,铺砂槽开口位置气体质量流量增大50.1%。

## 4 现场应用

基于仿真结果开发了铺砂器样机如图7所示,其工作原理为:气流经铺砂器壳体两侧进入铺砂器,经过整流罩整流,通过整流罩上方的气体分布板后均匀与型砂接触,随着气流速度的提高,铺砂器内型砂从固定床转化为流化床,然后从铺砂器底部开口被气流带出。

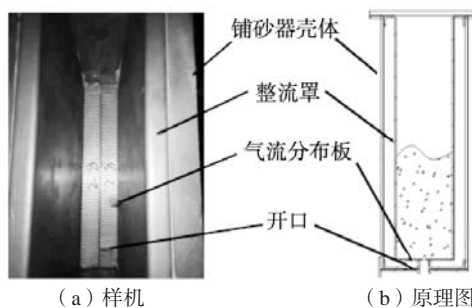


图7 新型铺砂器

Fig. 7 New sand spreader

在铺砂槽内加入混合固化剂的型砂,堆积高度约0.15 m,此时铺砂器开口宽度为1 mm。当铺砂槽内气流速度达到0.3 m/s时,铺砂槽内型砂进入流化床状态(图8a),此时型砂从铺砂槽大量排出(图8b)。移动铺砂器进行铺砂试验,移动速度为0.1 m/s,铺砂效果如图8c所示,砂面平整,铺砂质量良好。

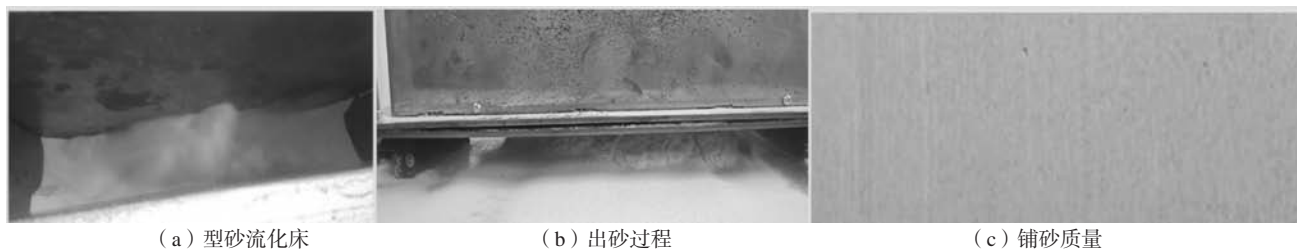


图8 新型铺砂器现场应用过程

Fig. 8 Application of the new sand spreader

## 5 结论

(1) 颗粒流态化技术能够显著改善型砂颗粒的流动性,当入口气流速度从0增大到0.02 m/s时,铺砂槽开口位置颗粒相对质量流量显著增大。

(2) 各铺砂器机构中,同等工况下锥底铺砂器开口位置型砂质量流量最大,圆底铺砂槽次之,平底

铺砂槽最小。同时,铺砂器开口位置的气流速度同样满足上述规律,为了避免较高的气流速度破坏已有砂面,在满足实际铺砂所需质量流量的前提下,建议工程应用中使用平底铺砂器。

(3) 在平底铺砂器中,随着通气时间的延长,开口位置型砂质量流量逐渐减小,当通气时间超过0.3 s

时, 型砂质量流量趋于稳定。随着铺砂槽内型砂堆积高度的增大, 开口位置型砂质量流量逐渐增大, 当型砂堆积高度大于0.04 m时, 型砂质量流量趋于稳定。

(4) 现场应用表明, 当铺砂器开口为1 mm, 铺砂槽内气流速度为0.3 m/s时, 基于颗粒流态化技术的铺砂器铺砂效果良好。

#### 参考文献:

- [1] 单忠德. 无模铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 5-10.
- [2] 谭锐, 尹绍奎, 姜延春, 等. 砂型喷墨3D打印用呋喃树脂的制备工艺与性能研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1217-1222.
- [3] 赵蒙蒙. 基于梯度打印的砂型性能基础研究 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
- [4] 张人佶, 颜永年, 林峰, 等. 无模铸型制造技术在快速模具中的应用 [J]. 电加工与模具, 2006 (B05): 59-62.
- [5] 国井大藏, O.列文斯比尔. 流态化工程 [M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1977: 1-10.
- [6] 郭宜祜, 王喜忠. 流化床基本原理及其工业应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1980: 20-30.
- [7] 汪琦. 气固流化床两相流动的CFD模型研究和实验验证 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] 刘楠. 喷雾干燥耦合流场数值模拟与实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

---

## Research on the Development and Application of 3D Printing Sand Spreader Based on Particle Fluidization Technology

LI Zheng, LIU Feng, MING Yu, WANG Chi-teng, HOU Jun-ji

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100044, China)

#### Abstract:

In order to solve the problem of premixed sand bridges in the sand paving process, a new sand spreader of sand mold 3D printing was developed on the basis of the particle fluidization technology in this paper. The flow characteristics of molding sand in three kinds of fluidized bed sanders (flat bottom, round bottom and cone bottom) were compared and analyzed by means of simulation method. The results showed that the flat bottom fluidized bed sander had the least damage to the printed sand surface under the condition of meeting the requirements of sand quantity. Based on the simulation results, a new flat bottom sand spreader prototype was developed and applied in the field, and the sand spreading quality was good.

#### Key words:

particle fluidization; sand mold 3D printing; sand laying; sand flowability