

3D打印设备用铺粉装置结构的研究与应用

孙冠琳¹ 李晓军¹ 鲁云¹ 周志军² 马睿²

1. 共享智能铸造产业创新中心有限公司 宁夏 银川 750011

2. 共享智能装备有限公司 宁夏 银川 750011

摘要：在3D打印中，铺粉装置的下粉质量直接影响打印制品质量和打印效率。本文聚焦于3D打印技术中传统铺粉方式的技术瓶颈，基于粉末动力学与机械传动理论，设计了一种新型铺粉装置。通过对装置结构进行力学分析、构建粉末流量控制数学模型，结合多种挡粉组件结构设计，系统研究其工作机理。实验验证表明，该装置在控制粉末铺设均匀性和层厚精度方面表现优异，为3D打印技术在高端制造领域的应用提供了重要技术支持。

关键词：3D打印；铺粉装置；粉末流量；铺设均匀

3D打印技术（也称增材制造技术），凭借其制造复杂形状和高精度零件的独特优势，在航空航天、医疗、汽车制造等高端领域引发了广泛关注^[1-6]。随着3D打印技术向精密化、产业化方向发展，砂芯（型）3D打印在铸造用模具制造领域的应用日益深入^[7]。已有研究表明，3DP技术具备型芯成型效率高、成型尺寸大、无热应力等显著优点，尤其适用于大规模、柔性、快速且智能化的型芯生产^[8]。在这些先进的3D打印技术体系中，粉末材料的均匀铺设以及打印层厚的精准控制，成为决定打印质量和效率的关键因素。然而，传统铺粉方式普遍存在粉末下粉不均、下粉量难以精确调控等技术瓶颈。

从粉末动力学角度来看，传统铺粉装置在下粉过程中，粉末颗粒间的摩擦力、粘附力以及重力作用难以协同控制，导致粉末流动性不稳定，进而影响下粉均匀性。在定量控制方面，现有装置缺乏有效的计量机制，无法满足高精度打印对粉末量的严格要求。因此，研究一种能够实现粉末铺设量精确控制且下粉均匀的新型铺粉装置，不仅是突破3D打印技术瓶颈的关键，更是推动其在高端制造领域应用的重要基础。

1 3D打印设备工作原理概述

3D打印设备通常由工作箱、铺砂装置、打印装置、工作箱驱动装置以及框架等核心功能部分构成^[9]。其中，工作箱主要用于容纳待生产的制品，一般配备可沿内壁上下移动的工作箱底板，通过该底板的逐层上下移动，实现待生产砂型的分层打印；铺砂装置负责将混合合格的粉料经由铺砂口均匀铺设在工作箱底板上；打印装置依据设定的打印图样，将液料（粘结剂）精准喷射在铺砂层面上；工作箱驱动装置则驱动工作箱底板进行上下运动。以工作箱底板逐层下降的机械设计模式为例，3D

打印设备的工作流程如下：首先，铺砂装置在工作箱底板上铺设一层粉料；接着，打印装置按照预设路径和图案，在该层粉料上喷射液料（粘结剂）；随后，工作箱底板下降指定高度（即打印层厚）；之后，铺砂装置再次铺设新的一层粉料，打印装置继续在新层上依据设定图样喷射定型液料；如此循环往复，直至铺砂器和打印头完成所有图层的铺砂和打印工作^[10-11]。

在整个打印过程中，铺粉装置的动态性能对打印质量有着至关重要的影响。当工作箱底板下降速度与铺粉装置的下粉速度不匹配时，会导致粉末堆积或铺设过薄，影响打印层的平整度。此外，铺粉装置的运动精度也会直接传递到打印件上，若铺粉装置在运动过程中存在振动或偏差，将导致打印层出现厚度不均的现象。因此，深入研究铺粉装置的工作原理，优化其结构设计，对于提高3D打印设备的整体性能具有重要意义。

2 铺粉装置的结构设计

为有效解决传统铺粉方式下粉量不易控制、下粉不均匀的技术难题，本研究基于机械传动与粉末流动控制理论，设计了一种新型铺粉装置结构，其结构示意图如图1所示。该铺粉装置主要由粉仓主体、下粉轴和挡粉组件三部分组成。粉仓主体用于储存打印所需的粉料，其底部设置有落粉口，作为粉料输出的通道；下粉轴作为装置的核心部件，可转动地安装于落粉口下方，并沿落粉口长度方向延伸；挡粉组件与下粉轴相互配合，用于实现对下粉轴下粉量的精确控制。

从力学角度分析，下粉轴在转动过程中，粉末在环形粉槽内受到离心力、重力以及摩擦力的共同作用。为确保粉末能够顺利从环形粉槽落下并均匀铺设，需要合理设计环形粉槽的深度、宽度以及下粉轴的转速。根据

粉末流动的连续性方程和动量方程，建立粉末流量与下粉轴参数之间的数学模型：

$$Q = \alpha \cdot v \cdot A$$

其中， Q 为粉末流量， α 为粉末流动系数（与粉末特性、环形粉槽结构有关）， v 为下粉轴线速度， A 为环形粉槽的有效截面积。

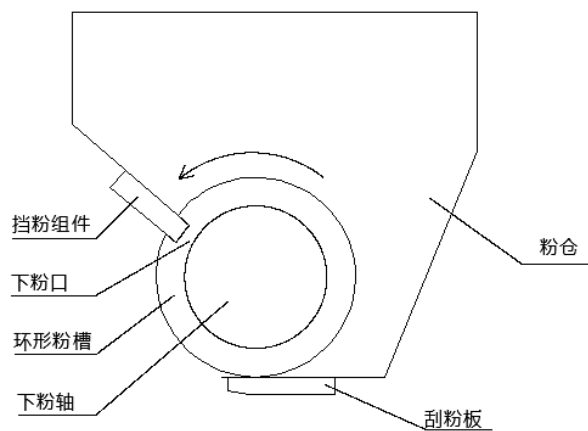


图1 铺粉装置结构示意图

通过该模型，可以定量分析下粉轴转速、环形粉槽尺寸等参数对粉末流量的影响，为装置的优化设计提供理论依据。挡粉组件与下粉轴的配合设计是实现精确控制的关键。如图2所示，通过调整挡粉组件的凸起与环形粉槽的相对位置，能够形成多个沿落粉口长度方向延伸的定量下粉口。这种设计不仅可以精确控制下粉量，还能利用下粉轴上梳齿状的凹槽结构，对粉料起到疏松作用，有效避免粉料团聚结块，确保粉料均匀铺设。

3 挡粉组件的设计

挡粉组件作为本铺粉装置的关键核心部件之一，根据粉料的物理化学特性、粒径大小以及具体打印需求，可设计为以下几种不同结构形式：

结构1：如图1所示，该结构的挡粉组件为一端开设有多个凹槽的条形挡粉板。相邻凹槽之间形成的凸起部分与下粉轴的环形粉槽相互配合。通过精确调节凸起到环形粉槽底部的距离，能够实现下粉口尺寸的灵活调整，进而达到对不同下粉量的有效控制。从机械传动原理来看，这种结构通过简单的线性调节，改变下粉口的截面积，从而实现对粉末流量的控制。其优点在于结构简单、成本低，适用于对下粉量调节精度要求不高的场景。

结构2：挡粉组件采用沿轴线开设有多多个凹槽的转辊结构。相邻凹槽之间形成的凸起与环形粉槽的凹槽相互匹配。同样，通过调节凸起到环形粉槽底部的距离，可实现下粉口尺寸的调整，从而控制不同的下粉量。此外，在该结构中，转辊具备转动功能，一方面能够对粉末进行输送，有效提升粉料的下粉速度；另一方面，可避免粉料黏附在挡粉组件上，保障铺粉过程的顺畅进

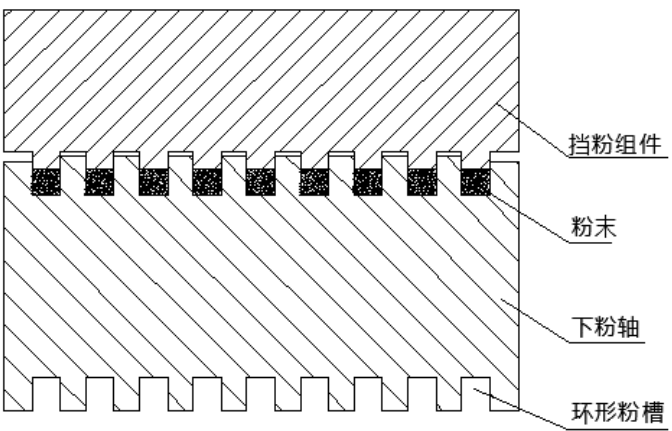


图2 铺粉装置定量下粉示意图

行。该结构引入了动态调节机制，通过转辊的转动，能够在打印过程中实时调整下粉量，适用于对下粉速度和均匀性要求较高的打印任务。

结构3：如图3所示，挡粉组件由转动辊和挡粉条组成。挡粉条设计有多种规格，不同规格的挡粉条沿转动辊圆周方向均匀设置。每种规格的挡粉条均包含多个，且在转动辊的轴向方向上间隔线性排列，其位置与环形粉槽精准配合。需要特别说明的是，多种挡粉条仅在长度方面存在差异，这使得每种规格的挡粉条顶端与转动辊旋转中心的距离各不相同。在打印设备运行过程中，通过转动辊的旋转，能够灵活调节挡粉条与环形粉槽的距离，从而在不同位置形成不同尺寸的下粉口，以满足不同粉末层厚、不同粉末材料以及不同粉末粒度的打印需求。该结构采用模块化设计理念，通过更换不同规格的挡粉条，能够快速适应多样化的打印要求，具有较强的通用性和灵活性。

结构4：如图4所示，挡粉组件由转动辊和多个挡粉条构成。各挡粉条沿转动辊轴向方向间隔分布，且挡粉条沿转动辊径向方向的尺寸呈逐渐增大趋势。挡粉条安装于转动件的外周面，其顶部与转动辊旋转中心的距离逐渐变化，进而形成渐变式定粉口。该结构所形成的下粉口调节范围较大，尤其适用于对不同粉末层厚度有特殊要求的打印场景。从流体力学角度分析，渐变式定粉口能够使粉末在流动过程中逐渐调整流速和流量，避免因下粉口尺寸突变导致的粉末堆积或喷射不均现象，进一步提高了粉末铺设的均匀性和稳定性。

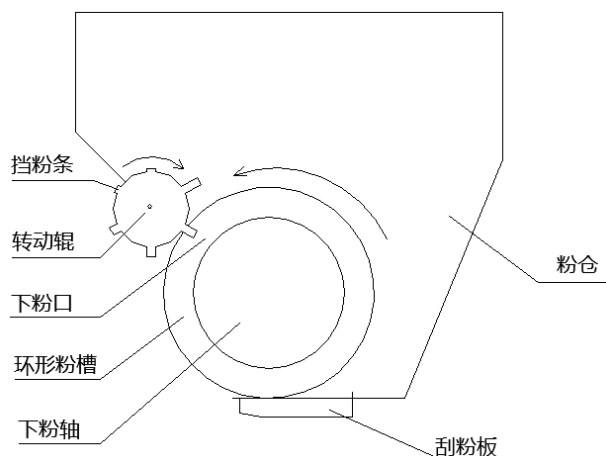


图3 挡粉条周向设置的铺粉装置示意图

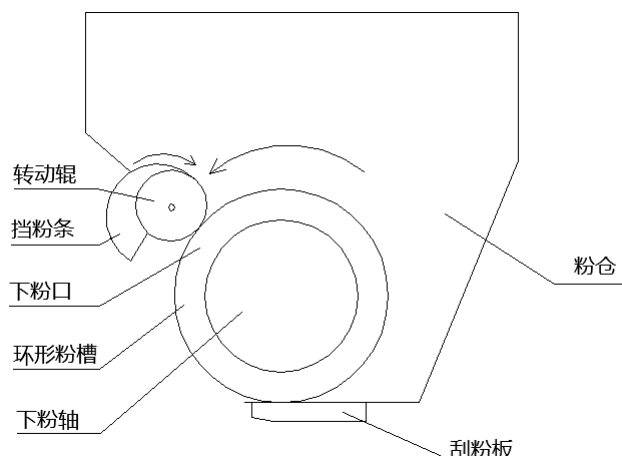


图4 挡粉条轴向设置的铺粉装置示意图

4 应用与效果

将本研究设计的铺粉装置应用于3D打印设备中，在金属粉末打印、陶瓷粉末打印等领域开展实际打印应用。以陶瓷粉末打印的复杂零部件打印为例，使用该铺粉装置后，打印件的表面质量、尺寸精度以及打印效率都得到很大提升。在大型设备制造领域，针对大型铸造模具的打印需求，该装置能够稳定控制粉末层厚，确保模具表面质量，减少后处理工序，降低生产成本。

通过对不同材料（如金属粉末、陶瓷粉末、砂砾粉料）的打印实验发现，该铺粉装置能够有效适应多种粉末特性。对于流动性较差的陶瓷粉末，通过结构2中转动辊的辅助输送作用，显著改善了下粉均匀性；对于粒度分布较广的砂砾粉料，利用结构3的多规格挡粉条设计，实现了不同区域的精准下粉控制。

结束语

本文基于粉末动力学和机械传动理论，设计并研究了一种新型3D打印铺粉装置。通过对装置结构的力学分析、数学模型构建以及多种挡粉组件结构设计，深入探讨了其工作机理和性能优势。实验验证表明，该装置在粉末铺设均匀性和打印精度控制方面表现出色，能够满足多种材料和复杂打印任务的需求。

未来，将进一步开展以下研究工作：一是结合人工智能算法，开发铺粉装置的智能控制系统，实现粉末流量和下粉均匀性的自适应调节；二是探索新型材料和结构设计，提高装置在极端环境下的可靠性和稳定性；三是开展产业化应用研究，推动该技术在更多领域的广泛应用，为3D打印技术的发展提供更强有力的支持。

参考文献

- [1] 孙世杰.美国福特汽车公司探索使用金属增材制造技术制作汽车零件[J].粉末冶金工业,2017,27(03):56.
- [2] 卢宝胜,程东霞.3D打印砂芯技术在铸件开发中的应用[J].铸造技术,2021(12): 1026-1029.
- [3] 李瑛辉,李天才.砂型3D打印技术在航空发动机领域的研究与应用[J].材料导报,2024(S1):439-442.
- [4] 赵琛,蔡嘉伟,张百成等.黏结剂喷射3D打印关键技术[J].材料工程,2023(5):14-26.
- [5] 左强,杨国娟,洪润洲等.应用砂型3D打印技术制备复杂铝合金铸件[J].铸造,2021(4):493-497.
- [6] 高博,匡锐,范玉虎,等.基于砂型3D打印技术的薄壁筒形件铸造成形技术[J].热加工工艺,2024(12):139-144.
- [7] 李天才,刘轶,曹继伟等.砂型3D打印技术在铸造铝合金领域的研究与应用[J].材料导报,2024,38(Z2):1-13.
- [8] 周志军,刘轶,徐云龙.提高铸造用3D打印砂芯(型)强度的方法[J].铸造技术,2016,37(10):2284-2285.
- [9] 林少凯,董选普,郭艇,于海春.高端汽车冲压模铸钢件的3DP打印砂型铸造技术.特种铸造及有色合金[J].2020,40(4):392-395.
- [10] 王瑞,何捷军,周志军.砂型增材制造设备用铺砂器清理机构的设计[J].铸造设备与工艺,2024,(04):1-4.
- [11] 蒙南华,田永刚,郝鹏,等.铸造砂型3D打印机应用及其效率提升的研究[J].中国铸造装备与技术,2021,56(03):11-15.
- [12] 周志军,刘轶,马睿,等.多工作箱砂型3D打印机机械结构设计[J].机械设计与制造工程,2020,19(08):48-50.