

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.04.014

## 冷冻砂型数控加工气动辅助精确排砂方法

刘亲将<sup>1,2</sup>, 单忠德<sup>1,2,3</sup>, 杨浩秦<sup>2,3</sup>, 施建培<sup>1,2</sup>, 梁校<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016; 3. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

**摘要:** 在冷冻砂型数控(Computerized numerical control, CNC)加工过程中, 有效排出切削砂坯产生的砂粒是确保砂型成形质量的关键技术之一。本文基于计算流体力学方法, 对环绕阵列式射流喷吹的排砂方式进行了数值模拟, 分析了射流流量、靶距、俯角和口径对型腔周围流场的影响。设计数控加工正交实验并对排砂率进行了极差分析, 验证了仿真的结果。研究表明, 环绕阵列式高速射流在刀具柱面和型腔壁面上会形成稳定贴附, 输送砂粒的主要区域为射流在型腔壁面形成的“排砂区”。仿真与实验结果均表明最佳排砂工艺参数为射流流量 30 L/min、靶距 45 mm、俯角 65° 和口径 2 mm, 其中射流流量的影响最为显著, 其次是射流喷嘴口径、俯角和靶距。本文结果可为排砂装置及工艺参数优化提供指导。

**关键词:** 冷冻砂型; 排砂工艺; 射流流场; 排砂率; 精确排砂

**中图分类号:** TG234.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)04-0712-11

## Pneumatic-Assisted Precise Sand Discharging Method for CNC Machining of Frozen Sand Molds

LIU Qinjiang<sup>1,2</sup>, SHAN Zhongde<sup>1,2,3</sup>, YANG Haoqin<sup>2,3</sup>, SHI Jianpei<sup>1,2</sup>, LIANG Xiao<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In the frozen sand mold computerized numerical control (CNC) machining process, the effective discharge of sand particles generated by cutting sand blanks is one of the key technologies to ensure the quality of sand molding. In this paper, based on the computational fluid dynamics method, a numerical simulation of the sand discharge mode of the surrounded array jet is carried out to analyze the effects of flow rate, target distance, pitch angle and aperture on the flow field around the cavity. CNC machining orthogonal experiments are designed and the range analysis of sand removal rate is carried out to verify the simulation results. High-speed jets form stable attachments on the tool face and cavity walls, and the main area for transporting sand particles is the “sand discharge area” formed by the jets on the cavity wall. Both simulation and experimental results show that the optimal sand removal process parameters are flow rate of 30 L/min, target distance of 45 mm, pitch angle of 65° and caliber of 2 mm, in which the effect of flow rate is the most significant, followed by nozzle caliber, pitch angle and target distance. Results can provide guidance for the optimization of sand removal devices and process parameters.

**基金项目:** 国家重点研发计划(2021YFB3401200); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金(BK20230885)。

**收稿日期:** 2023-12-21; **修订日期:** 2024-02-19

**通信作者:** 单忠德, 男, 研究员, 博士生导师, 中国工程院院士, E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn; 杨浩秦, 男, 博士, E-mail: yang-haoqin@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 刘亲将, 单忠德, 杨浩秦, 等. 冷冻砂型数控加工气动辅助精确排砂方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(4): 712-722. LIU Qinjiang, SHAN Zhongde, YANG Haoqin, et al. Pneumatic-assisted precise sand discharging method for CNC machining of frozen sand molds[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 712-722.

**Key words:** frozen sand mold; sand discharge process; jet flow field; sand discharge rate; precise sand discharge

冷冻砂型采用水做粘接剂,在低温环境下冻结含水型砂,通过数控加工切削出砂型,省去了传统砂型的模具制造环节,缩短了单件、小批量和复杂金属件的铸造流程<sup>[1-3]</sup>。冷冻砂型的制造质量决定了浇注后的铸件的表面精度以及是否会存在夹砂、砂眼、裂纹和收缩变形等缺陷。随着铸造行业对砂型的加工精度和质量要求日益提高,保证冷冻砂型切削表面完整性是相关研究人员的重要任务之一<sup>[4]</sup>。在加工冷冻砂型过程中,砂粒及粉尘是切削砂型过程中的必然产物,含水的砂粒极易在低温环境中重新粘接堆积在已加工砂型表面上,影响砂型表面精度和加工质量,降低刀具使用寿命<sup>[5]</sup>。

在砂型数控加工领域,为解决型腔废砂残余的问题,国内外砂型制造公司和科研人员在砂型数控加工排砂方法方面进行了许多探索研究。德国奥迪汽车股份有限公司开发出一种工业机器人直接铣削加工单元,采用机器人卧式铣削加工方式,使切削产生的砂粒飞屑自然地型腔中飞出<sup>[6]</sup>,但无法彻底清除型腔内的残留废砂。德国Metrom公司推出砂型专用的高速五面加工数控铣床,该装置结构简单且无导轨等粉尘敏感元件,可一定程度忽略机内砂粒粉尘防护问题<sup>[7]</sup>,但依旧没有解决砂型加工过程的排砂问题。为提高砂型数控加工过程的排砂效果,许多公司和学者引入了气动辅助排砂的方式用以解决型腔中残余废砂的问题并开展了一系列深入研究。

Iscar刀具公司开发内部可通压缩空气的刀具,高速压缩气体从刀具内部喷出,专门用于铣削砂型时冷却刀具并吹走砂屑,可提高20%的生产效率<sup>[8]</sup>。谢大进<sup>[9]</sup>采用吸砂的方式,减少实际加工中砂屑对机床导轨、夹具和加工环境的影响。经过实验发现,在数控切削加工过程中,及时清理砂屑能够有效降低切削力,从而提高加工质量。程正伟<sup>[10]</sup>开展砂型加工过程中气动辅助排砂实验,研究发现气流量对废砂清理效果影响显著,初步提供了一种喷嘴清砂方案。赵洪锋等<sup>[11]</sup>开发新型空心立铣刀用于解决树脂砂型型腔残留砂屑不易排除问题。李杰<sup>[12]</sup>基于风砂气固两相流理论,系统地对排砂装置的偏置、气流量、孔径比和砂粒目数开展试验研究,得到针对窄槽中的废砂最为有利的喷嘴布局设计。根据上述研究成果可知,通过运用气动方式辅助砂型数控加工排砂可取得较好的排砂效果,从而提高砂型加工质量,有利于后续砂型的

浇注使用。

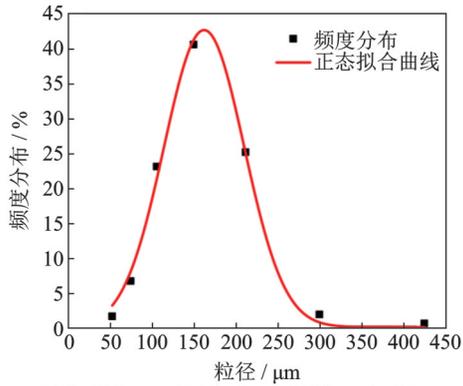
然而,数字化冷冻砂型加工技术不仅面临传统树脂砂型切削中废砂磨损刀具、降低表面精度等问题,还需针对冷冻砂型中含水废砂易粘结堆积、排砂过程数字化程度低等问题开展进一步研究。在加工冷冻砂型的过程中,冷冻砂型砂粒间粘性大,切屑产生的碎屑极易粘结成大颗粒,导致切削冷冻砂型产生的切屑颗粒比重比树脂砂型大得多。同时,冷冻砂型型腔中积累的废屑会二次重融粘结,极易附着粘接在砂型已加工表面上,从而破坏加工质量。大部分砂型加工属于型腔铣削加工,如何有效精确地排除切削冷冻砂型所产生的砂屑一直是数字化冷冻砂型切削成形技术中的一个关键技术和工艺。

综上所述,大多数文献都集中在树脂砂型数控加工质量和排砂方法的研究上,基本是在良好的排砂基础上开展研究,目前缺乏相关冷冻砂型排砂工艺的参数依据,且鲜少有针对冷冻砂型切削排砂过程的仿真方式和工艺试验探索的相关报道<sup>[13]</sup>。本文利用Fluent模拟加工区域射流流场的动态特性,揭示射流排砂工况下加工区域的流场分布,对优化射流排砂装置及工艺参数具有重要意义。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

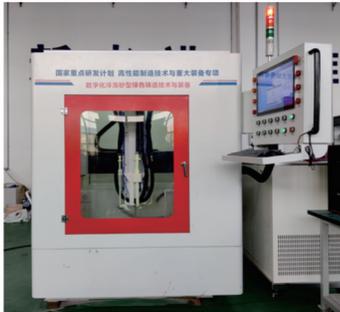
本实验使用100目的硅砂作为冷冻砂型的造型原砂。采用筛选法测量了硅砂的粒径分布,如图1(a)所示;采用奥林巴斯激光共聚焦显微镜(OLS 5100)观察了原砂砂粒样本,如图1(b)所示。实验使用的冷冻砂坯是质量分数为4%的水与100目硅砂颗粒混合均匀后在-40℃下冻结24h以上制备得到<sup>[14]</sup>。采用配套了区域控温装置及排砂装置的数字化冷冻砂型绿色铸造成形装备进行切削排砂试验验证,如图1(c)所示,该设备加工区域温度-10~0℃,在主轴上搭建了排砂装置,用于开展排砂试验。设备的重复定位精度 $\leq \pm 0.1 \text{ mm}/1\ 000$ ,最大成形尺寸可达500 mm×500 mm×200 mm。本实验采用循环压缩式间接制冷方式,压缩气体经二级冷却输出低温冷风提供给切削区域,排砂冷风可在-30~0℃范围内调节,冷风压力 $\leq 0.6 \text{ MPa}$ ,本实验的冷冻砂型数控加工过程如图1(d)所示。



(a) Particle size distribution of 100-mesh silica sand



(b) Morphology of silica sand



(c) Digitalized frozen sand mold green casting molding equipment



(d) Frozen sand computerized numerical control machining process

图1 实验材料及设备

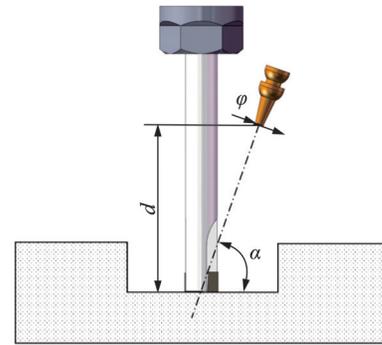
Fig.1 Experimental materials and equipment

## 1.2 实验方法

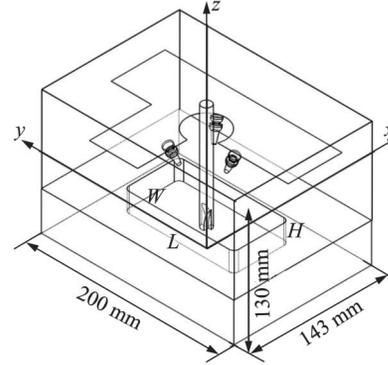
### 1.2.1 砂型加工区域的物理建模

几何模型条件如下:铣刀为平底立铣刀,刀具直径10 mm,冷冻砂型的大小为200 mm×143 mm×40 mm,矩形型腔尺寸为114 mm×57 mm×20 mm。在沿刀具圆周方向阵列布置3个喷嘴,喷嘴方位设置如图2(a)所示。以一个无厚度代表安装喷嘴的排砂装置底座,总体物理模型如图2(b)所示。仿真物理参数如表1所示,气流量是指在单位时间内气体通过喷嘴出口截面的流量;靶距指喷

嘴到铣刀端部的垂直距离;俯角是指在喷嘴中心轴线所在的垂直平面内,中心轴线与水平线所成的角;喷嘴口径指喷嘴出口的直径。



(a) Nozzle position setting



(b) Simulation computational domain modeling

图2 物理模型

Fig.2 Physical model

表1 物理参数

Table 1 Physical parameters

| 名称                         | 符号        |
|----------------------------|-----------|
| 铣刀直径/mm                    | $D$       |
| 型腔长度/mm                    | $L$       |
| 型腔宽度/mm                    | $W$       |
| 型腔深度/mm                    | $H$       |
| 气流量/(L·min <sup>-1</sup> ) | $q$       |
| 靶距/mm                      | $d$       |
| 俯角/(°)                     | $\alpha$  |
| 喷嘴口径/mm                    | $\varphi$ |

### 1.2.2 排砂射流流场数学模型建立

本文流场中马赫数普遍低于0.3,且流体所受的压力变化不大,流体为不可压缩流体。射流温度与环境温度相同,为等温冲击射流,忽略射流中水蒸气分压力产生的能量交换,认为排砂射流与流体域空气没有发生显热交换。

根据上述假设,在仿真拟中流场的空气流动服从质量守恒和动量守恒,而不求解能量方程,用式(1,2)描述<sup>[15]</sup>。

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = F_i + \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中:  $u_x, u_y, u_z$  分别为  $x, y, z$  方向的气流速度;  $\rho$  为空气密度;  $t$  为时间;  $x_i$  为  $i$  方向微元长度; 下标  $i$  指在直角坐标系中的  $x, y, z$  轴;  $u_i$  为  $i$  方向的气流速度;  $p$  为气流压力;  $\tau_{ij}$  为微元体上6个切应力分量;  $F_i$  为  $i$  方向的外部体积力;  $g_i$  为  $i$  方向的重力体积力。式(1)表示不可压缩流体的连续性方程。式(2)左端是流体单元的动量变化率,分别为惯性项与对流项;右端为作用在流体单元上的体积力、压力和黏性力,根据牛顿第二定律,动量的变化率等于作用力,因此得到式(2)。

排砂射流流场是环绕阵列式高速圆射流在型腔内部扩散过程中所产生的,采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型对流场湍流进行模拟。该模型适合包含有射流和混合流的自由流动,腔道流动和边界层流动,特别是对圆口射流和受限射流模拟中,Realizable  $k-\epsilon$  模型能给出较好的射流扩张,其湍动能及其耗散率输运方程为式(3,4)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon}{k + \sqrt{v \epsilon}} \quad (4)$$

式中:  $k$  为流场湍动能;  $\epsilon$  为湍流耗散率;  $\mu$  为空气的动力黏度;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $x_j$  为  $j$  方向微元单元长度;  $G_b$  为浮力影响引起的湍动能;  $C_1$  和  $C_2$  为常数;  $v$  为空气运动黏度系数;  $E$  为变形张量;  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  分别为湍动能及耗散率的湍流普朗特常量。

Realizable  $k-\epsilon$  模型并不依赖于分子黏性,在模拟近壁面的流动时会失效,但是近壁面的流动特性对停留在型腔表面的砂粒运动影响很大,因此在求解近壁面流动时加密了壁面处网格并使用了加强壁面函数法进一步增强模拟的准确性。

### 1.2.3 流场边界条件参数确定

本文采用三维流场数字分析方法,计算精度设置为双精度。根据实际加工区域温度,设置流场介质的参数为空气  $0^\circ\text{C}$  下的密度和粘度。采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型对流场湍流进行模拟,该模型对圆口射流和受限射流模拟可以给出较好的射流扩张结果<sup>[16-17]</sup>。设置射流流量  $20\text{ L/min}$ ,靶距  $60\text{ mm}$ ,俯角  $65^\circ$  和口径  $3\text{ mm}$ 。流场出口边界设置为压力出口边界,压力值为大气压力,流场入口边界设置为速度入口边界,在不可压缩定常流动中,流量与

入口速度  $V$  是等价的,通过式(5)转换。初始化边界条件,设置残差监视后进行稳态求解计算。

$$V = \frac{4q}{\pi \varphi^2} \quad (5)$$

### 1.2.4 正交实验设计方法

在计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)流场模拟结果的基础上,设计冷冻砂型数控加工气动辅助排砂的正交实验,对流量  $q$ 、靶距  $d$ 、俯角  $\alpha$  和喷嘴口径  $\varphi$  这4个因素进行分析,优化射流排砂工艺参数。根据模拟条件和数据分析,考虑实际加工过程喷嘴俯角过大会使射流路径与铸型表面产生干涉,因此选择表2中排砂工艺参数,设计4因素3水平的正交表  $L_9(3^4)$ 。

表2 工艺参数的正交因素水平

Table 2 Orthogonal factor levels for process parameters

| 序号 | 因素名称                                  | 水平     |        |        |
|----|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| 1  | 流量 $q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$ | 10(A1) | 20(A2) | 30(A3) |
| 2  | 靶距 $d/\text{mm}$                      | 45(B1) | 60(B2) | 75(B3) |
| 3  | 俯角 $\alpha/(\circ)$                   | 55(C1) | 65(C2) | 75(C3) |
| 4  | 口径 $\varphi/\text{mm}$                | 2(D1)  | 3(D2)  | 4(D3)  |

### 1.2.5 型腔残留砂粒的堆积体积表征方法

采用蓝光扫描仪对切削加工后的冷冻砂型表面进行扫描,逆向建模生成加工砂型的表面,基于最佳拟合平面法确定扫描模型的基准面和坐标系,并导入三维建模软件中对比分析砂型加工面的废砂残留情况。实验中,为兼顾蓝光扫描速度与扫描精度,使用的手持式蓝光扫描设备精度为  $0.3\text{ mm}$ ,同时考虑试验所用的100目造型原砂的粒径分布中,99%的砂粒粒径小于50目( $0.3\text{ mm}$ ),因此本试验规定扫描模型表面某处的尺寸偏差超出  $+0.3\text{ mm}$ ,认为该面上堆积了砂粒,处理流程如图3所示。

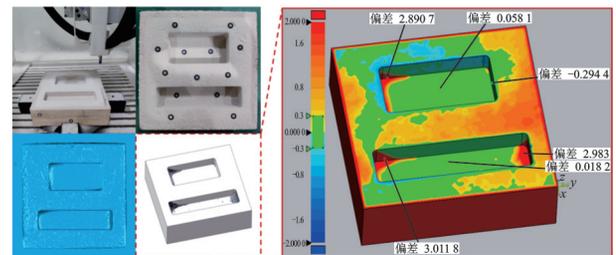


图3 砂型逆向建模及残留砂识别

Fig.3 Sand inverse modeling and residual sand identification

通过式(6,7)计算每组实验的排砂率,从而优化出最佳的排砂工艺参数。

$$V_c = L \times W \times H - D^2 \times H \times \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \quad (6)$$

$$P_i = \frac{V_c - V_{ti}}{V_c} \times 100 \quad (7)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  编号实验组对应的排砂率,  $V_{ti}$  指第  $i$

编号实验组滞留在型腔内部的残留砂体积,  $V_c$  为型腔的体积。

### 2 排砂射流流场有限元仿真分析

#### 2.1 砂型加工区域射流流场模拟结果

模拟计算经迭代一定次数后,流场速度、压力等趋于稳定后得到砂型加工区域空气流场,如图4所示。如图4(a)所示,从喷嘴处产生的高速射流冲击汇合在中心铣刀处,在康达效应的作用下,射流向刀具柱面偏转,并依次贴附在铣刀柱面、型腔底面和型腔侧壁上,在型腔中形成明显的涡流<sup>[18]</sup>。因此,排砂流场可分为4个典型区域:自由射流区、柱面贴附区、底面贴附区以及壁面贴附区,如图4(b)所示。流场中存在由高速射流诱导产生的横向气障,气障的流动阻碍了砂粒向工件外部飞出,在型腔中形成的不合理的涡流分布更有可能将砂屑吹扫进型腔角落形成粘连,造成大量的废砂堆积,严重影响了已加工表面质量。

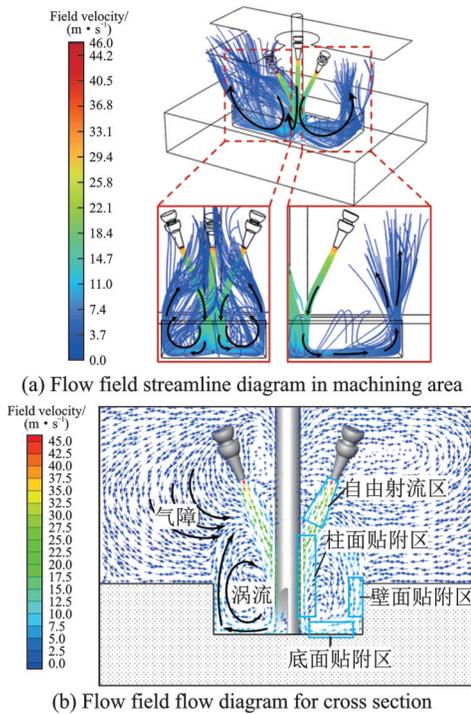


图4 型腔周围空气流场

Fig.4 Air flow field around cavity

如图5所示,每条截线所在的  $xy$  截面即为测量截面。6个测量截面分别距离型腔底面 2、4、6、10、15 和 20 mm,因此这些截面在模型坐标系中的位置分别为  $z=22、24、26、30、35$  和  $40$  mm。

在单束气流冲击圆柱面的过程,射流会在圆柱下游产生涡流的发生,分离和破裂,如出现冯·卡门涡和次级涡<sup>[19]</sup>。从图6可以看出,3束射流环绕吹风的方式与单束气流冲击柱面有显著的区别,其中一束射流冲击在柱面上仍然绕圆柱发生绕流,但气

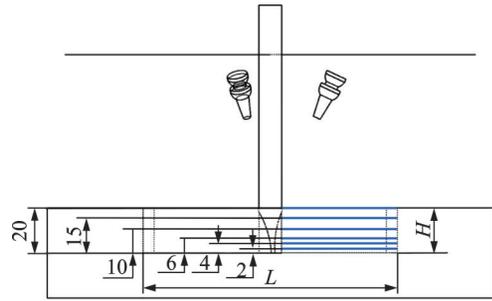


图5 测量截线与截面的位置示意图(单位:mm)

Fig.5 Schematic location of the measuring line and cross section (unit: mm)

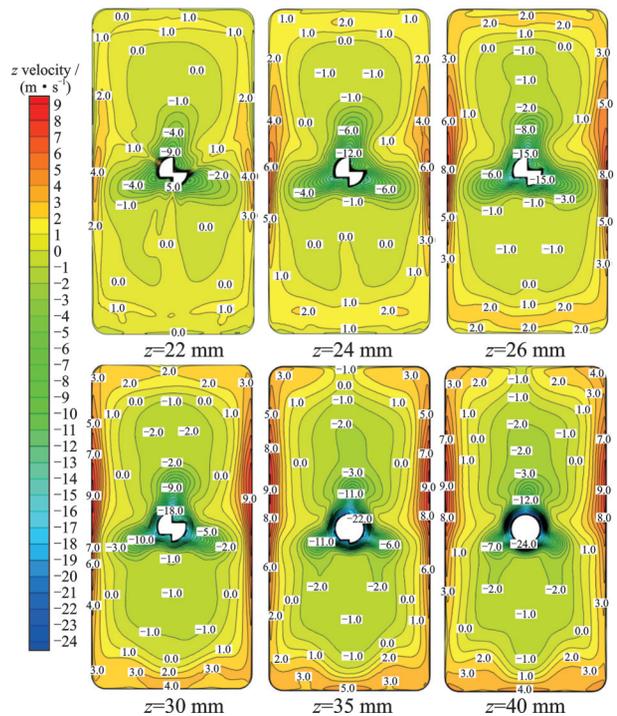


图6 矩形型腔中流场演变图

Fig.6 Evolution of flow field in rectangular cavity

流向周向扩散的运动受到了来自另外两束射流的周向绕流约束,平衡了刀具柱面周向的扰动,在各高度截面上均形成了稳定的“三叶草”速度分布形态。

#### 2.2 排砂射流工艺参数对型腔流场的影响

##### 2.2.1 射流流量对型腔流场的影响

在靶距 (60 mm)、俯角 (65°)、喷嘴口径 (3 mm)、矩形型腔尺寸 (114 mm×57 mm×20 mm)等参数保证不变的情况下,仅改变流量的大小,分别为 10、20 和 30 L/min,分析气流量对加工区域流场的分布规律。

3种射流流量下,各截面上的气流速度变化过程如图7所示。由于刀具柱面的摩擦与流体间的动量交换,柱面贴附区射流的轴向 ( $z$  向) 速度不断减小,如图7(a)所示。射流在型腔竖直壁面处同样形成贴附区,相比柱面贴附区的射流,此时的射

流速度稳定衰减缓慢,如图 7(b)中  $z=30\sim 40$  mm 截面。甚至  $z$  向速度会沿射流前进方向不减反增,如图 7(c)所示。从各流量射流在截面上具有相似的“三叶草”气流分布图案和速度梯度,说明使用环

绕阵列式的射流源会对竖直壁面产生更均匀的冲击效果。在 3 种射流流量下壁面贴附区的射流速度均在  $z=30$  mm 截面达到最大,在  $z=30\sim 40$  mm 区域速度保持稳定。

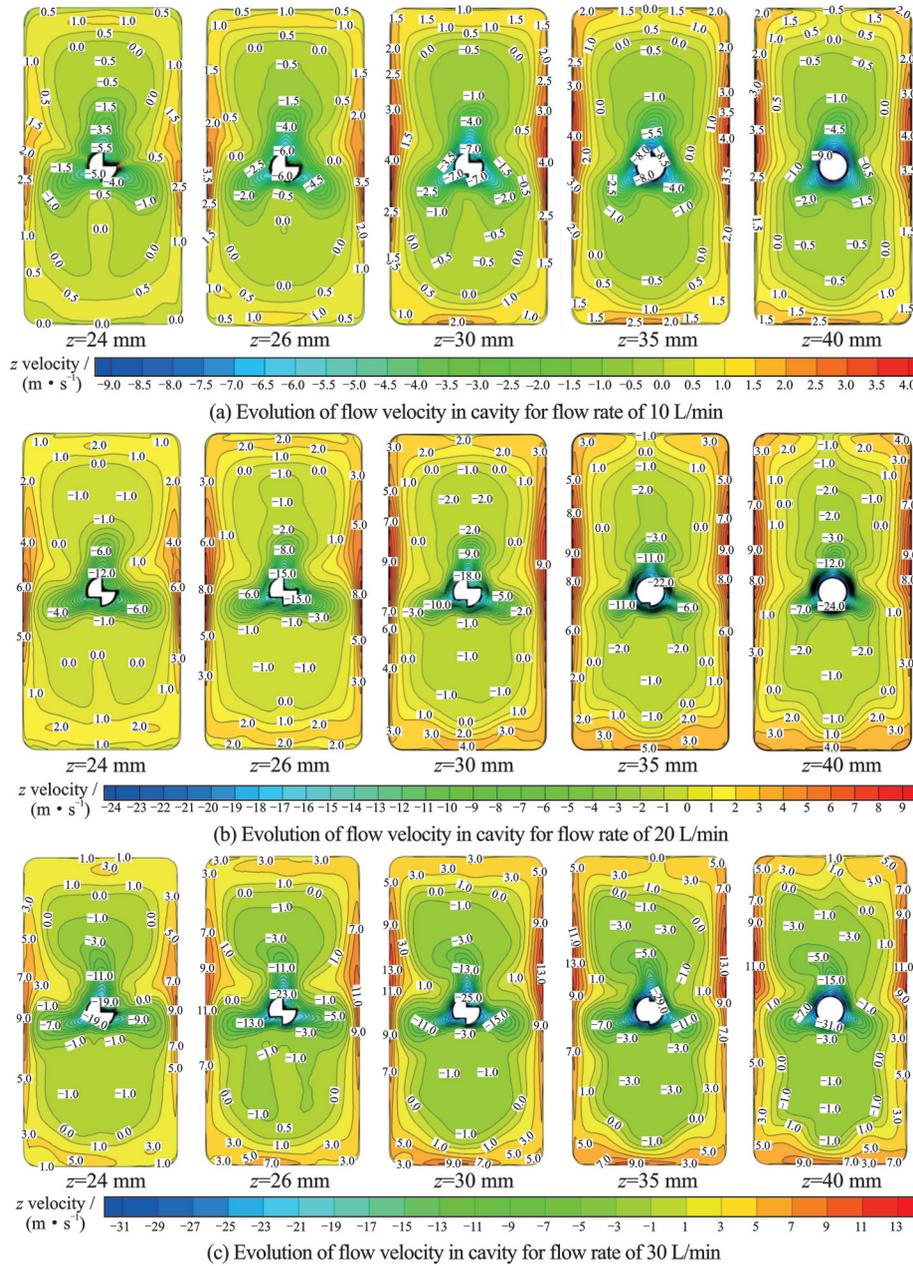


图 7 不同高度  $z$  向速度等值线图

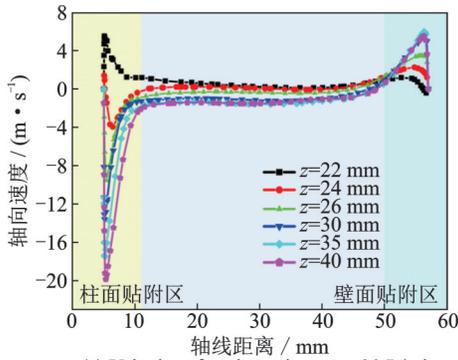
Fig.7 Contour plots of  $z$ -direction velocities at different altitudes

为了定量分析不同形状型腔对铣刀工件约束界面条件下空气流场的规律,提取不同流量下型腔周围截线上的空气流速,如图 8 所示。当纵坐标的轴向速度为正时,表示射流是流成型腔;当速度为负时,表示射流是向下进入型腔;横坐标代表测量点与刀具中心轴线的距离。

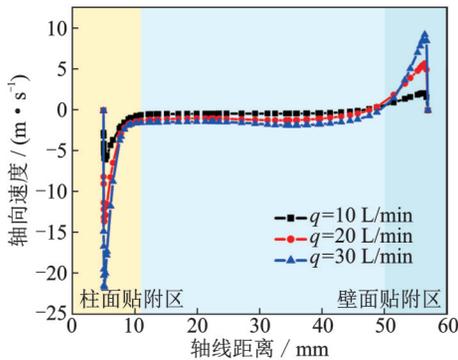
由图 8(a)所示,  $z=22$  mm 截面处于底面贴附区,底面对射流的反作用力产生了较大的正向射流速度,后续射流轴线速度降为 0 m/s,以活塞流的

形式沿型腔底面向四周辐射。由图 8(b)可知,不同流量下的气流速度均出现了双峰值,柱面贴附区的速度峰值分别为  $-6.04$  ( $q=10$  L/min)、 $-13.60$  ( $q=20$  L/min) 和  $-21.69$  m/s ( $q=30$  L/min)。由于射流的自由侧卷吸周围环境流体并与其发生动量交换,柱面贴附区以外的流场也被赋予了微弱的动量。在距离刀具轴线 50 mm 左右的位置,气流转向,进入壁面贴附区,峰值分别为 2.10 ( $q=10$  L/min)、5.75 ( $q=20$  L/min) 和 9.27 m/s ( $q=$

30 L/min)。柱面贴附区的射流撞击底面时,射流会裹挟出大量砂粒,底面贴附区射流吹起粘接在底面出的砂粒,壁面贴附区的射流有助于将拐角堆积的砂粒以及在切削区域飞溅出的砂粒输送出型腔,因此,各贴附区的射流影响范围越大、气流速度越大,越有利于排砂。增大流量虽然不能明显增大各贴附区的厚度,但可以显著增大射流的速度,从而起到输送砂粒的作用。



(a) Velocity of each section at  $q=20$  L/min



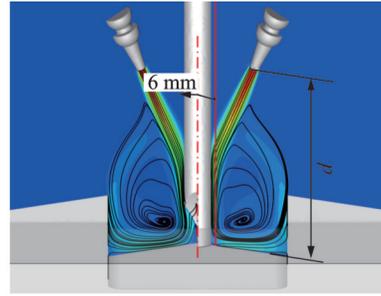
(b) Jet flow rate for each flow rate at  $z=30$  mm cross section

图8 不同射流流量下载线上的气流速度

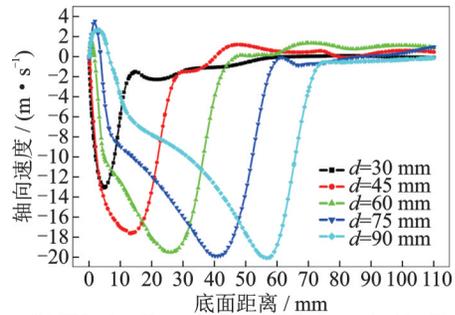
Fig.8 Air velocity on the measurement line for different jet flow rates

2.2.2 靶距对气流场的影响

仅改变靶距的大小,分别为3、45、60、75和90 mm,并分析观察靶距对加工区域气流场的影响。图9(a)显示流场中的测量线位置,提取该测量线上的流体流速,建立如图9(b)所示的射流轴向流速图,随着靶距的增加,环绕阵列式射流在刀具上的汇合区域不断升高,对应射流的速度极值点位置后移。靶距为60、75和90 mm的速度最大值均为20 m/s左右,但靶距为30 mm时,喷嘴与底面距离太近,环绕阵列式射流撞击在底面上动量耗散剧烈。当靶距为90 mm时,射流流动的路程过长,射流提前与柱面分离。因此,在保证环绕阵列式射流正常汇聚的前提下,可以通过降低靶距来减缓射流竖向贴附区的速度衰减,



(a) Schematic diagram of jet flow field



(b) Velocity diagram of cylindrical attached jet flow at different target distances

图9 贴附射流流场流速图

Fig.9 Velocity diagram of attached jet flow field

基于赵洪峰等的工作<sup>[20]</sup>,选取风速3.3 m/s为气动排砂的临界风速,将截面轴向速度大于3.3 m/s的区域定义为“排砂区”,引入不同靶距下各截面排砂区面积与截面总面积的比值分布,如图10所示。由图10可知,靶距为30 mm时,在各高度截面上的排砂区面积均不大,在型腔的出口截面( $z=40$  mm)上,排砂区占比在所有靶距中最低,因此排砂效果最弱;靶距为90 mm时,气流的轴向速度发展过慢,在 $z=30$  mm截面排砂区占比仅为1.4%,砂粒的运输效率低。这说明:靶距的改变会显著影响型腔中气流的分布,统计其余靶距范围上的排砂区面积,发现 $d=45$  mm排砂区面积占比最大, $d=75$  mm排砂区面积占比最小,因此,在适宜靶距范围内,靶距越小,排砂效果越好。

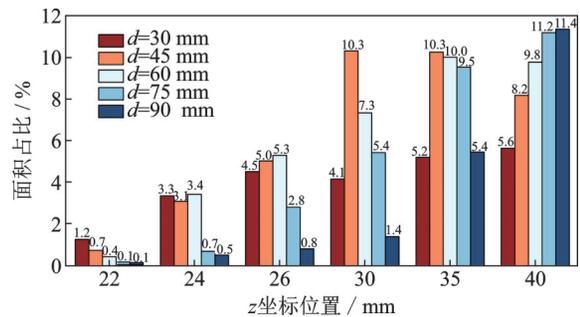


图10 不同靶距下排砂区面积占比变化

Fig.10 Variation of area share of sand drainage area under different target spacing

2.2.3 射流俯角对气流场的影响

仅改变射流俯角的大小,分别为45°、55°、65°、

75°和 85°,并分析观察俯角对型腔流场的影响。图 11 为不同俯角下喷嘴轴线截面上的空气流场速度云图,由图 11(a)看出,俯角为 45°、55°和 65°的情况下,随着俯角的增大,贴附区的厚度增大,代表进入型腔的射流越强,从图 11 中可以看出,俯角为 45°的射流在铣刀容屑槽处提前断流,形成较差的壁面贴附区。在图 11(b)中,俯角为 75°时,射流在刀尖处汇合,形成贴附后随即碰撞底面,继续增大俯角为 85°,射流不贴附在铣刀柱面上,直接冲击型腔底面上,射流对底面的撞击比较激烈,紊流脉动增强,在刀具柱面形成方向向上的贴附区。

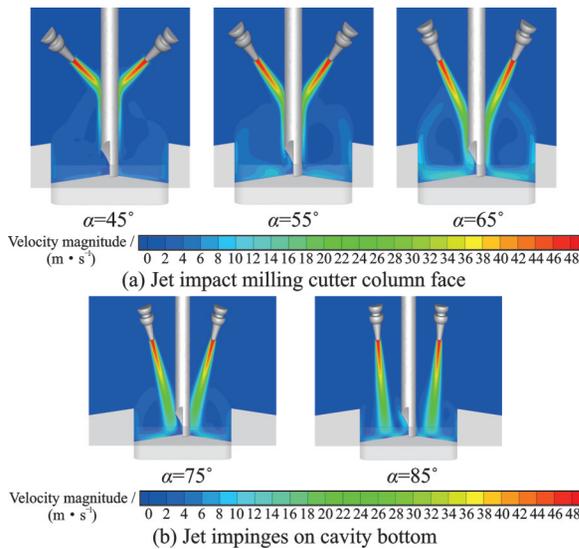


图 11 不同俯角下射流中心截面的速度分布

Fig.11 Velocity distribution in the center cross section of the jet at different pitch angles

引入不同俯角下各截面排砂区面积与截面总面积的比值分布,如图 12 所示。俯角为 65°时所产生的排砂区扩展迅速,区域面积显著高于俯角为 45°和 55°的工况。俯角为 75°时,射流直接对准切削区域,刀具与底面形成的拐角削弱了射流的动量,排砂区面积增长较慢。俯角 85°的射流以接近垂直的角度冲击底面,所产生的反作用力扭转射流的方向,迅速产生较大的排砂区域,但在  $z=$

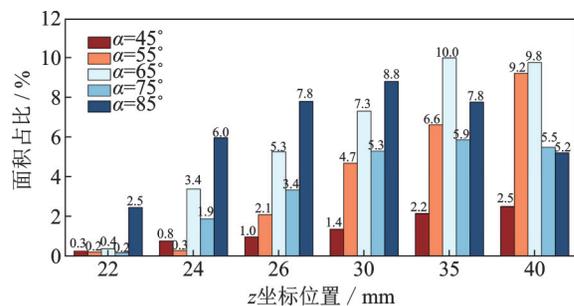


图 12 不同俯角下排砂区面积占比变化

Fig.12 Variation of area share of sand drainage area at different calibers

30~40 mm 截面上,排砂区面积衰减较为明显。因此,对于柱面贴附射流和底面冲击射流,通过改变俯角均会显著影响砂粒的排除效果。统计发现  $\alpha=65^\circ$ 和  $\alpha=85^\circ$ 的总排砂区面积占比最大,其次是  $\alpha=55^\circ$ 、 $\alpha=75^\circ$ 和  $\alpha=35^\circ$ 。

### 2.2.4 喷嘴口径对气流场的影响

通过改变射流喷嘴口径的大小,分别为 2、3 和 4 mm,分析喷嘴口径对加工区域气流场的影响。从图 13 可以看出,3 种喷嘴口径下,射流均在铣刀柱面上汇聚形成“三叶草”状的贴附射流。图 13(a)中最大速度由 38 m/s 降至 21 m/s,图 13(b)中最大速度由 24 m/s 降至 12 m/s(口径 3 mm),图 13(c)中最大速度由 17 m/s 降至 9 m/s(口径 4 mm),三者具有相近的衰减速率,这说明:仅改变口径的大小,影响贴附射流的速度,但不会显著影响射流的分布势态和衰减速率。图 13(a,b)中,随着高度的增加,壁面贴附区射流的  $z$  向速度先快速增大,后在  $z=30\sim 40$  mm 截面达到稳定。在图 13(a), $z=35$  mm 截面上,速度 3 m/s 的等值线几乎完全覆盖了型腔的 4 个侧壁面。相对的,在图 13(c)中,各截面上的壁面贴附区射流强度偏低,最大速度仅为 4 m/s。这说明:喷嘴口径越小,壁面贴附区的影响范围越大,射流的轴向速度越大,越有利于排砂。

为了进一步定量分析喷嘴口径对型腔内部流场速度的影响规律,引入不同口径下各截面排砂区面积与截面总面积的比值分布,如图 14 所示。由图可知,3 种喷嘴口径下,排砂区面积占比均呈现先增大后减小的趋势, $z=30\sim 40$  mm 截面上的排砂区面积变化较小,气流基本稳定。由图 13(c)可知,口径 4 mm 的柱面贴附射流的整体速度最小,相应的在图 14 中该工况下的排砂区面积占比仅 2% 左右。口径 2 mm 的排砂区面积是口径 3 mm 的 2 倍左右,是口径 4 mm 的 10 倍左右,这证明:柱面贴附区射流的强度与排砂区的面积大小正相关,口径越小,柱面贴附区的射流速度越大,型腔内排砂区的面积越大,越有利于排砂。

### 2.3 射流排砂工艺参数优化

极差分析结果如表 3 所示,不同射流排砂工艺参数下冷冻砂型加工排砂效果的变化范围很大,最高排砂率可达 99.998%,比最低排砂率(74.449%)提高了 34.3%。表 3 中  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为计算  $R$  的不同过程变量; $R$  表示每个因素对应的极差,其中  $R_A > R_D > R_C > R_B$ ,因此流量的变化对冷冻砂型切削过程排砂效果的影响最为显著,其次是喷嘴口径、俯角和靶距。

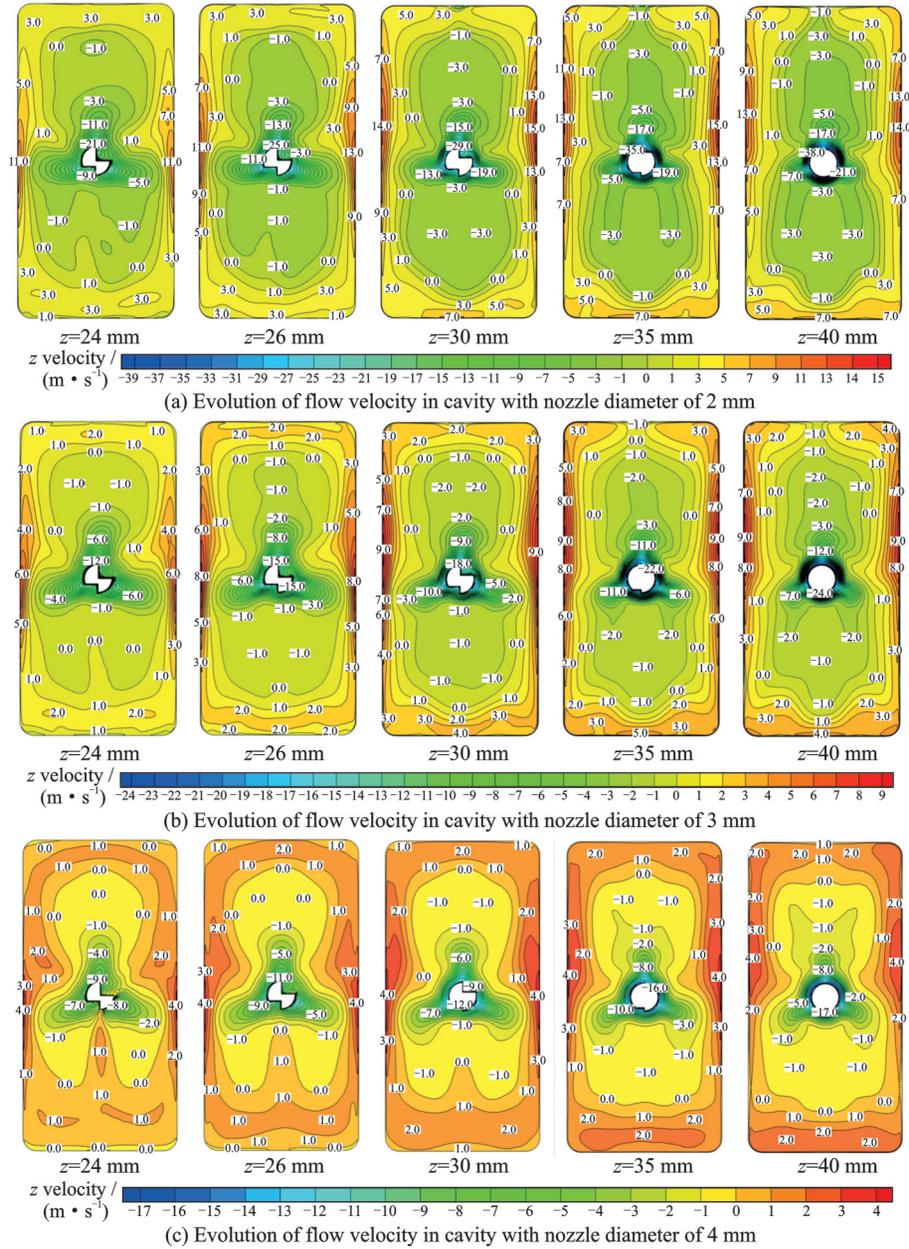


图13 不同高度截面上z向速度等值线云图

Fig.13 Contour plots of z-direction velocities on cross sections at different heights

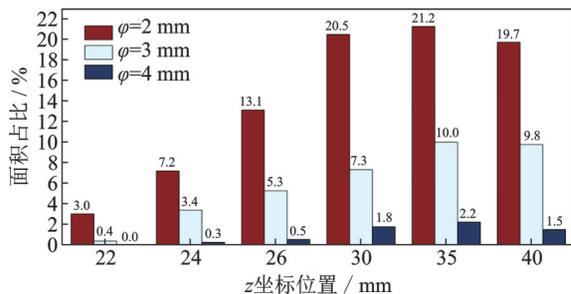


图14 不同口径下排砂区面积占比变化

Fig.14 Changes in percentage of area of sand drainage area under different calibers

各因素的效应曲线如图15所示,本试验条件下最优排砂工艺参数组合为A3B1C2D1,即在流量为30 L/min、靶距为45 mm、俯角为65°、口径为2 mm

条件下进行切削加工,冷冻砂型的排砂效果最好。

基于上述正交实验得到的最优工艺参数组合开展排砂工艺实验验证。使用100目铸造用硅砂与质量分数为4%的水混合,在温度为-40℃的低温冷柜中深冷冻结24 h制得待切削砂坯,选择排砂工艺参数最优组合,即在流量为30 L/min、靶距为45 mm、俯角为65°和口径为2 mm条件下开展冷冻砂型矩形腔数控加工精确排砂实验验证,测得实验排砂率为99.999%,得到优良的排砂效果。结合第2.2节各因素的仿真分析结论,发现实验规律与仿真结果相吻合,各因素对排砂区面积占比与排砂率的影响规律一致,证明本文的仿真可以进一步指导实验的设计与相应排砂装置和工艺的优化。

表 3 极差分析结果

Table 3 Results of range analysis

| 编号    | 流量      | 靶距      | 俯角      | 口径      | 排砂率/%  |
|-------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 1     | A1      | B1      | C1      | D1      | 90.562 |
| 2     | A1      | B2      | C3      | D2      | 74.449 |
| 3     | A1      | B3      | C2      | D4      | 76.207 |
| 4     | A2      | B1      | C3      | D4      | 84.528 |
| 5     | A2      | B2      | C2      | D1      | 99.652 |
| 6     | A2      | B3      | C1      | D2      | 84.093 |
| 7     | A3      | B1      | C2      | D2      | 99.998 |
| 8     | A3      | B2      | C1      | D4      | 95.066 |
| 9     | A3      | B3      | C3      | D1      | 99.998 |
| $K_1$ | 241.217 | 275.088 | 269.721 | 290.212 |        |
| $K_2$ | 268.273 | 269.167 | 275.857 | 258.540 |        |
| $K_3$ | 295.063 | 260.299 | 258.976 | 255.801 |        |
| $k_1$ | 80.406  | 91.696  | 89.907  | 96.737  |        |
| $k_2$ | 89.424  | 89.722  | 91.952  | 86.180  |        |
| $k_3$ | 98.354  | 86.766  | 86.325  | 85.267  |        |
| R     | 17.949  | 4.930   | 5.627   | 11.470  |        |

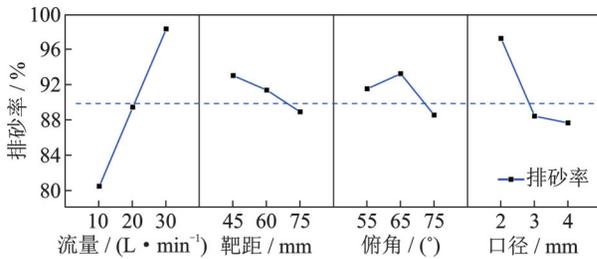


图 15 不同射流工艺参数排砂率曲线图

Fig.15 Curve diagram of sand discharge rate of different jet process parameters

### 3 结 论

(1)排砂环绕阵列式高速射流会在刀具柱面和型腔壁面上形成稳定贴附,输送砂粒的主要区域为射流在型腔壁面形成的排砂区。

(2)排砂射流喷嘴流量与排砂区面积正相关,靶距以 45~75 mm 为宜,俯角以 55°~65°为宜,喷嘴口径与排砂区面积负相关。排砂射流的最佳工艺参数为流量 30 L/min、靶距 45 mm、俯角 65°和口径 2 mm。

(3)正交实验表明,排砂率最大值(99.998%)比最小值(74.449%)提高了 34.3%。射流流量对排砂率的影响最为显著,其次是射流喷嘴口径、俯角和靶距。

(4)通过冷冻砂型加工排砂的试验测定,各工艺参数对排砂效果的影响规律与模拟分析结果相吻合。采用排砂射流流场模拟分析,可以优化射流流量、靶距、俯角和口径等排砂工艺参数。

### 参考文献:

[1] 单忠德. 无模铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.  
SHAN Zhongde. Patternless casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

[2] 司红丽. 砂型铸造模具对铸件精度的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2015(3): 16-17.  
SI Hongli. Influence of sand casting mould on casting precision[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2015(3): 16-17.

[3] CHEN Li, ZHANG Wei, WU Chenhong, et al. Application of digital pattern-less molding technology to produce art casting[J]. China Foundry, 2014, 11(6): 487-492.

[4] 杨浩秦, 单忠德, 刘丰, 等. 冷冻砂型高精高效制备过程研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(10): 1254-1259.  
YANG Haoqin, SHAN Zhongde, LIU Feng, et al. Study on high precision and high efficiency preparation processes of frozen sand molds[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1254-1259.

[5] 张国磊, 单忠德, 刘丽敏, 等. 冷冻砂型数字化铣削成形工艺参数优化研究[J]. 铸造, 2023, 72(5): 514-522.  
ZHANG Guolei, SHAN Zhongde, LIU Limin, et al. Research on optimization of forming parameters for digital milling of frozen sand mold[J]. Foundry, 2023, 72(5): 514-522.

[6] 佚名. 应用砂型铣削新工艺[J]. 国际模具制造商情, 2008(2): 24-26.  
Anonymity. Applying a new technology of sand mold milling[J]. International Mold & Die Making News for China, 2008(2): 24-26.

[7] METROM. Unique CNC machines[EB/OL].( 2023-12-20). <https://metrom.com/?id=1&L=1>.

[8] 谢云龙, 徐志锋, 张永才, 等. 精密砂型数控铣削加工技术研究进展[J]. 铸造, 2014, 63(8): 795-800.  
XIE Yunlong, XU Zhifeng, ZHANG Yongcai, et al. Research progress of precision sand cnc milling technology[J]. Foundry, 2014, 63(8): 795-800.

[9] 谢大进. 精密砂型数控铣削刀具切削力及磨损行为研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.  
XIE Dajin. Study on cutting force and tool wearbehavior of precision sand by NC milling[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.

[10] 程正伟. 无模化铸型数控切削快速制造技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.  
CHENG Zhengwei. Study on the rapid manufacturing technology of patternless casting by nc milling[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2010.

- [11] 赵洪锋, 单忠德, 刘丰, 等. 基于RSM的空心立铣刀多学科多目标优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(4): 740-746.  
ZHAO Hongfeng, SHAN Zhongde, LIU Feng, et al. Multidisciplinary multi-objective optimization design of hollow end mill based on response surface method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 740-746.
- [12] 李杰. 数字化无模铸造精密成形机排砂系统研究[D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2013.  
LI Jie. Research on waste sand cleaning system of digital precision forming machine without pattern casting [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2013.
- [13] 苏宏华, 王禹封, 谯木, 等. 切削加工有限元仿真技术的现状与展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 361-378.  
SU Honghua, WANG Yufeng, QIAO Mu, et al. Review current questions and strategies about finite element simulation for cutting processing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 361-378.
- [14] SHAN Zhongde, YANG Haoqin, LIU Feng, et al. Performance of digital patternless freeze-casting sand mould[J]. China Foundry, 2020, 17(4): 308-313.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: Principles and applications of cfd software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [16] 李亚军. 非等温竖壁贴附射流夜间通风降温特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.  
LI Yajun. Study on cooling characteristics of non-isothermal wall-mounted attached night ventilation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [17] Fluent Inc. Fluent turbulence[M].[S.l.]: Fluent Inc, 2006.
- [18] LI A. Extended coanda effect and attachment ventilation[J]. Indoor and Built Environment, 2019, 28(4): 437-442.
- [19] SINGH D, PREMACHANDRAN B, KOHLI S. Experimental and numerical investigation of jet impingement cooling of a circular cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 672-688.
- [20] 赵洪锋, 单忠德, 臧勇, 等. 空心立铣刀在无模铸造砂型加工中的排砂工艺[J]. 铸造, 2016, 65(1): 18-21.  
ZHAO Hongfeng, SHAN Zhongde, ZANG Yong, et al. Processing technology of removing sand chip in machining sand mold with hollow end mill for patternless casting[J]. Foundry, 2016, 65(1): 18-21.

(编辑:陈珺)