DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.03.015

冷冻砂型数控加工参数与排砂参数联合优化研究

刘亲将^{1,2},单忠德^{1,2,3},杨浩秦^{2,3},闫丹丹^{1,2},梁 校^{1,2} (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:通过数控加工方法制备铸造用冷冻砂型是实现数字化冷冻砂型绿色铸造的重要基础。开展了冷冻砂型在 不同目数和含水量下的数控加工稳健参数优化研究,获得对尺寸精度影响波动最小的切削加工工艺参数组合, 当切削速度为188 m/min、进给速度为120 mm/s、切削深度为3 mm和切削宽度为8 mm时,数控加工冷冻砂型的 尺寸精度较稳定。开展冷冻砂型多参数耦合排砂工艺参数优化研究,以排砂率为指标,在不同型腔三维尺寸条 件下分析流量、靶距、俯角和口径对排砂效果的影响规律,优化出较优排砂工艺参数组合,流量为30 L/min、靶距 为45 mm、俯角为65°、口径为2 mm,排砂效果较好。耦合冷冻砂型力学性能与排砂要求,优化得到造型参数为 100 目原砂与4%(质量分数)含水量。通过试验优化得到完整的冷冻砂型数控加工排砂工艺参数窗口,实现冷冻 砂型数控加工的高精高效成形。

关键词:冷冻砂型;排砂工艺;正交试验;参数优化;排砂效果
 中图分类号:TG234.6
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2615(2025)03-0535-12

Joint Optimization Study of CNC Machining Parameters and Sand Discharge Parameters for Frozen Sand Molds

LIU Qinjiang^{1,2}, SHAN Zhongde^{1,2,3}, YANG Haoqin^{2,3}, YAN Dandan^{1,2}, LIANG Xiao^{1,2}
(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: The preparation of frozen sand molds for casting by CNC machining methods is an important basis for the realization of digital frozen sand green casting. This paper carries out a study on the optimization of robust parameters for CNC machining of frozen sand profiles at different mesh sizes and different water contents, to obtain the combination of cutting process parameters that has the least impact on dimensional accuracy. The dimensional accuracy of CNC machined frozen sand molds is more stable when the cutting speed is 188 m/min, the feed rate is 120 mm/s, the depth of cut is 3 mm and the cutting width is 8 mm. Research on optimization of parameters of multi-parameter coupled sand removal process for frozen sand type is carried out. Taking the sand discharge rate as an index, the influence laws of flow rate, target distance, pitch angle and caliber on the sand discharge effect under conditions of different cavity three-dimensional size

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3401200);装备预研专用技术项目(30104040302);江苏省基础研究计划(自然 科学基金)青年基金(BK20230885)。

收稿日期:2024-05-12;修订日期:2025-04-16

通信作者:单忠德,男,研究员,博士生导师,院士,E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn;杨浩秦,男,博士,E-mail: yang-hao-qin@nuaa.edu.cn。

引用格式:刘亲将,单忠德,杨浩秦,等. 冷冻砂型数控加工参数与排砂参数联合优化研究[J]. 南京航空航天大学学报 (自然科学版),2025,57(3):535-546. LIU Qinjiang, SHAN Zhongde, YANG Haoqin, et al. Joint optimization study of CNC machining parameters and sand discharge parameters for frozen sand molds[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition),2025, 57(3):535-546.

are analyzed, and the combination of sand discharge process parameters is optimized. The flow rate is 30 L/min, target distance is 45 mm, pitch angle is 65° , and caliber is 2 mm. Coupled with the mechanical properties of frozen sand mold and sand discharge requirements, the optimized molding parameters are 100 mesh raw sand and 4% (mass fraction) water content. Through the test optimization, a complete frozen sand CNC machining sand discharge process parameter window can be obtained, thus achieving high precision and high efficiency of frozen sand CNC machining forming.

Key words: frozen sand mold; sand discharge process; orthogonal test; parameter optimization; sand discharge effect

铸造是机械零部件成形的重要基础工艺,其中 世界上80%的铸件通过砂型铸造生产^[1]。传统的 砂型铸造技术在大规模生产方面表现出色,然而难 以满足当前对单件、小批量铸件的试制以及新产品 开发的需求,铸造新技术亟需满足航空航天、能源 动力等行业对于复杂高端铸件短周期、高精度、高 性能制造的需求,助力铸造行业的转型升级^[2-3]。

随着制造业的数字化转型,砂型数控加工技术 在零部件铸造中得到广泛应用,数控加工技术深入 融合普及各行各业。随着应用领域的不断扩大,数 控加工技术对难加工材料、脆性材料、温度敏感等 材料的表面质量和加工精度的要求也日益提高^[4]。 因此,以数控加工为纽带,数字化冷冻砂型绿色铸 造技术应运而生,该技术基于数控减材加工原理, 直接对冷冻砂坯进行数字化切削加工,消除了传统 翻模造型工艺中制模的需要,减少废气、固体废弃 物的排放,实现了单件、小批量、复杂金属件的高精 度、高效率和绿色化制造^[57]。

数字化砂型加工普遍采用干式切削加工技术, 在砂型成形过程不使用任何切削液来润滑、冷却或 辅助断屑排屑[8],且大部分砂型加工在铣削窄槽深 孔等结构时,如果没有及时将刀具切削砂型材料产 生的砂屑清理干净,易造成大量废砂堆积在半封闭 的型腔结构中,铣刀长时间与废砂碰撞,刀片会受 到严重的磨损,直接减少刀具寿命,甚至出现刀具 断裂的现象^[9]。Lacalle等^[10]采用砂型数控加工技 术,对加工时间、成本和刀具磨损均进行了专门研 究,减少砂型在制造过程被破坏的风险,大大缩短 了交货时间。Zhao等^[11]研究出满足砂型数控加工 要求的制坯工艺,通过正交试验法揭示切削工艺参 数对树脂砂型数控加工质量的影响。张国磊等[12] 通过对切削力进行分析,揭示了各铣削成形参数对 冷冻砂型铣削力的影响机理。赵洪锋等[13]针对砂 型数控加工过程中砂屑不易及时排除等问题,提出 了一种气动排砂空心立铣刀模块化设计,根据砂型 加工深度对空心立铣刀的供给气体压力进行调节, 实现加工过程有效排砂。李杰[14]基于风砂气固两

相流,搭建了四喷嘴对吹排砂系统,得到针对窄槽 中的废砂最为有利的喷嘴布局设计。

数字化冷冻砂型加工技术在继承了无模加工 技术对复杂薄壁、高端铸件快速响应特点的同时^[15],在冷冻砂型铸造成形过程中也出现了许多 新的难题和挑战。其中,切削产生的夹冰含水砂粒 极易在低温加工环境中重新粘接在砂型表面,互相 粘连的废砂粘接成团,进一步提高排砂阻力,增加 冷冻砂型数控加工难度。冷冻砂型数控加工排砂 技术是冷冻砂型精确成形工艺体系的重要组成部 分,当前的冷冻砂型数控加工排砂工艺依旧面临如 低效和不稳定性等诸多挑战,优化出精确有效的排 砂工艺对提高铸件质量和生产效率至关重要。

1 试验条件及方案

首先测试了砂型的基础物理参数,包括粒径分 布、表面形貌,及不同含水量和不同目数下砂型抗 拉抗压强度等参数;设计基于田口方法的稳健参数 优化试验,对切削冷冻砂型的精度波动进行研究。 以此为基础开展了冷冻砂型型腔铣削加工气动辅 助排砂正交试验,对流量q、靶距d、俯角α和喷嘴 口径φ这4个因素进行分析,进一步研究分析得到 不同型腔深度及不同长宽比下的排砂率变化规律, 并验证了优化的排砂工艺参数。

1.1 冷冻砂型数控加工试验条件

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本试验中数控 加工排砂试验研究。其中,铣刀为成形机配套的专 用平头双刃立铣刀,使用 PCD 刀片,刀具直径为 10 mm,悬伸长度为110 mm。该设备配备的区域 控温装置可完全覆盖砂型加工区域,采用自然复叠 式制冷循环方式,压缩空气经低温冷干机二级冷 却,输出低温冷风的温度可在 0~-30 ℃调节,冷 风压力为0.1~0.7 MPa。砂型加工区域的温度达 -10~0℃,在主轴上搭建了排砂射流装置,可满足 冷冻砂型长时间加工条件。本文试验主要使用 100目的硅砂作为冷冻砂型的造型原砂,由一定质 量分数的去离子水与硅砂在-40℃下冻结24h以 上制得冷冻砂坯,冷冻砂坯尺寸为200mm× 200mm×100mm。

(1)制样仪器。保证试验结果准确可靠的首要 前提之一是选择标准的设备。采用QJ-20型混砂 搅拌机将型砂颗粒与纯水粘接剂搅拌均匀,如图 1(a)所示。采用捷胜DW-45L938工业冷柜冻结保 存样品及切削用冷冻砂型,冷柜温度-15~-45℃ 可调,冷柜内胆尺寸1000 mm×700 mm× 1300 mm,总容积938 L,如图1(b)所示。采用 SHA标准试样制样机制备冷冻砂型抗拉及抗压试 块,可同时制作多个紧实度的标准试样,用于测定 冷冻砂型标准试样的透气性、抗压、抗剪、抗拉强度 及热稳定性等各项工艺物理性能,如图1(c) 所示。





(a) Model QJ-20 sand mixer

(b) DW-45L938 industrial refrigeration unit



(c) SHA standard specimen preparation machine 图 1 制样相关仪器

Fig.1 Key instruments for sample fabrication

(2)测量仪器。如图 2(a)所示,采用 SDZ 电磁 振摆筛砂机测量砂粒的粒径,通过筛选法测量各目 数硅砂的粒径分布;采用奥林巴斯 3D 测量激光显 微镜(OLS 5100)观察砂粒样本的颗粒形貌,如图 2(b)所示;采用 SQS-II 智能砂型强度试验机测量 砂型力学试样的抗拉强度和抗压强度,如图 2(c) 所示;采用天远 FreeScan UE Pro多功能激光手持 三维扫描仪对切削加工后的冷冻砂型进行逆向建 模生成加工砂型的三维模型,通过统计砂型型腔面 上堆积砂粒的体积,得到每组试验的排砂量,如图 2(d)所示。



Fig.2 Instrumentation for sand mold property analysis

1.2 数控加工与排砂试验设计方案

1.2.1 稳健参数设计试验

稳健参数设计是以追求产品和系统质量特性 的稳健性、抗干扰性为目标的一种新的优化设计方 法,主要通过信噪比(SNR)和田口正交试验两个 核心工具进行参数优化设计^[16]。田口方法作为一 种局部优化方法可在较少的试验组数中得到优化 的参数组合,可极大地提高试验的效率和准确性。 SNR是指样本的均值(即目标的质量)和方差(即 数据的波动)之比,可综合反映响应质量和离散度 的特征信息。在 SNR分析中,目标质量的性能特 性分为望小、望大和望目特性,在本试验中,对切削 参数的研究目的是减少在数控加工过程对规定尺 寸目标值的影响波动,因此使用 SNR 目特性进行 相关计算分析^[17]。

对于本试验的冷冻砂型数控加工制程,质量性能(尺寸精度)的特征是可控因子和噪声因子共同作用的结果,可控因子是本试验需要控制和调整的因素;噪声因子是本试验为保证尺寸精度的稳健要求而考虑的随机误差,具体试验参数设计分别如表1和表2所示。

	表1	可控因素选择	
Table 1	Selection of	controlled proces	s parameters

可控因素	1水平	2水平	3水平	
A:切削速度 v _c /(m•min ⁻¹)	125	188	251	
B:进给速度f/(mm•s ⁻¹)	80	100	120	
C:切削深度 a _p /mm	2	3	4	
D:切削宽度 a _e /mm	6	8	10	

—————————————————————————————————————	表 2	误差因素选择
---------------------------------------	-----	--------

Table 2Noise factors and variation ranges

		8
噪声因素	1水平	2水平
N:位置	顶部	底部

本次试验测量壁厚尺寸分为两个部分,分别是 同一个壁厚特征的顶部和底部壁厚尺寸,安排这两 个测量位置为本次试验的噪声因素加以调节,得到 对冷冻砂型随加工深度增加而尺寸可以维持稳定、 保持高精度切削的工艺参数。每组砂型加工面测 量点位置如图 3(a)所示,每个位置在壁长方向取 5 点测量壁厚尺寸,取平均值进行 SNR分析。加工 后砂块如图 3(b)所示。



(a) Sampling point locations



(b) Sand test coupon dimensions 图 3 测量示意图 Fig.3 Sand mold measurement points

通过稳健参数设计,研究切削工艺参数(切削 速度、进给速度、切削深度和切削宽度)对冷冻砂型 壁厚在不同深度下的尺寸精度影响规律,通过最大 化SNR的方式有效地减小数控加工尺寸精度的波 动、大幅提高系统的稳健性,达到最小化与目标尺 寸值的偏差且去除噪声影响的目的,优化出稳健的 切削工艺参数组合,使后续的数控加工排砂试验不 受切削参数的影响。

1.2.2 冷冻砂型数控加工排砂正交试验设计

开展冷冻砂型型腔铣削加工气动辅助排砂正 交试验,对流量q、靶距d、俯角a和喷嘴口径 φ 这4 个因素进行分析,设计不同型腔深度(H=20 mm、 H=25 mm、H=30 mm)和不同型腔长宽比 (L:W=2:1、L:W=4:1)的数控加工模型,开展型 腔三维尺寸对排砂试验的影响研究。铣削的型腔 为矩形腔,原始尺寸为114 mm×57 mm×20 mm, 对应长宽比为2:1,深度为20 mm的工况,所述型 腔长宽比为4:1时,型腔长度为160 mm,宽度为 40 mm,如图4所示。



图 4 正交试验尺寸示意图 Fig.4 Orthogonal test key dimensions

选取的流量范围为10~30 L/min,喷嘴口径 2~4 mm,靶距45~75 mm,考虑到实际铣削是动 态加工过程,喷嘴俯角过大会导致射流路径与工件 表面产生干涉,因此喷嘴俯角范围为55°~75°,排 砂工艺参数如表3所示。

	表3 工艺参数的正交因素水平	
Table 3	Orthogonal factor levels of process parameter	er

水亚	流量 $q/$	靶距 d/	俯角α/	口径 $\varphi/$
小十	$(L \cdot min^{-1})$	mm	(°)	mm
1	10(A1)	45(B1)	55(C1)	2(D1)
2	20(A2)	60(B2)	65(C2)	3(D2)
3	30(A3)	75(B3)	75(C3)	4(D3)

本试验的目的在于根据排砂气流场分析确定 排砂工艺参数影响冷冻砂型切削加工排砂性能,排 砂工艺参数(流量q、靶距d、俯角a、口径 φ)4个因 素取3个水平,因此可选用正交表L₉(3⁴),如表4 所示。

表4 正交试验方案 Table 4 Orthogonal test lavou

	Table 4	Orthogonal	lest layout	
序号	q	d	α	φ
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C3	D2
3	A1	В3	C2	D4
4	A2	B1	C3	D4
5	A2	B2	C2	D1
6	A2	В3	C1	D2
7	A3	B1	C2	D2
8	A3	B2	C1	D4
9	A3	В3	С3	D1

2 冷冻砂型试验结果

2.1 冷冻砂型数控加工稳健性分析

2.1.1 含水量和目数对砂型力学性能的影响

冷冻砂型抗压强度用试样为圆柱形标准试样, 抗拉强度为"8"字形标准试样,具体尺寸与制备测 试方法参照标准《铸造用砂及混料试验方法》的规定基准执行^[18],开展冷冻砂型力学性能相关试验研究。

首先研究含水量(质量分数)分别为3%、4%、 5%、6%和7%的情况下,与70/140目铸造用硅砂 混合,在-40℃的冷冻温度下制得的冷冻砂型抗 拉强度和抗压强度变化规律。如图5(a)所示,随 着质量分数的增加,冷冻砂型的抗拉强度和抗压强 度均上升。这是由于冷冻砂型的力学强度主要取 决于冰晶与砂粒之间的界面粘接力^[19],含水量的 提高显著增加了型砂颗粒之间的冰晶粘接桥数量, 从而提高冰晶与砂颗粒之间的有效冷冻粘接界面 面积,因此冷冻砂型可承受较大的拉伸与压缩 损伤。

开展了不同目数的硅砂在固定含水量下的抗 拉性能和抗压性能测试,型砂颗粒的目数含40/ 70目、50/100目、70/140目、100/200目和140/260目 5种,含水量(质量分数)固定为4%,冷冻温度为 -40℃。如图5(b)所示,研究发现随着铸造用砂 目数的增大(即砂粒平均粒径的减小),冷冻砂型抗 拉强度和抗压强度均上升。大目数硅砂间的小尺 寸水膜比例较高,相应冷冻砂型试样中的总水膜面 积较大,原砂的目数越大,冷冻砂型具有越多的冰 晶粘接桥,因此目数大的硅砂比目数小的硅砂表现 出更高的宏观力学强度^[20]。综上所述,在满足铸



图5 砂型力学性能强度测试



造用砂型力学性能条件下优选出砂坯造型参数为: 含水量(质量分数)4%,铸造原砂70/140目硅砂, 冷冻温度-40℃。

2.1.2 切削工艺参数对砂型加工精度波动的 影响

本次试验采用静态特征方法,针对壁厚为 30 mm的砂型结构,用参数设计来确定可控因素的 优化组合,以便减少实际加工尺寸围绕目标尺寸 (30 mm)的波动,将实际加工尺寸的均值尽可能调 整到目标值。根据1.2.1节稳健参数设计进行相关 试验,获得9组SNR如表5所示。

表 5 试验结果分析表 Table 5 Analysis of test results

试验 编号	A: 切削速度/ (m•min ⁻¹)	B: 进给速度/- (mm•s ⁻¹)	C: 切削深度/ mm	D: 切削宽度/ mm	信噪比/ dB
1	1	1	1	1	49.340
2	1	2	3	2	49.546
3	1	3	2	3	49.656
4	2	1	3	3	49.480
5	2	2	2	1	49.344
6	2	3	1	2	49.424
7	3	1	2	2	49.382
8	3	2	1	3	49.380
9	3	3	3	1	49.474

试验围绕壁厚尺寸的波动展开,且波动越小越 好,因此壁厚尺寸是属于望目特性,通过计算望目 特性的 SNR,对可控因素的 SNR 极差进行分析, 试验选择可控因子的水平组合来降低冷冻砂型切 削尺寸精度对噪声因子变化的敏感性,从而减少试 验结果的波动。试验结果如图 6 所示,研究发现对 波动影响最大的是主轴转速,其次是切削深度,再 次是进给速度,切削宽度的影响最小。取 A2B3C2D2以使 SNR最大,即切削速度 188 m/min (主轴转速 6 000 r/min,刀具直径 10 mm),进给速 度 120 mm/s,铣削深度 3 mm,切削宽度 8 mm,得 到砂型数控加工尺寸波动最小的切削工艺组合。 经测量,使用该组切削工艺参数得到的尺寸精度达 到 \pm 0.5 mm,满足对冷冻砂型加工精度不大于 \pm 1 mm的指标要求。

2.2 冷冻砂型排砂试验结果分析

2.2.1 流量对冷冻砂型数控加工排砂率的影响

图 7 为冷冻砂型型腔长宽比分别为 2:1 和 4:1 条件下,切削不同型腔深度时排砂率随流量的变化 趋势图。由图 7 可看出,对两种长宽比的型腔进行 切削排砂测试时,型腔深度越大,对应的排砂效果



Fig.6 Main effect plot for robust parameter design

越差。如图7(a)所示,在本试验研究的流量范围 内,随着流量的增大,排砂率呈近似线性增加。分 析其原因:基于气力输送原理,本试验是使用相对 大量的排砂介质(低温压缩空气)来输送相对少量 的砂型材料(砂粒),属于稀相正压排砂的输送方 式,实质上是利用高速气流喷射到颗粒附近,将气 流的能量(速度和压力)转化为砂粒的动能,推动固 体颗粒移动^[21-22]。射流的流量越大,排砂气流的能 量越大,气流对砂粒的作用力越大,越有利于将砂 粒吹送出型腔,因此在不破坏冷冻砂型结构的基础 上,大流量射流的排砂率更加优良稳定。在图 7(b)中也呈现出相同的规律,说明型腔的长宽比不 会显著改变上述流量对排砂效果的影响机制。

如图 8 所示,在型腔深度为 20 mm 时,型腔长 宽比的变化对排砂率的影响较大,如图 8(a)所示, 相同流量下,增大长宽比,造成的排砂率下降幅度





Fig.7 Effect of flow rate on sand removal rate under two cavity aspect ratios

最大可达7.8%。在图8(b)和图8(c)中,排砂率随 长宽比的改变,出现的波动较小,波动最大分别为 1.5%和2.0%。对比图8(a)和图8(c),由型腔深度 造成的排砂率下降幅度最大可达30.7%(q=10 L/ min)。分析其原因,在本试验的模型设计中,长宽 比变化带来的型腔体积变化很小,在相同深度下, 长宽比为4:1的型腔体积比长宽比为2:1的型腔 体积仅差1.5%,这正与型腔深度为25和30mm下 排砂率随长宽比的最大波动大致相同,这说明与型 腔深度改变造成的型腔三维体积变化相比,长宽比 所决定的型腔二维形状变化对排砂率的影响很小, 而砂型加工理论应切除的体积越大,实际的排砂效 果越差。在小流量的情况下(g=10 L/min),型腔 的三维尺寸对排砂率的影响较大,深度及长宽比变 化带来的差距分别可达30.7%和7.8%;当流量为 30 L/min时,无论长宽比的增大还是深度的增加, 排砂率始终保持在99%左右,进一步说明在不影





响砂型强度的基础上,流量越大,排砂介质输送砂 粒的效果越好。

2.2.2 靶距对冷冻砂型数控加工排砂率的影响

图 9 为冷冻砂型型腔长宽比分别为 2:1 和 4:1 条件下,切削不同型腔深度时排砂率随流量的变化 趋势图。由图9(a)可看出,对两种长宽比的型腔 进行切削排砂测试中,深型腔的排砂率均小于浅型 腔的排砂率,此外,型腔深度为20mm下的排砂率 随靶距增加线性减小,深度为25mm及30mm的 型腔排砂率随靶距增加,下降速率加快。分析其原 因,一方面,靶距增加,环绕阵列式射流汇合处与型 腔底面的距离也增加,射流的速度进一步衰减,那 么作用于砂粒上的风力减弱,导致排砂率下降;另 一方面,随着型腔深度的增加,射流进入型腔的路 径增长,射流沿程速度衰减增多,两方面原因的叠 加导致型腔越深,随靶距增加排砂率下降幅度越 大^[23]。从图 9(b)可看出相同的趋势,说明型腔的 长宽比变化不会显著改变上述靶距对排砂效果的 影响机制。





Fig.9 Effect of stand-off distance on sand removal rate under two aspect ratios

图 10为3种型腔深度下,不同长宽比的排砂率 对比柱状图。如图 10(a)所示,在靶距为 75 mm 时,长宽比带来的排砂率差异最大,长宽比4:1的 排砂率比长宽比为 2:1的排砂率小 3.7%,在图 10(b)和图10(c)中,由长宽比引起的差异更小,多 处于2%以下,这说明靶距受型腔长宽比的影响较 小。对比图9,在靶距75mm时排砂率随深度下降 最大,下降幅度为19.5%。相比而言,靶距受型腔 三维尺寸的影响最低。分析其原因,流量与口径若 发生改变,将直接改变射流的流速,从而影响气力 输送相关;同样,俯角的变化也直接改变了环绕阵 列式射流的汇合位置和汇流后的速度。然而靶距 在45~75mm范围内变化时,既不改变射流的出口 速度,也对3束射流汇流后的速度影响很弱,仅改 变了射流汇聚区距离型腔底面的距离,因此改变靶 距对排砂射流的速度、汇聚和沿程损耗均影响较 弱,在排砂射流工艺4参数中,靶距受型腔三维尺 寸的影响最低。





2.2.3 俯角对冷冻砂型数控加工排砂率的影响

图 11 为冷冻砂型型腔长宽比分别为 2:1 和 4: 1条件下,切削不同型腔深度时排砂率随流量的变





Fig.11 Effect of inclination angle on sand removal rate at varying cavity depths

化趋势图。由图 11 可看出,型腔深度为 20 mm 时, 随着俯角的增加,排砂率先增大后减小;增加型腔 深度,俯角与排砂率的关系改变,排砂率与俯角呈 负相关的变化规律。在图 11(a)和图 11(b)中,可 明显看出俯角 65°的工况,随着型腔高度的增加,对 排砂率的影响逐渐降低,而俯角 55°在型腔深度为 25 mm时成为排砂率最高的水平。分析其原因,在 实际加工过程中,铣削冷冻砂型型腔是一个刀具动 态运动的过程,铣刀由内而外将每层的型腔形状铣 出。在铣刀铣削型腔壁面时,由于刀具是紧贴在型 腔的各直角边上,较大俯角的射流路径被砂型表面 遮挡^[24],至少使其中一束射流无法进入切削区域, 变相削弱了排砂射流的流量。

图 12 为 3 种型腔深度下,不同长宽比的排砂 率对比柱状图。在型腔深度为 20 mm 时长宽比对 排砂率的影响明显,当俯角为 75°时,长宽比造成的 排砂率差距最大,长宽比4:1的排砂率比长宽比为 2:1的排砂率小4.8%,在更深的型腔结构中,长宽 比变化对排砂率的影响转为不显著,各组差距均在 1% 以内,说明俯角受型腔高度方向的尺寸影响 最大。

2.2.4 口径对冷冻砂型数控加工排砂率的影响 图 13为冷冻砂型型腔长宽比分别为2:1和4:





1条件下,切削不同型腔深度时排砂率随流量的变 化趋势图。如图13(a)所示,针对口径对排砂率影 响的研究表明,排砂率随口径的增大先快速下降后 趋于稳定。分析其原因,口径越小,射流出口速度 越大,在流量相同的情况下,砂粒受到气体的冲击 和携带作用显著增强,表现出随着口径的减小,排 砂率的增加幅度逐渐上升的趋势。从图13(b)可 看出相同的趋势,说明型腔的长宽比变化不会显著 改变上述口径对排砂效果的影响机制。

图 14为3种型腔深度下,不同长宽比的排砂率 对比柱状图。如图 14(a)所示,在口径为4 mm 时, 长宽比带来的排砂率差异最大,长宽比4:1的排砂 率比长宽比为2:1的排砂率小4.5%,由图 14(c)可 知,口径4 mm 的排砂率比口径2 mm 的排砂率低 26.5%。分析发现,在大口径的情况下(*q* = 4 mm),型腔的三维尺寸对排砂率的影响较大,深 度及长宽比变化带来的差距分别可达 17.6% 和





Fig.13 Effect of nozzle diameter on sand removal rate at varying cavity depths

4.5%;当口径为2mm时,深度及长宽比变化造成的差距分别降为2.7%和1.4%,且排砂率均维持在较高水平。说明2mm口径射流克服了不同型腔尺寸造成的排砂差异,具有更优良稳定的效果,在不影响砂型强度的基础上,应采用更小的口径,使排砂介质输送砂粒的效果更好。





Fig.14 Effect of nozzle diameter on sand removal rate at three cavity depths

2.3 冷冻砂型正交试验极差分析

通过2.2节的分析可知,型腔的深度对排砂率 的影响较显著,排砂工艺参数对排砂率的影响规律 在两种型腔长宽比(L:W=2:1和L:W=4:1)条 件下,均表现出相同的趋势,因此为进一步研究冷 冻砂型排砂规律,固定型腔长宽比为4:1,开展不 同型腔深度条件下的正交试验极差分析。表6为 型腔深度为20mm时的各因素主效应图,在不同 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。第9组试验的排砂率最高,可达 99.974%,比第2组的最低排砂率(66.259%)高出 50.9%,图15所示为第9组试验仅残留微量浮砂, 不会影响已加工表面质量;第2组试验残留废砂堆 积过多,已严重破坏砂型的可加工性和表面质量。 表 6 中 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,其次分别是喷嘴口 径、俯角和靶距。

各因素的效应曲线如图 16 所示,本组试验条件下最优排砂工艺参数组合为 A3B1C2D1,即在

表6 止父试验极差分析						
Table 6 Range analysis table for the orthogonal test						
编号	流量	靶距	俯角	口径	排砂率/%	
1	A1	B1	C1	D1	86.432	
2	A1	B2	С3	D2	66.259	
3	A1	В3	C2	D4	69.492	
4	A2	B1	С3	D4	80.438	
5	A2	B2	C2	D1	99.396	
6	A2	В3	C1	D2	81.245	
7	A3	B1	C2	D2	99.957	
8	A3	B2	C1	D4	94.442	
9	A3	В3	С3	D1	99.974	
k_1	74.061	88.942	87.373	95.267		
k_{2}	87.027	86.699	89.615	82.487		
k_{3}	98.124	83.570	82.224	81.457		
R	24.063	5.372	7.391	13.810		







流量为30L/min、靶距为45mm、俯角为65°、口径为2mm条件下进行切削加工,冷冻砂型的排砂效 果最好。

由2.2节的分析可知,俯角等排砂工艺参数受 砂型型腔三维尺寸影响较大,因此有必要对比研究 不同深度的型腔正交试验极差结果,分析各因素的 影响趋势变化。型腔长宽比为4:1下,型腔深度分 别为25mm与30mm条件下的正交试验极差分析 各因素效应曲线分别如图17和图18所示。由图可 看出,不同射流排砂工艺参数下冷冻砂型数控加工 排砂效果的变化范围很大。在图 17 与图 18 的型腔 深度情况下各排砂因素对排砂率的影响趋势基本 一致,同时在相同的排砂因素条件下,深度越大,对 应试验组的排砂率越低。其中,与型腔深度为 20 mm 时最大不同的情况是,试验的极差大小为 $R_{\rm A} > R_{\rm D} > R_{\rm B} > R_{\rm C}$,因此流量的变化依旧是冷冻砂 型切削过程排砂效果的影响最为显著,其次是喷嘴 口径,而后分别为靶距和俯角。型腔深度分别为 25 与 30 mm 条件下最优排砂工艺参数组合为 A3B1C2D1,即在流量为30L/min、靶距为45mm、



Fig.17 Main effect plots of process parameters at a cavity depth of 25 mm



Fig.18 Main effect plots of process parameters at a cavity depth of 30 mm

俯角为55°、口径为2mm条件下进行切削加工,冷 冻砂型的排砂效果最好。

2.4 冷冻砂型排砂工艺加工验证

2.4.1 基于造型参数的排砂试验验证

基于 2.1.1 节研究的满足铸造用冷冻砂型力学 性能的砂型含水量和目数范围,为进一步探明优选 的排砂工艺参数对不同目数和不同含水量下冷冻 砂型数控加工排砂率的影响规律,首先开展含水量 (质量分数)分别为 3%、4%、5%、6% 和 7% 的情况 下,使用 70/140 目铸造用硅砂制得的冷冻砂型,砂 型型腔三维尺寸为 114 mm×57 mm×20 mm,在 流量为 30 L/min、靶距为 45 mm、俯角为 65°、口径 为 2 mm条件下排砂率的变化规律。如图 19(a)所 示,随着砂型含水量的增加,两种长宽比的砂型型 腔结构内的排砂率均下降。这是由于含水量的提 高,切削产生的废砂携带的冰晶粘接桥数量和面积 均增大,从而提高了废砂间的冻结粘接面面积,因 此含水量越大的砂型排砂率越低。

开展不同目数的冷冻砂型在流量为 30 L/ min、靶距为45mm、俯角为65°、口径为2mm条件 下排砂率的变化规律。型砂目数分别为40/70、 50/100、70/140、100/200和140/260目,含水量(质 量分数)固定为4%。如图19(b)所示,随着目数增 大,砂粒的平均粒径减小,较小的砂粒更易被排砂 射流所裹挟从而排出型腔区域,因此排砂率随目数 增大而逐渐增大;当目数为140/260目时,小粒径 (<100 µm)的砂粒粉尘增多,硅砂间的小尺寸水 膜比例较高,相应冷冻废砂间的粘接更为严重,因 此排砂率略有下降。2.1.1节基于砂型力学性能要 求优选出的冷冻砂型造型硅砂目数为70/140目, 含水量(质量分数)为4%,对比发现在该目数下, 不同长宽比下的砂型型腔排砂率均处于最高水平: 同时含水量(质量分数)为3%的排砂率虽略高于 含水量(质量分数)4%的排砂率,但对应的砂型力 学性能不符合铸造用冷冻砂型的要求。综上所述, 经过对比验证,在联合满足铸造用砂型的力学性能 和排砂效果的条件下,优选出砂坯造型参数为:含 水量(质量分数)4%,铸造原砂70/140目硅砂。



Fig.19 Sand removal performance test for frozen sand molds

2.4.2 数控加工排砂工艺验证

选取满足铸造和切削要求的砂型配方制备冷 冻砂型,在验证试验中使用的型砂材料为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24h制得待切削砂 坯。基于2.1.2节的研究选取数控加工的稳健切削 工艺参数为切削速度188 m/min(即主轴转速 6000 r/min,刀具直径10 mm),进给速度120 mm/s, 铣削深度3 mm,切削宽度8 mm。基于2.2节与2.3 节的研究,针对型腔深度为20 mm时选择排砂工 艺参数中流量为30 L/min、靶距为45 mm、俯角为 65°和口径为2 mm开展冷冻砂型矩形型腔数控加 工精确排砂试验验证,通过逆向建模生成加工后的 砂型模型,测得排砂率为99.99%,得到优良的排砂 效果,如图20所示,排砂试验分析结果可为后续冷



图 20 冷冻砂型矩形型腔工艺验证

Fig.20 Process validation of frozen sand molds with rectangular cavities

冻砂型数控加工装置设计和方案优化提供试验 基础。

3 结 论

聚焦冷冻砂型在数控加工中的尺寸稳定性和 排砂效果,通过砂型力学试验与稳健性尺寸参数试 验、排砂工艺参数正交试验以及实际切削排砂工艺 验证,全方位探究了冷冻砂型的加工质量与排砂工 艺优化的可行性。本文旨在优化排砂工艺参数、验 证实际排砂效果,从而为冷冻砂型数控加工的发展 提供科学的工艺参数支撑。

(1)通过对不同目数和含水率冷冻砂坯的力学 性能进行测试,使用含水量(质量分数)为4%,硅 砂目数为70/140目(100目)在-40℃下制得冷冻 砂坯符合铸造砂型力学性能和排砂要求。

(2)通过稳健性参数试验,优选一组抗干扰性 强、稳健性高的切削工艺参数组合为:切削速度 188 m/min,进给速度120 mm/s,铣削深度3 mm, 切削宽度8 mm。优选结果对砂型数控加工尺寸精 度影响最小,为后续排砂工艺的试验提供了必要的 基础数据。

(3)分析发现型腔三维尺寸中深度对排砂率的 影响最大,长宽比对排砂率的影响相对较小,其中 俯角受型腔三维尺寸的影响最大。揭示了流量、靶 距、俯角和口径对排砂率的影响规律,并对比研究 各工艺参数对排砂效果的影响程度。型腔深度为 20 mm时,优选的工艺参数组合为流量 30 L/min、 靶距45 mm、俯角 65°和口径2 mm;增大型腔深度, 优选的工艺参数组合中仅俯角变为55°。

(4)通过优化砂型造型参数、切削工艺参数和 排砂工艺参数,形成冷冻砂型数控加工排砂工艺参 数窗口。结果显示,优化后的试验排砂率可达 99.99%,可实现冷冻砂型数控加工过程的高精高 效排砂。

参考文献:

- BEELEY P. Foundry technology[M]. Holland: Elsevier, 2001.
- [2] 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.
- [3] KRISHNARAJ R, TESFAYE L, NAGAPRASAD N, et al. Investigation on pollution control device (PCD) in iron foundry industry to reduce environmental chemicals[J]. PLoS One, 2022, 17(7): e0271032.
- [4] ZHU Kunpeng, ZHANG Yu. A cyber-physical production system framework of smart CNC machining

monitoring system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(6): 2579-2586.

- [5] YANG Haoqin, SHAN Zhongde, WANG Yifei, et al. Simulation of temperature field of A356 aluminum alloy in freeze casting[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1600(1): 012045.
- [6] GONG Xiaolong, LIU Fuchu, HU Shengli, et al. Reclamation of clay-resin mixed waste sand by a hot waste alkali liquor soaking assisted with scrubbing method[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15: 566-575.
- [7] RODRÍGUEZ A, CALLEJA A, OLVERA D, et al. Sand moulds milling for one-of-a-kind pieces[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1431(1): 479-485.
- [8] ZHAO Guoqiang, WU Yingying, ZHANG Meitao. Research on sand blank preparation and sand mold NC precision milling technology[J]. Ferroelectrics, 2023, 608(1): 63-72.
- [9] MA L. Wear mechanisms of the coated cemented carbide tools in NC milling resin sand molds[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 10: 127.
- [10] LACALLE D L N L, RODRÍGUEZ A, LAMIKIZ A, et al. Milling of sand blocks to make casting moulds
 [J]. AIP Conference Proceedings, 2011, 1315(1): 1065.
- [11] ZHAO Guoqiang, WU Yingying, ZHANG Meitao. Research on sand blank preparation and sand mold NC precision milling technology[J]. Ferroelectrics, 2023, 608(1): 63-72.
- [12] 张国磊,单忠德,刘丰,等.铣削成形参数对冷冻砂型铣削力的影响[J].铸造技术,2023,44(7): 665-670.
 ZHANG Guolei, SHAN Zhongde, LIU Feng, et al. Effect of milling parameters on milling force in frozen sand molds[J]. Foundry Technology, 2023, 44(7): 665-670.
- [13] 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 machiningsand mold with hollow end mill for patternless casting[J]. Foundry, 2016, 65(1): 18-21.

[14] 李杰.数字化无模铸造精密成形机排砂系统研究[D].北京:机械科学研究总院,2013.

LI Jie. Research on waste sand cleaning systemof digital precision forming machine without pattern casting [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2013.

- [15] 刘飞,刘培基,单忠德,等.绿色制造总论[M].北京:机械工业出版社,2021.
 LIU Fei, LIU Peiji, SHAN Zhongde, et al. Green manufacturing general[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [16] 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.
- [17] GOETHALS P, CHO B. Designing the optimal process mean vector for mixed multiple quality characteristics[J]. IIE Transactions, 2012, 44(11): 1002-1021.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国 国家标准化管理委员会.铸造用砂及混合料试验方 法:GB/T 2684—2009[S].北京:中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for foundry sands and molding mixtures: GB/T 2684—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

- [19] CIVAN F. Unfrozen water in freezing and thawing soils: Kinetics and correlation[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14(3): 146-156.
- [20] SHAN Zhongde, YANG Haoqin, LIU Feng, et al. Performance of digital patternless freeze-casting sand mould[J]. China Foundry, 2020, 17(4): 308-313.
- [21] CLARK B, BIERHAUS E, HARRIS J, et al. TAGSAM: A gas-driven system for collecting samples from solar system bodies[C]//Proceedings of Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-8.
- [22] AGARWAL A T. Theory and design of dilute phase pneumatic conveying systems[J]. Powder Handling &. Processing, 2005, 17(1): 18-19.
- [23] DUAN Zhenjing, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Milling surface roughness for 7050 aluminum alloy cavity influenced by nozzle position of nanofluid minimum quantity lubrication[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(6): 33-53.
- [24] 吴喜峰,静电雾化微量润滑供给系统研发与铣削性 能实验研究[D].青岛:青岛理工大学,2022.
 WU Xifeng. Development of electrostatic atomization MQL supply system and experimental research on milling performance[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.