

# 机械制造工艺

2021年10月14日出版

2021年第3期·总第237期

编印单位：中国机械制造工艺协会

发送对象：中国机械制造工艺协会会员单位

印刷单位：北京北印印务有限公司

印 数：2000册

出 版：中国机械制造工艺协会

网 站：www.cammt.org.cn

电 话：010-88301523

传 真：010-88301523

邮 件：cammt\_bjb@163.com

## 《机械制造工艺》编委会

主任委员：王西峰

名誉主编：卢秉恒

副主任委员：单忠德 祝宪民

主 编：单忠德

责任编辑：赵关红

## 委员（按姓氏笔画排序）

王至尧 王绍川 龙友松 史苏存 刘泽林  
李成刚 李敏贤 李维谦 杨 彬 杨尔庄  
谷九如 张 科 张伯明 张金明 邵泽林  
战 丽 费书国 聂玉珍

## 中国机械制造工艺协会第六届理事会

名誉理事长：卢秉恒

理 事 长：单忠德

副 理 事 长：（按姓氏笔画排序）

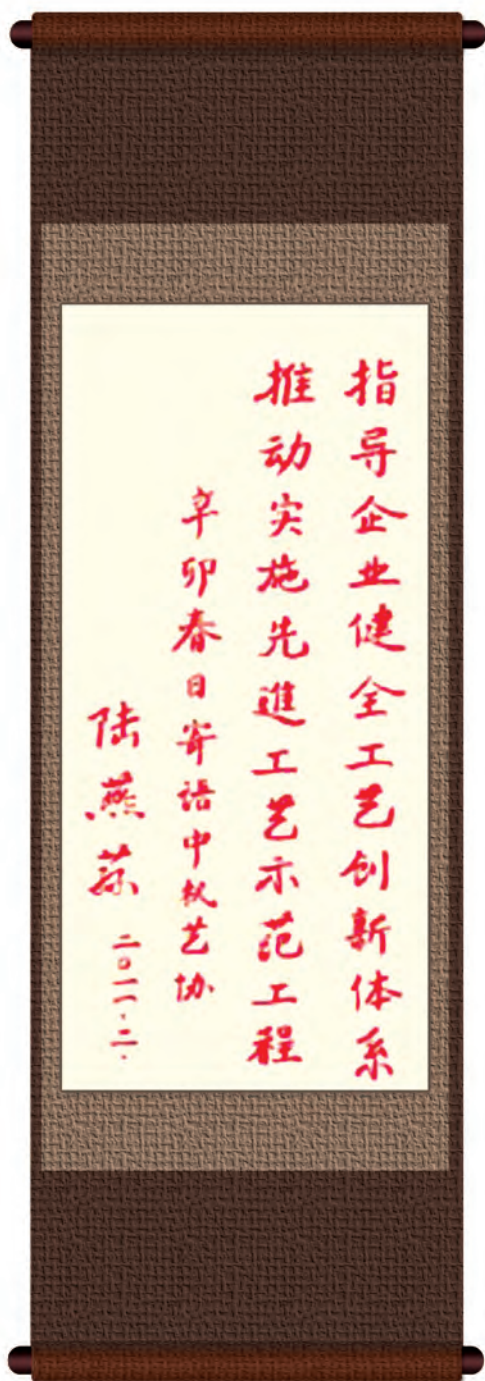
王建军 左健民 史苏存 孙海涛

严建文 李永革 李建军 毕文权

汪瑞军 张 科 陈宏志 钟明生

高俊峰 梁清延 曾艳丽

秘 书 长：战 丽



## 技术前沿

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 冷冻砂型高精高效制备过程研究····· | P01 |
|---------------------|-----|

## 协会动态

|  |     |
|--|-----|
| 我会承办复合材料技术与装备发展国际工程科技战略高端论坛·····       | P06 |
| 2021年第十五届机械工业节能减排工艺技术研讨会在山东威海隆重召开····· | P08 |
| 中国机械制造工艺协会召开党支部成立大会·····               | P09 |
| 我会推荐的三项专利喜获第二十二届中国专利奖奖项·····           | P10 |

## 政策法规

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 国务院办公厅关于改革完善中央财政科研经费管理的若干意见····· | P11 |
| 国务院办公厅关于完善科技成果评价机制的指导意见·····     | P14 |
| 国资委“剧透”改革重点组建战略性新兴产业新央企·····     | P17 |

## 行业动态

|   |     |
|---|-----|
| 平稳运行压力渐显 全年增长信心依然——2021年上半年机械工业经济运行情况 ····· | P18 |
| 《机械工业“十四五”发展纲要》解读之二：全面提升自主创新能力·····         | P21 |
| 刀具的数字化制造与解决方案·····                          | P24 |
| 立足新定位，经贸大国如何加快迈向经贸强国？·····                  | P25 |

## 会员传真

|       |     |
|-------|-----|
| ····· | P26 |
|-------|-----|

## 工艺创新

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 气流场对金属熔融雾化直写成形工艺影响规律研究····· | P31 |
| 一种环氧树脂快速固化工艺的研究·····        | P37 |

## 协会通知

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 关于缴纳2021年度会费的通知·····        | P42 |
| 关于征集2021年团体标准立项计划的通知·····   | P42 |
| 关于召开2021年全国机电企业工艺年会的通知····· | 封三  |

# 冷冻砂型高精高效制备过程研究

杨浩秦<sup>1,3</sup> 单忠德<sup>1,3</sup> 刘丰<sup>2,3</sup> 王怡飞<sup>2,3</sup>

1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016

2. 机械科学研究总院集团有限公司, 北京, 100044

3. 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京, 100083

**摘要:** 对采用数字化无模铸造精密成形技术制备铸造用冷冻砂型的高精高效成形过程进行了研究, 基于砂型尺寸精度控制和局部瞬态热场分析对冷冻砂型的切削加工参数进行联合约束, 优化得到适于冷冻砂型加工制造过程的工艺参数, 在切削刀具进给速度100mm/s、主轴转速4000r/min、切削深度4mm、切削宽度12.8mm条件下, 通过数字化无模成形技术制备出的冷冻砂型尺寸精度较高, 冷冻砂型切削区域局部瞬态温度较低, 该切削参数适用于冷冻砂型的长时稳定低温制备加工过程, 可实现冷冻砂型的高精高效制造。

**关键词:** 无模成形; 绿色铸造; 瞬态温度; 低温制备

## 1 引言

冷冻砂型的高精高效制备过程是通过数字化无模冷冻铸造成形技术实现的, 该技术基于砂型三维CAD模型驱动, 采用数控加工去除成形原理直接对冷冻砂型进行数字化切削加工, 省去了实体原型或模具制造环节, 避免了制模/翻模过程造成的砂型精度损失现象, 缩短铸造流程, 实现了单件、小批量、复杂金属件的快速制造<sup>[1-3]</sup>。

冷冻砂型的制备技术采用水做黏结剂, 各种型砂颗粒(硅砂、锆英砂等)作为耐火骨料。混有适量水分的型砂颗粒在低温环境下冻结制备冷冻砂坯后, 通过基于切削成形原理的数字化无模铸造成形技术实现冷冻砂型的快速成形, 浇注获得合格铸件<sup>[4]</sup>。在传统铸造行业中, 木模/金属模翻模制

备铸型制造周期长、尺寸精度低、污染排放大, 难以满足航空航天、国防军工等复杂薄壁、高端铸件的快速响应需求<sup>[5]</sup>。同时铸造企业在砂型造型和制芯环节普遍采用黏土黏结剂、酚醛树脂、呋喃树脂和水玻璃黏结剂等作为砂型铸造用黏结剂。这类黏结剂的使用严重影响铸造车间的空气质量, 且废砂后续处理过程, 亟需铸造技术的数字化和绿色化变革<sup>[6]</sup>。本课题组创新性地提出数字化无模冷冻铸造成形技术, 该技术具有绿色化、数字化、精密化、柔性化和快速制造的特点, 促进了铸造行业的绿色转型升级<sup>[7-9]</sup>。数字化无模冷冻铸造成形技术是一种新型的绿色铸造技术, 浇注时冷冻砂型中的水分可以迅速蒸发, 并能在金属液凝固之前迅速逸出, 不易产生气孔等铸造缺陷, 浇注后冷冻砂型自行

溃散, 落砂非常简单。同时, 冷冻铸造铝合金轮毂件尺寸精度可达CT8级, 冷冻铸造试样抗拉强度较树脂砂型铸造提高约11.2%, 断裂延伸率提高约26%<sup>[10]</sup>。

冷冻砂型的切削加工工艺参数对其尺寸精度和局域瞬态热场的影响至关重要, 同时局域瞬态热场的精准调控是冷冻砂型长时、低温制备工艺的重要技术。本文通过尺寸精度控制和局部瞬态热场分析对冷冻砂型切削加工工艺参数(包括进给速度、主轴转速、切削深度及切削宽度)进行联合约束, 优化得到适于冷冻砂型的持续低温高精高效加工工艺参数, 实现冷冻砂型的高精高效成形及高、中、低温合金的快速绿色制造, 推动数字化无模冷冻铸造技术从基础研究走向实际应用。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

本次试验所测试的冷冻砂坯是预混质量分数为4%水的100目硅砂颗粒在 $-20^{\circ}\text{C}$ 下冻结后制备的,冷冻砂型的抗拉强度约为1.1MPa,抗压强度约为2.2MPa,图1所示为100目硅砂的粒径分布,粒径呈正态分布,主要集中在 $140\mu\text{m}$ 左右。铣削刀具采用数字化无模铸造精密成形机配套的专用平头铣刀,刀具直径为16mm,悬伸长度为200mm。

### 2.2 试验方法

数字化无模冷冻铸造成形工艺参数的选择显著影响冷冻砂型的成形尺寸精度和加工效率<sup>[11]</sup>。试验过程中,假定各个切削加工工艺参数对冷冻砂型尺寸精度的影响规律相互独立,不存在耦合关系。将制备的冷冻砂坯在不同工艺参数(进给速度在 $40\sim 140\text{mm/s}$ 范围内,主轴转速在 $3000\sim 8000\text{r/min}$ 范围内,切削深度在 $1\sim 6\text{mm}$ 范围内,切削宽度在 $1.6\sim 14.4\text{mm}$ 范围内)下进行切削加工。为了测量冷冻砂型在不同切削加工工艺参数下的尺寸误差,试验中冷冻砂型的尺寸选择为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 20\text{mm}$ 的立方块。将不同切削加工工艺参数下加工的冷冻砂型采用蓝光扫描仪对其表面轮廓进行扫描并与三维模型进行对比,使用Geomagic软件对冷冻砂型的加工误差进行分析,优化出合适的切削加工参数控制范围,图2所示为试验用冷冻砂型精度测试蓝光扫描仪。

在基于尺寸精度优化的冷冻砂型低温制备的切削加工工艺参数控制范围的基础上,采用Flir红外热成像仪对各切削参数下冷冻砂型的局域瞬态热

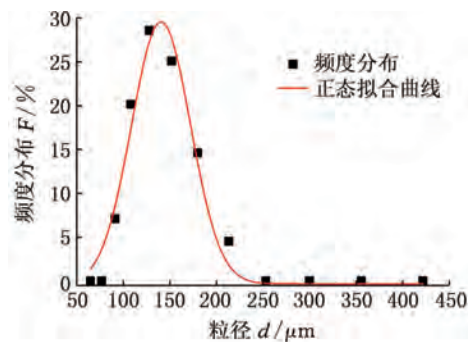


图1 100目硅砂粒径分布曲线

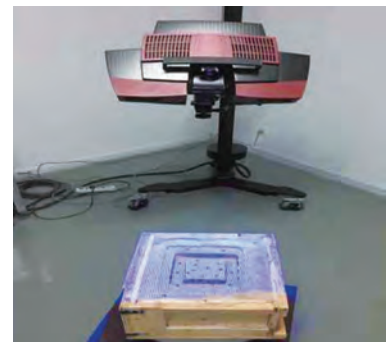


图2 冷冻砂型精度测试蓝光扫描仪

场进行分析,该热成像仪热灵敏度小于 $0.10^{\circ}\text{C}$ ,测温范围为 $-40\sim 650^{\circ}\text{C}$ 。在获得多种切削参数区域瞬态温度的基础上,利用正交试验法获得各参数下区域瞬态热场的温度及切削参数影响显著值。

## 3 试验结果及讨论

### 3.1 切削参数对冷冻砂型尺寸精度的影响

图3所示为不同切削加工工艺参数下冷冻砂型尺寸精度变化规律。冷冻砂型的尺寸精度随着刀具进给速度的变化呈现波浪式变化规律,进给速度过高时,切削过程易产生应力集中从而导致冷冻砂坯出现微裂纹,表现为包裹有多颗型砂颗粒的团状型砂颗粒被切出,精度损失严重,如图3a所示。因此兼顾砂型成形效率和加工尺寸精度的同时,选用铣削刀具最优进给速度为 $100\sim 120\text{mm/s}$ 。当切削刀具主轴转速过大时,刀具切削刃回弹力增大,后刀面对冷冻砂型的挤压速度增大,影响切削稳定性,导致砂型尺寸精度变低<sup>[12]</sup>,如图3b所示,因此选用铣削刀具的最优主轴转速为 $4000\sim 6000\text{r/min}$ 。当切削刀具的切削深度过大时,较大的切削深度导致裂纹扩展到砂型自由表面的速度加快,切削过程中易出现裂纹和崩角现象,

型砂颗粒出现“团聚”的脱离模式,造成冷冻砂型尺寸精度显著下降<sup>[13]</sup>,因此选用铣削刀具的最优切削深度为 $2\sim 4\text{mm}$ ,如图3c所示。当切削宽度大于 $8\text{mm}$ 时,冷冻砂型尺寸精度提高,因此选用铣削刀具的最优切削宽度为 $11.2\sim 14.4\text{mm}$ ,即每次切削宽度约为刀具直径的70%~90%,如图3d所示。

### 3.2 冷冻砂型切削区域瞬态热场分析

冷冻砂型切削过程中产生的切削热导致的切削区域温度显著升高是切削过程中存在的一个重要问题。区别于金属领域切削基体为连续均匀介质的金属,冷冻砂型是多孔介质的离散体系,其切削机理是切削加工过程中,刀具与离散型砂颗粒之间产生相互挤压与碰撞作用,使型砂颗粒获得足够的初始速度和动能,脱离冰晶黏结桥的黏附作用而与周围冷冻砂型分离。因此在冷冻砂型的型砂颗粒与切削刀具接触瞬间,铣削刀具会产生瞬态热量并显著影响冷冻砂型的局部温度场,进而显著影响冷冻砂型的尺寸精度和表面质量,增加刀具的磨损程度并缩短刀具的使用寿命。本文在基于砂型尺寸精度优化出的加工参数的控制范围基础上,通过切削过程中的切削区域瞬态热场分析进一步优化切削参数的变化范围。

本研究采用光热辐射法对多参数

切削过程中的冷冻砂型局部瞬态温度场进行测量。为了揭示不同的进给速度、主轴转速、切削深度和切削宽度对冷冻砂型切削过程瞬态温度场的影响规律，在根据砂型尺寸精度优化出的切削参数取值范围中选用主轴转速分别为4000r/min、5000r/min、6000r/min，进给速度为100mm/s、110mm/s、

120mm/s，切削深度为2mm、3mm、4mm，切削宽度为11.2mm、12.8mm、14.4mm，对冷冻砂型进行加工，并对切削过程局部瞬态温度场进行测量，获得局部瞬态温度。为了减少试验次数，根据测量数据，进行四因素三水平的瞬态热场正交试验分析，表1为L(3<sup>4</sup>)正交因素水平表。

在主轴转速为4000r/min、进给速度为100mm/s、切削深度为4mm、切削宽度为12.8mm条件下进行切削加工，参数对冷冻砂型区域瞬态热场影响最小，冷冻砂型尺寸精度较高。冷冻砂型切削区域热场分析的正交试验结果表明，进给速度的变化对冷冻砂型切削过程局部瞬态热场的影响显著，其次是主轴转速、切削深度和切削宽度。

进给速度对冷冻砂型局部瞬态温度场的影响比较显著。这是因为当铣削刀具沿着型砂颗粒运动时，型砂颗

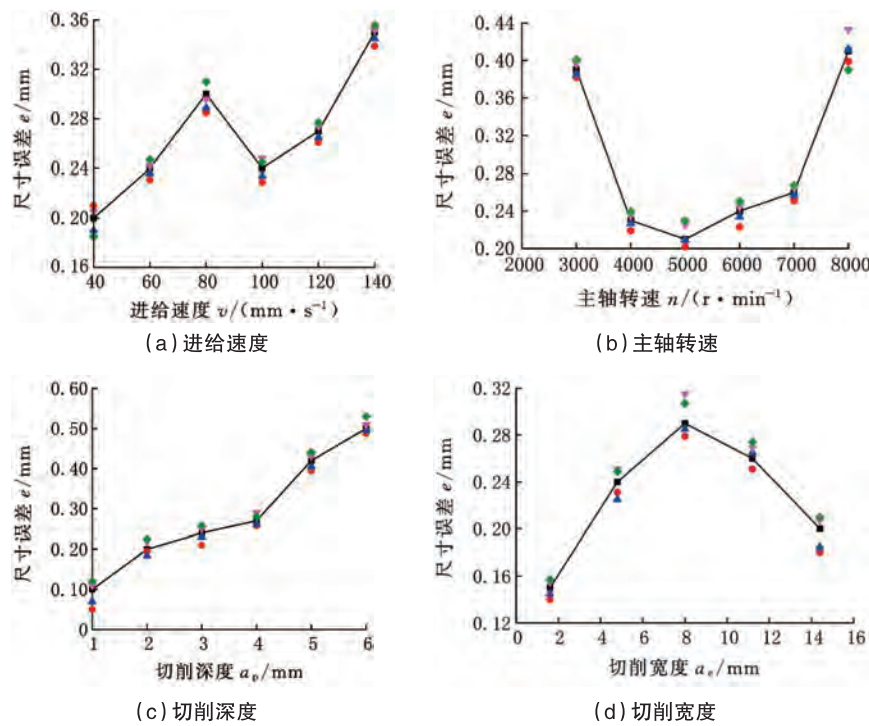


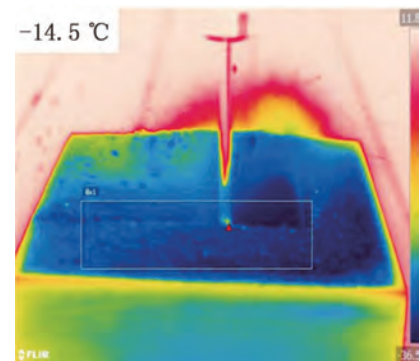
图3 切削参数对冷冻砂型尺寸精度影响

表1 L(34)正交因素水平表

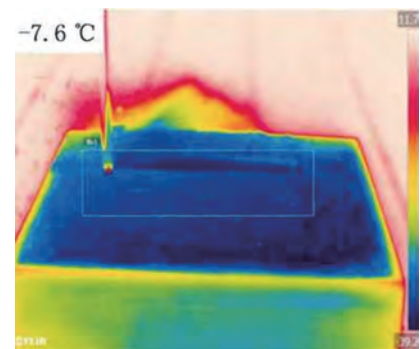
| 序号 | 因素名称         | 水平        |           |           |
|----|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 1  | 进给速度 (mm/s)  | 100 (A1)  | 110 (A2)  | 120 (A3)  |
| 2  | 主轴转速 (r/min) | 4000 (B1) | 5000 (B2) | 6000 (B3) |
| 3  | 切削深度 (mm)    | 2 (C1)    | 3 (C2)    | 4 (C3)    |
| 4  | 切削宽度 (mm)    | 11.2 (D1) | 12.8 (D2) | 14.4 (D3) |

图4所示分别为实测第7组、第9组和第3组(表2)的切削区域局部瞬态温度场，在采集过程中对每个切削参数下进行持续3min左右切削区域的温度场采集，对采集的温度结果进行平均获得该参数下的局部瞬态温度场最终值。表2为L(3<sup>4</sup>)试验结

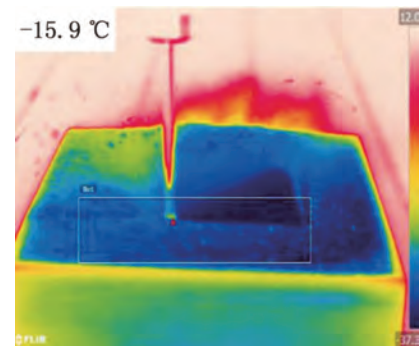
果正交分析表，从中可以看出，不同的切削工艺参数下冷冻砂型局部温度的变化范围很大，最高可达-7.6℃(影响最大)，最低为-16℃(影响最小)。通过9组切削工艺试验温度值的极差分析可知，冷冻砂型切削过程的最优加工工艺参数为A1B1C3D2，即



(a) 第7组试验



(b) 第9组试验



(c) 第3组试验

图4 实测切削区域瞬态温度场