

冷冻砂型数字化铣削成形工艺参数优化研究

张国磊¹, 单忠德^{1, 2}, 刘丽敏¹, 李 征¹, 梁昊天¹, 明 禹¹

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044;

2. 南京航空航天大学, 江苏南京 210016)

摘要: 冷冻砂型使用水做粘结剂, 解决了树脂砂型的污染问题, 实现了绿色铸造, 基于减材原理的数字化铣削技术可实现冷冻砂型的高精高效加工。本文基于响应面试验研究冷冻砂型数字化成形工艺参数对冷冻砂型成形质量的影响规律, 以主轴转速、进给速度、铣削宽度和铣削深度为研究因素, 以尺寸精度和表面粗糙度为响应变量, 拟合响应方程; 通过响应方程求得表面粗糙度优化的参数最优解, 并采用不同的算法 (NSGA-II、NSGA-III和MOEAD) 对冷冻砂型数字化铣削成形尺寸精度进行多目标优化; 以HV和IGD为评价标准。结果表明, 采用MOEAD算法更适用于本研究, HV值为0.324, IGD值为0.2。铣削成形的冷冻砂型表面质量满足浇注要求。

关键词: 冷冻砂型; 铣削参数; 响应面试验; 多目标优化

作者简介:

张国磊 (1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为机械制造及其自动化。E-mail: zhgl123@qq.com

通讯作者:

单忠德, 男, 研究员, 博士, 博士生导师。E-mail: shanzd@cam.com.cn

中图分类号: TG156.91;
TG221

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977 (2023)
05-0514-09

基金项目:

冷冻砂型绿色铸造成形工艺研究 (2021YFB3401202)。

收稿日期:

2022-11-02 收到初稿,
2022-12-27 收到修订稿。

冷冻砂型绿色铸造技术采用水作为粘接剂进行低温冻结成形, 避免了树脂粘结剂的使用, 从根本上解决了树脂砂型造型过程中的污染问题, 冷冻砂型数字化铣削成形是将混有适量水分的湿砂型在低温下冻结成具备一定强度的冷冻砂坯后, 通过数字化精密成形机直接对冷冻砂坯铣削加工获得砂型单元, 再将砂型单元组装获得待浇注砂型的一种快速、高效、绿色的砂型制备方法。

冷冻砂型的成形质量直接决定铸件的精度、表面质量和性能。高质量铸件要求砂型具有良好的尺寸精度和表面质量^[1-3]。冷冻砂型在铣削过程中, 铣削参数不合理会导致崩角、锯齿边、表面凹凸不平现象, 且会导致砂型内部孔隙发展为显微裂纹, 而裂纹扩展又可能会进一步导致塌陷等缺陷^[4-5]。因此, 选取合适的铣削加工工艺参数是制备高精度冷冻砂型的关键。在保证冷冻砂型具备较高强度、硬度和透气性等基础性能的同时, 应探究冷冻砂型铣削过程中的加工工艺参数 (如主轴转速、进给速度、铣削深度和铣削宽度等) 对冷冻砂型的尺寸精度和表面质量的影响规律。

影响冷冻砂型铣削质量的加工工艺参数有主轴转速、进给速度、铣削深度、铣削宽度、刀具直径、刀具悬伸量和机床本身的精度等, 以上参数共同决定了冷冻砂型的尺寸精度和表面质量, 但各参数本身对冷冻砂型的影响机理复杂, 且各参数之间存在耦合作用。为获得高尺寸精度和表面质量的冷冻砂型, 需要明确各铣削参数对冷冻砂型成形质量的影响规律, 分析铣削参数对冷冻砂型成形质量的影响机理并进行铣削工艺参数优化。本文采用Box-Behnken响应面方法^[6], 进行冷冻砂型数字化铣削成形工艺试验设计, 研究了铣削成形工艺参数及其耦合作用对冷冻砂型尺寸精度和表面质量的影响规律。

1 试验制备与方法

主轴转速、进给速度、铣削宽度和铣削深度是影响冷冻砂型成形质量的重要因素^[7]。其中, 砂型的表面质量采用表面粗糙度进行表征。

试验采用的响应面各因素水平见表1,其中铣削宽度取值为刀具直径的百分比,本次试验选用刀具直径为8 mm的圆柱立铣刀,型砂材料选用70/140目普通铸造用烘干硅砂,粘接剂选用纯净水,加入量为5% (质量分数),在-25 °C的环境下制备冷冻砂坯。冷冻砂型铣削成形的砂型多为直壁型腔,在刀具加工平面上的砂型形状由直线形和圆弧形两种路径组成,其中直线形又分为沿机床坐标轴单向直线形和双坐标轴耦合斜线形。选用美国国家航天航空局(NASA)于1996年制定的“通用切削测NAS系列金属切削装备规范”中NAS979试件^[8]进行冷冻砂型铣削成形尺寸精度验证,分别选用砂型样件为方形、圆形和菱形进行冷冻砂型尺寸精度试验。表面粗糙度的测试样件为50 mm × 50 mm × 20 mm的正方块。在1 h的铣削加工过程中刀具与砂型的摩擦产热使得刀具温度升高不超过5 °C,砂型温度升高不超过2 °C^[9]。相较于冷冻砂型铣削成形的环境温度,刀具和砂型的局部温升较小,因此可忽略铣削过程中摩擦产热对冷冻砂型铣削成形精度的影响。

表1 响应面试验因素水平表
Table 1 The factors and levels of response surface experiment

因素	水平		
	-1	0	1
A 主轴转速/(r·min ⁻¹)	4 000	5 000	6 000
B 进给速度/(mm·s ⁻¹)	100	110	120
C 铣削宽度/%	70	80	90
D 铣削深度/mm	2	3	4

冷冻砂型尺寸选用游标卡尺进行测量,表面粗糙度使用奥林巴斯激光共聚焦显微镜测量。对于方形砂型,分别在 x 向和 y 向采集三个测量点尺寸,取三个测量点的平均值。对于圆形砂型,选取三个方向的直径尺寸均值,对于菱形砂型,将方形 x/y 向逆时针旋转45°,视为菱形的 x/y 向;分别在两个方向采集三个测量点尺寸,取三个测量点的平均值。粗糙度的测量表面为正方块的方形侧面,通过激光共聚焦显微镜直接测量冷冻砂型铣削表面的算术平均高度;在正方形面内选取均布的九个点进行粗糙度计算,取九个点的均值作为粗糙度的实测值。将尺寸偏差值作为冷冻砂型尺寸精度响应面试验的响应,将表面粗糙度的实测值作为冷冻砂型表面质量响应面试验的响应。

2 试验结果及分析

根据响应面试验结果,采用Design-Expert软件对试验结果进行回归分析,得到主轴转速、进给速度、

铣削深度和铣削宽度对冷冻砂型成形质量的影响规律。剔除不显著项后的方差分析如表2至表6所示。

响应变量与各因素拟合的二次多项式回归方程见式(1)、式(2)、式(3)、式(4)。

表2 方形砂型尺寸精度回归模型方差分析表
Table 2 ANOVA of regression model for SQ

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.124 1	11	0.011 3	54.42	<0.000 1	重要
A	0.012 0	1	0.012 0	58.05	<0.000 1	
B	0.002 0	1	0.002 0	9.87	0.006 0	
C	0.004 2	1	0.004 2	20.05	0.000 3	
D	0.019 7	1	0.019 7	95.22	<0.000 1	
AD	0.001 2	1	0.001 2	5.91	0.026 4	
BC	0.002 0	1	0.002 0	9.77	0.006 2	
BD	0.002 3	1	0.002 3	11.27	0.003 7	
A ²	0.027 5	1	0.027 5	132.44	<0.000 1	
B ²	0.048 3	1	0.048 3	233.10	<0.000 1	
C ²	0.005 7	1	0.005 7	27.49	<0.000 1	
D ²	0.034 1	1	0.034 1	164.74	<0.000 1	
残差	0.003 5	17	0.000 2			
失拟项	0.002 9	13	0.000 2	1.47	0.3813	不重要
纯误差	0.000 6	4	0.000 2			
总离差	0.127 6	28				
				$R_2=0.972 4$	$R_{Adj}^2=0.954 5$	

表3 圆形砂型尺寸精度回归模型方差分析表
Table 3 ANOVA of regression model for C

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.071 0	11	0.006 5	58.43	<0.000 1	重要
A	0.006 8	1	0.006 8	61.95	<0.000 1	
B	0.002 7	1	0.002 7	24.42	0.000 1	
C	0.002 5	1	0.002 5	22.65	0.000 2	
D	0.030 0	1	0.030 0	271.38	<0.000 1	
AD	0.000 5	1	0.000 5	4.93	0.040 4	
BC	0.002 5	1	0.002 5	22.62	0.000 2	
BD	0.015 2	1	0.015 2	137.60	<0.000 1	
A ²	0.005 7	1	0.005 7	51.64	<0.000 1	
B ²	0.000 8	1	0.000 8	7.54	1	
C ²	0.000 1	1	0.000 1	0.862 2	0.0138	
D ²	0.006 7	1	0.006 7	60.71	0.366 1	
残差	0.001 9	17	0.000 1		<0.000 1	
失拟项	0.001 3	13	0.000 1	0.677 9		重要
纯误差	0.000 6	4	0.000 1		0.734 0	
总离差	0.072 9	28				
				$R_2=0.974 2$	$R_{Adj}^2=957 6$	

表4 菱形砂型尺寸精度回归模型方差分析表
Table 4 ANOVA of regression model for RH

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.121 6	9	0.013 5	25.75	<0.000 1	重要
A	0.063 1	1	0.063 1	120.26	<0.000 1	
B	0.0028	1	0.002 8	5.34	0.032 2	
C	0.002 7	1	0.002 7	5.15	0.035 1	
D	0.005 9	1	0.005 9	11.30	0.003 3	
BC	0.004 4	1	0.004 4	8.47	0.009 0	
BD	0.034 5	1	0.034 5	65.71	<0.000 1	
A ²	0.007 0	1	0.007 0	13.38	0.001 7	
B ²	0.008 3	1	0.008 3	15.86	0.000 8	
C ²	0.010 8	1	0.010 8	20.59	0.000 2	
D ²	0.010 0	19	0.000 5			
残差	0.008 7	15	0.000 6	1.81	0.299 8	
失拟项	0.001 3	4	0.000 3			
纯误差	0.131 5	28				不重要
总离差						
		$R_2=0.924 2$	$R_{Adj}^2=0.888 3$			

表5 表面粗糙度回归模型方差分析表
Table 5 ANOVA of regression model for Sa

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	351.54	10	35.15	18.65	<0.000 1	重要
A	33.33	1	33.33	17.69	0.000 5	
B	38.52	1	38.52	20.44	0.000 3	
C	37.63	1	37.63	19.97	0.000 3	
D	45.05	1	45.05	23.9	0.000 1	
AD	18.06	1	18.06	9.58	0.006 2	
BD	8.27	1	8.27	4.39	0.048 7	
A ²	86.32	1	86.32	45.8	<0.000 1	
B ²	83.39	1	83.39	44.24	<0.000 1	
C ²	38.28	1	38.28	20.31	0.000 3	
D ²	53.3	1	53.3	28.28	<0.000 1	
残差	33.92	18	1.88			
失拟项	27.47	14	1.96	1.22	0.467 4	
纯误差	6.45	4	1.61			不重要
总离差	385.47	28				
		$R_2=0.912 0$	$R_{Adj}^2=863 1$			

$$SQ=11.339 42-0.000 630 \times A-0.163 317 \times B-0.020 811 \times C-0.041 444 \times D-0.000 018 \times A \times D-0.000 225 \times B \times C-0.002 417 \times B \times D+0.000 000 065 055 6 \times A^2+0.000 863 \times B^2+0.000 296 \times C^2+0.072 556 \times D^2 \quad (1)$$

$$C=3.097 39-0.000 464 \times A-0.029 267 \times B-0.017 189 \times C+0.165 33 \times D+0.000 001 6667 \times A \times B+0.000 0025 \times A \times C-0.000 062 \times A \times D+0.000 000 029 666 7 \times A^2+0.000 113 \times B^2+0.000 038 \times C^2+0.032 167 \times D^2 \quad (2)$$

$$RH=7.435 05-0.000 801 \times A-0.060 828 \times B-0.055 789 \times C+0.144 056 \times D-0.003 333 \times B \times D+0.000 000 072 888 9 \times A^2+0.0003 29 \times B^2+0.000 358 \times C^2+0.040 806 \times D^2 \quad (3)$$

$$Sa=719.4-0.031 771 \times A-7.635 83 \times B-3.709 58 \times C+11.175 \times D-0.002 125 \times A \times D-0.143 750 \times B \times D+0.000 003 647 32 \times A^2+0.035 854 \times B^2+0.024 292 \times C^2+2.866 67 \times D^2 \quad (4)$$

从方差分析中可知, 试验结果的P值均小于0.000 1, 说明模型影响均极为显著; 失拟项P值均大于0.05, 均为不显著; 表明试验结果具有统计学意义。 R_2 和 R_{Adj}^2 的值表明回归方程的拟合可信度较高, 能够很好的对冷冻砂型的成形质量进行预测。

图1至图4为单因素对冷冻砂型成形质量的影响规律, 从图中可以看出随着主轴转速的增加各响应的值

先减小后增大, 原因在于随着主轴转速的增加, 主轴旋转过程中的径向同步误差先减小后增大^[10-11]。随着铣削深度的增加, 各响应的值整体呈现增大的趋势, 原因在于随着铣削深度的增加, 底层砂粒在受到挤压断裂后Z向位移被约束而发生犁耕现象导致已加工面砂粒脱落导致误差增大, 同时增大铣削深度还会导致铣削的单齿吃刀量增大, 铣削力增大, 刀具形变增加, 降

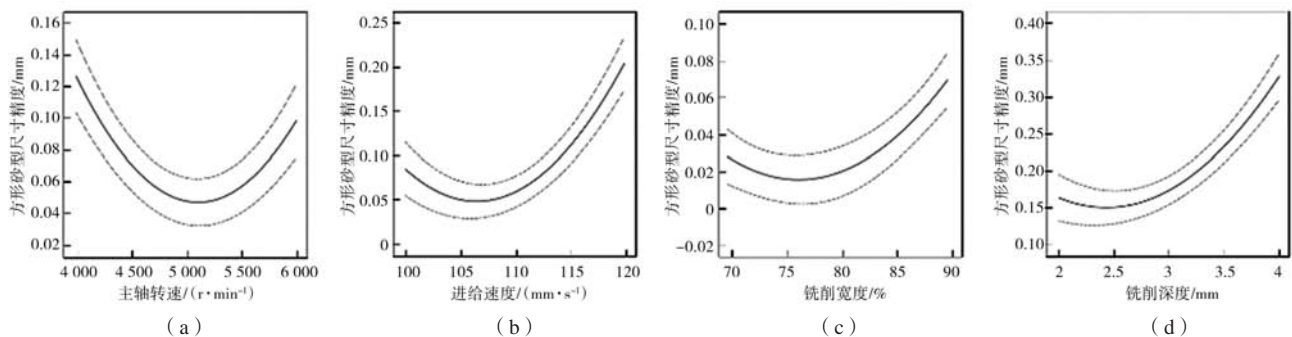


图1 单因素对方形砂型尺寸精度的影响规律

Fig. 1 Influence rule of single factor on SQ

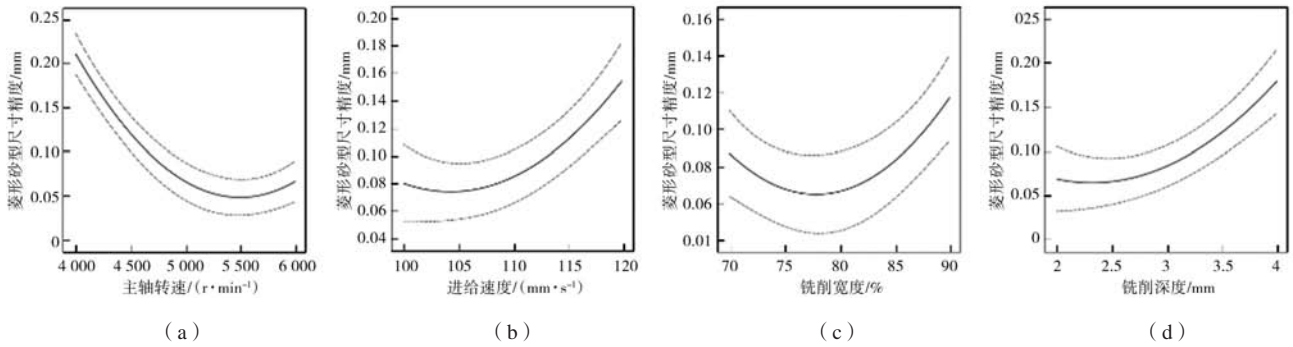


图2 单因素对菱形砂型尺寸精度的影响规律

Fig. 2 Influence rule of single factor on RH

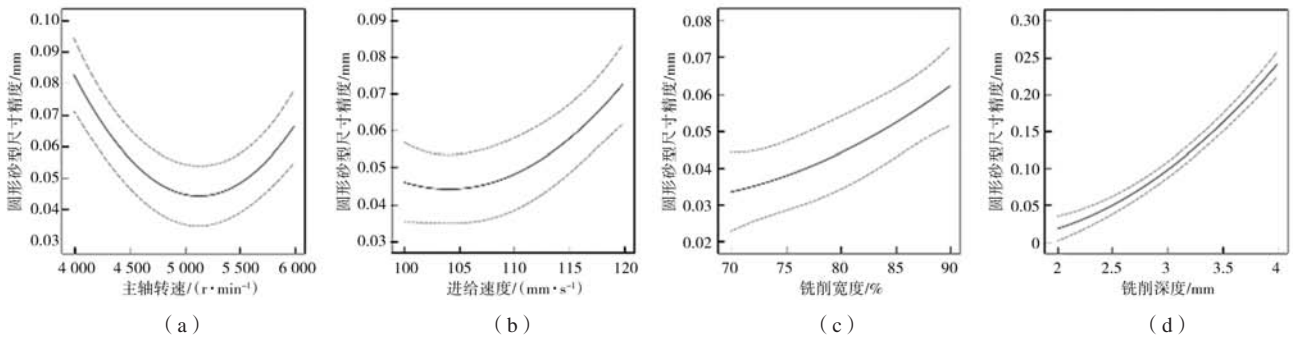


图3 单因素对圆形砂型尺寸精度的影响规律

Fig. 3 Influence rule of single factor on C

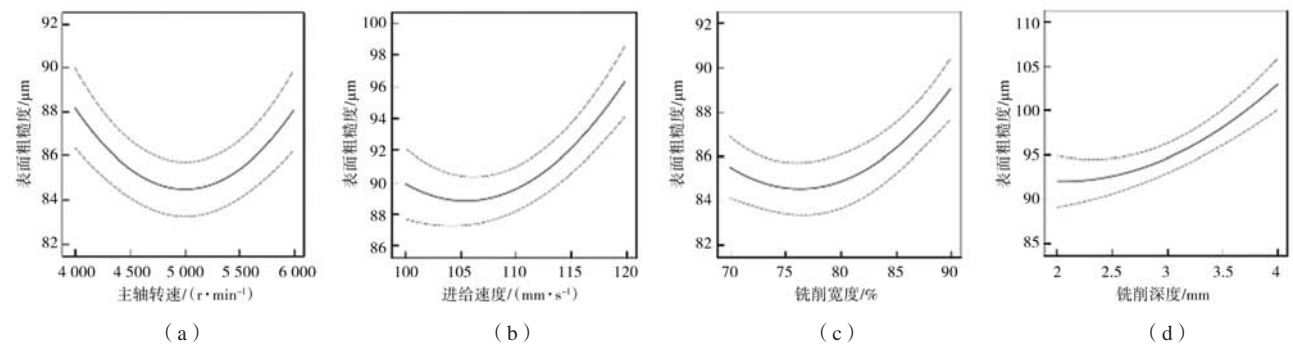


图4 单因素对表面粗糙度的影响规律

Fig. 4 Influence rule of single factor on Sa

低铣削精度。随着铣削宽度的增加各响应的值呈现整体增大的趋势，原因在于铣削宽度越大，同时进入变形阶段的砂粒数量和粘接桥数量增多，导致铣削力增大，刀具的颤振加大，导致误差加大。随着进给速度的增加各响应值先减小后增大，原因在于进给速度较小时，砂型铣削断裂面向砂型内部延伸，导致冷冻砂型成形精度降低，进给速度过大时，刀具加工过程受到的冲击增大，刀具变形较大导致冷冻砂型成形精度较低。

图5为因素耦合作用对方形砂型尺寸精度的影响，图5a为主轴转速和铣削深度耦合作用对方形砂型尺寸精度的响应面图。从图中可以看出在铣削深度的阈值

区内随着主轴转速的增加，方形砂型尺寸偏差值整体呈现先减小后增大的趋势；原因在于在铣削深度较大时，冷冻砂型的变形区域较大，刀具单齿吃刀量较大，因此刀具在高速旋转过程中的转速变化会导致刀具径跳增大，进而影响铣削精度^[12]。在主轴转速阈值区内，方形砂型尺寸偏差值随着铣削深度的增加整体呈现减小的趋势；原因在于主轴转速较大时，随着铣削深度的变化虽然单齿吃刀量增大，但主轴转速增大会减小单齿的单齿吃刀量，因此误差变化较小。

图5b和c分别为进给速度和铣削宽度耦合作用对方形砂型尺寸精度的影响及进给速度和铣削深度耦合作用对方形偏差的影响，可以看出耦合作用与单因素对

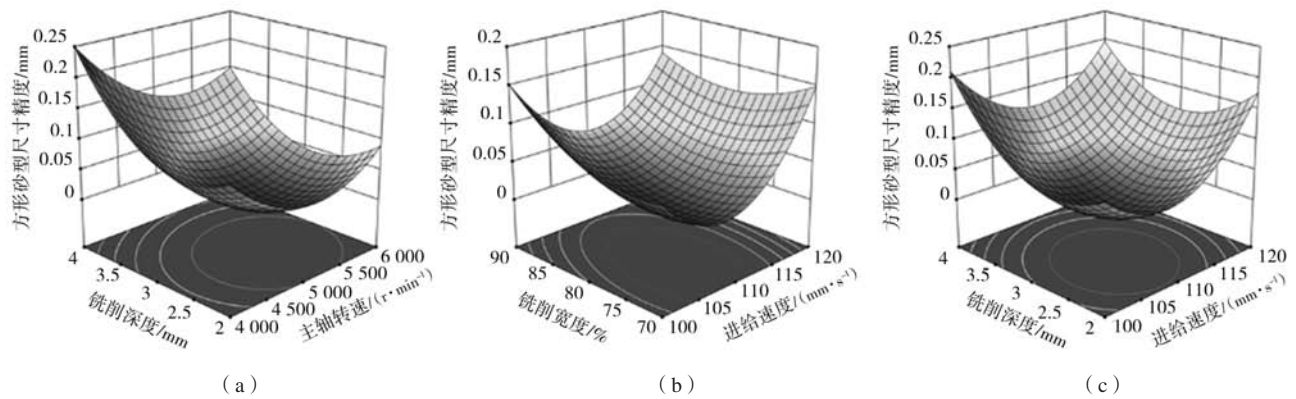


图5 耦合作用对方形砂型尺寸精度的影响响应面图
Fig. 5 Response surface plot of the effect of interaction on SQ

方形砂型尺寸精度的影响一致。

图6为耦合作用对圆形砂型尺寸精度的影响响应面图。图6a和b分别为主轴转速和进给速度耦合作用对圆形砂型尺寸精度的影响及主轴转速和铣削宽度耦合作用对圆形砂型尺寸精度的影响。可以看出耦合作用与单因素对圆形砂型尺寸精度的影响一致。

图6c为主轴转速和铣削深度耦合作用对圆形砂型尺寸精度的响应面图。主轴转速较小时，圆形砂型尺寸偏差值随着铣削深度的增加呈现增大的趋势；当主轴转速较大时，圆形砂型尺寸偏差值随着铣削深度的变化较小。原因在于在主轴转速较小时的单齿吃刀量较主轴转速较大时的单齿吃刀量大，因此随着铣削

深度的增加，刀具的单齿吃刀量增加较多，因此铣削精度较低。当主轴转速较大时，由于铣削深度增大所产生的单齿吃刀量大的问题得到解决，因此圆形砂型尺寸偏差值变化较小。当铣削深度较小时，主轴转速对圆形砂型尺寸偏差值的影响较小；当铣削深度较大时，圆形砂型尺寸偏差值随着主轴转速的增加呈现减小的趋势。原因在于铣削深度大时单齿吃刀量大，随着主轴转速的增加单齿吃刀量减少，因此圆形砂型尺寸偏差值呈现减小的趋势。铣削深度较小时，单齿吃刀量很小，主轴转速的变化对于单齿吃刀量的影响较小，同时主轴转速增大时的径向同步误差增大导致圆形砂型尺寸偏差值略有上升。

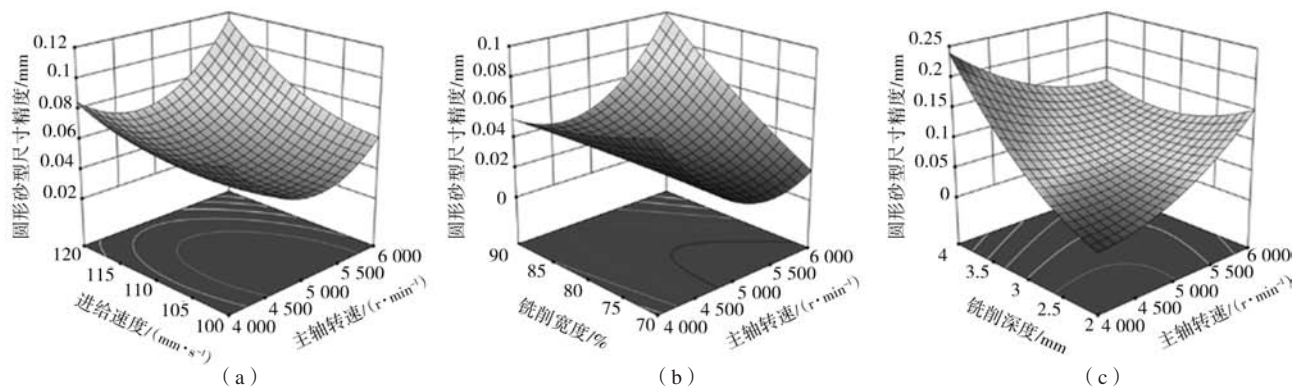


图6 耦合作用对圆形砂型尺寸精度值的影响响应面图
Fig. 6 Response surface plot of the effect of interaction on circular accuracy

图7为进给速度和铣削深度耦合作用对菱形砂型尺寸精度的响应面图。铣削深度较小时，菱形砂型尺寸偏差值随着进给速度的增大而增大。随着铣削深度的增加，菱形砂型尺寸偏差值随着进给速度的增大呈现先减小后增大的趋势。进给速度较小时，菱形砂型尺寸偏差值随着铣削深度的增大而增大，随着进给速度的增加，菱形砂型尺寸偏差值随着铣削深度的增大呈现先减小后增大的趋势。原因在于铣削深度较小时，

进给速度越小x轴和y轴的运动速度越小，两向轴的耦合运动更加精确，菱形砂型尺寸偏差值越小，铣削深度较大时，刀具的单齿吃刀量对菱形砂型尺寸偏差值的影响占主导作用，进给速度的变化而导致的双向耦合运动对菱形砂型尺寸偏差值影响较小。进给速度较小时，铣削深度变化导致单齿吃刀量的变化对菱形砂型尺寸偏差值的影响较大；进给速度较大时，菱形砂型尺寸偏差值受铣削深度的变化较小。这是由于进给

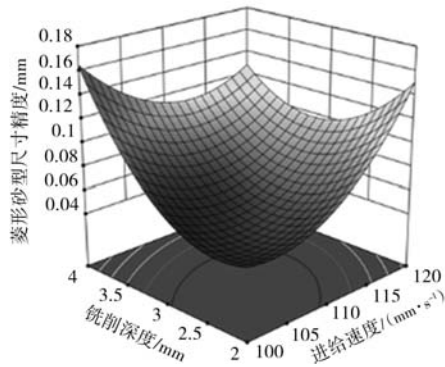


图7 耦合作用对菱形砂型尺寸精度的影响响应面图

Fig. 7 Response surface plot of the effect of interaction on the TH

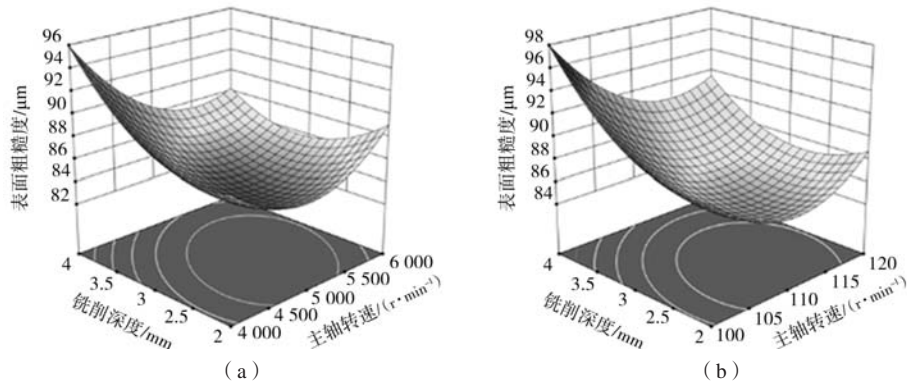


图8 耦合作用对表面粗糙度的影响响应面图

Fig. 8 Response surface plot of the effect of interaction on Sa

在主轴转速较小时，表面粗糙度随着铣削深度的增加而增大，主轴转速较大时，粗糙度随着铣削深度的增加变化较小，原因在于主轴转速较大时可降低铣削进刀量从而提高表面粗糙度。

图8中b为进给速度和铣削深度耦合作用对表面粗糙度的响应面图。从图中可以看出，在铣削深度较小时表面粗糙度随进给速度的变化较小，铣削深度较大时，表面粗糙度随进给速度的增大呈现减小的趋势。原因在于铣削深度较小时刀具受到铣削阻力较小，刀具受到的冲击较小，因此进给速度变化对表面粗糙度的影响较小；当铣削深度增大时，刀具单齿铣削量增大，刀具铣削力增大，产热增多导致表面粗糙度增大^[14]，但是随着进给速度的增加，刀具的旋转冲击增大，会切断颗粒体之间的连接使得砂型粗糙度降低。进给速度较小时，表面粗糙度随着铣削深度的增加而增大；进给速度较大时，粗糙度随着铣削深度的增加变化较小，原因在于进给速度较大时可降低铣削进刀量从而提高表面粗糙度。

3 参数优化

由冷冻砂型铣削成形表面粗糙度与铣削参数的拟

速度过大，双向耦合的运动轨迹较理论轨迹相差较大，对菱形砂型尺寸偏差值的影响较大。

图8a为主轴转速和铣削深度耦合作用对表面粗糙度的响应面图。从图中可以看出，在铣削深度较小时表面粗糙度随主轴转速的变化较小，铣削深度较大时，表面粗糙度随主轴转速的增大呈现减小的趋势。原因在于铣削深度较小时刀具受到铣削阻力较小，刀具受到的冲击较小，因此主轴转速变化对表面粗糙度的影响较小；当铣削深度增大时，刀具单齿铣削量增大，铣削过程受到团聚颗粒体的影响而导致粗糙度增大，但是随着主轴转速的增加，刀具的旋转冲击增大，会切断颗粒体之间的连接使得砂型粗糙度降低^[13]。

合方程计算，可获得最优表面粗糙度的铣削成形参数为：主轴转速为5 171 r/min，进给速度为112 mm/s，铣削宽度为刀具直径的76%，铣削深度为2.8 mm。此参数下铣削冷冻砂型表面粗糙度最优，其加工表面算术平均高度值为83.478 μm。

通过响应面试验得到了方形砂型尺寸精度、圆形砂型尺寸精度和菱形砂型尺寸精度的参数方程，通过参数方程可以各自求得其在参数取值区间内的最优解，但这些解可能是不同的，即不存在一组参数解可使得冷冻砂型的尺寸精度达到最优。因此我们需要对参数进行多目标优化，通过约束目标的范围选取最优的非支配解集，即帕累托解集。本文基于田野教授借助MATLAB平台开发的PlatEMO平台^[15]完成多目标求解。将响应面试验得到的参数方程作为多目标优化的目标函数。则多目标优化的数学模型可表示为：

$$\begin{cases} \min f_1 = SQ & SQ > 0 \\ \min f_2 = RH & RH > 0 \\ \min f_3 = C & C > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{ij} < x_i < x_{iu}$$

式中， x 为设计变量矢量； x_{ij} 、 x_{iu} 为设计变量的下限和上限，各变量取值范围见表1。

针对高维多目标优化问题常用的算法为遗传算

法, 选用NSGA-II、NSGA-III和MOEAD三种算法对本例进行优化比较。初始种群为100, 迭代次数为10 000次进行计算。算法的评价指标选择HV和IGD。HV是用于度量一个目标空间的体积, 该目标空间至少被非占优解集中的一个解占优。HV能很好地衡量算法的收敛性和多样性, 其值越大表明该算法综合性能越适用解

决目标函数^[16]。IGD用于计算真实帕累托前沿中所有解与求解算法获得的非占优解的平均欧式距离。IGD值越小, 表明非占优解集越逼近真实帕累托前沿并且分布更均匀, 解集的收敛性和多样性更好^[17]。为较好的计算HV和IGD的值, 将目标值和变量值进行归一化处理。三种算法的HV和IGD的值如图9-图11所示。

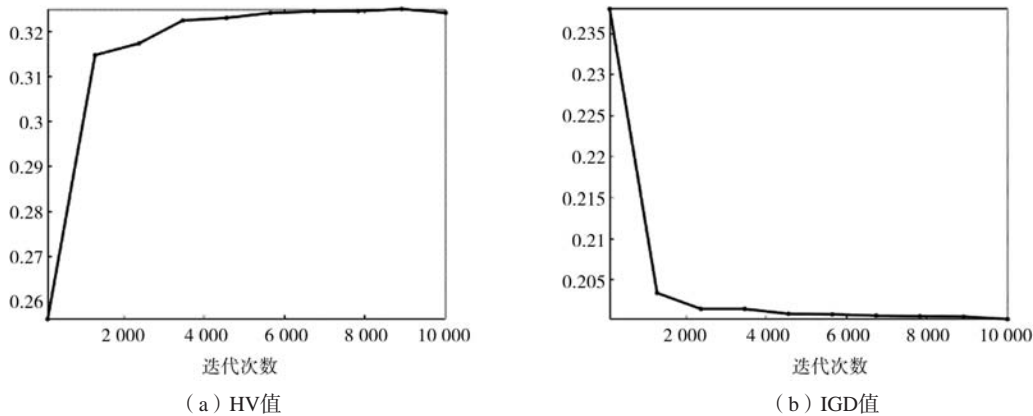


图9 MOEAD算法的HV值和IGD值

Fig. 9 HV value and IGD value of MOEAD algorithm

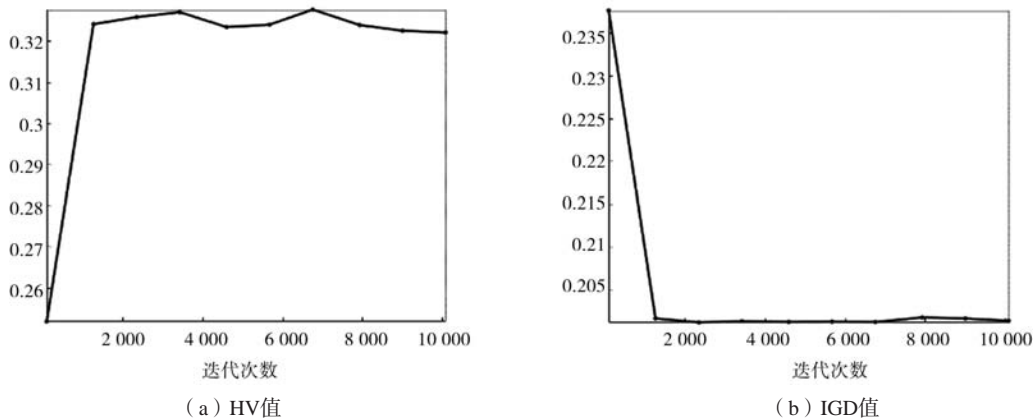


图10 NSGA-III算法的HV值和IGD值

Fig. 10 HV value and IGD value of NSGA-III algorithm

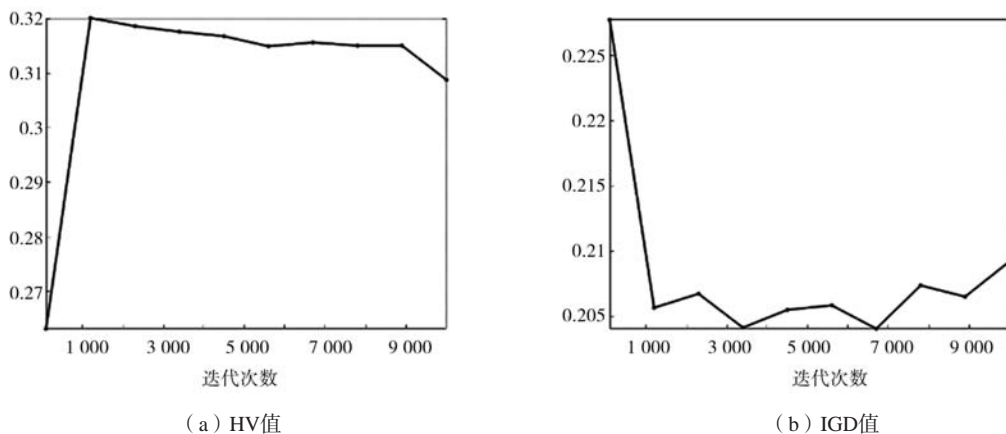


图11 NSGA-II算法的HV值和IGD值

Fig. 11 HV value and IGD value of NSGA-II algorithm

综合考虑三种算法的HV值和IGD值, MOEAD算法的HV值最大为0.324, 且曲线稳定收敛, IGD值为0.2, 因此本文选择MOEAD算法对本研究进行优化。优化后得帕累托解集如图12所示, 进行冷冻砂型数控铣削加工, 得到待浇注砂型并进行浇注试验, 冷冻砂型铣削成形及浇注样件如图13所示。对砂型尺寸测量三

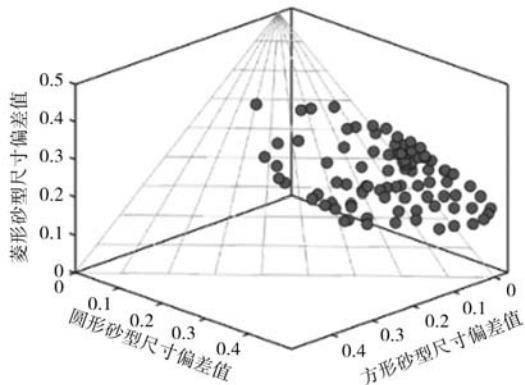


图12 MOEAD算法帕累托解集

Fig. 12 Pareto solution set of MOEAD algorithm

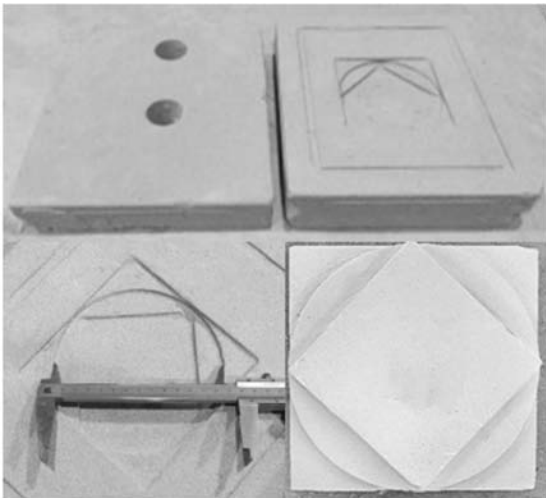


图13 冷冻砂型及铸件

Fig. 13 Frozen sand mold and castings

次取平均值, 方形砂型尺寸偏差均值为0.013 mm, 圆形砂型尺寸偏差均值为0.020 mm, 菱形砂型尺寸偏差均值为0.018 mm, 经检测铸件表面粗糙度较好, 尺寸精度达CT9级。

4 结论

本文开展了冷冻砂型数字化铣削成形工艺参数与冷冻砂型尺寸精度和表面质量的响应面试验, 得到了单因素及其耦合作用对冷冻砂型尺寸精度和表面质量的影响规律, 并建立了成形工艺参数对冷冻砂型尺寸精度及表面粗糙度的数学模型。利用进化算法优化冷冻砂型数字化铣削成形工艺参数并求得帕累托解集。

(1) 响应面试验结果表明冷冻砂型的尺寸精度和表面质量随着主轴转速、进给速度的增大呈现先减小后增大的趋势; 随着铣削深度、铣削宽度的增大整体呈现增大的趋势。

(2) 多参数耦合通过铣削冲击力和吃刀量影响冷冻砂型的尺寸精度和表面质量; 主轴转速和进给速度影响铣削过程中刀具与冷冻砂型的冲击作用力进而影响砂型的尺寸精度及表面质量; 铣削宽度和铣削深度影响铣削过程中的吃刀量进而影响砂型的尺寸精度及表面质量。

(3) 根据参数方程优化结果, 当主轴转速为5 171 r/min, 进给速度为112 mm/s, 铣削宽度为刀具直径的76%, 铣削深度为2.8 mm时, 铣削冷冻砂型表面质量最优, 表面粗糙度值为83.478 μm 。

(4) 针对冷冻砂型尺寸精度的多目标优化试验, MOEAD算法较NSGA-III算法和NSGA-II算法更加适用, 通过多目标优化参数方程获得冷冻砂型铣削成形尺寸精度的帕累托解集。根据解集内的数据进行铣削成形和浇注试验, 砂型尺寸精度较高, 铸件表面粗糙度较好, 尺寸精度达CT9级。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孟喜明, 李爱梅. 试论砂型铸造模具对铸件精确度的影响 [J]. 大型铸锻件, 2003 (1): 13-15.
- [3] 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.
- [4] 饶江华. 精密砂型数控铣削加工工艺研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [5] 单忠德. 无模铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [6] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] 杨浩秦. 数字化无模冷冻铸造成形机理研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2020.
- [8] 仇健. 数控机床切削性能测试典型试件综述 [J]. 制造技术与机床, 2014 (9): 193-203.
- [9] 朱福先. 无模砂型平头铣刀高效切削磨蚀机理研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2018.
- [10] 许颖, 刘阔. 主轴转速和温升对主轴动态误差影响的测试 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015 (9): 60-62.

- [11] 张霖, 赵东标, 张建明, 等. 微细端铣削工件表面粗糙度的研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19 (6): 658-661.
- [12] 王之军. 球头微铣刀加工失效机制及其对加工精度的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [13] 谢大进, 余欢, 徐志锋, 等. 数控铣削工艺参数对覆膜砂型表面品质的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (6): 1228-1232.
- [14] LEE, GYUNGIL, GAO, et al. Study of heat generation and cutting accuracy depending on spindle rotation speed change in ultra-precision cutting using ECTS [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19 (2): 265-269.
- [15] YE T, RAN C, ZHANG X, et al. PlatEMO: a matlab platform for evolutionary multi-objective optimization [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12 (4): 73-87.
- [16] ZITZLERE, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3 (4): 257-271.
- [17] CARLOS A, COELLO Coello, NARELI Cruz cortes. Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2005, 6 (2): 163-190.

Research on Optimization of Forming Parameters for Digital Milling of Frozen Sand Mold

ZHANG Guo-lei¹, SHAN Zhong-de^{1,2}, LIU Li-min¹, LI Zheng¹, LIANG Hao-tian¹, MING Yu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract:

The resin sand mold contamination problem was solved due to the use of water as a binder in the frozen sand mold and the green casting came true. The high precision and high efficiency machining of frozen sand mold was realized due to the digital milling technology based on the principle of material reduction. In this paper, the influence of digital milling process parameters on the forming quality of frozen sand mold was studied based on response surface experiments. The spindle speed, feed rate, milling width and milling depth were taken as the research factors, and the dimensional accuracy and surface roughness were taken as the response variables to fit the response equation. The optimal solution of surface roughness optimization parameters was obtained by response equation, and different algorithms (NSGA-II, NSGA-III and MOEAD) were used to multi-objective optimize the dimensional accuracy of digital milling of frozen sand mold. HV and IGD were used as evaluation criteria. The results showed that the MOEAD algorithm was more suitable for the study. The HV value was 0.324 and the IGD value was 0.2. The optimized parameters were selected for pouring test, and the surface quality of the frozen sand mold formed by milling met the pouring requirements.

Key words:

frozen sand mold; milling parameters; response surface experiment; multi-objective optimization