

基于响应曲面法的高速内冷铣削 AISI304 不锈钢铣削力

薛 姣 李广慧 尹凝霞 沈 灿 谭光宇

(广东海洋大学机械与动力工程学院, 湛江 524088)

文 摘 针对硬质合金刀具高速内冷铣削 AISI304 不锈钢时, 切削力大、切削温度高及加工表面质量低的问题。基于响应曲面中心复合设计方法进行高速内冷铣削实验, 建立了铣削力分量二阶回归预测模型, 并进行了实验验证。对比了干式与内冷铣削后的加工表面质量, 分析了铣削参数对铣削力分量的影响规律, 以铣削力分量最小为目标优化了铣削参数。结果表明: 进给力和径向力的预测值与实验值的误差分别为 4.77% 和 6.16%; 内冷铣削的 Ra 为 0.193~0.327 μm ; 对铣削力分量的影响是铣削深度>转速>进给量, 随着铣削深度和转速的增加, 进给力先升高后降低, 径向力逐步增加, 铣削深度与转速的交互作用对进给力和径向力的影响显著; 转速 11 643.63 r/min、铣削深度 1 mm、进给量 0.08 mm/r 为最优铣削参数组合。

关键词 高速内冷铣削, 中心复合设计, 铣削力, AISI304 不锈钢

中图分类号: TG501

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.03.005

Force of High Speed Internal Cooling Milling AISI304 Stainless Steel Based on Response Surface Methodology

XUE Jiao LI Guanghui YIN Ningxia SHEN Can TAN Guangyu

(College of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088)

Abstract Aiming at the problems of high cutting force, high cutting temperature and low surface quality when carbide tool was used to milling AISI304 stainless steel with high speed internal cooling. Based on the response surface center composite test design method, the high-speed internal cooling milling test was carried out, and the second-order regression forecast model of each milling force component was established and verified by experiments. The surface quality after dry milling and internal cooling milling was compared. The influence of milling parameters on the milling force components was analyzed, and the milling parameters were optimized with minimum milling force components as the goal. The results indicate that the error between the predicted value and the experimental value of the feed force and the radial force are 4.77% and 6.16%, respectively. The Ra value of internal cooling milling is 0.193 to 0.327 μm . The influence on milling components is milling depth>rotation speed>feed rate, the feed force first increases and then decreases with increasing milling depth and speed, the radial force increases gradually, the interaction between milling depth and speed have a significant influence on feed force and radial force. The optimal milling parameter combination are that speed is 11 643.63 r/min, milling depth is 1 mm, and feed rate is 0.08 mm/r.

Key words High speed inner-cooling milling, Central composite design, Milling force, AISI304 stainless steel

0 引言

AISI304 不锈钢因在高温腐蚀的环境下依然具有优良的综合性能而广泛应用于航空、船舶、医疗等高新技术领域, 是一种常用的宇航材料, 如飞机发动机冷端叶片^[1]。但其热导率低、塑性强使它在切削加工过程中具有切削力大、表面质量难以控制以及加工

硬化严重的特点, 导致刀具磨损加剧、粘屑、耐用度降低^[2-3]。

高速铣削是一个复杂的非线性铣削加工过程, 加工表面的质量和切削力都与切削过程中的冷却方式紧密相关。张春燕等^[4]对钛合金进行了内冷式 MQL 铣削实验, 分析了铣削参数对已加工表面质量

收稿日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(51375099); 广东省教育厅特色创新类项目(2017KTSCX086); 广东海洋大学科研启动费资助项目(E15168)

第一作者简介: 薛姣, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事难加工材料的高速切削机理分析工作。E-mail: XJJ2016LXT@126.com

通信作者: 李广慧, 教授, 主要从事高速切削理论、机械 CAD 等工作。E-mail: Ligh2009@126.com

的影响。邵军杰等^[5]对 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢进行了平面铣削实验,建立了表面粗糙度和铣削力模型。孙燕华等^[6]通过正交实验和多元线性回归建立了 0Cr18Ni9 铣削力模型。但是对 0Cr18Ni9 铣削力及刀具的研究主要是干式或外冷的铣削环境,内冷式微量润滑设备昂贵且操作复杂。内冷铣削是指切削液经过刀具内部螺旋孔,从刀具低刃端直接喷到切削区域对刀具及切削区域进行冷却润滑。切削液能够有效达到切削区,并在刀具与切屑间形成润滑膜,大大降低了刀屑之间的摩擦,减少了刀具磨损,提高了表面加工质量。因而研究高速内冷铣削过程中铣削力的变化规律,影响铣削力的主要铣削因素,建立可靠的铣削力模型对减少刀具的磨损、保证加工完整性等具有重要意义^[7-9]。

本文重点对高速内冷铣削力进行研究,通过响应曲面中心复合实验与单因素实验,建立铣削力分量预测模型,分析铣削参数对铣削力的影响规律,以铣削力分量最小为目标得出最优铣削参数组合,拟为工程实践提供参考。

1 高速铣削实验

1.1 设备

采用 VMC1000P 主轴出水立式加工中心(主轴最高转速 15 000 r/min,机床额定功率 11 kW),Kistler9119AA1 切削力测量系统(测量范围 0~4 kN,灵敏度进给力 $F_x \approx -26$ Pc/N,径向力 $F_y \approx -13$ Pc/N),采样频率 13~26 kHz; Mar Surf PS1 粗糙度测量仪, BT40 刀柄,动平衡等级 G2.5/2000 RPM,实验测力原理示意图如图 1 所示。

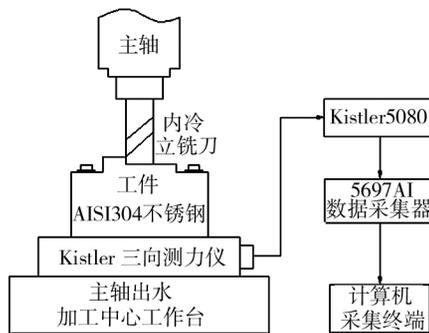


图 1 测力原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force measurement

1.2 实验条件与方案

采用 GU20 整体硬质合金 4 刃双螺旋内冷孔立铣刀,直径 10 mm,前角 5°,后角 15°,螺旋角 30°,内冷孔直径 1.4 mm,内冷压力 0.3 MPa(表压)。测试材料是 AISI304 不锈钢^[10],尺寸为 64 mm×40 mm×80 mm,DX-2 型切削液,采用高速内冷铣削,铣削方式为平面顺铣。中心复合设计(CCD)方法具有能评估高阶多项式预测模型、实验循环次数少、建模便捷以及预测结果贴近真实值

等优势而在工程中广泛应用^[11]。

根据机械加工工艺手册、工件及铣刀材料选择实验铣削参数,实验设计如表 1 所示。

表 1 实验因素与水平

Tab. 1 Experimental factors and levels

水平	$n / r \cdot \text{min}^{-1}$	a_p / mm	$f / \text{mm} \cdot r^{-1}$
-1.68	6636	0.32	0.066
-1	8000	1	0.08
0	10000	2	0.10
-1	12000	3	0.12
1.68	13364	3.68	0.134

2 结果分析与讨论

2.1 实验结果

通过铣削实验获得三个方向铣削力,其中轴向力 F_z 在铣削过程中波动较小且关于零轴对称分布,故本文只分析 F_x 和 F_y ,铣削力取切削稳定区连续 30 个峰值的平均值,1~20 组为中心复合实验,21~26 组为补充实验,实验结果如表 2 所示。

表 2 实验结果

Tab. 2 The experimental results

序号	$n / r \cdot \text{min}^{-1}$	a_p / mm	$f / \text{mm} \cdot r^{-1}$	F_x / N	F_y / N
1	8000	1	0.08	150	54
2	12000	1	0.08	213	77
3	8000	3	0.08	365	105
4	12000	3	0.08	481	148
5	8000	1	0.12	276	76
6	12000	1	0.12	320	121
7	8000	3	0.12	430	120
8	12000	3	0.12	495	190
9	6636	2	0.1	236	78
10	13364	2	0.1	370	148
11	10000	0.32	0.1	135	70
12	10000	3.68	0.1	515	169
13	10000	2	0.066	370	65
14	10000	2	0.134	520	120
15	10000	2	0.1	500	102
16	10000	2	0.1	498	99
17	10000	2	0.1	499	98
18	10000	2	0.1	501	101
19	10000	2	0.1	502	102
20	10000	2	0.1	502	100
21	8000	2	0.1	330	93
22	12000	2	0.1	419	110
23	10000	1	0.1	276	67
24	10000	3	0.1	572	160
25	10000	2	0.08	460	77
26	10000	2	0.12	539	100

2.2 内冷铣削力模型的建立与方差分析

响应曲面法能够反映响应值与响应因子之间的关系,克服了正交实验不能给出直观图的缺陷。假设影响因素显著性水平 $P < 0.05$,采用响应曲面中心复合法对铣削力分量与铣削参数之间的关系进行分析,根据实验数据运用最小二乘法拟合二阶回归方程模型,并对其进行方差分析以判别模型拟合的优良程度,二阶数学模型如下^[12]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中, y 为响应值, x 为铣削因子变量, β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 分别为各项系数。

通过形式转换,把实验因素的自由变量和铣削力分量值转换成矩阵形式,再运用最小二乘法得到上式中的系数值,最后经过铣削参数转换,建立铣削力分量与铣削因子间的多元回归预测模型,即:

$$F_x = -2993.84 + 0.388 \cdot n + 411.26 \cdot a_p + 16765.96 \cdot f + 4.625 \times 10^{-3} \cdot n \cdot a_p - 0.2187 \cdot n \cdot f - 962.5 \cdot a_p \cdot f - 1.784 \times 10^{-5} \cdot n^2 - 63.740 \cdot a_p^2 - 52937.9263 \cdot f^2 \quad (2)$$

$$F_y = 150.141 - 0.035 \cdot n - 22.405 \cdot a_p + 486.850 \cdot f + 2.812 \times 10^{-3} \cdot n \cdot a_p + 0.153 \cdot n \cdot f - 56.25 \cdot a_p \cdot f + 1.253 \times 10^{-6} \cdot n^2 + 7.329 \cdot a_p^2 - 5583.124 \cdot f^2 \quad (3)$$

建立二阶回归模型后,进行方差分析,结果见表3^[13]。

表3 回归模型方差分析表

Tab. 3 ANOVA table for the regression model

类型	平方和	自由度	均方	F值	Prob>F
模型	3.222×10 ⁻⁵	9	35805	387	<0.0001
失拟项	911.39	5	182.28	68.3	0.0002
F_x 纯误差	13.33	5	2.67		
总值	3.232×10 ⁵	19			
	$R^2=0.9971$		$R_{adj}^2=0.9946$		
模型	23505.38	9	2611.7	510	<0.0001
失拟项	37.83	5	7.57	2.84	0.1385
F_y 纯误差	13.33	5	2.67		
总值	23556.55	19			
	$R^2=0.9978$		$R_{adj}^2=0.9959$		

由表3可知, F_x 方差分析模型中 $P < 0.0001$,模型非常显著,多元相关系数 $R^2=0.9971$,校正后的多元相关系数 $R_{adj}^2=0.9946$,表明二阶模型拟合结果较好。 F_y 方差分析模型中 $P < 0.0001$,模型非常显著,多元相关系数 $R^2=0.9476$,校正后的多元相关系数 $R_{adj}^2=0.9404$,对实验结果的拟合程度高。

2.3 铣削力分量模型的验证及单因素对铣削力分

量的影响分析

通过三组单因素实验进行验证模型的准确性,并分析了单因素对铣削力分量的影响,具体结果如图2所示。从图2中看出,不管是 F_x 还是 F_y ,内冷实验值与预测值在不同转速、不同铣削深度、不同进给量下变化趋势均一致, F_x 的内冷实验值与预测值的误差是4.77%, F_y 的内冷实验值与预测值的误差是6.16%,表明铣削力分量预测模型的可靠性高。

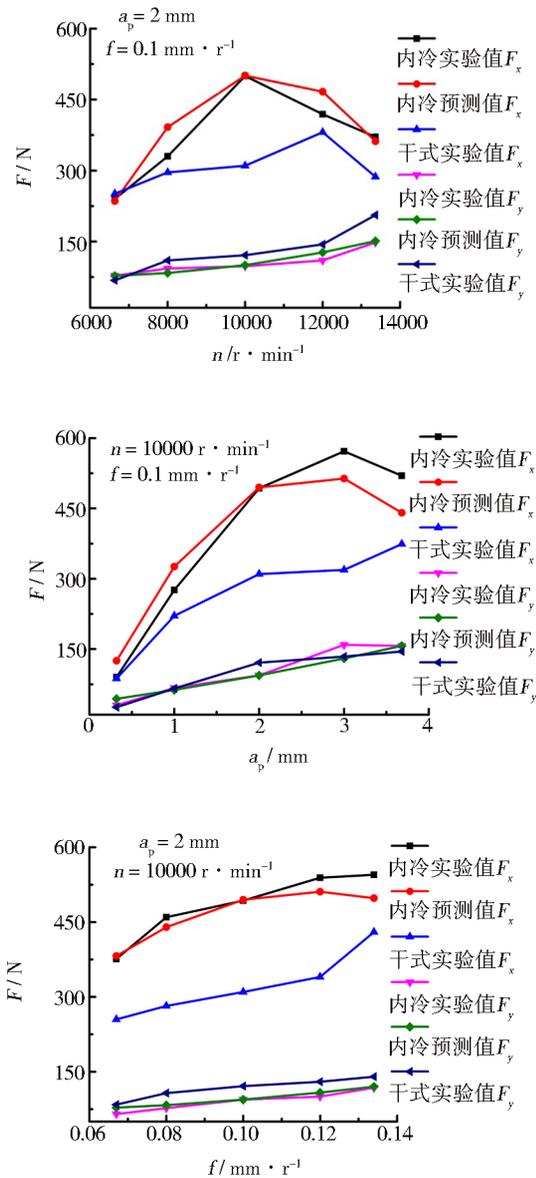


图2 单因素对铣削力分量的影响

Fig. 2 Effect of single factor on milling component force

F_x 内冷实验值高于干式实验值,是因为在切削液的作用下,切削温度下降,减小了加工表面的热软化,使得铣削力增大^[14];其次,切削液经内冷孔喷出,在离心力的作用下冲击待加工表面,增大了铣削力。 F_y 的内冷实验值略低于干式实验值,不同的铣削环境对 F_y 的影响不明显。对加工后的表面进行测量,内冷铣削

后的工件 Ra 为0.193~0.327 μm ,干式铣削后的工件 Ra 为0.330~0.488 μm ,内冷铣削的表面质量优势显著。在图2中,当转速在6 636~10 000 r/min时, F_x 增加,在10 000~13 364 r/min时, F_x 减小,最大值为500 N。这是高速切削的特征之一^[15-16],当工件材料被切削的速度超过了其本身滑移变形的速度时,材料还没有来得及完成滑移变形就被切掉了;第二切削速度的增加使得被切材料脆性化,铣削力减小。铣削深度在1~3 mm时,

F_x 增加,在3~4 mm时, F_x 减小,最大值为572 N;随着进给量的增加, F_x 缓慢增加。

F_y 随着转速和进给量的增加增速较小,随着铣削深度的增加,先增加后平缓减小。

2.4 交互因素对铣削力分量的影响

根据二阶回归方程模型做出铣削参数间交互作用的三维立体响应曲面,结果如图3和图4所示。

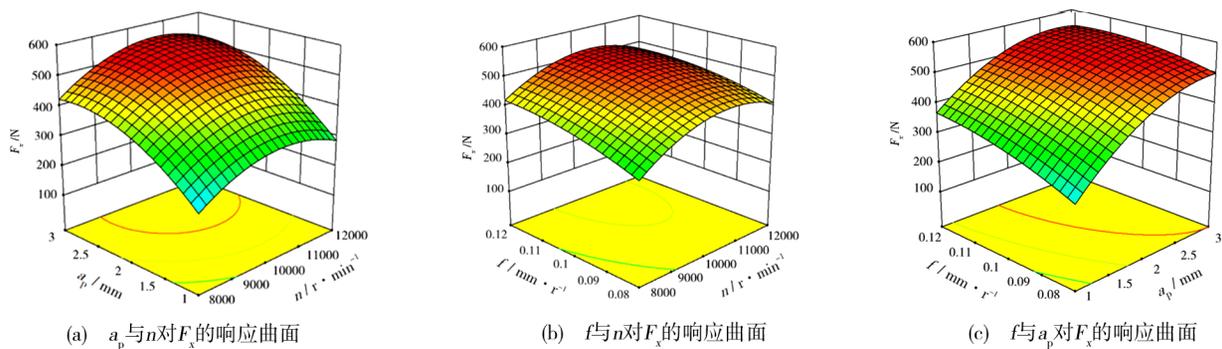


图3 F_x 的响应曲面图

Fig. 3 Response surface diagram of F_x

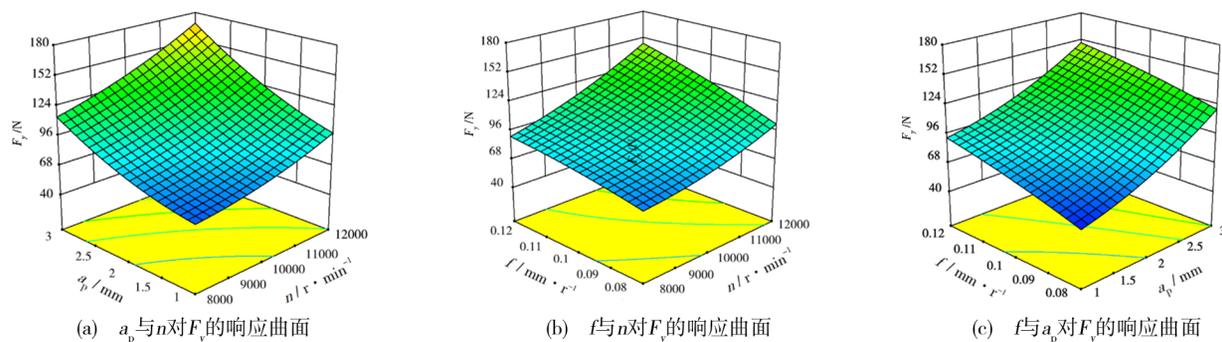


图4 F_y 的响应曲面图

Fig. 4 Response surface diagram of F_y

在图3(a)中的曲面弯曲幅度和目标值范围明显大于图3(b)和图3(c),可知铣削深度与转速之间的交互作用对 F_x 的影响大于铣削深度与进给量的交互作用及进给量与转速的交互作用。从图3(a)和图3(b)中得知在铣削深度和进给量不变的情况下, F_x 随着转速的增加先增大后减小,其原因与上述高速机理相似。由图3(a)和图3(c)中得知在转速和进给量不变的情况下, F_x 随着铣削深度的增大先增加后缓慢减小;由图3(b)和图3(c)中得知在铣削深度和转速不变的情况下, F_x 随着进给量的增加缓慢增加至趋于稳定。

从图4(a)和图4(b)中得知在铣削深度和进给量不变的情况下, F_y 随着转速的增加稳步增大;由图4(a)和图4(c)中得知在转速和进给量不变的情况下, F_y 随着铣削深度的增大而线性增长;由图4(b)和图4(c)中得知在铣削深度和转速不变的情况下, F_y 随着

进给量的增加缓慢增加至趋于稳定。

2.5 铣削参数优化

根据上述高速内冷铣削单因素实验及铣削参数的交互作用对铣削力分量的影响变化分析可知,对铣削力分量的影响是铣削深度>转速>进给量,因此应选择低的铣削深度、高转速和小进给量来获得最小铣削力分量。以此为基础,在所选的铣削参数范围内,结合二阶响应模型采用最小二乘法求解,得到转速11 643.63 r/min、铣削深度1 mm、进给量0.08 mm/r,此为铣削力分量最小的铣削参数组合。

3 结论

(1)建立高速内冷铣削的铣削力分量预测模型,并通过方差分析和实验验证了预测模型的可靠性高。 F_x 和 F_y 的预测值与实验值的误差分别为4.77%和6.16%。

(2)对铣削力分量的影响是铣削深度>转速>进给量。 F_x 随着铣削深度和转速的增加先增加后减小,转速在10 000 r/min时达到最大值500 N,铣削深度为3 mm时达到最大值572 N,随着进给量的增加, F_x 缓慢增加,直至趋于稳定; F_y 随着铣削深度、转速和进给量的增加慢慢升高。铣削深度与转速同时增加 F_x 先增加后逐渐减小, F_y 持续增加。

(3) F_x 内冷铣削高于干式铣削,二者的 F_y 相差不大,内冷铣削加工质量高,工件 Ra 为0.193~0.327 μm ;以铣削力分量最小为优化目标,获得一组最优铣削参数:转速11 643.63 r/min,铣削深度1 mm,进给量0.08 mm/r。

参考文献

[1] AMIT KUMAR G, HANSOGE N K, YASHJEE S T, et al. Development of constitutive models for dynamic strain aging regime in Austenitic stainless steel 304 [J]. *Materials and Design*, 2013, 45: 616-627.

[2] 张国平. 不锈钢切削加工[J]. *现代机械*, 2013(1): 65-67, 70.

ZHANG Guoping. Stainless steel cutting processing [J]. *Modern Machinery*, 2013(1): 65-67, 70.

[3] ZHOU F. A new analytical tool-chip friction model in dry cutting [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(1-4): 309-319.

[4] 张春燕, 祝亚京. 内冷式MQL铣削钛合金表面质量的研究[J]. *工具技术*, 2016, 50(12): 51-54.

ZHANG Chunyan, ZHU Yajing. Study on surface quality of titanium alloy milling with internal cooling MQL [J]. *Tool Engineering*, 2016, 50(12): 51-54.

[5] 邵军杰, 安庆龙, 陈明. 奥氏体不锈钢平面铣削切削力和表面粗糙度实验研究[J]. *工具技术*, 2008, 42(12): 25-28.

SHAO Junjie, AN Qinglong, CHEN Ming. Experimental studies on optimal parameters in milling of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel [J]. *Tool Engineering*, 2008, 42(12): 25-28.

[6] 孙燕华, 张臣, 方记文, 等. 不锈钢0Cr18Ni9铣削力建模与实验研究[J]. *机床与液压*, 2010, 38(19): 28-35.

SUN Yanhua, ZHANG Chen, FANG Jiwen, et al. Modeling and experiments of milling forces for stainless steel 0Cr18Ni9 [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2010, 38(19): 28-35.

[7] 刘璨, 吴敬权, 刘焕牢, 等. 平底立铣刀的切削力尺寸效应研究及其系数估算[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 199-208.

LIU Can, WU Jingquan, LIU Huanlao, et al. Research on size effect of cutting-force for flat end mills and estimation of its coefficient [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 199-208.

[8] 段鹏, 焦锋, 赵波, 等. 激光超声复合加工硬质合金的切削力理论与实验[J]. *现代制造工程*, 2017(11): 9-14, 35.

DUAN Peng, JIAO Feng, ZHAO Bo, et al. Cutting force

theory and experiment of machining tungsten carbide with assistance of laser heating and ultrasonic vibration [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2017(11): 9-14, 35.

[9] 杨振朝, 薛阳, 李言, 等. 纤维夹角和铣削参数对CFRP铣削力的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(6): 78-83.

YANG Zhenchao, XUE Yang, Li Yan, et al. Influence of fiber angle and milling parameters on milling force of CFRP [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2018, 48(6): 78-83.

[10] 尹凝霞, 李广慧, 谭光宇, 等. AISI 304不锈钢高速铣孔测温实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(11): 1766-1770.

YIN Ningxia, LI Guanghui, TAN Guangyu, et al. Experimental research on instantaneous temperature measurement of AISI 304 stainless steel in high-speed milling of hole [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(11): 1766-1770.

[11] 刘东雷, 申长雨, 刘春太, 等. 基于响应曲面法与改进遗传算法的RHCM成型工艺优化[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(14): 54-61.

LIU Donglei, SHEN Changyu, LIU Chuntai, et al. Efficient process parameters optimization of rapid heat cycling molding technology based on response surface methodology and improved genetic algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(14): 54-61.

[12] 张伟, 毛建国, 魏特特, 等. 基于响应曲面法的煤油发动机气门正时优化[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(7): 933-938.

ZHANG Wei, MAO Jianguo, WEI Tete, et al. Optimization of valve timing of a kerosene engine based on RSM [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(7): 933-938.

[13] 张烘州, 明伟伟, 安庆龙, 等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(4): 0447-0451.

Zhang Hongzhou, MING Weiwei, AN Qinglong, et al. Application of response surface methodology in surface roughness prediction model and parameter optimization [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(4): 0447-0451.

[14] 刘文韬, 刘战强. 钛合金Ti-6Al-4V高压冷却车削过程有限元分析[J]. *现代制造工程*, 2018(10): 44-50.

LIU Wentao, LIU Zhanqiang. Finite element analysis of turning Ti-6Al-4V under high-pressure coolant [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018(10): 44-50.

[15] 刘战强, 万熠, 艾兴. 高速铣削中切削力的研究[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(9): 734-737.

LIU Zhanqiang, WAN Yi, AI Xing. Cutting forces in high speed milling [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(9): 734-737.

[16] 何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.

HE Ning. High speed cutting technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012.