

# 响应曲面法优化球墨铸铁切削参数的研究

蔡霏<sup>1</sup>,何强<sup>1</sup>,冯丰<sup>2</sup>,王伟<sup>2</sup>,曹利平<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 现代制造技术研究所,江苏 镇江 212003; 2. 陕西柴油机重工有限公司,陕西 兴平 713105)

**摘要:**利用有限元技术建立了球墨铸铁 QT700 镗孔切削的简化模型,为响应曲面法提供试验数据。采用了中心组合设计方法,对试验数据进行多元回归分析,建立了主切削力和切削温度与切削速度、进给量及背吃刀量相关的预测模型。通过对响应面模型的分析研究,确定了各切削参数对主切削力与切削温度的影响。最后通过乘除法建立了主切削力、切削温度和去屑率的综合评价函数,求得在同时保证一定加工质量和加工效率情况下的优化切削参数值。

**关键词:**球墨铸铁 QT700;响应曲面法;切削参数;优化

**中图分类号:**TH164; TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0075-03

## Optimization of Cutting Parameters of Ductile Iron by Response Surface Methodology

CAI Fei<sup>1</sup>, HE Qiang<sup>1</sup>, FENG Feng<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, CAO Liping<sup>2</sup>

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. Shanxi Diesel Engine Heavy Industry, Co., Ltd., Xingping 713105, China)

**Abstract:** A simplified model for boring nodular cast iron QT700 is established by using finite element method, which is used to provide the experimental data for response surface methodology. The central combination design method is adopted. Multiple regression analysis is carried out on the test data, and the prediction models of main cutting force and cutting temperature related to the cutting speed, feed rate and cutting depth are established. By analyzing the response surface model, the influence of cutting parameters on the main cutting force and the cutting temperature is determined. Then, the comprehensive evaluation function of the main cutting force, cutting temperature and dandruff rate is established by multiplication and removal, and the optimal cutting parameters are obtained on the premise of guaranteeing the processing quality and efficiency.

**Keywords:** nodular cast iron QT700; response surface methodology; cutting parameters; optimization

## 0 引言

球墨铸铁 QT700 具有力学性能优良、耐磨、耐高温、加工成本低等优点,在材料市场占有重要的地位<sup>[1]</sup>。因其在高温下仍具有非常高的强度而广泛应用于船用柴油机活塞的制造中。然而,在镗削活塞销孔时,由于切削参数的不合理选择将会导致切削力过大、切削温度过高,使得活塞加工变形增大,影响工作性能。因此,对球墨铸铁 QT700 切削参数进行分析与优化是十分必要的。

在金属切削过程中,切削力与切削温度是引起加工变形的重要原因<sup>[2]</sup>,而切削参数直接影响着切削力与切削温度的大小。杨辉等人<sup>[3]</sup>应用 Deform-3D 对镍基高温合金进行了单变量切削参数仿真。陈俊云等人<sup>[4]</sup>运用 AdvantEdge 仿真软件分析了切削用量对硅铝合金车削过程的影响。以上的研究仅得到切削参数对切削力和切削热的大致影响,并没有得到确切的预测模型。通过有限元计算可以节省实验的时间和成本,但完全依靠有限元来获得切削力和切削热的预测公式或进行切削参数优化具有一定的局限性。响应曲面法<sup>[5]</sup>因其模型建立准确、预测性能良好而广泛地应用于产品工艺参数稳健性设计及工

艺过程的优化<sup>[6]</sup>。本文采用有限元计算和响应曲面法结合的方法,通过有限元计算提供试验数据,建立了切削力和切削温度与切削速度、进给量、背吃刀量相关的预测模型,并在保证一定去屑率的前提下对切削参数进行了优化。其研究成果对球墨铸铁 QT700 活塞切削参数的合理选择具有指导意义。

## 1 试验方案

### 1.1 试验条件

在以往的研究中,有限元模拟技术常被用来分析工件的切削加工过程,并且具有较高的准确性<sup>[7]</sup>。本文利用 Deform-3D 软件建立球墨铸铁活塞销孔镗削的有限元模型,并计算得出切削力和切削温度,避免了传统方法获取切削参数耗时长、成本高的缺点。

工件材料选取 Deform-3D 材料库中自带的 QT700,刀具材料选取硬质合金。当刀具进入稳定切削状态时,切削力和切削温度基本在某一值附近波动。为节省计算时间,模型只取销孔的一小段,如图 1 所示。模拟模型的宽度为 10 mm,厚度为 6 mm,圆弧半径为 100 mm,弧度为 10°。初

始网格划分采用网格尺寸控制法,即确定网格单元的绝对数目。设定刀具的网格数量为 30 000,工件的网格数量为 60 000。

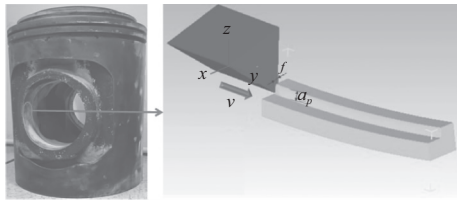


图 1 活塞销孔镗削模型

## 1.2 试验设计

为了研究球墨铸铁 QT700 镗孔切削参数对切削力和切削温度的影响规律,本文采用中心组合设计方法,以切削速度  $V$ 、进给量  $f$ 、背吃刀量  $a_p$  为自变量设计模型。根据《切削用量手册》<sup>[8]</sup> 确定设计变量的变化区间分别为:  $660 \text{ mm/s} \leq V \leq 1320 \text{ mm/s}$ ,  $0.3 \text{ mm/r} \leq f \leq 1 \text{ mm/r}$ ,  $0.8 \text{ mm} \leq a_p \leq 2.5 \text{ mm}$ 。以 1、0 和 -1 表示各设计因素的高、中、低水平,如表 1 所示。

在中心组合设计中, $a$  取 1,中心点  $n$  取 3,最终选取了 17 个样本点。通过有限元模型计算得到了每个样本点处的切削力和切削温度曲线,求得稳定状态时的平均值,试验结果如表 2 所示。从表 2 可以看到, $y$  方向的切削力远大于另两个方向的分力,故为主切削力,因此本文后面主要进行主切削力和切削温度的分析。

表 1 试验设计因素水平

切削参数	水平		
	-1	0	1
切削速度 $V/(mm/s)$	700	1 000	1 300
进给量 $f/(mm/r)$	0.3	0.6	0.9
切削深度 $a_p/mm$	1.00	1.75	2.50

## 2 结果分析

### 2.1 预测模型建立及显著性检验

通过 Design-Expert 10 对试验所获得的数据进行多元回归分析,从而得出响应变量主切削力  $F_y$  和切削温度  $T$  对  $V, f, a_p$  的二次多项式的回归方程,如式(1)、式(2)所示。

$$F_y = -96.65 + 0.05 \times V + 311.19 \times f + 97.86 \times a_p - 0.08 \times V \times f - 0.02 \times V \times a_p + 374.85 \times f \times a_p - 1.31 \times 10^{-5} \times V^2 - 168.62 \times f^2 - 0.20 \times a_p^2 \quad (1)$$

$$T = 218.85 + 0.41 \times V + 156.55 \times f + 107.64 \times a_p + 0.17 \times V \times f - 4.24 \times 10^{-3} \times V \times a_p - 5.21 \times f \times a_p - 1.57 \times 10^{-4} \times V^2 - 138.53 \times f^2 - 21.00 \times a_p^2 \quad (2)$$

对所建立的模型进行显著性分析,结果如表 3 所示。其中  $F$  值是均方与组内均方的比值, $P$  值是对应  $F$  值下的

概率,表示模型的显著性<sup>[9]</sup>。从中可以看到  $F_y$  和  $T$  的回归模型的  $P$  值都  $< 0.0001$ ,表明模型方程极显著。此外,两模型的多重拟合系数  $R^2$  分别为 0.9999 和 0.996 0,说明所建立的回归方程与试验数据拟合良好。因此,采用响应曲面法建立的  $F_y$  和  $T$  的回归方程具有较高的可信度,可以用来进行分析和预测。

表 2 试验设计表

试验序号	因素			响应值			
	切削速度 $V/(mm/s)$	进给量 $f/(mm/r)$	背吃刀量 $a_p/mm$	$x$ 方向力 $F_x/N$	$y$ 方向力 $F_y/N$	$z$ 方向力 $F_z/N$	切削温度 $T/(^\circ C)$
1	0	1	0	134.14	739.67	166.53	755.40
2	-1	-1	-1	44.10	194.34	65.65	582.52
3	1	1	-1	79.08	410.21	88.28	797.90
4	0	-1	0	64.46	326.84	101.05	677.60
5	0	0	0	101.59	546.29	140.11	729.65
6	-1	1	-1	87.74	445.90	101.20	645.08
7	1	-1	-1	28.06	175.67	55.86	663.63
8	-1	0	0	104.91	562.03	146.37	658.27
9	-1	-1	1	97.80	478.47	149.65	619.36
10	0	0	0	101.59	546.29	140.11	729.65
11	1	-1	1	103.13	451.34	145.89	706.15
12	-1	1	1	197.35	1 078.54	238.21	686.73
13	0	0	0	101.59	546.29	140.11	729.65
14	1	1	1	172.70	1 012.09	221.78	826.24
15	0	0	1	146.26	777.27	192.13	742.78
16	1	0	0	79.22	532.48	139.32	771.47
17	0	0	-1	59.35	319.37	80.36	691.52

表 3 回归模型  $F$  检验表

参数	来源	平方和	自由度	均方差	$F$ 值	$P$ 值	显著性
$F_y$	模型	$9.932 \times 10^5$	9	$1.104 \times 10^5$	5 967.87	$< 0.0001$	显著
	残差	129.44	7	18.49	—	—	—
	总和	$9.933 \times 10^5$	16	—	—	—	—
$T$	模型	64 320.21	9	7 146.69	193.48	$< 0.0001$	显著
	残差	258.56	7	36.94	—	—	—
	总和	64 578.77	16	—	—	—	—

### 2.2 响应面分析

根据响应曲面及其相应的等值线图,可以更加清晰地看出各因素对响应值的影响及两两交互作用。图 2 和图 3 分别为切削参数对  $F_y$  和  $T$  的响应面及等高线图。

从图 2 中可以看到, $f$  和  $a_p$  的增加都会导致  $F_y$  的增加,而  $V$  的增加可以使  $F_y$  减小。从图 2a) 可以发现,在大进给量的情况下,切削速度对主切削力的减小作用更加明显。根据图 2c) 的响应面坡度和等值线可以判断出背吃刀量对主切削力的增加影响大于进给量对主切削力的增加影响。

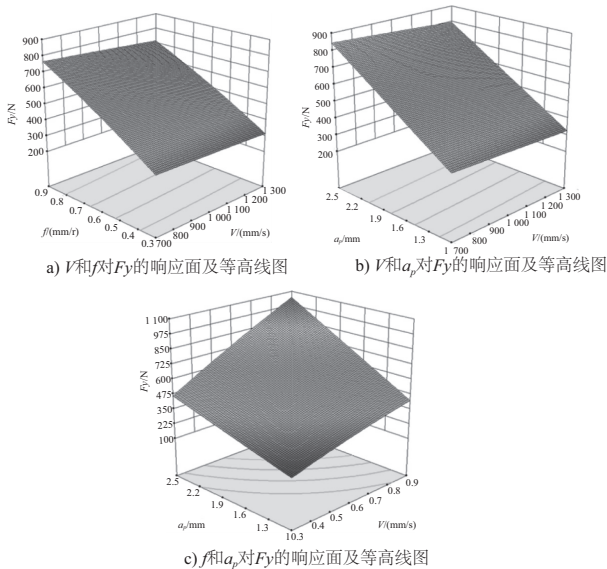


图2 切削参数对主切削力  $F_y$  的响应面及等高线图

从图3中可以看到,切削速度  $V$ ,进给量  $f$ 和背吃刀量  $a_p$ 的增加都会引起切削温度  $T$ 的上升。根据图3中的各响应面的坡度和等值线可以判断出切削参数对切削温度上升的影响大小关系为:切削速度  $V >$  进给量  $f >$  背吃刀量  $a_p$ 。

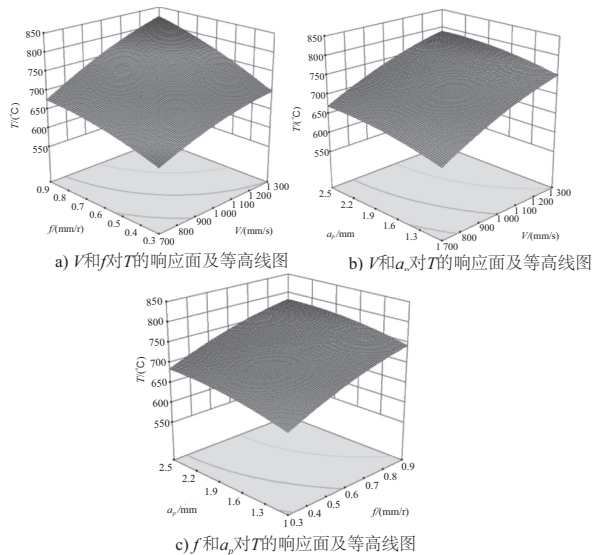


图3 切削参数对切削温度  $T$  的响应面及等高线图

根据以上分析可知,要想获得最小的主切削力,只要使得切削速度  $V$ 为最大值,进给量  $f$ 和背吃刀量  $a_p$ 为最小值;而要想获得最低的切削温度则需要同时取切削速度  $V$ 、进给量  $f$ 和背吃刀量  $a_p$ 的最小值。这两者间存在一定的矛盾,通常在加工过程中还需要考虑去屑率,既要保证活塞加工质量还要保证一定的加工效率。

### 2.3 参数选择与优化

最理想的加工状态是最小的主切削力,最低的切削温度和最大的材料去除率(去屑率),其中去屑率的求解方程如式(3)所示。可以看出这三者间存在一定的矛

盾,不可能同时取到最优状态,必须作出一定让步。本文采用乘除法构造评价函数  $H$  将多目标优化问题简化成单目标优化问题,即以去屑率为分母,主切削力与切削温度的乘积为分子,如式(4)所示。要使去屑率尽可能大,主切削力与切削温度尽可能小,只要使评价函数  $H$  的值尽可能小即可。

$$Q = a_p \times f \times V \tag{3}$$

$$\begin{cases} H = F_y \times T / Q \\ \text{s.t.} \\ 1 \leq a_p \leq 2.5 \\ 0.3 \leq f \leq 0.9 \\ 700 \leq V \leq 1300 \end{cases} \tag{4}$$

通过计算可得该评价的最优切削参数选择为  $V = 1300 \text{ mm/s}$ ,  $f = 0.9 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 1 \text{ mm}$ 。图4显示了目标函数的优化结果与试验结果比较,虚线表示优化结果的值。从图中可以看到通过乘除法构造的评价函数来进行优化可以得到较好的主切削力和去屑率,而切削温度的优化效果并不是很明显。因此,在实际生产中需要根据实际情况选取合适的优化方法,以获得满足加工条件的理想切削参数。

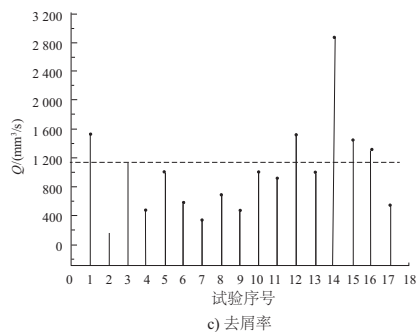
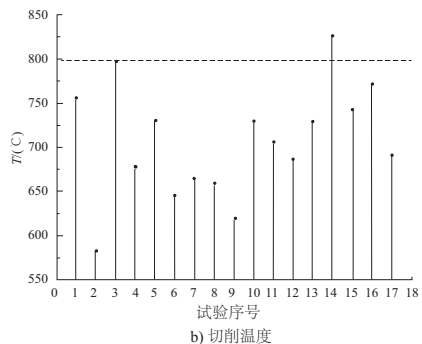
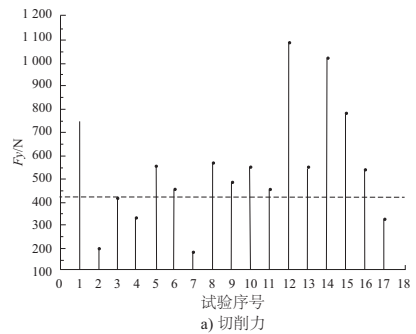


图4 目标函数的优化结果与试验结果比较

(下转第81页)