

基于响应曲面法的珩磨油石寿命影响因素研究

宁会峰, 郭文泉

兰州理工大学机电工程学院

摘要: 在珩磨加工时,油石磨损对零件的加工精度有重要影响。基于响应曲面法建立珩磨油石二阶响应曲面模型,通过 BBD 实验对珩磨油石寿命模型进行拟合,分别验证模型的有效性和显著性,结果表明响应曲面模型能很好地拟合油石寿命。在分析了珩磨油石寿命关于影响因素的响应曲面后,得到了各因素对油石寿命的交叉影响程度。结果表明:各工艺参数对油石寿命具有复杂的交互作用,在油石粒度相同的情况下,珩磨压力较往复速度对油石磨损的影响更加显著;压力和粒度的交互作用对油石寿命影响最大,油石在磨削时,由于细小的磨屑容易进入油石气孔中,粒度越小,越易出现堵塞现象。

关键词: 珩磨加工;油石磨损;响应曲面法

中图分类号: TG580.12;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.003

Study on Influencing Factors of Oil Stone Life Based on Response Surface Methodology

Ning Huifeng, Guo Wenxiao

Abstract: The abrasion of oil stone is very important to the accuracy of parts in honing process. On the basis of the Response Surface Methodology (RSM), a second-order model of honing stone life is established, and the life of model is fitted by BBD experiment. Then, the validity of the life model is verified by validity and significance test. By fitting the response surface of the relationship between the influence factors and the life of oil stone, the cross-effects of various factors on the life of oil stone are analyzed. The results show that the process parameters have a very complex interaction with the life of oil stone. At the same particle size of the oil stone, the influence of the honing pressure on the wear of the oil stone is more significant than that of reciprocating speed. The smaller particle size, the easier the blockage will occur because the wear debris can easily enter the blowhole of the oil stone during honing.

Keywords: honing; oilstone wear; response surface methodology

1 引言

珩磨加工作为零件的精密磨削工艺,是零件加工质量优劣的重要保证,油石的磨损状态会直接影响珩磨加工的效率 and 产品的最终加工质量,因此对珩磨加工中油石磨损的影响规律进行研究非常重要。而珩磨油石寿命受到加工中磨损量的直接影响,通过实验研究油石磨损影响规律对于提高油石磨损检测效率、产品加工质量和生产率有重要意义。胡勤^[1]将国产与进口氧化铝两种油石通过实验进行对比分析,指出可以改变油石气孔的数量来增强磨削能力。Damir S. Vrac 等^[2]在试验研究中,采用长行程珩磨系统,分别使用金刚石和碳化硅工具进行预处理,研究切削参数的变化,通过离散分析确定切削参数对表面粗糙度和生产率影响的数学模型,试验表明,切削速度对产品的生产率有最重要的影

响。Zhang Yonggui 等^[3]通过 MATLAB 仿真和有限元分析,研究了包括旋转速度、往复速度、油石材料等影响网纹质量和珩磨效率的因素。祝锡晶^[4]基于普通磨削理论,设计了一种新的功率超声珩磨装置,并完成了该方法的加工工艺优化实验研究。潘林^[5]通过高温合金深孔珩磨实验,分析了珩磨压力对油石粘附率和自锐性的影响,并优化了高温合金深孔珩磨工艺参数。国内外一些学者针对不同材料的摩擦行为及工件表面形貌进行了研究^[6-8]。闫旭强^[9]针对电镀金刚石微磨具在磨削加工时的磨损机理展开研究,分析了磨粒的磨损机制,基于实验数据建立了微磨具的磨损预测模型。温雪龙等^[10]对电镀金刚石微磨具磨损机理进行了研究,分析表明磨具磨头的磨损从快速增加逐渐过渡到缓慢增长阶段,磨粒磨损和破碎的数目以线性变化的趋势增加。

油石磨损研究对于提高珩磨加工效率、保证产品加工质量有重要意义,但相关研究很少。本文以棕刚玉珩磨油石为对象,以油石磨损量作为响应值,

利用响应曲面法设计 Box-Behnken 实验,建立二阶响应曲面模型,研究加工参数以及油石粒度对珩磨油石寿命的影响,为及时合理更换油石提供理论依据。

2 响应曲面法基本原理

响应曲面法(RSM)是一种以回归分析为函数的多元分析方法,通过多项式表达影响因素和响应值的关系,对函数进行响应曲面分析,并以图形的方式将响应和影响因素之间的关系进行直观显示^[11-13],其基本理念是:在真实响应未知的情况下,通过构造一个多项式来表达功能函数。

如果在实验中含有 k 个影响参数 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$, 可建立函数关系为

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (1)$$

式中, f 为真实响应函数; ε 为系统误差, 假设其均值为 0, 方差为 σ^2 。

如果输出响应满足以下关系, 则式(2)表示曲面为响应曲面。

$$E(y) = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) = \eta \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中, $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 为自然变量。为了便于研究, 通常将自然变量转化为规范变量 x_1, x_2, \dots, x_k , 规范变量的均值为 0, 具有标准方差。在规范变量的情况下, 规范响应曲面函数可写为 $\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 。在响应曲面法中, 需要找到自变量与响应之间的函数关系逼近式, 采用二阶模型为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

式中, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为采用最小二乘法估计的多项式系数, ε 为随机误差。

3 实验过程

采用 LSR-2M 型往复摩擦磨损试验机, 对不同粒度下的珩磨油石在不同压力、往复速度下的磨损量进行研究。考虑摩擦试验机工艺参数的使用范围, 油石采用具有珩磨加工代表性的 180#、220#、400# 的棕刚玉油石, 长度为 20mm、直径为 8mm 的圆柱形油石。工件材料为 45 钢, 直径为 50mm, 厚度为 6mm, 表面粗糙度为 $R_a 1.8$ 。实验前用丙酮对实验材料进行清洗和称重。

表 1 为油石寿命影响因素水平编码。表中, -1, 0, 1 代表三个因素水平, 分别代表影响因素的低水平、中水平、高水平。为了评价影响因素对珩磨油石寿命之间的关系, 优化加工参数, 采用响应曲面

Box-Behnken 设计二阶响应曲面实验。实验方案中, y 值为油石磨损一定时间后的磨损量。表 2 为 Box-Behnken 实验设计与测量结果。

表 1 油石寿命影响因素水平编码

编码	影响因素	因素水平		
		-1	0	1
X_1	压力(MPa)	0.8	1.4	2
X_2	往复速度(m/min)	10	17	24
X_3	粒度	180	220	400

表 2 Box-Behnken 实验设计与测量结果

序号	自然变量			规范变量			响应 $y(g)$
	X_1	X_2	X_3	x_1	x_2	x_3	
1	2	17	400	1	0	1	0.0013
2	1.4	10	400	0	-1	1	0.0051
3	2	17	180	1	0	-1	0.0126
4	1.4	24	180	0	1	-1	0.0152
5	1.4	17	220	0	0	0	0.0052
6	2	24	220	1	1	0	0.0081
7	1.4	10	180	0	-1	-1	0.0085
8	0.8	17	400	-1	0	1	0.0052
9	0.8	24	220	-1	1	0	0.0015
10	1.4	17	220	0	0	0	0.0037
11	1.4	24	400	0	1	1	0.0092
12	2	10	220	1	-1	0	0.0037
13	0.8	10	220	-1	-1	0	0.0014
14	0.8	17	180	-1	0	-1	0.0043
15	1.4	17	220	0	0	0	0.0045

4 实验结果及分析

根据表 2 的数据, 采用响应曲面优化设计方法进行多元回归拟合分析, 将数据导入 Design-Expert 软件建立与 X_1, X_2, X_3 之间的二次多项式响应面之间的响应回归方程为

$$y = 0.0045 + 0.0017X_1 + 0.0019X_2 - 0.0025X_3 - 0.0022X_1^2 + 0.0014X_2^2 + 0.0036X_3^2 + 0.0011X_1X_2 - 0.0031X_1X_3 - 0.0007X_2X_3$$

表 3 响应曲面设计回归方程方差分析

方差来源	响应				
	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	2.216×10^{-4}	9	2.463×10^{-5}	14.08	0.0047
X_1	2.211×10^{-5}	1	2.211×10^{-5}	12.64	0.0163
X_2	2.926×10^{-5}	1	2.926×10^{-5}	16.73	0.0094
X_3	4.900×10^{-5}	1	4.900×10^{-5}	28.02	0.0032
X_1X_2	4.623×10^{-6}	1	4.623×10^{-6}	2.64	0.1649
X_1X_3	3.721×10^{-5}	1	3.721×10^{-5}	21.28	0.0058
X_2X_3	1.690×10^{-6}	1	1.690×10^{-6}	0.97	0.3707
X_1^2	1.821×10^{-5}	1	1.821×10^{-5}	10.41	0.0233
X_2^2	7.542×10^{-6}	1	7.542×10^{-6}	4.31	0.0925
X_3^2	4.796×10^{-5}	1	4.796×10^{-5}	27.43	0.0034
残差	8.744×10^{-6}	5	1.749×10^{-6}		
总和	2.304×10^{-4}	14			

表3为响应曲面设计回归方程方差分析表。在Design-Expect中,可以根据残差的正态概率的分布判定模型是否有效。如图1所示,通过残差分布情况可知,所建立的珩磨油石寿命响应回归模型能很好地拟合影响因素和响应值。

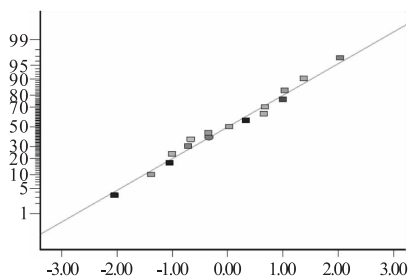


图1 残差正态概率分布

从模型的方差分析表可以看出,模型的残差趋近于零。根据回归因子和残余误差的自由度查 F 分布表,得 $F(9,5) = 3.32$ 。模型的 F 值为14.08,大于3.32。因此,所拟合的油石寿命二阶响应曲面模型的显著性很好,可对油石寿命进行预测。

4.1 模型中各项参数对应的影响显著性检验

通过显著性检验评价二阶响应模型获得的珩磨油石寿命回归方程的影响因素,针对每个参数对珩磨油石寿命作用的影响程度进行评估,分析影响油石寿命的切削参数。利用 P 值大小评价各影响因素的显著性, $P > 0.05$ 项对应 y 的影响不显著, $P \leq 0.05$ 项对应 y 的影响显著, $P \leq 0.01$ 项对应 y 的影响极显著。

从表3可以看出,各参数的单因素作用、交互作用及二次效应的影响顺序为: $X_3 > X_3^2 > X_1 X_3 > X_2 > X_1 > X_1^2 > X_2^2 > X_1 X_2$ 。在油石粒度相同的情况下,珩磨压力在油石磨损时占主导因素,压力和粒度的交互作用对油石寿命的影响最为显著。

4.2 模型的计算结果与真实结果的比较

从模型分析的方差表可以看出,建立的珩磨油石寿命二阶模型有较高的显著性。如图2所示,二阶响应曲面模型的计算结果与真实结果非常接近,表明模型的显著度良好。

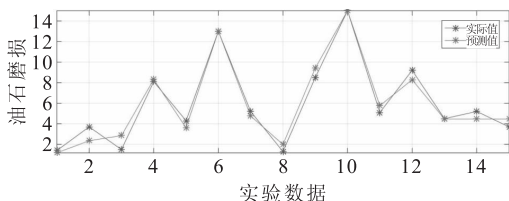


图2 模型预测结果与计算结果比较

4.3 影响因素对珩磨油石寿命的影响

影响珩磨油石寿命的因素很多,珩磨压力、往复

速度和珩磨油石的粒度在珩磨加工过程中对油石的磨损有重要影响,各影响因素之间存在交互作用。因此,通过响应曲面法分析这些因素对油石磨损的影响规律并对珩磨油石寿命模型进行拟合,得到影响因素对油石寿命的交叉影响规律。

图3为珩磨粒度处于零水平时,珩磨压力和往复速度对珩磨油石寿命的交叉影响规律。可以看出,珩磨油石的磨损量随着压力的增加呈现先增大后减小的趋势。这是因为珩磨油石刚进入磨削时,磨粒对材料有较好的切削作用,随着珩磨压力的增加,油石磨粒发生破碎和挤压,而且随着珩磨加工的进行,工件表面与油石的接触面积增大,产生的切屑容易堆积在油石和工件之间,如不能及时排出,会造成油石气孔面的堵塞而导致油石表面变得光滑,切削能力急剧下降。随着往复速度的增大,油石磨损呈现增加趋势。从图中可以看出,油石的最大磨损量出现在速度的高水平 and 压力的中水平处,最小磨损量出现在速度的低水平和压力的低水平处。

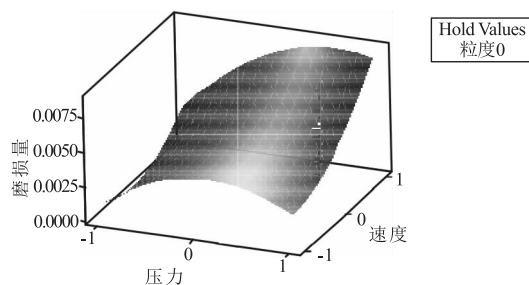


图3 压力和速度对油石寿命的影响响应曲面

图4为往复速度处于零水平时,珩磨压力和油石粒度对珩磨油石寿命的交叉影响规律。从图中可以看出,随着油石粒度的减小,其磨损呈现减小趋势。由于油石粒度越小,即磨粒粒径越小,对工件的磨削作用小,去除余量小,而且极细的磨屑会堆积在油石气孔中,导致油石气孔堵塞。此时油石和工件主要产生摩擦作用,油石切削能力降低。油石的最小磨损出现在压力的低水平和粒度的中水平处,最高磨损出现在粒度的高水平 and 压力的高水平处。在压力较大时,珩磨油石容易产生磨粒的破碎和脱落,因为珩磨压力增大将导致磨粒的切削深度变大,磨粒之间相互受到挤压,磨削力增大,所以磨粒破碎的比例增大。珩磨加工时,磨粒磨削时在磨削力作用下发生破碎和脱落,油石的表面形貌产生剧烈变化。磨粒破碎和形成新的磨粒逐渐达到动态平衡,细小的磨屑进入油石的气孔中造成堵塞,使珩磨油石加工能力迅速降低,材料的去除率也随之降低。

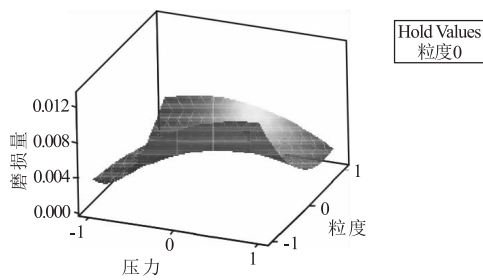


图4 压力和粒度对油石寿命的影响响应曲面

图5为珩磨压力处于零水平,珩磨速度和油石粒度对珩磨油石寿命的交叉影响规律。从图中可以看出,油石的最大磨损出现在粒度的低水平和速度的高水平处,最小磨损出现在粒度的中水平和速度的低水平处。不同粒度油石的磨损程度还与网纹角有关^[14]。在小角度时,占主导影响因素是油石的破碎和脱落;在大角度时,主要影响因素是油石堵塞。

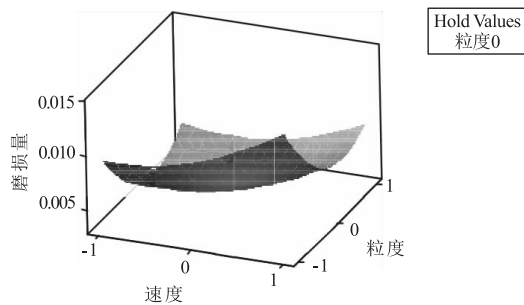


图5 速度和粒度对油石寿命的影响响应曲面

5 结语

采用二阶响应曲面法,以珩磨油石磨损量为评价指标,建立了珩磨油石寿命与珩磨压力、往复速度和油石粒度之间的响应模型,通过有效性和显著性检验,证明模型具有较高的可靠性。回归方程 F 分布值为 14.08,远大于 F 分布的临界值 3.32。而且模型的残差分布充分表明所建立的珩磨油石寿命响应回归模型能很好地拟合影响因素和响应值。

通过 Design-Expect 分析了珩磨油石的粒度、珩磨压力和往复速度对珩磨油石寿命的交叉影响。结果表明:由于各因素之间的相互影响,珩磨压力对油石寿命有显著影响,主要在于增大珩磨压力能加快油石的破碎与脱落,如磨屑不能及时排出会进入油石气孔中,造成油石堵塞,严重削弱油石的加工能力。

参考文献

- [1] 胡勤. 珩磨加工中珩磨油石对珩磨效率的影响及其微观机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- [2] Damir S Vrac, Laposava P Sidjanin, Pavel P Kovac, et al. The influence of honing process parameters on surface quality, productivity, cutting angle and coefficients of friction[J]. *Journal of Industrial Lubrication and Tribology*, 2012, 64(2): 77-83.
- [3] Zhang Yonggui, Niu Junkai, Yang Yongjiang, et al. Study on the influence factors of honing efficiency[J]. *Journal of Advanced Materials Research*, 2013, 655-657: 1204-1209.
- [4] 祝锡晶. 功率超声振动珩磨技术的基础与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [5] 潘琳. 高温合金深孔珩磨技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- [6] 谢瑜龙, 孙超, 张永振, 等. 碳含量对碳素钢磁场摩擦磨损性能的影响与作用机制研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(1): 99-108.
- [7] 李朝志, 付斌国, 刘金海, 等. 钛合金干滑动摩擦行为与磨损机理研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(31): 410-414.
- [8] 陈实, 张执南, 蔡晓江, 等. 磨削参数对工件表面形貌及其摩擦性能的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(5): 575-581.
- [9] 闫旭强. 基于硬脆材料微磨削的电镀金刚石微磨具磨损机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [10] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 电镀金刚石微磨具磨损机理分析与实验研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(11): 177-185.
- [11] 荆君涛, 刘运凤, 李占杰, 等. 旋转超声磨削加工中影响磨具寿命的结构参数优化[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 972-979.
- [12] 刘春景, 唐敦兵, 何华, 等. 基于响应曲面车削加工表面粗糙度稳健性分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(4): 520-525.
- [13] 张洪州, 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): 447-475.
- [14] 王谦. 面接触磨削材料去除机理与表面创成研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

第一作者: 宁会峰, 副教授, 兰州理工大学机电工程学院, 730050 兰州市

First Author: Ning Huifeng, Associate Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China