

曲面响应法预测干式切削温度的试验研究

李海峡¹, 杨华军¹, 李军¹, 吴杰¹, 陈立飞¹, 李祥增^{1,2}

¹森泰英格(成都)数控刀具股份有限公司; ²燕山大学机械工程学院

摘要:为适应清洁切削和绿色制造的相关政策,减少切削液对环境的污染,干式切削作为新型清洁加工技术而被广泛采用。本试验以干式切削中的切削温度为目标值,通过曲面响应法中的 Box-Behnken 设计分析法分析干式切削中切削速度、进给量和切削深度等参数对切削温度的影响,将切削温度设成响应值,建立其二次多项式数学模型,并结合有限元技术进一步分析切削速度、进给量和切削深度对切削温度的影响。分析结果表明:切削速度和切深对切削温度的影响显著,切削温度值几乎直接取决于切削速度和切深;该数学模型能够描述切削温度和切削速度、进给量以及切削深度之间的关系,并且可以对干式切削中的温度进行预测,为干式切削提供新的研究方法。

关键词:曲面响应法;干式切削;切削温度;预测模型

中图分类号: TG506; TG501.4; TH162.2 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.12.008

Experimental Study on Prediction of Dry Cutting Performance by Response Surface Methodology

Li Haixia, Yang Huajun, Li Jun, Wu Jie, Chen Lifei, Li Xiangzeng

Abstract: In view of the relevant policies of clean cutting and green manufacturing promulgated by the state in recent years, in order to reduce the pollution caused by cutting fluid to the environment, dry cutting is considered to be a new type of clean processing technology and is widely used. In this experiment, the cutting temperature in dry cutting is taken as the target value, and the influence of cutting speed, feed rate and cutting depth on cutting temperature in dry cutting is analyzed by Box-Behnken design and analysis method of response surface methodology. At the same time, the quadratic polynomial mathematical model of cutting temperature is established, and the cutting temperature is set as the response value to establish its mathematical model. Combined with finite element technology, the influence of cutting speed, feed rate and cutting depth on cutting temperature is further analyzed. The results show that the influence of cutting speed and cutting depth on cutting temperature is extremely significant, and the size of cutting temperature is almost directly determined by cutting speed and cutting depth. The mathematical model can describe the relationship between cutting temperature and cutting speed, feed rate and cutting depth, and can predict the temperature in dry cutting, providing a new research method for dry cutting.

Keywords: response surface methodology; dry cutting; cutting temperature; prediction model

1 引言

环境问题对人类社会的生存和发展有很大影响,人们对机械加工中造成的环境污染等问题愈发重视。绿色制造是当前较为流行的一种生产制造模式,主要关注资源的使用效率和对环境的影响。在传统机械切削过程中,对环境污染影响最大的是切削液,切削液中含有的添加剂等物质会对环境和操作者的健康造成很大危害。

干式切削作为新型加工工艺,在加工过程中产生的切屑清洁无污染,易处理回收,减少了对环境的

影响,同时能节约因切削液产生的支出,在一定程度上降低了加工成本。但干式切削也存在缺陷,由于无切削液,不能带走切削加工的热量,使刀具承受较大负荷,产生的大量切削热易造成刀具发生热变形。因此,干式切削时,在保证加工质量的同时降低切削温度以延长刀具的使用寿命是待解决的难题。

40Cr 合金结构钢具有良好的综合力学性能,广泛应用于汽车零部件,现有干式切削 40Cr 钢材的研究较少,切削用量对切削温度的影响缺少理论指导。本试验采用曲面响应法分析切削用量对干式切削温度的影响,通过车削试验验证结果的通用性,为研究干式切削提供了新的思路方法。

基金项目:制造基础技术与关键部件专项:航空航天典型材料零部件清洁切削成套技术及示范应用(2020YFB20105)
收稿日期:2021 年 9 月

2 干式切削试验

本试验中,使用的刀具材料为 YT15,由于其具有较高的硬度和耐磨性而被广泛用于切削加工钢类零件。加工参数为:后角 $\alpha_0 = 7^\circ$, 刀尖圆弧半径 $r = 0.8\text{mm}$, 主偏角 $k_r = 95^\circ$ 。工件材料为 40Cr 棒料,元素成分及力学性能分别见表 1 和表 2。

表 1 40Cr 中各元素成分 (%)

化学成分	C	Si	Mn	Cr
含量占比	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 1.1
化学成分	Ni	P	S	Cu
含量占比	≤0.3	≤0.035	≤0.035	≤0.03

表 2 40Cr 的力学性能

性能指标	抗拉强度 σ_b (MPa)	断面收缩率 ψ (%)	断后伸长率 δ_s (%)	调制后硬度 (HB)
数值	≥810	≥45	≥9	301 ~ 340

3 试验方案及分析

3.1 试验方案

试验时,将切削用量中的切削速度、进给量和切削深度作为响应因子,研究不同切削速度、进给量和切削深度对干式切削温度的影响,响应因子编码和水平见表 3。

表 3 影响因子编码及水平

因素	编码及水平		
	-1	0	1
切削速度 A (m/min)	100	125	150
切深 B (mm)	1.25	1.625	2
进给量 C (mm/r)	0.2	0.225	0.25

3.2 曲面响应法结果分析

应用曲面响应法设计 17 组试验点(见表 4),通过对数据进行回归响应曲面拟合得到切削温度关于切削速度、进给量和切削深度的回归方程数学模型,表示为

$$Y = 726.8 + 80A + 52.63B + 21.63C + 31AB - 6.5AC + 2.25BC - 14.28A^2 - 25.03B^2 - 33.52C^2 \quad (1)$$

式中, Y 为干式切削温度; A 为切削速度; B 为切深; C 为进给量。

切削温度回归方程模型方差分析结果见表 5。由表 4 和表 5 可知,通过曲面响应法拟合的数学模型可说明切削用量对干式切削温度的影响。由方差分析表可知,一次项对切削温度有极大的影响,而交互项和平方项对切削温度的影响程度低于一次项。该拟合模型的复相关系数平方 $R^2 = 0.9805$, 表示该数学模型可以指导 98.05% 的干式切削温度试验。

由表 5 可知,当失拟项 $P = 0.0676 > 0.05$, 表明该拟合模型的失拟程度不显著,模型稳定可靠,可以对切削温度进行预测。本次试验取显著水平 $\alpha = 0.05$, 在该显著水平下得到的模型检验项 P 值小于 0.05, 表明该因素影响显著,否则为不显著。通过分析表 5 可得:在切削温度 Y 的回归模型中,切削速度 A ($P < 0.0001 < 0.05$) 和切深 B ($P < 0.001 < 0.05$) 对模型的影响程度极为显著,在一定程度上可近似为切削温度值直接取决于切削速度和切削深度;而其他因素对切削温度的影响较为显著;其中交互项 AC 、 BC 和二次项 A^2 对切削温度的影响均不显著。

表 4 试验设计方案

序号	A	B	C	温度 Y
1	125	1.625	0.225	710
2	100	1.25	0.225	586
3	100	1.625	0.2	560
4	125	1.625	0.225	731
5	150	1.625	0.25	785
6	150	1.625	0.2	752
7	100	1.625	0.25	619
8	100	2	0.225	648
9	125	1.625	0.225	731
10	125	2	0.2	689
11	150	2	0.225	851
12	150	1.25	0.225	665
13	125	1.625	0.225	731
14	125	1.625	0.225	731
15	125	1.25	0.2	607
16	125	2	0.25	734
17	125	1.25	0.25	643

表 5 回归方程模型的方差分析

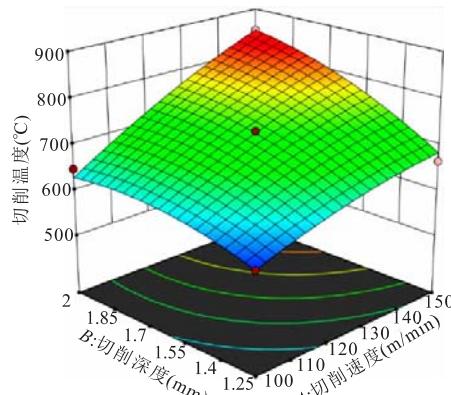
方差来源	平方和	均方	F	P 值(显著水平)	显著性
模型	90193	1×10^4	39.12	<0.0001	显著
A	51200	51200	199.88	<0.0001	
B	22155	22155	86.49	<0.0001	
C	3740	374	14.61	0.0065	
AB	3840	3844	15.01	0.0061	
AC	169	169	0.6598	0.4434	
BC	20.25	20.25	0.0791	0.7867	
A^2	858	858	3.35	0.1099	
B^2	2636	2600	10.29	0.0149	
C^2	4732	473	18.47	0.0036	
残差	1793	256			
失拟	1440	480	5.44	0.0676	
纯误差	352.80	88			
总回归	91986				

注:复相关系数平方 $R^2 = 0.9805$;修正相关系数平方 $Adjusted R^2 = 0.9554$ 。

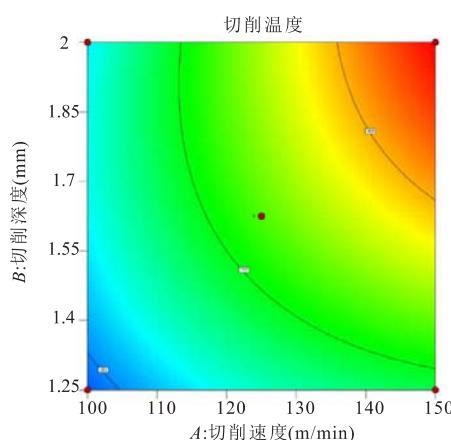
3.3 切削温度的曲面响应分析

在模型的曲面响应分析中,切削速度、进给量和切深对切削温度的影响如图 1 ~ 图 3 所示。

由图 1a 和图 1b 可知:当切削深度不变时,切削温度随切削速度的增加而增大;当切削速度不变时,切削温度随切削深度的增加先增大后趋于稳定。



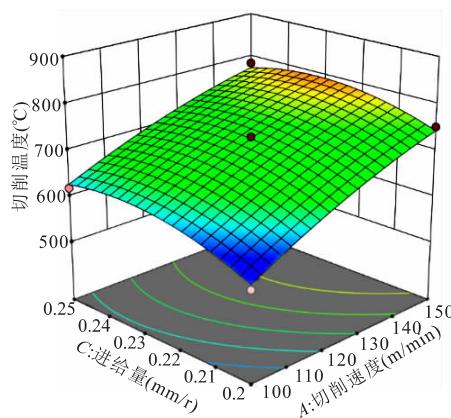
(a) 响应面立体图



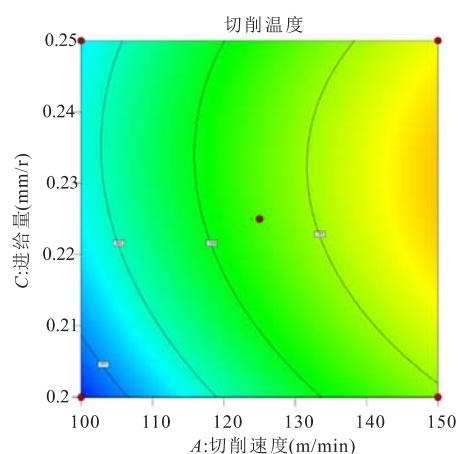
(b) 响应面等高线图

图 1 切削速度和切削深度对切削温度的影响

由图 2a 和图 2b 可知,在一定取值范围内,当进给量不变时,切削温度随切削速度的提高而增大;当切削速度不变时,切削温度随进给量的增加先增大后减小。



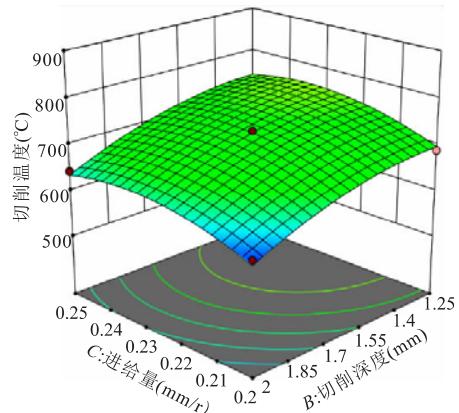
(a) 响应面立体图



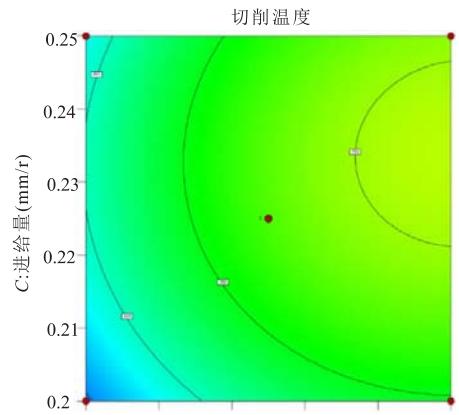
(b) 响应面等高线图

图 2 切削速度和进给量对切削温度的影响

由图 3a 和图 3b 可知,在一定取值范围内,当进给量不变时,切削温度随切深的增加而增大;当切深不变时,切削温度随进给量的增加先增大后减小。



(a) 响应面立体图



(b) 响应面等高线图

图 3 切削深度和进给量对切削温度的影响

3.4 模型验证

为校验模型的准确性,使用表 4 中的试验方案进行干式切削试验,得到的切削温度曲线见图 4。

实际切削温度围绕模型预测温度上下波动,误差不超过15%,说明该模型可预测干式切削温度。

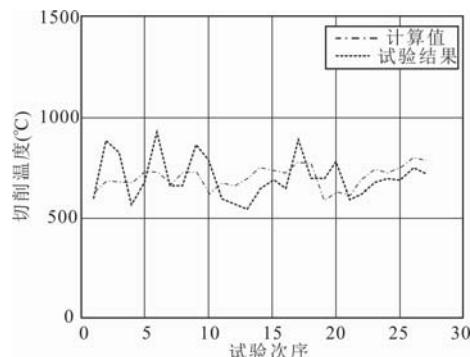


图4 实验温度与预测温度结果对比

4 结语

(1) 借助曲面响应法分析模型数据后可得,在进行干式切削加工时,当切削速度和切深一定时,可以使用较高的进给量进行加工,对切削温度的影响程度不显著。

(2) 结合曲面响应法拟合的干式切削温度预测模型能够全面分析各影响因素以及影响因素的交互作用对结果的影响程度,能够减少实际加工中试验时间以及成本,可以起到一定的指导作用。

参考文献

- [1] 张培耘,华希俊,王贵成,等. 基于绿色制造的清洁机械加工技术研究与发展[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版),2001,22(1):49-53.
 - [2] 孙立中. 清洁机械加工的应用研究[J]. 新技术新工艺,2015(2):1-3.
 - [3] 赵勇,王黎明,梁阔,等. 浅谈清洁生产审核在机械加工企业的应用[J]. 低碳世界,2018(9):283-284.
 - [4] 张程焱,王立新,俎晓莉,等. 高强铝合金干式切削加工参数多目标优化[J]. 机床与液压,2020,48(19):74-78.
 - [5] 张程焱,王立新,孟五洲,等. 7075-T6铝合金干式切削表面完整性研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(3):148-151.
 - [6] 刘磊,曹华军,李艳波. 绿色干式切削工艺性能综合评价方法[J]. 机电产品开发与创新,2019,32(4):45-48.
 - [7] 胡明哲. 干式切削加工技术的发展及应用[J]. 机床与液压,2019,47(13):179-185.
 - [8] K h Salman, Ammar H. Elsheikh, M. Ashham, et al. Effect of cutting parameters on surface residual stresses in dry turning of AISI 1035 alloy[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2019,41(8):1-12.
 - [9] Dennison Milon Selvam , M Abisha Meji, Umar Malik Mohamed. Data set collected during turning operation of AISI 1045 alloy steel with green cutting fluids in near dry condition[J]. Data in Brief,2020,32:106215.
 - [10] Surjeet Singh Bedi, Sarthak Prasad Sahoo, Vikas Bikkina, et al. Influence of cutting speed on dry machinability of AISI 304 stainless steel[J]. Materials Today: Proceedings,2020,38(8):2174-2180.
 - [11] Gobinda Chandra Behera, Jadam Thrinadh, Saurav Datta. Influence of cutting insert (uncoated and coated carbide) on cutting force, tool-tip temperature, and chip morphology during dry machining of Inconel 825[J]. Materials Today: Proceedings,2021,38(4):2664-2670.
- 第一作者:李海峡,高级工程师,森泰英格(成都)数控刀具股份有限公司,610207 成都市
- First Author: Li Haixia, Senior Engineer, CENTECH - EG Co. ,Ltd. ,Chengdu 610207, China