

注塑成型模具硬态铣削表面粗糙度研究

王凌云, 黄红辉

(上海工程技术大学 制造工程系, 上海, 200437)

摘要: 采用 AlTiN 涂层硬质合金球头立铣刀对 4Cr5MoSiV1 钢的注塑成型模具进行硬态高速铣削研究, 通过多因素法正交试验, 利用多元线性回归分析法建立模具硬态铣削的表面粗糙度预报模型, 经过现场加工实践检验其准确性。分析切削参数对模具零件的表面粗糙度的影响。研究表明: 在高转速、小切深及合适的进给速度下, 模具加工表面质量好, 为优化模具硬态铣削的切削参数和加工表面质量的控制提供了较好的依据。

关键词: 模具硬态铣削; 表面粗糙度; 参数优化

中图分类号: TH16; TH161⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2009)06-1604-05

Surface roughness of plastic mold parts in finish hard milling

WANG Ling-yun, HUANG Hong-hui

(Department of Manufacturing Engineering and Technology, Shanghai University of Engineering Science,
Shanghai 200437, China)

Abstract: Taking the hard milling of the plastic mold parts (cavity) as an example, using a hardened 4Cr5MoSiV1 steel and AlTiN coated carbide ball-end-milling tool, the empirical model of surface roughness was carried out with regressing analysis method and a multi-factorial orthogonal test, and the roughness of hard milling of the mold parts was predicted by the proposed model. The results show that better surface roughness can be attained by using higher spindle speed, appropriate feed rate, lower axial and radial depth of milling parameters, which provides the foundation for selecting cutting parameters properly and controlling surface quality of die and mold manufacture.

Key words: hard milling of mold parts; surface roughness regressing; parameters optimization

现代加工技术的发展以及高速加工中心、高性能的刀具夹持系统、安全可靠的高速切削 CAM 软件系统及超硬刀具材料的出现^[1], 使得以铣代磨、以铣代 EDM 进行高效、经济的模具加工成为可能。

在高淬硬钢件(HRC45~65)模具的加工过程中, 采用硬切削技术, 直接将淬硬钢一次装卡加工成形, 有效地避免了模具零件因多次装卡而造成的装夹误差, 提高了零件的几何位置精度。采用高速铣削可获得无铣痕的加工表面, 使零件表面质量大大提高。

表面粗糙度是评价零件加工质量的重要指标之一, 对机械产品的使用寿命和可靠性有重要影响。影响表面粗糙度的因素很多, 国内外研究人员所作的主要研究工作是: 建立表面粗糙度的预报模型, 探讨形成机理, 以实现对粗糙度的控制。如: Lee 等^[2-5]主要从切削过程变量方面进行分析, 提出了一种表面粗糙度模拟方法, 考虑到高速铣削中主轴振动对表面质量的影响, 用加速度信号代替切削力信号研究高速铣削表面粗糙度; Mizugaki 等^[3]用球头铣刀加工曲面轮廓

收稿日期: 2009-07-29; 修回日期: 2009-10-20

基金项目: 上海市教委科研创新项目(06NZ018); 上海工程技术大学科技发展基金资助项目(2008xy60)

通信作者: 王凌云(1963-), 女, 湖南湘阴人, 教授, 从事数控技术应用、先进制造技术、CAD/CAM 等方面的研究; 电话: 13501979635; E-mail: wanglyun16@sina.com

提出了一种新的曲面铣削的几何预测方法; Kim 等^[4]提出一种通过最大有效残留高度预测曲面铣削的粗糙度的方法。刘战强等^[6-10]主要从切削参数变量方面进行分析, 研究高速铣削铝合金、普通灰铸铁及 45 淬硬钢时铣削速度与进给量对加工表面粗糙度的影响; 苏宁等^[7]采用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)建立铝合金铣削加工表面粗糙度预测模型; 贾春德等^[11-12]从工件变量和刀具变量方面进行研究, 通过矢量分析, 建立正交车铣运动的矢量模型, 得出表面粗糙度的计算公式。

通过切削试验来探讨切削参数对高速加工表面质量的影响是目前加工表面粗糙度研究的主要手段。目前国内对淬硬钢模具高速铣削的研究较少^[13]。在此, 本文作者采用多因素法正交试验和回归分析方法, 建立模具零件加工表面粗糙度预报模型, 研究模具硬态铣削加工工艺参数, 并将其运用于模具实际生产中。

1 试 验

1.1 试验材料

试验材料为 4Cr5MoSiV1 钢^[14], 其化学成分如表 1 所示。

1.2 试验方法

采用多因素正交试验, 通过拟合、回归分析, 得到注塑成型模具零件加工表面粗糙度的经验预报模型。

模具加工主要有 3 种工艺: 软加工、硬加工和电加工, 根据模具的结构、硬度来决定所采用的工艺。本次试验用的模具采用在淬火后一次性铣成。

1.3 试验系统

试验中采用的刀具参数不变, 且加工系统处于稳定切削状态。刀具采用直径为 6 mm 的 AlTiN 涂层硬质合金双刃球头头立铣刀, 螺旋角为 30°; 表面粗糙度测量系统为 Mahr M1 便携式粗糙度仪(取样长度为 0.8 mm, 评定长度为 4 mm); 机床为 MAKINO 高速

立式加工中心 V33。采用牧野的高速主轴, 转速为 20 000 r/min, 快移速度为 20 m/min, 采用轴心冷却, 轴承内润滑方式, 由高速回转发生的热位移抑制为最小限度, 加工精度稳定。另外, 主轴和马达的转子为一体化的结构, 减小高速回转时的振动, 实现高品质的加工, 同时, 延长工具的使用寿命。

HSK 主轴利用刀柄的斜锥面 and 后端面同时与主轴紧密连接, 同时, 采用 1/10 的中空斜锥度设计保证了整个刀柄装卸的灵活性, 有效提高了重切削能力, 尤其在使用较长的刀柄加工时差别就更加明显。

试验工件是家用电器上一注塑件的模具型腔, 该模具产品的尺寸较小, 材料为 ABS, 结构如图 1 所示。型腔材料为 4Cr5MoSiV1 淬硬钢, 硬度(HRC)达 55, 采用侧浇口进胶, 定模型腔结构如图 2 所示。

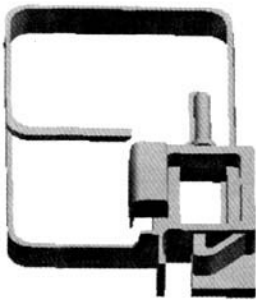


图 1 试件结构图
Fig.1 Drawing of mold product

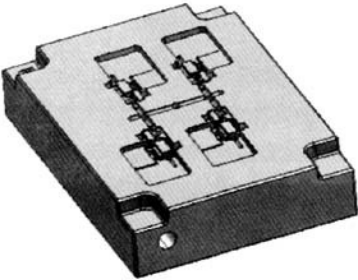


图 2 模具型腔图
Fig.2 Drawing of mold parts (cavity)

表 1 4Cr5MoSiV1 钢的化学成分
Table 1 Chemical compositions of 4Cr5MoSiV1 steel

标准	w/%								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	Ni
AISI 标准	0.32~0.42	0.81~1.20	≤0.40	4.50~5.50	1.00~1.50	0.80~1.10	≤0.03	≤0.03	
GB/T 1299—2000	0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	≤0.03	≤0.03	1.40~1.80

注: 临界点温度 t_{c1} =875 ℃, t_{c3} =935 ℃, t_s =305 ℃。

2 试验结果与分析

2.1 正交试验

按照 L16(4⁴)正交表共设计了 4×4 组试验, 4 个切削参数为主轴转速 n (r/min)、进给速度 v_f (mm)、轴向切削深度 a_p (mm)和径向切削深度 a_e (mm), 四水平则是 X1, X2, X3, X4。试验数据及表面粗糙度实测值如表 2 所示。表 2 中的切削参数是根据模具零件加工生产现场的高速精加工要求选取的, 以提高模具零件加工表面粗糙度预报模型的精度。

2.2 表面粗糙度的预测模型

在机床加工系统和刀具几何参数已确定的前提下, 可建立正交回归试验的通用模型为:

$$R_a = C_k a_p^{b_1} n^{b_2} v_f^{b_3} a_e^{b_4} \quad (1)$$

式中: R_a 为表面粗糙度; C_k 为加工材料、切削条件的系数; b_1 , b_2 , b_3 和 b_4 为待定指数。

对式(1)两边分别取对数得:

$$\lg R_a = \lg C_k + b_1 \lg a_p + b_2 \lg n + b_3 \lg v_f + b_4 \lg a_e \quad (2)$$

表 2 表面粗糙度实测值

Table 2 Surface roughness experimentation data

序号	a_p / mm	n / (r·min ⁻¹)	v_f / (m·min ⁻¹)	a_e / mm	R_a / μm
1	0.04	19 100	2.7	0.05	0.410
2	0.04	15 400	3.7	0.10	0.470
3	0.04	11 700	4.2	0.15	0.540
4	0.04	8 000	2.2	0.20	0.620
5	0.07	19 100	3.7	0.15	0.550
6	0.07	15 400	2.7	0.20	0.590
7	0.07	11 700	2.2	0.05	0.530
8	0.07	8 000	4.2	0.10	0.690
9	0.10	19 100	4.2	0.20	0.660
10	0.10	15 400	2.2	0.15	0.670
11	0.10	11 700	2.7	0.10	0.710
12	0.10	8 000	3.7	0.05	0.730
13	0.13	19 100	2.2	0.10	0.680
14	0.13	15 400	4.2	0.05	0.750
15	0.13	11 700	3.7	0.20	0.860
16	0.13	8 000	2.7	0.15	0.890

令 $y = \lg R_a$, $x_1 = \lg a_p$, $x_2 = \lg n$, $x_3 = \lg v_f$, $x_4 = \lg a_e$, $b_0 = \lg C_k$, 则有:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4$$

依多元线性回归模型:

$$\begin{cases} y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_k x_k + \varepsilon, \\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2), \end{cases}$$

用最小二乘法求出参数 b_0 , b_1 , b_2 , b_3 和 b_4 的估计 $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$, $\hat{b}_2$, $\hat{b}_3$ 和 $\hat{b}_4$ 。

建立多元线性回归方程:

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1 x_{11} + b_2 x_{12} + b_3 x_{13} + b_4 x_{14} + \varepsilon_1, \\ y_2 = b_0 + b_1 x_{21} + b_2 x_{22} + b_3 x_{23} + b_4 x_{24} + \varepsilon_2, \\ \vdots \\ y_{16} = b_0 + b_1 x_{161} + b_2 x_{162} + b_3 x_{163} + b_4 x_{164} + \varepsilon_{16}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: ε_i 为试验随机变量误差。

采用矩阵运算方法解正规矩阵方程组, 先引入矩阵

$$Y = Xb + \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{其中: } X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{161} & x_{162} & x_{163} & x_{164} \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{16} \end{pmatrix};$$

$$b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_4 \end{pmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{16} \end{pmatrix}.$$

根据矩阵运算可得:

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \quad (5)$$

则回归方程为:

$$\hat{y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + \hat{b}_3 x_3 + \hat{b}_4 x_4 \quad (6)$$

其中: $\hat{y}$ 为统计变量, $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$, $\hat{b}_2$, $\hat{b}_3$ 和 $\hat{b}_4$ 为回归系数, 可由式(5)求得。

根据表 2 中的试验结果, 采用 MATLAB 软件, 由式(3)~(6)计算得到上述试验条件下的表面粗糙度经验预测模型为:

$$R_a = 16.699 4 a_p^{0.379 3} n^{-0.281 6} v_f^{0.071 8} a_e^{0.097 5} \quad (7)$$

从式(7)可知: 提高切削速度能有效地减小工件表面粗糙度, 即主轴转速增大, 表面粗糙度减小; 而轴向切深、径向切深、进给速度增大, 粗糙度增大, 但增大的幅度不同, 表明影响程度各异。

2.3 表面粗糙度预测模型的应用

在一些家用电器产品的注塑模具零件的加工中,用式(7)中的表面粗糙度预报模型得到的预测值与工件表面粗糙度实测值相比较得出:该模型的预测精度达到 95.73%,表明所建立的模型具有较高的预测精度。

2.4 切削参数对表面粗糙度的影响分析

切削加工因素对表面粗糙度的影响如图 3~5 所示。由图 3 可知:当主轴转速较高、轴向切深较小时,区域表面粗糙度较小;当转速较低、轴向切深较大时,粗糙度较大,表面质量较差。在生产中高速精加工淬硬模具时,轴向切深为 0.04~0.08 mm 与转速为 19 000 r/min 是较好的组合。

由图 4 可知:较高转速与较小的径向切深区域表面粗糙度较小,当径向切深较大时,切削力增大、振动增加,粗糙度增大;而当径向切深取很小值时,

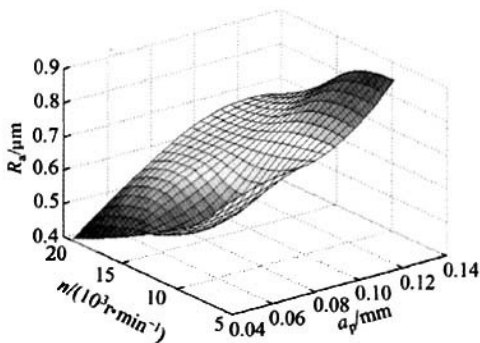


图3 主轴转速与轴向切深对粗糙度的影响

Fig.3 Influence of spindle speed and axial depth of cut on surface roughness

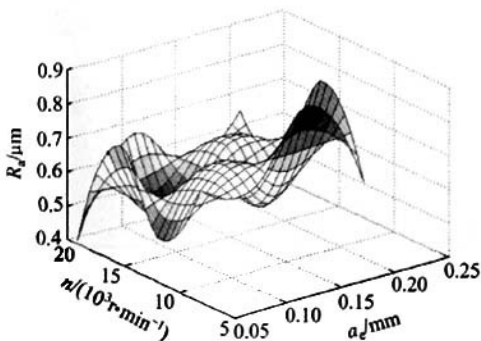


图4 主轴转速与径向切深对粗糙度的影响

Fig.4 Influence of spindle speed and radial depth of cut on surface roughness

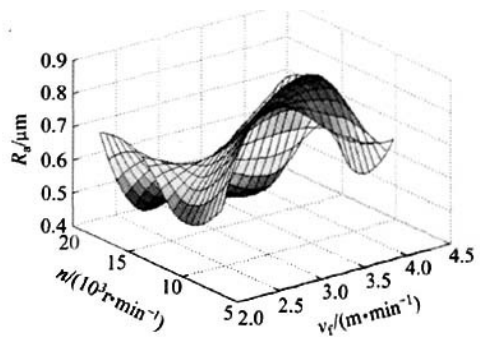


图5 主轴转速与进给速度对粗糙度的影响

Fig.5 Influence of spindle speed and feed rate on surface roughness

工件表面刀痕增多。

由图 5 可知:在低转速与较高进给速度的区域是表面粗糙度较大的区域;高转速与 2.7 m/min 进给速度附近的区域是表面粗糙度较小的区域。这是因为进给速度增大,工件表层易产生“撕裂”现象,表面粗糙度增大。

3 结 论

a. 采用多因素法,通过正交试验,利用多元线性回归分析,建立了淬硬钢 4Cr5MoSiV1 模具零件高速铣削的表面粗糙度的预报模型:

$$R_a = 16.699 4 a_p^{0.379 3} n^{-0.281 6} v_f^{0.071 8} a_e^{0.097 5}.$$

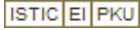
b. 在较高的主轴转速与较小的轴向切深及较小的径向切深区域,表面粗糙度较小;在机床转速高和进给速度为 2.7 m/min 时,模具表面粗糙度较大。利用预报模型对现场模具加工进行验证,表明其对模具加工表面质量的控制有较好的指导作用。

参考文献:

- [1] 艾 兴. 高效加工技术及其应用研究[J]. 中国工程科学, 2000, 11(2): 40~51.
AI Xing. Study on high efficiency machining technology and its applications[J]. Engineering Science, 2000, 11(2): 40~51.
- [2] Lee K Y, Kang M C, Jeong Y H, et al. Simulation of surface roughness and profile in high speed end milling[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 113(1/3): 410~415.

- [3] Mizugaki Y, Hao M, Kikkawa K. Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 69-72.
- [4] Kim B H, Chu C N. Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method[J]. CAD Computer Aided Design, 1999, 31(8): 485-494.
- [5] 李世杰, 孙立新, 郭兰申. 数控铣削中曲面加工的粗糙度预测[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(4): 35-37.
LI Shi-jie, SUN Li-xin, GUO Lan-shen. The forecasting of the roughness about NC milling of the surface[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2000, 29(4): 35-37.
- [6] 刘战强, 万 熠, 艾 兴. 高速铣削过程中表面粗糙度变化规律的试验研究[J]. 现代制造工程, 2002(3): 8-10.
LIU Zhan-qiang, WAN Yi, AI Xing. Experimental investigation on surface roughness of high-speed milling[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2002(3): 8-10.
- [7] 苏 宇, 何 宁, 武 凯, 等. 基于 ANFIS 的铝合金铣削加工表面粗糙度预测模型研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(6): 475-479.
SU Yu, HE Ning, WU Kai, et al. Prediction of surface roughness of milling aluminium alloy based on ANFIS[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(6): 475-479.
- [8] Lin W S, Lee B Y, Wu C L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 108(3): 286-293.
- [9] 陈曙光, 刘 平, 田保红. 切削表面粗糙度的人工神经网络预测[J]. 工具技术, 2005, 39(4): 30-32.
CHEN Shu-guang, LIU Ping, TIAN Bao-hong. Forecasting of artificial neural network on cutting surface roughness[J]. Tool Engineering, 2005, 39(4): 30-32.
- [10] 陈 涛, 刘献礼. PCBN 刀具硬态切削淬硬轴承钢 GCr15 表面粗糙度试验与预测[J]. 中国机械工程, 2007, 18(24): 2973-2976.
CHEN-Tao, LIU Xian-li. Surface roughness experiment and prediction in the hard turning of hardened bearing steel GCr15 using PCBN cutting tools[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(24): 2973-2976.
- [11] 贾春德, 姜增辉. 正交车铣运动的矢量建模及表面粗糙度的理论研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 152-159.
JIA Chun-de, JIANG Zeng-hui. Vector modeling of orthogonal turn-milling movement and theoretical analysis on roughness of surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(3): 152-159.
- [12] 黄雪梅, 王启义. 车削物理仿真工件表面质量模型的研究[J]. 机械, 2001, 28(5): 8-9.
HUANG Xue-mei, WANG Qi-yi. Study of workpiece surface toughness in turning physical simulation[J]. Machinery, 2001, 28(5): 8-9.
- [13] 夏 雨. 高速铣削淬硬钢的试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2006: 5-8.
XIA Yu. Experimental study of hardened steel milling[D]. Nanjing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics Astronautics, 2006: 5-8.
- [14] 闫 洁, 江开勇. 4Cr5MoSiV1 钢热轧辊的热处理工艺试验研究[J]. 重型机械, 2006, 1(3): 40-45.
YAN Jie, JIANG Kai-yong. Study on the heat treatment of 4Cr5MoSiV1 steel for hot mill rolls[J]. Heavy Machinery, 2006(3): 40-45.

注塑成型模具硬态铣削表面粗糙度研究

作者: [王凌云](#), [黄红辉](#), [WANG Ling-yun](#), [HUANG Hong-hui](#)
作者单位: [上海工程技术大学制造工程系, 上海, 200437](#)
刊名: [中南大学学报 \(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF CENTRAL SOUTH UNIVERSITY SCIENCE AND TECHNOLOGY](#)
年, 卷(期): 2009, 40(6)
被引用次数: 2次

参考文献(14条)

1. 刘战强;万熠;艾兴 [高速铣削过程中表面粗糙度变化规律的试验研究](#)[期刊论文]-[现代制造工程](#) 2002(03)
2. 李世杰;孙立新;郭兰申 [数控铣削中曲面加工的粗糙度预测](#)[期刊论文]-[机械设计与制造工程](#) 2000(04)
3. Kim B H;Chu C N [Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method](#) 1999(08)
4. Mizugaki Y;Hao M;Kikkawa K [Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling](#) 2001(01)
5. Lee K Y;Kang M C;Jeong Y H [Simulation of surface roughness and profile in high speed end milling](#) 2001(1/3)
6. 艾兴 [高效加工技术及其应用研究](#)[期刊论文]-[中国工程科学](#) 2000(02)
7. 陈曙光;刘平;田保红 [切削表面粗糙度的人工神经网络预测](#)[期刊论文]-[工具技术](#) 2005(04)
8. Lin W S;Lee B Y;Wu C L [Modeling the surface roughness and cutting force for turning](#) 2001(03)
9. 苏宇;何宁;武凯 [基于ANFIS的铝合金铣削加工表面粗糙度预测模型研究](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2005(06)
10. 闫洁;江开勇 [4Cr5MoSiV1钢热轧辊的热处理工艺试验研究](#)[期刊论文]-[重型机械](#) 2006(03)
11. 夏雨 [高速铣削淬硬钢的试验研究](#) 2006
12. 黄雪梅;王启义 [车削物理仿真工件表面质量模型的研究](#)[期刊论文]-[机械](#) 2001(05)
13. 贾春德;姜增辉 [正交车铣运动的矢量建模及表面粗糙度的理论研究](#)[期刊论文]-[机械工程学报](#) 2001(03)
14. 陈涛;刘献礼 [PCBN刀具硬态切削淬硬轴承钢GCr15表面粗糙度试验与预测](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2007(24)

引证文献(2条)

1. 王凌云, 黄红辉 [基于BP网络的注塑成型模具硬态高速铣削力研究](#)[期刊论文]-[中南大学学报 \(自然科学版\)](#) 2010(6)
2. 黄红辉, 王凌云 [注塑模具硬态高速铣削力研究](#)[期刊论文]-[制造技术与机床](#) 2010(12)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_zngydxxb200906024.aspx
授权使用: 湖南工学院(hngxy), 授权号: a64fa1db-4221-495e-b03d-9ef30110f208

下载时间: 2011年5月30日