

doi: 10.7690/bgzdh.2016.09.010

## 炮钢铣削力正交试验与数值仿真

任青剑<sup>1</sup>, 万宏强<sup>2</sup>, 王新宇<sup>2</sup>

(1. 陕西国防工业职业技术学院机电学院, 西安 710300; 2. 西安工业大学机电学院, 西安 710021)

**摘要:** 炮钢是一种重要的兵器材料, 为提高炮钢的加工精度及表面质量, 对切削条件与铣削力的影响规律进行研究。采用正交试验法探讨了各种因素对铣削力的影响规律, 建立了铣削力仿真模型, 得出了炮钢切削深度、切削速度及每齿进给量等 3 个切削参数的铣削力经验公式, 在加工中心上利用 9257B 型三向测力仪测量切削力信号, 并用数值计算的方法给出相同的铣削力分布数值。结果表明: 该铣削力仿真模型准确, 试验数据可信。该研究方法可为金属切削理论、材料的切削加工工艺性能和优化切削工艺性能等研究提供一定的参考。

**关键词:** 炮钢材料; 回归正交实验法; 方差分析; 数值计算

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Numerical Calculation and Orthogonal Experiments of Milling Force for Gun Steel Material

Ren Qingjian<sup>1</sup>, Wan Hongqiang<sup>2</sup>, Wang Xinyu<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics, Shanxi Defence Vocational & Technical College, Xi'an 710300, China;

2. School of Mechatronics, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Gun steel is an important weapons material. This paper studied the relationship between law cutting conditions and milling force, in order to improve the machining accuracy and surface quality of gun steel. The influence law of several factors on the milling force were discussed by orthogonal experiment method, and the simulation model of milling force are established. The milling force empirical formula is concluded, the formula contains cutting depth, cutting speed and every tooth feed. The cutting force is measured using a three-to-force measuring instrument 9257B at the machining center. The same milling force distribution data is given, using the method of numerical calculation. The results showed milling force simulation model is accurate and experimental data are credible. This research method has certain reference value to the research of metal cutting theory, material processing technology and the optimization of the cutting process.

**Keywords:** gun steel material; orthogonal regression experiment method; variance analysis; numerical calculation

### 0 引言

炮钢是兵器材料中的重要材料, 其性能水平直接关系到火炮威力及机动性的提高, 火炮身管材料要同时具备比例或屈服极限高、热强性高、高温耐磨和抗烧蚀等的特殊性能, 炮钢材料除具有一般合金结构钢的共同特点外, 还有更为严格的技术性能要求<sup>[1-2]</sup>。炮钢的切削加工质量和效率直接影响兵器的质量和成本, 切削过程涉及到弹性、塑性、断裂力学、热力学、摩擦学等学科, 研究需要进行大量的试验, 花费较高。采用数值模拟研究切削过程中的金属变形、应力应变及其温度分布等物理现象, 可以用较低的成本, 在较短的时间内获得较为丰富的数据, 对研究金属切削理论、材料的切削加工工艺性能和优化切削工艺性能等提供极大的帮助。

针对某型炮钢材料, 笔者采用正交试验法<sup>[3-4]</sup>,

通过试验分析各种因素对铣削力的影响规律, 并对铣削参数进行优化, 最后用数值计算的方法给出相同的铣削力及其温度分布数值<sup>[5]</sup>。

### 1 试验设备与材料

试验所用机床为 THA5656 型立式加工中心, 刀具为株洲牌硬质合金刀具, 硬度为 93HRA, 耐磨性好, 强度高, 红硬性较好, 抗塑性变形能力好, 能承受较大的冲击载荷, 采用对称铣削方式。试验工件材料为某炮钢, 其 $\sigma_p$ 为 965 MPa、 $\sigma_s$ 为 1 050 MPa、 $\sigma_b$ 为 1 190 MPa、硬度为 3.15 HWB。其化学成分如表 1 所示。

表 1 某炮钢化学成分

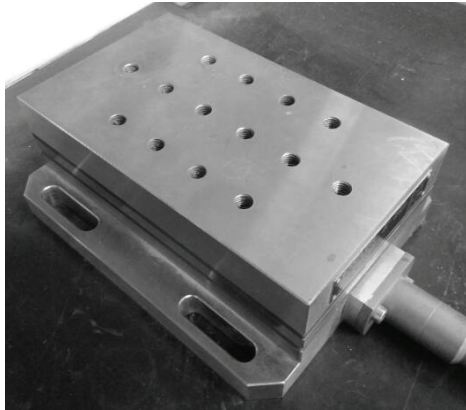
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	S	P
0.40	0.41	0.25	1.28	3.114	0.37	0.20	0.001	0.012

试验采用 KISTLER9257B 型三向测力仪, 搭配

收稿日期: 2016-05-07; 修回日期: 2016-06-20

作者简介: 任青剑(1960—), 男, 陕西人, 学士, 副教授, 从事机械设计与制造工艺研究。

5070A 信号放大器作为数据采集设备，配合终端 Dynoware 软件进行数据处理。本试验是将测力仪固定于机床上，再将工件固定于测力仪上，然后对工件进行铣削加工，产生的切削力将会由测力仪采集到经 5070A 信号放大器传到终端软件中。测试设备如图 1 所示。



(a) kistler9257B 型测力仪



(b) kistler5070A 型信号放大器

图 1 测试设备

## 2 铣削力正交试验

正交试验具有“均匀分散，齐整可比”的特点，是分式析因的主要方法，是一种高效率、低成本的试验设计方法。试验主要分析切削深度、切削速度及每齿进给量这 3 个主要因素，并对每个因素取 4 个水平，构成一个三因素四水平的正交试验，在前期进行了单因素多水平试验，得出了正交试验所需的数据范围，可得出正交试验水平表，如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平

水平	切削深度 $a_p/\text{mm}$	每齿进给量 $f/(\text{mm}/z)$	切削速度 $v/(\text{m}/\text{min})$
1	0.2	0.05	54
2	0.4	0.10	72
3	0.6	0.15	108
4	0.8	0.20	126

在试验过程中，主要分析各切削因素同切削力

的关系，其试验数据都是在刀具未发生明显损耗的情况下测量的。正交试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果

序号	组合	$F_x/\text{N}$	$F_y/\text{N}$	$F_z/\text{N}$
1	134	112	126	82
2	244	181	203	99
3	314	125	158	81
4	424	201	226	125
5	213	85	96	63
6	123	79	88	59
7	433	486	524	256
8	343	421	458	204
9	322	336	380	144
10	412	152	180	103
11	142	132	171	102
12	232	140	175	106
13	441	513	552	296
14	331	358	406	180
15	221	106	134	77
16	111	58	67	48

## 3 切削力的回归分析

对表 3 的数据进行回归研究，切削力与切削深度、切削速度和每齿进给量关系式为：

$$F = C \cdot K a_p^{b_1} \cdot f^{b_2} \cdot v^{b_3} \quad (1)$$

设  $CK=C_0$ ，式 (1) 可简化为：

$$F = C_0 a_p^{b_1} \cdot f^{b_2} \cdot v^{b_3} \quad (2)$$

对式 (2) 两边同取对数可得线性函数：

$$\ln F = \ln C_0 + b_1 \ln a_p + b_2 \ln f + b_3 \ln v \quad (3)$$

令  $\ln C_0=b_0$ ， $\ln a_p=x_1$ ， $\ln f=x_2$ ， $\ln v=x_3$ ，可得到线性回归方程：

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (4)$$

3 个自变量  $x_1, x_2, x_3$  和因变量  $y$  存在线性关系。这个检测里面共有 16 组，假如第 1 组自变量是  $x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}$ ；那么最终是  $y_1$ ，而且共有下列参数：

$$\left. \begin{matrix} x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, y_1 \\ x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, y_2 \\ \vdots \\ x_{16,1}, x_{16,2}, x_{16,3}, y_{16} \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

加入误差参数  $\varepsilon$ ，可由式 (5) 建立多元线性回归方程：

$$\left. \begin{matrix} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{1,1} + \beta_2 x_{1,2} + \beta_3 x_{1,3} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{2,1} + \beta_2 x_{2,2} + \beta_3 x_{2,3} + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ y_{16} = \beta_0 + \beta_1 x_{16,1} + \beta_2 x_{16,2} + \beta_3 x_{16,3} + \varepsilon_{16} \end{matrix} \right\} \quad (6)$$

式 (6) 写为矩阵形式可得：

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (7)$$

为了计算估计参数  $\beta$ ，采用最小二乘法，设  $b_0, b_1, b_2, b_3$  分别是  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  的最小二乘估计，则有回归方程：

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (8)$$

$b_0, b_1, b_2, b_3$  为回归系数。计算得：

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (9)$$

式中： $X^T$  为  $X$  的转换矩阵； $(X^T X)^{-1}$  为  $(X^T X)$  的逆矩阵。利用 Matlab 软件实现多元线性回归检测，公式为：

$$\begin{aligned} F_x &= 211.74a_p^{0.6094} \cdot f^{0.4832} \cdot v^{0.0664}; \\ F_y &= 485.54a_p^{0.6717} \cdot f^{0.4855} \cdot v^{0.0721}; \\ F_z &= 5964.35a_p^{0.5122} \cdot f^{0.9748} \cdot v^{0.2214}. \end{aligned} \quad (10)$$

对式 (10) 进行分析，计算出 Multiple R ( $R^2$ ) 分别为 0.92, 0.95, 0.96。Multiple R 表示多元线性方程的决定系数，是对预测值与方程拟合程度的指标。

对自变量与因变量进行  $F$  检测，以观察他们之间的相关程度。当  $F > F_{\alpha}(p, n-p-1)$  则表明多元线性方程的自变量与因变量的线性关系是显著的。由式 (10) 可得这 3 个方程的  $F$  值分别为 276, 88, 475，并且通过  $F$  分布表可知  $F_{\alpha}(p, n-p-1) = 3.49$ ；因此都通过了显著性检测，变量之间的关系是显著的。

## 4 切削三要素对切削力的影响

### 4.1 切削速度对切削力的影响

在试验及铣削力预测公式中发现，切削速度对主切削力影响不大。在试验的过程中可以发现，当在较小切削速度的情况下，切削过程比较平稳，切削时的噪音、振动都较为合理。但是当切削速度提升到 108 m/min 时，发现噪音变大，并且会伴有火星等现象。

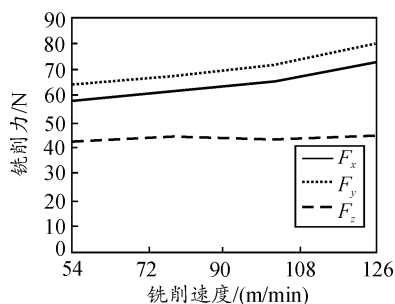


图2 切削力与切削速度的关系

由图 2 可知：在三向力中主切削力  $F_y$  最大，背向力  $F_x$  次之，最小的是  $F_z$  竖直方向的力。随着切削速度的增加，增速普遍比较缓慢，可以看出切削速度对切削力影响不是非常显著。

### 4.2 每齿进给量对切削力的影响

进给量与切削力的关系如图 3 所示。在进给量较小时，三向力差距并不大，但是随着每齿进给量

的增大，切削力也迅速增大，主切削力  $F_y$  和背向力  $F_x$  增大速度大于竖直方向上的力  $F_z$ ，并且由于切削面积的增大，后刀面与工件已加工表面的摩擦比较小的每齿进给量大很多。主切削力  $F_y$  和背向力  $F_x$  之间存在正比例变化的关系，一方会随着另外一方的变化而变化。

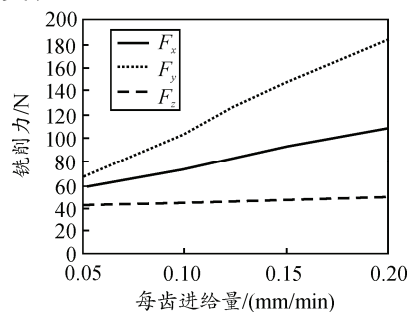


图3 切削力与进给量的关系

### 4.3 切削深度对切削力的影响

试验中测得的切削力随切削深度变化如图 4 所示。从图中可以看出：三向切削力都随着切削深度的增加而变大，而且增加幅度基本上属于线性的。在试验的过程中发现，当切削深度小于 0.4 mm 时切削状态较为稳定，随着切削深度的增加，当达到 0.8 mm 时，噪音变大，切屑的温度很高。当走刀 2 次之后，观察刀具发现，刀具磨损加快，前切削刃已经变形缺失。在正常切削加工中，考虑到刀具寿命等综合因素，不宜选择过大的切削深度，尽量控制在 0.4 mm 左右，这样可以保持在一个较低的切削力范围内，同时也会延长刀具的寿命。

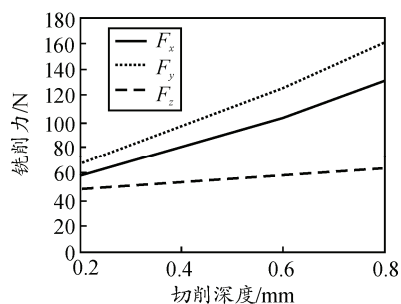


图4 切削力与切削深度的关系

## 5 验证性仿真

Deform-3D 属于立足有限元的物理仿真软件，主要的应用范围是金属成型以及热处理流程，其科学依据是经过变化的拉格朗日理论。Deform-3D 计算方法涵盖了领域内的大多数实际问题，可以考察热力耦合的非等温变形问题和三维变形。为了验证仿真模型正确与否，选用与试验铣削相同参数进行仿真，并将两者数据进行对比。以切削深度 0.2 mm、

每齿进给量 0.05 mm、切削速度 50 m/min 为例得出三向力数值为： $F_x=64$ 、 $F_y=76$ 、 $F_z=43$ 。经过与实际测得的值相对比， $F_x$  误差 11%、 $F_y$  误差 10.3%、 $F_z$  误差 13%。说明仿真结果与试验结果具有较好的一致性，由此确定的仿真模型比较可靠。

### 5.1 铣削速度对铣削力影响的仿真

仿真时，当铣削力随切削速度的提高而变化不大时，设置参数为切深 0.2 mm，每齿进给量 0.05 mm，以铣削速度为变量进行仿真，如图 5。

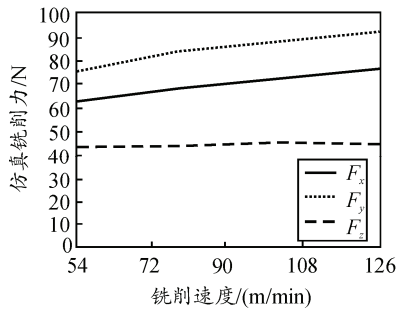


图 5 仿真铣削力随切削速度的关系

从图 5 中可以看到：随着切削速度的提高，铣削力的变化幅度呈越来越大的趋势，有可能是仿真软件没有考虑到材料的热软性而造成的。

### 5.2 每齿进给量对铣削力影响的仿真

本组试验尝试以较高的切削速度和每齿进给量进行。选择切深为 0.2 mm，铣削速度为 150 m/min，每齿进给量为变量进行仿真，结果如图 6 所示。

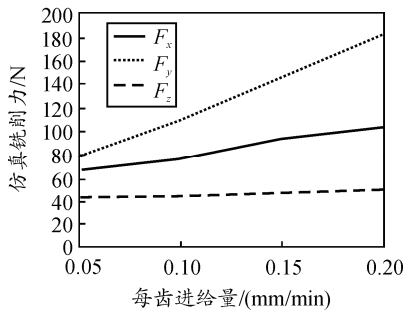


图 6 仿真铣削力与每齿进给量的关系

由图 6 可以看出：主切削力随进给量的增大而增大，其增长趋势基本为线性。进给方向同样随着每齿进给量的增大而增大，增长也是线性的。竖直方向上的力虽然也在增长，但是增长幅度明显较小。总体而言，仿真得出的三向力与每齿进给量的关系同试验所得的关系基本上是一致的。

### 5.3 切削深度对铣削力的影响

切削深度对铣削力影响较大，这组试验设定铣

削速度为 108 m/min，每齿进给量 0.1 mm/min，切削深度为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mm，得到如图 7 的关系。

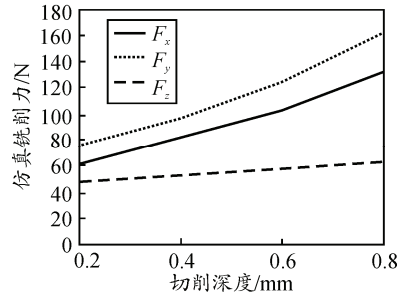


图 7 仿真铣削力与切削深度的关系

从图 7 可知：主切削力增长最为迅速，随着切削深度的增加，刀具受到非常大的力，进给方向上的力增加较为缓慢，没有主切削力增加效率高，竖直方向上的力变化较小。

## 6 结论

1) 通过铣削力仿真发现：对于铣削分力  $F_x$ ，影响最大的是铣削深度，其次是每齿进给量，最后是铣削速度；对于铣削分力  $F_y$  来说，影响最大的是每齿进给量，其次是切削深度，最后是切削速度；对于铣削分力  $F_z$ ，影响最大的是切削深度，其次是每齿进给量，影响最小的是铣削速度。综上所述：当选取较小的切削深度与每齿进给量，较高的铣削速度，可在得到较小的铣削力的同时保证加工效率。

2) 通过铣削力仿真结果与实际铣削结果的对比如分析可知，仿真结果与试验数据较为一致，从而验证了铣削力仿真模型的准确性<sup>[6]</sup>。

3) 通过仿真软件可以观测到在实际加工中无法观测的数据，为对研究机械加工领域提供了新的途径，并且可以在较低的成本下进行大量的试验，从而得到宝贵的参数以供学术研究。

## 参考文献：

- [1] 王毛球, 董瀚, 王琪, 等. 高强度炮钢的组织 and 力学性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(2): 7-10.
- [2] 郭峰, 黄进峰, 吴护林, 等. 高强韧性炮钢的组织 and 力学性能[J]. 金属热处理, 2005, 30(11): 35-38.
- [3] 时忠明, 李兴华, 汪通悦. 0Cr18Ni9 不锈钢铣削力的回归正交实验研究[J]. 机械设计与制造, 2013(8): 240-242.
- [4] 李锋, 刘维伟, 王东方. 基于田口法的不锈钢铣削参数优化研究[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(6): 28-31.
- [5] 王新宇, 万宏强. 浅析超高强度钢 30Cr3SiNiMoVA 高速铣削参数优化[J]. 机电信息, 2015(33): 86-87.
- [6] 张沛森, 李忠新. 高精度微孔镗削加工工艺的优化研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 808-811.