第36卷第6期 河北科技大学学报 Vol. 36, No. 6
2015年12月 Journal of Hebei University of Science and Technology Dec. 2015

文章编号:1008-1542(2015)06-0553-06 doi:10.7535/hbkd.2015yx06001

基于正交试验法的27SiMn钢车削力研究

刘良宝[1,2],孙剑飞[1,2],陈五一[1,2],王 威[3]

(1.北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;2.先进航空发动机协同创新中心,北京 100191;3.长治清华机械厂,山西长治 046000)

摘 要:为了研究难加工材料27SiMn钢的切削规律,采用硬质合金车刀,利用正交法对27SiMn钢进行切削实验,得到切削参数在一定范围内(切削深度:0.3~0.8 mm,进给量:0.08~0.2 mm/r,转速:200~400 r/min)与3个方向切削力的关系,结合线性回归方法得到三向切削力的经验模型。实验结果表明,切削深度对切削力的影响最大,其次是进给量,切削速度影响较小。切削深度和进给量对切削力的影响均是正相关,转速大于320 r/min时,切削力随着切削速度的增大而减小。显著性检验结果表明切削力经验公式高度显著。

关键词:切削加工工艺;27SiMn钢;正交试验;切削力;直观分析

中图分类号:TG5 **文献标志码**:A

Study on cutting force of turning of 27SiMn steel based on orthogonal experiment

LIU Liangbao[1,2], SUN Jianfei[1,2], CHEN Wuyi[1,2], WANG Wei[3]

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China; 3. Changzhi Qinghua Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046000, China)

Abstract: In order to explore the cutting laws of difficult-to-machine material 27SiMn steel, an orthogonal method is employed in its cutting experiment by using carbide tool. The relationship between cutting process parameters (when cutting depth is 0.3~0.8 mm, feed rate is 0.08~0.2 mm/r, and rotating speed is 200~400 r/min) and three dimensional cutting forces is revealed, and the empirical formulas of three dimensional cutting forces are deduced by using the linear regression method. Experimental results show that cutting depth is the most influential factor in cutting force, followed by feed rate and cutting speed. Cutting force is positively correlated with cutting depth and feed rate, but when rotating speed is over 320 r/min, the cutting force decreases. The cutting force effect of empirical formula is verified through significance test.

Keywords: cutting technology; 27SiMn steel; orthogonal experiment; cutting force; visual analysis

切削力对切削机理研究,功率消耗计算,刀具、机床、夹具的设计,切削用量的合理制定,刀具几何参数优化都有非常重要的意义。在切削加工过程中,切削力会引起切削热产生、刀具磨损和刀具变形等,最终影响

收稿日期:2015-06-17;修回日期:2015-09-15;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51305017);国家科技重大专项(2014ZX04001011);中央高校基本科研业务费专项;中国运载火箭技术研究院高校联合创新基金

作者简介:刘良宝(1985—),男,安徽巢湖人,博士研究生,主要从事整体结构件加工工艺方面的研究。

通讯作者:孙剑飞讲师。E-mail:sjf@buaa.edu.cn

刘良宝,孙剑飞,陈五一,等.基于正交试验法的27SiMn钢车削力研究[J].河北科技大学学报,2015,36(6):553-558.

LIU Liangbao, SUN Jianfei, CHEN Wuyi, et al. Study on cutting force of turning of 27SiMn steel based on orthogonal experiment[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(6): 553-558.

加工表面的完整性[1]。影响切削力的因素有工件材料、刀具材料、切削参数、切削液等[2-4]。

目前，常用的切削力模型主要包括基于单位切削系数的力学模型[5]、基于切削机理的物理模型[6-7]、基于人工智能的神经网络模型[8]以及基于试验的经验公式模型[9-10]。其中，经验公式模型是针对实验和数据回归分析建立起来的切削力模型，具有精度高、建模成本低等优点，对实际生产有指导帮助作用。

27SiMn热轧无缝钢管是机械、矿用液压油缸常用材料。与45钢相比，其硬度和强度较高，达到HRC 32～38，塑性和韧性相当，但导热系数低于后者，故在切削加工时塑性变形大，切削力大，加工硬化严重，不易断屑，属于难加工材料[11-12]。如果刀具材料、切削用量及刀具几何参数选择不合理，会导致刀具耐用度降低，加工效率下降。

本文通过27SiMn钢的切削力正交试验，研究了切削参数对切削力的影响规律，并结合实验数据的回归分析，得到了27SiMn钢的切削力经验公式。

1 实验设备及切削条件

实验机床：CA6140普通车床。

实验方案：本实验采用的是正交试验法[13-14]，结合实际切削参数，设计正交试验表，见表1。

表1 切削力正交试验表

Tab.1 Orthogonal experiment design of cutting force

实验序号	切削深度/mm	进给量/(mm·r^{-1})	转速/(r·min^{-1})	切削线速度/(m·min^{-1})
1	0.3	0.08	200	76
2	0.3	0.1	320	122
3	0.3	0.2	400	152
4	0.5	0.08	320	122
5	0.5	0.1	400	152
6	0.5	0.2	200	76
7	0.8	0.08	400	152
8	0.8	0.1	200	76
9	0.8	0.2	320	122

实验材料：27SiMn合金热轧制缸筒，直径Φ121 mm，壁厚5.5 mm，调制后HRC 34～38，见图1，化学成分按照国家标准GB/T 3077－1999，见表2。

刀具：刀片SVJCR2525M-16，刀杆VBMT160404-F2 TP2500，主偏角93°，前角0°，后角5°，刃倾角0°，刀尖角35°，副偏角52°。

测量仪器：实验所用测力仪参数见表3。

数据测量与处理软件：FAS-4D-3数据采集和处理系统。

图1 实验材料：27SiMn钢

Fig.1 Experimental specimen: 27SiMn steel

表2 27SiMn钢化学成分[15]

Tab.2 Chemical composition of 27SiMn steel[15]

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(S)	w(P)	w(Fe)
0.24～0.32	1.10～1.40	1.10～1.40	≤0.035～0.030	≤0.035～0.030	余量

表 3　测力仪参数

Tab. 3　Property of dynamometer

型号	采样频率/Hz	最大量程/N	灵敏度/(pC·N^{-1})
SDC－C4F 通用测力仪	60	F_x，F_y：0～2 500	F_z：0～4 500
	F_x，F_y：2.5	F_z：4.5	

2　实验过程和结果分析

实验现场及实验系统组成部分如图 2 所示。

如图 3 所示，工件通过三爪卡盘安装在车床上，测力仪安装在溜板箱上，以测力仪为基准坐标系，进给方向为 x 方向，切深方向为 y 方向，切削方向为 z 方向。

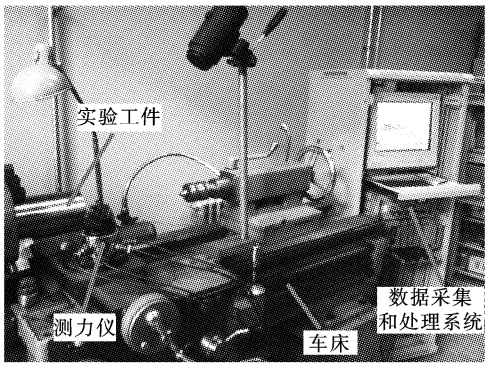

图 2　切削力实验现场

Fig. 3　Layout of experimental site for cutting force

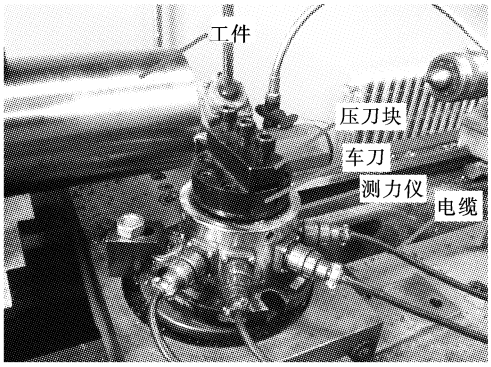

图 3　测力仪安装

Fig. 3　Fixture of dynamometer

小型缸筒外圆车削过程的切削力呈阶段曲线分布，选取最大值作为当前切削参数对应的切削力，全部实验结果见表 4，其中切削力 F_x，F_y，F_z 分别表示进给力、背向力和主切削力。从实验结果可以看出，主切削力 F_z 在数值上远大于其余 2 个方向切削力。

正交试验数据处理常用的方法有直观分析法和方差分析法。直观分析法计算简单，直观易懂，是常用的分析方法[16-17]。本文通过对正交试验结果进行直观分析，研究缸筒车削加工过程中切削参数和切削力之间的关系。各分力方向的直观分析结果如表 5—表 7 所示。其中 K_{IJ} 表示正交试验设计第 J 列上水平号为 I 的各因素实验结果之和，$\overline{K_{IJ}}$ 表示第 J 列因素取水平 I 时实验结果的平均值，R_J 是其所在因素的极差。

表 4　切削力正交测量结果

Tab. 4　Results of cutting force in orthogonal experiment

实验序号	F_x/N	F_y/N	F_z/N
1	46.72	103.98	120.66
2	60.13	125.89	132.93
3	71.49	150.54	180.44
4	114.13	158.23	204.50
5	120.49	171.55	222.45
6	149.53	217.18	368.19
7	189.79	189.22	305.22
8	202.26	206.35	371.22
9	238.02	211.29	536.85

表5 切削分力 F_x 直观分析表

Tab.5 Visual analysis of cutting force F_x

参数	切削深度/mm	进给量/(mm·r^{-1})	转速/(r·min^{-1})
K_{1J}	178.35	350.64	398.51
K_{2J}	384.14	382.88	412.28
K_{3J}	630.07	459.04	381.77
$\overline{K}_{1J}$	58.85	115.71	131.51
$\overline{K}_{2J}$	126.77	126.35	136.05
$\overline{K}_{3J}$	207.92	151.48	125.98
R_J	149.07	35.77	10.07

表6 切削分力 F_y 直观分析表

Tab.6 Visual analysis of cutting force F_y

参数	切削深度/mm	进给量/(mm·r^{-1})	转速/(r·min^{-1})
K_{1J}	380.41	451.43	527.50
K_{2J}	546.96	503.80	495.42
K_{3J}	606.86	579.01	511.31
$\overline{K}_{1J}$	125.53	148.97	174.08
$\overline{K}_{2J}$	180.50	166.25	163.49
$\overline{K}_{3J}$	200.26	191.07	168.73
R_J	74.73	42.10	10.59

表7 切削分力 F_z 直观分析表

Tab.7 Visual analysis of cutting force F_z

参数	切削深度/mm	进给量/(mm·r^{-1})	转速/(r·min^{-1})
K_{1J}	434.04	630.38	860.07
K_{2J}	795.14	726.60	874.28
K_{3J}	1213.29	1085.49	708.11
$\overline{K}_{1J}$	143.23	208.02	283.82
$\overline{K}_{2J}$	262.39	239.78	288.51
$\overline{K}_{3J}$	400.39	358.21	233.68
R_J	257.15	150.19	54.84

表5—表7直观分析结果均出现 $R_1>R_2>R_3$，表明在27SiMn小型缸筒车削过程中，3个因素对3个方向的切削力影响都是显著的，并且影响规律相同。对 x,y,z 方向切削力的影响程度由大到小为切削深度>进给量>转速。基于以上结论，对企业来说，在27SiMn钢的车削加工中，综合考虑生产效率和刀具耐用度，合理选用刀具和切削工艺参数具有了更可靠的依据。在工艺参数选择时，应该优先对切削深度进行优化，以最大幅度降低切削力。

分别以3个方向的切削力 F_x,F_y,F_z 作为实验指标，针对每个指标绘制趋势图，见图4。

图4表明，切削深度对进给力 F_x 和主切削力 F_z 影响比较明显，背向力 F_y 随着切削深度增加缓慢增长；进给力 F_x 和背向力 F_y 随着进给量提高增加幅度较小，而主切削力 F_z 增加明显，尤其当进给量大于0.1 mm/r时，F_z 增加幅度大大提高；切削速度对进给力 F_x 和背向力 F_y 影响不大，在转速小于320 r/min时，主切削力 F_z 几乎没有变化，但是大于320 r/min时，F_z 逐渐减小。

文献[18]研究了切削速度、进给量和切削深度对车削Cr12模具钢切削力的影响变化规律。结果表明，主切削力始终大于其他2个方向的分力；提高切削速度能减小切削力，而进给量越大，切削力也越大；在小切

深时，背向力大于进给力，随着切深的增加，进给力增加速度大于背向力。该研究结果与图 4 所得结论一致。

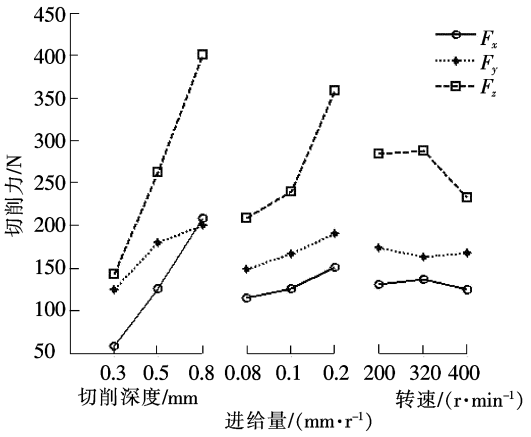

图 4　切削力随切削用量变化趋势图

Fig. 4　Trend chart of cutting force varying with cutting parameters

3　切削力经验公式回归分析

为了更直接地量化切削用量（切削深度、进给量和转速）对切削力的影响规律，在正交试验的数据基础上进行多元线性回归分析，建立 27SiMn 钢的车削力经验公式模型。

在金属切削中，利用指数公式计算切削力被广泛采用。常用的指数公式形式为[19-20]

$$F=Ca_p^m f^n v^k, \tag{1}$$

式中：C 为系数；m，n，k 为与切削深度 a_p、进给量 f 和转速 v 相关的指数。

对实验数据进行线性回归，得到 3 个方向切削力的指数经验公式，见式(2)—式(4)。

$$F_x=403.855\,4a_p^{1.300\,8}f^{0.318\,7}v^{0.075\,2}, \tag{2}$$

$$F_y=404.765\,6a_p^{0.489\,9}f^{0.271\,1}v^{0.007\,817}, \tag{3}$$

$$F_z=3\,202.868\,4a_p^{1.036\,5}f^{0.566\,0}v^{-0.133\,9}。 \tag{4}$$

为了验证所得经验公式的准确性，必须对 3 个方向切削力回归模型进行显著性检验。首先对 x 方向切削力回归模型进行显著性检验，F_x 方差分析结果如表 8 所示。

表 8　切削分力 F_x 回归模型的方差分析

Fig. 8　Variance analysis of regression model of F_x

变差来源	平方和	自由度	均方差	F
回归	2.59	3	0.86	103.66
剩余	0.04	5	0.008	

若取显著水平 $\alpha=0.05$，查 F 分布表可知：$F_{0.05}(3,5)=5.41$。从表 8 可得统计量 $F=103.66>17.51$，这说明式(2)表示的 x 方向切削力回归模型显著性明显，也说明了实验点的分散性比较低，经验公式与各实验点的拟合程度比较高。

同样，对 F_y，F_z 回归模型进行方差分析，统计量 F 分别为 13.34 和 369.43，均大于 $F_{0.05}(3,5)=5.41$，回归模型显著性明显，切削力经验公式(3)、公式(4)可靠性高。

4　结　论

通过正交试验法，研究车削过程中切削参数（切削深度：0.3～0.8 mm，进给量：0.08～0.2 mm/r，转速：200～400 r/min）对 27SiMn 钢切削力的影响规律。

1）对数据的直观分析发现，切削深度增加时，进给力和主切削力增长明显，背向力增长较缓慢；进给力和背向力随着进给量提高增加幅度较小，而主切削力增加明显，尤其当进给量大于 0.1 mm/r 时，增加幅度大大提高；转速对进给力和背向力 F_y 影响不大，在转速小于 320 r/min 时，主切削力 F_z 几乎保持不变，大于 320 r/min 时，逐渐减小。

2）基于多元线性回归分析建立 27SiMn 钢车削 3 个方向的切削力经验公式，经过 F 显著性检验后发现建立的经验公式线性高度显著。

参考文献/References：

[1]　陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京：机械工业出版社，2005.
CHEN Riyao. Theory of Metal Cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[2]　李宝灵，刘旭红，高中庸. 切削参数对切削力影响的实验分析[J]. 装备制造技术，2007(4)：1-2.
LI Baoling, LIU Xuhong, GAO Zhongyong. Experiment and analysis on the cutting force that influence by cutting parameters[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007(4): 1-2.

[3] 潘永智,艾兴,唐志涛,等. 基于切削力预测模型的刀具几何参数和切削参数优化[J]. 中国机械工程,2008,19(4):428-431.
PAN Yongzhi, AI Xing, TANG Zhitao, et al. Optimization of tool geometry and cutting parameters based on a predictive model of cutting force[J]. China Construction Machinery, 2008,19(4):428-431.

[4] 胡家国,杨志刚,李迎. 高速铣削铝合金切削力研究[J]. 工具技术,2003,37(11):33-36.
HU Jiaguo, YANG Zhigang, LI Ying. Research of aluminum alloy cutting force while high-speed milling[J]. Tool Engineering, 2003, 37(11):33-36.

[5] ALTINTAS Y, SPENCE A, TLUSTY J. End milling force algorithms for cadsystems[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1991,40(1):31-34.

[6] ARMAREGO E J A, DESHPANDE N P. Force prediction models and Cad/Cam software for helical tooth milling processes(Ⅲ): End-milling and slotting operations[J]. The International Journal of Production Research, 1994,32(7):1715-1738.

[7] LI H Z, ZHANG W B, LI X P. Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001,43(8):1711-1730.

[8] 胡创国. 薄壁件精密切削变形控制与误差补偿技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
HU Chuangguo. Deformation Control and Error Compensation in Precision Machining of Thin-Walled Parts[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

[9] 李艳聪,徐燕申,张连洪. 不锈钢立铣切削力实验研究及模型建立[J]. 制造技术与机床,2009(8):72-75.
LI Yancong, XU Yanshen, ZHANG Lianhong. Experimental study of stainless steel milling force and model establishing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(8):72-75.

[10] 仇健,李晓飞,马晓波. 硬质合金立铣刀高速铣削铝合金切削力实验研究[J]. 中国机械工程,2012,23(13):1555-1560.
QIU Jian, LI Xiaofei, MA Xiaobo. Experimental study of cutting forces on high milling aluminum alloy using carbide end mill[J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(13):1555-1560.

[11] 杨栋杰,刘雅政,周乐育,等. 热处理工艺对27SiMn钢力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2012,34(sup1):34-38.
YANG Dongjie, LIU Yazheng, ZHOU Leyu, et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of 27SiMn steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(sup1):34-38.

[12] 孟然,王贵成. 单体液压支柱活柱体精加工切削优化[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),1992,10(2):72-77.
MENG Ran, WANG Guicheng. The optimization in finishing of the moving pole of the single-body hydraulic pillar[J]. Journal of Jiamusi Institute of Technology, 1992,10(2):72-77.

[13] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010,27(9):52-55.

[14] 杨勇,朱卫卫,李明. 基于正交切削理论的航空钛合金切削加工本构模型构建[J]. 中国有色金属学报,2014,24(5):1259-1267.
YANG Yong, ZHU Weiwei, LI Ming. Construction of material constitutive model during cutting process for aeronautical titanium alloy based on orthogonal cutting theory[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5):1259-1267.

[15] 李安铭,王向杰,黄丽娟,等. 淬火工艺对27SiMn钢组织和性能的影响[J]. 矿冶工程,2007,27(4):80-82.
LI Anming, WANG Xiangjie, HUANG Lijuan, et al. Effect of quenching technology on the microstructure and properties of 27SiMn steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2007,27(4):80-82.

[16] 闫雪,陶华,高晓兵,等. 300M超高强度钢高速铣削切削力建模研究[J]. 机械强度,2008,30(5):860-863.
YAN Xue, TAO Hua, GAO Xiaobing, et al. Study on modeling of cutting force for 300M ultra-high-strength steel in high-speed milling process[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(5):860-863.

[17] 张建峰,贺成柱,侯力轩. 金属切削过程中切削热和切削温度场的仿真分析[J]. 机械研究与应用,2012(4):95-97.
ZHANG Jianfeng, HE Chengzhu, HOU Lixuan. Simulation analysis on cutting heat and temperature field in metal cutting process[J]. Mechanical Research & Application, 2012(4):95-97.

[18] 吴卫国,王贵成,沈春根,等. 精密车削Cr12模具钢的切削力研究[J]. 制造技术与机床,2007 (10):94-96.
WU Weiguo, WANG Guicheng, SHEN Chungen, et al. Experimental investigation of cutting forces in precision turning Cr12 die steel [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007(10):94-96.

[19] 惠记庄. 采用回归分析法建立切削力经验公式[J]. 西安公路交通大学学报,1996,16(4):102-105.
HUI Jizhuang. The cutting-force experience formulas established by means of regression analysis[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1996, 16(4):102-105.

[20] 陈恩平. 切削力经验公式的试验研究[J]. 燕山大学学报,2004,28(4):307-309.
CHEN Enping. Studies on empirical formula of cutting force[J]. Journal of Yanshan University, 2004,28(4):307-309.