

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.014

# 高精度微孔镗削加工工艺的优化研究

张沛森, 李忠新

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:**为解决使用微细切削技术加工微小型孔时存在的钻削孔表面质量差、孔轴线偏斜等问题,将镗削加工方法应用到微小型孔的加工中。通过选取合适的镗削工艺参数,定性地建立了镗刀尺寸、进给速度、转速与表面质量、尺寸精度之间的关系,优化了镗削加工的工艺参数,极大地改善了微小型孔的表面质量与加工精度。在具有较高强度的 3J33 马氏体时效钢上对钻削出的  $\Phi 2.7$  mm 小孔进行了镗削加工试验,测量并分析了镗削孔表面粗糙度与尺寸数据。实验结果表明,微细孔镗削加工比钻削加工更能够保证零件的尺寸精度、形状精度,并得到更好的表面质量。

**关键词:**镗削;微细切削;加工工艺

中图分类号:TH161

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0808-05

## Process optimization on boring's parameters in micro cutting

ZHANG Pei-sen, LI Zhong-xin

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the drilling such as poor surface quality, axes' decline when machining micro-holes by micro-cutting technology, the boring machining was investigated. After analysis of boring holes' quality, the relationship between boring cutters' sizes, feed speed, rotate speed and surface quality, dimensional accuracy were qualitatively established. Suitable parameter was presented to improve boring holes' quality. By boring  $\Phi 2.7$  mm holes on 3J33 maraging steel, surface roughness and sizes of these holes were measured and analyzed. The experimental results show that boring micro-hole can get better dimensional accuracy, form accuracy, and surface quality than drilling.

**Key words:** boring; micro-cutting; processing technic

## 0 引言

微小型化技术是 21 世纪重要技术之一,深刻地影响着科学进步和国防事业的发展,而随着各类微小型系统的不断发展及其应用领域的扩大,对于微小型结构件的需求种类和数量也逐年增加,微小型结构件往往具有微小的整体尺寸与较为复杂的特征,加工时要求较高的加工精度<sup>[1]</sup>。一般的钻削、铰孔等加工方法所加工的微小型孔表面质量较差,研磨加工效率较低,而镗削加工具有好的加工适应性和加工质量,并且有较高的加工效率<sup>[2]</sup>。

本研究通过对  $\Phi 2.7$  mm 小孔进行镗削加工,研究吃刀量、进给速度及刀具转速对镗削加工表面粗糙度和镗削后孔直径尺寸的影响,通过正交试验对工艺参数进行优化,加工出 IT6、 $Ra 0.2 \mu\text{m}$  的  $\Phi 2.9$  mm 孔,为科学、合理地制定微小型结构件的镗削加工参数提供参考。

## 1 微孔的镗削加工方法与试验条件

镗削加工是用镗刀对轮廓内径进行扩大的车削工艺,可以完成从半粗加工到精加工的加工要求。本次试验,首先通过钻孔得到一系列  $\Phi 2.7$  mm 的小孔,再使用插补算法对  $\Phi 2.7$  mm 钻削孔进行镗削加工,并对

加工得到的孔进行测量。

试验所用材料为 3J33 马氏体时效钢,在微小型构件中具有较高代表性,其基本性能为  $E = 180\ 000\ \text{MPa}$ 、 $G = 69\ 168\ \text{MPa}$ 、 $HRC = 42 \sim 55$ 、泊松比  $\nu = 0.3$ <sup>[3]</sup>,具有强度高,韧性好的特点。所用刀具为单刃镗刀,材料均为硬质合金,所用刀具如图 1 所示。

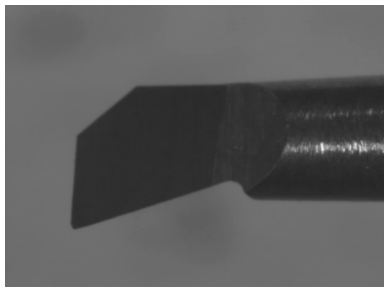


图 1  $\Phi 2.85$  镗刀 22.5 倍放大图

本研究所用机床为微小型车铣复合加工机床 KNC-50FS,如图 2 所示,其具有相互独立的三向动力主轴以及铣削电主轴,加工时试件固定,动力主轴完成进给运动,铣削电主轴带动镗刀转动进行镗削加工。



图 2 加工机床 KNC-50FS

加工得到孔的样件如图 3 所示。



图 3 小孔镗削加工样件

本研究使用万能工具显微镜 (19JPC-V) 分别测量了孔的两垂直方向尺寸 (单位: mm), 万能工具显微镜如图 4 所示, 测量精度达到  $1\ \mu\text{m}$ 。

笔者使用白光干涉仪 (Taylor Talysurf CCI) 对表面粗糙度检测进行测量, 测量结果如图 5 所示, 镗削加工表面粗糙度采用轮廓算术平均  $Ra$  值 (单位:  $\mu\text{m}$ )。

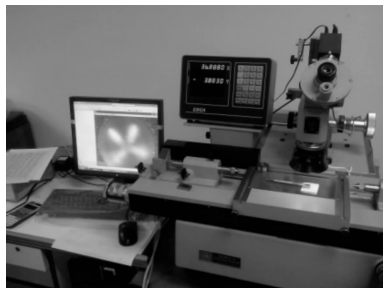
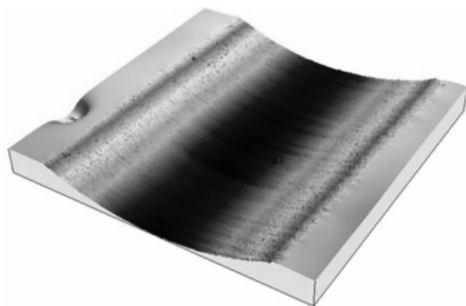


图 4 万能工具显微镜



ISO 4287					
	背景	Mean	Std dev	Min	Max
振幅参数 - 粗度轮廓					
$R_p$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	1.0015	0.4947	0.4666	3.7882
$R_v$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	0.9939	0.4003	0.5004	3.6870
$R_z$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	1.9954	0.7191	1.0886	5.7157
$R_c$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	0.7459	0.1631	0.4550	1.7533
$R_t$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	2.5119	1.2449	1.1442	8.6061
$R_a$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	0.2443	0.0317	0.1759	0.4226
$R_q$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	0.3228	0.0539	0.2332	0.6071
$R_{sk}$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	-0.1379	0.7261	-3.9003	2.9191
$R_{ku}$	$\mu\text{m}$ 高斯滤波: 0.25 mm	5.2352	4.4220	2.4659	37.1751

图 5 白光干涉仪输出数据

## 2 实验数据及分析

### 2.1 单因素变化试验

本研究使用悬深为 5 mm, 直径为  $\Phi 2.9\ \text{mm}$  的硬质合金镗刀, 对直径为 2.7 mm 的盲孔进行镗削加工的单因素试验。

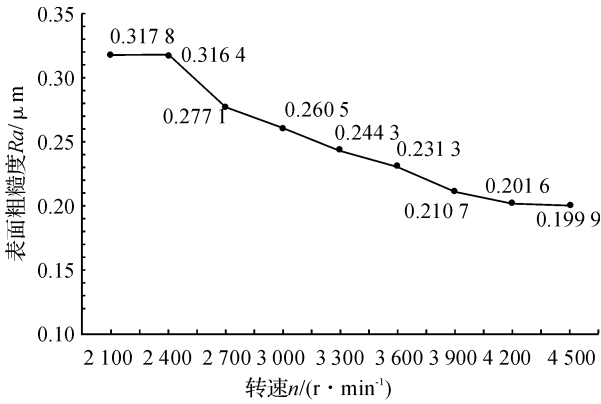
#### 2.1.1 转速对镗削后孔的尺寸以及表面粗糙度的影响

当进给速度为  $1.5\ \text{mm}/\text{min}$  时, 本研究测得刀具转速对镗削后孔尺寸和表面粗糙度的影响曲线如图 6 所示。

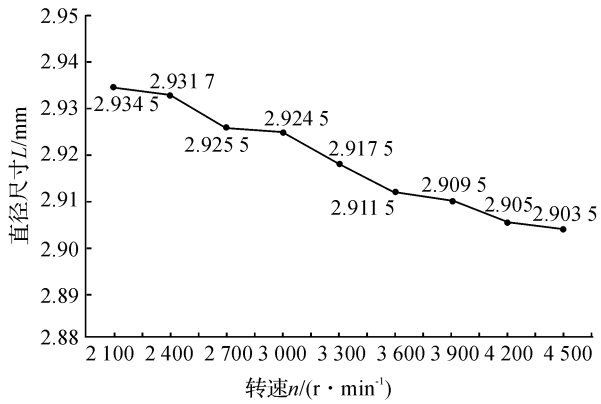
随着刀具转速的增加, 镗削表面的粗糙度  $Ra$  值减小 (如图 6(a) 所示), 并且所得到的孔的尺寸越接近理想尺寸  $\Phi 2.9\ \text{mm}$  (如图 6(b) 所示)。因为当进给速度一定时, 刀具转速与每转进给量成反比关系, 即加工单位长度的切削次数随着转速的增加而增加, 减少了镗刀挠性弯曲产生的加工误差, 并且切削力减小, 加工震颤降低, 提高了加工样件的表面质量<sup>[4]</sup>。但是随着刀具转速的提高, 产生大量的热, 容易造成刀具的损坏及不必要的损失, 并且随着转速的提高, 对表面质量和尺寸精度的改善越来越不明显<sup>[5]</sup>。

#### 2.1.2 进给速度对镗削后孔的尺寸以及表面粗糙度的影响

当刀具转速为  $4\ 500\ \text{r}/\text{min}$  时, 本研究测得进给速



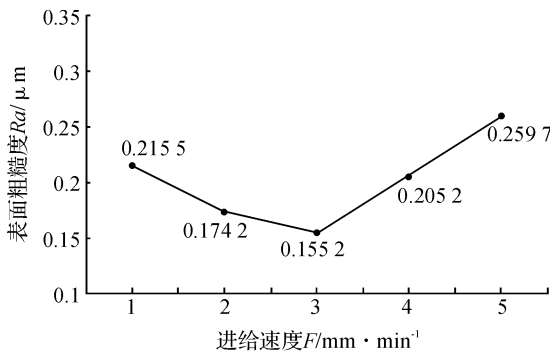
(a) 表面粗糙度随转速变化曲线



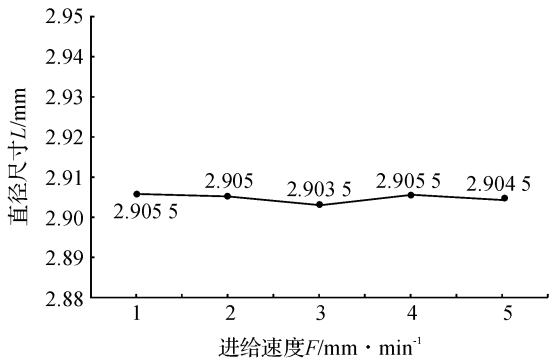
(b) 镗削后孔直径尺寸随转速变化曲线

图 6 转速对表面质量和加工精度的影响

度对镗削后孔尺寸和表面粗糙度影响的曲线如图 7 所示。



(a) 表面粗糙度随进给速度变化曲线



(b) 镗削后孔直径尺寸随进给速度变化曲线

图 7 进给速度对表面质量和加工精度的影响

进给速度的改变对镗削后孔直径尺寸的影响不大(如图 7(b)所示),但表面粗糙度随进给速度增加的先降低再升高(如图 7(a)所示)。当进给速度较低时,镗刀的每转进给量小,会对同一加工表面过度切削,延长了加工时间并易使表面被破坏;当进给速度较高时,镗刀的每转进给量会超过刀尖圆弧半径的作用范围,使表面不能被充分加工,甚至划出沟槽,使表面质量下降<sup>[6]</sup>。

在相关试验中,当刀具转速为 3 000 r/min 时,产生了类似的现象,最好的表面质量仍在进给速度为 3 mm/min 时取得,说明最佳进给速度与转速无关。

### 2.2 多因素对加工尺寸以及表面粗糙度的影响

实际加工过程中,不能只看单一因素对加工的影响,还要综合考虑各个因素间影响,从而选择最佳的切削参数,为比较各个因素对加工尺寸及表面粗糙度影响的大小,笔者用正交试验的方法对切削过程进行探究<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.2.1 正交试验方案设计

本研究选定的参数变量为刀具尺寸、进给速度、刀具转速,为三因素三水平试验,选用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交表设计正交试验。

所设计正交表如表 1 所示。

表 1 因素与水平表

水平	镗刀尺寸 (A)/mm	进给速度(B) /(mm·min <sup>-1</sup> )	转速(C)/(r·min <sup>-1</sup> )	其他(D)
1	Φ2.85	0.5	1 500	
2	Φ2.90	1	3 000	
3	Φ2.95	1.5	4 500	

#### 2.2.2 试验结果与分析

试验指标为表面粗糙度 Ra 值和镗削后盲孔直径尺寸 L<sub>x</sub>、L<sub>y</sub>。为使试验结果更可靠,每组实验均重复进行了 3 次,试验结果如表 2 所示。

表 2 正交试验结果

孔代号	A	B	C	D	表面粗糙度/ $\mu m$	X 方向孔径/mm	Y 方向孔径/mm
H01	1	1	1	1	1.1903	2.839 0	2.851 0
H02	1	1	1	1	1.127 2	2.839 5	2.850 0
H03	1	1	1	1	1.018 3	2.827 5	2.838 0
H04	1	2	2	2	1.070 6	2.839 0	2.844 0
H05	1	2	2	2	0.823 7	2.835 5	2.839 0
H06	1	2	2	2	0.722 2	2.827 5	2.822 0
H07	1	3	3	3	0.655 6	2.832 5	2.818 0
H08	1	3	3	3	0.617 0	2.833 5	2.835 0
H09	1	3	3	3	0.633 6	2.835 0	2.846 0
H10	2	1	2	3	0.322 2	2.899 0	2.901 0
H11	2	1	2	3	0.293 9	2.894 5	2.921 5
H12	2	1	2	3	0.161 4	2.892 0	2.907 0

(续表)

孔代号	A	B	C	D	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	X 方向孔径/mm	Y 方向孔径/mm
H13	2	2	3	1	0.212 6	2.893 5	2.908 0
H14	2	2	3	1	0.197 5	2.899 5	2.909 5
H15	2	2	3	1	0.236 4	2.898 0	2.898 5
H16	2	3	1	2	0.160 3	2.886 5	2.907 0
H17	2	3	1	2	0.260 6	2.895 5	2.907 5
H18	2	3	1	2	0.256 9	2.893 0	2.895 5
H19	3	1	3	2	0.759 3	2.936 5	2.931 0
H20	3	1	3	2	0.651 9	2.950 0	2.933 5
H21	3	1	3	2	0.595 1	2.955 5	2.927 5
H22	3	2	1	3	0.489 3	2.940 0	2.939 0
H23	3	2	1	3	0.294 7	2.945 0	2.937 5
H24	3	2	1	3	0.314 5	2.949 5	2.941 0
H25	3	3	2	1	0.457 3	2.930 5	2.915 0
H26	3	3	2	1	0.487 0	2.945 5	2.929 0
H27	3	3	2	1	0.531 7	2.933 0	2.923 0

为确定各因素的影响程度以及显著性,本研究对所得数据进行了极差分析和方差分析。对 27 组试验结果中表面粗糙度数据的极差分析和多次重复试验方差分析的结果分别如表 3、表 5 所示,对相同因素水平下所测量尺寸取平均值后的极差分析和多次重复试验方差分析<sup>[9]</sup>的结果分别如表 4、表 6 所示。

表 5 表面粗糙度方差分析表

差异来源	偏差平方和	自由度	均方	F	$F_{1-\alpha}$	显著性
A	1.852 90	2	0.926 45	55.794 6	$F_{0.01}(2,18) = 6.01$	大
B	0.274 95	2	0.137 48	8.279 4	$F_{0.05}(2,18) = 3.55$	大
C	0.017 08	2	0.008 54	0.514 4	$F_{0.10}(2,18) = 2.64$	小
误差	0.332 09	20	0.016 60			

表 6 加工孔直径尺寸方差分析表

差异来源	偏差平方和	自由度	均方	F	$F_{1-\alpha}$	显著性
A	0.046 17	2	0.023 085	599.610 4	$F_{0.01}(2,18) = 6.01$	大
B	0.000 6	2	0.000 3	7.792 2	$F_{0.05}(2,18) = 3.55$	大
C	0.000 03	2	0.000 015	0.389 6	$F_{0.10}(2,18) = 2.64$	小
误差	0.000 77	20	0.000 038 5			

### 3 结束语

本研究通过优化镗削加工参数,使得孔的加工尺寸精度可以达到 IT6 级精度,表面粗糙度  $Ra$  值可以达到  $0.2 \mu\text{m}$ 。与钻孔相比,镗削加工使孔表面质量显著提高, $Ra$  值降低  $0.8 \mu\text{m}$ ,形状误差得到改善。通过镗削加工试验及对所获得的数据进行分析,得出了如下结论:

(1) 镗削能达到较高的加工精度,表面粗糙度  $Ra$

表 3 表面粗糙度极差分析表

		A	B	C	D
$Ra$	K1	7.858 5	6.119 6	5.112 1	5.458 3
	K2	2.101 8	4.361 5	4.870 0	5.300 6
	K3	4.580 8	4.060 0	4.559 0	3.782 2
	R	5.756 7	2.059 6	0.553 1	1.676 1

表 4 测量尺寸极差分析表

		A	B	C	D
$L$	K1	8.508 7	8.682 3	8.680 3	8.671 3
	K2	8.701 2	8.677 7	8.666 3	8.671 0
	K3	8.810 3	8.660 2	8.673 5	8.677 8
	R	0.301 7	0.022 2	0.007 2	0.006 8

本研究由表 3、表 4 的极差分析,推断出切削参数对表面粗糙度和镗削后盲孔直径尺寸影响程度的排列顺序均为:所用镗刀尺寸 > 进给速度 > 转速。由表 5、表 6 的方差分析,推断出镗刀尺寸和进给速度对表面粗糙度  $Ra$  和镗削后孔尺寸  $L$  的影响显著。

本研究通过对表 2 的观察,发现 H04、H05、H06 有较好的表面质量和较理想的加工尺寸,此时均使用  $\Phi 2.90 \text{ mm}$  的镗刀进行镗削加工。镗削加工前孔的直径为  $\Phi 2.70 \text{ mm}$ ,认为单边  $0.1 \text{ mm}$  切削深度可以获得较好的加工效果。

值可达  $0.2$ ,可以达到生产加工的要求。铰孔加工时加工精度可达 IT6, $Ra$  值可达  $0.4$ ,但使用铰刀加工时存在无法加工非圆整孔、一把铰刀仅能加工一种尺寸、不适合加工高硬度的材料等不足。镗削加工具有较好的适应性,可以在克服上述不足,并取得较高的加工精度。

(2) 在对高强度、高韧性合金材料上的微小盲孔进行镗削加工时,切削深度对镗削质量的影响最大。因

(下转第 845 页)

本文引用格式:

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):808-811,845.

ZHANG Pei-sen, LI Zhong-xin. Process optimization on boring's parameters in micro cutting[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(6): 808-811,845.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>