

文章编号 1004-924X(2003)05-0477-04

# 通过轴向力监测预报微钻头折断的研究

杨兆军,杨永海,贾庆祥,王伟国

(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

**摘要:**对以轴向钻削力为监测对象的微孔钻削在线监测进行了研究。以 50 支直径为 0.4 mm 的高速钢麻花钻为样本,在数控高速精密微孔钻床上,对钻削 45# 碳素钢时微钻头折断的轴向钻削力极限值进行了检测。经参数估计和统计检验,得到轴向钻削力极限值服从对数正态分布的结论,并建立了基于可靠性的轴向钻削力监测阈值的确定方法。在此基础上选取不同可靠度水平进行了在线监测实验,与普通钻削比较,当选取可靠度水平为 0.999 时,在钻头利用率相同的情况下,10 支钻头的折断率由 30% 下降到 0,为避免发生微钻头折断这一长期困扰微孔加工的技术问题提供了一种良好的工艺方法。

**关键词:**微钻头;轴向钻削力;在线监测

**中图分类号:** TG506.5 **文献标识码:** A

## Prediction of micro drill break through thrust monitoring

YANG Zhao-jun, YANG Yong-hai, JIA Qing-xiang, WANG Wei-guo

(College of Mechanical Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** With 50 HSS twist drills of 0.4 mm in diameter used as samples on a CNC high speed precise drilling machine, limit thrust values of micro drill breaks were examined while No. 45 carbon steel was drilled. It is concluded from parameter evaluation and statistics that the limit thrust values obey the logarithm normal distribution law. The way of monitoring the threshold of thrust was also developed using the reliability theory. Experimental on-line monitoring was run at different reliable levels. When the reliable level selected was 0.999 and the drill utilization ratio was the same as that of in ordinary drills, the drill break ratio of 10 drills decreased from 30% to 0.

**Key words:** micro drill; drilling thrust; on-line monitoring

## 1 引言

微孔广泛应用于精密机械、电子电器和光学系统。随着机电产品的日益微型化和集成化<sup>[1-2]</sup>,微孔的加工数量越来越多。在加工微孔的各种方法中,钻削加工以其质量好、效率高的突出优点而占主要地位。但微钻头强度低,磨损后极易折断,成为微孔钻削加工的致命弱点。而且微钻头的寿命

(折断前的钻孔个数)分散性大,常达 10 倍以上<sup>[3-4]</sup>,何时折断难以估计。钻头折断后,嵌在工件中的部分难以取出,常造成工件报废。为避免折断,生产中主要采用强制换刀,在尚未达到平均寿命之前就不得不将钻头换掉,造成钻头的严重浪费。随着微孔加工需求的迅猛增长,特别是微孔自动化加工技术的日益发展,研究解决这一问题势在必行。磨损后钻削力增大是折断的主要原因,其中,轴向钻削力变化显著,且相对易于测量。

收稿日期:2003-05-09;修订日期:2003-08-01.

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 20010574)

若能寻找出微钻头折断时的轴向钻削力极限值,加工中对轴向钻削力进行在线监测,适时报警换刀,则可能避免折断。但由于钻头材质的不均匀和加工误差的影响,轴向钻削力极限值也不是一个常数,具有一定的分散性,所以进行在线监测首先必须探索出轴向钻削力极限值的分布规律,在此基础上再根据可靠性理论制订出具有一定可靠度水平的监测报警阈值,从而问题可望得到解决。

## 2 轴向钻削力极限值试验

### 2.1 试验条件

试验是在自行研制的数控微孔精密钻床上进行的,其主轴径向跳动为 0.001 mm,转速为 15 000 ~ 30 000 r/min,主轴进给运动的脉冲当量为 0.002 5 mm。轴向钻削力的测量采用的是自行研制的应变式微孔钻削测力仪,其轴向钻削力测量的灵敏度为 3.58 μ/N,量程 100 N。选用直径为 0.4 mm 的高速钢麻花钻头,取样本容量  $N = 50$ 。主轴转速为 15 000 r/min,进给量为 100 mm/min,工件材料为 1.5 mm 厚度的 45# 碳素结构钢。试验中由测力仪测得的力信号经 DPM-611 动态应变仪放大,然后由 MR-30C 磁带记录仪记录,再由 CF-250FFT 分析仪做数据处理并给出力值。对每一支钻头均从钻第一个孔时开始记录,直至钻头折断时止,取折断前 0.5 mm 钻削长度上的轴向钻削力平均值为轴向钻削力极限值。

### 2.2 试验结果

在上述试验条件下,随机取 50 支钻头进行轴向钻削力极限值试验,得到样本观测值  $n$ ,并对其从小到大进行重新排序,得到了表 1 所示的次序

表 1 轴向钻削力极限值次序统计量

Tab. 1 Order-statistics variables of the limit value of drilling thrust (N)

$i$	$n_i$	$i$	$n_i$	$i$	$n_i$	$i$	$n_i$
1	37.5	11	41.0	21	42.4	31	43.0
2	38.6	12	41.2	22	42.6	32	43.1
3	39.7	13	41.2	23	42.7	33	43.2
4	39.9	14	41.4	24	42.7	34	43.3
5	40.0	15	41.5	25	42.7	35	43.3
6	40.0	16	42.5	26	42.8	36	43.4
7	40.0	17	41.7	27	42.9	37	43.5
8	40.1	18	41.9	28	42.9	38	43.5
9	40.4	19	42.0	29	42.9	39	43.6
10	40.8	20	42.3	30	43.0	40	43.7

统计量  $n_i$ 。根据表 1 中的数据得到了图 1 所示的轴向钻削力极限值频率直方图,同时可得到式 (1) 所示的经验分布公式。

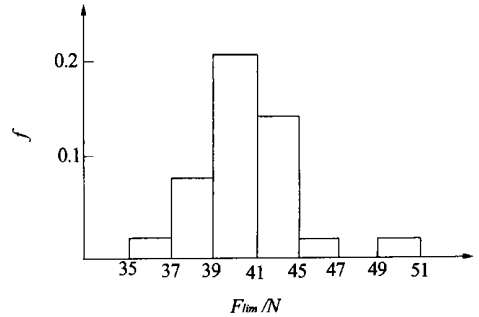


图 1 轴向钻削力极限值的频率直方图

Fig. 1 Straight-square drawings of frequencies of the limit values of drilling thrust

$$F_N(n_i) = \begin{cases} 0 & n < n_1 \\ \frac{i}{N} & n_i < n_{i+1} \\ 1 & n = n_N \end{cases}, \quad (1)$$

## 3 轴向钻削力极限值分布函数拟合

### 3.1 分布函数的拟合

由图 1 可见,轴向钻削力极限值呈峰值型分布,形状近似正态分布或对数正态分布,不妨同时作出服从上述两种分布的假设,通过参数估计分别拟合出分布函数,然后再通过统计检验确定出其真实的分布函数。

正态分布的数学模型为

$$F_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(n - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt, \quad (2)$$

其中需要估计的参数是均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$ ; 对数正态分布的数学模型为

$$F_i(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln n - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right] dt, \quad (3)$$

其中需要估计的参数是对数均值  $\mu_l$  和对数方差  $\sigma_l^2$ 。

按正态分布的参数估计公式求得  $\mu$  和  $\sigma^2$  的无偏估计值为:

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = 42.6 \\ \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu - n_i)^2 = 2.21^2, \end{cases} \quad (4)$$

按对数正态分布的参数估计公式求得  $\mu_l$  和  $\sigma_l^2$  的无偏估计值为

$$\begin{cases} \mu_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln n_i = 3.75 \\ \sigma_l^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_l - \ln n_i)^2 = 0.0511^2, \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)分别代入式(2)和式(3),即可分别得到按上述两种假设拟合出的分布函数。

### 3.2 分布函数的检验

采用柯尔莫哥洛夫检验方法<sup>[5]</sup>,其基本原理如下:对某种分布的检验,先计算检验统计量  $D_N$

$$D_N = \max\{d_i\}$$

式中  $d_i$  是拟合分布与经验分布的极差最大值

$$d_i = \max \left| F(n_i) - \frac{i-1}{N}, \frac{i}{N} - F(n_i) \right|$$

选取显著性水平  $\alpha$ ,查表得出检验临界值  $D_{N,\alpha}$ ,若  $D_N < D_{N,\alpha}$ ,则在显著性水平  $\alpha$  下接受假设的分布函数。若假设的两种分布函数均被接收,则以  $D_N$  最小者为更接近真实的分布函数。

根据这一检验原理,计算得到假设正态分布时的检验统计量  $D_{Nn} = 0.146$ ;对数正态分布时的检验统计量  $D_{Nl} = 0.137$ 。选取  $\alpha = 0.20$ ,根据柯尔莫哥洛夫检验临界值表<sup>[5]</sup>查得  $D_{50,0.20} = 0.148$ 。显然,  $D_{Nl} < D_{Nn} < D_{50,0.20}$ ,表明轴向钻削力极限值服从对数正态分布。将式(5)中对数正态分布的参数估计值代入式(3)得

$$F_l(n) = \frac{1}{0.0511 \sqrt{2}} \int_0^n \frac{1}{n} \exp \left[ -\frac{(\ln n - 3.75)^2}{2 \times 0.0511^2} \right] dn, \quad (6)$$

上式为微钻头轴向钻削力极限值的分布函数。

## 4 轴向钻削力的在线监测

### 4.1 监测阈值的确定

根据可靠性理论,由式(8)可得到微钻头不发生折断的可靠度函数  $R(n)$  与失效分布函数亦即微钻头的轴向钻削力极限值分布函数  $F_l(n)$  的互补关系为

$$R(n) = 1 - F_l(n)$$

式(6)代入上式得

$$R(n) = 1 - \frac{1}{0.0511 \sqrt{2}} \int_0^n \frac{1}{n} \exp \left[ -\frac{(\ln n - 3.75)^2}{2 \times 0.0511^2} \right] dn \quad (7)$$

令

$$Z_R = \frac{\ln n_R - 3.75}{0.0511}$$

则式(7)化为标准正态分布函数的补函数

$$R(n) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{Z_R}^{\infty} \exp\left(-\frac{Z_R^2}{2}\right) dZ_R, \quad (8)$$

同时得到与可靠度水平  $R$  相对应的可靠轴向钻削力函数  $n_R$  的估计值为

$$\hat{n}_R = \exp(3.75 + 0.0511 Z_R), \quad (9)$$

将式(8)和式(9)联系起来,给出一个可靠度  $R$  值,则由式(8)和标准正态分布表即可得到与之对应的  $Z_R$  值,再由式(9)即可得到具有可靠度水平  $R$  的可靠轴向钻削力,也就是用于报警换刀的监测阈值  $\hat{n}_R$ 。

### 4.2 在线监测实验

实验条件与前述的轴向钻削力极限值实验时相同,在线监测实验时将轴向钻削力监测阈值预先存入 AI708 人工智能显示报警器,动态应变仪输出的轴向钻削力信号亦直接送入 AI708,经其比较,达到阈值时向机床数控系统报警,停止钻削,更换钻头。

表 2 普通钻削实验

钻头序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钻孔个数	38	12	25	9	17	21	24	33	19	48
合计钻孔个数	246									
钻头折断个数	10									

实验分为 3 组,每组均随机抽取 10 支微钻头。第 1 组为普通钻削实验,即不进行在线监测,钻头全部钻削至折断为止,每支钻头钻孔个数的实验结果见表 2。第 2 组和第 3 组为在线监测实验,其中第 2 组取可靠度  $R$  为 0.999,则监测阈值  $\hat{n}_R$  为 35.1 N,实验结果见表 3。第 3 组取  $R$  为 0.900,则  $\hat{n}_R$  为 39.8 N,实验结果见表 4。

表 3 在线监测钻削实验 ( $R = 0.999$ ,  $n_R$  为 35.1 N)

Tab. 3 Experiments of on-line monitoring drilling ( $R = 0.999$ ,  $n_R = 35.1$  N)

钻头序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钻孔个数	24	17	26	22	7	18	32	23	12	15
合计钻孔个数	196									
钻头折断个数	1									

表 4 在线监测钻削实验 ( $R = 0.900$ ,  $n_R = 39.8$  N)

Tab. 4 Experiments of on-line monitoring drilling ( $R = 0.900$ ,  $n_R = 39.8$  N)

钻头序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钻孔个数	13	8	40	14	28	16	17	25	20	36
合计钻孔个数	217									
钻头折断个数	2									

根据实验结果,可以从提高微钻头利用率和避免微钻头折断两个方面来对比分析轴向钻削力在线监测的工艺效果。

首先看钻头的利用率。假设普通钻削和在线监测钻削都不允许发生钻头折断,普通钻削时取最有利的情况,即每支钻头钻 9 个孔后换掉,则 10 支钻头合计钻孔 90 个;在线监测钻削时取监测阈值为 35.1 N,合计钻孔 196 个,钻头利用率提高 118%。同理,假设普通钻削和在线监测钻削都允许 2 支钻头折断,则普通钻削每支钻头应在钻 17 个孔后换掉,则 10 支钻头合计钻孔 159

个;在线监测钻削时取监测阈值为 39.8 N,合计钻孔 217 个,钻头利用率提高 36%。

其次看避免钻头折断的效果。当 10 支钻头合计钻削 186 个孔时,普通钻削应在每支钻头钻削 19 个孔后才能换掉,则会有 3 支钻头折断,折断率为 30%,而在线监测钻削未发生折断。当 10 支钻头合计钻削 217 个孔时,普通钻削应在每支钻头钻削 22 个孔后才能换掉,则最少会有 5 支钻头折断,折断率 50%;而在线监测钻削时折断 2 支,折断率下降到 20%。

## 5 结论

(1) 微钻头的轴向钻削力极限值具有分散性,在实验条件下其分散规律服从对数正态分布。

(2) 轴向钻削力在线监测技术既可避免或减少微钻头的折断,又能提高微钻头的利用率,是提高钻削加工水平的良好工艺方法。

(3) 轴向钻削力在线监测阈值是一个与监测可靠度水平相关的变量,可靠度水平高则监测阈值减小,减少甚至避免微钻头折断的效果显著,但提高微钻头利用率的效果相对下降;反之亦然。采用这项技术时,应根据钻头与工件的相对价值和工程具体情况确定可靠度水平的高低。

## 参考文献:

- [1] 李勇,郭旻,周兆英. 特种微型机械加工技术[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 287-291.  
LI Y, GUO M, ZHOU ZH Y. Overview of non-traditional micromachining technologies [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 287-291.
- [2] 李旻,张亚男,龚振邦. 微小机器人的移动方式[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(4): 303-308.  
LI M, ZHANG Y N, GONG ZH B. Locomotion methods of mobile microrobots [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 303-308.
- [3] YANG ZH J, LI W, CHEN Y H. Study for increasing micro-drill reliability by vibrating drilling [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1998, 61(3): 229-233.
- [4] YANG ZH J, CHEN Y H, YANG Y H. Study on the life distribution of micro-drill [J]. *Journal of Engineering Manufacture Proceedings Part B*, 2002, 216(B3): 301-305.
- [5] 王超. 机械可靠性工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992.  
WANG CH. *Reliability engineering of machinery* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.

作者简介:杨兆军(1956-),男,吉林长春人,吉林大学教授、博士生导师,现从事机械制造新技术和精密加工方面的研究。