

基于田口法与响应曲面法的枪钻深孔加工圆度误差分析

申浩,李耀明,任丽娟,张煌,廖科伟

山西省深孔加工工程技术研究中心

摘要: 为了研究枪钻深孔加工中加工参数对孔圆度误差的影响,对枪钻加工切削参数进行优化。本文提出了一种基于田口法的参数优化方法,着重研究不同转速、进给速度和加工深度对孔圆度形貌的影响。并通过对比实验研究,分析加工孔圆度误差的优劣,从而确定优选的加工条件范围。通过对各因素信噪比极差值的求解,确定不同加工参数对孔圆度误差的影响程度,通过响应曲面法得出加工参数最优范围,实现了提高枪钻深孔圆度及加工的目的,为控制因素的分析 and 切削参数的优化研究提供了新的思路。

关键词: 深孔加工;枪钻;圆度误差;田口法;响应曲面法;加工参数

中图分类号: TG501;TH162

文献标志码: A

Roundness Error Analysis of Gun Drilling Deep Hole Machining Based on Taguchi Method and RSM

Shen Hao, Li Yaoming, Ren Lijuan, Zhang Huang, Liao Kewei

Abstract: In order to study the influence of processing parameters on roundness in deep hole drilling, and to optimize the parameters of processing parameters, a parameter research method based on Taguchi method is proposed. The analysis of rotation speed, feed speed and processing depth are carried out. Through the comparative and analysis of the roundness, the best condition is determined. The influence degree of every factors on the roundness is determined by the range of signal-to-noise ratio and the optimal range of the parameter is defined by RSM. The purpose of improving the roundness is achieved and a new kind of method of optimizing the cutting parameters and analyzing the control factors is provided.

Keywords: deep hole machine; gun-drill; roundness error; Taguchi; RSM; machine parameters

1 引言

深孔加工是指长径比大于5的孔加工工艺过程。枪钻作为深孔加工中的重要组成部分,常常用于小直径孔的生产,由于其具备长径比大和刚度弱的特性,钻杆在加工过程中极易发生回转误差和颤振,导致最终孔的轮廓发生形变,即产生圆度误差^[1]。不同的加工参数会产生不同的圆度误差,圆度误差会影响深孔零件在设备中的装配效果。

研究某一加工参数对孔圆度的影响时,采用传统单因素试验法比较方便可行,但在考虑诸多因素的情况下,实验步骤就会大大增加,导致实验效率低下,为此需研究高效、可行的试验方法进行参数优化。田口法是用正交表进行实验布置的高效益质量工程方法,此方法以信噪比为最终评价标准,对提高产品质量和促进技术创新具有积极意义。响应曲面法可以综合考虑多因素影响下实验结果的形成规律。因此,文中采用田口法研究各误差因素对最终

质量产生的干扰,通过响应曲面法综合确定加工参数的最优范围。

2 枪钻深孔加工实验

(1) 实验方案

实验主要通过改变钻杆转速、进给速度和孔深研究以下三种加工参数对孔圆度误差的影响:①钻杆转速分别为1200mm/min、1500mm/min、1800mm/min和2100mm/min;②进给速度分别为18mm/min、23mm/min、28mm/min和33mm/min;③孔深分别为60mm、90mm、120mm和150mm。

(2) 实验设备

如图1所示,实验使用中北大学深孔加工中心的三轴深孔加工机床DH-1300,该机床适合大型精密零件、模具顶针孔等深孔类零件的加工。机床主轴最高转速可达6000r/min,进给速度为1-180mm/min。使用直径 $\phi 11$ mm、长1.5m的硬质合金枪钻(见图2)。

使用三坐标测量仪在相应孔深的截面处采集若干个点,拟合成封闭的轮廓,计算拟合轮廓的外接圆

与内接圆之间的距离,记为圆度误差。实验中采用 FAROEdge 便携式三坐标测量仪。加工工件选用尺寸 $\phi 40 \times 150\text{mm}$ 的 45 钢棒料。



图1 深孔加工机床

图2 枪钻

(3) 实验方法

用枪钻在棒料上加工出直径为 11mm 的通孔,将加工后的工件在孔深为 60mm、90mm、120mm 和 150mm 处切开,然后使用三坐标测量仪在切割截面上选取样本点进行测绘,拟合圆度形貌。

3 田口法实验设计及结果分析

田口法是一种通过参数设计以达到优化实验的方法,通过对正交表的使用和信噪比的分析,可以相对全面地讨论各因素、各水平对最终指标的影响程度,并且田口法可以有效降低非实验因素对最终结果的影响。通过对田口法实验的结果进行分析,可以得到鲁棒性能最优的参数组合,提高产品质量^[2]。

根据实验内容,考虑钻杆转速、进给速度和加工深度三个要素对孔加工圆度的影响,对于每一个要素都设置 4 个水平进行实验。选用 $L_{16}(4^3)$ 的正交表进行实验设计,分别在不同的实验条件下测得加工孔的圆度误差,为了减小实验误差,在数据采集时对测得的孔圆度误差进行平均处理。实验方案和实验结果见表 1。

表1 正交表及实验数据

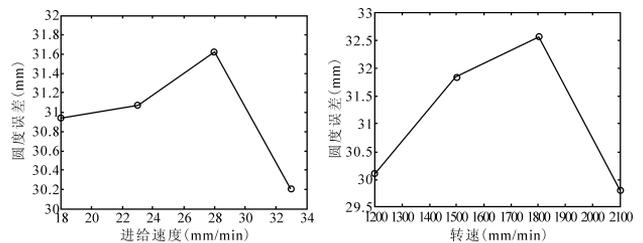
序号	进给速度 (mm/min)	转速 (r/min)	加工深度 (mm)	圆度误差 (mm)
1	18	1200	60	0.0327
2	18	1500	90	0.0268
3	18	1800	120	0.0229
4	18	2100	150	0.0301
5	23	1200	90	0.0315
6	23	1500	60	0.0265
7	23	1800	150	0.0207
8	23	2100	120	0.0317
9	28	1200	120	0.0287
10	28	1500	150	0.0203
11	28	1800	60	0.0227
12	28	2100	90	0.0317
13	33	1200	150	0.0319
14	33	1500	120	0.0279
15	33	1800	90	0.0274
16	33	2100	60	0.0357

田口法中用信噪比(S/N)来计算不同因素对最终质量的影响。在本实验中,使用信噪比分析工艺参数对枪钻深孔加工圆度误差的影响。根据加工实际情况,本实验中的信噪比分析属于望小特性,信噪比的值越大,表示此时圆度误差越小,加工质量越好。所以信噪比的计算公式为^[3]

$$S/N = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_i^2 \right) \quad (1)$$

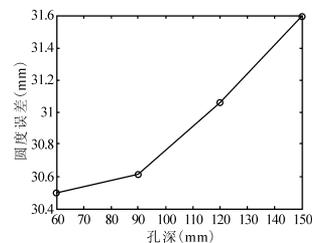
式中, S/N 表示信噪比值; r 为总实验次数,在本次实验中 $r=4$; y_i 表示某个实验因素下第 i 次实验的目标值,在文中表示在第 i 次实验中测得的圆度误差的值。

将表 1 中的数据代入式(1)得到如图 3 所示的实验结果。图中,横坐标表示每个控制因素的 4 个水平值,纵坐标表示信噪比值。可以看出,在进给速度 28mm/min、钻杆转速 1800r/min、加工深度 150mm 时,信噪比值最大,加工孔的圆度误差最小。



(a) 进给速度为控制因素的信噪比值

(b) 钻杆转速为控制因素的信噪比值



(c) 加工深度为控制因素的信噪比值

图3 圆度信噪比值

将各影响因素下信噪比的最大值和最小值做差值运算,可以得到该因素下的极差。极差值的大小反映了该影响因素对孔圆度的影响程度,极差越大,影响程度越大,反之影响程度越小。根据图 3 中的信噪比值,计算在三种因素下的极差值(见表 2)。从表 2 中可以看出,钻杆转速的极差值最大,加工深度的极差值最小。对比可得,在实际的生产加工中,钻杆转速是影响圆度误差的核心因素,而钻杆转速与加工深度对圆度误差的影响相对较小。

4 基于响应曲面法的参数分析

响应曲面法是在合理的实验设计基础上通过实

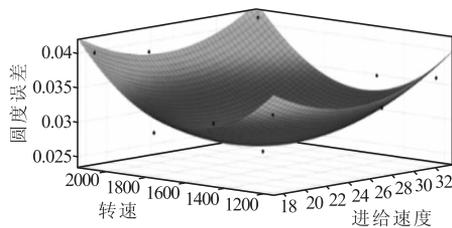
验得到响应的实验数据。采用多元二次回归方程拟合各因素与响应结果之间的函数关系,从而需求最佳参数组合。文中进给速度、钻杆转速和加工深度对枪钻圆度误差的影响是相对复杂的非线性关系,所以拟合方程为^[5]

$$y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_i \beta_{ij} x_i x_j + \sum_i \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (2)$$

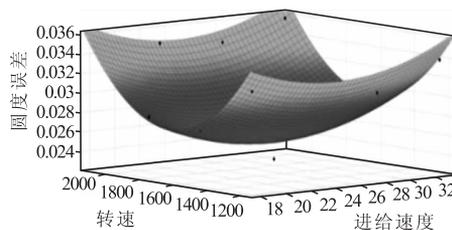
式中, y 表示圆度误差; x 表示进给速度、钻杆转速和加工深度; $\beta = 1, 2, \dots, n$ 表示回归方程的各项系数; ε 为拟合结果与实际结果的误差。使用 MATLAB 对实验结果进行拟合,得到如图 4 所示各因素对圆度误差的综合影响。

表 2 信噪比分析及极差值

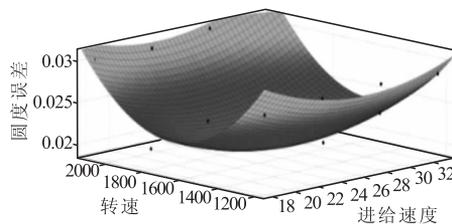
影响因素	水平				极差
	1	2	3	4	
进给速度	30.94	31.07	31.62	30.20	1.42
钻杆转速	30.11	31.85	32.56	29.80	2.76
加工深度	30.50	30.62	31.06	31.60	1.1



(a) 孔深 5mm 处圆度误差与进给速度和转速的关系



(b) 孔深 60mm 处圆度误差与进给速度和转速的关系



(c) 孔深 150mm 处圆度误差与进给速度和转速的关系

图 4 基于响应曲面法的加工参数与圆度误差关系

由图 4 可以直观地看出进给速度和钻杆转速对圆度误差的综合影响。从孔深为 5mm、60mm 和 150mm 的 3 个截面图可以看出,圆度误差在转速 1800r/min 处、进给速度 28mm/min 附近达到最小值,即深孔加工最优的转速和进给速度分别约为 1800r/min 和 28mm/min。

5 结语

本文通过田口法和响应曲面法分析了枪钻深孔加工的圆度误差,简化了实验步骤,比较了在不同加工参数时孔的圆度误差值,进而确定了最佳加工参数值。田口法通过信噪比值反应研究条件对最终结果的影响,而响应曲面法则综合考虑各因素对圆度误差的影响,确定出最优的参数范围。

通过实验可以直观地得到各加工参数对圆度的影响:随着进给速度的增加,孔的圆度误差先减小后增大,在 28mm/min 时圆度误差达到最小;随着转速的增加,孔的圆度误差先减小后增大,在 1800r/min 时达到最佳;随着长径比的增加,孔的圆度误差越来越小。利用田口法与响应曲面法分析得出,当进给速度 28mm/min、钻杆转速 1800r/min、加工深度 150mm 时,加工孔的圆度误差最小。用极差法确定不同加工参数对最终结果的影响程度,钻杆转速对圆度的影响最大,孔深对圆度误差的影响最小。

参考文献

- [1] 王峻. 现代深孔加工技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [2] 丁文华,钱桦. 基于田口法的木制品数控加工参数优化研究[J]. 木材加工机械,2007,18(6):4-7.
- [3] Sibalija T V, Majstorovic V D. An integrated approach to optimise parameter design of multi-response processes based on Taguchi method and artificial intelligence[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5): 1511-1528.
- [4] 李聪波,肖溱鸽,李丽,等. 基于田口法和响应面法的数控铣削工艺参数能效优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(12): 3182-3191.
- [5] Thepsonthi T, Özel T. Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V Titanium alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(9-12): 903-914.
- [6] 梁浩文. 枪钻加工工艺对加工质量影响的研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.

第一作者:申浩,硕士研究生,山西省深孔加工工程技术研究中心,030051 太原市

First Author: Shen Hao, Postgraduate, Shanxi Deep-hole Cutting Research Center of Engineering Technology, Taiyuan 030051, China