

大直径内螺纹铣削加工的振动试验及分析

张莹莹,金成哲,吴鹏

沈阳理工大学机械工程学院

摘要: 通过铣削加工大直径内螺纹试验,定量研究了大直径内螺纹铣削加工的切削速度、每齿进给量以及刀杆悬伸长度对振动的影响规律。采用正交试验法,选用硬质合金螺纹铣刀对45钢无缝钢管进行内螺纹加工,通过三向动态压电式平板测力仪和动态信号采集系统对不同工艺参数下的切削振动响应进行检测,运用DynoWare分析软件对采集的振动加速度和切削力信号进行处理和分析。结果表明,在合理范围内适当提升切削速度,可提高铣削加工大直径内螺纹的加工效率。铣削加工大直径内螺纹时,尽量选择较小的每齿进给量来提高机床刀具-主轴系统的稳定性,较短的刀杆悬伸长度有利于提高加工稳定性。

关键词: 内螺纹;铣削;正交试验;振动分析

中图分类号: TG506;TH161.6

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.004

Vibration Experiment and Analysis of Large Diameter Internal Thread in Milling

Zhang Yingying, Jin Chengzhe, Wu Peng

Abstract: Through milling machining large diameter internal thread experiment, the influence of cutting speed, feed per tooth and overhang length of tool rod on vibration in milling of large diameter internal thread is studied quantitatively. Orthogonal experiment is used, carbide thread milling cutter is used to process the internal thread of 45 steel seamless steel tube, the vibration response of cutting under different technological parameters is experimented, through three-way dynamic piezoelectric plate dynamometer and dynamic signal acquisition system, the vibration acceleration and cutting force signal are processed and analyzed by DynoWare analysis software. The machining efficiency of milling large diameter internal threads can increase the cutting speed in a reasonable range. When milling large diameter internal threads, try to select a smaller feed per tooth to improve the stability of the tool-spindle system. When milling large diameter internal threads, the shorter overhang length of the tool rod is selected to improve the machining stability.

Keywords: internal thread; milling; orthogonal experiment; vibration analysis

1 引言

在重型机械、石油化工、航空航天及军事工业等领域中,大直径螺纹是将旋转运动转化为直线运动的关键性部件,其高精度和高效率加工直接影响设备性能和生产效率^[1]。因此,在加工大直径内螺纹时,提高内螺纹的加工精度及效率是行业难题,对大直径内螺纹铣削加工中的振动研究尤为重要。

国内学者认为采用旋风铣削法加工大直径内螺纹能严格控制中径公差,加工精度高,效率高^[2]。铣削过程中的振颤会严重影响工件表面质量和生产率,造成刀具的破坏和磨损,降低机床和刀具使用寿命,引起不必要的损失甚至事故^[3]。因此,预防控制铣削中的振动问题,对提高大直径内螺纹的表面质量和加工效率来说很有必要^[4]。切削过程中的切削力不规则变化是导致加工振颤的主要原因^[5]。长期以来,研究者们提出了多种切削力模型,主要是

以加工过程切削参数的函数形式表达的模型,如轴向切削深度、加工表面的切削速度、每齿进给量、瞬时静态切削厚度以及瞬时动态切削厚度等^[6,7]。哈尔滨理工大学和天津理工大学在试验室条件下,采用实际加工参数进行了模拟铣削试验,分析了铣削力随切削参数的变化规律^[8]。铣削过程中的切削力是促进机床主轴颤动的关键因素,可用于预测加工后的表面粗糙度。Sijie Cai等^[9]提出了基于非均匀有理基础样条(NURBS)和有限元方法(FEM)的切削力预测模型。为提高加工精度和加工效率,抑制颤动至关重要。通过构建铣削过程的扩展模型,切削力被描述为切屑厚度的三阶非线性函数^[10]。考虑到颤振频率的影响,Jiri Drobilek等^[11]开发了利用先进测量设备根据颤振频率更精确地检测切削过程。

纵观大直径螺纹加工振颤的研究历程,国内外学者从各个角度对切削加工中影响表面质量和加工效率的因素进行了研究,取得了一定的实际成果,但对于以铣削试验为基础的大直径内螺纹

加工振动的研究还处在起步阶段。为此,本文在以往研究成果基础上,以铣削45钢无缝钢管的大直径内螺纹为研究对象,根据工件振动响应测试和切削力试验,研究大直径内螺纹铣削加工中的切削速度、每齿进给量以及刀杆悬伸长度对铣削加工振动的影响规律。

2 试验方案

在德玛吉 DMU50 五轴联动加工中心进行试验,材料为45钢无缝钢管,孔外壁直径 $D = 125\text{mm}$ 、孔内壁直径(螺纹小径) $D_0 = 96.75\text{mm}$ 、螺纹大径 D_h 轴向高度 $H = 150\text{mm}$ 。采用 $L_9(3^4)$ 进行正交试验,分别考虑切削速度、每齿进给量以及刀杆悬伸长度对振动的影响规律^[12]。采用 TMSC 螺纹铣刀盘及其系列刀片,加工过程中,采用瑞士 Kistler 9257B 三向动态压电式平板测力仪和 5070A 型多通道电荷放大器作为信号放大装置检测切削力,通过 Dyno Ware 软件分析得到相关数据,铣削力采集系统原理如图 1 所示。采样频率 2000Hz、测量范围 0 ~ 5000N,试验设置外冷切削液。铣削试验加工现场见图 2。切削用量见表 1, $L_9(3^4)$ 四切削用量参数正交试验见表 2。

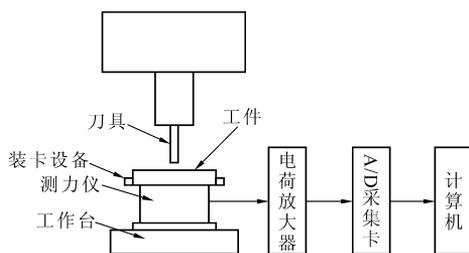


图 1 铣削力采集系统原理

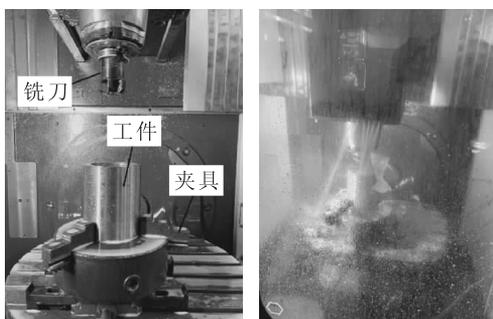


图 2 铣削试验加工现场

表 1 切削用量

水平	切削速度 v (m/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	悬伸量 l (mm)
1	70	0.04	35
2	80	0.06	60
3	90	0.08	100

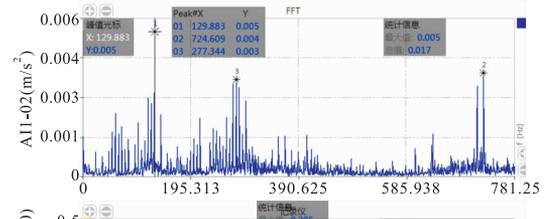
表 2 正交试验参数

序号	切削速度 v (m/min)	空列(其它误差因素)	每齿进给量 f_z (mm/z)	悬伸量 l (mm)
1	70	(1)	0.04	35
2	70	(2)	0.06	60
3	70	(3)	0.08	100
4	80	(1)	0.04	60
5	80	(2)	0.06	100
6	80	(3)	0.08	35
7	90	(1)	0.04	100
8	90	(2)	0.06	35
9	90	(3)	0.08	60

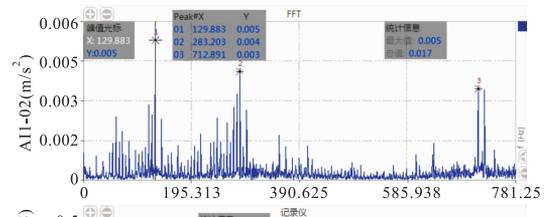
3 试验结果与分析

3.1 铣削振动试验结果

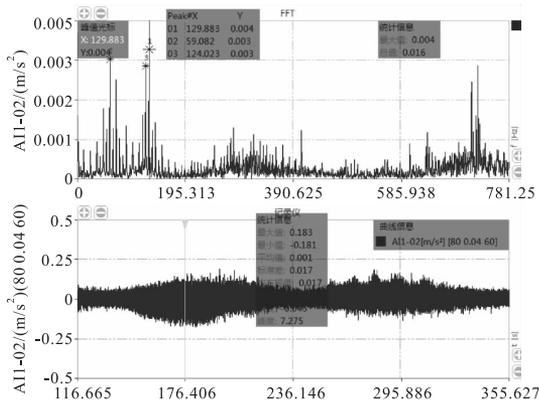
在 DHDAS 动态信号采集分析软件处理分析信号中,均方根值(有效值)是表示整个内螺纹铣削加工过程中振动加速度大小和主轴-刀具系统铣削加工过程出现振动大小的重要参数,所以试验选取加速度均方根值为参考对象。由于铣螺纹的运动方式为螺旋进给,刀具和主轴系统在 X、Y 方向的振动呈周期性的交替变换,但其均方根值不变。如图 3 所示,根据正交试验表列举测得 3 个不同参数下 X 方向振动加速度时域图及由 FFT 变换得到的频域图。表 3 为铣削振动正交试验结果。



(a) $v = 70\text{m/min}$, $f_z = 0.06\text{mm/z}$, $l = 60\text{mm}$



(b) $v = 80\text{m/min}$, $f_z = 0.08\text{mm/z}$, $l = 35\text{mm}$



(c) $v = 80\text{m/min}, f_z = 0.04\text{mm/z}, l = 60\text{mm}$

图3 加速度时域及频域信号

表3 正交试验结果

试验序号	切削速度 v (m/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	悬伸量 l (mm)	主轴 X (m/s^2)	主轴 Y (m/s^2)
1	70	0.04	35	0.014	0.015
2	70	0.06	60	0.021	0.021
3	70	0.08	100	0.032	0.032
4	80	0.04	60	0.017	0.017
5	80	0.06	100	0.023	0.023
6	80	0.08	35	0.019	0.019
7	90	0.04	100	0.018	0.018
8	90	0.06	35	0.018	0.018
9	90	0.08	60	0.024	0.024

3.2 试验结果极差分析

试验采用极差分析法对铣削振动正交试验结果进行分析,将切削速度 v 、每齿进给量 f_z 、刀杆悬伸长度 l 选用字母 A、B、C 来指代,对主轴 - 刀具系统 X、Y 两个方向上振动的各个切削参数的主次顺序可以由极差大小顺序排列,其振动加速度结果见表4。

表4 铣削振动试验结果极差分析

试验序号	A 切削速度 v (m/min)	B 每齿进给量 f_z (mm/z)	C 悬伸量 l (mm)	试验结果 (m/s^2)
1	70	0.04	35	0.015
2	70	0.06	60	0.021
3	70	0.08	100	0.032
4	80	0.04	60	0.017
5	80	0.06	100	0.023
6	80	0.08	35	0.019
7	90	0.04	100	0.018
8	90	0.06	35	0.018
9	90	0.08	60	0.024
K_1	0.0680	0.0500	0.0520	
K_2	0.0590	0.0620	0.0620	
K_3	0.0600	0.0750	0.0730	
k_1	0.0227	0.0167	0.0173	
k_2	0.0197	0.0207	0.0207	
k_3	0.0200	0.0250	0.0243	
最优水平	A2	B1	C1	
R_j	0.0030	0.0083	0.0070	
主次顺序	B C A			

对于主轴 - 刀具系统 X、Y 方向振动来说,影响振动加速度大小的因素主次顺序为:每齿进给量 f_z 、刀杆悬伸长度 l 、切削速度 v (主轴转速 n)。由表3可知,最优参数组合为:切削速度 $v = 70\text{m/min}$,每齿进给量 $f_z = 0.04\text{mm/z}$,刀杆悬伸长度 $l = 35\text{mm}$ 。

4 切削参数对铣削振动影响的分析

4.1 切削速度 v (主轴转速 n) 对铣削振动的影响

图4为刀具 - 主轴系统在 X、Y 两个方向的振动加速度随切削速度的变化规律。可知,切削速度由 70m/min 增至 80m/min 的过程中,加速度从 0.0227m/s^2 减至 0.0197m/s^2 ,切削速度继续提高至 90m/min ,振动加速度又小幅提升至 0.0200m/s^2 ,整体上振动加速度变化幅度不大,考虑到铣削大直径内螺纹加工效率问题,可在合理范围内适当提升切削速度。

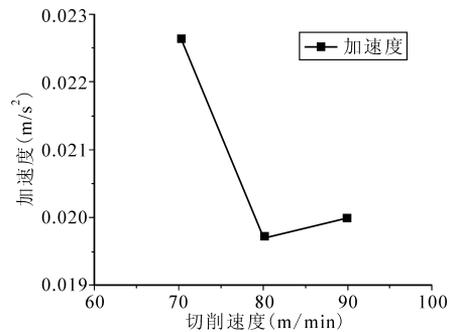


图4 切削速度对铣削振动的影响

4.2 每齿进给量 f_z 对铣削振动的影响

图5为刀具 - 主轴系统在 X、Y 两个方向的振动加速度随每齿进给量的变化规律。可知,当每齿进给量由 0.04mm/z 增至 0.06mm/z 时,振动加速度从 0.0167m/s^2 增至 0.0207m/s^2 ,继续改变每齿进给量使其提升至 0.08mm/z ,振动加速度增至 0.0250m/s^2 ,振动加速度的增加趋于呈线性增长,范围改变与切削速度相比较明显,故在铣削加工大直径内螺纹时尽量选择较小的每齿进给量来提高机床刀具 - 主轴系统的稳定性。

4.3 刀杆悬伸长度 l 对铣削振动的影响

图6为刀具 - 主轴系统在 X、Y 两个方向的振动加速度随刀杆悬伸量的变化规律。可知,当刀杆悬伸长度由 35mm 升至 60mm 时,振动加速度由 0.0173m/s^2 增至 0.0207m/s^2 ,继续改变刀杆悬伸长度当其为 100mm 时加速度增至 0.0243m/s^2 ,加速度范围改变也较明显介于每齿进给量和切削速度之间,故在铣削加工大直径内螺纹过程中尽量选择较

短的刀杆悬伸长度来提高加工稳定性。

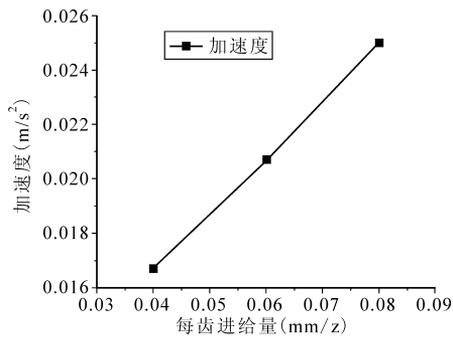


图5 每齿进给量对铣削振动的影响

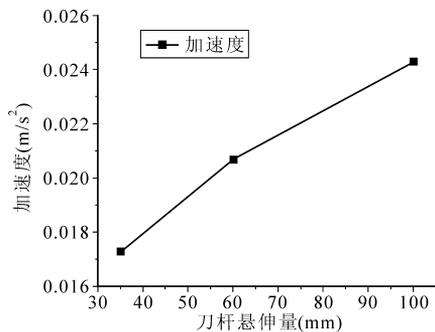


图6 刀杆悬伸量对铣削振动的影响

5 结语

通过铣削加工大直径内螺纹的振动试验并分析试验结果可知,对于主轴-刀具工艺系统来说,影响其铣削振动的因素主次顺序依次为:每齿进给量、刀杆悬伸长度、切削速度。

在合理的切削用量选择范围内适当增大切削速度,可提高铣削加工大直径内螺纹的加工效率。铣削加工大直径内螺纹时,应尽量选择较小的每齿进给量来提高机床刀具-主轴工艺系统的稳定性,尽量选择较短的刀杆悬伸长度来提高加工稳定性。

参考文献

- [1] 杜春涛. 薄壁大螺纹装配过程力学分析与实验研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2014.
- [2] 蔡伟. 大型螺纹旋风铣削工艺参数优化及刀具磨损在线监测研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [3] 闫正虎,刘志兵,王西彬,等. 基于径向基函数的铣削时域稳定性预测方法[C]. 广州:第十七届中国科协年会,2015:1-9.

- [4] 杨纪华,贺慧. 时滞机床颤振模型的稳定性和 Hopf 分支分析[J]. 数学的实践与认识,2016,46(8):161-165.
- [5] 徐延辉. 机械加工中振动对工件的影响[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报,2018,20(5):26-30.
- [6] Endres W J, Devor R E, Kapoor S G. A dual-mechanism approach to the prediction of machining forces, part 1: model development[J]. Journal of Engineering for Industry, 1995, 117(4):526-533.
- [7] Paris H, Brissaud D, Gousskov A. A more realistic cutting force model at uncut chip thickness close to zero [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1):415-418.
- [8] Yaonan Cheng, Chunyang Li, Qihang Yuan, et al. Experiment and model of cutting force of heavy-duty milling water chamber head material[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(12):1-9.
- [9] Sijie Cai, Bin Yao, Wei Feng, et al. An improved cutting force prediction model in the milling process with a multi-blade face milling cutter based on FEM and NURBS [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5-8):2487-2499.
- [10] Hamed Moradi, Ali Nouriani, Gholamreza Vossoughi. Robust control of regenerative chatter in uncertain milling process with weak nonlinear cutting forces: a comparison with linear model [J]. IFAC Papers on Line, 2019, 52(13):1102-1107.
- [11] Jiri Drobilek, Milos Polacek, Pavel Bach, et al. Improved dynamic cutting force model with complex coefficients at orthogonal turning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5-8):2691-2705.
- [12] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

第一作者:张莹莹,硕士研究生,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市

First Author: Zhang Yingying, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

通信作者:金成哲,博士,教授,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市

Corresponding Author: Jin Chengzhe, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China