

细长孔阻尼抑制深孔镗削颤振的研究

孟凡冲,关世玺,王治鑑,董伟康,郭振豪

中北大学

摘要: 针对深孔镗削加工中的颤振问题,设计了一套具有多个细长孔的双镗杆刀具系统结构,通过细长孔阻尼作用,抑制镗削加工过程中刀具系统的颤振。根据流体力学环形间隙流动以及细长孔阻尼理论,建立双镗杆刀具系统结构的数学模型,利用 MATLAB 进行数值模拟;利用 Fluent 软件对双镗杆刀具系统结构的内部流场进行仿真,得出流场域的阻力系数增大;建立镗削过程中的振动模型,运用 Simulink 对其进行动力学仿真得到振动时域图,直观显示了切削液流经具有多个细长孔的阻尼通道能有效抑制深孔镗削过程中的颤振。

关键词: 深孔镗削;颤振;细长孔;阻尼;减振

中图分类号: TG53;TH162

文献标志码: A

Study of Damping of Slender Holes Inhibition Based on Deep Hole Boring Chatter

Meng Fanchong, Guan Shixi, Wang Zhijian, Dong Weikang, Guo Zhenhao

Abstract: As for the chatter problem of deep-hole boring, a pair of boring bar with multiple slender hole in cutting tool systems structure is designed, which restrains the vibration of the tool system by the damping of slender hole. According to annular clearance flow of fluid mechanics and the theory of slender hole damping, a mathematic model of the double boring bar cutting tool system structure can be established, and then a numerical simulation by MATLAB is set up. By using Fluent, the simulation to internal flow field of double boring bar tool system structure is built, which is concluded the drag coefficient of the flow field increases. When the boring process of vibration model is established, the dynamic simulation to the model by using of the simulink is built. The time-domain diagram vibration of the simulation visually shows that the cutting fluid flowing through a multiple damping channel tenuous hole can effectively restrain the chatter in the process of deep hole boring.

Keywords: deep hole boring; chatter; elongated holes; damping; vibration reduction

1 引言

在深孔镗削加工过程中,工件与刀具间经常发生颤振,镗削颤振是机床切削系统的动态不稳定现象,严重影响表面加工质量、生产效率以及刀具的使用寿命。随着兵器、航空航天、石油、汽车、煤矿等领域对深孔加工精度的要求越来越高,加工中的颤振会降低被加工零部件的精度,使其无法达到行业的使用要求,因此,研究镗削过程中的颤振就显得非常重要。

目前,国内外研究人员对深孔加工过程中的颤振控制做了大量的研究。为降低镗杆的振动,在镗杆的内部安置减振器,并对镗杆以及内部的减振器进行结构参数优化^[1-3]。其中,秦柏等^[4]利用虚拟样机的技术,对安置有动力式减振器的镗杆进行动力学分析以及结构参数的优化,对研究镗杆的减振具有指导意义;孔繁森等^[5]将压电陶瓷运用到镗杆

上,通过对压电陶瓷施加反向作用来抑制镗杆在镗削过程中的振动,从而起到减振的效果;日本三菱公司采用一种新型材料和结构研制出一种新型减振镗杆^[6],在研发过程中,通过大幅度地减轻镗杆镗削头的质量,以提高镗杆的减振性能和静刚度,使镗杆达到更好的动态性能。Ema S. 等^[7]优化了减振镗杆内部动力吸振器的参数,使之达到更好的减振效果。

本文针对深孔镗削中的颤振问题,提出了根据细长孔节流阻尼原理来抑制镗削中镗杆的颤振。切削液通过双镗杆结构中的细长孔时,增大了阻尼力的输出,消耗了系统中振动能量,增大了系统的阻尼减振性能,抑制了镗削中镗杆的颤振,提高了镗杆的动态性能。

2 颤振产生的机理及动态切削力分析

在机械加工过程中,由于工件切削层以及被加工表面的弹性及塑形变形等原因,工件中存在硬质点,使得加工时工件的加工表面产生振纹。当刀具

再次镗削到这些振纹表面时,会导致加工过程中相邻的切削厚度发生改变,刀具的振动相位差及切削力也相应地发生改变,形成颤振^[8]。镗削加工过程中相邻的刀具切削轨迹见图1。

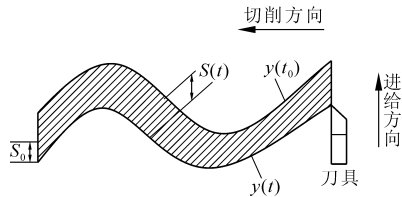


图1 刀具镗削轨迹

设图中相邻的刀具轨迹为 $y(t_0)$ 、 $y(t)$, 两个相邻轨迹之间的距离为 S_0 , 瞬时切削厚度为 $S(t)$, 则有

$$y(t) = A \sin \omega t \quad (1)$$

$$\dot{y}(t) = A \cos \omega t \quad (2)$$

式中, ω 为角频率; t 为时间变量。

在 y 方向上, 上一次切削厚度为

$$y(t_0) = y(t - T) - S_0 = A \sin(\omega t - \alpha) - S_0 \quad (3)$$

式中, T 为旋转周期。

设 α 为相邻两轨迹的相位差, 即有

$$\alpha = T\omega \quad (4)$$

瞬时切削厚度为

$$S(t) = y(t) - y(t_0) \quad (5)$$

计算式(1)、式(2)、式(3)以及式(5)得

$$\Delta S(t) = S(t) - S_0 = \frac{\sin \alpha}{\omega} \dot{y}(t) + (1 - \cos \alpha) y(t) \quad (6)$$

则动态切削力为

$$F(t) = bk_d \Delta S(t) = bk_d \frac{\sin \alpha}{\omega} \dot{y}(t) + bk_d (1 - \cos \alpha) y(t) \quad (7)$$

式中, b 为切削宽度; k_d 为切削宽度系数。

3 双镗杆刀体结构及减振原理

具有多个细长孔的双镗杆结构见图2。该结构中, 镗刀的调刀原理是利用三爪卡盘三个卡爪的径向伸缩实现刀体伸缩功能, 结构简单, 工艺性好。

具体工作原理: 转动分度环以及端盖, 使端盖内孔的键槽与传动轴外圆的花键进行啮合; 每次进退刀时, 顺时针/逆时针旋转分度环和端盖, 使传动轴正/反向进行转动, 通过键传动带动锥齿轮正/反向转动, 同时锥齿轮端面的螺旋槽也进行相应的正/反向转动, 这时与螺旋槽啮合在一起的刀头也相应地实现径向的伸缩。该调刀机构可以有效地提高生产效率, 降低生产成本。

双镗杆的内外镗杆通过授油器连接装配, 并形成环形间隙的流场域。其中, 内镗杆外表面一系列凸台处均布有细长孔, 切削液通过内外镗杆的环形间隙以及均布的细长孔流到刀头镗削加工处, 实现冷却润滑。切削液的流场域包括内外双镗杆的环形间隙以及细长孔, 其结构见图2。

减振原理: 镗削加工深孔中, 切削液在外来激励作用下流经流场域时, 由于阻力损失以及高压切削液通过细长孔处, 截留面积突变, 产生节流阻尼效果, 并形成涡流, 增大了镗刀系统阻尼的输出, 加速了耗散镗杆产生的振动能量, 减小其振动幅值, 从而改善了系统的动态性能。

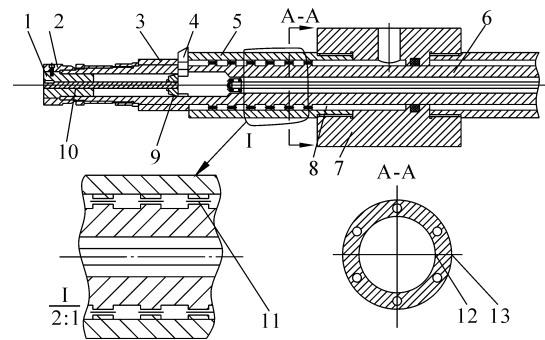


图2 细长孔双镗杆镗刀系统结构

4 双镗杆刀具系统结构的理论模型

切削液为粘性流体, 具有冷却、润滑以及减振的作用。根据流体的理论分析可知, 切削液流经流场域时, 阻力损失包含两部分: ①切削液在双镗杆的环形间隙以及细长孔中流动引起的沿程损失, 切削液通过细小孔时由于节流阻尼的作用, 增大了系统阻尼的输出; ②沿程阻力损失是切削液流经细长孔处时, 由于节流的原因以及截面突变在孔的入口和出口处引起了不可忽略的局部损失。

在双镗杆结构的环形间隙流场域中, 因粘性阻尼引起的压力损失为

$$\nabla p_t = \frac{12\mu l}{\pi dh^3} q \quad (8)$$

式中, q 为流量; d 为内镗杆的外表面直径; μ 为粘度系数; l 为双镗杆间隙的长度。

因 $q = A\nu$, 由于环形间隙 h 与内镗杆的外表面直径 d 相差很大, 即环形间隙近似于平行平面缝隙, 宽度 $B = \pi d$, 所以 $A = \pi dh$, 则

$$\nabla p_t = \frac{12\mu l}{h^2} \nu \quad (9)$$

由流体力学连续性方程可知,孔的入口速度以及孔的出口速度等于初始速度 ν 。由于细长孔节流的原因,孔的出口以及入口存在节流损失,设细长孔入口损失系数为 ξ_1 ,出口损失系数为 ξ_2 ,总节流损失为

$$\nabla p_1 = n(\xi_1 + \xi_2 + \xi) \frac{\rho \nu^2}{2} + n \frac{32\mu l_1}{d_1^2} \nu \quad (10)$$

$$\nabla p = \nabla p_t + \nabla p_1$$

总的压力损失为

$$\frac{12\mu l}{h^2} \nu + n(\xi_1 + \xi_2 + \xi) \frac{\rho}{2} \nu^2 + n \frac{32\mu l_1}{d_1^2} \nu \quad (11)$$

式中, n 为细长孔的数量; l_1 为细长孔的长度; d_1 为细长孔的直径。

设细长孔截面为 A_1 ,则 $A_1 = \frac{1}{4} \pi d_1^2$ 。设细长孔产生的阻尼力为 F_1 ,则

$$F_1 = \nabla p_1 A_1 = n(\xi_1 + \xi_2 + \xi) \frac{\pi \rho d_1^2}{8} \nu^2 + 8n\pi\mu l_1 \nu \quad (12)$$

设环形间隙阻尼通道产生的阻尼力为 F_2 ,则

$$F_2 = \nabla p_f A = \frac{12\mu l}{h^2} \nu \pi d h = \frac{12\pi\mu d l}{h} \nu \quad (13)$$

输出的总阻尼力为

$$F = F_1 + F_2 = n(\xi_1 + \xi_2 + \xi) \frac{\pi \rho d_1^2}{8} \nu^2 + 8n\pi\mu l_1 \nu + \frac{12\pi\mu d l}{h} \nu \quad (14)$$

5 理论模型的仿真分析和验证

5.1 双镗杆镗刀系统结构流体力学模型的数值模拟仿真

建立双镗杆镗刀系统结构的流体力学模型,利用 MATLAB 软件对其进行数值模拟分析。对比分析有细长孔的环形间隙流场域和无细长孔的普通环形间隙流场域,得到两者的初始速度与阻尼力之间的关系以及相同初始速度的情况下细长孔的数量与阻尼力的关系,其计算结果如图 3 和图 4 所示。

由图 3 中可以看出,没有细长杆的双镗杆结构,切削液流经内外双镗杆环形间隙时,输出的阻尼力相当小,而增加细长孔大大增大了阻尼力的输出。由图 4 可知,在不同速度参数下增加细长孔的数量,加大了阻尼力的输出。

5.2 双镗杆刀具系统结构的环形间隙阻尼通道内流场仿真分析

首先,建立流场仿真模型,基于 Fluent 软件对双镗杆结构流场域进行模拟仿真。切削液通过细长孔时因截面发生改变,其内部流场结构也相应地发生变化。根据仿真得到的速度流线图,可以观察到流

场中产生的漩涡,细长孔出口处的漩涡更为明显^[9,10]。截取速度流线图的部分剖面如图 5 所示。

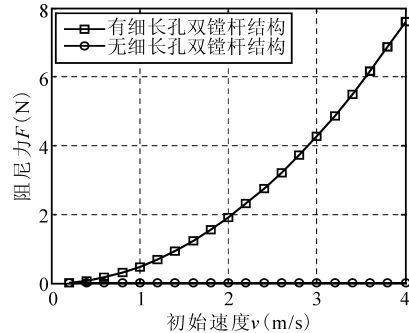


图 3 阻尼力—速度关系

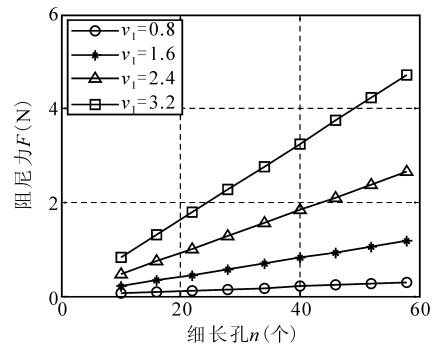


图 4 阻尼力与细长孔的孔数关系

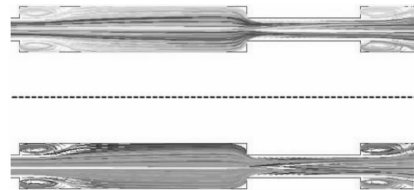


图 5 速度流线

其次,仿真分析有无细长孔时的流场,通过改变入口的初始速度,通过 Fluent 监测流场域的阻力系数,记录不同速度参数下的收敛值,最后运用 MATLAB 进行数据处理,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,细长孔的存在增大了切削液流场域的阻力系数,且阻力系数与细长孔数量成正相关。增加细长孔的数量,阻力系数也随之增大,即流体阻力增大,并消耗系统的能量,因此镗刀系统的阻尼增大。通过仿真发现,其仿真结果与理论模型符合性较好,证明了本文提出的数学模型正确可靠。

综合分析可知,由于流体在细长孔处的节流阻尼作用,孔的入口和出口存在局部损失,使其总的压力损失增大,同时细长孔的出口发生漩涡,涡流耗散能量,增大了能量的消耗以及镗刀系统阻尼的输出,进而使镗杆振动衰弱,稳定镗刀系统的动态性能。

5.3 镗刀系统动力学分析与仿真计算

通过流体仿真得出切削液流经双镗杆结构的流

场域时,由于小孔阻尼效果,大大增加了镗刀系统阻尼的输出,建立如图7所示的镗刀系统动力学简化模型。

由图可知, k_{ep} 、 c_{ep} 为阻尼液等效刚度和等效阻尼。根据动力学模型得系统动力学方程可得

$$m\ddot{y}(t) + c_{ep}\dot{y}(t) + k_{ep}y(t) = -F(t) \quad (15)$$

将式(7)代入式(15)得

$$m\ddot{y}(t) + (c_{ep} + bk_d \frac{\sin\alpha}{\omega})\dot{y}(t) + [k_{ep} + bk_d(1 - \cos\alpha)]y(t) = 0 \quad (16)$$

结合工程数据,运用 Simulink 软件求解动力学方程。对比分析流场域有无细长孔的双镗杆结构以及不同数量细长孔的双镗杆结构,仿真得出如图8所示的振动模型的振动时域图。

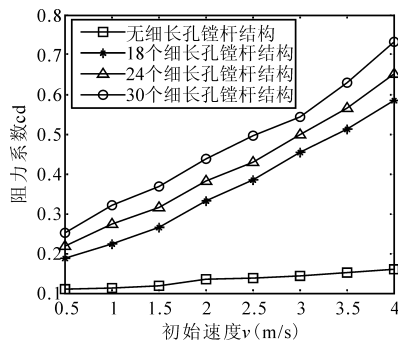


图6 阻力系数曲线

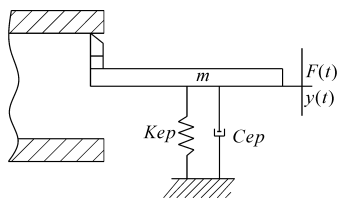


图7 镗刀系统动力学模型

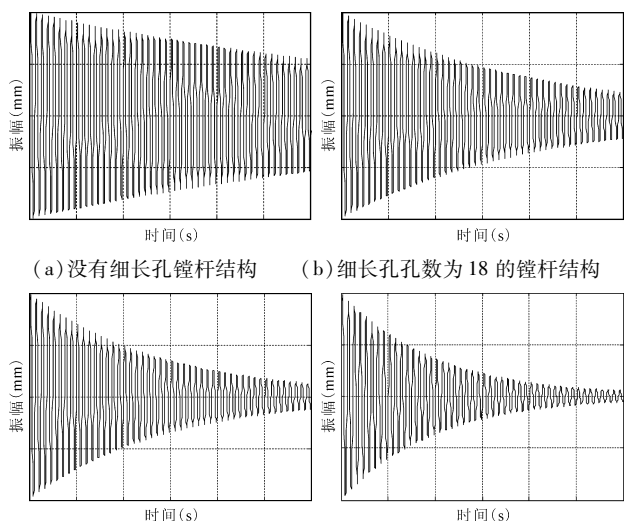


图8 振动时域图

振动时域图直观地反应了带有细长孔的双镗杆镗刀系统的动态性能更好,比无细长孔的双镗杆镗刀系统的振动波形更平缓,即细长孔通过节流阻尼作用能起到很好的阻尼效果。通过图8b、图8c以及图8d比较得出,细长孔的数量也影响阻尼效果,孔数越多,阻尼减振效果越好。因此,切削液流经细长孔时产生的较大阻尼,有效地抑制了镗杆的颤振,提高了镗杆的动态性能。

6 结语

(1) 运用流体力学理论对细长孔双镗杆结构进行分析计算,由于沿程阻力损失、局部阻力损失以及细长孔的节流阻尼作用导致压差大幅度降低,增大了镗刀系统阻尼的输出。

(2) 运用 Fluent 仿真软件对细长孔双镗杆结构的流场域进行流场仿真分析得出,随着流场阻力系数的增大以及孔数量的增加,细长孔通过节流产生较大的阻尼以及生成涡流,增大了阻尼力的输出及能量消耗。

(3) 运用 Simulink 对其进行动力学分析得出,有细长孔的双镗杆结构能有效地抑制镗削中镗杆的颤振,提高深孔加工的表面质量以及刀具的使用寿命。

(4) 细长孔的双镗杆结构简单,工艺性好,该结构对深孔加工刀具减振研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张海生,周利平,刘小莹,等. 切削参数对内置式减振镗杆振动影响的研究[J]. 机械设计与制造,2013(5):78-81.
- [2] Dai G L, Hui Y H, Jin K K. Designing and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar[J]. Composite Structures,2003,60(1):115-124.
- [3] 任违,孔金星,岳晓斌,等. 减振镗杆动态特性的对比实验分析[J]. 工具技术,2010,44(11):45-48.
- [4] 秦柏,邵俊鹏. 重型数控机床深孔加工动力减振镗杆的设计与仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报,2006,11(1):139-141.
- [5] 孔繁森,刘朋,刘春颖. 基于压电智能结构的镗削振动主动控制的仿真与实验研究[J]. 振动与冲击,2010,29(3):142-146.
- [6] 章宗诚. 日本三菱公司新型高阻尼抗振 FSCL 型镗杆[J]. 工具技术,2000,34(5):40.
- [7] Ema S, Marui E. Suppression of chatter vibration of boring tools using impact dampers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2000,40(8):1141-1156.

基于 ABAQUS 的钛合金螺旋铣孔仿真及试验验证

陈哲,孙会来,赵方方,贺龙宇

天津工业大学

摘要: 为了提高螺旋铣孔的制孔质量,需要预测加工过程中的切削力大小规律。通过 ABAQUS/Explicit 求解器模块对螺旋铣孔进行试验验证,分析并建立了钛合金螺旋铣孔仿真中的一系列模型,提出综合位移分离法和能量分离法来定义材料的分离属性。针对螺旋铣孔的特殊运动路径,运用连接器与边界载荷条件协同模拟实现。通过仿真模拟得出螺旋铣孔加工中切削力的变化规律,同时分析了最大应力应变的属性和分布特点。

关键词: ABAQUS 有限元模拟;螺旋铣孔;仿真加工技术;切削力;应力应变

中图分类号: TG659;TH162

文献标志码: A

Simulation Study on Spiral Milling of Titanium Alloy Based on ABAQUS

Chen Zhe, Sun Huilai, Zhao Fangfang, He Longyu

Abstract: To improve the drilling quality of spiral hole milling, cutting force prediction process, using ABAQUS/Explicit explicit analysis mode solver simulation of helical milling experiments. The establishment of a series of titanium alloy helical milling simulation in the column model is analyzed, a comprehensive method of separation and displacement the energy separation method to define the separation properties of materials is put forward. The special motion path of helical milling hole is simulated by using connector and boundary load condition. Through simulation, the change law of cutting force in spiral milling process is obtained. The attributes, distribution characteristics of maximum stress and strain are analyzed.

Keywords: ABAQUS finite element simulation; helical milling; simulation processing technology; cutting force; stress and strain

1 引言

钛合金是一种密度小、比强度高、热稳定性好、抗腐蚀能力强的材料,随着我国航空航天事业的高速发展,飞行器的性能不断提高,各种新型材料应运而生^[1]。由于传统的加工方法和经验已无法满足当下高效率和高标准的要求,对待一种新材料,如何保证设计精度、表面质量等就成为主要追求目标。螺旋铣削工艺因为切削力小,切削温度低以及加工质量好等优点在难加工材料制孔方面具有广阔的应用前景^[2]。有限元模拟分析是研究加工过程机理的高效手段和方法,进行有限元仿真的前提是建立

正确的材料本构模型^[3]。分析有限元模拟仿真的关键性技术以及切削时的一些动态特征,需要采用 ABAQUS/explicit 求解器模块对加工成型过程进行模拟^[4]。

本文采用三维有限元仿真的方式,提出利用连接器与边界载荷条件相结合的方式,模拟刀具路径,监测切削力以及应力应变等参数。最后进行螺旋铣孔试验,验证了 ABAQUS 三维仿真结果的真实可靠。

2 有限元加工模型的建立

(1) Johnson-Cook 剪切失效模型

本文将 Johnson-Cook 剪切失效模型与 Johnson-Cook 本构方程配合使用^[5],可以模拟大应变条件下的金属失效变形,Johnson-Cook 本构模型最先是由

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金(20130402);天津市科委项目(14JCTPJC00536)
收稿日期: 2017年6月

[8] 赵如意,关世玺,吴轲,等. 电流变液减振器在抑制深孔切削颤振上的研究[J]. 机械,2010,37(11):73-76.

[9] 付宜风,雷成旺,张璇,等. 基于 FLUENT 的管道内壁表面状态对流体摩擦阻力的影响研究[J]. 润滑与密封,2014,39(5):23-27.

[10] 周再东,魏长柱,孙明艳,等. 突扩管流动形态的数值模

拟[J]. 科学技术与工程,2012,12(30):7893-7895.

第一作者:孟凡冲,硕士,中北大学机电工程学院,030051 太原市

First Author: Meng Fanchong, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051 China