

机械式低频振动钻削技术的研究进展

李章东,田军伟,焦锋

河南理工大学

摘要: 普通的钻削加工已不能满足大量难加工材料的加工要求,振动钻削加工技术在该背景下应运而生。机械式低频振动钻削技术是振动钻削技术的分支,经过各国专家学者的试验论证,相比普通钻削,其孔加工精度明显提升,振动钻削加工技术必将成为今后研究的重点方向。文章概述了振动钻削加工技术的基本原理、特点及研究现状,总结了当前研究中存在的主要问题,并对其今后的发展做了展望。

关键词: 低频;振动钻削;孔加工

中图分类号: TG52;TH161

文献标志码: A

Research and Development Progress of Machine Type Low-Frequency Vibration Motion Technology

Li Zhangdong, Tian Junwei, Jiao Feng

Abstract: At present, with the extensive use of difficult to process materials, ordinary drilling has been difficult to meet its processing requirements, in this case, vibration drilling work came into being, and mechanical low-frequency vibration drilling is one of its branch, with the ordinary drilling process has a better processing effect, it can improve the quality of the hole processing. Vibration drilling technology will become a future focus on a direction. This paper summarizes the basic principles, characteristics and current research status of vibration drilling technology, points out some existing problems and prospects the future development of vibration drilling technology.

Keywords: low frequency; vibration drilling; hole processing

1 引言

用于加工孔的工艺方法较多,但麻花钻仍是应用最广泛的孔加工工具,随着不锈钢、钛合金和复合材料等各种难加工材料的广泛应用以及微小孔加工质量的要求和数量的增多,孔加工的难度也越来

越高^[1]。

振动钻削加工技术是一种较为先进的切削加工方法,集振动理论、金属切削理论、材料科学等为一体。振动钻削加工技术具有较好的工艺效果,在难加工材料和微小孔的加工中有着不可替代的作用^[2],振动钻削技术就是在这种情况下应运而生,各国学者开始了大量研究。文章就低频振动钻削技术的基本原理及特点、国内外的研究现状、工艺效果等进行了概

基金项目: 国家自然科学基金(51675164)
收稿日期: 2017年4月

- [23] 吴大维, 吴越侠, 彭友贵, 等. 高速钢刀具镀氮化碳超硬涂层研究[J]. 中国机械工程, 2002(24): 91-94, 97.
- [24] 王守仁, 张景春, 王砚军. 高温合金中 Cr₂O₃ 氧化膜与 Al₂O₃ 氧化膜的比较[J]. 山东建材, 2002(1): 35-36.
- [25] Hong Yu Wang, Dun Wen Zuo, X F Li, et al. Effects of nano-Al₂O₃-p on high temperature frictional wear behaviors of NiCoCrAlY cladded coatings[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1597(426).
- [26] 颜培, 邓建新, 李士鹏, 等. 涂层刀具摩擦磨损特性的研究进展[J]. 制造技术与机床, 2012(1): 59-63.
- [27] 陈政文. PVD 硬质合金涂层刀具切削和摩擦学性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2012.
- [28] 苏宇辉, 董小虹, 梁航, 等. 渗氮/离子镀复合涂层的制备及其性能[J]. 金属热处理, 2008(8): 80-82.
- [29] 荆阳, 庞思勤, 张学恒, 等. TiAlN-MoS₂/TiAlN 硬质润滑膜研究[J]. 北京理工大学学报, 2002(4): 457-459, 468.
- [30] 薛锴. 涂层刀具切削性能评价及其实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- 第一作者: 刘彦茗, 齐鲁工业大学机械与汽车工程学院, 250353 济南市
- First Author: Liu Yanming, School of Mechanical and Automotive Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China
- 通信作者: 杜劲, 博士, 副教授, 齐鲁工业大学机械与汽车工程学院, 250353 济南市
- Corresponding author: Du Jin, Doctor, Associate professor, School of Mechanical and Automotive Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China

述,总结了低频振动钻削技术在当前研究中存在的一些主要问题,并对其今后的发展做了展望。

2 机械式低频振动钻削原理及特点

2.1 机械式低频振动钻削原理

振动钻削可以分为以下几类:

①按振动频率的不同,可分为低频和高频两种。低频振动钻削的振动频率较低,低频较高值仅为几百赫兹;按激励方式的不同,主要有机械振动、超声波振动和液压振动等。

②按振动性质的不同,有自激振动(内在的振动)与强迫振动(强加的振动)两种。

③按振动施加方向的不同,可以分为三种类型:轴向振动钻削、扭转振动钻削、同时兼有前两种振动钻削方式的称为复合振动钻削^[3]。

机械式低频振动钻削装置一般由振动轴、电机、偏心轴、弹簧等主要部分组成^[4],机械式低频振动钻削包括工件振动和钻头振动两种形式。工件振动是把振动施加在工作台上,工件固定在工作台上进行加工的一种方式;而钻头振动则是把振动直接施加在钻头上。

2.2 机械式低频振动钻削特点

(1) 钻削扭矩小

机械式低频振动钻削产生的是脉冲力矩,可大幅降低切屑与刀具的摩擦因数,从而降低钻削力矩。

(2) 提高孔加工精度

由于孔的加工是间歇的,工件与刀具时触时离,切屑容易排出,并且切屑明显变小,因此,已经加工好的孔表面不容易被刮伤。

(3) 排屑容易

在振动加工中,钻头与工件之间时而接触,时而分开,大大降低刀具与切屑间的摩擦力,有利于切屑排出。

(4) 提高钻头寿命

振动钻削加工过程中,由于钻头与工件间有规律地时而接触,时而分开,大大降低刀具加工的温度和切削力,由此减小发生崩刃与产生积屑瘤发生的概率。

3 研究现状

3.1 国外研究现状

隈部淳一郎^[5]教授在1954年提出振动钻削理论,成功研制了低频复合振动钻削装置和超声波扭转装置,经多次试验论证,振动钻削装置具有良好的加工工艺效果。

日本的足立胜重^[6]在前人的基础上,总结出了振动断屑理论:在振动钻削过程中,刀具的工作前角也随着振动钻削做周期性变化,刀具的工作前角和后角的变化引起剪切角的周期性变化,使加工过程中切屑易于排出。

前苏联的鲍德拉耶夫等^[7]则根据大量的振动钻削试验总结,得出了冲击理论:横刃切削的效果可由钻头横刃的冲击作用得到较大的提高。鲍德拉耶夫根据弹塑性理论,分析证明横刃的切削现状确实得到了改善。

美国学者研制了一种机械式低频振动钻削装置,结构简单,操作方便。使用该装置对 $\phi 4 \times 58\text{mm}$ 的钢件进行多次钻削加工试验,试验结果论证得到了孔的表面加工质量提高、排屑顺畅和刀具寿命延长等优良的工艺效果。

3.2 国内研究现状

我国对振动钻削加工技术的研究较晚,到20世纪80年代初期才得到众多专家学者的认可与发展,在理论研究、工艺效果研究等方面取得了成果。

(1) 理论研究

西安理工大学的肖继明等^[8]在低频振动钻削的基础上,对麻花钻工作角度做了大量系统的分析,通过研究归纳概括出了各切削刃工作角度的计算公式,为提高切削性能、改变切削条件提供了重要的理论基础。吉林工业大学的王立江教授^[9]对振动钻削的理论进行了系统深入的研究,进一步完善了动断屑的理论:在零相位差不能断屑方面,取得了较大的突破。江苏大学的张平宽等^[10]得出了在轴向振动钻削过程中,各参数的变化是影响工作角度的一大因素。通过多次试验及总结,给出了振动钻削参数选择的理论依据。近些年,振动钻削的理论越来越完善,但这些理论大多通过试验得出,有些还未进行科学论证,因此应进一步完善理论方面的研究。

(2) 工艺效果研究

西安石油学院的徐旭松等^[11]利用自制的机械式低频振动钻削装置进行了小深孔振动钻削试验,试验参数如下:切削液选用机械油,压力设置为4MPa,系统的负压间隙为0.1-0.2mm,装置为双偏心轮结构,振幅在0-0.5mm之间,能实现无极调幅;频率可在0-100Hz内无极调频,而且钻头在工作中的振动频率变化不能太大。通过试验得到:断屑效果较好,不会发生切屑堵塞现象,表明了低频振动钻削装置的优良性,为振动钻削装置的广泛应用提供了参考。中北大学的马清艳等^[12]设计出了一

种机械式低频钻削装置,其结构简单,成本低廉,使用方便。此装置为摆动导杆机构,振动参数受负载影响较小,振幅和频率调整方便,振幅通过改变螺旋滑块的位置来实现,频率通过调整电机转速来实现,进而实现无极调频、无极调幅。当钻杆与工件距离过小时,钻杆需要回缩才能得到所需的钻削工艺效果。用此装置钻削小直径深孔时,只要振动参数选取适当,都能得到较好的工艺效果。中南工学院的陈从桂^[13]自制了一种通过一套装置可以实现三种不同振动方式的振动装置,并利用此装置通过三种不同的振动方式进行小深孔钻削试验,根据材料的不同来选择不同的振动参数,都能得到良好的效果。通过近些年国内众多专家学者对工艺效果的研究,以实际结果证明了振动钻削装置的优越性,与普通钻削相比,具有钻头不易折断、孔加工质量提高、排屑顺畅等一系列普通钻削无法企及的优点,并且不需要大的机床改造即可实现安装固定,因此,由试验验证出的优良结果必将推动振动钻削技术的进一步发展。

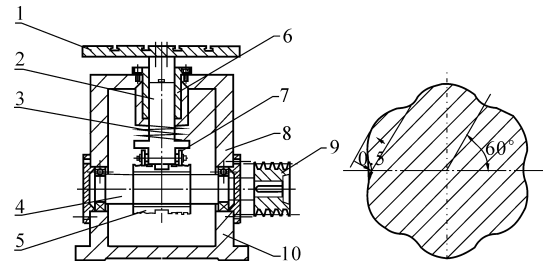
(3) 新型复合加工方式

当前各种振动钻削装的研究目的都离不开高的孔加工精度、长的钻头寿命、结构简单、操作方便、排屑顺畅、小的切屑。张鹏等^[14]通过大量试验,采用摆动振动钻削加工微小斜孔,既可以防止钻头钻偏降低钻头使用寿命,又能提高微小斜孔表面的加工质量。赖兴余等^[15]自制出了电热振动复合钻削装置:在钻头与工件之间形成的回路通低压电流,使钻头与工件在施加轴向振动时,钻削区的材料就会软化,从而改善材料的可加工性。辽宁工学院的宛剑业等^[16]提出了更加新颖的永磁低频轴向振动钻削方式,利用磁体间的引力与斥力产生有规律的正弦振动,使钻床实现主轴的旋转运动、进给运动、振动这三者的和谐统一,试验结果与理论都表明,设计的永磁振动钻削装置,材料选取适当、性能可靠、安装方便、价格便宜,具有较好的使用价值。新型复合加工方式不同于机械式低频钻削加工方式,在于其激励方式不同,但其共同点都是产生振动,因为只有工件与钻头按某种规律时触时离,孔的表面加工质量才会得到显著提高。

(4) 课题组研究现状

机械式低频振动钻削装置要求振动频率在 0 - 100Hz 之间,振幅为 0 - 0.5mm,允许加工的最大负载为 20kg,由此设计了一套振动钻削装置(见图 1),电动机经过皮带带动小带轮,小带轮带动主动轴与套筒一起旋转,主动轴和套筒由花键连接,套筒上开设有

三条环形封闭的正弦曲线,幅值分别为 0.1mm、0.3mm、0.5mm。套筒在旋转过程中通过弹簧带动振动轴始终按照所给的正弦曲线轨迹上下振动,实现了工作台的振动,其优点是主动轴转一周,工作台可以实现 6 个周期的振动。其振动频率的变化由变频电机实现,幅值的变化由切换套筒的环形凹槽实现。



1. 工作台 2. 振动轴 3. 压缩弹簧 4. 主动轴 5. 套筒
6. 直线轴承 7. 小轮 8. 上箱体 9. 小带轮 10. 下箱体

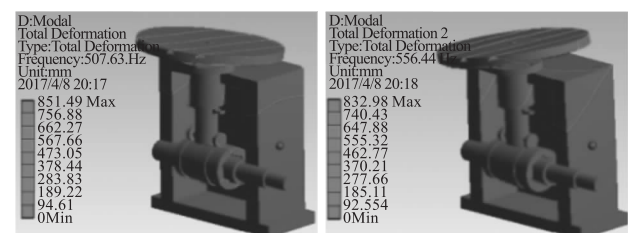
图 1 振动钻削装置结构

模态分析用于分析结构本身的固有频率、振型等振动特性,前六阶振型在总振形中所占比例较大,一般只看前六阶。采用 SolidWorks 软件对振动台整机进行三维建模,并导入 ANSYS Workbench 对振动台整机进行自由模态分析:选择下箱体底面为固定约束(没有额外的其它约束与载荷),得出其前 6 阶振型(见图 2)。

由表 1 可见,整机的固有频率与极限频率 100Hz 相差较远,故不会发生共振现象。压缩弹簧是关键部件,必须保证小轮与环形正弦凹槽曲线时刻接触,弹簧系数有一最小临界值,只要大于此临界值,就能保证弹簧正常工作。

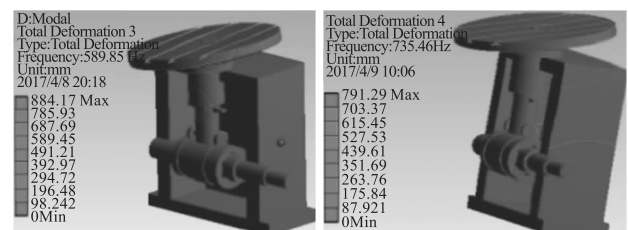
表 1 振动台整机前六阶固有频率

频率 f (Hz)	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
	507.63	556.44	589.85	735.46	828.14	854.93



(a) 第一阶模态振型

(b) 第二阶模态振型



(c) 第三阶模态振型

(d) 第四阶模态振型

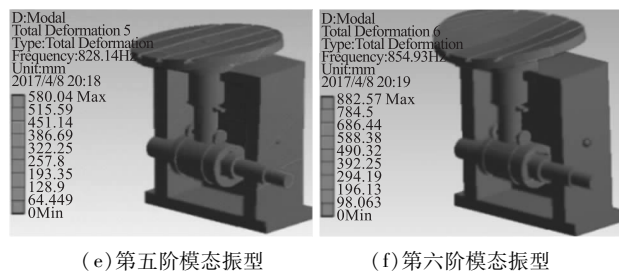


图2 振动台模态振型

3.3 存在问题

近年来,振动钻削技术得到了较快发展,但也存在一些问题:

(1) 振动钻削理论有待完善。当前所形成的振动钻削理论大多是从振动钻削试验结果与普通的振动钻削试验结果对比总结而来,对振动钻削理论的研究还不够深入,并且存在很大的局限性,缺乏科学的试验论证,还需进一步完善振动钻削的理论体系。

(2) 推广应用速度缓慢。在加工过程中,不可避免地出现振动加工振幅的缺失,对加工工艺效果产生很大的影响。

(3) 振动钻削参数需要根据材料的不同而进行调整。在对不同材料进行加工时,不能采用固定加工参数,需要根据所加工材料的特性、孔的长径比等再次选择加工的参数变量,以全面提高孔的加工质量。

(4) 振动钻削系统有线性因素与非线性因素之分。但目前的分析中,大多都忽视了非线性因素,得出的结论不够准确,甚至得出错误结论。

(5) 内排屑深孔钻头的研究还不完善。目前,在钻削加工中,麻花钻和枪钻比较常见,而内排屑深孔钻头却很少。国内所使用的枪钻大多都是从国外购买,成本较高。而麻花钻由于其自身的缺陷,在加工深孔时,不能发挥出应有的作用。内排屑深孔钻头的设计较为简单,制造容易,可以实现对深孔的加工,同时能带来较大的经济效益,所以有必要进一步完善对内排屑深孔钻头的研究。

4 结语

机械式低频振动钻削技术作为一种先进的加工工艺,能够满足难加工材料的加工。当前,机械式低频振动钻削也存在着一些难题,如理论的研究不够完善、振幅缺失、如何自动化、智能化等,这些将是今后研究的重点方向。

参考文献

[1] 曾忠. 微孔的超声振动钻削技术[J]. 中国机械工程,

2001(12):297-299.

- [2] Ken-ichi Ishikawa, Hitoshi Suwabe, et al. A study on combined vibration drilling by ultrasonic and low-frequency vibrations forward and brittle materials [J]. Precision Engineering, 1998, 22(4):196-205.
- [3] 陈尊荣. 液压式低频振动钻削的试验研究[D]. 福州:福建农林大学, 2008.
- [4] 叶玉刚. 振动钻削技术在深小微孔加工中的应用[J]. 装备制造技术, 2009(3):128-130.
- [5] [日]限部淳一郎. 精密加工—振动切削(基础与应用)[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.
- [6] [日]足立胜重. 振动切削研究(第1报), 精密机械, 1976, 42(12):1133-1138.
- [7] Podurear V N, et al. Increasing the efficiency of vibratory drilling by active coolants, Russian Engg [J]. 1996, 46(11):69.
- [8] 肖继明, 李淑娟, 郑建明, 等. 振动钻削时麻花钻的刀具角度分析[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(2):185-189.
- [9] Wang Lijiang, Zhang D, Qiu S, et al. Investigation on zero-phase-difference vibration chip breaking [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1990, 3(1):50-57.
- [10] 张平宽, 王贵成, 王慧霖. 轴向振动钻削中钻头角度变化的影响因素[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3):115-117.
- [11] 徐旭松, 刘战锋, 彭海. 低频机械式深孔振动钻削装置的设计与应用[J]. 新技术新工艺, 2002(10):16-18.
- [12] 马清艳, 马青华, 王彪, 等. 机械式轴向深孔振动钻削系统的设计[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(4):86-92.
- [13] 陈从桂. 小深孔加工的振动钻削装置[J]. 机械工程师, 1999(8):14-15.
- [14] 张鹏, 李先, 张德远. 摆动振动钻削微小斜孔[J]. 航空制造技术, 2008(12):97.
- [15] 赖兴余, 鄢春艳, 周劲松, 等. 振动钻削技术的新发展—电热振动复介钻削[J]. 工具技术, 2008, 42(2):3-6.
- [16] 宛剑业, 高印寒. 永磁振动钻削装置[J]. 机械工程师, 2000(5):11.

第一作者:李章东, 博士, 副教授, 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000 河南省焦作市

First Author: Li Zhangdong, Doctor, Associate Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China

通信作者:焦锋, 教授, 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000 河南省焦作市

Corresponding Author: Jiao Feng, Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China