

大长径比铣刀复合减振技术研究

唐志雄^{1,2}, 黄晓斌^{1,2}, 闫宁², 赵慧瑜²

¹中北大学机械工程学院; ²山西省深孔加工技术研究中心

摘要: 铣刀的长径比通常情况下远大于4,当刀具的长径比大于4时,在工作过程中会产生较大振动,对加工造成不利影响。针对此振动问题,设计一种基于动力减振法与阻尼材料减振法相结合的复合减振铣刀,利用ANSYS有限元软件对其进行静态结构力学仿真分析、模态分析及谐响应分析,并将其与普通硬质合金铣刀刀杆进行对比。对比分析结果表明,复合减振铣刀的动态性能优于普通硬质合金铣刀,更适合高速铣削加工;普通硬质合金铣刀的静态性能较好,静刚度高于减振铣刀,具有较低的动态频率和动刚度,更适合载荷较大的低速铣削加工。

关键词: 振动;复合减振;静刚度;动刚度

中图分类号: TG714; TH162 文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.12.019

Study on Compound Damping Technology of Large Long Diameter Ratio Milling Cutter

Tang Zhixiong, Huang Xiaobin, Yan Ning, Zhao Huiyu

Abstract: Generally, the length to diameter of milling cutter is much larger than 4. When the tool's long diameter ratio is greater than 4, a large vibration in the course of operation is produced, adversely affecting the machining. In view of such problems, a composite vibration reduction milling cutter based on the combination of dynamic damping method and damping material vibration reduction method is designed. ANSYS finite element software is used to static structural mechanics simulation, modal analysis and harmonic response analysis, and compared with ordinary carbide milling rods. The comparative results show that the dynamic performance of composite vibration reduction milling cutter is better than that of ordinary carbide milling cutter, which is more suitable for high-speed milling. While the static performance of ordinary carbide milling cutters is better, the static stiffness is higher than that of vibration reduction milling cutters, and it has lower dynamic frequency and kinetic stiffness, so it is more suitable for low-speed milling with large loads.

Keywords: vibration; compound vibration reduction; static stiffness; dynamic stiffness

1 引言

深孔铣刀作为深孔加工刀具的典型代表,对其进行研究与改进十分必要。目前深孔加工一直存在刀具振动问题。振动会对深孔加工造成诸多的不利影响,主要表现为以下4个方面:①增大加工表面粗糙度,降低加工精度,甚至在工件表面形成振纹;②降低刀具使用寿命,加速设备老化;③产生危害操作者身体健康的声音;④降低加工效率,甚至使加工无法继续进行。

众多学者对深孔加工刀具减振技术进行了大量研究。到目前为止,主流的减振技术一般包括被动减振技术、主动减振技术和半主动减振技术三类,其中使用最多的是被动减振技术^[1]。随着被动减振技术的不断发展,逐渐出现了单自由度、多重与多自

由度被动阻尼器等^[2]。山特维克可乐满公司设计出一种镗杆内部安装有减振质量块的减振镗刀,提高了镗杆刚度,从而达到减振的效果。John C. Ziegert等^[3]根据库仑摩擦原理设计出一种阻尼减振铣刀,相比普通铣刀,临界稳定切削深度提高了53%。石晓龙^[4]设计了一种主要由金属材料和碳纤维复合材料组成层状复合结构的复合减振镗刀,这种设计使镗刀刀杆的动态性能大幅提升,实现减振。

早在1992年,Kangming Xu等^[5]就提出了多重减振器的概念,在此基础上,杨毅清等^[6]进行了面向车削颤振抑制的多重阻尼器优化设计并取得成功。随着制造业的不断发展,单一的减振技术已经满足不了生产过程中的减振需求,复合减振技术必将成为将来研究深孔刀具减振技术的主流,为未来减振技术的研究与发展指明了方向。

2 结构设计及原理分析

2.1 减振铣刀结构设计

减振铣刀的具体结构设计方案见图1(刀头简

基金项目: 中北大学校基金(XJJ2016002); 山西省应用基础研究项目(面上青年基金项目)(201901D211203, 201801D221230)
收稿日期: 2021年5月

化)。其中,刀头与刀杆之间采用螺纹加锥面配合,以增加铣刀的同轴度。主体外圈靠近刀杆尾部一端直径减小 4mm,外面镶嵌内径与刀杆尾部端直径相等且厚度为 2mm 的阻尼材料(使用具有高强度和高减振性的锰铜合金作为阻尼材料)。刀杆主体在靠近刀头一侧做空腔设计,内部安装减振质量块,质量块两端连接弹簧。刀杆主体与阻尼层之间使用橡胶粘剂连接。减振刀杆各部分的参数见表 1。

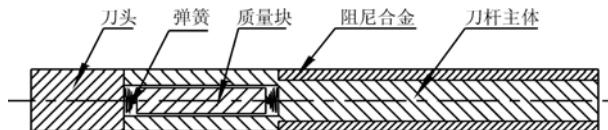


图 1 减振铣刀结构

表 1 减振刀杆各部分参数

刀杆组成	刀头	刀杆	阻尼合金	弹簧	减振质量块
密度(kg/m^3)	7.75	7.75	8.5	0.95	1.24
弹性模量(GPa)	211	211	110	0.003	630
泊松比	0.28	0.28	0.25	0.49	0.3

2.2 普通刀杆振动模型

普通硬质合金铣刀可以看作单自由度振动模型,图 2 为其振动简化模型。图中, M 为普通刀杆质量, k_1 为刀杆的等效弹性系数, c_1 为刀杆的阻尼系数, x_1 为刀杆的振动位移, $F e^{i\omega t}$ 为作用在 M 上的简谐激振力, ω 为频率, t 为时间。

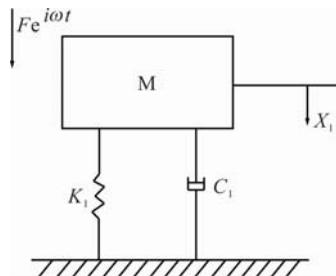


图 2 普通铣刀振动简化模型

振动动力学方程为

$$M \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = F e^{i\omega t} \quad (1)$$

2.3 复合减振铣刀振动模型

复合减振铣刀可以看作二自由度振动模型,图 3 为其简化模型。其中 M' 为减振刀杆的总质量, k'_1 为减振刀杆的等效弹性系数, c'_1 为减振刀杆的阻尼系数, x'_1 为减振刀杆的振动位移, $F' e^{i\omega t}$ 为作用在 M' 上的简谐激振力, ω 为频率, t 为时间, m 为减振质量块的质量, k_2 为减振质量块的等效弹性系数, c_2 为减振质量块的阻尼系数。

减振刀杆的振动动力学方程为

$$M' \ddot{x}'_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}'_1) - k_2 (x_2 - x'_1) + c'_1 \dot{x}_1 + k_1 x'_1 = F' e^{i\omega t}$$

$$m \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}'_1) + k_2 (x_2 - x'_1) = 0 \quad (2)$$

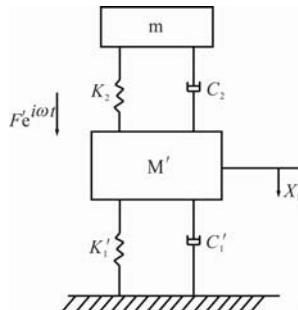


图 3 复合减振铣刀振动简化模型

2.4 减振原理分析

消除振动的方法有多种,其中包括提高刀具的抗振性和使用消减装置。提高刀具的抗振性又包括优化改进刀具的阻尼系数、弹性模量和惯性矩等;消减装置分为液体摩擦减振器和冲击减振器^[7]。本设计将冲击减振技术与提高刀具阻尼系数减振技术及提高刀具弹性模量减振技术相结合,从而达到减振的目的。内置减振块减振技术的基本原理为冲击减振,即利用铣刀与减振质量块相互碰撞后能量损失的原理,当铣刀存在振动时,必然会引起自由质量块的振动,两者相互碰撞,干扰振频,消减能量,减小振动,达到减振的目的;外置阻尼合金可有效提高铣刀的整体阻尼系数。两项减振技术相结合可以达到良好的减振效果,大幅降低铣刀工作时的振动幅度。

3 普通刀杆和减振刀杆静力学分析与对比

利用 SolidWorks 三维建模软件建立普通铣刀和减振铣刀的模型,图 4 为普通铣刀的三维模型和减振铣刀的三维剖视图,两刀外形轮廓尺寸完全相同。



(a) 普通铣刀

(b) 减振铣刀

图 4 三维建模

将建好的普通铣刀模型与减振铣刀模型分别导入到 ANSYS 软件中,选用 Static Structural 板块,在相同的边界条件下进行静力学结构仿真分析。边界条件设置为:模拟铣刀的工作条件,刀杆尾部进行固定约束,刀头部分施加 3 个大小相同(都为 100N)、方向不同的力。求解得到两刀杆的静力学变形(见图 5)。

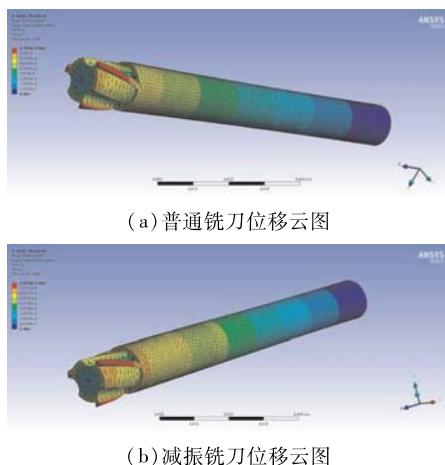


图5 普通铣刀与减振铣刀静力学分析结果

从两铣刀的静力分析可以看出,在相同工作条件下,变形最大的地方均为刀头部分,符合铣刀工作的实际情况和梁理论的分析。减振铣刀的变形量大于普通铣刀,说明减振铣刀的静刚度小于普通铣刀,普通铣刀更加适合载荷较大的低速铣削加工。

4 普通刀杆与减振刀杆的模态分析与对比

将普通铣刀和减振铣刀的模型在 ANSYS 有限元仿真软件中利用 Modal 板块进行模态分析,边界条件都是将刀杆尾部固定,设置 Analysis Settings 栏为 6,观察分析并对比两刀杆前六阶模态。普通铣刀和减振铣刀前六阶模态振型的模态仿真结果分别见图 6 和图 7。

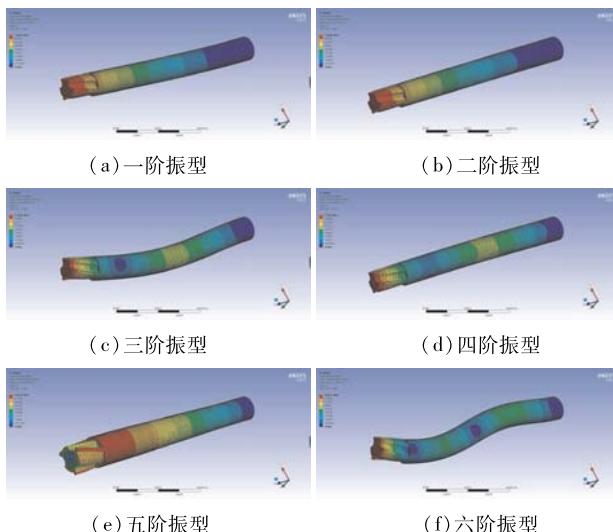


图6 普通铣刀前六阶振型

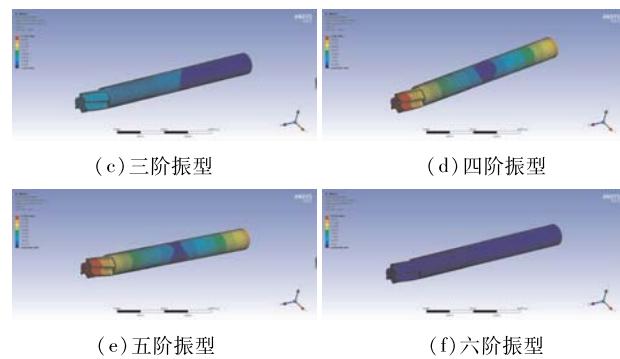
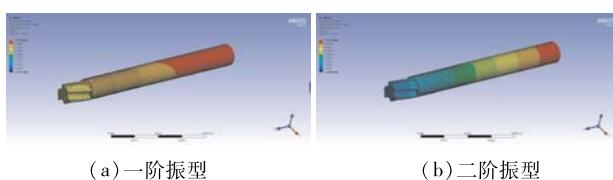


图7 减振铣刀前六阶振型

对比图 6 和图 7 各阶振型可知,减振铣刀的每一阶振幅都远小于普通铣刀,减振铣刀的振幅约为普通铣刀的 47%。减振铣刀的第 6 阶模态振动幅度不为 0,但云图显示为 0,因为振动集中于减振质量块。仿真结果表明,相比普通铣刀,减振刀杆具有更好的动刚度,在铣削加工过程中能够大幅降低刀杆的振动幅度。

5 普通刀杆与减振刀杆谐响应分析与对比

在两刀杆模态分析的基础上进行谐响应分析,两模型操作相同,简谐激振力选择施加在刀头最顶端,参数设置如下:在 Define By Components 选项下 Y Component 栏中输入 100N,在 Analysis Settings 命令下的 Range Minimum 栏中输入 0,在 Range Maximum 栏中输入 1000Hz,在 Solution Intervals 栏中输入 10。进行求解后得出结果,谐响应分析图谱见图 8。

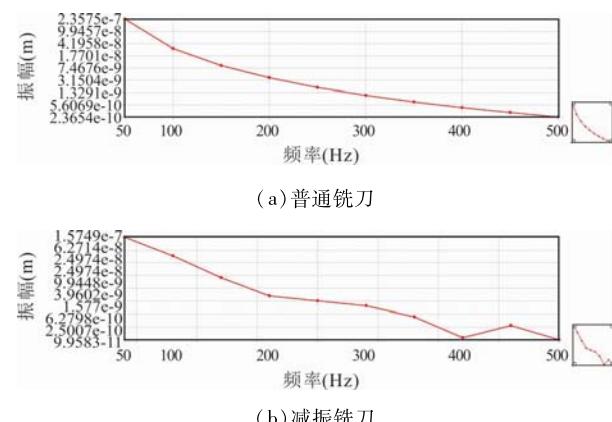


图8 谐响应图谱

由图 8 可见,在谐响应分析中,普通铣刀最大振动幅度为 2.3575×10^{-7} m,而减振铣刀的最大振动幅度为 1.5749×10^{-7} m。减振铣刀的最大振幅为普通铣刀的 66.8%,减振效率达到 33.2%,具有良好的减振效果。

异形转轴梁的工艺研究

刘波¹,赵应鑫¹,陈云²,陈茂军¹,姚佳志¹,高巍¹,熊计³,郭智兴³

¹四川明日宇航工业有限责任公司;²成都工具研究所有限公司;³四川大学

摘要:异形转轴梁是飞机舵面的主要承力结构,其加工难度大,效率低。本文介绍了异形转轴梁的加工难点,并详细介绍了其关键部分的型腔加工与排屑以及精铣外形的精度控制方法。

关键词:内腔排屑;工艺;加强筋设计

中图分类号:TH162 文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.12.020

Study on Technology of Special-shaped Rotating Shaft Beam

Liu Bo,Zhao Yingxin,Chen Yun,Chen Maojun,Yao Jiazhi,Gao Wei,Xiong Ji,Guo Zhixing

Abstract: Special shaped rotating shaft beam is the main bearing structure of aircraft rudder surface, which is difficult to process and have low efficiency. The machining difficulties of special-shaped rotating shaft beam is introduced, and the cavity machining and chip removal of the key parts, as well as the precision control method of finish milling shape are introduced in detail.

Keywords: inner cavity chip removal;process;stiffener design

1 引言

异形转轴梁是飞机舵面的主要承力结构,也是连接舵面和机身的关键部件。装配完成后,其一端

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2020YFB2010500);四川省科技计划—青年科技创新团队项目(2021JDTD0025)
收稿日期:2021年9月

6 结语

通过机械静力学仿真、模态分析及谐响应分析,检验了减振铣刀的减振效果,说明了复合减振设计的合理性,得到以下结论:

(1)与普通铣刀相比,复合减振铣刀工作过程中的振动幅度大幅降低,能够降低加工工件表面粗糙度,提高刀具使用寿命,同时也提高了铣刀加工工件时的工作效率;

(2)普通铣刀具有更好的静刚度,比减振铣刀更适合载荷较大的低速铣削加工;

(3)复合减振铣刀具有比普通铣刀更好的动刚度,在载荷较小的高速铣削加工过程中振动远小于普通铣刀,因此,更适合载荷较小的高速铣削加工。

参考文献

[1]宁文波,鞠杰,陈伟栋,等.大长径比插铣刀刀杆减振研究[J].机械制造,2019,57(1):49-51.

贴合舵面外形,一端带动舵面转动,除要承受较大扭转载荷外,还需要保证舵面刚性,并尽可能降低零件重量,因此这类零件多为深腔空心轴结构。

转轴类零件结构在具有性能优势的同时也给加工带来困难。零件具有的深腔和薄壁特点,使其在加工时难以同时保证加工效率和加工精度。本文针对异形转轴梁的型腔加工进行了研究。

- [2]刘耀宗,郁殿龙,赵宏刚,等.被动式动力吸振技术研究进展[J].机械工程学报,2007,43(3):14-21.
- [3]John C Ziegert,Charles Stanislaus,Tony L Schmitz,et al. Enhanced damping in long slender end mill[J]. Journal of Manufacturing Processes,2006,8(1):39-46.
- [4]石晓龙.镗刀复合减振分析与试验研究[D].太原:中北大学,2016.
- [5]Kangming Xu,Takeru Igusa.Dynamic characteristics of multiple sub-structures with closely spaced frequencies [J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1992,21(12):1059-1070.
- [6]杨毅青,刘强,王民.面向车削颤振抑制的多重阻尼器优化设计[J].振动工程学报,2010,23(4):468-474.
- [7]杨守帅.刀具的振动与消除措施研究[J].河南科技,2019(10):31-34.

第一作者:唐志雄,硕士研究生,中北大学机械工程学院,030051 太原市

First Author:Tang Zhixiong,Postgraduate,North University of China,School of Mechanical Engineering,Taiyuan 030051,China