

被动式减振刀具技术研究进展

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.4001

吴文镜^{1,2} 李龙鹏³

1. 高端重载机器人全国
重点实验室

广东 佛山 528311

2. 广东美的电气有限公司

广东 佛山 528311

3. 北京航空航天大学

机械工程及自动化学院

北京 100191

摘 要: 航空航天、包装机械等结构件中存在大量深孔、深腔特征,在进行切削加工时,对大长径比刀具有迫切需求。刀具刚度随长径比提高而下降,导致切削颤振频发,严重制约加工效率和加工精度。被动抑振技术减振效果明显、实施简单,能够有效改善长悬伸刀具的刚度/阻尼特性,其技术原理主要包括耗能减振和动力吸振。围绕车刀、铣刀与镗刀中的长悬伸刀具设计技术,介绍其国内外研究进展。随着结构设计、材料科学等技术的不断发展,减振刀具后续可从结构设计、新型材料的开发与应用、探索新型减振原理等方向开展更深入的研究。

关键词: 包装机械; 切削加工; 减振刀具; 颤振; 振动控制; 被动阻尼器

中图分类号: TB535⁺.1; TG71

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)04-0001-11

引文格式: 吴文镜, 李龙鹏. 被动式减振刀具技术研究进展 [J]. 包装学报, 2025, 17(4): 1-11.

1 研究背景

航空航天、包装机械等部分结构件中存在深孔、深腔特征,此类零件的加工过程需要使用大长径比刀具。随着长径比的增加,刀具刚度下降,导致切削颤振频发,易造成机床或者刀具结构损坏、零件表面破坏等系列危害^[1]。因此,研究长悬伸刀具减振技术对解决工程实际问题具有重要意义。

针对刀具切削振动,控制方法主要有切削参数工艺优化、主动/半主动控制以及被动控制技术^[2]。其中,被动控制又被称为无源控制,通过在主振系统上附加子系统改变其刚度/阻尼特性,从而实现振动控制。被动控制由于结构简单、造价低、易于维护和可靠性高等优点,在工程实际中得到广泛应用,其主要包括耗能减振技术和动力吸振技术。

耗能减振技术通过在主振系统上附加阻尼单元,对振动能量进行耗散,从而降低振动响应。阻尼元件

通常由橡胶等高内损耗因子材料制成,能够将振动动能转换为热能。耗能减振技术主要包括摩擦减振、冲击减振、电涡流减振和黏弹性阻尼减振技术。摩擦减振可分为在具有相对运动的表面之间的干摩擦,以及在黏性流体中的摩擦,振动能量通过摩擦生热的方式散发到介质中。冲击减振的原理是在主振系统上安装冲击质量块/颗粒,通过在有限空间内的来回碰撞将主结构的振动能量转化为热能。电涡流减振是利用电磁感应原理,在振动过程中产生抑制原有运动的电磁阻尼,从而消耗主结构的振动能量。黏弹性阻尼减振技术是利用材料自身的高阻尼特性将主结构的振动能量耗散。

动力吸振技术通过转移主振系统的振动能量,实现减振降噪。在主振系统上附加动力吸振器,利用弹性元件和阻尼元件使作用在主振系统上的力与外部激励力方向相反,从而减小主振系统所受的合力,增加整体结构的刚度和阻尼比。动力吸振器一般由质量

收稿日期: 2025-01-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4705100)

作者简介: 吴文镜,男,博士,主要研究方向为机器人与加工技术, E-mail: wuwj17@midea.com

块 m 、刚度单元 k 与阻尼单元 c 组成,设计过程中需充分考虑各元素的关系,然后根据最优动力学参数利用某种结构加以实现。动力吸振器包括单自由度、组合式和多自由度动力吸振器等。单自由度动力吸振器通常只有一个质量块,只利用其单个惯量进行抑振,是最简单也是最广泛使用的结构形式。根据刚度单元和阻尼单元连接方式的不同,又可衍生出 Voigt 式、三要素式和接地式等结构(见图 1),其中 Voigt 式动力吸振器由弹簧和阻尼器并联与质量块相连,在较宽频率范围有吸振效果,常用于普通设备;三要素式由两个弹簧和一个阻尼器组成,频率响应范围宽,能在多频率点吸振,适用于振动频率复杂的系统;接地式与地面相连,对低频振动吸收效果好,常用于大型建筑和对低频振动敏感的工业设备基础。组合式动力吸振器可分为并联和串联,通过在主振系统上同时附加若干个单自由度动力吸振器以增强抑振效果。多自由度动力吸振器利用吸振器质量单元的多个运动自由度抑制主振系统响应,在提升减振幅值及带宽的同时,具有多模态的抑制能力,且占用体积较小,适合应用于工作空间有限的场合,但由于自由度之间存在结构耦合,设计建模复杂,工程实现难度大。

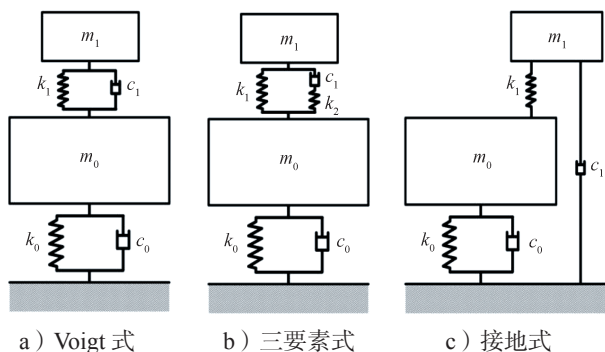


图 1 单自由度动力吸振器的 3 种典型结构

Fig. 1 Three typical structures of single degree of freedom dynamic vibration absorbers

目前,刀具产品市场有多家技术较为成熟的企业,产品广泛应用于汽车、航空航天、包装机械制造等行业。国外知名的刀具产品公司,如瑞典的山特维克可乐满,其推出的 Silent Tools 减振刀具系列运用动力吸振原理,在刀杆内部安装了由质量块、橡胶、阻尼油等组成的减振器;肯纳金属设计的 Beyond Evolution 是一款新型单刃切槽及切断刀具产品,采用 V 型刀座设计,用于提高加工稳定性;山高刀具 Steadyline 刀柄采用“动态被动式减振系统”增加刀柄的动态刚性,为大型深孔作业提供更高效、更可靠

的解决方案。在国内,松德公司研制了系列阻尼减振刀具,其减振车刀通过更换不同的车削刀座可适应不同的加工工况;百斯图公司推出的液压刀柄依靠可靠的夹持力提高刀具寿命,并通过阻尼减振效果大幅提升加工表面质量。随着包装行业向高速化、精密化发展,包装机械关键部件(如模切刀具、分切刀具等)的加工精度和稳定性面临更高要求。在高速运转过程中,刀具长悬伸导致的振动问题易引发包装材料切割不均匀、模具磨损加剧等问题,直接影响包装质量和生产效率。减振刀具技术通过提升刀具刚度和阻尼特性,可有效抑制加工过程中的颤振,为精密包装刀具的制造提供技术支撑。例如,在食品包装铝箔分切或药品泡罩成型模具加工中,采用减振刀具可显著降低表面波纹度,延长刀具寿命,从而提升包装设备整体性能。因此,将减振刀具技术引入包装机械关键部件的加工链条,对实现高精度、低损耗的包装生产具有重要意义。本文将围绕被动式减振车刀/铣刀/镗刀的研究进展进行综述。

2 减振车刀

车刀作为应用最广的一种单刃刀具,被用于外圆、内孔、螺纹、端面、槽等多种具有回转特征产品的加工。航空发动机典型零部件,如风扇盘、盘轴、涡轮轴等的加工需要采用车削操作,生产加工过程中要严格保证精度和表面粗糙度,对车刀抗振性能提出了较高的要求。目前国内外许多学者对减振车刀设计进行了研究。

2.1 基于耗能减振技术的减振车刀

冲击阻尼器由阻尼颗粒/质量块、阻尼腔组成,结构简单,能够起到明显的抑振效果。为测试颗粒冲击阻尼车刀的减振性能,D. I. Suyama 等^[3]对钢材料、硬质合金材料以及带有颗粒冲击阻尼的钢材料刀杆分别进行了内圆车削试验,通过对比加工表面的粗糙度,证明了在硬化钢车削中,颗粒冲击阻尼器能够代替更昂贵的硬质合金刀杆,具有良好的应用前景。区别于传统的小颗粒冲击阻尼器,A. E. Diniz 等^[4]研制的由较大尺寸钢球制成的颗粒冲击阻尼车刀杆,增大了球体冲击产生的阻尼,提高了车刀的极限悬长。P. S. Pual 等^[5]分别设计了颗粒阻尼和质量冲击阻尼车刀,颗粒阻尼器由直径 5 mm 的铜颗粒组成,质量冲击阻尼通过将铜块安装于刀杆底部实现;从 AISI4340 钢的切削试验结果可以看出,两种减振车刀均提高了刀

杆刚度, 抑制了切削颤振, 但质量冲击阻尼器具有更优的减振性能。Li T. 等^[6]提出了一种冲击阻尼器的优化设计方法, 将其应用于车削过程中车刀的振动控制, 通过将非线性系统简化为线性系统, 使得冲击阻尼器对线性和非线性系统均具有振动控制的能力, 同时在较宽的频率带宽中具有有效性。质量冲击阻尼器依靠碰撞进行减振, 使用过程中常常会产生噪声。Yang Y. Q. 等^[7]以装有冲击阻尼器的悬臂梁为模型, 采用模态叠加法建立了运动方程, 在冲击阻尼作用机理研究基础上, 对其进行设计优化, 实现了冲击阻尼器的线性响应, 并开展正弦扫频试验对其进行验证。针对内圆车削中径向力导致大长径比车刀振动而引发工件振纹的问题, 杨毅青等^[8]利用欧拉-伯努利梁的连续体振动理论建立了内置冲击阻尼器的车刀刀杆模型(见图2), 进而利用模拟退火算法选取不同单侧间隙 b 、径向力 F_p 以及径向位移 x 对阻尼器参数 c 进行优化; 设计了一种内置冲击阻尼器的减振车刀。模态测试和切削试验结果表明, 在不同的切削条件下, 该减振车刀对加工过程中刀具的加速度幅值、噪声幅值以及表面粗糙度均有明显的降低作用。

冲击阻尼器在车刀领域的应用研究不断发展, 在性能、设计及解决实际问题方面持续深入, 从而证实其在硬化钢车削的应用潜力。

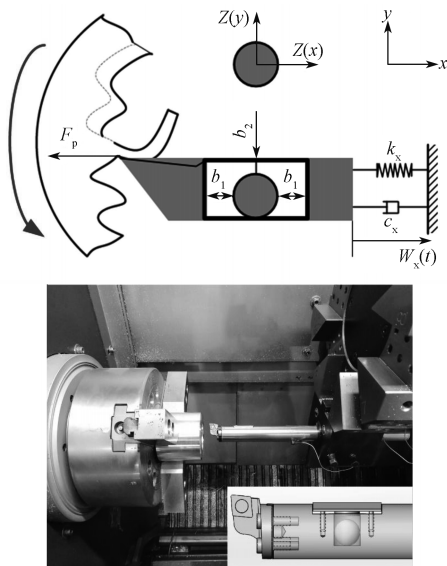


图2 基于冲击阻尼器的减振车刀

Fig. 2 Damping turning cutter based on impact damper

基于黏弹性材料的约束层阻尼车刀, 通过填充高密度材料、锰铜合金阻尼材料等优化阻尼层厚度, 也能起到明显的抑振效果。Liu Y. 等^[9]通过对约束层

阻尼车刀进行动力学建模和分析, 实现了约束层阻尼车刀阻尼层厚度的参数优化, 提高了刀具的阻尼比。对所设计的车刀进行了模态分析和试验验证, 结果表明, 该车刀能提高将近一倍的阻尼比, 显著提升加工稳定性。采用约束阻尼结构能够有效进行抑振, 同时对刀具的刚度、寿命影响较小。为改善刀架材料性能, E. Mohan 等^[10]将车刀杆钻开若干孔洞, 并在其中填充高密度的铜或黄铜材料, 以改善车刀的阻尼性能。切削试验结果表明, 该阻尼车刀能够明显改善加工表面状况。M. M. da Silva 等^[11]提出一种增加刀柄阻尼的方法, 在刀柄中使用嵌入式压电材料, 并与无源分流电路相连。车削试验结果表明, 刀柄的频率响应和零件粗糙度得到明显改善。以降低车刀颤振幅值为目标, 黄振华等^[12]设计了一种基于橡胶和颗粒的双阻尼减振车刀刀杆, 针对 1000 Hz 以下的外界激振频率进行了有限元分析和研究。结果表明, 所设计的减振车刀减振效果良好。霍桂臣等^[13]在刀杆上添加由锰铜合金制成的阻尼材料, 研制出一种阻尼车刀, 通过建立刀杆有限元模型和仿真分析, 对阻尼合金层总厚度进行优化, 降低了刀具的振动。

2.2 基于动力吸振技术的减振车刀

此外, 动力吸振在减振车刀的应用也非常普遍。

Tarnag Y. S. 等^[14]将压电惯性驱动器作为调谐阻尼器用于减振车刀的设计, 并对阻尼器参数进行设置, 所设计的车刀具有良好的减振性能。Lee E. C. 等^[15]提出了一种用于控制车削颤振的动态阻尼器, 并将该减振器安装于刀具上, 通过试验证明了方案的可行性。G. Habib 等^[16]设计了一种非线性的调谐阻尼器, 并建立了带有该阻尼器车刀的单自由度模型, 对该模型进行研究发现, 阻尼器扩展了颤振稳定域, 从而使临界稳定切深得到提高。Yang Y. Q. 等^[17]建立了带有单自由度动力吸振器的车刀频响分析方法, 设计出一种基于三要素式动力吸振器的大长径比减振车刀(见图3), 并实现了阻尼器的精确调谐, 降低了目标模态 87.1% 的幅值, 比 Voigt 式达到了更优的性能。在不同车削工况下各项指标均得到显著改善。在采用连续梁理论对刀杆进行动力学建模的基础上, 张明华等^[18]研究了刀杆与吸振器耦合系统的频响函数预测与吸振器优化方法。模态试验结果表明, 减振车刀动刚度提高了 104.1% 和 120.3%。杨毅青等^[19]以压电陶瓷为基础, 结合动力吸振器设计出一种长径比为 7 的细长车刀(见图4), 该车刀能够将切削振动能量

一部分转移到附加动力吸振器中,一部分由于压电陶瓷产生形变转化为电能。针对该刀具在不停进给速度和切削深度下分别开展了切削试验,结果表明,3种切削参数下加工质量得到大幅提高,同时,压电陶瓷可输出 10.1 V 的电压。该方法不仅实现了振动的抑制,振动能量收集所获得的电压输出还可应用于振动监测。

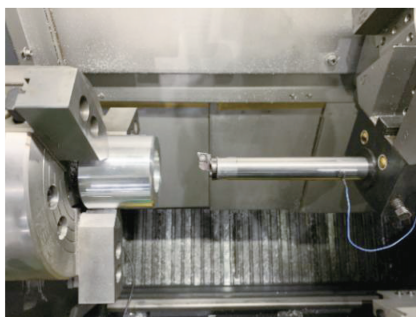


图 3 基于三要素式动力吸振器的减振车刀

Fig. 3 Damping turning cutter based on three-element type vibration absorbers

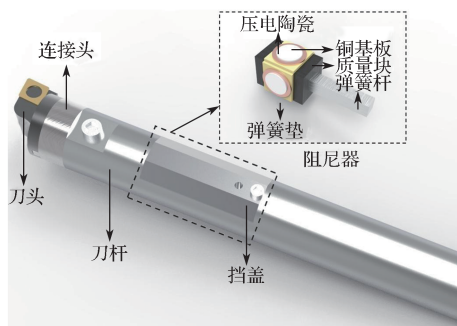


图 4 基于压电陶瓷的减振车刀

Fig. 4 Damping turning cutter based on piezoelectric ceramics

3 减振铣刀

铣刀是单齿或多齿旋转刀具,用于平面、台阶、沟槽、成形表面的加工。飞机结构件中的筋条、缘条、腹板等,以及发动机叶盘、机匣等的加工需要通过铣削来完成,尤其是存在深腔特征的零件,对具有良好减振性能的大长径比铣刀有迫切需求。

3.1 基于耗能减振技术的减振铣刀

耗能减振技术在减振铣刀领域应用广泛。B. Denkena 等^[20]基于摩擦减振原理,通过在铣刀刀柄中安装摩擦阻尼器,设计了一种摩擦阻尼铣刀,并对这种摩擦阻尼刀柄进行了数学建模和测试。结果表明,该刀柄提高了最大切削深度约 75%。J. C. Ziegert

等^[21]设计了一种内部带有摩擦阻尼器的细长减振立铣刀。当铣刀发生振动时,刀杆和阻尼器的刚度不同导致两者接触表面形成应变差,从而发生相对滑动,利用摩擦消耗刀具的振动能量。R. Madoliat 等^[22]提出了一种摩擦阻尼器,并将其安装于空心的铣刀刀杆内部,通过分析有限元模型和频响函数预测了刀具的稳定性。摩擦阻尼器实施简单,但其对材料耐磨性有一定要求,同时在一定程度上限制了刀具寿命。此外,由于这种阻尼器各部件之间配合接触压力较高,尽管有良好的抑振效果,但摩擦会随着主轴转速的变化而变化,从而影响减振性能。

在铣刀内部预先设计用于质量元件运动的间隙或空间,可实现冲击阻尼效果。F. A. M. Galarza 等^[23]设计了一种细长立铣刀,其孔内填充钢球作为冲击质量单元。结果表明,质量块体积越大,阻尼性能越好。V. R. Saciotto 等^[24]进一步研究了材料和球体的几何形状对阻尼性能的影响。张恒明等^[25]设计了一种颗粒阻尼铣刀,对填充颗粒直径、密度和填充率等参数进行了分析。铣削试验结果表明,选取合适的填充参数时,该铣刀比实心铣刀降低了 50.09% 的表面粗糙度。

目前,冲击阻尼器的仿真分析工具较为匮乏,其参数设计与优化工作亦缺乏具体的理论依据。Liu Y. 等^[26]设计了一种新型的具有约束层阻尼结构的铣削刀柄,用解析法求解出了阻尼层的最优设计参数。切削试验结果表明,该阻尼刀柄的动刚度和临界轴向切削深度提高了 600%,实现了稳定的端铣加工。Xia Y. 等^[27,28]通过在铣刀刀杆表面镶嵌阶梯条,设计了一种具有高动刚度的变截面刀杆,并采用有限元法对结构和材料进行了优化;在该设计方案的基础上,团队还将阻尼芯嵌入刀柄体内,进一步提高了铣刀的切削稳定性。

在减振铣刀阻尼材料的研究中,Fu Q. L. 等^[29]采用等离子体增强化学气相沉积法制备了多层纳米结构的复合材料,将其应用于铣刀的夹紧部位。模态分析结果表明,复合材料涂层能够在增加刀具阻尼的同时避免了刚度损失,提高了铣削稳定性。Sheng D. P. 等^[30]基于高阻尼合金设计了两种减振铣刀:第一种是在普通的铣刀刀杆表面包裹高阻尼合金套筒;第二种是在装有套筒的同时,在刀杆和刀头之间加装了高阻尼合金垫片。通过试验发现,两种铣刀均能有效降低切削力,且后者能够达到更好的减振效

果。C. Brecher 等^[31]研究了 NITI 形状记忆合金在不同热处理参数和高动态载荷影响下的应力压缩行为, 证明了伪弹性形状记忆合金作为阻尼元件在铣削加工中的潜在应用, 为后续新型减振铣刀的开发提供了依据。

在减振铣刀领域, 耗能减振技术发展呈现出多方面趋势, 材料创新上从普通材料向多层纳米结构复合材料、高阻尼合金、伪弹性形状记忆合金等拓展。结构设计不断优化, 如设计摩擦阻尼铣刀、颗粒阻尼铣刀、带约束层阻尼结构的铣削刀柄、变截面刀杆等。未来, 耗能减振技术在减振铣刀领域将朝着改进摩擦阻尼器、优化冲击阻尼器设计, 开发新型阻尼材料并创新结合多种减振结构, 加强理论与仿真分析以完善阻尼建模, 以及拓展至电子制造、医疗器械制造等更多对加工精度要求高的应用场景等方向发展。

3.2 基于动力吸振技术的减振铣刀

动力吸振技术在减振铣刀中的应用也取得了良好的进展。杨毅青等^[32]对单自由度、多自由度与组合式动力吸振器等分别进行建模, 并根据 H_{∞} 、 H_2 和最大稳定优化 3 种准则进行优化。结果表明, 多自由度吸振器达到了更好的减振性能, 在铣削加工试验中, 该阻尼器能够将切削中的颤振和共振幅值分别降低 34.7% 和 56.4%。两自由度阻尼器在理论建模、结构优化及工程实现中均存在一定复杂度, 此工作实现了阻尼器刚度的近似线性调节, 解决了两自由度吸振器结构参数间强耦合导致的设计难题。基于上述理论研究, 该团队又提出一种内置两自由度被动阻尼器的减振铣刀, 并设计了不同长径比^[33-35]。结果表明, 长径比为 7 的铣刀能够将等效刚度提高 2.5 倍, 阻尼比提高 46.5%, 同时频响函数峰值下降约 70%; 长径比为 8 的减振铣刀 (见图 5^[35]) 在不同主轴转速、进给量和切深的参数组合下的切削试验中, 各个方向上的减振效果显著, 在铝合金切削试验中, 噪声、切削力和粗糙度分别降低了 5.1%、49.5% 和 7.4%。A. Patel 等^[36]研究了铣削加工中动力吸振器的参数优化方法, 相比经典的调谐方法, 无颤振加工稳定性极限从 11.5 倍提升至 16.5 倍。在切削加工中, 目前广泛使用的动力吸振器最大化最小负实部准则旨在提升绝对稳定切深, 但仅适用于单向切削颤振, 而且还具有降低稳定域叶瓣波峰的缺点, 导致部分主轴转速下的临界稳态切深下降。针对该问题, Shen R. 等^[37]开展稳定域图预测及边界辨识研究, 提出了动力吸振器

优化切削加工稳定性专用方法, 在保证切削参数鲁棒性的前提下, 通过稳定域叶瓣设计与重定位提高了特定主轴转速下的临界稳定切削深度。



图 5 内置动力吸振器的减振铣刀

Fig. 5 Damping milling cutter with in-embedded dynamic vibration absorber

侯学元等^[38]在立铣刀刀柄伸出端安装动力吸振器 (见图 6), 以用于铣削加工减振。该吸振器采用上下对称的薄壁梁结构, 铣刀刀杆直径为 30 mm、长度为 240 mm、立铣刀悬伸 30 mm。通过切削试验发现, 减振铣刀相比原刀杆能够显著改善加工表面质量, 抑振效果明显。Wang M. 等^[39]基于欧拉-伯努利悬臂梁模型和质量调谐阻尼器的两自由度模型, 提出了一种更精确的建模方法, 并通过仿真和优化, 得到了设计的最佳参数, 最后将该方法应用于减振铣刀的设计。模态试验结果表明, 新型铣刀比通过传统建模方法得到的铣刀具有更低的频响函数幅值和更大的切深, 对动力吸振器的设计具有一定指导意义。

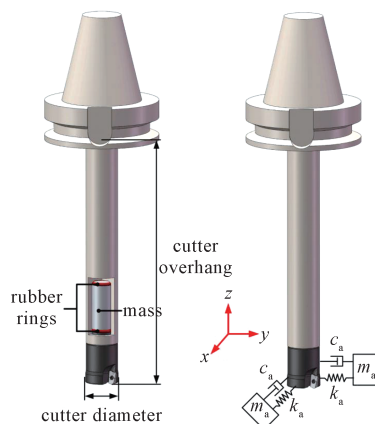


图 6 减振铣刀结构设计及双向颤振模型

Fig. 6 Structural design and bidirectional flutter model of vibration absorbing milling cutter

应用动力吸振技术的减振铣刀, 在材料上采用高

阻尼合金、伪弹性记忆合金等新型材料,结合多层纳米结构复合材料涂层,提升阻尼性能且避免刚度损失。结构设计从单自由度发展为多自由度及组合式,经参数优化可显著提升减振带宽与稳定性,与压电陶瓷等技术结合,实现能量转化与在线监测。高效化与多样化发展,提升动刚度与阻尼比,适配不同长径比刀具及多种材料加工。智能化与绿色环保方面,探索振动能量回收,未来有望集成传感器实现参数动态调谐。

3.3 基于颤振抑制技术的微型铣刀

在微铣削加工领域,受到刀具微小尺寸和高主轴转速的限制,阻尼器的设计仍存在挑战。S. Shakeri 等^[40]采用两个单自由度动力吸振器抑制微铣刀两个方向的振动,有效扩大了铣削稳定区域。Ma W. S. 等^[41]利用子结构响应耦合综合法,对微铣刀刀尖频响函数进行了预测,采用最大稳定性准则优化了阻尼器参数,设计出两自由度吸振器,并进行了槽形微铣削试验,以进一步研究所设计的调谐质量阻尼器(TMD)对抑制颤振的效果,试验装置如图7所示。试验结果表明,该阻尼器能够起到很好的抑振效果,在30 000 r/min和60 000 r/min的转速下,临界切削深度分别提高了10倍和13倍。具有宽频率调谐范围的吸振器可进一步应用于具有不同凹槽直径的微型铣刀。

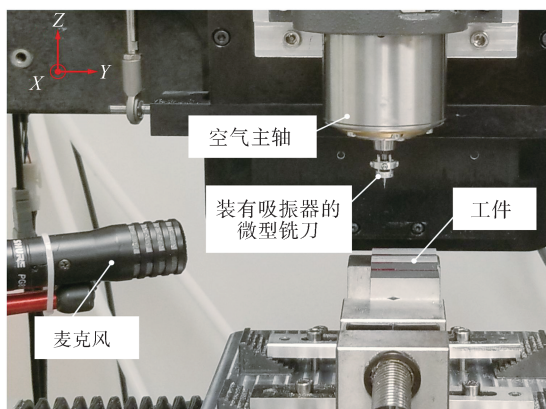


图7 减振微型铣刀

Fig. 7 Damping micro milling cutter

微型铣刀在颤振抑制技术发展中,研究者针对微小尺寸限制,开发两自由度吸振器,通过子结构响应耦合综合法优化参数,使临界切削深度显著提升。微型吸振器设计注重轻量化与紧凑性,适配不同凹槽直径的刀具,为微型铣刀的颤振抑制提供了一种低成本、可靠的解决方案。

4 减振镗刀

镗刀主要用于零件内孔的加工。镗削加工中,特别是深孔镗削时,由于刀杆悬伸较长,且刀具的后刀面和内孔的摩擦较大,切削系统易处于不稳定状态,颤振现象的发生更为频繁。

4.1 基于耗能减振技术的减振镗刀

为了减小镗削加工过程中的颤振,E. Edhi 等^[42]设计了带有内置摩擦阻尼器的阻尼镗杆,成功抑制了5000 Hz以上的高频颤振。由于结构设计简单且无需调整,所设计的阻尼器可作为解决精镗等连续切削操作所产生的高频颤振的可行方案。Wang M. 等^[43]建立了摩擦阻尼镗杆的摩擦力数学模型,对该模型进行研究获得了阻尼镗杆的频响函数,并对质量比和力比进行了优化,以最大限度地提高镗孔稳定性;同时,基于该模型,依据再生颤振理论实现了加工稳定性的预测,弥补了基于库伦摩擦和黏性摩擦进行阻尼器定性建模的缺陷。S. Hayati 等^[44]开发了一种具有内摩擦阻尼结构的新型镗杆,该阻尼结构由纵向压紧在镗杆内部的销钉组成。通过能量耗散的分析模型和镗杆的有限元建模,得到了内摩擦阻尼结构的最佳参数配置。模态试验和切削试验结果表明,该镗杆的阻尼比提高了34.9%。此外,区别于传统的摩擦阻尼器,该阻尼结构能够用于旋转或非旋转刀具,并且不限于实心圆截面结构,具有较强的适用性。C. Singaravelu 等^[45]将铜基形状记忆合金用于摩擦阻尼减振镗杆设计,通过对比研究不同材料制成的摩擦阻尼器镗杆,发现采用铅黄铜阻尼的镗杆表现出最好的性能,有效降低了表面粗糙度,相比市售的镗杆经济可行性更高。

C. V. Biju 等^[46]研制了基于颗粒冲击阻尼的减振镗杆,对阻尼腔位置参数进行了优化,所设计的镗杆能够提高镗孔质量,减少了圆度误差。G. Singh 等^[47]设计了一种新型颗粒阻尼减振镗杆,以改善加工表面质量,减少刀具磨损。H. C. G. de Aguiar 等^[48]设计了一种气流辅助颗粒阻尼镗刀,利用压缩气流诱导颗粒运动,以增加颗粒与空腔之间的摩擦力和冲击力。切削试验结果表明,该镗刀能够将平均表面粗糙度降低约60%。S. Ema 等^[49]将冲击阻尼器安装于镗刀侧面,成功抑制了两个方向的颤振,提高了镗削深度,但发生碰撞时会产生较大的噪声。冲击阻尼器具有结构简单的优点,但其非线性特征明显,理论建

模复杂, 实际设计过程中需要进行多次反复试验来验证和优化设计参数。H. V. Panossian^[50]发现颗粒阻尼的填充率与系统振动强弱有很大关系。G. Stépán 等^[51]对中心流形进行了研究, 推理出一个简单的公式, 并将其用于实际情况以确定切削宽度, 得出低于此宽度可有效避免颤振的结论。

夏峰等^[52]以抑制镗杆的振幅、提高镗杆的固有频率为目标, 设计了一种约束阻尼型减振镗杆, 通过有限元分析仿真实现了镗杆阻尼层外围半径的参数优化, 对优化后的镗杆进行了切削试验, 发现在长径比为6的情况下, 表面粗糙度能够降低50%以上。刘洋等^[53]根据 Kelvin-Voigt 黏弹性力学模型理论建立了约束阻尼型减振镗杆的动力学模型, 对其进行了结构和材料的优化, 分别改变主轴转速和切深进行试验, 发现减振镗杆能够有效减小径向振动、改善表面粗糙度; 此外, 还对约束阻尼抑振机理进行了研究, 在一定程度上弥补了相关方向理论研究的不足。基于黏弹性材料的阻尼器减振效果主要由材料性能、阻尼厚度以及阻尼器的结构等因素决定。未来的研究中, 开发高性能阻尼材料具有重要意义。

此外, S. Hayati 等^[54]设计了一种刚度可调的镗杆, 利用调节螺钉改变镗杆模态参数, 提高了镗削加工稳定性。U. Yigit 等^[55]将压电分流技术应用于镗杆的颤振抑制, 将外部电路的阻抗调谐到刀具固有频率以达到最佳抑振效果。切削试验结果表明, 绝对稳定极限提高了250%。基于流体力学原理, 孟凡冲等^[56]设计了一种具有多个细长小孔的减振镗杆, 在切削过程中, 切削液流经细长小孔时在节流作用下形成涡流, 从而增大刀杆的阻尼比, 同时将振动能量转化为热能耗散出去。动力学分析和仿真结果表明, 所设计的镗杆具有很好的减振性能。赵永成等^[57]基于挤压液膜阻尼原理设计了一种减振镗杆, 利用液体摩擦耗散振动能量, 改善了精镗削的加工性能, 提高了加工表面质量。

在基于耗能减振技术的镗刀发展中, 材料创新从普通金属拓展至高密度填充材料、黏弹性材料及适配特殊阻尼原理的材料, 带来如降低表面粗糙度、提高经济可行性、降低表面粗糙度超50%等成果, 结构设计则从内置摩擦阻尼器、内摩擦阻尼结构、颗粒冲击阻尼结构, 发展到刚度可调、应用压电分流技术等多样化结构, 实现抑制高频颤振、提升阻尼比、降低表面粗糙度等成效, 显著提升镗削加工的稳定性

与质量。

4.2 基于动力吸振技术的减振镗刀

在利用动力吸振技术方面, Y. Altintas 等^[58]开发了一种能够自调谐的动力吸振器, 并将其应用于大长径比的镗杆。结果表明, 频响函数的实部从 $-15.17 \mu\text{m}/\text{N}$ 减小到 $-0.24 \mu\text{m}/\text{N}$, 动刚度提高到原来的6.2倍。Liu X. L. 等^[59]通过分析镗杆的振动特性, 并得出了不同激励频率下减振性能的变化规律, 设计了一种基于变刚度动力吸振器的镗杆。H. Moradi 等^[60]将由质量、弹簧和缓冲器单元组成的可调谐阻尼器应用于镗杆, 并建立了镗杆的悬臂欧拉-伯努利梁模型, 通过优化算法确定了阻尼器的最佳参数。L. Rubio 等^[61]研究了应用于镗杆的动力吸振器参数优化问题, 提出阻尼器频率和阻尼比最优值的经验拟合公式。稳定波瓣图结果表明, 镗杆稳定性得到明显提升。A. Bansal 等^[62]提出一种基于响应耦合的动力吸振器优化方法, 将其用于镗杆阻尼器动力学参数和安装位置的优化。结果表明, 镗杆的无颤振切削深度从0.03 mm增加至0.28 mm。秦柏等^[63]建立了内置式动力减振镗杆的有限元模型, 利用仿真软件对减振镗杆的性能进行了验证。刘强等^[64]提出了一种变质量吸振器的新型减振镗杆, 通过调节吸振块质量实现减振镗杆刚度的改变。针对动力减振镗杆的最优参数设计问题, 何苗等^[65]提出了一种新的计算方法, 将动力减振镗杆视为不等截面梁, 通过数值方法识别其等效参数, 并且适用于其他机械结构不等截面梁的计算。数值仿真结果表明, 新方法能够简便高效地实现减振器参数求解。

5 展望

当前, 长悬伸减振刀具的研制已经有了长足的发展。得益于结构简单、可靠性高、成本低廉, 被动减振技术在长悬伸刀具中应用十分广泛。本文对动力吸振和耗能减振技术进行了简要概括, 并从车刀、铣刀和镗刀3个方面总结了国内外研究现状。目前, 国内学者在减振车刀与减振镗刀的设计中已经取得明显的成果, 而铣削一般依靠较高的主轴转速进行加工, 其动力学特性较为复杂, 导致减振铣刀设计仍存在一定困难, 未来需要对其进行进一步探索。

1) 理论创新

现阶段对于阻尼建模的理论体系还有待完善, 例如冲击阻尼器在设计过程中更多地依靠试验手段进

行设计参数的优化,方法通用性差,而当设计参数过多时,则很难对最优参数进行确定。为使阻尼器的实际性能尽可能接近理论最优,后续需开展精确阻尼建模,对阻尼的定量、确定性实现方法进行探索。另一方面,在动力吸振器设计过程中,当使用特殊材料或振幅较大时,材料与几何非线性问题不可避免,由此带来的非线性响应问题(如分叉、混沌等)以及对应吸振器的设计问题还有待进一步研究。

2) 材料创新

对制作阻尼元件的材料进行创新是提升减振刀具性能的关键因素之一。从制作阻尼元件所用的传统普通金属材料入手,逐渐拓展到橡胶等高内损耗因子材料,利用其将振动动能转化为热能实现耗能减振。黏弹性材料在约束层阻尼刀具中发挥重要作用,通过优化阻尼层厚度等参数,显著提高刀具阻尼比。高密度的铜或黄铜、锰铜合金、压电材料、多层纳米结构复合材料、高阻尼合金以及伪弹性形状记忆合金等新型材料相继应用于减振刀具,在改善阻尼性能、实现振动能量转化与监测、提高动刚度等方面取得显著成效。采用可回收阻尼材料与低能耗制造工艺、减少切削液使用、降低噪声污染,并结合振动能量回收技术实现加工过程的低碳化。

3) 减振刀具的结构设计

在车刀、铣刀和镗刀领域,基于不同减振原理设计出多种创新结构。冲击阻尼器结构不断改进,从普通颗粒冲击阻尼器到增大球体尺寸的设计,以及针对不同刀具的优化应用,都有效提升了减振效果。摩擦阻尼器结构在铣刀和镗刀中广泛应用,通过在刀柄或镗杆中安装阻尼器,利用接触表面的相对滑动耗散振动能量。带有约束层阻尼结构的刀柄、变截面刀杆、刚度可调镗杆等结构创新,以及不同自由度和组合形式的动力吸振器应用,如三要素式动力吸振器在车刀中的应用、两自由度动力吸振器在铣刀中的应用等,从多方面提高刀具的刚度和阻尼特性,抑制切削颤振。

4) 与前沿技术融合创新

传统的减振方式受限于作用机理,抑振效果有限。如何实现更简单或更高效的减振设计,是有待进一步研究和突破的难题。随着新原理的出现,对现有理论进一步扩充,减振刀具的设计将会有新的发展。如利用涂层阻尼技术提高刀具阻尼;基于压电分流的减振刀具能够在不破坏刀具原有结构的情况下进行

振动控制;利用压电效应实现振动能量的转化,将压电材料与动力吸振技术相结合,在抑制刀具振动的同时,压电材料由于形变而产生电能,输出电压可用于加工过程监测等。

5) 应用场景扩展

最初,减振刀具主要应用于航空航天、汽车制造等对加工精度和零件质量要求极高的行业,用于解决大长径比刀具在加工深孔、深腔特征零件时的颤振问题。随着技术的发展,其应用范围逐渐拓展到包装机械关键部件加工领域,有效解决了刀具长悬伸导致的振动问题,提升了包装材料的加工质量和生产效率。未来,减振刀具技术有望进一步拓展至电子制造、医疗器械制造等更多对加工精度要求苛刻的行业,满足不同领域的加工需求。

参考文献:

- [1] 顾庭瑞,肖方志,郭伟,等. 切削颤振机理及控制[J]. 金属加工(冷加工), 2010(10): 36-38.
- [2] 王跃辉,王民. 金属切削过程颤振控制技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 166-174.
- [3] SUYAMA D I, DINIZ A E, PEDERIVA R. The Use of Carbide and Particle-Damped Bars to Increase Tool Overhang in the Internal Turning of Hardened Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5): 2083-2092.
- [4] DINIZ A E, da SILVA W T A, SUYAMA D I, et al. Evaluating the Use of a New Type of Impact Damper for Internal Turning Tool Bar in Deep Holes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5): 1375-1390.
- [5] PAUL P S, RAJA P, ARULDHAS P, et al. Effectiveness of Particle and Mass Impact Damping on Tool Vibration During Hard Turning Process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(5): 776-786.
- [6] LI T, QIU D, SEGUY S, et al. Activation Characteristic of a Vibro-Impact Energy Sink and Its Application to Chatter Control in Turning[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 405: 1-18.
- [7] YANG Y Q, WANG X. Investigation into the Linear Velocity Response of Cantilever Beam Embedded with Impact Damper[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(7): 1365-1378.
- [8] 杨毅青,吴栋辉,王熙. 基于冲击阻尼的深孔车削

- 减振车刀设计[J]. 航空制造技术, 2019, 62(17): 22–30.
- [9] LIU Y, LIU Z Q, SONG Q H, et al. Analysis and Implementation of Chatter Frequency Dependent Constrained Layer Damping Tool Holder for Stability Improvement in Turning Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 687–695.
- [10] MOHAN E, MAMUNDI AZAATH L, NATARAJAN U. Experiment Study on Damping Characteristics of the Turning Tool Holder Materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 37: 3713–3717.
- [11] DA SILVA M M, VENTER G S, VAROTO P S, et al. Experimental Results on Chatter Reduction in Turning Through Embedded Piezoelectric Material and Passive Shunt Circuits[J]. Mechatronics, 2015, 29: 78–85.
- [12] 黄振华, 沈浩, 张旺, 等. 硬态切削下内孔车刀双减振刀杆的模拟研究[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(1): 28–30.
- [13] 霍桂臣, 刘宝会, 冀璞光, 等. 阻尼合金在切削工具中的应用仿真研究[J]. 河北工业大学学报, 2020, 49(2): 73–76, 81.
- [14] TARNG Y S, KAO J Y, LEE E C. Chatter Suppression in Turning Operations with a Tuned Vibration Absorber[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1/2): 55–60.
- [15] LEE E C, NIAN C Y, TARNG Y S. Design of a Dynamic Vibration Absorber Against Vibrations in Turning Operations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108(3): 278–285.
- [16] HABIB G, KERSCHEN G, STEPAN G. Chatter Mitigation Using the Nonlinear Tuned Vibration Absorber[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2017, 91: 103–112.
- [17] YANG Y Q, GAO H Y, MA W S, et al. Design of a Turning Cutting Tool with Large Length-Diameter Ratio Based on Three-Element Type Vibration Absorber[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020, 234(6/7): 1032–1043.
- [18] 张明华, 杨国庆, 杨毅青, 等. 内置动力吸振器的宽频减振车刀设计及试验[J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 338–344.
- [19] 杨毅青, 申睿, 高浩洋, 等. 基于压电效应的切削振动能量收集及减振刀具应用[J]. 航空制造技术, 2021, 64(14): 66–70, 100.
- [20] DENKENA B, BERGMANN B, TEIGE C. Frictionally Damped Tool Holder for Long Projection Cutting Tools[J]. Production Engineering, 2018, 12(6): 715–722.
- [21] ZIEGERT J C, STANISLAUS C, SCHMITZ T L, et al. Enhanced Damping in Long Slender End Mills[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2006, 8(1): 39–46.
- [22] MADOLIAT R, HAYATI S, GHASEMI GHALEBAHMAN A. Investigation of Chatter Suppression in Slender Endmill via a Frictional Damper[J]. Scientia Iranica, 2011, 18(5): 1069–1077.
- [23] GALARZA F A M, de ALBUQUERQUE M V, ANTONIALI A Í S, et al. Design and Experimental Evaluation of an Impact Damper to Be Used in a Slender End Mill Tool in the Machining of Hardened Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5): 2553–2567.
- [24] SACIOTTO V R, DINIZ A E. An Experimental Evaluation of Particle Impact Dampers Applied on the Tool for Milling of Hardened Steel Complex Surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11): 7579–7597.
- [25] 张恒明, 庞学慧. 颗粒阻尼铣刀减振分析与试验研究[J]. 制造技术与机床, 2016(6): 89–93.
- [26] LIU Y, LIU Z Q, SONG Q H, et al. Development of Constrained Layer Damping Toolholder to Improve Chatter Stability in End Milling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 117: 299–308.
- [27] XIA Y, WAN Y, LUO X C, et al. Development of a Toolholder with High Dynamic Stiffness for Mitigating Chatter and Improving Machining Efficiency in Face Milling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106928.
- [28] XIA Y, WAN Y, LUO X C, et al. Improvement of Milling Stable Processing Condition for a Cutter with Large Ratio of Length to Diameter[J]. IEEE Access, 2020, 8: 200420–200429.
- [29] FU Q L, LORITE G S, RASHID M M, et al. Suppressing Tool Chatter with Novel Multi-Layered Nanostructures of Carbon Based Composite Coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 292–298.
- [30] SHENG D P, LU F X, WAN H S. Experimental Study of Milling Cutter with High Damping Alloy Sleeve[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2002(1): 012021.
- [31] BRECHER C, NEUS S, KLUMPEN N, et al. Investigation of Transformation Behaviour of Pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys Under Compressive Loading to Assess the Potential Use in

- Vibration Damping in Milling Operations[C]//Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2021: 67467.
- [32] 杨毅青, 代 巍. 两自由度被动阻尼器设计及数控加工应用[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(10): 2653-2658.
- [33] 杨毅青, 余 玉. 基于两自由度被动阻尼器的减振铣刀设计[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(11): 2588-2593.
- [34] 杨毅青, 骈亚威, 王云飞. 内置被动阻尼器减振铣刀的实验测试[J]. 振动测试与诊断, 2019, 39(6): 1177-1182, 1357.
- [35] YANG Y Q, WANG Y F, LIU Q. Design of a Milling Cutter with Large Length-Diameter Ratio Based on Embedded Passive Damper[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(3): 506-516.
- [36] PATEL A, TALAVIYA D K, LAW M, et al. Optimally Tuning an Absorber for a Chatter-Resistant Rotating Slender Milling Tool Holder[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 520: 116594.
- [37] SHEN R, YANG Y Q. An Updated Tuning Methodology of Vibration Absorber for Machining Chatter Suppression[J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 569: 118084.
- [38] 侯学元, 韩淑华, 郭如飞, 等. 一种用于大长径比铣刀杆减振的新型动力减振器[J]. 机床与液压, 2021, 49(4): 102-106.
- [39] WANG M, QIN P, ZAN T, et al. Improving Optimal Chatter Control of Slender Cutting Tool Through More Accurate Tuned Mass Damper Modeling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 513: 116393.
- [40] SHAKERI S, S SAMANI F. Application of Linear and Nonlinear Vibration Absorbers in Micro-Milling Process in Order to Suppress Regenerative Chatter[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 89(2): 851-862.
- [41] MA W S, YANG Y Q, JIN X L. Chatter Suppression in Micro-Milling Using Shank-Mounted Two-DOF Tuned Mass Damper[J]. Precision Engineering, 2021, 72: 144-157.
- [42] EDHI E, HOSHI T. Stabilization of High Frequency Chatter Vibration in Fine Boring by Friction Damper[J]. Precision Engineering, 2001, 25(3): 224-234.
- [43] WANG M, ZAN T, GAO X. Modeling and Optimization of a Friction Damper for Boring Chatter Control[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 690768.
- [44] HAYATI S, SHAHROKHI M, HEDAYATI A. Development of a Frictionally Damped Boring Bar for Chatter Suppression in Boring Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(9): 2761-2778.
- [45] SINGARAVELU C, VARATHARAJAN P, RAMU G, et al. Investigation of Damping Characteristics on Copper-Based Shape Memory Alloy Frictional Damper in Boring Process[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(12): 11859-11870.
- [46] BIJU C V, SHUNMUGAM M S. Investigation into Effect of Particle Impact Damping (PID) on Surface Topography in Boring Operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5): 1219-1231.
- [47] SINGH G, MANN G S, PRADHAN S. Improving the Surface Roughness and Flank Wear of the Boring Process Using Particle Damped Boring Bars[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(14): 28186-28194.
- [48] DE AGUIAR H C G, HASSUI A, SUYAMA D I, et al. Reduction of Internal Turning Surface Roughness by Using Particle Damping Aided by Airflow[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1): 125-131.
- [49] 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.
- [50] PANOSSION H V. Non-Obstructive Particle Damping Tests on Aluminum Beams[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1991, 3078(3): ICD1-7.
- [51] STÉPÁN G, KALMAR-NAGY T. Nonlinear Regenerative Machine Tool Vibrations[C]//ASME Design Engineering Technical Conferences. Sacramento: American Society of Mechanical Engineers, 1997. DOI: 10.1115/DETC97/VIB-4021.
- [52] 夏 峰, 刘战强, 宋清华. 约束阻尼型减振镗杆[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2652-2659.
- [53] 刘 洋, 刘战强, 宋清华. 约束阻尼型镗杆的优化及减振性能[J]. 航空学报, 2016, 37(6): 1992-2002.
- [54] HAYATI S, HAJALIAKBARI M, RAJABI Y, et al. Chatter Reduction in Slender Boring Bar via a Tunable Holder with Variable Mass and Stiffness[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(12): 2098-2108.
- [55] YIGIT U, CIGEROGLU E, BUDAK E. Chatter Reduction in Boring Process by Using Piezoelectric Shunt

- Damping with Experimental Verification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 312–321.
- [56] 孟凡冲, 关世玺, 王治鑑, 等. 细长孔阻尼抑制深孔镗削颤振的研究[J]. 工具技术, 2018, 52(4): 68–72.
- [57] 赵永成, 马飞, 闫长罡, 等. 精镗孔时液膜阻尼减振效果的研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(21): 1827–1829, 1855.
- [58] ALTINTAS Y, LAPPIN D, VAN ZYL D, et al. Automatically Tuned Boring Bar System[J]. CIRP Annals, 2021, 70(1): 313–316.
- [59] LIU X L, LIU Q, WU S, et al. Analysis of the Vibration Characteristics and Adjustment Method of Boring Bar with a Variable Stiffness Vibration Absorber[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1): 95–105.
- [60] MORADI H, BAKHTIARI-NEJAD F, MOVAHHEDY M R. Tuneable Vibration Absorber Design to Suppress Vibrations: an Application in Boring Manufacturing Process[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318(1/2): 93–108.
- [61] RUBIO L, LOYA J A, MIGUÉLEZ M H, et al. Optimization of Passive Vibration Absorbers to Reduce Chatter in Boring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1/2): 691–704.
- [62] BANSAL A, LAW M. A Receptance Coupling Approach to Optimally Tune and Place Absorbers on Boring Bars for Chatter Suppression[J]. Procedia CIRP, 2018, 77: 167–170.
- [63] 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.
- [64] 刘强, 刘献礼, 吴石, 等. 变质量动力吸振器减振镗杆减振性能研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(5): 25–29.
- [65] 何苗, 孙蓓蓓. 识别动力减振镗杆主系统等效参数的数学计算方法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 194–198, 244.

(责任编辑: 李玉华)

Research Progress in Passive Vibration Damping Cutter Technology

WU Wenjing^{1,2}, LI Longpeng³

(1. State Key Laboratory of High-End Heavy-Load Robots, Foshan Guangdong 528311, China;

2. Guangdong Midea Electric Co., Ltd., Foshan Guangdong 528311, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In aerospace and packaging machinery, structural components often contain deep holes and cavities that require cutting tools with high length-to-diameter ratios during machining. However, the stiffness of these tools decreases significantly with the increase in length-to-diameter ratio, leading to frequent cutting chatter that severely limits machining efficiency and accuracy. Passive vibration suppression technologies, characterized by their effectiveness and simplicity in implementation, have demonstrated great potential in improving the stiffness/damping characteristics of long overhang tools. These technologies mainly operate via energy dissipation and dynamic vibration absorption mechanisms. Recent research progress in long overhang tool design for turning, milling and boring operations is systematically reviewed, covering both domestic and international developments. With ongoing advancements in structural design and materials science, future research directions may focus on theoretical innovations, structural optimization, development of novel damping materials, and exploration of new vibration suppression principles.

Keywords: packaging machinery; machining; damping cutter; chatter; vibration control; passive damper