

航空零部件车铣加工技术的应用与发展*

孙涛^{1,2},傅玉灿¹,何磊¹,侯军明¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 徐州工程学院机电工程学院, 徐州 221111)

[摘要] 进行了航空材料和结构特征对车铣加工技术的需求分析,总结了车铣加工技术在航空难加工材料典型零部件加工中的应用现状,分析了车铣加工技术在推广应用中的问题,提出了进一步开发航空零部件车铣加工技术潜力的构想。

关键词: 航空; 车铣加工; 难加工材料; 典型结构

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.024



孙涛

博士研究生,副教授。主要研究方向为高效精密加工技术。

为了满足超高速、高空、长航时、超远航程的新一代飞行器的需要,高强度钢、钛合金、镍基高温合金等难

* 基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0139); 中央高校基本科研业务费专项资金。

加工材料在航空零部件中所占的比例越来越大,同时采用此类难加工材料的零件要求的加工精度也越来越高,这就对制造技术提出了更高的要求。尤其对于细长杆、机匣、起落架、叶片等一些具有特殊结构特性的回转类零件,由于存在材料切削加工性差、加工易变形、加工精度高难以保证等问题,采用传统的切削加工方法已难以完全胜任此类零件高效精密加工的技术需求,而车铣加工技术的出现在一定程度上满足了此类零件的加工需求。

车铣加工技术是德国学者Schulz在20世纪90年代提出的^[1-2],发展至今,它已经成为充分适应数控技术条件的一种高新切削技术。车铣加工技术是利用铣刀和工件旋转的合成运动来实现对工件的切削加工,使工件在形状精度、位置精度、表面粗糙度及残余应力等多方面达到使用要求的一种先进切削加工方法。

20多年来,国内外学者在运动

原理^[3-6]、切屑形貌^[7-9]、切削动力学^[10-19]和加工质量^[20-25]等方面对车铣加工技术进行了不断的探索和研究,相继的研究成果表明车铣加工技术具有如下特点:易于排屑,适合数控自动加工;间断切削利于冷却降温,适用于加工导热系数小的难加工材料;相对于车削,径向力下降有利于加工细长杆和薄壁件;通过工件的低速旋转和铣刀的高速旋转,在降低工件离心力的前提下实现了工件的高速加工,适合于大型回转类零件的加工;在高进给量的条件下仍可实现较低的表面粗糙度值,且加工表面质量优于车削,是一种典型的高效精密加工方法。

鉴于车铣加工技术的工艺优势,现阶段车铣加工技术在航空零部件加工中得到了广泛的应用。本文尝试总结车铣加工技术的研究与应用现状,分析存在的问题,提出如何在更高层面上开发车铣加工技术潜力的研究构想。

车铣加工技术在航空零部件中的应用

车铣加工按铣刀与工件的相对位置分为轴向、正切和正交车铣3类常用的加工方法。它们分别有各自的特点,如图1所示。轴向车铣由于受到刀具长度的限制,所以加工行程不长;正切车铣由于受到刀具长度的限制,所以一般适合于直径较小的细长轴类零件的加工;正交车铣的铣刀回转轴线与工件的回转轴线相互垂直,是加工大型回转体和细长轴类零件的一种高效方法。其中,正交车铣可根据铣刀轴线和工件轴线的距离和方位分为无偏心、上偏心和下偏心3种加工方式。

1 难加工材料的车铣加工

车铣加工技术是否适合于难加

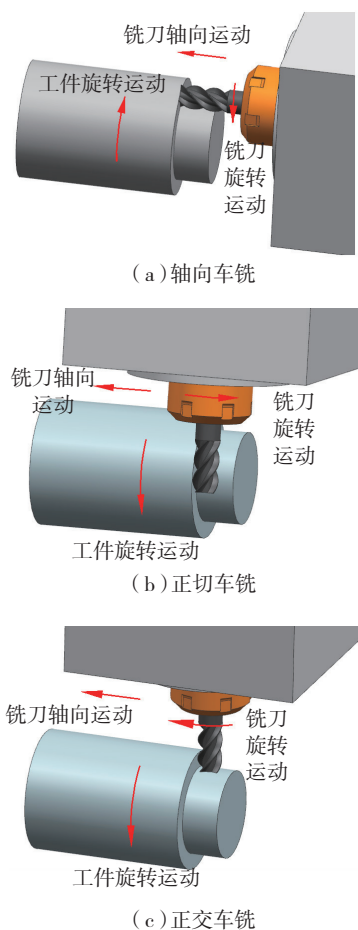


图1 车铣加工的主要运动形式

Fig.1 Main motion types of turn-milling

工材料的加工对于车铣加工技术的推广具有重要的意义。国内外学者对车铣加工难加工材料进行了大量的试验研究,确认了车铣加工技术适用于难加工材料切削的优越性,扩大了车铣加工的应用范围。

1.1 高强度钢的车铣加工

在车铣加工技术领域具有开创性的代表人物是Schulz^[1-2],他在首先提出车铣加工概念的同时,采用硬质合金P20/30(对应于我国的YT14/5牌号)、CBN和复合陶瓷涂层(Al_2O_3+TiC)刀具对轴承钢100Cr6($HRC \geq 62$)进行轴向车铣加工,进行了刀具磨损、表面粗糙度、表面形貌试验,结果表明车铣加工可以在工件低速旋转条件下实现高速切削,且断屑容易;其表面粗糙度值远小于车削,加工表面粗糙度 R_a 小于 $0.5 \mu m$, R_z 小于 $2 \mu m$,可媲美磨削。Schulz的研究成果提供了一种新的可替代车削的加工方式,尤其适用于车削后需要磨削的零件。同时,其研究成果也为车铣加工技术在难加工材料、大型回转类零件以及薄壁类等零部件加工上的应用提供了思路和借鉴。

我国学者对于不同刀具材料、不同切削条件下车铣加工高强度钢的刀具磨损规律和机理进行了大量的试验研究工作。结论如下:

(1)对于涂层刀具来说,采用干切削的刀具耐用度大大高于采用水溶乳化液冷却的刀具耐用度。这是由于水溶乳化液冷却时高频交变热应力较大,涂层剥落较快;干式切削时,高频交变热应力较小,虽在涂层表面有微裂纹产生,但涂层不易剥落,刀具耐磨性较好。例如采用TiN涂层刀具高速正交车铣D60钢时,干切削的刀具耐用度是185min,而水溶性冷却的刀具耐用度只有35min;采用金属陶瓷刀具高速车铣D60钢时,干切削的刀具耐用度是160min,而水溶性冷却的刀具耐用度只有18

min^[26-28]。

(2)正交车铣高强度钢时,刀具磨损规律与铣刀速度有很大关系,刀具磨损随铣刀速度的提高而加剧。例如,在水溶性冷却液浇注冷却条件下,采用陶瓷刀片高速正交车铣D60钢,当铣刀速度 $v=392.5m/min$ 时,后刀面磨损可经历初期磨损、正常磨损和剧烈磨损3个阶段,而当 $v=785m/min$ 时,刀具只经过很短时间便迅速磨损^[29-30]。同时,高速正交车铣高强度钢时,不论湿式切削还是干式切削,刀具的主要磨损形态是后刀面磨损^[26-27,29]。

(3)正交车铣的刀具磨损机理与铣刀速度、刀具材料、工件材料和冷却条件有很大关系。例如在水溶性冷却液浇注冷却条件下,采用TiN涂层刀具高速正交车铣D60钢时,在较低的切削速度下车铣复合加工高强度钢的刀具磨损机理主要以粘结磨损为主,在此基础上也伴随疲劳一剥落磨损和磨料磨损等;而在较高的切削速度下以疲劳一剥落磨损和扩散磨损为主,并伴随粘结磨损和磨料磨损等,各种磨损机理在不同的切削条件下相互影响、相互作用^[27,29-30]。

1.2 钛合金的车铣加工

姜增辉等^[31-32]对采用TiAlN涂层硬质合金刀具对钛合金TC4的轴向车铣研究表明:顺铣的刀具耐用度要高于逆铣,刀具磨损速度随着切削速度的增大而增大,且磨损主要发生在刀尖刃口与后刀面处,刀具磨损形式以粘结磨损为主;切削速度在50~150m/min范围内对已加工表面粗糙度没有明显的影响,每齿进给量从0.05mm增加到0.15mm,已加工表面粗糙度明显增大。

石莉等^[33-34]对比了无涂层和TiAlN涂层硬质合金刀具正交车铣TC4的刀具耐用度情况,表明逆铣时刀具和工件摩擦、挤压严重,切削刃处容易积累大量切削热,加上刀具的切入和切出,使刀片承受交变载荷,

从而在切削液的作用下产生微裂纹,而采用无涂层硬质合金刀具在顺铣干切条件下可以延缓刀具磨损,提高刀具耐用度。

潘靖宇等^[22]在建立正交车铣已加工表面粗糙度理论模型的基础上,对钛合金 TC9 进行试验验证,通过增大转速比和偏心量以及降低轴向进给量,可以保证表面粗糙度 R_a 控制在 $1\mu\text{m}$ 以内,这表明正交车铣完全可以实现钛合金的精密加工。

1.3 镍基高温合金的车铣加工

Karagüzel 等^[35]着重考察了冷却润滑方式对车铣加工难加工材料的切削加工性的影响。采用硬质合金刀具,对比了常规浇注冷却车削、干式正交车铣、常规浇注冷却正交车铣、微量润滑技术(MQL)正交车铣4种方式下加工镍基高温合金 Inconel 718 的刀具磨损过程。试验结果表明刀具耐用度大小的关系是: MQL 正交车铣 > 常规浇注冷却正交车铣 > 干式正交车铣 > 常规浇注冷却车削,且 MQL 正交车铣的刀具耐用度约是常规浇注冷却车削的 3.5 倍。Karagüzel 等的研究表明,由于车铣加工断续切削的方式更利于排屑和降温,有利于降低切削温度,减缓刀具的磨损;同时配合合适的冷却方式,可以大幅度提高刀具耐用度。该研究为车铣加工在导热率低、切削温度高的钛合金、高温合金等难加工材料上的应用提供了参考。

2 细长轴零件的车铣加工

通常称长径比大于 25 的轴为细长轴。细长轴零件的加工特点是径向刚度低,加工过程中容易产生径向振动。同时,航空等行业中所需的细长轴零件的径向尺寸和形状精度及表面粗糙度的要求又很高,故其加工一直是机械加工中的难点之一。

为解决以上问题,跟刀架车削法、夹拉车削法、反向车削法、砂带磨削、双刀车削法等工艺方法和自动控制理论被用于加工细长轴零件,但是

依然无法很好地解决细长轴零件高效精密加工的问题。

根据不同的材料确保合适的切削速度是保证工件加工质量的有效方法,但是对于细长轴类零件来说,由于其直径很小,采用车削加工的方法会造成工件转速很高,造成离心力和振动增大。例如加工直径 1mm 的铝合金细长轴,按照铝合金推荐的最低切削速度 $500\text{m}/\text{min}$ 计算,工件转速需达到 $159235\text{r}/\text{min}$,这在实际生产中根本无法实现;而采用车铣加工的方式,可以在工件转速很低的情况下实现高速加工。例如上述的工件,在工件转速 $2\text{r}/\text{min}$ 的条件下,采用直径 5mm 的铣刀和推荐的参数,铣刀转速需达到 $31847\text{r}/\text{min}$,这在实际生产中是可以实现的。

现阶段,通过切削力、颤振和强迫振动仿真与分析,以及各种加工质量预测与优化方法研究,为进一步提高车铣加工细长轴零件的加工质量提供了强有力的技术支撑,从而促使车铣加工技术更加广泛地应用于细长轴零件的实际生产。

目前,车铣加工技术在细长轴零件的应用主要包括常规细长轴(简称细长轴)和微型细长轴。

2.1 细长轴的车铣加工

现有的试验研究表明,细长轴的加工采用车铣加工方式比车削具有更小的表面粗糙度值和更高的加工精度。

细长轴的车铣加工过程中,强迫振动是影响加工过程的稳定性从而降低刀具耐用度和恶化加工表面质量的重要因素。刘晔等^[36-38]对于细长轴的正交车铣和轴向车铣的强迫振动的产生和抑制进行了分析和研究。在正交车铣加工细长轴方面,采用 matlab 软件通过对等截面梁横向振动理论建立的模型进行仿真,表明振动系统对强迫振动可起到一定的抑制作用,且强迫振动振幅大小与抑制作用成正比。在轴向车铣加工细

长轴方面,采用 ANSYS 软件通过对弹性体动力学理论建立的模型进行了模态分析和谐响应分析,得到了细长轴振动峰值的频率和幅值,提出合理选择铣刀转速和齿数可使切削频率避开共振区间的措施。

祝孟琪等^[39]通过单因素试验法对长径比为 300/10 的不锈钢细长轴的正交车铣加工参数进行优化,在优化的加工参数下进行了正向和反向的车铣加工试验,结果表明:反向切削时,车铣力的轴向分力使细长轴工件切削时受拉,相当于增加了细长轴的刚度,所以反向车铣时可获得较高的加工质量:表面粗糙度 R_a 为 $0.458\mu\text{m}$,尺寸误差小于 0.015mm 。

2.2 微型细长轴的车铣加工

微型细长轴是微型零件的典型结构之一,而微型零件是指几何特征尺寸介于 $0.01\sim 10\text{mm}$ 范围内的零件,国际上也称为微米和中间尺度零件。

张之敬等^[18,40-41]基于自主研发的微型车铣机床对微型细长轴零件的车铣加工的切削力和颤振机理进行了深入研究。针对微型无偏正交车铣加工,以铣刀的一个齿为对象,分析了铣刀单齿圆周刃沿进给螺旋线展开形成的次摆线运动轨迹,得出轨迹方程以及在一个切削周期中(即一次啮合过程)单齿圆周刃的切入角、切出角、切削厚度和切削宽度等计算模型,从而分析单齿圆周刃切削力情况。对于加工系统中刚度最低的工件系统,利用再生型颤振理论进行分析,得到加工稳定性叶瓣图,并且通过试验验证了该叶瓣图的准确性。同时,通过分析建立正交车铣的非线性延时微分方程组(DDEs)对正交车铣模型的 DDEs 进行线性化,并利用 Floquet 理论分析得到了正交车铣加工的颤振频率。目前,已经可以加工长径比约为 6/0.1 的微型细长轴,其加工质量远好于车削。

由于微细车铣在切削机理上与

传统车铣存在很大差别,对于微小型细长轴来说,随着结构尺寸的“微米化”,其尺寸效应愈发明显,造成传统切削经验公式无法预测微小型细长轴的加工表面粗糙度。金成哲等人^[42]通过对传统BP神经网络进行附加动量项和自适应学习率的改进,实现了正交车铣微小型细长轴的表面粗糙度值精确预测。

微细丝杆作为一种更为典型的微小型零件,其加工难度超过同类零件——微小型细长轴。金成哲等^[43]通过对直径3mm的微细丝杆进行正交车铣试验研究,分析刀具磨损的原因,揭示了铣刀转速和进给量对加工表面粗糙度的影响规律,即随着转速比增大和进给量的降低,表面粗糙度下降。试验结果表明,在铣刀转速120000r/min、工件转速3r/min、切削深度0.05mm、轴向进给量0.8mm/r的条件下,表面粗糙度值最小,约为0.4 μm ,这说明车铣加工能够实现微细丝杆的高效精密加工。

车铣加工技术在微小型细长轴的应用和发展,为航空领域及其他领域中微小型零件的加工提供了技术支持,为机械部件微型化的发展提供了新的思路。

3 薄壁回转体零件的车铣加工

薄壁回转体零件广泛应用于航空、航天、核工业等领域,如石油、化学及核工程中的容器和反应塔,航空发动机的机匣、仪表中的弹性元件,动力机械中的水轮机蜗壳等。薄壁回转体零件(简称薄壁回转体)由于刚度差和加工过程中力变形、热变形较严重,造成加工变形严重,所以其加工一直是机械加工的难点之一。车铣加工相对于车削具有很小的切削力和切削温度,且多刀切削过程平稳,因此更适用于薄壁回转体的加工。

石莉等^[19]通过薄壁振动信号的采集和小波包分析,得出正交车铣铝合金薄壁回转体振动主要为自激振动,强迫振动振幅小,切削力小;刀

具转速对切削振动有很大影响,正交车铣加工时应通过调整转速比,避开颤振敏感的刀具速度。由于车铣切削力是车铣加工中强迫振动的主要振源,所以通过研究车铣加工中的强迫振动信号,可以从侧面了解车铣加工过程中切削力的变化情况,即在激振力频率与系统固有频率比值、系统的刚度及阻尼不变的情况下,强迫振动振幅增大,激振力也增大,相应车铣切削力也由小变大。该研究通过检测和分析振动信号,为研究车铣复合加工切削力的变化趋势提供一种新的方法。

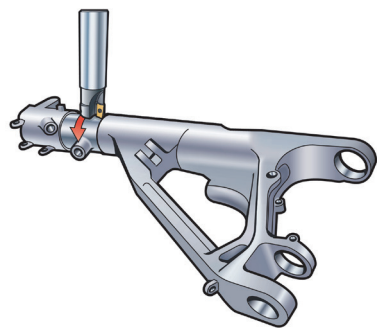
张坤等^[44]使用Abaqus软件仿真了碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/Al)薄壁回转体正交车铣时切削参数对切削力的影响规律,其中切削深度对切削力的影响最大。其他的研究工作主要集中在薄壁回转体的模态分析和谐响应分析,为切削力频率避免共振区间提供了有效的方法^[45-48]。

目前,我国的某型号航空发动机机匣的外型面已经采用偏心正交车铣加工技术^[49],有效避免刀具零转速点接触零件,从而改善加工质量、提高加工效率,如图2所示^[50]。

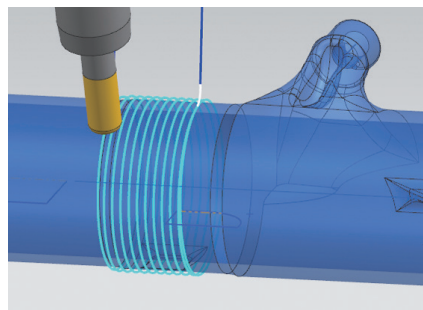
4 其他典型零部件的车铣加工

现阶段,车铣加工已经在许多航空零部件的加工中得到了应用,如起落架、转动梁、叶片和各种接头等。对于起落架和转动梁直径较小的外

圆(相当于矩形沟槽)来说,由于传统的加工工艺需要左偏刀和右偏刀分别进行车削加工,加工效率低下且加工表面有刀具接痕。而采用正交车铣的加工方式,一把刀具即可完成加工内容,加工效率大幅度提高且加工质量良好,如图3(a)、(b)^[50]和图4所示。



(a) 车铣加工示意图



(b) 车铣加工的刀具路径

图3 起落架的车铣加工
Fig.3 Turn-milling of landing gear

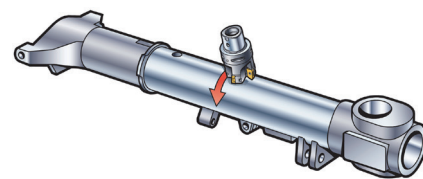


图4 转动梁的车铣加工
Fig.4 Turn-milling of beam

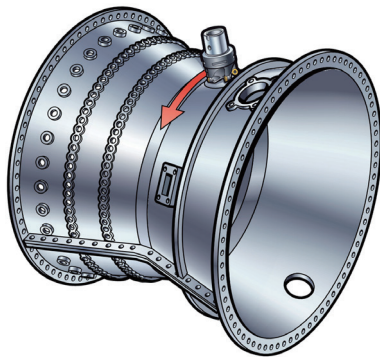


图2 机匣的车铣加工示意图
Fig.2 Turn-milling of aeroengine casing

目前,已经有采用车铣加工的方式对叶片和曲轴进行加工的成功案例,如图5^[51]、图6^[52]所示。同时,对于叶片加工的重点研究内容——刀轨进行了研究,以表面粗糙度为目标,优选了刀具角度和刀轨路径,为车铣加工在叶片加工上的应用提供了新的思路。

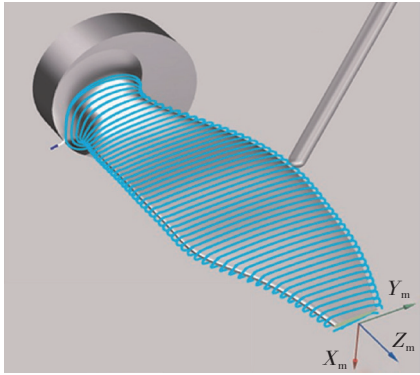


图5 车铣叶片

Fig.5 Turn-milling of blade

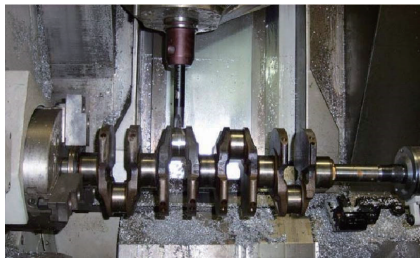


图6 正交车铣曲轴

Fig.6 Turn-milling of crankshaft

航空零部件车铣加工技术存在的问题

1 车铣加工难加工材料存在的问题

难加工材料在航空零部件中广泛使用,但其切削加工性差造成加工效率低、加工质量难以保证等问题。为了改进难加工材料的切削加工性,学者和专家进行了大量的研究,如通过刀具结构和材料的优选、切削参数的优化、设计合理的冷却介质和装置、采用非常规的切削工艺以及采取适当热处理的方法等。这些方法创造了有利的切削加工外部或内部条件,改善了难加工材料本身的切削加工性。但是,这些方法有的需要重新研制刀具,有的需要额外的设备或装置,有的工艺过程难以控制,并且切削加工性的改善效果并不稳定,所以在工厂实际生产中难以大面积推广。

对于高强度钢和导热率低的难加工材料的加工,已经证明车铣加工技术相对于车削具有更好的刀具耐用度和加工表面质量。但同时也应该认识到,对于不同的加工材料和

不同材料的刀具,在不同的冷却条件下,采用不同的切削参数,车铣加工获得的加工效果迥然不同。目前对于难加工材料的车铣加工技术研究,主要集中在刀具磨损机理方面,对于车铣加工参数对刀具耐用度和加工表面粗糙度的影响规律的研究也有涉及,但对于车铣加工参数对刀具耐用度和加工表面质量作用机理的研究却一直未被深入探讨和研究,制约了车铣加工效率的进一步提高。

2 车铣加工典型结构零部件存在的问题

对于细长轴、曲轴、凸轮、薄壁回转件、大型回转件等已经采用车铣加工的典型结构零部件来说,车铣加工虽然体现了加工变形小、刀具耐用度高、加工效率高一些优越性,但是在车铣加工过程中依然存在一些不可避免的问题,如加工过程中由于切屑形貌是变切深和变切厚的情况,所以容易产生颤振,严重影响刀具耐用度和加工表面质量,尤其对于弱刚性的零件更是如此。

现阶段,对于典型结构零件的车铣加工的振动研究主要集中在强迫振动方面,研究方法主要集中在模态分析和谐响应分析,而对于车铣过程中的自激振动——颤振的研究却不多。目前,关于车铣加工的颤振研究还没有考虑零件的结构特征,如细长轴和薄壁回转体是弱刚性体,但现有的车铣加工颤振稳定性模型还未考虑这种情况,造成与实际加工有所区别。同时,大型回转件一般采用大直径刀具,其切削速度不高,而按照线性时滞动力学模型,在低速区是没有完整的稳定性叶瓣的。按照传统的线性模型计算稳定性极限,势必会严重影响加工效率,也难以据此来指导刀具结构参数的设计。

进一步开发航空零部件车铣加工技术潜力的构想

1 研究车铣加工机理,优化切削参数

现在的研究结果已经表明,车铣加工的参数对刀具耐用度、加工表面质量等加工效果的影响较大,因此必须深入研究车铣加工参数对加工效果的作用机理,进行定性和定量的分析研究,才能进一步提升车铣加工技术的潜力。

车铣加工方式有别于传统的车削或铣削,还体现在切屑形貌上。通过切屑形貌的数学建模而对切削力进行仿真,根据仿真结果中切削力的波动来作为刀具耐用度和加工表面质量的评判依据是车铣加工参数优化行之有效的方法。但由于车铣加工参数较多、加工情况复杂,目前还没有统一的切屑数学模型。为解决这一问题,可以采用先定性后定量的判别方法,即先对各种切削参数下的切屑形貌进行仿真,根据切屑形貌的变化为车铣加工参数的优化提供定性参考,然后根据定性的选择结果对切屑形貌进行数学建模,最后以切屑模型为基础建立车铣加工切削力的数学仿真模型。

以正交车铣为例,其切屑呈变切深和变切厚的情况,通过切屑形貌的仿真结果判断切屑切深和切厚的变化情况,可以为正交车铣切削参数的选择提供定性依据。正交车铣的顺铣和逆铣的加工方式如图7所示,其中,箭头的指向为刀具的旋转方向。从图中可以发现,正交车铣顺铣时,切屑厚度由厚变薄,对刀具有利;而逆铣的切屑厚度由薄变厚,会增加刀具磨损。所以,在正交车铣时应选择顺铣。正交车铣时,偏心距方向也是需要考虑的一个因素。设定偏心距 e 为7mm和-7mm,其对应的切屑形状仿真结果如图7所示。由图可知,正交车铣时,正方向偏心产生的切屑的形貌要比负方向偏心复杂,且在切削深度方向的变动更大,这会增加切削力突变的趋势,使得刀具承受的机械冲击增大,故正交车铣时应采用负方向偏心。

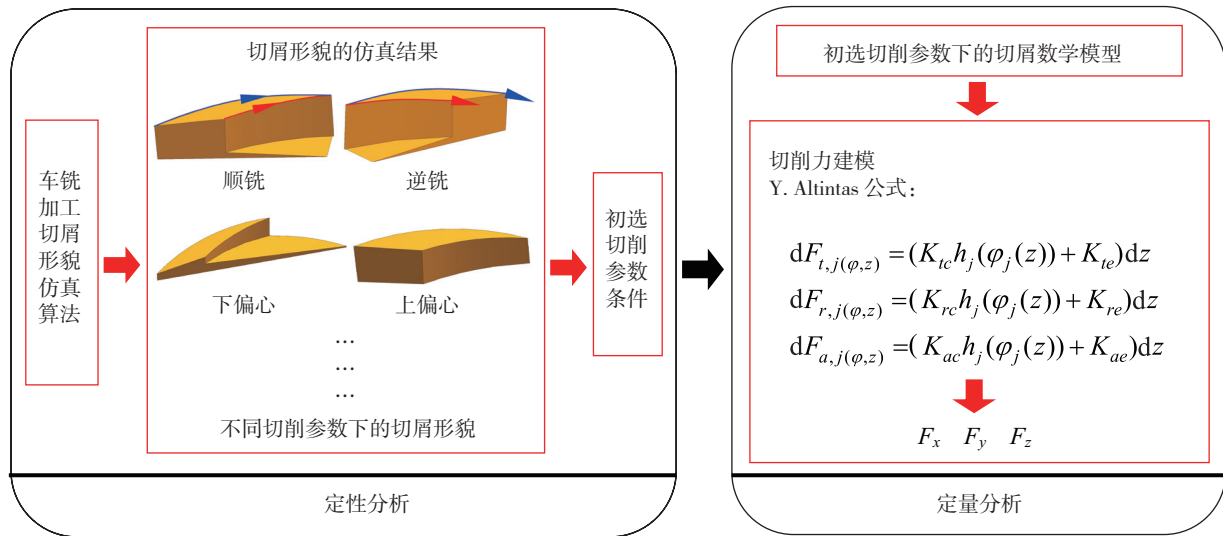


图7 车铣加工时切削参数的优化方法

Fig.7 Optimization method of cutting parameters for turn-milling

车铣加工参数对切屑形貌的影响很大,目前还无法对不同切削参数下的车铣加工切屑形貌建立统一的数学模型,因此对车铣加工切屑形貌进行仿真,从而为车铣加工参数的优化提供定性的判断依据尤为必要。如根据图7可知,正交车铣时,应采用顺铣和负方向偏心加工方式,其他切削参数的选择依据也可以通过此方法进行判断。在此基础上,后续再对正交车铣的切屑进行数学建模,为正交车铣切削力的仿真提供基础,从而对正交车铣的加工过程进行定量分析,最终为正交车铣切削参数的优化提供详细指导。

对于难加工材料的车铣加工需要进行刀具磨损机理研究,优选冷却条件和刀具材料;同时经过刀具耐用度试验,建立预测模型,优化切削参数;最后以优化切削参数为约束条件,建立生产率和生产成本为目标的多目标优化函数,以达到进一步优化车铣加工参数的目的。

2 典型结构特征零部件车铣加工稳定性研究

对于典型结构特征零部件的车铣加工参数优化,基于不同的目标有不同的优化方法。以加工表面粗糙度为优化目标,车铣加工常见的方法

有:结合刀具几何角度确定车铣加工中刀具与工件的运动学关系,分析各切削参数对加工表面粗糙度的影响;切削参数试验后经过回归分析或者神经网络等智能算法建立预测模型;采用展开式投影法将刀具底部轮廓沿曲面展开后投影到切削方向,计算加工行距和残留高度,分析车铣过程中已加工表面的加工误差。同时,以刀具耐用度和工件表面质量为优化目标,对车铣加工的动力学进行分析和研究是目前最行之有效的方法,其常见的方法有:模态分析、谐响应分析、颤振分析。由于车铣加工对象的结构特征(如薄壁回转体、细长轴),造成加工过程中容易出现颤振,而车铣加工由圆周刃和端面刃共同完成对旋转面的加工,采用传统

的二维颤振模型难以与实际情况吻合。因此,车铣加工的切削颤振始终是该技术的研究热点和难点。

进一步对典型结构特征零部件的车铣加工稳定性进行研究主要是结合车铣加工的对象,即零部件的结构特征,开展探索车铣加工颤振的研究,包括车铣加工颤振的产生本质、影响因素及其控制方面的科学问题。

对于车铣加工的某些特殊情况,如图8所示正交车铣在顺铣、刀具半径 $r_1=10\text{mm}$ 、切削深度 $a_p=2\text{mm}$ 、每转进给量 $f_s=2\text{mm/r}$ 、偏心距 $e=0$ 、转速比 $\lambda=100$ 的条件下,当工件半径 r_w 从 10mm 增大到 50mm ,即随着工件半径/刀具半径比值的增加,切屑在切深方向的变化趋势减缓。这时,由

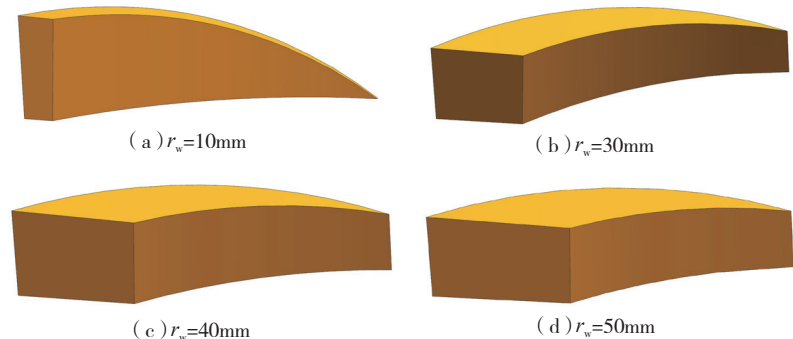
图8 工件半径对正交车铣切屑形貌的影响 ($r_1=10\text{mm}$ 、顺铣)

Fig.8 Impacting of workpiece radius on chip morphology of turn-milling

于车铣加工的切屑在切深方面变化很小,可以看作切屑在切深方面是定值,因此可以建立二维颤振模型对车铣加工的稳定性进行研究。

多数情况下,需开展车铣加工三维颤振建模与分析。首先,要考虑工件和刀具的结构特征,如正交车铣时,对于刚性较差的薄壁回转件加工,工件需设为柔性体;对于细长轴加工,工件和刀具都需设为柔性体。其次,根据三维铣削加工动力学,需、对主轴转速、轴向进给量、切削深度之间的非线性关系进行仿真预测及试验验证,同时分析相关切削参数对稳定性的影响,进而为抑制颤振现象的产生、切削参数的优化提供有效方法。

对于在车铣加工过程中轴向进给量很大或者切削去除率很高的情况,需要考虑“刀具—工件”整个加工系统的动态特性对加工稳定性的影响。如在正交车铣过程中,由于高效加工的特点,随着工件的加工,其形状和质量发生较快的改变,整个加工系统的动态特性随之改变,容易引发加工系统颤振。因此,其车铣加工颤振的研究思路可以在建立“机床—刀具—工件”整体加工系统的相对传递函数和综合动刚度场模型的基础上,进行车铣加工三维颤振建模,分析不同加工位置的整体加工系统综合动刚度特性对加工稳定性模型的影响,从而优选加工参数,为车铣高效稳定加工提供技术指导。

结束语

车铣加工作为一种可以适用于航空零部件的高效精密加工技术,其加工机理和加工稳定性分析一直都是制约其高效精密加工的关键因素。通过大量的试验和仿真工作,科研人员分析了冷却条件和加工参数对车铣加工的刀具耐用度和加工表面质量的影响规律,主要研究了刀具磨损机理和强迫振动的动力学模型,为车

铣加工在难加工材料和一些典型结构件加工中的应用提供了强有力的技术保障。

车铣加工已经展示出明显优势和广阔的应用前景,但其潜能还需进一步开发。只有针对车铣加工零件的材料特性和结构特征进一步开展有针对性的加工机理和颤振动力学模型研究,才能实现车铣加工的工艺优化及加工过程的控制,进一步提高加工效率和加工表面质量。

参考文献

- [1] SCHULZ H, SPUR G. High speed turn-milling—a new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces[J]. Annals of the CIRP, 1990, 39(1): 107–109.
- [2] SCHULZ H, KNEISEL T. Turn-milling of hardened steel—an alternative to turning[J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 93–96.
- [3] 姜增辉, 贾春德. 车铣运动的矢量建模[J]. 机械工程学报, 2003, 39(4): 15–18.
- JIANG Zenghui, JIA Chunde. Vector modeling of turn-milling motion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(4): 15–18.
- [4] 姜增辉, 潘恒阳, 李伟兵. 轴向车铣等距型面的运动建模[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 149–153.
- JIANG Zenghui, PAN Hengyang, LI Weibing. Movement modeling on machining equidistant profile by axial turn-milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 149–153.
- [5] SHE C, HUNG C. Development of multi-axis numerical control program for mill-turn machine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(6): 741–745.
- [6] 王凡, 喻红婕, 姜增辉. 正交车铣运动轨迹的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(8): 1038–1040.
- WANG Fan, YU Hongjie, JIANG Zenghui. Research on movement track of orthogonal turn-milling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(8): 1038–1040.
- [7] 金成哲, 贾春德. 正交车铣高强度钢切屑形成机理的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(9): 1610–1612.
- JIN Chengzhe, JIA Chunde. Research on mechanism of chip formation in orthogonal turn-milling high strength steel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(9): 1610–1612.
- [8] 朱立达, 李虎, 杨建宇, 等. 正交车铣三维切屑理论建模研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 111–115.
- ZHU Lida, LI Hu, YANG Jianyu, et al. Research on theoretical modeling of 3D chip of orthogonal turn-milling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(1): 111–115.
- [9] 邱文旺, 刘强, 袁松梅. 面铣刀正交车铣加工切屑厚度的计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1638–1644.
- QIU Wenwang, LIU Qiang, YUAN Songmei. Computing approach of uncut chip thickness in orthogonal turn-milling with inserted cutters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(9): 1638–1644.
- [10] 姜增辉, 贾春德. 轴向车铣理论切削力的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 86–90.
- JIANG Zenghui, JIA Chunde. Research on the theoretical cutting force of the axial turn-milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 86–90.
- [11] 姜增辉, 贾春德. 无偏心正交车铣理论切削力[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 23–28.
- JIANG Zenghui, JIA Chunde. Theoretical cutting force of non-eccentricity orthogonal turn-milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 23–28.
- [12] 朱立达, 于天彪, 王宛山. 正交车铣加工切削力仿真分析[J]. 兵工学报, 2012, 33(4): 419–424.
- ZHU Lida, YU Tianbiao, WANG Wanshan. Simulation for cutting force of orthogonal turn-milling[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(4): 419–424.
- [13] KARAGUZEL U, BAKKAL M, BUDAK E. Process modeling of turn-milling using analytical approach[J]. Procedia CIRP, 2012, 4: 131–139.
- [14] CRICHIGNO FILHO J M. Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1–4): 71–80.
- [15] QIU W, LIU Q, YUAN S. Modeling of cutting forces in orthogonal turn-milling with round insert cutters[J]. The International Journal

- of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5-8): 1211-1222.
- [16] Karagüzel U, UYSAL E, BUDAK E, et al. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 24-33.
- [17] 朱立达, 王宛山, 李鹤, 等. 正交车铣偏心加工三维颤振稳定性的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 186-192.
- ZHU Lida, WANG Wanshan, LI He, et al. Research on 3D chatter stability of orthogonal and eccentric turn-milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 186-192.
- [18] 张之敬, 刘冰冰, 金鑫. 基于再生理论的微小型正交车铣颤振[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(5): 729-733.
- ZHANG Zhijing, LIU Bingbing, JIN Xin. Micro-miniature orthogonal turn-milling chatter analyses based on regenerative theory[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(5): 729-733.
- [19] 石莉, 陈尔涛, 姜增辉. 正交车铣铝合金薄壁回转体振动信号的试验分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 356-360.
- SHI Li, CHEN Ertao, JIANG Zenghui. Test analysis on vibration signal of thin aluminium-alloy cylinder machined with orthogonal turn-milling[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 356-360.
- [20] 黄树涛, 贾春德, 姜增辉, 等. 高速车铣已加工表面粗糙度的理论与实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(5): 717-720.
- HUANG Shutao, JIA Chunde, JIANG Zenghui, et al. Research on surface roughness of machined workpiece by high speed turn-milling with theory and experiment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(5): 717-720.
- [21] 金成哲, 陈尔涛, 徐驩. 车铣粗糙度预测模型的建立和分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(3): 224-226.
- JIN Chengzhe, CHEN Ertao, XU Chan. Analysis and establishment of a predictive model for surface roughness of turn-milling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(3): 224-226.
- [22] 潘靖宇, 徐九华, 傅玉灿, 等. 钛合金 TC9 正交车铣加工表面粗糙度研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 720-725.
- PAN Jingyu, XU Jiuhua, FU Yucan, et al. Investigation on surface roughness in orthogonal turn milling of titanium alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(5): 720-725.
- [23] CHOUDHURY S K, BAJPAI J B. Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(3): 487-493.
- [24] EKINOVIĆ S, BEGOVIĆ E, SILAJDŽIJA A. Comparison of machined surface quality obtained by high-speed machining and conventional turning[J]. Machining Science and Technology, 2007, 11(4): 531-551.
- [25] SAVAS V, OZAY C. The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(3/4): 335-340.
- [26] 黄树涛, 贾春德, 姜增辉, 等. TiN 涂层刀具高速车铣切削性能及磨损机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(9): 1501-1505.
- HUANG Shutao, JIA Chunde, JIANG Zenghui, et al. Cutting performance and wear mechanism of TiN coat cutter in high speed turn-milling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(9): 1501-1505.
- [27] 黄树涛, 贾春德, 姜增辉, 等. 干式高速车铣时金属陶瓷刀具磨损机理研究[J]. 制造技术与机床, 2001(3): 35-36.
- HUANG Shutao, JIA Chunde, JIANG Zenghui, et al. Research on wearing mechanism of ceramic tool in high speed dry turning and milling[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2001(3): 35-36.
- [28] 刘晔, 李晓岩. 高速车铣高强度钢刀具磨损的研究[J]. 新技术新工艺, 2008(3): 8-9.
- LIU Wei, LI Xiaoyan. Wearing mechanism of tools in the high speed turn-milling of high strength steel[J]. New Technology & New Process, 2008(3): 8-9.
- [29] 黄树涛, 于骏一, 姜增辉, 等. 湿式高速车铣 D60 钢时金属陶瓷刀具的磨损机理[J]. 吉林工业大学自然科学学报, 2001, 31(1): 6-9.
- HUANG Shutao, YU Junyi, JIANG Zenghui, et al. Study on wear mechanism of ceramal tool in high speed wet turn-milling D60 steel[J]. Natural Science Journal of Jilin University of Technology, 2001, 31(1): 6-9.
- [30] 金成哲, 贾春德, 庞思勤. 正交车铣高强度钢刀具磨损的研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(3): 397-400.
- JIN Chengzhe, JIA Chunde, PANG Siqin. Wearing mechanism of tools in the orthogonal turn-milling of high strength steel[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(3): 397-400.
- [31] 姜增辉, 王文凯, 任梦羽. 高速轴向车铣 TC4 内孔的硬质合金刀具磨损特性[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(9): 28-30.
- JIANG Zenghui, WANG Wenkai, REN Mengyu. The wear characteristic of carbide tools in high speed cutting TC4 inner bore by the axial turn-milling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(9): 28-30.
- [32] 张富君, 姜增辉, 王文凯. 切削速度对轴向车铣 TC4 钛合金刀具磨损的影响[J]. 机械设计与制造, 2015(9): 125-127.
- ZHANG Fujun, JIANG Zenghui, WANG Wenkai. The influence of cutting speed to tools wear in cutting TC4 titanium by axial turn-milling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(9): 125-127.
- [33] 石莉, 巩亚东, 姜增辉. 涂层硬质合金正交车铣 TC4 钛合金刀具寿命试验分析[J]. 工具技术, 2015, 49(7): 15-17.
- SHI Li, GONG Yadong, JIANG Zenghui. Tool life test analysis of coated cemented carbide while orthogonal turn-milling TC4 titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2015, 49(7): 15-17.
- [34] 石莉, 巩亚东, 姜增辉. 硬质合金正交车铣 TC4 钛合金刀具寿命试验分析[J]. 制造技术与机床, 2015(2): 94-96.
- SHI Li, GONG Yadong, JIANG Zenghui. Tool life test analysis of cemented carbide in orthogonal turn-milling TC4 titanium alloy[J]. Manufacturing technology and machine tools, 2015(2): 94-96.
- [35] KARAGÜZEL U, OLGUN U, UYSAL E, et al. New production technologies in aerospace industry[M]. Springer International Publishing, 2014: 1-9.
- [36] 刘晔, 喻红婳, 姜增辉. 弱刚度细长杆正交车铣加工的研究[J]. 新技术新工艺, 2005(4): 26-27.
- LIU Wei, YU Hongjie, JIANG Zenghui. Research on machining the slender rod with weak rigidity by the orthogonal turn milling[J]. New Technology & New Process, 2005(4): 26-27.
- [37] 黄巍, 姜增辉. 正交车铣细长杆的动力学分析[J]. 新技术新工艺, 2008(11): 74-76.
- HUANG Wei, JIANG Zenghui. Dynamics analyzing on slender rod machining by orthogonal turn-milling[J]. New Technology & New Process, 2008(11): 74-76.
- [38] 姜增辉, 梁伟. 轴向车铣细长杆的动力学分析[J]. 制造技术与机床, 2009(1): 49-52.

JIANG Zenghui, LIANG Wei. Dynamics analyzing on slender rod machining by axial turn-milling[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2009(1): 49-52.

[39] 祝孟琪, 徐文骥. 车铣复合加工不锈钢细长轴的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2015(6): 102-104.

ZHU Mengqi, XU Wenji. Research on turn-milling of slender stainless steel shaft[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6):102-104.

[40] 周敏, 张之敬. 微小型正交车铣单齿圆周刃理论切削力研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(13): 1527-1532.

ZHOU Min, ZHANG Zhijing. Cutting force of single circumference edge for micro orthogonal turn-milling[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(13): 1527-1532.

[41] 刘冰冰, 张之敬, 金鑫. 微小型无偏正交车铣加工系统稳定性研究[J]. 工具技术, 2013, 47(3): 11-14.

LIU Bingbing, ZHANG Zhijing, JIN Xin. Micro-miniature non-eccentricity orthogonal turn-milling stability analysis[J]. Tool Engineering, 2013, 47(3): 11-14.

[42] 金成哲, 李江南, 姜增辉, 等. 基于人工神经网络的微细车铣表面粗糙度预测模型[J]. 工具技术, 2015, 49(8): 92-94.

JIN Chengzhe, LI Jiangnan, JIANG Zenghui, et al. Prediction for micro milling roughness based on artificial neural network[J]. Tool Engineering, 2015, 49(8): 92-94.

[43] 金成哲, 陈尔涛. 基于车铣复合加工技术的微细丝杠切削研究[J]. 工具技术, 2012, 46(1): 45-47.

JIN Chengzhe, CHEN Ertao. Research on cutting micro-screw cutting based on turn-milling technology[J]. Tool Engineering, 2012, 46(1): 45-47.

[44] 张坤, 黄树涛, 焦可如, 等. SiCp/Al 复合材料薄壁件高速正交车铣切削力的仿真研究[J]. 工具技术, 2014, 48(11): 25-29.

ZHANG Kun, HUANG Shutao, JIAO Keru, et al. Simulation research on cutting force of orthogonal turn-milling thin-walled SiCp/Al composite in high speed[J]. Tool Engineering, 2014, 48(11): 25-29.

[45] 王伟. 轴上车铣薄壁回转体工件的动力学有限元分析[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(2): 9-11.

WANG Wei. Dynamics finite element analysis on axial turn-milling for thin-wall rotary part[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011, 47(2): 9-11.

[46] 杨大卫, 梁伟, 姜增辉. 轴上车铣薄壁回转体的动力学分析[J]. 新技术新工艺, 2009(11): 8-10.

YANG Dawei, LIANG Wei, JIANG Zenghui. Dynamics analysis of the thin-wall rotors machining by axial turn-milling[J]. New Technology & New Process, 2009(11): 8-10.

[47] 李俭, 李翠芝, 姜增辉. 车铣加工薄壁回转体的谐响应分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2007, 26(1): 59-61.

LI Jian, LI Cuizhi, JIANG Zenghui. Analysis on harmonic response of the thin-wall rotational workpiece in the turn-milling[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2007, 26(1): 59-61.

[48] 郭俊文, 黄树涛, 许立福, 等. 正交车铣加工 SiCp/Al 复合材料薄壁回转体的

谐响应分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(10): 19-22.

GUO Junwen, HUANG Shutao, XU Lifu, et al. Harmonic response analysis about rotary thin-walled part of SiCp/Al composites with orthogonal turn-milling machining[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(10): 19-22.

[49] 俸跃伟, 纪俐, 郝长明, 等. 偏心车铣削技术在航空发动机机匣加工中的应用[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(4): 39-41.

FENG Yuewei, JI Li, HAO Changming, et al. The application of eccentricity turning-milling technology in aero-engine casing machining[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2012, 29(4): 39-41.

[50] 王细洋, 朱志坤. 大型飞机复杂回转件的车铣复合加工[J]. 航空制造技术, 2015(1/2): 68-72.

WANG Xiyang, ZHU Zhikun. Turn-milling complex machining of large aircraft complex round parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(1/2): 68-72.

[51] CALLEJA A, FERNÁNDEZ A, RODRÍGUEZ A, et al. Turn-milling of blades in turning centres and multitasking machines controlling tool tilt angle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014: 1-13.

[52] 陈艳丽. 基于车铣的曲轴精加工技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.

CHEN Yanli. Research on finish machining technology of crankshaft by turn-milling[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2008.

Application and Development of Turn-Milling Technology for Aeronautic Components

SUN Tao^{1,2}, FU Yucan¹, HE Lei¹, HOU Junming¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China)

[ABSTRACT] Demands for aeronautic materials and structural features are analyzed, and application statuses of turn-milling technology for difficult-to-cut materials and typical parts on aviation are summarized. In addition, some problems of turn-milling technology on spreading application are analyzed. Finally, some ideas of further developing turn-milling technology for aeronautic components are proposed.

Keywords: Aviation; Turn-milling machining; Difficult-to-cut materials; Typical structure

(责编 谷雨)