

小曲率整体叶盘复合高效强力铣加工基础试验研究

Fundamental Experiment Research in Compound and Efficient Powerful Milling Process for Small Curvature Blisk

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 史耀耀 赵鹏兵



史耀耀

西北工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机电控制及自动化、专用数控工艺装备、高速高效数控加工、加工表面光整技术等方面的研究工作。主持和参加各类科研项目 20 余项,发表学术论文 30 余篇,获国家发明专利三项,获国家、省部级奖励 5 项,入选“2006 年度中国高等学校十大科技进展”。

为满足以 F119、F120、EJ200 为标志的第 4 代战斗机用发动机以及未来高推重比新概念发动机的性能要求,除采用先进技术以减少飞机机

将盘铣、插铣和侧铣等工艺高度集成对于小曲率整体叶盘通道的大余量开槽加工具有可行性和有效性,同时也为实现该工艺方法的数控装备的刚度分析与切削参数优化提供了依据。

体结构、机载设备的重量外,需要重点突破发动机部件的气动、结构设计、材料及工艺等方面的关键技术。其中,在发动机风扇、压气机和涡轮上采用整体叶盘结构是重要措施之一^[1]。

如图 1 和图 2 所示,与传统的叶

片和轮毂装配结构相比,整体叶盘省去了连接用的榫头和榫槽,具有大大简化航空发动机结构、显著提高风扇和压气机性能、延长转子使用寿命和可靠性等优点。

整体叶盘结构复杂、通道开敞性差、弯扭大,毛坯一般采用钛合金、



图1 传统叶盘

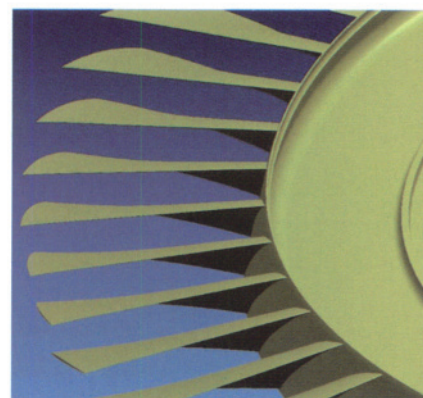


图2 整体叶盘

高温合金等难加工材料锻造而成,制造技术难度大。传统加工方法通常采用球头铣刀进行行切或用圆柱铣刀进行侧铣,加工效率低,刀具磨损严重,更有甚者,刀具会受到过大的径向切削力而折断,导致制造成本增加。西北工业大学率先开展了整体叶盘高效开槽插铣加工工艺研究^[2-3],该方法与传统的侧铣开槽粗加工相比,其效率有明显提高,而且也改变了刀具的受力方向,使其不易折断,降低了制造成本。南京航空航天大学进行了整体叶盘电解加工技术的研究^[4],对于通道较窄的整体叶盘,该方法具有明显的技术优势,但对于大直径整体叶盘,由于去除材料量较大,电极与被加工件的接触面积大,其加工效率大幅降低,同时电解加工容易对环境产生污染。哈尔滨工业大学对电火花加工整体叶轮的电极设计与制造、电极运动轨迹等关键技术进行了研究^[5],电火花加工精度和加工稳定性较高,但加工速度慢,表面有再铸层,而且由于电极损耗影响成型精度,需经常更换电极或采取其他措施,导致加工速度更慢、加工成本更高。

本文针对小曲率整体叶盘通道的大余量开槽加工,提出了一种复合高效强力铣加工工艺方法,并对其工艺性能进行相关试验研究,旨在验证该工艺方法的可行性和有效性。

复合高效强力铣加工工艺方法

复合强力铣加工工艺方法,即盘铣-插铣-侧铣。首先利用开槽高效粗加工工艺方法即盘铣,对小曲率整体叶盘通道进行大余量切除,如图3所示;在此基础上,通过插铣新工艺对盘铣刀不可达区域进行高效插铣切除,实现扩槽加工,如图4所示;最后,在较小余量的基础上,通过圆柱铣刀或球头铣刀进行侧铣或行切,实现叶片型面的精加工及清根,如图

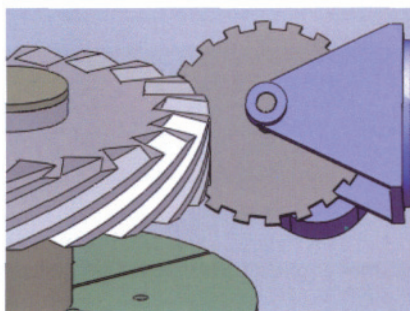


图3 盘铣

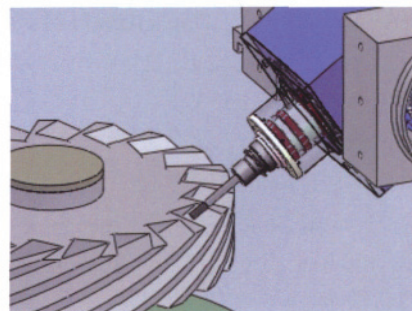


图4 插铣

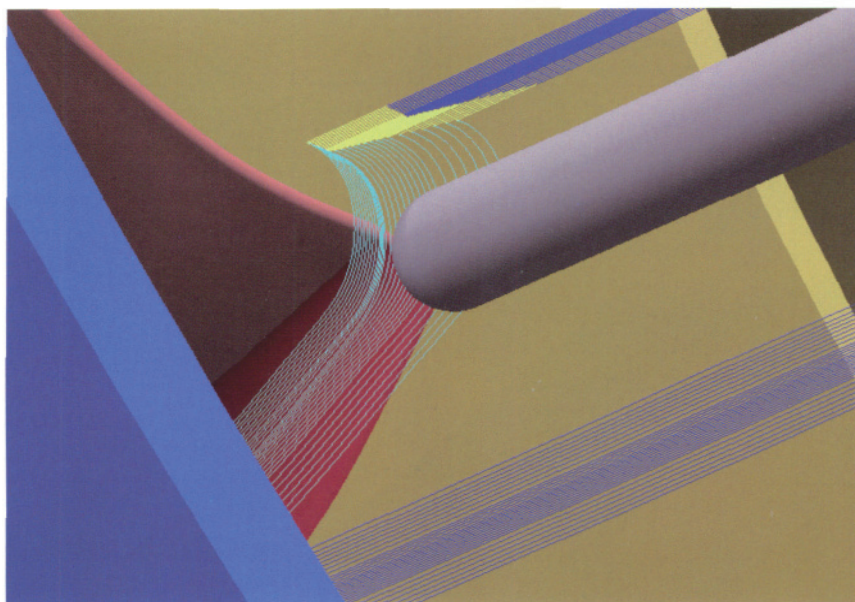


图5 侧铣

5所示。通过盘铣、插铣、侧铣的有效集成,可大幅度提升小曲率整体叶盘的综合加工效率,降低制造成本。

插铣与盘铣的加工工艺性能对比试验

在复合高效强力铣加工中,盘铣和插铣时材料去除量较大,刀具和机

床所受切削力较大,所需承受的冲击载荷也较大。所以需要加工过程中的切削力和振动状态进行测试分析,并比较其加工效率,以便更好地确定切削参数及所用设备性能。

(1) 试验设备、材料及刀具。

在盘铣和插铣的加工工艺试验中,所需的设备、材料和刀具主要有:



图6 切削力测力仪



图7 瞬态信号记录仪

VMC850 立式加工中心;320mm 卧式万能铣床; KISTLER 9255B 切削力测力仪(图 6); DEWE 3010 瞬态信号记录仪(图 7); 钛合金 TC11 试件材料两块(100mm × 81mm × 50mm); 直径 $\phi=12\text{mm}$ 的插铣刀; 直径 $\phi=160\text{mm}$ 、切削宽度为 14mm、盘铣刀齿数为 14 的盘铣刀。

(2) 工艺参数确定。

为了测试切削力及刀具-工件-

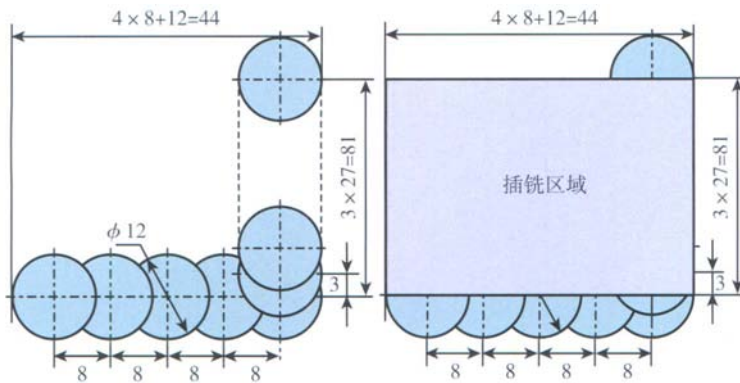


图8 插铣切削示意图

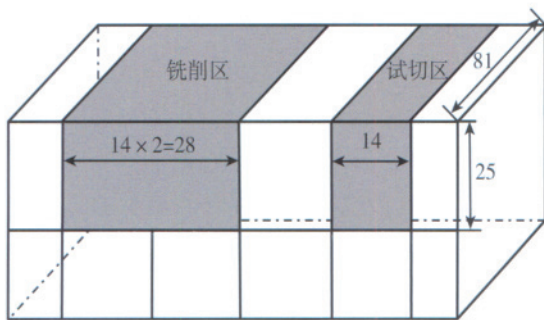


图9 盘铣切削示意图

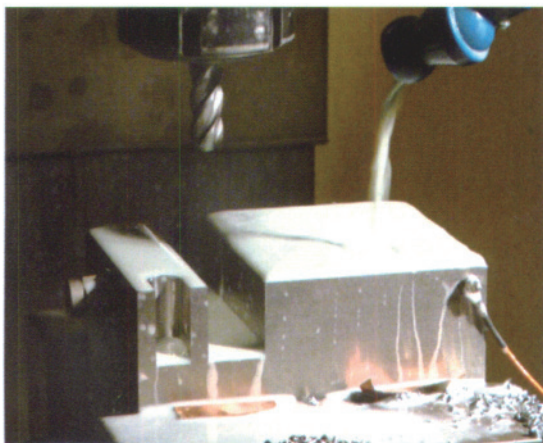


图10 插铣加工试验

表1 插铣试切数据

主轴转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	1300	1400	1500	1600	1700	1800
进给量/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	260	240	220	200	180	160

表2 盘铣试切数据

主轴转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	40	60	80	100	120	140	160	180
进给量/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	90	80	70	60	50	40	30	20

经验数据,结合金属切削计算手册选择切削数据如下^[6-8]:

a. 插铣: 行距 $a_e=8\text{mm}$, 步距 $s=3\text{mm}$, 切削深度 $a_p=30\text{mm}$, 主轴转速 $n=1600\text{r/min}$, 进给速度 $f_z=200\text{mm/min}$ 。

b. 盘铣: 切削宽度 $a_e=14\text{mm}$, 切削深度 $a_p=25\text{mm}$, 主轴转速 $n=100\text{r/min}$, 进给速度 $f_z=60\text{mm/min}$ 。

(3) 试验数据采集。

利用测力仪、5019B 电荷放大器 and 瞬态信号记录仪记录 x 轴、 y 轴和 z 轴 3 个方向上的切削力; 将加速度传感器贴到工件侧壁上间接测量刀具的振动; 利用秒表记录两种加工工艺所用的切削时间。图 10 所示为插铣加工试验。

试验结果分析

1 切削力分析

提取 3 个周期内的切削力数据, 插铣和盘铣在 x 、 y 、 z 3 个方向的切削力变化分别如图 11 和图 12 所示。

由图 11 和图 12 可知,两种铣削

机床系统的振动性能,同时又能对两种加工方法的切削效率进行对比分析,设计了如图 8 和图 9 所示的钛合金试件及走刀轨迹。插铣和盘铣加工试验的试切数据如表 1 和表 2 所示。

根据试件材料性能、刀具参数、设备性能,并参考插铣和盘铣的理想

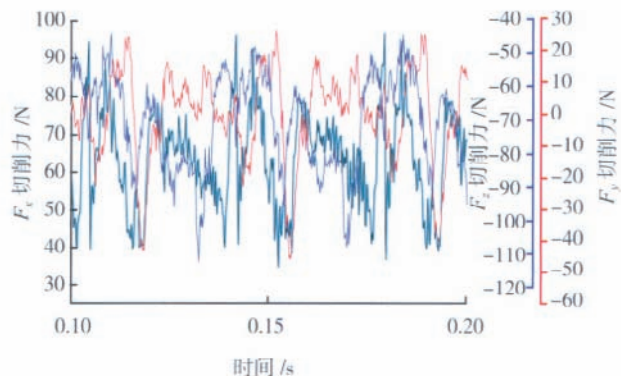


图11 插铣过程中切削力的变化

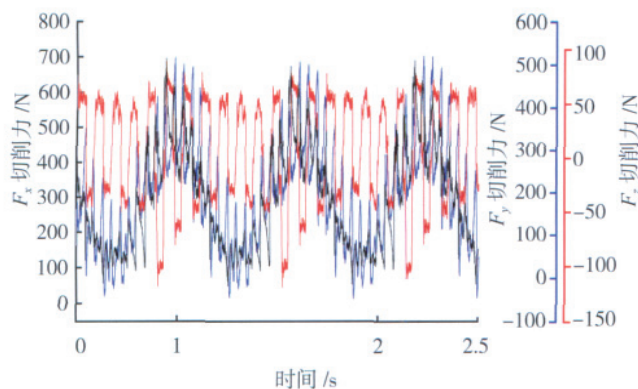


图12 盘铣过程中切削力的变化

方式下,3个方向的切削力都在一定的范围内波动,而且呈周期性变化。插铣过程中 x 轴方向力的变化范围是 $[35\text{N}, 98\text{N}]$, y 轴方向力的变化范围是 $[25\text{N}, -46\text{N}]$, z 轴方向力的变化范围是 $[-55\text{N}, -133\text{N}]$ 。插铣在 z 轴方向的切削力最大,因为在整个插铣过程中,刀具都是沿 z 轴方向垂直于工件表面进给,刀具受到沿 z 轴方向的挤压力。盘铣过程中 x 轴方向力的变化范围是 $[0\text{N}, 700\text{N}]$, y 轴方向力的变化范围是 $[-123\text{N}, 75\text{N}]$, z 轴方向力的变化范围是 $[-50\text{N}, 532\text{N}]$ 。盘铣过程中,因为盘铣刀绕 y 轴旋转,沿 x 轴方向进给,所以 x 轴方向的受力最大,同时,盘铣刀还要沿 z 轴方向垂直于工件表面运动来实现给定的切削深度,所以 z 轴方向的受力也较大。图13所示为插铣与盘铣的最大切削力比较,由图可知,盘铣

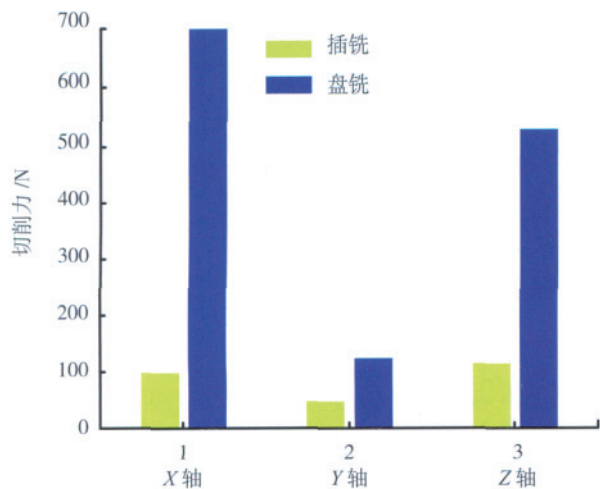


图13 插铣与盘铣的最大切削力比较

表3 插铣与盘铣的加工效率分析

加工方式	插铣	盘铣
材料去除总量/ mm^3	106920	56700
切削所用时间/s	1860	300
材料去除率/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	57.484	189

在3个方向的最大切削力均大于插铣在3个方向的最大切削力,在 x 轴方向上,盘铣的最大切削力几乎是插铣的7倍。

2 刀具振动分析

通过测量工件振动加速度的大小,可以间接获得铣削过程中插铣刀和盘铣刀的振动加速度情况。在插铣过程中,刀具在 x 轴方向的振动范围为 $[0.4\text{g}, 0.7\text{g}]$,在 y 轴方向的振动范围为 $[10\text{g}, -10\text{g}]$ 。在盘铣过程中,刀具在 x 轴方向的振动范围为 $[0\text{g}, 0.14\text{g}]$,在 y 轴方向的振动范围为 $[20\text{g}, -20\text{g}]$ 。由此可见,两种加工方式下,刀具在 x 轴方向的振动都比较微弱,但在 y 轴方向上,盘铣刀的振动几乎是插铣刀的2倍。

3 加工效率分析

由铣削加工过程中材料的去除总量和切削所用时间可以计算出单位时间内的材料去除率。由表3所列数

据可知,盘铣的加工效率几乎是插铣的3倍多。而在整体叶盘通道开槽加工中,材料切除量最大,占切除总量的90%以上,其对加工效率的综合提升尤为显著。

结束语

针对整体叶盘制造效率低、成本居高不下等问题,本文基于小曲率整体叶盘通道的大余量开槽加工,提出了一种复合高效强力铣加工工艺,即盘铣-插铣-侧铣,接着对加工过程中的切削力和刀具振动状态进行了测试分析并对加工效率做了比较。与插铣工艺相比,盘铣工艺虽然切削力和刀具振动较大,但其加工效率远远高于插铣。

该试验说明了将盘铣、插铣和侧铣等工艺高度集成对于小曲率整体叶盘通道的大余量开槽加工具有可行性和有效性,同时也为实现该工艺方法的数控装备的刚度分析与切削参数优化提供了依据。

参考文献

- [1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术. 航空制造技术, 2006(4): 94-100.
- [2] 任军学, 姜振南. 开式整体叶盘四坐标高效开槽插铣工艺方法. 航空学报, 2008, 11(6): 1692-1698.
- [3] 任军学, 田卫军. 钛合金整体结构件高效插铣工艺实验研究. 中国机械工程, 2008, 11(22): 2758-2761.
- [4] 徐家文, 云乃彰. 数控电解加工整体叶盘的研究、应用和发展. 航空制造技术, 2003(6): 31-34.
- [5] 李刚, 王振龙. 带冠整体涡轮盘电火花加工 CAD/CAM 技术. 南京航空航天大学学报, 2007, 4(2): 253-257.
- [6] Jeong H K, Altintas Y. Time Domain Model of Plunge Milling Operation. Int. J. Mach. Tools, 2007, 47(9): 1351-1361.
- [7] 杨振朝, 张定华. TC11 钛合金插铣加工切削力影响参数的灵敏度分析. 航空学报, 2009, 9(9): 1776-1781.
- [8] 王德发. 简明金属切削手册. 上海: 上海科学技术出版社, 2007.11.

(责编 小城)