

# 微小整体叶轮五轴联动微细铣削加工试验研究\*

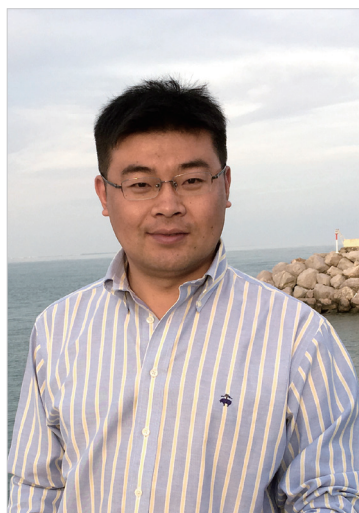
梁志强,方亚楠,周天丰,高 鹏,张素燕,刘志兵,王西彬

(北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室,北京 100081)

**[摘要]** 微小整体叶轮作为微型发动机的重要组成部分,其加工质量直接影响微型发动机的使用性能。针对微小整体式复杂叶轮流道狭窄、叶片扭曲大和长厚比大等特点,开展了微小复杂扭曲整体式叶轮五轴联动微细铣削加工方法研究。针对微小叶轮加工过程极易发生变形、过切和碰撞干涉等问题,对微小叶轮的加工过程进行工艺规划,建立了微小叶轮流道加工刀具选择的约束方程,计算出叶轮加工刀具的最大理论直径。通过 CAM 软件对叶轮进行切削仿真,验证了刀具选择和工艺规划的正确性。通过五轴联动微细铣削试验,得到了具有 6 个直径 10mm 的叶片、叶片最小厚度 0.15mm、叶片最小相邻间距 0.58mm 的 7075 铝合金微小整体叶轮。

**关键词:** 微小整体叶轮; 五轴加工; 微细切削; 刀具选择

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.045



梁志强

博士、副教授、硕士生导师,主要研究方向为难加工材料切削磨削技术、微细刀具设计与制造技术。

近年来,随着 MEMS 技术、新型材料技术、微加工技术、微型传感器技术的迅速发展,各种飞行器开始出现微型化的趋势。微型涡轮喷气发动机作为各种微型飞行器的动力来源,被称为整个微型飞行器的“心脏”,在航空技术发达国家得到了高度的重视。微型涡轮喷气发动机体积小、重量轻、功率大、能量存储密度高,是一种具有良好应用前景的新型喷气推进动力装置<sup>[1]</sup>。微小整体叶轮作为微型发动机的重要组成部分,属于典型的微小复杂零部件,其加工质量的优劣必将对微型发动机的使用性能产生重要影响,因此对其加工技术的研究势在必行。

美国麻省理工学院的燃气涡轮实验室于 2003 年采用 MEMS 技术加工出了直径为 21mm,厚为 3.7mm,转速为  $1.2 \times 10^6$  r/min 的微型涡轮发动机,其微型涡轮的叶片采用直壁

结构,直径为 4mm<sup>[2]</sup>。比利时鲁汶大学于 2004 年采用电火花成形加工方法研制了不锈钢材料的微型涡轮发动机,其中压气机叶轮为非直壁结构,直径为 20mm,包括 10 个长叶片和 10 个短叶片<sup>[3]</sup>。英国学者 Heaton<sup>[4]</sup>于 2005 年采用受激准分子激光在 PMMA 材料上加工出微小涡轮盘。基于所研制的五轴微小型立式铣床,韩国学者 Bang 等<sup>[5]</sup>于 2005 年使用直径 200  $\mu$ m 硬质合金平头立铣刀,在黄铜工件上加工出了直径 800  $\mu$ m 的微型直壁叶轮。比利时鲁汶大学于 2009 年基于微铣机床 Kern MMP,采用 UGNX3/CAM 进行数控编程,通过五轴铣削加工制备出了直径 20mm 的钛合金材料的压气机叶轮<sup>[6]</sup>,其中采用了直径 1mm 和 0.5mm 的硬质合金球头铣刀对叶轮的不同部位进行加工。日本东北大学采用微磨削、车削以及电火

\*基金项目:国家自然科学基金项目(51575049; 51375055)和国家重点基础研究计划项目(2015CB059900)。

花的方法研制出了微型燃气涡轮发动机<sup>[7-9]</sup>,其直径为100mm,长度为150mm,并通过测试发现该发动机可以实现 $3.6 \times 10^5 \text{r/min}$ 的转速,其中压气机叶轮的直径为16mm,涡轮叶轮的直径为17.4mm。哈尔滨工业大学董颖怀等<sup>[10-11]</sup>于2009年设计了一种三维结构的离心式压气机,采用微细电火花铣削加工方法,得到了具有良好表面质量和精度的三维金属微型压气机,该压气机有8个叶片,直径为3mm,高度为1.5mm,叶片的出口高度为0.4mm,厚度为0.1mm;微型涡轮叶片的直径为2.9mm,叶片高0.4mm,叶片厚度为0.1mm。哈尔滨工业大学的Zhang等<sup>[12-13]</sup>于2010年通过自行研制的5轴微铣机床,加工出了直径为20mm的微型叶轮;并于2012年对微型闭式整体叶轮进行了研究,该微型叶轮的尺寸为 $\Phi 20 \times 14$ (mm),相邻两个叶片间的最小距离仅为2.3mm;利用UG/CAM软件生成了叶轮的加工轨迹,并利用Vericut仿真软件对微型叶轮的刀路轨迹进行了加工仿真。哈尔滨工业大学的Geng等<sup>[14]</sup>于2014年采用微细电火花加工技术,加工出了微型发动机转子模具,然后通过挤压成型,加工出直径为6mm的微小直壁叶轮,叶轮叶片的厚度为0.3mm,高度为0.832mm。

鉴于五轴微细铣削方法在复杂零部件加工中的众多优势,开展了微小整体叶轮五轴联动微细铣削方法的加工研究。基于CAD软件SolidWorks对微小整体叶轮进行三维建模,该叶轮的直径为10mm,有6个相同的扭曲叶片,叶片最小厚度为0.15mm,两相邻叶片间的最小距离为0.58mm。利用CAM软件PowerMill生成微小整体叶轮加工的刀路轨迹,并对刀路轨迹进行加工仿真。最后,采用五轴微细铣削的加工方法,实现了微小整体叶轮的高质量加工。

## 微小整体叶轮加工工艺规划

### 1 微小整体叶轮加工难点分析

微小整体叶轮属于典型的微小复杂薄壁零部件,其流道狭窄、开敞性差,并且叶片薄、叶片扭曲大和叶片长厚比大,在加工过程中极易发生变形和碰撞干涉。另外由于微小整体叶轮尺寸小,在其精加工过程中材料去除量极小,因此需要采用五轴微细铣削的方法实现叶轮的精加工,而微细铣削不同于常规的宏观切削,在叶轮的精加工过程中会发生尺寸效应。因此,针对以上难点有必要对微小整体叶轮的加工工艺进行研究。

基于CAD软件SolidWorks实现微小整体叶轮的三维建模。微小整体叶轮由轮毂曲面和叶片曲面构成,叶片曲面包括压力曲面、吸力曲面和包覆曲面,如图1所示。轮毂曲面由叶根线绕中心轴旋转而成,叶片曲面为直纹曲面。叶轮的直径10mm,高度4.5mm,顶部直径1.5mm,轴孔直径0.8mm,有6个相同的扭曲叶片,叶片最小厚度为0.15mm,两相邻叶片间的最小距离为0.58mm,微小整体叶轮几何模型如图2所示。

### 2 微小整体叶轮加工工艺规划

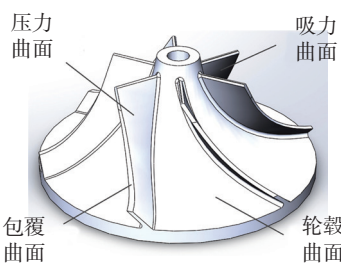


图1 微小整体叶轮几何结构

Fig.1 Micro integral impeller geometry

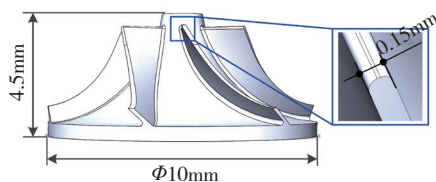


图2 微小整体叶轮几何模型

Fig.2 Geometric model of the micro integral impeller

从整体叶轮的结构特点可以看出,加工整体叶轮时刀具轨迹规划的约束条件较多、相邻叶片空间较小,加工时极易产生碰撞干涉<sup>[15]</sup>,为实现高质量加工,需对叶轮的加工阶段进行划分。加工微小整体叶轮主要分为4个阶段,即过渡模型加工、流道粗加工、轮毂精加工和叶片精加工,如图3所示。第一步:通过三轴联动的铣削方法,将圆柱体毛坯材料加工成叶轮的过渡模型;第二步:采用五轴联动的铣削方法,进行流道粗加工,以去除大量的毛坯材料;第三步:采用五轴联动的铣削方法,对轮毂进行精加工;第四步:采用五轴联动的铣削方法,对叶片进行精加工,实现整个叶轮的加工。

#### 2.1 微小整体叶轮加工刀具选择

由于微小整体叶轮在加工过程中材料去除率高达70%,刀具磨损严重,因此需要根据不同的加工阶段选择合适的铣削刀具以实现微小整体叶轮的高效率和质量加工。在第一阶段,由于采用三轴联动加工,不涉及到刀轴变换,因此在保证加工质量的情况下,选择较大直径的铣刀,在此阶段可选用直径1mm的球头铣刀。在第二阶段,对流道进行粗加工,以去除大量的多余材料为主要目的。两相邻叶片间的最小距离为0.58mm,在充分保证刀具及其运动对于加工部位的空间可达

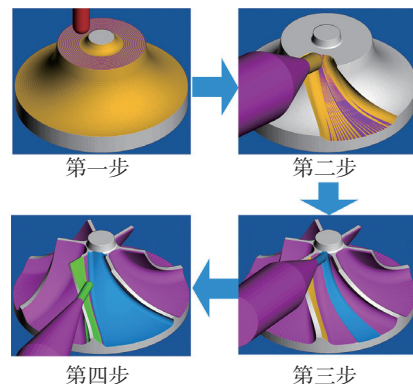


图3 微小整体叶轮的加工流程

Fig.3 Machining process of micro integral impeller

性和无刀工干涉的情况下,选择直径尽可能大的球头铣刀。图4为球头铣刀粗加工叶轮时的局部截面图,刀轴位于两叶片之间任一方向,且两相邻叶片的交点与圆弧 $\widehat{MN}$ 为同一圆心,球头铣刀与叶轮轮毂相切于点A。根据以上信息,计算出在给定粗加工余量情况下的刀具半径选择约束方程。

叶轮叶片的个数为 $n$ ,两相邻叶片间的最小距离为 $MN=l$ ,两相邻叶片间的夹角为 $\theta$ ,粗加工球头铣刀的半径为 $R$ ,刀心坐标到叶片轮廓的最短距离 $OP_0=x$ ,加工余量为 $\delta$ , $AP_1=t$ , $BC=a$ 。在加工过程中不发生叶片过切的情况下,可得到刀具半径选择的约束方程。

$$\begin{cases} x \geq R + \delta \\ x = (R - t) \csc\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ x = \left(t + \delta + a\right) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{l}{2} \sec\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ a = \frac{l}{2} \left(\csc\left(\frac{\theta}{2}\right) - \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\theta=2\pi/n$ ,当 $x=R+\delta$ 时,表示刀

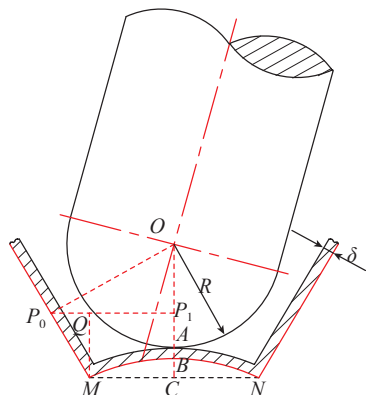
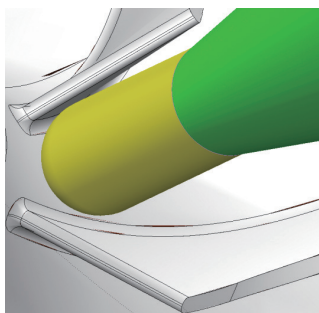


图4 刀具切削几何分析图

Fig.4 Geometric analysis of the cutting process

具与叶片加工余量部分相切,此时刀具的理论半径最大,又 $n=6$ , $\theta=\pi/3$ , $l=0.58\text{mm}$ ,当粗加工余量 $\delta=0.05\text{mm}$ 时,根据上述方程组可得 $R=0.53\text{mm}$ ,即流道开粗加工所能使用的理论最大刀具直径为 $1.06\text{mm}$ 。因此,在第2阶段选择直径为 $1\text{mm}$ 的球头铣刀,既可以去除大量的多余材料,又可避免刀具磨损。在第3~4阶段,以保证叶轮的表面质量和加工精度为首要目的,在这两个阶段均选择直径为 $0.5\text{mm}$ 的微细球头铣刀。

## 2.2 微小整体叶轮刀路轨迹生成

粗加工过程以去除工件的多余材料为主,因此在保证刀具与工件不发生干涉的情况下选用直径较大的刀具,并在主轴转速、进给率、轴向切深和径向切深等切削参数的选择上以保证材料的去除率为首要目的,并为精加工留有 $50\mu\text{m}$ 的余量。由于工件尺寸小,在微小型叶轮的加工过程中,机床主轴极易与工作台发生碰撞,为了保证加工过程的顺利进行,必须使工件与工作台在Z方向的距离足够的大,并且对刀轴的倾角进行限界,限定机床B轴的倾角范围为 $0^\circ\sim 85^\circ$ 。刀轴限界后微小整体叶轮单个流道的粗加工刀路轨迹如图5所示。

为了保证叶轮的表面质量和加工精度,需要对微小型叶轮进行精加工。在精加工过程选择直径比较小的球头铣刀,对粗加工未能切削到的部分进行加工。另外,需要选择合适的切削参数,保证叶轮加工的表面质量、加工精度和加工效率。精加工主要针对叶轮的轮毂和叶片部分进行加工。在对轮毂部分精加工的过程中,需要合理地调整刀具倾角,以避免刀具与叶片发生干涉。在轮毂的精加工过程中,选用直径为 $0.5\text{mm}$ 的硬质合金微细球头铣刀。图6为单个流道的轮毂精加工刀路轨迹,可以看出刀路轨迹光滑连续,刀轴处于连续性变化且未发生加工干涉。

叶片为整个小型叶轮的重要组成部分,其加工质量的优劣对整个叶轮的使用性能会产生重要的影响。在叶片的顶端,厚度仅有 $0.15\text{mm}$ ,并且叶片几何形状复杂,如果切削参数选择不当极易造成叶片的变形,导致工件的报废。在叶片的精加工过程中,选用直径为 $0.5\text{mm}$ 的硬质合金微细球头铣刀,采用点铣方式加工。通过等参数线法生成的单个叶片的精加工刀路轨迹如图7所示,刀路轨迹光滑连续,刀轴连续变化且未发生干涉。

## 2.3 微小整体叶轮加工工艺路线铣削仿真

经过上述分析,可得到微小整体叶轮加工的工艺路线:叶轮过渡模型粗加工→叶轮过渡模型精加工→叶轮流道粗加工→叶轮轮毂精加工→叶轮叶片精加工。具体的工艺规

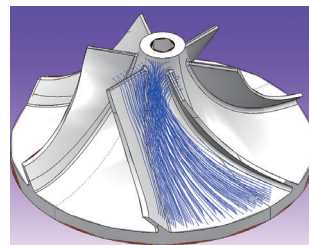


图5 流道粗加工刀路轨迹

Fig.5 Toolpath of channel rough machining

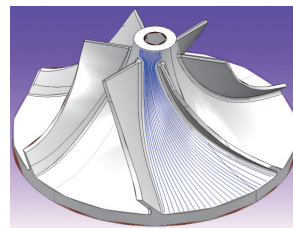


图6 轮毂精加工刀路轨迹

Fig.6 Toolpath of hub finish machining

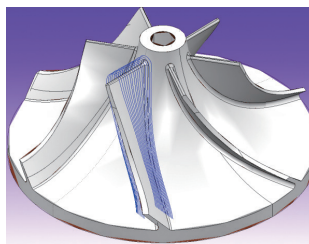


图7 叶片精加工刀路轨迹

Fig.7 Toolpath of blade finish machining

程如表 1 所示。

微小叶轮叶片具有复杂的几何形状,并且厚度小,在五轴联动数控加工过程中刀轴矢量变换频繁,容易产生过切、碰撞等问题。因此,有必要对微小叶轮进行加工仿真,减小工件报废和机床加工事故发生的频率。机床仿真模型如图 8 所示。通过对叶轮加工过程仿真的观察和分析可知,在叶轮的加工过程中,走刀轨迹光顺平稳,并未产生过切、碰撞等问题。因此,可以证实所生成的走刀轨迹是安全可靠的。

### 微小整体叶轮五轴微细切削试验

根据微小整体叶轮加工工艺分析和切削仿真,可对其进行铣削加工试验。以单个叶片和轮毂为研究对象,采用单因素试验,研究每齿进给量对微小整体叶轮精加工表面粗糙度的影响规律。微小整体叶轮的材料为 7075 铝合金,质量轻、强度高、具有良好的力学性能(抗拉强度为 524MPa;屈服强度为 455MPa;延伸率为 11%;弹性模量为 71GPa;硬度为 150HB;密度为 2810kg/m<sup>3</sup>),在航空领域具有广泛的应用。其化学成分如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

微小整体叶轮铣削试验所用的机床为德玛吉 DMU80monoBLOCK 五轴加工中心。在试验过程中,加入切削液以提高工件表面质量和减小刀具磨损。微小整体叶轮轮毂和叶片精加工切削工艺参数如表 3 所示,其加工过程和实物如图 9 所示。

### 试验结果与讨论

通过五轴联动铣削试验,得到了直径为 10mm,叶片最小厚度为 0.15mm,两相邻叶片最小间距为 0.58mm,有 6 个相同叶片的微小整体叶轮。利用基恩士三维激光扫描显微镜 VK-X100 对微小整体叶轮叶片和轮毂的表面粗糙度进行检测,叶片和轮毂在进给方向和垂直于进给方向的表面粗糙度值如图 10 所示。可以看出,轮毂和叶片的表面粗糙度值都呈现先减小后增大的趋势,并且在每齿进给量为 2 μm 时表面粗糙度值都达到最小,沿进给方向的表面粗糙度值均小于垂直于进给方向的值,因此在所采用的每齿进给量的参数范围内有一个最优值。这是由

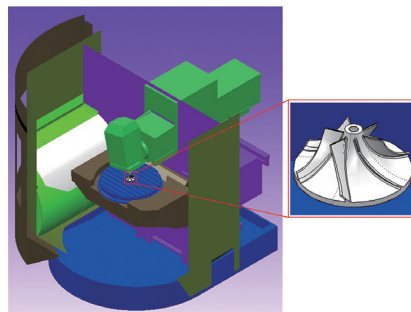
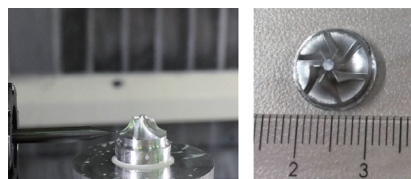


图8 机床仿真模型

Fig.8 Simulation model of machine tool



(a) 加工过程 (b) 加工实物

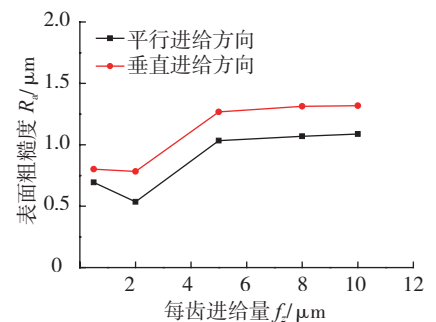
图9 微小整体叶轮铣削试验

Fig.9 Experiment of micro integral impeller

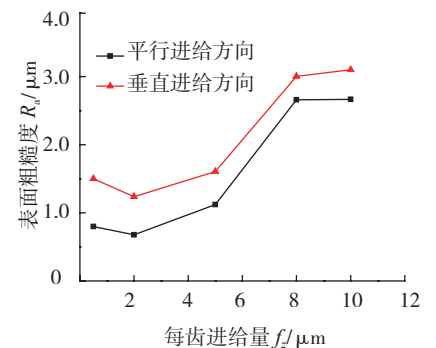
表1 微小整体叶轮加工工艺规程

工序号	工序内容	刀具直径/mm	主轴转速/(r·min <sup>-1</sup> )	每齿进给量/μm	轴向切深/mm	径向切深/mm
1	下料 Φ11mm × 15mm	—	—	—	—	—
2	毛坯装夹	—	—	—	—	—
3	过渡模型粗加工	2.0	10000	40	0.15	0.20
4	过渡模型精加工	1.0	12000	21	0.05	0.10
5	流道粗加工	1.0	12000	40	0.15	0.20
6	轮毂精加工	0.5	12000	0.5,2.5,8,10	0.05	0.08
7	叶片精加工	0.5	12000	0.5,2.5,8,10	0.05	0.08

于在微细切削过程中,当每齿进给量小于刃口钝圆半径时会引起尺寸效应,刀具以负前角进行切削从而增大了表面粗糙度值。当每齿进给量远大于刃口钝圆半径时,随着每齿进给量的增加,切削力将会增大,刀具与工件之间的摩擦将会增大,从而使表面粗糙度值增大。每齿进给量和加工行距共同决定了工件的表面形貌,由于加工行距大于每齿进给量,两条相邻刀路轨迹之间的残留高度比较大,因此沿垂直于进给方向的表面粗糙度大于沿进给方向的表面粗糙度。在每齿进给量为 2 μm 时,轮毂沿进



(a) 每齿进给量对轮毂表面质量的影响



(b) 每齿进给量对叶片表面质量的影响

图10 每齿进给量对轮毂和叶片表面粗糙度的影响

Fig.10 Influence of feed per tooth on the surface roughness of hub and blade

表2 7075 铝合金化学成分 (原子百分数) %

合金元素									其他	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	单个	合计
0.4	0.5	1.2~2.0	0.3	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.2	余量	0.05	0.15

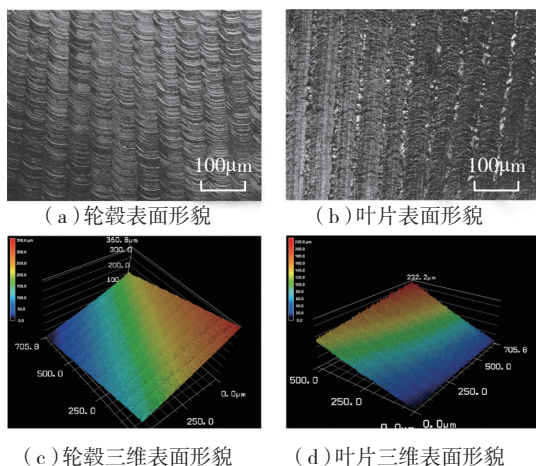


图11 轮毂和叶片表面形貌

Fig.11 Topography of hub and blade surface

表3 微小整体叶轮加工工艺参数

参数	数值
每齿进给量 $f_z/\mu\text{m}$	0.5, 2, 5, 8, 10
主轴转速 / ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	12000
轴向切深 /mm	0.05
径向切深 /mm	0.08

给方向和垂直于进给方向的表面粗糙度分别为  $0.536\mu\text{m}$  和  $0.783\mu\text{m}$ , 叶片沿进给方向和垂直于进给方向的表面粗糙度分别为  $0.678\mu\text{m}$  和  $1.236\mu\text{m}$ 。叶片表面的粗糙度值均大于轮毂表面的粗糙度值,这是由于叶片为薄壁件,在加工过程中刀具与工件之间发生颤振,导致叶片具有较高的表面粗糙度。每齿进给量为  $2\mu\text{m}$  时叶轮轮毂和叶片的表面形貌如图 11 所示。在轮毂表面沿气流方向可以明显看到刀路痕迹,这不仅不会损伤叶轮的空气动力学性能反而能够起到稳定效应。试验结果表明,采用五轴微细切削方法实现微小整体叶轮的高质量加工是可行的。

### 结论

针对微小复杂整体式叶轮,开展了五轴联动微细铣削加工方法研

究。根据叶轮的几何结构,建立了微小整体叶轮流道加工刀具直径选择的约束方程。对微小整体叶轮的加工工艺进行分析,生成了叶轮流道粗加工、轮毂精加工和叶片精加工的刀路轨迹。为避免叶轮加工过程中过切、碰撞等事故发生,对叶轮的加工过程进行切削仿真,最终实现了直径  $10\text{mm}$  的微小整体叶轮的高质量加工。

### 参考文献

[1] 梁德旺, 黄国平. 厘米级微型涡轮喷气发动机主要研究进展 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004(2): 9-13.  
LIANG Dewang, HUANG Guoping. Recent development and key techniques of micro-turbine in centimeter size[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004(2): 9-13.  
[2] EPSTEIN A H. Millimeter-scale, micro-electro-mechanical systems gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2004, 126(2): 205-226.  
[3] PEIRS J, REYNAERTS D, VERPLEATSEN F. A microturbine for electric power generation[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2004, 113(1): 86-93.  
[4] HEATON M. Laser machining for smooth continuous 3-D contouring for micro airflow blades[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5824: 216-

223.  
[5] BANG Y B, LEE K M, OH S. 5-axis micro milling machine for machining micro parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(9): 888-894.  
[6] LIU K, WAUMANS T, PEIRS J, et al. Precision manufacturing of key components for an ultra miniature gas turbine unit for power generation[J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(9): 1417-1425.  
[7] TANAKA S, HIKICHI K, TOGO S, et al. World's smallest gas turbine establishing brayton cycle [R]. Alberta Report, 2007.  
[8] ISOMURA K, TANAKA S, TOGO S, et al. Development of micromachine gas turbine for portable power generation[J]. Bulletin of the JSME, 2004, 47(3): 459-464.  
[9] TANAKA S, TOGO S, HIKICHI K, et al. Analytical and experimental study of hydroinertia gas bearings for micromachine gas turbines[C]// ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea & Air. 2005: 747-755.  
[10] 董颖怀. 一种微型涡轮发动机的关键结构及其制造技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
DONG Yinghuai. A study of key structures and fabrication technology of a micro turbine engine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.  
[11] 董颖怀, 王振龙, 彭子龙, 等. 微型涡轮发动机中压气机部件设计仿真及加工实验 [J]. 上海交通大学学报, 2009(9): 1517-1520.  
DONG Yinghuai, WANG Zhenlong, PENG Zilong, et al. Simulation and fabrication of the micro compressor for micro turbine engine[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009(9): 1517-1520.  
[12] ZHANG X, HAN Z Y, SUN Y Z, et al. Equipments and strategies of machining 3D meso-scale parts[J]. Key Engineering Materials, 2010, 431-432: 78-81.  
[13] ZHANG X, PAN X D, WANG G L. Machining trajectory generation and simulation of miniature integral impeller[J]. Key Engineering Materials, 2012, 522: 355-358.  
[14] GENG X, CHI G, WANG Y, et al. High-efficiency approach for fabricating MTE rotor by micro-EDM and micro-extrusion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014(4): 830-835.  
[15] 张朋辉, 崔晶. 构建虚拟仿真平台提高叶轮加工质量 [J]. 航空制造技术, 2010(18): 91-93.  
ZHANG Penghui, CUI Jing. Improve machining quality of impeller by building virtual simulation platform[J]. Aeronautical Manufacturing (下转第69页)