

# GH710整体叶盘叶片型面磨削加工技术研究\*

徐汝锋<sup>1</sup>, 王海宁<sup>1</sup>, 付余<sup>2</sup>, 杨慎亮<sup>3</sup>, 李勋<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000;

2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

3. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**[摘要]** GH710 材料强度高、耐热性好, 但切削加工性极差, 导致 GH710 整体叶盘叶片型面的轮廓精度极难保证。根据 GH710 整体叶盘的加工特点, 研制了专用 CBN 电镀砂轮, 在磨削参数和工艺方法优选的基础上, 实现了 GH710 整体叶盘叶片型面的精密磨削加工, 并完成磨削应用验证试验。结果表明, 利用电镀 CBN 砂轮磨削加工技术和对称插磨工艺可以实现 GH710 整体叶盘叶片型面的精密磨削加工, 叶片型面的整体轮廓误差小于 0.04mm, 且砂轮使用寿命和磨削效率能够满足生产需要。

**关键词:** 整体叶盘; 叶片; 高温合金; 磨削; CBN 砂轮

## Study on Grinding Technology for Blade Surface of GH710 Blisk

XU Rufeng<sup>1</sup>, WANG Haining<sup>1</sup>, FU Yu<sup>2</sup>, YANG Shenliang<sup>3</sup>, LI Xun<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

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

**[ABSTRACT]** GH710 is an important material with high strength, high temperature resistance and poor cutting performance, which make it difficult to guarantee the machining accuracy of blisk blade. According to the characteristics of GH710 blisk, CBN electroplated grinding wheel was presented. Precision grinding of GH710 blisk blade was realized based on optimization of grinding parameters and process, and verification tests were performed. The results show that the machining accuracy of GH710 blisk blade can be realized utilizing CBN electroplated grinding wheel and symmetrical plunge grinding, the profile error of blade surface is below 0.04mm and the requirement of wheel lifetime and grinding efficiency can be satisfied.

**Keywords:** Blisk; Blade; Superalloy; Grinding; CBN wheel

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.17.073

GH710 材料具有优异的物理性能, 其工作温度可达 980℃, 室温强度为 1300MPa 左右, 是制造发动机叶盘的专用材料<sup>[1]</sup>。目前针对 GH710 整体叶盘的生产工艺是利用锻造、车削、电火花加工、电解加工等方式获得整体叶盘毛坯件<sup>[2]</sup>, 叶片单边预留 0.6~0.9mm 左右的加工余量, 如图 1 所示。

获得叶盘毛坯后, 再利用手工抛修或数控铣削的方法对叶盘叶片型面进行精加工, 最后进行叶片表面抛光处理<sup>[3-4]</sup>, 其主要的生产工艺流程如图 2 所示。叶片的粗、精加工工序是影响叶盘生产效率和型面轮廓精度的

关键步骤。目前, 企业生产中采用手工抛修、数控铣削等加工方式, 均不易保证叶片型面的轮廓精度, 同时存在刀具成本高、加工效率较低等问题。

高速电主轴、超硬磨料砂轮、五轴编程等技术水平的提高<sup>[5-8]</sup>, 为难加工材料整体叶盘的五轴精密磨削加工技术的研究和应用提供了基础条件。

目前, 针对整体叶盘砂轮磨削去料的相关工艺内容较少<sup>[9-10]</sup>。北京航空航天大学的李勋等<sup>[11]</sup>利用设计的电镀 CBN 砂轮对 GH4169 整体叶盘叶片进行五轴数控加工, 获得的叶片轮廓误差约为 0.027mm; 北京航空航天大学的孟凡军等<sup>[12]</sup>应用砂轮对薄壁叶片进行悬臂磨削加工, 获得的叶片轮廓误差约为 0.02mm。

\* 基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX04005001); 山东省自然科学基金(ZR2017MEE060); 山东省重点研发计划(2019GGX104094)。

但是,针对耐高温大晶粒 GH710 整体叶盘叶片型面精密磨削加工技术的研究成果还相对较少。

本文利用电镀 CBN 砂轮对 GH710 整体叶盘叶片型面进行磨削加工技术研究,研制了适合 GH710 整体叶盘叶片型面磨削加工的电镀 CBN 砂轮,优化了加工工艺过程和磨削加工参数,最终实现了 GH710 整体叶盘叶片型面的精密磨削加工。研究成果和试验数据为 GH710 整体叶盘叶片型面的精密、低成本、高效加工提供了重要的参考。

## 1 砂轮研制及磨削参数优选

### 1.1 砂轮设计

进行整体叶盘叶片型面加工时,通常选用锥鼓形砂轮或对称鼓形砂轮<sup>[13-14]</sup>。整体叶盘叶片型面扭曲度大、叶间流道狭窄,锥鼓形砂轮加工时易产生加工干涉,如图 3 所示,本文拟采用对称鼓形砂轮,对于相同的流道空间,对称鼓形砂轮的加工姿态更加灵活,加工时可以有效避免加工干涉,如图 4 所示。

为了确定砂轮的几何尺寸,需要对整体叶盘的叶片

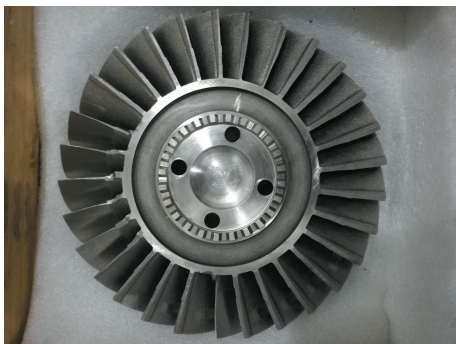


图1 GH710整体叶盘毛坯  
Fig.1 GH710 blisk blank

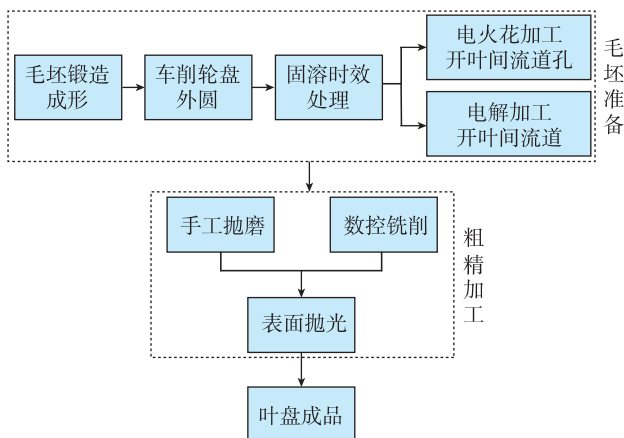


图2 GH710整体叶盘生产工艺流程图  
Fig.2 Flow chart of production process of GH710 blisk

流道间距进行测量。整体叶盘叶片结构和叶片流道间距测量方式如图 5 所示,测量结果如表 1 所示。

由表 1 可知,整体叶盘叶片叶间流道狭窄,在叶盆、叶背处(即叶片深度为 40mm 时),理论叶间流道最短间距为 11.62mm 左右,由于实际叶片毛坯单边预留加工余量 0.6~0.9mm,导致实际叶片的流道最短间距为 10.42~9.82mm,这就决定了砂轮盘直径不能超过  $\phi 9.82\text{mm}$ ,考虑到叶片毛坯厚度不均匀性较大,确定砂轮盘鼓形部分最大直径为  $\phi 9\text{mm}$ ;为了使刀杆与叶片之间保留较大的安全距离,选取刀杆直径为 6mm;砂轮的鼓形半径决定了砂轮与加工零件的接触弧长,接触弧长过长会造成底刃棱边与叶片表面干涉,过短会使加工行宽变短,效率降低,结合给定叶片的结构尺寸,选取砂轮鼓形半径为 8mm,砂轮厚度选为 3.5mm;砂轮总长选取应考虑叶片加工深度(约 40mm)以及刀杆装夹长度(15~20mm),以及主轴与叶片之间的安全距离(10~15mm),所以选定刀具总长度为 80mm。综上所述,砂轮的结构尺寸如图 6 所示。

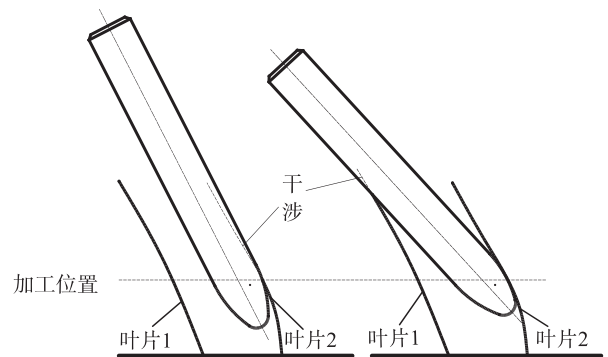


图3 锥鼓形砂轮加工干涉的典型状态  
Fig.3 Typical state of barrel grinding wheel machining interference

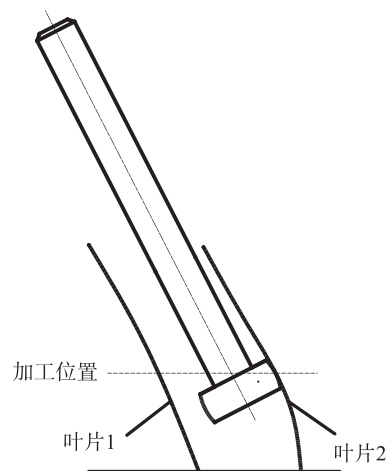


图4 对称鼓形砂轮加工  
Fig.4 Machining process of symmetrical barrel grinding wheel

本文研究的发动机整体叶盘由时效处理的GH710材料制成,材料的高温强化项比普通高温合金多1倍,金相组织呈大晶粒等轴晶体结构,晶粒尺寸0.3~0.5mm,如图7所示<sup>[1]</sup>。

相关研究表明,针对难加工材料高温合金,电镀

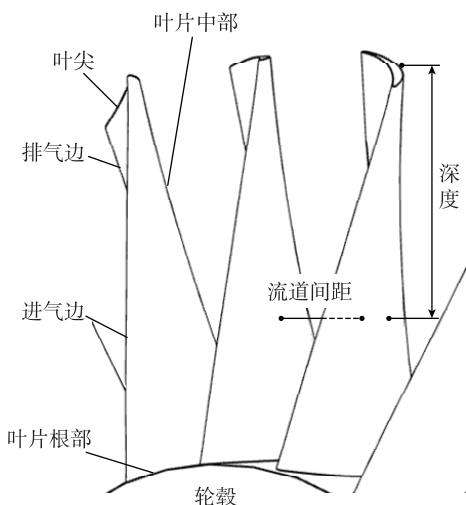


图5 叶片模型流道间距测量方式

Fig.5 Measurement method of blade spacing

表1 相邻叶片流道最小间距与叶片深度的关系

Table 1 Relationship between minimum spacing of adjacent blade passageway and blade depth mm

| 叶片深度 | 流道最小间距 |
|------|--------|
| 0    | 13.21  |
| 10   | 13.15  |
| 20   | 13.02  |
| 30   | 12.74  |
| 40   | 11.62  |
| 45   | 10.64  |

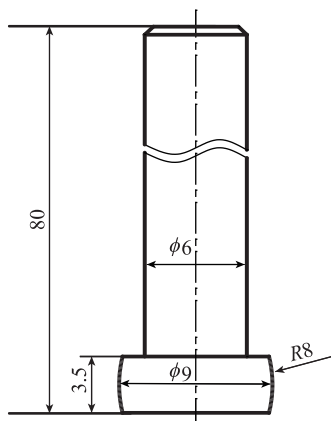


图6 磨削砂轮设计

Fig.6 Design of grinding wheel

CBN砂轮的磨削性能明显优于其他材料的砂轮<sup>[15-16]</sup>。电镀砂轮无需修整,具有良好的形状保持性和尺寸稳定性;砂轮形状设计灵活,制作成本较低;电镀工艺简单,磨粒把持能力较强<sup>[17]</sup>。根据本文研究材料的特性,最终确定选用120#电镀CBN砂轮对GH710整体叶盘叶片进行加工。砂轮的最终实物如图8所示。

### 1.2 粗磨加工参数优选

加工参数是影响加工效率、加工质量以及刀具寿命的重要因素,粗磨加工过程主要关注砂轮的加工效率和砂轮寿命。为了探究砂轮的磨削性能,在三轴高速磨床上对GH710材料进行磨削试验,加工方式和磨削力测量方式如图9所示。试件尺寸为60mm×25mm×16mm。砂轮采用设计的120#电镀CBN砂轮。冷却液为Blaser高速磨削油,并用Kistler9257B测力仪对磨削力进行测量。取砂轮线速度 $v_s=21.2\text{m/s}$ ,磨削宽度 $w=1.5\text{mm}$ ,其他试验参数及磨削力测量结果如表2所示。

根据表2可知,周磨方式下,采用大进给、小磨深的参数组合时,产生的磨削力较小,选定周磨加工参数组

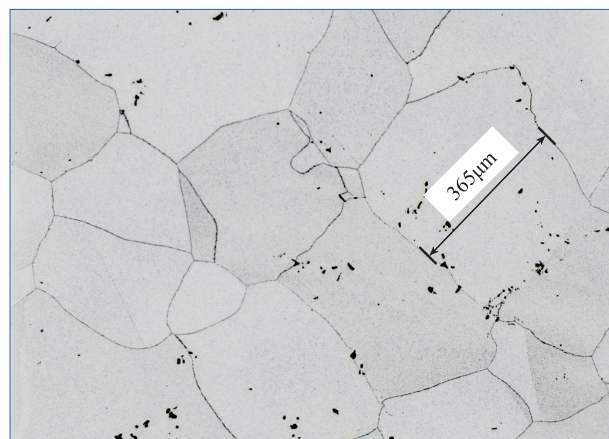


图7 时效状态GH710金相组织

Fig.7 Metallographic structure of aging state GH710



图8 研制的120#电镀CBN砂轮

Fig.8 120# electroplated CBN grinding wheel

合为： $v_f=600\text{mm/min}$ ， $a_p=0.05\text{mm}$ ， $w=1.5\text{mm}$ ， $v_s=21.2\text{m/s}$ ，该参数下磨削抗力  $F_x$  为 11N，磨削阻力  $F_y$  为 2.5N，轴向抗力  $F_z$  为 0；插磨方式<sup>[18]</sup>下，采用小进给、大磨深的参数组合时，磨削力较小，选定插磨加工参数组合为： $v_f=300\text{mm/min}$ ， $a_p=0.1\text{mm}$ ， $w=1.5\text{mm}$ ， $v_s=21.2\text{m/s}$ ，该参数下的磨削抗力  $F_x$  为 10N，磨削阻力  $F_y$  为 1N，轴向抗力

力  $F_z$  为 0.75N。

利用优选得到的加工参数组合，采用新制砂轮对上述试件进行周、插磨加工，得到磨削力关于材料去除量的关系曲线如图 10 所示。

可以看出，相对于磨削抗力  $F_x$ ，进给阻力  $F_y$  数值较小。对比周磨和插磨加工测力曲线发现，初始加工时，插磨加工时的磨削抗力  $F_x$  和进给阻力  $F_y$  较小，但是随着加工的进行，磨削力迅速增大，且插磨的磨削抗力增幅较大，随着材料去除量的增加(大约超过  $310\text{mm}^3$  左右)，

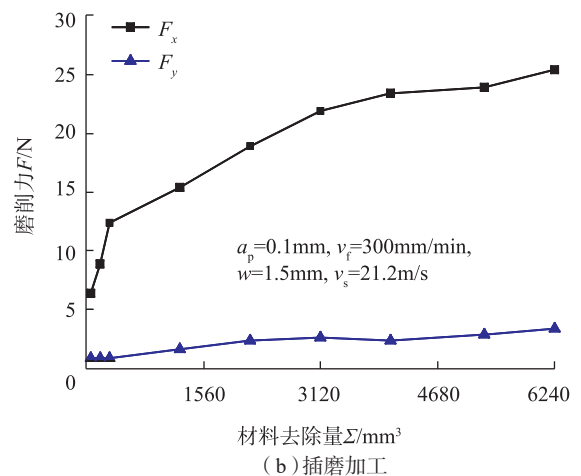
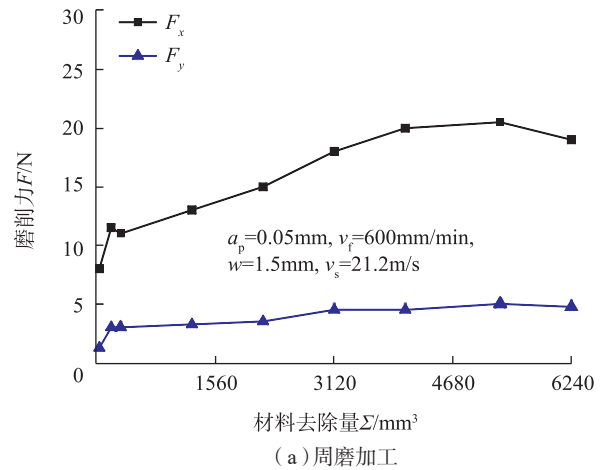
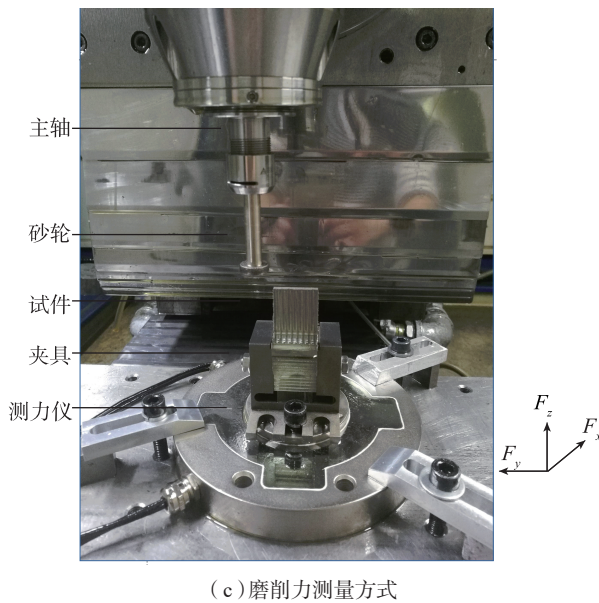
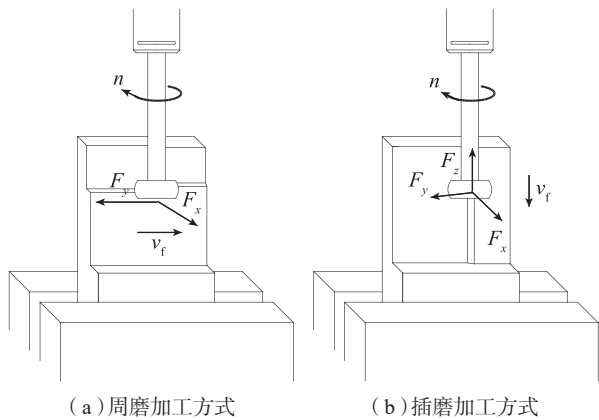


图9 GH710周磨、插磨加工示意图及测力方式  
Fig.9 Process diagram of grinding and method of force measurement

图10 周磨、插磨磨削力测量结果  
Fig.10 Force measurement results of different grinding methods

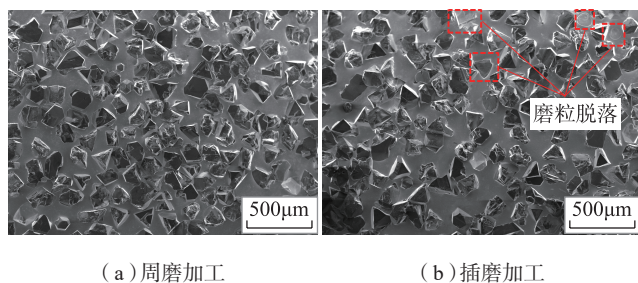
表2 砂轮周磨、插磨加工参数及测力结果  
Table 2 Processing parameters and force measurement results

| 磨削方式 | 进给速度 $v_f/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$ | 磨削深度 $a_p/\text{mm}$ | 磨削力 /N |       |       |
|------|--|----------------------|--------|-------|-------|
|      |  |                      | $F_x$  | $F_y$ | $F_z$ |
| 周磨   | 600  | 0.05                 | 11.0   | -2.5  | 0     |
|      | 300  | 0.1                  | 12.5   | -3.5  | 0     |
| 插磨   | 600  | 0.05                 | 11.5   | -1.25 | -0.5  |
|      | 300  | 0.1                  | 10.0   | -1.0  | -0.75 |

插磨加工的磨削力逐渐大于周磨。当材料去除量达到  $6240\text{mm}^3$  时,周磨和插磨加工测力曲线趋于稳定,此时周磨的磨削抗力  $F_x$  为  $20\text{N}$  左右,进给阻力  $F_y$  为  $5\text{N}$  左右;插磨的磨削抗力  $F_x$  为  $25\text{N}$  左右,进给阻力  $F_y$  为  $3.5\text{N}$  左右。

材料去除总量为  $6240\text{mm}^3$  时,利用扫描电子显微镜 (SEM) 对砂轮表面进行观测,其形貌如图 11 所示。

从砂轮磨损情况来看,相比于周磨加工方式,插磨加工后的砂轮表面磨粒破碎较为严重,且存在一定程度的磨粒整体脱落现象。这是由于插磨加工时,砂轮进给

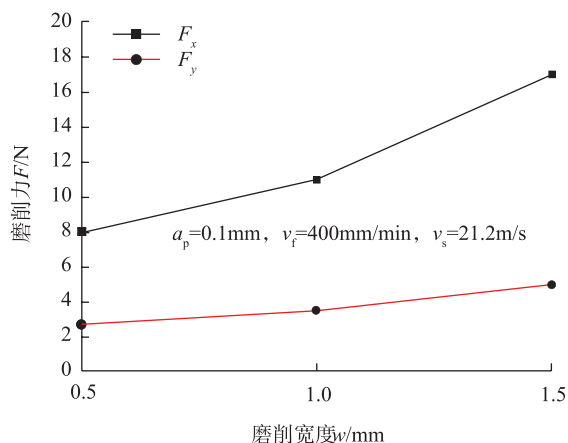


(a) 周磨加工

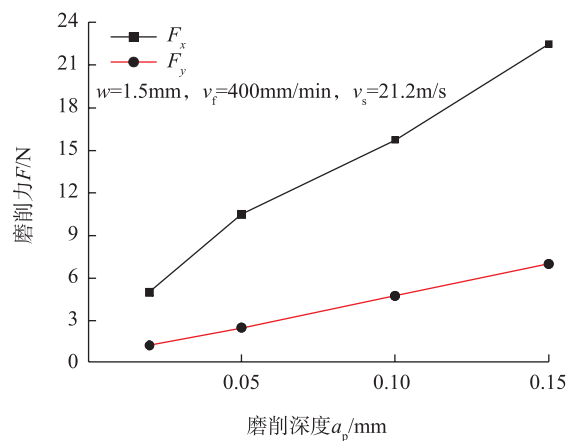
(b) 插磨加工

图 11 不同加工方式砂轮磨损情况

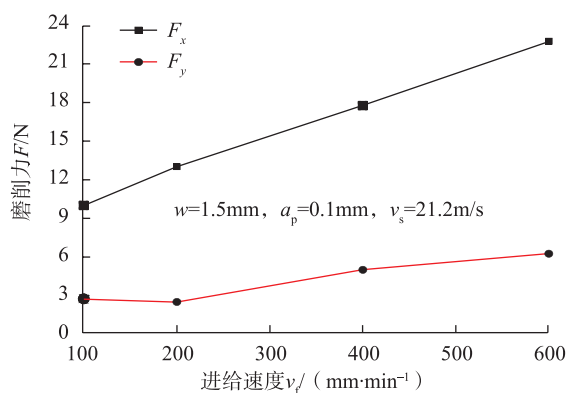
Fig.11 Wheel surface microstructure of different grinding methods



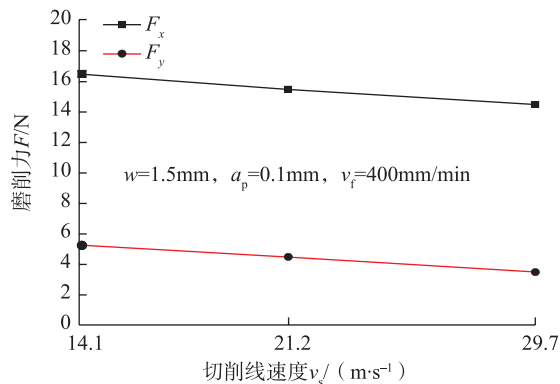
(a) 磨削宽度对磨削力的影响



(b) 磨削深度对磨削力的影响



(c) 进给速度对磨削力的影响



(d) 切削线速度对磨削力的影响

图 12 磨削力随磨削参数的变化规律

Fig.12 Force measurement results of different grinding parameters

方向与线速度方向垂直,加工过程中存在轴向力,容易产生砂轮颤振,磨粒受力状况较差,砂轮磨损速度较快;而周磨加工方式下,砂轮进给方向与线速度方向一致,加工过程基本无轴向力,砂轮运动较为平稳,磨粒受力状况较好,砂轮磨损较慢。同时从图 11 中可以看出,无论周磨加工还是插磨加工方式,当材料去除量达到  $6240\text{mm}^3$  (实际加工时,单个叶片材料去除量小于  $1600\text{mm}^3$ ) 时,磨粒形状仍然较为锋利,砂轮仍具有继续切削加工的能力,可见在当前试验条件下,砂轮的磨削性能较好。

由此可见,选出的周、插磨加工参数能够保证砂轮寿命,可满足整体叶盘叶片型面的粗加工需要。

### 1.3 精磨加工参数优选

对于薄壁试件的加工,切削力的大小直接影响加工变形,为确定高效率、高质量的叶片加工参数组合,根据已有的粗加工参数,采用单因素试验法依次研究进给速度  $v_f$ 、磨削深度  $a_p$ 、磨削宽度  $w$  和切削线速度  $v_s$  对磨削力  $F$  的影响规律。由于周磨粗加工时产生的切削力较小,试验采用周磨的加工方式,取砂轮线速度  $v_s=21.2\text{m/s}$ ,其他试验参数及磨削力测量结果如图 12 所示。

通过图 12 (a)可知:垂直于进给方向的磨削抗力  $F_x$  处于显著地位,是加工过程中的主要磨削力且磨削宽度对磨削力有显著影响;图 12 (b)中曲线  $F_x$  倾斜程度较大,说明磨削深度对磨削力的影响也较大;图 12 (c)中随着进给速度的增加,磨削力的增幅不明显,为提高磨削效率,可适当选取较大的进给速度;图 12 (d)可见增大切削线速度可以减小磨削力,为提高砂轮磨削能力,可在条件允许的情况下选取较大的切削线速度。

综合考虑以上试验结果,在本试验参数范围内选取叶片粗、精加工参数如表 3 所示。

## 2 磨削加工工艺条件

### 2.1 设备及叶盘安装

设计专用夹具对时效处理的整体叶盘进行装夹,如图 13 所示,利用五轴数控机床对其进行磨削加工验证。砂轮采用设计的 120# 电镀 CBN 对称鼓形砂轮,粗、精加工的切削线速度取 21.2m/s,其他参数采用表 3 中得到的参数组合。

### 2.2 磨削加工方案设计

叶片属于典型的弱刚性结构,加工过程中形成的加工表面残余应力会对工件的变形量产生很大的影响<sup>[19]</sup>。为了研究加工过程中砂轮运动轨迹对叶片型面变形量

的影响,拟采用 4 种加工方案<sup>[13,18,20]</sup>对叶片型面进行磨削加工试验,如图 14 所示。

图 14 (a)所示为分层对称周磨,即用周磨的加工方式,先在叶片的一侧横向走刀,完成后转换到另一侧横向走刀;图 14 (b)所示为分层对称插磨,以插磨的方式沿叶片高度方向进行走刀,先加工一侧,再加工另一侧;图 14 (c)所示为螺旋周磨,以周磨的加工方式,围绕叶片沿同一方向螺旋走刀,使刀路近似对称;图 14



图13 整体叶盘安装图  
Fig.13 Diagram of blisk installation

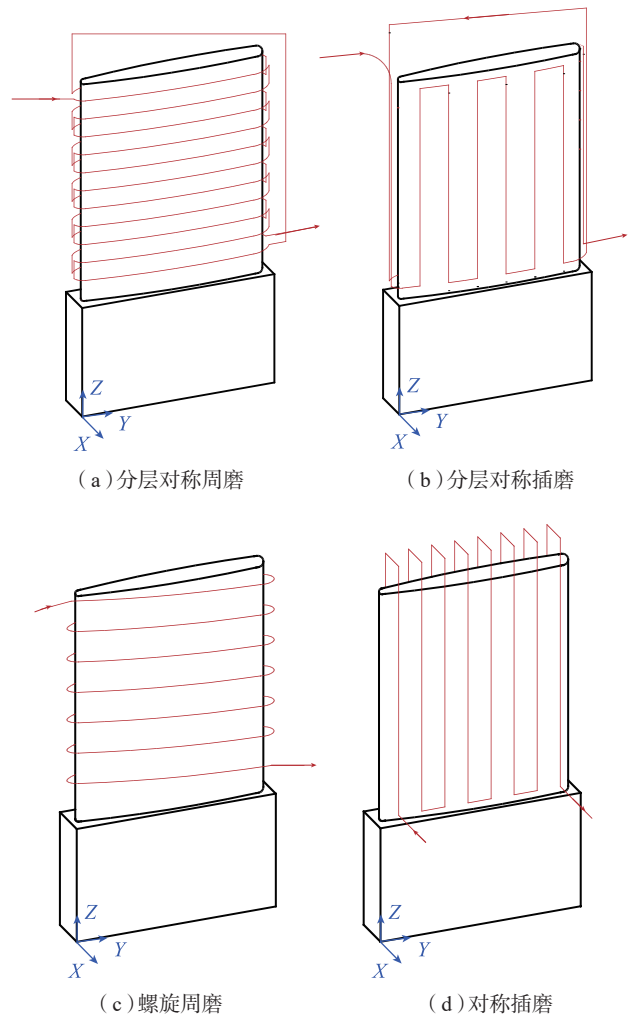


图14 加工方案刀路简图  
Fig.14 Schematic drawing of machining tool path

表3 叶片粗、精磨削加工参数组合

Table 3 Rough and finish grinding machining parameters of blade

| 项目 | 周磨             |                  |                                     | 插磨             |                  |                                     |
|----|----------------|------------------|-------------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------|
|    | 磨削宽度<br>$w/mm$ | 磨削深度<br>$a_p/mm$ | 进给速度<br>$v_f / (mm \cdot min^{-1})$ | 磨削宽度<br>$w/mm$ | 磨削深度<br>$a_p/mm$ | 进给速度<br>$v_f / (mm \cdot min^{-1})$ |
| 粗磨 | 1.5            | 0.05             | 600                                 | 1.5            | 0.1              | 300                                 |
| 精磨 | 0.5            | 0.05             | 300                                 | 0.5            | 0.05             | 300                                 |

(d)所示为对称插磨,以插磨的加工方式,在叶片两侧的高度方向上进行交替走刀,使刀路完全对称。

### 3 叶片型面磨削试验及分析

利用以上4种加工方案分别对时效处理的整体叶盘叶片型面进行加工,并通过三坐标测量机分别对叶片进气边、排气边和型面中部进行打点测量,得到各部分的变形量如图15、16所示。

从以上叶片型面的变形量测量结果可知:

(1)4种加工方案中,进气边变形量最大,最大变形在0.03~0.08mm之间;排气边变形量曲线较为分散,数值变化范围小于进气边,为0.02~0.05mm;叶片中部变形量曲线相对集中,最大变形量的范围为0.02~0.035mm。在叶片高度方向上,叶根处叶片变形量要小于叶尖处的叶片变形量。

(2)采用分层对称周磨和分层对称插磨加工后的叶片变形量曲线波动大,即变形量大。这是因为,分层对称磨削先加工叶片一侧再加工另一侧,两侧新产生的

残余应力对叶片型面的作用效果相互抵消,因此,分层对称磨削后的叶片型面主要以“让刀”变形为主。

(3)螺旋周磨加工后的叶片变形量相对较小,表明螺旋周磨对残余应力变形和“让刀”变形有较好的控制,但螺旋周磨会使叶片产生一定的扭转变形,且进排气边

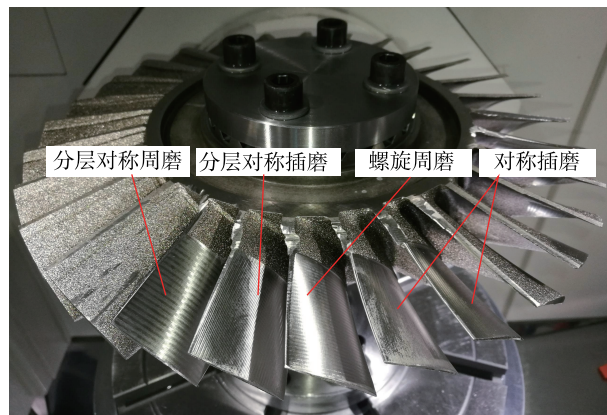
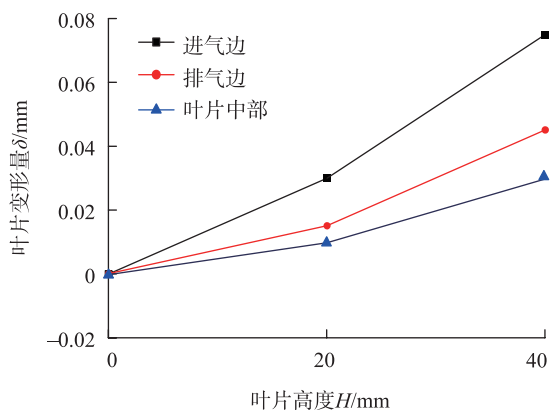
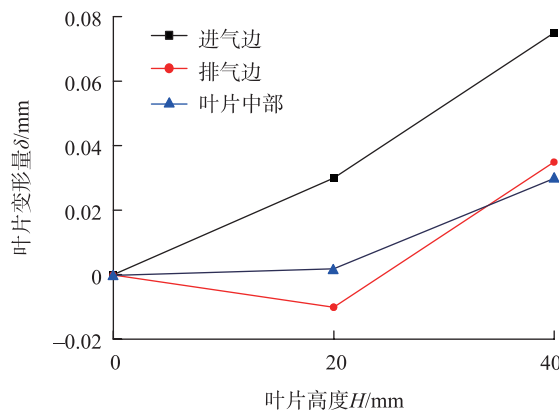


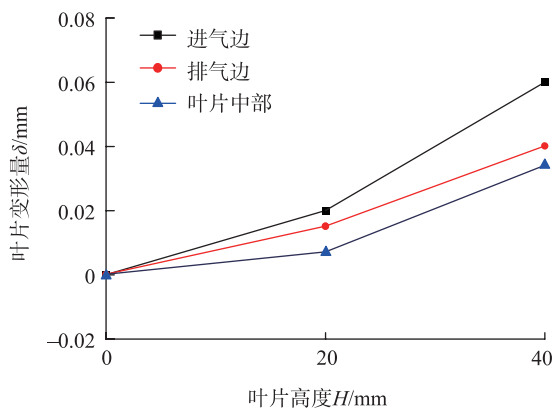
图15 整体叶盘叶片多工艺方案加工效果图  
Fig.15 Results of grinding test



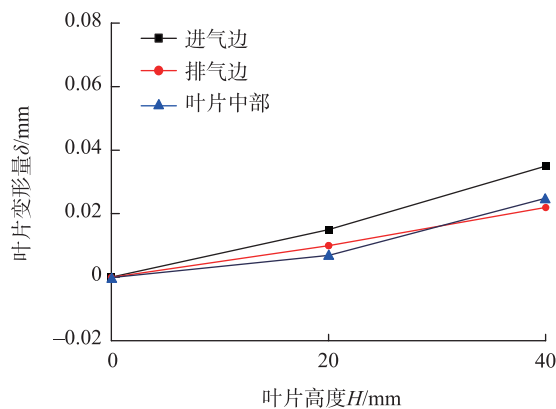
(a) 分层对称周磨



(b) 分层对称插磨



(c) 螺旋周磨



(d) 对称插磨

图16 整体叶盘叶片加工变形曲线

Fig.16 Results of machining deformation of blisk blade

处的刀路曲率变化大,对机床的响应速度及联动精度要求较高。

(4) 对称插磨后叶片变形量对高度变化不敏感,且排气边的变形量仅有 0.035mm,比分层对称周磨的变形量小 50%,说明对称插磨对叶片整体变形控制效果最好。

利用扫描电子显微镜(SEM)对磨削加工 5 个叶片后的砂轮表面进行观察,结果如图 17 所示。砂轮主要磨损区为鼓形区中部,且磨粒磨损均匀,进而能够保证加工精度及其一致性。同时,说明加工过程中砂轮与叶片型面的接触状态较好,砂轮寿命可以满足叶片型面实际加工的需要。

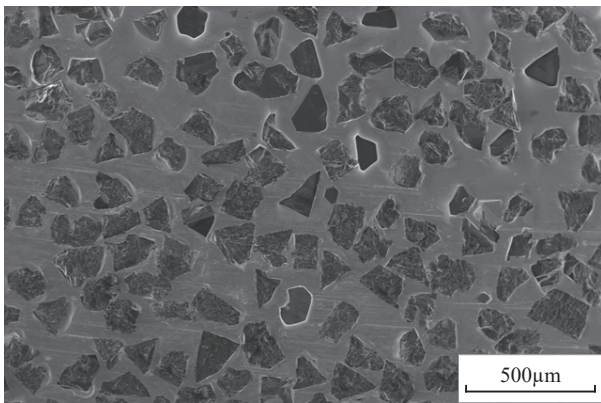


图17 砂轮表面磨损情况

Fig.17 Surface microstructure of used wheel

## 4 结论

(1) 利用 120# 电镀 CBN 砂轮和对称插磨可以实现 GH710 整体叶盘叶片型面的精密磨削加工,叶片型面的整体轮廓误差小于 0.04mm。

(2) 优化了叶片型面的磨削工艺方法。在试验条件下,对称插磨方式对叶片型面的变形控制效果最优,可以使叶片变形量相较于其他磨削工艺方法减少 50%。

(3) 优化了叶片型面粗、精磨削加工参数。当粗磨加工参数组合为  $v_f=300\text{mm}/\text{min}$ 、 $a_p=0.1\text{mm}$ 、 $w=1.5\text{mm}$ 、 $v_s=21.2\text{m}/\text{s}$  时,材料去除量达到  $6240\text{mm}^3$  时,砂轮磨粒具有较好的磨削性能;当精磨加工参数组合为  $v_f=300\text{mm}/\text{min}$ 、 $a_p=0.05\text{mm}$ 、 $w=0.5\text{mm}$ 、 $v_s=21.2\text{m}/\text{s}$  时,可以极大地降低磨削力,减小叶片型面的“让刀”变形,保证叶片型面的轮廓精度。

## 参考文献

[1] XU L, CUI C, SUN X. The effects of co and ti additions on microstructures and compressive strength of Udimet710[J]. Materials

Science & Engineering A, 2011, 528(27): 7851–7856.

[2] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(2): 205–208.

REN Junxue, ZHANG Dinghua, WANG Zengqiang, et al. Research on the NC machining technique of blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 205–208.

[3] 刘春辉. 整体叶盘砂带磨抛工具系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

LIU Chunhui. Research on the abrasive belt grinding and polishing tool system for blisk finishing[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[4] 肖贵坚. 整体叶盘面开式砂带精密磨削方法及其实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

XIAO Guijian. Experimental research on the precision grinding method of blisk with openloop abrasive belt[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[5] GUO C, RANGANATH S, MCINTOSH D, et al. Virtual high performance grinding with CBN wheels[J]. CIRP Annals–Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 325–328.

[6] CHO I, LEE D K, KIM J. Generation of collision-free cutter location data in five-axis milling using the potential energy method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(8): 523–529.

[7] MORISHIGE K, KASE K, TAKEUCHI Y. Collision-free tool path generation using 2-dimensional C-space for 5-axis control machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(6): 393–400.

[8] HUANG Y, OLIVER J H. Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1994, 9(5): 281–290.

[9] DENKENA B, KÄSTNER J, WANG B. Advanced microstructures and its production through cutting and grinding[J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 67–72.

[10] DENKENA B, TURGER A, BEHRENS L, et al. Five-axis-grinding with toric tools: a status review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(5): 054001.

[11] LI X, MENG F J, CUI W, et al. The CNC grinding of integrated impeller with electroplated CBN wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5–8): 1353–1361.

[12] MENG F, LI X, CHEN Z, et al. Study on the cantilever grinding process of aero-engine blade[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(11): 1393–1400.

[13] LI X, MA S, MENG F. Surface integrity of GH4169 affected by cantilever finish grinding and the application in aero-engine blades[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(5): 1539–1545.

[14] 孟凡军. 整体叶盘叶片型面数控精密磨削加工技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.

MENG Fanjun. Study on the precision grinding technology for (下转至第94页)

additive manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V[J]. *Materials Characterization*, 2016, 114: 103-114.

[29] CAIN V, THIJS L, VAN HUMBEECK J, et al. Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 5: 68-76.

[30] RAFI H K, KARTHIK N V, GONG H, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2013, 22(12): 3872-3883.

[31] SIMONELLI M, TSE Y Y, TUCK C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 616: 1-11.

[32] FACCHINI L, MAGALINI E, ROBOTTI P, et al. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2010, 16(6): 450-459.

[33] HOLLANDER D A, VON W M, WIRTZ T, et al. Structural, mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming[J]. *Biomaterials*, 2006, 27(7): 955-963.

[34] VILARO T, COLIN C, BARTOUT J D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2011, 42(10): 3190-3199.

[35] XU W, BRANDT M, SUN S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. *Acta Materialia*, 2015, 85: 74-84.

[36] BAUFELD B, BIEST OVD, GAULT R, et al. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2012, 31(1): 106-111.

[37] BAUFELD B, BRANDL E, BIEST OVD. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(6): 1146-1158.

[38] WANG F, WILLIAMS S, PAUL C, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44(2): 968-977.

[39] BRANDL E, BAUFELD B, LEYENS C, et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 595-606.

[40] LIN J, LÜ Y, LIU Y, et al. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 69: 19-29.

[41] LIN J J, LÜ Y H, LIU Y X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2016, 102: 30-40.

[42] ASTM F1108-14. Standard specification for titanium-6aluminum-4vanadium alloy castings for surgical implants[S]. Almere: ASTM International, 2014.

[43] BERMINGHAM M J, NICASTRO L, KENT D, et al.

Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 753: 247-255.

[44] BERMINGHAM M J, KENT D, ZHAN H, et al. Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions[J]. *Acta Materialia*, 2015, 91: 289-303.

通讯作者: 张林杰, 副教授, 博士生导师, 研究方向为激光焊、激光增材制造, E-mail: zhanglinjie@mail.xjtu.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第80页)

the CNC machining of blade surface of blisk[D]. Beijing: Beihang University, 2015.

[15] 康仁科, 杨巧凤, 齐威, 等. 电镀 CBN 砂轮缓进给磨削高温合金叶片窄深槽的试验研究 [J]. *航空制造技术*, 1999, 42(6): 16-18, 23.

KANG Renke, YANG Qiaofeng, QI Wei, et al. An experimental study on creep feed grinding narrow deep groove of high temperature alloy blade with electroplated CBN wheel[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999, 42(6): 16-18, 23.

[16] 杨茂奎, 李雅卿, 史兴宽, 等. 陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削 GH4169 高温合金的磨削加工性与磨削表面完整性 [J]. *工具技术*, 1996(11): 6-10.

YANG Maokui, LI Yaqing, SHI Xingkuan, et al. The grindability and grind surface integrity of nickel-based superalloy GH4169 using CBN wheel[J]. *Tool Engineering*, 1996(11): 6-10.

[17] 马爽, 李勋, 苏帅, 等. 电镀砂轮磨损对 GH4169 磨削表面完整性的影响 [J]. *航空制造技术*, 2017, 60(1/2): 74-78.

MA Shuang, LI Xun, SU Shuai, et al. Influence of electroplated wheel wear on GH4169 grinding surface integrity[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(1/2): 74-78.

[18] 马爽, 李勋, 崔伟, 等. GH4169 叶片悬臂磨表完整性及参数优化研究 [J]. *航空制造技术*, 2016, 59(18): 102-108.

MA Shuang, LI Xun, CUI Wei, et al. Study on surface integrity and parameter optimization of GH4169 machined by cantilever plunge grinding[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(18): 102-108.

[19] 孙杰, 李剑峰, 王中秋, 等. 航空整体结构件加工变形控制与校正关键技术 [J]. *航空制造技术*, 2009, 52(23): 62-66.

SUN Jie, LI Jianfeng, WANG Zhongqiu, et al. Key technology on processing deformation control and correction of aviation overall parts[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(23): 62-66.

[20] 王瑞秋, 陈五一, 肖俊, 等. 鼓形砂轮周磨自由曲面刀位算法 [J]. *中国机械工程*, 2006, 17(16): 1719-1722.

WANG Ruiqiu, CHEN Wuyi, XIAO Jun, et al. Tool positioning strategy for free form surface flank grinding with drum wheel[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(16): 1719-1722.

通讯作者: 徐汝锋, 博士, 副教授, 研究方向为复杂曲面多轴数控加工技术, E-mail: xurufeng2003@126.com.

(责编 铃兰)