

偏置量对固结磨料小工具头抛光 面形收敛效率的影响

徐成宇¹, 张云², 刘纪东¹, 朱永伟¹

(1.南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2.清华大学 机械工程系, 北京 100080)

摘 要: **目的** 解决自由曲面磨抛面形收敛困难的问题, 提高抛光小工具头的抛光效率。**方法** 提出一种偏置式固结磨料小工具头, 基于固结磨料小工具头的结构特征参数, 建立抛光小工具头的去除函数理论模型, 并进行仿真分析, 应用定点抛光法建立抛光小工具头去除函数实验模型, 并验证抛光小工具头理论去除函数合理性, 基于 CCOS 技术原理建立工件表面定量去除模型, 通过虚拟加工实验探索偏置量对固结磨料小工具头抛光钛合金后的面形收敛效率的影响。**结果** 归一化理论去除函数曲线与实验曲线吻合度较高, 定点抛光去除函数仿真模型能够很好地预测定点抛光斑的去除轮廓形状。抛光小工具头抛光钛合金的面形误差随偏置量增加, 呈现先减小、后增大的趋势, 无偏置的抛光小工具头抛光后, 面形数据均方根 (RMS) 收敛效率为 54.56%, 波峰值与谷峰值之差 (PV) 的收敛效率为 60.21%, 当抛光小工具头偏置量为 1.5 mm 时, 抛光后的 RMS 收敛效率达到最高, 为 73.83%, PV 收敛效率为 69.68%。**结论** 固结磨料小工具头去除函数理论模型可指导确定性材料去除, 偏置量为 1.5 mm 时的抛光小工具头具有最强的修正误差能力, 可以显著提高固结磨料小工具头抛光工艺的面形收敛效率。

关键词: 固结磨料垫; 抛光小工具头; 去除函数; 偏置量; 面形收敛

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0130-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.013

Effect of Offset on Polishing Surface Shape Convergence Efficiency of the Fixed Abrasive Tool Head

XU Cheng-yu¹, ZHANG Yun², LIU Ji-dong¹, ZHU Yong-wei¹

(1.College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of difficulty in convergence of free surface polishing and improve the polishing efficiency of the polishing tool head. An offset fixed abrasive small polishing head is proposed. The theoretical model of removal function of the polishing tool head is established and simulation analysis is completed based on the structural

收稿日期: 2021-10-24; 修订日期: 2021-12-05

Received: 2021-10-24; Revised: 2021-12-05

作者简介: 徐成宇 (1993—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密超精密加工。

Biography: XU Cheng-yu (1993—), Female, Doctoral candidate, Research focus: precision and ultra-precision machining.

通讯作者: 朱永伟 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米材料的制备与应用、精密超精密加工、表面工程。

Corresponding author: ZHU Yong-wei (1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: preparation and application of nanomaterials, precision and ultra-precision machining, surface engineering.

引文格式: 徐成宇, 张云, 刘纪东, 等. 偏置量对固结磨料小工具头抛光面形收敛效率的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 130-139.

XU Cheng-yu, ZHANG Yun, LIU Ji-dong, et al. Effect of offset on polishing surface shape convergence efficiency of the fixed abrasive tool head[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 130-139.

characteristic parameters of the polishing tool head. Removal function experimental model of the polishing tool head is established and the rationality of the theoretical removal function of the polishing tool head is verified by point polishing experiments. Deterministic material removal model of workpiece surface is established based on the CCOS principle and effect of offset on polished surface of fixed abrasive tool head surface shape convergence efficiency is evaluated by virtual machining experiment. The results show that the normalization theory removal function curve is in good agreement with the experimental curve removal function simulation model of point polishing can predict the removal contour shape of the fixed-point polishing spot. The surface shape error of the polishing tool head first increases and then decreases with the increase of the offset. The RMS convergence efficiency after polishing with the no-offset polishing tool head is 54.56%, and the PV convergence efficiency is 60.21%. The surface shape convergence efficiency after polishing reaches the maximum value when the offset of polishing tool head equals 1.5 mm. The RMS convergence efficiency of the surface shape error is 73.83%, and the convergence efficiency is 69.68%. The theoretical model of removal function of fixed abrasive tool head can guide deterministic material removal. The offset polishing tool head with an offset of 1.5 mm has the strongest ability to correct errors and can significantly improve the surface shape convergence efficiency of the fixed abrasive polishing process.

KEY WORDS: fixed abrasive pad; polishing tool head; removal function; offset; surface shape convergence

自由曲面因其独特的结构特性而被广泛应用于汽车、电子、航空航天等领域。航空发动机叶片是由复杂自由曲面构成的薄壁型零件,发动机叶片工作时需要承受较大且变化频繁的工作应力和工作温度,这对叶片提出了更高的加工要求^[1]。钛合金因综合力学性能优良,被作为航空发动机叶片重要制成材料之一,但是钛合金化学性质活泼、在高温下易与磨料粘附^[2-3],粘附严重会造成工具头堵塞、变形,降低加工精度,加剧抛光工具的磨损。同时,钛合金材料的热导率低,在机械加工时易导致加工区域温度急剧上升,表面容易造成烧伤,对叶片的服役寿命影响巨大^[4]。抛光作为叶片加工成形的最终工艺,直接决定叶片表面质量,进而对航空发动机使用性能与寿命有着决定性作用^[5]。抛光工具作为抛光过程中的重要部件,对航空发动机叶片的型面精度和表面质量有直接影响。

目前,国内科研机构对于抛光工具进行了大量研究,如西北工业大学^[6]在自主研发的五轴数控机床上,采用砂布轮作为抛光工具,实现了叶片的柔性自适应抛光。淮文博等^[7]通过灰色关联度优化方法,获得了基于弹性磨具砂布轮抛光效率优化的工艺参数,能在较短的时间内获得合格的表面粗糙度。但数控抛光对加工设备精度的高要求致使工艺成本较高,不适用于航空发动机叶片的大批量加工。肖贵坚等^[8]基于叶片磨削控制方程对叶片进行砂带磨削实验,整体叶盘磨削后的表面粗糙度 $<0.25\ \mu\text{m}$,型线精度 $<0.05\ \text{mm}$,提高了叶片的型面精度一致性。Zhao 等^[9]建立了柔性抛光叶片的表面粗糙度预测模型,并应用响应面法确定最佳工艺参数,显著提高了加工质量。陈志同等^[10]提出一种变预压量抛光技术,实现了叶片的非均匀去除,将叶片的型面轮廓度提高至 $-0.04\sim-0.005\ \text{mm}$ 。重庆大学黄云^[11]提出的恒载自适应砂带抛光方法相较于传统砂带抛光,在尺寸精度和表面质量一致性上更具有优势。张明德等^[12]基于机器人抛光平台对叶片

进行余量自适应磨削,叶片型面的加工质量得到改善,型面精度达到 $\pm 0.05\ \text{mm}$ 。

小工具头抛光技术是因光学自由曲面的加工需求开发并发展成熟的一种加工方法^[13-14],该方法采用比工件直径小 1/4 的小工具头对工件表面进行抛光,根据面形误差参数,将小工具头装夹在多轴联动的数控加工中心上,控制小工具头的驻留时间,来控制材料的去除量,以达到精准控制工件面形误差精度的目的^[15]。刘振宇等^[16]应用一种误差分离组合加工技术对 2.04 m 口径的非球面反射镜进行抛光,抛光后的面形收敛效率(RMS)达到 61.2%。马付建等^[17]建立了钛合金光整加工的材料去除函数,并通过单点抛光实验验证了材料去除函数拟合的准确性。黄智等^[18]采用机器人气囊抛光方法对非球面碳化硅进行了抛光实验,经过粗抛、精抛后的工件表面面形波峰值与谷值之差(PV)达到 570.1 nm,面形数据均方根(RMS)达到 62.3 nm。胡德金^[19]采用砂轮磨损实时监测与自适应磨削方法,以圆筒砂轮端面对硬脆非球面光学镜进行加工,在保证面形精度的同时,提高了磨削效率。

传统小工具头抛光属于游离磨料加工,磨粒不均匀分布、磨料浓度等因素对其面形精度影响较大。固结磨料是通过将磨粒与结合剂等其他辅助添加剂混合后充分搅拌的高聚物,经热固化处理成形的一种固结磨具^[20],固结磨料抛光因其效率高、亚表面损伤小、成本低等优点,而被广泛应用于光学、陶瓷等元件的精密超精密加工^[21-22]。随着市场需求的不断发展,对重大关键零件的精密加工提出了更高的要求,因此固结磨料抛光技术也逐步应用于金属材料的研抛加工^[23]。本文基于机器人恒力抛光系统,将加工精度高的固结磨料应用于小工具头抛光技术,提出一种固结磨料小工具头抛光 TC4 钛合金,建立并验证抛光小工具头去除函数理论模型,对不同偏置量下抛光小

工具头的去除函数进行了研究,为自由曲面的确定性去除提供参考依据。

1 抛光小工具头去除函数

1.1 抛光小工具头去除函数理论建模

小工具头抛光技术的特点是需要根据不同抛光工具头的去除函数模型,来设定加工过程中的工艺参数^[24],实现工件表面的材料去除可控。因此,定量抛光工艺的首要步骤是建立准确的抛光小工具头去除函数模型。Preston 方程作为材料去除模型^[25],其合理性已经得到验证,该方程描述了抛光时材料的去除量正比于该接触区域压强与相对线速度,如式(1)所示。

$$R(x, y) = k \cdot P(x, y) \cdot V(x, y) \quad (1)$$

式中: $R(x, y)$ 表示抛光小工具头与被加工表面接触点 (x, y) 在单位时间内的材料去除量; k 表示 Preston 比例系数; $P(x, y)$ 表示点 (x, y) 的瞬时接触压强; $V(x, y)$ 表示点 (x, y) 的瞬时相对速度。

由于抛光小工具头在与工件相互作用时,抛光盘面积、抛光液浓度、酸碱度与温度可以假设为不发生变化。这样通过对式(1)积分可获得式(2)。

$$R(x, y) = k \int_{T(x, y)} P(x, y) \cdot V(x, y) dt \quad (2)$$

对式(2)归一化处理后,可获得抛光小工具头去除函数:

$$Z(x, y) = \frac{1}{T(x, y)} k \int_{T(x, y)} P(x, y) \cdot V(x, y) dt \quad (3)$$

式中: $T(x, y)$ 表示点 (x, y) 的驻留抛光时间。

图1是偏置式抛光小工具头运动示意图,其原理是电动轴带动抛光小工具头以一定偏心距 e 绕旋转中心 O ,以 ω 的角速度作圆周运动,工件上任意一点 P 与 x 轴夹角为 θ 。

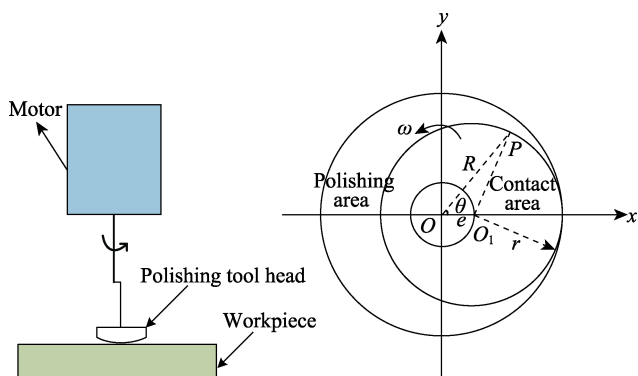


图1 偏置式抛光小工具头运动示意图

Fig.1 Principle map of the offset polishing tool head motion

如图2所示,当抛光小工具头旋转一周,工件上的有效抛光区域由两个区域组成,第一个区域A是以 $(r-e)$ 为半径、 O 点为中心的圆形区域,该区域

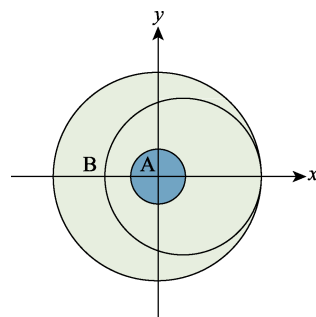


图2 偏置式抛光小工具头有效抛光区域

Fig.2 Effective polishing area of the offset polishing tool head

内工件上的点在抛光小工具头工作时间内始终被覆盖;第二个区域B是以半径在 $(r-e, r+e)$ 范围内的环形,该区域内工件上点与抛光小工具头的相对作用角度为 θ 。根据抛光小工具头的运动特征,得到抛光小工具头与工件接触区域内点 P 的相对角度表达式为:

$$\theta = \begin{cases} \pi & 0 \leq R \leq r-e \\ \arccos\left(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2Re}\right) & r-e \leq R \leq r+e \end{cases} \quad (4)$$

抛光小工具头上任意一点的角速度为一恒量,因此根据式(4)得到偏置式抛光小工具头的去除函数为:

$$Z(R) = \frac{1}{\omega} \begin{cases} \int_{-\pi}^{\pi} kPV d\theta_1 & 0 \leq R \leq r-e \\ \int_{-\theta}^{\theta} kPV d\theta_1 & r-e \leq R \leq r+e \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R = \sqrt{(x-m)^2 + (y-n)^2}$, (m, n) 为抛光小工具头运动形成的圆形轨迹的圆心坐标。

根据赫兹接触理论^[26]可知,抛光小工具头与自由曲面工件接触区域的压强分布为:

$$P(x, y) = \frac{5F}{2\pi ab} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

式中: F 为垂直于抛光轨迹的正压力, a 为接触区域的长轴半径, b 为接触区域的短轴半径。

抛光小工具头与平面工件的接触区域为圆形,接触圆的半径^[27]为:

$$r = \left(\frac{3(d_1 + d_2)R_p F}{4}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

式中: $d_i = \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$ ($i=1, 2$), ν_1 、 ν_2 和 E_1 、 E_2 分别为抛光小工具头和工件的泊松比和弹性模量, R_p 为抛光小工具头的工具半径。

综上,得到点 (x, y) 的瞬时相对压强为:

$$P(x, y) = \frac{5F}{2\pi r^2} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

由图 1 可知, 工具头旋转角速度为 ω , 抛光区域内只有切平面内的速度影响去除函数, 旋转轴与抛光小工具头圆心偏置距离为 e , 根据刚体绕定点转动的运动学知识, 接触面内的点都是绕圆点 O 旋转。抛光小工具头在点 (x, y) 处产生的线速度为:

$$V(x, y) = \omega \cdot R \quad (9)$$

式中: R 为接触面上点到抛光小工具头旋转轴的距离, 由几何关系可知, 当抛光轨迹圆心坐标为 $(-e, 0)$ 时:

$$h(x, y) = \sqrt{(x+e)^2 + y^2} \quad (10)$$

1.2 去除函数数值仿真

式(5)、(8)和(9)采用 Matlab 模拟抛光小工具头加工后的材料去除轮廓, 由于 k 值只影响去除函数的幅值, 为方便比较在不同偏置量情况下的固结磨料抛光小工具头材料去除轮廓特征, 应用归一化方法对仿真材料去除数据进行了处理。球形小工具头抛光工具半径 $R_p=30$ mm, 小工具头抛光工具转速为 500 rad/min, 抛光小工具头对工件的法向作用力 F 为 6 N。

图 3 给出了在 0、1、1.5、2 mm 偏置量时小工具头材料去除率的归一化分布, 单点研磨斑三维形状是关于中心旋转对称的环状峰。如图 4 所示, 在偏置量为 0 时, 抛光小工具头的抛光斑半径 r 为 3 mm, 抛光小工具头在中心虽然受到的压力最大, 但是中心位置的速度为 0, 因此该区域的材料去除量最小; 当增大偏置量时, 抛光小工具头与工件接触的压力峰值点位置避开抛光小工具头线速度为 0 的位置, 材料去除轮廓的峰值开始增大, 材料去除轮廓直径增大, 去除量显著增加; 当偏置量增大至 2 mm 时, 抛光小工具头与工件接触的压力峰值点远离区域 A, 移至半径为 $(r-e, r+e)$ 的环形区域 B 内, 区域 B 内的点在一个工作周期内无法全覆盖, 该点在一个工作周期内的抛光时间减小, 导致去除函数峰值逐渐减小, 去除深度逐渐减小, 但去除函数直径仍在增大。在保持其他工艺参数不变的条件下, 增加抛光小工具头的偏置量, 抛光小工具头去除函数的直径逐渐增大, 最大去除深度先增大、后减小。

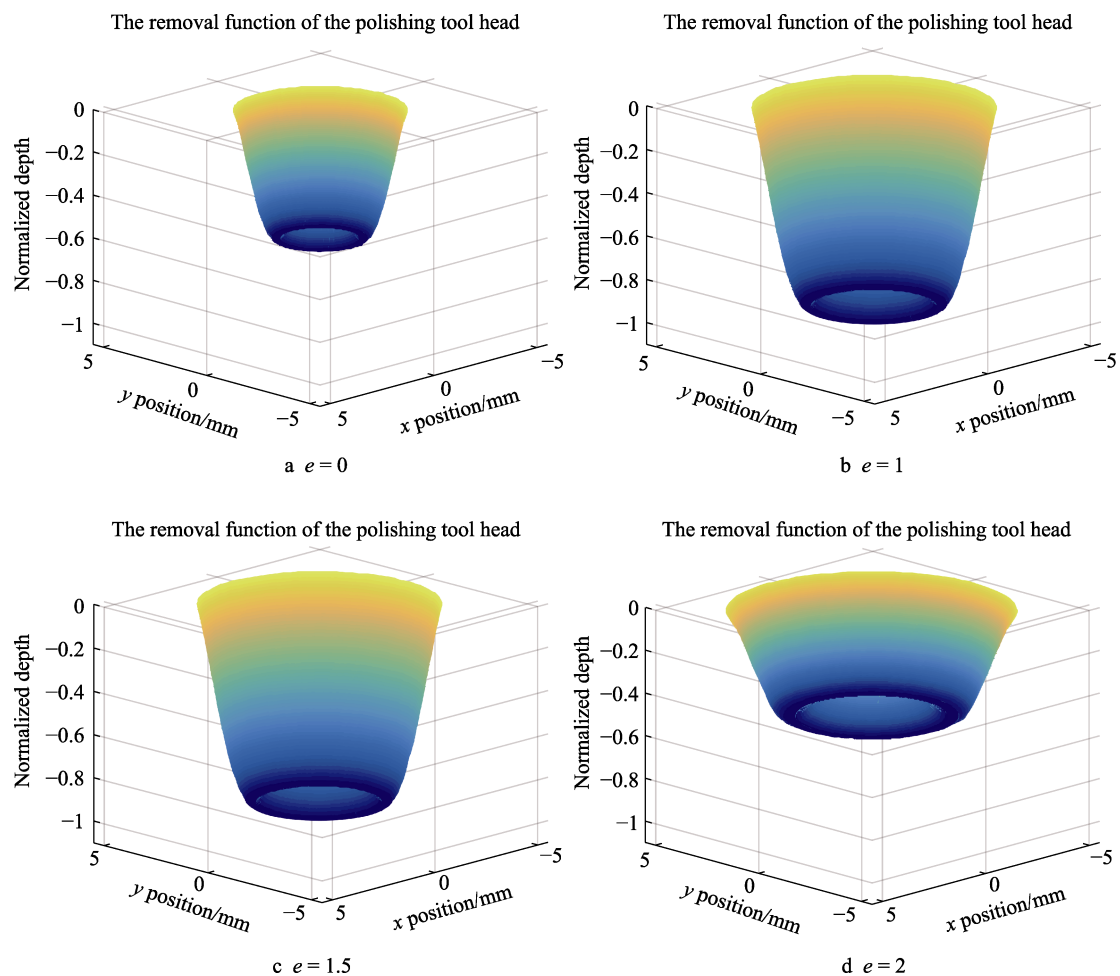


图 3 不同偏置量的抛光小工具头去除函数仿真图

Fig.3 Simulation function of different offset parameters on polishing tool head

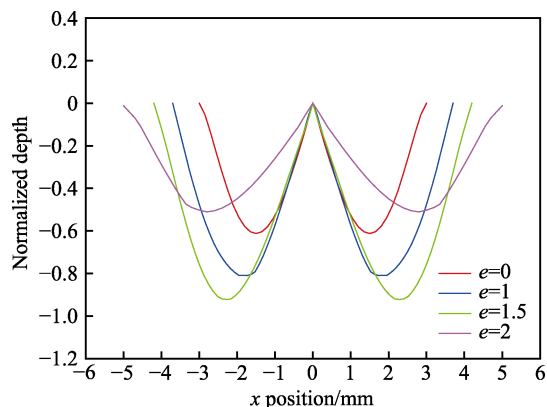


图4 截面轮廓
Fig.4 Sectional profile

2 抛光小工具头去除函数实验验证

2.1 实验设计

为了验证上述结论中抛光小工具头去除函数理论模型以及偏置量对去除函数的影响规律,基于ABB六轴机器人打磨平台,进行抛光小工具头单点抛光实验,平台系统配置六维力传感器,保证抛光过程中压力恒定,图5为实验平台。本实验采用的抛光工具为粒径20~30 μm 的金刚石为磨料制成的聚集体固结磨料抛光小工具头,如图6所示,硅胶弹性层上的魔术

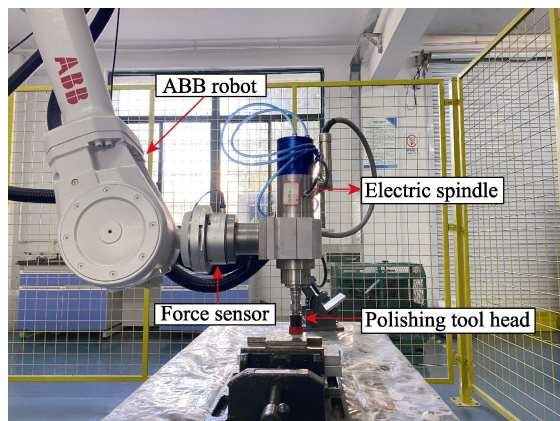


图5 实验平台
Fig.5 Experiment platform



图6 固结磨料小工具头
Fig.6 Fixed abrasive tool head

贴可调节不同的偏置量,抛光时,抛光小工具头通过高精弹性夹头装夹在机器人电主轴上。

实验所用工件为80 mm×80 mm×3 mm的TC4钛合金,在TC4钛合金标记4个位置点,分别采用4种(0、1、1.5、2 mm)偏置量固结磨料小工具头,在各位置点进行定点加工,实验工艺参数如表1所示。

表1 抛光小工具头定点抛光工艺参数

Tab.1 Fixed spot polishing processing parameters of the polishing tool head

Experiment number	Offset/mm	Spindle speed /($\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$)	Polishing force/N
1	0	500	6
2	1	500	6
3	1.5	500	6
4	2	500	6

加工结束后,采用NanoMap500LS三维形貌仪测量抛光小工具头定点抛光后的材料去除深度,扫描长度为1200 μm ,扫描速度为100 $\mu\text{m}/\text{s}$,采样频率为60 point/s。

2.2 结果与分析

图7给出了不同偏置量抛光小工具头去除函数的实验轮廓曲线,为了更好地对比理论和实验去除函数,将实验测得的去除函数轮廓进行滤波处理,并于去除函数仿真轮廓进行归一化比较,结果如图8所示,实验与仿真的去除函数轮廓相似性很高,但仿真得到的去除函数最大深度略大于实验,这主要是由于在抛光过程中,磨粒发生脱落,实际参与去除的有效磨料少于仿真中的数值。另外,由于抛光小工具头去除函数理论模型所用的力分布形式是通过赫兹接触理论进行推导,实际的力分布要进行测量才能获得,随着抛光的进行,抛光小工具头曲率逐渐增大,与工件表面接触状态发生了改变,进而导致力分布情况发生变化,致使实际去除函数轮廓最大去除深度区域较为平坦,存在一定的偏差。综上,虽然理论与实验去除函数不完全重合,但整体来看二者具有较高的相似度,证明了抛光小工具头去除函数理论模型的准确性。

图9为不同偏置量定点抛光后的抛光斑,可见随抛光小工具头的偏置量增大,抛光斑直径增大。抛光后TC4钛合金工件的表面形貌如图10所示,从图中可以看出,每种偏置量的抛光小工具头都有抛光痕迹形成,当偏置量为0时,磨痕深度较浅,材料去除率较小,当偏置量增大至1、1.5 mm时,磨粒产生的磨痕相应增大,材料去除率增加,当继续增大偏置量至2 mm时,一个工作周期内的磨粒划过工件的时间减少,导致磨痕变浅,最大去除深度减小。

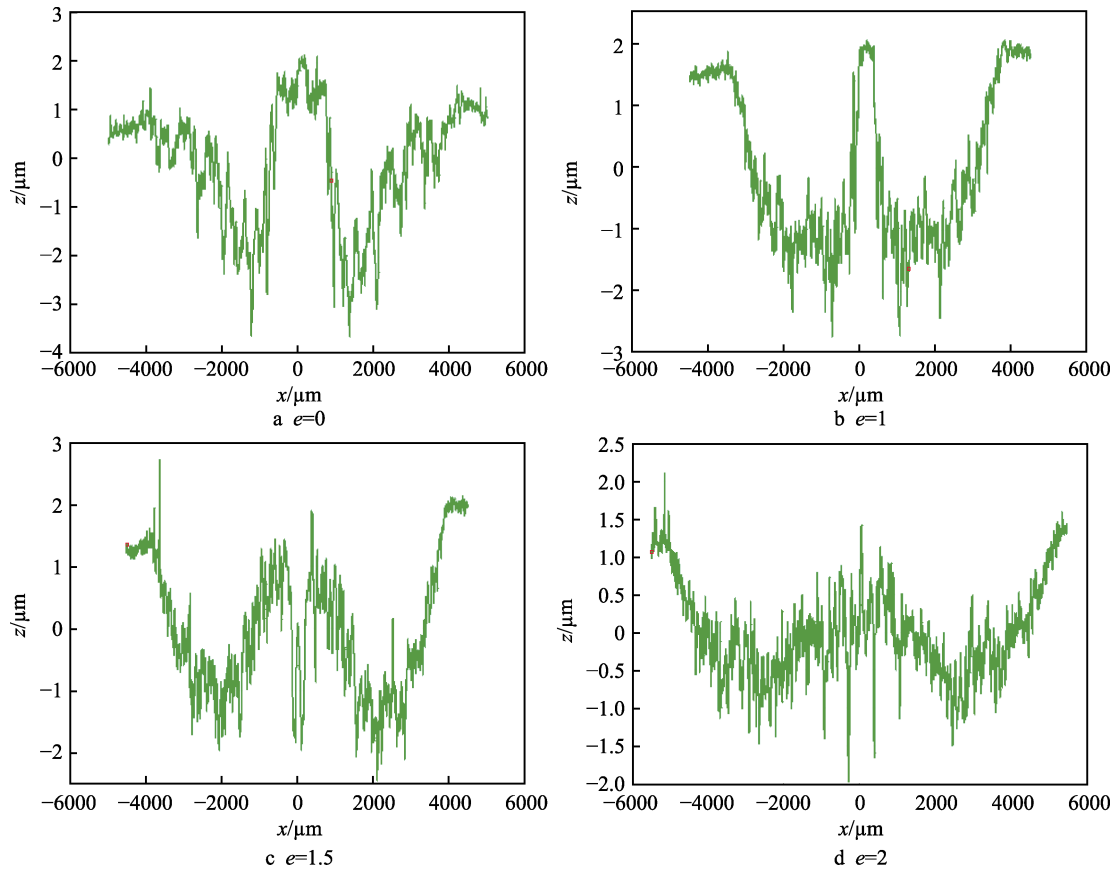


图 7 不同偏置量的去除函数轮廓曲线

Fig.7 The profile curves of removal function with different offset parameters

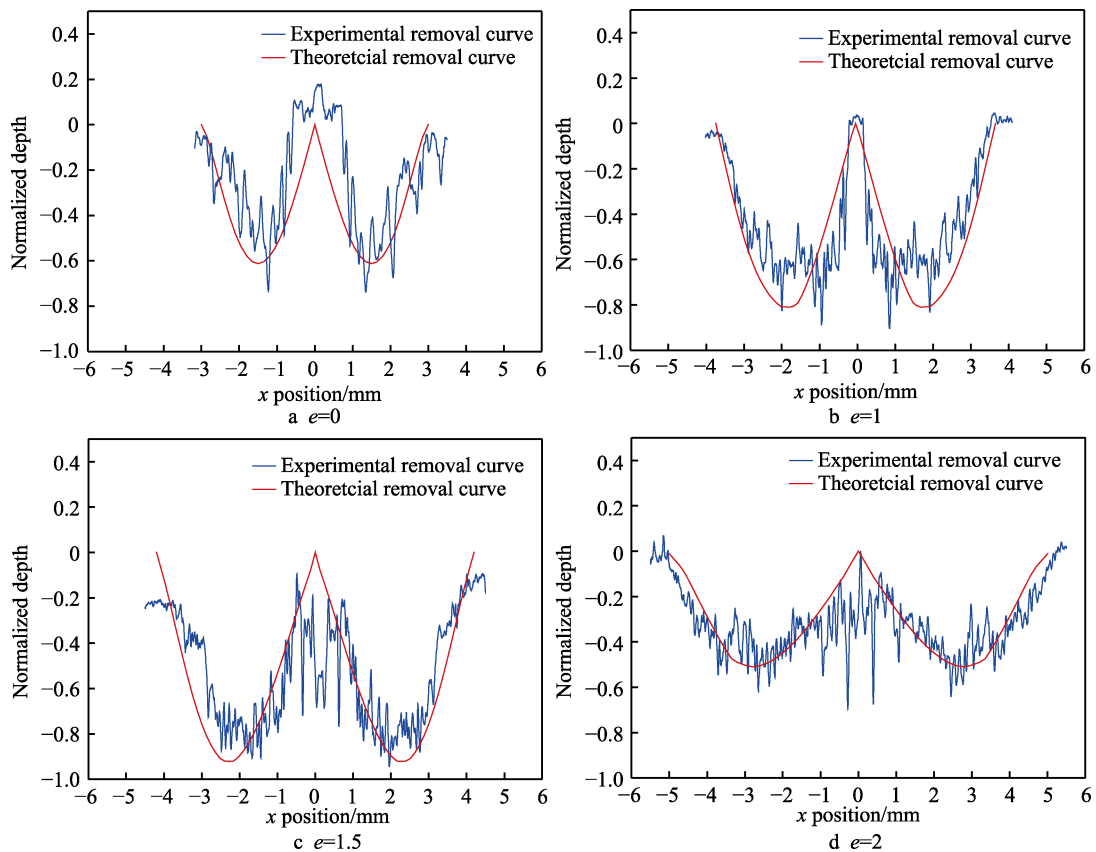


图 8 理论去除函数与实际去除函数轮廓曲线比较

Fig.8 The profile curves comparison of experimental removal function and theoretical removal function

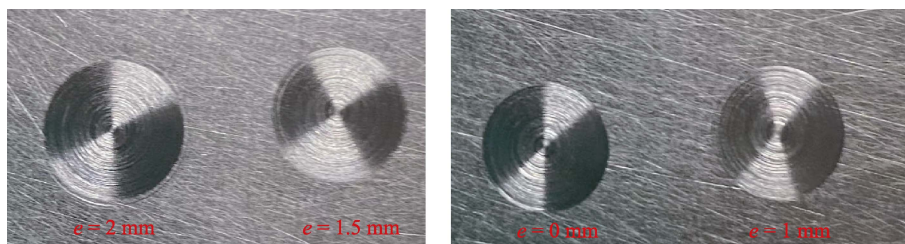


图 9 TC4 钛合金抛光斑点
Fig.9 The polishing spots on the TC4 titanium alloy

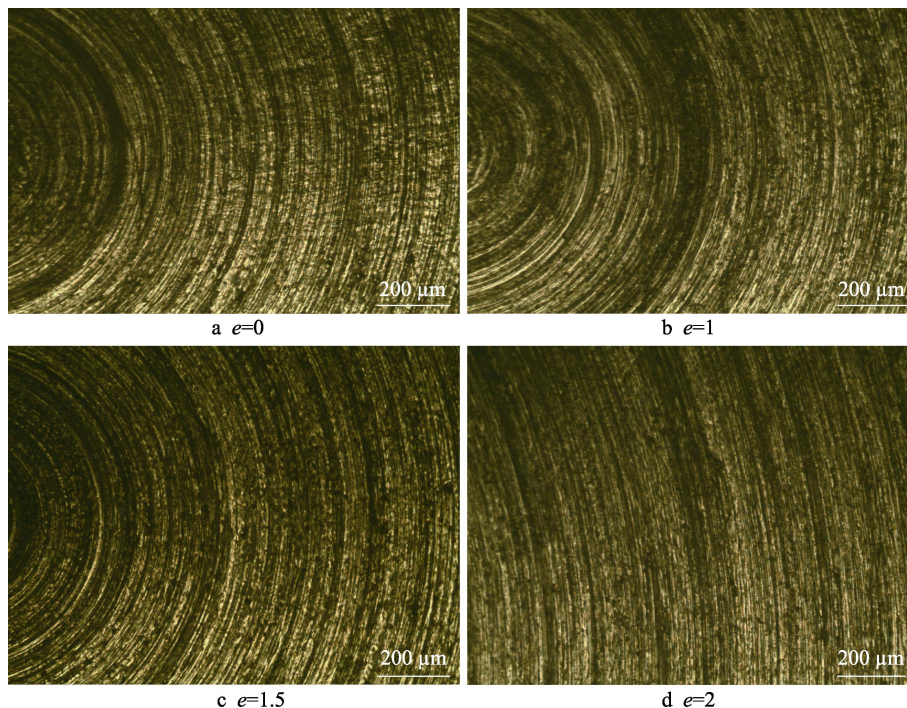


图 10 抛光点表面形貌
Fig.10 Surface morphology of polishing spots

3 抛光小工具头偏置量对工件面形收敛效率的影响

为了探索抛光小工具头偏置量对面形收敛效率的影响规律,对计算机控制成形 (computer controlled optical surfacing) 加工过程中的驻留时间求解程序进行了编写,计算机控制成形技术的原理如图 11 所示,结合抛光小工具头去除函数理论模型,应用仿真软件

对不同偏置量的抛光小工具头加工 TC4 钛合金工件面形进行了研究。

实验选取待加工工件大小为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 设定压力 $F=6\text{ N}$, 小磨头转速 $w_0=400\text{ rad/min}$, 工件表面的面形误差设定为随机分布,如图 12 所示,面形数据均方根 RMS 为 $0.5697\text{ }\mu\text{m}$,面形波峰值与谷值之差 PV 为 $0.9944\text{ }\mu\text{m}$ 。为了保证实验一致性,四次不同偏置量抛光仿真实验的初始面形误差相同,其他工

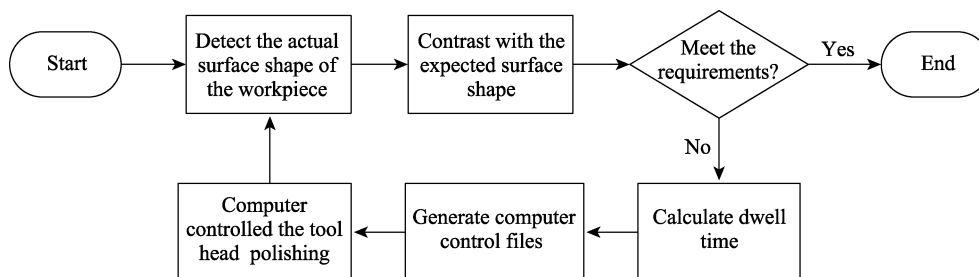


图 11 计算机控制成形技术原理图
Fig.11 The principle chart of CCOS

艺参数也保持不变。

分别采用偏置量为 0、1、1.5、2 mm 的抛光小工具头的去除函数进行仿真实验，图 13 为采用不同偏置量抛光小工具头的去除函数计算所得的残余误差，可以看出，经过不同偏置量抛光小工具头的去除函数加工后的工件面形误差都有所收敛，对比图 13a—d 发现，偏置量为 1、1.5 mm 时，抛光小工具头加工后

的表面高频误差较小，对于面形误差的去除效果更好；当偏置量增大至 2 mm，面形误差增大。

表 2 表示四种去除函数加工工件面形收敛率结果。通过对比发现，在设定相同初始面形误差的条件下，面形误差的去除效果跟抛光小工具头的去除函数有密切关系，随着偏置量增大至 1、1.5 mm，去除函数深度增大，面形误差相对于无偏置量的情况下较小，面形收敛效率更高。当偏置量增加至 2 mm 时，去除函数的最大去除深度减小，因此加工后的工件面形误差增大。实验结果表明，抛光后工件面形误差的大小随偏置量出现波动性变化：偏置量为 1、1.5 mm

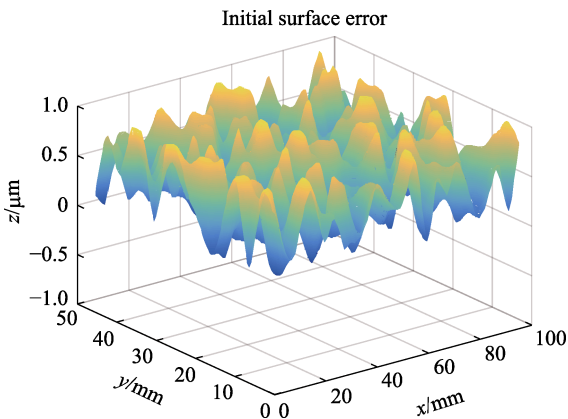


图 12 初始表面面形误差
Fig.12 Initlal surface error

表 2 抛光小工具头加工面形误差 Tab.2 Processing surface error of polishing tool head				
Offset/mm	RMS/μm	PV/μm	RMS convergence efficiency/%	PV convergence efficiency/%
0	0.2589	0.3957	54.56	60.21
1	0.1826	0.3458	67.95	65.23
1.5	0.1491	0.3015	73.83	69.68
2	0.2664	0.4087	53.24	58.90

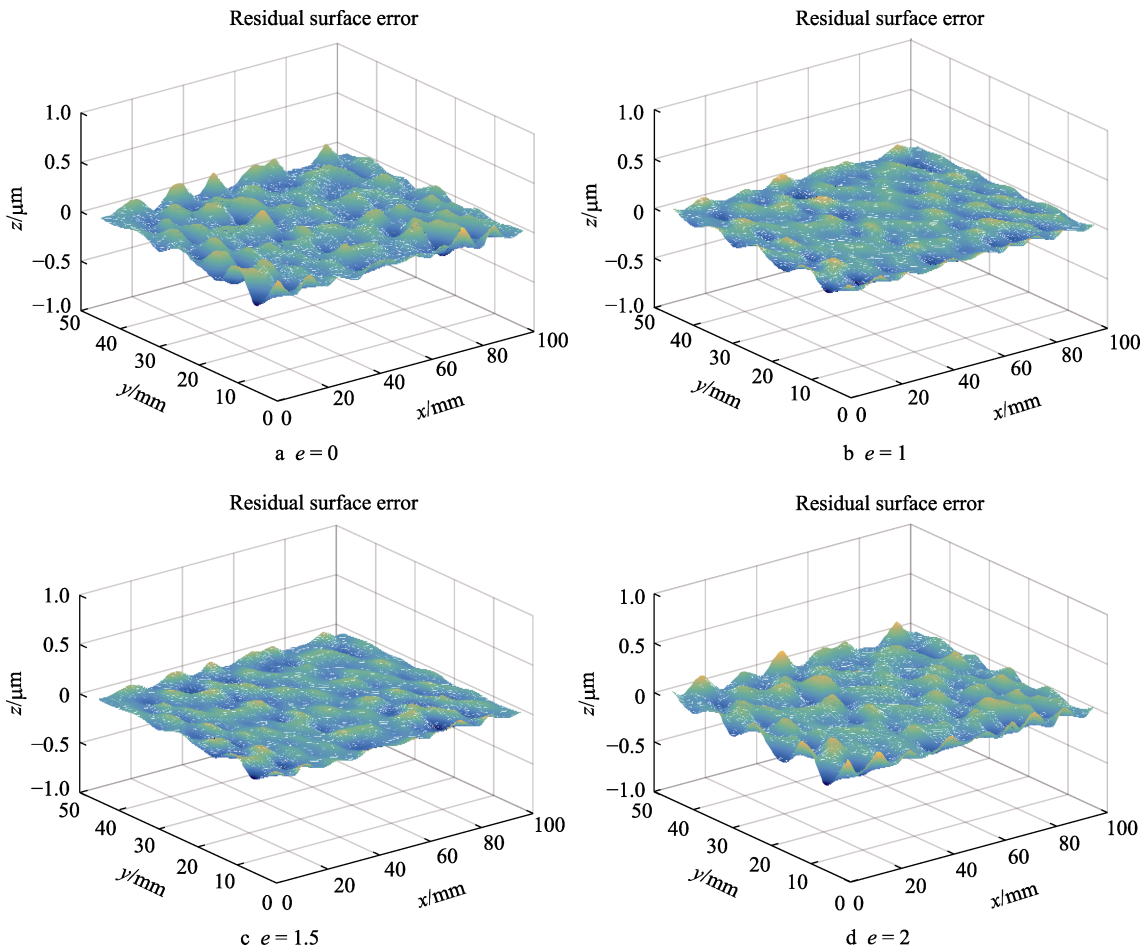


图 13 不同抛光小工具头加工后的表面残余误差
Fig.13 Residual surface error after machining with different polishing tool head

时,抛光小工具头相对于无偏置的抛光小工具头,所得到的残余误差更小,面形收敛效率相对更高,具有比较好的修正误差能力以及材料去除效率,当继续增大偏置量至 2 mm 时,面形误差相对增大,面形收敛效率反而减小。在实际加工中,需选择合适的偏置量来减小面形误差,提高面形收敛效率。

4 结论

1) 基于赫兹接触理论,得到抛光小工具头与工件接触面的压力分布,根据抛光小工具头运动特征,推导出抛光小工具头去除函数的理论模型,并通过实验对理论模型进行了验证,实验结果表明,抛光小工具头理论去除函数曲线与实验曲线二者吻合度较高,证明了抛光小工具头理论去除函数模型的准确性,对自由曲面的确定性抛光工艺具有一定的指导意义。

2) 开展不同偏置量下的固结磨料抛光小工具头定点抛光实验,并将实验抛光斑与理论模拟结果相比较,结果显示,当其他参数保持恒定的情况下,随着偏置量的增大,去除函数的最大去除深度先增加、后减小,去除函数直径逐渐增大。在实际加工中,根据不同的加工需求选择合适的偏置量能够提高材料去除效率,优化加工工艺。

3) 通过虚拟加工实验验证了当增大抛光小工具头的偏置量时,抛光面形误差先减小、后增大,偏置量为 1.5 mm 的抛光小工具头具有最好的修正误差能力,对于面形误差的收敛速度更快,提高了固结磨料小工具头的抛光效率。

参考文献:

- [1] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 119-134.
GUO Dong-ming, SUN Yu-wen, JIA Zhen-yuan. Methods and research progress of high performance manufacturing[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(11): 119-134.
- [2] 丁文锋, 奚欣欣, 占京华, 等. 航空发动机钛材料磨削技术研究现状及展望[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 022763.
DING Wen-feng, XI Xin-xin, ZHAN Jing-hua, et al. Research status and future development of grinding technology of titanium materials for aero-engines[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2019, 40(6): 022763.
- [3] 罗戈山, 邹莱, 黄云, 等. 氧化铝空心球砂带磨削钛合金的材料去除及表面质量研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(19): 2363-2370.
LUO Ge-shan, ZOU Lai, HUANG Yun, et al. Study on material removal and surface quality in titanium alloy grinding with alumina hollow-sphere abrasive belt[J]. China mechanical engineering, 2020, 31(19): 2363-2370.
- [4] 冯宝富, 赵恒华, 蔡光起, 等. 高速单颗磨粒磨削机理的研究[J]. 东北大学学报, 2002, 23(5): 470-473.
FENG Bao-fu, ZHAO Heng-hua, CAI Guang-qi, et al. Study on the single grain high-speed grinding mechanism[J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(5): 470-473.
- [5] 刘浩, 张雷, 冀世军, 等. 叶片难抛光区域粗糙度对压气机性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(8): 8-14.
LIU Hao, ZHANG Lei, JI Shi-jun, et al. Influence of roughness in difficult-to-polished blade region on the performance of compressor[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2015, 42(8): 8-14.
- [6] 段继豪, 史耀耀, 张军锋, 等. 航空发动机叶片柔性抛光技术[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 573-578.
DUAN Ji-hao, SHI Yao-yao, ZHANG Jun-feng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2012, 33(3): 573-578.
- [7] 淮文博, 史耀耀, 蔺小军. 整体叶盘自适应柔性抛光效率优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1550-1557.
HUAI Wen-bo, SHI Yao-yao, LIN Xiao-jun. Optimization of adaptive flexible blisk polishing efficiency[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2021, 27(6): 1550-1557.
- [8] 肖贵坚, 黄云, 伊浩. 面向型面精度一致性的整体叶盘砂带磨削新方法实验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1666-1676.
XIAO Gui-jian, HUANG Yun, YI Hao. Experimental research of new belt grinding method for consistency of blisk profile and surface precision[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2016, 37(5): 1666-1676.
- [9] ZHAO Tao, SHI Yao-yao, LIN Xiao-jun, et al. Surface roughness prediction and parameters optimization in grinding and polishing process for IBR of aero-engine[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, 74(5-8): 653-663.
- [10] 陈志同, 易鹏, 朱正清, 等. 具有误差修正功能的叶片变预压量抛光技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 80-84.
CHEN Zhi-tong, YI Peng, ZHU Zheng-qing, et al. New aero-engine blade polishing technology available to correct machining errors through presetting wheel contact deformation[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2018, 61(17): 80-84.
- [11] XIAO Gui-jian, HUANG Yun. Constant-load adaptive belt polishing of the weak-rigidity blisk blade[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 78(9-12): 1473-1484.
- [12] 张明德, 温钊, 蔡汉水, 等. 叶片机器人砂带自适应磨削方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(4): 81-86.

- ZHANG Ming-de, WEN Zhao, CAI Han-shui, et al. Research on adaptive belt grinding method of blade robot[J]. Journal of Chongqing University of Technology (natural science), 2018, 32(4): 81-86.
- [13] 王振忠, 施晨淳, 张鹏飞, 等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 23-56.
- WANG Zhen-zhong, SHI Chen-chun, ZHANG Peng-fei, et al. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(8): 23-56.
- [14] JONES R A. Optimization of computer controlled polishing[J]. Applied optics, 1977, 16(1): 218-224.
- [15] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- YUAN Ju-long, ZHANG Fei-hu, DAI Yi-fan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [16] 刘振宇, 李龙响, 曾雪峰, 等. 大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 281-287.
- LIU Zhen-yu, LI Long-xiang, ZENG Xue-feng, et al. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation[J]. Optics and precision engineering, 2017, 25(4): 281-287.
- [17] 马付建, 姜天优, 刘宇, 等. 钛合金曲面超声辅助磁性磨料光整加工材料去除规律及去除函数[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 290-299.
- MA Fu-jian, JIANG Tian-you, LIU Yu, et al. Material removal rule and removal function for ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of titanium alloy curved surface[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 290-299.
- [18] 黄智, 周涛, 吴湘, 等. 机器人气囊抛光 SiC 光学元件加工特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 22-29.
- HUANG Zhi, ZHOU Tao, WU Xiang, et al. SiC optical element processing properties under robot bonnet polishing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 22-29.
- [19] 胡德金. 硬脆非球面光学镜精密磨削与自适应控制方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722004.
- HU De-jin. Precision grinding and adaptive control method for hard and brittle aspheric optical mirror[J]. Acta optica sinica, 2016, 36(7): 0722004.
- [20] LI Jun, ZHU Yong-wei, ZUO Dun-wen, et al. Fixed abrasive lapping and polishing of hard brittle materials[J]. Key engineering materials, 2010, 426-427: 589-592.
- [21] FANG Cong-fu, ZHAO Zai-xing, LU Long-yuan, et al. Influence of fixed abrasive configuration on the polishing process of silicon wafers[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 88(1-4): 575-584.
- [22] 朱永伟, 付杰, 居志兰, 等. 材料特性对亲水性固结磨料研磨垫加工性能的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(1): 51-56.
- ZHU Yong-wei, FU Jie, JU Zhi-lan, et al. Influence of material characteristics on machining performance of hydrophilic fixed abrasive pad[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2013, 11(1): 51-56.
- [23] 王健杰. 固结磨料研磨 TC4 钛合金的材料去除机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- WANG Jian-jie. Material removal mechanism of lapping TC4 titanium alloy by fixed abrasive[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [24] 张文彪. 基于计算机控制小磨头抛光的去除函数理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Wen-biao. Theoretical research of the removal function based on the computer controlled polishing technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [25] PRESTON F W. The theory and design of plate glass polishing machine[J]. Journal of the Society of Glass Technology, 1927, 11: 214-256.
- [26] SHIOU F J, CIOU H S. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2008, 48(7-8): 721-732.
- [27] JOHNSON K L. 接触力学[M]. 徐秉业译. 北京: 高等教育出版社, 1992: 485.
- JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. XU Bing-ye translated. Beijing: Higher Education Press, 1992: 485.