

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.11.010

双轴式不定偏心法对提高磁粒研磨轨迹均匀性的研究

马小刚^{1,2*}, 王梓鉴^{1,2}, 李厚乐^{1,2}, 王泽志^{1,2}

(1. 辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 辽宁鞍山 114051; 2. 辽宁省复杂工件表面特种加工重点实验室, 辽宁鞍山 114051)

摘要:为解决TC4钛合金表面研磨不均匀、研磨轨迹重叠与加工效率低的问题,提出1种双轴式不定偏心磁粒研磨法。利用Adams软件模拟单颗磨粒的运动轨迹,采用统计方法计算运动轨迹密度的标准差值,作为平面运动轨迹均匀性的定量评价值。采用单轴式磁粒研磨法、双轴式定心磁粒研磨法和双轴式不定心磁粒研磨法在主轴转速350 r/min,研磨间隙1.5 mm的实验条件下对TC4钛合金平面研磨60 min,通过表面粗糙度、平面度大小和表面形貌来表征工件的表面均匀性。结果表明相同实验条件下采用双轴式不定偏心磁粒研磨法进行表面光整加工,粗糙度 R_a 由3.60 μm 下降到0.21 μm ,最大高度差由41.0 μm 变为6.3 μm ,平面度由0.0297 mm变为0.0072 mm,相比较于其它2种加工方式,双轴式不定偏心磁粒研磨既可以提高研磨效率,又可以使磨粒的运动轨迹密集程度大幅度减小,研磨轨迹更加均匀,有效去除了工件表面缺陷,显著提升表面均匀性。

关键词: 磁粒研磨; 平面研磨; 轨迹均匀性; Adams; 表面粗糙度; 平面度

中图分类号: TG176

文献标识码: A

Research on improving the uniformity of magnetic particle grinding trajectory by double axis indeterminate eccentricity method

Ma Xiaogang^{1,2*}, Wang Zijian^{1,2}, Li Houle^{1,2}, Wang Zezhi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Special Surface Processing for Complex Components, Anshan 114051, China)

Abstract: A biaxial indefinite eccentric magnetic particle grinding method was proposed to solve the problems of uneven surface grinding of TC4 titanium alloy, overlapping grinding tracks and low processing efficiency. The Adams software is used to simulate the movement trajectory of a single abrasive particle, and the standard deviation of the movement trajectory density is calculated by a statistical method as a quantitative evaluation value of the uniformity of the plane movement trajectory. TC4 titanium alloy plane grinding was ground for 60 min under the experimental conditions of spindle speed of 350 r/min and grinding gap of 1.5 mm by uniaxial magnetic particle grinding method, biaxial fixed eccentric magnetic particle grinding method and biaxial indefinite eccentric magnetic particle grinding method, and the surface uniformity of the workpiece was characterized by surface roughness, flatness size and surface morphology. The results show that under the same experimental conditions, the surface photofinishing method is carried out by the biaxial indefinite eccentric method, the roughness

收稿日期: 2024-05-23

修回日期: 2024-06-08

作者简介: 马小刚(1988—),男,博士研究生,副教授,从事精密加工与特种加工方面的研究, email: mxg_fy@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)

decreases from 3.60 μm to 0.21 μm , the maximum height difference changes from 41.0 μm to 6.3 μm , and the flatness changes from 0.0297 mm to 0.0072 mm. Compared to the other methods, the biaxial indefinite eccentric method can not only improve the grinding efficiency, but also greatly reduce the density of the trajectory of the abrasive particles, the grinding trajectory is more uniform, the surface defects are effectively removed, and the surface uniformity is significantly improved.

Keywords: magnetic particle finishing; plane grinding; trajectory uniformity; Adams; surface roughness; flatness

钛合金具有强度高、密度小、耐高温、耐腐蚀等优异性能,广泛应用于国防工业、医疗设备等重要领域^[1-3]。在上述领域的实际加工过程中,钛合金在传统铣削时受到过高的温度和压力会使零件表面受热不均匀和产生弹塑性变形,导致钛合金材料表面发生硬化,使零件表面产生裂纹且进一步扩大,综合因素影响钛合金的残余应力,降低钛合金的使用寿命和耐磨性^[4-6]。因此,对钛合金表面的光整加工是急需解决的问题。

磁粒研磨是1种通过磁场控制磁性磨粒对工件进行磨削加工的技术。这种加工方法结合了磁力和磨粒2种原理,可以实现高效、精密和非接触式的加工过程。磁粒研磨法作为1种精密光整加工方法,与传统的光整加工方法相比具有自适应性、自锐性和柔性加工等特点^[7-8],在其研磨过程中磁性磨粒与工件的相对运动轨迹,对研磨后工件的表面质量有重要的影响^[9-10]。在金属表面的精密光整加工中,研磨轨迹单一且不均匀^[11-12]、区域轨迹密集程度高^[13-15]、磨粒翻滚更替效率低^[16]等都是目前需要解决的问题。针对上述技术难题,国内外学者做出了大量的研究^[17-19]。朱子俊等^[20]在TC4钛合金平面光整加工的过程中采用超声来辅助磁粒研磨,从而在磨粒的法向方向上加入高频振动,增加单位时间内磨粒的去除量,提高加工效率。但是超声辅助磁粒研磨技术无法改善工件表面的研磨轨迹分布,研磨轨迹单一,轨迹均匀性没有明显提升。焦安源等^[21-22]在现有磁粒研磨工艺基础上为磁力刷附加公转运动,提高了研磨后工件表面的均匀性,但研磨轨迹密集程度较高,且中心区域存在明显的轨迹密集现象。

为了解决钛合金表面精密光整加工过程中遇到的研磨轨迹分布不均匀、轨迹密集程度高等问题,以TC4钛合金平面为研究对象,在现有的磁粒研磨研

究的基础上,利用开槽磁极提高磨粒的翻滚和更替效率,采用双轴式磁粒研磨法对TC4钛合金表面进行光整加工,以此来改善TC4钛合金表面的研磨轨迹均匀性,降低区域轨迹密集程度,并对磨粒运动轨迹进行模拟仿真分析,采用统计方法计算运动轨迹密度的标准差值。通过试验验证模拟仿真结果,最后对试验结果进行理论分析,进而确定双轴式磁粒研磨法对TC4钛合金表面均匀性提高的可行性。

1 加工机理

1.1 运动方式示意

磁极与工件的相对运动是由磁极和工件各自的运动合成的。以工件轴心 O_2 为圆心, O_2 和磁极旋转中心 O_1 的连线为 x 轴,建立直角坐标系。图1是单轴式直线运动、双轴式定偏心运动、双轴式不定偏心运动,3种运动方式的平面研磨运动示意图。图1(a)为单轴式直线运动模型,磁极以 ω_p 的角速度做逆时针旋转运动,工件以速率 v 沿 x 方向 y 方向做直线式往复运动。图1(b)为双轴式定偏心运动模型,磁极和工件分别以 ω_p 、 ω_w 的角速度做逆时针旋转运动,且磁极与工件偏心距 e 保持不变。图1(c)为双轴式不定偏心运动模型,磁极与工件分别以 ω_p 、 ω_w 的角速度做逆时针旋转运动,且工件随工作台做往复直线运动,工件与磁极的偏心距 e 时刻变化。

1.2 基于Adams模拟分析平面研磨均匀性

为了提高磁场强度的梯度变化,使磨粒更容易翻滚和更替,更显著的提高工件的表面均匀性,采用直径30 mm的轴向圆柱矩形开槽磁极进行光整加工^[23-25]。工件选取为直径60 mm的圆形钛合金平面。将单轴式直线运动、双轴式定偏心运动、双轴式不定偏心运动进行对比,来达到均匀的加工效果,其中单轴式直线运动依次施加 x 方向和 y 方向30 mm的往复运动,最终形成正四边形轨迹实现工件全部

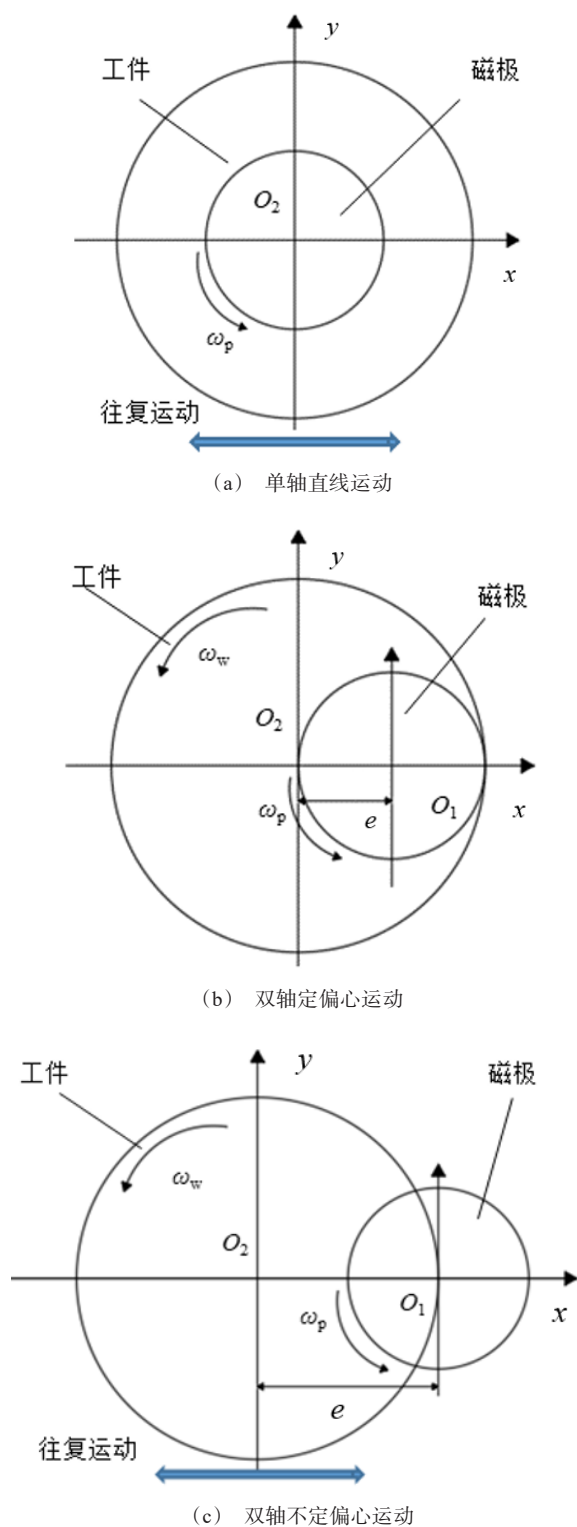


图1 平面研磨运动示意图

Fig.1 Schematic diagrams of plane grinding movement

表面的加工;双轴式定偏心运动的偏心距 $e=15\text{ mm}$, 转速比 $k(\omega_p/\omega_w)=16$;双轴式不定偏心运动的转速比

$k(\omega_p/\omega_w)=16$, 对工件施加 x 方向 15 mm 的往复运动。往复运动频数(工件旋转一圈往复运动的次数)都为 8。磁性磨粒吸附在磁极端面上,随磁极做旋转运动,外圈磨粒的线速度远大于内圈,以外圈处的单颗磨粒为例研究其运动轨迹,利用 Adams 进行模拟仿真,仿真步数为 2000,时间为 1 s 。

在研磨轨迹均匀性评价过程中,工件表面的区域划分对评价结果的准确性有很大的影响。由于工件为直径 60 mm 圆形钛合金板,所以采用极坐标形式对工件表面进行区域划分。当采样点数固定不变时,区域密度的增加会使标准差增大,计算量也会成倍的增加,但区域密度太小又会影响结果的准确性。在保证评价结果准确性的前提下应尽可能的减少区域密度,所以采用极坐标的形式,将 TC4 钛合金工件表面划分为 100 块区域。先将圆形平面沿圆周方向均分为 20 份,再沿半径方向均分为 5 份,圆形平面总共被分为 100 份。由于圆形平面内的研磨轨迹点分布均匀且密集,为减少后期计算量,方便统计每一区域内的研磨轨迹点密度 x_i ,选择四分之一的区域由内及外将各区域从 1~25 进行标号(如图 2 所示)。先采用统计方法得出 1~25 号研磨区域的轨迹密度 x_i ,再以此计算得出标准差值 S 。标准差 S 的大小能说明一组数据的波动幅度和离散程度,通过 S 的大小可以定量评价平面研磨轨迹均匀性。标准差 S 越小,数据波动幅度和离散程度越小,研磨轨迹的均匀性越好。

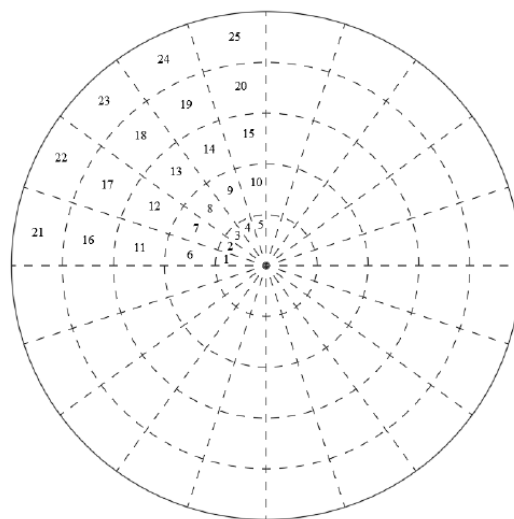


图2 工件网格区域划分图

Fig.2 Mesh area map of part

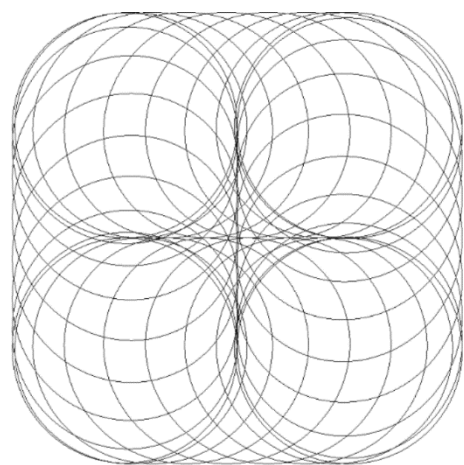
以区域内研磨轨迹点的密度 x_i 来计算标准差值 S 的研磨轨迹的均匀性标准差计算公式为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

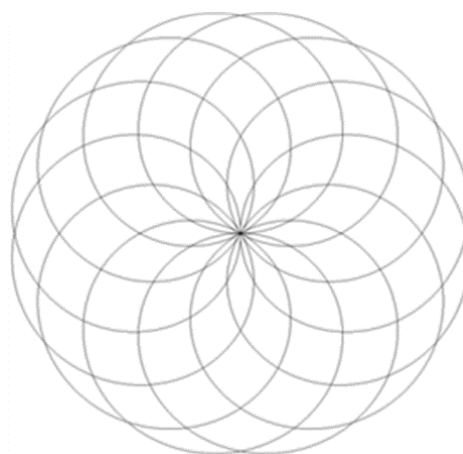
其中 \bar{x} 为所有区域内轨迹点密度的平均值。

对单轴式直线运动、双轴式定偏心运动、双轴式不定偏心运动形成的研磨轨迹进行均匀性评价分析。磨料由大量单颗磁性颗粒在磁场力的作用下形成磁力刷,磁力刷对工件表面产生相对运动从而达到去除材料的目的。本文研究的研磨轨迹是以单颗

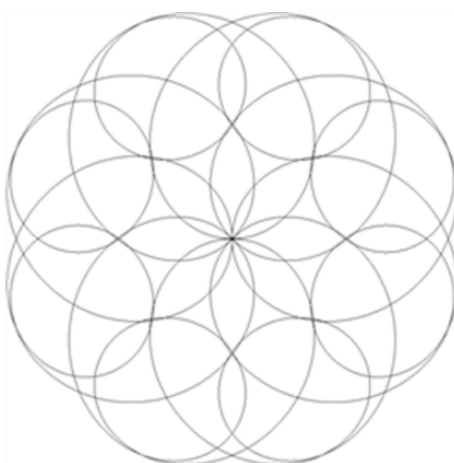
磨粒为研究对象,对其光整加工过程中的运动轨迹进行模拟,磁力刷与单颗磁性颗粒的运动轨迹相似,由点及面,单颗磁性磨粒的运动轨迹可视为磁力刷作用时的研磨轨迹。根据图3(a)看出,单轴式直线运动的轨迹密集程度比较大,中间区域存在明显的轨迹密集现象。根据3(b)看出,双轴式定偏心运动轨迹密集程度大幅度减小,轨迹分布比较均匀,只有中心小部分区域呈现轨迹密集现象。根据图3(c)看出,与双轴式定偏心运动相比,双轴式不定偏心运动的轨迹密集程度更小,轨迹均匀性更好,且中心区域无明显的轨迹密集现象。



(a) 单轴直线研磨轨迹



(b) 双轴定偏心研磨轨迹



(c) 双轴不定偏心研磨轨迹

图3 研磨轨迹图

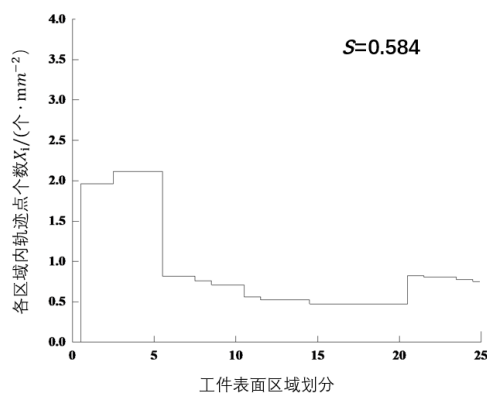
Fig.3 Diagram of grinding track

对比图4(a)、图4(b)、图4(c)可以看出,3种运动方式得到的均匀性计算结果有较大差异,与单轴

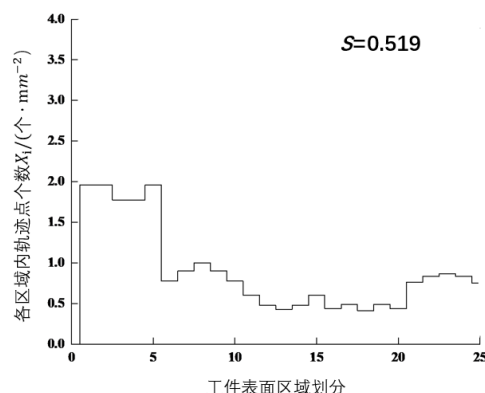
式直线运动、双轴式定偏心运动相比,双轴式不定偏心运动的研磨轨迹密度 x_i 明显更小更均匀,有效地

改善了轨迹密集程度大和中心区域轨迹密集的现象。通过标准差计算公式计算出单轴式直线运动、双轴式定偏心运动、双轴式不定偏心运动的标准差分别为 0.584、0.519、0.248, 双轴式不定偏心运动的标准差远小于其它两种运动方式的标准差值。由此

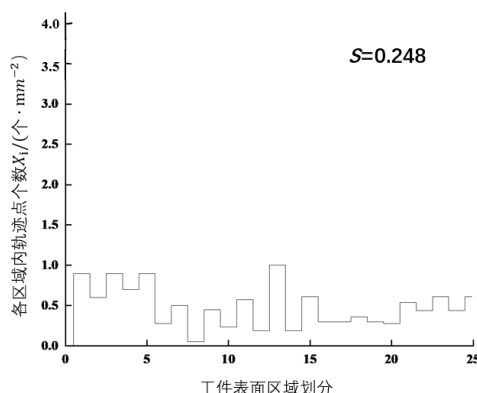
可以得出, 双轴式不定偏心运动的研磨轨迹均匀性, 明显好于其它 2 种运动方式的研磨轨迹均匀性, 更有利于提高工件的面形精度, 保证平面研磨的表面均匀性。



(a) 单轴直线均匀性阶梯图



(b) 双轴定偏心均匀性阶梯图



(c) 双轴不定偏心均匀性阶梯图

图 4 均匀性阶梯图

Fig.4 Diagram of uniformity ladder

2 试验装置和条件

试验装置如图 5 所示, 矩形开槽磁极装夹在铣床主轴上, TC4 钛合金工件夹持在移动旋转滑台上, 移动旋转滑台则固定在铣床工作台上, 其中计算机控制滑轨移动速度, 控制器控制滑轨的运动方式, 通过计算机和控制器控制滑轨带动滑台做旋转运动和往复移动, 通过调整工作台的高度来对磁极与工件的相对位置进行调整。

移动旋转滑台的编程程序如表 1 所示, 矩形开槽磁极位于 TC4 钛合金工件的二分之一处, 以矩形

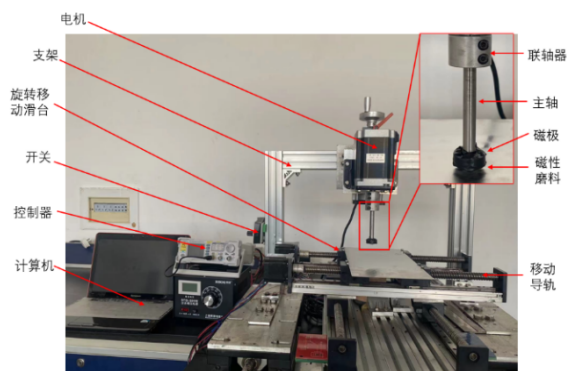


图 5 磁粒研磨试验装置

Fig.5 Test device of magnetic abrasive finishing

开槽磁极外缘与工件直径相切处为编程原点。

表1 编程程序

Tab.1 Programming program

行号	程序指令	标号	移动距离 D/mm	转速 $Z/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	平移速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	设定坐标	0	0	—	—
2	绝对运动	1	15	22	88
3	绝对运动	2	0	22	88
4	绝对跳转	3	1	—	—
5	结束	4	—	—	—

试验条件如表2所示,采用矩形开槽磁极进行试验,选用的磁性磨粒为Fe(铁磁相)与 Al_2O_3 (研磨相)按2:1混合烧结而成^[26]。分别研究单轴式直线磁粒研磨、双轴式定偏心磁粒研磨、双轴式不定偏心磁粒研磨的工作情况。将TC4钛合金工件用超声波清洗机清洗,使用精密电子分析天平测量研磨去除量;使用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪测量工件表面粗糙度值;使用VHX-500F超景深3D电子显微镜观测表面形貌;使用三坐标测量仪测量工件表面平面。

每次采集试验数据前均利用无水乙醇超声清洗工件,并利用热风吹干工件表面。粗糙度和表面形貌检测区域如图6所示,在工件表面取A、B、C三处来检测表面粗糙度,其中B点还用于试验的表面微观形貌检测,试验中列出的表面粗糙度值均为A、B、C三点的平均值。采用三坐标测量仪测量研磨前后的平面度来表征研磨表面均匀性,数据采集点分布同样如图6所示,为保证有足够的数据采集点生成平面度的同时,尽量减少工作量,在工件表面采集5个数据点。

表2 试验条件

Tab.2 Experimental conditions

工艺参数	试验参数
工件尺寸	TC4: $\varnothing 60\text{ mm}\times 3\text{ mm}$
磁极尺寸	NdFeB: $30\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ (矩形开槽)
主轴转速	$350\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$
研磨间隙	1.5 mm
滑台转速	$22\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$
研磨时间	60 min

3 结果与分析

3.1 表面粗糙度和材料去除量分析

图7为在3种不同运动方式下研磨60 min,工件

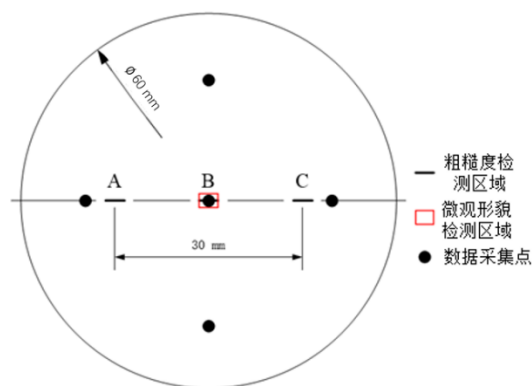


图6 工件表面检测区域

Fig.6 Surface detection area of workpiece

表面粗糙度和材料去除量变化图。可以看出3种加工方式造成的粗糙度和材料去除量变化有相同的规律,研磨前30 min材料去除量大,粗糙度快速下降,研磨30 min后变化速度放缓。这是因为磁粒研磨刚开始时,工件表面粗糙度大,表面的微小凸起和沟槽很多,材料易于去除,且磨粒没有被磨损,磨削性能好。加工一段时间后,工件表面粗糙度下降,材料去除难度增加,磨粒经过磨损磨削性能有所下降,故而材料去除量减小,粗糙度下降速度变缓。

由图7(a)可以看:单轴式直线运动磁粒研磨,表面粗糙度变化缓慢,研磨 $t = 60\text{ min}$ 后表面粗糙度 R_a 由 $3.60\text{ }\mu\text{m}$ 下降至 $1.38\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度改善率($\Delta R_a\%$)为61.67%。双轴式定偏心运动磁粒研磨,研磨 $t = 45\text{ min}$ 时,表面粗糙度 R_a 至 $0.42\text{ }\mu\text{m}$,研磨 $t = 60\text{ min}$ 时,表面粗糙度 R_a 上升至 $0.47\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度改善率 $\Delta R_a\%$ 为86.94%。双轴式定偏心运动磁粒研磨使磁性磨粒与工件在单位时间内的划擦次数增大,促进了磁性磨粒的自锐性,加快了表面粗糙度和材料去除量变化,但工件与磁极轴线方向为固定偏心,长时间加工会使工件在磁极轴线位置上留下较深的研磨轨迹,造成粗糙度上升。双轴式不定偏

心运动磁粒研磨加工 $t=60\text{ min}$ 后,工件表面粗糙度 R_a 由 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 下降至 $0.21\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度改善率 $\Delta R_a\%$ 为 94.17% 。

由图 7(b)可知,相同研磨时间 t 内双轴式不定偏心磁粒研磨去除量最大。双轴式不定偏心运动磁粒研磨使工件做旋转运动和往复直线运动,磁性磨粒做旋转运动,磁性磨粒与工件在单位时间内的研磨面积和划擦次数进一步增大,材料去除量变化更快,且使研磨加工轨迹彼此交织,避免形成单一加工

纹理,工件表面更加均匀。经过 60 min 磁粒研磨,单轴式直线运动磁粒研磨材料去除量为 39 mg ,双轴式定偏心运动磁粒研磨材料去除量为 50 mg ,双轴式不定偏心磁粒研磨材料去除量为 58 mg 。

比较 3 种不同运动方式下的磁粒研磨加工结果,采用双轴式不定偏心磁力研磨加工后的 TC4 偶然肉钛合金工件研磨轨迹均匀性最好,研磨效率最高。

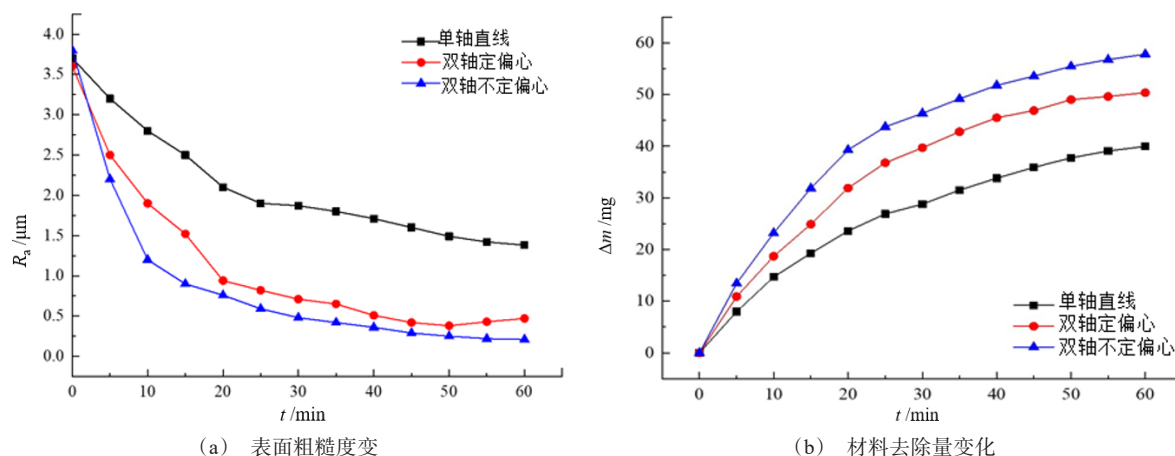


图 7 表面粗糙度和材料去除量变化图

Fig.7 Surface roughness and material removal change graph

3.2 研磨轨迹和表面形貌分析

TC4 钛合金工件的原始表面形貌与 3 种不同方式加工后的表面形貌如图 8 所示。

由图 8(a)可以看出,原始表面凹凸不平且带有裂纹,均匀性较差,最大高度差为 $41.0\text{ }\mu\text{m}$ 。由图 8(b)可以看出,单轴式直线磁粒研磨时,工件表面的研磨轨迹重复性高,密集程度大且分布不均匀,影响工件表面形貌和均匀性,最大高度差为 $15.2\text{ }\mu\text{m}$ 。由图 8(c)可以看出,双轴式定偏心磁粒研磨时,可以将原始表面大部分缺陷去除,研磨轨迹密集程度大幅度减小,但由于磁极与工件为固定偏心,使得工件圆心处表面研磨轨迹重复性高,研磨纹理易深化,造成过度磨损,影响工件的研磨均匀性,最大高度差 $10.2\text{ }\mu\text{m}$ 。双轴式不定偏心磁粒研磨时,工件同时做旋转和往复直线运动,磁性磨粒随磁极旋转,磁性磨粒更均匀的划擦工件表面,使得研磨轨迹复杂化,轨迹密集程度更小,由图 8(d)可以看出,双轴式不定偏心磁粒研磨轨迹均匀性更好,无明显的

轨迹密集现象,工件的研磨均匀性有显著提升,最大高度差为 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 。通过分析可以看出,双轴式不定偏心运动的研磨轨迹密集程度更小,研磨轨迹均匀性明显更好,并且没有明显的轨迹密集现象,更有利于提高工件的面形精度,保证钛合金工件平面研磨的轨迹均匀性。

平面度测量结果如表 3 所示。其中 NOMINAL 表示理想的平坦度目标或标准, $+TOL$ 表示最大正偏差, MEAS 表示实际测量值, DEV 表示偏差, OUTTOL 表示超出公差范围,用来表征平面度。工件原始表面凹凸不平且带有裂纹,表面均匀性较差,平面度为 0.0297 mm 。单轴式直线磁粒研磨后,工件的表面缺陷得到有效的去除,表面均匀性得到的明显改善,但研磨轨迹密集程度高且分布不均匀的现象,仍制约着表面均匀性的进一步提高,平面度值为 0.0159 mm 。双轴式定偏心磁粒研磨后,原始表面缺陷得到有效去除的同时,研磨轨迹密集程度大幅减小,但工件圆心处仍由于轨迹重复性高,造成过

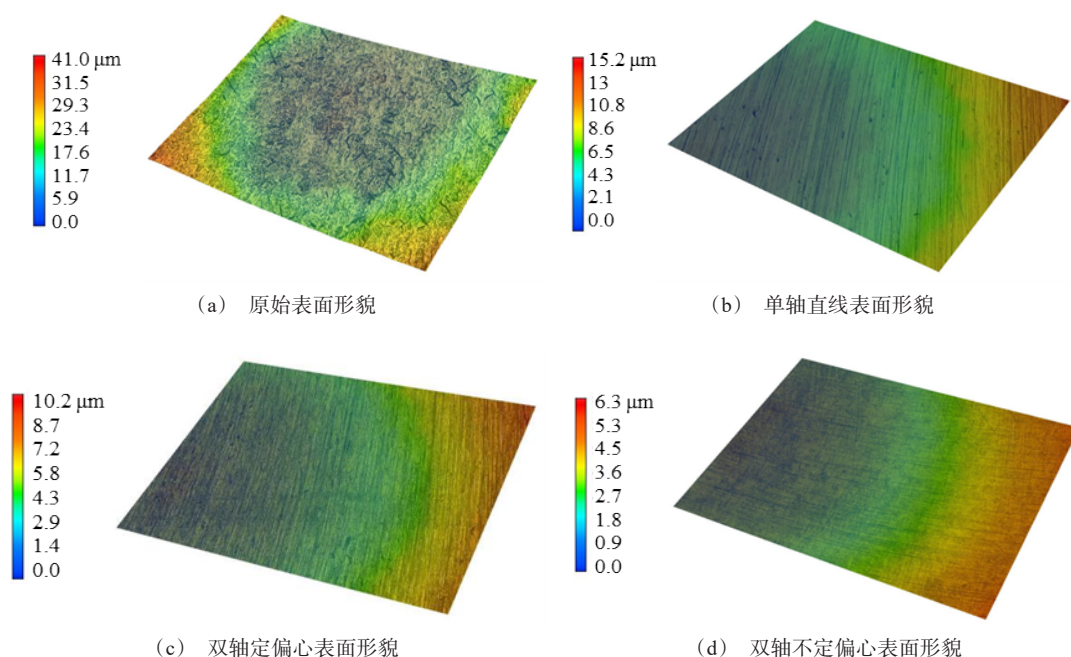


图8 不同研磨轨迹的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of different grinding tracks

度磨损,影响工件的表面均匀性,平面度值达到了0.0119 mm。双轴式不定偏心磁粒研磨后,研磨轨迹复杂化,轨迹密集程度更小,工件圆心处轨迹密集造成的过度磨损得到有效去除,平面度值达到了0.0072 mm。通过分析可以看出,双轴式不定偏心磁力研磨不仅能更有效地去除TC4工件的表面缺陷,而且增加了研磨轨迹复杂化程度,避免轨迹密集造成过度磨损,提高了工件表面均匀性。

表3 表面平整度

Tab.3 Surface Roughness

加工方式	NOMINAL	+TOL	MEAS	DEV	OUTTOL
原始表面/mm	0.0000	0.1000	0.0297	0.0297	0.0000
单轴直线/mm	0.0000	0.1000	0.0159	0.0159	0.0000
双轴定偏心/mm	0.0000	0.1000	0.0119	0.0119	0.0000
双轴不定偏心/mm	0.0000	0.1000	0.0072	0.0072	0.0000

4 结论

(1)对比3种研磨方式外圈单颗磁粒运动轨迹的Adams模拟仿真结果,双轴式不定偏心磁粒研磨轨迹密集程度最小,研磨轨迹复杂程度最高,可以避免形成单一的加工纹理;中心区域没有明显的轨迹密集现象,有效避免了过度磨损;表面均匀性最好,

轨迹均匀性标准差值最小可达0.248。

(2)通过实验验证了理论与仿真结果的可靠性。采用双轴式不定偏心磁粒研磨加工60 min后,粗糙度 R_a 由3.60 μm 下降到0.21 μm ,表面粗糙度改善率最高达到94.17%,最大高度差由41.0 μm 变为6.3 μm ,平面度由0.0297 mm变为0.0072 mm。相较于单轴式直线磁力研磨和双轴式定偏心磁力研磨,双轴式不定偏心磁粒研磨既提高了研磨效率,又大幅降低了研磨轨迹的密集程度,使研磨轨迹更加均匀,有效去除了工件表面缺陷,显著提升了工件表面均匀性。

参考文献

- [1] 李秀红,李文辉,王程伟,等. TC4钛合金滚磨光整加工的表面完整性与抗疲劳性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 15-25.
- [2] 吕春兰. 离心研磨加工钛合金表面粗糙度的试验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 213-217.
- [3] 王筱冬,张娇. 研磨光整处理Ti-6Al-4V钛合金表面组织及疲劳性能[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 30-31, 49.
- [4] 沈雪红,张定华,姚倡锋,等. 钛合金切削加工表面完整性形成机制研究进展[J]. 航空材料学报, 2021, 41(4):

- 1-16.
- [5] 王荣华, 汪振华. TC4 钛合金铣削力及表面粗糙度分析[J]. 工具技术, 2021, 55(5): 30-33.
- [6] Yamaguchi H, Srivastava A K, Tan M, Hashimoto. Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 311-314.
- [7] 刘文浩, 陈燕, 李文龙, 等. 磁粒研磨加工技术的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 47-61.
- [8] 陈燕, 张广彬, 韩冰, 等. 磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 131-137.
- [9] 姬孟托, 洪滔, 文东辉, 等. 无理数转速比下的平面研磨轨迹均匀性研究[J]. 机电工程, 2016, 33(5): 532-536.
- [10] Yao W, Yuan J L, Zhou F F, et al. Trajectory analysis and experiments of both-sides cylindrical lapping in eccentric rotation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 9-12.
- [11] Zhao D W, Wang T Q, He Y Y, et al. Kinematic optimization for chemical mechanical polishing based on statistical analysis of particle trajectories[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2013, 26(4): 556-563.
- [12] Zhao D W, He Y Y, Wang T Q, et al. Effect of kinematic parameters and their coupling relationships on global uniformity of chemical-mechanical polishing[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2012, 25(3): 502-510.
- [13] 焦安源, 邹艳华. 平面磁力研磨轨迹的研究与分析[J]. 制造技术与机床, 2011(10): 90-93.
- [14] 刘清, 张广鹏, 高智学, 等. X-Y 平面联动的平面研磨轨迹分析与研磨实验[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6): 903-909.
- [15] 杨晓京, 李明. 平面光学元件研磨抛光磨粒运动轨迹研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 355-360.
- [16] 叶恒宇, 梁存真, 覃寿同. 磁极开槽情况对磁力研磨的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 101-103, 107.
- [17] 郭龙文, 杨能阁, 陈燕. 磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 10-14.
- [18] Jiang T Y, Ma F J, Liu X, et al. Technological rule of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of titanium alloy[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 616: 012018.
- [19] 赵文宏, 周兆忠, 文东辉, 等. 定偏心和不定偏心平面研磨均匀性的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006(3): 46-49.
- [20] 周兆忠, 郑家锦, 袁巨龙. 定偏心平面研磨均匀性研究[J]. 现代制造工程, 2005(5): 14-16.
- [21] 朱子俊, 韩冰, 李奎, 等. 超声辅助磁粒研磨 TC4 平面的光整试验研究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(10): 6-11.
- [22] 焦安源, 全洪军, 邹艳华. 平面研磨中磁粒刷运动轨迹规划的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2015(10): 84-87.
- [23] 王杰, 陈燕, 吕旖旎, 等. 开槽仿形磁极在轴承内圈滚道光整中的应用[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(5): 32-37.
- [24] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形状对磁粒研磨工艺影响的数值分析[J]. 现代制造工程, 2003(10): 10-12.
- [25] 陈燕, 张耀明, 邓超, 等. V 形磁铁在 SUS304 管内表面抛光中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 187-191.
- [26] 陈燕, 张旭. 铁基白刚玉磁性磨料的制备工艺[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(3): 12-16.