

航空发动机整体叶盘叶片前倾抛光工序规划

陈振¹, 赵盼^{2,3}, 史耀耀³, 李峰⁴, 丁莹¹, 路丹尼³

(1.西安航空学院 机械工程学院, 陕西 西安 710077;
2.西安明德理工学院 智能制造与控制技术学院, 陕西 西安 710124;
3.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072; 4.西安航空学院 飞行器学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:通过增加前倾角的前倾抛光工艺可降低表面粗糙度。探究前倾角对抛光表面质量的影响规律对提高整体叶盘叶片的抛光效率具有重要意义。通过砂布页轮前倾抛光实验,获得 P400~P1200 粒度砂布页轮抛光 TC4 整体叶盘叶片时,用在不同抛光次数、前倾角度下的表面粗糙度。实验结果表明,抛光表面粗糙度随着前倾角的增加呈下降趋势。分析了前倾角变化对抛光表面质量的影响机制,并从多个角度进行探讨。通过量化抛光效率,研究了各粒度砂布页轮抛光效率随前倾角的变化规律,并得到了最佳前倾角度;此基础上进行抛光效率最优的抛光工序规划,并通过抛光实验进行验证。实验结果表明,优化后的抛光工序规划能在较少工序内获得合格的表面粗糙度,验证了抛光工序规划结果的可靠性。该研究为 TC4 整体叶盘叶片砂布页轮抛光工艺的优化提供了理论依据和实践指导。

关 键 词:整体叶盘叶片;柔性抛光;抛光效率;表面粗糙度

中图分类号:V261

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)06-1107-07

航空发动机是关系到国家安全和国民经济发展的战略性高科技产品^[1-2]。作为新型航空发动机提高气动效率的重大改进部件,整体叶盘具有非常巨大的潜在市场需求。整体叶盘在精密铣削加工后的刀痕对发动机质量和性能有直接影响,因此必须对其流道型面及叶片型面进行抛光加工,以提高表面质量、增强其疲劳强度,保证整机使用性能和寿命^[3-5]。

整体叶盘开敞性差的结构特点使得磨具系统可达性差,在抛光过程中磨具极易与叶片的叶尖部位及进排气边发生干涉。因此,很难用砂带等与工件接触面积大的传统磨具进行开敞性较差的整体叶盘叶片表面抛光加工。而柱状类柔性磨具,如砂布页轮、砂圈、芝麻磨头等^[6-7],结构简单、具有更好的可

达性,适合开敞性差的整体叶盘叶片抛光加工。在利用柱状类柔性磨具对叶片型面进行抛光时,为了实现接触区域面积的最大化以减少走刀次数和加工时间,多采用传统的横向走刀方式^[8]。从加工效率角度看,尽管横向走刀方式下的叶片型面单次抛光时间最短,但获得的表面质量不佳。考虑到抛光工艺通常包括由粗抛、半精抛到精抛的多个工序,整个叶片型面及整体叶盘的抛光时间长、加工效率低。

外圆磨削加工中的点磨削工艺,通过改变砂轮与工件轴线之间的变量夹角,使得加工过程中磨粒运动轨迹和磨削几何参数发生改变,从而提高了加工效率^[9]。然而,点磨削技术主要应用于轴类零件加工,变量夹角的取值一般在 $\pm 2^\circ$ 范围内^[10]。工程实践中发现,采用前倾走刀方式(将传统横向走刀

收稿日期:2023-01-06

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-503,2023JCYB-431,2023JCYB-080)、陕西省教育厅科研计划(23JK0495,23JP124)、西安航空学院博士科研启动金(2021KY0216)、陕西高校青年创新团队(2022)、西安明德理工学院科研基金(2022XY02104)、教育部产学研合作协同育人项目(220906280183841)、2022 年度陕西省液压技术重点实验室开放基金(YYS2022KF11)与航空科学基金(2020Z045053001)资助

作者简介:陈振(1990—),西安航空学院讲师,主要从事难加工材料精密抛光研究。

通信作者:赵盼(1986—),西安明德理工学院教授,主要从事复杂结构零件成型工艺与装备研究。

e-mail:pan.zhao@nwpu.edu.cn

方式下的刀轴偏转一定角度,即前倾角 θ)进行抛光,可极大提高表面质量,大幅减少叶片抛光时间。前倾抛光工艺提高表面质量和加工效率,对整体叶盘叶片抛光加工自动化生产具有重要意义。然而,在针对多工序的整体叶盘叶片抛光工艺方面,如何确立最佳的前倾角度,并在保证加工表面质量的前提下降低抛光次数以提高抛光效率,以及如何进行工序规划,目前相关研究较少。

基于此,本文以开式整体叶盘叶片型面为研究对象,以砂布页轮为抛光柔性磨具,开展前倾抛光实验,掌握可快速降低表面粗糙度、提高抛光效率的最佳前倾角度及其相关抛光工序规划。本研究旨在为提高航空发动机整体叶盘叶片抛光加工效率提供理论指导和借鉴。

1 砂布页轮前倾抛光实验

1.1 实验设置

抛光实验在 QMK020 整体叶盘特种抛光机上进行,如图 1 所示。某型号整体叶盘的工件材料为 TC4 钛合金。抛光磨具为科盈磨具公司生产的碳化硅砂布页轮(公称直径 12 mm,宽度 12 mm),根据试块初始表面粗糙度,依次选用粒度为 P400~P1200 范围的砂布页轮进行抛光^[11]。

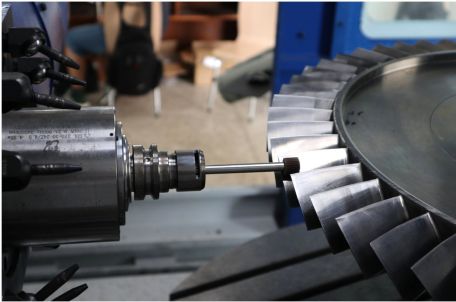


图 1 砂布页轮抛光实验

抛光工艺参数根据工程经验统一选取为:主轴转速 8 000 r/min,进给速度 200 mm/min,压缩量 0.5 mm。走刀方式为前倾角 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$,间隔为 10° 。实验按砂布页轮 5 种粒度分为 5 组。抛光后用 Mahr MarSurf M300C 手持式粗糙度测量仪测量表面粗糙度 R_a 值,每次抛光后随机测量 5 个区域的 R_a 值,取其平均值。测量方向为垂直于磨粒切削方向。

1.2 实验过程和结果

1) P400 砂布页轮抛光

整体叶盘叶片铣削后的初始表面粗糙度 R_a 范围为 1.287~1.372 μm ,均值为 1.320 μm 。以 P400 粒度砂布页轮进行不同前倾角下的多次抛光实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 P400 砂布页轮抛光实验结果

前倾角/ ($^\circ$)	粗糙度/ μm			
	抛光 1 次	抛光 2 次	抛光 3 次	抛光 4 次
0	1.198	1.121	1.053	0.994
10	1.011	0.941	0.891	0.863
20	0.922	0.835	0.801	0.767
30	0.867	0.803	0.752	0.736
40	0.812	0.762	0.689	0.67
50	0.781	0.628	0.584	0.572
60	0.710	0.661	0.514	0.490
70	0.645	0.563	0.431	0.435
80	0.590	0.467	0.443	0.413
90	0.566	0.457	0.397	0.389

2) P600 砂布页轮抛光

根据 P400 粒度砂布页轮抛光实验结果,先将铣削叶片按横向抛光工艺以 P400 粒度砂布页轮抛光 3 次,获得统一的初始表面形貌,表面粗糙度 R_a 均值为 1.052 μm ;然后用 P600 粒度砂布页轮进行进行不同前倾角下的多次抛光实验,实验结果如表 2 所示。

表 2 P600 砂布页轮抛光实验结果

前倾角/ ($^\circ$)	粗糙度/ μm			
	抛光 1 次	抛光 2 次	抛光 3 次	抛光 4 次
0	0.895	0.818	0.781	0.734
10	0.832	0.804	0.721	0.719
20	0.742	0.681	0.694	0.674
30	0.685	0.669	0.673	0.624
40	0.582	0.577	0.533	0.527
50	0.560	0.525	0.511	0.526
60	0.545	0.469	0.426	0.406
70	0.538	0.429	0.432	0.379
80	0.444	0.374	0.368	0.328
90	0.372	0.357	0.355	0.309

3) P800 砂布页轮抛光

同理,先依次用 2 种粒度的砂布页轮对铣削后的叶片试块进行横向抛光,P400 粒度抛光 3 次,P600 粒度抛光 2 次,获得统一的初始表面形貌,表面粗糙度 R_a 均值为 0.823 μm ;然后用 P800 粒度砂

布页轮重复进行进行不同前倾角下的多次抛光实验,实验结果如表 3 所示。

表 3 P800 砂布页轮抛光实验结果

前倾角/ (°)	粗糙度/ μm			
	抛光 1 次	抛光 2 次	抛光 3 次	抛光 4 次
0	0.752	0.726	0.678	0.638
10	0.686	0.677	0.634	0.567
20	0.617	0.526	0.538	0.493
30	0.589	0.543	0.471	0.386
40	0.515	0.503	0.411	0.351
50	0.513	0.471	0.411	0.397
60	0.440	0.345	0.320	0.317
70	0.412	0.319	0.351	0.314
80	0.362	0.297	0.296	0.250
90	0.350	0.296	0.277	0.242

4) P1000 砂布页轮抛光

依次用 3 种粒度砂布页轮对铣削后的叶片试块进行横向抛光,P400 粒度 3 次,P600 粒度 2 次,P800 粒度 3 次,获得统一的初始表面形貌,表面粗

表 4 P1000 砂布页轮抛光实验结果

前倾角/ (°)	粗糙度/ μm			
	抛光 1 次	抛光 2 次	抛光 3 次	抛光 4 次
0	0.600	0.530	0.511	0.504
10	0.551	0.466	0.443	0.373
20	0.571	0.453	0.397	0.369
30	0.442	0.384	0.341	0.337
40	0.368	0.318	0.323	0.312
50	0.346	0.312	0.305	0.292
60	0.284	0.238	0.243	0.260
70	0.272	0.246	0.237	0.224
80	0.258	0.237	0.226	0.232
90	0.224	0.218	0.203	0.207

糙度 R_a 均值为 $0.673\ \mu\text{m}$;然后用 P1000 粒度砂布页轮重复进行进行不同前倾角下的多次抛光实验,实验结果如表 4 所示。

5) P1200 砂布页轮抛光

依次用 4 种粒度砂布页轮对铣削后的叶片试块进行横向抛光,P400 粒度 3 次,P600 粒度 2 次,P800 粒度 3 次,P1000 粒度 3 次,以获得统一的初始表面形貌,表面粗糙度 R_a 均值为 $0.511\ \mu\text{m}$;然后用 P1200 粒度砂布页轮重复进行进行不同前倾角下的多次抛光实验,实验结果如表 5 所示。

表 5 P1200 砂布页轮抛光实验结果

前倾角/ (°)	粗糙度/ μm			
	抛光 1 次	抛光 2 次	抛光 3 次	抛光 4 次
0	0.436	0.385	0.371	0.376
10	0.394	0.366	0.351	0.349
20	0.367	0.351	0.340	0.350
30	0.345	0.315	0.308	0.312
40	0.301	0.284	0.281	0.268
50	0.283	0.267	0.262	0.253
60	0.278	0.253	0.249	0.256
70	0.231	0.220	0.214	0.207
80	0.227	0.172	0.181	0.188
90	0.214	0.169	0.157	0.141

2 抛光结果分析

从表 1~5 各粒度砂布页轮抛光实验结果可以观察到,无论哪种粒度的砂布页轮,其抛光表面粗糙度都随着前倾角的增加呈下降趋势。绘制各粒度砂布页轮的表面粗糙度随着前倾角的下降曲线,如图 2 所示。

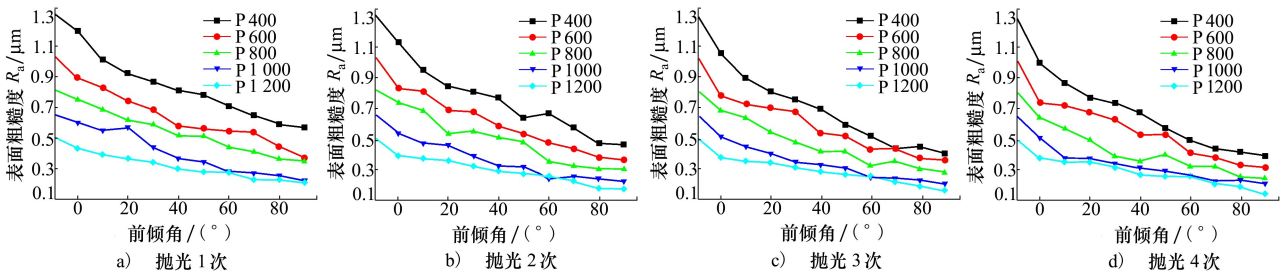


图 2 砂布页轮抛光表面粗糙度随前倾角的变化

抛光表面形成是磨具表面无数磨粒在工件表面的切削轨迹相互干涉的叠加。从宏观角度,对于柔

性抛光而言,在一定压缩量下砂布页轮磨具表面磨粒运动与工件发生干涉时,在工件表面形成近似矩

形的切触区域。磨具沿着规划路径与工件做相对进给运动,抛光接触区域均匀覆盖于工件表面,实现工件区域的抛光。从工件某区域被抛光的角度对前倾角影响抛光形貌的作用机制进行分析,对于不同的前倾角抛光工艺而言:

1) 横向抛光时(前倾角 $=0^\circ$),由于磨粒切削方向与磨具进给方向平行,工件上某区域只会受到磨具表面某环向位置上磨粒的切削作用。工件上该区域的抛光深度取决于环向上出刃高度最高的磨粒,因此,横向抛光工艺的工件表面质量极易受磨具表面磨粒分布的影响,且磨具的回转偏心运动会加剧这一现象。

2) 随着前倾角增加,由于柔性磨具受挤压而产生的切触区域的存在,工件上某区域受到磨具表面上更多相邻环向位置磨粒的切削作用。由于工件上该区域受到更多磨粒的切削作用,且磨粒的切痕宽度随着进给运动扩大,增加了不同磨粒在工件表面切削轨迹的交叠区域范围。因此,前倾抛光工艺使得整个工件的表面粗糙度降低。

3) 纵向抛光时(前倾角为 90°),刀轴方向平行于相对进给方向。在此情况下,工件上的某区域会受到磨具整个轴向方向上每一环向位置磨粒的切削作用。

前倾抛光工艺和纵向抛光工艺下,工件某区域受到更多环向位置磨粒的切削作用,因此抛光表面质量受磨具表面磨粒分布不均、磨具回转偏心等不利因素的影响大幅减小,从而提高了表面形貌的一致性。

此外,对于叶片抛光加工而言,其首要目的是去除表面依然存在的残留铣削刀痕。铣削刀痕方向沿着叶片宽度方向,而传统横向抛光工艺的刀位轨迹为相同方向。因此,横向抛光工艺下,磨粒切削方向与铣削刀痕方向相同。磨粒在叶片表面的切削轨迹与铣削表面纹理方向具有相似性的情况下,凸起的铣削刀痕受到的磨粒切削力的方向与刀痕方向一致,从而难以实现铣削刀痕的有效去除,且抛光后易形成明显的抛光刀痕。而前倾抛光工艺下,磨粒在叶片表面的切削轨迹方向与铣削表面纹理方向不再重合,凸起的铣削刀痕受到的磨粒切削力方向与刀痕方向呈一定夹角,从而容易实现铣削刀痕的有效去除,而且这种抛光工艺的加工效率要明显高于传统的横向抛光工艺。

3 砂布页轮前倾抛光加工效率及工序规划

3.1 抛光加工效率

在柔性抛光中,磨具与工件接触形成近似矩形的接触区域,其长度方向平行于磨具主轴。在传统的横向抛光工艺下,沿着进给方向形成的抛光带宽与砂布页轮长度相等。而在前倾抛光工艺下,随着主轴倾斜角度的增加,抛光带宽逐渐下降,直到前倾角为 90° 时纵向抛光工艺下,沿着进给方向形成的抛光带宽等于接触矩形的宽度。即在前倾抛光工艺下,随着前倾角增加,表面粗糙度下降的同时,抛光带宽也在逐渐下降,需要增加刀位轨迹密度完成工件表面的抛光,从而增加了单位面积的加工时间。

文献[12]将砂布页轮抛光效率定义为单位时间内抛光面积与其表面粗糙度减小量的乘积,忽略了初始表面粗糙度对抛光效率的影响。因此,为了量化前倾角对抛光效率的影响,本文定义抛光效率 P_E 为单位时间内抛光区域的表面粗糙度下降率。其计算方法如公式(1)所示。

$$P_E = \frac{S}{t} \cdot \frac{R_{a0} - R_{a1}}{R_{a0}} \quad (1)$$

由于前倾角的变化导致抛光带宽不同,从而影响刀位轨迹密度和加工时间。设抛光过程中砂布页轮与叶片接触区域的长度为 a 、宽度为 b ,即当前倾角为 0° 时的抛光带宽为 a ,而前倾角为 90° 时的抛光带宽为 b 。如图3所示,其他角度时的抛光带宽 p_w 计算方法为:

$$\phi = \arcsin \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

$$p_w = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \phi) \quad (3)$$

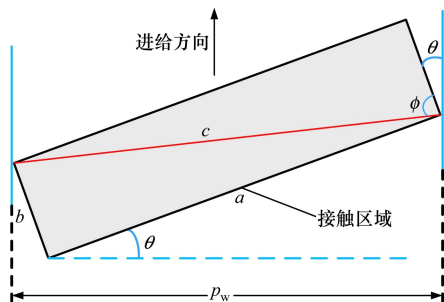


图3 砂布页轮抛光带宽

以等参数线法规划抛光路径,对整体叶盘中的

单个叶片型面进行抛光,不同前倾角时的抛光总面积 S 相同,但抛光时间 t 和表面粗糙度 R_a 的变化不同。抛光时间 t 与接触工件时的进给速度 v_f 、非接触工件时的抬刀速度以及刀位轨迹密度相关。设不同前倾角抛光时的进给速度和抬刀速度相同,则抛光时间 t 只取决于刀位轨迹密度,而刀位轨迹密度与抛光宽度 p_w 呈反比。设 $(R_{a0} - R_{a1})/R_{a0}$ 随前倾角 θ 的变化为函数 $f(\theta)$,则定义函数 F 如(4) 式所示。

$$F = p_w \cdot f(\theta) \tag{4}$$

根据抛光效率计算公式(1),抛光相同面积 S 的叶片型面时, F 取最大值时对应的前倾角度即为理论最佳前倾角度。

以 P400 粒度砂布页轮抛光为例,在设置的工艺参数下,砂布页轮与叶片工件接触区域长度 $a = 12\text{ mm}$ 、宽度 $b = 3.71\text{ mm}$,则抛光宽度 p_w 与前倾角 θ 之间的关系如(5)式所示。

$$p_w = 12.560 \times \sin(72.820^\circ + \theta) \tag{5}$$

拟合抛光次数 1 次时 $(R_{a0} - R_{a1})/R_{a0}$ 随前倾角的变化得到函数 $f(\theta)$,如公式(6) 所示。

$$f(\theta) = 1.084 \times \sin^3\theta - 1.682 \times \sin^2\theta + 1.073 \times \sin\theta + 0.092 \tag{6}$$

联立(4)~(6)式,则 F 与前倾角 θ 之间的关系如(7)式所示。

$$F = (12.560 \times \sin(72.820^\circ + \theta)) \cdot (1.084 \times \sin^3\theta - 1.682 \times \sin^2\theta + 1.073 \times \sin\theta + 0.092) \tag{7}$$

根据(7)式,计算可得前倾角 θ 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内使 F 取最大值的角度为 48.83° ,即为 P400 粒度砂布页轮抛光工艺的理论最佳前倾角度。在本粒度砂布页轮获得横向抛光效率最优的前提下,再进行下一个粒度砂布页轮的抛光,以此逐步获得每一粒度砂布页轮的最佳前倾角。后续其他粒度砂布页轮抛光的最佳前倾角度如表 6 所示。

表 6 各粒度砂布页轮抛光 1 次时的理论最佳前倾角

粒度	P400	P600	P800	P1000	P1200
最佳前倾角	48.83°	50.21°	60.24°	32.72°	44.97°

但实际抛光中,砂布页轮尺寸并非远小于叶片尺寸,一定前倾角范围内的刀位轨迹密度相近而叶片抛光时间可能是相同的,即实际工程应用中最佳前倾角会与理论值有所差别。对 1.2 节的实验数据进行抛光效率统计,取抛光次数第 1 次的抛光效率 P_E 进行统计分析(抛光效率单位为 mm^2/s),可以得

出前倾抛光砂布页轮 P400~P1200 粒度的最佳前倾角度如表 7 所示。

表 7 各粒度砂布页轮抛光 1 次时的实验最佳前倾角

粒度	P400	P600	P800	P1000	P1200
最佳前倾角	40°	40°	40°	60°	40°

对于 P1000 粒度砂布页轮,前倾角 40° 和 60° 的抛光效率值相近。因此,可将 P400~P1200 粒度砂布页轮抛光 TC4 叶片的最佳前倾角统一为 40° 。

3.2 抛光工序规划

面向初始粗糙度 $R_a 1.32\text{ }\mu\text{m}$ 左右的整体叶盘叶片,抛光效率最优的抛光工序规划为:

- 1) P400 粒度砂布页轮以 40° 前倾角抛光 1 次,预计粗糙度 R_a 下降到 $0.81\text{ }\mu\text{m}$ 左右;
- 2) P800 砂布页轮以 40° 前倾角抛光 1 次,预计粗糙度 R_a 下降到 $0.51\text{ }\mu\text{m}$ 左右;
- 3) 最后用 P1200 粒度砂布页轮以 40° 前倾角抛光 1 次,预计粗糙度 R_a 下降到 $0.30\text{ }\mu\text{m}$ 左右。

基于以上抛光工序进行整体叶盘叶片抛光实验验证,结果如图 4 所示。

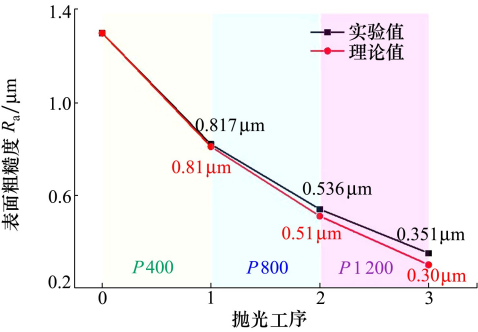


图 4 砂布页轮前倾抛光工序规划及实验验证

从图中可以看出,P400 粒度砂布页轮的实验结果与理论值相近,而 P800、P1200 粒度砂布页轮的抛光表面粗糙度低于理论值。在初次砂布页轮抛光实验中,P400 粒度砂布页轮抛光前表面形貌为铣削形貌,P600~P1200 粒度砂布页轮抛光前的表面形貌,均为前一粒度砂布页轮在横向抛光工艺下形成的抛光形貌。在前倾抛光工艺下,磨粒切削方向与表面纹理方向均成一定夹角,这有利于前一粒度砂布页轮横向抛光纹理的材料去除。新的抛光工序中,P400 粒度砂布页轮抛光前为铣削纹路,前倾抛光工艺下磨粒切削方向与铣削纹路方向成 40° 夹角;而 P800、P1200 粒度砂布页轮抛光前,前一粒度砂布页轮在前倾抛光工艺下已形成与铣削纹路方向

呈 40° 夹角方向的抛光表面纹理。因此, P800、P1200 粒度砂布页轮仍继续以 40° 前倾角抛光时, 磨粒切削方向与抛光前的纹路方向相同, 其材料去除能力有所下降。但由于磨具的相对进给运动以及不同磨粒分布特征, 磨粒在工件表面的运动轨迹仍然能够完全覆盖前一道工序形成的抛光形貌从而形成新的抛光表面形貌。

由表 1~表 5 中前倾角为 0° 的传统横向抛光工艺的实验结果可知, 依次使用 P400、P600、P800、P1000、P1200 5 种粒度砂布页轮, 每个粒度的磨具抛光 6 次, 最终可达到表面粗糙度 $0.369\ \mu\text{m}$ 。而采用前倾抛光工艺, 依次使用 P400、P800、P1200 3 种粒度砂布页轮, 每个粒度的磨具抛光 1 次, 即可达到表面粗糙度 $0.351\ \mu\text{m}$ 。相对于传统的横向抛光工艺, 前倾抛光工艺达到相近表面质量的抛光时间大幅减小, 从而极大地提高了抛光效率。

4 结 论

本文通过砂布页轮前倾抛光实验, 获得不同粒度砂布页轮抛光 TC4 整体叶盘叶片在不同抛光次数、不同前倾角度下的表面粗糙度, 结果表明, 抛光表面粗糙度随着前倾角的增加呈下降趋势, 并从工件某区域被抛光的角度和抛光前的铣削表面纹理特征两方面分析前倾角影响抛光形貌的作用机制; 通过量化抛光效率得到各粒度砂布页轮抛光随前倾角的变化规律并获得最佳前倾角度; 在此基础上进行抛光工序规划, 并通过抛光实验进行验证。抛光实验表明, 优化后的抛光工序规划能在较少工序内获得合格的表面粗糙度, 验证了抛光工序规划结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 王增强. 先进航空发动机关键制造技术[J]. 航空制造技术, 2015(22): 34-38
WANG Zengqiang. Key manufacturing technology of advanced aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015 (22): 34-38 (in Chinese)
- [2] XIAO G, HE Y, HUANG Y, et al. Shark-skin-inspired micro-riblets forming mechanism of TC17 titanium alloy with belt grinding[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107635-107647
- [3] 苏宇浩, 焦磊, 何志强, 等. 整体叶盘超硬磨料柔性抛光轮几何参数与力学性能分析[J]. 制造技术与机床, 2023, 728(2): 127-133
SU Yuhao, JIAO Lei, HE Zhiqiang, et al. Geometric parameter and mechanical property analysis of flexible polishing wheel with superhard abrasive for blisk[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023, 728(2): 127-133 (in Chinese)
- [4] 李文辉, 温学杰, 李秀红, 等. 整体叶盘抛磨技术研究现状及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 88-102
LI Wenhui, WEN Xuejie, LI Xiuhong, et al. Research status and development trend of blisk polishing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 88-102 (in Chinese)
- [5] 黎先才, 叶欢, 何志强. 航空发动机中小型整体叶盘自动化抛光技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 573(11): 143-146
LI Xiancai, YE Huan, HE Zhiqiang. Automatic polishing technology for small and medium sized blisk of aeroengine[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, 573(11): 143-146 (in Chinese)
- [6] CHEN F, ZHAO H, LI D, et al. Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 391-403
- [7] ZHANG J, SHI Y, LIN X, et al. Parameter optimization of five-axis polishing using abrasive belt flap wheel for blisk blade[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(10): 4805-4812
- [8] HUAI W, SHI Y, TANG H, et al. An adaptive flexible polishing path programming method of the blisk blade using elastic grinding tools[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(7): 3487-3495
- [9] 尹国强, 巩亚东, 李雨晴, 等. 新型点磨削砂轮磨削表面/亚表面质量研究[J]. 东北大学学报, 2019, 40(6): 835-840
YIN Guoqiang, GONG Yadong, LI Yuqing, et al. Study on the grinding surface and subsurface quality of novel point grinding wheels[J]. Journal of Northeastern University, 2019, 40(6): 835-840 (in Chinese)
- [10] 马廉洁, 曹小兵, 巩亚东, 等. 基于遗传算法与 BP 神经网络的微晶玻璃点磨削工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2015,

26(1): 102-106

MA Lianjie, CAO Xiaobing, GONG Yadong, et al. Process parameter optimization based on BP neural networks and GA in point grinding low expansion glass[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(1): 102-106 (in Chinese)

[11] 陈振, 闫蕊, 李锋, 等. 砂布页轮表面形貌测量与建模[J]. 航空制造技术, 2022, 65(4): 63-72

CHEN Zhen, YAN Rui, LI Feng, et al. Surface morphology measurement and modeling of belt flapwheel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 63-72 (in Chinese)

[12] 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 Wenbo, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun. Optimization of adaptive flexible blisk polishing efficiency[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(6): 1550-1557 (in Chinese)

Forward polishing process planning of aero-engine blisk blade

CHEN Zhen¹, ZHAO Pan^{2,3}, SHI Yaoyao³, LI Feng⁴, DING Ying¹, LU Danni³

(1.School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;
2.School of Intelligent Manufacturing and Control Technology, Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China;
3.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
4.School of Aircraft, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The surface roughness can be reduced by increasing the forward-tilt angle of polishing process. It is of great significance to explore the influence law of the forward-tilt angle on the quality of the polished surface to improve the polishing efficiency of the blisk blade. In this paper, the surface roughness of the polished TC4 blisk blades polished by the belt flapwheel with a grain size of P400-P1200 under different polishing times and different forward-tilt angles was obtained through the forward-tilting polishing experiment. The experimental results show that the roughness of the polished surface decreases with the increase of the forward-tilt angle. Then the mechanism of the influence of the change of the forward-tilt angle on the quality of the polished surface was analyzed from multiple aspects. By quantifying the polishing efficiency, the variation law of the polishing efficiency of the belt flapwheel with various grain sizes with the forward-tilt angle was studied, and the optimal forward-tilt angle was obtained. On this basis, the polishing process planning with the optimal polishing efficiency was carried out, and verified by polishing experiments. The experimental results show that the optimized polishing process planning can obtain qualified surface roughness in fewer processes, which verifies the reliability of the polishing process planning results. This study provides a theoretical basis and practical guidance for the optimization of the belt flapwheel polishing process for TC4 blisk blades.

Keywords: blisk blade; flexible polishing; polishing efficiency; roughness of surface

引用格式: 陈振, 赵盼, 史耀耀, 等. 航空发动机整体叶盘叶片前倾抛光工序规划[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1107-1113

CHEN Zhen, ZHAO Pan, SHI Yaoyao, et al. Forward polishing process planning of aero-engine blisk blade[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(6): 1107-1113 (in Chinese)