

引文格式: 田凤杰, 齐子建, 张彦智, 等. 弹性磨具磨抛叶片叶尖圆角工艺研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(4): 76-82.

TIAN Fengjie, QI Zijian, ZHANG Yanzhi, et al. Research on rounding for blade tip fillet with elastic grinding tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(4): 76-82.

弹性磨具磨抛叶片叶尖圆角工艺研究*

田凤杰¹, 齐子建¹, 张彦智¹, 李 论²

(1. 沈阳理工大学, 沈阳 110159;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

[摘要] 为了实现航空发动机叶片叶尖圆角的自动化磨抛加工,进行了基于弹性磨具的微弧圆角磨抛加工研究,提出了一种可控性良好的叶尖微弧圆角加工方法。以聚酯纤维作为基体材料的弹性磨抛轮,在加工过程中,利用磨抛轮弹性变形的特点使涂附于基体表面的磨料将叶尖顶角磨抛加工成微小半径圆角。基于弹性接触理论与 Preston 去除理论,建立了磨抛轮与叶尖顶角加工状态下的理论接触模型和材料去除模型,采用 Abaqus 软件对模型进行了接触区域应力仿真分析,并对去除分布函数进行了仿真。理论证明,弹性磨抛轮与叶尖顶角通过自适应包络接触变形,在加工区域与磨抛轮之间形成“微面触切”,从而实现微小半径圆弧的圆角加工。进行了叶片叶尖顶角的圆角磨抛试验,对实现微小圆弧圆角加工的可行性与可控性进行了验证。结果表明,弹性磨抛轮的自适应包络变形使叶尖顶角加工接触区域形成圆弧状应力分布,涂附于基体上的磨料可以良好地磨抛去除,实现圆角加工。此加工方法实现了叶片叶尖微弧圆角的自动化加工,加工后的叶片尺寸精度高,表面质量一致性良好,表面粗糙度稳定在 0.20~0.28 μm 之间,圆角半径大小变化稳定在 16 μm 范围内。

关键词: 弹性磨抛; 航空发动机叶片; 叶尖; 微弧圆角; 工艺参数

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.04.076



田凤杰

教授,博士,研究方向为机器人先进制造理论与技术应用。

航空发动机作为飞机主要动力源,具有十分复杂的机械结构和制造工艺,叶片作为核心部件之一,其制造质量可直接影响发动机的服役性能和寿命^[1]。叶尖是位于叶片顶端的部位,较为尖锐。叶尖顶角结构具有控制马蹄涡发展的功能,能降低叶片在工作过程中出现裂纹乃至崩角的风险。叶尖顶角存在一个最佳圆角半径,可使叶片的工作效率达到最高^[2-4]。精密铸造的航空叶片叶尖顶角半径介于 0.06~0.08 mm,需要进行加工使其达到要求的圆角半径和表面质量。由于航空叶片叶尖顶角的面积较小、刚性较差,加工过程中叶片容易产生振动甚至变形,且叶片轮

廓曲线较为复杂,加工难度较大,尤其对于叶尖微小半径圆弧的圆角加工难度更大。航空叶片生产类型属于小批量、多品种生产,不宜采用专用机床,为了提高其加工质量与一致性,多采用数控机床进行加工。对于微小半径圆弧的圆角加工,数控机床需要采用圆角成形固结磨头进行加工,容易产生振动让刀,造成尺寸精度差、表面质量不合格的问题^[5]。航空发动机叶片多为塑性较高的钛合金或者高温合金材质,采用固结磨头加工时在加工精度、效率和表面损伤控制等方面仍存在较多问题,且加工成本较高,对于叶片的圆角加工并不适用。目前最广泛的加工方法仍然

* 基金项目: 省教育厅重点攻关项目(LJKZZ20220036); 中国科学院沈阳自动化研究所基础研究面上项目(2022JK2K09)。

以人工磨抛为主,加工质量和效率较低,圆角大小一致性较差。因此,研发新型的航空叶片叶尖微小半径圆角方法在叶片加工领域具有重要的应用价值。

弹性磨具是通过有机化学反应直接生成的新型弹性体材料,在该弹性体材料内部或表面添加磨料制备而成的一种涂附磨具^[6]。相较于常规的固结刚性工具磨削,弹性磨具磨抛对工件形貌的适应性、可控性及加工后的表面质量都有一定的优势,可以更好地满足复杂型面加工高精度、高效率、高完整性、低损/无损的高性能加工需求。同时,弹性磨具高速旋转时在离心力的作用下半径增大,具有较大弹性,在磨抛时与叶片型面紧密接触。工件表面与弹性磨具之间形成微小的包络面,实现“微面触切”,进而增大了磨抛面积,能有效切除行间残留高度,提高磨抛效率,还避免了砂轮等刚性磨头导致的“过抛”或“欠抛”现象。

本研究以叶片的叶尖顶角为加工对象,通过弹性磨具在加工接触过程中自身的弹性变形,形成自适应包络接触,实现“微面触切”的圆角加工。基于弹性接触理论和 Preston 去除理论建立力学模型,并结合材料去除率的影响因素和规律,建立叶片叶尖磨抛接触模型和材料去除模型,验证加工方法的可行性。

1 磨抛去除理论与接触分析

1.1 磨抛接触模型建立

磨抛过程中弹性磨抛轮与叶片叶尖顶角的轮廓表层之间存在接触与变形,图 1 为磨抛加工叶尖顶角表面两侧时加工区域截面的接触状态示意图。可以看出磨抛轮变形和叶尖顶角加工区域横截面的受力关系。

磨抛加工过程中做如下假设^[7]:

(1) 磨抛轮和叶片叶尖轮廓表面只发生弹性形变,即磨抛过程中叶片并未因挤压而产生塑性变形;(2) 磨抛

轮与工件之间的作用力垂直于接触面;(3) 磨抛轮半径远小于接触点顶面轮廓曲线的曲率半径值,即接触区域切线方向趋向于平坦,可忽略叶尖曲率变化对接触区域受力的影响。当磨抛轮和叶片处于稳定磨抛加工时,各力之间应该满足如下关系。

$$\begin{cases} \sum F_1 = \sum F_2 = \frac{F_n}{2 \sin \theta} \\ F_t = \mu F_n \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ 为磨抛轮与叶片之间的摩擦系数。对加工模型进行受力分析可以确定,由于切向力 F_t 可以向 F_n 转化,且接触区域为对称模型, ΣF_{1x} 可与 ΣF_{2x} 相抵消,最终转化为只考虑垂直力的模型。对于磨抛轮和叶片叶尖顶角两侧面接触问题,为了准确表述各种物理量及其之间的关系,建

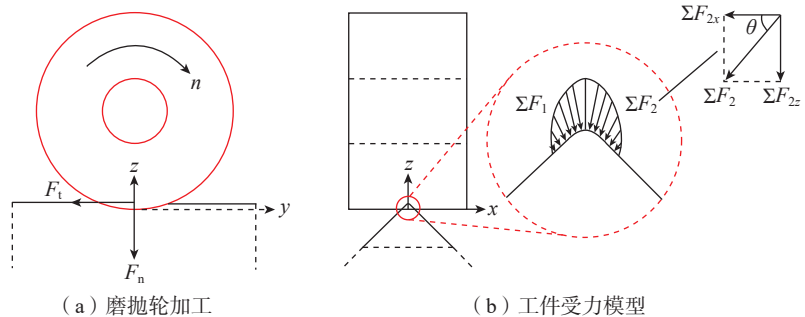
立适应于这种接触关系的模型。在只考虑接触模型法向接触条件下沿 $x-z$ 平面进行剖面分析。 $x-z$ 平面的接触可以看作是一个带有微小半径圆角的二维楔压入弹性半空间体,接触模型如图 2 所示。

当楔体压入深度为 δ 时,接触力 F_n 和接触区域的压强分布 p 可描述为

$$F_n = \frac{\theta a}{E^* \times \sin \varphi_0} \left(\frac{\sin \varphi_0}{2} + \varphi_0 \right) \quad (2)$$

$$\frac{\pi E^*}{\theta} p(\varphi) = \ln \left| \tan \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \tan \frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right| - 2\varphi_0 \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi_0} - \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0} \ln \left| \frac{\sin(\varphi - \varphi_0)}{\sin(\varphi + \varphi_0)} \right| \quad (3)$$

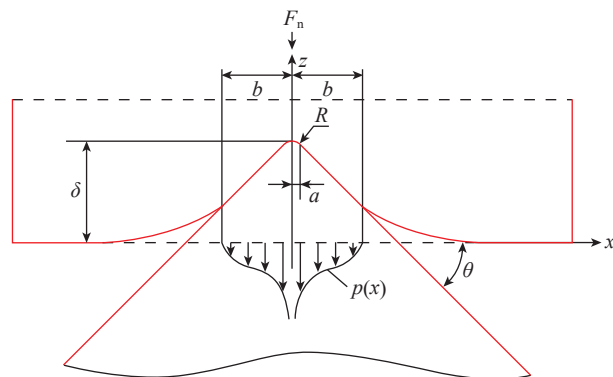
式中, E^* 表示磨抛轮与叶尖在该接触状态下的综合弹性模量; φ 与 φ_0 分别



注: n 为磨抛过程中工具转速; ΣF_1 为叶尖左侧受到的合力; ΣF_2 为叶尖右侧受到的合力; θ 为接触分力的合力方向与磨抛轮表面之间的夹角; F_t 为磨抛力的切线方向分量; F_n 为磨抛力的法线方向分量。切线方向和法线方向均指加工接触区域内的曲面切向和法线方向,而不是接触轮外轮廓的切线和法线方向。

图 1 磨抛轮与工件受力模型

Fig.1 Force analysis between elastic grinding tool and blade tip



注: $p(x)$ 为接触区域的压强分布; R 为圆角半径的曲率半径; δ 为楔体压入深度; a 为圆角区域在 x 轴的投影长度; b 为二维楔与半空间体在接触区域的半轴长度。

图 2 接触区域压强分布模型

Fig.2 Contact area pressure distribution model

用于描述 x 和 a 、 b 之间的关系。即

$$\varphi = \arcsin \frac{x}{b}, \varphi_0 = \arcsin \frac{a}{b}$$

由式 (3) 可以得到中心点最大压强为

$$p(0) = \frac{2\theta}{\pi E^*} \left[\ln \left(\tan \frac{\varphi_0}{2} \right) - \frac{\varphi_0}{\sin \varphi_0} \right] \quad (4)$$

根据式 (4), 结合本研究所采用的磨抛轮与叶片对两种接触状态加以分析: 当磨抛轮与叶尖顶角刚发生接触时, 接触状态符合赫兹接触的压强分布, 即 $a/b \geq 1$ 。当 $a/b=1$ 时 ($x=asin\varphi$), 接触力 F_n 和接触区域的压强分布 $p(x)$ 可被描述为

$$F_n = \frac{\pi a^2}{2RE^*} \quad (5)$$

$$p(x) = -\frac{2F_n}{\pi a^2} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (6)$$

当磨抛轮与叶尖顶角接触产生较大压入深度时, 即 $a/b \rightarrow 0$ ($x=bsin\varphi$)。叶尖初始半径相较于接触区域而言是极小值, 则接触模型可被视作一个尖锐的二维楔压入弹性半空间体, 此时的接触力 F_n 和接触区域的压强分布 $p(x)$ 可被描述为

$$F_n = \frac{2b\theta}{E^*} \quad (7)$$

$$p(x) = \frac{F_n}{\pi b} \operatorname{arch} \left| \frac{b}{x} \right| \quad (8)$$

本研究所采用的叶片试验件, 其初始叶尖圆角半径为 0.06~0.08 mm, 该半径在实际接触过程中, 相较于接触区域而言属于极小值。根据 Ciavarella 等^[8] 对于这种接触状态应力分布的分析, 当 $a/b \leq 0.1$ 时, 接触模型的接触力和压强分布结果与式 (7) 和 (8) 一致。当磨抛轮磨抛面为圆柱面, 叶尖顶角初始形貌为微小角时, 磨抛中工具与工件的接触区域近似为椭圆, 其接触区域的表达式可表示为

$$\left(\frac{x}{b} \right)^2 + \left(\frac{y}{c} \right)^2 = 1 \quad (9)$$

式中, b 、 c 为椭圆区域的短、长半轴, 则接触区域在不同剖面下的短半轴

横坐标 x 可表达为

$$x = \sqrt{b^2 \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right)} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8) 的短半轴 b , 最终得到接触区域的压强分布为

$$p(x, y) = \frac{F_n}{\pi b} \operatorname{arch} \left| \sqrt{b^2 \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right)} / x \right| \quad (11)$$

1.2 磨抛去除模型建立

磨抛加工可以描述为单位时间内材料去除深度的变化, Preston 去除理论可以应用于弹性磨抛的材料去除分析。根据 Preston 去除理论, 单位时间内材料去除深度可以描述为修正系数、磨抛工具与工件的接触压力和相对速度之间的乘积, 其表达式如下^[9-11]。

$$\frac{dh}{dt} = k_p p v_r \quad (12)$$

式中, dh/dt 表示单位时间内磨抛工具对工件材料的去除深度; k_p 为 Preston 修正系数, 与磨粒和工件的材料有关, 一般需要根据试验确定; v_r 为磨抛工具在接触点与工件的相对速度, 与磨抛工具在接触点的线速度 v_s 和进给速度 v_f 有关。由于接触区域的变形微小, 可以忽略因弹性变形对线速度产生的影响。接触区域的各点线速度近似相等, 表达式为

$$v_r = v_s \pm v_f \quad (13)$$

式中, 逆磨时为 $v_s + v_f$, 顺磨时为 $v_s - v_f$ 。

则式 (13) 变为

$$\frac{dh}{dt} = k_p p (v_s \pm v_f) \quad (14)$$

将式 (11) 代入式 (14) 中, 最终得到材料去除模型的表达式为

$$\frac{dh}{dt} = k_p \frac{F_n}{\pi b} \operatorname{arch} \left| \sqrt{b^2 \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right)} / x \right| (v_s \pm v_f) \quad (15)$$

2 接触状态仿真分析

2.1 有限元接触模型

根据实际加工过程中磨抛轮和叶片的几何尺寸, 在 Abaqus 软件中

建立对应的仿真模型, 其中磨抛轮直径 50 mm、长 30 mm。分析磨抛前后叶尖顶角形貌的变化过程, 将工件尺寸设为直角边 15 mm、长 50 mm 的三棱柱, 接触区域采用半径 0.07 mm 的圆角接触, 网格设置 0.01 mm, 模型如图 3 所示。

定义工具及工件之间相应的接触关系, 将工件设置为完全固定约束。在实际加工过程中, 磨抛轮与叶尖接触时, 由于接触力的作用而产生弹性变形。在有限元分析中, 根据磨抛过程中磨抛轮在不同接触力作用下产生的弹性变形对工具施加对应的接触力。磨抛轮的基体材料为聚酯纤维, 表面通过粘结剂均匀地粘接碳化硅磨料。碳化硅磨料粒度为 P180~P500, 相较于整个磨抛区域的尺度而言, 体积微小, 对磨抛区域的应力分布影响很小, 可以忽略磨粒对接触区域的应力变化影响。材料参数见表 1。

2.2 应力分布

根据上述设定条件, 对模型进行运算仿真, 应力分布结果如图 4 所示。可以看到接触区域压强呈高斯分布, 在顶角接触区域中心压强最大, 并沿边缘区域逐渐呈梯度减小。在 0.3 N 接触力的作用下, 接触区域短半轴、

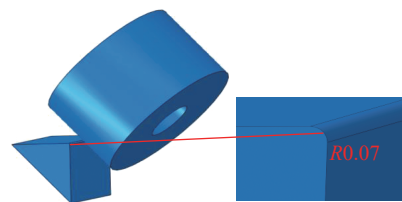


图 3 有限元接触模型
Fig.3 Finite element contact model

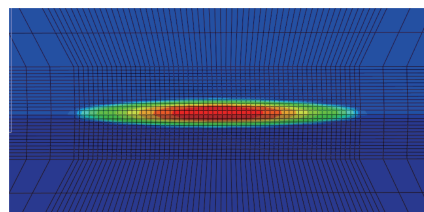
表 1 工具和工件的材料属性
Table 1 Material properties of tools and workpieces

力学性能	磨抛轮基体	叶片
弹性模量/MPa	0.35	110000
泊松比	0.4	0.3
密度/(g/cm ³)	0.012	4.5

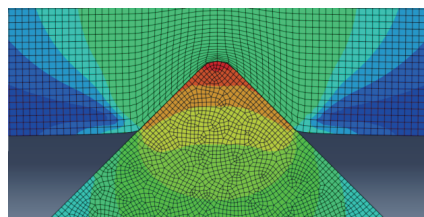
长半轴分别为 0.6 mm 和 6 mm。为进一步研究内部应力分布,沿模型的法向剖面进行仿真,叶尖顶角内部应力分布呈凸弧形分布,在顶角接触点附近应力最大,并随着远离接触点逐渐减小。法向剖面上的应力分布与理论分析结果基本一致,验证了模型的正确性。

2.3 去除率函数分布

由式(15)可知,接触区域的材料去除率与接触压强、材料参数及相对速度有关。根据式(15)对材料去除函数进行仿真,得到的材料去除分布函数如图5所示(接触力 3 N、逆磨、工具转速 8000 r/min、进给速度 16 mm/s)。可以看到,单位时间内的材料去除率呈高斯分布,接触区域的中心材料去除量最大,逐渐靠近磨抛区域的边缘时,材料去除量减小,材料去除分布与接触应力分布模拟结果一致。需要注意的是,理论上在 $x=0$ 附近的材料去除率将变得非常大,因为根据理论分析得出来的结果,接触区域中心应存在一个应力奇点,该点的压强以及材料去除率都趋于无穷大。但实际加工过程中该处的压强及材料去除率都远达不到理论值,总体上的材料去除分布结果与理论分析一致。



(a) 表面应力分布



(b) 内部应力分布

图4 接触区域应力分布

Fig.4 Stress distribution in the contact area

3 磨抛加工试验与分析

3.1 试验条件

试验件选用 TC4 合金叶片,叶尖顶角的初始形貌如图6所示。磨抛工具选用与仿真分析一致的弹性磨抛轮,尺寸与仿真分析相同,如图7所示。表面涂附碳化硅磨粒,并根据磨粒的尺寸准备了不同粒度的磨抛轮。试验设计选用 P180、P320、P500 粒度的磨抛轮进行磨抛,磨粒尺寸分别为 78 μm 、46 μm 、30 μm 。

由于叶尖形貌比较复杂,磨抛试验采用机器人进行加工。机器人产

品型号为 KUKA 的 KR 60-3 机器人,重复定位精度 ± 0.06 mm,有效载荷 60 kg。配备力传感器及主轴进行磨抛加工,传感器选择 ATI-SI-165-15 型六维力/力矩传感器,主轴为 EMS 高速电主轴,额定输出功率 1.9 kW、最高转速 18000 r/min、扭矩 1 N·m,磨抛过程如图8所示。采用不同的工艺参数进行加工,试验结果以磨抛工后的圆角半径和表面粗糙度作为加工质量的衡量标准。加工前后的叶尖圆角形貌使用超深三维显微镜(VHX-1000)以 100 倍放大率进行观察。在叶尖长度上分别选取叶尖

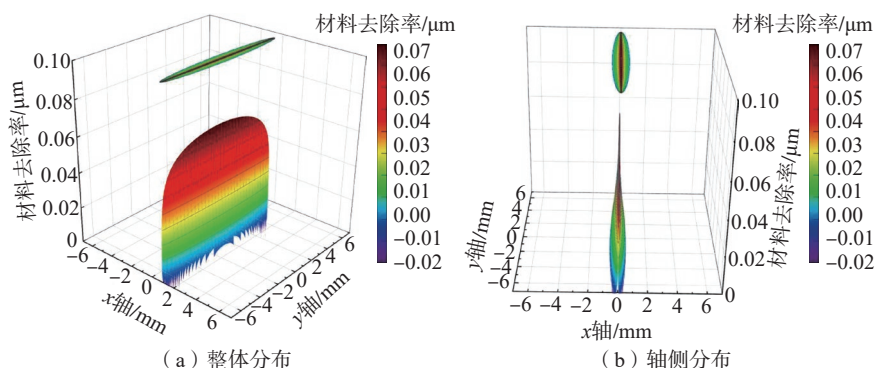


图5 去除函数分布及投影图

Fig.5 Removal function distribution and projection diagram

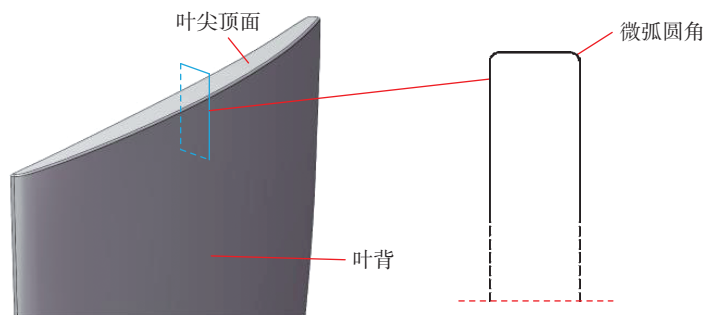


图6 叶尖圆角设计

Fig.6 Blade tip fillet



图7 弹性磨抛轮

Fig.7 Elastic grinding wheel

两端和中心 3 个点测量该位置的圆角半径,计算 3 个半径的平均值并记录试验数据。表面粗糙度采用粗糙度仪进行测量,同样选取叶尖两端和中心 3 个位置进行测量。将粗糙度仪平行放置在叶尖长度方向,测量一定距离内的粗糙度值并记录试验数据。叶尖测量点位置如图 9 所示。

3.2 试验结果与分析

磨抛加工试验选择 4 个工艺参数,每个工艺参数选择 3 个水平。接触力选择 0.5 N、1.0 N、1.5 N,工具转速选择 6000 r/min、7000 r/min 和 8000 r/min,进给速度选择 8 mm/s、12 mm/s 和 16 mm/s,磨粒粒度选择 P180、P320 及 P500。共进行了 12 组试验,叶尖圆角形貌的测量结果如表 2 所示。

将上述试验结果绘制成点线图,结果如图 10 所示。从图 10 (a) 可以看到,圆角半径的大小随着接触力



图 8 机器人自动磨抛叶尖圆角

Fig.8 Robot automatic grinding blade tip

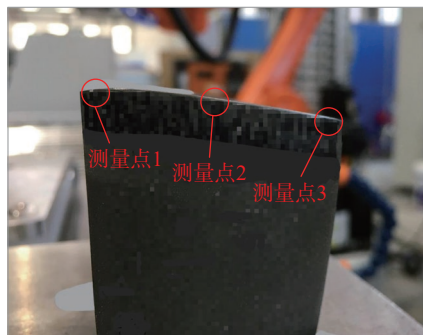
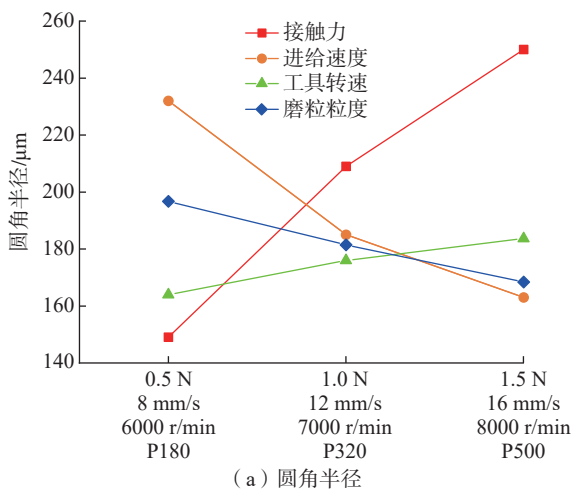


图 9 叶尖测量位置

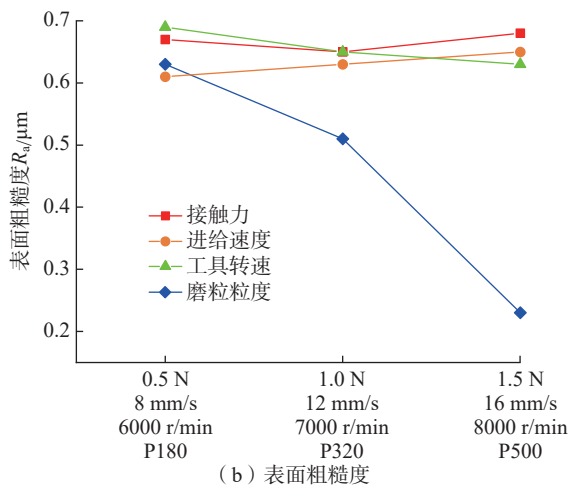
Fig.9 Blade tip measurement position

表 2 试验结果
Table 2 Experiment results

接触力 F_t/N	进给速度 $v_f/(mm/s)$	工具转速 $n/(r/min)$	磨粒粒度	圆角半径 $r/\mu m$	表面粗糙度 $R_a/\mu m$
0.5	12	7000	P180	149	0.67
1.0	12	7000	P180	209	0.65
1.5	12	7000	P180	250	0.68
1.0	8	7000	P180	242	0.61
1.0	12	7000	P180	185	0.63
1.0	16	7000	P180	163	0.65
1.0	12	6000	P180	157	0.69
1.0	12	7000	P180	181	0.65
1.0	12	8000	P180	195	0.63
1.0	12	7000	P180	197	0.63
1.0	12	7000	P320	183	0.56
1.0	12	7000	P500	171	0.23



(a) 圆角半径



(b) 表面粗糙度

图 10 工艺参数对圆角半径和表面粗糙度的影响规律

Fig.10 Influence of process parameters on fillet radius and surface roughness

和工具转速的增大而增大,随着进给速度和磨粒粒度的增大而减小。接触力对磨抛后叶尖圆角半径的影响最为显著,进给速度的影响程度小于接触力;工具转速以及磨粒粒度对圆角半径的影响较小。从图 10(b)可以看出,接触力、进给速度、工具转速对表面粗糙度的影响规律并不明显,磨粒粒度对表面粗糙度的影响规律较为显著;磨抛后的叶尖表面粗糙度随着磨粒粒度的增大而减小。

3.3 试验验证

采用接触力 1.0 N、进给速度 12 mm/s、工具转速 6000 r/min 以及磨粒粒度 P500 的工艺参数对叶尖进行多次重复磨抛,并采用粗糙度仪和超景深电子显微镜进行粗糙度测量和 3D 形貌扫描。部分测量结果如图 11~13 所示。从图 12 可以观察到,叶尖圆角半径由初始的 67~85 μm 增大至 153~166 μm 。采用该组工艺参数进行多次磨抛后圆角半径稳定在 151~167 μm 之间,浮动偏差 $\pm 16 \mu\text{m}$ 。磨抛后的表面粗糙度稳定在 $R_a 0.20\sim 0.28 \mu\text{m}$ (图 13)。经多次试验验证,采用相同工艺参数磨抛的叶尖圆角形貌及表面质量稳定,能够实现可控加工。

4 结论

(1) 采用弹性接触理论对磨抛轮与叶尖的接触状态进行了分析,并将分析后的应力分布结果代入 Preston 材料去除方程。对叶尖与磨抛轮的接触状态进行了静力学仿真分析,对 Perston 的最终表达式进行了函数仿真分析。仿真结果与理论分析结果的分布趋势基本吻合,验证了理论分析的正确性。

(2) 采用不同的工艺参数进行了磨抛加工试验,以加工后的圆角半径和表面粗糙度作为衡量标准。试验结果显示圆角半径大小与接触力、工具转速的水平呈正相关,与进给速度、磨粒粒度的水平呈负相关。接触力、进给速度和工具转速对表面粗糙

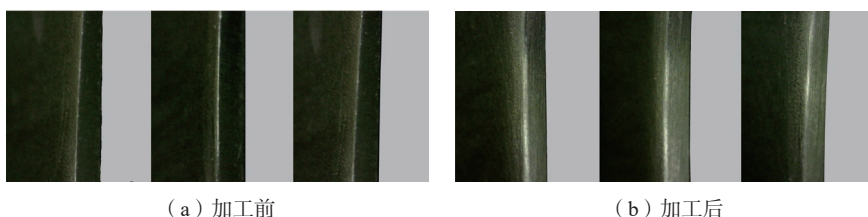


图 11 磨抛前后叶尖形貌
Fig.11 Morphological comparison before and after grinding

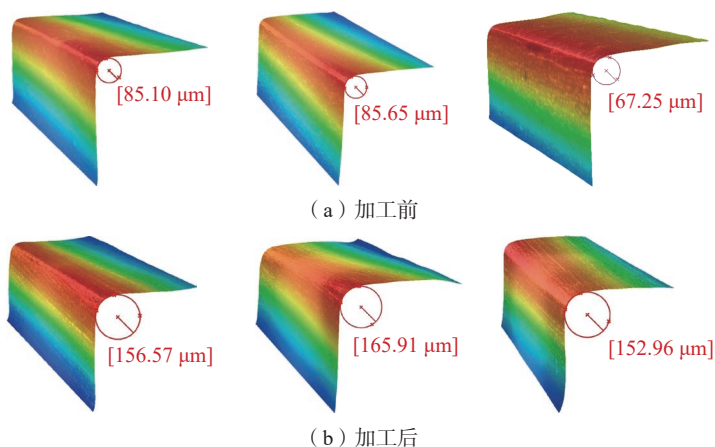


图 12 磨抛前后叶尖圆角半径
Fig.12 Blade tip fillet radius before and after grinding



图 13 磨抛后叶尖表面粗糙度
Fig.13 Surface roughness of the leaf tip after grinding

度的影响不显著,磨粒粒度的增加使表面粗糙度显著下降。

(3) 采用相同的工艺参数进行了多组磨抛加工试验,结果显示叶尖圆角半径变化稳定在 16 μm 范围内,表面粗糙度稳定在 $R_a 0.20\sim 0.28 \mu\text{m}$ 。采用该加工方法对叶尖圆角进行磨抛加工具有较好的可控性,叶尖加工质量一致性良好。

参考文献

[1] 张同桐,何奕为,党冰洁,等.基于 Solidworks软件的闭式叶轮强度分析[J]. 风机技术, 2017, 59(2): 43-47.
ZHANG Tongtong, HE Yiwei, DANG Bingjie, et al. Strength analysis on a shrouded impeller based on solidworks[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2017, 59(2): 43-47.
[2] 高丽敏,王浩浩,赵磊,等.叶尖单侧倒圆对扩压叶栅叶顶间隙流动的影响[J]. 航

空动力学报, 2020, 35(9): 1927–1935.

GAO Limin, WANG Haohao, ZHAO Lei, et al. Effect of unilateral blade tip fillet structure on blade tip clearance flow of compressor cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1927–1935.

[3] KUMAR P M, HALDER P, SAMAD A. RADIUS edge blade tip for a wider operating range in wells turbine[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(3): 2663–2676.

[4] AMERI A A, BUNKER R S. Heat transfer and flow on the first-stage blade tip of a power generation gas turbine: Part 2—Simulation results[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 272–277.

[5] 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): 1353–1361.

[6] 郑焕青. 微发泡聚氨酯弹性磨具的性能研究[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(12): 108–110.

ZHENG Huanqing. Research on the performance of micro-foamed polyurethane elastic abrasives[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50(12): 108–110.

[7] (德) 瓦伦丁L. 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 李强, 雒建斌, 译. 北京: 清华大学出版社, 2011.

VALENTIN L. Popov. Contact mechanics and friction physical principles and applications[M]. LI Qiang, LUO Jianbin, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.

[8] CIAVARELLA M, HILLS D A,

MONNO G. Contact problems for a wedge with rounded apex[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998, 40(10): 977–988.

[9] PRESTON F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. Intermetallics, 2005, 13(9): 959–964.

[10] 郭磊, 王家庆, 明子航, 等. 基于弹性基体磨具的3D打印高温合金叶片磨抛试验[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 43–54.

GUO Lei, WANG Jiaqing, MING Zihang, et al. Grinding and polishing test of 3D-printed superalloy blade based on elastic-matrix abrasive tool[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 43–54.

[11] TONG X, WU X, ZHANG F, et al. Mechanism and parameter optimization in grinding and polishing of M300 steel by an elastic abrasive[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(3): E340.

Research on Rounding for Blade Tip Fillet With Elastic Grinding Tool

TIAN Fengjie¹, QI Zijian¹, ZHANG Yanzhi¹, LI Lun²

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] To achieve the automated grinding and polishing of the blade tip fillet in an aero-engine blade, a study on the micro-arc fillet grinding and polishing process based on elastic grinding tools was conducted, and a highly controllable method for machining the micro-arc fillet of the blade tip was proposed. An elastic grinding and polishing wheel with polyester fiber as the base material was employed. By leveraging the characteristic of elastic deformation of the grinding and polishing wheel during the machining process, the abrasive coated on the surface of the base material was used to grind and polish the blade tip apex angle into a micro-radius fillet. Based on the elastic contact theory and the Preston removal theory, the theoretical contact model and material removal model of the grinding and polishing wheel and the blade tip apex angle under the machining state were established. The Abaqus software was utilized to perform a simulation analysis of the stress in the contact region of the model and to simulate the removal distribution function. Theory proves that through the adaptive enveloping contact deformation between the elastic grinding and polishing wheel and the blade tip apex angle, a “micro-surface contact cutting” was formed between the machining region and the grinding and polishing wheel, enabling the machining of a micro-radius arc fillet. The fillet grinding and polishing experiment of the blade tip apex angle was carried out to verify the feasibility and controllability of achieving the micro-arc fillet machining. The results showed that the adaptive enveloping deformation of the elastic grinding and polishing wheel led to an arc-shaped stress distribution in the contact region of the blade tip, and the abrasive coated on the base material could effectively grind and polish to achieve the fillet machining. This machining method effectively realized the automated machining of the micro-arc fillet of the blade tip, with good consistency in dimensional accuracy and surface quality. The roughness R_a was stable between 0.20 μm and 0.28 μm , and the variation in the fillet radius was stable within a range of 16 μm .

Keywords: Elastic grinding; Aero-engine blade; Blade tip; Micro-radius fillet; Process parameters

(责编 七七)