

砂布轮抛光航空发动机叶片温度仿真与试验研究

鲜超^{1,3*} 辛红敏^{2,3} 代辉² 程清思²

1.湖北文理学院机械工程学院,襄阳,441053

2.湖北文理学院汽车与交通工程学院,襄阳,441053

3.西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室,西安,710072

摘要:在 ANSYS 软件中使用矩形热源加载的方法仿真得到了砂布轮抛光叶片过程瞬时温度场,研究了抛光过程中叶片表面和沿叶片厚度方向的温度分布,并探究了工艺参数对抛光温度的影响规律。结果表明:随着抛光加工的进行,抛光温度分布逐渐趋于稳定,当抛光温度趋于稳定时,叶片已加工部分在不同深度处的温度值趋于一致,正在加工部分的温度沿着深度方向不断减小;抛光温度梯度从正在加工的接触区域向已加工区域逐渐递减;抛光温度随主轴转速的增加而升高,进给速度对抛光温度的影响并不明显,抛光温度与切向抛光力正相关。将测量温度值与仿真温度值进行比较,偏差率不超过 10%,表明两者具有良好的一致性,仿真准确性较高。

关键词:航空发动机叶片;砂布轮;抛光温度;工艺参数;影响规律

中图分类号: TG580.14; V232.4

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and Experimental Study of Temperature for Polishing Aero-engine Blades with Abrasive Cloth Wheel

XIAN Chao^{1,3*} XIN Hongmin^{2,3} DAI Hui² CHENG Qingsi²

1.College of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei, 441053

2.College of Automotive and Traffic Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei, 441053

3.Key Laboratory of Aero-engine High Performance Manufacturing, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072

Abstract: ANSYS software was used to simulate the instantaneous temperature fields in the polishing processes with abrasive cloth wheel using a rectangular heat source loading method. The temperature distribution on the blade surfaces and along the blade thickness direction in the polishing processes was studied, and the influences of processing parameters on the polishing temperature was explored. The results show that as the polishing process progresses, the polishing temperature distribution gradually stabilizes. When the polishing temperature stabilizes, the temperature values of the machined parts of the blade at different depths tend to be consistent, while the temperature of the machining parts decreases continuously along the depth direction; the polishing temperature gradient gradually decreases from the contact area being machined to the machined area; the polishing temperature increases with the increase of spindle speed, the effects of feed speed on the polishing temperature are not significant and the polishing temperature is positively correlated with the tangential polishing forces; the deviation rates between the measured and the simulated temperature values are not more than 10%, indicating that the good consistency and high accuracy of the simulation.

Key words: aero-engine blade; abrasive cloth wheel; polishing temperature; processing parameter; influence law

0 引言

在磨削和抛光过程中,温度过高引起的表面热损伤会降低零件的耐磨性,增加应力腐蚀的敏感性,降低疲劳抗力,从而降低零件的使用寿命和

工作可靠性。磨削温度越高,磨粒越容易从磨具上脱落,降低磨具的加工效果,降低加工质量和精度。因此,研究磨削和抛光时工件的温度分布和工艺参数对磨削温度的影响规律,对磨削和抛光温度的控制具有重要的现实意义。

理论求解抛光温度场计算复杂,对于具有复杂几何形状和非线性特征参数的研究对象,很难

收稿日期:2024-04-22

基金项目:国家科技重大专项(2015ZX04001003);国家自然科学基金(51675439)

获得解析解,甚至无法求解。测量法测量抛光温度成本高,并且只能测量某个区域的温度值,无法反映整体温度分布,但是通过数值模拟可以很快得到整个温度场的分布结果。鉴于上述原因,计算机数值模拟技术在研究抛光过程温度场方面具有很大的优势。

JAEGER^[1]在1942年提出了移动热源模型,他认为,在磨削过程中工件和磨具之间的接触区域是一个矩形热源,它以匀速移动。基于这一假设,可以通过分析方法获得工件温度场分布,从而为磨削温度的理论求解和仿真奠定基础。贝季瑶^[2]和SNOEY^[3]认为矩形热源与实际情况有一定偏差,相继提出了三角形热源分布假设。后来, JIN等^[4-5]提出了倾斜运动面热源模型和圆弧面热源模型。张磊^[6]对比了矩形热源模型、直角三角形热源模型、等腰三角形热源模型、梯形热源模型和矩三角形热源模型,提出了热源分布综合模型。其他学者还提出了抛物线热源模型^[7]、椭圆热源模型^[8]和瑞利热源模型^[8]等。

近几年,为了更加符合真实情况,研究人员相继建立了新的热源模型。LIU等^[9]建立了一种基于随机晶粒的磨削表面温度场分布模型。YANG等^[10]基于移动点热源理论、齿轮成形磨削几何模型和磨粒特性参数,提出了一种高阶函数曲线移动热源模型。GRIMMERT等^[11]采用优化方法和温度匹配法对蠕变进给磨削过程的热通量分布和热分配进行了校准。对于杯形砂轮磨抛风力涡轮叶片,李晓强^[12]将热源形状与热流分布紧密结合,在圆柱坐标系中建立了周向和径向具有不同函数分布的非均匀热源模型。

还有一些学者进行了曲面磨削的温度场仿真研究。GUO等^[13]进行了蜗轮蜗杆运动热载荷作用下齿轮磨削温度场的有限元仿真,依据仿真结果探讨了磨削工艺参数对磨削温度的影响规律。吴少洋^[14]针对外圆磨削建立了磨具与工件的二维有限元模型,在不同的磨削工艺参数下进行了磨削力、磨削温度、工件表面粗糙度和工件表面残余应力的有限元仿真。孙坤^[15]借助ANSYS软件分别使用矩形热源和三角形热源仿真得到了高速列车轴箱轴承内外套圈滚道磨削温度场,探讨了磨削参数与轴承套圈温度场的定性关系。王小军^[16]提出了磨削风电叶片曲面的热源模型,借助MATLAB软件求解得到了周向和轴向磨削的热流密度分布模型,使用ANSYS仿真得到了不同磨削工艺参数下的温度场,探讨了最高磨削温度随磨削参数的变化规律。金光迪^[17]分析了磨粒

和工件之间的相互作用,建立了磨削轴承外圈滚道磨削力模型、总热流密度模型以及传入工件的热流密度模型,然后借助ABAQUS软件使用三角形热源进行了磨削温度场仿真,研究了磨削工艺参数对磨削温度的影响规律。

还有学者研究了不同磨削方式对磨削温度场的影响。YI等^[18]对TC4钛合金材料的间歇进给高速磨削过程进行了有限元模拟,得到了不同磨削工艺参数下工件的瞬时温度场分布。李厦等^[19]分别对普通缓进给磨削和超声辅助缓进给磨削两种磨削方式的磨削温度进行了有限元仿真和试验研究。

还有一些学者采用其他仿真方法进行了磨削温度的研究。CHEN等^[20]建立了一种新的三维磨削温度场有限差分法,并使用该方法进行了磨削温度场仿真,同时还探讨了热源类型、空间步长和对流传热系数对磨削温度场的影响规律。赵玲刚^[21]借助分子动力学法进行了氮化硅陶瓷磨削温度场的仿真,并依据仿真结果研究了磨削参数对磨削温度的影响规律。

整体叶盘经过精加工后,其表面粗糙度不能满足工程要求,还需要进行抛光以降低表面粗糙度。西北工业大学提出了一种用砂布轮抛光整体叶盘的方法^[22-27],并对抛光过程进行了研究。砂布轮作为一种磨具,体积小,可以深入整体叶盘叶片之间的狭窄通道进行抛光,因此路径规划简单。此外,当砂布轮高速旋转时,砂布轮的每个砂带叶片都会因离心力而沿径向展开,砂布轮的半径会变大,从而转变为柔性磨具,实现柔性抛光,柔性抛光的抛光力小,抛光温度低,可以避免表面烧伤,但抛光热依然会对表面性能产生影响。

由以上分析可知,磨削和抛光温度的仿真研究集中在更加准确的热源分布模型以提高仿真准确性、大尺寸曲面磨削温度仿真研究、特殊磨削方式磨削温度仿真研究、磨削温度的其他非有限元仿真方法的探究工作。叶片为薄壁件,表面是复杂曲面,目前大多数研究都集中在各方向尺寸较大的曲面零件磨削温度场的模拟上。本文对砂布轮抛光薄壁叶片曲面的温度场进行了仿真,探讨了抛光过程中叶片表面和沿叶片厚度方向的温度分布,并讨论了工艺参数对抛光温度的影响规律。

1 叶片抛光路径的确定

抛光路径一般包括横向抛光、纵向抛光、环形抛光、螺旋抛光等抛光轨迹,如图1所示。横向抛光的抛光轨迹曲率变化相对平缓,并且磨具和叶

片之间的接触相对充分,单位时间内横向抛光的抛光面积大于纵向抛光的抛光面积。环形抛光和螺旋抛光在叶片前缘和后缘的抛光轨迹曲率上变化迅速,容易造成损坏,因此,前缘和后缘一般是纵向抛光,这样可以保证抛光轨迹的平滑变化,保证抛光质量和效率。由此,一般采用横向抛光法对叶片叶盆表面和叶片背面进行抛光,采用纵向抛光法对前缘和后缘进行抛光。本文仅研究叶盆表面和叶片背面的抛光。

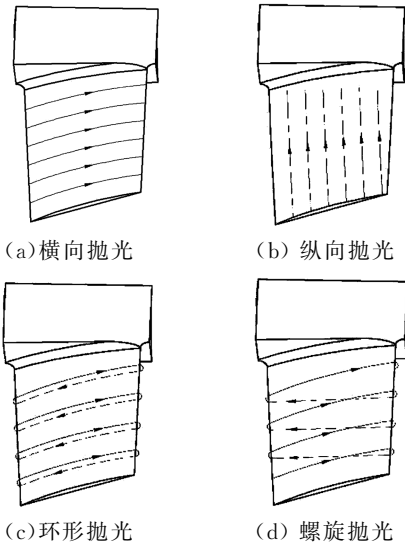


图 1 抛光路径

Fig.1 Polishing path

叶片背面采用砂布轮进行横向抛光,如图 2 所示。黑色箭头曲线是横向抛光轨迹,砂布轮沿着抛光轨迹从位置 A 移动到位置 B,这是一次抛光。位置 A 表示砂布轮刚刚与叶片接触,位置 B 表示砂布轮即将与叶片分离。横向抛光试验如图 3 所示。从测试中可以获得抛光力信号和红外热图像。

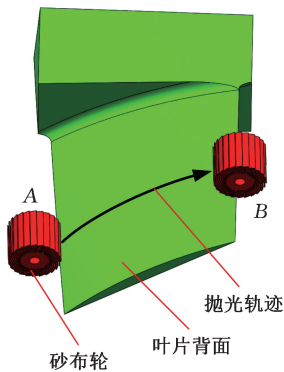


图 2 砂布轮横向抛光叶片

Fig.2 Polishing blade transversely with abrasive cloth wheel

2 热源分布模型的确定

JAEGER^[1]提出的矩形热源分布模型如图 4a 所示。贝季瑶^[2]和 SNOEY^[3]提出的三角形热

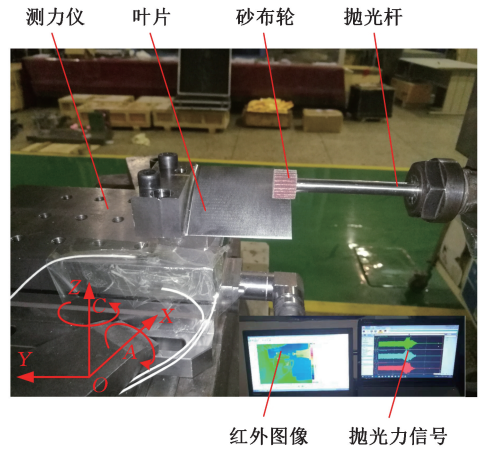
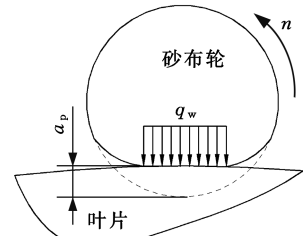


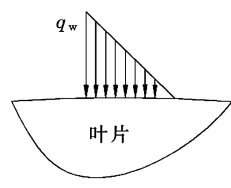
图 3 现场试验图

Fig.3 Field test

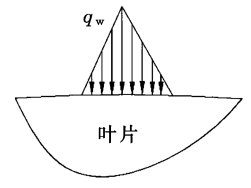
源分布模型如图 4b 所示。此外,一些学者还提出了等腰三角形热源分布模型、矩形-三角形热源分布模型、梯形热源分布模型、综合热源分布模型和抛物线形热源分布模型等,如图 4 所示,上述分布模型均具有一定的理论价值。首先,使用砂布轮抛光叶片材料时去除厚度为几十微米,去除量很小,可以认为,加工表面与未加工表面重合,因此



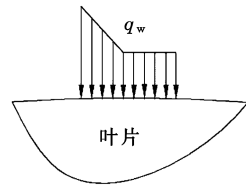
(a) 矩形热源模型



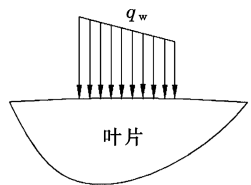
(b) 三角形热源模型



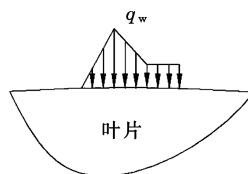
(c) 等腰三角形热源模型



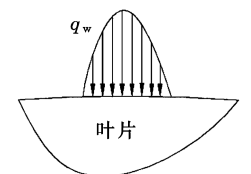
(d) 矩形-三角形热源模型



(e) 梯形热源模型



(f) 综合热源模型



(g) 抛物线形热源模型

图 4 常见热源模型

Fig.4 Common heat source models

矩形热源分布模型更符合实际情况。其次,研究表明,不同热源分布模型仿真得到的工件表面温升速率、冷却速率和最高温度存在一定差异,但差异较小,温度变化规律一致^[6]。因此,本文选择矩形热源分布模型来仿真砂布轮抛光叶片的抛光温度场。

3 仿真流程

仿真过程中要确定的参数包括切向抛光力、砂布轮的线速度、接触弧长、砂布轮宽度、进给速度、传入工件的热量分配系数以及工件的密度、质量热容和热导率等。切向抛光力和接触弧长需要通过试验进行测量,参考文献[24-26]中接触弧长的测量方法,如图2所示。抛光轨迹为由位置A到位置B,位置A表示百叶轮刚开始接触叶片,此时时刻记为 t_1 ;当百叶轮移动到图2中的位置B时,此时标记为 t_2 ,表示百叶轮即将和叶片分离。从 t_1 到 t_2 ,总的抛光接触轨迹是接触弧长和抛光轨迹长的总和,其中 t_1 、 t_2 可以通过抛光力时域信号获得,如图5所示。因此,抛光过程中砂轮与叶片接触弧长 l 的计算公式为

$$l = v_w(t_2 - t_1) - h \quad (1)$$

式中: v_w 为磨具进给速度; h 为抛光轨迹长度。

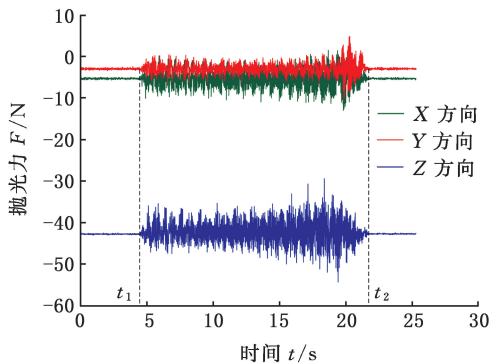


图5 抛光力信号

Fig.5 Polishing force signal

砂布轮的线速度可以通过主轴转速和砂布轮半径来获得,砂布轮的宽度和进给速度是已知量。热量分配系数可以参考 ROWE^[28]的热量分配系数模型,其表达式为

$$R_w = [1 + \frac{0.974\alpha_g}{\sqrt{r_0 v_s (\alpha \rho c)}}]^{-1} \quad (2)$$

式中: v_s 为百叶轮线速度,m/s; α_g 为磨粒热导率,W/(m·K); r_0 为磨料颗粒的有效半径; α 为工件热导率,W/(m·K); c 为工件质量热容,J/(kg·K); ρ 为工件密度,kg/m³。

本文采用有限元软件 ANSYS 进行抛光温度场仿真,航空发动机叶片表面是B样条曲面,但其曲率相对较小,为了简化仿真计算过程,将其简化为圆柱面,通过这种方式,可以在圆柱坐标系中

进行求解。

本文抛光叶片温度场的仿真研究是基于移动热源法开展的,并未涉及磨具磨粒与工件之间的相互作用,同时假定叶片曲率变化较小,将叶片模型简化为了圆柱面,叶片与磨具之间的接触形状为近似矩形,可以使用矩形移动热源法进行抛光温度仿真。而当叶片曲率变化较大时,磨具与叶片的接触形状不能再简化为矩形,接触形状更加复杂,需要建立更加准确的接触区域几何特征模型;同时在接触区域内热流密度也不再是均匀的,矩形移动热源不再适用,需要探究更加准确的热源模型。由以上分析可知,当叶片曲率变化较小时,本文将叶片模型简化为了圆柱面,将叶片与磨具之间的接触形状近似为矩形,实际上由于叶片表面各个方向的曲率导致接触区域形状不再是矩形,实际接触面积更小,接触区域热流密度也不再是均匀的,可能出现局部热载荷非常高的现象,所以仿真的温度要低于实际抛光温度。

工件材料为 TC4,其相关材料参数如表1所示。工件材料的尺寸为:长50 mm、宽50 mm、厚1 mm。沿长度和宽度方向网格尺寸为0.5 mm,沿厚度方向网格尺寸为0.1 mm,因长度和宽度方向尺寸较大,厚度方向尺寸较小,因此,为了缩短求解时间,长度方向和宽度方向网格尺寸设置较大,厚度方向尺寸设置较小,建立的叶片网格模型如图6所示。边界条件为:工件内部及表面无热源,设置工件初始温度为19.5℃(与室温一致)。

表1 TC4在20℃时物理性能参数

Tab.1 Physical performance parameters of TC4 at 20℃

性能参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	4450
质量热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	612
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	5.44
弹性模量/Pa	1.09×10 ¹¹
泊松比	0.3
膨胀系数/K ⁻¹	8.6×10 ⁻⁶

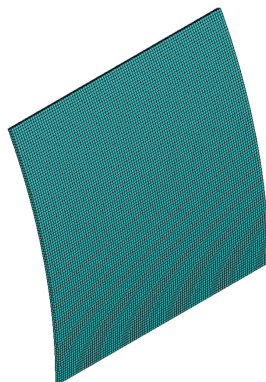


图6 叶片网格模型

Fig.6 Blade grid model

在抛光过程中,抛光区域的热源在加工表面沿着进给方向移动,在仿真中,热流载荷直接加载到节点上。为了模拟热源的移动,在热源的移动方向上选择不同的节点进行加载,并进行瞬态求解。在小时间步长的情况下,可以获得近似连续热源的加载过程,为了准确模拟热源的连续运动,可以通过循环加载依次选择热源移动方向上的不同节点。ANSYS 软件可以通过 APDL 命令流中的 DO 循环语句实现循环加载。仿真过程如图 7 所示。

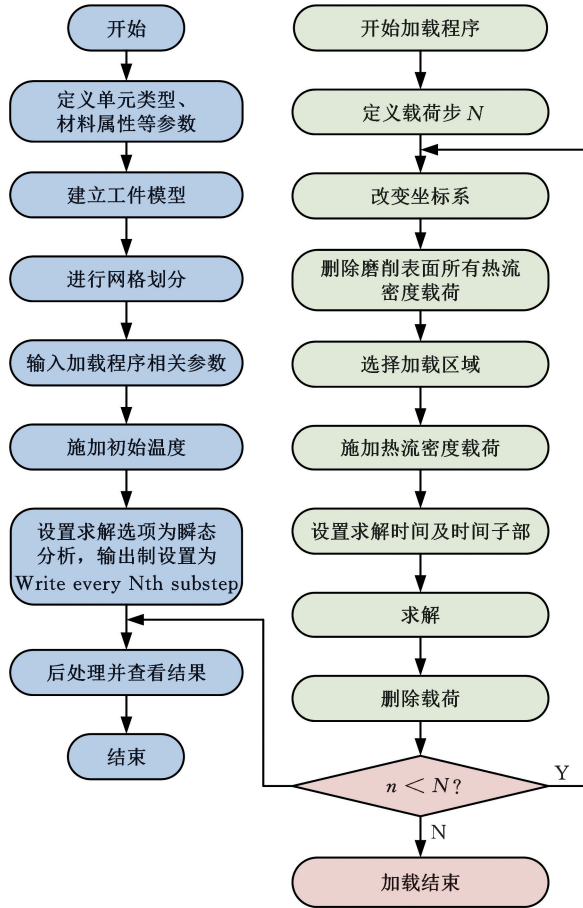


图 7 仿真流程

Fig.7 Simulation process

4 仿真结果与讨论

4.1 仿真结果与分析

仿真工艺参数为:主轴转速 $n = 4000 \text{ r/min}$, 砂布轮进给速度 $v_w = 100 \text{ mm/min}$, 砂布轮磨粒数 $P = 240$ 目, 砂布轮压缩量 $a_p = 1.4 \text{ mm}$ 。模拟抛光过程中叶片的温度场, 仿真过程分为 50 个载荷步, 第 1、第 10、第 20、第 25、第 30、第 40 和第 50 载荷步仿真获得的表面温度和对称截面温度分布结果分别如图 8~图 14 所示。

图 15 显示了不同载荷步下叶片表面的温度分布。在抛光的初始阶段, 抛光区域的温度较低,

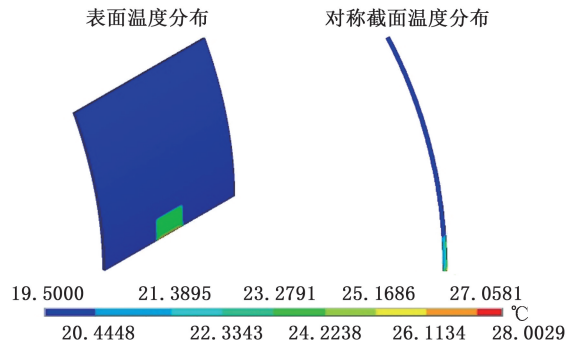


图 8 第 1 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.8 Temperature distribution of surface and symmetric section at the first load step

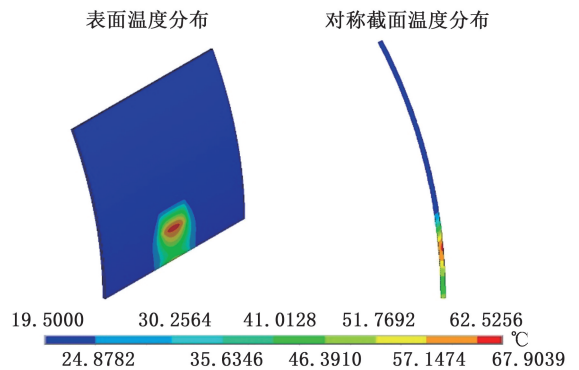


图 9 第 10 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.9 Temperature distribution of surface and symmetric section at the tenth load step

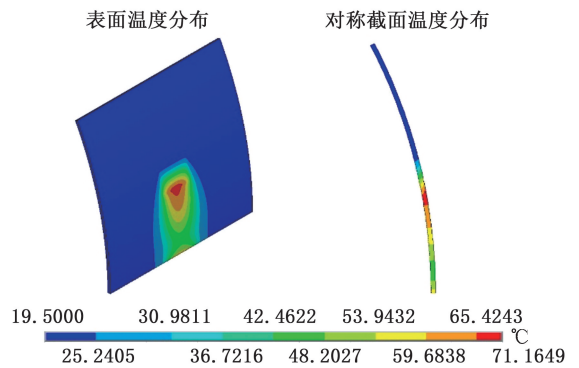


图 10 第 20 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.10 Temperature distribution of surface and symmetric section at the 20th load step

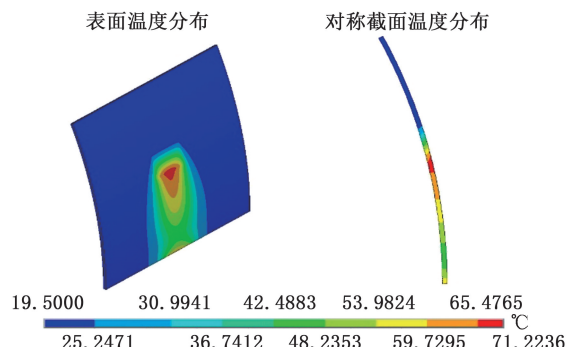


图 11 第 25 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.11 Temperature distribution of surface and symmetric section at the 25th load step

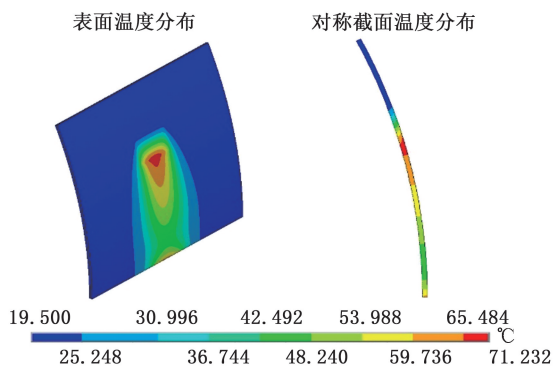


图 12 第 30 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.12 Temperature distribution of surface and symmetric section at the 30th load step

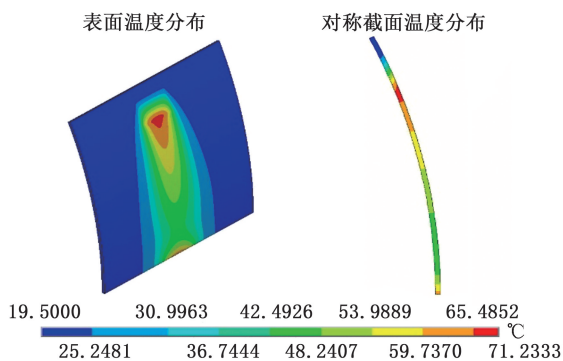


图 13 第 40 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.13 Temperature distribution of surface and symmetric section at the 40th load step

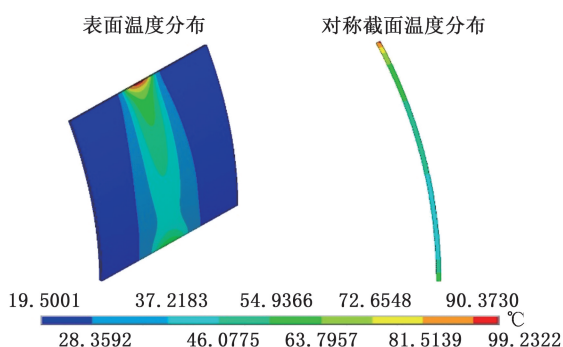


图 14 第 50 载荷步表面温度和对称截面温度分布

Fig.14 Temperature distribution of surface and symmetric section at the 50th load step

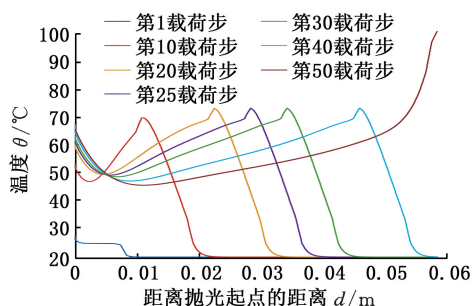


图 15 不同载荷步下叶片表面温度分布

Fig.15 Temperature distribution on blade surface at different load steps

随着加工的进行,温度逐渐升高。从第 20 载荷步开始,抛光温度分布逐渐稳定,稳态下的最高温度约为 71.23 °C。随着加工的继续进行,当砂布轮到达叶片边缘时,大量的热量逐渐传递到边缘,导致边缘温度急剧上升,并且高于稳定状态下的最高温度。

由图 15 可以看出,抛光温度分布从第 20 个载荷步开始逐渐趋于稳定,故选择第 25 个载荷步分析叶片横截面上的温度分布,并绘制出距离叶片表面不同深度的温度分布,如图 16 所示。从图 16 中可以看出,当抛光温度趋于稳定时,叶片已加工部分在不同深度处的温度值趋于一致,因为在没有热源的情况下经过一段时间热传递后,沿深度方向的温度分布已经达到均匀。抛光区域温度沿深度方向不断下降,这是因为抛光区域持续产生热量,叶片表面的温度首先上升,导致表面和表面下方的叶片材料之间产生温差,然后热量将从工件表面传递到工件内部,温度首先在靠近工件表面的地方升高,然后在远离工件表面的地方上升。

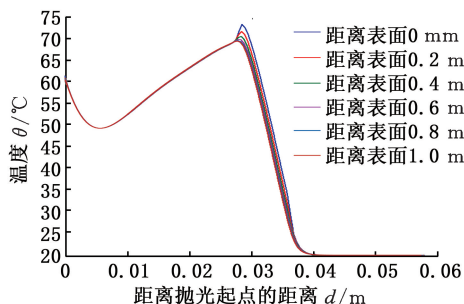


图 16 第 25 个载荷步距离叶片表面不同深度处温度分布

Fig.16 Temperature distribution at different depths from the blade surface at the 25th load step

由图 8~图 15 可知,在给定的工艺参数下,工件抛光温度可达约 71.23 °C,而边缘抛光温度可达 100 °C 以上。由以上分析可知,本文磨具是一个柔性磨具,工件表面为自由曲面,仿真时将工件简化为圆柱表面,接触区域形状简化为矩形,而实际接触面积更小,接触区域热流密度也不再是均匀的,可能出现局部热载荷非常高的现象,瞬时温度可能达到几百摄氏度,边缘抛光温度也可能达到数百摄氏度,瞬时高温和边缘抛光温度可能对工件的残余应力分布产生影响,同时高温会影响抛光力,从而引起工件表面产生塑性变形和毛刺,增大表面粗糙度。

4.2 工艺参数对仿真抛光温度的影响

由仿真可知,加工时砂布轮和叶片接触区域

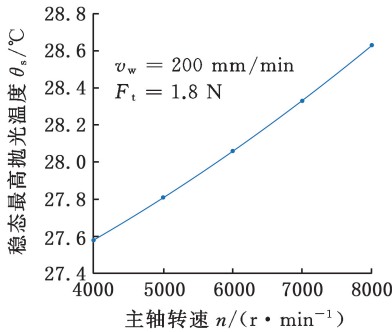
的温度急剧升高,两者接触位置的温度最高。从砂布轮和工件开始接触到正在接触产生的连续热源对已加工过的区域的温度均会造成影响,抛光温度梯度从正在加工的接触区域向已加工过的区域逐渐递减。工件上抛光初始位置边缘的温度也较高,这是由于热量传递到叶片边缘时发生积聚,造成边缘温度升高。

抛光温度仿真依赖的工艺参数包括切向抛光力、砂布轮的线速度(主轴转速)和进给速度,砂布轮压缩量和磨粒目数无法直接在仿真中设置,砂布轮压缩量和磨粒目数变化对抛光温度的影响通过切向抛光力对抛光温度的影响来反映。仿真得到的抛光温度随工艺参数变化规律如图 17 所示。由图 17a 可知,抛光温度随主轴转速的增大而升高,这是由于主轴转速越高,砂布轮的线速度越高,单位时间磨具与工件之间摩擦力做的功越多,产生的热量越多,则抛光温度越高。温度变化量除以主轴转速变化量可以得到主轴转速对温度的影响程度,为 $2.625 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$,影响程度较小。由图 17b 可知,进给速度对抛光温度的

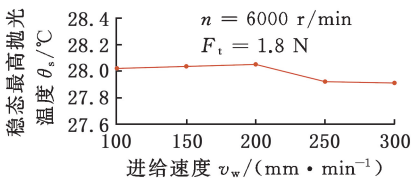
影响并不明显,温度变化量除以进给速度变化量可以得到进给速度对温度的影响程度,为 $5.5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$,影响程度较小。由图 17c 可知,抛光温度与切向抛光力正相关,这是由于切向抛光力越大,单位时间摩擦力做功越多,产生的热量越多,则抛光温度越高,温度变化量除以切向抛光力变化量可以得到切向抛光力对温度的影响程度,为 $2.957 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{N}$,影响程度较大。磨粒目数指的是确定面积的筛网上用于筛选磨粒大小的筛孔数目的多少,目数越大,筛孔数量越多,磨粒直径越小,抛光力越小,所以抛光温度越低;压缩量是指抛光时砂布轮的径向变形量,压缩量越大,抛光力越大,则抛光温度越高。

4.3 试验验证

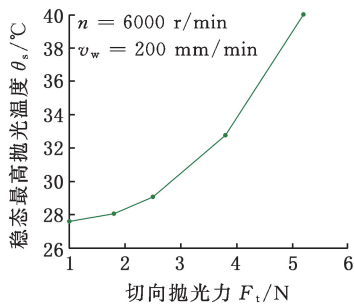
从抛光试验可以看出,当砂布轮到达抛光轨迹中点时,抛光力和温度相对稳定,故选择恰好表示砂布轮到达抛光轨迹中点的第 25 个载荷步进行仿真温度与测量温度的对比分析。当砂布轮到达抛光轨迹中点时,红外热成像检测系统获得的红外热图像见图 18,记录图像中箭头所指点的温度,并按照文献[29]进行修正得到实际温度 θ_m ,记录通过仿真获得的第 25 个载荷步最高温度处附近温度 θ_s ,结果如表 2 所示,温度测量距离为 1 m。试验研究发现,当测量距离在 0.5~3 m 范围内时,测量距离越近,则测得的温度越高,距离越远,则测得的温度值越小,但测量误差在 1 $^\circ\text{C}$ 范围



(a) 主轴转速对抛光温度的影响



(b) 进给速度对抛光温度的影响



(c) 切向抛光力对抛光温度的影响

图 17 抛光温度随工艺参数的变化规律

Fig.17 Variation law of polishing temperature with process parameters

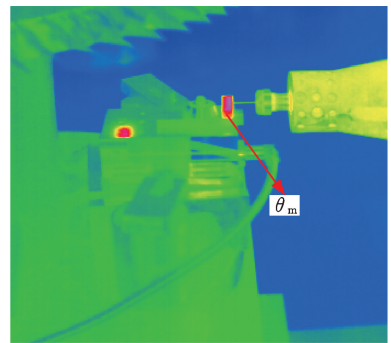


图 18 红外热成像图片

Fig.18 Infrared thermal imaging image

表 2 测量温度和仿真温度

Tab.2 Measured temperature and simulated temperature

序号	$n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p / mm	$v_w / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	P	$\theta_s / ^\circ\text{C}$	$\theta_m / ^\circ\text{C}$
1	8000	1.4	100	240	43.254	39.782
2	4000	1.4	300	240	63.516	59.710
3	4000	0.6	100	600	31.356	28.549
4	8000	0.6	100	600	34.567	32.646
5	4000	1.0	200	400	26.997	27.583
6	8000	1.0	200	400	27.328	28.633
7	6000	1.4	200	400	32.787	30.386
8	6000	1.0	200	240	34.486	32.772

内。仿真值和测量值之间的对比如图 19 所示,可以看出,抛光温度的仿真值和测量值之间的偏差均小于 10%,这表明两者具有较好的一致性,仿真准确性较高。

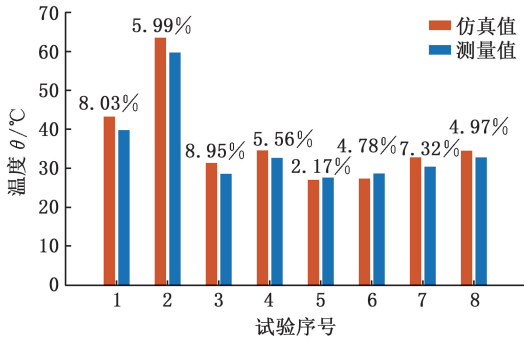


图 19 测量温度和仿真温度对比

Fig.19 Comparison between measured temperature and simulated temperature

5 结论

1)在抛光的初始阶段,抛光区域的温度较低,随着加工的进行,抛光温度逐渐升高,并逐渐趋于稳定,随着加工的继续进行,当砂布轮到达叶片边缘时,大量的热量逐渐传递到边缘,导致边缘温度急剧上升,并且高于稳定状态下的最高温度。当抛光温度趋于稳定时,叶片已加工部分在不同深度处的温度值趋于一致,正在加工部分的温度沿着深度方向不断降低;抛光温度梯度从正在加工的接触区域向已加工过的区域逐渐递减。

2)抛光温度随主轴转速的增大而升高,进给速度对抛光温度的影响并不明显,抛光温度与切向抛光力正相关。

3)当砂布轮到达抛光轨迹中点时,将抛光区域附近的测量温度和仿真温度进行比较,结果发现,两者之间的偏差小于 10%,这表明仿真温度与测量温度一致性较好,仿真精度较高。

4)由以上结论可知,当砂布轮到达叶片边缘时,边缘温度急剧上升,该温度高于稳定状态下的最高温度,导致边缘加工质量和其他位置不一致,所以有必要寻求降低边缘加工温度的方法;再者,切向抛光力对抛光温度影响最明显,而影响抛光力的主要因素为砂布轮压缩量和磨粒目数,所以要选择适当的砂布轮压缩量和磨粒目数。

参考文献:

[1] JEAGER J C. Moving Source of Heat and the Temperature at Sliding Contacts[J]. Proceedings of the Royal Society of New South Wale, 1942, 76:203-224.
[2] 贝季瑶. 磨削温度的分析与研究[J]. 上海交通大学

学报, 1964(3):55-71.

BEI Jiyao. Analysis and Research on Grinding Temperature[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1964(3):57-73.

- [3] SNOEY R. Thermally Induced Damage in Grinding [J]. Annals of the CIRP, 1978, 27(1):571-581.
[4] JIN T, CAI G Q. Analytical Thermal Models of Oblique Moving Heat Source for Deep Grinding and Cutting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(2):185-190.
[5] JIN T, ROWE W B, MCCORMACK D. Temperatures in Deep Grinding of Finite Workpieces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(1):53-59.
[6] 张磊. 单程平面磨削淬硬技术的理论分析和试验研究[D]. 济南:山东大学, 2006.
ZHANG Lei. Study on Mechanism and Experiment of Single-pass Surface Grind-hardening Technology [D]. Jinan:Shandong University, 2006.
[7] 毛聪. 平面磨削温度场及热损伤的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2008.
MAO Cong. The Research on the Temperature Field and Thermal Damage in the Surface Grinding [D]. Changsha:Hunan University, 2008.
[8] WANG X Z, YU T B, SUN X, et al. Study of 3D Grinding Temperature Field Based on Finite Difference Method: Considering Machining Parameters and Energy Partition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84: 915-927.
[9] LIU M Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Analysis of Grain Tribology and Improved Grinding Temperature Model Based on Discrete Heat Source[J]. Tribology International, 2023, 180:108196.
[10] YANG S Y, CHEN W F, NONG S, et al. Temperature Field Modelling in the Form Grinding of Involute Gear Based on High-order Function Moving Heat Source [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81:1028-1039.
[11] GRIMMERT A, PACHNEK F, WIEDERKEHR P. Temperature Modeling of Creep-feed Grinding Processes for Nickel-based Superalloys with Variable Heat Flux Distribution [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, 41: 477-489.
[12] 李晓强. 风电叶片磨削温度场建模与实验研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2019.
LI Xiaoqiang. Modeling and Experimental Research on Grinding Temperature Field of Wind Turbine Blades [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
[13] GUO Z F, YI J, HU X P, et al. Heat Flux Distri-

- bution Model and Transient Temperature Field Analysis in Grinding of Helical Raceway[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(9/10):6497-6506.
- [14] 吴少洋. 18CrNiMo7-6 合金钢外圆及缺口磨削仿真研究与试验验证[D]. 郑州:郑州大学, 2022.
WU Shaoyang. Simulation Study and Experimental Verification of Cylindrical and Notch Grinding of 18CRNIMO7-6 Alloy Steel[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [15] 孙坤. 高速列车轴箱轴承套圈磨削热与残余应力仿真研究[D]. 大连:大连交通大学, 2021.
SUN Kun. Simulation Study on Grinding Heat and Residual Stress of Axle Box Bearing Ring of High Speed Train[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2021.
- [16] 王小军. 机器人打磨风电叶片磨削温度变化规律研究[D]. 天津:河北工业大学, 2020.
WANG Xiaojun. Research on the Temperature Change Law of Robot Grinding of Wind Turbine Blades[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [17] 金光迪. 圆锥滚子轴承外圈滚道磨削加工表面粗糙度预测与温度场有限元仿真[D]. 济南:山东大学, 2023.
JIN Guangdi. Surface Roughness Prediction and Temperature Field Finite Element Simulation of Grinding Outer Ring Raceway of Tapered Roller Bearing[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [18] YI J, ZHOU W, DENG Z H. Experimental Study and Numerical Simulation of the Intermittent Feed High-speed Grinding of TC4 Titanium Alloy[J]. Metals, 2019, 9(7):802.
- [19] 李厦, 王锴霖. 超声振动辅助进给磨削温度场仿真与试验分析[J]. 表面技术, 2018, 47(7):265-269.
LI Xia, WANG Kailin. Simulation and Experimental Analysis of Ultrasonic Vibration Assisted Creep Feed Grinding Temperature Field [J]. Surface Technology, 2018, 47 (7):265-269.
- [20] CHEN H, ZHAO J, DAI Y X, et al. Simulation of 3D Grinding Temperature Field by Using an Improved Finite Difference Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108:3871-3884.
- [21] 赵玲刚. 氮化硅陶瓷磨削温度与表面变质层的仿真与实验[J]. 机械与电子, 2021, 39(10):9-14.
ZHAO Linggang. Simulation and Experiment of Grinding Temperature and Surface Modification Layer of Silicon Nitride Ceramics[J]. Machinery & Electronics, 2021, 39 (10):9-14.
- [22] LIN X J, XIN X P, SHAN X F, et al. Optimal Parameter Ranges of Material Removal Depth of Abrasive Cloth Wheel Polishing Based on Sensitivity Analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 5165-5179.
- [23] WANG Z W, LIN X J, SHI Y Y, et al. Reducing Roughness of Freeform Surface through Tool Orientation Optimization in Multi-axis Polishing of Blisk[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108:917-929.
- [24] XIAN C, SHI Y Y, LIN X J, et al. Experimental Study on Energy Partition of Polishing Aero-engine Blades with Abrasive Cloth Wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5/6):1839-1853.
- [25] XIAN C, SHI Y Y, LIN X J, et al. Roughness Modeling for Polishing an Aero-engine Blade with an Abrasive Cloth Wheel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(8):3353-3361.
- [26] XIAN C, SHI Y Y, LIN X J, et al. Force Modeling for Polishing Aero-engine Blades with Abrasive Cloth Wheels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(11/12):5255-5267.
- [27] XIAN C, SHI Y Y, LIN X J, et al. Modeling Bulk Modulus of Abrasive Cloth Wheel and Polished Surface Roughness for Polishing Blade with Abrasive Cloth Wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128 (11/12):5301-5314.
- [28] ROWE W B. Thermal Analysis of High Efficiency Deep Grinding [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(1):1-19.
- [29] 陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2010.
LU Zifeng. Calibration and the Measurement Error Analysis of Infrared Imaging System for Temperature Measurement [D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics), 2010.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:鲜超*,男,1987年生,讲师。研究方向为整体叶盘的铣削加工、精密磨削和抛光加工。发表论文16篇。

本文引用格式:

鲜超,辛红敏,代辉,等. 砂布轮抛光航空发动机叶片温度仿真与试验研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4):802-810.

XIAN Chao, XIN Hongmin, DAI Hui, et al. Simulation and Experimental Study of Temperature for Polishing Aero-engine Blades with Abrasive Cloth Wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):802-810.