

GH4169 叶片悬臂插磨表面完整性及参数优化研究^{*}

马爽^{1,2}, 李勋¹, 崔伟¹, 苏帅¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;
2. 中航工业北京航空精密机械研究所, 北京 100076)

[摘要] 利用超硬磨料砂轮进行 GH4169 叶片型面的精密磨削加工是提高其几何精度的有效手段。通过对 GH4169 材料进行悬臂插磨试验发现在精磨参数下磨削表面硬度在 44~47HRC 之间, 叶片表面双方向均获得较大的残余压应力, 进给方向上的残余压应力大于线速度方向上的残余压应力, 且磨削参数对磨削表面硬度和残余压应力的影响不显著。在此基础上, 基于磨削表面粗糙度小于 $R_a 0.5 \mu\text{m}$ 的要求, 提出叶片插磨的参数优化原则, 为了降低磨削粗糙度推荐插磨参数: 砂轮线速度 26.8m/s, 进给速度 1000mm/min, 型面磨削残高 $2 \mu\text{m}$; 为了减小磨削力引起叶片的弹性变形所造成的加工误差, 推荐磨削深度为 0.005mm。在推荐参数下所加工叶片的形状精度可达到 $20 \mu\text{m}$ 以内, 磨削表面以下没有明显的拉应力层, 压应力层深度约为 $70 \mu\text{m}$, 最大残余压应力位于表面下 $5 \mu\text{m}$ 处。以上研究为 GH4169 叶片的悬臂插磨工艺提供了一种基于表面完整性的参数优化方法和一组经过优化的精磨参数。

关键词: 叶片; 磨削; 表面完整性; 参数优化; 悬臂; 插磨

Study on Surface Integrity and Parameter Optimization of GH4169 Machined by Cantilever Plunge Grinding

MA Shuang^{1,2}, LI Xun¹, CUI Wei¹, SU Shuai¹

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. AVIC Beijing Precision Engineering Institute Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Grinding GH4169 blades by superhard abrasive wheel is effective for geometric accuracy improvement. The grinding experiment with finish parameters shows that the surface hardness is at 44~47HRC and the residual stresses in both directions are compressive and the value of the feed direction is larger. Both of the hardness and residual stresses is insensitive to parameters. According to this experiment results, the optimization principle and recommended parameters were proposed. On the demand of roughness, the grinding speed adopts 26.8m/s, the feed speed is 1000mm/min, the scallop height is 0.002mm. On the order to decrease the elastic deformation caused by grinding force, the grinding depth adopts 0.005mm. The grinding experiment with recommended parameters shows that the blade shape precision is within $20 \mu\text{m}$. The stresses layer depth is about $70 \mu\text{m}$ while the largest stresses is at $5 \mu\text{m}$ under grinding surface. And there is no significant tensile stress layer. This research provide a parameter optimization method based on surface integrity and a set of optimized grinding parameters for GH4169 blade cantilever grinding.

Keywords: Blade; Grind; Surface integrity; Parameter optimization; Cantilever; Plunge grinding

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.18.102

叶片是航空发动机中最为关键的零件之一, 其绝大多数的失效形式为疲劳断裂, 而叶片型面的表面完整性对单个叶片的疲劳寿命具有非常显著的影响, 进而影响发动机的整体可靠性。美国学者的研究结果证明, 在特定的条件下表面完整性可以使零件的疲劳寿命相差 6 倍以上^[1]。GH4169 材料是航空发动机涡轮叶片和高

压气机叶片最为常用的材料, 其优良的高温性能导致 GH4169 材料的切削加工性能较差^[2]。目前, GH4169 材料叶片以数控铣削为主要加工方式, 但是由于刀具磨损快, 加工过程中易产生颤振从而影响叶片型面的加工精度和表面完整性的进一步提高。

超硬磨料砂轮的高速磨削加工已被证明有利于提高加工精度, 并被国内外学者所重视^[3]。孟凡军、李勋等^[4-5]的研究表明利用悬臂装夹的方式对叶片进行精密磨削加

^{*} 基金项目: 叶片磨削抛光加工单元研究应用 (2013ZX04001051); 涡轮增压内冷却磨削液施加新原理研究 (51105024)。

工的工艺方法能够大幅度提高叶片磨削加工的形状精度,同时悬臂插磨方式的刀轨曲率相对于周磨方式大幅减小,降低了对机床动态性能的要求。但是国内外学者对于表面完整性的研究大多集中于周磨方式^[6-8],在悬臂磨削工艺条件下,针对GH4169叶片材料的高速磨削加工表面完整性的研究涉及较少。

本文在叶片悬臂磨削加工工艺的基础上,利用电镀CBN超硬磨料砂轮对GH4169叶片材料的表面完整性进行了研究,充分考虑薄壁叶片加工精度,提出了GH4169材料的精磨参数优化原则和推荐参数,为GH4169发动机叶片的高精度、高可靠性制造提供前期的试验基础和可行的工艺途径。

1 试验方案及条件

发动机叶片对型面表面加工质量和几何精度都有很严格的要求。表面粗糙度的波谷处容易引起应力集中,产生疲劳裂纹;残余压应力有利于增强疲劳强度,延长疲劳寿命;表面硬度对疲劳寿命也有着显著影响^[9-10]。悬臂插磨方式可以通过多层磨削加工不断修正由于加工过程中材料内部残余应力释放和表面残余应力作用而产生的无规律变形^[4],但无法消除因磨削力引起的叶片弹性变形造成的形状误差^[11],所以必须严格控制磨削力的大小,尽可能地消除磨削力对叶片变形的影响。因此本文将对表面硬度、表面粗糙度、残余应力和磨削力进行研究,综合考虑表面加工质量和叶片加工精度两方面因素,对叶片悬臂磨削的精磨参数进行优化。

试验采用三轴立式磨床;砂轮采用 $\phi 16$ 电镀200# CBN砂轮,轴向圆弧半径为1.5mm;磨削液采用Blaser高速磨削油;粗糙度测量仪采用表面轮廓仪;硬度测量仪采用HV-1000显微硬度计,试验力选用0.2N,保持载荷时间为10s;利用芬兰XStress3000对加工表面的残余应力进行测量。磨削力使用采用三向压电式测力仪进行测量;试验材料为GH4169,热处理制度为标准热处理制度:(950~980) $^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,1h,油冷、空冷或水冷+720 $^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$,8h,以50 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 炉冷至620 $^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$,8h,空冷。其金相组织经过腐蚀后不能观察到明显晶粒,并且有大量硬化相存在,如图1所示。试件尺寸为15.7mm \times 4.8mm \times 56mm,其中一半长度用于夹持;磨削方式为插磨,单向走刀,磨削参数如表1所示。

2 试验结果及分析

2.1 精磨参数下表面残余应力特点分析

利用经过初期磨损的 $\phi 16$ 电镀CBN砂轮对GH4169试件进行悬臂插磨,对残余应力进行测量。由于参数变化范围较小,并未发现残余应力随磨削参数变化

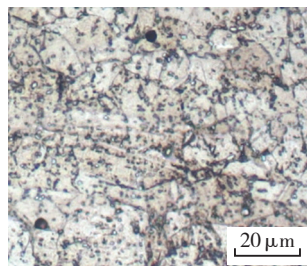


图1 试验所用GH4169金相照片
Fig.1 Metallograph of GH4169

表1 磨削试验参数

磨削参数	数值
砂轮线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	11.7、17.6、23.5
磨削宽度 b_w / mm	0.56、0.8、1.5、2
磨削深度 a_p / mm	0.005、0.02、0.03、0.05
进给速度 $f / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	40、200、400、600、800、1000、1200

的明显规律,但双方向均为残余压应力,且沿进给方向上的残余压应力大于砂轮线速度方向上的残余压应力。沿进给方向上的残余压应力在900~13000MPa之间,砂轮线速度方向上的残余压应力在650~850MPa之间。

磨削表面双向都是残余压应力是由于参与磨削的砂粒大多数为负前角,磨削过程同时也是对材料的碾压过程,因此会在所有方向上获得残余压应力;又因为经过固溶加时效处理的GH4169材料其弹性极限不低于1040MPa,拉伸极限不低于1280MPa^[12],且精磨时磨削温度很低,热效应不显著,所采用的材料有很多增强相存在(图1),减缓了弹性回弹造成的残余压应力下降,因此进给方向残余压应力在900~13000MPa之间。同时砂粒的移动会将材料的晶粒沿线速度方向拉长,产生一定的残余拉应力,与碾压产生残余压应力相互叠加,导致线速度方向残余压应力低于进给方向残余压应力,如图2所示。

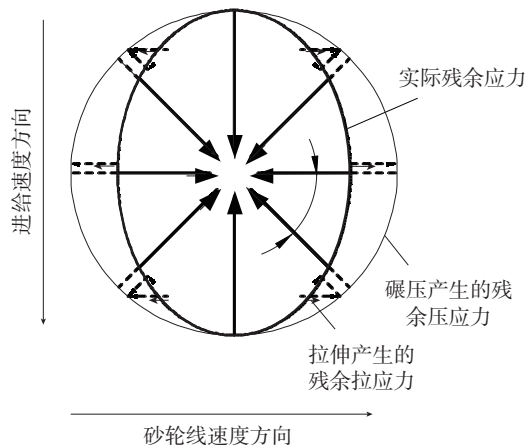


图2 各向残余应力关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of different directions residual stresses

2.2 精磨参数下表面硬度特点分析

利用经过初期磨损的 $\phi 16$ 电镀 CBN 砂轮对 GH4169 试件进行悬臂插磨,并对表面硬度进行测量,每组试验及测量均进行 5~6 次,表面硬度平均值随磨削参数变化情况如图 3 所示。

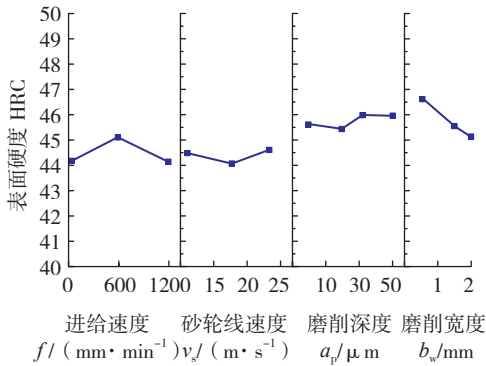


图3 表面硬度随磨削参数变化情况

Fig.3 Influence of grinding parameters on surface hardness

对试验结果进行分析发现,同一参数下的磨削表面硬度值的波动值为 2~4HRC,而进给速度、砂轮线速度、磨削深度 3 个因素对表面硬度平均值的影响范围在 1HRC 左右,因此认为在所选参数范围内表面硬度受磨削参数的影响很小。这是因为随着进给速度、砂轮线速度、磨削深度的上升,一方面材料的塑性变形增大,从而导致磨削表面显微硬度上升;另一方面,磨削表面温度也会增加,从而导致磨削表面的显微硬度下降,但是由于所选参数的变化范围较小,因此两者的影响程度的差别未能充分显示,所以两者的综合作用最终使加工表面的显微硬度变化较小。磨削宽度的影响程度较为明显,变化范围为 1.5HRC,其表面硬度下降是由于磨削温度随磨削宽度的提升而增高,软化效应增加,但是砂粒每转切削深度不变,所以材料的塑性变形基本不变,因此硬度略微下降。

综上所述,对所采用的 GH4169 材料,在悬臂插磨方式下表面残余应力及表面硬度受磨削参数的影响不显著,不能对悬臂插磨的精磨参数优化形成有效约束。

2.3 基于表面粗糙度的参数优化

悬臂插磨方式下磨削表面微观形貌示意图如图 4 所示,沿砂轮线速度的方向上的粗糙度和残高可以根据理论公式由磨削宽度和砂轮的等效半径计算得出,进给方向上的粗糙度的影响因素较多,而且与砂轮的粒度、轮廓形状和尺寸都有较大的关系,其数值主要通过试验进行优化,因此下文仅对该方向上的粗糙度进行测量。

同样利用经过初期磨损的 $\phi 16$ 电镀 CBN 砂轮对 GH4169 试件进行悬臂插磨,通过对沿进给方向粗糙度随进给速度、砂轮线速度、磨削宽度和磨削深度的单因素试

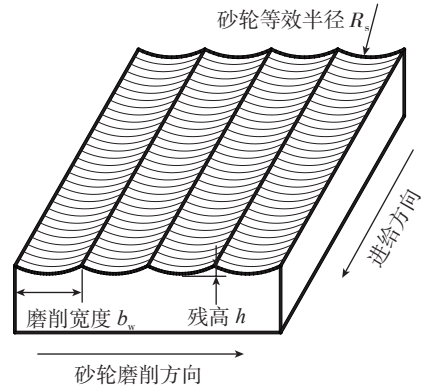


图4 插磨方式下工件表面形貌示意图

Fig.4 Schematic diagram of workpiece surface machined by cantilever plunge grinding

验结果进行分析,发现在所采用的精磨参数范围内粗糙度受磨削深度和磨削宽度的影响较小(如图 5 所示),而受砂轮进给速度影响最为显著。

图 6 显示了进给速度和砂轮每转进给量对粗糙度影

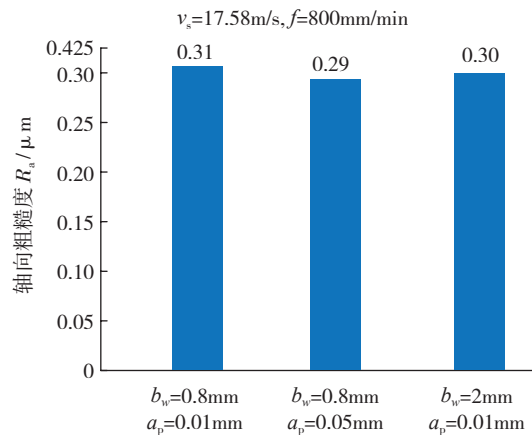


图5 磨削深度和磨削宽度对粗糙度的影响

Fig.5 Influence of grinding width and depth on roughness

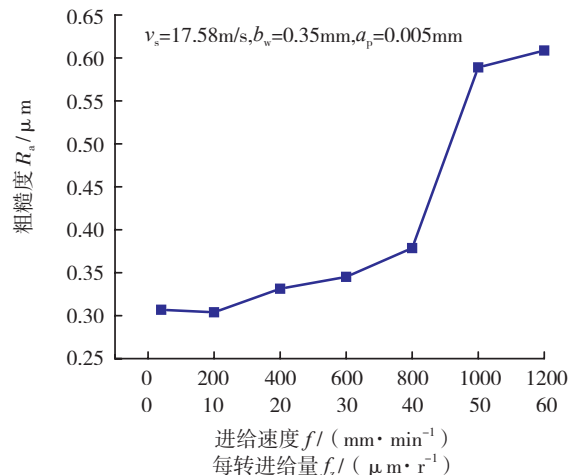


图6 粗糙度随进给速度及每转进给量的变化情况

Fig.6 Situation of roughness changes with feed speed and the feed of per revolution

响规律,可以发现粗糙度随着砂轮每转进给量的下降而下降,在 40~50 $\mu\text{m}/\text{r}$ 时下降幅度明显,之后下降速度变缓,粗糙度最终稳定在 $R_a 0.3\mu\text{m}$ 左右。

粗糙度随砂轮线速度的变化情况如图 7 所示,由于试验条件所限,砂轮线速度取在 11.7~23.4m/s 之间,但仍然能够看出粗糙度随砂轮转速的升高有很明显的下降,证明粗糙度随砂轮每转进给量的下降而减小。

通过扫描电镜对进给速度为 1000mm/min 时的磨削工件表面形貌进行观察,试验结果如图 8 所示,可以看到插磨方式下的工件表面形貌和周磨方式有着明显的不同,工件表面实际上呈现的是垂直于进给方向的周期性纹路,相邻两条纹路间距等于砂轮的每转进给量,即 47.6 μm ,所以砂轮上仅有少量砂粒参与了磨削过程。

通过扫描电镜对进给速度为 40mm/min 时的磨削工件表面形貌进行观察,试验结果如图 9 所示,可以发现工件表面比进给速度为 1000mm/min 时平整,观察不到周期性纹路,但在砂轮转速方向仍然存在大量细密刀纹。

砂轮在安装后不可避免地存在径向跳动,砂粒径向高度也不可能完全相等,必定存在少量较为突出的砂粒,所以在砂轮旋转过程中砂轮高点和低点切入工件的深度

有所不同,又由于砂轮进给方向和砂轮转速方向相互垂直,砂轮高点和低点的加工痕迹一般不会相互重叠,因此会在已加工表面上留下如图 8 所示的具有周期性纹路的磨削表面。为了更清楚地解释悬臂插磨方式下的粗糙度随每转进给量的变化规律,首先将砂轮高点处的若干砂粒沿圆周方向上的旋转投影简化成梯形,其周围是大量砂粒组成的平均高度,如图 10 (a) 所示。

当进给速度很大时,工件表面的凹谷是由砂轮的高点出砂粒加工形成,工件表面的凸起是由组成等效高度的砂粒加工形成,如图 10 (b) 所示;当进给速度降低以致梯形两侧的斜面相互重叠时,工件表面的凹谷仍然是由砂轮的高点加工而成,而工件表面的凸起是梯形两侧的斜面重叠而形成的,其波峰波谷差距 $h_2 < h_1$,并且随着进给速度的降低而减小,其示意图如图 10 (c) 所示;当进给速度进一步降低,达到砂轮每转进给量小于高点处砂粒的顶端平面沿进方向的长度时,材料表面理论上就不会存在凸起,而完全是一个平面,如图 10 (d); 此时粗

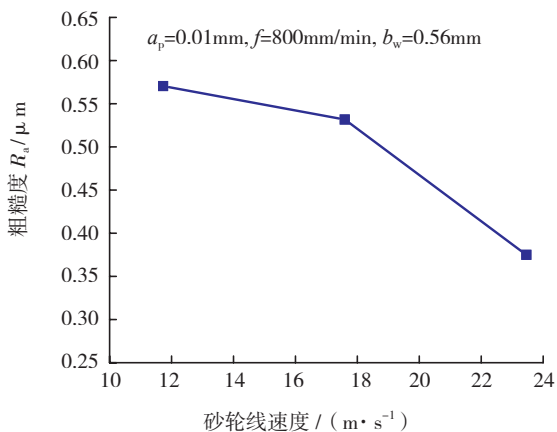


图7 砂轮线速度对粗糙度的影响

Fig.7 Situation of roughness changes with wheel speed

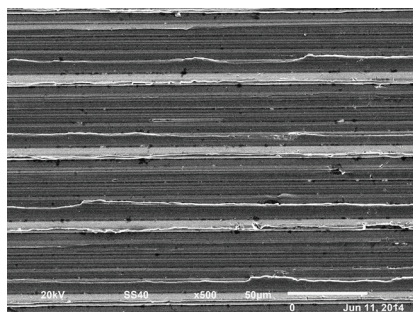


图8 进给速度1000mm/min时GH4169放大500倍的表面形貌

Fig.8 Surface topography magnified 500 times of GH4169 grinded at feed speed of 1000mm/min

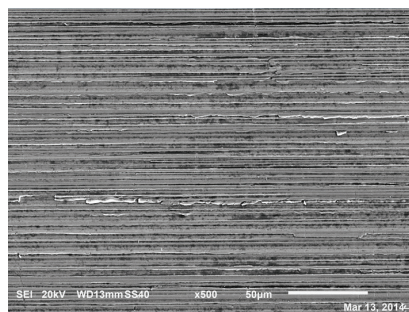


图9 进给速度40m/min时GH4169放大500倍的表面形貌
Fig.9 Surface topography magnified 500 times grinded at feed speed of 40 mm/min

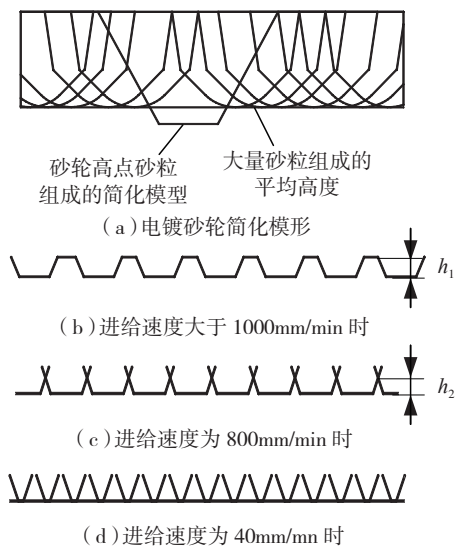


图10 工件表面粗糙度形成的简化示意图
Fig.10 Simplified schematic diagram of the roughness producing process

精度不会由于进给速度的降低而降低,理论上为零,但事实上粗糙度大约为 $R_a 0.3 \mu\text{m}$,这是 3 个方面因素引起的。首先,虽然磨损会使砂粒顶端形成小平面,但无论是图 10 中的高点还是周围较矮的平均高度都是由多个砂粒组成,但整体情况不会是完全平整的,还是会存在细小的沟槽,因此加工出的平面不会完全平整;其次,磨削过程中会有一些的振动;最后,砂粒表面的材料粘附等因素也会引起粗糙度的存在。因此最终形成如图 9 所示整体平整,但仍然有细小纹路的表面。

根据上述分析,综合考虑加工质量和加工效率,应当通过进给速度和砂轮转速相互配合将砂轮每转进给量取在曲线下端拐点处,即砂轮线速度为 $38 \mu\text{m}/\text{r}$ 。因为高速磨削被证实有利于磨削质量提升,而试验所用砂轮较小,砂轮线速度远低于高速磨削要求^[13-14],结合生产实际,砂轮转速最终采用主轴稳定工作的上限速度 $32000\text{r}/\text{min}$,此时砂轮线速度为 $26.8\text{m}/\text{s}$,进给速度为 $1000\text{mm}/\text{min}$,此时每转进给量为 $32 \mu\text{m}/\text{r}$;在该参数下经过 10 余次试验测得沿进给方向上的粗糙度平均值为 $R_a 0.32 \mu\text{m}$,并且测得的粗糙度最大值在 $R_a 0.5 \mu\text{m}$ 以下,平均线速度 R_c 在 $2 \mu\text{m}$ 以下,因此沿砂轮进给方向上的粗糙度小于平均线高度 $R_a 0.5 \mu\text{m}$ 即可。取磨削宽度为 0.35mm 时,理论残高为 $1.9 \mu\text{m}$,理论粗糙度为 $R_a 0.49 \mu\text{m}$,可满足要求。因此在本试验条件下推荐采用精磨参数为: $v_s=26.8\text{m}/\text{s}$ ($n=32000\text{r}/\text{min}$), $f=1000\text{mm}/\text{min}$, $b_w=0.35\text{mm}$ (或残高 $h=0.002\text{mm}$)。

2.4 基于磨削力的磨削深度优化

悬臂插磨方式可以通过多层磨削加工能够不断修正,由于加工过程中材料内部残余应力释放和表面残余应力作用而产生的无规律变形^[4-5],但无法消除因磨削力引起的叶片弹性变形造成的形状误差^[11],因此必须对磨削力进行控制。本节通过试验证明磨削力随磨削深度的降低而逐渐下降,因此可以通过减小磨削深度达到控制弹性变形,提高叶片的型面精度的目的。

采用 Kistler 9257B 三向压电式测力仪对磨削力进行测量。试验过程中,为了更稳定的测量到磨削力,本次试验在推荐参数的基础上将磨削宽度扩大取为 1mm ,砂轮转速和进给速度也成比例降低,从而使磨削力适当增大,减小磨削过程中的各种干扰对磨削力测量精度的影响。试验结果如图 11 所示,其中 F_x 为转速方向上的抗力, F_y 为磨削深度方向上的抗力, F_z 为进给方向上的抗力。从图 11 中可以发现,在所选参数范围内磨削力随磨削深度呈线性增加,因此可以通过磨削深度对磨削力进行控制。

对于长 20mm 、宽 15mm 、最厚处 0.8mm 的高温合金叶片,当最后一层磨削深度取 0.005mm 时,根据图 11 所示结果进行估算^[8],此时磨削力约为 0.2N ,根据有限元仿

真结果(叶片端部施加 0.2N 力),其弹性变形可以控制在 $3 \mu\text{m}$ 以内(如图 12 所示)。并利用上述参数对实际叶片进行磨削加工,并通过接触式三坐标测量机进行测量,其上下截面线误差基本相同,如图 13 所示,因此可以忽略叶片因受到磨削力作用而产生的弹性变形对轮廓精度的影响,且叶片整体形貌精度在 $10 \mu\text{m}$ 以内,个别位置在 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 之间。

综上所述,对上述叶片进行悬臂插磨工艺时推荐使用精磨参数为:磨削线速度 $v_s=26.8\text{m}/\text{s}$ ($n=32000$)

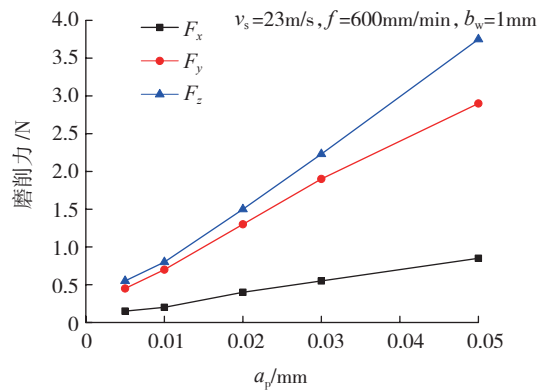


图 11 磨削力随深度方向的变化情况

Fig. 11 Grinding forces changes with grinding depth

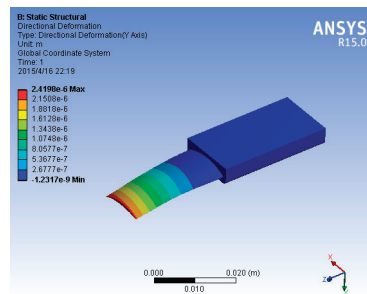


图 12 叶片变形的有限元仿真

Fig. 12 Finite element simulation of blade deformation

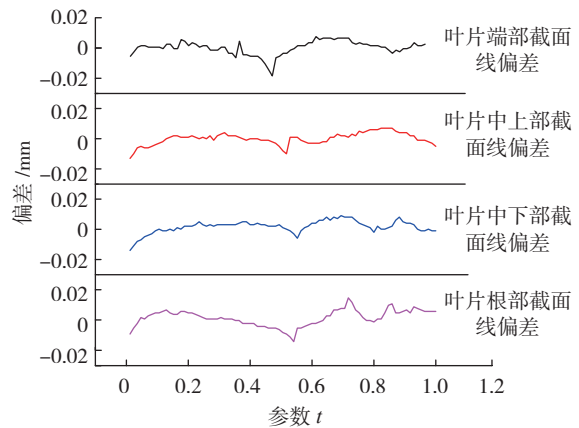


图 13 叶片不同部位截面线偏差

Fig. 13 Cross-sectional errors at different positions of blade

r/min),进给速度 $f=1000\text{mm}/\text{min}$,残高 $h=0.002\text{mm}$,磨深 $a_p=0.005\text{mm}$ 。

2.5 叶片残余应力的测试及分析

对利用推荐参数所加工的叶背上5个不同点进行残余应力测量(如图14),最大压应力出现在1#点,进给方向残余压应力为1293MPa,线速度方向残余压应力为758MPa;最小压应力出现在5#点,进给方向残余压应力为1133MPa,线速度方向残余压应力为561MPa。说明在该参数下,即使受到机床稳定性、叶片曲率等其他因素影响导致磨削参数有所波动,但仍然可以维持加工表面为残余压应力状态。

通过电解加工的方式对推荐精磨参数下形成的表面进行逐层去除,并测量距离精磨表面不同深度上的残余应力分布情况,测量结果如图15所示。

从图15中可以看出,加工表面以下并没有严重的拉应力层;表面应力层的深度约为 $70\mu\text{m}$;在表面下 $5\mu\text{m}$ 处有最大压应力;进给方向上的残余压应力高于转速方向上的残余压应力,而进给方向是试验所用叶片的主要受力方向。从定性的角度来看,压应力状态良好,有利于延长GH4169叶片的疲劳寿命^[15]。

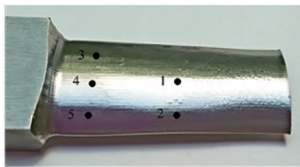


图14 叶片残余应力测量点分布

Fig.14 Distribution of residual stresses measurement points on blade

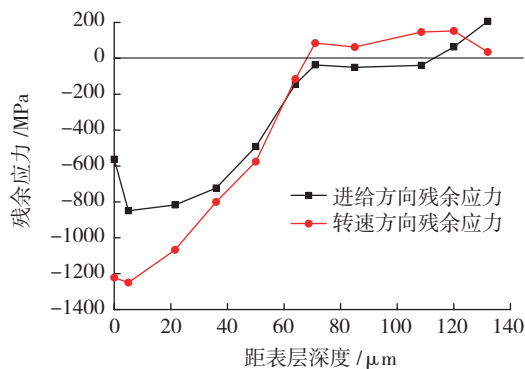


图15 残余应力沿深度方向上的分布情况

Fig.15 Residual stress distribution on depth direction

3 结论

通过对GH4169在悬臂插磨方式下进行的一系列试验可以得到如下结论:

(1)基于对磨削温度、表面硬度、表面粗糙度和磨削力的研究,提出了GH4169材料悬臂插磨工艺的磨削参数

优化方法,结合本文试验条件,针对小型GH4169叶片型面的精磨加工,推荐一组优化参数: $v_s=26.8\text{m}/\text{s}$ ($n=32000\text{r}/\text{min}$), $f=1000\text{mm}/\text{min}$,残高 $h=0.002\text{mm}$, $a_p=0.005\text{mm}$ 。

(2)在所推荐的磨削参数下,叶片型面偏差在 0.02mm 以下,磨削粗糙度可保持在 $R_a 0.5\mu\text{m}$ 以下;表面硬度约为HRC45;加工表面各处均为残余压应力,且表面下没有明显的拉应力层,应力层深度约为 $70\mu\text{m}$,在表面下 $5\mu\text{m}$ 处有最大压应力;进给方向上的残余压应力均高于转速方向上的残余压应力。

(3)提出了理论模型对粗糙度随进给速度变化规律进行了解释,并对残余应力特点及其形成原因进行了分析。

参考文献

- [1] GUO Y B, LI W, JAWAHIR I S. Surface integrity characterization and prediction in machining of hardened and difficult-to-machine alloys: a state-of-art research review and analysis[J]. Machining Science and Technology, 2009, 13(4): 437-470.
- [2] XUE C, CHEN W Y. Adhering layer formation and its effect on the wear of coated carbide tools during turning of a nickel-based alloy [J]. Wear, 2011, 270(11-12): 895-902.
- [3] 张国华. 超高速磨削温度的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006. ZHAN Guohua. Research on temperature of ultra-high speed grinding[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [4] MENG Fanjun, LI Xun, CHEN Zhitong, et al. Study on the cantilever grinding process of aero-engine blade[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2014, 228(11): 1393-1400.
- [5] 李勋, 孟凡军, 陈志同. 一种利用三轴联动插补的叶片悬臂磨削加工方法:201310009069.6[P]. 2013-01-10. LI Xun, MENG Fanjun, CHEN Zhitong. A kind of three axes linkage interpolation method for cantilever grinding blades: 201310009069.6[P]. 2013-01-10.
- [6] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 镍基高温合金GH4169磨削参数对表面完整性影响 [J]. 航空动力学报, 2013(3): 621-628. HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2013(3): 621-628.
- [7] 周志雄, 毛聪, 周德旺, 等. 平面磨削温度及其对表面质量影响的实验研究 [J]. 中国机械工程, 2008(8): 980-984. ZHOU Zhixiong, MAO Cong, ZHOU Dewang, et al. Experimental investigation of grinding temperature and its effects on surface quality in surface grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2008(8): 980-984.
- [8] 苏若斌, 陈国定, 王涛. GH4169高温合金平面磨削力研究[J]. 机械科学与技术, 2012(5): 818-821. SU Ruobin, CHEN Guoding, WANG Tao. Study on the surface grinding force of superalloy GH4169[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012(5): 818-821.
- [9] 陈雷, 吕泉, 马艳玲, 等. 表面完整性对航空发动机零件疲劳寿命的影响分析 [J]. 航空精密制造技术, 2012(5): 47-50. CHEN Lei, LÜ Quan, MA Yanling, et al. Analysis of effect of surface integrity on aero engine parts fatigue life failure[J]. Aviation Precision

Manufacturing Technology, 2012(5): 818-821.

[10] YAO C, WU D, JIN Q, et al. Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 650-660.

[11] 陈婵娟. 叶片类弱刚性零件加工变形误差分析及补偿技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.

CHEN Chanjuan. The research on deformation error analysis and compensation of weakly rigid leave parts[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[12] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

China aviation materials manual editor[S]. China aviation materials manual. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[13] 田霖, 傅玉灿, 杨路, 等. 基于速度效应的高温合金高速超高速磨削成屑过程及磨削力研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 169-177.

TIAN Lin, FU Yucan, YANG Lu, et al. Investigations of the "speed effect" on critical thickness of chip formation and grinding force in high speed and ultra-high speed grinding of superalloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 169-177.

[14] 钱源, 徐九华, 傅玉灿, 等. CBN 砂轮高速磨削镍基高温合金磨削力与比磨削能研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(6): 33-37.

QIAN Yuan, XU Jiuhua, FU Yucan, et al. Grinding force and specific grinding energy of nickel based superalloy during high speed grinding with CBN wheel[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(6): 33-37.

[15] 杨茂奎, 任敬心. 加工表面完整性对 GH4169 高温合金疲劳寿命的影响[J]. 航空精密制造技术, 1996, 32(6): 28-31.

YANG Maokui, REN Jingxin. The affect of surface integrity on fatigue life of GH4169 superalloy[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996, 32(6): 28-31.

(责编 大漠)

(上接第98页)

Cleaning World, 2010, 10(4): 59-61.

[4] 聂磊, 蔡坚, 贾松良, 等. 微电子封装中等离子体清洗及其应用[J]. 半导体技术, 2004, 29(12): 30-34.

NIE Lei, CAI Jian, JIA Songliang, et al. Plasma cleaning and its application in microelectronics packaging[J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(12): 30-34.

[5] 孙祖琴. 等离子清洗在电子元器件中的应用[J]. 机电元件, 2010, 30(1): 13-15.

SUN Zuqin. The application of the plasma cleaning in the electrical components [J]. Electromechanical Components, 2010, 30(1): 13-15.

[6] 王守国. 常压射频冷等离子体清洗技术介绍[J]. 清洗世界, 2004, 20(12): 32-34.

WANG Shouguo. A normal pressure radio-frequency cold plasma cleaning technology[J]. Cleaning World, 2004, 20(12): 32-34.

[7] 贾彩霞, 陈平, 王乾, 等. 常压空气等离子体对连续纤维的在线改性[J]. 材料研究学报, 2015, 29(1): 10-16.

JIA Caixia, CHEN Ping, WANG Qian, et al. On-line modification of continuous fibers by atmospheric air plasma[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(1): 10-16.

[8] 傅建钦, 刘方. 等离子体技术及在污染防治中的应用[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 75-78.

FU Jianqin, LIU Fang. Plasmas technology and its application in the prevention and control of environmental pollution[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(8): 75-78.

[9] 刘兆麟, 程灿灿. 复合材料液体模塑成型工艺研究现状[J]. 山东纺织科技, 2011, 52(2): 50-53.

LIU Zhaolin, CHENG Cancan. Research status of liquid composites molding[J]. Shandong Textile Science & Technology, 2011, 52(2): 50-53.

[10] 沙春鹏, 卢少微, 赵雪莹, 等. 等离子体清洗技术在航空制造业中的应用及前景分析[J]. 能源研究与管理, 2014(4): 77-80.

SHA Chunpeng, LU Shaowei, ZHAO Xueying, et al. Applications and prospects of plasma cleaning in the aerospace manufacturing industry[J]. Energy Research and Management, 2014(4): 77-80.

(责编 大漠)

(上接第101页)

LI Chonghe, ZHU Ming, WANG Ning. Application of titanium alloy in airplane[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1): 84-91.

[2] 李曙光. 国外高超音速飞行器现状及有关工艺技术研究[J]. 航天制造技术, 2007, 12(6): 3-5.

LI Shuguang. The development status of hypersonic spacecraft and correlative technology research abroad [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2007, 12(6): 3-5.

[3] 张绪虎, 单群, 陈永来, 等. 钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(6): 28-33.

ZHANG Xuhu, SHAN Qun, CHEN Yonglai, et al. Application and development of titanium alloys for aircrafts[J]. Materials China, 2011, 30(6): 28-33.

[4] 付刚, 胡刚. TC4 钛合金超塑成形 / 扩散连接后电子束焊接技术[J]. 航空制造技术, 2004(12): 72-80.

FU Gang, HU Gang. EB welding technology after SPF/DB of TC4 Ti alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(12): 72-80.

[5] ENJO T, KURODA T, NISHIZAWA M. Microstructure and mechanical properties in weld heat affected zone of titanium alloy(materials, metallurgy & weldability) [J]. Transactions of Jwri, 1988, 17(2): 393-398.

[6] OH J, KIM N J, LEE S, et al. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds [J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 340(1-2): 232-242.

[7] 侯继军, 余军, 董俊慧. TC4 钛合金 TIG 焊接头组织及力学性能[J]. 焊接技术, 2011, 40(4): 15-17.

HOU Jijun, YU Jun, DONG Junhui. Study on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy welded joint by TIG welding[J]. Welding Technology, 2011, 40(4): 15-17.

[8] 郭海丁, 郭华芝, 高德平, 等. TC4 钛合金焊接接头疲劳性能试验研究[J]. 理化检验(物理分册), 2002(12): 529-531.

GUO Haiding, WU Huazhi, GAO Deping, et al. An experimental study of fatigue property of TC4 titanium alloy welded joint [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2002(12): 529-531.

[9] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

GAO Zhentong. Fatigue applied statistics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986.

(责编 大漠)