

引文格式: 孙辉. TC4 钛合金叶片喷丸数值模拟及喷丸路径规划 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(14): 95-100.

SUN Hui. Shot peening numerical simulation and path planning of TC4 titanium alloy blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(14): 95-100.

TC4 钛合金叶片喷丸数值模拟及喷丸路径规划*

孙 辉

(长春职业技术学院, 长春 130000)

[摘要] 针对 TC4 钛合金叶片在喷丸强化过程中受残余应力易产生形变的问题,对钛合金叶片喷丸过程进行数值分析及试验研究。首先,确定了叶片的喷丸参数,通过单弹丸的喷丸模拟找到喷丸速度和残余应力之间的对应关系,通过数值模拟和实际检测对比喷丸过程产生的残余应力,从而确定喷丸速度等参数条件。然后,为研究不同喷丸路径对叶片变形量的影响,设计了 3 种喷丸路径工艺。模拟和试验结果表明,叶片在喷丸后的变形主要沿 Y 方向,叶片整体呈现出由内弧侧向背弧侧弯曲的趋势,不同的喷丸路径叶片变形程度不相同,其中采用“背弧-内弧”的喷丸方式时, Y 方向变形量最小,最小值为 0.182mm。叶片不同喷丸路径其变形量不同,找到合适喷丸路径能有效减少叶片喷丸变形,通过模拟和喷丸路径规划针对叶片不同路径喷丸变形大小,在叶片机加工时给予一定的预补偿量使叶片喷丸变形后达到预定的形状。

关键词: 钛合金; 叶片; 喷丸强化; 残余应力; 数值模拟

Shot Peening Numerical Simulation and Path Planning of TC4 Titanium Alloy Blade

SUN Hui

(Changchun Polytechnic, Changchun 130000)

[ABSTRACT] Aiming at the problem that TC4 titanium alloy blade is easy to deform due to residual stress in shot peening process, numerical analysis and experimental study on shot peening process of titanium alloy blade were carried out. Firstly, the shot peening parameters of blade are determined. The corresponding relationship between shot peening speed and residual stress is found by shot peening simulation of single shot. The residual stress generated in shot peening process is compared by numerical simulation and actual detection, so as to determine the parameters such as shot peening speed. Then, in order to study the influence of different shot peening sequence on blade deformation, three shot peening path technologies are designed to realize the planning of blade shot peening path, and the reliability of the planning path is verified by experiments. The simulation and experimental results show that the deformation of the blade is mainly along the Y-direction after shot peening, and the deformation trend of the blade is from the inner arc side to the back arc side. The deformation degree of the blade varies with different shot peening paths. When the “back arc inner arc” shot peening method is adopted, the deformation in the Y-direction is the smallest, and the minimum value is 0.182mm. The deformation of blade is different with different shot peening paths. Finding an appropriate shot peening path can effectively reduce the blade's shot peening deformation. Based on the simulation and shot peening path planning, a certain amount of pre-compensation is given in the machining process to make the blade reach the predetermined shape after shot peening deformation.

Keywords: TC4 titanium alloy; Blade; Shot peening; Residual stress; Numerical simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.14.095

* 基金项目: 吉林省高等教育学会科研课题(JGJX2020D647, JGJX2020D653)。

TC4 钛合金材料属于 $\alpha+\beta$ 双相合金材料^[1],含有 α 稳定元素同时还有 β 稳定元素,具有较好的热稳定性、耐腐蚀性、较高的比强度和良好的生物相容性,广泛应用于航天、生物医疗、化工等领域^[2]。

在航空领域 TC4 钛合金材料多用于风扇叶片、压气机叶片、压气机盘、整体叶盘、机匣、燃烧室外壳、起落架等方面。在航空发动机上 TC4 钛合金叶片属于转动关键件,在运行过程中叶片表面容易萌生疲劳裂纹,裂纹的产生对发动机的寿命有着重要的影响。对 TC4 钛合金叶片进行表面改性,能有效提高其抗疲劳强度^[3-5],延长叶片运行时间。

喷丸强化能使零件材料表层发生塑性变形产生残余压应力,残余压应力产生能够提高材料的抗疲劳强度。目前对 TC4 钛合金喷丸的研究主要集中于对残余应力大小及变形等方向,而对于喷丸路径对 TC4 钛合金叶片变形影响的研究相对较少。其中高玉魁^[6]对高强钢喷丸后的残余应力进行研究;赵春梅^[7]对喷丸进行模拟和残余应力研究;赵莉莉^[8]研究了喷丸残余应力对裂纹扩展和疲劳寿命影响。基于此,对 TC4 钛合金叶片进行喷丸强化处理,通过数值模拟喷丸强化过程,并和实际叶片喷丸后变形情况对比研究喷丸路径对叶片变形的影响,不同的喷丸路径对叶片变形量不同,找到合适的喷丸路径能有效减少叶片喷丸后变形,通过喷丸路径规划和模拟针对叶片喷丸变形量大小,在叶片进行机加工时给予一定的预补偿量使叶片喷丸后能达到预定形状,在叶片加工保形方面有重要的现实意义。

1 喷丸强化数值模拟模型

1.1 本构模型

喷丸强化^[9-11]是一种高度非线性的动态冲击过程,是由大量弹丸高速撞击零件表面使其发生塑性变形,具有高应变率和大应变的特点。文章采用 ABAQUS 有限元软件建立多弹丸的有限元模型^[12],通过 ABAQUS/Explicit 显式求解器进行计算,来实现瞬时、高应变非线性问题的快速求解。模拟时用的本构模型是 J-C 模型, J-C 模型是由 Johnson 和 Cook 在 1983 年针对高速冲击和爆炸问题提出来的,是一种描述金属应变率强化效应和温度软化效应的本构模型,其表达式为:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

其中, A 为材料在参考应变率和参考温度下的屈服强度; B 和 n 为应变强化系数, C 为应变敏感系数; m 为温度敏感系数; σ_{eq} 为等效应力; ε_{eq} 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲的等效塑性应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 无量纲温度,其中 T_r 为参考温度, T_m 为材料熔点温度。

查阅文献 [13] 中的数据,得到 TC4 钛合金材料 J-

C 本构模型参数,如表 1 所示。

1.2 有限元模型

ABAQUS/Explicit 提供两种接触作用算法,本文模拟采用的是接触对算法,弹丸和材料之间的摩擦系数设为 0.2,采用 C3D8R 六面体线性减缩积分单元对材料进行网格划分,喷丸强化过程是弹丸以一定的速度撞击材料表面产生力的作用,因此模拟过程中给弹丸一定的初始速度。建立试块的多弹丸喷丸的有限元模型如图 1 所示,进而应用到叶片 TC4 钛合金叶片喷丸模拟。

2 TC4 钛合金叶片喷丸试验

2.1 叶片喷丸参数

某 TC4 钛合金压气机叶片要求喷丸强度为 0.16~0.22mmA,为了确认具体的喷丸参数需要进行试验绘制饱和曲线确定喷丸强度。饱和曲线的绘制需要在其他参数一定的情况下用不同的喷丸速度或喷丸时间击打 Almen 试片,通过至少 4 个不同速度或时间下的 Almen 试片的弧高值计算绘制饱和曲线。弧高值的计算采用弧高仪测量,弧高仪和 Almen A 型标准试片如图 2 所示。

表 1 TC4 钛合金 J-C 模型参数
Tab.1 J-C model parameters of TC4 titanium alloy

参数	A/MPa	B/MPa	n	c	m
数值	1098	1092	0.93	0.014	1.1

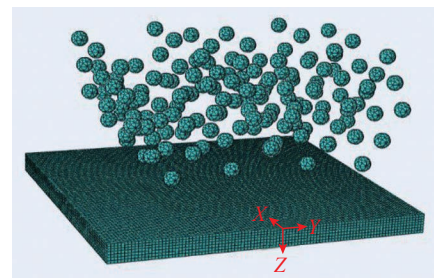
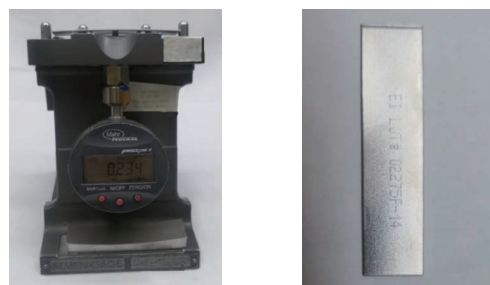


图 1 多弹丸有限元模型
Fig.1 Finite element model of multiple shots



(a) 阿尔门测量仪 (b) 阿尔门试片

图 2 阿尔门量仪和阿尔门试片
Fig.2 Almen gage and Almen strip

叶片喷丸参数: S230 铸钢丸、空气压力 0.25MPa、丸流量 12kg/min。用上述参数进行喷丸试验和对 TC4 压气机叶片进行喷丸,对 A 型试片进行饱和强度试验,得到了该喷丸参数下的喷丸强度为 0.18mmA,此时饱和点的时间为 2.02s,喷枪移动的速度为 0.078m/s,饱和曲线见图 3,确定了具体喷丸参数后续叶片喷丸在该参数下进行。

由于铸钢丸加工方法和丸料硬度比较高的特性,决定了铸钢丸比较脆,寿命相对短,容易在受喷材料表面遗留铁粉,需要采用合适的方式将其去掉。TC4 钛合金叶片用铸钢丸喷丸后,要求叶片表面的 Fe 元素要小于等于材料基体中的质量分数,小于 0.3%。因此,本试验在进行铸钢丸喷丸后,再采用喷玻璃丸的方式来去除表面的铁粉污染,喷丸后的叶片表面图像如图 4 所示。

检测了 TC4 钛合金叶片元素及其含量如表 2 所示,为检测采用喷玻璃丸方法去除叶片表面的铁粉污染的有效性,对除污后的叶片表面进行元素含量检测,得到喷丸后叶片表面的元素含量,如表 3 所示。

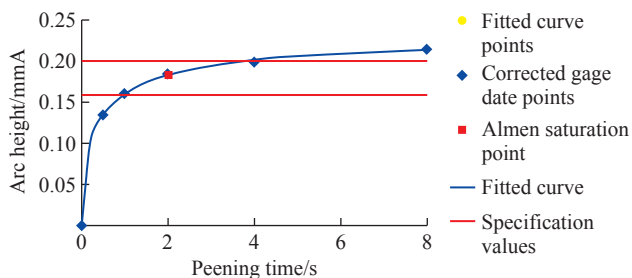


图 3 饱和曲线
Fig.3 Saturation intensity curve

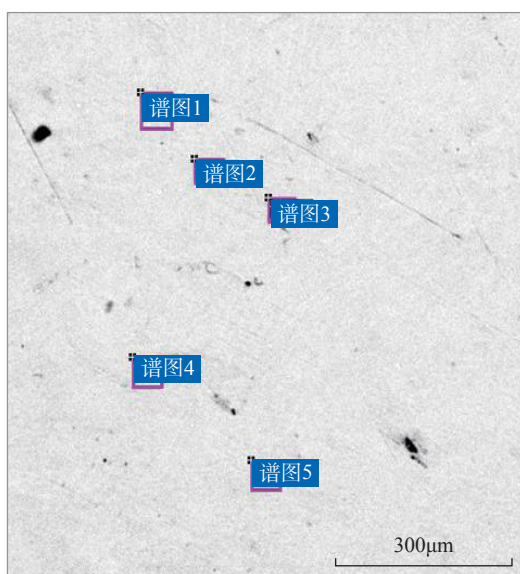


图 4 喷丸后叶片表面谱图
Fig.4 Surface spectrum of blade after shot peening

结果表明,采用喷玻璃丸叶片表面 Fe 元素质量分数为 0.28%,小于标准。说明此方法可有效去除叶片表面的铁粉污染,达到去污指标。

用扫描电镜观察叶片喷丸后的表面状态,分析铸钢丸加工后的效果,如图 5 所示。

从图 5 可以看出 TC4 钛合金叶片喷丸后表面凹坑比较均匀,覆盖率达到了 100%,表面没有褶皱等缺陷,表面状态良好。

2.2 残余应力的测量

为了检测 TC4 钛合金叶片喷丸后的残余应力,采

表 2 TC4 钛合金叶片的化学成分(质量分数)
Table 2 Components of TC4 alloy blade (mass fraction) %

Al	V	Fe	C
5.5~6.8	3.5~4.5	0.3~0.4	≤0.10
N	O	H	其他
≤0.05	≤0.20	≤0.015	≤0.40

表 3 喷丸后叶片表面元素组成(质量分数)

Table 3 Elements of blade surface after shot peening (mass fraction) %

谱图	C	Al	Ti	V	Fe
1	1.14	5.89	89.28	3.69	—
2	—	6.07	89.92	4.01	—
3	2.14	5.77	88.38	3.43	0.28
4	—	5.98	90.52	3.50	—
5	—	6.13	90.49	3.38	—
最大	2.14	6.13	90.52	4.01	0.28
最小	1.14	5.77	88.38	3.38	0.28

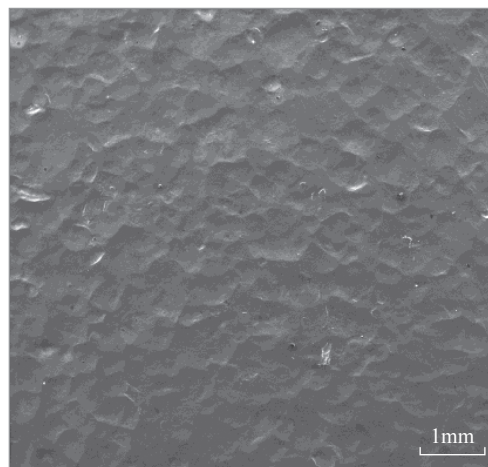


图 5 TC4 叶片喷丸后叶片表面状态
Fig.5 Blade surface after shot peening

用 X-350A 型残余应力测试仪,如图 6 所示^[14-16]。用电解抛光仪采用饱和食盐水溶液对叶片浅表层进行剥层,每隔 20 μm 进行一次剥层测量,残余应力测量结果如图 7 所示,在模拟过程中通过不断调整弹丸撞击零件表面的速度,找到和实际喷丸强化后应力水平一致的速度,然后用该速度进行后续的模拟。

在模拟过程中分别用 50m/s、70m/s、80m/s 和 85m/s 弹丸速度撞击零件表面,模拟结束后提取模型中的应力结果。随着弹丸撞击速度的增减残余应力的大小和深度均增加,用 85m/s 的弹丸速度模拟得到的应力结果和实际用 0.18mmA 喷丸强度喷叶片后测量得到的残余应力大小和深度基本吻合,残余应力最大值为 -676MPa,应力层深度约 0.225mm,后续的模拟过程中采用 85m/s 的弹丸速度进行模拟。

3 喷丸路径规划

3.1 不同喷丸路径

为研究不同喷丸路径对叶片变形量的影响,设计了 3 种喷丸路径工艺。

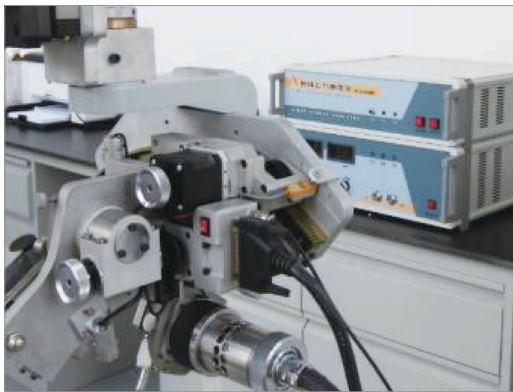


图 6 X-350A 型残余应力测试仪
Fig.6 X-350A residual stress analyzer

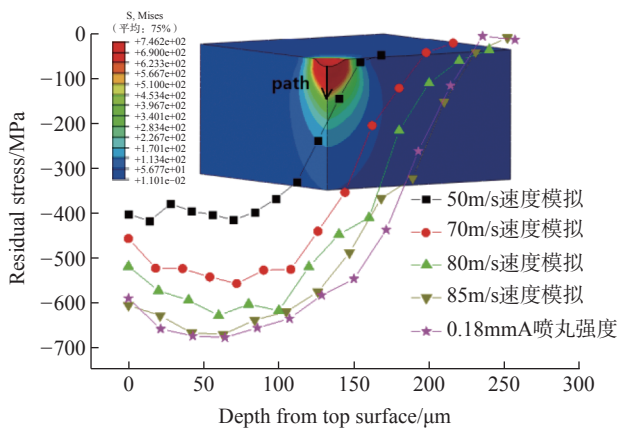


图 7 残余应力结果
Fig.7 Residual stress result

工艺 1: 先内弧喷丸再背弧喷丸,即内弧-背弧。
工艺 2: 用双喷枪同时对内弧和背弧喷丸。
工艺 3: 先背弧喷丸再内弧喷丸,即背弧-内弧。
具体路径方向如图 8 所示。

3.2 不同喷丸路径变形结果

用 85m/s 的弹丸速度对 3 种喷丸路径进行模拟,并对模拟结果的变形量进行提取,沿叶片长度方向平均分成了 9 个模拟点,分别为: s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 、 s_5 、 s_6 、 s_7 、 s_8 和 s_9 ,其中 s_1 点靠近叶根, s_9 点靠近叶顶。分别对不同路径的 X 方向和 Y 方向的变形量进行采集,结果如图 9 所示。

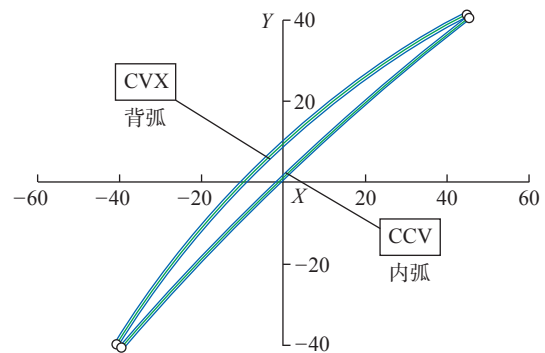


图 8 方向示意图
Fig.8 Direction diagram

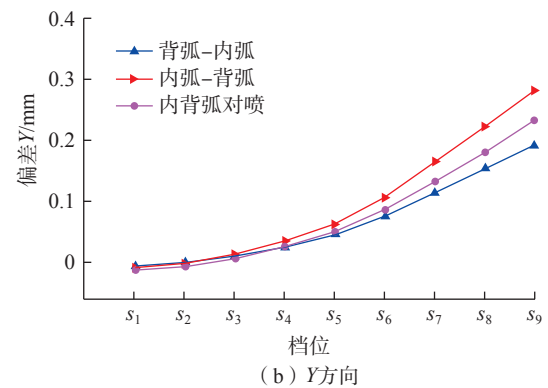
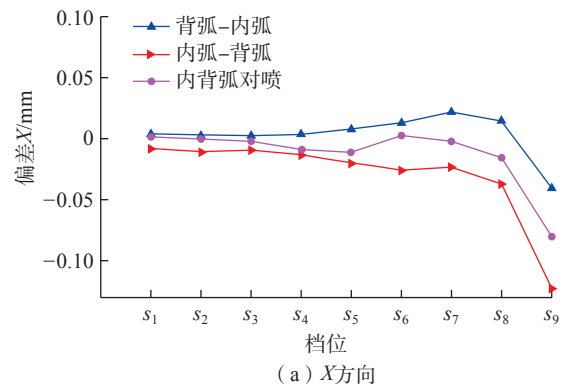


图 9 不同喷丸路径的变形情况
Fig.9 Deformation of different shot peening paths

从模拟结果可以看出,在3种喷丸路径中,内弧-背弧 X 方向的变形量为 -0.126mm ,内背对喷 X 方向的变形量为 -0.082mm ,背弧-内弧喷丸 X 方向的变形量为 -0.033mm ,3种喷丸路径中内弧-背弧 X 方向的变形量最大,其次是内背弧对喷,背弧-内弧喷丸 X 方向的变形量最小。3种喷丸路径中 Y 方向的变形量均为正值,说明变形在 Y 方向是沿着增大的方向变形即向背弧方向变形,背弧-内弧喷丸 Y 方向变形量为 0.182mm ,内背弧对喷 Y 方向的变形量为 0.233mm ,内弧-背弧喷丸 Y 方向的变形量为 0.284mm 。综上可以看出越靠近叶顶变形量越大,3种喷丸路径 X 方向变形量差异比较小, Y 方向变形量差异比较大,变形整体呈现出由内弧侧向背弧侧弯曲的趋势。

为验证数值模拟的正确性,对3种路径喷丸后的叶片用三坐标检测仪对相同位置进行数据提取,得到不同喷丸路径的叶片变形情况,如表4所示。

从表4可以看出三坐标测量结果和模拟结果有相同的趋势,沿 Y 方向的变形量最大,变形也呈现出由内弧侧向背弧侧弯曲的变形趋势,且3种喷丸路径中先背弧-内弧的喷丸方式的变形量最小。三坐标测量变形量结果比模拟结果要大一些,主要是因为模拟时采用的参数、约束条件等和实际喷丸情况略有差异。

4 结论

(1)建立了多弹丸喷丸模拟的模型,在喷丸模拟中发现弹丸速度 85m/s 的残余应力和 0.18mmA 喷丸强度的残余应力水平基本一致,最大残余应力 -676MPa ,应力层深度约 0.225mm 。

(2)3种喷丸路径的变形主要是在 Y 方向上产生, X 方向比较小,内弧-背弧喷丸方式的变形量最大,实测 Y 方向变形量值为 0.292mm ;背弧-内弧喷丸方式变形量最小,实测 Y 方向变形量值为 0.190mm ;3种喷丸方式的模拟结果和三坐标实测结果基本一致,叶片呈现由内弧侧向背弧侧弯曲的变形趋势。

(3)通过实测变形量验证了多弹丸喷丸模拟模型有效性,叶片喷丸前可通过模拟合理规划喷丸路径能有效减小叶片喷丸后的变形量。

表4 不同路径的变形结果

Table 4 Deformation results of different paths

背弧-内弧		内背对喷		内部-背弧	
X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
-0.032	0.182	-0.082	0.233	-0.126	0.284
-0.041	0.190	-0.091	0.242	-0.133	0.292

参考文献

- [1] LÜTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of $(\alpha+\beta)$ titanium alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 1998, 243(1): 32-45.
- [2] 高玉魁. 喷丸强化对TC4钛合金组织结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536-1539.
- [3] GAO Yukui. Effect of shot-peening on microstructure of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536-1539.
- [4] FARRAHI G H, MAJZOBI F, HOSSEINZADEH F, et al. Experimental evaluation of the effect of residual stress field on crack growth behaviors in C(T) specimen[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(13): 1772-1782.
- [5] FU Y Q, LOH N L, BATCHELOR A W, et al. Improvement in fretting wear and fatigue resistance of Ti-6Al-4V by application of several surface treatments and coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 106(2-3): 193-197.
- [6] 高玉魁. 喷丸对Ti-10V-2Fe-3Al钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 60-63.
- [7] GAO Yukui. Influence of shot peening on tension-tension fatigue properties in Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 60-63.
- [8] 高玉魁. 高强度钢喷丸强化残余应力场特征[J]. 金属热处理, 2002, 28(4): 42-44.
- [9] GAO Yukui. Character istics and application prospect of hard to machine materials[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 28(4): 42-44.
- [10] 赵春梅. 高强钢表面强化残余应力场实验研究与数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [11] ZHAO Chunmei. Experimental study and numerical simulation of surface strengthening residual stress field of high strength steel[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [12] 赵莉莉. 喷丸残余应力对裂纹扩展疲劳寿命影响的数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [13] ZHAO Lili. Numerical simulation of the effect of shot peening residual stress on fatigue life of crack propagation[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [14] WANG Y Z, ZHANG Y P, SONG G H, et al. Effect of shot peening on fatigue crack propagation of Ti6Al4V[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101430.
- [15] LIN Q J, LIU H J, ZHU C C, et al. Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398: 126054.
- [16] ZHANG Q, DUAN B, ZHANG Z Q, et al. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11(3): 1090-1099.
- [17] FAN Y, GAO Y. Predicting the peen forming effectiveness of Ti-6Al-4V strips with different thicknesses using realistic finite element simulations[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2016, 22(1): 59-62.
- [18] SEKAR K V, KUMAR K P. Finite element simulations of Ti6Al4V titanium alloy machining to assess material model parameters

of the Johnson-Cook constitutive equation[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2011, 33(2): 203-211.

[14] 蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析 [J]. 表面技术, 2016, 45(4): 5-9, 52.

JIANG Congying, HUANG Lu, WANG Jingchen, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 5-9, 52.

[15] 王利平, 王建明, 赵莉莉, 等. 基于 SPH 结合 FEM 的喷丸残余应力数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 71-76.

WANG Liping, WANG Jianming, ZHAO Lili, et al. Numerical simulation of shot peening residual stress based on SPH and FEM[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 71-76.

[16] 须庆. 各向异性材料喷丸残余应力的数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

XU Qing. Numerical simulation of shot peening residual stress in anisotropic materials[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

通讯作者: 孙辉, 讲师、硕士, 主要研究方向为焊接技术及自动化。

(责编 七七)

(上接第 70 页)

当 $a_p=0.2\text{mm}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ 、 $n=800\text{r/min}$ 时, 减振刀具的最大输出电压为 3.3V (图 10 (b))。当 f 从 0.1mm/r 降低到 0.05mm/r 且其他参数保持不变时, 最大输出电压从 3.3V 降低到 1.7V (图 10 (a))。在图 10 (b) 的切削参数基础上仅将 a_p 增加到 0.4mm, 最大输出电压即达到 10.1V (图 10 (c))。从频域观察电压信号, 相比于图 7, 电压信号的频域图不仅能看到减振刀具的共振峰频率, 还能清晰地看到主轴旋转频率 26Hz 及其倍频, 这表明电压信号与切削振动相关度高。

5 结论

为提高振动抑制效果, 本文设计出一种压电陶瓷式吸振器, 并将其应用于大长径比车削刀具上。吸振器将刀具的振动能量传递给吸振器的质量块与阻尼元件, 而压电陶瓷作为阻尼元件将振动能量转换为电能。通过分析内置吸振器刀具的无量纲频率响应以及压电陶瓷的响应特性, 对吸振器进行参数优化设计, 结论如下。

(1) 与仅具有黏性阻尼的吸振器相比, 具有双重阻尼的吸振器使频响函数峰值进一步减小了 5.8%。

(2) 模态试验表明, 具有压电陶瓷吸振器刀具的共

振峰值衰减到原刀具的 19.9%, 极大地提高了加工稳定性。

(3) 在多种切削参数下进行加工试验, 相比于无吸振器刀具, 加吸振器后刀具频响函数峰值下降了 72%, 工件表面粗糙度下降了 67.2%, 切削过程中收集到压电陶瓷输出的电压信号幅值可达 10.1V, 且信号与切削振动相关度高。

参考文献

[1] DENKENA B, BERGMANN B, TEIGE C. Frictionally damped tool holder for long projection cutting tools[J]. Production Engineering, 2018, 12(6): 715-722.

[2] LIU Y, LIU Z Q, SONG Q H, et al. Development of constrained layer damping toolholder to improve chatter stability in end milling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 117: 299-308.

[3] ZIEGERT J C, STANISLAUS C, SCHMITZ T L, et al. Enhanced damping in long slender end mills[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2006, 8(1): 39-46.

[4] HAHN R S. Design of lanchester damper for elimination of metal-cutting chatter[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1951, 73(3): 331-335.

[5] 杨毅青, 骈亚威, 王云飞. 内置被动阻尼器减振铣刀的实验测试 [J]. 振动, 测试与诊断, 2019, 39(6): 1177-1182.

YANG Yiqing, PIAN Yawei, WANG Yunfei. Experimental tests of damped milling cutter based on embedded passive damper[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(6): 1177-1182.

[6] 陈子光, 胡元太, 杨嘉实. 基于扭转模态的角振动压电俘能器研究 [J]. 应用数学和力学, 2007, 28(6): 693-698.

CHEN Ziguang, HU Yuantai, YANG Jiashi. Research on angular vibration piezoelectric energy harvester based on torsional mode[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(6): 693-698.

[7] 刘祥建, 陈仁文. 激励环境下 rainbow 型压电换能器发电性能分析 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(21): 172-176.

LIU Xiangjian, CHEN Renwen. Power generation performance analysis of rainbow piezoelectric transducer under excitation environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(21): 172-176.

[8] ABDELMOULA H, DAI H L, ABDELKEFI A, et al. Control of base-excited dynamical systems through piezoelectric energy harvesting absorber[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9): 95013.

[9] YAN Z, HAJJ M R. Energy harvesting from an autoparametric vibration absorber[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(11): 115012.

[10] 周标, 柯宏威, 陈旭, 等. 基于压电分支阻尼技术的航空发动机叶片振动抑制方法研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 209-215.

ZHOU Biao, KE Hongwei, CHEN Xu, et al. Aero-engine blade vibration suppression method based on piezoelectric shunt damping technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 209-215.

通讯作者: 杨毅青, 副教授, 博士, 研究方向为先进数控加工技术与装备。

(责编 七七)