

文章编号: 1001-4888(2024)02-0149-09

残余应力对柔性薄壁连接结构固有频率的影响*

高粱¹, 咎祥², 李艳², 邓华夏¹, 王宇¹, 龚兴龙¹

(1. 中国科学技术大学 近代力学系 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 对于光束线系统中的精密部件而言, 线切割加工过程往往会造成部件表面产生残余应力, 从而使得精密部件的振动特性与设计预期产生偏差, 影响电子束流的稳定性。本文通过对柔性薄壁连接试件固有频率的测量, 结合数字图像相关方法和有损切割法对薄壁连接处残余应力进行分析, 并结合有限元法分析了残余应力对柔性薄壁连接试件的固有频率影响, 从而对光束线系统中柔性铰链部件的固有频率与设计值的偏差进行了探究, 研究结果可为柔性薄壁连接部件振动特性设计提供依据。

关键词: 残余应力; 柔性铰链; 固有频率

中图分类号: TG48 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-24-042

0 引言

随着同步辐射光源对电子束流稳定性要求的不断提升, 光束线系统中的精密部件对光源性能的影响显得尤为重要。在光束线系统中, 为了满足精密机械对变形控制的高精度要求, 存在一类含薄壁连接的金属柔性铰链部件, 这类柔性铰链的加工通常需要经过铣削、钻孔、激光切割、电火花线切割等方式^[1-2]。在加工过程中, 不可避免地会在薄壁区域产生残余应力, 而残余应力的存在可能会对柔性铰链结构的固有频率产生影响, 进而影响整个系统的控制精度。同步辐射光源中采用了一系列高精密光学部件, 这些部件的振动特性直接关系到光束的稳定性。因此, 清楚认识线切割残余应力对柔性薄壁连接结构固有频率的影响, 对于高精密光束线系统的设计具有重要意义。

研究表明^[3-4], 切削工艺通常会导部件加工位置表面产生残余应力, 一般而言, 线切割导致的残余应力主要为分布表面的拉应力, 并随着深度增加而快速降低。丁海娟等^[5]采用电解抛光仪逐层去除的方法测定了 M42 钢电火花线切割加工表面残余应力分布, 发现表层下 180 μm 以内整体表现为残余拉应力, 应力值达到 200MPa。KRUTH 等^[6]对 C45 钢工件线切割残余应力进行测量, 结果显示残余应力主要分布在表面以下 100 μm 以内, 最大能达到 400MPa。

针对残余应力对固有频率的影响规律, GHAREHBAGHI 等^[7]利用钻孔法对 AA6061-T6 铝板的焊缝处残余应力进行了测量, 并通过实验和仿真方法研究了有无焊接残余应力时铝板的固有频率, 发现有残余应力的情况下固有频率会发生变化。DAS 等^[8]采用 XRD(X-Ray Diffraction)方法测量了 304 不锈钢板的焊接残余应力, 并探究了残余应力与固有频率之间的关系, 结果表明焊缝的残余应力与固有频率以线性回归方程的形式相关。ZHANG 等^[9]分析了金刚石线锯在残余应力作用下的固有频率变

* 收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(12372187); 同步辐射联合基金项目(KY2090000097)

通信作者: 龚兴龙(1966-), 男, 博士, 教授/博士生导师。主要研究领域: 实验力学、智能材料与振动控制。Email: gongxl@ustc.edu.cn

化,并提出了利用运动母线振动频率检测残余应力的方法,发现母线固有频率随着残余应力的增加而上升,且残余应力作用与拉应力相似。这些研究工作都表明,残余应力会对结构的固有频率造成影响。

为探究加工残余应力对光束线系统柔性铰链固有频率的影响规律,本文首先通过锤击法对线切割加工的柔性铰链结构不锈钢试件进行了固有频率测量;进一步将残余应力释放,并利用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法对柔性铰链处的变形进行测量,根据测量结果反演薄壁结构处残余应力;最后结合有限元方法分析残余应力对柔性铰链结构固有频率的影响。本文通过 DIC 方法测量获取线切割加工的残余应力,探讨残余应力对固有频率的影响,相关的研究结果可为光束线系统精密部件中的柔性铰链结构设计提供参考,并可为新一代同步辐射光源的光束线系统振动稳定性研究提供支持。

1 实验测试及分析

1.1 试件准备

为分析残余应力对柔性薄壁连接结构固有频率的影响,设计了如图 1(a)所示的试件,其中外框架起刚性支撑作用,通过两根连杆将中间质量块部分和外框架连接,连杆由刚性杆和两端的直圆型柔性铰链构成。试件加工材料采用 304 不锈钢,通过常规电火花线切割工艺一体化加工成型,如图 1(b)。

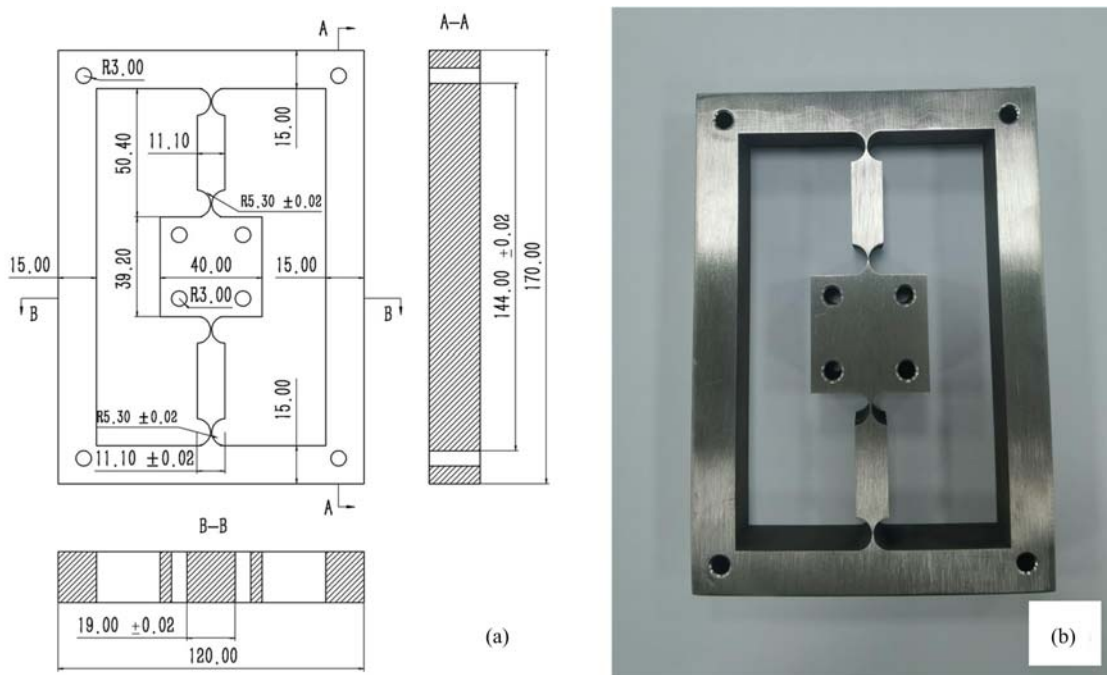


图 1 (a) 试件工程简图(单位:mm);(b) 电火花线切割加工的试件

Fig. 1 (a) engineering drawing of the specimen (mm); (b) specimen machined with wire EDM (Electrical Discharge Machine)

1.2 固有频率的测试

通过锤击法对加工试件的固有频率进行测量(图 2(a)):采用力锤(江苏东华测试技术股份有限公司,型号为 LC02)敲击试件,并通过力锤中的力传感器(型号为 3A102)获取锤击力信号;在试件的中间质量块部分固定加速度传感器(江苏东华测试技术股份有限公司,型号为 DH141),用来获取试件受到激励的响应信号。力锤的锤击信号和锤击作用下的试件响应信号均通过图 2(b)中的信号采集系统来获取。

在 40s 内连续进行 3 次锤击,激励方向平行于图 2(a)中传感器的安装方向,用信号采集系统获取锤击过程中的力信号和加速度信号。为了保证良好的相干性,每次锤击都需要等测试试件的加速度响应

衰减到零附近,并确保每次锤击无连击现象。对测量所得的加速度响应信号进行 FFT(Fast Fourier Transformation)处理以获得试件的频域响应曲线,进而获得试件的固有频率。

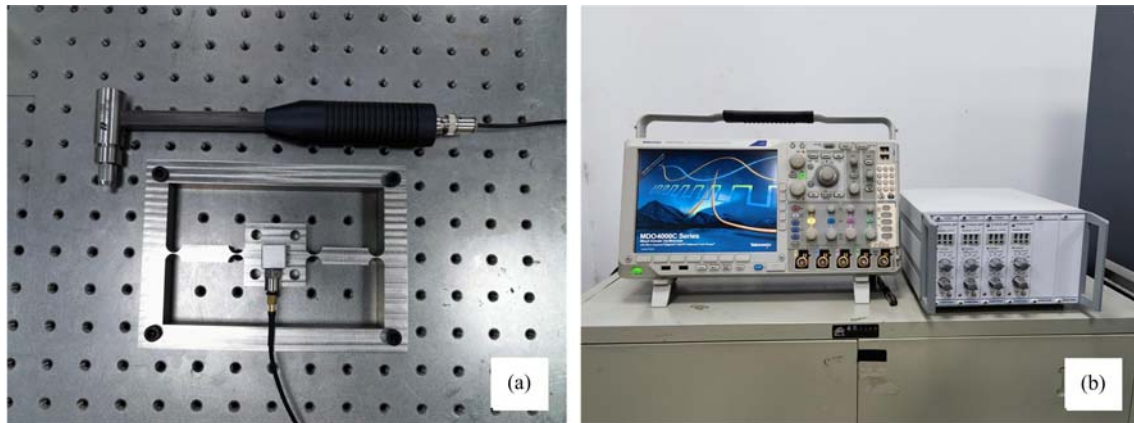


图 2 (a) 锤击测试试件;(b)信号采集系统

Fig. 2 (a) specimen excited by hammer; (b) data sampling system

1.3 数值仿真

为研究残余应力对结构固有频率的影响规律,采用有限元方法对试件振动特性进行分析。根据图 1 的结构,对试件的模型划分有限元网格,随后通过有限元软件 ABAQUS 对试件的固有频率进行仿真计算,有限元模型如图 3 所示。在划分网格时对连杆的柔性铰链部分进行局部网格加密,柔性铰链最细处所采用的网格尺寸约为 0.10mm,得到的整个试件模型共有 C3D20R 单元 38052 个,C3D15 单元 5040 个。模型的弹塑性材料参数如下:弹性模量约为 182.08GPa,弹塑性模量约为 5.25GPa,屈服极限约为 305.66 MPa,泊松比为 0.30,密度为 7.89 g/cm³。有限元模型的边界条件与实验条件一致,在试件外框的 4 个孔洞处采用固支边界条件。同时,在模型中间部分添加了 1 个质量点,其质量大小为加速度传感器和支架块质量之和,根据测量结果可得传感器和支架块的质量和为 12.75g。此外,在模态分析步之前添加静力分析步并激活非线性几何,通过在薄壁结构处施加预应力场的办法模拟残余应力的影响,从而利用有限元法分析残余应力对结构振动特性的影响规律。

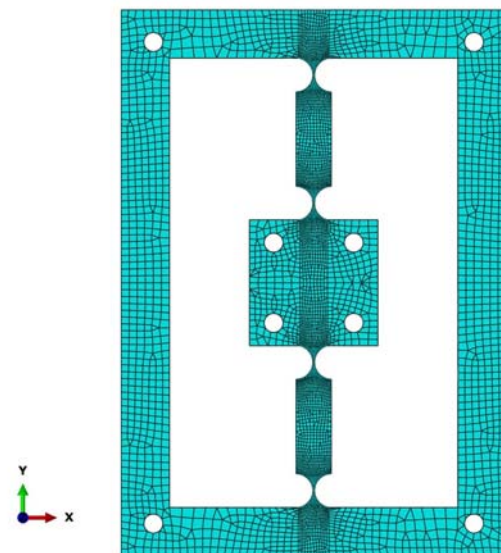


图 3 有限元网格划分

Fig. 3 Mesh of finite element model

1.4 薄壁连接结构残余应力的测试

残余应力的测试分为有损方法和无损方法,然而由于柔性铰链结构异形,仅通过常规方法难以完成残余应力的测量。本项研究工作通过切割法对试件的残余应力进行释放,然后利用 DIC 方法获取薄壁连接处的变形量,并进一步根据变形结果反演残余应力值。按照 DIC 方法的测量要求^[10-11],对 1.1 节中测试试件的表面均匀喷涂散斑(图 4)。

使用 CCD 相机对薄壁连接的柔性铰链局部进行第 1 次拍摄,从而采集试件残余应力未释放状态下的目标图像。实验采用分辨率为 3072pixel×2048pixel 的工业 CCD 相机(杭州海康威视数字技术股份有限公司,型号为 MV-CE060E-10UM),搭配焦距为 12mm 的定焦镜头,拍摄平台如图 5(a)所示。依次

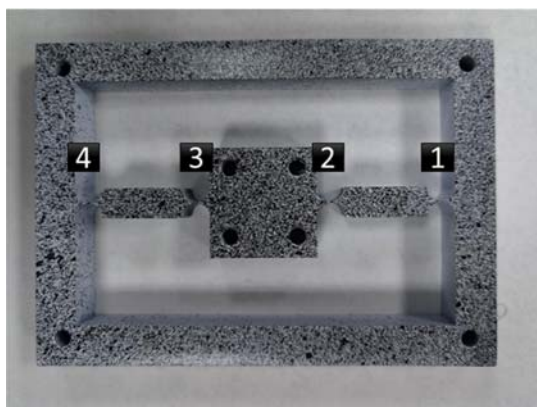


图 4 喷涂白底黑色散斑的试件

Fig. 4 The specimen with black random speckles applied onto white surface

对试件中每一个柔性铰链处的散斑图片进行拍摄,在每次拍摄时确保光轴和拍摄平面保持垂直,且在放置试件时让每个柔性铰链的薄壁位置处于拍摄画面中间。拍摄获取的其中一个铰链的图像如图 5(b)所示。

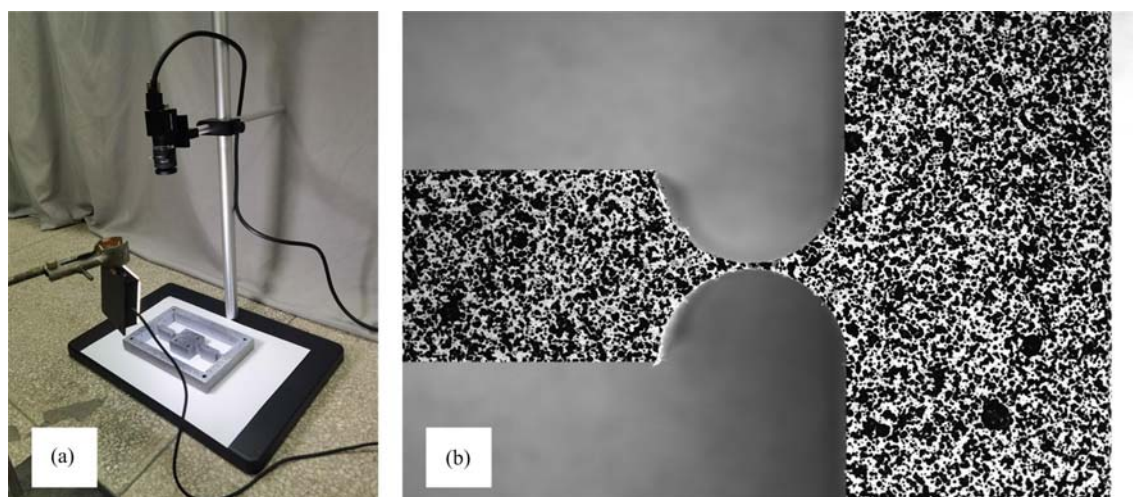


图 5 (a) DIC 拍摄平台; (b) CCD 拍摄的柔性铰链图像

Fig. 5 (a) set-up for DIC; (b) picture of flexure hinge filmed with CCD

将该试件进行切割处理,通过线切割将图 4 中 1-2 连杆的中间刚性杆沿中部截断,使整个柔性铰链结构的残余应力得以释放。然后再利用 CCD 相机对截断之后的试件进行第 2 次拍摄,使用与第 1 次相同的方法依次拍摄 4 个柔性铰链处的局部散斑图像,从而获取释放直圆型柔性铰链处残余应力之后的变形图像。最后通过直圆型柔性铰链的变形来反演对应的残余应力。

2 结果讨论

2.1 薄壁连接结构的固有频率

锤击法测试中采集到的试件加速度响应信号和激励力信号如图 6(a)所示,将试件的时域加速度响应信号进行 FFT 处理转换为频域曲线(图 6(b)),获得线切割加工试件在残余应力未释放状态下的 1 阶固有频率为 95.13Hz。

在未考虑残余应力的情况下,对试件的有限元模型进行仿真计算,获取了模型的 1 阶模态结果如图 7 所示,仿真得到的试件固有频率为 63.18Hz。柔性薄壁连接试件的仿真结果与实验测试结果的偏差较大,仿真固有频率的偏差已达到 33.58%。

2.2 残余应力分析

利用 DIC 分析软件 GOM Correlate 对切割前后每个柔性铰链附近的图像进行分析,确定切割后残

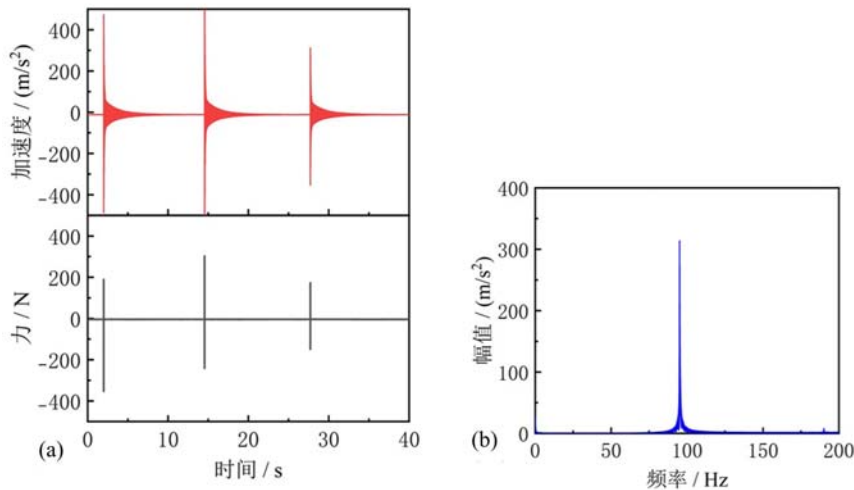


图 6 原试件：(a)锤击测试激励和响应信号；(b)响应信号的频域数据

Fig. 6 Specimen as received: (a)hammer excitation and response signals; (b)frequency-domain data of response signal
余应力释放导致的柔性铰链长度相对变化,进而根据局部应变信息反演柔性铰链残余应力大小。

以未截断试件的直圆型柔性铰链局部图像作为参考图像(图 8),根据参考图像中的标距计算图中每个像素对应的实际尺寸约为 $13.69\mu\text{m}\times 13.69\mu\text{m}$ 。考虑到残余应力对连杆中间的刚性杆部分影响较小,假定其切割之后应变为零。如图 8 所示,在刚性连杆处创建子区域尺寸 $51\text{pixel}\times 51\text{pixel}$ 的点 A,在水平方向确定相同子区域尺寸的点 B,以切割前后 AB 线段长度的改变确定试件位置移动导致的像素分辨率变化比例。然后,在每个直圆型柔性铰链的参考图像中,选取一子区域尺寸大小为 $51\text{pixel}\times 51\text{pixel}$ 的点 C。从点 C 沿水平方向出发,在距 C 点 24mm 处选取相同子区域大小的点 D,利用相关函数极值条件确定试件切割前后 CD 连线上不同位置像素点 E 的位置,进而利用式(1)计算由于残余应力释放导致不同位置像素点 E 相对于点 C 的位移 Δl 。其中 l_0 为线段 CE 在参考图像中的长度大小; l'_0 为线段 CE 上在切割后图像中的长度大小; l_1 为线段 AB 上在参考图像中的长度大小; l'_1 为线段 AB 上在切割后图像中的长度大小。

$$\Delta l = l'_0 \frac{l_1}{l'_1} - l_0 \tag{1}$$

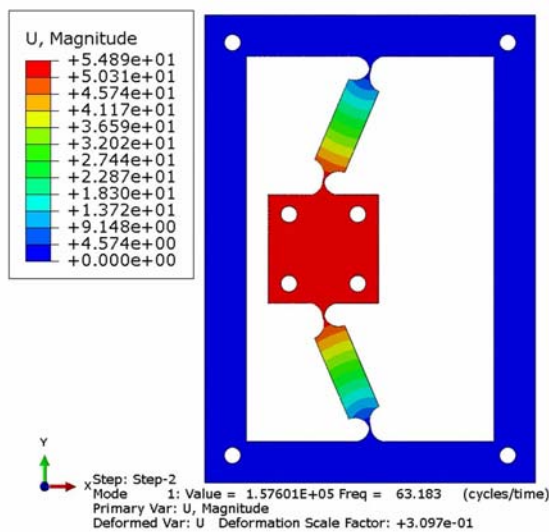


图 7 无预应力场模型的 1 阶模态

Fig. 7 1st mode shape without prestress

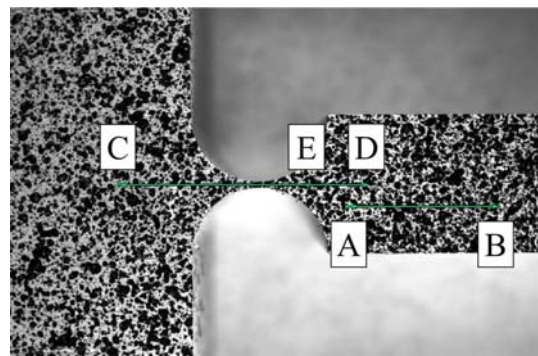


图 8 参考图像及变形的测量示意图

Fig. 8 Reference image and deformation measuring

直圆型柔性铰链处变形数据及拟合结果如图9所示,其中直圆型柔性铰链编号对应图4中的编号,从图9中的相对位移可以看出,在切割连杆释放残余应力之后,直圆型柔性铰链产生了沿着连杆方向的收缩。其中,在C点附近的像素点位移较小,而在薄壁连接结构中心区域位移量逐渐增加;在D点的像素点,其相对C点的位移大致相等,意味着D点附近像素点接近刚体运动。根据不同线段CE的长度变化可以发现,残余应力释放导致局部变形大致分为3个部分,分别对3个区域的位移进行拟合可以得到在薄壁连接区域的局部应变分布,见表1。

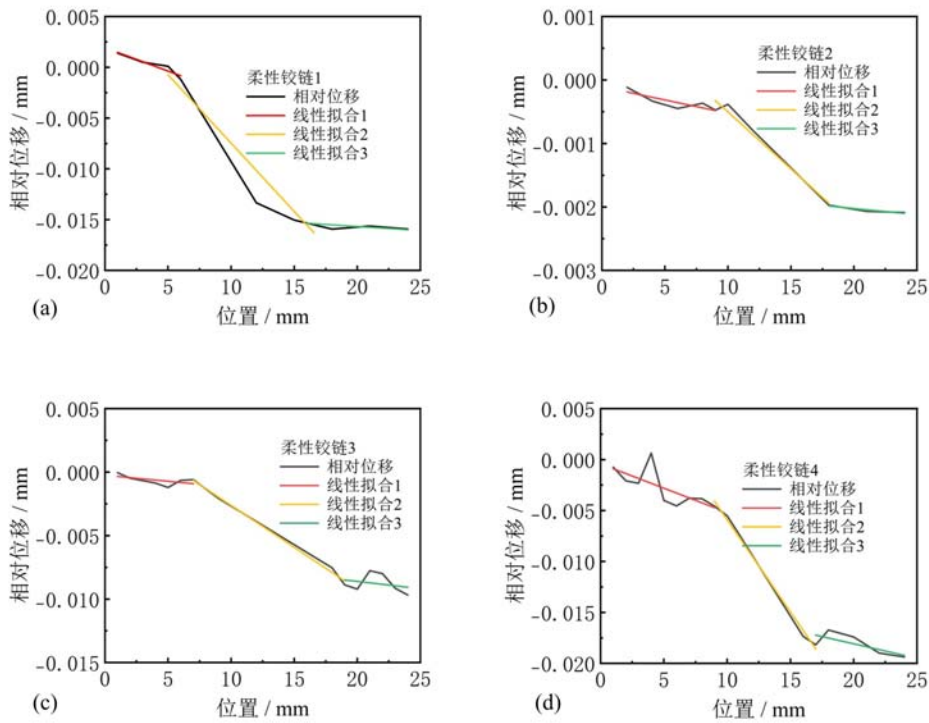


图9 柔性铰链变形数据及拟合结果

Fig. 9 Deformation of the flexure hinges and its fitting results

表1 柔性铰链处局部应变

Tab. 1 Local strain of the flexure hinges

柔性铰链	局部应变	柔性铰链	局部应变	柔性铰链	局部应变	柔性铰链	局部应变
	-4.59E-04		-4.18E-05		-8.13E-05		-4.78E-04
1	-1.35E-03	2	-1.79E-04	3	-6.59E-04	4	-1.81E-03
	-7.97E-05		-1.94E-05		-1.16E-04		-2.85E-04

由每个直圆型柔性铰链薄壁连接区域的局部应变 ϵ^* 可以得到对应区域的残余应力 σ 为

$$\sigma = -E\epsilon^* \tag{2}$$

试件弹性模量为 182.08GPa,由式(2)可以确定不同区域对应的残余应力值(表2)。

表2 柔性铰链处残余应力

Tab. 2 Residual stress of each flexure hinge

柔性铰链	残余应力 /MPa	柔性铰链	残余应力 /MPa	柔性铰链	残余应力 /MPa	柔性铰链	残余应力 /MPa
	83.61		7.61		14.81		86.98
1	245.81	2	32.63	3	120.03	4	329.56
	14.34		1.02		21.07		51.82

将获取的残余应力值作为有限元模型预应力场中连杆轴向方向的分量,施加在不同直圆型柔性铰链对应区域的单元中,打开静力分析步中的几何非线性开关,计算模型的静力结果后再对模型进行模态仿真,获取 1 阶模态结果如图 10 所示,仿真中考虑残余应力作用的模型 1 阶固有频率约为 94.78Hz。将仿真结果与实验结果对比,偏差约为 0.37%,可见考虑残余应力分布的仿真结果与实验结果吻合良好。

2.3 截断试件测试及仿真对比

对切割后的试件的固有频率进行测量,结果如图 11 所示,其 1 阶固有频率为 16.74Hz。通过与截断连杆的有限元模型仿真对比分析(图 12),计算得到截断后结构的 1 阶固有频率为 16.99Hz,仿真固有频率与实验频率之间偏差为 1.49%,进一步验证了残余应力对柔性铰链结构的固有频率产生影响的结论。

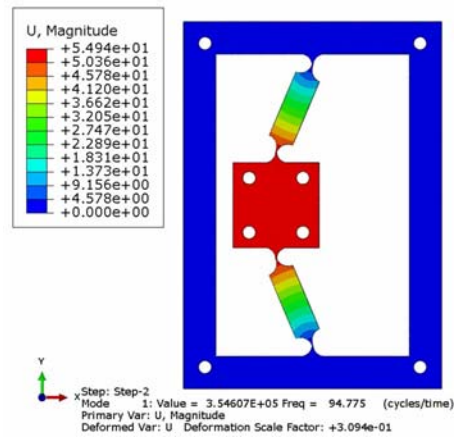


图 10 施加预应力场模型的 1 阶模态
Fig. 10 1st mode shape with prestress

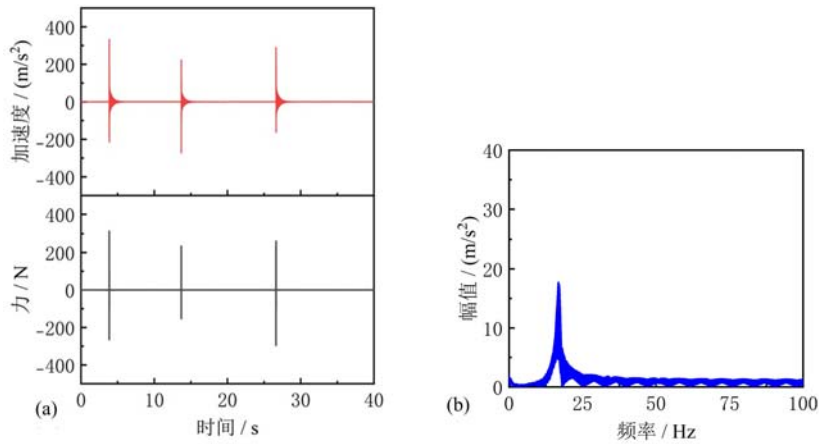


图 11 切割后试件: (a)锤击测试激励和响应信号;(b)响应信号的频域数据
Fig. 11 The cut specimen; (a) hammer excitation and response signals;
(b) frequency-domain data of response signal

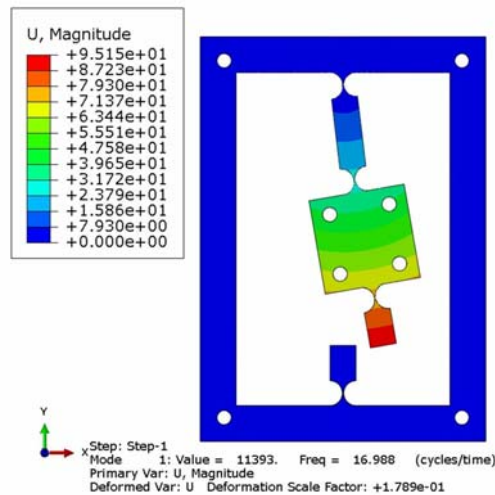


图 12 试件连杆截断模型的 1 阶模态
Fig. 12 1st mode shape of the cut model

3 结论

本文通过锤击法测试了含有直圆型柔性铰链的不锈钢试件,分别获取了线切割加工的原试件和截断后试件的固有频率。同时,采取 DIC 方法,利用切割法对直圆型柔性铰链的局部残余应力进行分析,通过对比截断前后试件的薄壁连接处散斑图像,分析局部残余应力导致的变形大小,进一步反演确定了不同薄壁连接区域残余应力的大小。通过建立有限元模型,进行残余应力对结构固有频率影响的仿真分析,计算得到的固有频率与实验测试得到的固有频率吻合较好。研究表明:常规电火花线切割导致柔性铰链产生残余应力,使得部件的固有频率显著偏大,从而会导致柔性铰链结构动力学特性与设计预期产生偏差。本文研究结果可为同步辐射中关键精密结构的设计和加工提供一定参考。

参考文献:

- [1] 曾超,毛成文,何燕,等. 纳米精度位移机构柔性铰链结构设计分析[J]. 核技术, 2022, 45(7):12-20 (ZENG Chao, MAO Chengwen, HE Yan, et al. Design and analysis of flexure hinge displacement mechanism with nano precision[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(7):12-20 (in Chinese))
- [2] 王姝歆,陈国平,周建华,等. 复合型柔性铰链机构特性及其应用研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增刊):91-97 (WANG Shuxin, CHEN Guoping, ZHOU Jianhua, et al. Compliant mechanisms consisted of compound flexible hinges and its applications [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(Suppl.): 91-97 (in Chinese))
- [3] JANG D Y, WATKINS T R, KOZACZEK K J, et al. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel[J]. Wear, 1996, 194(1):168-173.
- [4] LUNDBERG M, SAARIMÄKI J, MOVERARE J J, et al. Surface integrity and fatigue behaviour of electric discharged machined and milled austenitic stainless steel[J]. Materials Characterization, 2017, 124:215-222.
- [5] 丁海娟,李小海,郭黎滨,等. 微细电火花线切割加工 M42 表面残余应力研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2017, 35(1):88-89, 94 (DING Haijuan, LI Xiaohai, GUO Libin, et al. Research on residual stress of micro wire electrical discharge machining M42 surface [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2017, 35(1):88-89, 94 (in Chinese))
- [6] KRUTH J P, BLEYS P H. Measuring residual stress caused by wire EDM of tool steel[J]. International Journal of Electrical Machining, 2000, 5:23-28.
- [7] GHAREHBAGHI H, HOSSEINI S, HOSSEINI R. Investigation of the effect of welding residual stress on natural frequencies, experimental and numerical study[J]. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering, 2023, 47:1777-1785.
- [8] DAS D, PRATHAR D K, ROY G G. Establishing a correlation between residual stress and natural frequency of vibration for electron beam butt weld of AISI 304 stainless steel[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2020, 45(7):5769-5781.
- [9] ZHANG M, LI S, KANG T, et al. Residual stress dynamic detection and vibration characteristics of wire saw busbar[J]. Journal of the International Measurement Confederation, 2024, 226:114056.
- [10] 李阳,孙晨,陈巨兵. 基于数字图像相关方法的矿用扁平接链环模型接触变形实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(6):926-934 (LI Yang, SUN Chen, CHEN Jubing. Experimental investigation on contact deformation of mining flat type chain connector model based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(6):926-934 (in Chinese))
- [11] 宋秋,李晓星,杨岩峰. 基于 DIC 方法的残余应力快速测量系统[J]. 实验力学, 2017, 32(4):506-516 (SONG Qiu, LI Xiaoxing, YANG Yanfeng. A rapid measurement system of residual stress based on DIC method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4): 506-516 (in Chinese))

Effect of residual stress on natural frequency of thin-walled component

GAO Liang¹, ZAN Xiang², LI Yan², DENG Huaxia¹, WANG Yu¹, GONG Xinglong¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: For precision components in synchrotron radiation light source, the wire EDM often induces residual stresses on the component surfaces, leading to deviations from the expected vibration characteristics in the design, which can affect the stability of the electron beam. This paper measured the natural frequency of a flexure thin-walled connection specimen, and analyzed the residual stress at the flexure hinges using both the digital image correlation method and the notching method. Furthermore, the finite element method was employed to probe into the effect of residual stress on the natural frequency of the flexure hinge. The investigation helps to explore the deviation between the measured flexure hinge and the designed one and offers a design foundation for understanding the vibration characteristics of the thin-walled components.

Keywords: residual stress; flexure hinge; natural frequency