

文章编号: 1001-4888(2006)03-0292-07

材料拉压加载试验实时同步辐射 CT 分析系统^{*}

李大应, 胡小方, 夏源明

(中国科学技术大学 力学与机械工程系, 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 本文介绍了自行研制的材料拉压加载试验实时同步辐射 CT 分析系统, 该系统既可得到试件拉压试验 $P-\Delta$ 曲线, 也可得到对应曲线上任意点的试件 CT 重建图。该系统的关键设备之一是自行研制的一体化拉压加载和转动装置, 文中以 X 射线 CCD 的像素尺寸 $10.9\mu\text{m} \times 10.9\mu\text{m}$ 为基础, 通过分析, 给出了加载和转动装置应满足的运动学定位精度要求。该装置采用了四柱式框架结构, 采用上下夹头同步转动实现试件相对于框架的刚性转动; 上夹头作相对于框架的轴向运动(下夹头轴向位置固定)实现对试件的加载; 在加载和转动装置中采用了诸多高精技术, 实现了试件高精度的轴向定位、径向定位和刚性角度定位; 对装置的精度检测表明其实际的定位精度优于运动学定位精度要求; 对系统的计量考评初步表明, 系统不计噪声的空间分辨率优于 X 射线 CCD 的像素 $10.9\mu\text{m}$ 。

关键词: 同步辐射; CT; X 射线 CCD; 一体化加载和转动装置; 空间分辨率

中图分类号: O348

文献标识码: A

0 引言

同步辐射是从远红外到 X 射线范围的连续光谱, 具有高强度、高准直性等优点。同步辐射的出现给 CT 技术发展带来了新希望, 国外一直在致力于同步辐射 CT 技术研究, 并把它应用到固体材料内部细观结构检测上^[1-3]。美国、日本、德国、俄国、加拿大等国研究人员在各自同步辐射加速器上均建立了 CT 材料试验系统, J. H. Kinney^[4,5]等采用同步辐射 CT 技术对碳化硅增强铝基复合材料 (Al/SiC) 进行了无损检测, 得到了材料内部结构图, 分辨率为 $10\mu\text{m}$ 。J-Y. Buffiere^[6]等采用同步辐射 CT 技术对碳化硅增强铝基复合材料 (Al/SiC) 进行了损伤评估, O. B. Olurin^[7]等对泡沫铝内部的结构参数进行了研究, S. Youssef^[8]等对泡沫聚合物的内部结构及其在压缩过程中的演化进行了研究。目前国际上同步辐射 CT 技术主要向两个方向发展, 其一是提高 CT 系统空间分辨率, 其二是研制材料试验高分辨率实时 CT 分析系统, 其中又以拉压加载试验实时 CT 分析系统为主要发展方向。

T. Hirano^[9]等研制了一台分体式拉伸加载和转动装置, 并成功组建了一套材料拉伸试验实时同步辐射 CT 分析系统, 实现了 Al/SiC 内部细观结构在线检测, 并初步观察到 Al/SiC 在拉伸载荷加载下 SiC 纤维脱层、纤维拔出和基体开裂现象, 文献没有给出该系统的空间分辨率。所谓分体式结构, 是指该装置由龙门式拉伸加载装置和高精度回转工作台组成, 且将前者放到后者台面上, 并跟随后者作旋转运动, 从而实现试件在拉伸加载状态下转动。由于试件跟随龙门架转动, 龙门架在一些角度挡住了入射光, 因此无法得到 180° 全范围的投影, 从而影响了重建图像的质量。

我们成功研制了一台四柱式一体化拉压加载和转动装置, 该装置上夹头和下夹头还可作同步转动

^{*} 收稿日期: 2005-06-23; 修订日期: 2006-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 10232030)和高能所同步室 BSRF 基金联合资助课题

通讯作者: 李大应(1968-), 男, 博士生, 研究方向: 同步辐射 CT 技术。

实现试件的刚性转动,上夹头可作轴向运动(下夹头轴向位置固定)实现对试件的加载,所有运动机构装配在一个四柱式框架中,故称四柱式一体化拉压加载和转动装置。试验时框架固定不动,只要其放置合适,可以保证框架自身不遮挡光源。我们以该装置为基础,组建了一套材料拉压加载试验实时同步辐射CT分析系统,该系统可以得到试件的拉压载荷和轴向相对位移曲线,以及在不同拉压加载时刻下试件的三维立体图 and 不同位置不同方向的截面图。本文将对该系统和装置及其相关问题作一分析介绍。

1 CT 分析系统简介

图1为本套材料拉压加载试验实时同步辐射CT分析系统图,图2为系统实物图,同步辐射光源经过硅单晶变成单色光,再通过取光屏截取需要的光束线,然后垂直于试件回转主轴穿透试件,最后垂直照射到X射线CCD接收屏上。试件的加载和转动以及X射线CCD的成像都是通过计算机控制的;力的测量采用自行设计的高同心度筒形电阻应变式力传感器和应变仪实现;上夹头的轴向位移实为带动上夹头轴向运动的滚珠丝杠的位移,通过角光栅读取驱动滚珠螺母转动的蜗杆的转角换算得到。

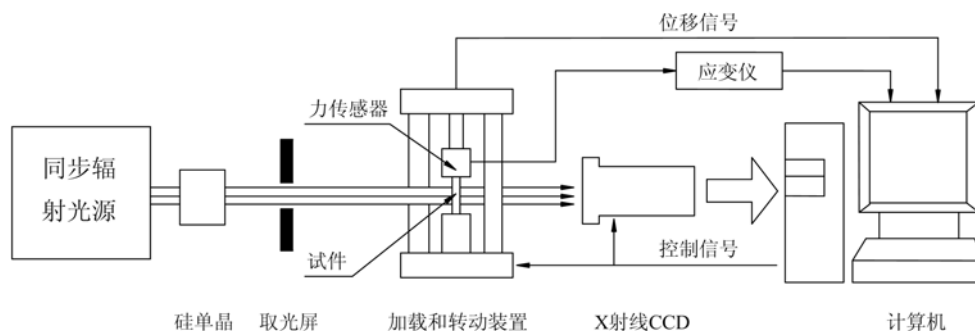


图1 材料拉压加载试验实时同步辐射CT分析系统

Fig. 1 Real-time synchrotron radiation CT system for materials analysis



图2 系统实物图

Fig. 2 Photo of the system

实验中,每加载一个 ΔP (或 Δ), 得到一个 Δ (或 ΔP), 即得到 $P-\Delta$ 平面上一点, 同时得到一幅透射投影图, 然后转动试件 $\Delta\theta$ 角 ($\Delta\theta$ 根据试件的直径选择^[10]), 得到另一幅透射投影图, 以此类推, 分别转动试件到 $2\Delta\theta, 3\Delta\theta$ 直至 $(n-1)\Delta\theta$ 角 ($n\Delta\theta=180^\circ$), 共得到 n 幅透射投影图, 然后加载试件到另一个状态, 得到 $P-\Delta$ 平面上另一点和另一组 n 幅透射投影图, 以此类推, 共得到 $P-\Delta$ 平面上 m 个点和 m 组透射投影图。将 m 个点连起来得到试件的 $P-\Delta$ 曲线; 对每一组 n 幅透射投影图, 采用 R-L 滤波器的滤波反投影重建算法, 得到 k 幅试件不同高度的断面图 (k 为 CCD 点阵的行数), 进一步可以得到试件三维立体图和不同位置不同方向截面图。图3是用该套系统得到的泡沫铝压缩试验 $P-\Delta$ 曲线, 图4

是对应曲线上 A 点的试件三维立体图。

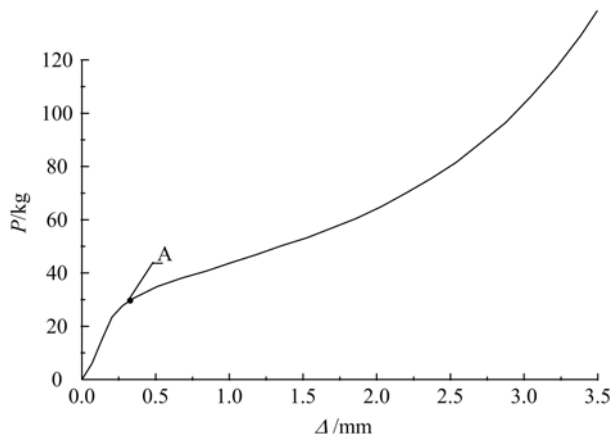


图 3 泡沫铝 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 3 Foam aluminium $P-\Delta$ curve

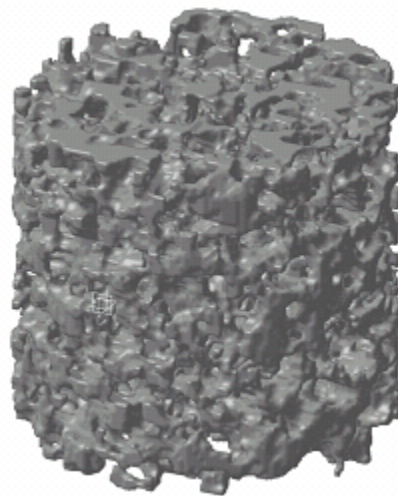


图 4 曲线上 A 点三维
立体图(试件直径 7mm)

Fig. 4 The solid figure corresponding
to the point of the curve

2 四柱式一体化加载和转动装置

2.1 系统空间分辨率与试件转动定位精度关系

本系统采用的 X 射线 CCD 的像素尺寸为 $10.9\mu\text{m} \times 10.9\mu\text{m}$, 根据 CT 重建算法^[10], 重建截面图像的像素尺寸同样为 $10.9\mu\text{m} \times 10.9\mu\text{m}$, 也即重建图像的理论空间分辨率为 $10.9\mu\text{m}$, 实际的空间分辨率还与光源空间分辨率、X 射线 CCD 阵列分布精度和信噪比以及试件转动定位精度有关, 为简单计, 本文仅分析重建图像的理论空间分辨率与试件运动定位精度的关系, 这是设计加载和运动装置的依据。

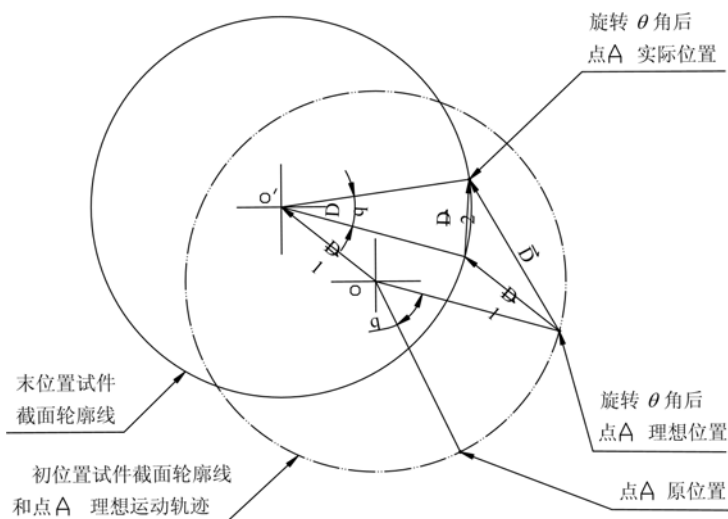


图 5 点在重建截面上的位置偏差图

Fig. 5 The position deviation of the point in the cross-section rebuilt by CT

试件转动定位偏差可以分解为三部分, 即径向定位偏差、角度定位偏差和轴向定位偏差, 其中径向定位偏差和角度定位偏差共同决定试件上的点在重建横截面上理论位置和实际位置偏差。设试件为圆柱体, 柱体直径为 D , 试件绕圆柱轴线从初位置转动 θ 角到末位置, 如图 5 所示, A 为重建横截面圆周上任意点, 设旋转 θ 角后点 A 实际位置和理论位置的偏差为 Δ , 其中由试件径向定位偏差引起的位置偏

差为 $\vec{\Delta}_1$, 由角度定位偏差引起的位置偏差为 $\vec{\Delta}_2$ 。由图可以得到:

$$\vec{\Delta} = \vec{\Delta}_1 + \vec{\Delta}_2 \quad (1)$$

$$|\vec{\Delta}| \leq |\vec{\Delta}_1| + |\vec{\Delta}_2| = |\vec{\Delta}|_{\max} \quad (2)$$

为满足重建截面一个像素的空间分辨率要求, 必须 $|\vec{\Delta}|_{\max} \leq 10.9 \mu\text{m}$ 。本文取 $|\vec{\Delta}|_{\max} = 10 \mu\text{m}$, 且取 $|\vec{\Delta}_1|$ 为 $5 \mu\text{m}$, 那么 $|\vec{\Delta}_2|$ 为 $5 \mu\text{m}$ 。

又因为:

$$|\vec{\Delta}_2| = \frac{1}{2} D |\Delta\theta| \quad (3)$$

本系统通常使用的 $D_{\max} = 6 \text{mm}$, 所以

$$|\Delta\theta| = \frac{360^\circ \cdot |\vec{\Delta}_2|}{2\pi D} = \frac{360^\circ \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2\pi D} = 0.048^\circ \quad (4)$$

同理, 试件上点在高度方向上的投影位置偏差不能超过 X 射线 CCD 一个像素尺寸 $10.9 \mu\text{m}$, 本文取 $5 \mu\text{m}$ (即轴向定位偏差)。

2.2 一体化加载和转动装置

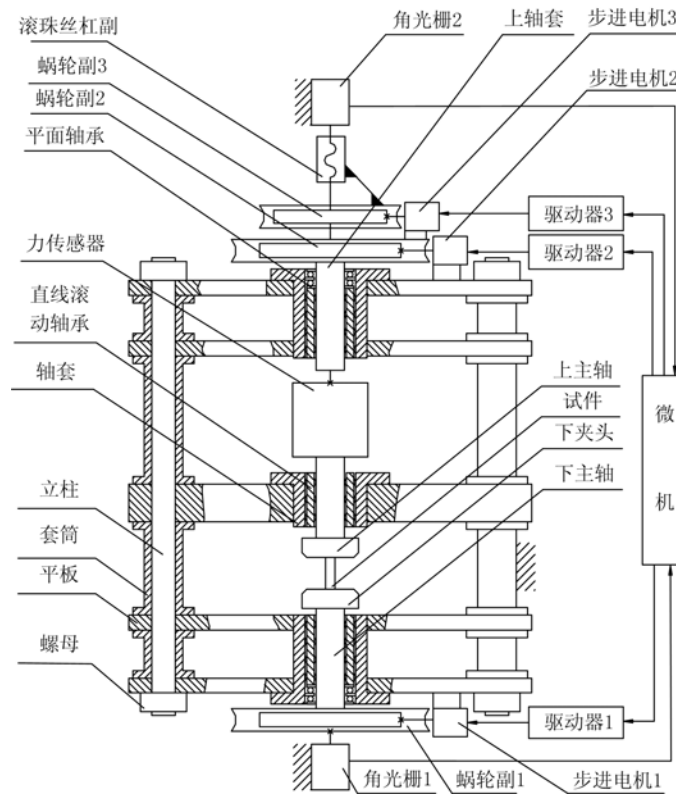


图6 一体化加载和转动装置示意图

Fig. 6 The integral loading/rotating device

图6为该装置示意图, 图中步进电机1和2分别驱动蜗轮副1和2实现上下主轴(包括夹头)转动, 通过角光栅1和2实时检测上下主轴的转角, 并与插入微机中的控制卡和控制软件组成对步进电机1和2的闭环控制系统, 从而实现对上下主轴(包括夹头)的高精度同步转动和定位控制。角光栅1和2一周脉冲数为25000, 换算成角度分辨率为 0.0144° , 最大绝对角度偏差为 0.0072° , 故上下夹头角度定位精度亦为 0.0072° ; 上下夹头同步的相对偏差为一个脉冲当量 0.0144° , 最大同步角度偏差 $\Delta\phi$ 为同步相对偏差和两个绝对角度偏差之和, 也即是:

$$\Delta\phi = 0.0144^\circ + 2 \times 0.0072^\circ = 0.0288^\circ \quad (5)$$

固定在蜗轮 2 上的步进电机 3 带动同样固定在蜗轮 2 上的蜗轮副 3,再由滚珠丝杠副(螺母固定在蜗轮 3 上)将蜗轮 3 的旋转运动转换成滚珠丝杠(包括上夹头)的直线运动,实现对试件加载,这样,转动上夹头(也即蜗轮 2)时就不会引起上夹头轴向运动,从而实现试件在载荷不变状态下转动。

四柱式框架是安装运动机构的基础和基准,它由四个立柱、五块平板、四组套筒和八个螺母组成,每个平板上下面均通过等高套筒保证平行,不同平板上的五个孔是在坐标镗床上一次装夹完成加工,保证了所有平板中心孔的同圆心度,框架结构中的中间三块平板是为了保证上下主轴共轴度而附加的,也即是一种过定位设计,夹头是高度自定心结构形式,保证了试件与上下主轴的共轴度。上下主轴与其轴套之间选用高精度的直线滚动轴承和平面轴承并与其共同组成运动副,上下主轴、轴套和直线滚动轴承之间采用小过盈配合,从而实现了试件转动时的高精度的径向定位和轴向定位。

装置装配后,直接测得上下主轴的端面跳动都为 $2\mu\text{m}$;用上下夹头同时夹持检棒(检棒的圆柱度为 $1\mu\text{m}$,夹持长度为 15mm ,两夹头之间的距离为 30mm),并驱使上下夹头同步转动,测得检棒不同位置的径向跳动均小于 $4\mu\text{m}$,由此可以判定,试件的径向和轴向定位精度达到了系统要求。

3 计量考评

本文对这套 CT 分析系统获得的试件图像进行了计量考评,即用该系统得到一有缺口试件的 CT 重建截面图,同时用激光无接触测头(NEXTEC, W1000)的三坐标测量机(COORD3, ARES 1075 AUTO)得到同一试件相应的扫描轮廓图,最后将重建截面图和轮廓图进行对比分析。事先,我们对三坐标测量机的测量精度进行了标定,将厚度为 1.9mm 的二级块规放在测量机工作台的不同位置并对其两个侧面进行扫描,再用直线对侧面轮廓线进行拟合,得到实测的块规尺寸为 $1.9 \pm 0.002\text{mm}$,即去除激光无接触测头噪声后三坐标测量机的测量偏差小于 $2\mu\text{m}$ 。

3.1 试件

试件的材料是 Ly12 铝,如图 7 所示,试件上有一个洋冲打出的小坑。

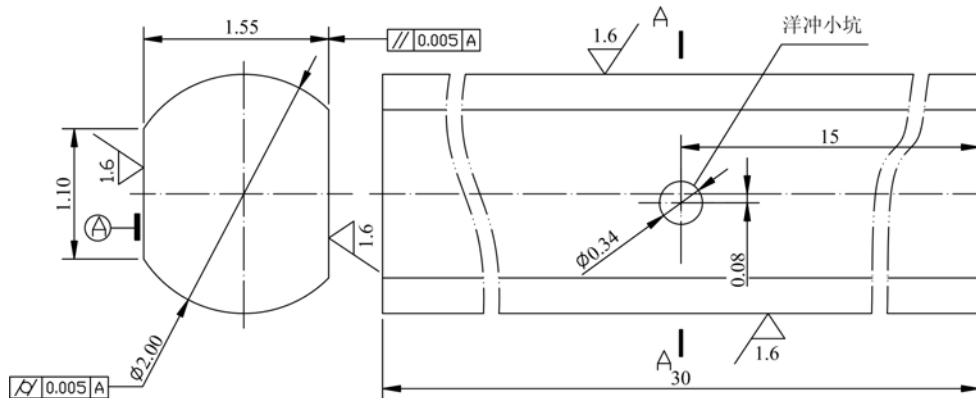


图 7 计量考评试件

Fig. 7 The specimen for quantifying the system

3.2 测试结果

图 8 是试件 A-A 处 CT 重建截面(黑色)和测量得到的轮廓线(白色),从图 8 可以看出,截面图边界线和轮廓线几乎重合,但边界线和轮廓线均存在毛刺,这分别是由重建图像噪声和激光测头噪声引起。为进一步分析重建图像边界线和轮廓线的偏差,我们用曲线拟合去除噪声,即用直线对两个侧面的边界线和轮廓线进行拟合,用圆对圆弧线进行拟合,用直线对缺口处边界线和轮廓线进行拟合;最后将拟合后的边界线和轮廓线画到同一个图上,如图 9 所示(图中对两个图形的差异进行了放大显示,其中实线为重建图像边界线,虚线是测量轮廓线)。从图 9 可以看出两者最大的尺寸偏差为 $4\mu\text{m}$ 。根据前面得到的三坐标测量机的测量精度,可以得到重建图像和实物的尺寸偏差小于 $6\mu\text{m}$,也即该系统不计噪声的空间分辨率优于 X 射线 CCD 的像素 $10.9\mu\text{m}$ 。



图8 重建截面和测量轮廓线
Fig. 8 The cross-section
rebuilt and the contour

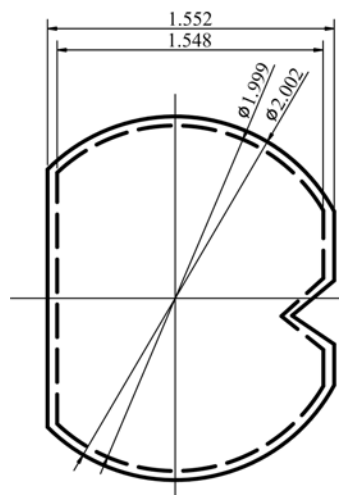


图9 拟合边界线和拟合轮廓线
Fig. 9 The fitting boundary line
and the fitting contour

4 结论

1) 成功组建了一套材料拉压加载试验实时同步辐射 CT 分析系统。该套系统既可得到试件拉压加载 $P-\Delta$ 曲线,又可得到对应曲线上任意点的试件 CT 重建图。

2) 该系统的关键设备之一是自行研制的一体化拉压加载和转动装置,该装置采用了四柱式框架结构,采用上下夹头同步转动实现试件的相对于框架的刚性转动;上夹头作相对于框架的轴向运动(下夹头轴向位置固定)实现对试件的加载;只要将框架放置于合适位置,便可得到试件 360° 全范围的透射投影。本文以 X 射线 CCD 的像素尺寸 $10.9\mu\text{m} \times 10.9\mu\text{m}$ 为基础,分析了重建图像的理论空间分辨率与试件运动定位精度的关系,给出了加载和转动装置应满足的运动学定位精度要求。在加载和转动装置中采用了过定位设计、高精度的直线滚动轴承、高精度滚珠丝杠、高度自定心的夹头以及高精度同步闭环控制等高精技术,实现了试件高精度的轴向定位、径向定位和刚性角度定位;对装置的精度检测表明其实际的定位精度优于运动学定位精度要求;对系统的计量考评试验表明系统不计噪声的空间分辨率优于 X 射线 CCD 的像素 $10.9\mu\text{m}$ 。

3) 与其他 CT 系统相同,本 CT 分析系统也存在重建图像噪声问题,将在另文中讨论。

参考文献:

- [1] Suzuki Y, Usami K, Sakamoto K, et al. X-ray computerized tomography using monochromated synchrotron radiation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1988, 27(3): L461~L464.
- [2] Hirano T, Usami K. High resolution monochromatic X-ray tomography using synchrotron radiation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989, 28(2): 263~266.
- [3] Bonse Ulrich, Busch Frank. X-ray computed microtomography(μCT) using synchrotron radiation(SR)[J]. Prog. Biophys. Molec. Biol., 1996, 65(1/2): 133~169.
- [4] Kinney John H, Johnson Quintin C, Saroyan R Allyn. Energy-modulated X-ray microtomography[J]. Rev. Sci. Instrument, 1988, 59(1): 196~197.
- [5] Kinney J H, Stock S R, Nichols M C, et al. Nondestructive investigation of damage in composites using X-ray tomographic microscopy(XTM)[J]. J. Mater. Res., 1990, 5(5): 1123~1129.
- [6] Buffiere J-Y, Maire E, Verdu C, et al. Damage assessment in an Al/SiC composite during monotonic tensile tests using synchrotron X-ray microtomography[J]. Materials Science and Engineering, 1997, A234-236: 633~635.
- [7] Olurin O B, Arnold M, Korner C, et al. The Investigation of morphometric parameters of aluminium foams using

- micro-computed tomography[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A328: 334~343.
- [8] Youssef S, Maire E, Gaertner R. Finite element modeling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography[J]. Acta Materialia, 2005, 53: 719~730.
- [9] Hirano T, Usami K. In situ X-ray CT under tensile loading using synchrotron radiation[J]. J. Mater. Res., 1995, 10(2):381~386.
- [10] 庄天戈. CT 原理和算法[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992 (ZHUANG Tiange. CT Principle and Algorithm [M]. Shanghai: Press of Shanghai Jiao Tong University, 1992(in Chinese))

A Real-time Synchrotron Radiation CT System for Materials Analysis in Tension/Compression Testing

LI Da-ying, HU Xiao-fang, XIA Yuan-ming

(Department of Modern Mechanics University of Science and Technology of China, CAS Key laboratory of Mechanical behavior and design of Materials(University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: A real-time synchrotron radiation CT system for materials analysis in the tension/compression testing was introduced. By using this system, the macro $P-\Delta$ curve of the specimen can be obtained, as well as the micro CT photograph at any loading state. One of the key components of this system was the integral loading/rotating device. Based on the pixel size ($10.9\mu\text{m}\times 10.9\mu\text{m}$) of the X-ray CCD, The kinematic positioning accuracy requirement was given through analysis. In the device, a four-post frame was adopted, two synchronously rotating grip holders were used to realize rigidity rotation of the specimen, and the axial movement of the upper grip holder implemented the tension/compression loading. Positioning accuracy in the axis, radial and circumferential directions were achieved by adopting many advanced and delicate technologies. Measurement on the device indicated that the actual positioning accuracy of the device was better than the kinematic positioning accuracy. Evaluation test on the system indicated that the spatial resolution is better than the pixel size without considering the noise.

Key words: synchrotron radiation; CT; X-ray CCD; integral loading/rotating device; spatial resolution