

黏弹阻尼器拉压疲劳损伤三维成像分析

张宝双¹, 敖波¹, 丁阳², 江洪流³, 邬冠华¹

- (1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;
2. 中国航空工业集团有限公司 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001;
3. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 采用显微 CT(micro-computed tomography)对阻尼器结构分段进行了三维观察,成像分辨率为 $91.89\mu\text{m}$ 。通过三维分割成功提取了橡胶层空隙、开裂缺陷,并定量分析空隙缺陷的直径、总体积等几何特征参数。为了提高成像分辨率,对单个空隙缺陷进行局部高分辨显微 CT 成像及三维可视化分析,获取单个空隙形貌信息。结果表明:黏弹阻尼器以产生脱黏、空隙、开裂缺陷为主,上、下段橡胶层空隙最大直径分别为 13.12、12.21 mm,发现上、下段端部存在开裂现象,环状裂纹体向上延伸至橡胶层表面,向下延伸至铝合金内筒外壁。局部显微 CT 三维成像分辨率为 $20.85\mu\text{m}$,结果显示单个空隙表面形貌存在褶皱、凹坑现象,但未发现微小裂纹。DR(digital radiography)成像实验结果表明通过 X 射线切向照相检测黏弹阻尼器橡胶层脱黏、空隙缺陷是可行的。

关 键 词: 黏弹阻尼器; 三维成像; 空隙; 脱黏; 三维可视化

中图分类号: V275.1

文献标志码: A

Three-dimensional imaging analysis of tension-compression fatigue damage in viscoelastic damper

ZHANG Baoshuang¹, AO Bo¹, DING Yang², JIANG Hongliu³, WU Guanhua¹

- (1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. China Helicopter Research and Development Institute, Aviation Industry Corporation of China Limited, Jingdezhen Jiangxi 333001, China;
3. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Three-dimensional observation of the damper was performed by micro-CT (micro computed tomography), and the imaging resolution was $91.89\mu\text{m}$. The voids and cracking defects of the rubber layer were successfully extracted through three-dimensional segmentation, and quantitative analysis of defects' geometric parameters such as diameter and total volume was performed. In order to improve the imaging resolution, local high-resolution micro-CT imaging and 3D visualization analysis of single void defects were performed to obtain the information of single void morphology. The results showed that the main defects of viscoelastic damper mainly included debonding, void and cracking, the maximum

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 无损检测技术教育部重点实验室开放基金(EW201708253)

作者简介: 张宝双(1996—),女,硕士生,主要从事疲劳损伤射线 CT 成像检测研究。

引用格式: 张宝双,敖波,丁阳,等. 黏弹阻尼器拉压疲劳损伤三维成像分析[J]. 航空动力学报,2020,35(12):2635-2641. ZHANG Baoshuang, AO Bo, DING Yang, et al. Three-dimensional imaging analysis of tension-compression fatigue damage in viscoelastic damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(12): 2635-2641.

void diameter of the upper and lower rubber layers was 13.12 mm and 12.21 mm, respectively. It was found that cracking existed at the ends of the upper and lower sections, the ring-shaped crack body extended upward to the surface of the rubber layer and downward to the outer wall of the aluminum alloy inner tube. The three-dimensional imaging resolution of local micro-CT was 20.85 μm . The experimental results showed that the surface morphology of a single void had wrinkles and pits, but no micro-cracks were found. Digital radiography (DR) experiment results show that it is feasible to detect the debonding and void defects of rubber layer in viscoelastic damper by X-ray tangential radiography.

Key words: viscoelastic damper; 3D imaging; void; debonding; 3D visualization

黏弹阻尼器是一种安装在相邻两桨叶之间的摆振阻尼器,内、外筒和衬套材料为铝合金,内外筒之间材料为高阻尼弹性硅橡胶,通过胶黏剂高温硫化黏接形成金属-橡胶硫化件^[1]。黏弹阻尼器的作用是当直升机桨叶摆动时,使黏弹阻尼器的高阻尼硅橡胶材料发生剪切变形,防止旋翼发生不稳定摆振运动^[2]。在生产制造过程中,黏弹阻尼器橡胶层不可避免的存在固有缺陷^[3],橡胶材料在役使用过程中,由于拉压载荷作用易产生空隙、裂纹、脱黏等缺陷,严重影响直接影响阻尼器的使用性能并带来安全隐患,进而威胁直升机旋翼系统的安全。因此,针对疲劳后的黏弹阻尼器进行内部缺陷检测与评估至关重要,采取有效的测试手段可为黏弹阻尼器制造质量和在役性能监控提供可靠性保障。

目前黏弹阻尼器内部缺陷无损检测方法主要有超声检测、射线照相检测及显微 CT 检测等,其中超声相控阵检测技术对于微裂纹检测和大厚度制件检测中有较好的效果,但难以精确地定性、定量缺陷^[4-7]。由于显微 CT 成像分辨率高,能够直观的显示材料及内部缺陷三维形态(如缺陷的尺寸、位置和结构分布)等特点^[8-10],在复杂构件检测方面的优势明显,一直是航空构件无损检测相关研究的重要手段^[11]。

针对黏弹阻尼器多层结构特点,孙献煜^[1]采用显微 CT 研究了黏弹阻尼器内部的空隙和脱黏,但研究不深入。董俊冬^[12]利用超声特征扫描成像系统研究一界面完全脱黏试样的脱黏特征信号,检测出 6 mm 的完全脱黏缺陷、10 mm 的弱黏接缺陷。张丽涵等^[13]采用 X 射线切向射线照相技术对典型推进剂装药包覆层/药柱黏接界面脱黏或分离的面积性缺陷进行了检测,通过对被判报废药柱的解剖结果证明了检测结果准确可靠。针对橡胶材料的疲劳缺陷,Liu 等^[14]制备了丁苯橡胶(SBR)后进行循环疲劳实验,对无疲劳和疲劳

样品进行显微 CT 成像,成像分辨率达到 4 μm 。结果表明:在施加的单轴拉伸疲劳载荷的平行(模式 I)和垂直(模式 II)方向上均观察到裂纹。Marco 等^[15]通过三维观测,研究了最大主应变和循环次数对材料尺寸、孔隙率、缺陷体积密度等损伤参数的影响。Wu 等^[16]利用同步辐射显微 CT (SR-CT)揭示了裂纹与固有孔隙、析出物、金属间夹杂物和晶粒结构以及孔洞和接头等宏观特征之间的复杂相互作用。Garcea 等^[17]采用原位同步 X 射线 CT 技术研究了碳纤维/环氧树脂复合材料在连续单次拉伸载荷作用下损伤演化特征。Madra 等^[18]利用 X 射线显微成像技术,获得玻璃纤维增强热塑性复合材料三维结构。

本文针对直升机旋翼黏弹阻尼器橡胶层疲劳缺陷,采用 X 射线切向照相技术对结构缺陷和脱黏缺陷进行二维切向照相,采用显微 CT 技术实现橡胶层缺陷的定位、定量分析。

1 实 验

1.1 实验材料

实验对象为某直升机旋翼黏弹阻尼器 1 号、2 号样件(经过拉-压疲劳实验),如图 1 所示,总长度为 387 mm,直径为 91 mm,疲劳实验加载方式为单轴加载,轴向最大拉力为 10 kN,最小拉力为 3.3 kN,黏弹阻尼器由 3 层结构组成,内、外壳材

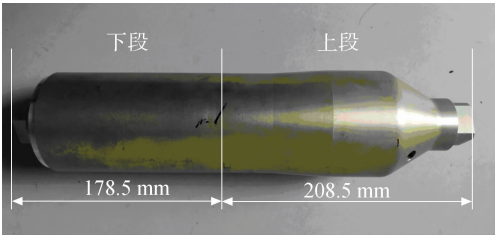


图 1 黏弹阻尼器样件
Fig. 1 Sample of viscoelastic damper

料为铝合金,壳间填充物为弹性硅橡胶,工作时黏弹阻尼器承受轴向拉压载荷。

1.2 X 射线切向照相实验

黏弹阻尼器外筒与橡胶材料、橡胶材料与内筒之间都可能产生脱黏,对黏弹阻尼器进行 X 射线切向照相,实验设备为美国 GE(General Electric)公司的 ISOVOLT 320 M2 hp 型射线机,射线源焦点尺寸为 0.4 mm。平板探测器为 Varex 公司的 XRpad2 4336 型非晶硅平板探测器,其闪烁体材料为碘化铯,成像矩阵大小为 $4\,288\times 3\,524$,探测器单元尺寸为 $100\,\mu\text{m}\times 100\,\mu\text{m}$,A/D 位数为 16 bit。

实验参数为:管电压为 150 kV,管电流为 5 mA,积分时间为 400 ms,射线源至阻尼器的距离(SOD)为 650 mm,射线源到探测器的距离(SDD)为 900 mm,图 2 为黏弹阻尼器 X 射线切向照相透照布置图,通过转台连续旋转来监测内部脱黏情况。

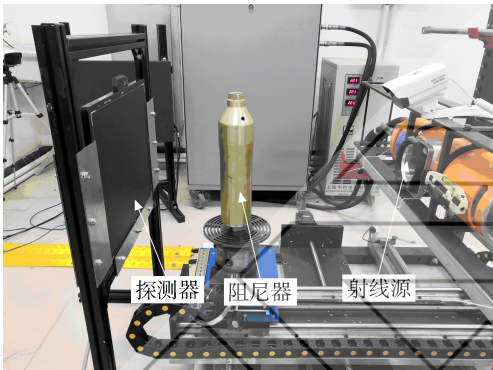


图 2 黏弹阻尼器 X 射线切向照相透照布置图
Fig. 2 X-ray tangential radiography layout diagram of viscoelastic damper

1.3 显微 CT 成像实验

采用天津三英精密机械仪器股份有限公司提供的 nanoVoxel-4000 CT 成像系统对黏弹阻尼器进行三维扫描(以下实验结果均为 1 号黏弹阻尼器),射线源型号为 WorX XWY-240-CT,最小焦点尺寸为 $4\,\mu\text{m}$;平板探测器型号为 VAREX Pax-Scan 2520DX-1,探元尺寸为 $127\,\mu\text{m}\times 127\,\mu\text{m}$,成像矩阵为 $1\,920\times 1\,536$ 。

实验参数为:管电压为 200 kV,管电流为 $120\,\mu\text{A}$,SOD 为 507 mm,SDD 为 700 mm,放大倍数为 1.4 倍,单幅投影图像的积分时间为 0.8 s,每 360° 共采集 720 幅投影图像,总体扫描时间约 20 min,图 3 为黏弹阻尼器显微 CT 扫描布置图。由于黏弹阻尼器长度较大,需要分段显微 CT 成像。

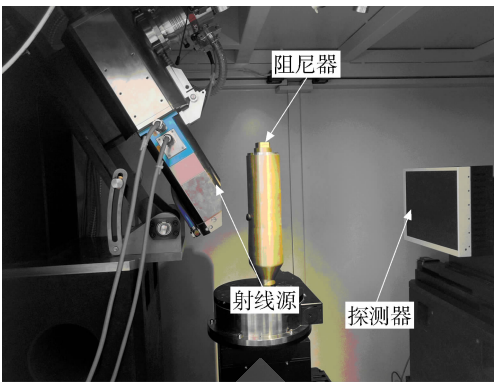


图 3 黏弹阻尼器显微 CT 扫描布置图
Fig. 3 Micro-CT layout diagram of viscoelastic damper

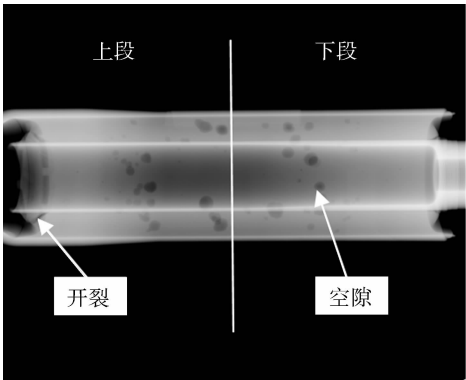
1.4 局部显微 CT 成像实验

考虑到橡胶材料疲劳裂纹尺度可能很小,而全局显微 CT 成像分辨率可能不够高,为此开展局部更高分辨率显微 CT 成像。利用文中第 1.3 节中实验设备对 1 号黏弹阻尼器进行局部高分辨率显微 CT 扫描实验,实验参数为:管电压为 200 kV,管电流为 $100\,\mu\text{A}$,SOD 为 96 mm,SDD 为 590 mm,放大倍数为 6.1 倍,每 360° 共采集 1 440 幅投影图像,单幅投影图像的积分时间为 0.75 s。

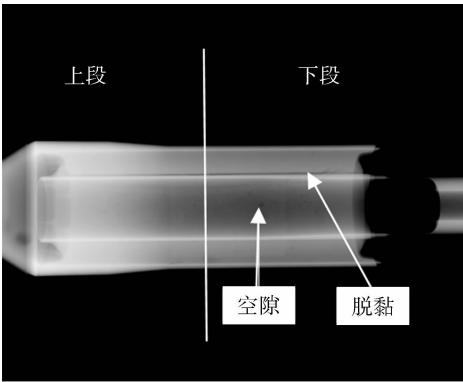
2 结果分析

2.1 黏弹阻尼器 X 射线切向照相结果分析

图 4 分别为 1 号、2 号黏弹阻尼器 X 射线切向照相 DR 图像,可以观察到 1 号黏弹阻尼器橡胶层存在大量近圆形缺陷,根据缺陷特征及橡胶材料特点判断为空腔缺陷。从图 4(a)可以发现,空腔集中在黏弹阻尼器中段,配合旋转台转动和实时图像采集,图像中未发现橡胶层与内、外筒间存在脱黏类型缺陷,上、下段端部各发现一个橡胶材料开裂(裂纹)。由图 4(b)可观察到橡胶层与铝合金内筒间存在沿内筒壁走向的脱黏型缺陷,同时橡胶层存在少量空腔类缺陷。由于 DR 图像



(a) 1号黏弹阻尼器数字图像



(b) 2号黏弹阻尼器数字图像

图 4 黏弹阻尼器 X 射线切向照相结果
Fig. 4 X-ray tangential radiography result of viscoelastic damper

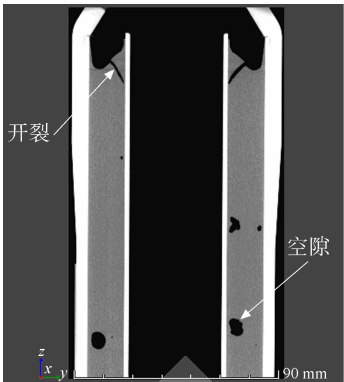
仅显示缺陷的二维信息,无法获取缺陷详细信息,应进一步获取缺陷三维信息。

DR 实验结果表明,结合旋转台运动和实时成像采集可快速检测黏弹阻尼器内部是否存在脱黏缺陷。

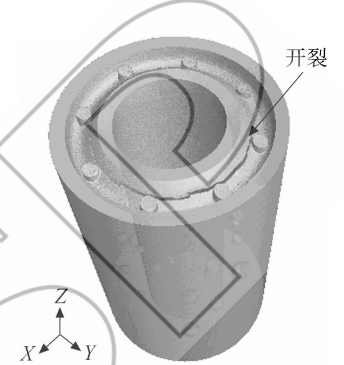
2.2 黏弹阻尼器三维结构分析

显微 CT 成像实验可以从任意视角观察黏弹阻尼器内部结构及缺陷的三维形貌。将显微 CT 扫描得到的 720 幅投影图像进行三维重建,成像分辨率为 $91.89\mu\text{m}$ 。将重建后的原始数据导入 VG Studio MAX 软件进行三维重构,针对黏弹阻尼器选择合适的重构体素参数,上段裁切重构结果至 $1037(\text{体素}) \times 1037(\text{体素}) \times 1806(\text{体素})$,下段裁切重构结果至 $981(\text{体素}) \times 977(\text{体素}) \times 1813(\text{体素})$ 。图 5(a)为黏弹阻尼器上段 YZ 截面第 562 层切片图像,图 5(b)为黏弹阻尼器上段三维重构结果,黏弹阻尼器上段橡胶层存在一定数量的空隙缺陷,空隙表现为黑色且轮廓不规则,阻尼器中部空隙数量较多并存在部分空隙相连接现象,空隙与橡胶层本体灰度差异明显。黏弹阻尼器上段端部发现一处环形开裂(环状裂纹体),切片图像显示为黑色且与背景相连,裂纹体从橡胶层中间位置斜向环绕延伸至内筒外壁。

图 6(a)为黏弹阻尼器下段 YZ 截面第 430 层切片图像,图 6(b)为黏弹阻尼器下段三维重构结果,黏弹阻尼器下段橡胶层同样存在一定数量的空隙类缺陷,空隙表现为黑色且轮廓不规则,阻尼器中部空隙数量较多并存在部分空隙相连接现象,黏弹阻尼器下段端部橡胶材料发现一处开裂(环状裂纹体),裂纹体断续向内筒侧壁延伸。

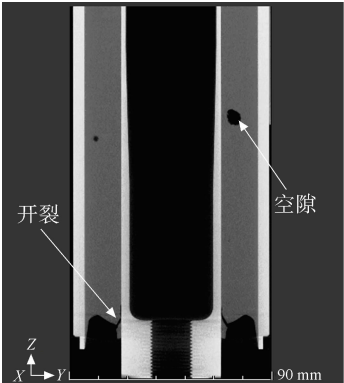


(a) 上段第562层切片图像(YZ)



(b) 上段三维重构结果

图 5 上段三维可视化
Fig. 5 Three-dimension visualization of upper section



(a) 1号黏弹阻尼器数字图像



(b) 下段三维重构结果

图 6 下段三维可视化

Fig. 6 Three-dimension visualization of lower section

2.3 橡胶层内部缺陷三维分析

黏弹阻尼器在使用过程中,由于橡胶层受拉压载荷作用产生疲劳缺陷,缺陷的存在可能严重影响黏弹阻尼器的力学性能,所以缺陷的定性、定位、定量评价对黏弹阻尼器的安全服役至关重要。图 7 为上段橡胶层缺陷提取结果,图 8 为上段橡胶层空隙(除环状裂纹体外)的直径、体积分布图,上段橡胶层内部共提取 82 个空隙,最大空隙直径为 13.12 mm,最小空隙直径为 0.18 mm,空隙体积范围为 0.0016~503.85 mm³,空隙表面积范围为 0.084~550.86 mm²。少部分空隙存在“直径大,体积小”的现象,说明该部分空隙形状为长条形。

由于黏弹阻尼器受轴向拉-压载荷作用,容易在端部位置产生开裂。由于实验黏弹阻尼器上段

端部存在环状裂纹,通过裂纹体表面形貌多角度分析可知,上段端部环状裂纹体侧壁表面粗糙并有较小角度弯曲,环状裂纹体中间部位向内侧有部分凹陷,向上延伸至橡胶层表面,向下延伸至铝合金内筒外壁。通过对裂纹体进行尺寸测量,沿倾斜侧壁方向裂纹体平均长度为 11.59 mm,环状裂纹体平均侧壁厚度为 1.12 mm。

图 9 为下段橡胶层缺陷提取结果,图 10 为下段橡胶层空隙直径、体积分布图。下段橡胶层内部共提取出 71 个空隙,最大空隙直径为 12.21 mm,最小空隙直径为 0.28 mm,空隙体积范围为 0.0031~551.72 mm³,空隙表面积范围为 0.152~592.62 mm²。通过裂纹体表面形貌多角度分析可知,下段端部环状裂纹体侧壁断续相连,存在多处空隙,间断空隙靠近小直径环一侧,通过对裂纹体进行尺寸测量,沿倾斜侧壁方向裂纹体平均长度为 8.73 mm,环状裂纹体平均侧壁厚度为 1.83 mm。

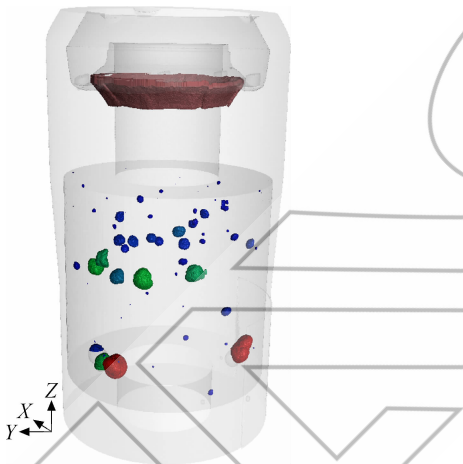


图 7 上段缺陷提取结果

Fig. 7 Extraction of defects in upper section

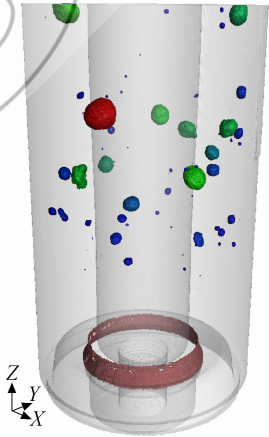


图 9 下段缺陷提取结果

Fig. 9 Extraction of defects in lower section

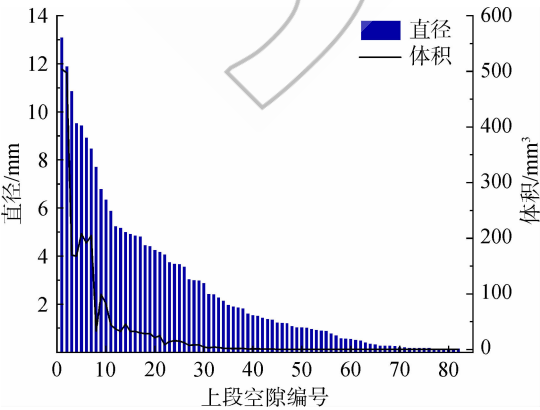


图 8 上空隙直径、体积分布

Fig. 8 Diameter and volume distribution of voids in upper section

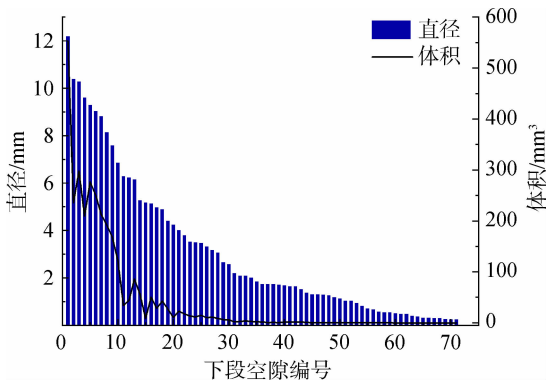


图 10 下段空隙直径、体积分布

Fig. 10 Diameter and volume distribution of voids in lower section

在上、下段端部位置出现开裂,在橡胶层内部无开裂缺陷,分析原因为端部为受力点,受疲劳作用影响较严重,当应力达到或超过橡胶材料的抗拉强度时,就会导致橡胶材料开裂。因此,上、下段端部都出现了明显的疲劳损伤。

将橡胶层内部空隙直径排序分别划分至 0~3、3~6、6~9、9~12、12~15 mm 的 5 个不同区间。表 1 共统计了上段 82 个空隙的球度,表 2 共统计了下段 71 个空隙的球度,说明空隙以近球形缺陷为主。

表 1 上段空隙球度
Table 1 Sphericity of voids in upper section

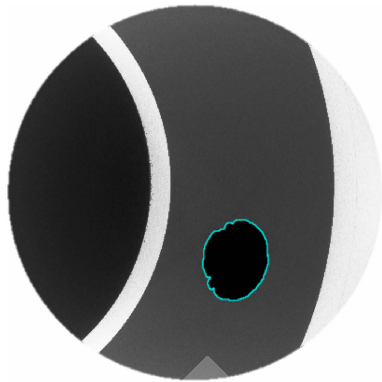
空隙直径 d/mm	空隙个数	空隙球度
$0 < d \leq 3$	53	0.44~0.77
$3 < d \leq 6$	19	0.48~0.62
$6 < d \leq 9$	5	0.44~0.61
$9 < d \leq 12$	4	0.48~0.57
$12 < d \leq 15$	1	0.56

表 2 下段空隙球度
Table 2 Sphericity of voids in lower section

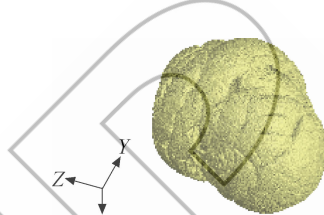
空隙直径 d/mm	空隙个数	空隙球度
$0 < d \leq 3$	43	0.49~0.70
$3 < d \leq 6$	15	0.41~0.64
$6 < d \leq 9$	7	0.26~0.73
$9 < d \leq 12$	5	0.50~0.63
$12 < d \leq 15$	1	0.55

2.4 黏弹阻尼器上段局部高分辨率三维分析

由于体积较大的空隙表面可能存在裂纹萌生处,所以选择黏弹阻尼器上段体积为 482.75 mm³ 的空隙进行局部高分辨率 X 射线三维成像实验,以进一步研究空隙类缺陷表面形貌。将局部显微 CT 扫描得到的 1440 幅投影图像进行三维重建,成像分辨率为 20.85 μm。将重建后的原始数据导入 VG Studio MAX 软件进行三维重构,裁切重构结果至 1749(体素)×1749(体素)×1194(体素),图 11(a)为 XY 截面第 761 层切片图像,图像清晰显示了此空隙截面微观形貌,截面存在明显凸起及凹陷,图 11(b)为局部空隙提取结果,可观察到空隙形状类似椭圆形且轮廓周围有褶皱及凹坑,并存在少量突出毛刺,但没有发现明显微小裂纹。



(a) 第761层切片图像(XY)



(b) 空隙提取结果

图 11 局部空隙三维可视化

Fig. 11 Three-dimension visualization of local void

3 结 论

通过 X 射线切向照相获得了橡胶层脱黏缺陷和内部空隙二维影像及位置分布,采用显微 CT 成像技术获取了空隙、开裂缺陷三维形貌及特征参数。

1) 采用 X 射线 DR 技术对黏弹阻尼器进行切向照相结果表明,X 射线切向照相可有效检测内、外筒体与橡胶之间脱黏缺陷,同时发现橡胶内部存在大量内部空隙。

2) 采用显微 CT 成像技术对直升机旋翼黏弹阻尼器分段进行三维成像,获得了高质量的内部结构图像,在三维重构基础上实现了空隙、橡胶材料开裂缺陷的三维分割提取。

3) 基于显微 CT 三维成像结果提取上段 82 个空隙,最大直径为 13.12 mm。下段提取出 71 个空隙,最大直径为 12.21 mm。

4) 通过对黏弹阻尼器进行局部高分辨显微 CT 三维成像,成像分辨率为 20.85 μm,发现局部单个空隙表面形貌存在褶皱、凹坑现象,但没有发现微小裂纹,可能还需提高成像分辨率。

5) 从研究结果推断黏弹阻尼器主要以产生脱黏、空隙、材料开裂缺陷为主。1 号、2 号黏弹阻尼器 DR 检测结果(开裂、脱黏缺陷)表明,两个黏弹阻尼器都已出现明显疲劳损伤。

参考文献:

- [1] 孙献煜. 直升机旋翼黏弹阻尼器内部缺陷无损检测方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.
SUN Xianyu. Research on nondestructive testing method for internal defects of helicopter rotor viscoel damper[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019. (in Chinese)
- [2] 李锐锐. 直升机旋翼阻尼器非线性动力学特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
LI Rui Rui. Research on hlicopter rotor lead-lag damper nonlinear dynamics characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [3] 侯珂, 张璟. 橡胶密封件裂缝缺陷定位方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 205-208.
HOU Ke, ZHANG Jing. Research of rubber sealing's crack location method[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(27): 205-208. (in Chinese)
- [4] 敦怡, 师小红, 徐章遂. 非线性超声在金属基复合材料结构界面黏接强度评价中的应用[J]. 中国机械工程, 2008, 19(19): 2351-2354.
GUO Yi, SHI Xiaohong, XU Zhangsui. Nondestructive evaluation of adhesive interfaces in MMCS using nonlinear ultrasonic method [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(19): 2351-2354. (in Chinese)
- [5] 李媛. 不等厚复合构件的相控阵超声脱黏检测技术研究[J]. 电力学报, 2011, 26(6): 61-63.
LI Yuan. Research on phased array ultrasonic debond test ing technology of not uniform thickness compound compound[J]. Journal of Electric Power, 2011, 26(6): 61-63. (in Chinese)
- [6] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN Shijiu, YANG Xiaoxia, CHEN Shili, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934. (in Chinese)
- [7] 刘桂雄, 唐文明, 李宇中. 超声相控阵无损检测仪器关键技术研究[J]. 计测技术, 2018, 38(3): 99-111.
LIU Giuxiong, TANG Wenming, LI Yuzhong. Research on key technologies of ultrasonic phased array nondestructive testing instrument[J]. Metrology Measurement Technology, 2018, 38(3): 99-111. (in Chinese)
- [8] 冯炎建, 冯祖德, 李思维, 等. C/SiC 复合材料微结构的显微 CT 表征分析[J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 49-54.
FENG Yanjian, FENG Zude, LI Siwei, et al. Micro CT characterization on microstructure of C/SiC composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 49-54. (in Chinese)
- [9] 桂建保, 胡战利, 周颖, 等. 高分辨显微 CT 技术进展[J]. CT 理论与应用研究, 2009, 18(2): 108-118.
GUI Jianbao, HU Zhanlia, ZHOU Ying, et al. Technology development of micro-CT with high spatial resolution[J]. CT Theory and Applications, 2009, 18(2): 108-118. (in Chinese)
- [10] 史琳, 许然, 许强辉, 等. 基于显微 CT 技术的结焦砂 3 维孔隙结构精细表征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(10): 1079-1084.
SHI Lin, XU Ran, XU Qianghui, et al. Advanced characterization of three-dimensional pores in coking sand by micro-CT[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(10): 1079-1084. (in Chinese)
- [11] 熊琰, 刘海强, 杜本莉, 等. 微焦点 CT 在陶瓷基复合材料上的检测应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(19): 58-63.
XIONG Ying, LIU Haiqiang, DU Benli, et al. Application of micro-focus CT on inspection of ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19): 58-63. (in Chinese)
- [12] 董俊冬. 金属-橡胶多界面黏接质量的超声检测方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.
DONG Jundong. Study on ultrasonic testing method of metal-rubber multi-interface bonding quality [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019. (in Chinese)
- [13] 张丽涵, 李宏岩, 王瑛, 等. 切向射线照相技术在固体推进剂装药包覆层/药柱黏接界面脱黏缺陷检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(4): 60-64.
ZHANG Lihan, LI Hongyan, WANG Ying, et al. X-ray tangent applied in testing the interface between the propellant surface and its coating[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(4): 60-64. (in Chinese)
- [14] LIU R, SANCAKTAR E. Identification of crack progression in filled rubber by micro X-ray CT-scan[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111: 144-150.
- [15] MARCO Y, SAUX V L, CALLOCH S, et al. X-ray computed μ tomography: a tool for the characterization of fatigue defect population in a polychloroprene rubber[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 2131-2140.
- [16] WU S C, XIAO T Q, WITHERS P J. The imaging of failure in structural materials by synchrotron radiation X-ray microtomography [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 182: 127-156.
- [17] GARCEA S C, SINCLAIR I, SPEARING S M, et al. Mapping fibre failure in situ in carbon fibre reinforced polymers by fast synchrotron X-ray computed tomography[J]. Composites Science and Technology, 2017, 149: 81-89.
- [18] MADRA A, HAJJ N E, BENZEGGAGH M. X-ray microtomography applications for quantitative and qualitative analysis of porosity in woven glass fiber reinforced thermoplastic[J]. Composites Science and Technology, 2014, 95: 50-58.