

碳纤维缠绕发动机壳体数字射线 DR 成像检测图像质量控制

刘 凯 王晓勇 袁孟春

(湖北三江航天江北机械工程有限公司, 孝感 432000)

文 摘 对检测图像的空间分辨率、信噪比和对比度的影响因素进行了研究。采用不同的工艺参数对碳纤维缠绕发动机壳体进行了数字射线DR成像检测试验。试验结果表明,当其他检测参数不变时,焦点尺寸和放大倍数对图像的空间分辨率影响较大;管电压、管电流和单帧积分时间对图像的信噪比有影响;管电压和管电流对图像的对比度均具有一定影响。

关键词 缠绕壳体,数字射线,空间分辨率,对比度,信噪比

中图分类号: TG115.28

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.XXXX.XX.001

Quality Control of Images of Digital Radiography Testing for Carbon Filament-Wound Motor Case

LIU Kai WANG Xiaoyong YUAN Mengchun

(Jiangbei Machinery Engineering Co., Ltd., Xiaogan 432000)

Abstract The influencing spatial resolution, SNR and factors of contrast of images were researched. The digital radiography experiments were carried out on carbon filament-wound motor case with different technological parameters. The results show that when other parameters are consistent, focus size and magnifications have great effects on spatial resolution, the SNR of the images are affected by the tube voltage, tube current and single frame integration, both tube voltage and tube current have effects on image contrast.

Key words Filament-wound motor case, Digital radiography, Spatial resolution, SNR, Contrast

0 引言

碳纤维缠绕发动机壳体已成为固体火箭发动机壳体的重要发展方向,壳体在成型过程中会产生孔洞、夹杂、分层、脱粘等缺陷^[1-2]。采用数字射线DR成像检测可快速、有效地对碳纤维缠绕发动机壳体的内部质量进行检测,其主要是通过观察数字图像的影像特征来对检测结果进行判定,为了保证检测结果的可靠性,本文针对空间分辨率、信噪比和对比度三个基本因素^[3]进行了研究。

1 检测试验

1.1 试验设备

数字射线成像检测系统主要由一台最大管电压为600 kV的高频恒压定向X射线机和一个像素尺寸为100 μm 的面阵探测器组成,其中X射线机的射线

管具有0.5和1.5 mm双焦点。

1.2 透照布置

根据碳纤维缠绕壳体和试验设备的结构特点,采取法线垂直透照壳体的透照布置,见图1。

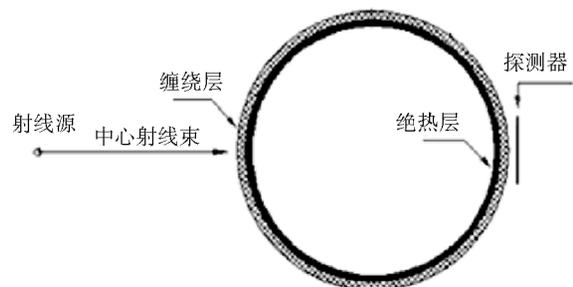


图1 碳纤维缠绕壳体透照布置

Fig. 1 Transillumination layout of carbon filament-wound motor case

收稿日期:2020-03-20

第一作者简介:刘凯,1992年出生,工程师,主要从事无损检测研究工作。E-mail:871401715@qq.com

2 结果与讨论

2.1 图像空间分辨率影响因素

2.1.1 焦点尺寸对图像空间分辨率影响

在其他检测参数不变的情况下,分别采用不同的焦点对 $\varphi 1200$ mm的碳纤维缠绕壳体进行检测试验,对不同检测情况下图像空间分辨率进行测量、分

析,确定焦点尺寸对图像空间分辨率的影响。

图像空间分辨率采用双丝像质计进行测定,0.5和1.5 mm的焦点尺寸空间分辨率测试结果分别如图2图3所示,按照瑞利判据曲线深度达到20%即可识别该组丝对^[4]的测试结果如表1所示。

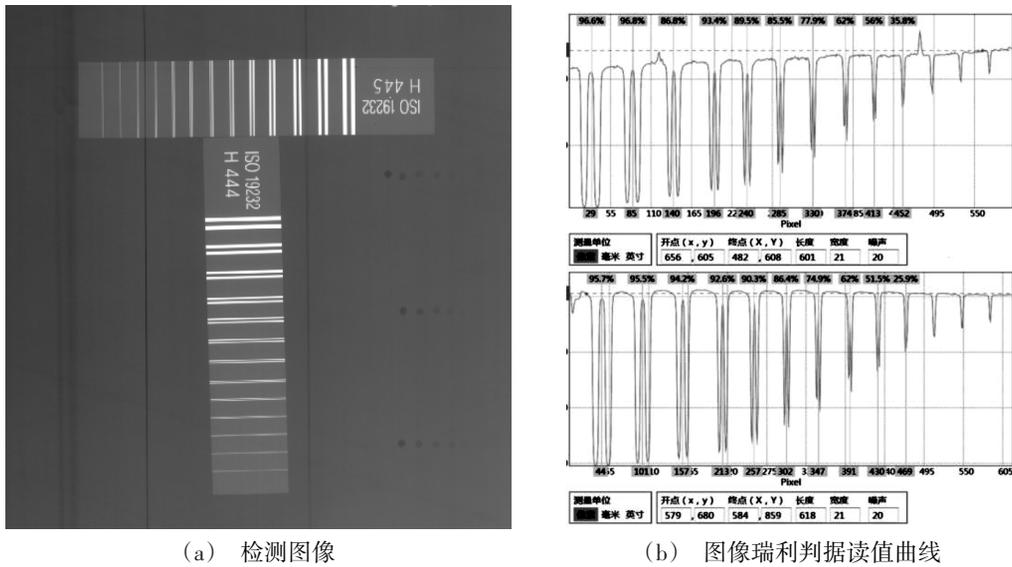


图2 焦点尺寸为0.5 mm测试结果

Fig. 2 Test result under focus 0.5 mm

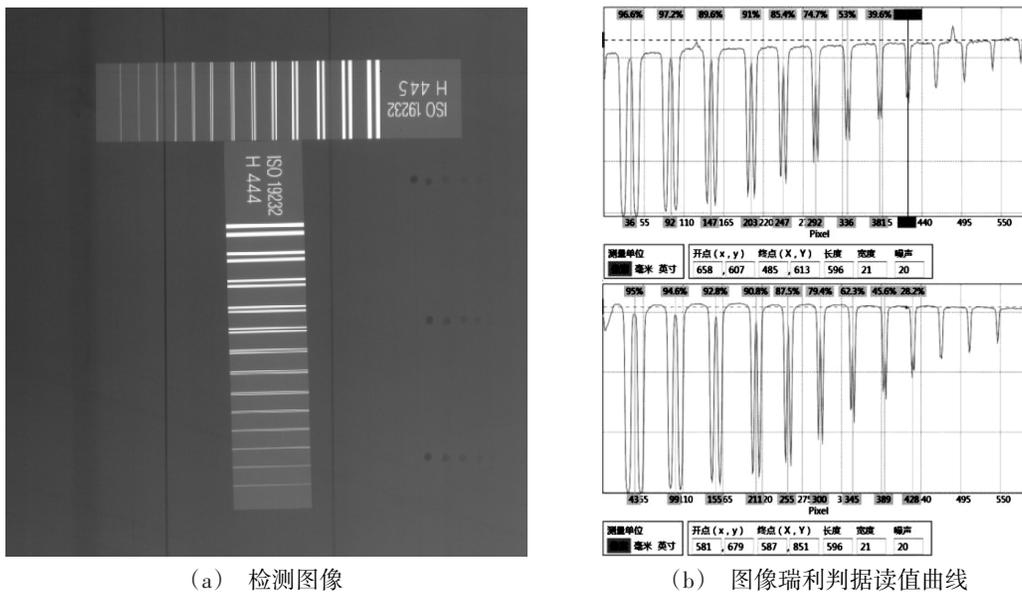


图3 焦点尺寸为1.5 mm测试结果

Fig. 3 Test result under focus 1.5 mm

表1 图像分辨率测试结果

Tab. 1 Test result of spatial resolution

焦点尺寸/mm	可识别丝对		MTF 曲线调制深度读数/%		图像空间分辨率 L_p /mm
	横向	纵向	横向	纵向	
0.5	D10	D10	35.8	25.9	6.25
1.5	D8	D9	39.6	28.2	3.85

从表1中的试验数据分析,在其他参数不变的情况下,采用较小的焦点尺寸进行透照可获得较高的图像空间分辨率。

2.1.2 放大倍数对检测图像空间分辨率影响

在相同的检测参数下,通过采用不同放大倍数^[4]对φ1 200 mm的碳纤维缠绕壳体进行检测试验,对不同放大倍数下图像空间分辨率进行测量、分析,确定最佳放大倍数对图像空间分辨率的影响。

试验采用的面阵探测器像素尺寸为100 μm,检测系统的固有不清晰度应为0.2 mm;X射线管的焦点尺寸选用0.5 mm。最佳放大倍数计算公式如下:

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_D}{\varphi} \right)^2 \quad (1)$$

式中, M_0 为最佳放大倍数; U_D 为固有不清晰度; φ 为焦点尺寸^[4];试验时 U_D 为0.2 mm, φ 为0.5 mm,计算得出 M_0 为1.16。

不同放大倍数下空间分辨率测试结果分别如图4~图6所示,按照瑞利判据曲线深度达到20%即可识别该组丝对^[4]的测试结果如表2所示。

从表2中的试验数据分析,在其他参数不变的情况下,采用最佳放大倍数对碳纤维缠绕壳体进行检测时,图像分辨率最高。

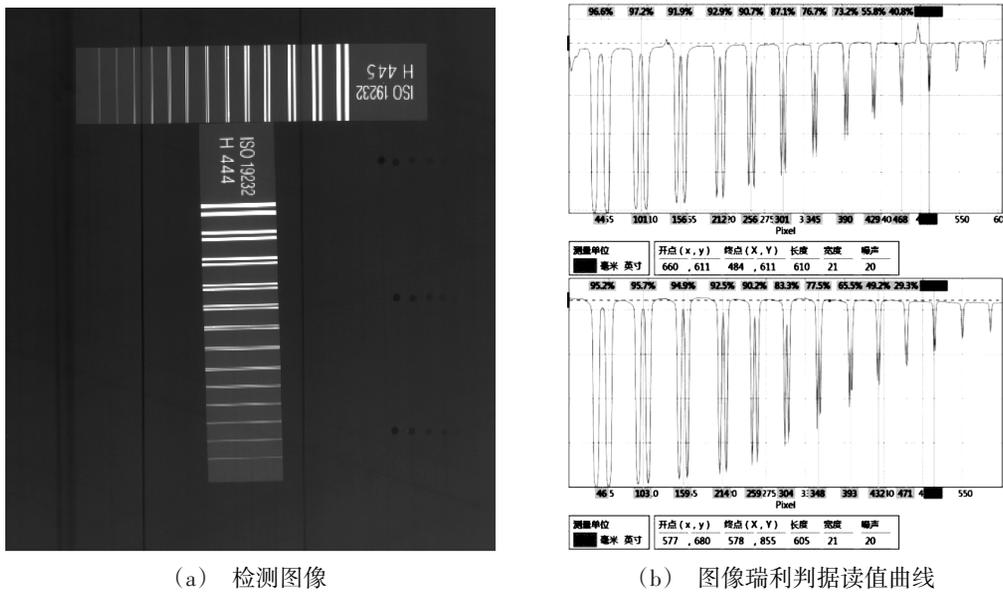


图4 放大倍数1.16测试结果
Fig. 4 Test result under magnification 1.16

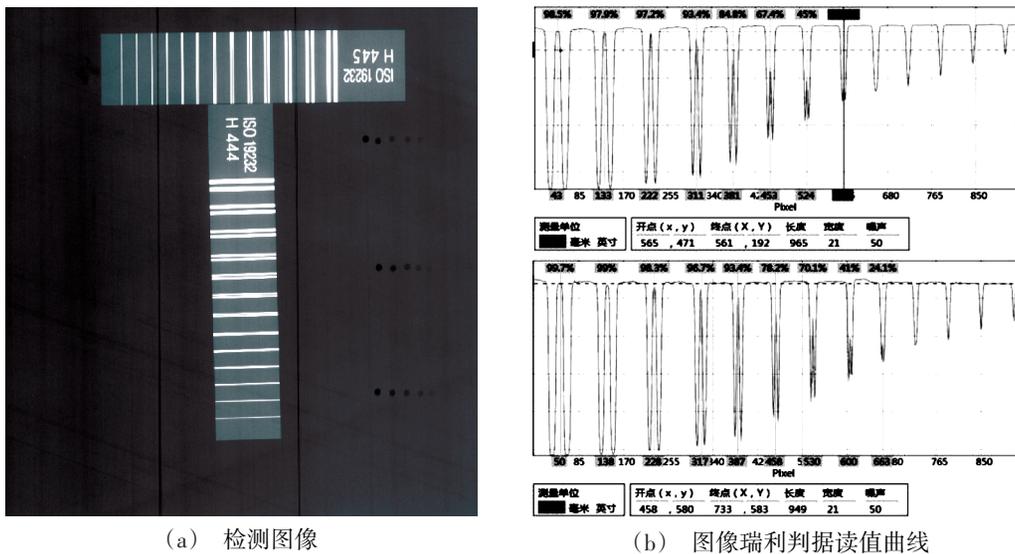


图5 放大倍数1.5测试结果
Fig. 5 Test result under magnification 1.5

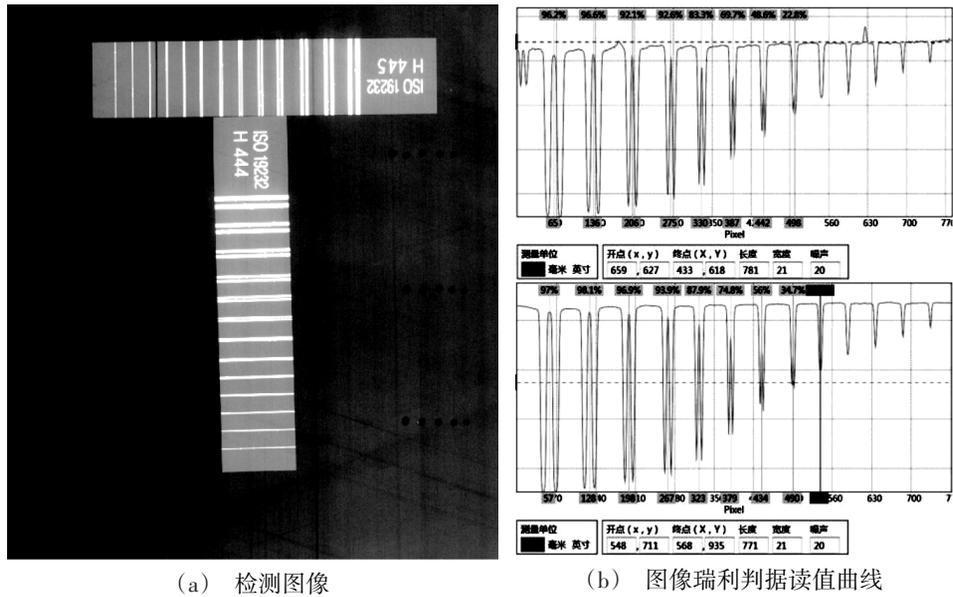


图6 放大倍数2测试结果

Fig. 6 Test result under magnification 2

表2 图像分辨率测试结果

Tab. 2 Test result of spatial resolution

放大 倍数	可识别丝对		MTF 曲线调制深度读值/%		L_p/mm
	横向	纵向	横向	纵向	
1.16	D10	D10	40.8	29.3	6.25
1.5	D7	D9	45	24.1	3.125
2.0	D8	D8	22.8	34.7	3.85

2.2 图像信噪比影响因素

在相同的检测参数下,分别改变管电压、管电流、单帧积分时间和图像采集叠加帧数对 $\phi 1\ 200\ mm$ 的碳纤维缠绕壳体进行检测试验,测量不同透照参数下检测结果图像的信噪比,经比较分析,确定管电压、管电流、单帧积分时间和图像采集叠加帧数对图像信噪比的影响。图像信噪比测试位置如图7所示,测试结果如表3所示。

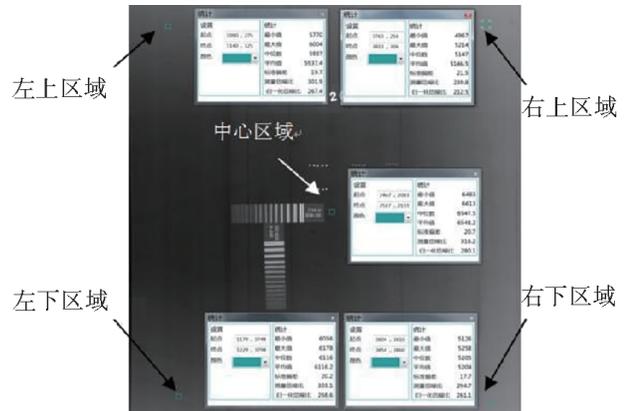


图7 图像信噪比测试位置

Fig. 7 Test-points of SNR

从试验1~3的测试结果分析发现,随着管电压增加,图像的信噪比显著增加;从试验1、4的测试结果分析发现,当管电流由1.1 mA增加到1.7 mA时,图像的信噪比有所增加;从试验4、5的测试结果分析发现,当图像采集叠加帧数30帧增加到60帧时,图像

表3 信噪比测试结果

Tab. 3 Test result of SNR

试验序号	管电压/kV	管电流/mA	单帧积分时间/ms	叠加帧数/帧	图像信噪比				
					中心区域	左上区域	右上区域	左下区域	右下区域
1	150	1.1	499	30	186.6	142.2	117.8	186	184
2	200	1.1	499	30	271.1	194	152.8	257.5	213.7
3	400	1.1	499	30	350.3	250.3	198.2	280.6	350.4
4	150	1.7	499	30	238.7	183.4	171.9	247.8	114.6
5	150	1.7	499	60	257.3	196.4	176.6	245.9	126.5
6	150	1.7	999	30	280.1	267.4	212.5	268.6	261.1

的信噪比基本不变;从试验4、6的测试结果分析发现,当单帧积分时间由499 ms增加到999 ms时,图像信噪比略有增加。

在其他检测参数不变的情况下提高管电压,可以使图像的信噪比大大提高;提高管电流和单帧积分时间有利于提高图像的信噪比,但影响不大;图像采集叠加帧数对图像信噪比基本没有什么影响。

2.3 图像对比度影响因素

在数字射线检测技术中,数字图像的对比度具

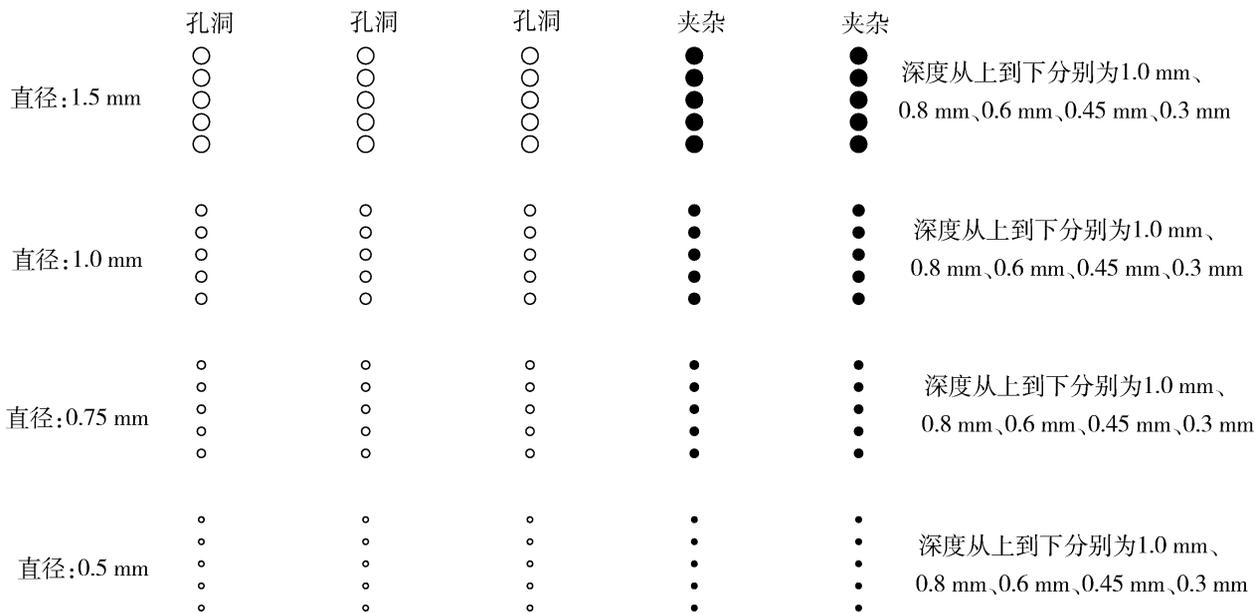


图8 预埋缺陷示意图

Fig. 8 Embedded defects diagram

2.3.1 管电流影响

在相同的检测参数下,分别采用0.5、0.65、0.9 mA的管电流对直径 $\varphi 500$ mm的模拟缺陷壳体进行

检测试验。如图9为不同管电流下检测结果,可识别的孔洞和夹杂最小尺寸如表4所示。

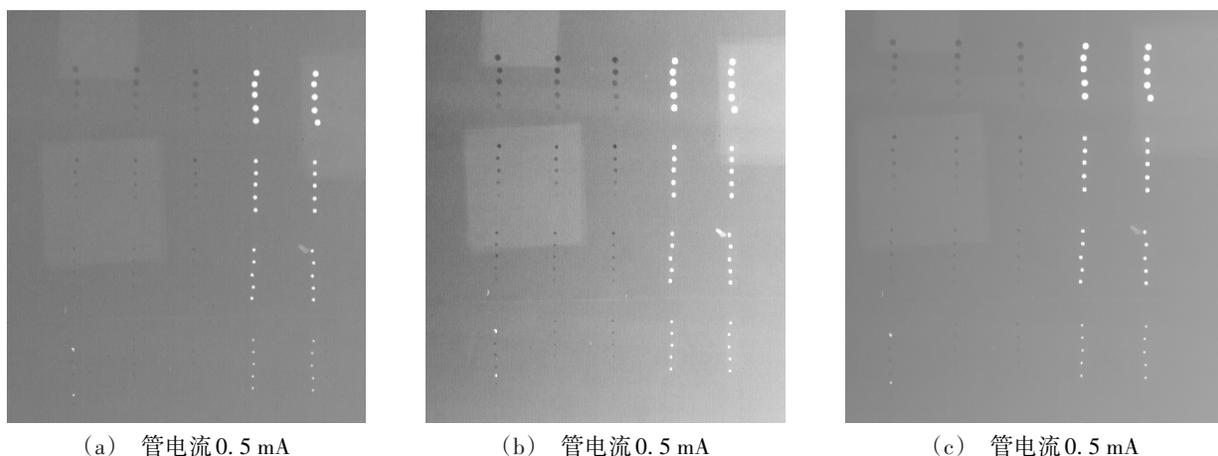


图9 不同管电流下检测结果

Fig. 9 Test results under different tube currents

从试验结果分析,所有夹杂均清晰可见;针对孔洞,当管电流由0.5 mA增加到0.65 mA时,对比度灵

敏度略有提高。说明提高管电流,在一定程度上可提高图像的对比度。

表4 最小可分辨孔洞、夹杂尺寸

Tab. 4 Size of minimum recognizable holes and inclusions

透照管电流/mA	可识别最小孔洞		可识别最小夹杂		对比度/%	
	直径/mm	深度/mm	直径/mm	深度/mm	孔	夹杂
0.5	0.5	0.45	0.5	0.3	2.5	1.7
0.65	0.5	0.30	0.5	0.3	1.7	1.7
0.9	0.5	0.30	0.5	0.3	1.7	1.7

2.3.2 管电压影响

在相同的检测参数下,分别采用45、60、80、100、120 kV的管电压对直径 $\varphi 500$ mm的模拟缺陷壳体进行检测试验。如图10为不同管电压下检测结果图,可识别的孔洞和夹杂最小尺寸如表5所示。

从试验结果分析,所有夹杂均清晰可见;针对孔

洞,当管电压由45 kV增加到60 kV时,对比度灵敏度由2.5%提高到1.7%,当管电压由100 kV增加到120 kV时,对比度灵敏度由1.7%降低到2.5%。试验结果表明,在一定范围内,当管电压增加时,对比度灵敏度会有所提高,但当管电压超出一定范围后,当管电压增加时,对比度灵敏度会有所降低。

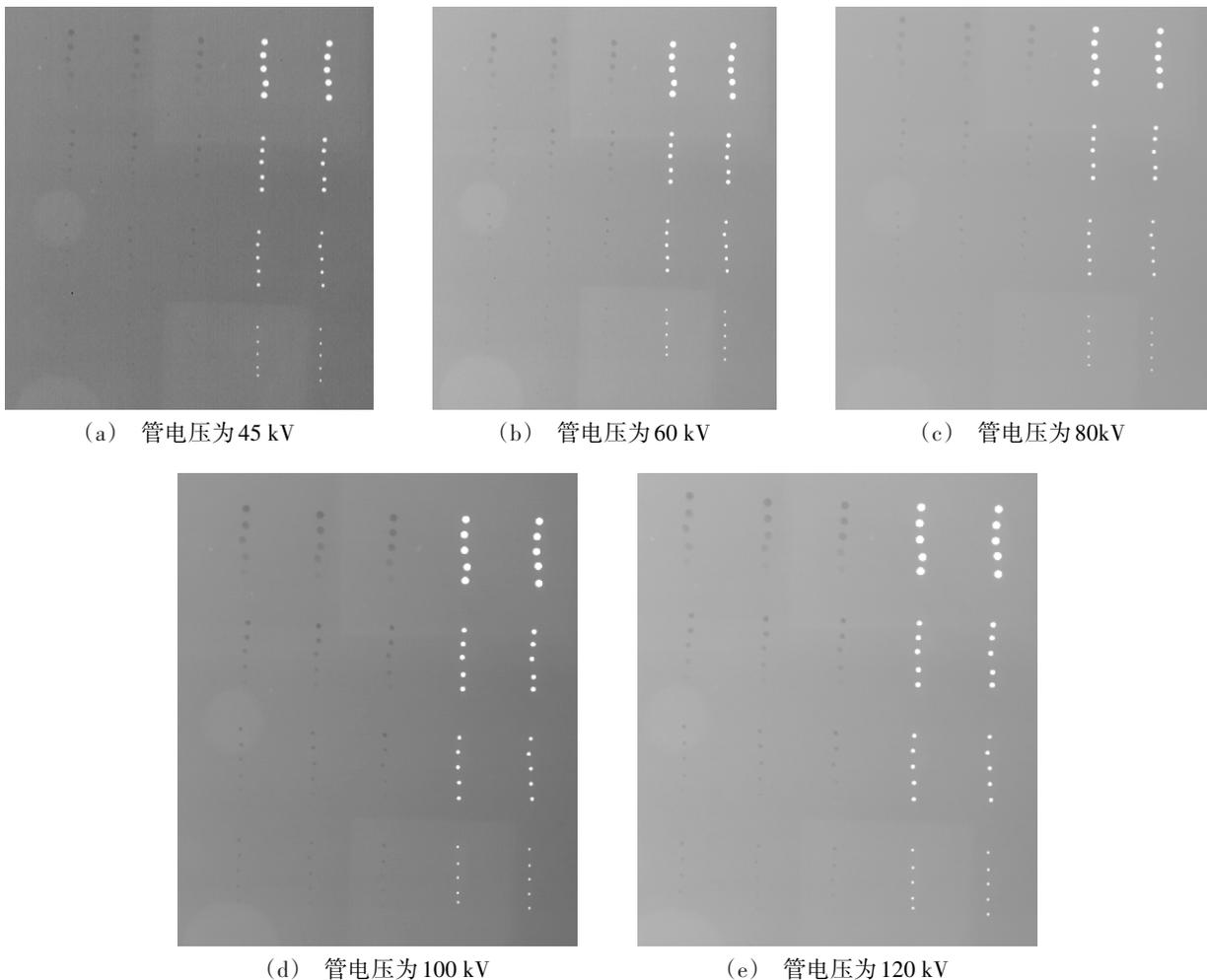


图10 不同管电压下检测结果

Fig. 10 Test results under different tube voltages

3 结论

本文针对碳纤维缠绕发动机壳体进行X射线数字DR成像检测试验,在其他试验透照条件不变的情况下具有以下结论:

(1)采用较小的焦点尺寸进行检测时,图像的空间分辨率更高;使用最佳放大倍数获得的图像空间分辨最高。

(2)当管电压、管电流和图像采集的单帧积分时

表5 最小可分辨孔洞、夹杂尺寸
Tab. 5 Size of minimum recognizable holes and inclusions

透照管电压 /kV	可识别最小孔洞		可识别最小夹杂		对比度/%	
	直径/mm	深度/mm	直径/mm	深度/mm	孔	夹杂
45	0.5	0.45	0.5	0.3	2.5	1.7
60	0.5	0.30	0.5	0.3	1.7	1.7
80	0.5	0.30	0.5	0.3	1.7	1.7
100	0.5	0.30	0.5	0.3	1.7	1.7
120	0.5	0.45	0.5	0.3	2.5	1.7

间增加,图像的信噪比明显增加。

(3)进行数字射线DR检测时,在一定范围内管电压增加,图像对比度灵敏度增加,当超出一定限制后,管电压增加,对比度灵敏度会降低;管电流增加,图像的对比度灵敏度有所增加。

参考文献

[1] 张治纲. YY-1发动机复合材料壳体结构分析[J]. 国防科技大学,2014(11):1~5.
ZHANG Zhi gang. Research of structural stability for composite material filament winding shell of YY-1 motor [J]. National Defense of Defense Technology, 2014(11): 1~5.
[2] 何方成,王箬,史丽军. 航空用纤维增强聚合物基复合材料无损检测技术应用与展望[J]. 无损检测,2018,40(11):29.
HE Fang cheng, WANG Zheng, SHI Li jun. Application and development of NDT for fiber reinforced polymer matrix

composites used in aviation [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(11):29.

[3] 郑世才. 数字射线检测技术专题(四)——数字射线图像基本理论[J]. 无损检测,2012,34(4):63~65.

ZHENG Shi cai. Digital radiography IV :The basic theory of digital radiological image [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(4):63~65.

[4] 郑世才,王晓勇. 数字射线检测技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

ZHENG Shi cai, WANG Xiao yong. Digital radiography technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

[5] 沈建中,林俊明. 现代复合材料的无损检测技术[M]. 北京:国防工业出版社,2016.

SHEN Jian zhong, LIN Jun ming. Nondestructive testing technology of modern composite materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.