

飞机外场腐蚀损伤检测方法研究

张幸, 何卫平

(中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

摘要: **目的** 研究飞机外场条件下适用的腐蚀损伤检测方法。**方法** 针对某型飞机铝合金和结构钢的腐蚀损伤特点,采用 X 射线 CR(计算机放射成像系统,Computed Radiography,简称 CR)、X 射线 DR(Digital Radiography,简称 DR)、红外热波检测等无损检测方法对铝合金和结构钢的典型腐蚀损伤件进行检测,优选及验证适合用于飞机腐蚀损伤的外场检测方法。**结果** X 射线 CR 检测方法可检测铝合金和结构钢单层隐蔽腐蚀损伤和多层隐蔽裂纹,X 射线 DR 检测方法可检测铝合金和结构钢单层/多层隐蔽腐蚀损伤/裂纹,红外热波检测方法只可检测铝合金和结构钢单层隐蔽腐蚀损伤。**结论** 相较于 X 射线 CR 和红外热波检测方法,X 射线 DR 成像检测方法能够更可靠、便捷地检测铝合金和结构钢单层/多层结构隐蔽腐蚀/裂纹损伤,更适于飞机结构腐蚀损伤的外场检测。

关键词: CR; DR; 红外热波检测; 腐蚀损伤; 外场检测

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.06.020

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0116-08

Investigations on Outfield Detection Methods for Corrosion Damages of Aircraft

ZHANG Xing, HE Wei-ping

(Avic Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the outfield detection techniques for corrosion damages of aircraft. **Methods** Several experimental investigations were carried out to detect the corrosion damages of Al alloy and structure steel using three newly developed NDT techniques including X-radial CR, X-radial DR and infrared thermographic detection. **Results** X-radial CR detection technology could detect hidden corrosion damages of monolayer and crack damages of multilayer Al alloy and structure steel. X-radial DR detection technology could detect hidden corrosion/crack damages of monolayer or multilayer Al alloy and structure steel. Infrared thermographic detection technology could only detect hidden corrosion damages of monolayer Al alloy and structure steel. **Conclusion** X-radial DR detection technology could effectively detect hidden corrosion/crack damages of monolayer or multilayer Al alloy and structure steel, which was considered to be prior to X-radial CR and infrared thermographic detection technology in outfield detection of corrosion damages of aircraft.

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-10-29

Received: 2014-10-15; Revised: 2014-10-29

作者简介: 张幸(1984—),女,湖南浏阳人,硕士,工程师,主要研究方向为飞机结构腐蚀防护与控制。

Biography: ZHANG Xing(1984—), Female, from Liuyang, Hunan, Master, Engineer, Research focus: corrosion protection and control of aircraft structure.

KEY WORDS: CR; DR; infrared thermographic detection; corrosion damage; outfield detection

飞机在服役环境下的腐蚀损伤会引起机体材料静强度和疲劳强度的削弱,直接影响着飞机的使用寿命和安全性^[1]。对飞机结构件腐蚀损伤的检测和早期预报,是实现飞机结构日历寿命体系评定的重要手段,对有效提高飞机在使用维护中的安全性、经济性,延长飞机的使用寿命具有重要意义^[2-3]。

传统的无损检测技术如超声波检测、涡流检测及渗透检测均存在明显的不足^[4-5]。如:超声波难以对小、薄、复杂零件进行检测,需耦合剂耦合,检测时间长,存在盲区,对近表面的检测能力差;涡流检测信号受探头提离效应影响较大,对零件几何形状、突变引起的边缘效应敏感,对检测人员要求较高,容易造成漏判和误判;渗透检测不能检测表面多孔材料,不能检测隐蔽腐蚀和裂纹。可以说,这些方法都不是十分有效可靠的腐蚀损伤检测方法,无法及时地检测出刚刚发生的腐蚀。同时,上述传统的无损检测方式也无法满足飞机外场对检测灵活性,可操作性的要求。

近年快速发展起来的一些先进无损检测技术如 CR(Computed Radiography)数字成像技术、DR(Digital Radiography)数字直接成像技术及红外热波检测技术对腐蚀检测起到了很大的推动作用^[6-12]。相比于传统检测方法,这些新型检测技术具有检测速度快、成像质量高、操作简单方便等一系列优势,适合用于外场检测,现场应用和在线、在役检测^[13-16]。文中结合某型飞机铝合金和结构钢的腐蚀损伤特点,选取 X 射线 CR、X 射线 DR、红外热波检测等 3 种无损检测方法对其典型腐蚀损伤件进行检测,分析各检测方式的成像特点和检测性能,选定适于外场使用的腐蚀损伤检测方法,为飞机外场腐蚀损伤检测和维修提供技术支持。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

试验材料为某型飞机用高强度铝合金(2024)和结构钢(30CrMnSiA),结合飞机在服役时的腐蚀

损伤特点,分别进行以下 3 类腐蚀损伤件的制备。

1) A 类平板腐蚀损伤件。A 类腐蚀损伤件为平板腐蚀件,尺寸为 100 mm×60 mm×3 mm 的薄板,试验件材料、损伤类型和损伤制备方式等见表 1。

表 1 A 类腐蚀损伤
Table 1 Class A corrosion damages

材料	损伤类型	损伤制备
铝合金	预腐蚀	密封留出小区域,然后 EXCO 溶液浸泡腐蚀
结构钢	预腐蚀	

2) B 类腐蚀/裂纹损伤件。B 类腐蚀损伤件为夹层腐蚀/裂纹损伤件,由 3 块尺寸均为 100 mm×60 mm×3 mm 的平板件双剪螺栓形成,试验件材料、损伤类型和损伤制备方式等见表 2。

表 2 B 类腐蚀/裂纹损伤件
Table 2 Class B corrosion/crack damages

材料	损伤类型	损伤制备
铝合金	预腐蚀	1) 腐蚀:将第Ⅱ层板材密封留出小区域,然后 EXCO 溶液浸泡腐蚀,之后进行螺栓,形成连接件。
	预制裂纹	
结构钢	预腐蚀	2) 裂纹:用线切割的方法在双剪螺栓件的中间夹层(第Ⅱ层)预制裂纹,裂纹位置包括板材中间、板材边缘和螺栓孔边。
	预制裂纹	

3) C 类腐蚀损伤件。C 类腐蚀损伤件为夹层腐蚀损伤件,由 3 块平板件螺栓形成。试验件材料、规格和损伤类型和损伤制备方式等见表 3。

表 3 C 类腐蚀损伤件
Table 3 Class C corrosion damages

材料	试件尺寸/mm	损伤制备
铝合金	第Ⅰ层:180×60×2	将第Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ层板材局部密封留出小区域,然后 EXCO 溶液浸泡腐蚀,之后螺栓形成连接件
	第Ⅱ层:120×60×2	
	第Ⅲ层:80×60×3	
结构钢	第Ⅰ层:180×60×1.5	
	第Ⅱ层:120×60×1.5	
	第Ⅲ层:80×60×3	

1.2 腐蚀损伤的检测方法

分别采用 X 射线 CR、X 射线 DR、红外热波检测等 3 种无损检测方法对 1.1 中所预制的腐蚀损伤进行检测,所采用的检测设备及检测工艺参数如下。

1) X 射线 CR 成像。采用射线机和 VMI NDT CR 无损检测系统(尺寸为 130 cm×68 cm×37 cm,质量为 40 kg)对预制腐蚀损伤试样进行检测。其中,CR 成像系统的主要装置包括影像采集部分(IP 板)、影像扫描部分(激光扫描仪)及影像后处理和记录部分(成像软件),具体试验参数见表 4。

表 4 射线机和 CR 设备试验参数

Table 4 Test parameters of CR equipment

试验件	电压 /kV	电流 /mA	曝光时 间/s	扫描主机 的扫描精 度/ μm
铝合金平板腐蚀件	50	20	18	50
结构钢平板腐蚀件	95	20	12	50
铝合金夹层腐蚀件	62	20	18	50
结构钢夹层腐蚀件	135	20	18	50
铝合金夹层预制裂纹件	62	20	18	50
结构钢夹层预制裂纹件	135	20	18	50

2) X 射线 DR 成像。采用 V-RX 便携式 X 射线 DR 成像系统(尺寸为 80 cm×45 cm×30 cm,质量为 34 kg)对预制腐蚀损伤试样进行检测。所采用的射线机为连续射线机,焦点尺寸为 0.4 mm,成像板分辨率为 3.51 p/mm,动态范围为 14 位。试验采用高电压、低电流和低曝光时间,具体的试验参数见表 5 和表 6。

表 5 DR 设备试验参数——A 类和 B 类腐蚀损伤件

Table 5 Test parameters of DR equipment for Class A and B corrosion damages

试验件类型	电压 /kV	电流 /mA	曝光时 间/s
铝合金平板腐蚀件	120	0.8	2
结构钢平板腐蚀件	120	0.8	2
铝合金夹层腐蚀件	120	0.8	4
结构钢夹层腐蚀件	120	0.8	4
铝合金夹层裂纹件	120	0.8	4
结构钢夹层裂纹件	120	0.8	4

表 6 DR 设备试验参数——C 类腐蚀损伤件

Table 6 Test parameters of DR equipment for Class C corrosion damages

试验件类型	电压 /kV	电流 /mA	曝光时 间/s
铝合金腐蚀件(单层)	70	2.2	2
结构钢腐蚀件(双层)	70	2.4	2.4
铝合金腐蚀件(三层)	70	2.8	2.8
结构钢腐蚀件(单层)	80	2.2	2.6
结构钢腐蚀件(双层)	80	2.4	2.8
结构钢腐蚀件(三层)	80	3.2	3

3) 红外热波检测。采用 Thermoscope II 便携式脉冲加热红外热成像无损检测系统对预制腐蚀损伤试样进行检测。该系统由脉冲热源、红外热像仪(尺寸为 22 cm×14 cm×13 cm,质量为 3.2 kg)和计算机图像处理系统(尺寸为 40 cm×30 cm×15 cm,质量为 10 kg)等 3 部分组成。根据铝合金和结构钢腐蚀损伤试件的表面状况,在其表面刷涂水溶性黑漆进行表面处理,以提高检测表面的发射率。实验在室温下进行,根据被测试件的导热特性和实验所要达到的目的,选择的具体参数:闪光灯能量为 9.8 kJ;采集频率为 60 Hz;探测时间为 15 s。

2 结果与讨论

2.1 X 射线 CR 技术检测结果

X 射线 CR 便携式数字成像系统对铝合金和结构钢腐蚀损伤件进行检测,其检测结果见表 7 和如图 1—图 6 中 b 所示。3 mm 厚铝合金和结构钢平板件预腐蚀后的宏观形貌和 CR 成像照片如图 1a,b 和图 2a,b 所示(腐蚀缺陷见箭头标记处)。X 射线 CR 设备可检测到 3 mm 厚的铝合金(从缺陷正面检测)和结构钢(从缺陷反面检测)平板件上的腐蚀(箭头标记处),检测铝合金板腐蚀的灵敏度 $\leq 2.7\%$,检测结构钢板腐蚀的灵敏度 $\leq 7.9\%$ 。结果表明,采用 X 射线从试件正面和反面检测腐蚀缺陷的效果相似。由图 3—图 6 中 b 可知,X 射线 CR 设备可检测到 9 mm 厚的铝合金和结构钢连接件夹层中间和边缘的裂纹,螺栓孔边裂纹不明显,检测裂纹的灵敏度 $\leq 2.2\%$ 。无法检测 9 mm 厚的铝合金和结

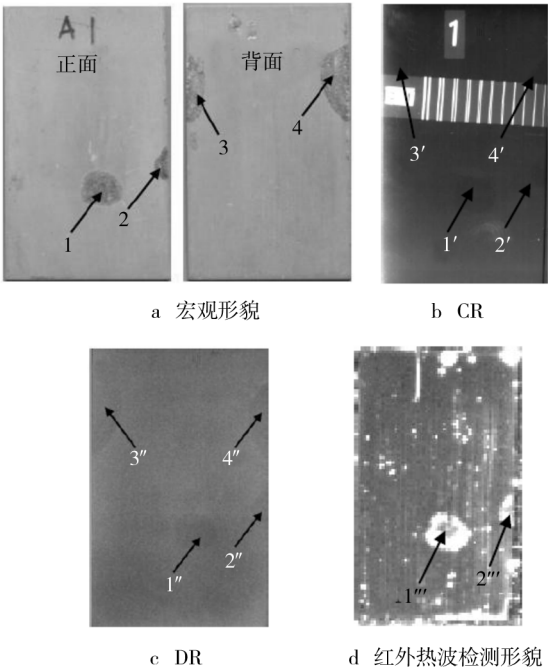


图 1 3 mm 厚铝合金平板腐蚀件及 CR,DR 和红外热波检测形貌

Fig. 1 Morphologies of macrograph, CR, DR and infrared thermal wave detection from both right and reverse sides of the Al alloy (2024) with a thickness of 3 mm

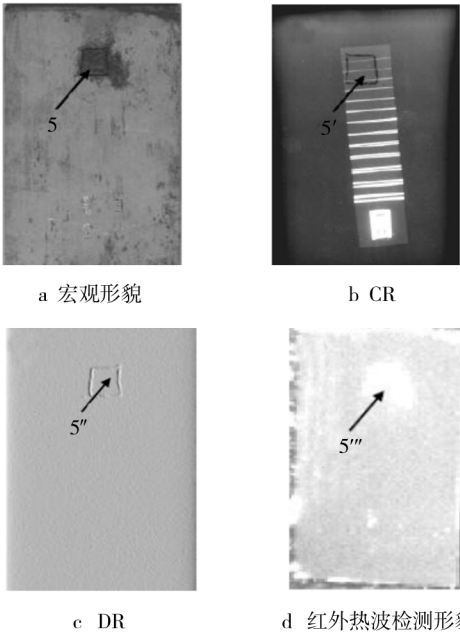


图 2 3 mm 厚结构钢 (30CrMnSiA) 平板腐蚀件及 CR,DR 和红外热波检测形貌

Fig. 2 Morphologies of macrograph, CR, DR and infrared thermal wave detection of the structural steel (30CrMnSiA) with a thickness of 3 mm

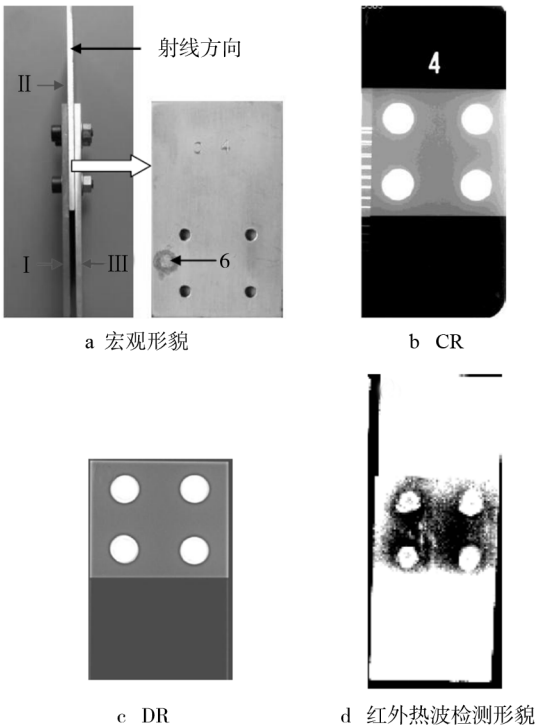


图 3 9 mm 厚铝合金夹层腐蚀损伤形貌及 CR,DR 和红外热波检测形貌(铝板 I, II, III 的厚度均为 3 mm)

Fig. 3 Morphologies of macrograph, CR, DR and infrared thermal wave detection of the Al alloy (2024) with a thickness of 9 mm

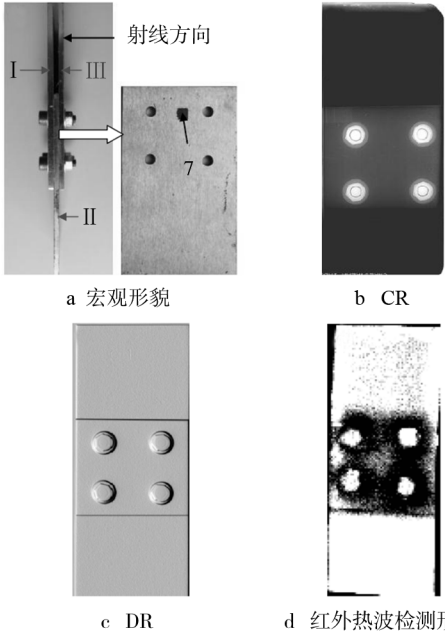


图 4 9 mm 厚结构钢夹层腐蚀损伤形貌及 CR,DR 和红外热波检测形貌(钢板 I, II, III 的厚度均为 3 mm)

Fig. 4 Morphologies of macrograph, CR, DR and infrared thermal wave detection of the alloy steel (30CrMnSiA) with a thickness of 9 mm

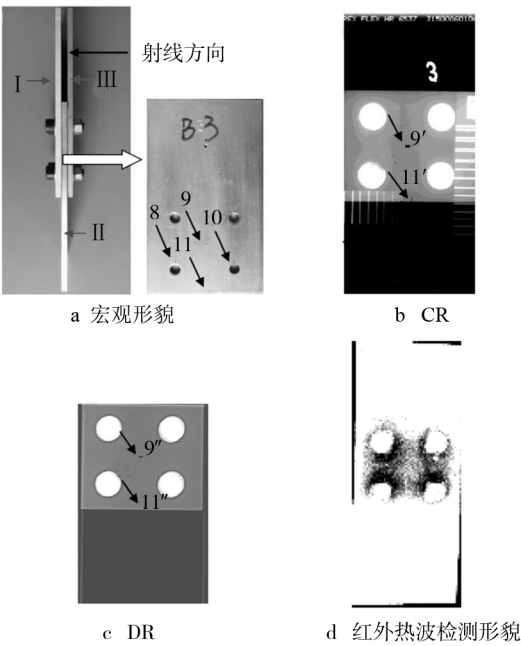


图 5 9 mm 厚铝合金夹层预制裂纹形貌及 CR,DR 和红外热波检测形貌(铝板 I, II, III 的厚度均为 3 mm)
Fig. 5 Morphologies of macrograph, CR, DR and infrared thermal wave detection of the Al alloy plates I, II, III (2024) with a thickness of 9 mm

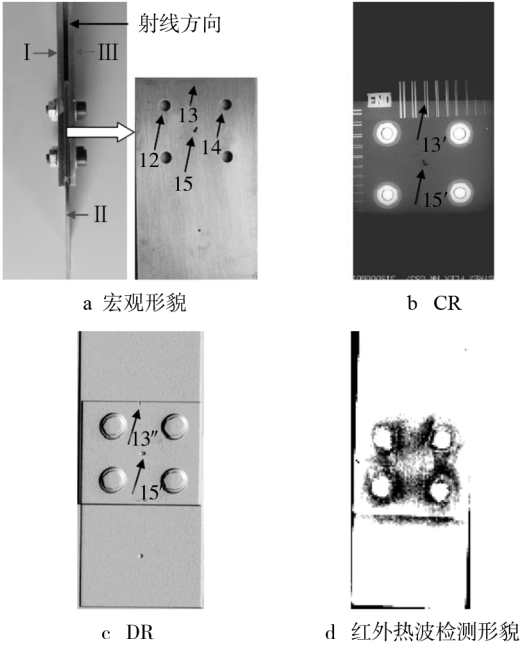


图 6 9 mm 厚结构钢夹层预制裂纹形貌及 CR,DR 和红外热波检测照片(钢板 I, II, III 的厚度均为 3mm)
Fig. 6 Morphologies of macrograph, CR, DR and infrared thermal wave detection of the alloy steel (30CrMnSiA) with a thickness of 9 mm

表 7 CR,DR 和红外热波设备检测结果
Table 7 Test results obtained by CR, DR and infrared thermal wave detection

缺陷类型	试验件总 厚度 D/ mm	检测到的 缺陷类型	腐蚀深度或裂纹 宽度 d/ μ m	d/D /%	检测评价		
					CR	DR	红外热波
铝合金平板腐蚀	3	腐蚀	82	2.7	√	√	√
结构钢平板腐蚀	3	腐蚀	238	7.9	√	√	√
铝合金夹层腐蚀	9	/	84	0.9	×	×	×
结构钢夹层腐蚀	9	/	150	1.7	×	×	×
铝合金夹层裂纹	9	中间和	1000	11	√	√	×
		边缘裂纹	200	2.2			
结构钢夹层裂纹	9	中间和	200	2.2	√	√	×
		边缘裂纹	1000	11			

注:“√”示可检测;“×”表示不可检测。

构钢连接件夹层中的腐蚀,其可能原因是腐蚀缺陷不够深,缺陷与试件总厚度之比太小。

2.2 X 射线 DR 技术检测结果

采用 X 射线 DR 便携式无损检测系统对腐蚀损伤件进行检测,其检测结果见表 7 和如图 1—图 6 中 c 所示(腐蚀缺陷见箭头标记处)。对于 3 mm 厚

的铝合金平板件,将 DR 系统的锐化、灰度调节后,可看出铝板上的腐蚀(如图 1c 所示),检测铝合金板腐蚀的灵敏度 $\leq 2.7\%$ 。图 2c 是 DR 系统的二维浮雕效果图,对于 3 mm 厚的结构钢平板件,将 DR 系统的锐化、灰度调节后,可清晰、直观地看出钢板上的腐蚀,检测结构钢板腐蚀的灵敏度 $\leq 7.9\%$ 。由图 3—图 6 中 c 可知,对于 9 mm 厚的铝合金和结构

钢连接件,可检测到夹层中间和边缘的裂纹,检测裂纹的灵敏度 $\leq 2.2\%$ 。无法检测夹层中腐蚀和孔边裂纹,其可能原因是腐蚀缺陷深度不够,缺陷与试件总厚度之比太小,孔边预制裂纹太短,被螺帽遮挡,增加了检测难度。

2.3 红外热波检测结果

采用某型便携式红外热波检测系统对腐蚀损伤件进行检测,其检测结果见表 8 和如图 1—图 6 中 d 所示。由图 1d 和图 2d 可知,对于 3 mm 厚的铝合金和结构钢平板件,可从缺陷正面检测到腐蚀,检测铝合金板腐蚀的灵敏度 $\leq 2.7\%$,检测结构钢板腐蚀的灵敏度 $\leq 7.9\%$ 。由图 3—图 6 中 d 可知,对于 9 mm 厚的铝合金和结构钢连接件,无法检测到夹层中的腐蚀和夹层中间、边缘以及孔边裂纹,可能是由于缺陷的宽深比和面积未达到设备的检测灵敏度。

2.4 X 射线 DR 检测方法二次验证结果

上述试验结果表明:针对飞机用铝合金和结构钢腐蚀/裂纹损伤,综合考虑检测的快捷性、有效性和设备的便携性,X 射线 DR 成像检测方法较佳,可检测铝合金和结构钢单层腐蚀及夹层裂纹,未检测到铝合金和结构钢夹层腐蚀,可能的原因是预制腐蚀缺陷深度不够。为了进一步验证 X 射线 DR 成像检测方法对多层腐蚀的检测能力,制备 C 类腐蚀损伤件进行腐蚀损伤检测。

C 类腐蚀损伤检测试验件有 3 层,其腐蚀缺陷如图 7 所示。采用便携式 X 射线 DR 无损检测系统对腐蚀损伤件进行检测,检测试件第 2 层时,第 1 层因曝光量相对较大变为不可见;检测试件第 3 层时,第 1 层及第 2 层因曝光量相对较大变为不可见。对于铝合金,检测第 1 层和第 2 层时放置球形校准块和 5 mm 铝板试块,检测第 3 层时放置球形校准块和 10 mm 铝板试块,可检测夹层中的隐蔽腐蚀,其检测结果见表 8 和如图 8 所示。由图 8 可知,X 射线 DR 无损检测系统可检测单层、双层、三层铝合金件中的隐蔽腐蚀损伤;检测 2 mm 厚铝合金板(单层)腐蚀的灵敏度 $\leq 10\%$;检测 4 mm 厚铝合金板(双层)腐蚀的灵敏度 $\leq 7.5\%$;检测 7 mm 厚铝合金板(三层)腐蚀的灵敏度 $\leq 7.1\%$ 。对于结构钢,检测检测第 1 层和第 2 层时放置球形校准块,检测第 3 层时,放置阶梯试块及球形校准块,可检测夹层中

的隐蔽腐蚀,其检测结果见表 9 和如图 9 所示。

图 7 B 类腐蚀损伤件的缺陷示意

Fig. 7 Sketch map of defect of corrosion damages caused by Class B

a 宏观形貌

b DR

试件正面 球形校准块 铝板试块 试件第1层 试件第2层 试件第3层

图 8 铝合金腐蚀损伤检测试件宏观形貌及 DR 检测结果

Fig. 8 Morphologies of macrograph and DR detection results of the Al alloy (2024)

a 宏观形貌

b DR

试件正面 阶梯试块 球形校准块 试件第1层 试件第2层 试件第3层

表 8 铝合金腐蚀损伤检测试件检测结果
Table 8 Test results of Al alloy corrosion damage

缺陷位置	试件层数	厚度 D / mm	缺陷深度 d / mm		缺陷面积 S / mm^2		d / D /%	检测评价
			实际	检测	实际	检测		
1 上	单层	2	0.4	0.4	12×18	12×15	20	√
	双层	4	0.3	0.3	10×14	10×14	7.5	√
	三层	7	0.53	0.5	10×16	10×15	7.1	√
1 下	单层	2	0.21	0.2	9×13	9×13	10	√
2 下	双层	4	0.7	0.7	12×14	10×14	17.5	√
	三层	7	0.52	0.5	14×13	13×13	7.1	√
3 下	三层	7	0.73	0.7	10×10	10×10	10	√

注:1. 铝合金试件(2[#])第 1,2,3 层的厚度分别为 2,2 和 3 mm。
2. “√”表示可检测;“×”表示不可检测。
3. “实际”表示的是将试验件分解测量得到的结果;“检测”表示的是采用腐蚀损伤检测方法检测得到的结果。

表 9 结构钢腐蚀损伤检测试件检测结果
Table 9 Test results of alloy corrosion damage

缺陷位置	试件层数	厚度 D / mm	缺陷深度 d / mm		缺陷面积 S / mm^2		d / D /%	检测评价
			实际	检测	实际	检测		
1 上	单层	1.5	0.1	0.1	13×17	10×17	6.7	√
	双层	3	0.31	0.3	10×16	10×15	10	√
	三层	6	0.62	0.5	11×16	11×16	8.3	√
1 下	单层	1.5	0.1	0.1	12×17	10×17	6.7	√
2 下	双层	3	0.3	0.3	12×15	10×15	10	√
	三层	6	0.52	0.5	12×12	12×12	8.3	√
3 下	三层	6	0.74	0.6	10×14	10×13	10	√

注:1. 结构钢试件(5[#])第 1,2,3 层的厚度分别为 1.5,1.5 和 3 mm。
2. “√”表示可检测;“×”表示不可检测。
3. “实际”表示的是将试验件分解测量得到的结果;“检测”表示的是采用腐蚀损伤检测方法检测得到的结果。

1.5 mm 厚结构钢板(单层)腐蚀的灵敏度≤6.7%;
检测 3 mm 厚结构钢(双层)腐蚀的灵敏度≤10%;
检测 6 mm 厚结构钢板(三层)腐蚀的灵敏度≤8.3%。腐蚀损伤检测试验完成后,将铝合金和结构钢试验件拆卸分解测量腐蚀深度和腐蚀面积,并将结果记录于表 8 和表 9。由两表可知,采用无损检测设备测得的腐蚀损伤检测结果和实际腐蚀损伤尺寸相差不大,验证了 X 射线 DR 检测方法的准确度。

3 结论

1) 采用 X 射线 CR 数字成像方法可检测铝合金和结构钢单层隐蔽腐蚀损伤和多层隐蔽裂纹,且

其需另配 X 射线源使用。
2) 采用 X 射线 DR 检测方法可检测铝合金和结构钢单层/多层隐蔽腐蚀损伤/裂纹。
3) 采用红外热波检测方法只可检测铝合金和结构钢单层隐蔽腐蚀损伤。
综上所述,对于飞机铝合金和结构钢的腐蚀损伤,X 射线 DR 成像方法能够更可靠、便捷地检测单层/多层结构隐蔽腐蚀/裂纹损伤,该便携式 DR 无损检测系统尺寸小、质量轻、检测时间短,更能满足便携性和检测快捷性的特点,特别适于飞机外场使用。

参考文献:
[1] 张丹峰,谭晓明,马力,等.服役环境条件下飞机结构

- 铝合金材料孔蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 93—96.
- ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, MA Li, et al. Aluminum Pitting Corrosion Damage Rule under Service Environment[J]. Journal of Chinese society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2): 93—96.
- [2] 穆志涛, 熊玉平. 飞机结构主体材料腐蚀损伤特点分析[J]. 材料保护, 2001, 34(12): 203—208.
- MU Zhi-tao, XIONG Yu-ping. Analysis of Corrosion Damage Characteristics for Principal Parts of Aircraft Structure[J]. Materials Protection, 2001, 34(12): 203—208.
- [3] 刘文琰, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Precision Measurement Methods for the Calendar Life of Aircraft Structure System[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [4] 李久青, 杜翠薇. 腐蚀试验方法及监测技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- LI Jiu-qing, DU Cui-wei. Measurement Methods and Monitoring Techniques for Corrosion Tests[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [5] 刘贵民, 马丽丽. 无损检测技术[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- LIU Gui-min, MA Li-li. NDT Technology [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [6] 田慧, 栗保明. CR 成像技术在弹道实验中的应用[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(10): 47—49.
- TIAN Hui, LI Bao-ming. Applications of CR Technology in Ballistic Test[J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 11(10): 47—49.
- [7] 李艳红, 张存林, 金万评, 等. 碳纤维复合材料的红外热波检测[J]. 激光与红外, 2005, 35(4): 262—264.
- LI Yan-hong, ZHANG Cun-lin, JIN Wan-ping, et al. IR Thermalwave Nondestructive Inspection of Carbon Fiber Composite Material[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(4): 262—264.
- [8] 王迅, 金万评, 张存林, 等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2004, 26(10): 497—501.
- WANG Xun, JIN Wan-ping, ZHANG Cun-lin, et al. Actuality and Evolvement of Infrared Thermal Wave Nondestructive Imaging Technology [J]. NDT, 2004, 26(10): 497—501.
- [9] MARINETTI S, VAVILOV V. IR Thermographic Detection and Characterization of Hidden Corrosion in Metals; General Analysis[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 865—872.
- [10] LI Yan-hong, Study on Pulsed Phase Analysis of Depth Measurement for Infrared Thermal Wave Nondestructive Evaluation [C]//Photonics Asia 2007 Conference and Exhibition. Proceeding of the SPIE 2008, 2008.
- [11] ZHANG Yan, FENG Li-chun, LI Yan-hong, et al. Pulsed Phase Thermography for Defect Detection of Honeycomb Structure [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2009.
- [12] CHEN Da-peng, ZHANG Cun-lin, ZENG Zhi, et al. Active Infrared Thermal Imaging Technology to Detect the Corrosion Defects in Aircraft Cargo Door [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2009.
- [13] TAKAHIDE S, SHIRO K. Applications of Pulse Heating Thermography and Lock-in Thermography to Quantitative Nondestructive Evaluations[J]. Infrared Physics & Technology, 2002(43): 211—218.
- [14] EVA B, VASCO P. de F. Evaluation of Building Materials Using Infrared Thermography[J]. Construction and Building Materials, 2007(21): 218—224.
- [15] WANG Xun. Pulse-echo Thermal Wave Imaging of Metals and Composite[D]. Detroit: Wayne State Univ, 2001.
- [16] 金国锋, 张炜, 杨正伟, 等. 涂层下金属腐蚀损伤的红外热波检测与评估[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(1): 58—62.
- JIN Guo-feng, ZHANG Wei, YANG Zheng-wei, et al. Detection and Evaluation of Corrosion Damage under Coating by Infrared Thermal Wave Technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(1): 58—62.

(上接第 39 页)

LI Bin, ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, et al. Effect of Water-based Cleaning Compound for Aircraft Exterior Surface on Metals Corrosion and Hydrogen Embrittlement [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(6): 55—60.

[13] ROBERT N M, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(4): 17—21.