

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.015

复合材料层合板凹坑损伤目视检测影响因素分析

童瑶¹, 戴升鑫²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201206; 2. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 飞机复合材料结构设计中必须确定凹坑损伤的目视检测阈值及其影响因素。采用 3 种直径的冲头, 通过准静态方法对平板表面引入随机分布的凹坑损伤。考察板的角度、颜色以及检测人员水平 3 种因素对详细目视检测结果的影响。基于累积对数正态分布模型分析对比了不同因素条件下的检出概率。结果表明, 蓝色板的凹坑损伤更容易被检出; 接近垂直检测角度的板的凹坑损伤更容易被检出; 具有维修或目视检测相关经验的专业人员的检出概率高。

关键词: 复合材料; 凹坑损伤; 目视检测; 检出概率; 影响因素

中图分类号: V214.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)01-0132-08

Analysis of Influence Factors on Visual Inspection of Dent Damage in Composite Laminates

TONG Yao¹, DAI Shengxin²

(1. Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 201206, China; 2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The visual inspection threshold of dent damage and its influence factors must be determined during the aircraft composite structure design. Three kinds of punches with different diameters are used to introduce randomly distributed dent damage on the surface of plate by quasi-static method. The influence of three factors, such as the angle of the plate, color and the level of the inspector, on the results of the detailed visual inspection is investigated. Based on the cumulative lognormal distribution model, the detection probability of different factors is analyzed and compared. The results show that dent damage of the blue plate is easier to be detected; it is easier to detect the dent damage when the angle is close to the vertical; and the detection probability of the professional with maintenance or visual inspection experience is high.

Key words: composite material; dent damage; visual inspection; probability of detection; influence factor

复合材料结构设计规定^[1]:“必须表明用于检出损伤的方法是可靠的”,且“这些方法必须在持续适航文件中的适当章节规定”,而“目视检测是最主要的外场损伤检测方法”。目视检测包括一般目视检测(General visual inspection, GVI)和详细目视检测(Detailed visual inspection, DET)。因此,确定准确合理的目视检测阈值是结构损伤容限设计与修理设计的关键。文献[1]还明确指出,目视

检测方法应考虑冲击损伤凹坑深度、零件表面颜色等因素。

国外先进飞机制造商在复合材料结构设计中均通过试验确定了凹坑损伤的检出门槛值,以确保航空公司以此制定的维修方案能够检测出相应的损伤。例如,欧洲航空公司通过一般目视检测,即 A 检和 C 检、日检、周检等,检测得到的冲击损伤检测数据(约 1 000 个记录)的 85% 均高于空客公司

收稿日期:2021-07-11;修订日期:2021-10-29

通信作者:戴升鑫,男,硕士研究生,E-mail:452865478@qq.com。

引用格式:童瑶,戴升鑫. 复合材料层合板凹坑损伤目视检测影响因素分析[J]. 南京航空航天大学学报,2022,54(1):132-139. TONG Yao, DAI Shengxin. Analysis of influence factors on visual inspection of dent damage in composite laminates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1):132-139.

确定的可检阈值。

现有文献表明,复合材料层合板类结构表面凹坑损伤的检出概率通常定义为凹坑深度的函数。不同检测方法的效果可以用损伤检出概率分布模型来描述,最常用的损伤检出概率模型为累积对数正态模型和对数奇函数模型^[2-7]。

文献[3]采用直径为6~120 mm范围内的多种冲击头对不同颜色和不同表面光洁度的复合材料层合板冲击引入凹坑损伤。应用累积对数正态模型对目视检测数据进行了统计分析,给出了累积对数正态分布检出概率(Probability of detection, POD)曲线图。文献[5-6]采用最大似然估算法对累积对数正态模型中的参数进行估值,其研究工作进一步证明了凹坑损伤检出概率符合累积对数正态分布模型。

2006年在Chicago举行的复合材料结构损伤容限与维护研讨会上, Waite^[8]初步阐明了结构表面不同颜色/表面光洁度对目视检测概率的影响:绿色表面比白色表面更容易发现损伤;哑光表面比在光亮表面更容易发现损伤,但未有详细的定量分析与研究。蒋韵尔等^[9-10]通过试验研究了照明条件、板面颜色、检测距离以及检测角度等环境因素对维修人员目视检测结果的影响。结果表明:当照明条件控制在500 Lx左右时,检测距离越近检出概率越高,垂直的检测角度效果较好。事实上,美国照明工程协会制定的标准^[11]建议机库的照明强度为750 Lx。另外,以上文献均未对不同检测人员水平的影响进行详细分析。由于试验条件的限制,文献[5-6]未对室内照明反光状态的检测数据进行深入的分析与讨论。

鉴于以上问题,本文在室内照明反光状态下,考虑人员类型、平板置放角度和颜色等因素,对带有凹坑损伤的复合材料层合板进行详细目视检测;采用累积对数正态分布模型分析对比了不同因素下的检出概率。

1 目视检测试验

1.1 凹坑损伤引入

文献[12-14]的研究结果表明:在不考虑能量参数的前提下,低速落锤冲击损伤可以用准静态来模拟,落锤冲击和静压在冲击力相同的情况下产生的损伤基本上相同。因此,采用静压方法引入凹坑损伤,不仅能得到与落锤冲击效果一致的凹坑损伤,同时也解决了落锤冲击引起的表面漆开裂而增加凹坑的识别特征导致很浅的凹坑也能被轻易检出的问题。

采用直径为12.7、16和25.4 mm的3种钢珠冲击头对板表面进行顶压,利用千斤顶的压力表读数控

制凹坑损伤的深度,凹坑损伤的深度范围为0.05~1.5 mm,每块板上的凹坑损伤随机分布,凹坑损伤数量25~30个。

1.2 影响因素设置

(1) 人员类型及数量

两类检测人员:对复合材料和目视检测专业没有任何经验,但在试验前进行目视检测相关知识培训的人员,10人;从事复合材料结构维护或目视检测的专业机务人员,10人。

(2) 材料和颜色

考虑到某民用飞机蒙皮外表面的装饰颜色,制作了表面为白色、蓝色和绿色3种碳纤维复合材料层合板(方板)。其中,白色试板14块、蓝色和绿色试板各18块,共计50块板。板的检测表面清洁光滑,表面尺寸为1 000 mm×1 000 mm,厚度为2.5 mm。

(3) 置放角度

实际维护中,检测人员的观测角度是多样的,为考察其对检测结果的影响,考虑板与垂直平面夹角为15°、45°和60°这3种置放情况,如图1所示。

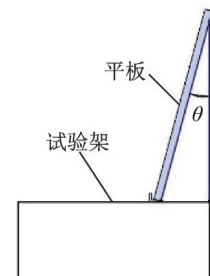


图1 板的置放角度

Fig.1 Placement angle of plate

(4) 照明反光

为了使目视检测试验与真实的飞机结构表面目视检测情况一致,环境照明强度至少为750 Lx^[10]。

1.3 目视检测试验步骤

目视检测试验步骤如下:

(1)工作人员对目视检测人员进行基本要求培训,培训内容包括检测步骤、观测区域、观测距离等。

(2)试验中,检测人员面对试件,分区域进行水平或垂直扫描,对试件进行逐一观察。

(3)检测人员用示意杆逐一指出被其认为发现了的凹坑损伤,并示意协助人员在该凹坑损伤旁边置放带有颜色的标记吸盘。

(4)检测人员认为整块板检测完成之后,方可对第二块板进行检测。

(5)每块板被检测完成且凹坑损伤标记置放完成之后,另一协助人员拍下照片,如图2所示。

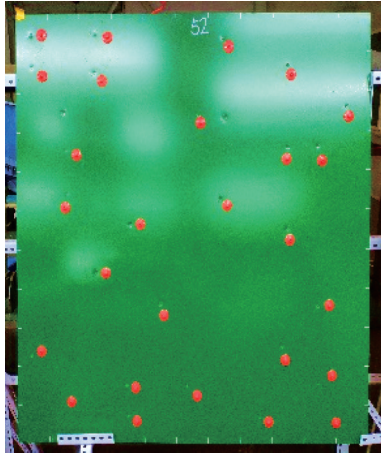


图2 检测试验完成后所拍下的照片

Fig.2 Photo taken after testing

(6)专业人员及非专业人员全部完成了该项检测试验后,可认为该项检测试验结束。

2 损伤检出识别与分析

2.1 损伤检出识别方法

(1)每块板上的凹坑损伤均有唯一的编号,并且凹坑损伤中心的坐标已知(像素坐标),如图3所示。

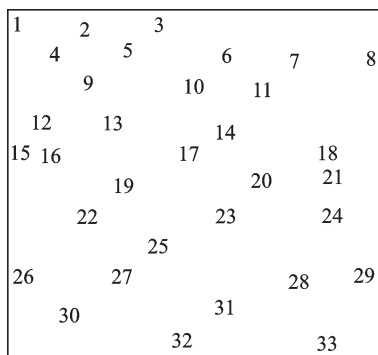


图3 板中凹坑损伤的编号

Fig.3 Number of dent damage in plate

(2)将检测过程中拍下的照片裁剪成方形图像,进行增加颜色对比度的处理后,得到如图4所示的位图,板表面上的每个吸盘标记一个识别出的凹坑损伤。

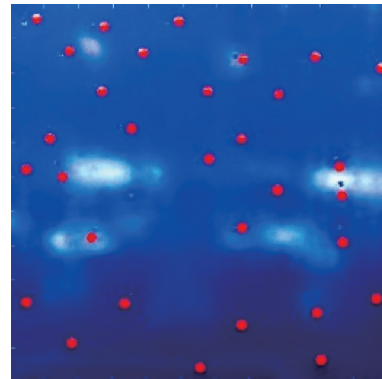


图4 处理后的照片

Fig.4 Processed photo

(3)图3和图4的像素相同,均为6 200像素×6 200像素。

(4)计算出图4中某一吸盘的中心与图3中每个凹坑损伤中心的距离(单位为像素)。

(5)吸盘与某一凹坑损伤的最小距离小于预定阈值(50像素),则该凹坑损伤被检出。

(6)用1表示凹坑损伤被检出,用0表示凹坑损伤未被检出。

(7)根据试验项目、试件角度、照明状态和检测人员的类型等信息生成检测结果文件。置放角为15°的白色板的非专业人员检测结果见表1。限于篇幅,这里不能一一列出各种因素条件的检测结果。

以上的凹坑损伤检出与否的识别分析均由基于Wolfram语言编写的程序完成。

表1 照明反光状态下,置放角为15°白色板的非专业人员检测结果

Table 1 Non-professional test results of 15° white plates under the lighting reflection

凹坑范围/ mm	深度/ mm	检出次数	检测次数	检出率/ %	凹坑范围/ mm	深度/ mm	检出次数	检测次数	检出率/ %
0.07~0.09	0.08	4	10	40.00	0.87~0.89	0.88	10	10	100.00
0.09~0.11	0.10	13	50	26.00	0.89~0.91	0.90	30	30	100.00
0.11~0.13	0.12	10	40	25.00	0.91~0.93	0.92	20	20	100.00
0.13~0.15	0.14	16	30	53.33	0.93~0.95	0.94	60	60	100.00
0.15~0.17	0.16	20	40	50.00	0.95~0.97	0.96	30	30	100.00
0.17~0.19	0.18	30	50	60.00	0.97~0.99	0.98	0	0	—
0.19~0.21	0.20	58	90	64.44	0.99~1.01	1.00	20	20	100.00
0.21~0.23	0.22	56	80	70.00	1.01~1.03	1.02	28	30	93.33
0.23~0.25	0.24	113	140	80.71	1.03~1.05	1.04	10	10	100.00
0.25~0.27	0.26	158	200	79.00	1.05~1.07	1.06	39	40	97.50
0.27~0.29	0.28	61	70	87.14	1.07~1.09	1.08	20	20	100.00
0.29~0.31	0.30	63	70	90.00	1.09~1.11	1.10	30	30	100.00

续表

凹坑范围/ mm	深度/ mm	检出次数	检测次数	检出率/ %	凹坑范围/ mm	深度/ mm	检出次数	检测次数	检出率/ %
0.31~0.33	0.32	106	120	88.33	1.11~1.13	1.12	0	0	—
0.33~0.35	0.34	48	50	96.00	1.13~1.15	1.14	20	20	100.00
0.35~0.37	0.36	94	100	94.00	1.15~1.17	1.16	30	30	100.00
0.37~0.39	0.38	46	50	92.00	1.17~1.19	1.18	30	30	100.00
0.39~0.41	0.40	108	110	98.18	1.19~1.21	1.20	10	10	100.00
0.41~0.43	0.42	75	80	93.75	1.21~1.23	1.22	10	10	100.00
0.43~0.45	0.44	59	60	98.33	1.23~1.25	1.24	0	0	—
0.45~0.47	0.46	93	100	93.00	1.25~1.27	1.26	20	20	100.00
0.47~0.49	0.48	77	80	96.25	1.27~1.29	1.28	10	10	100.00
0.49~0.51	0.50	58	60	96.67	1.29~1.31	1.30	0	0	—
0.51~0.53	0.52	54	57	94.74	1.31~1.33	1.32	10	10	100.00
0.53~0.55	0.54	67	69	97.10	1.33~1.35	1.34	10	10	100.00
0.55~0.57	0.56	30	30	100.00	1.35~1.37	1.36	0	0	—
0.57~0.59	0.58	39	40	97.50	1.39~1.41	1.40	9	10	90.00
0.59~0.61	0.60	89	90	98.89	1.41~1.43	1.42	10	10	100.00
0.63~0.65	0.64	49	50	98.00	1.43~1.45	1.44	0	0	—
0.65~0.67	0.66	30	30	100.00	1.45~1.47	1.46	0	0	—
0.67~0.69	0.68	90	90	100.00	1.47~1.49	1.48	10	10	100.00
0.69~0.71	0.70	68	70	97.14	1.49~1.51	1.50	10	10	100.00
0.71~0.73	0.72	10	10	100.00	1.39~1.41	1.40	9	10	90.00
0.73~0.75	0.74	19	20	95.00	1.41~1.43	1.42	10	10	100.00
0.75~0.77	0.76	60	60	100.00	1.43~1.45	1.44	0	0	—
0.77~0.79	0.78	49	50	98.00	1.45~1.47	1.46	0	0	—
0.79~0.81	0.80	40	40	100.00	1.47~1.49	1.48	10	10	100.00
0.83~0.85	0.84	20	20	100.00	1.49~1.51	1.50	10	10	100.00
0.85~0.87	0.86	40	40	100.00					

注:对于区间0.07~0.09指的是大于等于0.07,小于0.09,其余区间均与此一致。

2.2 最大似然法与累积对数正态分布模型

本文采用最大似然法对平均值与标准差进行估计^[3,5-6,15]。设 $\theta=(\mu, \sigma)^T$, 其中 μ, σ 分别为平均值与标准差。假设 $\theta^{(n)}$ 为第 n 次迭代的 θ 值, 在 $\theta^{(n)}$ 处将 $\ln L(\mu, \sigma)$ 按二元函数的 Taylor 公式展开

$$R^{(n)} = \ln L(\theta^{(n)}) + (Q^{(n)})^T (\theta - \theta^{(n)}) + \frac{1}{2} (\theta - \theta^{(n)})^T H^{(n)} (\theta - \theta^{(n)}) \quad (1)$$

令 $\frac{\partial R^{(n)}}{\partial \theta} = Q^{(n)} + H^{(n)} (\theta - \theta^{(n)}) = 0$, 可解得

$$\theta^{(n+1)} = \theta^{(n)} - (H^{(n)})^{-1} Q^{(n)} \quad (2)$$

在迭代过程中, 可通过信息矩阵得到 θ 的协方差矩阵

$$V = -H^{-1} \quad (3)$$

如果考虑某一置信度下试验结果的 POD 曲线, 则有

$$a_p = \exp(\mu + z_p \sigma) \quad (4)$$

式中: a_p 表示 $POD(a_p) = p$ 的凹坑深度; z_p 表示标准正态分布的 p 分位点。

若令

$$X_p = \hat{\mu} + z_p \hat{\sigma} \quad (5)$$

则其均值、方差和标准差分别为

$$M(X_p) = \mu + z_p \sigma \quad (6)$$

$$D(X_p) = V_{11} + 2z_p V_{12} + z_p^2 V_{22} \quad (7)$$

$$SD(X_p) = \sqrt{D(X_p)} \quad (8)$$

式中: V_{11} 表示 $\hat{\mu}$ 的方差; V_{22} 表示 $\hat{\sigma}$ 的方差; V_{12} 表示 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 的协方差。因此

$$a_{p/q} = \exp[\hat{\mu} + z_p \hat{\sigma} + z_p SD(X_p)] \quad (9)$$

95% 置信度下的 POD 曲线的均值和标准差分别为

$$\mu_{95} = \ln(a_{50/95}) \quad (10)$$

$$\sigma_{95} = \frac{\ln(a_{99/95}) - \ln(a_{50/95})}{2.33} \quad (11)$$

将式(10,11)的结果代入累积对数正态函数模型 $POD(a) = \Phi\left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma}\right)$ 中, 可得 95% 置信度下的 POD 曲线。

不同条件下的POD统计参数(均值和方差)见表2。

表2 不同条件下的POD统计参数(均值、方差)

Table 2 POD statistical parameters (mean, variance) under different conditions

试验条件	μ	σ	μ_{95}	σ_{95}
专业白色 15°	-0.062	0.145	-0.029	0.145
专业蓝色 15°	-0.052	0.151	-0.015	0.150
专业绿色 15°	-0.060	0.129	-0.029	0.129
专业白色 45°	-0.079	0.210	-0.037	0.208
专业蓝色 45°	-0.041	0.104	-0.012	0.103
专业绿色 45°	-0.061	0.149	-0.026	0.148
专业白色 60°	-0.102	0.235	-0.055	0.234
专业蓝色 60°	-0.059	0.153	-0.023	0.152
专业绿色 60°	-0.062	0.145	-0.029	0.145
非专业白色 15°	-0.081	0.160	-0.046	0.159
非专业蓝色 15°	-0.058	0.122	-0.027	0.121
非专业绿色 15°	-0.092	0.166	-0.057	0.165
非专业白色 45°	-0.138	0.264	-0.090	0.262
非专业蓝色 45°	-0.085	0.158	-0.050	0.157
非专业绿色 45°	-0.073	0.167	-0.039	0.166
非专业白色 60°	-0.137	0.286	-0.086	0.285
非专业蓝色 60°	-0.065	0.175	-0.025	0.174
非专业绿色 60°	-0.081	0.160	-0.046	0.159

2.3 结果分析

对应表1中检出率的两种POD曲线见图5(a),图5(b)是专业人员对15°蓝色板进行详细目视检测的两种POD曲线。图5中的圆点表示检出率;实线表示基于累积对数正态分布模型的POD曲线;虚线表示95%置信度下的POD曲线。

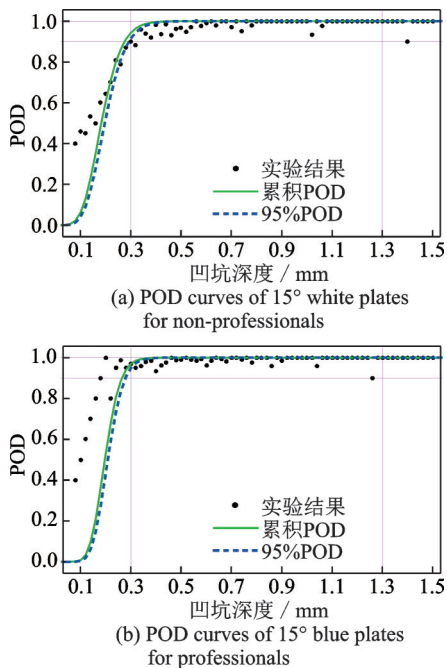


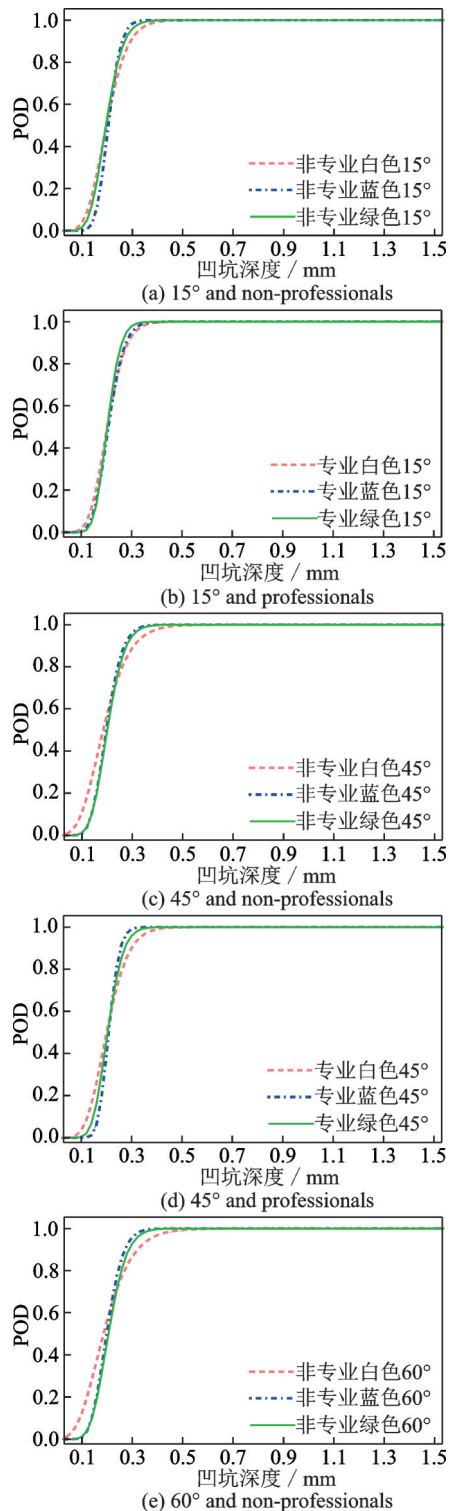
图5 两类人员的POD曲线

Fig.5 POD curves of two types of inspectors

由图5(b)可以看出,累积对数正态分布曲线与检出率符合较好。图5表明,对于非专业和专业人员,置放角为15°的白色和蓝色两种板,凹坑深度大于0.3 mm时,95%置信度下的检出概率大于90%。当凹坑深度大于等于1.3 mm时,95%置信度下的检出概率可达100%。

图6~8给出了多种影响因素条件下95%置信度的POD曲线对比分析。

图6表明,对于不同的置放角度和不同的颜色板,蓝色板的凹坑损伤更容易检出。



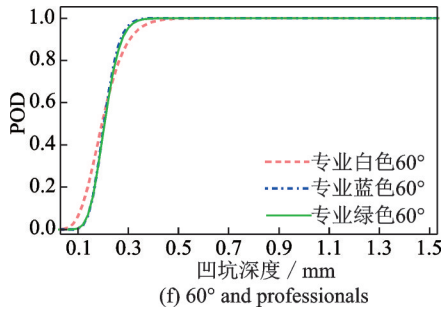
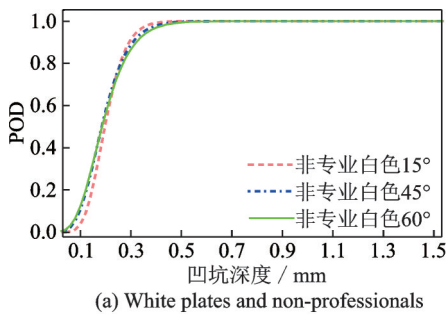
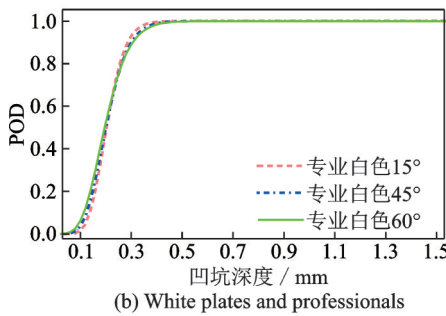


图 6 同一角度下 3 种颜色非专业与专业人员的 95%POD 曲线

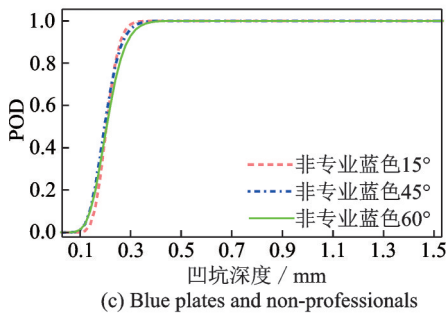
Fig.6 95% POD curves of non-professionals and professionals in three colors under the same angle



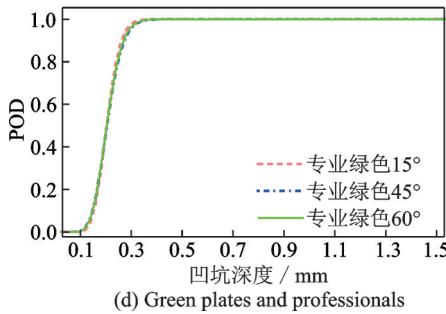
(a) White plates and non-professionals



(b) White plates and professionals



(c) Blue plates and non-professionals

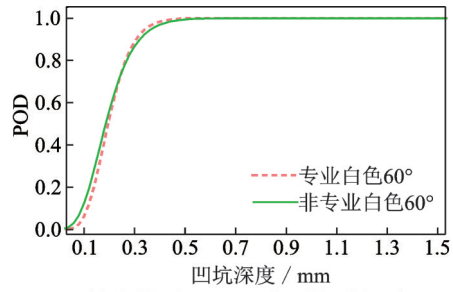


(d) Green plates and professionals

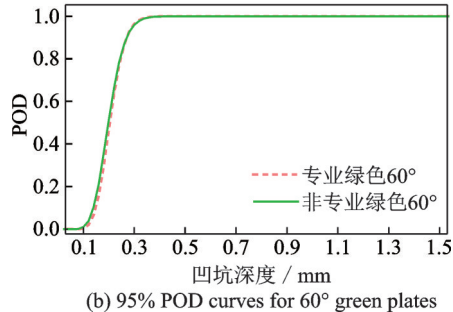
图 7 同一颜色下 3 个角度非专业与专业人员的 95%POD 曲线

Fig.7 95% POD curves of non-professionals and professionals from three angles under the same color

图 7(a,b)表明,不论是非专业人员还是专业人员,置放角为 15°的白板的凹坑更容易检出。事实上,这一结论与颜色无关,参见图 7(c,d)。



(a) 95% POD curves for 60° white plates



(b) 95% POD curves for 60° green plates

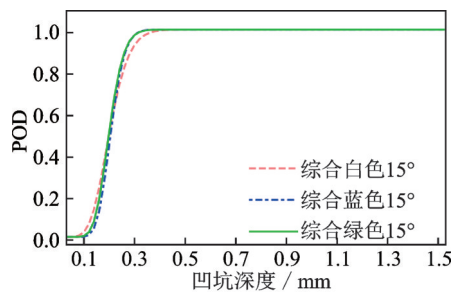
图 8 非专业与专业人员 95%POD 曲线

Fig.8 95% POD curves of non-professionals and professional personnels

图 8 表明,当置放角为 60°时,对于白色板和绿色板,专业人员的检出概率高。从图 5 中的 POD 曲线也可以看出,置放角为 15°时蓝色板的专业人员的检出概率高。因此,这一结论与板的置放角和颜色无关。

图 9 给出了非专业人员与专业人员综合的 95%POD 曲线。具体的处理方法是 以凹坑深度为随机变量,将非专业人员与专业人员对应具体凹坑深度的检出概率取平均值,然后按累积对数正态分布模型计算综合的 95%POD 曲线。

从图 9 不难看出,非专业与专业人员综合的 95%POD 曲线表明蓝色板中的凹坑更容易检出。



(a) Comprehensive 95% POD curves of 15° plates with three colors

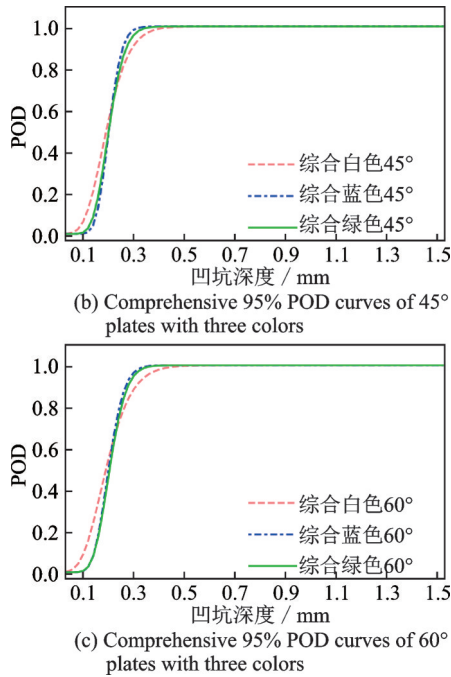


图9 非专业与专业人员综合的95%POD曲线

Fig.9 Comprehensive 95% POD curves of non-professionals and professionals

3 结 论

本文通过详细目视检测试验,考察了复合材料层合板的置放角度、颜色以及检测人员水平3种因素对凹坑损伤检出概率的影响。各种因素下的累积对数正态分布概率曲线与检出率符合较好。通过不同影响因素下POD曲线的对比分析得到如下结论:

(1) 对于非专业和专业人员,置放角 15° 的白色和蓝色板,凹坑深度大于0.3 mm时,95%置信度下的检出概率大于90%。当凹坑深度大于等于1.3 mm时,95%置信度下的检出概率可达100%。

(2) 不论专业或非专业人员,蓝色板中的凹坑更容易检出。

(3) 不论是专业还是非专业人员,对于白、蓝和绿这3种颜色的板,置放角为 15° 时,凹坑损伤更容易被检出。

(4) 对于不同颜色和置放角度,具有维修或目视检测相关经验的专业人员的检出概率高。

参考文献:

[1] Federal Aviation Administration. Composite aircraft structure: AC 20-107B[R]. Washington DC: [s.n.], 2009.

[2] PIASCIK R S, PROSSER W H. Space shuttle program (SSP) orbiter main propulsion system (MPS) gaseous hydrogen (GH₂) flow control valve (FCV) poppet eddy current (EC) inspection probability of detection (POD) study: NASA/TM—2011-217072 [R]. Washington DC: NASA, 2011.

[3] FUALDES C. Airbus damage tolerance methodology [R]. Chicago: Composite Damage Tolerance and Maintenance Workshop, 2006.

[4] HODGE A J, WALKER II J L. Probability of detection study on impact damage to honeycomb composite structure using thermographic inspection[C]//Proceedings of SAPME Fall Technical Conference and Exhibition. Memphis, Tennessee, USA: [s. n.], 2008: 41-46.

[5] 肖闪闪. 飞机复合材料结构概率冲击损伤容限评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

XIAO Shanshan. Probabilistic assessment methodology of impact damage tolerance for composite aircraft structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[6] 肖闪闪, 陈普会, 沈薇, 等. 复合材料结构冲击损伤检出概率的试验研究与分析[J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 231-237.

XIAO Shanshan, CHEN Puhui, SHEN Wei, et al. Experimental study and analysis on probability of detection for impact damage of composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 231-237.

[7] LIU Junyan, LIU Yang, WANG Fei, et al. Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials[J]. Infrared Physics and Technology, 2015, 71: 448-456.

[8] WAITE S. Damage/defect types and inspection—Some regulatory concerns[C]//Proceedings of Wichita State University Composite Damage Tolerance & Maintenance Workshop. Chicago: FAA, 2006: 19-21.

[9] 蒋韵尔, 黄淑萍, 傅山. 环境因素影响复合材料目视检测的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(11): 157-162.

JIANG Yun'er, HUANG Shuping, FU Shan. Experimental study on environmental factors in visual inspection of composites[J]. China Safety Science Journal,

- 2013, 23(11): 157-162.
- [10] 蒋韵尔. 民航维修目视检测人为因素研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- JIANG Yun'er. Research on human factors in visual inspection of aviation maintenance[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [11] Illuminating Engineering Society. IES lighting handbook: Reference volume[M]. New York: Illuminating Engineering Society, 1993: 875-886.
- [12] 闫丽, 安学锋, 蔡建丽, 等. 复合材料层压板低速冲击和准静态压痕损伤等效性的研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(3): 71-75.
- YAN Li, AN Xuefeng, CAI Jianli, et al. Study on damage equivalence of composite laminates subjected to low-velocity impact and quasi-static indentation[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(3): 71-75.
- [13] 黄光启, 杨胜春, 鲍盘盘. 复合材料低速冲击与准静态压痕等效方法研究[C]//第17届全国复合材料学术会议(复合材料检测与测试技术分论坛). 北京: 中国航空学会, 2012.
- HUANG Guangqi, YANG Shengchun, BAO Panpan. Equivalent method of composite material subjected to low speed impact and quasi-static indentation force [C]//Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials (Composite Testing and Testing Technology Sub-forum). Beijing: China Aviation Society, 2012.
- [14] YAN L, AN X F, YI X S. Comparison with low-velocity impact and quasi-static indentation testing of foam core sandwich composites[J]. International Journal of Applied Physics and Mathematics, 2012, 2(1): 58-62.
- [15] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 152-156.

(编辑: 胥橙庭)