

复合材料外物损伤规律及损伤后拉伸疲劳研究

刘丰瑞^a,陈伟^a,陆楷楠^a,赵振华^b,刘璐璐^a,罗刚^b

(南京航空航天大学 a. 航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室,

b. 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:为研究复合材料受外力冲击的规律和冲击后疲劳的特性,分别使用 200 m/s、300 m/s 的冲击速度、直径 4 mm、3 mm 的钢珠以 90°和 30°入射角度冲击复合材料层合板,模拟外物损伤的过程,共设计了 24 组冲击试验和 9 组疲劳试验。根据结果比对冲击速度、冲击物大小、冲击角度对冲击损伤的影响,分别对复合材料层合板损伤的长度、宽度和深度进行研究。对冲击后的层合板进行拉伸疲劳试验,根据所得到的疲劳极限,建立冲击损伤长度、宽度、深度和疲劳强度的关系。结果表明:相对于冲击角度,冲击物大小变化对层合板损伤影响更大,冲击速度的影响最小;疲劳强度与损伤长度和宽度的相关性较为明显,而与损伤深度的相关性较小。

关键词:复合材料;外物损伤;冲击速度;冲击角度;外物尺寸;拉伸疲劳

中图分类号:TB302.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0042-06

Study on Foreign Object Damage Rule and Tensile Fatigue of Composite Materials

LIU Fengrui^a, CHEN Wei^a, LU Kainan^a, ZHAO Zhenhua^b, LIU Lulu^a, LUO Gang^b

(a. Aero-engine Thermal Environment and Structure Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology,

b. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study the impact law and impacted fatigue characteristics of composite materials, 4 mm and 3 mm diameter steel balls were used to impact the composite laminates at the speeds of 200 m/s and 300 m/s and at the angles of 30 and 90 to simulate the process of foreign object damage, 24 groups of impact tests and 9 groups of fatigue tests were designed and conducted. According to the test results, the effects on the impact damage by impact velocity, foreign object size and impact angle were compared, and the damage length, width and depth of composite laminates were studied respectively. The tensile fatigue tests of the damaged laminates were carried out. According to the obtained fatigue limit, the relationship between the length, width, depth of impact damage and fatigue strength was established. The results show the impact material size change has a greater effect on the damage of composite laminates than the impact angle with the the least effect on impact velocity, while the fatigue strength has obvious correlation with the length and width of damage, but poor correlation with the depth of damage.

Keywords: composite material; foreign object damage; impact velocity; impact angle; foreign object size; tensile fatigue

0 引言

航空发动机静子叶片作为压气机的核心部件,主要作用是对气流进行梳整和扩压,提高发动机的工作效率,其工作状态直接影响发动机的总体性能及稳定性。由于气动载荷的作用,静子叶片长时间受到气流冲刷及承受被打伤的风险,使得其故障率高,主要损伤模式为振动破坏、疲劳破坏和打伤^[1-2]。纤维增强树脂基复合材料具有高比强、高比模、可设计、阻尼大、耐疲劳等优良的综合性能,可较好地解决金属静子叶片所面临的疲劳损伤和振动损伤问题,是航空发动机理想的轻量化材料^[3]。

在 90 年代,GE 公司将其研制的碳纤维复合材料叶片“大力神”应用到了 GE90 上,在 11 年的飞行历程中,仅更换过 3 片叶片。在后来的优化中更是将原来的 22 片叶片

减少为 18 片,极大地减轻了发动机的质量^[4]。而现代飞机在其飞行时,动力装置会吸入各种外来物,这些外物会对飞机的叶片造成一定的损伤^[5]。这些损伤部位会受到不断吸入的气流冲击,造成整个叶片的提前疲劳失效^[6]。将复合材料用于发动机的叶片上,对复合材料受损伤后的疲劳研究就显得格外必要。国内外的学者,对复合材料受损伤和损伤对疲劳强度的影响已经有了一定的研究。NICHOLAS T 等^[7]研究了较小的硬物对钛合金平板的冲击损伤,提出了定量冲击损伤的概念;对不同带有模拟叶片边缘几何形状的平板试样进行弹道冲击,造成可调控的冲击损伤。AWALE D D 等^[8]在试件不同的位置制造了与试验件成 45°、宽度为 1 mm 的裂纹,对不同位置的裂纹与整个试验件的疲劳性能关系进行了研究,得出了在试验件中间的一道裂纹比在试验件两侧两道裂纹的影响更大的结论。KOO JAE-MEAM 等^[9]通过改变冲击能量和冲

击器直径,研究 CFRP 复合材料受冲击后对残余强度和疲劳强度的影响,并提出了疲劳寿命预测模型。顾善群等^[10]采用树脂传递模塑工艺制备碳纤维/环氧树脂复合材料,通过空气炮冲击试验研究树脂韧性和碳纤维复合材料的抗高速冲击性能。

本文对实际冲击条件进行模拟,进行不同冲击速度、冲击角度、外物尺寸的冲击试验,探究其对复合材料的损伤规律^[11],并在冲击试验后进行拉伸疲劳试验,探究冲击对拉伸疲劳的影响情况。

1 外物损伤试验

1.1 试验件介绍

本次试验冲击靶体用的是 CCF300/QY9511 复合材料层合板,其基本尺寸如表 1 所示。

表 1 复合材料层合板试验件参数

长度/ mm	宽度/ mm	厚度/ mm	铺层 次序	加持段 长/mm	加持段 厚度/mm	角度/ (°)
250	25	3	[45°/0°/ -45°/90°] _{ss}	50	1.5	15

1.2 使用方法

本次实验采用的是一级空气炮系统^[12],发射直径分别为 3 mm、4 mm 的钢珠模拟外物,分别以 200 m/s、300 m/s 的速度冲击试验件,钢珠的材料属性如表 2 所示。完成外物损伤试验后,使用三维体视显微镜对缺口进行损伤参数观测,定义损伤宽度与损伤长度,再用超景深显微镜测量损伤的深度^[13]。

表 2 钢珠材料参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/Pa	泊松比
GCr15 轴承钢	7 810	2.12×10 ¹¹	0.29

1.3 试验结果

本次试验共对 24 件复合材料平板试验件进行模拟外物损伤试验。为了定量地描述损伤的严重程度,定义与试验件最长边平行的距离为损伤长度,与试验件最长边垂直的距离为损伤宽度,试验造成损伤的最深部位与平板面的距离定义为损伤深度。损伤长度、损伤宽度与损伤深度参数的测量如图 1 所示。外物损伤情况如表 3 所示。

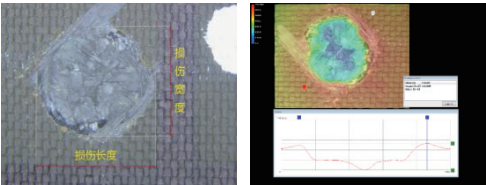


图 1 损伤长度、宽度和深度的定义

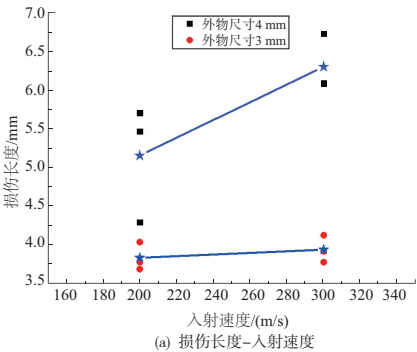
表 3 外物损伤情况统计

序号	钢珠 直径/ mm	冲击 速度/ (m/s)	冲击 角度/ (°)	损伤 长度/ mm	损伤 宽度/ mm	损伤 深度/ mm	损伤 类型
1	4	200	90	4.17	3.69	0.76	未穿透
2	4	200	90	5.12	3.08	0.97	未穿透
3	4	200	90	5.04	2.91	0.98	未穿透
4	4	200	30	5.46	3.83	0.71	未穿透
5	4	200	30	4.29	3.58	0.51	未穿透
6	4	200	30	5.70	3.87	0.56	未穿透
7	3	200	90	3.40	2.76	0.56	未穿透
8	3	200	90	3.22	2.96	0.53	未穿透
9	3	200	90	3.65	2.83	0.53	未穿透
10	3	200	30	3.78	2.94	0.41	未穿透
11	3	200	30	3.69	2.80	0.50	未穿透
12	3	200	30	4.04	3.28	0.40	未穿透
13	4	300	90	3.98	3.84	3.00	穿透
14	4	300	90	3.91	3.95	3.00	穿透
15	4	300	90	4.14	3.86	3.00	穿透
16	4	300	30	6.07	4.32	3.00	穿透
17	4	300	30	6.08	3.90	3.00	穿透
18	4	300	30	6.72	4.06	3.00	穿透
19	3	300	90	3.61	3.03	0.82	未穿透
20	3	300	90	3.76	3.00	0.83	未穿透
21	3	300	90	3.72	3.22	0.88	未穿透
22	3	300	30	4.12	3.10	0.99	未穿透
23	3	300	30	3.92	3.61	0.64	未穿透
24	3	300	30	3.78	3.79	0.70	未穿透

1.4 试验结果分析

1) 入射速度对外物损伤宏观尺寸的影响

在入射角为 30°的条件下,缺口损伤长度、宽度和深度与入射速度的关系如图 2 所示,其中直线连接的星形点代表横轴对应速度下的损伤尺寸结果均值。



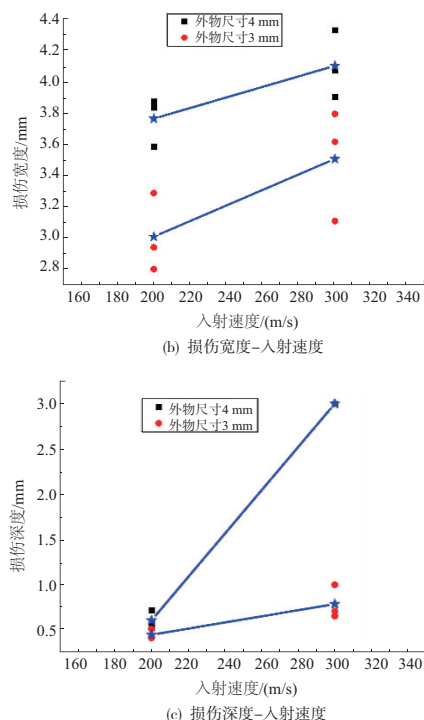


图2 30°冲击损伤宏观尺寸与入射速度的关系

从图2可以看出,当入射角度在30°时,直径4 mm的外物受冲击速度的影响比直径3 mm的外物更加明显。分析图2(a)、图2(b),直径4 mm外物尺寸造成长度损伤均值较大是由于不同尺寸外物增加同样的速度时,大尺寸外物会获得更加多的能量,因此在造成冲击时会在试验件表面产生更大的滑移,因此相较于损伤宽度,损伤长度会有明显的变化。观察图2(c)可以看出,入射速度300 m/s、直径4 mm钢珠发生了穿透损伤,而同样条件下3 mm钢珠损伤只有1 mm。这是由于在实际试验中,4 mm钢珠发生了完全非弹性碰撞,嵌入了试验件中,如图3所示,而3 mm钢珠发生了非完全弹性碰撞,如图4所示。



图3 完全非弹性碰撞

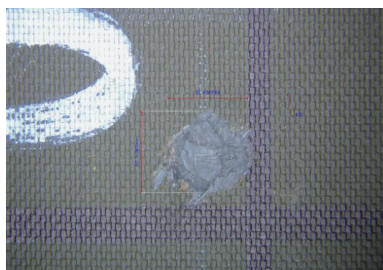


图4 非完全弹性碰撞

在入射角为90°的条件下,缺口损伤长度、宽度和深度与入射速度的关系如图5所示。

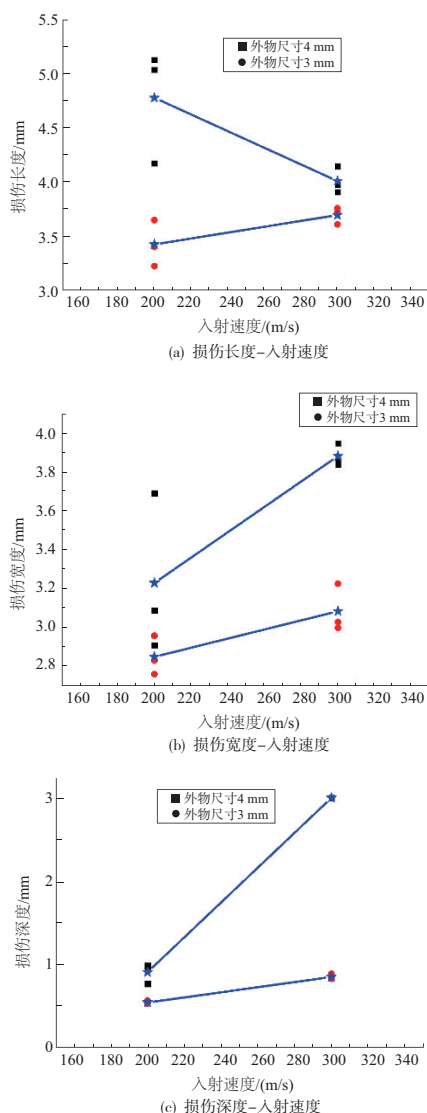


图5 90°冲击损伤宏观尺寸与入射速度的关系

在图5(a)中随着冲击速度的增加,损伤长度减少,这可能是钢珠在与弹托分离时和飞行过程中受到气流等不确定因素的扰动可导致撞击位置发生微小偏离,这可以从图5(b)、图5(c)看出,随着速度的增大,损伤深度和损伤宽度增大的趋势。与直径3 mm的钢珠造成的外物损伤相比,4 mm直径的钢珠造成的外物损伤显示出更大的分散性,并且在90°冲击角度的情况和30°冲击相比,随着冲击速度的增大,损伤尺寸增加的趋势更加明显。

2) 入射角度对外物损伤宏观尺寸的影响

在入射速度为200 m/s的条件下,使用直径3 mm、4 mm钢珠,分别以30°、90°两种入射角度对模拟叶片进行外物损伤试验。统计损伤缺口和入射角度的关系如图6所示。其中直线连接的星形点代表横轴对应入射角度下的损伤尺寸均值。

如图6所示,与30°冲击角度相比,90°冲击角度所造成的损伤区域较小,损伤深度较大。这是由于在同等条件下,斜撞击时层合板与钢珠的接触时间较正撞击时更

长,因此表面吸收了更多的能量,所以其损伤情况更为严重,对深度的影响就会较小。

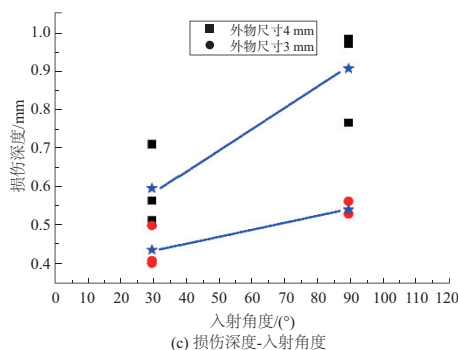
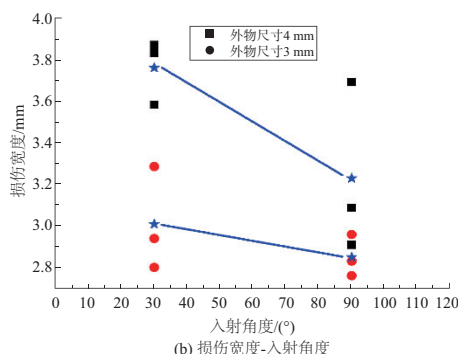
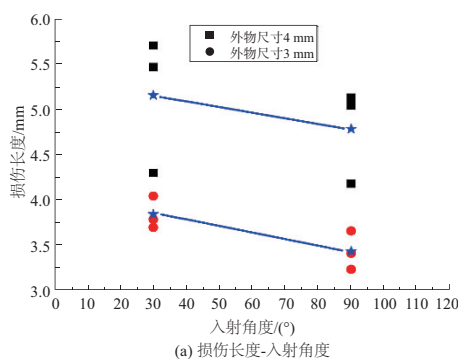


图6 200 m/s 冲击损伤宏观尺寸与入射角度的关系

在入射速度为 300 m/s 的条件下,使用 3 mm、4 mm 钢珠,分别以 30°、90°两种入射角度对模拟叶片进行外物损伤试验。统计损伤缺口的宽度和深度与入射角度的关系如图 7 所示。其中直线连接的星形点代表横轴对应入射角度下的损伤尺寸均值。

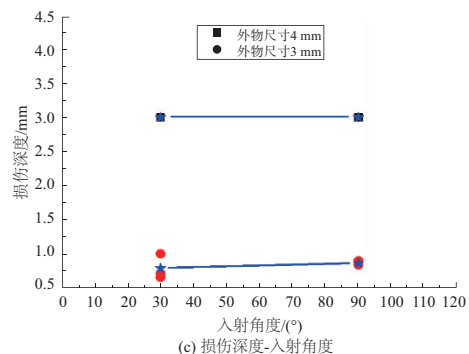
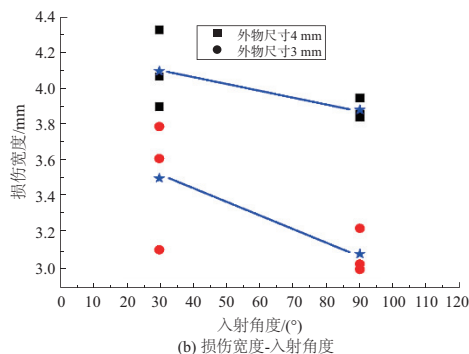
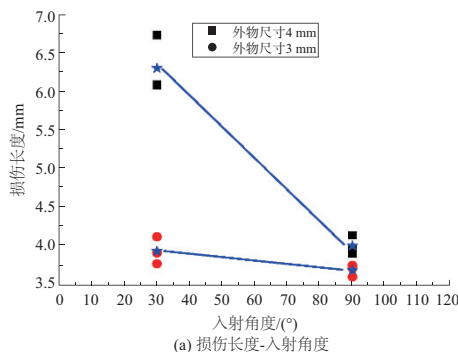


图7 300 m/s 冲击损伤宏观尺寸与入射角度的关系

如图 7(a)、图 7(b)所示,与 30°冲击角度相比,90°冲击角度所造成的损伤区域较小,与 200 m/s 冲击相比整体的损伤区域更大,但在损伤长度和深度呈现大体相同的趋势。在图 7(c)中可以看出当入射角度增大时,损伤深度并没有随之而增大,反而成稳定趋势,这是因为 30°、3 mm 外物、300 m/s 冲击速度造成的损伤深度远大于同样条件 200 m/s 冲击速度造成的深度损伤。这可能是因为冲击对损伤深度的影响是非线性的。当外物尺寸在 3 mm 时,外物远未能穿透层合板,但外物尺寸 4 mm 时,不论角度的变化,外物均穿透层合板。因此外物尺寸对冲击损伤深度的影响最大。

2 拉伸疲劳试验

2.1 试验设备和方法

对试验件损伤后的高周疲劳试验是在 QBG-100 微机控制高频疲劳试验机上进行。考虑到通过空气炮获得的各试件伤都是唯一的,因此通过步进法对试件逐级加载,获取试件的疲劳强度^[6]。根据所选的实验件和实验工况,选择疲劳应力比为 0.1,单级循环次数为 10^6 ,初始拉伸强度为 66 MPa。

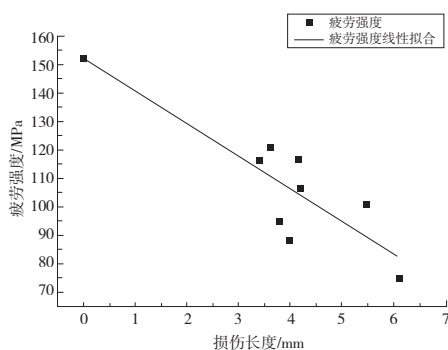
2.2 试验结果

本次试验选取每组冲击试验的第一件试验件进行拉伸疲劳试验,再对一个无损伤的试验件进行拉伸疲劳试验作为对照^[14]。疲劳试验从 $\sigma_1 = 67$ MPa 为初始值,每级按照 1.15 倍的比例增加,疲劳结果如表 4 所示^[15]。

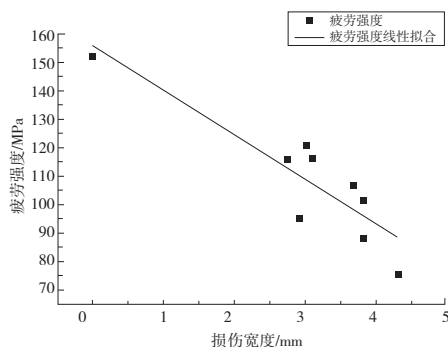
表4 试验件疲劳强度

序号	外物直径/mm	冲击速度/(m/s)	冲击角度/(°)	损伤长度/mm	损伤宽度/mm	损伤深度/mm	疲劳强度/MPa
1	4	200	90	4.17	3.69	0.76	106
4	4	200	30	5.46	3.83	0.71	101
7	3	200	90	3.40	2.76	0.56	116
10	3	200	30	3.78	2.94	0.41	94
13	4	300	90	3.98	3.84	3.00	88
16	4	300	30	6.07	4.32	3.00	75
19	3	300	90	3.61	3.03	0.82	121
22	3	300	30	4.12	3.10	0.99	116
25	—	—	—	—	—	—	152

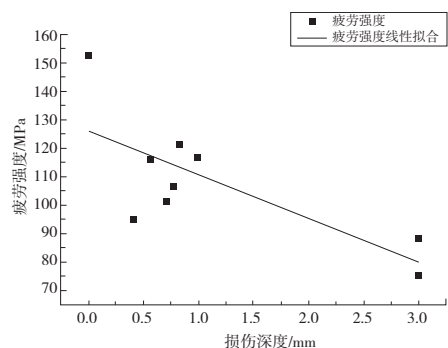
统计表4中试验结果,冲击后高周疲劳强度与外物损伤宏观尺寸的关系如图8所示。



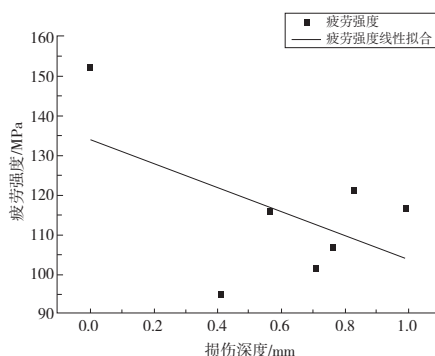
(a) 疲劳强度-损伤长度



(b) 疲劳强度-损伤宽度



(c) 疲劳强度-损伤深度



(d) 疲劳强度-损伤深度(未穿透)

图8 FOD模拟叶片疲劳强度与损伤宏观尺寸关系

外物损伤后试验件的高周疲劳强度随损伤长度和宽度的变化规律较为明显,但随深度的变化规律并不明显。从总体上看随着损伤长度、宽度和深度的增加,疲劳强度呈现一定的下降趋势。

将试验件的损伤情况和疲劳强度综合对比可以看出,因为部分冲击过程发生了完全非弹性碰撞,所以在图8(c)中可以看出,实际各个试验件疲劳结果与整体线性拟合情况相差较大。图8(d)是去掉冲击穿透了的试验件,损伤深度与疲劳强度的关系,可以看出相比图8(c),与线性拟合程度相差更大。因此可以看出单独考虑损伤深度和疲劳强度的关系是不合理的,还需要综合冲击条件和试验件的材料属性。

3 结语

1)当冲击速度、外物尺寸增大到一定程度时,外物冲击会发生完全非弹性碰撞,使损伤深度显著增加,外物穿透试验件。

2)冲击过程中,当保持冲击速度不变,改变冲击角度或保持冲击角度不变,改变冲击速度,4 mm 外物冲击的试验结果会有更大的变化。并且与3 mm 外物相比,相同的冲击条件下,4 mm 外物冲击的结果会显现出更大的分散性。

3)分析冲击后的疲劳试验,损伤长度和损伤宽度与疲劳强度呈一定的规律性,而不论是否考虑穿透冲击的结果,损伤深度与疲劳强度的相关性都较差。

参考文献:

- [1] 王焱林,刘天生,刘东,等. 航空发动机复合材料静子叶片研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2018(12):96-101.
- [2] 徐明. 层合复合材料风扇机匣与叶片连接结构强度分析方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [3] WANG JIYE,JIANG DAPENG,YU LI.Design and experimental study of composite vanes [J]. Fan / Compressor Technology, 2020(2): 68-70.
- [4] PANIN S V,BURKOV M V,LYUBUTIN P S, et al. Fatigue damage evaluation of carbon fiber composite using aluminum foil based strain sensors[J]. Engineering Fracture Mechanics,2014, 129:45-53.
- [5] BULL D J,SPEARING S M,SINCLAIR I. Investigation of the response to low velocity impact and quasi-static indentation loading of particle-toughened carbon-fibre composite

- materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 74: 38-46.
- [6] TEHRANI M, BOROUJENI A Y, HARTMAN T B, et al. Mechanical characterization and impact damage assessment of a woven carbon fiber reinforced carbon nanotube-epoxy composite[J]. Composites Science and Technology, 2013, 75: 42-48.
- [7] NICHOLAS T, BARBER J P, BERTKE R S. Impact damage on titanium leading edges from small hard objects[J]. Experimental Mechanics, 1980, 20(10): 357-364.
- [8] AWALE D D, THAWRE M M. Effect of induced external damage on fatigue life of carbon fiber reinforced (CFC) composite[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 2127-2131.
- [9] KOO J M, CHOI J H, SEOK C S. Evaluation for residual strength and fatigue characteristics after impact in CFRP composites[J]. Composite Structures, 2013, 105: 58-65.
- [10] 顾善群, 刘燕峰, 李军, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料高速冲击性能[J]. 材料工程, 2019, 47(8): 110-117.
- [11] 关玉璞, 陈伟, 高德平. 航空发动机叶片外物损伤研究现状[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 851-857.
- [12] ZHAO ZHENHUA, ZHANG JUNHE, WANG LINGFENG, et al. Numerical analysis on residual stress of foreign object damage on the leading edge of titanium alloy blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2284-2292.
- [13] ZHAO Z H, XU X S, CHEN W, et al. The influences of foreign object damage on the high cycle fatigue behavior of titanium alloy TC4 [C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Salt Lake City, UT. Reston, Virginia: AIAA, 2016: 4850.
- [14] XIAO J G Y, YONG C, JIE T, et al. Numerical investigation of rub-induced composite fan blade vibrations and abradable coating removals[J]. Composite Structures, 2019, 226: 111274.
- [15] NASH N H, YOUNG T M, MCGRAIL P T, et al. Inclusion of a thermoplastic phase to improve impact and post-impact performances of carbon fibre reinforced thermosetting composites-a review[J]. Materials & Design, 2015, 85: 582-597.

收稿日期: 2021-09-28

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] 马浩, 景军锋, 苏泽斌, 等. 基于 LBP 和 HOG 特征的图案织物缺陷检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 95-102.
- [2] 令晓明, 郭锐辛, 刘光廷, 等. 基于 PCA 降维的多特征级联的行人检测研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(3): 32-34, 76.
- [3] SEO Y, SHIN K S. Image classification of fine-grained fashion image based on style using pre-trained convolutional neural network[C]//2018 IEEE 3rd International Conference on Big Data Analysis. Shanghai, China: IEEE, 2018: 387-390.
- [4] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, OH, USA: IEEE, 2014: 580-587.
- [5] ENGUEHARD J, O'HALLORAN P, GHOLIPOUR A. Semi supervised learning with deep embedded clustering for image classification and segmentation[J]. IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions, 2019, 7: 11093-11104.
- [6] PAPANDREOU G, ZHU T, KANAZAWA N, et al. Towards accurate multi-person pose estimation in the wild[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 3711-3719.
- [7] 伍锡如, 黄国明, 孙立宁. 基于深度学习的工业分拣机器人快速视觉识别与定位算法[J]. 机器人, 2016, 38(6): 711-719.
- [8] 郑健红, 鲍官军, 张立彬, 等. 结合深度学习与支持向量机的金属零件识别[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(12): 2233-2242.
- [9] 王一鸣, 杜慧敏, 张霞, 等. 视觉注意力网络在工作表面缺陷检测中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(9): 1528-1534.
- [10] 常海涛, 荀军年, 李晓梅. Faster R-CNN 在工业 CT 图像缺陷检测中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(7): 1061-1071.
- [11] WANG H, WANG Y T, ZHOU Z, et al. CosFace: large margin cosine loss for deep face recognition[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2018: 5265-5274.
- [12] CAI J, MENG Z B, KHAN A S, et al. Island loss for learning discriminative features in facial expression recognition[C]//2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition. Xi'an, China: IEEE, 2018: 302-309.
- [13] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M L, et al. MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2018: 4510-4520.
- [14] HOWARD A, SANDLER M, CHEN B, et al. Searching for MobileNetV3[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Seoul, Korea (South): IEEE, 2019: 1314-1324.

收稿日期: 2021-09-14