

非概率可靠性的拉伸载荷下飞机含孔复合材料 安全性分析

陈秋宇¹, 王强¹, 史越¹, 李群², 陈玉洁²

(1. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051;

2. 西安交通大学航天航空学院, 西安, 710049)

摘要 针对拉伸载荷作用下飞机含孔复合材料易发生损伤失效的问题, 为研究穿透型圆孔对复合材料安全性的影响, 根据某型飞机实际使用的碳纤维复合材料, 设计了无孔和含孔试样进行拉伸试验, 获得宏观拉伸性能参数, 对比分析穿透型圆孔对拉伸性能的影响; 基于非概率可靠性分析方法, 采用最小无穷范数指标, 分别对训练强度提高前后的拉伸强度可靠性进行计算与分析, 并总结了复合材料安全性分析方法。结果表明: 穿透型圆孔会导致该复合材料拉伸强度的大幅下降, 而对拉伸刚度影响不大, 且拉伸强度下降率与孔径成正比; 穿透型圆孔会引起该复合材料拉伸强度可靠性的大幅下降, 下降程度随孔径的增大而增大; 训练强度提高后, 可靠性进一步下降, 三种孔径的复合材料拉伸强度可靠性均降至1以下, 严重影响复合材料安全性。

关键词 复合材料; 穿透型圆孔; 安全性; 拉伸性能; 非概率可靠性

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.04.005

中图分类号 V258; X949 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)04-0029-06

Study on the Safety of Aircraft Composite Materials Containing Holes under Tensile Loading Based on Non-Probabilistic Reliability

CHEN Qiuyu¹, WANG Qiang¹, SHI Yue¹, LI Qun², CHEN Yujie²

(1. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. School of Aerospace Xi'an Jiantong University, Xi'an 710049, China)

Abstract To address the problem that aircraft composite materials containing holes are prone to damage failure under tensile loading, in order to study the effect of penetrating circular holes on the safety of composite materials, tensile tests were designed for specimens without and with holes according to the actual carbon fiber composites used in a certain type of aircraft. The macroscopic tensile performance parameters were obtained, and the effects of penetrating round holes on the tensile performance were compared and analyzed. Based on the non-probabilistic reliability analysis method, the reliability of tensile strength before and after the increase of training intensity was calculated and analyzed respectively by using the minimum infinite parametric index. And the safety analysis method of composite materials was summarized. The results show that the penetrating circular hole causes a significant decrease in the tensile strength of

收稿日期: 2022-03-16

作者简介: 陈秋宇(1998—), 男, 山东费县人, 硕士生, 研究方向为管理科学与工程。E-mail: cqy_1016@126.com

引用格式: 陈秋宇, 王强, 史越, 等. 非概率可靠性的拉伸载荷下飞机含孔复合材料安全性分析[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(4): 29-34.
CHEN Qiuyu, WANG Qiang, SHI Yue, et al. Study on the Safety of Aircraft Composite Materials Containing Holes under Tensile Loading Based on Non-Probabilistic Reliability[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(4): 29-34.

this composite, while it has little effect on the tensile stiffness. The rate of decrease in tensile strength is proportional to the hole diameter. The penetrating round holes causes a significant decrease in the tensile strength reliability of the composite, and the degree of decrease increases with the increase of the hole diameter. The reliability decreases further when the training strength is increased. The tensile strength reliability of the composites with all three pore diameters decreases to below 1, which seriously affects the safety of the composites.

Key words composite materials; penetrating round hole; safety; tensile properties; non-probabilistic reliability

复合材料相对金属材料有着质量轻、比强度和比刚度高以及抗疲劳性能好等多种优点,在航空航天领域被广泛运用^[1],随着材料科学与制造工艺的进步,其用量不断提升,使用部位也从非承力结构逐步向次承力结构乃至主承力结构发展^[2]。而关于复合材料与其他材料的连接方式,虽然有许多新方法被提出,但是机械连接仍是目前主要连接方式之一^[3],这导致飞机复合材料难以避免地存在穿透型圆孔,同时当较薄的复合材料层板被外物冲击击穿时,其形成的损伤也可以简化为穿透型圆孔,对材料性能产生很大影响。且由于应力集中现象的存在,含孔复合材料在拉伸载荷作用下更容易出现损伤失效,因此拉伸载荷下飞机含孔复合材料的安全性分析十分必要。

对此中外许多学者就其损伤机理及缺陷扩展^[4-5]开展了大量的研究工作。但是对于飞机复合材料的实际使用而言,更加关注的是含孔复合材料是否安全的问题。相较于对复合材料微观性质的研究,根据宏观性能开展的可靠性分析能够更加有效反映复合材料的安全性。对于飞机尤其是军机复合材料可靠性研究而言,飞行训练强度的提高导致其应力区间发生变化且难以确定其分布形式,广泛应用的基于概率统计的可靠性分析方法受到数据量以及准确性影响较大^[6],不能较好地应用于飞机含孔复合材料的可靠性分析,需要更加适用的可靠性分析方法。由 Ben-Haim 最先提出的非概率可靠性方法可以基于较少的试验数据对可靠性进行合理的分析^[7],成功地用于不确定结构的数值分析和优化设计^[8];郭书祥基于区间模型提出了一种非概率可靠性的最小无穷范数指标^[9],在机械工程^[10]等领域被广泛运用,是目前使用最多的非概率可靠性指标;王晓军等学者基于非概率应力-强度干涉模型,提出了一种体积比非概率可靠性模型,分析了与概率可靠性的相容性^[11],并较好运用到工程问题中^[12];罗阳军等人基于多椭球模型,提出一种基于“广义无穷范数”的最短距离指标,该方法相较区间模型能够考虑

到变量间的相关性^[13];Sun 等人针对变量边界可能存在模糊性的问题,基于模糊凸集模型提出了一种新的非概率可靠性模型,提高了非概率可靠性的适用性^[14]。非概率可靠性分析方法能够很好的克服飞机复合材料结构可靠性分析中试验成本高、数据少的现实问题,因此本文基于该方法对含孔复合材料的安全性开展分析研究。

1 拉伸性能试验及结果

1.1 试验试样设计及试验方法

试验试样的材料选取某型飞机实际使用的碳纤维层合板材料,使用 24 层 T300/5405 预浸料,单层预浸料厚度为 0.125 mm,铺层堆叠顺序为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{3s}$,采用热压罐成型工艺制作。按照《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》规定^[15],设计无孔试样如图 1 所示,图中阴影部位是按照标准要求制作铝制加强片。

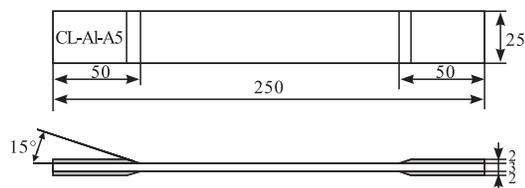


图 1 无孔试样设计

为分析穿透型圆孔的不同孔径对复合材料安全性的影响情况,试验试样设置 3 种不同孔径,分别为 5 mm、7 mm 和 9 mm,以 7 mm 孔径为例,设计试验试样如图 2 所示。

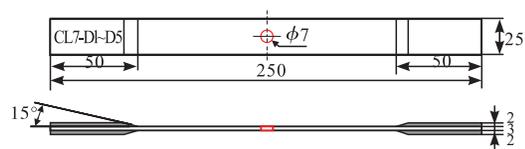


图 2 含孔试样设计

按照孔径设置的不同将试样分为 4 组,其中每组试样各 5 块,各组试样的具体分组、编号和孔径设置如表 1 所示。

表 1 分组、编号及孔径设置

组别	编号	样件类型	孔径/mm
第 1 组	CL-A1~A5	无孔	
第 2 组	CL5-D1~D5	穿透型圆孔	5
第 3 组	CL7-D1~D5	穿透型圆孔	7
第 4 组	CL9-D1~D5	穿透型圆孔	9

试验在实验室标准环境下,采用 MTS880/25T 液压伺服试验机以 1 mm/min 的位移加载速率对试样连续加载,采用全套数字图像相关技术(digital image correlation,DIC)设备捕捉采集位移信息获取应变场。

1.2 试验结果记录

按照标准要求开展拉伸试验,记录试样破坏状态,并根据所测得的力学性能参数绘制应力应变曲线。

无孔组试样 CL-A1 拉伸破坏后状态如图 3 所示。绘制无孔组应力应变曲线后,分析发现各试样的曲线形式基本相同,因此以 CL-A1 试样的应力应变曲线为例,如图 4 所示。



图 3 CL-A1 破坏后的状态

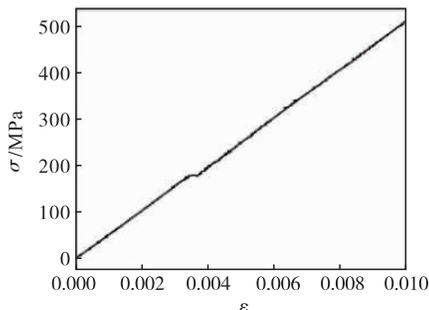


图 4 CL-A1 试样应力应变曲线

将试验记录中反应复合材料拉伸强度与刚度的力学性能数据,即各试样的拉伸强度与拉伸弹性模量整理如表 2 所示。

表 2 无孔组(第 1 组)试验结果

试样编号	σ_t /MPa	E_t /GPa
CL-A1	512.64	51.4
CL-A2	540.35	52.5
CL-A3	550.20	46.8
CL-A4	530.45	52.0
CL-A5	557.16	51.5

根据第 1 组试验所得数据,该复合材料无穿透型圆孔时,其拉伸强度与拉伸弹性模量的平均值分别为 538.16 MPa 和 50.9 GPa。

含孔组试样 CL5-D1 在试验机上被拉伸破坏时状态如图 5 所示。各含孔组试样曲线形式基本相同,因此以 CL5-D1 试样的应力应变曲线为例,如图 6 所示,并将各含孔组试样的拉伸强度与弹性模量整理如表 3 所示。



图 5 CL5-D1 破坏后的状态

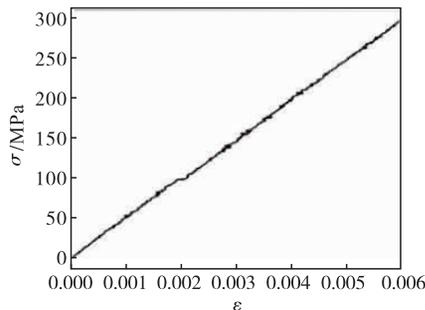


图 6 CL5-D1 试样应力应变曲线

表 3 含孔组试样试验结果

组别	试样编号	σ_t /MPa	E_t /GPa	组别	试样编号	σ_t /MPa	E_t /GPa	组别	试样编号	σ_t /MPa	E_t /GPa
第 2 组	CL5-D1	297.16	50.1	第 3 组	CL7-D1	271.14	48.5	第 4 组	CL9-D1	239.44	47.9
	CL5-D2	300.33	51.5		CL7-D2	271.34	50.9		CL9-D2	243.70	48.4
	CL5-D3	301.47	51.3		CL7-D3	271.50	50.8		CL9-D3	243.54	49.3
	CL5-D4	300.56	50.9		CL7-D4	271.39	50.7		CL9-D4	241.92	48.9
	CL5-D5	299.64	50.7		CL7-D5	270.54	50.9		CL9-D5	241.78	48.3
	平均值	299.83	50.9		平均值	271.18	50.4		平均值	242.08	48.6

2 穿透型圆孔对拉伸性能的影响分析

2.1 穿透型圆孔对拉伸强度的影响分析

根据拉伸试验所得数据,以无孔组的平均拉伸强度为基准,各组的拉伸强度比值如表 4 所示。

表 4 拉伸强度均值

组别	拉伸强度均值/MPa	拉伸强度比值(与第 1 组比)/%
第 1 组	538.16	100.00
第 2 组	299.83	55.71
第 3 组	271.18	50.39
第 4 组	242.08	44.98

对表 4 数据进行分析可知,孔径 5 mm 的穿透型圆孔使其拉伸强度均值降低 238.33 MPa,降至无孔组的 55.71%,孔径 7 mm 与 9 mm 的穿透型圆孔使其拉伸强度均值降低 266.98 MPa 与 296.08 MPa,分别降低至无孔组的 50.39%以及 44.98%。

即穿透型圆孔会导致该复合材料拉伸强度大幅降低,且孔径越大,拉伸强度降低越严重,孔径为 7 mm 时甚至降低至无孔组的一半以下。观察拉伸强度比值可以发现,其降低幅度与孔径基本成正比关系。

2.2 穿透型圆孔对拉伸刚度的影响分析

根据拉伸试验所得数据,以无孔组平均拉伸弹性模量为基准,各组弹性模量比值如表 5 所示。

表 5 弹性模量均值

组别	拉伸弹性模量 均值/GPa	弹性模量比值 (与第 1 组相比)/%
第 1 组	50.9	100.00
第 2 组	51.0	100.11
第 3 组	50.4	99.09
第 4 组	48.6	95.48

根据表 5 数据可知,穿透型圆孔对碳纤维复合材料拉伸刚度的影响很小,孔径最大的复合材料拉伸刚度下降率也仅为 4.52%。

对比穿透型圆孔对拉伸强度与刚度的影响情况可以发现,该复合材料拉伸强度受影响较大,而拉伸刚度受影响很小,可以忽略。且对于复合材料而言,在承受拉伸载荷作用时,决定其安全与否的根本性能为拉伸强度,因此为进一步分析拉伸载荷作用下飞机含孔复合材料的安全性,需选取合适的方法对复合材料拉伸强度可靠性进行分析。

3 含孔复合材料拉伸强度可靠性的分析

为更加直观地对拉伸载荷作用下含孔复合材料安全性进行分析,并有效反映训练强度提高对其带来的影响,选取合适的非概率可靠性分析方法,对含孔复合材料的拉伸强度可靠性进行分析。

3.1 非概率可靠性指标的选取

目前,非概率可靠性作为一种较新的可靠性分析方法,其指标尚未统一,因此在进行可靠性分析前,需要确定适合的非概率可靠性指标。目前较为常用的有最小无穷范数指标^[9]、体积比指标^[11]、广义无穷范数指标^[13]等。

其中最小无穷范数指标基于区间模型以及区间运算方法,提出非概率可靠性指标为功能函数的均

值与离差之比,其对应的物理意义为区间变量标准化后,在其扩展空间中极限状态平面至原点的最短距离,如图 7 所示。该指标也是目前被运用最广泛的非概率可靠性指标。

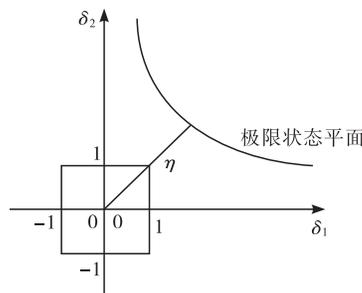


图 7 最小无穷范数指标

体积比指标基于建立的应力-强度非概率干涉模型,将标准化空间内安全域面积与基本变量区域总面积的比值作为非概率可靠性指标,如图 8 所示。该指标物理意义较为明确且易于理解,但是在强度可靠,即可靠性指标大于 1 时,计算结果为 1,对于判断强度是否可靠已经足够,但是在分析穿透型圆孔对复合材料的拉伸强度可靠性的影响时,无法直观看出其可靠性的变化程度以进行对比。

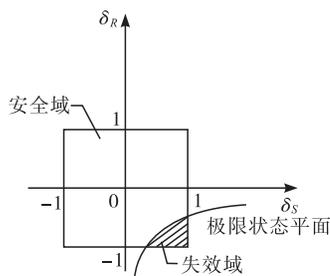


图 8 体积比指标

广义无穷范数指标基于多椭球模型,定义了一种“广义无穷范数”,以此为基础计算距离,将极限状态曲面至原点的最短距离定义为非概率可靠性指标。相较于区间模型,多椭球模型能够有效考虑参数间的相关性,但相应也会有更大的计算量。

本文主要对含孔复合材料拉伸强度可靠性进行分析,受力情况较简单,且区间变量之间不存在相互关系,最小无穷范数指标足以满足分析需求,且拥有较低的计算量,因此选择最小无穷范数指标进行强度可靠性的分析计算。

3.2 拉伸强度可靠性计算

3.2.1 强度与应力的区间表示

对于承受拉伸载荷的飞机复合材料,其拉伸强度 R 受到材料分散性、制造工艺等影响,应力 S 受到飞行任务与训练强度的影响,二者都具有不确定

性,可以通过区间表示法将拉伸强度区间与应力区间分别表示为:

$$R^l = [R^l, R^u] \quad (1)$$

$$S^l = [S^l, S^u] \quad (2)$$

式中: R^l 和 R^u 分别为拉伸强度的下限和上限, S^l 和 S^u 分别为应力的下限和上限。

对区间变量 R^l 以及 S^l 进行标准化变换得:

$$R^l = R^c + R^r \delta_R \quad (3)$$

$$S^l = S^c + S^r \delta_S \quad (4)$$

式中: R^c 和 R^r 分别表示均值 $R^c = \frac{R^l + R^u}{2}$ 以及离差 $R^r = \frac{R^l - R^u}{2}$, S^c 和 S^r 同理。

据力学试验的结果,各组拉伸强度的上下限 R^l 、 R^u 和对应的 R^c 、 R^r 整理如表6所示。

表6 拉伸强度区间数据

组别	R^l /MPa	R^u /MPa	R^c /MPa	R^r /MPa
第1组	512.64	557.16	534.90	22.26
第2组	297.16	301.47	299.32	2.16
第3组	270.54	271.5	271.02	0.48
第4组	239.44	243.70	241.57	2.13

对于应力 S ,根据飞机飞行训练数据发现,飞行训练强度提高前后,该复合材料的应力区间有明显变化,训练强度提高前应力区间为 $S^{l-} \in [35.6, 285]$,因此, $S^{c-} = 160.3$, $S^{r-} = 124.7$;训练强度提高后应力区间为 $S^{l+} \in [35.6, 320]$,因此 $S^{c+} = 177.8$, $S^{r+} = 142.2$,单位均为MPa。

3.2.2 极限状态函数的确定

在分析层合板的失效时,一般采用的准则主要是首层失效或末层失效^[16],而在本研究中主要依据材料宏观参数进行分析,且通过拉伸试验所得应力应变曲线可知,该碳纤维层合板在断裂失效时呈现脆性材料特征,因此在进行强度可靠性分析时,采用较简单的极限状态函数:

$$M = g(R, S) = R - S = 0 \quad (5)$$

根据式(3)、(4)对式(5)进行转换得:

$$M_i = R_i^c + R_i^r \delta_{R_i} - S_i^c - S_i^r \delta_{S_i} = 0 \quad (6)$$

式中: $i=1,2,3,4$,分别对应第1~4组试验数据。

3.2.3 非概率可靠性指标的计算

根据最小无穷范数指标的定义,拉伸强度非概率可靠性指标为:

$$\eta_i = \min(\|\delta_i\|_\infty) = \min\{\max\{|\delta_{R_i}|, |\delta_{S_i}|\}\} \quad (7)$$

根据试验所得的强度区间数据,计算各组试样在训练强度提高前后的拉伸强度非概率可靠性指标 η_i 如表7。其中 η_i^+ 与 η_i^- 分别表示第 i 组试样在训练强度提高前与提高后应力水平下的非概率可靠性指标。

表7 各组拉伸强度可靠性指标

组别	η_i^-	η_i^+
第1组	2.549	2.171
第2组	1.096	0.842
第3组	0.884	0.653
第4组	0.641	0.442

3.3 穿透型圆孔对复合材料安全性的影响分析

在分析材料安全问题时,可靠性在很大程度上反映着材料安全性,尤其对于飞机重要结构使用的复合材料,一旦发生失效则必然引发安全事故,此时材料的可靠性与安全性对等,因此基于非概率可靠性指标对飞机含孔复合材料安全性进行分析。

通过第1组拉伸强度可靠性指标可以看出:对于无孔试样而言,由于在设计阶段对强度有1.5倍安全系数的要求,无孔组试样在训练强度提高前后的拉伸强度可靠性指标分别达到2.549和2.171,远大于1,即此复合材料在不含穿透型圆孔时拉伸强度可靠性水平很高,能够保证飞行任务对拉伸强度的要求。

分析训练强度提高前的可靠性指标可以发现,当孔径为5mm时,其拉伸强度可靠性指标值相较无孔试样发生大幅下降,由2.549迅速下降到1.096;当孔径增大时,其拉伸强度可靠性指标值进一步下降至1以下,其中孔径为7mm时降低至0.884,而孔径为9mm时甚至降低至0.641,可靠性水平大幅较低,已无法满足飞行训练对可靠性的要求,对该复合材料的安全性有较大影响。

分析训练强度提高后的可靠性指标可以发现,各含孔复合材料的拉伸强度可靠性进一步降低,分别降至0.842、0.653与0.442。其中在训练强度提高前,孔径为5mm的复合材料的拉伸强度可靠性还可以满足训练需求,在训练强度提高后,其可靠性也同样降至较低水平,严重影响该复合材料的安全性。

3.4 复合材料安全性分析方法

根据对拉伸载荷下开孔复合材料安全性的研究,总结提出复合材料安全性分析方法。主要包括准备工作、性能分析以及安全性分析3个部分。

1)准备工作。包括确定分析对象、制作试验试样以及确定应力区间。其中分析对象指分层缺陷、穿孔缺陷、冲击损伤等损伤缺陷以及载荷模式等;确定应力区间主要根据飞机载荷谱等实际数据确定。

2)性能分析。主要开展材料级力学试验,分析损伤缺陷在对应载荷模式下对复合材料性能的影响规律,并记录强度区间,为后续安全性分析提供基础。

3)安全性分析。根据分析需求,选择非概率可

可靠性指标,确定复合材料失效时的极限状态函数,根据所得数据计算非概率可靠性指标,并以此对复合材料安全性进行分析。

航空复合材料安全性分析流程如图 9 所示。

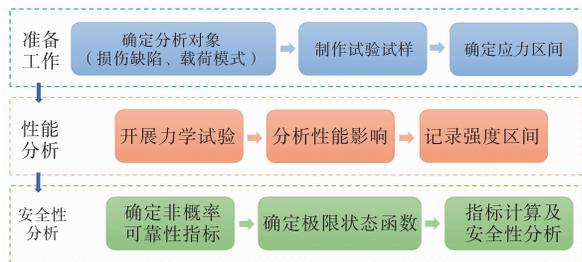


图 9 复合材料安全性分析流程

4 结论

为分析拉伸载荷作用下飞机含孔复合材料的安全性,本文根据某型飞机实际使用的复合材料,设计了无孔组和含孔组试样并开展了拉伸试验,分析穿透型圆孔对该复合材料拉伸性能的影响,并基于非概率可靠性分析了训练强度提高前后穿透型圆孔对拉伸强度可靠性的影响,得到结论如下。

1) 穿透型圆孔使得飞机复合材料的拉伸强度大幅下降,孔径越大,拉伸强度下降越明显,且拉伸强度的下降率与孔径成正比关系,其中孔径达到 9 mm 时会使其拉伸强度下降率超过 50%;穿透型圆孔对复合材料的拉伸刚度影响不大。

2) 结合研究需要,确定以最小无穷范数指标作为可靠性指标对复合材料安全性进行分析。结果表明无孔复合材料拉伸强度可靠性达到 2.549,可认为其安全性较高;穿透型圆孔会使拉伸强度可靠性大幅下降,且下降幅度随孔径的增大而增大,在训练强度提高前,孔径为 5 mm、7 mm 和 9 mm 的复材拉伸强度可靠性分别降至 1.096、0.884 和 0.641,会导致该复合材料拉伸强度可靠性无法满足飞行安全的需求。

3) 将训练强度提高前后复合材料拉伸强度可靠性进行对比分析,发现训练强度提高使得该复合材料拉伸强度可靠性进一步降低。在训练强度提高前,孔径为 5 mm 的复合材料拉伸强度可靠性尚能满足训练需要,训练强度提高后其可靠性指标也降至 1 以下,严重影响了该复合材料的安全性。

参考文献

[1] TOWSYFYAN H, BIGURI A, BOARDMAN R, et al. Successes and Challenges in Non-Destructive Testing of Aircraft Composite Structures[J]. Chinese Journal

of Aeronautics, 2020, 33(3): 771-791.

[2] 赵欣, 朱键键, 李梦, 等. 复合材料应用研究与产业发展建议[J]. 材料导报, 2016, 30(S1): 525-530.

[3] 刘煜纯, 赵洪运, 周宝升, 等. 金属/聚合物基于摩擦连接技术研究现状[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 200-217.

[4] GUO Q W, ZHANG Y F, LI D S, et al. Tensile Properties and Failure Mechanism of 3D Woven Composites Containing Holes of Different Geometries[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 166: 108115.

[5] 秦建兵, 赵玺, 梁荣娜. 一种失效准则在面外载荷下含孔层合板的应用[J]. 复合材料科学与工程, 2021(6): 52-57.

[6] 廖文辉. 基于非概率可靠性起落架结构安全性分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2020: 2-4.

[7] BEN-HAIM Y. A Non-Probabilistic Concept of Reliability[J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227-245.

[8] ZHAN J J, LUO Y J, ZHANG X P, et al. A General Assessment Index for Non-Probabilistic Reliability of Structures with Bounded Field and Parametric Uncertainties[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 366: 113046.

[9] 郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 56-60.

[10] YANG R G, LI W Z, ZHAO G L, et al. Interval Non-Probabilistic Time-Dependent Reliability Analysis of Boom Crane Structures[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(2): 535-544.

[11] 王晓军, 邱志平, 武哲. 结构非概率集合可靠性模型[J]. 力学学报, 2007(5): 641-646.

[12] CHEN X, WANG X J, QIU Z P, et al. A Novel Reliability-Based Two-Level Optimization Method for Composite Laminated Structures[J]. Composite Structures, 2018, 192: 336-346.

[13] 罗阳军, 亢战, ALEX L. 基于凸模型的结构非概率可靠性指标及其求解方法研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(6): 646-654.

[14] SUN W C, YANG Z C. A Comprehensive Model for Structural Non-Probabilistic Reliability and the Key Algorithms[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 123(1): 309-332.

[15] 中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 2.

[16] MA Y J, WANG X J, WANG L, et al. Non-Probabilistic Interval Model-Based System Reliability Assessment for Composite Laminates[J]. Computational Mechanics, 2019, 64(3): 829-845.

(编辑: 姚树峰)