

定向破坏复合材料层合壳体结构铺层的分析与设计

杨红娜 王向茹

(北京航天合众科技发展有限公司,北京 102628)

文 摘 以复合材料层合板为基本材料设计了一种结构新颖的定向破坏复合材料层合壳体结构,在导弹与该壳体结构的初始接触区域预制缺陷区,导弹发射时以四瓣形式开裂,大幅度提高了导弹的发射效率。利用 ANSYS 有限元模拟分析软件,通过强度分析确定了最佳铺层设计方案,单层板厚度为 0.2 mm,采用基体本身加强预置缺陷区的 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 铺层方式。该种铺层方式的爆破载荷为 0.21 MPa,最小顶破载荷为 1 kN,完全能够满足其在工作环境下既能承受一定的压力不漏气又能在较小的顶破载荷下自行破裂的设计要求。

关键词 结构铺层设计,承压,爆破,顶破,有限元法

中图分类号:V258.3;TB331

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.02.003

Analysis and Design of The Structure Layer of The Directional Damage Composite Laminated Shell

YANG Hongna WANG Xiangru

(Beijing Aerospace Hezhong Science and Technology Co. Ltd., Beijing 102628)

Abstract A new kind of structure of the directional composite laminated shell structure is designed in this paper, based on the composite laminated plate as the basic material. The weakness is precasted in the missile and the initial contact area of the shell structure precast defect area. The missile launch cracking in the form of four petals, and the efficiency of the missile launch is improved greatly. Through the finite element simulation analysis software ANSYS, the design scheme of the layer is determined by the strength analysis, namely 0.2 mm of the thickness for the single plate, the weakness is strengthened using the matrix itself, the kinds of the layer methods for $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$, the limit load is 0.21 MPa and the minimum bursting load is 1 kN of the layer, so that it can meet the design requirements to bear certain internal pressure and in smaller bursting load to crack in the work environment.

Key words Layer design of structure, Burst Pressure, Bearing capacity, Break load, Finite element method

0 引言

导弹发射箱盖的轻质化是减轻导弹运载工具质量提高导弹发射效率的重要措施之一,过去导弹发射箱多采用机械开盖和爆炸螺栓开盖等^[1-4]。但是这些箱盖均有其自身的缺点,所以传统的开启模式在许多发达国家中已经被结构简单的轻质易碎复合材料层合壳体所取代。Done^[5]设计并制造了一种穿透式复合材料层合壳体,其结构设计简单、质量轻,层合壳体在制造时预留带有刻痕的缺陷区域。J. H. WU

等^[6]研制出另一种穿透式复合材料箱盖,该箱盖能够以预定好的四瓣形式开裂并飞出,且不会对导弹的发射造成不良影响。周光明等人^[7-8]研究了一种穿透式复合材料薄膜盖,导弹发射时,盖体能够按照预置缺陷区撕裂线方向以四瓣形式完整的开裂,提高了导弹的发射效率。钱元等人^[9]在平板式易碎薄膜盖的基础上,对预置缺陷区的结构进行了改进设计。魏凤春等人^[10]对正交各向异性易碎复合材料层合板进行了研究。

收稿日期:2014-02-17

作者简介:杨红娜,1977年出生,硕士研究生,主要从事复合材料结构设计和产品研发。E-mail:mmcty@163.com.

本文以复合材料层合板为基本材料设计了一种定向破坏复合材料层合壳体结构,该构件可以作为密封盖(或称薄膜盖)用在导弹发射箱上。利用 ANSYS 有限元模拟分析软件对主体结构区铺层方式进行设计分析,引入相应的强度理论,进行各种工况下的失效判断,确定了定向破坏复合材料层合壳体结构铺层的最佳设计方案。

1 定向破坏复合材料层合壳体结构的铺层设计

根据定向破坏复合材料层合壳体结构设计的要求,考虑到玻璃纤维的特点,采用 0° 、 90° 和 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° 两种铺层角度,共设计了三种铺层方式:(1) $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$; (2) $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$; (3) $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 。共 12 种铺层方案,其铺层参数设计见表 1。

表 1 定向破坏复合材料层合壳体结构的铺层参数设计

Tab.1 Layer parameter design of the directional damage composite laminated shell structure

铺层序号	铺层方式	单层厚度/mm	总厚度/mm	预置缺陷区有无加强
1#	$[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$	0.1	1.5	无
2#	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$	0.1	1.6	无
3#	$[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$	0.1	1.6	无
4#	$[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$	0.1	1.5	有
5#	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$	0.1	1.6	有
6#	$[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$	0.1	1.6	有
7#	$[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$	0.2	3.0	无
8#	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$	0.2	3.2	无
9#	$[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$	0.2	3.2	无
10#	$[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$	0.2	3.0	有
11#	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$	0.2	3.2	有
12#	$[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$	0.2	3.2	有

2 定向破坏复合材料层合壳体结构铺层的有限元分析

2.1 有限元模型

为了简化有限元分析,选择定向破坏复合材料层合壳体结构的 1/4 实体模型建模,选择自由网格用 SHELL99 单元对其中性面层划分网格。划分网格后的模型如图 1 所示。

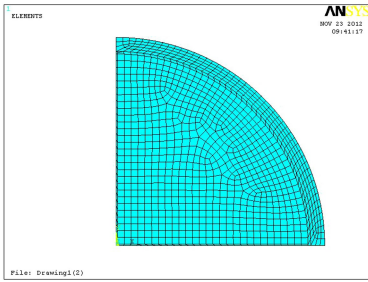


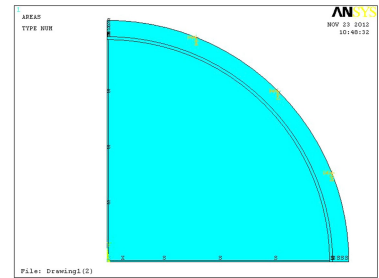
图 1 划分网格后的复合层合壳体 1/4 有限元模型

Fig.1 A quarter of the finite element model of the composites laminated shells after meshing

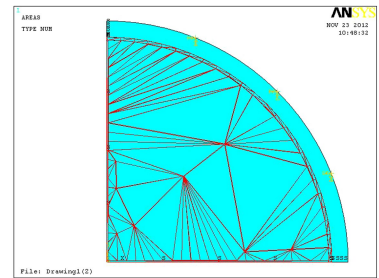
2.2 边界条件和面压力载荷的等效施加

为了与实际情况相符,在定向破坏复合材料层合壳体模型的主体剖面上施加对称约束,工装外圈面施加环向全约束。施加边界条件后在定向破坏复合材料层合壳体内表面施加 65 kPa 的均布面压力载荷,

其模型如图 2 所示。



(a) 施加边界条件



(b) 施加载荷

图 2 施加边界条件和载荷后的 1/4 有限元模型

Fig.2 A quarter of the finite element model after applying boundary conditions and the applied load

2.3 失效分析

表 2 各铺层下的变形和应力

Tab. 2 Deformation and the stress of the each layer

铺层序号	最大总位移/mm	最大总应力/MPa
1 [#]	800.735	2473
2 [#]	684.904	1991
3 [#]	671.810	1972
4 [#]	736.545	1236
5 [#]	642.401	1201
6 [#]	629.028	1154
7 [#]	100.258	610.7
8 [#]	85.711	485.4
9 [#]	84.071	480.0
10 [#]	92.183	310.5
11 [#]	80.386	300.2
12 [#]	78.716	288.9

在给定的载荷下,采用最大应力准则和逐渐失效的分析方法对定向破坏复合材料层合壳体结构的铺层进行优化设计,如果在给定载荷作用下,该层合壳体层最先一层发生破坏则认为整体失效。之后采用其他方案继续分析设计,直至确定符合承压性能要求的铺层组合。

2.4 计算结果与分析

根据表 1 所示的铺层设计情况利用 ANSYS 有限元分析软件分别对其进行了分析计算,得到以下相关数据,见表 2。依据单层板最大应力失效准则和逐渐失效的分析方法,对表 1 所示的铺层设计情况利用 ANSYS 有限元分析软件分别对其进行了分析计算,从结果中可以看到同种铺层方式下厚度越厚其产生的变形和应力越小,缺陷区对整个结构也有很大的影响,在同种铺层方式和厚度下,对预置缺陷区进行加强,其结构越稳定,变形越小。得到三种铺层设计方案符合要求,即单层板厚度 0.2 mm,采用基体本身填充十字槽与圆周槽的 $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 、 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ 和 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 三种铺层方式,其变形及应力云图如图 3 ~ 图 5 所示。

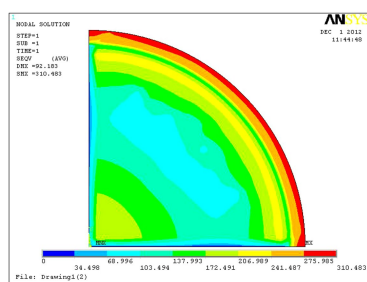
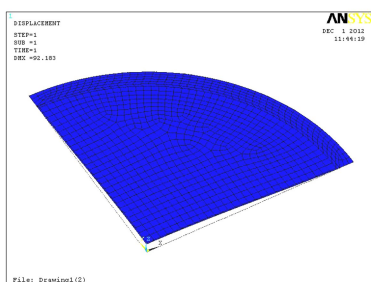


图 3 单层 0.2 mm 厚 $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 预置缺陷区加强的变形与应力云图
Fig. 3 Deformation and stress nephogram of the weakness strengthened 0.2 mm thickness single plate, the layer of $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$

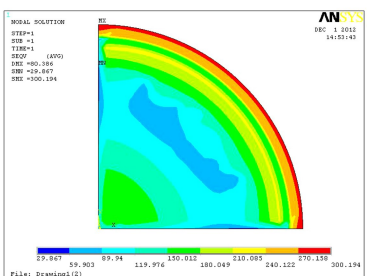
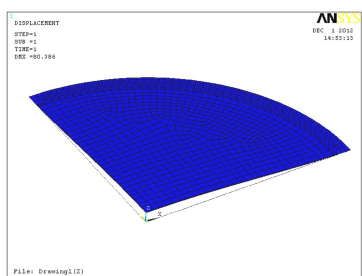


图 4 单层 0.2 mm 厚 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ 预置缺陷区加强的变形与应力云图
Fig. 4 Deformation and stress nephogram of the weakness strengthened 0.2 mm thickness single plate, the layer of $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$

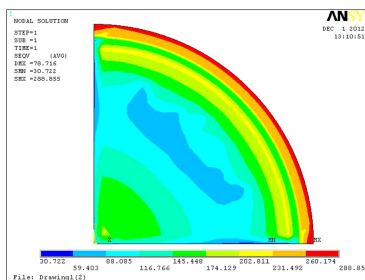
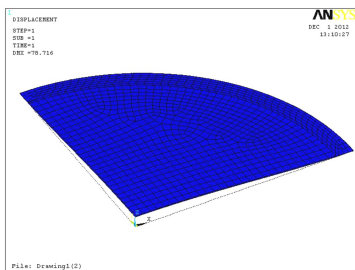


图5 单层 0.2 mm 厚 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 预置缺陷加强的变形与应力云图

Fig.5 Deformation and stress nephogram of the weakness strengthened 0.2 mm thickness single plate, the layer of $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$

3 定向破坏复合材料层合壳体结构强度的有限元分析

元分析软件分别对爆破压力进行了分析计算,其分析计算结果如表 3 和图 6 ~ 图 8 所示。

3.1 爆破压力的有限元分析

根据上述确定的三种铺层方式利用 ANSYS 有限

表 3 定向破坏复合材料层合壳体结构在三种铺层方式下的变形、应力和极限载荷

Tab.3 Deformation, stress and limit load of the directional damage composite laminated shell structure in three layer

铺层序号	铺层方式	最大总位移 /mm	最大总应力 /MPa	极限载荷 /MPa
10#	$[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$	269.457	907.6	0.19
11#	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$	259.710	969.9	0.21
12#	$[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$	254.314	933.2	0.21

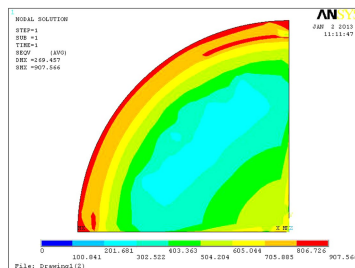
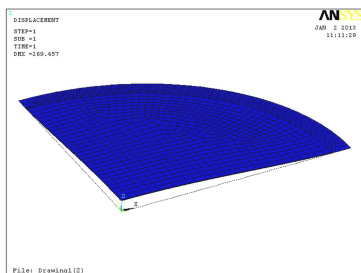


图 6 $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 铺层在 0.19 MPa 下变形和应力云图

Fig.6 Deformation and stress nephogram of the layer for $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ under 0.19 MPa

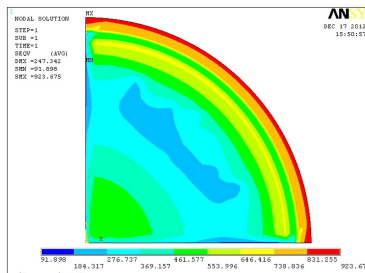
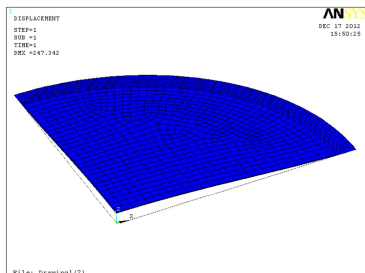


图 7 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ 铺层在 0.20 MPa 下变形和应力云图

Fig.7 Deformation and stress nephogram of the layer for $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ under 0.21 MPa

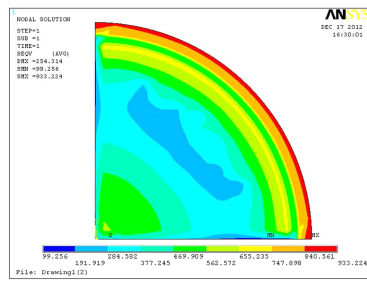
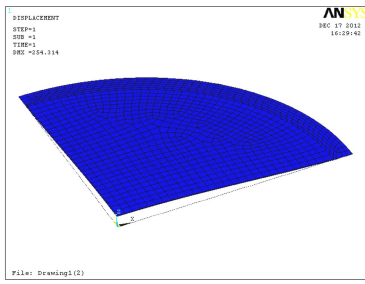


图 8 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 铺层在 0.21 MPa 下变形和应力云图

Fig. 8 Deformation and stress nephogram of the layer for $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ under 0.21 MPa

可以看出,在同种厚度和加强方式下,不同的铺层方式对爆破压力有较大的影响, $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 铺层的爆破载荷最小为 0.19 MPa,但是其产生的变形较大, $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ 和 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 爆破载荷为 0.21 MPa,其产生的变

形逐渐减小。

3.2 顶破载荷的有限元分析

根据确定的三种铺层方式利用 ANSYS 有限元分析软件分别对顶破载荷进行了分析计算,其分析计算结果如表 4 及图 9 ~ 图 11 所示。

表 4 定向破坏复合材料层壳体在 800 N ~ 2 kN 集中载荷作用下顶破力的计算结果

Tab.4 Calculation results of the break load of the directional damage composite laminated shell under concentrated loading of 800 N to 2 kN

铺层序号	铺层方式	最大总位移 /mm	最大总应力 /MPa	最小顶破载荷 /kN
10#	$[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$	227.652	3760	1.8
11#	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$	161.626	2707	1.5
12#	$[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$	106.417	1810	1.0

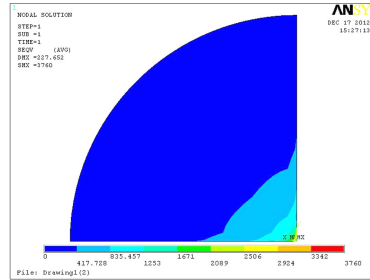
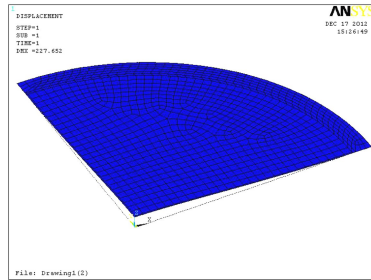


图 9 $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 铺层在 1.8 kN 下变形和应力云图

Fig. 9 Deformation and stress nephogram of the layer for $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ under 1.8 kN

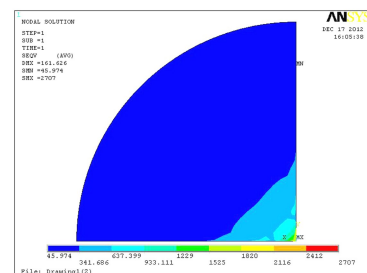
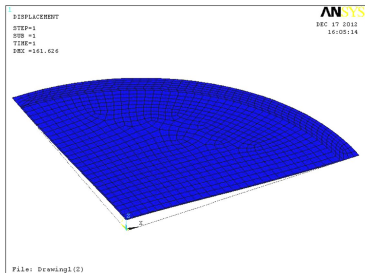


图 10 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ 铺层在 1.5 kN 下变形和应力云图

Fig. 10 Deformation and stress nephogram of the layer for $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ under 1.5 kN

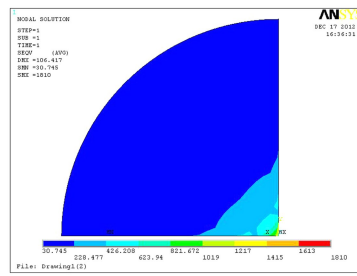
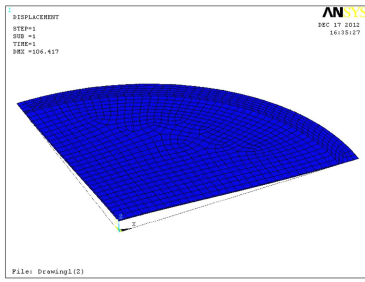


图 11 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 铺层在 1 kN 下变形和应力云图

Fig. 11 Deformation and stress nephogram of the layer for $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ under 1 kN

可以看出,在同种厚度和加强方式下,不同的铺层方式对顶破压力有较大的影响, $[0^\circ/90^\circ]_{2S}/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 铺层的顶破载荷和产生的变形最大, $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$ 次之, $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 顶破载荷及产生的变形最小,因此,这种铺层方式最好。

4 结论

以复合材料层合板为基本材料设计了一种结构新颖的定向破坏复合材料层合壳体结构,利用有限元分析软件 ANSYS 对定向破坏复合材料层合壳体结构的铺层进行了有限元分析,依据单层板最大应力理论和逐渐失效的分析方法对其分析结果进行了校核,得出三种符合定向破坏复合材料层合壳体结构设计要求的铺层设计方案;在此基础上对这三种铺层方式进行了爆破压力和最小顶破载荷的分析,预测出了符合承压强度要求的三种铺层设计的爆破压力及最小顶破载荷,确定了定向破坏复合材料层合壳体结构的最佳设计方案:单层板厚度为 0.2 mm,采用基体本身加强预置缺陷区的 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$ 铺层方式,其爆破载荷为 0.21 MPa,最小顶破载荷为 1 kN,完全能够满足其在工作环境下既能承受一定的压力不漏气又能在较小的顶破载荷下自行破裂的设计要求。

参考文献

- [1] Copeland R L, Greene R F. Protective cover for a missile nose cone [P]. US Pat, 1976, 3970006
- [2] Boeglin P H. Plate-glass fitted with an explosion-cutting device [P]. US Pat, 1982, 4333381
- [3] Bell R E. Missile weapon system [P]. US Pat, 1992, 5239909
- [4] Krol U B. Frangible cover assembly for missile launchers [P]. US Pat, 1971, 3742814
- [5] Doane W J. Frangible fly through diaphragm for missile launch canister [P]. US Pat, 1985, 4498368
- [6] Wu J H, Wang W T, Kam T Y. Failure analysis of a frangible laminated composite canister cover [J]. Proc. Inst. Mech. Eng., 1999, 213, G:187-195
- [7] 周光明, 贾德财, 王新峰. 轻质穿透式层合壳体的分析、设计与试验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36 (6): 693-696
- [8] 周光明, 袁卓伟. 新型穿透式复合材料层合壳体的设计、制作与试验 [J]. 宇航学报, 2006, 27 (2): 276-280
- [9] 钱元, 周光明, 贺卫东, 等. 复合材料易碎盖预置缺陷区结构设计分析 [J]. 航空学报, 2012, 33 (3): 487-493
- [10] 魏凤春, 张军, 张晓, 等. 正交各向异性易碎复合材料层合板的设计与试验研究 [J]. 工程塑料应用, 2011, 39 (5): 61-64

(编辑 李洪泉)