

环氧泡沫塑料易碎保护盖结构设计及实验验证

Structure Design and Verification Test for
Fragile Protection Closure Made from Epoxy-foam Plastics

张晓艳,王景鹤,成晓阳,范召东

(北京航空材料研究院,北京 100095)

ZHANG Xiao-yan, WANG Jing-he, CHENG Xiao-yang, FAN Zhao-dong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 设计了一种以环氧泡沫塑料为基本材料的新型易碎保护盖结构,并采用有限元模拟方法分析易碎保护盖在给定冲盖爆破压力下的应力分布。采用应变方法测试分析了易碎保护盖在安全载荷下的应变分布特点以及盖体结构边缘弹翼滑过区域的破坏方式,确定了两种盖体结构,制备出实物样件并进行了静压冲盖和燃气动压冲盖实验。结果表明:内表面沿经纬向和边缘特定分布的弱化槽结构,利于整体环氧泡沫塑料盖体在临界压力下的均匀破碎和齐根断;盖体弱化槽结构设计合理,设计分析方法准确,所建立的方法和研究结果为易碎保护盖的设计应用提供了依据。

关键词: 环氧泡沫塑料;易碎保护盖;弱化槽;冲盖实验

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)08-0005-05

Abstract: The stress distribution of the fragile protection cover made from epoxy-foam plastics was analyzed under the given blast load by the method of the finite element simulation. And the strain distribution was tested under the safe load. So the two drafts of the structure were designed based on the results of the research on the destroy forms of the wing slip area of cover structure which was carried out according to the properties of the base material. The explosion experiments besides the static pressure and gas dynamic pressure were executed to the specimens. The results showed that the weakening groove laid along the structure in vertical, horizontal and edge lines contributed to root fracture and uniform segments at the critical pressure, and that the structure design was reasonable and the analysis method was accurate, which were proved to be the basis for the application of fragile protection cover.

Key words: epoxy-foam plastics; fragile protection cover; weakening groove; blunt cover experiment

易碎保护盖是发射筒的组成部件之一,导弹发射时,易碎保护盖胀破,盖体边缘弹翼划过区域的残余物不应损伤导弹构件,碎块应质量小,分离性好。易碎保护盖主要由非金属材料组合而成,周边通过金属法兰与发射筒连接。易碎保护盖通常选用硬脆性材料,结构上进行局部弱化设计提供应力集中,有利于盖体边缘沿弹翼划过区域断裂(谓之齐根断)和碎块较小。早期易碎保护盖采用聚氨酯泡沫塑料结构,后期演变为橡胶板/纤维增强树脂层压板复合结构,通过预埋裂纹源,保证齐根断和碎块较小;易碎保护盖也采用过整体环氧泡沫塑料结构,盖体内表面布设若干径纬向和边缘的弱化槽,有利于均匀破碎和齐根断^[1-4]。与复合材料结构盖体相比,整体环氧泡沫塑料保护盖结构可设计性好、成型工艺简便、产品质量一致性较好。

文献[5,6]报道,环氧泡沫塑料多为闭孔致密结构,具有质轻、结构均匀、强度高等特点,可以用于成型大型结构件,1964年美国壳牌公司首先研制成功,俄罗斯曾于20世纪60年代末将其用于飞机结构件(夹层板结构)。北京航空材料研究院系统地研究了环氧泡沫塑料的配方、工艺、性能及其大尺寸发泡制件的制备技术,建立了较为完备的材料标准和工艺文件^[7,8]。

本工作以北京航空材料研究院(简称航材院)研制的环氧泡沫塑料为易碎保护盖基本材料,采用有限元模拟、无损应变测试等方法,分别分析了盖体结构在冲盖爆破载荷,安全载荷下的应力、应变分布,确定了带有径纬槽、边缘槽等弱化槽的盖体结构,进行了静压和燃气动压冲盖实验验证。

1 实验

1.1 原材料

双酚 A 环氧树脂(无锡树脂厂);芳香多元胺(上海试剂三厂);酰肼发泡剂(市售);OP 表面活性剂(市售);XM 密封剂(航材院)。

1.2 实验仪器和设备

SZF-20 反应釜,烘箱,磅秤,电子天平,三辊炼胶机,注胶枪,电钻及钻头。

1.3 模具及工装

大型球冠形铝质模具;金属法兰及压环。

1.4 盖体制备及装配

将环氧树脂、固化剂、发泡剂以及其他助剂加入到反应釜中,在一定程序温度下进行预聚反应,注入到成型模具中进行固化发泡,制备环氧泡沫塑料盖体。将盖体和金属法兰配合打孔,用螺钉和螺柱连接并锁紧固定,盖体和金属法兰内外表面涂敷密封剂,室温硫化或在 70°C 下处理 8h。

1.5 有限元分析和无损应变测试

根据材料基本性能、工况条件及设计的几何信息,建立盖体结构模型,对盖体结构在冲盖爆破应力

0.146MPa 下的应力分布进行分析;在盖体结构外表面的近沟槽区域、非沟槽区域选择测试点,分别粘贴应变片,每个点包括 90° 、 45° 和 0° 三个方向,设定安全加载应力为 0.03MPa,测定各点的应变水平。

1.6 易碎前冲盖实验

进行易碎保护盖的静压冲盖实验和燃气动压冲盖实验,验证其齐根断和碎块均匀性。

2 结果与讨论

2.1 有限元应力分析

按等厚度(35mm)建立盖体结构模型,并进行弱化槽设计,如图 1 所示。

经纬槽深度 X 选择 4,12,14,16,18mm,边缘槽深度 Y 选择 14,18,20,25,30mm,施加载荷条件进行 FEM 应力分析,经纬槽、边缘槽深度与槽所受平均应力的关系如图 2 所示,典型槽深下的应力分布云图如图 3 所示。

由图 2,3 分析可知:①在极限应力为 0.146MPa,无弱化槽和弱化槽深度较小时,在爆炸压力作用下,保护盖根部应力明显大于其他部位,此时无法满足均匀

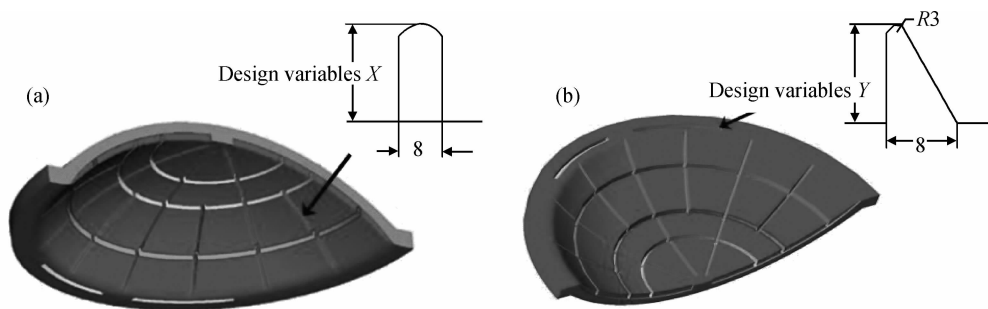


图 1 盖体结构及弱化槽模型 (a)经纬槽;(b)边缘槽

Fig. 1 Body structure and the weakening groove model (a)latitude and longitude slot;(b)edge slot

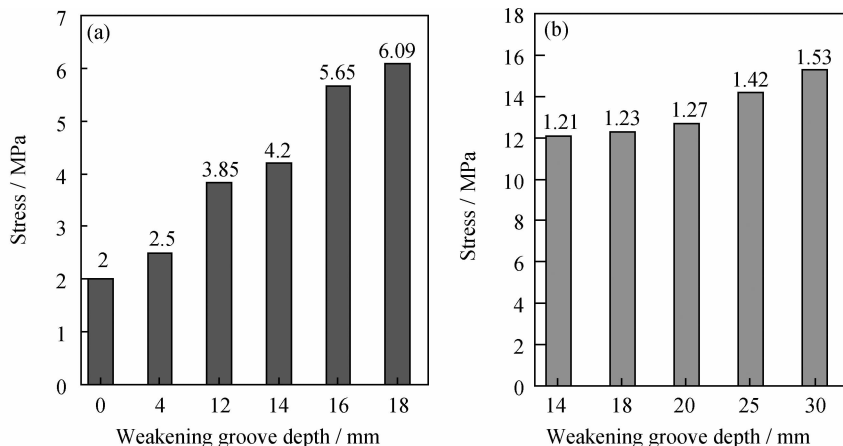


图 2 经纬槽、边缘槽深度与槽所受平均应力的关系 (a)经纬槽;(b)边缘槽

Fig. 2 Relationship between the weakening groove depth and average stress (a)latitude and longitude slot;(b)edge slot

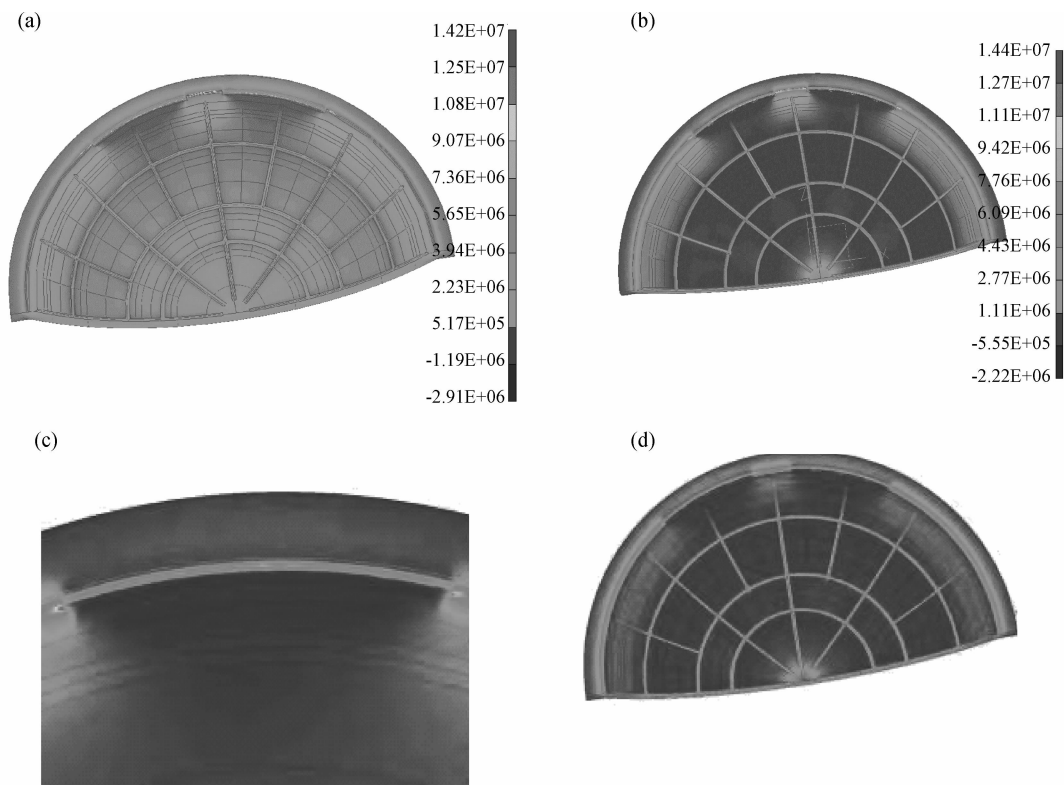


图3 典型槽深下的应力分布云图 (a)经纬槽深4mm;(b)经纬槽深1mm;(c)边缘槽深18mm;(d)增加周边槽5mm

Fig. 3 The typical depth of the groove corresponding stress distribution nephogram

(a)latitude and longitude groove depth 4mm;(b)latitude and longitude groove depth 1mm;

(c)edge slot depth 18mm;(d)increased peripheral slot 5mm

破碎的设计技术要求。②随着经纬槽 X 值的增加,易碎盖开槽部位所受应力水平提高,有利于满足均匀破碎的设计要求;当 X 值从 4mm 增加到 14mm 时,经纬槽所受应力变化较为平缓,且小于材料的强度极限, X 值从 14mm 增加到 16mm 时,经纬槽所受应力变化较大,当 X 值大于 16mm 时,经纬槽所受应力大于材料的强度极限。③随着边缘槽深度 Y 值的增加,易碎盖在爆破应力作用下,该部位所受应力增加,有利于实现齐根断的设计要求。④在其他条件不变的情况下,通过在保护盖周边部位设置一圈深度为 5mm 的弱化槽后,保护盖的应力分布更加趋于合理。

2.2 无损应变测试与分析

采用无损检测方法对盖体结构在安全载荷 (0.03MPa) 作用下的应变分布状态进行分析。盖体表面测试点分布以及各点应变水平与径向半径关系曲线如图 4 所示。

分析结果显示,主应变 ϵ_1 由盖体中心向边缘呈递增趋势,靠近经纬槽交叉点处的 ϵ_1 比远离交叉点的大,这与有限元分析的结果一致。主应变 ϵ_2 沿径向呈先增后减的趋势,在边缘出现负值,但经计算,此处的应力仍为拉应力。这表明边缘沟槽处外表面为拉应力,如果此处存在缺口、缺陷,造成应力集中,应该首先

从此处破坏。

2.3 盖体结构边缘弹翼划过区域(法兰边缘)的破坏形式分析

随机抽取盖体样件,加工拉伸试样和冲击试样,并测试其相应性能。表 1 为盖体环氧泡沫塑料的拉伸性能和冲击性能。

拉伸试样断口垂直于拉伸应力方向,呈现一定的脆性断裂断口形貌,其应力-应变曲线类似于硬脆材料的应力-应变曲线;其 δ 为 1% 左右, a_k 为 $2\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。工程上通常将 $\delta < 5\%$, $a_k < 2\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 的材料称为脆性材料, $\delta > 5\%$, $a_k > 2\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 的材料称为韧性材料^[9]。盖体环氧泡沫塑料具有近似脆性材料的性能特点,是一种介于韧脆过渡区的材料。对于高聚物材料,脆性和韧性表现还极大地依赖于测试速率(应变速率),在恒定温度条件下,断裂表现可由低应变速率下接近韧性断裂形式转变为高应变速率下的脆性断裂形式^[9]。在冲盖实验中,静压破碎实验可以认为是一种低应变速率实验,随着升压速率的降低,盖体破坏方式倾向于部分韧性断裂;燃气动压冲破实验是一种高应变速率实验,盖体破坏方式更接近于脆性断裂。

图 5 为盖体边缘弹翼划过区域的典型剖面结构,A 点为压环内径下沿与盖体边缘外表面接触点,B 点

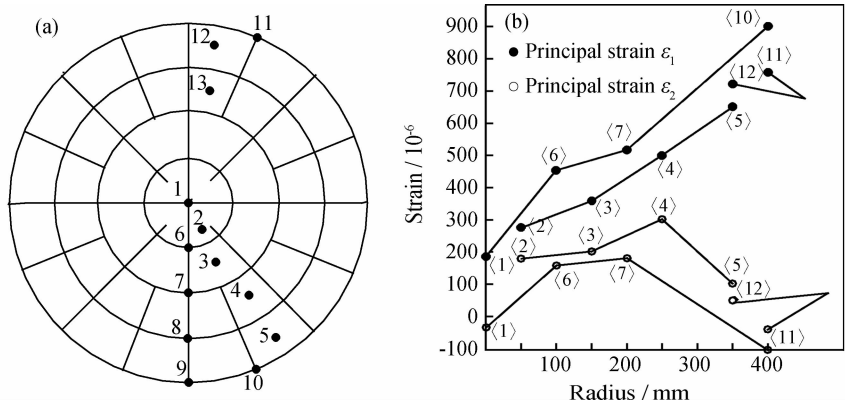


图 4 盖体表面测试点分布(a)以及各点应变水平与径向半径关系(b)
Fig. 4 Test point distribution on body surface (a) and relationship between each point's strain and radius (b)

表 1 盖体环氧泡沫塑料的拉伸性能和冲击性能
Table 1 The tensile and impact properties of body materials

No	Sample site	σ_b /MPa	E /GPa	δ /%	α_k /(kJ·m ⁻²)
1	Upper part	5.29	0.522	1.01	2.2
2	Central section	4.99	0.521	0.96	2.2
3	Lower part	4.62	0.481	0.96	2.0

为边缘槽深顶点,C 点为法兰内径上沿与盖体边缘内表面接触点,D 点为 AB 连线与盖体内表面交点,X,Y 为边缘槽深度。

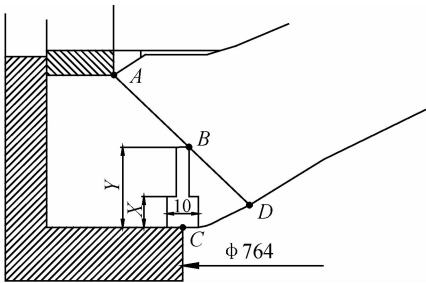


图 5 盖体边缘弹翼划过区域的典型剖面结构
Fig. 5 The typical body structure surrounding the wing slip area

通过有限元应力分析和无损应变测试分析可知,在爆破应力作用下,A 点为拉应力,C 点为压应力。A 点有利于产生应力集中,根据脆性材料断裂特点,在没有其他缺口和缺陷的条件下,裂纹通常应从 A 点产生,沿盖体径向方向 AD 扩展至 D 点断裂,而不是沿 C 点断裂。制件厚度不同(30~60mm),断裂方向角(即断裂方向与盖体垂直轴向的夹角)基本在 40~45° 之间。经对无弱化槽或弱化槽很浅的盖体样件进行宏观断口分析,盖体边缘断裂情况与之基本相符。为满足沿 C 点断裂的设计要求,只有在 AD 方向上存在一个伸向 C 点的断裂扩展面才能改变原来的裂纹扩展方向。在盖体 C 点处垂直法兰边缘开一沟槽,沟槽深度 Y 要接近与 AD 面相交(经计算 Y 约为 18~22mm),有利于实现裂纹沿 BC 扩展,并在 C 点断裂。

2.4 盖体结构设计和冲盖实验验证

根据上述分析结果,设计了两种结构形式的盖体,方案一:等厚度结构(图 6(a)),经纬槽 φ8mm×18mm,边缘槽 φ8mm×18mm,周边弱化槽 φ8mm×5mm;方案二:局部变厚度结构(图 6(b)),经纬槽 8 mm×(8~18)mm,中部采用多边形凹槽,边缘槽

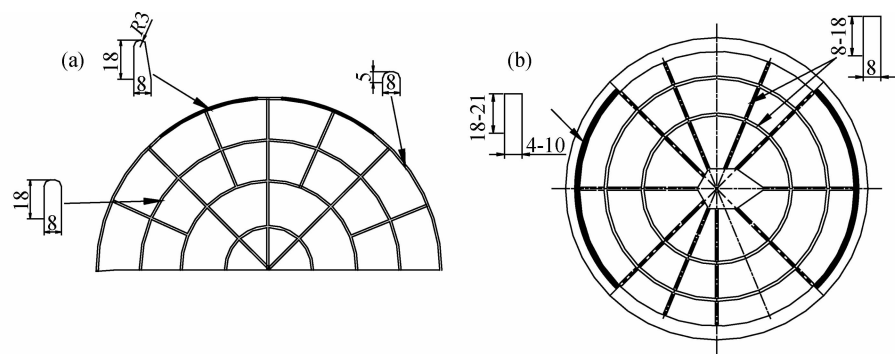


图 6 盖体结构设计示意图 (a)等厚度结构;(b)局部变厚度结构
Fig. 6 The design of the body structure diagram (a)uniform thickness;(b)part nonuniform thickness

(4~10)mm×(18~21)mm;制备了两种结构的实物样件。进行了静压和燃气动压冲盖实验。

两种结构的盖体静压爆破应力均为 0.14~0.17MPa,满足性能要求;静压、燃气动压冲盖实验后,

盖体边缘弹翼滑过处没有残余物,齐根断情况良好(图7);燃气动压冲盖实验后,盖体碎块较小,质量分布如表2所示。经过冲盖实验验证,结果表明盖体结构设计合理,性能满足要求。

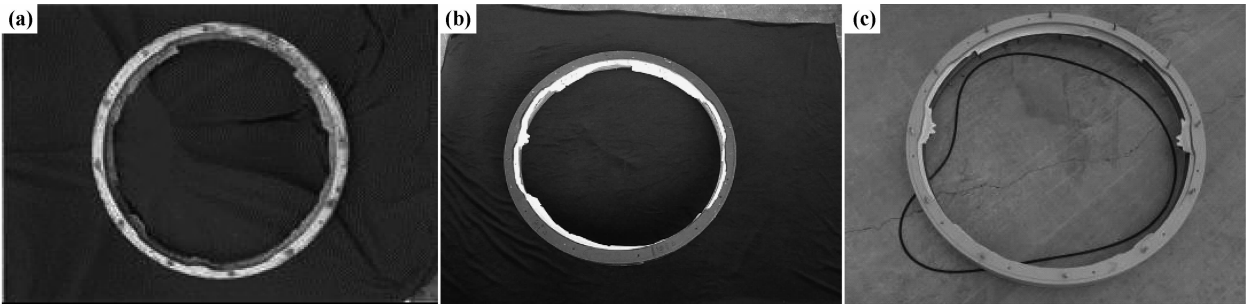


图7 冲盖实验后易碎盖破碎状态 (a)方案一,静压冲盖;(b)方案二,静压冲盖;(c)方案二,动压冲盖

Fig.7 The broken state of the fragile cover body after pressure blunt cover test

(a)the first scheme,static pressure blunt cover;(b)the second scheme,static pressure blunt cover;

(c)the second scheme,gas dynamic pressure blunt cover

表2 燃气动压冲盖后盖体碎块质量分布(g)

Table 2 Mass distribution of body pieces after gas dynamic pressure blunt cover(g)

No	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
1	1350	1500	1400	1700	1680
2	1050	1450	950	1450	1580
3	850	1000	880	1600	1520
4	800	920	800	950	1000
5	780	600	750	400	350
6	700	400	700	300	410
7	550	550	620	350	200
8	550	330	500	250	300
9	500	200	800	150	150
10	320	220	450	200	100
11	300	100	300	—	—
12	180	—	100	—	—
13	100	—	150	—	—
14	100	—	—	—	—

3 结论

(1)有限元模拟应力分析和无损应变测试分析结果表明,在给定冲盖爆破压力下,盖体结构边缘外表面为拉应力,内表面为压应力,内表面沿径纬向和边缘特定分布的弱化槽结构利于盖体结构在临界压力下实现均匀破碎和齐根断。

(2)基于材料特性对盖体边缘弹翼滑过区域的破坏方式的研究,为边缘弱化槽的详细设计提供了依据。

(3)通过静压冲盖、燃气动压冲盖实验验证,盖体弱化槽结构设计合理,设计分析方法准确,所建立的方法和研究结果为易碎保护盖的设计应用提供了依据。

参考文献

[1] FORIS VICTOR G,MARINA DEL REY,TAKESHI TOKIYAMA,et al. Protective missile launch tube enclosure [P]. USA Patent;6311604,2001-11-06.

[2] DOANE WILLIAM J,DIEGO SAN. Frangible fly through diaphragm for missile launch canister [P]. USA Patent;4498368,1985-02-12.

[3] MUSSEY RICHARD A. Launch tube closure [P]. USA Patent;4301708,1981-11-24.

[4] JANSSON AKE. Launch tube protective cover [P]. USA Patent;7954412,2011-06-07.

[5] 区英鸿. 塑料手册[M]. 北京:兵器工业出版社,1991. 1145—1150.

[6] 钱志屏. 泡沫塑料[M]. 北京:中国石化出版社,1998. 274—288.

[7] 王景鹤,熊金水,张晓艳,等. 硬质环氧泡沫塑料的工艺研究[J]. 材料工程,1996,(增刊):197—199.

[8] 张晓艳. 一种中密度硬质环氧泡沫塑料的制备及其性能研究[A]. 第十三届全国复合材料学术会议论文集[C]. 北京:航空工业出版社,2004. 1177—1184.

[9] 中国科学技术大学高分子物理教研室. 高聚物的结构与性能[M]. 北京:科学出版社,1981. 265—272.

收稿日期:2012-01-06;修订日期:2012-06-15

作者简介:张晓艳(1972—),女,硕士,高级工程师,从事环氧树脂改性,轻质高强环氧泡沫塑料、室温固化有机硅热防护涂层研究,联系地址:北京市 81 信箱 7 分箱(100095),E-mail:xiaoyan.zhang@biam.ac.cn