

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.12.024

易碎式导弹发射箱盖研究进展

杨鑫宇^{1,3}, 冷子凌¹, 李伟², 李照谦³, 南博华³, 周翔¹(1. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240;
3. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

摘要: 从易碎式导弹发射箱盖比传统的机械式箱盖和爆破式箱盖的优势出发, 针对易碎盖的材料选择、结构设计优化和有限元分析3个方面简述了国内外易碎式导弹发射箱盖的研究进展, 分析了影响易碎盖冲破性能和抗外压承载性能的关键因素。指出目前易碎盖所使用的材料以玻璃纤维增强环氧树脂为主, 针对易碎盖冲破性能的结构设计与优化主要有应力薄弱区设计、胶接薄弱区设计和拓扑自锁结构, 提议在易碎盖材料选择和结构设计优化等方向进一步加大研究。

关键词: 发射箱盖; 结构与优化; 有限元分析; 复合材料; 薄弱区结构

中图分类号: TJ768.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)12-0142-07

Research Progress of Fragile Missile Launching Box Cover

Yang Xinyu^{1,3}, Leng Ziling¹, Li Wei², Li Zhaoqian³, Nan Bohua³, Zhou Xiang¹(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Metal Matrix Composite Materials, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
3. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing General Factory Co. Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract : The research progress of the fragile missile launch box cover at home and abroad was briefly described in terms of material selection, structural design optimization and finite element analysis of the fragile cover, starting from the advantages of the fragile missile launch box cover compared with the traditional mechanical box cover and the blasting box cover. The research progress of the frangible missile launch box cover, and the key factors affecting the breakthrough performance and external pressure bearing performance of the fragile cover were analyzed. It is pointed out that glass fiber reinforced epoxy resin is the main material used for the fragile cover at present, and the structural design and optimization for the breakthrough performance of the fragile cover mainly include the design of the weak area of stress, the design of the weak area of bonding and the topological self-locking structure. Further research is needed on the selection of materials and the design and optimization of structures of fragile cover.

Keywords : launch box cover ; structural design and optimization ; finite element analysis ; composite ; weak area structure

导弹贮运发射箱作为导弹武器系统的关键部件, 不仅具有发射瞄准的功能, 还能在运输和贮存时起到保护导弹的作用, 在发射时以某种方式迅速打开, 使导弹顺利出箱。现代信息化战争作战武器高技术化、作战方式多样化、作战节奏迅速, 这些特点决定了导弹贮运发射箱必须快速反应以提高导弹的生存能力。贮运发射箱按开盖方式可分为机械式、爆破式和易碎式三类^[1-3]。机械式箱盖通过机械结构传动将箱盖打开, 开盖稳定, 可重复多次使用, 但箱盖机构复杂, 开盖缓慢, 降低了发射箱的反应能力, 多用于大型导弹贮运发射

箱定向器上。爆破式箱盖^[4]在发射时点燃火药将箱盖上的爆破螺栓炸断, 依靠箱内气压将箱盖冲飞完成开盖。相较于机械式箱盖, 爆破式箱盖开盖迅速, 节省时间, 但只能单次使用, 火药存在爆炸不安全、不稳定的风险。易碎式箱盖在发射时被导弹顶飞抛出, 开盖方便稳定快捷, 且由于所使用的材料具有质量轻、耐腐蚀和可设计性强等优点, 逐渐成为发射箱盖的研究热点。目前国外有许多导弹武器系统采用了先进的易碎盖结构, 如英国的“海狼”垂直发射系统、俄罗斯的C-300导弹以及美国的M270火箭炮等。

基金项目: 上海航天技术研究院—上海交通大学航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2016-19)

通信作者: 周翔, 博士, 副教授, 主要从事复合材料结构设计和优化方向的研究

收稿日期: 2022-11-12

引用格式: 杨鑫宇, 冷子凌, 李伟, 等. 易碎式导弹发射箱盖研究进展[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12): 142-148.

Yang Xinyu, Leng Ziling, Li Wei, et al. Research progress of fragile missile launching box cover[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 142-148.

笔者从易碎盖的材料选择、结构设计优化和有限元分析三个方向出发,详细介绍国内易碎式导弹发射箱盖的研究进展。

1 易碎式导弹发射箱盖的材料选择

目前国内主要采用树脂基复合材料或泡沫塑料作为易碎式导弹发射箱盖的主体材料。树脂基复合材料是一种以树脂为基体的纤维增强材料,具有许多优良性能,比如质量轻、强度高、耐腐蚀、较好的抗烧蚀性以及较好的电磁屏蔽性^[5-7]。同时,树脂基复合材料可以选择不同的基体和纤维并进行铺层设计,具有很强的可设计性,能使易碎盖沿预定的破坏模式和破坏轨迹破坏。泡沫塑料是一种有气体微孔分布的高分子材料,具有质量轻、隔热、减震等特点,其介电性能优于基体树脂,可通过更改泡沫塑料的密度从而选定合适的强度和模量^[8-9]。

1.1 树脂基复合材料易碎盖

目前树脂基复合材料易碎盖所使用的材料以玻璃纤维增强环氧树脂为主,部分采用玻璃纤维增强乙烯基树脂复合材料、玻璃纤维增强硅橡胶复合材料和碳纤维增强环氧树脂等作为主体材料。

王松超^[10]采用玻璃纤维增强环氧树脂作为易碎盖材料,设计了易碎盖玻璃纤维铺层,对单层玻璃纤维布划轻微刻痕,制备了易碎盖并进行了冲击试验,对比分析仿真与试验结果,验证了密封盖的性能。Kam等^[11]通过理论和实验的方法研究了玻璃纤维增强环氧树脂复合材料易碎盖在均匀外部压力下的静态破坏强度。易碎盖由四块层合板组成。孙志彬等^[12]研制了一种玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的定向分离易碎盖,设计了4种拥有不同薄弱区结构的易碎盖,根据仿真计算结果制作了其中两种易碎盖并进行了冲破试验,结果表明,改变薄弱区的强度可以实现圆形易碎盖的定向分离。王敏等^[13]对陶瓷基复合材料天线罩撞击玻璃纤维增强环氧树脂易碎盖的过程进行了瞬态动力学分析,得到了撞击过程的动态响应和失效模式。同时,进行相应的冲击试验,证明易碎盖能沿预设应力槽破坏,天线罩保持结构完整。

马飞^[14]以玻璃纤维增强乙烯基树脂为主体材料设计了6种不同结构类型的密封盖,盖体上预制了规则裂纹使密封盖定向断裂,所设计的易碎盖在冲破时能沿预制的薄弱区裂纹撕裂成有规则的四块,撕裂后的碎片在很短的时间内飞离,不影响导弹发射。徐文彬^[15]设计了6瓣、8瓣、12瓣共三种结构形式的玻璃纤维增强硅橡胶复合材料易碎盖,基于可失效的弹塑性本构建立了三种不同结构的易碎盖有限元模型,并进行了冲破过程的模拟。结果表明,在相同裂纹强度下,选用12瓣的易碎盖撞击力最小。苑晓旭等^[16]设计发明了一种碳纤维复合材料易碎盖,验证了相较于盖体各部分用胶粘接的易碎盖,薄弱区开孔/槽的碳纤维易碎盖有更好的气密性与耐压性。

1.2 泡沫塑料易碎盖

早期泡沫塑料易碎盖采用聚氨酯泡沫制成,由于其力学

性能差和耐低温性能低等诸多问题,受环境限制影响很大。目前泡沫塑料易碎盖多采用环氧树脂泡沫制成,其力学强度高,粘接力强,耐热及环境性能好。聚甲基丙烯酸酰胺泡沫虽具有泡沫材料中最高的比强度和比模量,但0.因其昂贵的价格而较少使用。

张中利等^[17]为某型号火箭发射箱设计了一种采用硬质聚氨酯泡沫塑料为主体材料的易碎式密封盖,模拟了火箭弹和燃气流冲击易碎盖的过程,并进行了冲破实验来对比验证,得到了密封盖的破碎模式和性能。卓毅等^[18]针对一种易碎盖的技术要求开展了结构设计,设置了弱化槽并利用泡沫材料的拉压不对称性的特点实现了易碎盖正反两个方向的承压要求。张晓艳等^[19]设计了一种环氧泡沫塑料易碎盖,模拟了易碎盖在给定冲盖爆破压力下的工况,得到了易碎盖的应力分布,测试了易碎盖在安全载荷下的应变分布,分析得到了盖体结构边缘弹翼滑过区域的破坏方式。王迪^[20]选择高比强度的聚甲基丙烯酸酰胺泡沫作为易碎盖的主体材料,建立了有限元模型模拟发射冲破过程,分析了易碎盖的破坏模式和弹头碰撞时易碎盖的载荷特性,并提出了改进措施。

2 易碎式导弹发射箱盖的结构设计与优化

根据导弹贮存、运输和发射的实际使用需求,易碎式导弹发射箱盖的结构必须满足以下两个条件:(1)在导弹发射时,导弹能以较小的冲击力冲破易碎盖发射出箱;(2)在贮存和运输时,易碎盖需保证一定的强度和气密性以起到保护和密封的作用。互相矛盾的两个需求决定了易碎式导弹发射箱盖的结构必定与传统的机械盖和爆破盖不同,其在结构上必须具有一定的特殊性。目前,针对于易碎式导弹发射箱盖的结构设计与优化的目标主要集中在易碎盖的两个性能上,分别是冲破性能和抗外压承载性能。

2.1 针对易碎式导弹发射箱盖冲破性能的结构设计与优化

为了实现导弹发射时产生较小冲击力的目标,大多数易碎盖在盖体上设计了薄弱区结构方便导弹出箱。目前,薄弱区结构设计可大致分为以下三类:(1)应力薄弱区;(2)胶接薄弱区;(3)拓扑自锁结构。

(1)应力薄弱区设计。

设计应力薄弱区主要通过盖体上预制刻痕或沟槽等完成。Wang Hui-fang等^[21]设计了一种具有划痕的玻璃纤维易碎盖,并以玻璃纤维铺层数为自变量设置了6种结构类型。建立了火箭弹冲破易碎盖和气流冲击易碎盖的有限元模型,模拟了火箭弹冲破和气流冲击的过程。结果表明,易碎盖会沿预制的刻痕断裂,不会产生碎片干扰火箭发射。随着玻璃纤维层数的增加,易碎盖破裂时火箭头部的Mises应力增加。气流对相邻发射筒的易碎盖的影响分布不均匀,最大Mises应力出现在盖体刻痕处。随着玻璃纤维层数的减少,易碎盖在气流冲击下的失效指数值增加。刘峰等^[22]设计制作了一种含有预制切口薄弱环节的混杂复合材料口盖试件。采用不同的冲击能量对口盖试件开展了冲击试验并建立了冲击开盖有限元模型进行对比分析。结果表明,当冲击

能量低于开盖阈值时,冲击头会反弹,开盖失败;当冲击能量高于开盖阈值且低于贯穿阈值时,能够成功沿预制薄弱环节开盖。张晓东等^[23]针对易碎盖密封性不好和铝箔内侧表面设置的十字状凹槽的筒盖外端在发射弹箭时开裂不完全而不能顺利脱落的问题,设计了一种筒箱式弹箭武器易碎盖。易碎盖结构由支撑环、阻隔层以及增强层组成。在增强层表面的中间或周边预置了应力线,使筒盖在弹箭发射时顺利脱落。为了起到较好的支撑和密封作用,采用纸环、塑料环或金属环作为支撑环,铝箔层为隔热层,布料层或塑性材料层为增强层。易碎盖防潮密封性能良好,在发射时能顺利脱落。

周光明等^[24]设计了一种玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的穿透式易碎盖。在导弹与易碎盖初始接触区域预制了偏心薄弱区,导弹顶破时盖体以四瓣形式开裂。利用有限元软件MSC Patran/Nastran建立了导弹冲破易碎盖的仿真模型,并制作了实物进行验证。结果表明,当顶破载荷较小时,易碎盖能以预定的形式破坏,并且能够承受贮存气压。钱元等^[25]在周光明等设计的平板型冲破式易碎盖的薄弱区结构基础上,改进了结构设计,易碎盖被薄弱区分割为主体与框架两部分并进行了胶接。当强度不够时,在胶接处上下面贴布条并通过调节加贴层的层数和长度来控制胶接强度。加长加贴层与主体的搭接长度,并在结构主体之间设计了一个灌满树脂的V型凹槽以保证易碎盖的密封性能。通过局部的数值模拟并结合最大应力准则预测了易碎盖的冲破压力,同时进行了实验验证所制易碎盖的性能,指出薄弱区参数对易碎盖的破坏形式和破坏压力有很大的影响。

(2)胶接薄弱区设计。

部分易碎盖设计为多瓣粘接式,多个子瓣通过胶接形成完整盖体,在发射时,子瓣沿冲击而脱粘的胶层分离,导弹射出。李文龙等^[26]为了减轻整体冲破式复合材料易碎盖分离体的质量,基于等强度设计原则设计了一种带有薄弱区的环氧树脂/玻璃纤维复合材料多瓣易碎盖,易碎盖6个子瓣通过胶接粘在一起。利用ABAQUS/Explicit显式动力学算法对易碎盖的分瓣过程进行了模拟,同时,进行了相应的冲破试验,对比分析仿真和试验结果,验证了设计方法的有效性。结果表明,提出的设计方法可以保证易碎盖在短时间内冲破,且分离体沿预设轨迹飞出,不会对导弹正常发射产生影响。余洪浩^[27]设计了一种方形多瓣复合材料易碎盖,通过有限元方法对薄弱区两个主要影响强度的参数进行了量化模拟和趋势影响分析,结合试验探究了搭接厚度和长度的变化对强度的影响。李文龙等^[28]提出了一种包含球面薄弱区和柱面薄弱区的多瓣易碎盖结构。模拟得到了薄弱区结构在不同工况下的失效载荷并绘制了强度包络线,结果表明,在其它参数不变的情况下,增加薄弱区的搭接宽度和长度,易碎盖的承载能力有不同程度的增大。

部分易碎盖在薄弱区将盖体分割为主体与框架两部分并进行胶接,导弹发射时易碎盖在胶接处发生断裂,整体被

导弹顶飞。陈海立^[29]针对该种易碎盖探究了其破坏机理,通过有限元软件ABAQUS模拟冲破过程,研究了不同型式接头承弯时的破坏机理,并基于该机理提出了新的设计方法。当易碎盖分离的主体部分质量较大时,会对周边的设备造成一定的威胁,俞鑫^[30]对整体冲破式易碎盖的分离过程进行了研究,通过改变薄弱区的强度实现了侧向分离的目的。曹然等^[31]提出了一种薄弱区结构参数化的设计方法,通过有限元模拟确定了薄弱区局部模型分析的边界条件和载荷。结果表明,薄弱区结构的剪切强度主要受薄弱区内外侧布条搭接长度的影响,而薄弱区结构的拉伸强度主要受薄弱区内外侧布条搭接厚度的影响。

(3)拓扑自锁结构设计。

拓扑自锁结构^[32]是由许多子构件按一定的规则排列并施加边界约束组合而成的一种新的整体式结构。该结构中各子构件直接接触,每一个子构件都被相邻的子构件约束,因此,结构具有较大的承载能力。在受到撞击等触发条件时,拓扑自锁结构会迅速“解锁”,子构件的约束被解除,整体结构发生碎裂。徐振钦等^[33]设计了一种拓扑自锁结构的易碎盖。当在反向施加一较小冲击力时,易碎盖可以定向断裂。模拟了易碎盖正向承受燃气射流冲击的过程并利用落锤进行了反向冲击实验,同时,进行了断裂验证。结果表明,易碎盖满足正向强度和刚度要求,设计符合要求。

2.2 针对易碎式导弹发射箱盖抗外压承载性能的结构设计与优化

目前,多数易碎式导弹发射箱盖依靠材料本身强度来抵抗外压载荷,从而起到保护和密封的作用。采用拓扑互锁结构可以增强易碎盖的抗外压能力,徐振钦等^[34]设计了一种拓扑互锁结构易碎盖,模拟了燃气射流正向冲击下易碎盖拓扑自锁的过程,并进行了相应的实验。结果表明,燃气射流冲击力不会对易碎盖造成破坏。刘宇盖等^[35]针对易碎盖外压承载能力不足而无法保证邻位导弹安全性的问题,设计了易碎盖内侧的限位支撑机构并保证了内压破坏强度基本不变,模拟了易碎盖改进前后的外压承载工况,并进行了相应的工作试验。结果表明,安装限位支撑机构后的易碎盖的外压承载能力得到了大幅度提高。仲健林等^[36]发明了一种发射箱盖外形结构参数的优化设计方法。通过解析求解发射箱盖对称截面几何特征等效的等截面梁结构在均布外压下的挠度,构建综合挠度函数,使箱盖外压承载变形挠度最小,可以最大化发射箱盖的外压承载刚度。该方法不需要进行有限元迭代仿真,优化效率高,当给定结构边界和约束条件时,能得到结构参数的最优解,使箱盖外侧承压性能最优。Cai Xuanlong等^[37]通过试验和有限元法研究了易碎盖在外压下的异常失效行为。基于失效压力、失效形式和结构强度分析,确定了屈曲失稳失效是导致易碎盖异常失效的原因,并模拟了易碎盖中心位置高度变化时的屈曲失稳状态,通过试验验证了计算方法的可靠性。结果表明,在设计易碎盖时需考虑易碎盖的稳定性。胡利鸿等^[38]设计了一种通过调节紧

定螺钉的位置和压紧力来提高抗外压承载性能的易碎盖,有效地降低了临近工位发射时产生的燃气流对易碎盖的影响。

3 易碎式导弹发射箱盖的有限元分析

易碎式导弹发射箱盖大多数由复合材料制成,在发射时受到导弹冲击被顶飞抛出,而复合材料在受到面外冲击时可能会发生基体开裂、层间分层和纤维断裂的现象,基于强度的理论模型不能很好地预测这些现象的产生,因此,需要建立有效的数值仿真模型来模拟复合材料层压板的面外冲击过程。笔者在这里详细介绍三种分析复合材料层压板冲击响应的数值模型^[39],分别为 Stacked shell model, Stacked-solid model 和 Ply splitting model。

(1) Stacked shell model。

Stacked shell model 将层压板分为单层板和层间胶层两个部分,单层板采用 S4R 壳单元进行离散,层间胶层采用厚度极小的 COH3D8 Cohesive 单元进行离散,使用 ABAQUS 中的 Tie Constraint 将 cohesive 层与相邻的单层板耦合在一起。这种耦合的建模方法相较于共享节点的建模方法,更消耗计算资源,但为层内和层间的网格密度提供了更多的选择。

Chen Shunhua 等^[40]建立了包含 Stacked shell model 在内的 6 种模拟夹层玻璃冲击的数值模型,从玻璃层开裂和加速的过程对比了不同数值模型的效果,讨论了数值算法在夹层玻璃冲击失效分析中的性能。

(2) Stacked-solid model。

Stacked-solid model 采用 C3D8R 实体单元对单层板进行离散,采用 Cohesive Surfaces 模拟层间胶层。相较于使用 Cohesive 单元,使用 Cohesive Surfaces 可以减少网格数,但每一步的迭代计算需要消耗更多资源。另外,在 ABAQUS 中没有内嵌适用于实体单元的连续损伤力学模型,用于必须自定义材料模型。

Lopes 等^[41]针对纤维增强塑料的冲击响应问题,分别建立了两种采用不同方法模拟层间行为的数值模型:厚度极小的 Cohesive 单元和 Cohesive Surfaces。对比了两种方法下载荷-位移曲线的初始斜率、分层开始时的载荷、层压板承受的最大载荷和最大分层面积,结果表明,采用 Cohesive Surfaces 模拟层间胶层的力学行为取得了更好的效果。陈亚军^[42]采用实体单元模拟单层板,在每两层板之间引入零厚度的 Cohesive 单元模拟分层损伤的产生与扩展,预测结果与试验结果相吻合。基于此模型,探究了动力学参数对复合材料层压板冲击损伤的影响。朱炜鑫等^[43]建立了基于应变描述的失效判据的复合材料层压板冲击有限元模型,每个单层板采用一层 3D 实体单元模拟,层与层之间使用无厚度的 Cohesive 单元连接,采用应力失效判据和能量释放率准则定义分层损伤的起始和演化规律,数值和试验结果的一致性表明了模型的准确性。于哲峰等^[44]针对中等质量冲头冲击作用下复合材料层压板响应的问题,建立了由实体单元和无厚度的 Cohesive 单元组成的层压板模型。采用改进的 Chang-Chang

准则预测层内损伤,对于层间分层损伤,采用平方名义应力准则预测其起始阶段,幂律断裂准则预测分层的扩展。结果表明,层压板在中等质量冲头冲击作用下产生的振动将导致层压板在冲击过程中与冲头脱离接触,板的损伤程度减小。

(3) Ply splitting model。

Ply splitting model 是基于 Stacked-solid model 改进的模型,采用 C3D8R 实体单元离散单层板,采用厚度极小的 COH3D8 Cohesive 单元离散层间胶层。

杨鹏等^[45]针对复合材料层压板在低速冲击作用下的损伤模式,建立了包含实体单元和界面单元的混合模型,每一层单层板建立一层实体单元来模拟层内力学行为,每两层实体单元之间插入厚度极薄的 Cohesive 单元来模拟层间力学行为,对建立的层压板有限元模型进行了落锤冲击模拟,与已有试验对比仿真得到的冲击力-时间曲线及损伤面积,良好的一致性证明了模型的准确性。饶辉^[46]建立了复合材料加筋板在横向冲击作用下的有限元分析模型,层压板由六面体实体单元和极薄的 3D Cohesive 单元构成,筋条由一层实体单元构成,层内采用 Hashin 失效准则,层间损伤的起始和演化由应力失效判据和能量释放率进行判断。通过试验和仿真,探究了不同位置和能量等因素对复合材料加筋板冲击性能的影响。贾雪芳^[47]采用 C3D8R 实体单元和 0.01 mm 厚的 Cohesive 单元建立了复合材料层压板的冲击响应模型,分析了层压板在多次冲击后的应变状态和损伤扩展情况,探究了冲击参数对层压板冲击响应的影响。Hongkarnjanakul 等^[48]改进了 Ply splitting model,改变了纤维失效模型,消除了纤维失效在体积有限元中的能量释放率,引入与断裂损伤演化相关的纤维压缩失效准则。通过仿真和试验的力-位移曲线中载荷的显著下降,确定发生了纤维压碎破坏。

除上述三种数值模型以外,研究人员发展了更多的冲击响应下复合材料层压板建模方法。为了研究复合材料层压板在受到面外冲击过程中的力学行为,张彦等^[49]将层压板的损伤模式分为层内损伤和层间损伤,并视层压板由复合材料子层和界面层粘接而成。建立了预测层压板冲击作用下层内和层间损伤的有限元模型,其中,单层板采用 S4R 四节点壳单元离散,针对分层损伤定义了层合板相邻子层上下界面间的接触,该接触行为采用其自定义的界面损伤演化规律。预测了碳纤维增强环氧树脂复合材料层压板在冲击下的损伤和变形,数值结果与试验结果基本一致,验证了模型的正确性。Volnei 等^[50]基于试验和有限元探究了低速冲击对碳纤维增强环氧树脂层压板的影响。分别建立了只考虑层内损伤的平面应力连续壳单元模型和考虑层内损伤与层间损伤的三维应力状态实体单元模型,对比了试验和有限元结果的冲击力-时间曲线、位移-时间曲线、能量-时间曲线和无损检测的图像,研究了铺层堆叠顺序和能量大小对冲击动态响应的影响。结果表明,只考虑层内损伤的平面应力状态模型无法预测分层损伤,导致数值结果的冲击力-时间曲线不收敛于试验结果;考虑层内损伤和分层损伤的三维应力状态模型

可以预测分层现象的产生,但不能准确模拟由剪应力引起的非线性行为;两种材料模型均不能模拟卸载后的塑性应变。储怡^[51]基于Hashin失效准则建立了S4R壳单元的单层板模拟模型,在各个壳模型层间插入0厚度的Cohesive单元模拟层间的胶层,对比分析位移曲线、应力曲线、能量曲线和层间分层面积与形状,验证了模型的合理性。陈县辉^[52]采用SC8R连续壳单元和Cohesive单元建立了层压板的冲击有限元模型,定义了相邻铺层面间的接触防止相邻铺层发生侵彻现象,将文献中的分层损伤图案及冲击力-时间曲线与仿真结果进行了对比,验证了所建立模型的有效性和可靠性。伊鹏跃^[53]没有建立胶层模型,而是在VUMAT子程序中定义了所采用的分层失效准则,基于此方法探究了冲击质量、速度、冲头半径、层压板跨度、厚度和材料参数对冲击作用下复合材料层压板的接触力和永久凹坑深度的影响。

针对易碎式导弹发射箱盖的有限元分析,主要是对发射冲破过程和抗外压承载过程的模拟。从几何结构上来说,易碎盖沿厚度方向的尺寸远小于其它两个方向的尺寸,盖体结构采用壳单元计算相较于采用实体单元计算,可以采用更少的网格数,从而减少计算量,提升效率。然而,当易碎盖在受到来自外部的压力载荷时,盖体主要承受拉弯耦合载荷的作用,沿厚度方向上的应力分布不一致,此时,采用实体单元计算可以得到更加精确的结果。

安庆升等^[54]在利用有限元分析软件ABAQUS对环氧树脂泡沫易碎盖进行仿真模拟时,针对受内、外压静强度分析的工况,采用三维C3D4实体单元构建盖体网格,而在冲破工况下,采用四边形壳单元S4构建盖体网格,验证了易碎盖的综合性能。为了得到更好的仿真精度,李绪东^[55]采用有限元分析软件ANSYS中的SOLID186实体单元对易碎盖盖体结构进行网格划分,基于最大拉应力理论模拟了易碎盖的承压和冲破过程,并进行了承压和冲破试验,对比分析仿真和试验结果,证明了易碎盖满足技术指标。徐澧明等^[56]采用C3D8R实体单元对所设计的平面整体冲破式易碎盖进行离散,考察了易碎盖在承压工况下的应力和变形分布,得到了结构参数对易碎盖最大变形的影响。蔡德咏等^[57]根据易碎盖的性能指标和战术要求,采用玻璃纤维复合材料,利用ABAQUS中的4节点减缩积分壳单元S4R划分易碎盖网格,模拟了所设计的六种易碎盖的发射冲破过程,掌握了易碎盖的破裂效果和规律。

4 结语

易碎式导弹发射箱盖作为导弹贮运发射箱的关键部件,在导弹发射时,导弹能以较小的冲击力冲破易碎盖发射出箱,在贮存和运输时,易碎盖需保证一定的强度和气密性以起到保护和密封的作用。为了解决这一对互相矛盾的需求,国内的研究人员在材料选择、结构设计优化和有限元分析等各个方面进行了大量深入的研究,取得了不小的进步,为我国的导弹武器事业发展做出了尤为重要的贡献。同时,针对易碎盖冲破性能和抗外压承载性能的优化,需进一步加在

材料选择以及结构设计方面的研究。

参考文献

- [1] Copeland R L, Greene R F, Beeler D R, et al. Protective cover for a missile nose cone: US3970006 A[P]. 1976-07-20.
- [2] Boeglin P H, Chigot C R, et al. Plate-glass fitted with an explosion-cutting device: US4333381[P]. 1982-06-08.
- [3] Bell R E, Reid W, et al. Missile weapon system: US5239909 A [P]. 1993-08-31.
- [4] 谷荣亮,等. 导弹与航天运载技术, 2009(2):12-16.
Gu Rongliang, et al. Missiles and Space Vehicles, 2009(2):12-16.
- [5] Hinton M J, et al. The world-wide failure exercise: Its origin, concept and content[M]. Amsterdam:Elsevier Ltd., 2004.
- [6] Kam T Y, et al. Composite Structures, 1997, 38(1-4):447-452.
- [7] 魏凤春,等. 材料导报, 2008, 22(S1):397-399.
Wei Fengchun, et al. Materials Reports, 2008, 22(S1):397-399.
- [8] 厄特尔,等. 聚氨酯手册[M]. 北京:中国石化出版社, 1992.
Oertel, et al. Handbook of polyurethane[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1992.
- [9] 方禹声. 精细与专用化学品, 1984, 11(9):36.
Fang Yusheng. Fine and Specialty Chemicals, 1984, 11(9):36.
- [10] 王松超. 某火箭系统易碎式密封盖研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
Wang Songchao. Research on fragile sealing cover of a rocket system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [11] Kam T Y, et al. Composite Structures, 1999, 47(1-4):563-569.
- [12] 孙志彬,等. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(6):803-808.
Sun Zhibin, et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(6):803-808.
- [13] 王敏,等. 复合材料科学与工程, 2020(9):25-28.
Wang Min, et al. Composites Science and Engineering, 2020(9): 25-28.
- [14] 马飞. 易碎式密封盖的设计和制作[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
Ma Fei. The design and manufacture for composite frangible cover [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [15] 徐文彬. 科学技术创新, 2019(17):88-89.
Xu Wenbin. Scientific and Technological Innovation, 2019(17): 88-89.
- [16] 苑晓旭,徐志明,许以欣,等. 碳纤维复合材料易碎盖[P]: CN110953929A[P]. 2020-04-03.
Yuan Xiaoxu, Xu Zhiming, Xu Yixin, et al. Carbon fiber composite fragile cover: CN110953929A[P]. 2020-04-03.
- [17] 张中利,等. 爆炸与冲击, 2008(1):62-66.
Zhang Zhongli, et al. Explosion and Shock Waves, 2008(1):62-66.
- [18] 卓毅,等. 包装工程, 2017, 38(3):46-50.
Zhuo Yi, et al. Packaging Engineering, 2017, 38(3):46-50.
- [19] 张晓艳,等. 材料工程, 2012, 351(8):5-9.
Zhang Xiaoyan, et al. Journal of Materials Engineering, 2012, 351 (8):5-9.
- [20] 王迪. 易碎式发射箱盖的设计与优化[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
Wang Di. Design and optimization of fragile launch canister cover

- [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [21] Wang Huifang, et al. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1 676(1). DOI:10.1088/1742-6596/1676/1/012105.
- [22] 刘峰,等.兵器装备工程学报,2021,42(9):264–272.
Liu Feng, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(9):264–272.
- [23] 张晓东,李月平,蒲利君,等.一种筒/箱式弹箭武器易碎穿通盖:CN201653274U[P].2010-11-24.
Zhang Xiaodong, Li Yueping, Pu Lijun, et al. Fragile penetrating cover for a barrel/box-type projectile weapon: CN201653274U [P].2010-11-24.
- [24] 周光明,等.宇航学报,2006(2):126–130,166.
Zhou Guangming, et al. Journal of Astronautics, 2006(2): 126–130, 166.
- [25] 钱元,等.航空学报,2012,33(3):487–493.
Qian Yuan, et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33 (3):487–493.
- [26] 李文龙,等.弹箭与制导学报,2019(1):21–24.
Li Wenlong, et al. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019(1):21–24.
- [27] 余洪浩.冲破式方形多瓣易碎盖的结构设计与试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
Yu Honghao. Structure design and experiment research on square fragile cover made of multiple parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- [28] 李文龙,等.兵器装备工程学报,2016,37(12):135–139.
Li Wenlong, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(12):135–139.
- [29] 陈海立.冲破式复合材料易碎盖破坏机理研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
Chen Haili. Research on failure mechanism of bursting-type composite canister cover[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [30] 俞鑫.圆形复合材料易碎盖的冲破性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
Yu Xin. Research on the breakthrough performance of circular composite fragile cover[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [31] 曹然,等.固体火箭技术,2015,38(4):549–553,561.
Cao Ran, et al. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(4): 549–553, 561.
- [32] 魏凤春,等.兵工学报,2008,29(12):1 454–1 457.
Wei Fengchun, et al. Acta Armamentarii, 2008, 29(12): 1 454–1 457.
- [33] 徐振钦,等.工程塑料应用,2009,37(8):48–51.
Xu Zhenqing, et al. Engineering Plastics Application, 2009, 37(8): 48–51.
- [34] 徐振钦,等.振动与冲击,2010,29(4):77–80,232.
Xu Zhenqing, et al. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4): 77–80, 232.
- [35] 刘宇盖,等.理化检验(物理分册),2019,55(1):1–4,18.
Liu Yugai, et al. Physical Testing and Chemical Analysis, Part A: Physical Testing, 2019, 55(1):1–4, 18.
- [36] 仲健林,任杰,赵昌方,等.方形发射箱装置中箱盖外形结构参数优化设计方法:CN111475984B[P].2020-09-15.
Zhong Jianlin, Ren Jie, Zhao Changfang, et al. Optimal design method of shape and structure parameters of box cover in square launch box device: CN111475984B[P].2020-09-15.
- [37] Cai Xuanlong, et al. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21:1 252–1 256.
- [38] 胡利鸿,王明珠,许超营.一种提高反向承压能力的新型易碎端盖:CN207816097U[P].2018-09-04.
Hu Lihong, Wang Mingzhu, Xu Chaoying. A new type of fragile cover with improved reverse pressure bearing capacity: CN207816097U[P]. 2018-09-04.
- [39] Bogenfeld R, et al. Engineering Failure Analysis, 2018, 86:72–99.
- [40] Chen Sunhua, et al. Composites Part B Engineering, 2017, 122(8): 47–60.
- [41] Lopes C S, et al. International Journal of Impact Engineering, 2016, 92(1):3–17.
- [42] 陈亚军.动力学参数对复合材料层压板低速冲击损伤特性的影响研究[D].上海:上海交通大学,2012.
Chen Yajun. Effect of dynamics parameters on low-velocity impact damage in composite laminates[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [43] 朱炜焱,等.复合材料学报,2010,27(6):200–207.
Zhu Weiyao, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 200–207.
- [44] 于哲峰,等.固体力学学报,2013,34(6):557–561.
Yu Zhefeng, et al. Acta Mechanica Solida Sinica, 2013, 34(6): 557–561.
- [45] 杨鹏,等.机械与电子,2013(4):78–80.
Yang Peng, et al. Achinery & Electronics, 2013(4):78–80.
- [46] 饶辉.复合材料加筋板低速冲击损伤研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
Rao Hui. Research on low-velocity impact damage of composite stiffened panels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [47] 贾雪芳.复合材料层合板低速冲击有限元模拟分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
Jia Xuefang. Damage simulation of composite laminates subjected to low velocity impact[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [48] Hongkarnjanakul N, et al. Composite Structures, 2013, 106(12): 549–559.
- [49] 张彦,等.复合材料学报,2006,23(2):150–157.
Zhang Yan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(2): 150–157.
- [50] Volnei T, et al. Composite Structures, 2008, 83(4):413–428.
- [51] 储怡.复合材料层合板的冲击数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
Chu Yi. Numerical simulation of composite laminates under impact[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [52] 陈县辉.基于内聚力单元的层合板低速冲击响应模拟研究[D].太原:中北大学,2014.
Chen Xianhui. Simulation research on low-velocity impact responses of laminates based on cohesive element[D]. Taiyuan:

- North University of China, 2014.
- [53] 伊鹏跃. 基于有限元与解析法的复合材料冲击响应参数分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- Yi Pengyue. Parametric Study on the impact responses of composite laminates based on finite element method and analytical model [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [54] 安庆升, 等. 复合材料科学与工程, 2021(5):73-79.
- An Qingsheng, et al. Composite Science and Engineering, 2021 (5):73-79.
- [55] 李绪东. 一种平板型复合材料薄膜盖的应用研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2019.
- Li Xudong. Study on the application of a flat composite film cover [D]. Beijing: Academy of Machinery Science and Technology, 2019.
- [56] 徐澧明, 等. 上海航天(中英文), 2021, 38(1):119-127.
- Xu Liming, et al. Aerospace Shanghai(Chinese & English), 2021, 38(1):119-127.
- [57] 蔡德泳, 等. 系统仿真学报, 2012, 24(2):284-288.
- Cai Deyong, et al. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 284-288.

CHINAPLAS 2023聚势创新

主动出击抢抓橡塑大市场新机遇

当前全球制造业面临经济下行压力明显、疫情发展不确定性、原材料价格波动、能源危机、通货膨胀等挑战,与此同时也迎来RCEP红利、粤港澳大湾区发展空间辽阔、经济社会绿色转型、数字化转型、新兴产业对橡塑的需求上升等诸多机遇。

雅式展览服务有限公司总经理梁雅琪女士表示,直面挑战、抢抓橡塑大市场新机遇,CHINAPLAS将激活多年沉淀的上下游资源,线上线下全面主动出击,推动业界持续创新抢占先机。以“启新程·塑未来·创新共赢”为主题,全球橡塑高科技大展——“CHINAPLAS 2023 国际橡塑展”将于2023年4月17~20日聚势回归深圳国际会展中心。展会启用38万平方米展示面积,集结3 900+家海内外优质展商,汇聚具创新性的橡塑解决方案及行业信息,助全球买家找到开启灵感 and 时代商机的“金钥匙”。

1 共享RCEP超级“朋友圈”新机遇

2022年1月1日,占全球人口数量、经济体量及贸易总额1/3的《区域全面经济伙伴关系协定》(RCEP)正式生效。区域内90%以上的货物贸易将逐步实现零关税。这一全球最大自贸区的启航将改写全球经贸格局,推动亚洲形成更加开放的大市场,加快全球经济重心不断向东转移的趋势。

RCEP落地以来,为区域和全球经济复苏注入了“强心剂”。我国海关数据显示,2022年前8个月,我国与RCEP其它14个成员国的进出口额同比增长7.5%。据美国彼得森国际经济研究所测算,预计到2030年,RCEP有望带动成员国国民收入净增加1860亿美元。RCEP成员国是“CHINAPLAS 国际橡塑展”重要的客源区,展会立足中国、面向亚洲、辐射全球,将与橡塑材料、机械供应商及下游应用行业进一步共享RCEP红利。

2 深耕大湾区,引领橡塑高质量发展

研究与试验发展(R&D)经费,是国家对科技创新支持力度的直观体现,也在很大程度上反映出经济转型升级进程和高质量发展水平。2022年8月31日,《2021年全国科技经费投入统计公报》正式发布。2021年中国R&D经费投入总量达到2.8万亿元,比2020年增长14.6%,研发强度达2.44%。

其中广东省依然是最舍得在研发投入“砸钱”的省份,而深圳则位列广东榜首,R&D经费投入强度达5.46%。

粤港澳大湾区是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,无论是科技创新水平、高端制造业,还是吸收外资的规模及质量,大湾区都在全国占据着举足轻重的地位。“CHINAPLAS 国际橡塑展”再次落户大湾区核心引擎城市——深圳,在这片诞生“中国奇迹”的热土上激发行业创新,将加快构建橡塑业新发展格局。

3 拥抱创新,塑造人类美好生活

“CHINAPLAS 国际橡塑展”上推出的升级创新技术及智能化解决方案,不仅能够更好地帮助企业抢抓RCEP和大湾区的新商机,还可即时响应市场的快速变化。

碳中和大背景下,我国正推进新能源、新材料的可靠替代过程,并积极推进经济社会全面绿色转型。新能源汽车迎来井喷式增长,光伏、风电、氢能、储能等市场发展迅猛,对上游高性能材料、设备的需求暴增。此外,新一代信息技术、预制菜包装、冷链运输、单一材质环保包装、医疗健康、国防军工、生物塑料在各行业的应用等成为行业关注焦点,释放出对橡塑创新与突破的新需求。

3 900多家知名参展商已确认参加2023届展会,其中包括来自奥地利、法国、德国、日本、英国等9个国家及地区展团,以18大主题专区,涵盖注塑成型方案、挤出机械、3D技术、回收再生科技、智能制造解决方案、复合及特种材料、热塑性弹性体及橡胶等。

“CHINAPLAS 国际橡塑展”已成为塑料橡胶上游供应商推出新产品和解决方案、展示创新材料与机械的首选平台。展会中既有来自世界各地的突破性、前瞻性技术成果,亦有自主创新的中国科技。这些技术正朝着“功能化、轻量化、精密化、生态化、智能化”的创新方向发展,迎合不同应用行业买家的需要,如汽车、包装、电子电气、医疗、建材、新能源、循环再生、运动与休闲等。

除了产品的展示与交流,展会还将推出许多不容错过的同期活动,包括循环经济、工业4.0、设计X创新等主题,为业界人士打造探索橡塑行业趋势、技术突破和拓展人脉的重要阵地。详情即将公布,敬请期待!

(雅式展览服务有限公司)