

拓扑互锁易碎复合材料隔水罩的设计与试验研究^{*}

魏凤春¹ 张 晓² 张秀丽¹ 张 恒¹

(1. 郑州大学材料工程学院, 郑州 450052; 2. 河南省公路工程局集团有限公司, 郑州 450052)

摘要 导弹发射筒盖与导弹弹体之间的隔水罩必须具备足够的强度和刚度以抵抗海水进筒时的冲击力和进筒后的压力,而在导弹射出筒前的瞬间隔水罩必须能够在外加触发条件下自行碎裂,使导弹顺利通过。为实现这一工作机制,采用拓扑互锁原理和有限元方法设计了拓扑互锁易碎复合材料隔水罩,并根据相似理论制作了隔水罩模型。试验表明,所设计的拓扑互锁结构满足承压要求;当在反向施加一较小冲击力时,承载层各子构件的拓扑互锁约束被解除,互锁功能消失,使结构完成触发碎裂。有限元分析结果与试验结果基本吻合。

关键词 拓扑互锁 隔水罩 复合材料 有限元法 触发碎裂

当今世界最有威慑力的战略核导弹是由机动性好、不易被发现的核潜艇从深海水下发射的。导弹发射前,首先要打开发射筒盖,此时会有海水涌入发射筒。为防止海水接触导弹,在发射筒盖与导弹弹体之间设置了一个隔水罩。隔水罩必须具备足够的强度和刚度以抵抗海水进筒时的冲击力和进筒后的压力。而在导弹射出筒前的瞬间,它必须能够在外加触发条件下自行碎裂,使导弹顺利通过。

目前深海水下导弹发射装置的隔水罩大多采用导爆索爆炸切割的方法来实现自行碎裂。该方法在确保导弹顺利通过方面十分可靠,但存在着电子元件和火工品因长期存放(战略核导弹都面临的情况)可能失效及爆炸时的冲击波可能会伤害导弹头部内的电子元件的缺点^[1]。

国外一些发达国家已经研制出先进的易碎发射筒隔水罩,其密封性能较好,且能承受外部冲击,导弹发射时只需施加微小的集中力即可将其撞破,使导弹顺利通过。如英国的 GWS-26 I 型“海狼”垂直发射系统^[2]、俄罗斯 C-300 导弹垂直发射装置^[3]及 SA-N-6“力夫”导弹垂直发射系统的箱盖^[4]等。国内航天材料及工艺研究所也研制出了与国外产品性能很近似的易碎发射筒隔水罩。笔者设计的隔水罩尺寸见图 1,其工作要求为:①耐 1.5 MPa 静水压力;②可按工作要求自行碎裂成多块;③满足精度要求。

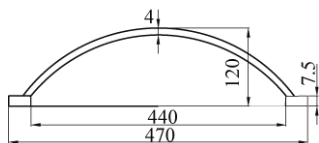


图 1 隔水罩尺寸示意图

工艺等多方面的因素,提出一种新的易碎复合材料结构,采用拓扑互锁原理满足隔水罩结构的强度和刚度要求;当在反向施加一较小冲击力时,隔水罩可完成触发碎裂。对研制出的隔水罩进行强度有限元分析和强度检测,并制作了模型进行试验,有限元分析结果与试验结果基本吻合。

1 拓扑互锁易碎复合材料隔水罩结构设计

德国克劳斯塔尔大学的 Y. Estlin 教授和澳大利亚的 A. V. Dyskin 博士等^[5]首先提出了一种利用许多有特殊相同形状、尺寸的子构件按一定的规则排列并施加边界约束,组合成一种可承载的拓扑互锁复合结构。他们^[6]还对此结构的某一个子构件承受集中载荷时的整体力学性能进行了实验研究,发现它在材料可设计性及阻止子构件中的裂纹扩展方面具有独特的优点。笔者借用拓扑互锁结构作为隔水罩结构的承载层,利用其整体承载及其子构件之间接触面无粘结、约束解除时即可散落成规定碎块的性能来达到隔水罩的工作要求。图 2 示出拓扑互锁易碎复合材料隔水罩的结构。由图 2 可看出,其承载层(B 层)采用的许多子构件是按一定的规则排列并施加边界约束的,各子构件相互以曲面或平面接触而无粘结,每一个子构件都被相邻子构件的接触面所固定。考虑到子构件的制造误差和装配误差,以及拓扑互锁结构可能存在的密封问题,又专门设计了复合于拓扑互锁承载层上的密封层(A 层)。它是由复合材料制成的连续层,与每一个子构件粘结,同时对每一条子构件之间的接触缝隙起密封作用。这样一来,整个结构既具有良好的密封性能和

^{*} 国家自然科学基金资助项目(10472106)

收稿日期:2007-10-19

承载能力,又可在遇到撞击使子构件之间的约束被解除时自动散落,完成触发碎裂的工作机制。

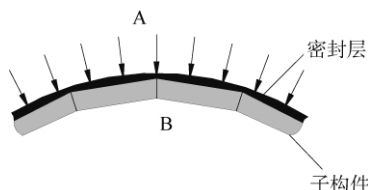


图2 拓扑互锁易碎复合材料结构示意图

隔水罩除具有足够的强度和刚度外,还要满足气密、抗振、耐老化、耐“三防”、耐高低温等要求。环氧树脂具有很强的内聚力,分子结构致密,且粘接性能优异,因此密封层材料选用环氧树脂可满足各项要求,而且可较好地与承载层各子构件粘接;承载层选用由不饱和聚酯树脂和玻璃纤维复合而成的呈各向异性的复合材料。

2 隔水罩有限元建模和失效分析

2.1 有限元模型

由于承载层子构件拓扑接触,而拓扑自锁结构子构件接触面形状复杂,很难得到理论解以指导结构设计,故采用接触单元来模拟相邻块子构件的接触,即咬合、摩擦、分离、撞击等不同状况。在建模过程中,将结构看作一个轴对称旋转体,考虑双向对称,取结构 1/4 建模,计算中拓扑接触面采用接触单元。有限元网格划分采用四边形结合三角形进行网格离散。网格划分如图 3 所示。

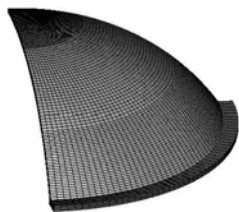


图3 隔水罩有限元网格划分

2.2 接触单元的建立

接触是一种高度的非线性行为,由于考虑摩擦使问题变得困难,这就需要较大的计算机资源^[7]。为了进行切实有效的计算,理解问题的物理特性和建立合理的模型是很重要的。考虑到本结构的实际情况,选择面-面接触单元,目标单元为 TARG174 单元,接触单元为 CONTA170。在生成接触时选择对称接触对,以利于收敛。

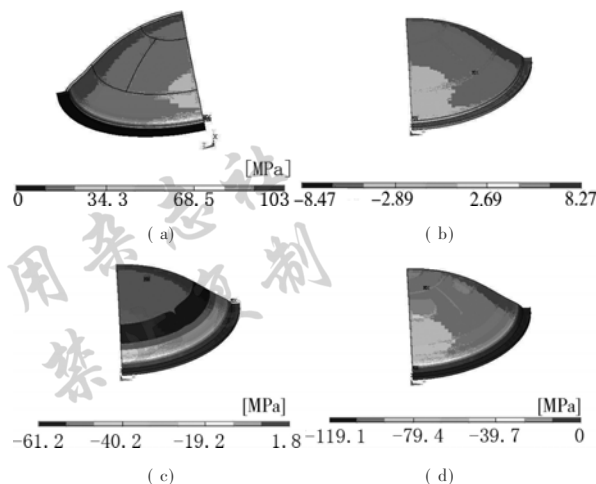
2.3 边界条件和约束力的施加

约束结构底端为全部自由度。将水压处理成均布载荷分布于隔水罩的外表面。考虑到双向对称,对称面处理成对称约束。

2.4 结果分析

(1) 承压结果分析

图 4 所示为拓扑互锁结构隔水罩等效力场等值线图和各方向应力云图。从图 4 可知,承受 1.5 MPa 水压后,最大位移为 1.157 mm,最大应力 103 MPa,而复合材料的许用弯曲应力为 120 MPa,压缩应力为 190 MPa,满足受压条件。从三个方向的应力云图可知,隔水罩端部固定处有应力集中,由于复合材料表面硬度较低,抗挤压能力低,因此可在端面法兰处复合一层金属薄板。



a—等效力场; b—X 方向应力分布;
c—Y 方向应力分布; d—Z 方向应力分布

图4 隔水罩等效力场等值线图和各方向应力云图

(2) 触发碎裂结果分析

反向在内部施加 375 N 的集中力后,最大剪切应力达到 36.4 MPa,隔水罩碎裂,见图 5。图 5 示出隔水罩其它部位的切向拉应力降低,而槽根部存在一个压应力区,因此槽尖处产生应力集中,裂纹将沿槽尖扩展,直至断裂。

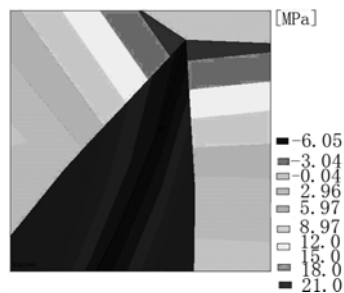


图5 隔水罩受冲击力等效力场等值线图

3 隔水罩试件制作与试验研究

3.1 试件制作

根据设计分析及相似理论,使实物与模型的比例为 5:1。按模型尺寸制作模具,采用手糊成型法

制作隔水罩试件。裁剪玻璃纤维布时应注意裁布的方向性要遵守设计要求,圆环制品要利用布的变形性,裁剪成经纬向 45° 的布条,在模具上铺层。铺层达到预定厚度后常温固化并进行热处理,使其达到强度要求。然后通过机加工的方法进行分块,最后装配成型,同时施加预压力,在外层涂抹环氧树脂形成密封层。图6为制成的隔水罩模型照片。

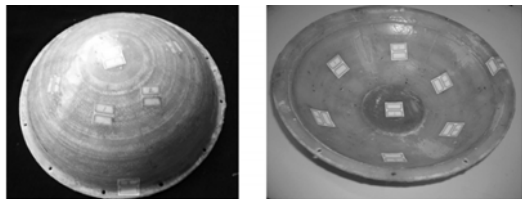


图6 隔水罩模型照片

3.2 试验过程

承压试验装置示意图如图7所示。把试件按要求放到压力试验机上,缓慢施加载荷,通过特制压头,用转换压头的方式模拟均匀水压的加载。根据要求施加到 1.5 MPa 停止加载。通过压力传感器和电阻应变仪将采集结果输入计算机。触发碎裂试验时先反向固定好试件,使其外表面悬空,然后通过试验机直接加压于压力传感器,然后传递到试件内壁中心处,试件碎裂瞬间通过计算机显示的传感器电压值得此时的静压力。

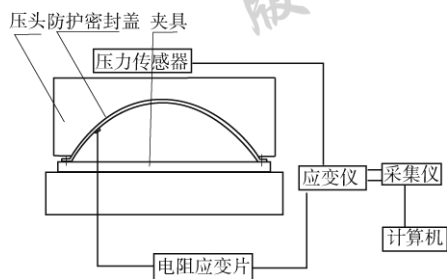


图7 承压试验装置示意图

3.3 试验结果分析

分析平面应变时,若在确定的坐标轴下已知测点的 x 方向线应变 ε_x 、 y 方向线应变 ε_y 和剪应变 γ_y ,则测点处任意方向 α 的线应变与剪应变可由式(1)表示为:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha - \frac{\gamma_y}{2} \sin 2\alpha$$

$$\gamma_\alpha = (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin 2\alpha + \gamma_y \cos 2\alpha \quad (1)$$

直接测量平面应变时,由于剪应变 γ_y 不易测量,一般先测出在3个选定方向 α_1 、 α_2 和 α_3 上的线应变 ε_{α_1} 、 ε_{α_2} 和 ε_{α_3} 。根据所贴三轴 45° 直角应变,其

主应变 ε 、主应力 σ 分别为:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}}{2} \pm \left(\frac{\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ} - 2\varepsilon_{45^\circ}}{2} \right)^2$$

$$\sigma = \frac{E}{2(1-\mu)} (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) \pm \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ} \right)^2 + \left(\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ} \right)^2 \quad (2)$$

式中: E 为材料的弹性模量, μ 为材料的泊松比。

式(2)中取“+”时为最大值,取“-”时为最小值。由试验所得数据,根据式(2)可计算出三个方向的最大应变和最大应力。由计算结果可知,所测点的应变没有随着载荷的增加而急剧增大,说明在测量点没有应力集中现象,且最大应力均不超过 100 MPa ,和有限元分析结果基本吻合;试件受到反向集中力的作用发生触发碎裂时所测压力值为 372.4 N ,这也与有限元分析结果基本一致。

4 结语

采用拓扑互锁原理和有限元方法设计了拓扑互锁易碎复合材料隔水罩,并根据相似原理在实验室制作了隔水罩模型。承压和触发碎裂试验表明,所设计的拓扑互锁结构承压能力高于同材料整体结构,满足承压要求;反向在内部施加一较小冲击力时,子构件之间的约束被解除,结构可自动散落。有限元分析结果与试验结果基本吻合。这种研究方法和结果对易碎复合材料结构的设计和应用提供了依据。该结构还可以扩展到各种形状和尺寸的构件,为复合材料的结构设计提供了新的思路和方法。

参考文献

- [1] 孙甫. MY-9易碎材料在武器系统上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2002(2): 25-28.
- [2] 国外舰载导弹垂直发射技术发展状况研究[EB/OL]. <http://www.ncit.edu.cn/redth/gfyd/jskt.asp?id=271>. 2007-10-19.
- [3] 金钊, 陈思庄. 航空导弹垂直发射系统发展概况[J]. 航空导弹, 2006(1): 23-27.
- [4] 常卫伟. 舰载导弹垂直发射系统巡礼[J]. 舰载武器, 2004(1): 65-68.
- [5] Dyskin A V, Estrin Y. Toughening by fragmentation—How topology helps[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 11(3): 885-888.
- [6] Dyskin A V, Estrin Y, Kanel-Belov A J, et al. A new principle in design of composites materials: Reinforcement by interlocked element[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 483-491.
- [7] 宁桂峰, 满翠华. 有限元接触分析应用研究[J]. 现代制造工程, 2005(4): 66-68.

DESIGN AND EXPERIMENT FOR TOPOLOGICAL INTERLOCKING FRAGILE COMPOSITE WATER-RESISTING COVER

Wei Fengchun¹, Zhang Xiao², Zhang Xiuli¹, Zhang Heng¹

(1. Materials Science and Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Henan Highway Engineering Bureau Group Corporation Limited, Zhengzhou 450052, China)

ABSTRACT In order to meet the special working mechanism of water-resisting cover, topological interlocking fragile composite water-resisting cover was designed through topological interlocking principle and finite element method. The cover model was manufactured according to. The experimental results indicated that the bearing ability of topological interlocked structure could meet the requirement. The topological interlocking restrain of every structural parts of the load-supporting layer was released which lead to the interlocking function vanished when a little impact force was applied to the undersurface opposite. The contact gap between the structural parts guided the crack to make the seal course fracture, which made the structure completing the trigger fracture work principle. Finite element method calculation results agreed well with experimental results.

KEYWORDS topological interlocking, water-resisting cover, composite, finite element method, trigger fracture

国内市场蓬勃发展,工程塑料产业空间有多大

近年来,工程塑料以其优异的性能获得了越来越广泛的应用。据不完全统计,近年来,国内通用的聚碳酸酯(PC)、聚甲醛(POM)、聚酰胺(PA)、热塑性聚酯(PBT、PET)、改性聚苯醚(MPPO)等五大工程塑料的市场需求持续增长。有关专家预测,到2010年工程塑料的总需求量将达到167万t;未来数年内工程塑料市场需求量还将持续快速地增长,我国的工程塑料产业将步入产需两旺的佳境。

(1) 国内市场蓬勃发展 目前工程塑料制品主要是用于家电、电子、汽车、通信等行业的配套件。正是相关制造业的蓬勃发展,带动了我国工程塑料制品需求量的大幅度上升。2007年全国五大工程塑料的市场需求已达80万t,其中PA达16.5万t,PC达40.5万t,POM达14万t,PET和PBT合计达6.8万t,MPPO达2.2万t。以家电行业来说,今后仅以冰箱、冷柜、洗衣机、空调及各类小家电产品每年的工程塑料需求量将达60万t左右。汽车也是工程塑料应用的主要领域,其中轿车将占40%左右,需要各种工程塑料配件约40万t。用于通信基础设施建设及铁路、公路建设等方面的工程塑料用量则更为惊人。此外,工程塑料还在航天、电子等领域获得了普遍应用,经济效益极为显著。专家介绍,工程塑料在轴承上也具有广阔的应用前景。这是因为工程塑料具有优异的自润滑性、耐磨性、低摩擦因数和特殊的抗咬合性等特点,即使在润滑条件不良的情况下也能正常工作,用作轴承材料可谓适得其所。目前,我国尚处于起步阶段,发展空间还很大。

国内旺盛的市场需求引来了众多的跨国巨头,从20世纪90年代中期起,以美国GE、杜邦公司为首的一大批跨国公司就纷纷进入中国投资建厂,韩国化学等公司则是选择合资方式进入中国市场。这些跨国巨头的到来,客观上刺激了国内工程塑料产业的发展,也对国内工程塑料生产企业造成了极大的压力。

(2) 结构规模有待调整 有关专家指出,尽管前景诱人,但目前我国工程塑料行业的发展仍存在种种不尽如人意

之处,其中最突出的一点是,我国工程塑料的品种结构并不合理,基本上都是通用工程塑料,高附加值特种工程塑料树脂几乎是空白。而在通用工程塑料中,大部分企业生产工程塑料改性树脂,从事基础树脂生产的企业所占比例甚少。从整体上来看,由于缺乏大型龙头企业作为行业支撑,导致国内企业市场占有率偏低,竞争能力不强。

就经营规模而言,我国工程塑料企业多为千吨级生产装置或工业化试验装置,而国外企业的年生产能力多为万吨级以上。规模和工艺水平上的巨大差异使得国产工程塑料难以满足国内市场需求,产品性能和价格都无法与进口产品相竞争,我国已连续多年成为世界最大的工程塑料进口国。

(3) 未来发展科技为本 我国工程塑料业的发展现状引起了国家相关部门的高度重视。在工程塑料工业“十一五”发展规划中明确提出,要尽快提高我国工程塑料的产业化水平,并根据不同品种的产业化程度高低采取不同的策略。业内专家分析认为,今后我国工程塑料产业的发展将呈现出如下趋势:①环境因素将成为未来新产品开发的关键问题之一。出于可持续发展战略的考虑,今后开发产品必须以节能、省料和有利于环保为前提。基于同样的理由,塑料废弃物的有效回收利用也将成为今后的一大重要课题,尤其是工程塑料的回收利用将成为未来一大热点。②一方面要靠自己的力量,另一方面也要利用国外的技术与资金,关键是把各方面的力量集中起来,形成一股合力,才能形成较大规模的工业化生产,尽快形成产业化。聚合物改性中,纳米材料的应用、液晶材料的原位复合都会给塑料行业带来极大的影响。今后纳米技术的研究是不可缺少的部分,可能会给工程塑料行业发展带来意想不到的结果。通用塑料的工程化及工程塑料的高性能化和低成本化将是未来工程发展的最重要趋势。③我国工程塑料企业还必须提高产品功能,通过各种方法满足各工业部门对材料性能的多样化要求,提高技术含量,降低产品成本,尽快提升全行业的核心竞争能力。惟有如此,我国的工程塑料企业才能在激烈的市场竞争中立足,并赢得进一步发展壮大的时间和空间。(中华塑网)