

doi: 10.7690/bgzdh.2021.04.019

爆炸冲击下防护罩安全性能分析与优化设计

郭进勇, 余 瑶, 李 昂, 张 博, 韩智鹏, 雷 林

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为验证弹药装配中防护罩结构设计的合理性, 提高安全防护性能。针对 15 mm 厚的防护罩采用理论计算与静力学分析, 判断出防护罩结构的失效区域, 提出增加厚度到 30 mm, 顶部设置 2 个 100 mm×100 mm 方形泄爆口的改进方案, 通过爆炸冲击过程动力学模拟, 评估厚度、泄爆口对防护罩安全性能的影响。结果表明: 在不改变外形尺寸的情况下, 优化后的防护罩能够满足抗爆设计要求, 从而防止意外事故下对设备和人员的伤害, 为大当量装药的小尺寸防护罩设计提供参考。

关键词: 冲击波; 防护罩; 强度; 有限元; 泄爆

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Safety Performance Analysis and Optimization Design of Protective Cover Under Explosion Impact

Guo Jinyong, Yu Yao, Li Ang, Zhang Bo, Han Zhipeng, Lei Lin

(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to verify the rationality of protective cover structure design in ammunition assembly and improve safety protection performance. The failure area of 15 mm thick protective cover is judged by theoretical calculation and statics analysis, and the improvement scheme of adding wall thickness to 30 mm, with two 100 mm *100 mm square vent is put forward. The influence of wall thickness and vent on the safety performance of protective cover is evaluated by dynamic simulation of explosion impact process. The results show that the optimized protective cover can meet the requirements of anti-explosion design without changing the shape size, thus preventing the injury to equipment and personnel under accident, and providing reference for the design of small size protective cover for large amount charging.

Keywords: shock wave; protective cover; strength; finite element; explosion venting

0 引言

弹药制造全过程中, 装药装配是赋予弹药产品毁伤能力、形成弹药产品的关键阶段和最终阶段。弹药装药装配过程中会直接接触, 甚至加工敏感性极高的含能材料及其零部件, 存在极大的安全风险, 具有高危险性。弹药的含能特性决定了它存在意外起爆的可能, 而装药体在加工、装配过程中可能会承受拉压弯扭、温度变化等热力载荷。在这些外部载荷作用下, 内部缺陷引起的热点效应进一步提升了发生爆炸事故的几率。此类事故往往会损害社会利益, 严重影响军工企业的生产效益和生产安全; 因此, 一些高危的操作单元外部需增设防护罩, 如压药、结弹等工序。防护罩能够一定程度上减轻爆炸事故对外界的破坏, 将损害控制在一定范围。

爆炸冲击载荷下材料的防护性能备受关注, 包括各种复合材料^[1-2]、特种材料^[3-5]抗爆性能的研究,

手段以实验研究与数值模拟为主。王永刚等^[6]对爆炸载荷下泡沫铝的抗冲击能力开展了实验研究与数值模拟。崔小杰等^[7]对泡沫铝材料的防护性能进行了参数化的模拟分析。马洋洋等^[8]针对多层复合结构的抗爆防护问题, 应用数值仿真的手段对高强度钢、聚脲弹性体、泡沫铝、超高分子量聚乙烯材料组成的不同结构、不同厚度分配下多层复合结构开展了数值优化设计与抗爆性能研究, 初步试验验证了最佳抗爆性能的多层复合结构。杨鑫等^[9]通过对空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的研究成果进行比较分析, 并据此拟合出能较好地描述冲击波超压峰值与比例距离关系的表达式。

笔者基于工程应用背景, 对弹药装配生产线上某高危工序中防护罩的结构设计与抗爆性能进行分析, 采用有限元方法, 验证防护罩结构设计的合理性, 提出增加壁厚与设计泄爆口的改进方案, 以提高其安全防护性能, 为大当量装药的小尺寸防护罩

收稿日期: 2020-12-29; 修回日期: 2021-02-10

作者简介: 郭进勇(1985—), 男, 陕西人, 硕士, 高级工程师, 从事高危产品多学科协同设计与仿真分析研究。E-mail: hzfdgijy@163.com。

设计提供参考。

1 静力学分析

弹药装配工序中，防护罩结构尺寸长宽高分别为 600 mm×400 mm×850 mm，厚度最初设计为 15 mm，外部防爆门厚度为 20 mm。采用六面体单元主导的结构化网格，网格尺寸定为 8 mm，保证沿厚度方向有 2 层网格。划分后共计 400 779 个节点、75 726 个单元，有限元模型结构见图 1，防护罩底部与工位基座相连，视为固定约束。

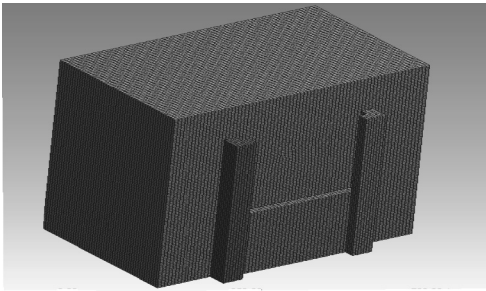


图 1 防护罩有限元模型

由于爆炸情况下的冲击波载荷很大，防护罩尺寸较小，计算中需考虑防护罩的塑性变形，故采用双线性的弹塑性本构关系。罩体材料选取性能优异的 45#钢，其材料参数见表 1。

表 1 45#钢材料参数

密度/ (kg/m ³)	弹性 模量/GPa	切线 模量/GPa	泊松比	屈服 极限/MPa	抗拉 极限/MPa
7 890	209	2.09	0.269	355	600

防护罩前后壁面距离爆炸中心最近，为危险面，均布载荷下其静态失效载荷为：

$$p_s = 12M_0 / (b \tan \varphi)^2 ; \tag{1}$$

$$M_0 = Yh^2 / 4 ; \tag{2}$$

$$\tan \varphi = \sqrt{3 + (b/a)^2} - b/a . \tag{3}$$

其中： M_0 为材料塑性极限弯矩，MPa； Y 为材料屈服强度，MPa； h 为防护罩高度，mm； a 为防护罩高度，mm； b 为防护罩宽度，mm。

经计算得到防护罩前后壁面均布压力 p_s 为 0.492 MPa 时，结构达到静态失效载荷，将产生塑性变形。实际上，内部弹药爆炸后，罩体壁面承受的是非均布载荷，压力值与位置密切相关。45#钢在超出屈服应力后仍具有较大的承载能力。罩体某区域内应力达到屈服应力后进入塑性变形阶段，根据双线性弹塑性本构关系，随着外部载荷继续增大，屈服区内应力增长变缓，但屈服区逐渐扩大。此外，防护罩外部的结构对罩体本身也有一定加强作

用。基于此，初步在罩体内壁面施加 10 倍静态失效载荷的均布压力 (5 MPa)，考查其静态变形失效模式，鉴别出防护罩结构的危险点。需指出：文中罩体失效是指内部应力超过材料的极限应力，而非一般工程中定义的超过屈服应力即为失效。

在 ANSYS Workbench 中调用静力结构模块进行有限元计算。内压为 5 MPa 时防护罩的位移云图如图 2。从计算结果可知：前壁面变形最大，为首要危险区域，最大位移约为 51.9 mm。根据等强度的结构设计理念，前后壁面距离爆炸点最近，需使用最厚的钢板，并在关键核心位置进行加强，侧壁面次之，顶部可采用相对较薄的钢板，这样可进一步优化防护罩结构，节约成本。

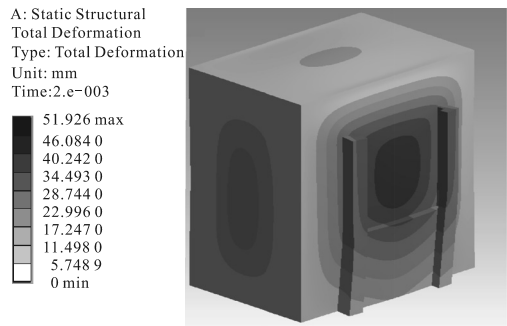


图 2 内压为 5 MPa 时的位移云图

图 3 中：罩体最大主应力在底部固支处，大部分区域的最大主应力已超过 45#钢的极限拉伸强度 600 MPa，说明当前结构已经大面积失效，15 mm 厚的防护罩结构不能承受内壁面 5 MPa 的均布载荷作用。

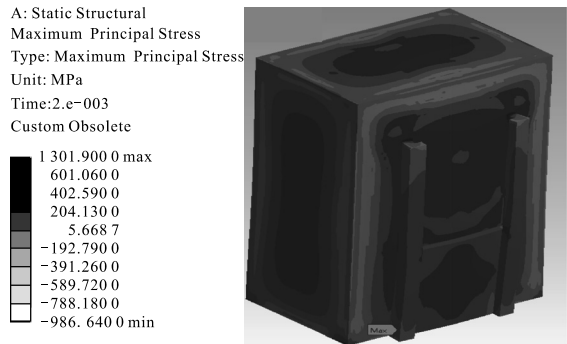


图 3 内压为 5 MPa 时的最大主应力云图

表 2 中第一个子步时，由于内压 (0.6 MPa) 大于静态失效载荷 (0.492 MPa)，结构已经产生塑性应变，此时塑性应变值尚小于弹性应变值。图 4 中，随着载荷的增加，最大等效弹性应变变化不大，仅有稍许增加，但最大等效塑性应变剧增。内压超过 3.8 MPa 后，最大等效塑性应变高于最大等效弹性应变 2 个数量级，表明结构出现了大面积塑性变形。

表 2 等效弹性应变与等效塑性应变

t/s	内压/MPa	最大等效弹性应变	最大等效塑性应变
2.0×10 ⁻⁴	0.6	2.46×10 ⁻³	7.77×10 ⁻⁴
4.0×10 ⁻⁴	1.2	2.81×10 ⁻³	5.91×10 ⁻³
7.0×10 ⁻⁴	2.1	2.45×10 ⁻³	2.13×10 ⁻²
1.0×10 ⁻³	3.0	3.05×10 ⁻³	6.40×10 ⁻²
1.2×10 ⁻³	3.4	3.15×10 ⁻³	9.28×10 ⁻²
1.4×10 ⁻³	3.8	2.88×10 ⁻³	1.22×10 ⁻¹
1.7×10 ⁻³	4.4	3.30×10 ⁻³	1.64×10 ⁻¹
2.0×10 ⁻³	5.0	3.68×10 ⁻³	2.03×10 ⁻¹

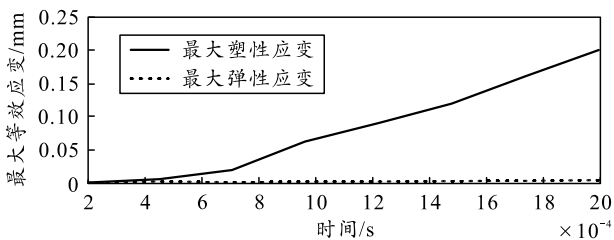


图 4 最大等效弹性应变与最大等效塑性应变曲线

根据 Mises 强度准则，其等效极限失效力

$$\sigma_{eq} = \sigma_t / \sqrt{3} \quad (4)$$

式中： σ_t 为材料拉伸极限，得到 σ_{eq} 为 346.4 MPa。

图 5 中黑色区域已超过材料的强度极限，进一步说明了当前防护罩结构已大面积失效。

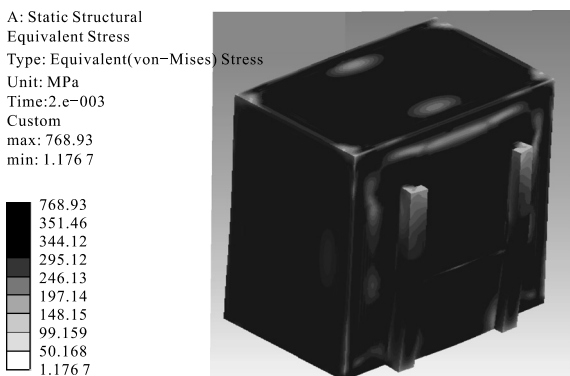


图 5 内压为 5 MPa 时的 von-Mises 应力云图

2 爆炸冲击动力学分析

弹药起爆后产生强大的冲击波，会对防护罩壁面产生强烈的冲击作用，采用式(5)计算冲击波的超压 Δp , MPa。

$$\Delta p = 0.084/R + 0.27/R^2 + 0.7/R^3 \quad (5)$$

其中

$$R = r/\sqrt[3]{W} \quad (6)$$

式中： r 为到爆炸中心的距离，m； w 为装药当量，kg。

当 1 发 25 g TNT 当量的弹丸在中间位置爆炸时，前后壁板上出现的最大超压约为 4.5 MPa，侧壁面上最大超压约为 1.3 MPa；若 2 发弹丸同时爆炸，根据叠加原理，前后壁面的最大超压将明显超

过 15 mm 钢板的静态承载极限，需调整当前防护罩结构。目前，在防护罩设计时，主要通过增大防护罩尺寸、增强壁厚、设置泄爆口和采用吸能式的防爆结构等方法提升防护罩的抗爆性能。设计中受结构尺寸和其他因素限制，拟同时采用加厚壁板与顶部设计泄爆口的方法。

泄爆模拟中，防护罩厚度增加为 30 mm，受防护罩顶部其他结构的影响，顶部设计 2 个 100 mm×100 mm 的方形泄爆口，距离底部工作台 188.5 mm 处，同一水平面间隔 60 mm 放置 2 发 25 g 的 TNT 药柱，药柱尺寸 20 mm×20 mm×38.5 mm，2 个起爆点位于药柱顶部中间位置。炸药的网格尺寸为 2 mm，其他网格尺寸均为 10 mm。图 6 给出了整个防爆间的网格离散结构，所有部分均采用六面体单元，共计 260 726 个节点、223 154 个单元。

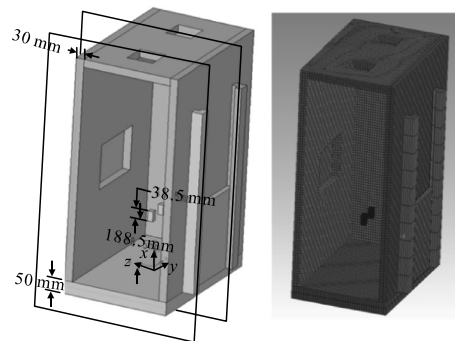


图 6 优化后防爆间有限元模型

采用 Ansys workbench 中显示动力学模块进行建模分析，使用 Autodyn 求解器进行有限元求解。计算时间设置为 0.5 ms，初始时间步与最小时间步均设置为程序自身控制。计算结果输出 10 个采集点，并均匀设置 5 个重启节点。

图 7、图 8 分别给出了冲击波在传播过程中对防护罩的应力作用以及应力—时间关系。由图可知：TNT 爆炸后 0.04 ms 时，冲击波抵达了后挡板的内表面，对挡板产生压力，最大等效应力为 57.6 MPa，随后冲击波在 0.05、0.07 ms 时分别到达前挡板和两侧挡板，最大等效应力分别为 214.8 和 184.8 MPa；然后发生反射叠加，在罩体内部形成激荡波，对罩体产生再次冲击，并迅速向顶部传播，0.2 ms 时整个防护罩的最大屈服载荷达到 335 MPa，直到部分空气被冲击波从上方泄爆口挤出，压力随之有所减小，但由于冲击波的激荡叠加效应，压力又逐步上升，0.4 ms 时整个防护罩的最大屈服载荷达到 351 MPa，位置出现在前防护板与工作平台连接处。如图 9，0.45 ms 冲击波顶部波阵面越过泄爆口，高压

气体由泄爆口流出后，罩体内部压强显著降低，爆轰过程逐渐结束。

采用 30 mm 的 45#钢，在顶部设置 2 个 100 mm×100 mm 的方形泄爆口，防护罩能够满足设计要求，可以有效防止意外事故下工作单元对设备和人员的伤害。

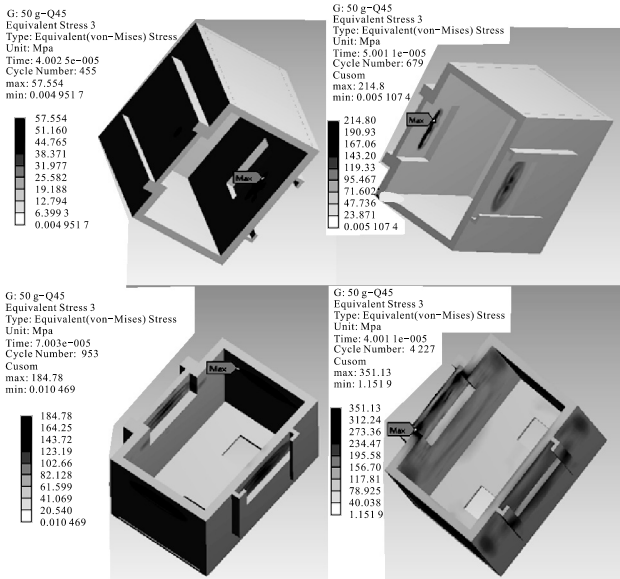


图 7 最大等效力云图

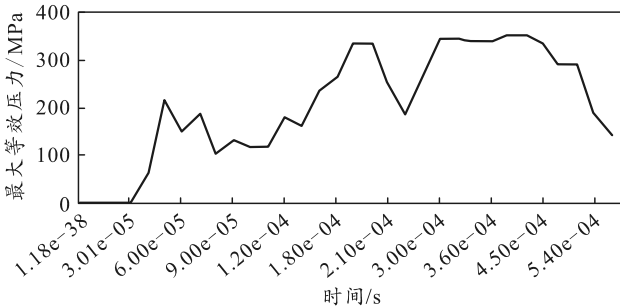


图 8 最大等效力-时间曲线

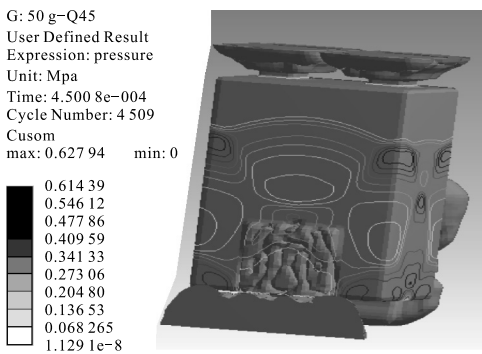


图 9 0.45 ms 冲击波压力云图

如图 10，防护罩的最大变形同样出现在前挡板与工作平台连接处中间位置，达到 1.08 mm。此区域的等效力略小于 45#钢的屈服强度 355 MPa，因此，防护罩的设计满足防爆要求。

3 结论

通过理论计算与静力学仿真，对某弹药装配工序中防护罩提出了增强壁厚与设计泄爆口的综合改进方案。结果表明：在不改变外形尺寸的情况下，

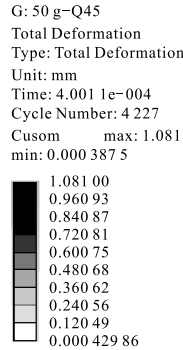


图 10 防护罩最大变形

由于条件限制，泄爆口设计起到部分泄爆作用，并没有完全实现防护罩的危险区域由侧壁面转移到顶部。在当量较大的防护罩设计中，可以适当增大罩体尺寸，寻求尺寸与厚度的最优组合，考虑泄爆口位置，使壁面上的最大超压尽可能小，为大当量装药的小尺寸防护罩设计提供参考。此外，应进一步开展冲击波载荷下吸能式夹芯板罩体防护作用的研究。

参考文献:

- [1] 王宇新, 顾元宪, 孙明. 冲击载荷作用下多孔材料复合结构防爆理论计算[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 375-379.
- [2] 马海洋, 龙源, 刘好全, 等. 非金属复合材料抗爆性能研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1081-1087.
- [3] 张晓颖, 李胜杰, 李志强. 爆炸荷载作用下夹层玻璃动态响应的数值模拟[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1379-1388.
- [4] 刘俊, 田宇, 钟巍, 等. 冲击波作用下单层钢化玻璃抗暴性能的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1402-1408.
- [5] 侯海, 量朱锡, 阚于龙. 陶瓷材料抗冲击响应特性研究进展[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 94-99.
- [6] 王永刚, 胡时胜, 王礼力. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 23(6): 516-521.
- [7] 崔小杰, 张国伟. 泡沫铝材料防护性能的数值模拟[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5): 82-84.
- [8] 马洋洋, 赵磊, 吴成, 等. 多层复合抗爆结构的数值优化与试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(6): 82-86.
- [9] 杨鑫, 石少卿. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008(2): 15-19