文章编号：1000-5773(2013)06-0889-08

# 矿用救生舱防爆门抗爆结构安全性数值分析*

罗星娜，黄　平，钱新明

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

**摘要**：为了保证矿用可移动式救生舱防爆门的结构安全性，采用非线性动力分析有限元软件ANSYS/LS-DYNA，分别建立了厚度为10、20和25 mm防爆门的有限元模型，模拟加载峰值压力0.6 MPa、持续时间300 ms的三角形爆炸冲击波，分析了防爆门的最大载荷和变形情况，并对20 mm厚防爆门增加加强筋结构前后的结构响应情况进行了对比。结果表明，防爆门承受爆炸载荷时的最大应力在门板与内表面加强筋的联接位置，最大位移在门板的中部位置，加强筋可以显著减小舱门的最大位移，增加加强筋的20 mm厚防爆门的最大位移由24.47 mm减少至5.25 mm。通过对比不同厚度救生舱防爆门的材料、重量和加工方式等因素，表明20 mm厚的防爆门增加加强筋后具有良好的结构安全性，满足矿用可移动式救生舱的要求。

**关键词**：煤矿；救生舱防爆门；结构安全性；冲击波；数值模拟

**中图分类号**：TD774　　**文献标识码**：A

## 1　引　言

目前，煤矿井下安全事故发生仍然频繁，原因有很多方面，例如：煤矿片面追求利益最大化、煤矿井下安全避险系统设施不健全、煤矿井下安全管理不严格等。其中，煤矿井下安全避险系统的不健全是煤矿事故造成大量人员伤亡的重要原因之一[1]。建立健全煤矿井下避险系统的迫切需要使国内矿用可移动式救生舱的研究和生产成为煤矿井下安全问题关注的热点之一。矿用可移动式救生舱的生产成本巨大，在设计阶段进行结构安全性分析，可以确保救生舱的服务年限，减少报废量，从而有效地降低生产投入。

矿用可移动式救生舱防爆门是矿用可移动式救生舱结构的重点部位之一。据统计，发生事故后的遇难人员中约有80％是由于一氧化碳中毒和缺氧窒息死亡，约20％由于创伤和烧伤致死。在矿井火灾和炸药燃烧事故中，由于一氧化碳中毒和缺氧窒息死亡的比例更高[2]。当煤矿井下发生爆炸事故时，救生舱一旦结构遭到破坏，高温、高一氧化碳含量气体将会进入舱内，对舱内避险人员造成严重危害。防爆门通常布置在承受爆炸冲击载荷的首端面上，爆炸时首当其冲，受力情况最为严苛。

研究人员对不同应用领域的防爆门的性能、设计理论做了大量有意义的工作。吴义田等[3]对防爆门结构进行实验及动力数值模拟，得到了某种防爆门结构在几种工况下的响应结果，并通过数值模拟分析了抗爆易损部件。陆新征等[4]利用LS-DYNA进行了防爆门考虑接触时的动力仿真分析，对多种工况下的抗爆技术性能进行了评估。方林中[5]通过模拟门扇和内部梁架的应力情况，确定防爆门的结构安全性，但分析中加载的是静力载荷，与爆炸载荷差别较大。目前得到的一些关于结构响应方面的数据和相关信息，大多来自于军事上的一些实验研究成果，数值仿真也多是静力分析。由于气体爆炸与炸药爆炸所产生的冲击波载荷有所不同，因此多数研究结果不能直接用于瓦斯和煤尘爆炸中，加之场地条件、抗爆门尺寸的不同，都要求在进行防爆门工程设计与校核时，具体问题具体分析。目前，国内还没有针对矿

* **收稿日期**：2012-07-25；**修回日期**：2012-10-10

**作者简介**：罗星娜(1988—)，女，硕士，主要从事爆炸与系统安全性研究. E-mail：sweetxingna@163.com

**通讯作者**：黄　平(1961—)，男，博士，副教授，主要从事爆炸与系统安全性研究. E-mail：ph6111@bit.edu.cn

用救生舱防爆门结构安全性的研究。本研究将从防爆门结构安全性的角度对救生舱防爆门进行合理设计,并通过有限元数值模拟的方法进行防爆门的动力学仿真,分析瓦斯爆炸载荷下防爆门的结构安全性。

## 2 矿用可移动式救生舱防爆门结构

### 2.1 防爆门概况

矿用可移动式救生舱防爆门系统包含防爆门门板、防爆门门框、防爆门门闩、防爆门门轴、安装铰链、手柄或手轮、密封条等。手柄或手轮位于防爆门门板外部;防爆门门闩位于防爆门的内侧,作为防爆门门板的紧固装置;防爆门门板通过铰链结构安装在门框上,可绕门轴旋转式开启;而防爆门门框又通过法兰结构与救生舱的主体固定式联接。防爆门内部常采用薄铁板封装(即在加强筋外再焊一块薄铁板)。防爆门沿门板与门框接触的内部边沿安装有密封条,以增强防爆门的密封效果。



图 1 矿用可移动式救生舱及其防爆门安装位置

Fig. 1 Refuge chamber and the door installation position

当煤矿井下发生爆炸安全事故时,由于井下的工作人员需要在最短时间内进入舱内避险,通常把防爆门布置在救生舱承受冲击波载荷的首端面上(迎着工作人员逃生的方向),因此爆炸冲击波首先作用在可移动式救生舱的防爆门上,所以救生舱的防爆门对结构安全性要求高。矿用可移动式救生舱外形及其防爆门安装位置见图 1。

### 2.2 防爆门结构分类

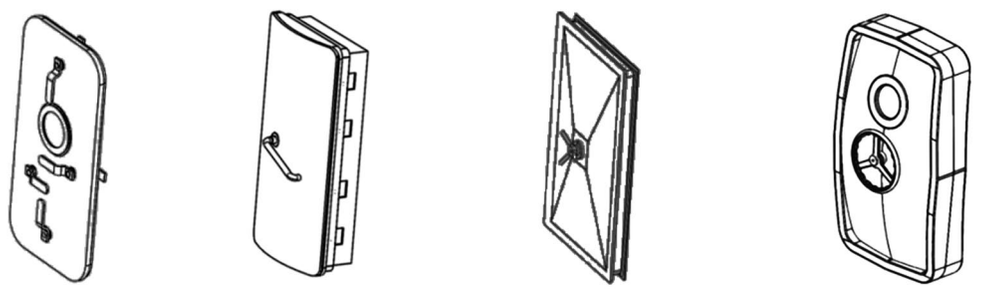
本研究不考虑矿用可移动式救生舱防爆门锁紧机构在结构上的区别,仅仅考虑矿用可移动式救生舱的外形结构,当前市场上选用的救生舱防爆门主要有以下 4 种结构形式。

(1) 平板型结构。平板型防爆门是最常见的矿用可移动式救生舱防爆门结构形式,许多生产厂家采用这种结构形式,可以方便地根据使用需要布置加强筋和观察窗,见图 2(a)。

(2) 圆拱型结构。如图 2(b)所示,除平板外的板型均需采用薄壳液压成型工艺,将平板型的防爆门冲压成具有一定的弧度。成型后为保证材料品质,往往需要对救生舱防爆门进行进一步的热处理,增加了防爆门生产工艺的复杂性和生产成本。且该型防爆门的机械加工精度较难控制,不便于装配和密封。

(3) 四棱拱型结构。四棱拱型救生舱舱门可以有效地将中部的最大爆炸冲击应力分散到门板中部两侧,从而提高救生舱防爆门的结构安全性。同样存在着圆拱型防爆门的加工复杂和生产成本高等问题,见图 2(c)。

(4) 圆弧型结构。圆弧型的救生舱防爆门常见于拱形顶救生舱和卧式圆筒形救生舱防爆门,与圆拱型门板和四棱拱型门板的受力状况比较相似,见图 2(d)。



(a) Flat-plate structure (b) Arch structure (c) Quadrangular arch structure (d) Spherical structure

图 2 救生舱防爆门几何结构类型

Fig. 2 Geometry construction of refuge chamber door

### 2.3 防爆门材料选择

矿用可移动式救生舱防爆门选用的材料应具备以下几种性质:足够的屈服强度、韧性良好、焊接性能良好、生产过程简单、易于机加工等等。为达到这些材料要求,一般选用工程结构钢。工程结构钢分为普通碳素结构钢,低合金高强度结构钢和铸造碳钢。其中普通碳素结构钢含 S(硫)、P(磷)杂质较多,强度较低并且一般不进行热处理,但是价格低廉,常用于力学性能要求不高的部件。低合金结构钢则可以很好地满足以上各项要求,其中 Q460 低合金结构钢性能优秀,是在普通碳素结构钢的基础上加入少量的合金元素(一般含量小于 3%)制成的,其很多性能优于普通碳素结构钢,尤其是力学性能,与同规格的普通碳素结构钢相比,在强度相同的情况下,可节省钢材 20%~30%,并且这类钢材生产过程简单,价格低廉,一般在热轧或者正火状态下就可使用。可用于制造大型或者高载荷的焊接构架,如高压容器、起重机及矿山机械、电站设备、水轮机涡壳、中高压石化容器等[6]。Q460 钢的材料参数见表 1[7]。铸造碳钢则用于制造有些形状复杂、不易锻造并且用铸铁不能满足力学性能要求的零件,如采掘机箱体、联轴器等,铸钢碳含量一般小于 0.65%,但是其机械加工性能比低合金高强度结构钢差,且刚度和韧性不能很好地满足矿用可移动式救生舱的工程要求,故在本研究中选择低合金高强度结构钢为救生舱防爆门的材料。

**表 1 Q460 钢的材料特性参数**

**Table 1 Material characteristic parameters of Q460 steel**

| Density/(g/cm$^3$) | Young's modulus of elasticity/(GPa) | Poisson's ratio | Yield stress/(MPa) | Tensile strength/(MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 7.85 | 206 | 0.3 | 460 | 550-720 |

### 2.4 数值模拟防爆门结构

根据前文分析,本研究建立的矿用可移动式救生舱防爆门的基本结构见图 3。

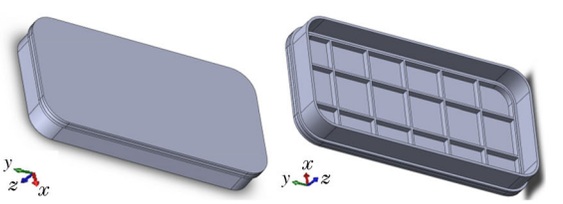



图 3 防爆门的几何结构

Fig. 3 Geometry construction of refuge chamber door

(1) 防爆门门板的基本结构选用平板型。平板型门板加工方便,且在工程中应用最广泛。在门板边缘设计了圆角,这样的设计可减少结构直角处的应力集中。为了增强救生舱防爆门结构的抗爆性能,限制门板动力响应过程中的最大位移,在门板内部布置加强筋:根据生产实际中的经验,救生舱防爆门内侧采用纵向 4 条、横向七条的井字形加强筋布置。加强筋板的尺寸为 20 mm×50 mm。

(2) 矿用可移动式救生舱防爆门门板、门框、内侧加强筋采用的材料均为 Q460 钢。

(3) 矿用可移动式救生舱防爆门的尺寸为 2 000 mm×1 000 mm;厚度选择 3 种规格(10、20 和 25 mm)。

(4) 沿防爆门门板内侧边沿固定一圈 3 mm 厚的密封条,密封条采用防火阻燃抗静电胶条。

## 3 救生舱防爆门爆炸载荷作用下数值模拟分析

### 3.1 有限元分析模型

计算爆炸载荷作用下救生舱防爆门的应力和弹塑性变形时,采用显式非线性动力分析程序 ANSYS/LS-DYNA[8]进行。进行有限元分析时需要建立一个准确可靠的力学模型,由于本模型的特殊性,在保证模型准确的条件下需要做一定的简化。假设结构件的焊接是完全可靠的,结构件之间已焊透,焊接应力全部消除,焊脚高度对结构无影响,防爆门结构不存在任何制造或安装变形[9]。

防爆门模型及有限元划分见图 4。门框、门板及加强筋结构均使用实体单元划分网格,20 mm 厚门的门板组件在厚度方向上尺寸最小处划分两排 10 mm 的单元,25 mm 厚门的门板处划分 3 层小于

10 mm 的网格单元，10 mm 厚防爆门门板最小尺寸处减小单元尺寸，保证最少两排单元，加强筋最小尺寸处也划分两排单元。其它部位依据尺寸不同，划分网格，最大单元尺寸为 10 mm。单元质量参数满足理想范围，网格塌陷(Tetra Collapse)参数大于 0.5，体扭曲度(Volume Skew)小于 0.6，满足单元质量要求。门框部分最终划分单元数量 26 496 个，门板及加强筋共划分单元 63 728 个。




图 4 防爆门有限元划分

Fig. 4 The finite element meshing model

## 3.2 加载条件及材料模型

采用加载压力波的方法模拟爆炸载荷对救生舱的作用的方法有两种：模拟实际结构在流场中的受力情况，得到载荷-时间曲线；或者采用简化的三角形冲击波作为加载曲线。冲击波或爆炸波是典型的非周期载荷，其极短的作用持续时间使得问题可以用特殊的简化分析方法来处理，可以通过等效冲量的方法把爆炸载荷转化为三角波后求解结构的动力响应情况[10]。实际爆炸环境的波形复杂，且受巷道内障碍物及救生舱整体尺寸的影响较大。为了使对不同防爆门结构的研究具有可比性，本研究采用加载三角形冲击波的方式研究防爆门结构在瓦斯爆炸载荷作用时的安全性。

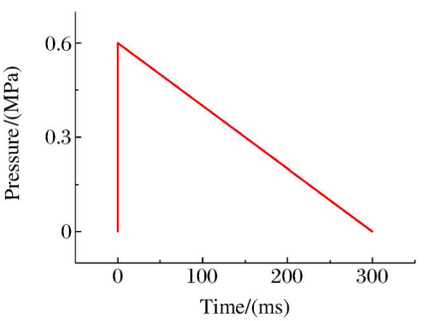



图 5 冲击波压力-时间曲线

Fig. 5 Stress-time curve of triangle explosion shock wave

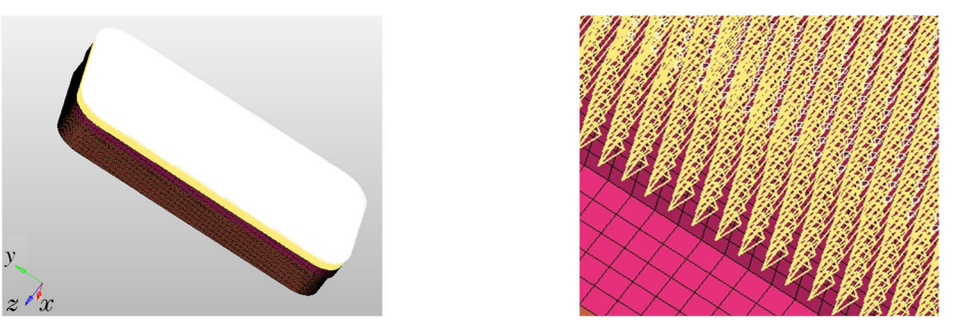
将爆炸冲击波简化为超压 0.6 MPa、持续时间 300 ms的三角形冲击波，均匀加载在防爆门外表面上，冲击波压力-时间曲线见图 5，为实现波形构造如表 2 所示的数组[11]。图 6 为舱门载荷分布示意图。为了研究防爆门相对于门框的变形情况，对门框外表面进行固定约束。

**表 2 三角形爆炸冲击波数组**

**Table 2 Array of triangle explosion shock wave**

| Time/(ms) | Pressure/(MPa) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 0.1 | 0.6 |
| 300 | 0 |

防爆门门板、门框、内侧加强筋材料均采用 Q460 钢。计算选用拉格朗日算法。防爆门在冲击波作用下会产生弹塑性变形，主要关注塑性变形；因此，在进行防爆门在冲击波作用下有限元分析时，选用 LS-DYNA 中的弹塑性非线性本构模型。




(a) Overall load distribution (b) Details of load distribution

图 6 舱门载荷分布示意图

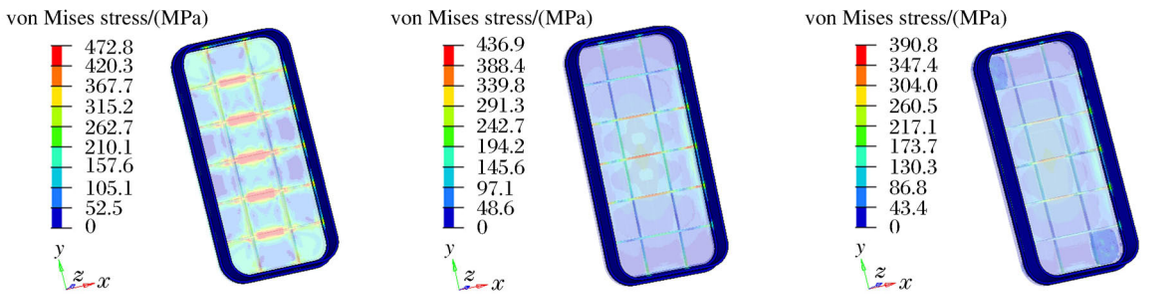
Fig. 6 Load distribution on refuge chamber door

## 3.3　结果及分析

### 3.3.1　不同厚度防爆门应力

防爆门最大应力出现在计算初始时刻不久,数据存储步长取为 2.5 ms 时,在计算时程内第一个步长时刻出现在防爆门加强筋上,随后振荡减小。10 mm 厚防爆门出现最大应力的单元较多,且最大应力超过材料屈服应力,部分加强筋单元出现塑性变形,应力出现最大值后不能随着爆炸载荷的卸载而减小,不满足强度要求。20 mm 厚防爆门最大应力为 436.9 MPa,且仅出现在加强筋的部分位置,门板上应力分布均匀,小于材料屈服应力,满足强度要求。25 mm 厚防爆门最大应力为 390.8 MPa,出现在加强筋极少单元上,小于材料屈服应力,满足强度要求。

不同厚度防爆门爆炸冲击波作用下的最大应力响应云图见图 7(2.5 ms 时),最大应力点应力随时间变化的曲线见图 8。




(a) 10 mm　　(b) 20 mm　　(c) 25 mm

图 7　不同厚度防爆门应力达到最大值时刻的应力响应云图

Fig. 7　Stress response of different thickness doors

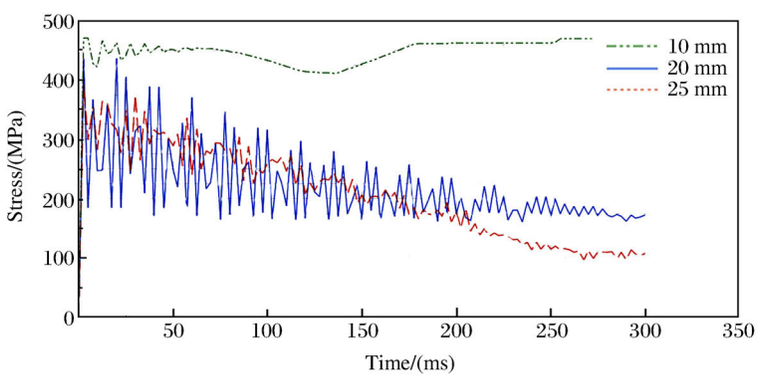



图 8　不同厚度应力最大值单元应力随时间变化曲线

Fig. 8　Stress-time curve of the maximum stress elements

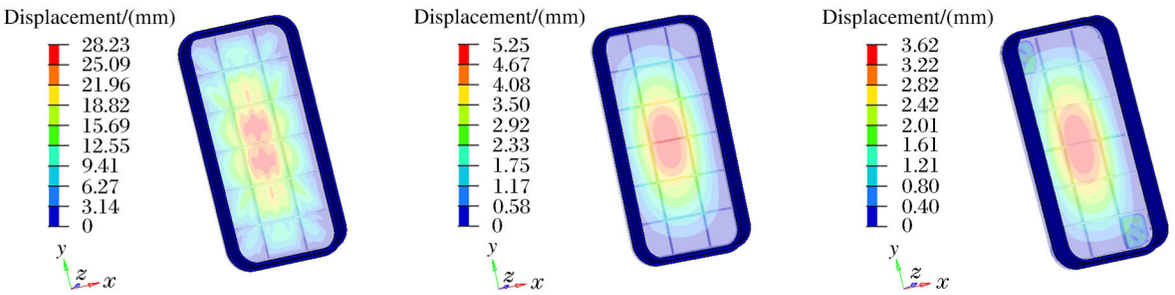
### 3.3.2　不同尺寸防爆门位移

防爆门最大位移出现在计算初始时刻不久之后,数据存储步长取为 2.5 ms 时,在计算时程内第一个步长时刻出现在防爆门中部位置,随后振荡减小。根据我国救生舱技术条件鉴定的实际工作中遵守的《煤矿可移动式硬体救生舱通用技术条件》(征求意见稿)的最新要求,防爆门属于梁柱结构,最大变形挠度和变形量不应超过 15 mm。舱门属于重要部位,材料应力不可超过屈服极限,不能发生塑性变形。10 mm 厚防爆门最大弹性变形量达到 28.2 mm,位移值较大,不满足刚度要求,且难以保证工作过程中的密封要求。20 mm 厚防爆门最大位移为 5.25 mm,25 mm 厚防爆门最大位移为 3.62 mm,均小于 15 mm,满足刚度要求。

2.5 ms 时,不同厚度防爆门爆炸冲击波作用下的最大位移响应云图见图 9,最大位移点位移随时间变化的曲线见图 10。

### 3.3.3 加强筋对防爆门结构安全性的影响

加强筋对防爆门结构安全性的影响可以通过对 20 mm 厚防爆门增加加强筋前、后模拟结果的对比得到。把图 11 中 20 mm 厚防爆门应力及位移响应云图分别与图 7(b)和图 9(b)的对比，可以看出，加强筋对减小门板的最大位移值具有显著作用。图 11 中的最大位移是 24.47 mm，而图 9(b)中减小至5.25 mm。




(a) 10 mm (b) 20 mm (c) 25 mm

图 9 不同厚度防爆门位移达到最大值处的位移响应云图($t$=2.5 ms)

Fig. 9 Displacement response of different thickness doors ($t$=2.5 ms)

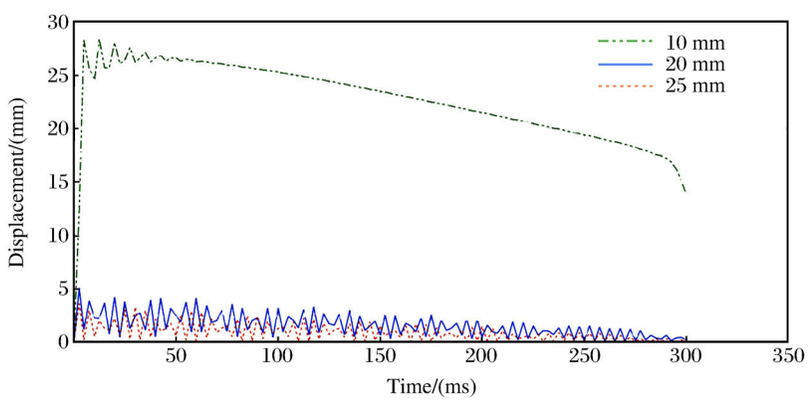



图 10 不同厚度位移最大值单元位移随时间变化曲线

Fig. 10 Displacement-time of the maximum stress elements

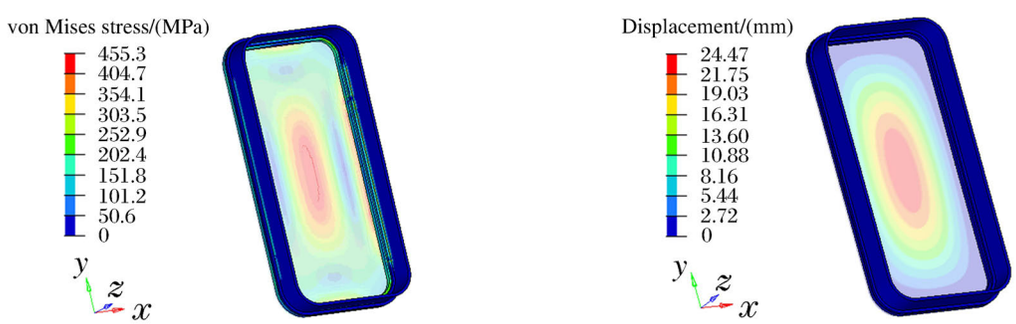



图 11 无加强筋时 20 mm 厚防爆门应力及位移响应云图

Fig. 11 Stress and displacement response of 20 mm door without stiffeners

### 3.3.4 数值模拟结论及分析

由数值模拟结果可知，有加强筋结构的 10 mm 厚防爆门承受冲击载荷时的最大应力值超过材料的屈服极限，并且出现塑性应变，因此不满足结构安全性的要求。有加强筋结构的 20 和 25 mm 厚防爆门的强度、刚度均满足结构安全性的要求。加强筋对增加防爆门的结构安全性具有显著作用。综合考虑

结构安全性和材料用量,选用有加强筋的 20 mm 厚的防爆门可以最好地满足要求。应力及位移云图显示,防爆门的应力最大值出现在门板与加强筋联接的位置,位移最大值出现在防爆门的中间位置,加强筋可以显著减小结构的最大位移值。如果需要进一步增加防爆门结构的安全性,可以通过加强门板及加强筋材料、增加加强筋数量、改进加强筋结构和分布等方式来增加防爆门的抗冲击强度,避免出现塑性变形,增加其抗弯刚度。

## 4　结　论

(1) 对比分析了救生舱防爆门的 4 种不同结构,认为救生舱防爆门的设计在综合考虑材料、重量、加工方式等因素的同时,也应考虑结构强度、刚度以及密封性的要求。

(2) 设计了一种防爆门的基本模型。数值模拟分析表明,有加强筋结构的 20 mm 厚防爆门具有良好的结构安全性。

(3) 防爆门应力最大值出现在门板与加强筋联接的位置,位移最大值出现在防爆门的中间位置,当门板足够厚时,加强筋可显著减少防爆门的最大位移值,从而提高结构的安全性。可以通过加强门板及加强筋材料、增加加强筋数量或改进加强筋结构和分布等方式,进一步增加防爆门的抗冲击强度,避免出现塑性变形,提高其抗弯刚度。

## References:


[1] Sun J P. Research on emergency refuge system in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1):69-71. (in Chinese)
孙继平. 煤矿井下紧急避险系统研究 [J]. 煤炭科学技术. 2011,39(1):69-71.

[2] Sun J P. The key technologies of the refuge chamber and rescue capsule in the underground coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 36(5):713-717. (in Chinese)
孙继平. 煤矿井下避难硐室与救生舱关键技术研究 [J]. 煤炭学报,2011,36(5):713-717.

[3] Wu Y T, Zhang Q M, Fu Y S. The safety of the blast-resistant doors using dynamic FEM analysis [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2):245-247. (in Chinese)
吴义田,张庆明,付跃升. 某抗爆门结构防护性能的有限元分析 [J]. 箭弹与制导学报,2007,27(2):245-247.

[4] Lu X Z, Jiang J J. Dynamic numerical simulation of antiknock door under blast loads [J]. Proteciong Engineering, 2003, 37(4):1-5. (in Chinese)
陆新征,江见鲸. 抗爆门在爆炸载荷作用下有限元动力数值模拟 [J]. 防护工程,2003,37(4):1-5.

[5] Fang L Z. Analysis of protective obturator's valve structure [J]. Journal of Anhui University of Technology(Science), 2008, 28(1):30-33. (in Chinese)
方林中. 防护密闭装置门扇结构分析 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2008,28(1):30-33.

[6] Lin J R. Engineering Material and Forming Technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 82-86. (in Chinese).
林建榕. 工程材料及成型技术 [M]. 北京:高等教育出版社,2007:82-86.

[7] Cheng D X. Machinerys Handbook [M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 13-82.
成大先. 机械设计手册 [M]. 5 版. 北京:化学工业出版社,2002:13-82.

[8] Beijing Institute of Technology ANSYS/LS-DYNA Technical Support Center. The foundation and method of use of algorithm for ANSYS/LS-DYNA [Z]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1999. (in Chinese)
北京理工大学 ANSYS/LS-DYNA 技术支持中心. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法 [Z]. 北京:北京理工大学,1999.

[9] Ren T. The finite element analysis and design of blast resistant door [D]. Xi'an: Changan University, 2011: 20-21. (in Chinese)
任　涛. 抗爆门有限元分析及优化设计 [D]. 西安:长安大学,2011:20-21.

[10] Zhao H J, Qian X M. Simulation analysis on structure safety of coal mine mobile refuge chamber under explosion load [J]. Safety Science, 2012, 50(4): 674-678.

[11] Hu B Y, Liu D M, Bo J S, et al. Elastic response of spherical containment vessel to impulsive loads [J]. Journal of Vibration and Shock [J]. 1998, 17(3): 19-23, 87-88. (in Chinese)
胡八一, 刘大敏, 柏劲松, 等. 脉冲载荷下球形爆炸容器的弹性响应 [J]. 振动与冲击, 1998, 17(3): 19-23, 87-88.

# Simulation Analysis on Structure Safety of Refuge Chamber Door under Explosion Load

LUO Xing-Na, HUANG Ping, QIAN Xin-Ming

(*State Key Laboratory of Explosion Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

**Abstract**: The door of coal mine mobile refuge chamber should keep strong structure during its life cycle. A basic structure of the door was designed. And finite element models of the door were established for numerical simulation, with thickness 10, 20, and 25 mm, respectively. Finite element software ANSYS/LS-DYNA was used in the numerical simulation. Deformation of the door under a triangle explosion shock wave with maximum value for 0.6 MPa and 300 ms duration was calculated. The maximum stress value appears in the connection position between the door plank and reinforced stiffeners. The maximum displacement value appears in the middle of the door plank. Stiffeners have significant effect on the maximum displacement. The maximum displacement of improved chamber door is reduced to 5.25 mm, having a decrease of 19.22 mm. According to the simulation analysis, the door with 20 mm thickness could fulfill the requirements of structure safety.

**Key words**: coal mine; refuge chamber door; structure safety; shock wave; numerical simulation