

矿难救险生命球系统的研发

姚 斌, 陈春榕, 毛芳萍, 石 林, 王 飞

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要: 设计了一个矿难救险设施。介绍了生命球的系统组成、结构、受力分析及仿真和生命球与地面连通的整体系统。通过相关的仿真模拟, 证明了该设计结构的合理性和可行性。

关键词: 矿难; 生命球; 救生系统

中图分类号: TD77.4 文献标志码: B 文章编号: 0253-2336 (2006) 11-0031-03

Research and development on life ball system for mine disaster rescue

YAO Bin, CHEN Chun-rong, MAO Fang-ping, SHI Lin, WANG Fei

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

通过对各重大矿难进行分析发现, 矿难发生的主要原因有两种。一是矿内瓦斯爆炸或粉尘爆炸。近 10 年来我国煤矿事故统计分析表明, 瓦斯爆炸是目前煤矿安全生产中最主要的灾害^[1]。瓦斯爆炸或粉尘爆炸可直接导致工人死亡或者被冲击波炸伤, 更多的 (85% 左右) 是由于瓦斯或粉尘爆炸引起巷道塌方, 工人被掩埋窒息而死^[1]。二是矿内透水, 工人被水淹没或是被水围困, 最终由于救援不及时窒息而死。

由于地下岩层的客观复杂性, 煤矿事故至今还难以避免。现在的问题在于如何在矿难发生后挽救被困矿工的生命。课题组根据技术专利设计了一个球形的救生设施——生命球。将生命球在煤矿巷道内根据实际需求分散布局。在矿难发生后, 矿井便和外界隔绝。生命球通过进气管、出气管、饮料供应管与外界保持联系, 在矿井内构造一个和矿外地面连通的小环境, 使得工人们可以在球内维持生命, 等待救援的到来。爆炸或透水发生后, 工人只要能够安全进入生命球内, 获救的可能性就很高。

1 生命球系统

生命球救生系统的安装很重要。一般煤矿的巷道断面宽 3 m, 高 1.8 m。救生球外径 1.3 m, 不能直接将其安装在巷道中间, 否则会影响煤矿的正常作业。同时为了缩小瓦斯爆炸的波及范围, 也应尽量减少煤矿井下障碍物的存在^[2]。综合考虑便

于工人工作和尽量减少冲击波和塌方对救生球的作用等因素, 在安装球的位置向内侧挖进半个球深, 向下挖半个球深的一个坑。安装时救生球门要朝向冲击波相反的方向。这样可以减少冲击波对球门的影响。系统由地面或主巷道救生工作站、连接管道、非工作面救生球、工作面救生球等几个部分组成。救生工作站装有通风机、通信设备、饮料储存罐, 监控中心等。

瓦斯或粉尘爆炸多发生在工作面附近。工作面或非工作面上没有遇难的工人可以躲进球内。球门及其对称位置都涂有荧光漆, 便于工人在爆炸后复杂的环境中找到救生球门。工人躲进救生球以后, 通过通信设备向监控中心报警, 在球内等待救援的到来。监控中心及时启动通气设备、饮料供应等。

1.1 生命球的外壳结构

生命球由上下两个半球壳组成, 用螺栓联结而成, 两半球壳中间加上水气密封垫及隔热密封圈,

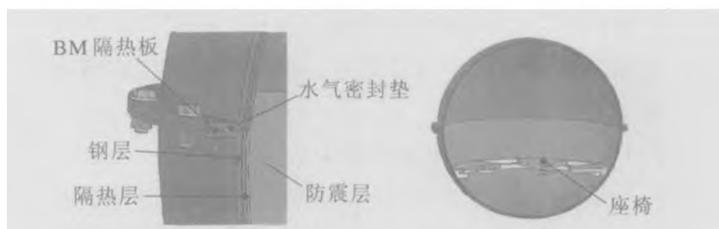


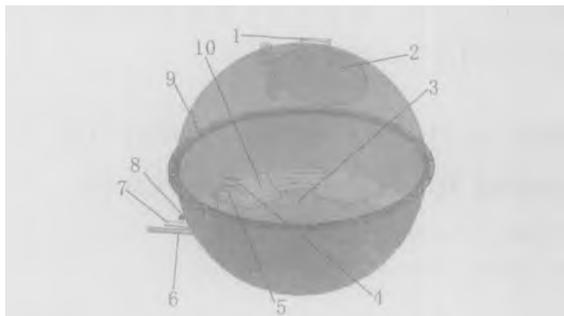
图 1 生命球三维实体

防止漏气及隔热。如图 1 所示。球壳从外到内由钢层、隔热层、防震层组成。基于人体工程学等方面考虑, 球的有效空间为直径 1.3 m。球内空间可以容纳 4 个人。钢层采用低碳耐酸钢, 其机械性能较

好。隔热层由耐高温材料组成。内层为海绵等材料组成防震层，压缩性好、有防震功能，可以有效减轻各种震动对工人身体的伤害。生命球上半球开设一个圆形门，作为工人进出球的通道。水气密封垫及隔热密封圈，防止漏气及隔热。

1.2 生命球的内部设备

如图 2 所示，内部设备主要有：



1—门把手；2—门；3—压缩氧气自救器安装座；4—进气管开关；5—饮料管道开关；6—饮料管道；7—进气管；8—出气管；9—通信设备；10—座椅

图 2 救生球内部构造

(1) 座椅。座椅安装在距离球体底部高 300 mm 处。

(2) 电话通信控制模块等其他配套设施安装于上半球壳中。

(3) 压缩氧气自救器安装座。球内储备有应急用的压缩氧气自救器，工人进入球内但通气系统尚未开启这段时间内可启用。

2 生命球结构受力分析及仿真

瓦斯或粉尘爆炸时，巷道内会有冲击波、火灾、塌方等。生命球尺寸和结构确定后，需考虑其抗压、抗拉强度，进行应力分析校验。瓦斯或粉尘爆炸对生命球的影响主要有两个，一个是瓦斯爆炸产生的冲击波和热浪对外钢层的冲击作用；一个是瓦斯爆炸引起煤矿局部塌方，煤或岩石层压在生命球上方。

2.1 生命球在爆炸冲击波中的应力分析

从爆炸动力学可知，瓦斯或粉尘爆炸时冲击波的冲击气流冲向洞口方向。安装时将生命球埋入地下一半。这样可以大幅减少瓦斯或粉尘爆炸的冲击波对生命球的冲击。煤矿井下瓦斯爆炸产生两类压力，即静压和冲击动压。静压在所有方向上的作用力相等，这是由于高温气体膨胀和沿巷道流动产生的，并推动冲击波面的前进。动压是冲击波作用使

波面经过的局部区域空气高速流动产生的，具有方向性。静压主要会破坏联络巷道的密闭或风门，动压则摧毁巷道中的障碍物并在巷道转弯等处造成强烈的破坏。

相关资料记载^[3]，10.1% 的瓦斯空气混合气体测定得到的定容爆炸压力为 0.71~0.81 MPa。1952 年舒尔茨-容霍夫 (Schultze-Rhnhof) 在美国一个废弃矿井进行了两次瓦斯浓度 9.5%、积聚区域 300 m³ 的大型爆炸实验，爆炸测得峰值压力 1.01 MPa。在重庆实验巷道进行的爆炸实验，瓦斯体积分数 8.6%，体积 50 m³，测得的最大压力为 65.86 kPa；浓度 9.5%，体积 100 m³，测得的最大压力 0.18 MPa；体积 200 m³，9.5% 的瓦斯测得的最大压力为 0.46 MPa^[2]。

取瓦斯或粉尘爆炸冲击波的最大压力为 1 MPa 对救生球进行冲击波模拟实验。假设冲击波单方向 (取从右向左) 作用在球壳外表面上，图 3~图 7 是利用 Solidworks 软件 COSMOSXpress 插件做的应力分析图的 5 大组成部分。依次是应力结果、应变结果、位移结果、变形结果、设计检查结果。各个图中右边的颜色条由上到下均表示对应值的变化。

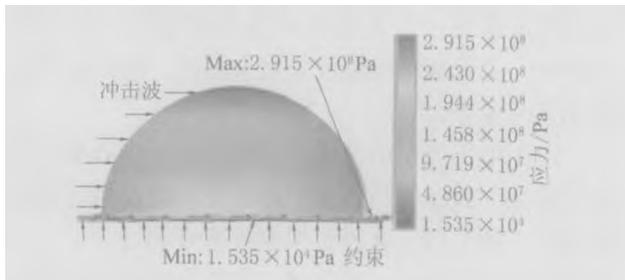


图 3 救生球受单向冲击波静态节应力结果

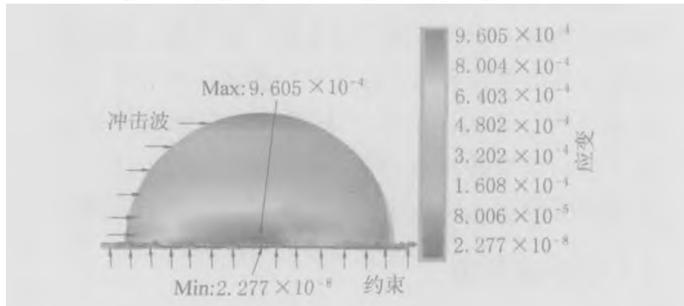


图 4 救生球受单向冲击波静态应变结果

如图 3 所示的应力最大值出现在冲击波作用的反向端面处，为 291.5 MPa，最小值出现在与冲击波作用方向垂直端面处，为 0.015 MPa。

如图 4 所示的应变结果，和静态应力相对应的，应变最大值出现在与冲击波作用方向垂直端面处上方，为 9.605 × 10⁻⁴，最小值出现在与冲击波

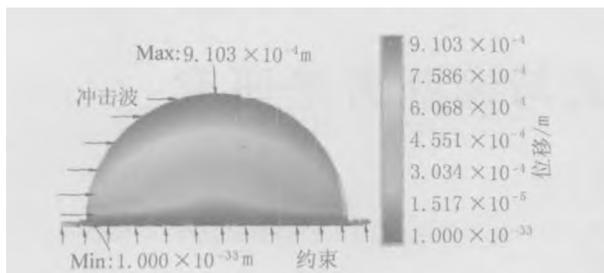


图 5 救生球受单向冲击波静态位移结果

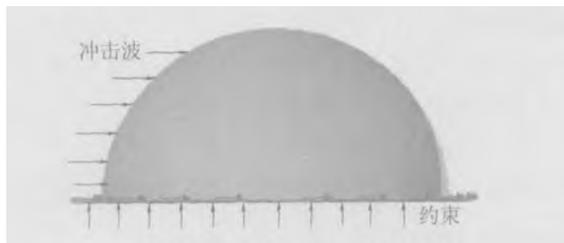


图 6 救生球受单向冲击波静态变形结果

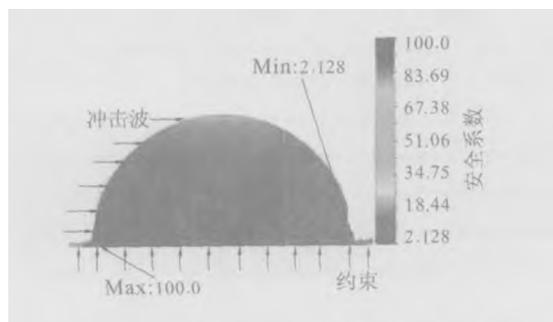


图 7 救生球受单向冲击波设计检查结果

作用方向垂直端面处, 为 2.277×10^{-8} 。

如图 5 所示位移结果, 位移最大值出现在救生球顶部, 为 9.103×10^{-4} m, 最小值出现在与冲击波作用方向垂直端面处, 为 1.000×10^{-33} m。

如图 6 所示为救生球变形结果。变形比例为 1 的情况下救生球变形形状。在受到 1 MPa 冲击波时, 变形极其微小, 不会引起球壳的褶皱、破损、断裂。因此, 厚度为 8 mm 的钢板, 材料强度、硬度等机械性能皆能满足要求。

如图 7 所示, 最小安全系数出现在冲击波作用的反向端面处, 为 2.128。

通过上面的分析可知瓦斯或粉尘爆炸产生的冲击波对生命球的冲击作用不会导致生命球的损坏。

2.2 生命球受塌方正压力应力分析

根据调研所收集的资料, 一般煤矿塌方为局部塌方, 煤块岩石层作用在救生球上的压力小于 10 kN, 取最大值 10 kN 来做应力分析。令压力均匀地分布在球壳外表面上。用上节相同方法得到的相

应的应力分析图的 5 个组成部分。救生球静应力最大位置在救生球下端面, 为 292.2 MPa, 静应力最小位置在救生球顶部, 为 0.015 MPa, 和静态应力相对应的, 救生球静应变最大位置在救生球下端面, 为 9.605×10^{-4} ; 应变最小位置在救生球顶部, 为 2.377×10^{-8} 。救生球静态位移最大位置在救生球顶部, 为 9.103×10^{-4} m, 静态位移最小位置在救生球下端面, 为 1.100×10^{-33} m。在受到 10 kN 均布正压力时, 变形非常小, 不会引起球壳的褶皱、破损、断裂。因此, 厚度为 8 mm 的钢板, 材料强度、硬度等机械性能皆能满足要求。由以上分析可知, 救生球受 10 kN 均布正压力不会引起钢球破裂, 钢球的微小变形不会导致其失效。

3 救生球通气系统设计

通气系统由一条进气管道、一条排气管及阀门等组成。瓦斯或粉尘爆炸后, 工人躲进生命球内, 当地面接到报警后, 启动输气系统, 通过进气管向生命球内供气。进气管和出气管都带有阀门, 可根据需要调节进出气流量。

4 结 论

本文进行了生命球系统、结构设计、受力分析及仿真、生命球与地面连通的整体系统规划的设计等方面的阐述, 加工出了如图 8 所示的救生球实体。



图 8 救生球实体

对于煤矿来说产生事故隐患的主要因素为: 人的不安全行为、物的不安全因素, 环境的不安全因素及管理上的缺陷。通过正确使用生命球系统以及对矿工进行相关的教育, 本课题解决了物的不安全因素, 环境的不安全因素这两大重要因素。

在此特别鸣谢技术专利^[5]发明人蒋国仙先生对本研究的支持。

(下转第 36 页)

$x(k)$ 距离超过设定阈值时, 可判别为传感器发生了故障。使用中发现该神经网络具有良好的收敛性与稳定性。当学习系数 η 为 0.23 时, 递归学习约 21 000 次, 即可使均方误差达到 -90 dB。适当地调整改变学习系数 η 可改变网络算法的收敛速度。

表 1 神经网络学习样本排列

神经网络输入序列值	预测输出值
$x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), x(6)$	$\hat{x}(7)$
$x(2), x(3), x(4), x(5), x(6), x(7)$	$\hat{x}(8)$
⋮	
$x(204), x(205), \dots, x(209)$	$\hat{x}(210)$

采用 KG J15 型瓦斯传感器作为实验用的瓦斯传感器, 实验中模拟了传感器的加热丝故障, 当瓦斯传感器发生故障时, 传感器的实际输出与神经网络的预测输出出现了明显的偏差, 超过了设定阈值, 表明瓦斯传感器发生了故障。阈值的选取必须考虑瓦斯传感器输出噪声的影响, 经实验, 该系统的阈值设定为 0.034。神经网络预测输出与发生故障瓦斯传感器的输出如图 3 所示。

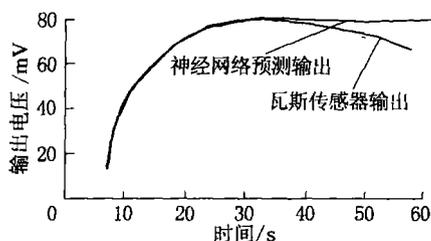


图 3 神经网络预测输出与发生故障瓦斯传感器的输出

由图 3 可见, 当瓦斯传感器正常工作时瓦斯传感器的实际输出与神经网络的预测输出是一致的, 当瓦斯传感器发生故障时, 传感器的实际输出与神

经网络的预测输出发生偏差, 通过检测算法中的 L2Euclidean 量度计算值与设定的阈值相比较, 可以方便地实现传感器故障诊断。

通过实验仿真证明, 采用人工神经网络方法对瓦斯传感器进行动态非线性建模实现在线故障测试, 比传统方法具有更多的优点。该方法也同样适用于其他动态非线性系统的建模与故障诊断。

参考文献:

- [1] 张德增, 郑江萍. 煤矿安全监测技术基础知识 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [2] 罗新民, 俞启香. 煤矿瓦斯预测评价 [J]. 中国安全科学学报, 1994 (3).
- [3] 钮永胜, 赵新民, 孙金玮. 采用基于神经网络的时间序列预测器的传感器故障诊断新方法 [J]. 仪器仪表学报, 1998 (4).
- [4] Masumi Ishikawa. Prediction of Time Series by a Structure Learning of Neural Network [J]. Fuzzy Sets and System, 1996 (2).
- [5] 王崇峻. 一种基于遗传算法的 BP 神经网络算法及其应用 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 2003 (5).
- [6] 卢文祥. 工程测试与信息处理 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- [7] Patra J C, Van Den Bos A. Modeling of an intelligent pressure sensor using functional link artificial neural networks [J]. ISA Transactions, 2000 (1).
- [8] Rath SK, Patra J C. Intelligent pressure sensor with self-calibration capability using artificial neural networks [A]. IEEE International Conference Proceeding on Systems [C]. USA: IEEE, 2000.
- [9] Widrow B. Neural network application in industry business and science [J]. Communication of the ACM, 1994 (37).

作者简介: 王其军 (1962-), 男, 安徽萧县人, 副教授, 博士研究生, 长期从事安全监测及信息技术方向的教学和科研工作。Tel: 0532-82242779, E-mail: wangqj@163.com

收稿日期: 2006-04-05; 责任编辑: 赵 瑞

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] 胡学义. 煤矿瓦斯爆炸事故数值模拟分析 [J]. 爆破, 2003 (3).
- [2] 林柏泉. 瓦斯爆炸动力学特征参数的测定及其分析 [J]. 煤炭学报, 2002 (2).
- [3] 周心权, 吴 兵, 徐景德. 煤矿井下瓦斯爆炸的基本特性 [J]. 中国煤炭, 2003 (9).
- [4] 王子佳, 南 宝. 井下瓦斯爆炸爆源特征尺寸计算方法的分

析 [J]. 中国煤炭, 2004 (7).

- [5] 蒋国仙. 一种救生球 [P]. 中国专利: CN200420040614.4, 2004.05.14

作者简介: 姚 斌 (1963-), 男, 湖北宜都, 副教授, 研究方向: 机械制造及自动化。联系人: 陈春榕, Tel: 0592-2186923, E-mail: chencr1995@163.com

收稿日期: 2006-07-11; 责任编辑: 王宗禹