

矿难救生球系统在瓦斯爆炸冲击波作用下的动态响应^{*}

张玉周¹ 实验师 姚斌² 教授 叶军君² 副教授

(1集美大学机械工程学院, 厦门 361021 2厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

学科分类与代码: 620 3020

中图分类号: X932 TP391.9

文献标识码: A

资助项目: 福建省重点项目(2006Z0027)。

【摘要】 介绍矿难救生球系统(简称球)的原理及结构,构建巷道空间和球的分析模型,运用数值分析的方法,分别选择3种球体材料和3种球体厚度进行计算,对该系统在瓦斯爆炸冲击波作用下的动态响应进行研讨,分析冲击波作用下球表面的变形、等效应力、等效塑性应变以及球体材料、厚度等因素对球动态响应的影响。结果表明:运用数值分析的方法,可以为救生球系统设计建立一个仿真的实验环境,为优化系统设计、提高设计效率提供参考数据。

【关键词】 瓦斯爆炸; 冲击波; 救生球; 动态响应; 数值分析

Dynamic Response of a Life-saving Ball System to the Shock Wave of Gas Explosion

ZHANG Yu-zhou, Technician YAO Bin, Prof YE Jun-jun, Assoc. Prof

(1 College of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China

2 Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The principle and structure of a life-saving ball system (referred to as ball for short hereinafter) were introduced. Analytical model of the roadway space and the ball were established. By selecting three kinds of balls with different materials and thickness for calculation, the dynamic response of the ball to the shock wave of gas explosion was respectively analyzed with numerical analysis methods. The analysis focused on the deformation, the equivalent stress and the equivalent plastic strain of the surface of the ball under shock wave, and the effect of the material and thickness on the dynamic response of the ball. The analysis results show that a simulation experimental environment can be established and reference data can be provided for the design of a life-saving ball system by using numerical analysis methods.

Key words: gas explosion; shock wave; life-saving ball; dynamic response; numerical analysis

0 引言

我国是一个产煤大国,同时也是矿难大国。2005年我国煤炭产量占世界37%,但矿难死亡人数却占世界的80%^[1]。大量的事故分析统计和研究表明^[1],矿难发生的主要有两种原因:一是,矿内瓦

斯爆炸或粉尘爆炸;二是,矿内透水。

由于地下岩层的客观复杂性,煤矿事故的发生至今还是很难避免的。除继续研讨矿难的深层次因素和预报、预防措施外,还必须依法落实和解决在矿难发生后如何保证被困矿工的生命安全,例如:设计高效实用的井下矿难救生系统,以便在矿难发生后,

* 文章编号: 1003-3033(2008)10-0092-07 收稿日期: 2008-06-16 修稿日期: 2008-09-30

矿工能及时进入该系统等待地面救援^[2]。2007年8月1日,河南陕县“7·29”透水事件被困69名矿工解救成功,这是矿难救生史上的一个奇迹^[3]。

据专家介绍,他们之所以能获救,其齐全的安全设备、科学的救援方案以及矿工们的自救行为都是重要因素。而巷道内一根直径约为5 m的橡胶管,既可以通风输氧,又可以输送牛奶,成为“救命管”。这次成功的获救也为井下矿难救生系统的研发提供有益的启示。

国内有关矿难安全设备已有文献报道,其救生设备的设计不同:有救生带、救助管道、救生站、紧急救援装置等。

文献[4]报道了一种矿井安全救生带,它由带体制成,带体的横向剖面为椭圆形,带体内有水通道、气通道和电通道。该救生带对于矿难发生后的救援及自救能够产生非常大的帮助。

文献[5]报道的矿井用应急救助管道,该管道从井口沿各分支巷道铺设至工作面,管道每隔一段距离设置一个三通管,三通管横通管口装有活动联接的管口盖和密封圈,出现矿难时,打开管口盖,管口就可作为矿井内外输送空气、水分的流道或传输声音的通道。

国外也有类似设备。在加拿大,要求矿山都要建造“避险站”(安全屋)。安全屋每个长约45 m,宽约15 m,它是可提供氧气、食物以及能起保护作用的避险室。并且配有通信系统,事发后救援人员很快可以通过无线电与被困矿工取得了联系。前不久,加拿大西部钾碱矿的72名矿工,在被困井下30个小时后仍能全部获救,据称就是由于井下设有氧气筒和“安全屋”。

厦门大学联合课题组根据技术专利设计了一个球形的避险救生设施——矿难救生球系统。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。其工作原理是:在矿难发生后,救生球通过进气管、出气管、饮料供应管及通讯设备与外界保持联系,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。只要在爆炸或透水发生之后,工人们能够安全进入救生球内,他们获救的可能性是很高的。

救生球(以下简称球)由上下两个半球壳组成,用螺栓、螺母联结而成,且两半球壳中间加上水气密封垫及隔热密封圈,防止漏气及隔热,如图1所示。内部设备主要有:座椅、通讯设备、进气和出气管道

等,如图2所示。基于人体工程学考虑,救生球外径为1.5 m。现已经根据设计图纸加工出实体,下一步将进行现场实验。

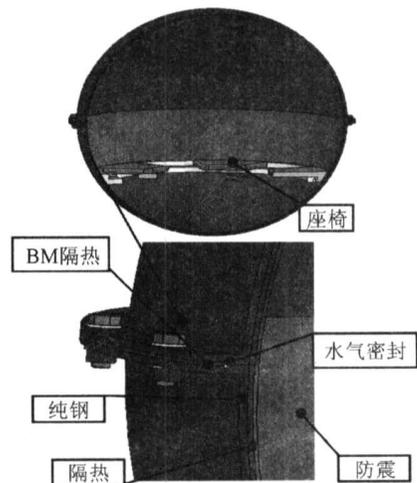


图1 救生球三维实体图

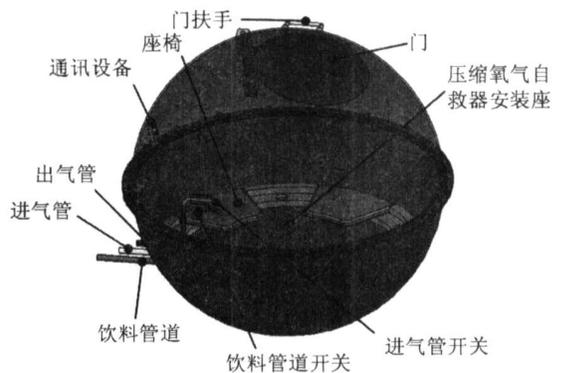


图2 救生球内部构造

笔者以该系统为研究对象,运用计算机模拟的方法,对该系统在瓦斯爆炸冲击波载荷作用下的动态响应进行分析,着重分析冲击波作用下球表面的变形、等效应力、等效塑性应变以及材料、厚度对球动态响应的的影响。分析结果表明,运用数值分析的方法,可以为救生球系统设计建立一个仿真的实验环境,为优化系统设计、提高设计效率提供参考数据。

1 建立分析模型,确定初始边界条件

1.1 巷道空间的分析模型及初始边界条件

为了便于分析,假设爆炸是在平巷内发生。巷道简化为五端封闭一端开口的管状空间,左侧为爆炸区。为了减少计算时间,取300 m长的巷道进行模拟,端面宽度为3 m×3 m,如图3所示。管壁强度足够抵抗破坏,在此不考虑。巷道内离爆炸点50 m处存在一救生球。

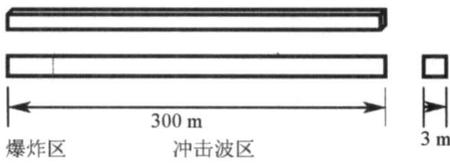


图 3 瓦斯爆炸传播的巷道空间模型

将管道内的空间用 6 面体单元离散, 作欧拉网格, 密度 $9 \times 9 \times 260$ 共计 21 060 个网格, 用 PEUL-ER1 定义其物理特性。用 DMAT 定义空气的材料特性, 采用理想气体模型, 理想气体比热比 γ 取 $1.4^{[6]}$ 。用 EOSGAM 状态方程模拟爆炸后高温高压气体。用一般耦合定义欧拉网格和拉格朗日网格之间的耦合关系, 其接触的表面作为流固耦合的界面。管状空间的开口端用 FLOW 定义为气体流出的边界, 其余自由表面均按边界条件的默认值设为 WALL ET

爆炸后的高温高压气体和空气均采用 γ 律状态方程描述:

$$P = (\gamma - 1) \rho e$$

式中, e ——单位质量内能;

P ——材料密度;

γ ——气体的比热比。

文献 [7] 表明: 经实验室测试显示, 瓦斯爆炸时, 冲击波峰值超压可达 3 MPa , 传播速度大于音速。因此, 取冲击波的最大超压为 3 MPa 对救生球系统进行模拟分析。

1.2 救生球的分析模型及初始边界条件

救生球用 QUAD4 四节点四边形板壳单元模拟, 采用弹塑性材料, 用 DMATEP 定义其材料模型, 屈服模式采用双线性。上下半球交界处施加位移约束, 3 个方向的平动及转动自由度上均具有零运动速度 (即被约束)。

2 模拟结果分析

研究表明^[8-9], 瓦斯爆炸时, 巷道内的障碍物对冲击波的传播产生激励效应, 会加剧冲击波的破坏, 因此, 应尽量减少巷道内的障碍物。基于此, 在安装时要将球埋入地下一半, 同时埋入侧面墙壁一半, 只有 $1/4$ 球暴露在巷道空间。这样一方面可以减少瓦斯或粉尘爆炸的冲击波对救生球的冲击, 另一方面可以减少救生球系统对爆炸波的激励效应。

2.1 球体厚度对球动态响应的影响

在球体材料、球的位置、冲击波初始条件都相同

的情况下, 分析不同厚度的球的动态响应。在研究球体厚度对球动态响应的影响时, 选择了多种厚度进行了多次运算和分析, 现选择 6 mm 、 8 mm 、 10 mm 这三个数据进行对比。

球的直径为 1.5 m , 首先材料选择 45 钢, 屈服强度 σ_s 为 355 MPa ^[8], 弹性模量 E 为 204 GPa ^[10], 球离爆炸点 50 m 。

计算结果如图 4~图 15 所示:

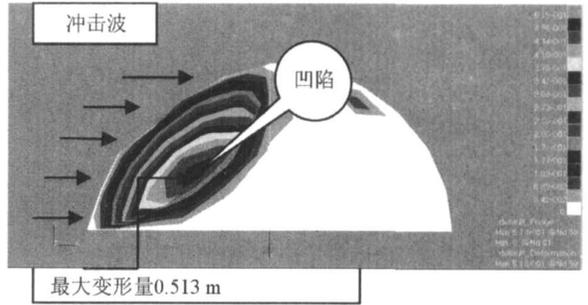


图 4 厚度为 6 mm 球的变形云图

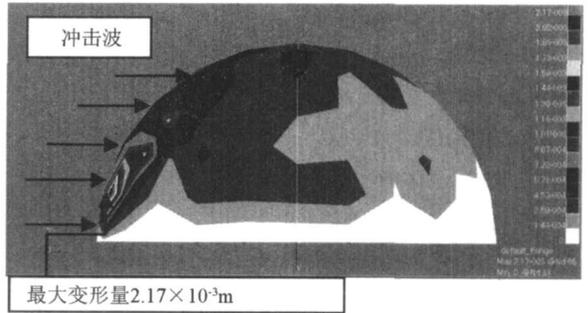


图 5 厚度为 8 mm 球的变形云图

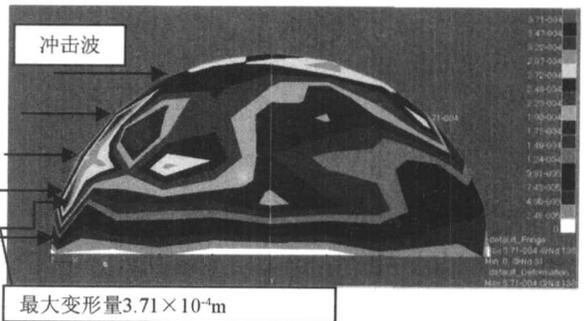


图 6 厚度为 10 mm 球的变形云图

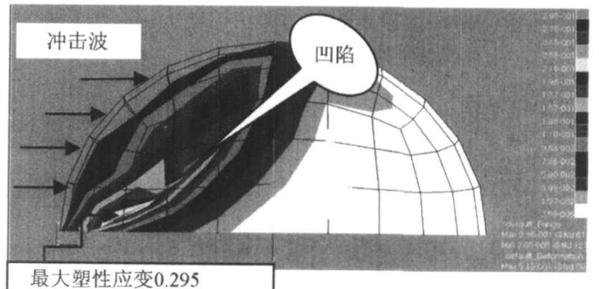


图 7 厚度为 6 mm 球的等效塑性应变云图

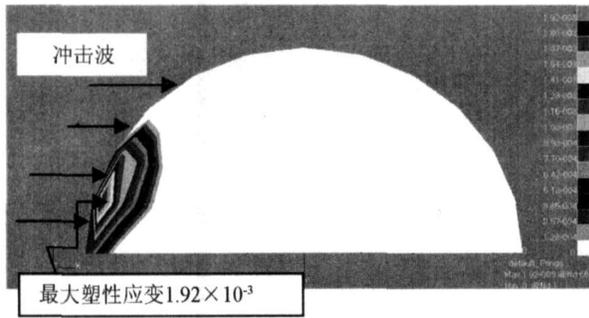


图 8 厚度为 8 mm 球的等效塑性应变变云图

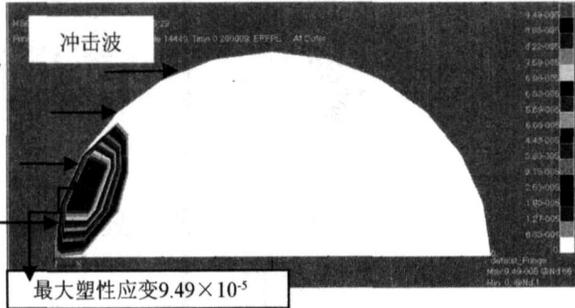


图 9 厚度为 10 mm 球的等效塑性应变变云图

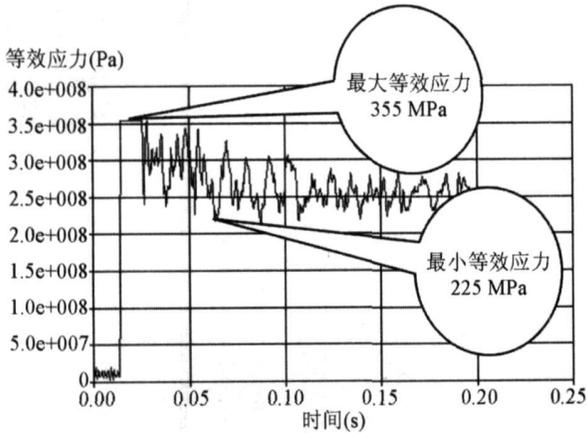


图 10 厚度为 6 mm 球的某单元的等效应力时间曲线

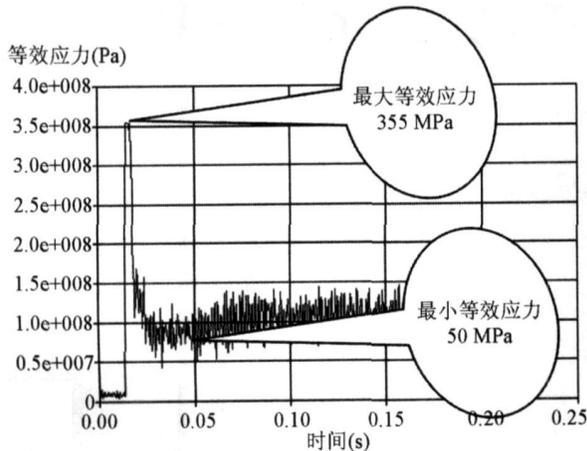


图 11 厚度为 8 mm 球的某单元的等效应力时间曲线

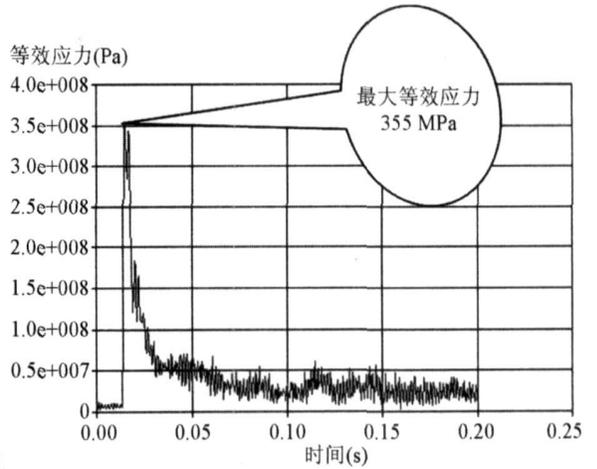


图 12 厚度为 10 mm 球的某单元的等效应力时间曲线

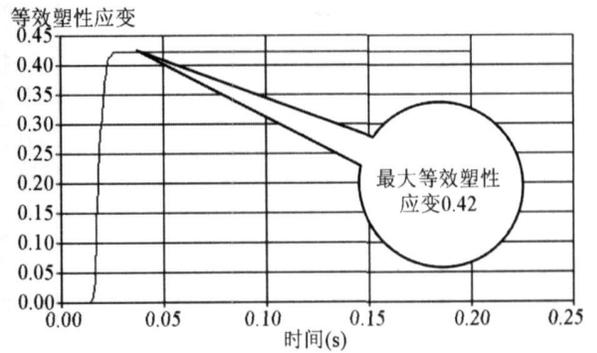


图 13 厚度为 6 mm 球的某单元的等效塑性应变时间曲线

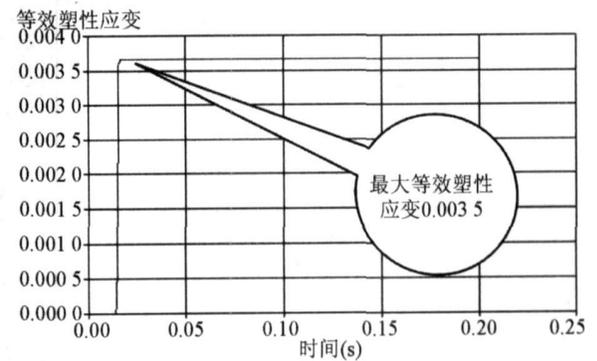


图 14 厚度为 8 mm 球的某单元的等效塑性应变时间曲线

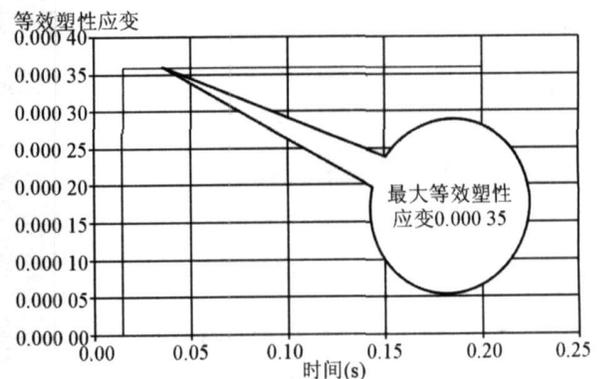


图 15 厚度为 10 mm 球的某单元的等效塑性应变时间曲线

图 4 ~图 15 为厚度 6 mm、8 mm 和 10 mm 的球的变形云图、等效塑性应变云图和应力应变时间曲线。从图中可看出, 3 个球在冲击波载荷作用下, 最大等效应力都达到了材料的屈服强度, 球表面某些区域进入屈服阶段, 发生了塑性变形。这说明如果材料选择 45 钢, 球的厚度为 6 mm、8 mm 或 10 mm, 其强度都无法抵抗冲击波的冲击。而且从图中可看出, 厚度为 6 mm 的球在冲击波作用下表面发生明显变形, 某些区域出现严重凹陷, 而 8 mm 和 10 mm 球的变形情况明显改善。模拟分析表明, 随着球体厚度的增大, 球抵抗冲击波破坏能力的提高, 球表面产生的变形量和等效塑性应变量减小。因此, 如果通过多次计算和分析, 运用计算机模拟的方法, 是可以为球体结构设计选择一个合适的厚度。

2.2 材料强度对球动态响应的影响

在球体厚度、球的位置、冲击波初始条件都相同的情况下, 分析不同材料的球的动态响应。球体材料分别选择 Q215(低碳钢)、45 钢(中碳钢)、70 钢(高碳钢)进行对比。在材料选择方面, 为了便于分析问题, 只考虑了强度因素, 在设计时还应考虑材料的其他性能, 例如耐腐蚀、材料的热硬性等等。

3 种材料的主要性能指标如下^[10]:

- 1) Q215: 屈服强度 σ_s 为 215 MPa; 弹性模量 E 为 210 GPa
- 2) 45 钢(调质处理): 屈服强度 σ_s 为 355 MPa; 弹性模量 E 为 204 GPa
- 3) 70 钢(正火): 屈服强度 σ_s 为 420 MPa; 弹性模量 E 为 210 GPa

计算结果如图 16 ~图 27 所示。

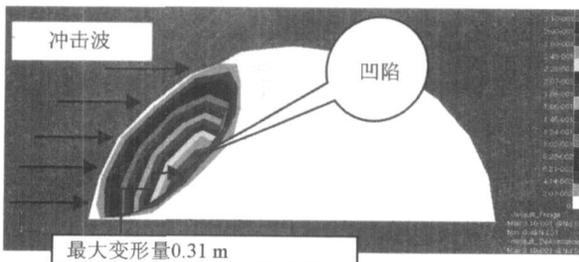


图 16 材料为 Q215 的球的变形云图

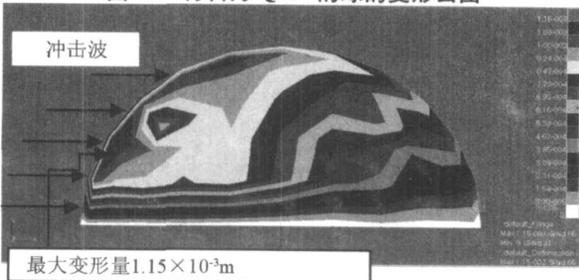


图 17 材料为 45 钢的球的变形云图

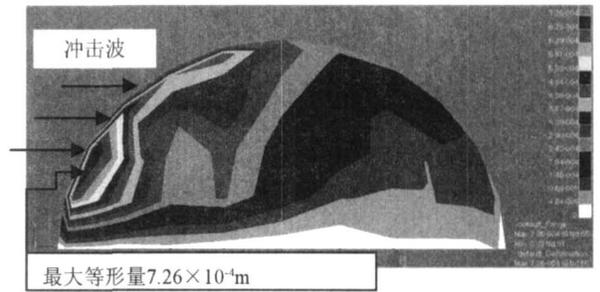


图 18 材料为 70 钢的球的变形云图

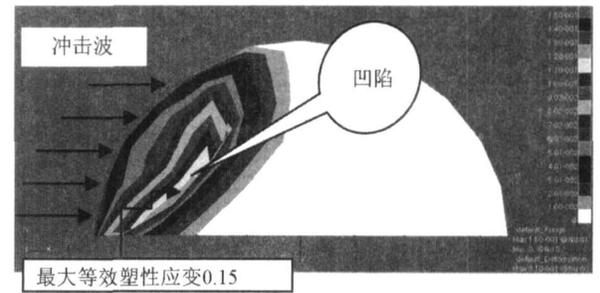


图 19 材料为 Q215 的球的等效塑性应变云图

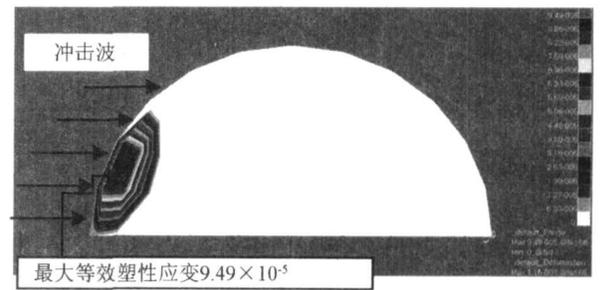


图 20 材料为 45 钢的球的等效塑性应变云图

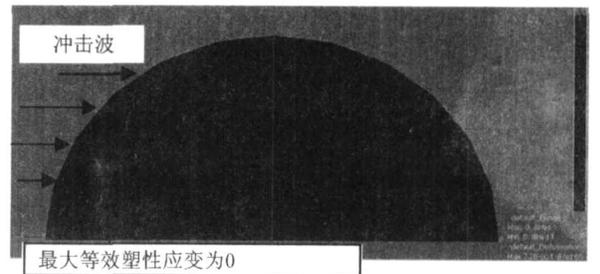


图 21 材料为 70 钢的球的等效塑性应变云图

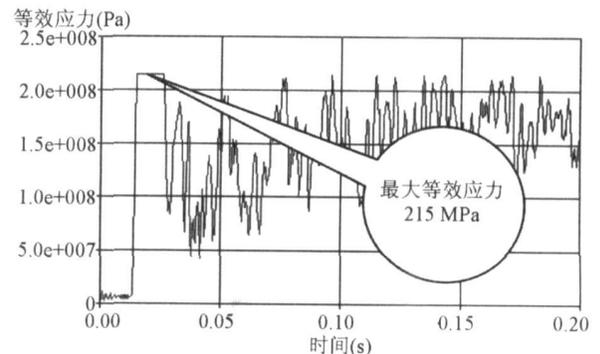


图 22 材料为 Q215 的球的某单元的等效应力时间曲线

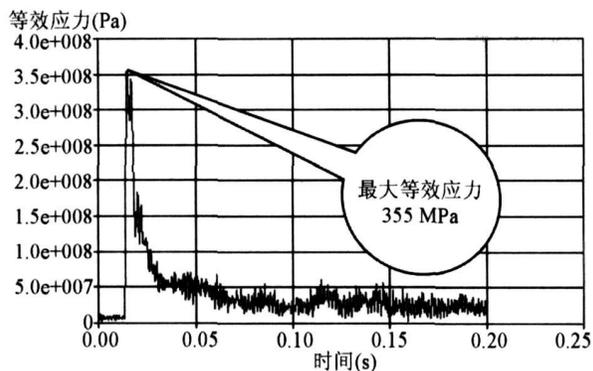


图 23 材料为 45 钢的球的某单元的等效应力时间曲线

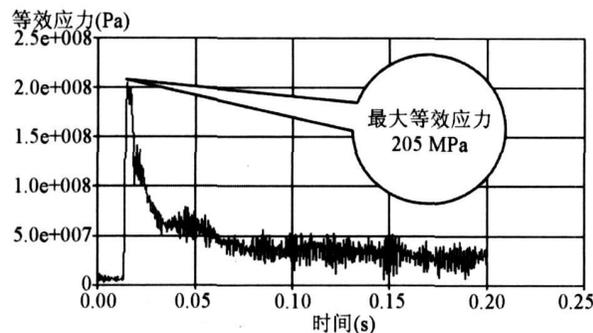


图 24 材料为 70 钢的球的某单元的等效应力时间曲线

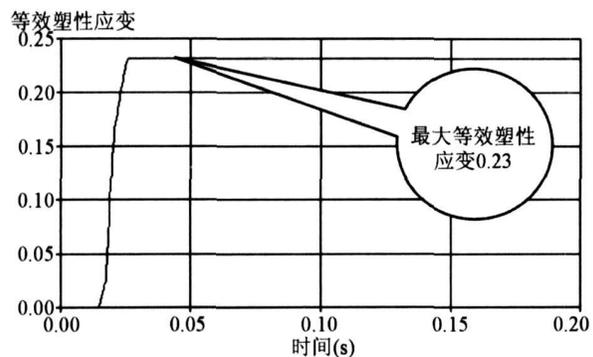


图 25 材料为 Q215 的球的某单元的等效塑性应变时间曲线

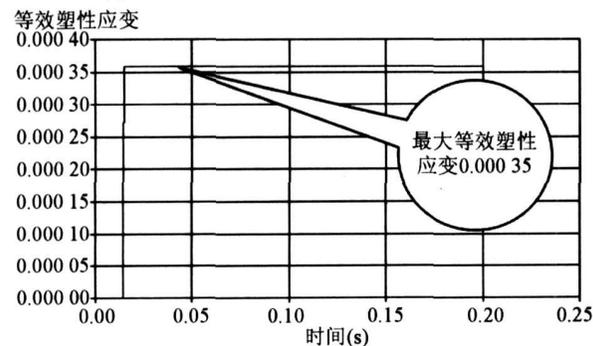


图 26 材料为 45 钢的球的某单元的等效塑性应变时间曲线

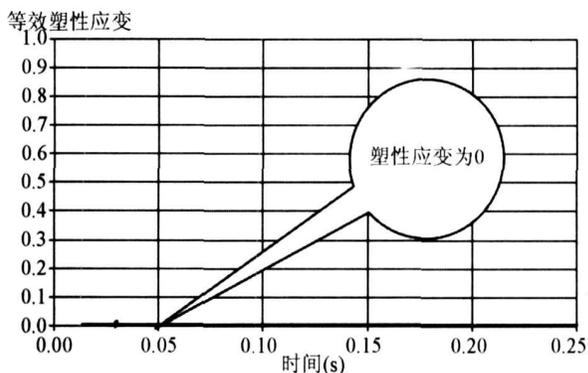


图 27 材料为 70 钢的球的某单元的等效塑性应变时间曲线

对比 3 种材料的球 (厚度同为 10 mm) 的变形、等效塑性应变的云图和时间历程曲线可知, 在冲击波载荷作用下, 材料为 Q15 的球和材料为 45 钢的球都进入屈服阶段, 发生了塑性变形, 强度无法满足要求。而且, 由于 Q15 强度低, 在冲击波的冲击作用下, 球表面发生明显变形, 局部地方出现凹陷, 而 45 钢的强度稍好, 球的变形情况有所改善。

材料为 70 钢的球则没有进入屈服阶段, 最大等效塑性应变为 0 说明材料为 70 钢厚度为 10 mm 的球能够抵抗冲击波载荷的作用, 其强度满足要求。模拟结果表明, 运用计算机模拟的方法, 经过多次运算和比较, 可以为救生球系统的设计提供强度满足要求的材料。

3 结 论

笔者运用数值分析的方法, 分析了救生球系统在冲击波载荷作用下的动态响应, 结果表明:

1) 运用数值分析的方法, 可以为救生球系统设计建立一个仿真的实验环境, 从而在一定程度上弥补了无法现场实验的不足。

2) 运用数值分析的方法, 可以为优化系统设计及提高设计效率提供参考数据。例如: 在对球体厚度、球体材料对球动态响应的影响进行多次运算分析后, 可以为救生球系统的设计提供强度满足要求的材料及为球体结构设计选择一个合适的厚度。

3) 笔者的数值模拟结果具有一定的参考价值, 但还需进行现场实验验证, 下一步要将数值模拟与现场实验研究结合起来。

参 考 文 献

- [1] 董建美. 我国煤矿事故多发的原因及对策 [J]. 国土资源, 2007(1): 22~25
- [2] 林柏泉, 常建华, 翟成等. 我国煤矿安全生产现状及应当采取的对策分析 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(5): 42~46
- [3] 刘先琴. 为了 69 个矿工兄弟 [N]. 光明日报, 2007-08-02(2)
- [4] 程德龙. 一种矿井安全救生带 [P]. 200510016963, 2005-12-28
- [5] 白云安. 矿井用应急救助管道 [P]. 200410045499, 2005-07-20
- [6] 张守中. 爆炸基本原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988
- [7] 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, 28(9): 8~11
- [8] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 [博士论文], 2003
- [9] 贾智伟, 景国勋, 程磊等. 巷道截面积突变情况下瓦斯爆炸冲击波传播规律的研究 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(3): 92~94
- [10] 万嘉礼. 机电工程金属材料手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990
- [11] 陈作斌. 计算流体力学及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [12] 顾尔祚. 流体力学有限差分法基础 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988
- [13] 王振华. 流体力学的基本理论 [M]. 上海: 上海大学出版社, 2002
- [14] 周昕清. 爆炸动力学及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [15] 朱自强. 应用计算流体力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998

欢迎订阅 2009年《建筑安全》杂志

由住房和城乡建设部工程质量安全监督与行业发展司指导, 中国建筑业协会建筑安全分会和四川华西集团有限公司联合主办的《建筑安全》杂志, 其主要职能是传达国家有关安全生产的政策、法规、标准和规范; 交流安全生产的先进技术和经验; 探索建筑业安全生产的规律和措施; 研究建筑安全理论; 推动施工安全技术及先进安全防护产品、设施的应用; 剖析事故发生的原因; 传递国内、外建设信息等。

本刊是宣传党和国家关于建筑安全生产的路线、方针和政策的理论喉舌, 是展示我国建筑安全生产工作 and 科技成果的窗口, 亦是我国建筑业各级领导、企业经理、管理人员、工程技术人员和广大职工做好施工安全工作的良师益友。并以其权威性、可读性、可操作性受到建筑行业领导和广大职工的喜爱, 被誉为“建筑安全工作者之家”。

杂志常设栏目: 要闻、法规标准、行业管理、施工安全技术、安全专论、事故预防与分析、电气安全、机械安全、高处作业安全、预防坍塌与中毒、安全环境与健康、事故应急预案、模架施工安全等。

发行范围: 国内外公开发行 刊号: ISSN1004-552X CN51-1390/TU

出版单位: 《建筑安全》杂志社 出版日期: 每月 5 号 邮发代号: 62-182

本刊为国际 16 开, 每月 5 日出版, 定价 10 元/册, 全年 12 期共 120 元。同时还出版 2008 年度建筑安全杂志社合订本 (于次年初发行), 定价 150 元/册。需要者请同月刊一并订购。

地 址: 成都市解放路二段 95 号 邮政编码: 610081

联系电话: 028-83331029 (发行部) 028-83379323 (编辑部)

028-83357526 (广告部) 028-83357742 (传真)

开户银行: 中国工商银行成都市外北支行

帐 号: 4402214009024908052

网 址: <http://www.jzqzz.com>

E-mail: jzqzz@163.com