

瓦斯爆炸冲击载荷下管道壁面 动态响应数值分析

伍堂锐,叶青*,贾真真

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为了研究井下巷道内瓦斯爆炸冲击载荷对壁面的动态响应,利用 ANSYS/LS-DYNA 建立圆形管道模型,在管道封闭端填充长度为 5 m 浓度为 9.5% 的瓦斯混合气体,对瓦斯爆炸冲击载荷作用下管道壁面的动态响应进行了数值模拟.得到管道壁面各测点速度、位移、超压随时间变化曲线.结果表明:距离爆源前方一定的距离,管道壁面响应更为强烈;从爆源处至开口端整体上壁面响应情况是先增大后减小的.研究成果能够对煤矿井下瓦斯爆炸源的确定和瓦斯爆炸事故调查提供一些理论指导和技术依据.

关键词:瓦斯爆炸;冲击载荷;壁面响应;数值模拟

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)04-0038-05

Numerical Analysis of Dynamic Response of Pipeline Under Gas Explosion Impact Loading

Wu Tangrui, Ye Qing, Jia Zhenzhen

(School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of gas explosion impact loading to the wall in roadway, ANSYS/LS-DYNA is used to establish the model of the circular pipeline. In the closed end of pipeline filled with a length of 5 m concentration of 9.5% gas mixture, the dynamic response of pipeline wall under the impact load of gas explosion is simulated. The velocity, the displacement, and the over-pressure changed with time curves are obtained. Results show that: Distance from the explosion source in front of a certain distance, the pipeline wall response is more obvious; The response from the source to the open end of the wall on the whole shows the increase first and then decrease. The research results can provide the theoretical guidance and technical basis for the determination of coal mine gas explosion sources and the investigation of gas explosion accidents.

Keywords: gas explosion; impact load; wall response; numerical simulation

煤矿采掘过程中一旦发生瓦斯爆炸事故,尤其是特别重大瓦斯爆炸事故不仅仅导致大量的人员伤亡、严重的巷道及设备损坏和巨大的财产损失,还可能造成负面社会影响甚至不良国际声誉^[1].瓦斯爆炸的损伤破坏效应主要体现在爆炸的传播阶段^[2]强大的爆炸冲击载荷能够摧毁爆炸源附近的构筑物,巷道壁面也会受到爆炸冲击载荷和高温火焰等相互作用而产生损伤甚至严重破坏,从而造成更为严重的损失.例如 2012 年 8 月 29 日,肖家湾煤矿发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成 48 死 54 伤,直接经济损失 4 980 万元,在爆炸冲击和高温的相互作用下,1 220 m 平巷下部 8#和 9#煤层一些采掘作业点积聚的瓦斯发生二次爆

收稿日期:2017-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374003;51604110);湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ6038);湖南省教育厅资助项目(16C0653)

*通信作者,E-mail: cumtyeqing@126.com

炸,造成了多处巷道损坏。“2013年3月28日16时左右,八宝煤矿-416采区附近采空区发生瓦斯爆炸,截止29日21时56分,该采区共计发生爆炸5次,造成36人遇难,12人受伤,直接经济损失4708.9万元,煤矿巷道遭到严重破坏,巷道维修设备更新等耗资巨大。”因此国内外专家学者非常重视研究爆炸对巷道周围结构在冲击载荷作用下的响应问题,经过长期探索取得了丰硕成果^[3-8]。目前有关爆炸冲击荷载响应特性的研究,大多集中在固体炸药爆炸方面,针对瓦斯爆炸对壁面结构响应特性的研究较少^[9,10],并且研究主要是在实验室管道中模拟井下巷道,但是实验的局限性在于不能得到爆炸过程的详细信息,而数值模拟可以很好地再现整个爆炸过程。研究^[11-13]表明数值模拟可以较好地模拟爆炸冲击问题,因此采用ANSYS/LS-DYNA建立瓦斯爆炸管道模型,基于多物质ALE算法^[14]针对壁面进行仿真分析。通过研究瓦斯爆炸过程中管道壁面的动态响应,对煤矿瓦斯爆炸灾害防治和低浓度瓦斯输送与开发利用具有十分重要的现实意义和科研价值,同时研究成果对煤矿井下瓦斯爆炸源的确定和瓦斯爆炸事故调查能提供一些理论指导和技术依据,对丰富和完善瓦斯爆炸理论也将起到积极的促进作用。

1 数学模型

1.1 运动方程

参考坐标系中各点的位置由位置矢量 ξ 来确定, ξ 在空间中的运动速度为 v ,质点 X 在参照坐标系的速度为 ω 。 v 为参照点 ξ 在空间中的位置 $x(\xi,t)$ 对时间的导数; ω 为位置矢量 $\xi(X,t)$ 对时间的导数。即:

$$v = \frac{\partial x(\xi,t)}{\partial t}; \omega = \frac{\partial \xi(X,t)}{\partial t} \Big|_X. \quad (1)$$

1.2 控制方程(质量、动量、能量守恒方程)

在任一连续体研究对象中, $\partial\Delta_X$, $\partial\Delta_x$ 和 $\partial\Delta_\xi$ 分别为连续体的物质域、空间域和参考域边界,连续体中各构形的密度分别表示为 ρ_X , ρ_x 和 ρ_ξ 。

$$M = \int_{\Delta_\xi} \rho_\xi dv_\xi = \int_{\Delta_x} \rho_x dv_x = \int_{\Delta_X} \rho_X dv_X; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Big|_X \int_{\Delta_\xi} \rho_\xi v_\xi dv_\xi = \int_{\partial\Delta_\xi} t_i ds_\xi + \int_{\Delta_\xi} \rho_\xi f_i dv_\xi; \quad (3)$$

$$E = V_{s_{ij}} \xi_{ij} - (p + q) \dot{V}. \quad (4)$$

式中: t_i 为作用于参考域 Δ_ξ 的边界 $\partial\Delta_\xi$ 上单位表面上的力; f_i 为作用于物体中单位质量的体积力; V 为现时构形的相对体积; \dot{V} 为现时构形的相对体积变形速度; s_{ij} , p 为偏应力张量和静水压力; ξ_{ij} 为应变率张量; q 为体积粘性阻力。

2 数值模拟

2.1 模型的建立

根据圆形管道模型的轴对称性,同时也考虑到缩短计算机计算时间和便于后期观察,故利用ANSYS/LS-DYNA建立1/2的圆形管道模型,建立后的有限元模型如图1所示。管道长10m,半径0.8m,整个模型均采用SOLID164单元。管道采用双线性硬化弹塑性材料模型,密度为7830kg/m³,泊松比为0.25,弹性模量为201GPa,切向模量为10GPa,在标准大气压下环境温度设置为25℃。瓦斯混合气体及空气相关参数参照文献[15]。由于90%左右的瓦斯爆炸事故是发生在掘进工作面,为符合井下掘进巷道现场实际情况,所以设置管道一端开口,另一端为封闭。当瓦斯浓度为9.5%时爆炸威力较大,因此我们在管道内封闭端处聚集长度为5m,浓度为9.5%瓦斯混合气体,并用水密薄膜将混合气体与正常空气分隔开,模拟的全过程均采用统一单位制(kg-m-s)。

2.2 网格划分

图2为划分网格后的有限元模型,为了便于观察,在LS-PREPOST中显示网格划分后的模型如图3所示,共3部分组成:壁面、瓦斯混合气体区和空气区。根据研究需要,规则模型可采用映射网格划分^[16],

因此对管道模型采用了八节点六面体单元形式进行网格划分,模型单元边界尺寸控制为0.04 m,模型划分后产生378 000个单元.

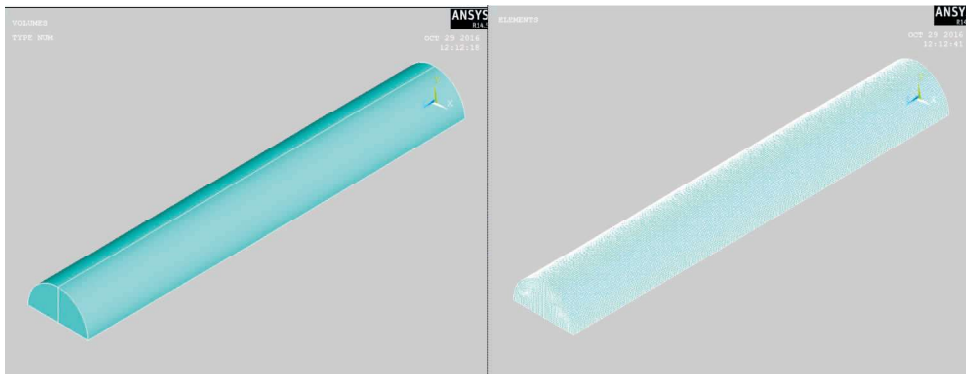


图1 管道有限元模型

图2 划分网格后的有限元模型

2.3 边界条件与初始条件

为了便于研究,对模型做出如下合理假设:假设管道内除瓦斯爆炸热源外无其他任何热源;假设管道壁面光滑且绝热;假设管道内瓦斯混合气体和空气均均匀分布;假设模型开口端为无反射边界条件;假设边界的剖面法线方向上的位移为零;忽略瓦斯爆炸化学反应的中间过程.

3 模拟结果分析

为了研究瓦斯爆炸情况下管道壁面的动力响应情况,从管道内壁面的闭口端向开口方向依次设置6个测点,A测点为712单元坐标是(0.8,0,0.3),B测点为4 168单元坐标是(0.8,0,2),其余测点依次间隔2 m设置,管道壁面测点分布情况如图4所示,其中点火位置为(0,0,2).由于最大爆炸压力及其上升速率是国际上广泛作为计算毁伤的重要参考,因此分别对测点环向(x 方向)的速度、位移、超压进行监测,进而得到环向冲击载荷变化趋势,有效反应壁面响应情况.为了便于对比分析,用LS-PREPOST后处理时对瓦斯区和空气区的测点分开显示,其中A~C号测点处于瓦斯区,D~F号测点处于空气区.

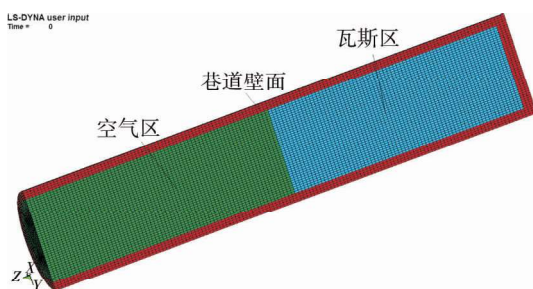


图3 划分 part 后的有限元模型

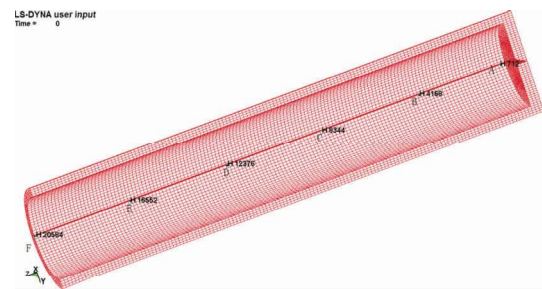


图4 管道壁面测点分布情况

由图5各测点环向速度时程曲线得到:由于壁面不规则反射,壁面测点速度测值并非平滑曲线,而是产生震荡,瓦斯区(图5a)各测点环向速度震荡幅度整体上要大于空气区(图5b),瓦斯区震荡频率也高于空气区.这是由于瓦斯爆炸过程中,瓦斯区能量瞬间释放,各测点瞬间达到超压峰值造成的,此时,由于冲击波的频繁反射管道壁面会受到多次的拉压而造成变形甚至破坏;而空气区不能持续为后续爆炸提供可燃物,随着爆炸的传播由于能量转化和能量损失爆炸威力会越来越小,管道壁面的响应也随之减弱.故导致瓦斯区壁面响应整体上要大于空气区.由图5不难看出图5a中各测点环向速度测值变化幅度依次为 $A < B < C$,说明在瓦斯区爆源附近区域开口方向壁面响应比闭口方向更为强烈;图5b中测点环向速度变化幅度大小依次为 $D > E > F$,故在空气区,离爆源位置越近管道壁面响应越强.整个速度变化趋势符合瓦斯爆炸过程中先增大然后到峰值最后衰减的现象.

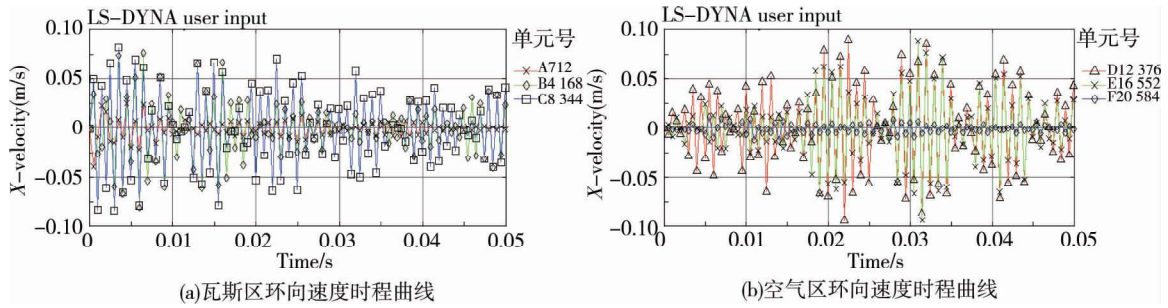


图 5 环向速度时程曲线

由图 6 各测点环向位移时程曲线得到:由于壁面不规则反射,壁面测点位移值并非平滑曲线,而是产生震荡,随着反应的发生,各测点位移测值呈现一定变化规律:整个位移变化趋势为先增大然后衰减.图 6c 中各测点位移变化幅度依次为 $A < B < C$. A~C 测点变化趋势基本相似,都是先迅速增加然后衰减最后趋于平稳,其中 A 测点位移变化幅度最小,位移最大值为 0.4×10^{-6} m, B 测点位移整体上略小于 C 测点,其中 C 测点在 0.085 s 时位移达到最大值 0.227×10^{-4} m.所以相对而言 C 测点壁面响应较为强烈.图 6d 中瓦斯爆炸击波依次经过 D~F 号测点,由于能量逐渐衰减,各测点位移变化幅度依次为 $D > E > F$,故在空气区距爆源越近管道壁面位移越大壁面响应效果越强.

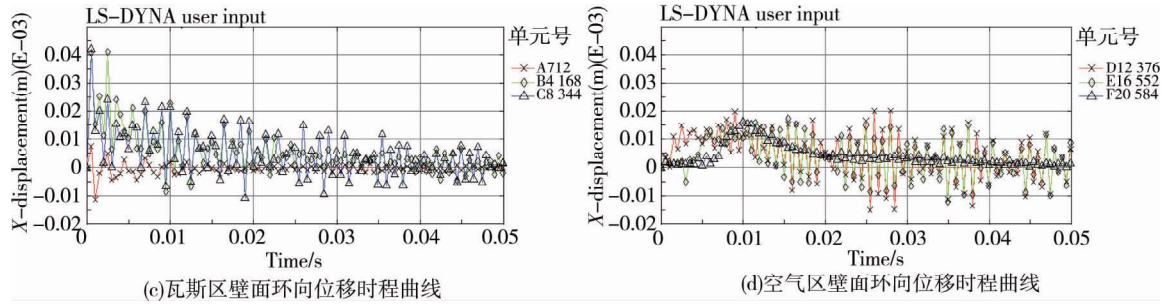


图 6 壁面环向位移时程曲线

图 7 为管道壁面测点的超压时程曲线,可得:壁面超压时程曲线趋势和壁面位移、速度变化趋势较为吻合.图 7e 中各测点超压测值大小关系为 $A < B < C$ 中,由于爆源位于管道中心且离封闭端 2 m 处,瓦斯混合气体刚被点燃时,燃烧速度还比较慢,此时还没有能够产生巨大的能量,在 C 测点位置由于能量向开口方向传递和后续瓦斯爆炸产生能量的累积使得该测点的冲击波超压较大,最大超压值达到 4.3×10^6 Pa,因此在爆源处管道壁面响应不会是最强烈的,超压值约为 3.4×10^6 Pa,但也相对比较强烈.图 7f 中由于没有了瓦斯气体,后续爆炸不能够连续进行,但是瓦斯区爆炸所产生的绝大部分能量向开口方向传播,因此 D 和 E 测点超压测值依次增大,而 F 测点在开口处由于泄压迅速,故超压变化幅度不是很大.整体来看 D 测点测值略大于 E 测点测值,超压测值也存在 $D > E > F$ 的关系.

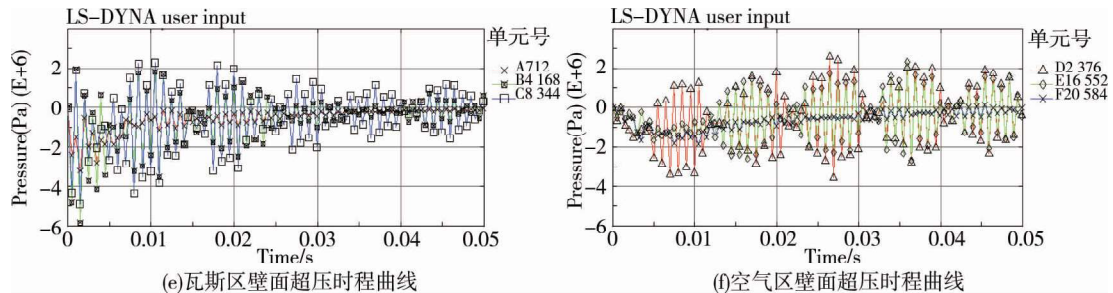


图 7 壁面超压时程曲线

通过比较管道壁面各测点的速度、位移和超压随时间变化曲线,我们可以发现其趋势基本一致,即在瓦斯区各测点的速度、位移、超压变化幅度大小均为 $A < B < C$,而在空气区均为 $D > E > F$,各测点处的最大值

依然存在这种关系.结果与叶青^[1]对受限空间瓦斯爆炸传播特性研究结论一致,即冲击波的产生有一个过程,因此B测点测值小于C测点;冲击波传播过程中的强度取决于补充能量与耗能的关系,由于没有能量补充D测点后测值逐渐衰减.故从爆源处至开口端瓦斯区壁面响应整体上是增强的而空气区壁面响应整体上是减弱的.这与相同情况下瓦斯爆炸冲击载荷传播规律极为相似,存在明显的点燃阶段,加速传播阶段和衰减阶段,与徐景德^[2]的研究结论“瓦斯爆炸的破坏效应主要体现在爆炸的传播阶段”相吻合.

4 结论

1)可以利用ANSYS/LS-DYNA建立三维有限元分析模型,模拟管道壁面在瓦斯爆炸冲击载荷下的动态响应过程.通过模拟得到瓦斯爆炸环向冲击载荷作用下壁面响应的发展规律:从爆源处至开口端,瓦斯区壁面响应整体上是增强的而空气区壁面响应整体上是减弱的.

2)爆源处壁面响应较强,但点火瞬间瓦斯混合气体还处于点燃阶段,而瓦斯爆炸的破坏效应主要体现在爆炸的传播阶段,所以距爆源处开口方向一定距离,管道壁面响应程度比爆源周围更为强烈.

参考文献:

- [1] 叶青,林柏泉.受限空间瓦斯爆炸传播特性[M].徐州:中国矿业大学出版社,2012.
- [2] 徐景德.矿井瓦斯爆炸传播的尺寸效应研究[J].中国安全科学学报,2001,11(6):36-40.
- [3] 夏谦.隧道内爆炸作用衬砌结构的损伤机理和抗爆性能研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [4] 吕祥锋,潘一山,李忠华,等.冲击波作用下管道破坏规律相似模拟研究[J].振动与冲击,2011,30(10):212-215.
- [5] 曲志明,孙强,黎锦贤,等.掘进管道瓦斯爆炸冲击波与巷道壁面作用研究[J].煤矿安全,2005,36(9):1-2.
- [6] 潘城,赵光明,孟祥瑞.爆炸载荷作用下围岩累积损伤效应的数值分析[J].爆破,2016,33(1):30-33.
- [7] Kobiera A, Kindracki J, Ztdak P, et al. A new phenomenological model of gas explosion based on characteristics of flame surface[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007,20(3): 271-280.
- [8] Dallyj W, Foumey W L, Holloway D C. Influence of containment of the bore hole pressure on explosive induced fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomech Abstr,1975,12:5-12.
- [9] Sair A, Whitney M. Blast analysis and retrofit of structures in industrial facilities[C]//Structures Congress2009:Dont Mess with Structural Engineers-Expanding Our Role, Structure 2009.
- [10] 穆朝民,任辉启,李永池,等.爆室内爆炸流场演化与壳体动力响应研究[J].振动与冲击,2009,28(10):106-111.
- [11] Chafi M S, Karami G, Ziejewski M. Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALE multi-material formations[J]. Int J Impact Engineering, 2009,36:1269-1275.
- [12] Langdon G S, Chung K Y S, Nurick G N. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates, Part II: localised blast loading[J]. Int J Impact Engineering, 2005,31:85-111.
- [13] Bonorchis D, Nurick G N. The analysis and simulation of welded stiffener plates subjected to localized blast loading[J]. Int J Impact Engineering, 2010,37:260-273.
- [14] Alia A, Souli M. High explosive simulation using multi-material formulations[J]. Applied Thermal Engineering, 2006,26:1032-1042.
- [15] 张秀华,王钧,赵金友,等.室内燃气爆炸冲击波的特性及传播规律[J].工程力学,2014(s1):258-264.
- [16] 石少卿,康建功,江敏,等.ANSYS/LS-DYNA在爆炸与冲击领域内的工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.