

管道内瓦斯爆炸冲击作用特性数值模拟研究

柳伟¹, 叶青^{1,2*}, 伍堂锐¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了掌握管道内瓦斯爆炸冲击作用特性, 利用 ANSYS/LS-DYNA 对浓度为 9.5%, 填充长度为 5 m 的瓦斯在管道内爆炸产生冲击作用进行了数值模拟, 分析了耦合效应对管道内瓦斯爆炸流场和冲击波超压的影响。研究表明: 瓦斯爆炸瞬间, 管道内坐标分别为 $A(0,0,2)$, $B(0,0,4)$ 测点的压力瞬间达到峰值, 之后测点 A, B 的压力逐渐减小直至趋近于某一稳定值。而初始压力为大气压的测点 $C(0,0,6)$, $D(0,0,8)$, $E(0,0,10)$ 依次达到超压峰值后逐渐地衰减趋近于大气压力。因此, 在耦合和解耦合的 2 种情况下, 不同测点的超压时程曲线走势基本一致。在解耦合条件下, 管道轴向同心环等压线以均匀圆环的形式向开口方向传播; 在耦合条件下, 管道轴向同心环等压线以紊乱的等压线分布形式向开口端传播。因此, 瓦斯爆炸流固耦合效应对冲击波等压线的分布有一定的影响, 即改变流场分布。

关键词: 管道; 瓦斯爆炸; 爆炸流场; 冲击波超压; 数值模拟

中图分类号: TD712.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5876(2016)03-0015-06

Numerical simulation research on characteristics of gas explosion shock in tubes

LIU Wei¹, YE Qing^{1,2*}, WU Tangrui¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to master the characteristics of gas explosion shock in tubes, induced by the gas whose concentration is 9.5% and the filling length of which in tubes is 5 m, this process is simulated through the software ANSYS/LS-DYNA. Furthermore, the influence of coupling effects on the flow field of gas explosion and the shock overpressure inside the tube are analyzed. Results indicate that at the moment of gas explosion, the pressure of measuring point $A(0,0,2)$, and $B(0,0,4)$, arranged in the gas regional of tube reaches to peak suddenly, then they decreases to a steady value gradually, while the pressure of measuring point $C(0,0,6)$, $D(0,0,8)$ and $E(0,0,10)$ decreases to the atmospheric pressure before they reaches to overpressure peak value successively. Therefore, the tendency of the overpressure-time curve keeps consistent between those different measuring points under the coupling and uncoupling condition. The isobar of concentric ring along the axial direction transmits towards the opening direction under the download coupling condition in the form of uniformly circle, but in the form of inordinate isobar under the coupling condition. So, the fluid-solid coupling effect of gas explosion has some influences on the isobar of shock wave, namely the distribution characteristic of isobar is changed.

Key words: tubes; gas explosion; explosion field; shock wave overpressure; numerical simulation

收稿日期: 2016-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374003; 51004048); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ2092)

*通信作者, E-mail: cumtyeqing@126.com

瓦斯爆炸是我国煤炭开采过程中最为严重的自然灾害之一,尤其是特别重大瓦斯爆炸事故导致众多人员伤亡、巷道设备严重破坏和巨大财产损失,造成不良的社会影响^[1].为了有效地预防和控制煤矿井下瓦斯爆炸事故,国内外专家通过不同的方法对瓦斯爆炸传播特性及机理方面进行了大量的研究,并取得了显著的成果.司荣军^[2]针对实验管道和大型试验巷道,分别考察了不同点火能量、不同体积量和不同浓度 3 个因素对管道和巷道内瓦斯爆炸的传播规律的影响,为煤矿的抑爆装备的研究和开发提供了重要的理论依据.徐景德等^[3]以实验研究结果为基础,对矿井瓦斯进行了数值模拟和理论分析.文献[4]研究表明流固耦合效应对爆炸荷载的影响较小.文献[5]表明固体变形或运动会反射超压造成一定的影响,流固耦合效应不可忽视.许多学者^[6-10]对受限空间内部爆炸流场的分布和演化进行了相关的研究,并得出一些非常有价值的结论.上述分析研究成果对管道内爆炸冲击波传播特性分析具有非常重要的价值,但是由于煤矿井下环境的复杂性,瓦斯爆炸属于非点源爆炸,和以上研究还是存在一定的区别.文献[10]研究表明瓦斯浓度在 9.5% 时爆炸,产生的爆炸速度和爆炸冲击波压力都达到最大.为此,本文采用动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立管道瓦斯爆炸模型,基于 ALE 算法对浓度为 9.5% 瓦斯爆炸进行仿真分析,期望得出管道内瓦斯爆炸有益结论,为预防瓦斯爆炸事故的发生、降低瓦斯爆炸事故灾害损失提供理论依据和技术指导.

1 数学模型

1.1 运动方程

将任一连续体在初始时刻 t_0 的构形记作 Ω_x , 将该连续体在 t 时刻的构形记作 Ω_x , ALE 方法描述是在连续体现时构形和初始构形之外引入一个可以独立于初始变形和现时构形运动的参照构形^[11], 记作 Ω_ξ . 为确定参照构形中的各参照点的位置, 引入参照坐标系 $o\xi_1\xi_2\xi_3$. 参照构形中各点的位置由其在参照坐标系中的位置矢量 ξ 确定.

ALE 方法描述中的有限单元部分是对参照构形进行的, 一一对应的映射关系, 雅可比行列式 J_1 (描述的是参照构形到现时构形的映射关系), J_2 (描述的是初始构形到现时构形的映射关系) 都不为零. 参照构形中某点 ξ 在空间中的运动速度 (即网格点的运动速度) v 则等于参照点 (即网格点) ξ 在空间中的位置 $x(\xi, t)$ 对时间的导数.

$$v = \frac{\partial x(\xi, t)}{\partial t}. \quad (1)$$

质点 X 在参照坐标系的速度 ω 为质点 X 在参照坐标系的位置矢量 $\xi(X, t)$ 对时间的导数, 即

$$\omega = \left. \frac{\partial \xi(X, t)}{\partial t} \right|_X. \quad (2)$$

1.2 控制方程

1.2.1 质量守恒方程

任取一连续体作为研究对象, 分别用 $\partial\Omega_x, \partial\Omega_x, \partial\Omega_\xi$ 表示连续体的物质域、空间域、参考域的边界, 用 ρ_x, ρ_x 和 ρ_ξ 分别表示连续体中各构形的密度. 根据连续介质力学知识可知, 在不同构形中连续体的质量 M 可以表示为

$$M = \int_{\Omega_\xi} \rho_\xi d\mathbf{v}_\xi = \int_{\Omega_x} \rho_x d\mathbf{v}_x = \int_{\Omega_x} \rho_x d\mathbf{v}_x. \quad (3)$$

式中, $\rho_\xi(\xi, t) = J_1 \rho_x(x, t)$; $\rho_x = 2J_2 \rho_x(x, t)$.

1.2.2 动量守恒方程

动量守恒定律表明: 在 t 时刻占参考域 Ω_ξ 的物体总动量的整体变化率等于施加在该物体上的所有外力之和, 即

$$\left. \frac{\partial}{\partial t} \right|_X \int_{\Omega_\xi} \rho_\xi \mathbf{v}_\xi d\mathbf{v}_\xi = \int_{\partial\Omega_\xi} t_i ds_\xi + \int_{\Omega_\xi} \rho_\xi f_i d\mathbf{v}_\xi. \quad (4)$$

式中, t_i : 作用在参考域 Ω_ξ 的边界 $\partial\Omega_\xi$ 上单位表面上的力; f_i : 作用在物体中单位质量的体积力.

1.2.3 能量守恒方程

$$E = V_{s_{ij}} \xi_{ij} - (p + q) \dot{V}. \quad (5)$$

式中, V : 现时构形的相对体积; \dot{V} : 现时构形的相对体积变形速度; s_{ij}, p : 偏应力张量和静水压力; ξ_{ij} : 应变率张量; q : 体积粘性阻力.

2 数值模拟

2.1 模型的建立

本文实验模拟的管道尺寸:管道长为 10 m,半径为 0.8 m,管道一端封闭,另一端为开口,忽略管道壁厚。管道内封闭端处聚集长度为 5 m,浓度为 9.5% 瓦斯预混合气体,混合气体与正常空气之间用水密薄膜隔开。基于三维模型的计算量较大,为了便于研究,根据模型的轴对称性,建立 1/2 的管道模型进行数值模拟,所用材料的模型和参数均采用统一单位制(kg-m-s),管道有限元模型如图 1。

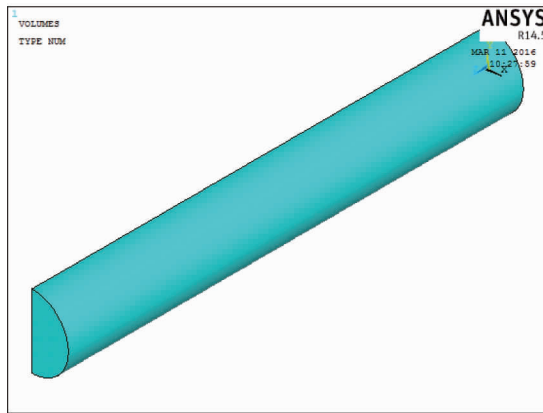


图1 管道有限元模型

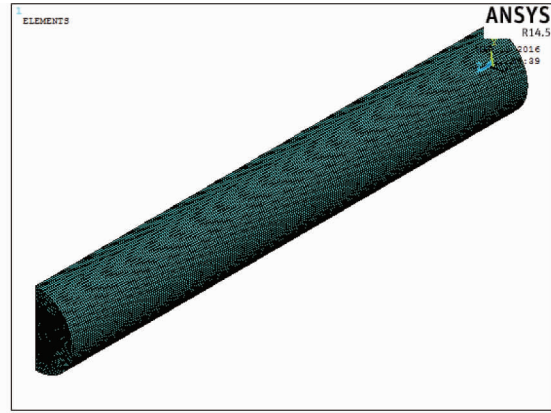


图2 划分网格后的有限元模型

2.2 网格划分

根据本文研究的需要,本文采用了六面体单元形式对管道模型进行映射网格划分,利用映射网格划分规则模型是一种较好的网格划分方法^[12]。因此,本文采用的单元尺寸为 0.04 m,计算模型共划分为 192 000 个单元,管道的单元数为 32 160 个,瓦斯单元数为 8 000 个,空气的网格数为 798 440 个,划分网格后的有限元模型如图 2。

2.3 边界条件与初始条件

瓦斯爆炸是一个极其快速且非常复杂的物理、化学反应过程,其过程中所涉及到许多的中间产物和瞬间产物,例如,自由基、离子、电子、分子等。这些爆炸物理化学变化包括流体流动扩散、多孔介质传热、表面的化学反应和气体产物(CO, H₂O 等)的生成与扩散,这些过程决定了瓦斯爆炸的最终特性^[13-15],在本文中忽略其化学反应的中间过程。为了简化计算,对模型做出了如下假设:

- 1) 除瓦斯爆炸的热源外,管道内没有其他的体积热源。
- 2) 模拟管道壁面光滑绝热,瓦斯的初始浓度、温度和压力都均匀分布,初始温度 $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $P_0 = 0.1\text{ MPa}$ 。
- 3) 模型一端设置封闭,另一端设置开口且无反射边界条件。
- 4) 根据模型的几何轴对称性,边界的剖面法线方向上的位移为零。

3 模拟结果及分析

为了研究流固耦合效应对管道内瓦爆炸冲击波传播规律的影响,然而分析过程中不计流固耦合效应,管道采用刚性材料模型,质量密度为 7 830 kg/m³,弹性模量为 201 GPa,泊松比为 0.3;考虑爆炸流场与管道壁的耦合效应时,管道材料采用双线性硬化弹塑性模型,屈服应力为 300 MPa,切向模量为 10 GPa。

3.1 解耦合分析

图 3 给出解耦合条件下管道轴线上各测点超压时程曲线图。

不考虑爆炸流场与管道壁间的耦合效应,将管道壁视为刚性壁,忽略管道厚度对爆炸流场的影响。在管道封闭端积聚长度 5 m,浓度为 9.5% 的瓦斯预混气体遇点火源发生爆炸,点火位置为管道封闭端,坐标为(0,0,2)。为了测得瓦斯爆炸过程中冲击波超压变化,分别在有限元管道轴线上依次布置 5 个监测点。测点坐标分别为 A(0,0,2), B(0,0,4), C(0,0,6), D(0,0,8) 和 E(0,0,10)。从图 3 中直观看出瓦斯爆炸压力变化趋势,测点 A, B 爆炸瞬间压力达到超压峰值为 0.93 MPa,并且在几毫秒内维持着一定值,这是因为 A, B 测点都在爆炸气体区域内,2 个测点距离爆炸源较近(测点 A 在爆心位置),2 点达到最大爆炸压力的时间极短,说明瓦斯爆炸的瞬间性。测点 C, D, E 未受到前驱冲击波扰动的影响,初始压力为大气压力。

随着时间的推移及瓦斯爆炸的充分反应,并持续为前驱冲击波提供能量,使其向管道开口端传播.管道内空气段受到冲击波扰动后,气体被压力波锋面压缩导致 C,D,E 3 个测点依次出现超压峰值.最终测点 A,B,C,D,E 的压力都趋于稳定状态.管道内冲击波衰减主要是由于气体间的粘性摩擦以及空气动能的增加造成的.在无粘性的理想情况下,管道内的冲击波超压是不衰减的,压力的衰减的主要原因是由于正压区随着空气冲击波的传播不断被拉宽,以及冲击波在传播过程中始终存在着因空气受绝热压缩而产生不可逆的能量耗散效应而造成的.

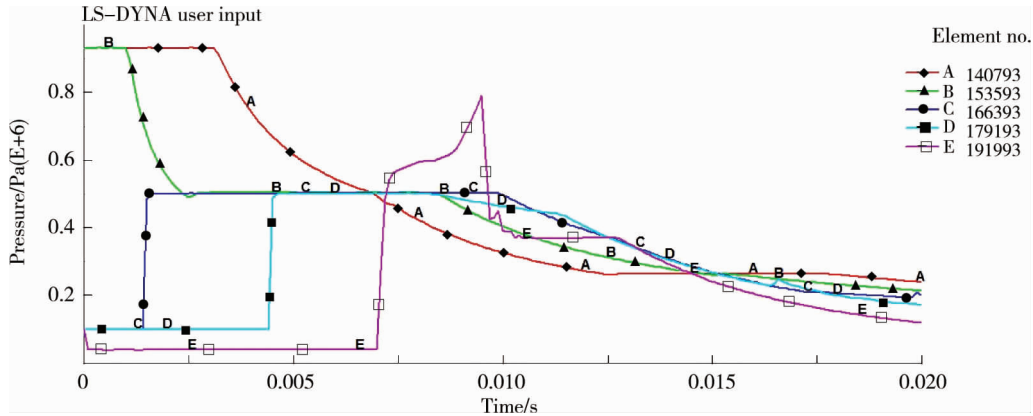


图3 解耦合条件下管道轴线上各测点超压时程曲线

图4是解耦合条件下瓦斯爆炸管道轴向不同时刻等压线分布图,即瓦斯爆炸流场的冲击波系的演化过程.管道内瓦斯被点燃发生爆炸后,冲击波向各个方向同时传播,由于管道的轴对称性,管道的刚性壁面以及封闭端约束,冲击波遇到管道封闭端面发生了正反射,同时以垂直管道内壁方向传播也发生了全反射,反射后出现了同心环状的等压线分布.随着爆炸的进行,冲击波与管道壁面发生了多次的来回反射,管道内壁的反射点不断向开口方向移动,反射后均以同心圆环等压线形式向管口方向靠近,且波后等压线间距也逐渐变宽.

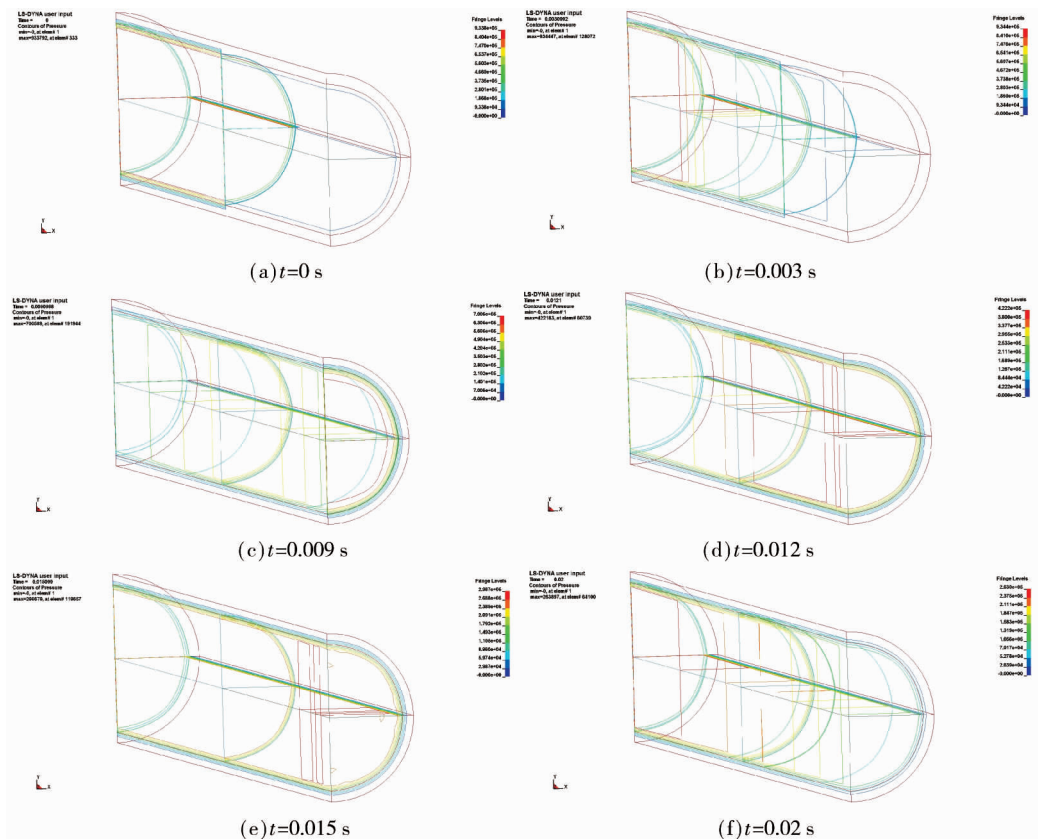


图4 解耦合条件下管道轴向不同时刻的等压线分布

3.2 耦合分析

考虑爆炸流场与管道壁间发生流固耦合效应,管道模型采用双线性硬化弹塑性材料,其他条件设置均和解耦分析完全相同.由图5分析可知,瓦斯爆炸瞬间,测点A,B处的压力瞬间达到超压峰值为0.89 MPa,2点达到最大爆炸压力的时间极短,并且在几毫秒内维持着一定值,这是因为A,B 2测点均在爆炸气体内部,说明了瓦斯爆炸的发生是瞬间的.管道内空气区域的气体未被扰动,测点C,D,E仍处于大气压力状态.随着计算时间的变化,爆炸气体的活塞效应,轴向传播的冲击波与反射后的冲击波之间相互叠加,然而在传播过程中伴随着能量耗散,使得测点C,D,E依次达到各自的超压峰值,但仍低于测点A,B超压峰值.最终A,B,C,D,E各测点的压力都趋于稳定状态.由图5各个测点曲线的整体趋势分析可知,5个测点分别达到各自的超压峰值后均有衰减,由于瓦斯爆炸完全后,气体间粘性摩擦,热传导及壁面多次反射冲击波能量被慢慢地消耗,最后衰减趋于大气压力.

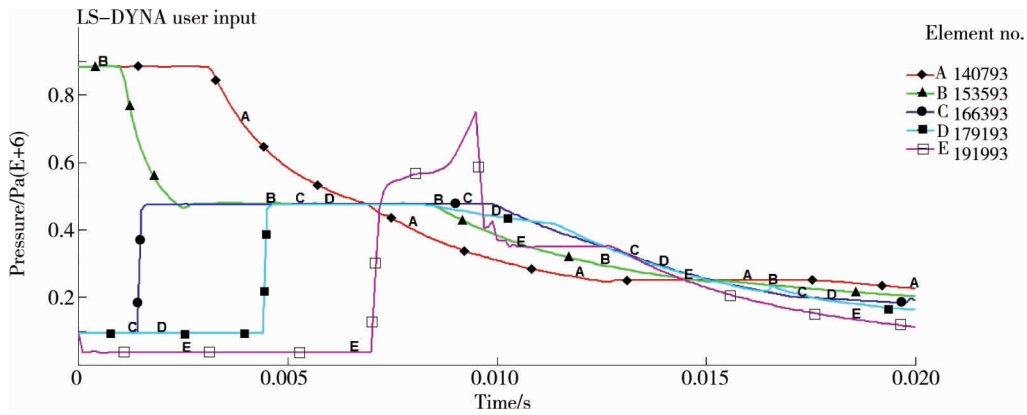


图5 耦合条件下管道轴线上各测点超压时程曲线

图6耦合条件下管道轴向不同时刻的等压线分布图.由于受到封闭端和管道壁面的约束作用,爆炸产生的空气冲击波作用在管道上,考虑到爆炸流场的耦合作用,管道内壁在爆炸冲击载荷作用下产生运动或者变形,而固体的运动或者变形反过来影响冲击波反射的方向,从而改变爆炸冲击波以及反射激波的载荷分布和大小.由于管道结构的变形是几何非线性,再加上流体运动的非线性,从而导致管道壁面的流固耦合问题更加复杂化.

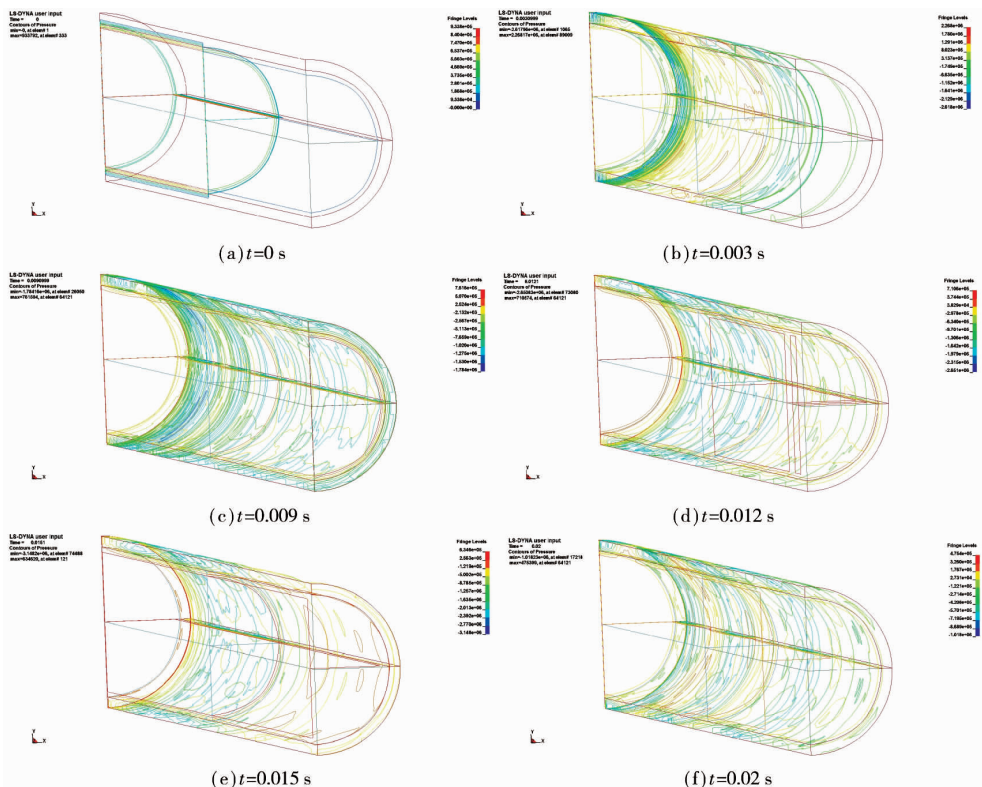


图6 耦合条件下管道轴向不同时刻的等压线分布

通过管道内瓦斯爆炸流场在解耦合和耦合情况下的对比分析,分别比较了管道轴线上各测点的压力变化情况.从图3和图5中的比较可知,在整个计算时间内,测点A、B的超压瞬间达到最大,随后单调衰减直至趋近于某一定值,而初始时刻测点C、D、E处于大气压状态下,随后依次出现各自的超压峰值,达到峰值后逐渐衰减直至趋近于大气压力.因此,在耦合和解耦合情况下,2图中各测点超压时程曲线的走势基本一致,流体和固体的相互作用对爆炸流场内部的冲击超压大小的影响基本上可以忽略;通过比较图4和图6瓦斯爆炸流场等压线分布,由图4可知,管道轴向的等压线分布呈现较规则同心环,以圆环的形式向管道开口处传播,传播过程冲击波对管道壁荷载作用,由于刚性管道壁面的限制,管道壁均未发生微弱变形.图6可知,在整个传播过程管道内等压线分布一直处于紊乱状态,说明爆炸冲击波加载在管道壁上,管道产生较为微弱的变形,流场边界的变化波系,导致对结构的后续冲击波加载位置的变化,管道壁的微弱变形反而影响冲击波的反射方向,改变了荷载的分布,致使瓦斯爆炸流场的等压线紊乱.

4 结论

1)在解耦合和耦合的条件下,瓦斯爆炸瞬间,管道内测点A、B的压力瞬间达到超压峰值,之后测点A、B的压力逐渐减小直至趋近于某一定值,而初始压力为大气压的测点C、D、E依次达到超压峰值后逐渐地衰减趋近于大气压力.因此,考虑耦合效应时各测点的超压峰值变化趋势与非耦合情况基本一致,超压峰值大小差异较小,流固耦合作用对爆炸流场内部的爆炸冲击超压大小影响较小,计算分析时基本上采用解耦合模型.

2)通过比较瓦斯爆炸流场等压线分布规律可知,在解耦合条件下,管道轴向的等压线分布呈现较规则同心环,以圆环的形式向管道开口处传播;在耦合条件下,管道轴向等压线分布则以较为紊乱的形式向管道的开口处传播.因此,瓦斯爆炸流固耦合效应对爆炸流场等压线分布有一定的影响,即改变流场分布.

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] 司荣军.管道内瓦斯爆炸传播试验研究[J].煤炭科学技术,2009,37(2):47-50.
- [3] 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(北京),2002.
- [4] 张亚军,徐胜利.中心内爆引起的圆柱壳流固耦合问题数值模拟[J].中国科学技术大学学报,2007,37(11):6-12.
- [5] Casadei F, Halleux J P, Sala A, et al. Transient fluid - structure interaction algorithms for large industrial applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001,190(24/25):3081-3110.
- [6] 张亚军,张梦萍,徐胜利,等.爆炸容器内冲击波系演化及壳体响应的数值研究[J].爆炸与冲击,2003,23(4):331-336.
- [7] 郑万成.掘进巷道内瓦斯爆炸传播规律[J].煤矿安全,2015(1):152-155.
- [8] 陈晓坤,郭丽萍,程方明,等.独头巷道瓦斯爆炸的数值模拟[J].煤矿安全,2012(7):20-22.
- [9] 罗振敏,张群,王华,等.基于FLACS的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J].煤炭学报,2013(8):1381-1387.
- [10] 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.
- [11] 王建,金志浩.输流管道流固耦合非线性动力学分析[J].沈阳化工学院学报,2007(4):292-295.
- [12] 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,2011.
- [13] 王涛.管道内甲烷爆炸特性及CO₂抑爆的实验与数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [14] Marsi A R, Ibrahim S S, Nehzat N, et al. Experiment study of premixed flame propagation over solid obstruction[J]. Exp Thermal and Fluid Science,2000,21:109-116.
- [15] 魏嘉,闻利群.瓦斯爆炸的研究进展及展望[J].山西化工,2015(1):41-43.