

朱邵飞,叶青,柳伟,等.瓦斯爆炸对地下巷道破坏效应的数值模拟分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4): 17-23. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.003

Zhu S F, Ye Q, Liu W, et al. Numerical Simulation Analysis of Damage Effects of Gas Explosion to Underground Roadways [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 17-23. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.003

# 瓦斯爆炸对地下巷道破坏效应的 数值模拟分析

朱邵飞,叶青\*,柳伟,贾真真,杨卓华

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为了研究瓦斯爆炸对地下巷道壁面结构的冲击作用规律以及瓦斯爆炸与巷道壁面耦合效应,利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立管道物理模型,数值模拟了耦合和解耦条件下管道内瓦斯爆炸压力变化、压力等值线分布、能量变化及管道等效应力的变化情况.模拟结果表明:(1)耦合效应下对爆炸流场内部的冲击超压大小的影响基本上可以忽略;(2)解耦条件下,管道的应力等压线分布呈现较规则同心环,而耦合条件下,在整个传播过程管道内等压线分布处于紊乱状态,可知在耦合效应下瓦斯爆炸流场在巷道中会变得更加复杂;(3)等效应力分布导致管道多次轻微变形,但第1次变形破坏最为有效,可知瓦斯爆炸时应力波是随着时间的推移逐渐减少.研究结果能够对地下巷道的设计提供一定的理论指导,对减小瓦斯爆炸的损失也具有重要的现实意义.

**关键词:** 瓦斯爆炸;管道;耦合效应;数值模拟

**中图分类号:** TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)04-0017-07

## Numerical Simulation Analysis of Damage Effects of Gas Explosion to Underground Roadways

Zhu Shaofei, Ye Qing, Liu Wei, Jia Zhenzhen, Yang Zhuohua

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

**Abstract:** In order to study the impact of gas explosion on the wall structure of underground roadway and the coupling effect of gas explosion and roadway wall surface, the tube physical model was established by finite element analysis software ANSYS / LS-DYNA, the variation of the gas explosion pressure, the distribution of pressure contours, the change of energy and the equivalent stress of the tube under the coupling and decoupling conditions were numerically simulated. The simulation results show that: (1) the effect of the coupling effect on the magnitude of the impact overpressure inside the blast flow field is basically negligible; (2) under the condition of uncoupling, the stress distribution of the tube is regular concentric ring, and the coupling condition, the stress distribution of the tube is disorder. It can be seen that the gas explosion flow field become more complicated under the coupling effect; (3) the equivalent stress distribution leads to a slight deformation of the

收稿日期:2017-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704111;51374003;51434006);湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ6038);湖南省教育厅项目资助(E51523)

\*通信作者,E-mail:cumtyeqing@126.com

tube several times, but the first deformation of the most effective. It can be seen that the stress wave is gradually reduced with time as the gas explodes. The research results provide some theoretical guidance for the design of underground roadway and reduce the loss of gas explosion. It has important practical significance.

**Keywords:** gas explosion; tube; coupling effect; numerical simulation

目前,我国仍然是以煤炭资源为主要能源的国家,然而在煤炭开采过程中发生的瓦斯爆炸事故损失也是惊人的.瓦斯爆炸事故导致群伤群死、巷道设备破坏和巨大经济损失,造成了恶劣的社会影响.受限空间内一旦发生瓦斯爆炸,将导致严重的人员伤亡和经济损失,因此,瓦斯爆炸对巷道围岩的破坏问题成为煤矿资源开发急需解决的重要课题.例如,2016年10月31日,永川区金山煤业发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成33人死亡、1人受伤,直接经济损失达到3 682万元;2017年5月3日,伊朗古莱斯坦省一煤矿由于矿井内瓦斯浓度过高引发爆炸并导致矿井坍塌,导致42名矿工死亡,设备及煤矿巷道遭到严重破坏,巷道维修及设备更新等耗资巨大.然而受限空间发生瓦斯爆炸事故,不但流体会对巷道产生强大的冲击作用力,巷道壁面形变也会对流场产生一些影响,因此,两者之间存在耦合作用.张亚军等<sup>[1]</sup>研究表明流固耦合效应对爆炸荷载大小的影响较小.Casadei F等<sup>[2]</sup>研究表明固体变形或运动会反射超压造成一定的影响,气体和气固成分之间的耦合效应不可忽视.当前,有限元方法在流固耦合分析中得到了广泛应用,特别是基于显式有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 的 ALE 方法,分析耦合作用具有较理想的效果<sup>[3-5]</sup>,许多国内外专家学者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<sup>[6-9]</sup>.由于煤矿开采过程中,所处环境敏感、致灾因素复杂,对巷道中瓦斯爆炸对壁面的冲击破坏的研究较少,因此,本文利用非线性动力有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,采用了共节点方法建立管道瓦斯爆炸模型,管道模型即为模拟巷道,模拟了解耦合和耦合条件下管道内瓦斯爆炸压力变化、压力等值线分布、能量变化及管道等效应力,探究瓦斯爆炸巷道壁面热冲击作用特性及其分布规律、瓦斯爆炸流场及其与巷道壁面耦合作用<sup>[10]</sup>以及能量释放和传递特性,以期对煤矿瓦斯爆炸防治提供参考.

## 1 数值模型

### 1.1 模型建立

根据几何模型的轴对称性,建立 1/2 的管道.本文中所用材料的模型和参数均采用统一单位制(kg/m/s),管道长  $L=20$  m,半径  $r=0.8$  m,一端密闭,另一端为开口,管道内密闭端填充长度为 10 m,浓度为 9.5% 瓦斯预混气体,预混气体与管道内空气之间用膜片隔开,管道有限元模型如图 1.

### 1.2 网格划分

对于规则形状的管道模型,通常利用映射网格划分<sup>[11]</sup>,故对管道瓦斯爆炸物理模型采用六面体单元映射网格划分,本文中设置单元尺寸大小为 0.04 m.划分网格后如图 2 所示.

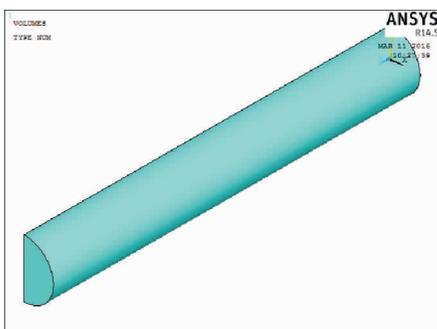


图 1 管道有限元模型

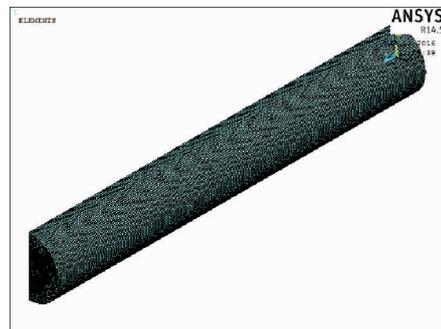


图 2 划分网格后的模型

### 1.3 定义单元类型与材料模型

利用 ANSYS/LS-DYNA,采用 8 节点实体 SOLID164 单元建立管道瓦斯爆炸物理模型,由于应变率是

结构抗动态冲击荷载中的一个非常关键的因素,因此,材料模型应选用适用于钢材并考虑应变率影响的模型<sup>[12]</sup>.本文选用非线性塑性材料模型 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC,应变率采用 Cowper-Symonds 模型来考虑,其屈服应力与应变率的关系如式(1).

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{K} \right)^{\frac{1}{S}} \right] (\sigma_0 + \beta N_w \epsilon_{\text{eff}}^w). \quad (1)$$

式中:  $\sigma_y$  为屈服强度;  $\dot{\epsilon}$  为应变率;  $K$  和  $S$  为 Cowper-Symonds 的应变参数;  $\sigma_0$  为初始屈服强度;  $\beta$  为描述不同的硬化模型;  $N_w$  为钢材的塑性硬化模量;  $\epsilon_{\text{eff}}^w$  为有效塑性应变.

另外,刚性体材料模型为 \* MAT\_RIGID,其中,材料弹性模量为 206 GPa,切线模量为 1.0 GPa,密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.3,应变参数  $K$  和  $S$  分别为 1 234 和 4.15,失效应变为 0.2.

#### 1.4 边界条件与初始条件

瓦斯爆炸是一种极其迅速复杂的化学反应,该过程决定了瓦斯爆炸的最终特性<sup>[13-14]</sup>,在本文中忽略其化学反应的中间过程.为了简化计算,对几何模型做出了一些基本假设:管道内只有瓦斯爆炸热源存在;设置管道壁面光滑,瓦斯初始状态如浓度、温度和压力均匀分布,初始温度为 25 °C;压力为 0.1 MPa,模型开口端为无反射边界条件.

#### 1.5 状态方程

将爆炸后生成的爆炸产物可当作理想介质.因此,采用理想气体的  $\gamma$  律方程描述爆炸后的气体状态变化过程.瓦斯材料模型及状态方程:ANSYS/LS-DYNA 中采用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料关键字描述爆炸物质,同时结合线性多项式状态方程 LINEAR\_POLYNOMIAL 进行相应定义;空气材料模型及状态方程:空气一般采用空材料模型和线性多项式状态方程加以描述,线性多项式状态方程为

$$P = R_0 + R_1\mu + R_2\mu^2 + R_3\mu^3 + (R_4 + R_5\mu + R_6\mu^2) Q; \\ \mu = \frac{1}{V} - 1. \quad (2)$$

式中:  $P$  为爆轰压力;  $Q$  为单位体积内能;  $V$  为相对体积;  $\mu$  为粘度系数;  $R_0 \sim R_6$  为状态方程参数,为定义常数.当此方程用于空气模型时:  $R_0 = R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = 0, R_4 = R_5 = 0.4$ .

## 2 分析与讨论

### 2.1 管道内瓦斯爆炸压力对比分析

在不考虑爆炸流场与管道壁间耦合效应,将管道壁视为刚性壁,采用刚性体模型.若考虑耦合效应时,管道采用双线性硬化弹塑性模型.图 3 为解耦合和耦合条件下的管道轴线上各测点超压时程曲线.在管道密闭端坐标  $A(0,0,2)$  设置为点火位置.为了测得瓦斯爆炸过程中冲击波超压变化,以  $A$  为起始点,再分别以 3 m 为等间距在有限元管道轴线上依次布置 5 个监测点.

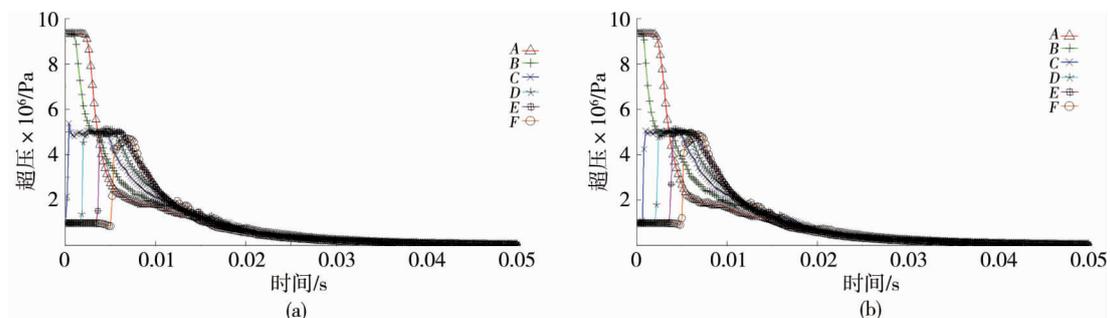


图3 管道轴线上各测点超压时程曲线

通过比较在解耦合和耦合情况下,管道内轴线上各测点瓦斯爆炸流场压力的分布情况,分析可知:在整个爆炸过程中,测点  $A, B$  的超压瞬间达到峰值,并均有压力“平台”现象,随后各自均单调衰减趋近于常

压,一开始测点  $C, D, E, F$  未受到影响,均处于大气压状态下,随后依次达到各自的超压峰值,并有较小的压力波动后,逐渐衰减为大气压力.因此,在耦合和解耦合条件下,图 3 中各测点超压时程曲线发展趋势一致,各测点压力峰值基本相同,因此认为耦合效应对巷道内爆炸流场的冲击超压测值的影响较小.

### 2.2 管道内瓦斯爆炸等压线分布对比分析

图 4 为解耦合和耦合条件下瓦斯爆炸不同时刻等压线分布图.解耦合条件下: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,由于管道的刚性壁面约束以及封闭端的存在,在封闭端面正反射爆炸冲击波,同时在管道内壁也出现全反射,导致管道内壁呈现一系列同心环状的等压线;随着爆炸的传播,反射点也不断向开口处移动,冲击波反射等压线分布后均以同心圆环形式向开口处运动,且随后等压线间距会逐渐变宽.

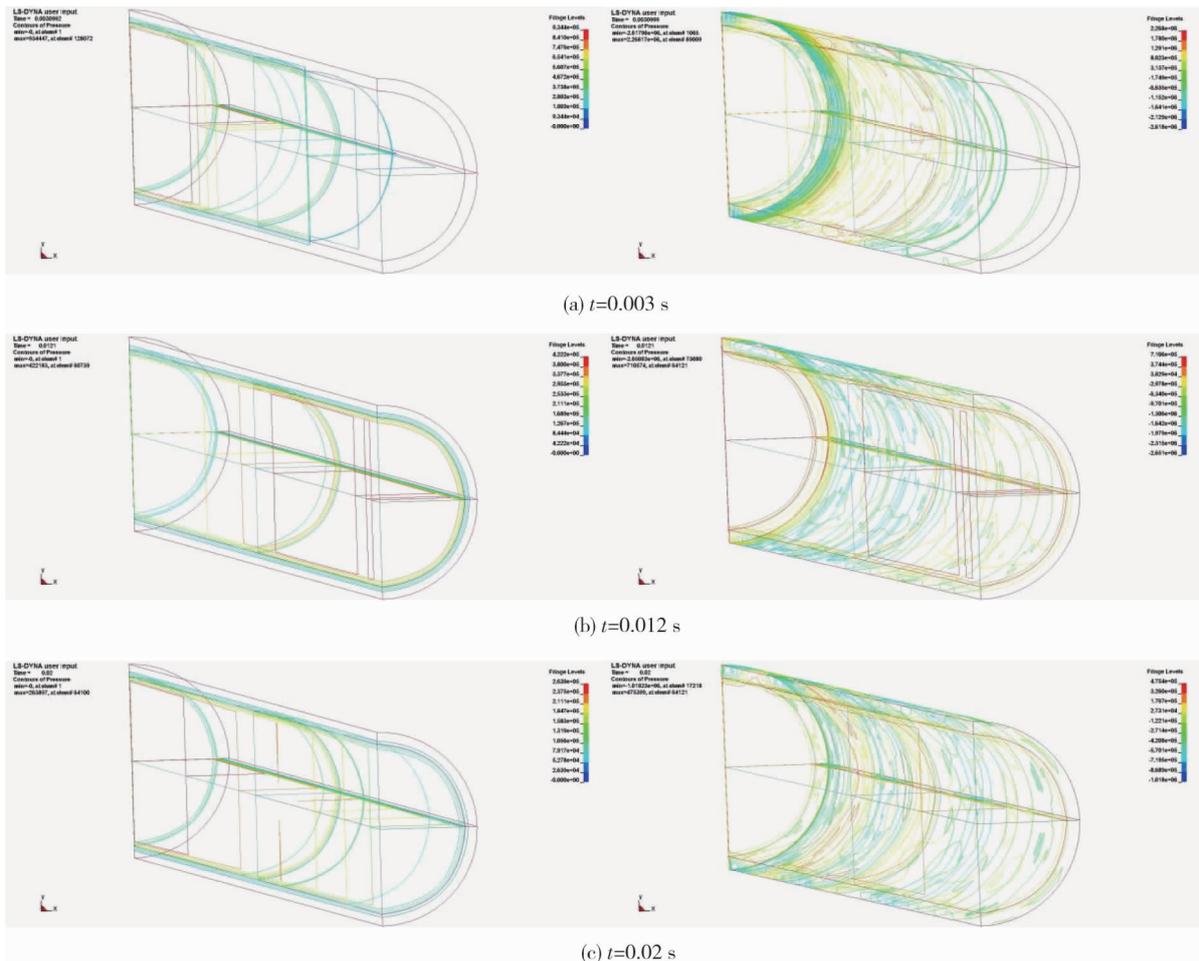


图 4 解耦合与耦合情况下管道内不同时刻的等压线分布

耦合条件下: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内壁上,爆炸产物与管道内壁面间发生耦合作用,爆炸冲击载荷作用使得管道内壁面产生微形变,这些形变导致冲击波发生不规则反射,使得爆炸冲击波以及反射激波的载荷分布和大小发生改变.由于管道产生的形变是几何非线性的,而流体运动也具有非线性,从而导致右边管道壁面所示的复杂现象.

对瓦斯爆炸流场等压线分布对比分析:在解耦合条件下,管道不发生形变,管道的压力等值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,压力等值线分布一直处于紊乱状态,是由于爆炸冲击波使管道壁产生微弱形变,流场边界波系随着变化,后续冲击波加载位置发生改变,反射方向及荷载分布变得复杂,导致瓦斯爆炸等压线分布紊乱,随着时间的进一步推进,在耦合效应下巷道爆炸流场变得会更加复杂,但是冲击波仍未完全消散.

### 2.3 管道内瓦斯爆炸能量对比分析

瓦斯爆炸总能量时程曲线如图5所示,解耦合和耦合条件下动能时程曲线如图6所示.由图5可知:管道内瓦斯量相同,即爆炸初始总能量相同,随着瓦斯爆炸的进行,总能量逐渐减小直至为0.由图6中的动能时程曲线分析可知:瓦斯爆炸初期,动能为0,动能出现先增大后减小的现象,最后动能为0.2条曲线的走势完全相同,但各自达到峰值的时间不同,解耦合条件下达到动能峰值时间明显比耦合条件达到峰值时间要短,且峰值大小不同,图6a中动能最大值为9.97 MJ,图6b中动能最大值为4.6 MJ.由于瓦斯爆炸前,瓦斯处于静止状态,动能为0,接着爆炸开始,动能逐渐增大,达到动能峰值,耦合条件下,瓦斯爆炸能量转化为爆炸产物动能、热能以及有部分能量加载在管道上,使得管道变形产生弹性势能,而解耦合条件下,爆炸冲击波与管道间不发生耦合作用,瓦斯爆炸仅转为爆炸动能和热能.因此可以得出:耦合效应下,瓦斯爆炸能量虽有差别,但其破坏效应依然很强,在达到峰值时破坏力最大,之后能量急剧衰减.针对煤矿巷道的具体条件来预防瓦斯爆炸事故,制造出安全稳定的阻爆隔爆设施,以此减轻瓦斯爆炸造成的危害.

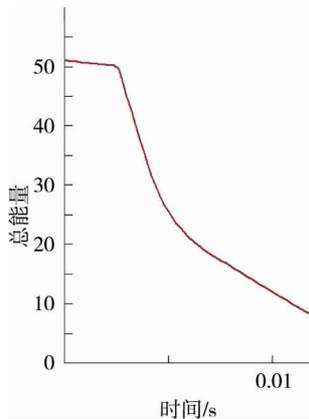


图5 瓦斯爆炸能量时程曲线

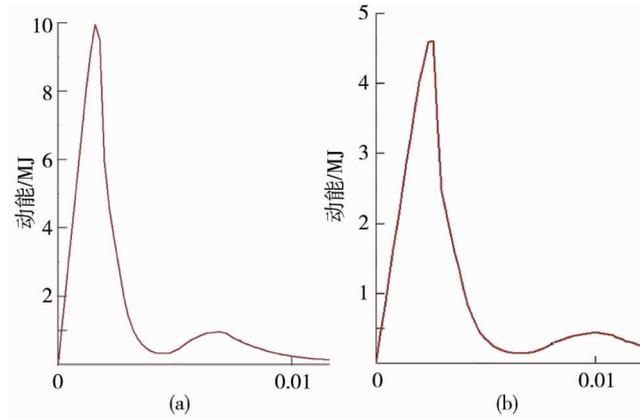


图6 动能时程曲线

### 2.4 管道等效应力对比分析

金属材料在外力作用下的破坏形式一般有2种:脆性破坏和塑性破坏.金属管道属于理想弹塑性材料,第四强度理论认为畸变能密度是引起屈服的主要因素,即认为材料无论是处在何种应力状态下,只要危险点位置的畸变能密度达到了材料性质相关的某一极限值,材料就会发生屈服<sup>[15]</sup>,第四强度理论屈服破坏条件即为 Von-mises 屈服准则,即

$$\sigma_4 = \sqrt{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $\sigma_4$  分别为最大拉应力、最大伸长线应变、最大剪应力、形状改变比能.

图7为流固耦合效应下管道不同时刻的等效应力云图,从图7中可以看出: $t=0.01$  s时最大等效应力为40.760 MPa, $t=0.02$  s时的最大等效应力为39.277 MPa, $t=0.03$  s时最大等效应力为36.315 MPa, $t=0.04$  s时最大等效应力为25.807 MPa.由于管道封闭端瓦斯聚集,瞬间被点燃,瓦斯区域内的爆炸压力瞬间达到最大,最大爆炸压力加载在管道壁面上,爆炸产物与管道间发生相互耦合作用,使得管道自身内部结构发生相互作用阻止管道变形,试图使管道变形后的位置恢复到变形前而产生等效应力.瓦斯爆炸的瞬间,管道封闭端角隅处冲击波汇聚,管道角隅处发生了变形,局部出现最大等效应力,同时封闭端受冲击波瞬间冲击作用,向外膨胀变形,随后变形恢复.随着时间的推移,瓦斯爆炸冲击波压缩临近气体向管道开口端传播,传播过程中伴随着能量衰减,管道均发生了微弱变形.爆炸冲击波过后,封闭端区域内出现了负压区,周围的气体回流向爆炸中心移动,对爆炸气体进行压缩,致使角隅部位及封闭端再次发生变形,随后又变形恢复,但是之后的变形均小于瓦斯爆炸瞬间的变形.由于爆炸冲击波传播距离增大,能量耗散以及甲烷气体的密度小,惯性也小,有实际意义的只是第1次膨胀压缩过程,因此,可以得到:在巷道中冲击应力波是沿巷道方向传播,等效应力分布不断变化,瓦斯爆炸时应力波是随着时间的推移逐渐减少.冲击能是

影响巷道破坏的重要因素。

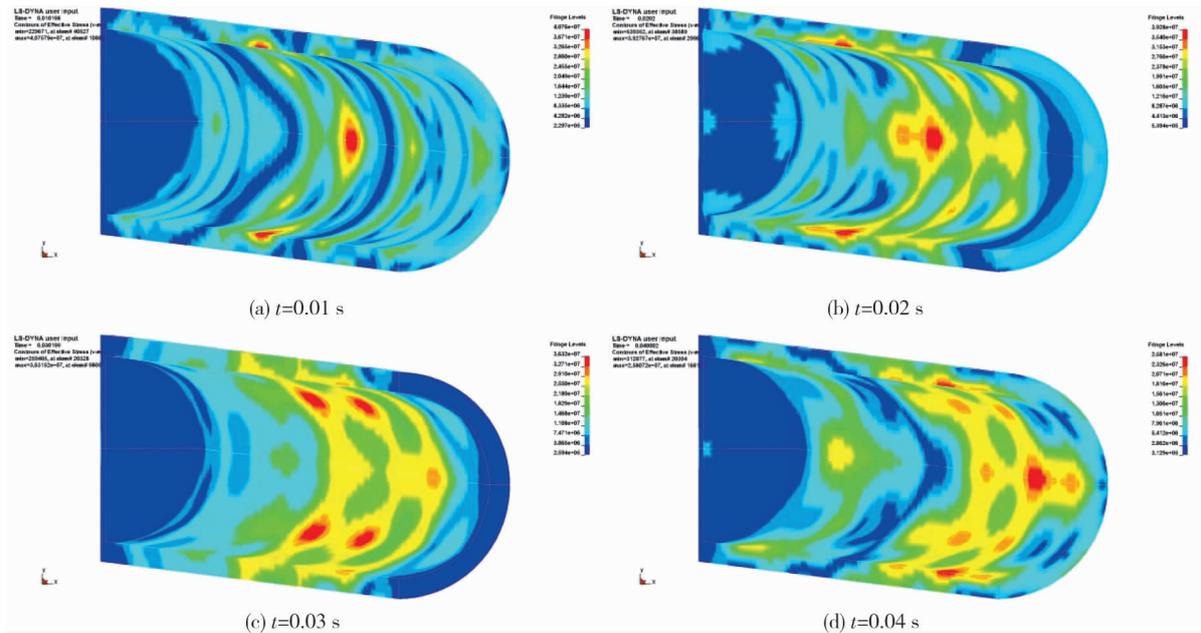


图7 管壁不同时刻的等效应力

## 2.5 管道壁面的性质及其力学特性分析

管道的属性即为模拟巷道的属性,在有限空间的管道里,一旦发生瓦斯爆炸,爆炸会迅速形成一个特有的流场,气体和气固成分会出现耦合效应,其中压力、温度、流速和冲击波等和壁面相互作用,对壁面会产生巨大的破坏效应,使壁面状态参数产生突跃.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,采用刚性体模型.若考虑耦合效应时,管道采用双线性硬化弹塑性模型.因其性质和载荷大小的不同,具有弹性变形和塑性变形2种不同性质的变形.

在爆炸刚发生时,冲击加载是瞬时性的,一般是毫秒级的,根据之前分析等效应力云图中可知,取其中的 $t=0.01$  s时最大等效应力为40.76 MPa, $t=0.02$  s时的最大等效应力为39.277 MPa, $t=0.03$  s时最大等效应力为36.315 MPa, $t=0.04$  s时最大等效应力为25.807 MPa,可知瓦斯爆炸时,其冲击波对巷道壁面会产生巨大的破坏效应.

瓦斯爆炸区域内瞬间达到最大爆炸压力加载到壁面上,爆炸流场和管道间发生相互耦合效应,使得管道自身内部结构发生相互作用阻止管道变形,管道变形后恢复变形前而产生等效应力.在巷道中,巷道壁面受到冲击载荷作用,巷道壁面产生应力波.由于冲击波沿壁面的作用位置和大小不断变化,应力波在壁面发生反射,各反射点产生应力波叠加进而增大了破坏效应.

## 3 结论

1) 耦合效应下对巷道内爆炸流场内部的冲击超压大小的影响较小.

2) 解耦合条件下,管道壁无变形,管道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.耦合条件下,爆炸冲击波加载在管道壁上,管道壁的微弱变形影响冲击波的反射方向,改变了爆炸荷载的分布,导致在整个传播过程中管道内的等压线分布一直处于紊乱状态,可知在耦合效应下巷道内爆炸流场变得会更加复杂.

3) 耦合效应下,巷道内瓦斯爆炸能量虽有差别,但其破坏效应依然很强.在达到峰值时破坏力最大,之后能量急剧衰减.以此针对煤矿巷道的具体条件来预防瓦斯爆炸事故,减轻瓦斯爆炸事故造成的危害.

4) 巷道中发生瓦斯爆炸,冲击波是随着传播距离和时间的增加进而转化为波形较为平缓的应力波.冲击能是影响巷道破坏的重要因素.

5) 由于应力波传播速度快,巷道壁面所受冲击波载荷比较大,其应力也比较大.因此,在实际巷道设计中,巷道壁面应该设计光滑平面,减少阻力,否则会造成的应力集中,给煤矿巷道的安全使用造成隐患.

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Casadei F, Halleux J P, Sala A, et al. Transient fluid-structure interaction algorithms for large industrial applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(24/25):3081-3110.
- [3] 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,2013,38(8):1381-1387.
- [4] Lee J, Rohrschneider R, Ruffin S, et al. Fluid-structure analysis of a clamped ballute in Titan's atmosphere [C]// AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Miami, USA, 2007.
- [5] Goyal V, Huertas C, Leutwiler T, et al. Robust bird-strike modeling based On ALE formulation using LS-DYNA [C]// AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Newport, USA, 2006.
- [6] 林柏泉,菅从光,张辉.管道壁面散热对瓦斯爆炸传播特性影响的研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(1):1-4.
- [7] 文霞,姚安林,陈谦,等.隧道并行输气管道爆炸对邻管的冲击效应分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):156-162.
- [8] 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.
- [9] Fasanella E L, Jackson K E. Dynamic impact tolerance of shuttle RCC leading edge panels using LS-DYNA [C]// AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit. Tucson, USA, 2005.
- [10] 柳伟,叶青,伍堂锐.管道内瓦斯爆炸冲击作用特性数值模拟研究[J].矿业工程研究,2016,31(3):15-20.
- [11] 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.
- [12] 丁刚毅.ANSYS/LS-DYNA算法基础和使用方法[M].北京:北京理工大学,1999.
- [13] 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[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集.2013:317-322.
- [14] 时党勇,李裕春,张胜民.基于ANSYS/LS-DYNA 8.1进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [15] 刘鸿文.材料力学I[M].北京:高等教育出版社,2011:224.