

Numerical Simulation on Shock Failure Characteristics of Pipe Surface under Different Gas Explosion Strengths

Zhenzhen Jia, Qing Ye, Wei Liu, Yi Lu

School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Email: 402688637@qq.com

Received: Jun. 1st, 2017; accepted: Jun. 16th, 2017; published: Jun. 19th, 2017

Abstract

In order to obtain the failure characteristics of the pipe surface under the shock wave action of gas explosion, the physical model and mathematical model of gas explosion in pipe are established by LS-DYNA, and the shock failure characteristics of gas explosion under different explosion strengths in pipe are simulated. The result shows that at the instant of gas explosion, the shock wave is directly loaded on the surface and the closed end of the pipe, and the shock waves at the corner of closed end are converged and superposed, which cause expansion and deformation at the closed end of pipe. With the continuation of gas explosion, the negative pressure zone is appeared in the closed end and the air reflux is compressed; the shock waves are converged in the "Z type" groove; at this time, the pipe surface becomes thin, and the "ladder type" failure characteristics appear on this surface. With the increase of the gas explosion strength, when the shock wave load exceeds the yield strength of the pipe, the "Z type" failure appears on the inner surface of the closed end of the pipe. With the sustained loading of gas explosion loads, the failure of the "ladder type" and the expansion phenomenon of "open type" appear at the pipe surface.

Keywords

Gas Explosion, Failure Characteristics, Explosion Strengths, Numerical Simulation, Pipe Surface

不同瓦斯爆炸强度作用下管道壁面冲击破坏特征数值模拟

贾真真, 叶青, 柳伟, 鲁义

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

Email: 402688637@qq.com

收稿日期：2017年6月1日；录用日期：2017年6月16日；发布日期：2017年6月19日

摘要

为了获取管道壁面在瓦斯爆炸冲击作用下的破坏特性，利用LS-DYNA建立了管道内瓦斯爆炸物理模型和数学模型，模拟了管道内不同爆炸强度的瓦斯爆炸冲击破坏特性，模拟结果表明：在瓦斯爆炸瞬间，爆炸冲击波直接加载在管道壁面及封闭端，封闭端隅角处冲击波汇聚叠加，致使管道封闭端发生膨胀变形。随着瓦斯爆炸的进行，封闭端区域内出现了负压区，空气回流压缩，冲击波都汇聚在“Z”型槽里，此时管道壁面变薄，出现了“阶梯式”破坏特征。随着瓦斯爆炸强度的增加，爆炸冲击波荷载超过了材料的屈服强度，管道封闭端与内壁面结合隅角部位，内壁面沿管道出现了“Z”型破坏。随着爆炸荷载的持续加载，壁面最终出现了“阶梯式”的破坏和张开型的扩展现象。

关键词

瓦斯爆炸，破坏特征，爆炸强度，数值模拟，管道壁面

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿瓦斯爆炸是煤炭开采过程中最严重灾害之一，尤其是特别重大瓦斯爆炸事故导致众多人员伤亡、巷道设施设备严重破坏和巨大财产损失，造成不良的社会影响。例如2004年大平煤矿、陈家山煤矿、2005年孙家湾煤矿、2007年山西瑞之源煤业公司等瓦斯爆炸事故。因此，我国政府加强了煤矿的安全投入和安全管理，在国有重点煤矿中，推行综合机械化开采技术，其比例已达75%，并出台和修订了一批强化安全管理的法律法规，如《煤矿安全规程》、《防治煤与瓦斯突出规定》等；同时，坚决关闭一些证件不全、非法开采的小煤矿，我国安全技术及管理水平得到了较大提高，我国煤矿生产安全状况持续好转，但也偶尔也发生了许多重特大瓦斯爆炸事故。国内外许多的专家学者利用实验巷道或管道平台对瓦斯爆炸进行了大量实验研究[1] [2] [3] [4] [5]，也有学者采用了数值模拟方法对瓦斯爆炸进行分析，并取得大量的研究成果[6] [7] [8] [9]。当整个巷道充满瓦斯或产生连续瓦斯爆炸，其爆炸破坏时间相对较长。在一些矿井，瓦斯爆炸产生的冲击波甚至通过井口破坏地面建筑物，伤害地面人员[10] [11] [12] [13]，所以人们历来十分关注巷道周围结构在冲击波载荷作用下的冲击破坏问题，并进行了大量的研究工作[14] [15] [16] [17]。但是采用数值模拟分析瓦斯爆炸热冲击问题时，不同瓦斯爆炸强度的管道壁面破坏特征分析较少。然而LS-DYNA能很好解决热冲击对管道壁面破坏问题，因此，本文利用LS-DYNA对管道内瓦斯爆炸热冲击进行了数值模拟，研究不同瓦斯爆炸强度的管道壁面冲击破坏特征，期望研究结果为煤矿或瓦斯隧道等受限空间的瓦斯爆炸事故防治以及降低瓦斯爆炸事故灾害损失提供理论依据和技术指导。

2. 物理数学模型的建立

2.1. 物理模型

2.1.1. 有限元模型的建立

本次所用材料的模型和参数均采用统一单位制(kg/m/s)，本次数值模拟所采用管道几何参数：管道长

$L = 20$ m, 半径 $r = 0.8$ m, 一端密闭, 另一端为开口, 预混气体与管道开口末端之间用膜片隔开, 管道有限元模型如图 1 所示。

2.1.2. 网格划分

根据本次研究内容的需要, 对于规则形状的管道模型, 通常利用映射网格划分, 对管道瓦斯爆炸物理模型采用六面体单元映射网格划分。因此, 本次设置单元尺寸大小为 0.04 m, 管道瓦斯爆炸物理模型共划分为 1,563,880 个单元, 管道的单元数为 33,200 个, 瓦斯的单元数为 765,340 个, 空气的单元个数为 765,340 个, 划分网格后的有限元模型如图 2。

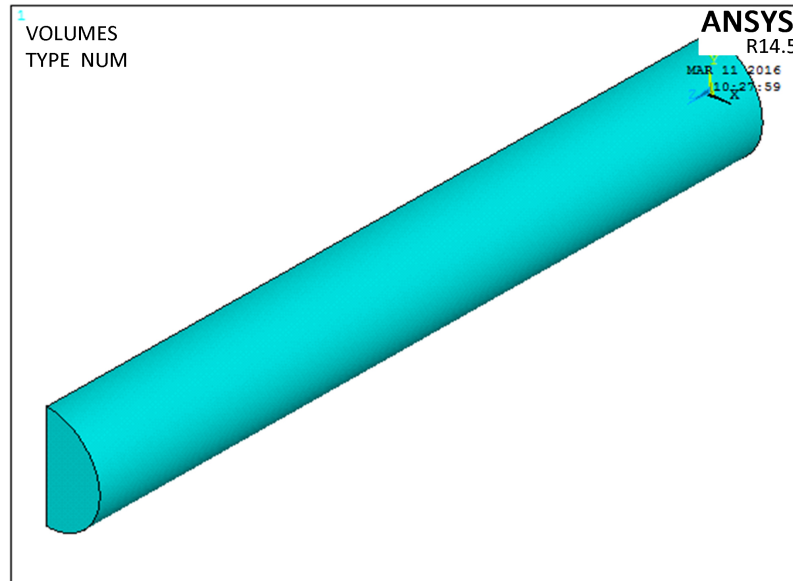


Figure 1. Finite element model of pipes
图 1. 管道有限元模型

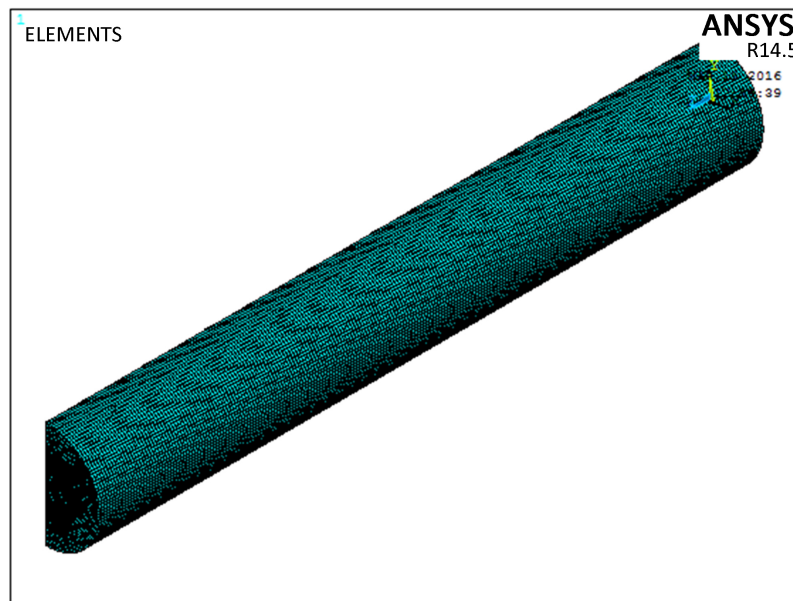


Figure 2. The finite element model after meshing
图 2. 划分网格后的有限元模型

2.1.3. 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, 根据国外现有的有关领域研究成果及研究现状可以知道, 应变率是结构抗动态冲击荷载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。本次选用非线性塑性材料模型, 常用的模型为 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 对于爆炸冲击荷载作用下的金属材料非常适用, 其中, 应变率采用 Cowper-Symonds 模型来考虑。

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, 其爆炸过程中所涉及大量的中间和瞬间产物, 本次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如下: (1) 只有瓦斯爆炸热源存在, 管道内再无其它热源。(2) 设置管道壁面光滑绝热, 瓦斯初始状态如浓度、温度和压力均匀分布, 初始温度和压力分别为 $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $P_0 = 0.1\text{MPa}$ 。(3) 模型设置一端密闭, 另一端开口且无反射边界条件。(4) 几何模型的轴对称性, 边界的剖面法线方向位移为零。

2.1.5. 状态方程

瓦斯爆炸过程涉及许多的瞬间和中间产物, 若不考虑热辐射、热传导、对流以及粘滞摩擦等, 则将爆炸后生成的爆炸产物均可当作理想介质。瓦斯与空气的混合气体在爆炸过程中, 其原始反应物和爆炸产物分别遵循理想气体的状态变化特性, 因此, 采用理想气体的 γ 律方程描述爆炸后的气体状态变化过程。

(1) 瓦斯材料模型及状态方程

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。

(2) 空气材料模型及状态方程

空气一般采用空气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:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{V} - 1$$

式中, P 表示爆炸压力; E 表示单位体积内能; V 表示相对体积。当此方程用于空气模型时: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$ 。空气密度为 1.225 kg/m^3 , 初始相对体积 V_0 为 1.0。

2.2. 数学模型

2.2.1. 基本假设

为了方便数值模拟和建立数学模型, 本次进行如下假设: ① 不考虑瓦斯的化学反应过程, 但需要考虑气体粘性。② 假设管道绝热、光滑, 常温常压下瓦斯预混气体初始状态如浓度、温度和压力分布均匀。

2.2.2. 基本控制方程

管道瓦斯爆炸传播问题属于一端开口、一端封闭的管状空间内含有高温高压的冲击波流动过程, 在直角坐标系下, 瓦斯爆炸流场三维非定常流动的三个守恒方程式分别如下:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

状态方程:

$$p = p(\rho, T) = \rho RT \quad (5)$$

式中 x, y, z 为坐标参数; ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; p 为压力, Pa; u, v, w 分别是三个坐标方向的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为时间坐标, T 为温度, K; R 为气体常数; e 为比能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho(u^2 + v^2 + w^2)}{2}$, 其中 γ 是气体指数, 为常数。

3. 数值模拟及结果分析

通过管道内瓦斯填充长度的不同来实现瓦斯爆炸的不同强度, 进而研究不同的瓦斯爆炸强度对管道壁面损伤破坏的影响, 基于前期分析结果和模拟结论, 本次分别模拟了瓦斯填充长度为 15 m、16 m、17 m、18 m、19 m 和 20 m。

图 3 是瓦斯填充长度为 15 m 的管壁不同时刻等效应力云图, 从图 3 的分析可知, 在 0~0.04 s 时间内, 仅 $t = 0.01$ s 时刻, 管壁最大值应力为 279.3 MPa, 管道局部位置应力超过了管道的屈服强度, 管道发生了弹塑性变形, 在 0.01 s 之后时间内, 最大应力值均未超过 279.3 MPa, 未超过材料的抗拉强度, 管壁瓦斯爆炸完成后, 管道内还剩下空气冲击波作用, 管壁再次发生变形, 从瓦斯爆炸开始到完成整个时间内, 管壁发生着变形-恢复循环往返, 导致管道发生疲劳损伤, 若冲击波持续加载, 最终管壁会出现破坏现象。

图 4 为管道内填充长度为 16 m 的管壁不同时刻等效应力云图, 从图 4 分析可知, 在 0~0.04 s 的时间内, 仅 $t = 0.01$ s 时刻, 应力最大值为 229.0 MPa, 未超过管道屈服强度, 管道发生了弹塑性变形, 随着瓦斯爆炸的完成, 瓦斯量的消耗, 之后的整个时间内, 最大应力都没有超过 229.0 MPa, 壁面没有出现破坏现象, 但是管道会发生疲劳损伤效应。

图 5 是管道内瓦斯填充长度为 17 m 的不同时刻壁面等效应力云图, 由图 5 分析可知, 瓦斯爆炸瞬间, 封闭端隅角处冲击波汇聚叠加, 致使管道封闭端和管道发生膨胀变形。在 $t = 0.0008$ s 时, 管道封闭端拐角位置沿圆的周向开始出现“Z”型缺口, 即内壁面出现一层壁面失效, 管道外壁没有任何的破坏痕迹。随着瓦斯爆炸的进行, 爆炸冲击波压缩临近的气体, 迫使周围的空气离开原来占据的位置, 迅速向开口端运动。此时封闭端区域内出现了负压区, 空气回流压缩, 冲击波都汇聚在“Z”型槽里, 冲击波叠加程度更大, 封闭端膨胀再次发生变形, 管壁又有一层的失效, 管道壁面变薄, 在“Z”型槽内壁面继续失效破坏, 出现了“阶梯式”破坏特征。

图 6 为管道内瓦斯填充长度为 18 m 的不同时刻壁面等效应力云图, 由图 6 分析可知, 瓦斯爆炸瞬间, 爆炸冲击荷载加载在管道壁面及封闭端, 封闭端隅角处冲击波汇聚叠加, 致使管道封闭端和管道发生膨

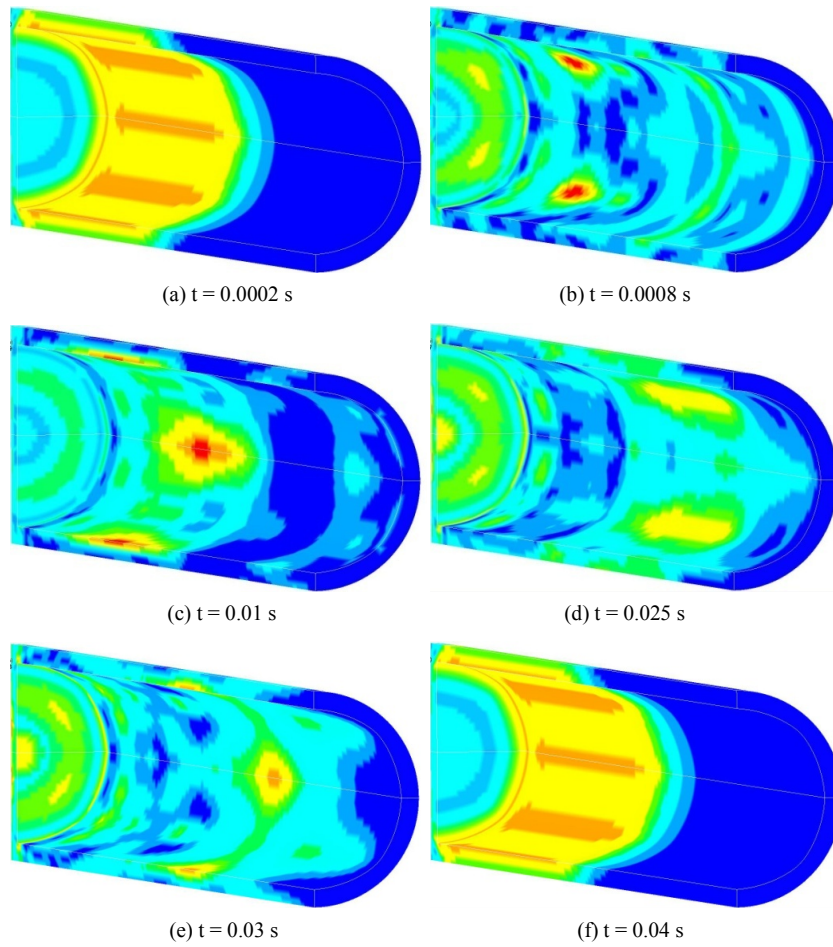
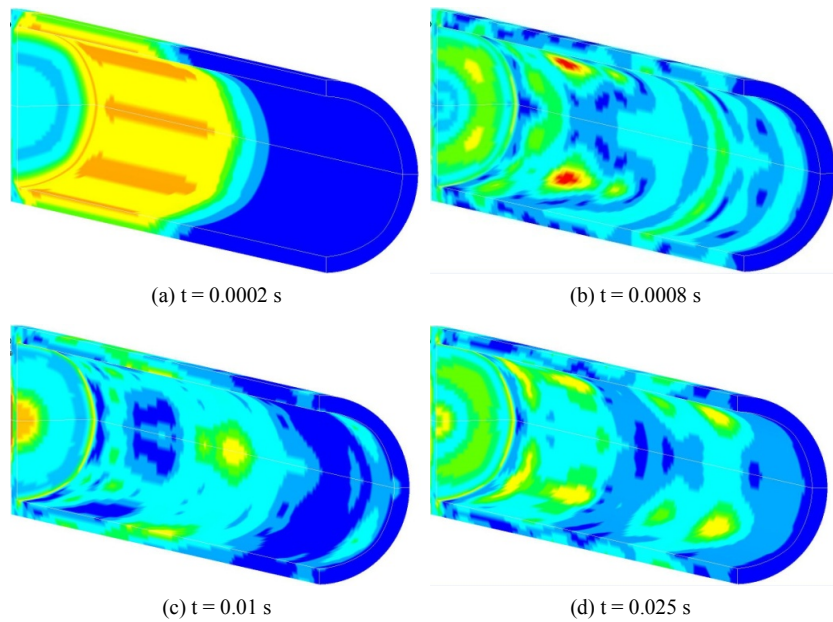


Figure 3. The equivalent stress contour with gas filled length of 15 m in the pipe at different times

图 3. 管道内瓦斯填充长度为 15 m 壁面等效应力云图



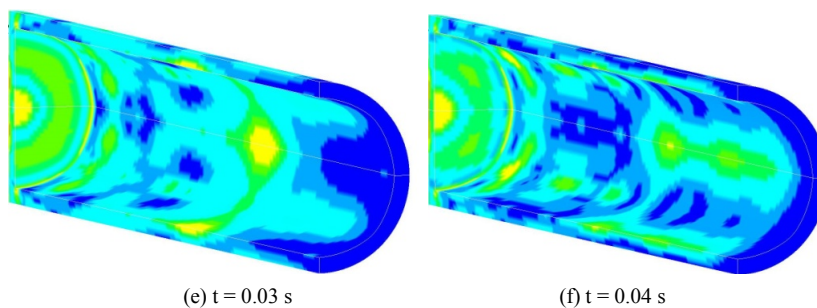


Figure 4. The equivalent stress contour with gas filled length of 16 m in the pipe at different times

图 4. 管道内瓦斯填充长度为 16 m 壁面等效应力云图

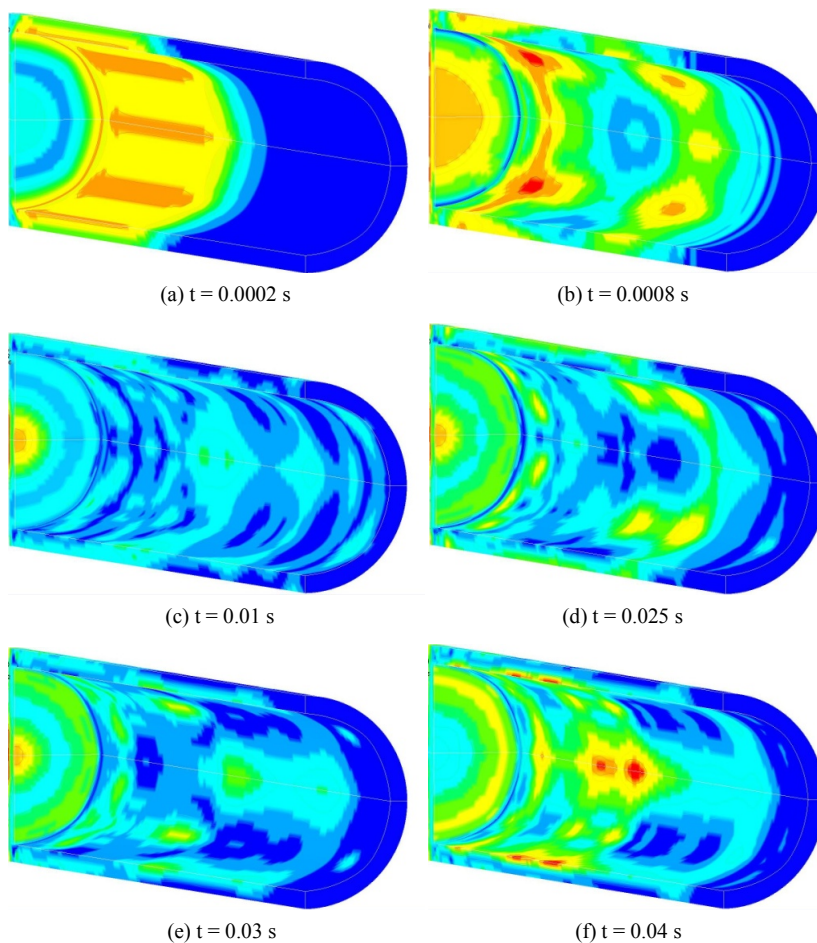


Figure 5. The equivalent stress contour with gas filled length of 17 m in the pipe at different times

图 5. 管道内瓦斯填充长度为 17 m 壁面等效应力云图

胀变形。在 $t = 0.0008 \text{ s}$ 时，管道封闭端与壁面的拐角区域沿圆的周向开始出现“Z”型缺口，管道外壁没有出现破坏痕迹。管道封闭端发生瓦斯爆炸，冲击波沿程衰减，导致封闭端区域内出现负压区，空气回流压缩，冲击波都汇聚在“Z”型槽里，冲击波叠加程度更为严重，出现了“阶梯式”破坏特征，其产生的原因是壁面反射冲击波、隅角汇聚冲击波及静态气体压力，其中壁面和封闭端结合处角隅汇聚冲击波最大。

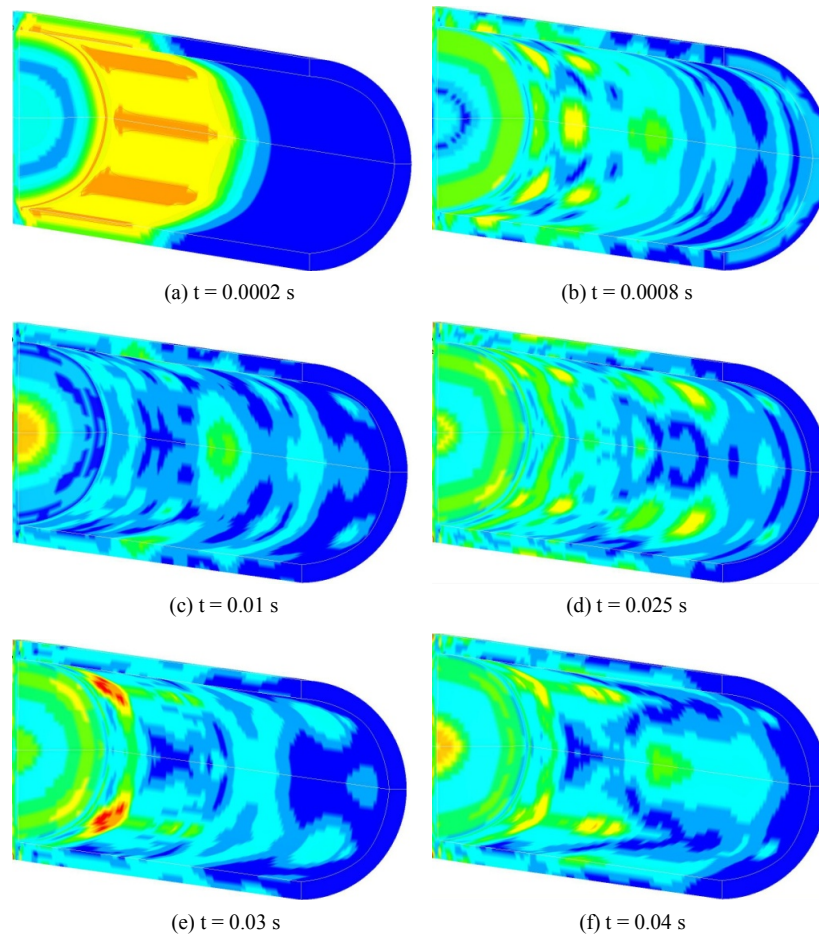


Figure 6. The equivalent stress contour with gas filled length of 18 m at different times
图 6. 管道内瓦斯填充长度为 18 m 壁面等效应力云图

图 7 为管道内瓦斯填充长度为 19 m 的不同时刻壁面等效应力云图，由图 7 分析可知，管道内瓦斯爆炸的瞬间，冲击荷载作用在管道封闭端及壁面上，封闭端隅角处冲击波汇聚叠加，致使管道封闭端和管道发生膨胀变形。 $t = 0.0008$ s 时，管道封闭端隅角沿圆的周向开始出现“Z”型缺口，管道外壁没有出现破坏痕迹。管道封闭端发生瓦斯爆炸，冲击波沿程衰减，导致封闭端区域内出现负压区，空气回流压缩，冲击波都汇聚在“Z”型槽里，冲击波叠加程度更为严重，出现了“阶梯式”破坏特征。

图 8 为管道内瓦斯填充长度为 20 m 的不同时刻壁面等效应力云图，由图 8 分析可知，瓦斯爆炸瞬间，管道壁面及封闭端受到爆炸冲击波直接加载，在管道隅角处冲击波汇聚叠加，致使管道封闭端向外膨胀变形。在 $t = 0.0008$ s 时，管道封闭端与壁面的拐角位置沿圆的周向开始出现“Z”型缺口，即内壁面出现一层壁面失效，此时管道外壁没有出现任何的破坏痕迹。随着瓦斯爆炸进行，爆炸冲击波压缩临近的气体，迫使周围空气离开原来占据的位置，迅速向开口端运动。此时封闭端区域内出现了负压区，空气回流压缩，冲击波都汇聚在“Z”型槽里，冲击波叠加程度更大，封闭端膨胀再次变形，在“Z”型槽内壁面再次失效，出现了“阶梯式”破坏特征，其产生的原因是壁面反射冲击波、隅角汇聚冲击波及静态气体压力，其中壁面和封闭端结合处角隅汇聚冲击波最大。

通过对管道内瓦斯填充长度分别为 15 m、16 m、17 m、18 m 和 20 m 的瓦斯爆炸对管道壁面破坏模式及特征进行了分析，由此可以得到：管道内瓦斯填充 15 m 和 16 m 时管道壁面没有出现明显的破坏，

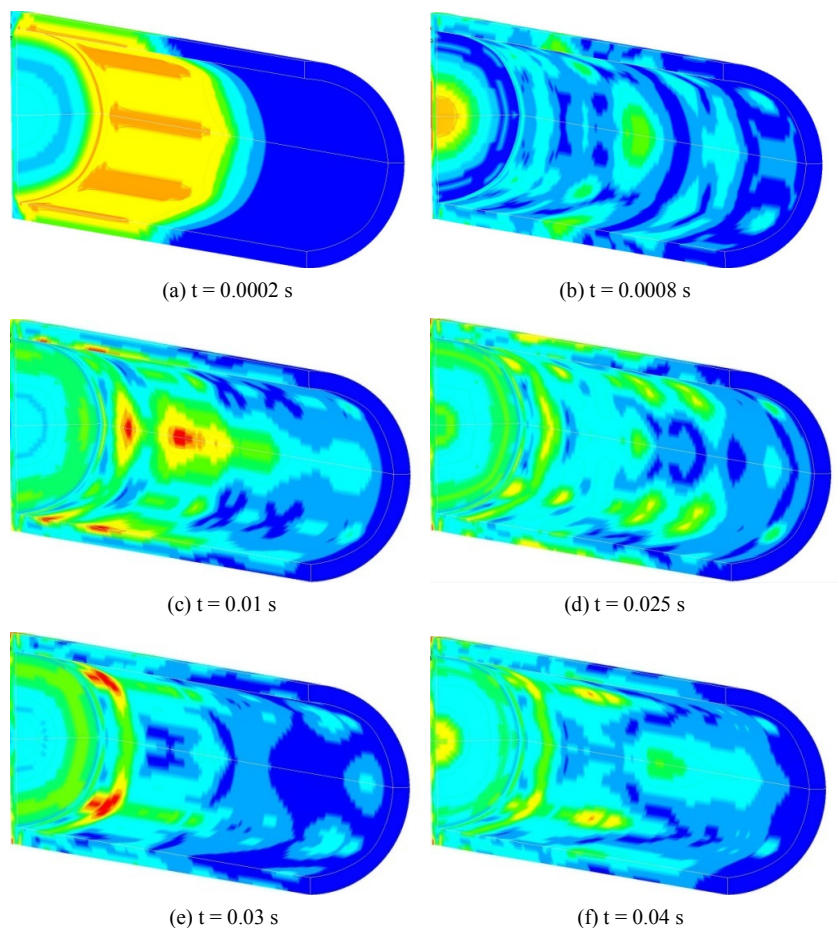


Figure 7. The equivalent stress contour with gas filled length of 19 m at different times
图 7. 管道内瓦斯填充长度为 19 m 壁面等效应力云图

但管道一定会出现疲劳损伤，若冲击波对管道壁持续作用，管道最终出现破坏。当管道内瓦斯填充长度 17 m 时，瓦斯爆炸瞬间管道壁面开始出现破坏现象，并且瓦斯填充长度超过 17 m 的管道壁面均出现了破坏，随着瓦斯填充长度的增大，管道壁面的破坏现象加剧。

随着管道内瓦斯填充长度增加，即瓦斯爆炸强度的增加，管道封闭端最开始有弹性膨胀变形，爆炸冲击波荷载超过了材料的屈服强度，管道封闭端与内壁面结合隅角部位，内壁面沿管道周向出现一层脱落，出现了“Z 型”破坏，随着爆炸荷载的持续加载，壁面最终出现了“阶梯式”的破坏，但是爆炸强度继续增大，最终在管道壁面沿周向出现一圈缺口，封闭端脱离束缚，管道壁面开始撕裂，产生了张开型的扩展现象。

4. 结论

通过有限元软件 LS-DYNA 对管道内不同爆炸强度的瓦斯爆炸冲击破坏特性进行了数值模拟研究，得到如下结论：

- (1) 在瓦斯爆炸瞬间，爆炸冲击波直接加载在管道壁面及封闭端，封闭端隅角处冲击波汇聚叠加，致使管道封闭端和管道发生膨胀变形。
- (2) 随着瓦斯爆炸的进行，爆炸冲击波压缩临近的气体，迫使周围的空气离开原来占据的位置，迅速

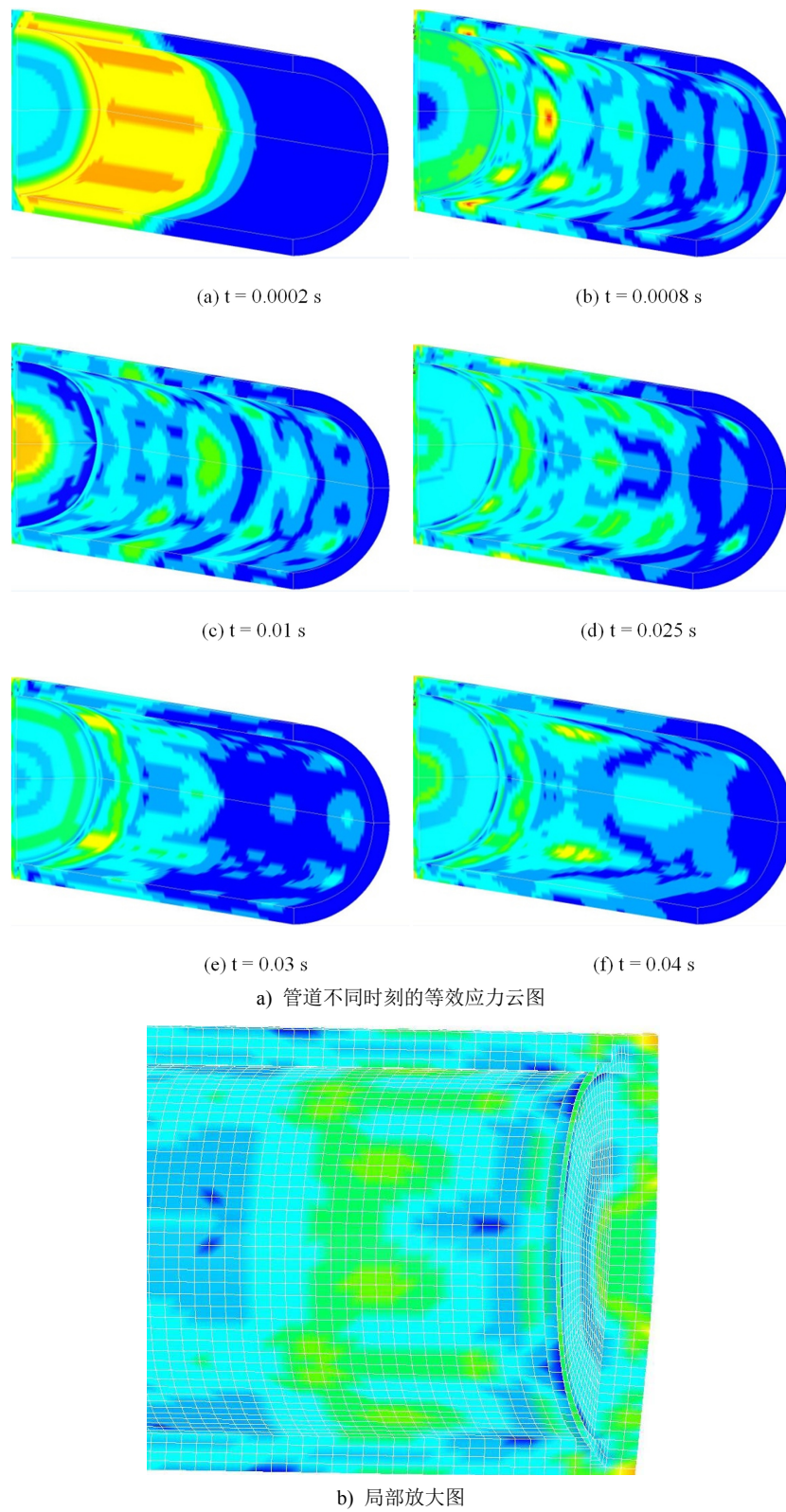


Figure 8. The equivalent stress contour with gas filled length of 20 m in the pipe at different times

图 8. 管道内瓦斯填充长度为 20 m 壁面等效应力云图

向开口端运动。此时封闭端区域内出现了负压区，空气回流压缩，冲击波都汇聚在“Z型”槽里，冲击波叠加程度更大，封闭端膨胀变形，管壁又有一层的失效，管道壁面变薄，出现了“阶梯式”破坏特征。其中壁面和封闭端结合处角隅汇聚冲击波最大。

(3) 随着瓦斯爆炸强度的增加，管道封闭端最开始有弹性膨胀变形，当爆炸冲击波荷载超过了材料的屈服强度，在管道封闭端与内壁面结合隅角部位的内壁面沿管道周向出现一层脱落，出现了“Z型”破坏。

(4) 随着爆炸荷载的持续加载，壁面最终出现了“阶梯式”的破坏。随着爆炸强度继续增大，管道壁面开始撕裂，产生了张开型的扩展现象。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51374003, 51004048, 51604110)，湖南省自然科学基金项目(2016JJ6038)，湖南省教育厅项目(E51523)。

参考文献 (References)

- [1] 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(1): 1-4.
- [2] 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.
- [3] 洪溢都, 林柏泉, 朱传杰. 开口型管道内瓦斯爆炸冲击波动压的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2016(2): 198-209.
- [4] Ferrara, G., Willacy, S.K., Phylaktou, H.N., et al. (2007) Venting of Gas Explosion through Relief Ducts: Interaction between Internal and External Explosions. *Journal of Hazardous Materials*, **155**, 358-368.
- [5] 赵军凯, 王磊, 滑帅, 曹旭. 瓦斯浓度对瓦斯爆炸影响的数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2012(4): 1-4 + 92.
- [6] Ye, Z. and Jia, Z. (2014) Effect of the Bifurcating Duct on the Gas Explosion Propagation Characteristics. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **50**, 424-428. <https://doi.org/10.1134/S0010508214040108>
- [7] Ye, Q., Wang, G.X., Jia, Z. and Zheng, C. (2017) Experimental Study on the Influence of Wall Heat Effect on Gas Explosion and Its Propagation. *Applied Thermal Engineering*, **118**, 392-397.
- [8] Jia, Z. and Feng, T. (2014) Numerical Simulation on Methane Explosion Propagation in a One-Dimensional Straight Duct with Porous Metal Materials. *Computer Modeling & New Technologies*, **18**, 275-282.
- [9] Ye, Q. and Jia, Z. (2012) Propagation Characteristics of Gas Explosion in Duct with Sharp Change of Cross Sections. *Disaster Advance*, **15**, 999-1003.
- [10] 曲志明. 煤矿巷道瓦斯爆炸破坏效应研究[C]. 中国力学学会学术大会, 2005: 35-37.
- [11] 杨书召, 景国勋. 矿井瓦斯爆炸冲击气流伤害研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1354-1357.
- [12] 李雪, 许加堂, 陶文圣. 爆炸冲击对环境的破坏研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(3): 35-37.
- [13] 李家文. 爆炸冲击波作用下结构瞬态响应分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [14] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度压力对瓦斯爆炸危险性影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 218-223.
- [15] 夏奎. 对地下建筑结构内部爆炸荷载取值与抗内部爆炸设计方法探讨[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [16] 郭玉斌. 地下结构偶然性内爆炸效应研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [17] 周清. 密闭空间内爆炸引起的内壁超压分布规律及简化计算研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2008.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：me@hanspub.org