

液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究*

董庆祥¹ 王兆丰^{1,2} 研究员 韩亚北¹ 孙小明¹

(1 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003

2 瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003)

学科分类与代码: 6203020(爆炸安全工程)

中图分类号: X936

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助(51274090); 河南省协同创新项目(15131319)。

【摘要】 为确定液态 CO₂ 相变致裂爆破影响半径, 进而确定合理的装药量和布孔参数, 需要研究液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量。通过分析液态 CO₂ 相变致裂原理, 选取压缩气体与水蒸气容器爆破模型进行 TNT 当量计算, 然后利用动力分析软件 ANSYS_LS-DYNA3D 模拟 TNT 在混凝土试块中的爆炸, 分析应力分布情况, 并将所得结果与液态 CO₂ 相变致裂试验结果对比。研究结果表明: 液态 CO₂ 相变致裂设备中, F57L 型储液管和 SD390 型定压泄能片单次致裂产生的能量与 277 g TNT 所具有的能量相当; 液态 CO₂ 相变致裂试验的破碎分形维数 D 为 2.83, TNT 数值模拟的破碎分形维数 D 为 2.41, 相对误差约为 14.84%, 满足工程应用的需要。

【关键词】 液态 CO₂; 相变致裂; LS-DYNA^{3D}; TNT 当量; 数值模拟

Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing

DONG Qing-xiang¹ WANG Zhao-feng^{1,2} HAN Ya-bei¹ SUN Xiao-ming¹

(1 School of Safety Science & Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China

2 Key Laboratory of Gas Geology & Gas Control, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: In order to determine the blast radius of influence of liquid CO₂ phase-transition fracturing, then determine reasonable charge quantity and hole parameters, it is necessary to study the TNT equivalent of liquid CO₂ phase transition fracturing. Through the analysis of principle of liquid CO₂ phase transition fracturing, the computational model of 'compressed air and steam vessel explosion' was selected to calculate the TNT equivalent. By using ANSYS LSDYNA software, same equivalent explosion in a block of concrete was simulated, and stress distribution was analyzed. A comparison was made between the results of the simulation and those of a liquid CO₂ phase-transition fracturing test. The results of study show that fracturing energy from the equipment of liquid CO₂ phase-transforming fracture for F57L liquid storage tube and SD390 rupture disc is equivalent to 277g TNT, that concrete fractal crushing dimension D of liquid CO₂ phase-transforming fracture is 2.83, and fractal crushing dimension D of TNT numerical simulation is 2.41, and relative error is about 14.84%, which can satisfy the need of engineering application.

Key words: liquid CO₂; phase-transforming fracture; LS-DYNA^{3D}; TNT equivalent; numerical simulation

0 引言

我国 95% 以上的突出矿井所开采的煤层属于低透气性煤层, 煤层透气性系数只有 $0.004 \sim 0.04 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$, 瓦斯抽采难度较大^[1]。因此, 探索一种具有普遍适应性且使用过程安全高效的强化增透抽采技术, 对于瓦斯灾害治理、开采煤层气资源具有重要意义。

目前低透气性煤层增透技术主要有深孔预裂爆破、大直径密集钻孔、保护层开采、水力冲孔、水力压裂、水力割缝等^[2-5], 但是都有其局限性。液态 CO₂ 相变致裂是一种新的物理爆破技术, 目前国内主要在爆破落煤、放顶煤和处理三角区悬顶方面做了试验分析^[6-8]; 初步用于煤层增透强化预抽取得显著效果, 且整个致裂过程无火花外露、无需验炮、操作简便^[9]。国外 Pickering D H^[10]介绍了这种装置的主要结构和使用方法; 在土耳其, 部分煤矿通过采煤工作面使用 Cardox 装置, 破碎煤体, 用来提高块煤率^[11]。总体而言, 目前国内外对液态 CO₂ 相变致裂技术深层次的相变致裂增透机理研究较少, 这项技术的理论研究落后于实践。鉴于此, 笔者将探讨相变致裂机理, 研究液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量, 确定致裂影响半径及装药量和布孔参数, 以期取得更好的煤层增透效果。

1 液态 CO₂ 相变致裂 TNT 当量计算

1.1 液态 CO₂ 相变致裂原理

液态 CO₂ 的相变致裂装置如图 1 所示, 将致裂装置与低压启动器连接, 启动致裂系统, 管内的液态 CO₂ 迅速升温升压, 当储液管内压力达到 $140 \sim 300 \text{ MPa}$ ^[12]时, 释放管内的定压泄能片被冲破, CO₂ 气体透过排放孔, 迅速向外爆发, 体积膨胀 600 倍, 利用瞬间产生的强大推力, CO₂ 气体沿自然或被引发的裂面松开物料, 将其推离主体, 从而达到致裂的效果。

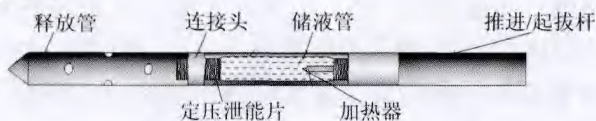


图1 液态 CO₂ 相变致裂装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of liquid CO₂ phase transition fracturing equipment

1.2 计算方法的选取

物质气态、液态、固态之间的转变称之为相变,

相变是由压力和温度的变化来控制的, 属于物理变化。CO₂ 物相与压力、温度的关系如图 2 所示。气态、液态和超临界状态的临界点的压力为 7.39 MPa , 温度为 $31.06 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据液态 CO₂ 相变致裂的工作原理, 可以看出液态 CO₂ 相变致裂是一个物理变化过程, 是 CO₂ 从液相到气相的一种转化, 其能量的主要来源是物理爆炸能量。物理爆炸(如压力容器破裂)过程气体膨胀所释放的能量主要与气体压力、容器的容积以及介质在容器内的物性相态有关。目前主要有 3 种物理爆炸计算方法^[13], 即: 介质全部为液体时的爆破能量计算、液化气体与高温饱和水的爆破能量计算、压缩气体与水蒸气容器爆破能量计算。液态 CO₂ 相变致裂开始前, 储液管中的 CO₂ 处于气-液两相共存的状态, 致裂启动后储液管内的温度和压力升高, 管内 CO₂ 形态的变化如图 3 所示。

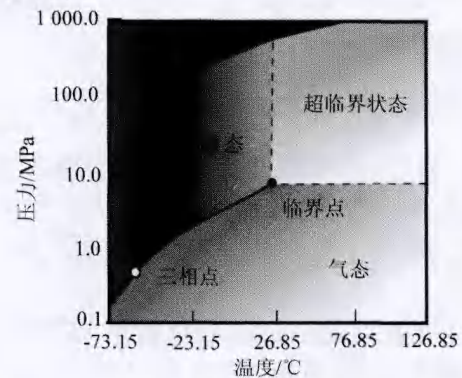


图2 CO₂ 三相图

Fig.2 Three-phase diagram of CO₂

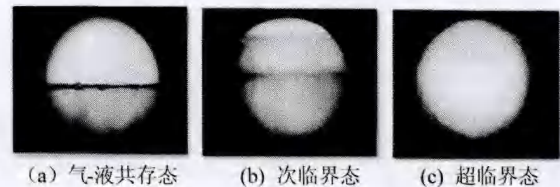


图3 液态 CO₂ 的 3 种状态

Fig.3 Three states of liquid CO₂

储液管内的 CO₂ 随着温度和压力增大由气-液两相共存态转变为次临界状态, 当温度和压力达到一定程度时又转变为超临界状态。超临界状态下的 CO₂ 是一种介于液体和气体之间的流体, 因此, 不能用介质全部为液体时的爆破能量计算方法。储液管内的 CO₂ 处于高压液化状态, 属于永久低温液体, 是非热力气体, 液化气体与高温饱和水的爆破能量计算是针对过热液体, 而 CO₂ 液相亦非过热液体。从图 2 可以看出, 在大气压力和过热条件下, 不存

在液态的 CO_2 ，与致裂过程物相的演化不符合，因此，不能用液化气体与高温饱和水的爆破能量计算方法来计算致裂产生的能量。压缩气体与水蒸气容器爆破是当压力容器中介质为压缩气体，即以气态形式存在时而发生的物理爆破。液态 CO_2 储存于储液管中，经加热后迅速反应由液态转化为气态，以压缩气体形式存在，直到撑破定压泄能片产生爆破效果。因此，液态 CO_2 相变致裂的过程符合压缩气体与水蒸气容器爆破的定义。

1.3 TNT 当量的计算

以常用的 F57L 型储液管和 SD390 型定压泄能片及与之相配的加热管^[14]为例，来计算液态 CO_2 相变致裂的 TNT 当量。

根据已有的试验检测结果可知，SD390 型定压泄能片的破裂压力为 276 MPa，F57L 型储液管的容积为 1.26 L，最少装液量为 1.248 kg。液态 CO_2 相变致裂时释放的能量可用下式计算^[15]：

$$E_g = \frac{pV}{K-1} \left[1 - \left(\frac{0.1013 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}}{p} \right) \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中： E_g 为气体的爆破能量，kJ； p 为容器内气体的绝对压力，MPa； V 为容器的容积， m^3 ； K 为气体的绝热指数，即气体的定压比热与定容比热之比，取 1.295。

将上述数据代入式(1)，可得出 F57L 型液态 CO_2 储液管启动后释放的能量为 1 178.85 kJ。液态 CO_2 相变致裂装置的近似 TNT 当量 W_{TNT} 可以利用式(2)计算：

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E_g}{Q_{\text{TNT}}} \quad (2)$$

式中： Q_{TNT} 为 1 kg TNT 爆炸能，取 4 250 kJ/kg。

经过计算，该型号的液态 CO_2 相变致裂装置的当量为 277 g TNT。

2 致裂 TNT 当量的验证

为了验证液态 CO_2 相变致裂 TNT 当量计算结果的准确性，同时由于 TNT 无法获得审批进行试验，因此，采用液态 CO_2 相变致裂试验与 TNT 数值模拟相结合的方法，应用分形理论，通过分析试验和数值模拟后岩石破碎程度的分形维数 D 进行验证。按照尺-频关系，分形维数 D 的计算公式如下^[16]：

$$N = N_0 (R/R_{\text{max}})^{-D} \quad (3)$$

式中： N 为特征尺寸大于等于 R 的碎块数； R 为特征尺寸，mm； R_{max} 为最大特征尺寸，mm； N_0 为最大特征

尺寸碎块数； D 为碎块分形维数。

2.1 液态 CO_2 相变致裂试验

以常用的 F57L 型储液管和 SD390 型定压泄能片进行试验。混凝土试块的材料为：水 175 kg，水泥 398 kg，砂 566 kg，石子 1 261 kg，配合比为 0.44:1:1.42:3.17，规格为 100 cm × 100 cm × 100 cm，中心留有直径为 10 cm 的炮孔，炮孔长度为 80 cm。在实验室进行测定并获取试块的力学参数为：密度 2.6 g/cm³，剪切模量 12.7 GPa，屈服应力 24 MPa，抗拉强度 5 MPa，失效应变 0.4。致裂前后对比如图 4 所示。

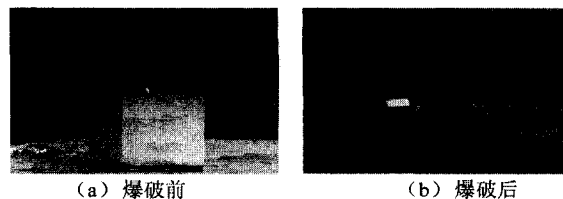


图 4 混凝土试块

Fig. 4 Concrete block

从图 4 可以看出，致裂后的混凝土试块被致裂产生的高能 CO_2 气体劈裂为 7 大块，但并没有将混凝土试块粉碎，而是高能 CO_2 气体沿着致裂前期产生的裂隙劈开试块。劈裂完成后，残余的气体能量产生强大的推力将劈裂后的试块推出致裂点。经测量和计算，试验后混凝土试块的分形维数 D 为 2.83。

2.2 TNT 数值模拟

2.2.1 数值模型建立及参数选取

利用三维动力分析软件 ANSYS_LS-DYNA3D 模拟 277 g TNT 在混凝土试块中的爆炸。该软件对爆炸问题有 3 种算法^[17]，文中采用共节点算法进行模拟。数值模型由 TNT、空气、混凝土试块 3 部分组成，TNT 和空气采用共节点的作用方式传力。TNT 和空气介质采用欧拉网格建模，单元使用多物质 Arbitrary Lagrange-Euler 算法，混凝土介质采用拉格朗日网格建模。TNT、空气和混凝土单元均采用 Solid164 单元。数值模型采用 cm-g- μs 单位制，致裂模型如图 5 所示，力学参数、规格、炮眼长度和孔径均与 2.1 中混凝土试块相同。考虑到液态 CO_2 相变致裂释放管长度为 80 cm，为保证数值模拟与相变致裂过程的一致性，模拟采用条形装药。

在 ANSYS_LS-DYNA3D 数值模拟的建模过程中，分别对 TNT 和混凝土模块 2 种不同的材质进行不同的网格划分。为了防止计算过程中产生负体积

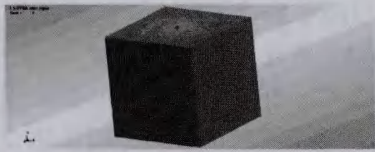


图 5 混凝土试块 - 炮孔模型

Fig. 5 Concrete block-explosion hole model

和节点速度无穷大现象,使 TNT 和混凝土模块的单元尺寸比接近 2:5。由于计算模型大、建立的单元数目多,在划分单元时,分别对爆破孔采用映射划分法,对混凝土采用 Sweep 划分法。混凝土模块计算模型的节点数为 159 180,单元数为 155 200。混凝土模块空气采用 MAT_NULL 材料模型,其状态方程可用线性多项式描述:

$$P_1 = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (4)$$

式中: $\mu = 1/V_1 - 1$; V_1 为相对体积, m^3 ; P_1 为爆轰压力, MPa; E 为单位体积内能,取 $2.533 \times 10^5 \text{ J/m}^3$; $C_0 - C_6$ 均为常数, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6$, $C_4 = C_5 = 0.4$ 。

ANSYS_LS-DYNA3D 中的 JWL 状态方程能精确地描述爆轰产物膨胀做功过程,从方程可以得到任意时刻的爆轰压力为^[18]:

$$P_1 = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_1} \right) \exp(-R_1 V_1) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_1} \right) \exp(-R_2 V_1) + \frac{\omega E_0}{V_1} \quad (5)$$

式中: E_0 为初始比内能, Pa 或 J/m^3 ; A, B, R_1, R_2 和 ω 为与材料性质有关的常数,这些常数可以由 TNT 密度 ρ 、爆速 v 和绝热系数 γ 拟合得到,详细方法不再赘述,参数的计算结果见表 1。

表 1 状态方程参数表

Table 1 Parameter table of state equation

$\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$v /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	γ	$A /$ GPa	$B /$ GPa	R_1	R_2	ω	$E_0 /$ GPa
0.95	3 600	1.33	347	0.733	4.15	0.95	0.3	1.0

2.2.2 模拟运算结果及分析

模拟有效应力云图如图 6 和图 7 所示,应力变化曲线如图 8 所示。

从图 6 可以看出,混凝土试块自上而下致裂,在 $t = 200 \mu\text{s}$ 时致裂基本完成,致裂产生的冲击波传至孔底。从图 7 可以看出,在 $t = 200 \mu\text{s}$ 时致裂产生的应力已经传至整个试块,试块的部分边缘处有效应力范围为 6.64 ~ 13.37 MPa。图 8 为爆破孔周边单

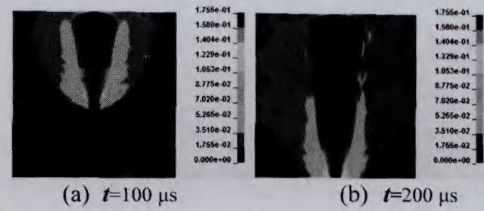


图 6 纵向剖面云图

Fig. 6 Longitudinal profile nephogram

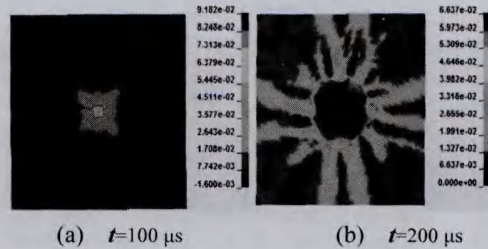


图 7 径向剖面云图

Fig. 7 Radial profile nephogram

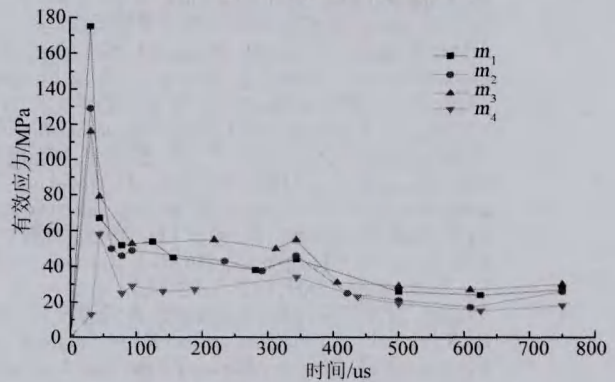


图 8 爆破孔周边单元有效应力变化曲线

Fig. 8 Effective stress vs time for units surrounding blasting holes

元有效应力变化曲线, m_1, m_2, m_3, m_4 等 4 个单元取点的位置分别在试块上表面距孔中心 5, 10, 30 和 50 cm 处。结合图 6—图 8 可以看出, 277 g TNT 爆炸时产生的应力足以破坏混凝土试块。由图 7 可以看出, 试块破碎后, 尺寸 400 mm 的数量为 2, 尺寸 300 mm 的数量为 2, 尺寸 100 mm 的数量为 5, 选取特征尺寸为 300 mm, 最大特征尺度为 400 mm, 经计算得数值模拟的分形维数 D 为 2.41。

综上, 液态 CO₂ 相变致裂试验的混凝土破碎分形维数 D 为 2.83, TNT 数值模拟的混凝土模型破碎分形维数 D 为 2.41, 相对误差约为 14.84%, 能够满足工程应用的需要, 证明用 F57L 型储液管的液态 CO₂ 相变致裂装置单次致裂的能量约为 277 g TNT 当量。

3 结论

1) 通过对液态 CO₂ 相变致裂过程的分析,确定了计算液态 CO₂ 相变致裂 TNT 当量的计算方法,即采用“压缩气体与水蒸气容器爆破能量”计算方法。

2) 计算出液态 CO₂ 相变致裂设备中, F57L 型

储液管和 SD390 型定压泄能片单次致裂产生的能量与 277 gTNT 所具有的能量相当。

3) 液态 CO₂ 相变致裂试验的破碎分形维数 D 为 2.83, TNT 数值模拟的破碎分形维数 D 为 2.41, 相对误差约为 14.84%, 能够满足工程应用的需要, 证明计算结果是可靠的。

参考文献

- [1] 王兆丰, 刘军. 我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J]. 煤矿安全, 2005, 36(3): 29-32.
WANG Zhao-feng, LIU Jun. Probe into the problems of methane drainage in China's coal mines and its countermeasures[J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(3): 29-32.
- [2] 谭波, 何杰山, 潘凤龙. 深孔预裂爆破在低透性高突煤层中的应用与分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 73-78.
TAN Bo, HE Jie-shan, PAN Feng-long. Application and analysis of deep hole pre-split blasting in low permeability and high outburst coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(11): 73-78.
- [3] 方良才, 夏抗生. 淮南矿区区域性瓦斯治理成套技术实践[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(2): 56-58.
FANG Liang-cai, XIA Kang-sheng. Practices on completed set technology of local gas control in Huainan coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(2): 56-58.
- [4] 王志亮, 杨仁树, 张跃兵. 保护层开采效果评价指标及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(10): 58-63.
WANG Zhi-liang, YANG Ren-shu, ZHANG Yue-bing. Study on protection layer mining effect evaluation indexes and their applications[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(10): 58-63.
- [5] 赵阳升, 杨栋, 胡耀青, 等. 低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 455-458.
ZHAO Yang-sheng, YANG Dong, HU Yao-qing, et al. Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 455-458.
- [6] 聂政. CO₂ 炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8): 26-27.
NIE Zheng. Application of Cardox dioxide blasting technique in coal mines[J]. Coal Technology, 2007, 26(8): 26-27.
- [7] 朱栓成, 周海丰, 李浩荡. CO₂ 炮处理综采工作面巷道三角区悬顶[J]. 煤矿安全, 2013, 44(8): 144-146.
ZHU Shuan-cheng, ZHOU Hai-feng, LI Hao-dang. The application of carbon dioxide gun in processing hanging arch at triangle area of fully mechanized mining face roadway[J]. Safety in Coal Mine, 2013, 44(8): 144-146.
- [8] 魏刚, 夏洪满, 姜凤岗, 等. 液态 CO₂ 爆破器落煤试验研究[J]. 煤矿开采, 2009, 14(1): 22-24.
WEI Gang, XIA Hong-man, JIANG Feng-gang, et al. Test research on coal drop with liquid CO₂ blaster[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(1): 22-24.
- [9] 韩亚北. 液态二氧化碳相变致裂增透机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014. 7.
HAN Ya-bei. Mechanism research on increase coal gas permeability by liquid CO₂ phase transition fracturing technique[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014. 7.
- [10] Pickering D H. Tests on Cardox for the reinstatement of approval for use in coal mines[C]. Industry Applications Society Annual Meeting, 1989: 251-259.
- [11] R Holmberg, T White. Cardox system brings benefits in the mining of large coal[J]. Coal international, 1995, 243(1): 31-33.
- [12] How it works[EB/OL]. [2014-09-05]. Cardox International Limited. <http://www.cardox.co.uk/how.htm>.
- [13] 国家安全生产监督管理局. 安全评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 563-569.
State Administration of Work Safety. Safety evaluation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005: 563-569.
- [14] Zoran Radulovi. Mining of the cave arch using the CARDOX procedure[J]. Zoran Radulovic, 2012, 2(7): 314-320.
- [15] 李文炜, 狄刚, 王瑞欣. 船运液态 CO₂ 储罐爆炸事故的原因分析[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(1): 95-98.
LI Wen-wei, DI gang, WANG Rui-xin. Analysis of a liquid CO₂ tank explosion on a ship[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(1): 95-98.
- [16] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1-9.
XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4): 1-9.
- [17] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 68-89.
BAI Jin-ze. Analysis of theory and practice about LS-DYNA3D[M]. Beijing: Science Press, 2005: 68-89.
- [18] Trevor K Groves. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[M]. Montreal: Department of Mechanical Engineering McGill University, 1966: 50-422.



作者简介: 董庆祥 (1990-), 男, 河南周口人, 河南理工大学瓦斯灾害防治技术及装备研究所硕士研究生, 研究方向为安全技术及工程、煤矿瓦斯防治理论及技术。E-mail: 15093748105@163.com.