

岩石中强爆炸动力学过程数值模拟

浦锡锋, 张海波, 田 宙, 郝保田

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 在地下结构抗强爆炸作用的安全和防护研究中, 需要对强爆炸的力学效应进行三维数值模拟。强爆炸的早期过程很复杂, 在计算强爆炸的力学作用时一般可将其初始反应阶段结束时刻作为初始时刻, 把强爆炸力学作用过程简化为铁蒸汽球等熵膨胀过程中对周围介质的作用。利用 LS-DYNA^{3D} 软件的用户自定义材料模型接口, 将上述简化的强爆炸源作为一种独立的材料模型, 实现了 LS-DYNA^{3D} 软件模拟强爆炸力学作用的功能。使用加入了强爆炸模型后的 LS-DYNA^{3D} 软件计算了花岗岩中强爆炸自由场应力波参数和空腔解耦强爆炸对壁面的压力, 得到的结果与实测值和其他学者研究结果符合较好。研究结果为各种地下结构受强爆炸作用问题的三维数值模拟提供了计算工具。

关键词: 数值模拟; 地下爆炸; LS-DYNA^{3D}; 用户自定义材料

中图分类号: O 242; O 381

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5007 - 06

NUMERICAL SIMULATION OF UNDERGROUND EXPLOSION IN GRANITE

PU Xi-feng, ZHANG Hai-bo, TIAN Zhou, HAO Bao-tian

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The 3D numerical simulation of underground explosion is of interest for the protection of underground structures under explosion. The energy of explosion is sufficient to vaporize the medium around the work point. The expansion of the vaporized gas displaces the medium further out, causing deformation and failure. So the radiation transport and details of the very-early-time dynamics in the explosion source region are not considered in numerical calculations, and the energy source is modeled as an initially uniform spherical region of the appropriate energy content. A simple approximation is used for the vaporized gas, where the gas is assumed to consist of Fe and isentropic expansion of the gas is calculated. The suggested model is performed as a material model of LS-DYNA^{3D} through its user-defined material function. Attenuation of radial peak stress and radial peak particle velocity of explosion in granite and the wall load function for decoupled explosive are calculated by using this material model. The numerical results are in good agreement with the experimental and numerical data achieved by other scholars.

Key words: numerical simulation; underground explosion; LS-DYNA^{3D}; user-defined material model

1 引 言

在地下结构抗强爆炸作用的安全和防护研究

中, 需要对强爆炸的力学效应进行研究。其中强爆炸源的实现是数值模拟工作的基础, 爆炸源模拟的准确程度决定后续效应计算的可靠性。

强爆炸的早期过程很复杂, 在分析强爆炸的力

收稿日期: 2005 - 05 - 11; **修回日期:** 2005 - 06 - 20

作者简介: 浦锡锋(1980 -), 男, 硕士, 2004 年毕业于西北核技术研究所爆炸理论与应用专业, 现任研究实习员, 主要从事爆炸力学数值模拟方面的研究工作。E-mail: tyqk@163.net。

学作用时一般将其初始反应阶段结束时刻作为初始时刻,把强爆炸对周围介质的作用过程等效为爆炸源区汽化物质的等熵膨胀做功过程^[1]。根据以上简化,需要描述源区汽化物质等熵膨胀过程中的状态方程及其参数。在实际情况下,强爆炸周围区域内包含未反应材料汽化物、装置壳体汽化物、其他汽化物质等多种物质,不可能通过试验得到比较精确的源区混和物的状态方程参数。因此,在数值计算中一般使用比较单一元素的状态方程进行近似。文[1]给出了H₂O, NaCl和硅酸岩材料的气体状态方程,其中硅酸岩蒸汽使用由不同百分比的SiO₂和H₂O组成的混和物近似。

在美国 Lawrence Livermore 实验室开发的用于计算岩石中强爆炸动力学过程的一维球对称程序 SOC 中,根据以上思路,提出了 2 种源的简化方式:使用具有与爆炸当量相同能量的铁蒸汽近似源区汽化物质;或者假设每千吨爆炸能量可以汽化 70 t 岩石,以岩石汽化区域作为程序计算的起始区域,这一区域中包含了与爆炸当量能量相同的岩石蒸汽。2 种模型在离源区较远的距离外所得到的自由场应力波参数基本一致^[2]。Lawrence Livermore 实验室开发的二维柱对称程序 TENSOR 中也采用了这种强爆炸源的模拟方式。SOC 程序和 TENSOR 程序被广泛应用于地下强爆炸试验封闭和力学安全研究中^[3~5],因此,这种强爆炸源的处理方式也成为强爆炸模拟的一般方式。

我国学者对强爆炸的模拟基本上也是沿用上述思路,并根据是否考虑源区汽化物质与周围介质的混和过程提出了“球爆炸”模型和“球活塞”模型。文[6]把这种强爆炸源的模拟方式加入到一维球对称计算程序中,并计算了地下强爆炸自由场应力波参数,计算结果与实测比较相符。

在研究比较复杂的结构受地下强爆炸作用的问题时,需要进行三维数值计算。而在模拟爆炸等大变形瞬态动力学问题方面,源于 Lawrence Livermore 实验室的 LS-DYNA^{3D} 软件是目前使用最广泛的计算软件之一^[7]。但在 LS-DYNA^{3D} 软件中,对于强爆炸的模拟只提供了空气中爆炸超压计算的简单加载模型^[8]。本文利用 LS-DYNA^{3D} 软件提供的用户自定义材料模型接口程序,将上述强爆炸源的处理过程作为一种新的材料模型加入到软件中。使用铁蒸汽来近似源区汽化物质,根据由 SAHA 电离平衡状态方程计算得到的铁元素的状态方程参数,插值计算源区汽化物质等熵膨胀过程中的状态参量。

使用加入了强爆炸源材料模型的 LS-DYNA^{3D} 软件计算了花岗岩中强爆炸自由场应力波参数和空腔解耦爆炸情况下的壁面压力。计算结果与实测值和其他学者研究结果比较相符,计算得到的壁面压力随时间变化的曲线可作为地下结构在强爆炸条件下安全计算的载荷。

2 爆炸源区汽化物质状态方程

充满爆室的高温高压铁蒸汽的膨胀过程可认为是等熵的,根据热力学第一、第二定律,对于单位质量气体^[9]有

$$TdS = de + pdv \quad (1)$$

式中: e 为单位质量的内能, dv 为比容变化量。对于等熵过程 $dS = 0$, 则有

$$de = -pdv \quad (2)$$

源区物质由单一铁元素组成,由 SAHA 电离平衡方程计算得到铁元素在一定温度和压力范围内的状态参数之间的关系。图 1, 2 是计算得到的铁元素的 $T-\eta-E$ 关系和 $T-\eta-P$ 关系的示意图(其中, η 为体积压缩比,且 $\eta = \frac{\rho}{\rho_{00}}$; E 为体积能量密度,且

$E = \frac{e}{v} = \rho_{00} \eta e$; ρ_{00} 为铁的初始密度,且 $\rho_{00} = 7.8 \text{ g/cm}^3$)。这样,已知初始条件后,就可以通过以下二维插值的过程得到源区铁蒸汽等熵膨胀过程中的各状态参量:

(1) 由源区气体的质量和当前气体体积计算当前气体的体积压缩比(相对于铁的初始密度);

(2) 由当前源区气体的总能量和气体体积计算气体的体积能量密度;

(3) 根据图 1 所示的体积能量密度 - 压缩比 - 温度关系,插值得到当前体积压缩比对应的体积能量密度与温度的关系;

(4) 根据(3)计算得到的体积能量密度与温度的关系,由当前体积能量密度插值得到当前温度;

(5) 根据图 2 所示的压力 - 温度 - 压缩比关系,插值得到当前体积压缩比对应的压力与温度关系;

(6) 根据(5)计算得到的压力与温度关系,由(4)中求得温度插值得到当前压力;

(7) 将当前压力值作为载荷作用到周围介质上,计算得到下一时刻的源区气体体积;

(8) 计算能量的损耗,更新源区气体的总能量,返回(1)。

上述二维插值过程如图 3 所示。

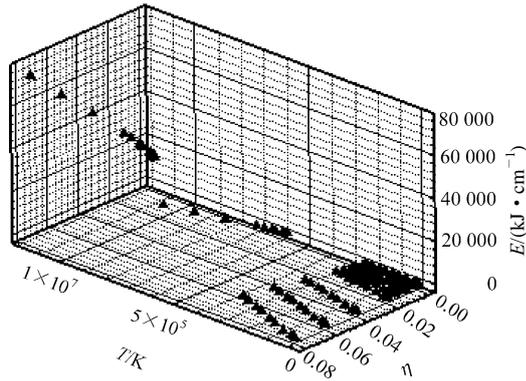


图 1 状态参量 $T-\eta-E$ 的关系

Fig.1 Relationship between parameters T , η and E

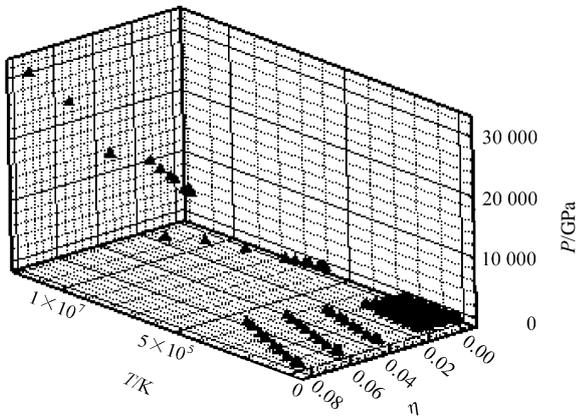


图 2 状态参量 $T-\eta-P$ 的关系

Fig.2 Relationship between parameters T , η and P

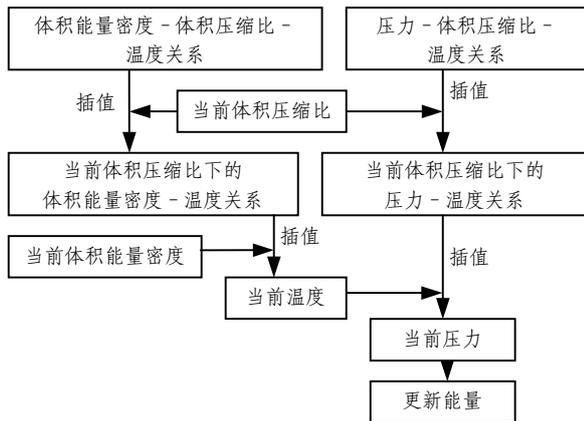


图 3 二维插值求状态参量过程

Fig.3 Flow chart of two-dimension interpolation

由上述插值过程可以看到，插值要求的初始条件为初始体积压缩比和初始体积能量密度。例如对球形爆室， E 和 η 的初始条件可以表示为

$$\eta_0 = \frac{3M}{4\pi R_0^3 \rho_{00}} \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{3Q}{4\pi R_0^3} \quad (4)$$

式中： Q 为源区初始总能量，所以在计算时应当给出源区域的半径、爆炸当量、源区物质总质量。

3 LS-DYNA^{3D} 自定义材料模型实现

LS-DYNA^{3D} 软件中 Lagrangian 计算的主要流程(不包含接触处理)如图 4 所示。软件提供的用户自定义材料模型接口位置处于流程中的应力更新部分，即要求用户在自定义材料模型程序部分计算单元的偏应力和压力。在 LS-DYNA^{3D} 软件提供的主程序接口及用户自定义子程序文件 LS-DYNA.F 中，已经给出了应力更新的框架和单元应变增量等已知量，需要用户自定义部分返回应力增量和可能涉及的历史变量^[10]，在本文中不使用历史变量。

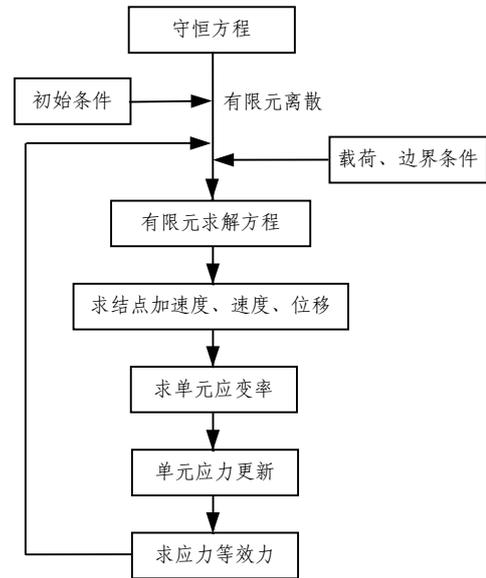


图 4 Lagrangian 计算过程

Fig.4 Flow chart of Lagrangian calculation step

由于源区物质为气体，所以处理过程采用类似于 LS-DYNA^{3D} 程序中的 MAT_NULL 材料模型加状态方程的形式，即令偏应力为 0，压力根据上述二维插值过程求得。

对于 $p = p(V, E)$ 形式的状态方程，LS-DYNA^{3D} 软件中应力更新的过程^[11](略去了体积粘性项)为：

(1) 计算偏应力分量

在本文中由于源区物质为气体，所以偏应力置为 0。

(2) 由 t^n 时刻的压力求 t^{n+1} 时刻的内能试值 其内能试值为

$$e^{*n+1} = e^n - \frac{1}{2} \Delta v p^n \quad (5)$$

(3) 由状态方程和内能试值求 t^{n+1} 时刻压力状态方程可表示成对内能的线性形式:

$$p^{n+1} = A^{n+1} + B^{n+1} E^{n+1} \quad (6)$$

其中,

$$E^{n+1} = \frac{e^{n+1}}{v_0} \quad (7)$$

另外, 由于:

$$e^{n+1} = e^{*n+1} - \frac{1}{2} \Delta v p^{n+1} \quad (8)$$

联立式(6)~(8), 求解得到

$$p^{n+1} = \frac{A^{n+1} + B^{n+1} E^{*n+1}}{1 + \frac{1}{2} B^{n+1} \frac{\Delta v}{v_0}} \quad (9)$$

如果状态方程不能表示成内能的线性形式, 则使用以下一步迭代过程来求得压力试值:

$$p^{*n+1} = p(V^{n+1}, E^{*n+1}) \quad (10)$$

根据式(8), 由 p^{*n+1} 得到 $n+1$ 时刻的内能 E^{n+1} , 再求得 $n+1$ 时刻的压力:

$$p^{n+1} = p(V^{n+1}, E^{n+1}) \quad (11)$$

(4) 由 $n+1$ 时刻的压力求 $n+1$ 时刻的内能

如果状态方程可表示为内能的线性形式, 则根据式(8), 由求得的 $n+1$ 时刻的压力求得 $n+1$ 时刻的内能。

在本文中, 由于压力由二维插值过程求得, 所以计算压力时采用上述状态方程不能写成内能线性形式时的过程: 求得内能试值 E^{*n+1} 后, 插值求得 $n+1$ 时刻的压力试值 p^{*n+1} , 然后根据式(8)求得 $n+1$ 时刻的内能 E^{n+1} , 最后再插值求得 $n+1$ 时刻的压力。

4 验证算例

使用加入爆炸源模型后的 LS-DYNA^{3D} 软件, 对花岗岩中强爆炸的力学作用过程进行了数值模拟。在计算中分别使用 Lagrangian 接触算法和 Eulerian 耦合的方法实现源区汽化物质与周围介质的作用。首先计算了花岗岩中强爆炸的自由场应力波参数, 然后计算了空腔解耦强爆炸对空腔壁面的压力。

计算中使用的岩石材料模型为流体 - 弹塑性材料模型。岩石的密度为 2.62 g/cm³, 剪切模量 $G = 23.7$ GPa, 其他材料参数和岩石的压力与体积压缩比的关系取自文[12]中的试验数据。

4.1 花岗岩中强爆炸自由场应力波参数计算

计算了花岗岩中 1×10^3 t TNT 当量的强爆炸作用过程, 计算得到的峰值径向应力和峰值径向粒子速度随比例爆心距的变化如图 5, 6 所示($K = R/Q^{1/3}$), 其中归一化后的实测值取自文[12]。

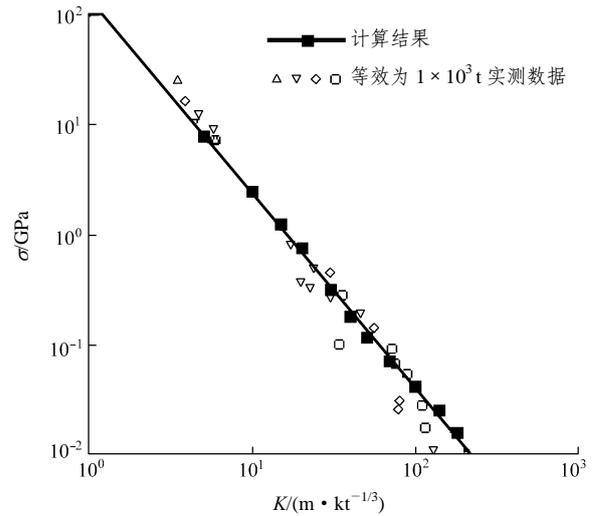


图 5 峰值径向应力随比例距离的变化

Fig.5 Attenuation of radial peak stress

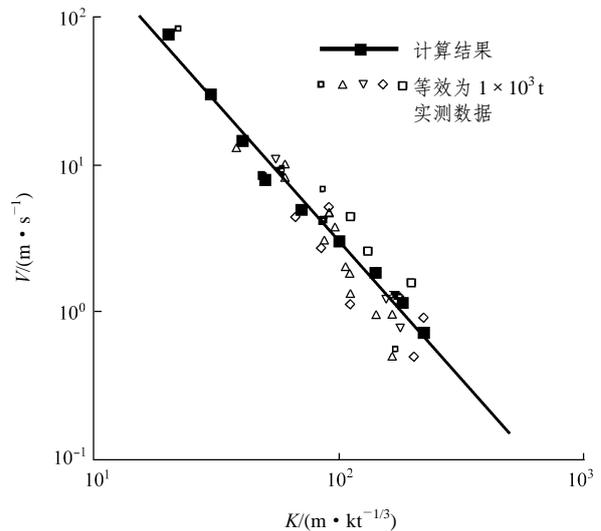


图 6 峰值径向粒子速度随比例距离的变化

Fig.6 Attenuation of radial peak particle velocity vs. distance

由图 5, 6 可以看到, 使用本文的爆炸源模型计算得到的地下强爆炸自由场应力波参数与实测结果比较相符。

4.2 空腔解耦爆炸壁面压力计算

计算模型如图 7 所示。爆炸当量为 20 t TNT，取源区物质质量为 70 kg，空腔半径为 11 m，空腔中空气的初始压力设为 0.101 3 MPa。在计算中使用刚性空腔壁面，空气使用理想气体状态方程。计算得到的壁面反射压力如图 8 所示。为方便与文献值比较，压力单位取为 Mbar(相当于 100 GPa)。图 9 为文[13]中相同模型下计算得到的壁面压力，可以看到，本文计算得到的空腔解耦爆炸壁面压力随时间变化曲线与文献值在峰值大小和波形上都比较相符。

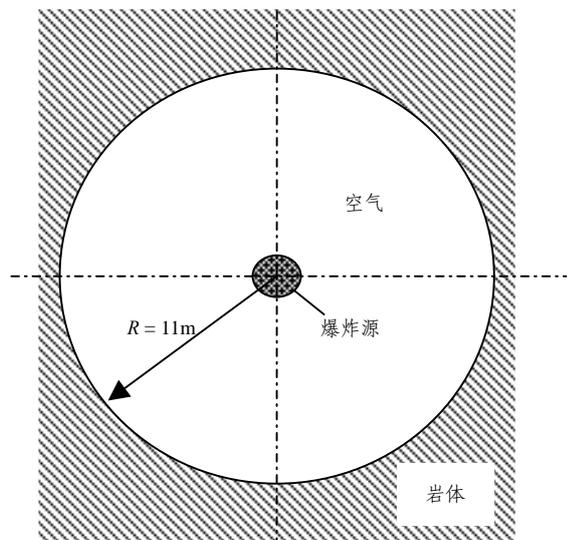


图 7 空腔解耦强爆炸物理模型

Fig.7 Physical model of decoupled explosion

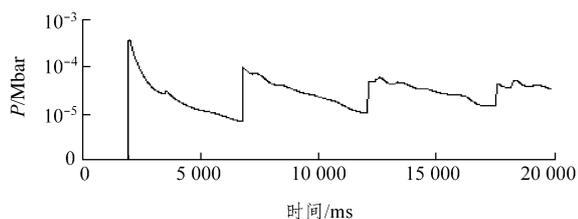


图 8 计算得到的空腔壁面压力随时间变化曲线

Fig.8 Variation pressure-time history curve at wall of calculation results

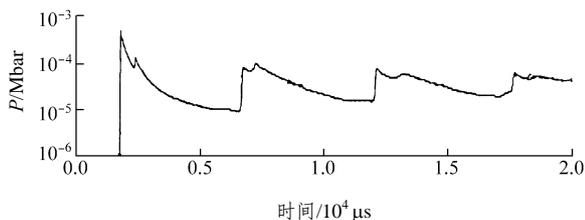


图 9 空腔壁面压力随时间变化曲线^[13]

Fig.9 Reflected pressure-time history at the wall^[13]

5 讨论

在上述 2 个算例中，分别通过 Lagrangian 接触算法和 Eulerian 耦合的方法实现强爆炸产物与周围介质的作用。在 Lagrangian 计算中，爆炸源区产物与周围介质被物质界面分开，不能与周围介质自由混和，这种计算方式属于“球活塞”模型；而在 Eulerian 耦合计算中，物质可以在网格中流动并混和，所以这种计算方式应该属于“球爆炸”模型。使用两种模型都可以取得比较好的计算结果，这与有关研究的认识是一致的。

从以上计算结果看，本文的强爆炸源模拟可以比较正确的描述强爆炸作用过程。但是应该注意到，使用 SAHA 电离平衡状态方程求得的铁元素的状态参数只适用于高温高压，以致于源区物质处于完全电离状态的情况下。在爆炸源区初始温度、压力比较低，可能不足以使物质完全电离，甚至不能汽化全部源区物质的情况下，使用此爆炸源模型时应该谨慎。

6 结论

本文根据强爆炸源模拟的一般处理方法，把强爆炸力学作用过程简化为反应结束后高温、高压源区汽化物质的等熵膨胀过程。使用铁蒸汽近似反应结束后源区汽化物质，根据由 SAHA 电离平衡方程计算得到的状态方程参数插值得铁蒸汽等熵膨胀过程中的状态，实现了强爆炸加载。

利用通用动力学有限元软件 LS-DYNA^{3D} 提供的用户自定义材料模型接口，将本文爆炸源模型加入到 LS-DYNA^{3D} 软件中作为一种独立的材料模型。

使用加入了本文爆炸源模型的 LS-DYNA^{3D} 软件，分别用 Lagrangian 方法和 Eulerian 方法计算了花岗岩中的强爆炸自由场应力波参数和空腔解耦情况下 20 t TNT 当量强爆炸对岩石壁面的压力随时间变化曲线，得到了与实测值和有关研究结果相吻合的结论。本文的工作为地下结构受强爆炸作用问题的三维数值模拟提供了计算工具。

参考文献(References):

- [1] Butkovich T B. The gas equation of state for natural materials[R]. [s. l.]: UCRL - 14729, 1967.
- [2] Schatz J F. Soc73, a one-dimensional^[13] propagation code for rock

- media[R]. [s. l.]: UCRL - 51689, 1974.
- [3] Butkovich T B. Calculation of the shock wave from an underground nuclear explosion in granite[R]. [s. l.]: UCRL - 7762, 1967.
- [4] Terhune R W, Glenn H D, Burton D E, et al. Containment analysis for the simultaneous detonation of two nuclear explosive[R]. [s. l.]: UCRL - 52268, 1977.
- [5] Terhune R W. Analysis of burial depth criteria for containment[R]. [s. l.]: UCRL - 52395, 1978.
- [6] 刘文韬, 王肖钧, 周 钟, 等. 一种岩石损伤本构模型在地下强爆炸中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 207 - 213.(Liu Wentao, Wang Xiaojun, Zhou Zhong, et al. A damage constitutive model of rocks and its applications in underground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 207 - 213.(in Chinese)).
- [7] 北京理工软件技术开发有限公司. ANSYS/LS-DYNA 技术应用报告[R]. 北京: 北京理工软件技术开发有限公司, 2002.(Beijing Engineering Software Technology Co., Ltd.. ANSYS/LS-DYNA Technology Report[R]. Beijing: Beijing Engineering Software Technology Co., Ltd., 2002.(in Chinese))
- [8] Livermore Software Technology Corporation. LSTC.LS-DYNA Keyword User's Manual Version 960[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, LSTC, 2001.
- [9] 乔登江, 韩学安, 李如松. 地下核爆炸现象学概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.(Qiao Dengjiang, Han Xue'an, Li Rusong. Phenomena of Underground Nuclear Explosion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.(in Chinese))
- [10] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.(Zhao Hai'ou. Guide to LS-DYNA Dynamics Analysis[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003.(in Chinese))
- [11] Hallquist J. LS-DYNA Theory Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, LSTC, 1998.
- [12] 郝保田. 地下核爆炸及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.(Hao Baotian. Underground Nuclear Explosion and Its Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.(in Chinese))
- [13] Snell C M, Swift R P, Marusak N L, et al. Canonical wall loading functions for decoupled cavities and containment vessels[A]. In: Proceedings of the Seventh Symposium on Containment of Underground Nuclear Explosions[C]. Washington: Boeing Space Center East Kent, 1993. 23 - 43.