

花岗岩介质中爆炸回填堵塞的数值模拟

王海兵, 张海波, 田 宙, 郝保田

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 采用显式动力学有限元程序 LS-DYNA^{3D}, 对花岗岩介质中带拐弯坑道回填堵塞的化爆试验进行数值模拟。介绍了计算所用的材料模型, 并给出经过大量数值试验验证的材料参数; 计算了自由场的力学参数, 给出了围岩和堵塞物的力学破坏情况和破坏分区; 分析比较围岩和坑道中的应力波走时, 并与试验结果进行对比。计算结果与试验结果符合较好。本研究工作是模拟岩石中爆炸的基础, 可为填实化爆、直坑道和带拐弯坑道堵塞的试验研究提供借鉴和参考。

关键词: 数值模拟; 爆炸; 坑道; 堵塞; 材料模型; 花岗岩

中图分类号: O 383.1; O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5013 - 07

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-EXPLOSIVE EXPLOSION WITH A BACKFILLED TUNNEL IN GRANITE

WANG Hai-bing, ZHANG Hai-bo, TIAN Zhou, HAO Bao-tian

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

Abstract: The dynamics finite element program LS-DYNA^{3D} is employed to simulate the high-explosive explosion experiment in granite, which has a crooked tunnel that is backfilled with concrete stemming. The appropriate material models and its parameters are important in numerical simulation. Together with the results of high-explosive explosion experiments, the computational methods, physical models, constitutive models, and their parameters that used for calculation are established and validated by large numbers of numerical tests. Elastic-plastic-hydro material model is used for granite, and the JHC model is used to describe the dynamic response of concrete. The equation of state(EOS) of JWL is used to determine the pressure of detonation products of high-explosive. Free field parameters and the failure regions are calculated. The reach time of stress wave in wall rock and tunnel is analyzed and compared. The simulated results agree well with the experiments results. This work can be regarded as the basement for numerical simulation of the explosion in granite and can be used for such experimental studies.

Key words: numerical simulation; explosion; tunnel; stem; material model; granite

1 引 言

本文曾在花岗岩介质中进行了药量为 1 t TNT 的填实化爆试验。试验的坑道堵塞结构如图 1 所

示。坑道的横截面尺寸为 2 m×2 m, 坑道采用水泥砂浆和混凝土浆砌预制块回填, 回填的总长度为 21 m, 其中正对爆室的坑道回填了 6 m, 坑道 90° 转弯后又回填了 15 m。

根据以往的计算^[1], 自由场中的力学参数以及

收稿日期: 2005 - 04 - 02; **修回日期:** 2005 - 06 - 20

作者简介: 王海兵(1980 -), 男, 硕士, 2005 年毕业于西北核技术研究所爆炸力学与应用专业, 主要从事爆炸力学数值模拟方面的研究工作。E-mail: braveheart01@163.com。

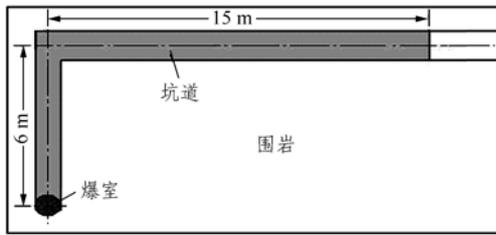


图 1 试验坑道堵塞示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment with a backfilled tunnel

围岩和堵塞物的破坏范围主要由一维 SOC 程序的数值计算并结合经验公式给出；坑道和堵塞物的相互作用，主要采用一、二维程序耦合的方法来进行计算，坑道内采用一维 Pufi 程序，围岩中采用二维 Tensor 程序，两个程序在坑道壁处进行耦合。由于坑道内采用的是一维程序，所以只能对直坑道进行计算。这种方法沿用了很多年，解决了不少实际问题。然而随着试验要求的逐步提高，需要模拟一些较为复杂的试验情况，如带拐弯的回填堵塞、分段堵塞等等。这些三维问题，现有的一、二维程序不能计算，采用经验公式估算对一些细节的分析又有些粗略，可能会掩盖一些真实的物理过程。所以必须发展三维的计算方法和力学模型。本文采用三维动力有限元程序 LS-DYNA^{3D}，计算模拟了带拐弯堵塞的填实化爆试验。通过与实测结果和零后开挖结果的比较，经过大量的数值试验，确定了模拟化爆所用的计算方法、材料模型和材料参数。计算结果与实测结果、开挖结果符合较好，可为以后计算类似化爆堵塞结构问题提供借鉴和参考。

数值模拟中，选取合适的材料模型及其参数直接决定了数值模拟结果的好坏。基于对岩石特性的不同处理方法，对于花岗岩介质，在数值模拟中相继出现过不同的模型^[2]，例如有流体模型、包络线模型、流体-粘弹塑性模型、流体-弹塑性模型等。本文计算中，花岗岩材料采用流体-弹塑性模型。该模型克服了上述其他模型的不足，将弹塑性状态方程(即本构关系)引入基本方程。岩石在高于其液化压力的冲击波作用下，处理为理想可压缩流体，置剪应力 $\tau = 0$ 。在冲击波压力低于岩石液化压力的区域，岩石的加、卸载均以弹塑性体处理，服从弹塑性状态方程。

2 计算方法、材料模型及材料参数

2.1 有限元模型

计算采用流固耦合 ALE 算法^[3~5]。根据试验的实际结构和尺寸，建立有限元计算模型，如图 2 所示。图中中心小方块区域为 1 t TNT 的立方体装药，边长 84 cm；L 型区域为 21 m 长的浆砌预制块回填堵塞段；其余区域为坑道周围的花岗岩。

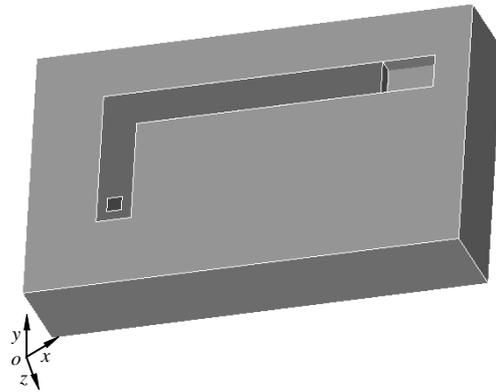


图 2 计算模型

Fig.2 Computational model

2.2 材料模型及材料参数

下面给出本文计算中所用的几种材料的材料模型和材料参数。

(1) TNT

TNT 炸药采用高能炸药爆轰模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL 状态方程描述，JWL 状态方程精确地描述了在爆炸过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特性。JWL 状态方程定义压力为相对体积和内能的函数，方程形式如下：

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中： A_1 ， B_1 ， R_1 ， R_2 和 ω 均为 JWL 状态方程参数； E 为炸药的内能。

表 1 给出了本文计算所采用的 TNT 炸药的材料参数。

表 1 TNT 炸药材料参数
Table 1 Material parameters of TNT

密度/(g · cm ⁻³)	爆速/(m · s ⁻¹)	P_{CJ}	A_1	B_1
1.63	0.693	0.21	3.712	0.032 31
R_1	R_2	ω	E_0	V_0
4.15	0.95	0.5	0.074	1.0

(2) 空气

空气采用流体材料模型 MAT_NULL 和多项式

状态方程 EOS_LINEAR_PLOYNOMIAL 来描述。

多项式状态方程表述为

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

式中: $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 。

当取 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 时, 此多项式状态方程可以用来模拟空气。此时 $P =$

$$(\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E。$$

本文计算中, ρ_0 取 $1.23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$; γ 取 1.3, 其余参数取值为 0。

(3) 混凝土

对于堵塞物, 实际试验中采用浆砌混凝土预制块回填, 材料为预制块和水泥砂浆。在计算中整体等效为混凝土来处理。

本文中引入 HOLMQUIST_JOHNSON_COOK 材料模型, 该模型综合考虑了混凝土的应变率效应、压力效应及混凝土的损伤, 是描述高速冲击下混凝土动力学响应与破坏较为合适的材料模型^[6]。

其本构方程形式如下:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + B(P/f_c)^N][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (3)$$

式中: $\sigma^* = \sigma/f_c$ 为无量纲等效应力, σ 为冲击过程中混凝土的实际等效应力; f_c 为静态单轴抗压强度; P 为实际压力; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率, 且 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为等效应变率; A, B, C, N 为材料常数, 且 $A = \sigma^*(P=0, \dot{\epsilon}^*=1)$, B 为无量纲压力硬化系数, N 为压力硬化指数, C 为应变率系数。 D 为混凝土的损伤度(损伤因子)($0 \leq D \leq 1.0$), 由等效塑性应变和塑性体积应变累加得到。

压力 - 体积应变关系分为三个区: 第一段为线弹性段; 第二段为过渡段, 混凝土孔隙中的气体逐渐被压出, 混凝土结构受到损伤, 并开始产生破碎性裂纹; 状态方程第三段为完全致密段。该阶段混凝土孔隙中的空气完全被排出, 混凝土完全被压碎, 满足凝聚态材料的 Hugoniot 关系, 如图 3 所示。

本文计算所用的材料参数在表 2 中列出。

(4) 花岗岩

对于花岗岩材料, 采用流体弹塑性模型。其状态方程, 加载用 Hugoniot 曲线(实测 + 解析理论), 卸载采用变模量卸载, 如图 4 所示。在 LS-DYNA^{3D} 中对应材料模型为 Elastic_Plastic_Hydro_Spall, 状

态方程为 Tabulated_Compaction。

计算所用的材料参数在表 3 中列出。

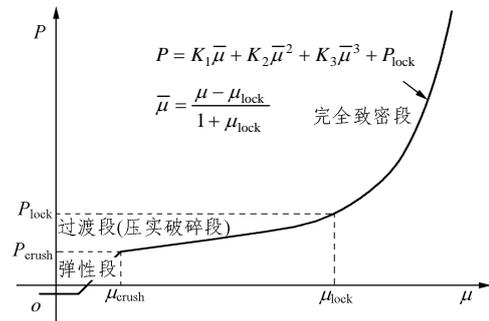


图 3 压力 - 体应变关系

Fig.3 Relationship between pressure and volumetric strain

表 2 混凝土材料常数^[7]

Table 2 Material parameters of concrete^[7]

f'_c /GPa	A	B	N	C	σ_{max}^*
0.014	0.79	1.6	0.61	0.007	7.0
G/GPa	D_1	D_2	EFMIN	T/GPa	p_{crush} /GPa
14.86	0.04	1.0	0.01	0.004	0.016
μ_{crush}	P_{lock} /GPa	μ_{lock}	K_1 /GPa	K_2 /GPa	K_3 /GPa
0.001	0.80	0.10	17.4	38.8	29.8

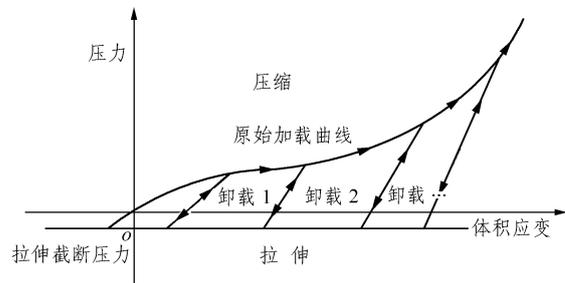


图 4 花岗岩状态方程示意图

Fig.4 Schematic diagram of EOS for granite

表 3 花岗岩材料参数

Table 3 Material parameters of granite

密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	剪切模量 /GPa	体压缩模量 /GPa
2.62	58.7	0.24	23.7	37.6
抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	屈服强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	纵波速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
5.93	169.8	105	38	4 250

3 计算结果

对上述有限元模型采用 LS-DYNA^{3D} 显式动力有限元程序流固耦合算法进行计算, 计算结果如下。

3.1 空腔形状和半径

1 t TNT 立方体装药，边长为 84 cm，所以爆室的初始形状为边长 84 cm 的立方体。爆后形成的稳定空腔形状近似球形，半径为约 1 m，如图 5 所示。

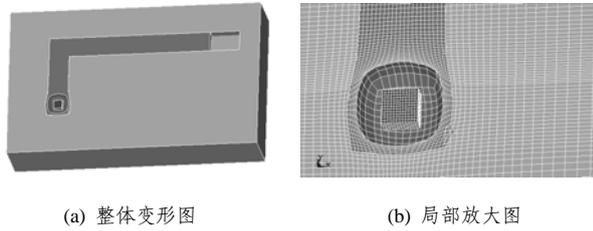


图 5 空腔形状
Fig.5 Cavity shape

图 6 给出了空腔尺寸随时间的变化过程，从图中可以看出空腔在 2.6 ms 时达到最大值，之后有一个很小的回弹，在 3.1 ms 时达到稳定，稳定的空腔半径约为 1 m。

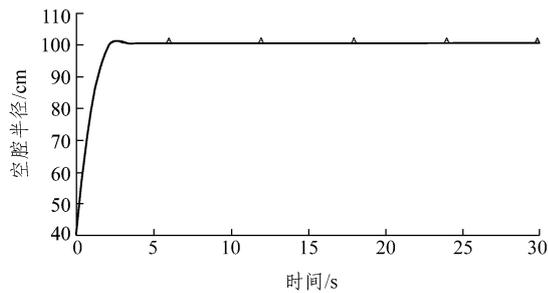


图 6 空腔尺寸随时间的变化
Fig.6 Time history of cavity size

图 7 为试验开挖得到的空腔形状和尺寸示意图。开挖表明，空腔半径约为 1.1 m。计算值与试验值符合较好。

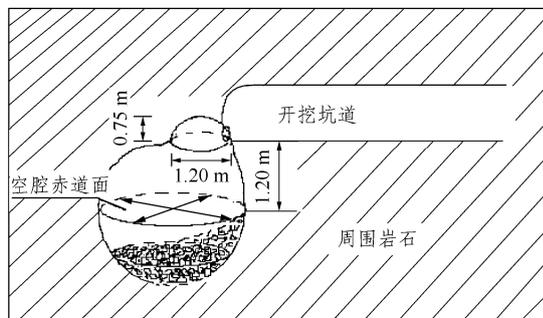


图 7 空腔形状和尺寸示意图
Fig.7 Schematic diagram of cavity shape and size

3.2 自由场中的力学参量

计算自由场中的力学参量时采用两种模型进行

计算。一种模型为图 2 所示的带拐弯坑道及堵塞物的整体模型；另外一种模型为将实际带堵塞坑道的爆炸简化为无限大岩石自由场中的填实爆炸，如图 8 所示的球对称模型。这种模型不考虑由于坑道的存在而产生的影响，因为对于填实爆炸，坑道只对自由场近区的一个方向上有影响，对于其他方向和远区的自由场不会产生影响。

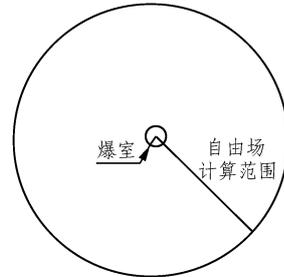


图 8 球对称模型示意图
Fig.8 Sketch map of sphere symmetry model

本文分别采用上述两种模型计算了自由场中的力学参量，采用整体模型的计算范围为 20 m，采用球对称模型的计算范围为 500 m。自由场中粒子速度的计算结果和试验实测值结果的比较如图 9 所示。

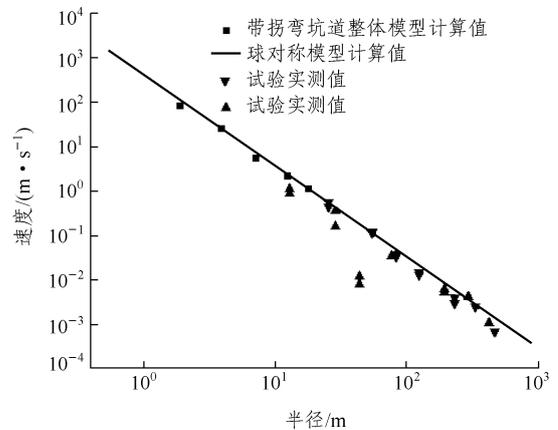


图 9 自由场速度计算结果与实测值的比较
Fig.9 Velocity comparison of calculation results and experiments results in free filed

加速度的计算结果与实测结果比较如图 10 所示。

3.3 围岩和坑道中堵塞物的力学破坏情况

(1) 围岩中的力学破坏情况

试验中花岗岩材料的汽化压力约为 200 GPa，液化压力约为 45 GPa。由于化爆试验产生的初始压力较低(约 20 GPa)，初始温度也较低(约 3 000 K)，因此，围岩中不会形成汽化液化区，但会形成压实

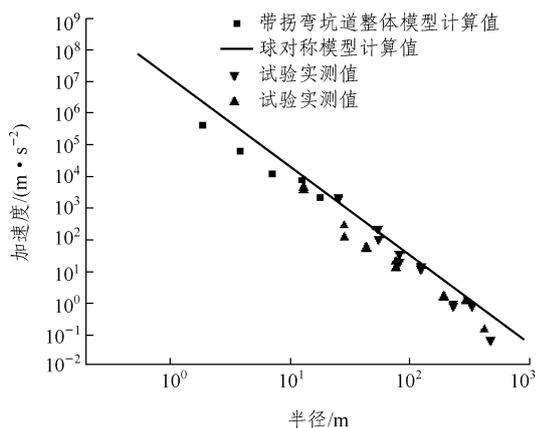


图 10 自由场加速度计算结果与实测值的比较

Fig.10 Acceleration comparison of calculation results and experiments results in free field

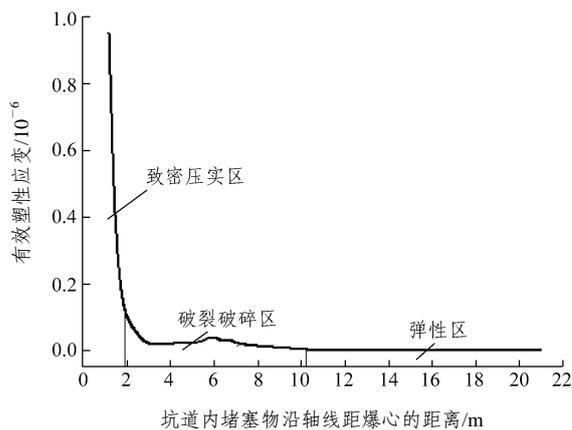


图 12 堵塞物沿坑道轴线的应变

Fig.12 Stemming strain along the tunnel axes

区、破碎区、破裂区和弹性区。对于试验安全来说，围岩的破裂破碎区半径是一个极为重要的参数。

计算得到爆室周围岩石的压实范围为从空腔壁到距爆心约 2 m 的范围，约 1 m 厚；围岩的破裂破碎区为从距爆心 2 m 到距爆心 6 m 的范围；距爆心 6 m 以外为围岩的弹性区，围岩的力学破坏分区图如图 11 所示。

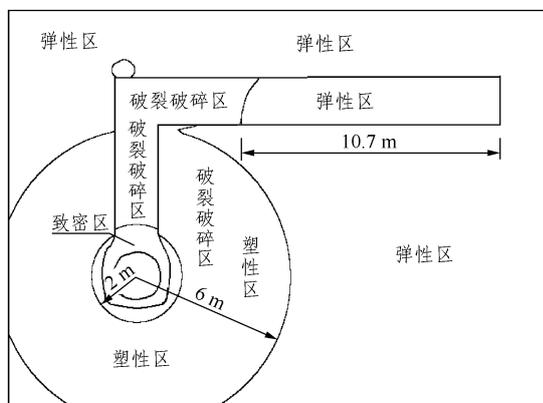


图 11 计算得到的力学破坏分区图

Fig.11 Simulation result of mechanical failure region

(2) 坑道内堵塞物的有效塑性应变和破坏分区
沿坑道轴线读取坑道内堵塞物的有效塑性应变，如图 12 所示。

由图 12 看到，正对爆室的直坑道内堵塞物的塑性应变，随着距爆心位置的增大其有效塑性应变值逐渐减小但之后又有所增大，一直增大到坑道拐弯处，之后又逐渐减小。实际现场零后开挖时也观察到了同样的现象，发现坑道拐弯处的浆砌预制块堵塞物的破坏程度明显大于前后位置，拐弯近角处的

预制块由原来的规整排列变得前后错动、堆砌凌乱，而远角处的堵塞物较为密实。正对爆室的直坑道内之所以出现这样破坏程度逐渐减小之后又增大的现象，是因为应力波在拐角坑道壁面处反射，反射使应力波增强，从而使近拐弯处坑道内的堵塞物的破坏程度也增强了。所以拐弯轴线处的破坏程度较大，此处的塑性应变值也较大。读取计算中某一时刻的有效塑性应变等值线云图如图 13 所示，等值线云图明显显示拐弯处堵塞物的塑性应变值大于坑道内前后位置处堵塞物的塑性应变。按混凝土状态方程中弹性区、过渡区和致密区的划分，得到坑道内堵塞物的破坏分区为：压实致密范围为从空腔壁到距爆心 2.24 m 范围，约 1.24 m 厚；从压实致密区向外到拐弯后距轴线 4.3 m 处，即距堵塞段末端 10.7 m 的范围为堵塞段破裂破碎区；从堵塞段外端面到距离堵塞段 10.7 m 范围为堵塞段的弹性区。计算得到的弹性应变分区如图 14 所示。从图 13, 14 的塑性应变云图可以看到，正对爆室的坑道内的堵塞物都发生了塑性变形，受到破坏，拐弯处的近角和远角处都是高应力区，此处的围岩也比距爆心相同距离处的围岩破坏更为严重。这与实际开挖看到的现象相同。开挖结果表明(如图 15 所示)，距堵塞物末端

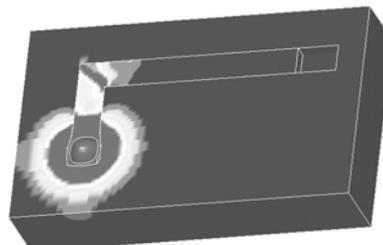


图 13 有效塑性应变等值线云图

Fig.13 Equivalence nephogram of effective strain

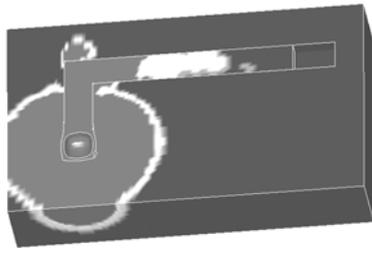


图 14 计算得到的堵塞物和围岩的弹塑性分区

Fig.14 Computational result of failure region for stemming and surrounding rock

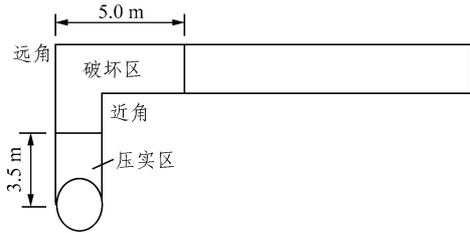


图 15 现场开挖得到的堵塞段力学破坏分区示意图

Fig.15 Schematic diagram for the in-situ excavation results of failure region of stemming

0~10.7 m 范围内, 堵塞物没有受到破坏。计算结果与试验结果符合较好。

3.4 围岩和坑道中的应力波走时

读取应力波沿坑道内堵塞物轴线位置、坑道外围岩和岩石自由场中的走时, 分别对应于图 16 中的 A, B, C 曲线。

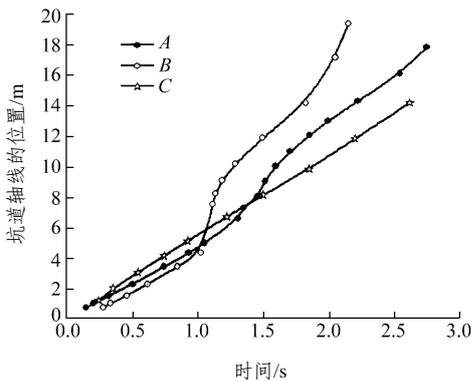


图 16 坑道内应力波的走时和围岩中应力波走时相互比较

Fig.16 Comparison of the reach time of stress waves in tunnel and in wall rock

由上图中堵塞物内应力波的走时和自由场中应力波的走时曲线加以比较, 可以看出爆炸冲击波在围岩中的传播速度比在坑道中快; 由堵塞物内应力波走时曲线和坑道壁围岩内应力波走时曲线的比较, 可看出在正对爆室的坑道(垂直坑道)堵塞物内

和坑道外围的岩石中传播速度相差不大。但是坑道拐弯之后, 坑道壁内应力波的到时明显早于拐弯坑道(水平坑道)内相同位置处堵塞物内应力波的到时, 所以水平坑道内的堵塞物最先受到来自坑道壁传来的冲击波的作用, 之后才受到来自坑道内前端堵塞物传来的冲击波的作用。而堵塞物内的冲击波由于在坑道拐弯处受到坑道壁的反射, 再向水平坑道内的堵塞物传播时, 其强度已明显降低, 所以水平坑道和水平坑道内堵塞物受到的破坏主要是来自围岩中冲击波的破坏, 受前端堵塞物冲击产生的破坏只是其次。沿坑道轴线距爆心等距离处, 水平坑道的破坏程度要大于垂直坑道的破坏程度, 在拐弯处坑道和坑道内的堵塞物受的破坏作用比前后位置都要大, 此处的坑道会被压实压碎, 当爆炸当量一定时, 首先会在此处发生自封。所以采用带拐弯的坑道, 其堵塞封闭效果比单纯采用直坑道的堵塞封闭效果要好。

4 结 论

本文首先介绍了计算中所涉及的几种材料的材料模型, 并给出经过数值试验验证的材料参数。之后对花岗岩介质中 1 t TNT 当量带拐弯堵塞结构的化爆试验进行了数值模拟。计算并分析了围岩和坑道内堵塞物的力学破坏情况, 给出了力学破坏分区; 分析比较了围岩和坑道中的应力波走时; 给出了自由场的力学参数。计算结果与实测结果和开挖结果符合较好。上述工作, 可以为填实化爆、直坑道和类似带拐弯坑道堵塞化爆试验的开展提供理论依据和类似试验的数值模拟提供借鉴和参考。

参考文献(References):

[1] 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))

[2] 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. Introduction to Underground Nuclear Explosion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.(in Chinese))

[3] 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 of LS-DYNA Dynamics Analysis[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003.(in Chinese))

[4] John O H. LS-DYNA^{3D} Theoretical Manual Rev.2[M]. Livermore:

- Livermore Software Technology Corporation, LSTC, 1993.
- [5] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual Version 960[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, LSTC, 2001.
- [6] 王可慧. 长杆弹侵彻混凝土靶的数值模拟与理论研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西北核技术研究所, 2002.(Wang Kehui. Numerical simulation and theoretical studies of long rod projectile penetration concrete targets[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2002.(in Chinese))
- [7] 宋顺成, 才鸿年, 段祝平. 模拟导弹战斗部侵彻混凝土的数值计算[A]. 见: 第二届全国爆炸力学学术会议[C]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.(Song Shuncheng, Cai Hongnian, Duan Zhuping. Numerical simulation of missile projectile penetration concrete[A]. In: Proc. the Second National Blasting Mechanics Conference[C]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [8] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999.(Yang Jun, Jin Qiankun, Huang Fenglei. Theoretical Constitutive Model and Numerical Calculation for Rock Blasting[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese))