

文章编号: 1001-1455(2006)06-0562-06

# 含泡沫吸能层防护结构爆炸能量分布的数值模拟研究<sup>\*</sup>

王代华<sup>1</sup>, 刘殿书<sup>2</sup>, 杜玉兰<sup>2</sup>, 柳慧鹏<sup>2</sup>

(1. 广东宏大爆破工程有限公司, 广东 广州 510055;

2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对复合结构各层中的爆破能量的分布进行了系统的数值模拟研究; 由计算得到的复合防护结构中能量的分布规律显示, 泡沫混凝土的反射、吸能作用非常明显, 改变了防护结构内的能量分布状态, 各层的能量分布发生了很大的改变, 能量的分布向上转移, 其最下层能量仅为无吸能层结构的 14%。

**关键词:** 爆炸力学; 能量分布; 数值模拟; 泡沫混凝土; 吸能层

**中图分类号:** O383

**国标学科代码:** 130 · 3599

**文献标志码:** A

## 1 引言

尽管已普遍认识到掌握岩石爆破中爆炸能量分布规律的重要性, 但由于问题的复杂性, 其研究进展缓慢。因为至少有 20 种影响岩石破碎的因素, 可分成炸药参数、装药参数和岩石参数三大类。爆炸能量分布的复杂性及研究的困难具体表现在<sup>[1]</sup>: (1) 岩石爆破能量的划分以及具体的实验技术(如破碎能、表面形成能、抛掷能等的测定)目前尚未完全解决, 无法测得爆破过程中形成新表面以及爆破对深部岩石产生损伤的能量消耗; (2) 能量分布涉及爆破作用、岩石破碎以及抛掷的全过程; (3) 施爆对象(介质的非均质性、各向异性、结构和结构的差异等)的复杂性, 使爆炸能量的分布方向难以控制。在爆炸能量分布理论研究中, 深入系统的研究成果不多, 常见的文献资料以定性研究为主。

在破岩和防护等工程领域, 更需要了解不同形式的瞬态应力波通过夹层时的透射效应和能量传递效果, 因而在这方面已作了大量的研究<sup>[2~5]</sup>。这些研究工作主要集中在节理与分层结构中的应力波传播衰减情况, 以及节理、分层对爆破效果的影响等。分层结构中爆破爆炸作用的大小、破坏程度的强弱, 取决于爆破能量的分配。要彻底弄清楚复合结构的抗爆机理, 必须对爆炸能量的分配规律进行定性和定量的计算<sup>[6]</sup>。本文中通过设计有限元模型、进行计算, 对含泡沫混凝土防护结构爆炸载荷下能量分布规律进行研究。

## 2 模型及参数

### 2.1 模型

为研究含泡沫混凝土防护结构的抗爆性能, 在实验室中进行了大量的平板结构接触爆炸, 模拟模型尺寸: 直径为 500 mm, 总厚度  $b=100$  mm, 采用的 TNT 炸药为 43 g, 炸药距结构表面距离设计为 8 cm, 复合结构中泡沫混凝土吸能层为 20 mm, 混凝土强度为 30 MPa。采用 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟计算。计算中采用多物质流固耦合方法, 即炸药、砂、空气采用多物质 Euler 描述法, 钢筋混凝土采用 Lagrange 描述法, 数值模拟采用的单位制为厘米, 克与微秒制。构件有限元模型见图 1。

\* 收稿日期: 2005-09-21; 修回日期: 2005-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272109)

作者简介: 王代华(1972—), 男, 博士。

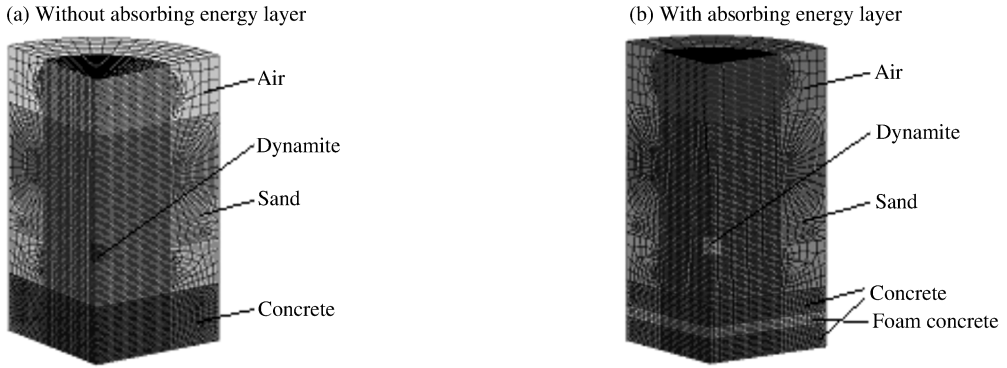


图 1 平板构件有限元模型  
Fig.1 Finite element model

2.2 模型基本方程

混凝土选取 JOHNSON\_H OLMQUIST\_CONCRETE 材料模型<sup>[7]</sup>,该模型是一个适合大应变、高应变率与高压条件下的混凝土本构模型,它适合 Lagrange 和 Eulerian 算法。模型中将归一化有效应力表示成归一化压力、归一化应变率和损伤的函数,其中将归一化压力表示为体积应变的函数(状态方程),将累积损伤表示为塑性体积应变、等效塑性应变和压力的函数。该模型与 D. A. Matuska<sup>[7]</sup>所建立的模型相似,但可拓展到包括材料损伤、应变率效应以及因压力和空隙而引起的永久性破坏等。

图 2 为归一化强度随归一化压力的变化<sup>8</sup>,归一化等效应力定义为

$$\sigma^* = \sigma / f'_c \tag{1}$$

式中: $\sigma$  为等效真应力; $f'_c$  为准静态单轴抗压强度。

归一化等效应力可表示为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \tag{2}$$

式中: $D$  为损伤参数,且  $0 \leq D \leq 1$ ;  $p^* = p / f'_c$  为归一化压强(其中  $p$  为实际压力); $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  为量纲一应变率( $\dot{\epsilon}$  为实际应变率, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$  为参考应变率);归一化最大抗拉静水压力  $T^* = T / f'_c$ ,其中  $T$  为最大抗拉静水压力。 $A, B, N, S_{\max}$  为材料常数,其中  $A$  为归一化粘结强度, $B$  为归一化压力硬化因数, $N$  为压力硬化指数, $C$  为应变率因数, $S_{\max}$  为材料所能达到的归一化最大强度。

泡沫混凝土选用 Crushable-Foam<sup>[9]</sup> 材料模型,屈服应力与体积应变关系如图 3 所示,图中显示了从 1 点卸载到拉应力中止值 2 点,然后卸载到 3 点,最后重新加载到 4 点的过程,并且重新加载继续沿原来的加载曲线上升。

假定弹性模量为常数,且修正的应力假定为弹性特性,则试应力

$$\sigma_{ij}^{\text{trial}} = \sigma_{ij}^n + E \dot{\epsilon}_{ij}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \tag{3}$$

式中: $E$  为杨氏模量。

检查试应力主值  $\sigma_i^{\text{trial}} (i = 1, 3)$  是否超过屈服应力  $\sigma_y$ ,如果超过,则其值按比例回到屈服面

$$\sigma_i^{n+1/2} = \sigma_y \frac{\sigma_i^{\text{trial}}}{|\sigma_i^{\text{trial}}|} \quad \sigma_y < |\sigma_i^{\text{trial}}| \tag{4}$$

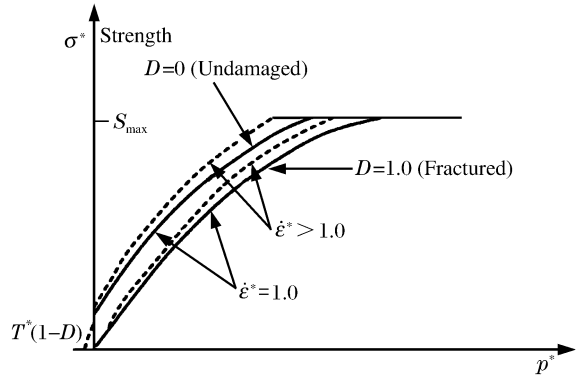


图 2 归一化压力与归一化强度关系  
Fig.2 Normalized pressure-strength relationship

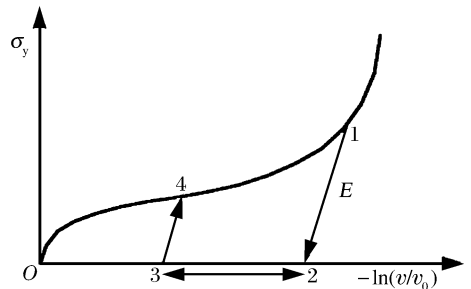


图 3 屈服应力与体积应变曲线  
Fig.3 Relation between yielding stress and volume strain

对砂,选取 SOIL\_AND\_FOAM\_FAILURE<sup>[10]</sup> 材料模型,该模型在某些方面具有流体性质,其应用于土或泡沫被限制在结构中或有几何边界存在的情况下。压力是正压缩,在负压缩情况下,体积应变是相对体积的自然对数,相对体积是计算开始时当前体积与初始体积之比。其压力与体积应变如图 4 所示<sup>[10]</sup>。其塑性屈服极限函数  $\phi$  根据应力偏量第二不变量  $J_2$  描述

$$\phi = J_2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \quad (5)$$

式中:  $J_2 = S_{ij}S_{ij}/2$ ;  $p$  为压力;  $a_0, a_1, a_2$  为常数。

### 2.3 模型本构方程参数选取

炸药为 TNT,采用 JWL 状态方程,具体参数<sup>[11]</sup>:密度  $\rho = 1.50 \text{ g/cm}^3$ ;爆速  $c_D = 6930 \text{ m/s}$ ;爆压  $p_{C-J} = 21 \text{ GPa}$ ;材料常数  $A = 373.8 \text{ GPa}, B = 3.747 \text{ GPa}, R_1 = 4.15, R_2 = 0.9, \omega = 0.35$ ;爆轰产物单位体积的内能  $e = 6.0 \text{ GPa}$ 。

钢筋混凝土材料的等效参数<sup>[12]</sup>:密度  $\rho = 2.474 \text{ g/cm}^3$ ,最大抗拉强度  $T = 8.4 \text{ MPa}$ ,压实体应变  $\epsilon_b = 0.1$ ,剪切模量  $G = 14.1 \text{ GPa}$ ,参考应变率  $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ;损伤参数  $D_1 = 0.04, D_2 = 1.0$ ;粘性强度参数  $A = 0.79$ ,材料破坏的最小塑性应变  $\epsilon_{\min}^p = 0.01$ ,压力硬化参数  $B = 1.60$ ,有效归一化应力最大值  $\sigma_{\max}^* = 7.0$ ;材料常数  $K_1 = 85 \text{ GPa}, K_2 = -171 \text{ GPa}, K_3 = 208 \text{ GPa}$ ;应变率效应参数  $C = 0.007$ ,压碎体压强  $p_c = 8 \text{ MPa}$ ,压力硬化指数  $N = 0.61$ ,压碎体应变  $\epsilon_c = 0.5$ ,静载荷强度  $f_c = 30 \text{ MPa}$ ,压实体压强  $p_b = 0.8 \text{ GPa}$ 。

泡沫混凝土材料的具体参数<sup>[9]</sup>:密度  $\rho = 0.788 \text{ g/cm}^3$ ,泊松比  $\mu = 0.1$ ,杨氏模量  $E = 342.2 \text{ MPa}$ ,抗拉强度  $T_s = 0.2 \text{ MPa}$ ,阻尼系数  $d = 0.1$ 。

砂材料参数<sup>[13]</sup>:密度  $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$ ;剪切模量  $G = 6.385 \times 10^{-4} \text{ GPa}$ ;弹性体积参数  $B = 0.3$ ;屈服方程常数  $a_0 = 3.4 \times 10^{-13} \text{ GPa}^2, a_1 = 7.033 \times 10^{-7} \text{ GPa}, a_2 = 0.30$ ;拉破坏截止压力  $p_c = -6.90 \times 10^{-8} \text{ GPa}$ ;单元压碎选择项  $C_{VCR} = 0.0$ ;有效塑性应变  $\epsilon_{e_2}^p = -0.104, \epsilon_{e_3}^p = -0.161, \epsilon_{e_4}^p = -0.192, \epsilon_{e_5}^p = -0.224, \epsilon_{e_6}^p = -0.246, \epsilon_{e_7}^p = -0.271, \epsilon_{e_8}^p = -0.283, \epsilon_{e_9}^p = -0.29, \epsilon_{e_{10}}^p = -0.4$ ;塑性应变对应的压力  $p_2 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ GPa}, p_3 = 4.0 \times 10^{-4} \text{ GPa}, p_4 = 6.0 \times 10^{-3} \text{ GPa}, p_5 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ GPa}, p_6 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ GPa}, p_7 = 4.0 \times 10^{-3} \text{ GPa}, p_8 = 6.0 \times 10^{-3} \text{ GPa}, p_9 = 8.0 \times 10^{-3} \text{ GPa}, p_{10} = 4.1 \times 10^{-2} \text{ GPa}$ 。

### 3 数值模拟结果分析

为分析方便,如图 5 所示,将三层复合结构模型的每层分别命名为 F1、F2 和 F3,同理,将无吸能层结构也人为地分为厚度与复合结构各层相同的三部分,即 W1、W2 和 W3, F 表示复合结构, W 表示无吸能层结构。

图 6 为两种结构的能量变化图,图中 I 表示内能, K 表示动能, T 表示总能量(以下同);由图中可以看出,含吸能层结构的总能量和总内能比无吸能层结构低,这可能是由于应力波在含吸能中传播过程中遇到泡沫混凝土界面后,一部分反射能量透射回结构上层砂介质的缘故,因为计算的含吸能层结构上层介质的总能量比无吸能层结构上层介质的能量大。

由于结构中加入了泡沫混凝土层,使含吸能层结构刚度有所降低,总能量转化为动能增加,所以含吸能层结构的总动能比无吸能层结构高。

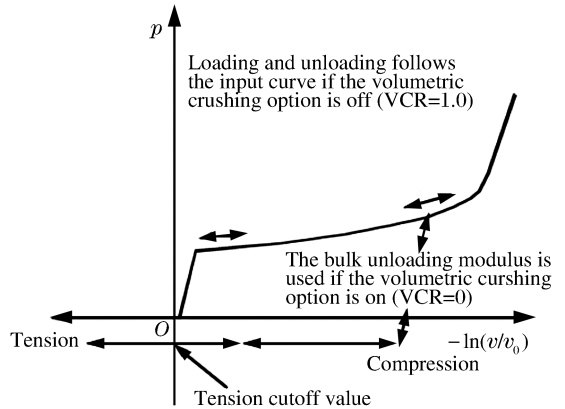


图 4 压力与体积应变曲线图

Fig. 4 Relation between pressure and volume strain



图 5 结构模型示意图

Fig. 5 The sketch model of structure

图 7 为两种结构层 1 的能量对比图,在层 1 中,无吸能层结构的总能量、内能均比含吸能层结构大,其中总能量  $e_{TW1}/e_{TF1}=1.085$ ,内能  $e_{IW1}/e_{IF1}=1.102$ ,动能  $e_{KW1}/e_{KF1}=0.535$ ,说明加入泡沫混凝土层后结构上层的总能量和内能略有减少,虽然无吸能层结构层 1 的动能小于含吸能层结构层 1 的动能,但由于动能在总能量中所占的比例较小且作用时间也较短,因此并不改变总能量的分布。

图 8 为两种结构层 2 的能量对比图,在层 2 中,无吸能层结构的总能量、内能及动能均比含吸能层结构大,其中总能量峰值  $e_{TW2}/e_{TF2}=1.052$ ,内能峰值  $e_{IW2}/e_{IF2}=1.019$ ,动能峰值  $e_{KW2}/e_{KF2}=3.00$ ,复合结构中加入泡沫混凝土后,与无吸能层结构相比,动能大大减少,说明泡沫混凝土层起到了吸收能量以及减小震动的作用。

图 9 为两种结构层 3 的能量对比图,在层 3 中,无吸能层结构的总能量、内能及动能均比含吸能层结构大,其中总能量  $e_{TW3}/e_{TF3}=7.19$ ,内能  $e_{IW3}/e_{IF3}=10.17$ ,动能  $e_{KW3}/e_{KF3}=1.97$ 。表明能量经过泡沫混凝土层传入第三层后,能量水平大大降低,泡沫混凝土的吸能作用非常明显,其第三层总能量仅为无吸能层结构第三层总能量的 14%。

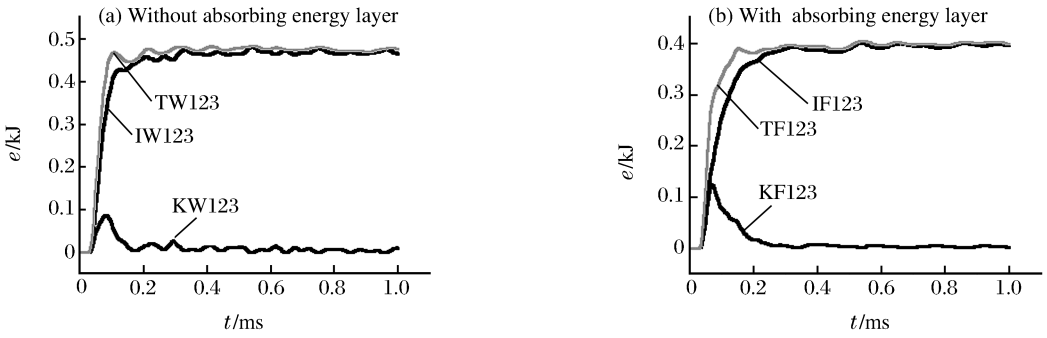


图 6 两种结构的能量变化图

Fig. 6 The energy changing for the two structures

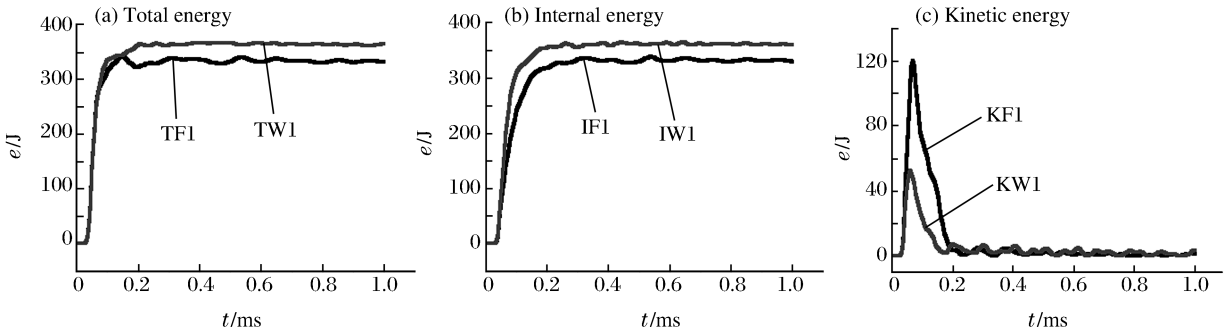


图 7 两种结构层 1 的能量对比图

Fig. 7 The energy changing contrast in layer 1 for the two structures

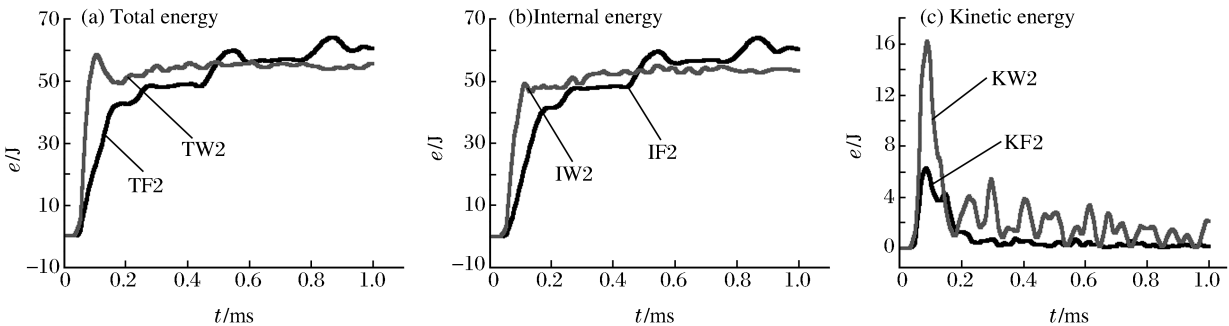


图 8 两种结构层 2 的能量对比图

Fig. 8 The energy changing contrast in layer 2 for the two structures

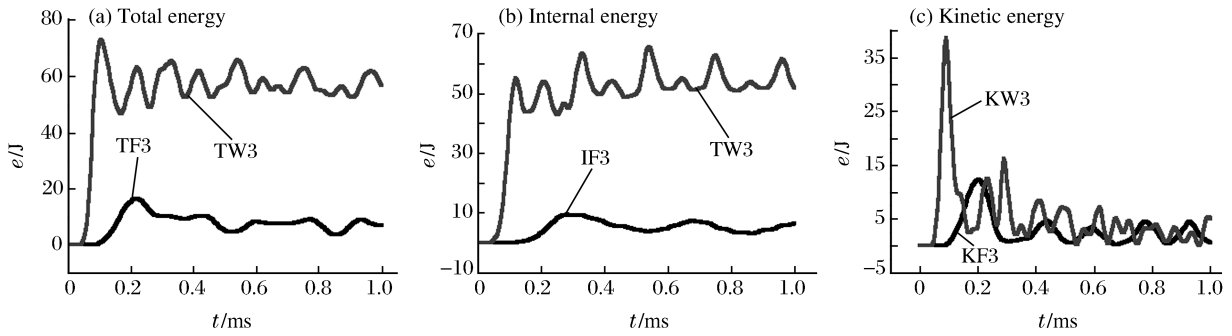


图9 两种结构层3的能量对比图

Fig. 9 The energy changing contrast in layer 3 for the two structures

通过对以上一系列图的分析,可以得出,对于无吸能层结构,各层总能量占结构总能量的比例为,层1:76.5%,层2:11.5%,层3:12%;对于含吸能层结构,各层总能量占结构总能量的比例为,层1:84.9%,层2:13.1%,层3:2%。以上分析表明,结构加入泡沫混凝土层后改变了防护结构各层的能量分布状态,使各层的总能量分布发生了很大的改变,能量的分布向上转移,结构的总能量有所降低,泡沫混凝土层的反射效应非常明显,第一层和第二层总能量占结构总能量的比重增加,第一层增加的比重最大,泡沫层的总能量有所增加,因此作用于最下层的能量远小于无吸能层结构。

## 4 结论

通过数值模拟,对应力波在无吸能层结构和含吸能层结构中的能量分布进行了研究,结果表明:

(1)结构加入泡沫混凝土层后改变了防护结构各层的能量分布状态,使各层的总能量分布发生了很大的改变,能量的分布向上转移,泡沫混凝土层的反射效应非常明显,第一层和第二层总能量占结构总能量的比重增加,第一层增加的比重最大,泡沫层的总能量有所增加,因此作用于最下层的能量远小于无吸能层结构。

(2)在计算条件下,无吸能层结构,各层总能量占结构总能量的比例为,层1:76.5%,层2:11.5%,层3:12%;含吸能层结构,各层总能量占结构总能量的比例为,层1:84.9%,层2:13.1%,层3:2%。

(3)能量经过泡沫混凝土层传入第三层后,能量水平大大降低,泡沫混凝土的吸能作用非常明显,其第三层总能量仅为无吸能层结构第三层总能量的14%。

## 参考文献:

- [1] 田建胜,程玉生. 岩石爆破中爆炸能量分布理论与控制方法研究进展[J]. 工程爆破,1998,1:64-68.  
TIAN Jian-sheng, CHENG Yu-sheng. Study progress on explosion energy distribution and controlling methods of rock blasting[J]. Engineering Blasting, 1998,1:64-68.
- [2] 张奇. 应力波在节理处的传播过程[J]. 岩土工程学报,1986,8(6):99-105.  
ZHANG Qi. The process of the stress wave passing through joint[J]. Rock and Soil Engineering, 1986,8(6):99-105.
- [3] 李夕兵,陈寿如. 应力波在层状矿岩结构中传播的新算法[J]. 中南矿冶学院学报,1994,24(6):738-742.  
LI Xi-bing, CHEN Shou-ru. New algorithm of stress wave spreading in layer rock structure[J]. Midsouth Mining and Metallurgy Insitute, 1994,24(6):738-742.
- [4] 李夕兵,古德生,赖海辉. 爆炸应力波遇夹层后的能量传递效果[J]. 有色金属,1993,45(4):1-6.  
LI Xi-bing, GU De-sheng, LAI Hai-hui. Energy transmission effects of transient stress waves through sandwiches in rock mass[J]. Nonferrous Metal, 1993,45(4):1-6.
- [5] 郭文章. 节理岩体爆破过程数值模型及其实验研究[D]. 北京:中国矿业大学北京研究生部,1997.
- [6] 杨军,熊代余. 岩石爆破机理[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:6-43.
- [7] Matuska D A, Durrett R E, Osborn J J. Hull Users Guide for Three-dimensional Linking with EPIC 3[M]. Orlan-

do: Orlando Technology Inc, 1982.

- [8] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[A]. The 7th International Symposium on Ballistics[C]. Netherlands: The Hague, 1983:541—547.
- [9] 田志敏, 钱七虎, 吴步旭. 大压力爆炸动载作用下地下复合圆形结构研究[J]. 特种结构, 1997, 14: 40—43.  
TIAN Zhi-min, QIAN Qi-hu, WU Bu-xu. Study of underground circle shape structure under high pressure and blasting dynamic load[J]. Special Structure, 1997, 14: 40—43.
- [10] Krieg R D. A simple constitutive description of cellular concrete[R]. SC-DR-72-0883, 1972.
- [11] Lee E, Fringer M, Collins W. JWL equation of state coefficient for high explosiv[R]. Lawrence Livermore Laboratory report, UCID-16189, 1973.
- [12] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[A]. The 14th International Symposium on Ballistics[C]. Quebec, Canada, 1993:591—600.
- [13] Krieg R D, Key S W. Implementation of a time dependent plasticity theory into structural computer programs [A]. Vol 20 of Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects[M]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1976:125—137.

## Numerical simulation of anti-blasting mechanism and energy distribution of composite protective structure with foam concrete

WANG Dai-hua<sup>1</sup>, LIU Dian-shu<sup>2\*</sup>, DU Yu-lan<sup>2</sup>, LIU Hui-peng<sup>2</sup>

(1. *Guangdong Hamdar Blasting Engineering Company Limited, Guangzhou 510055, Guangdong, China;*

2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The anti-blasting and absorbing energy mechanisms of composite protective structure under blasting loads were numerically simulated by applying ANSYS/LS-DYNA. The energy distribution regulation shows that the foam concrete has greater effects of the reflection and absorbing energy, and changes the energy distribution in the protective structure. The more energy is absorbed by top layers, the energy in the bottom layer is only 14% of that in the structure without absorbing energy layer.

**Key words:** mechanics of explosion; energy distribution; numerical simulation; foam concrete; absorbing energy layer

---

\* Corresponding author: LIU Dian-shu  
E-mail address: lds@cumt.edu.cn  
Telephone: 010-62331013