

文章编号: 1001-1455(2006)05-0462-06

水中爆炸激波对水泥试样作用的数值模拟分析*

林英松^{1,2}, 朱天玉², 蒋金宝², 阮新芳², 李德聪¹, 丁雁生¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 通过对水中爆炸激波在水泥净浆试样中传播的数值模拟, 再现了爆炸激波的传播过程, 采用对典型单元受到的激波作用和应力进行分析的方法, 得出了水泥试样各个区域损伤破坏的成因, 数值模拟结果和实验现象吻合。

关键词: 爆炸力学; 损伤; 数值模拟; 激波; 水泥试样; 拉伸破坏

中图分类号: O382

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

“层内爆炸”^[1]采油是一项新的低渗透油田改造技术, 对低渗透油田的开发具有重要意义。研究“层内爆炸”涉及岩石在爆炸条件下的损伤破坏、爆轰波的传播以及爆生气体的作用等问题, 其现象和机理十分复杂, 现有的理论尚不能得到满意的答案, 需要借助于实验研究和数值模拟。数值模拟可以对实验中不能观测到的激波传播过程进行分析, 有利于解释水泥试样的损伤破坏规律。近年来, 人们对岩石和混凝土在爆炸条件下的本构关系进行了大量的研究, 一些弹塑性模型和损伤模型基本能够反映材料的动态冲击特性。

在本文中, 采用动力分析软件 LS-DYNA 模拟了激波在水泥净浆试样中的传播^[2], 分析了水泥试样受到的激波作用, 对照实验现象解释了各个损伤破坏区域的成因, 模拟结果和实验现象吻合。实验在水中进行是为了消除空气拉伸波对试样的破坏, 经过小尺度和大尺度试样在爆炸激波作用下的实验得出, 大尺度试样更容易观察损伤破坏区域, 因此将原有试样尺寸由直径 15 cm、高 10 cm 的圆柱水泥扩大至直径 30 cm、高 30 cm, 并采用预制剖面的方法, 以达到观察试样内部损伤的目的, 经过实验验证预制剖面对裂纹的分布影响不大。由于岩石材料是各向异性的, 进行基本规律的研究, 则不能得到理想的结果, 因此实验中用水泥净浆材料来代替岩石。

2 模型的建立

2.1 水泥净浆材料的本构模型

在爆炸冲击过程中涉及水泥材料的塑性流动、硬化软化、损伤断裂、应变率效应等多方面的力学现象, 与静态行为完全不同。尽管有很多混凝土材料本构模型, 但这些模型通常不适用于爆炸冲击过程的仿真计算。在实际中, 一般只能得到材料的基本参数, 如杨氏模量、泊松比、硬化模量、最大抗压抗拉强度等。如果模型中包含许多无法从简单实验中确定的材料参数, 模型就会失去实用价值。采用双线性弹塑性本构模型^[3], 是模拟岩石、混凝土经常采用的一种模型, 其本构方程为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中: σ_0 是初始屈服应力; ϵ_p^{eff} 是等效塑性应变; $E_p = E_{\text{tan}} E / (E - E_{\text{tan}})$ 是塑性硬化模量, E 是初始弹性模量, E_{tan} 是切线模量; 硬化参数 β 在 0 (随动强化) 和 1 (等向强化) 之间取值, 可以反映混合强化作用; $\dot{\epsilon}$ 是

* 收稿日期: 2005-04-01; 修回日期: 2005-07-21

作者简介: 林英松(1964—), 女, 博士研究生, 副教授。

应变率,不考虑应变效应时,中括号内的项为 1。该模型用 Cower-Symonds 模型反映应变率效应, C 、 P 为 Cower-Symonds 常数,令 $k = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right]$,当不考虑应变率效应时, $k=1$ 。

需要输入的参数通过水泥试样材料特性实验测得如下:密度 $\rho=2.4 \text{ kg/cm}^3$,弹性模量 $E=40 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.23$,初始屈服应力 $\sigma_0=39 \text{ MPa}$,切线模量 $E_{\text{tan}}=2 \text{ GPa}$,硬化参数 β 为 0.5。

2.2 炸药的 JWL 方程

实验采用的是塑性炸药,炸药的状态方程用 JWL 方程^[4]描述

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_r} \right) e^{-R_1 V_r} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_r} \right) e^{-R_2 V_r} + \frac{\omega E_0}{V_r} \quad (2)$$

式中: V_r 为相对体积(爆轰产物体积与初始体积之比 V/V_0);计算中 $A = 3.74 \times 10^9$; $B = 3.23 \times 10^7$; $R_1 = 4.15$; $R_2 = 0.95$; $\omega = 0.3$; E_0 为爆轰产物初始内能,取 7 GPa 。爆速为 $D = 6930 \text{ m/s}$;炸药密度 $\rho_e = 1.40 \text{ g/cm}^3$,CJ 点压力 $p_{\text{CJ}} = 21 \text{ GPa}$,一端起爆。

2.3 数值计算的几何模型及边界处理

先介绍一下实验。将直径为 30 cm ,高为 30 cm 的两个半圆柱拼接成的水泥净浆试样放入水池中。为了容易观察试样内部的破坏情况,将水泥块预制了一个剖面,通过观察拼接试样的侧面裂纹和顶面裂纹,发现裂纹吻合较好,说明预制剖面对裂缝的扩展影响不大,可以认为剖面上的裂纹特征近似代表试样内部裂纹特征,如图 1 和图 2。水池深约 45 cm ,上口口径约为 90 cm ,底径约为 45 cm ,为泥质。为取下试样方便,在水池底部放一个薄木块,高约 2 cm 。炸药为长条形,平行放置在水泥块顶部接缝处,接雷管导爆索。由于离水面很近,爆生气体的作用不大,在水中迅速卸载,故可以忽略爆生气体的影响。

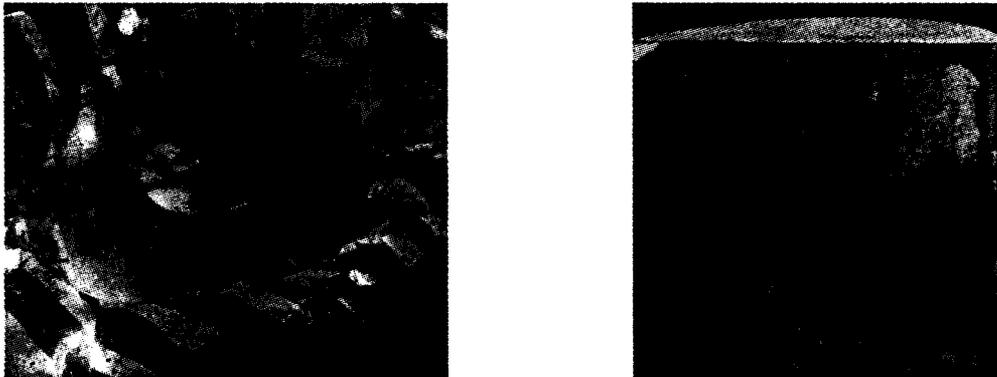
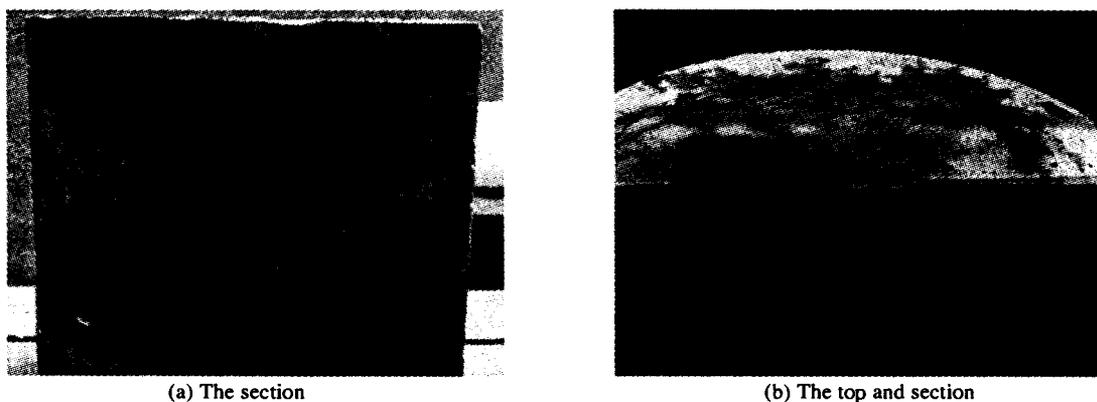


图 1 实验场景及水泥试样预制剖面照片

Fig. 1 The photos of the experiment scene and the prefab section of cement sample



(a) The section

(b) The top and section

图 2 爆后的试样照片

Fig. 2 Photos of the sample after blast

数值模拟采用二维模拟,具体几何参数如下:水泥块直径为 30 cm,高度为 30 cm,梯形水域,上底面 90 cm,下底面 45 cm,水泥块距水底 2 cm,距水面 10 cm,炸药换算成当量尺寸为 0.5 cm×2 cm。水池壁为密度 1.8 g/cm² 的泥质材料,厚度简化成 2 cm,这样考虑了反射稀疏波的作用。边界条件处理:水面为自由面,炸药和水泥块接触界面是滑动接触边界,水泥块和水的交界面是反射边界,水和水池壁交界面是反射边界。

3 激波传播过程及水泥块破坏区域分析

水中爆炸激波作用后的净浆试样剖面照片见图 2。

实验结果可以将试样分为 4 个区:压实破坏区、压实损伤区、拉伸破坏区和拉伸损伤区。压实破坏区中与炸药接触的水泥表面处出现几条裂缝;在压实损伤区中每一块试样的上表面都有一个压实坑,里面有大量的径向裂纹分布,在预制的剖面上可以观察到明显的剪切压实带,经过分析,它们是在激波的作用下,水泥试样发生剪切破坏造成的;在拉伸损伤区中试样上表面有近似同心环形裂纹,在环形裂纹内侧和外侧均有大量裂纹分布,在预制剖面上,可以看到大致呈 U 型,并且几个试样都在剖面中部出现了一条贯通的裂纹;在 U 型裂纹外侧以及上下角处出现小块的剥落,为拉伸破坏区。图 3 为试样破坏区域示意图。

通过模拟可得到激波传播过程的大量信息和实验无法观察到的激波在水泥试样及水中的传播和反射过程,如图 4。

炸药起爆后,压缩波会向水泥块和水泥块上部水域同时向外传播,将会在各个自由表面反射成拉伸波,这些拉伸波相遇后,就会对水泥块造成不同程度的损伤和破坏。如图 3 所示水泥块顶面 S—T 的环向破裂和 U 型裂纹是从侧表面反射成的拉伸波而产生的;K—H 裂纹是由入射到自由表面的压缩波经反射形成的拉伸波,与入射压缩波的后续部分相互作用,造成在邻近水泥块边缘的拉应力,这个拉应力满足某种动态的断裂准则,则将在该处引起水泥块的断裂;水泥块的上下角部破坏 LMNO 是由水泥块上下底面和侧面反射的拉伸波相遇后相互作用,在水泥块上下底角处形成一个锥形破裂面,而形成角裂。

3.1 U 型裂纹和 S—T 环向裂纹分析

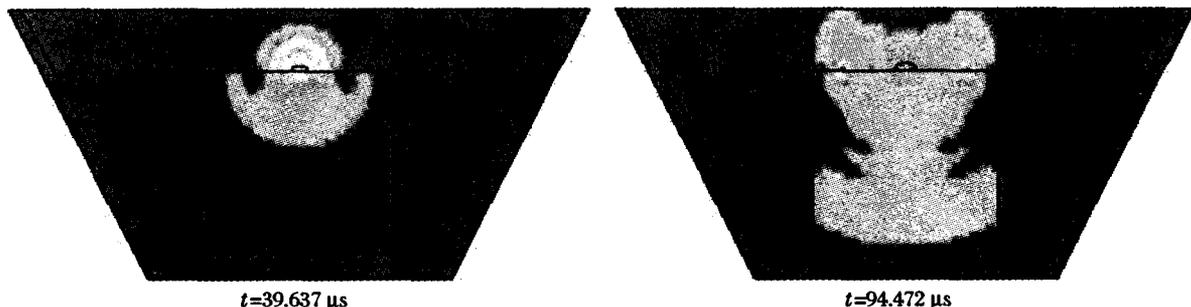


图 4 不同时刻激波压力传播图

Fig. 4 Propagation of blast wave in different time

当爆炸压缩波传到水泥块的侧表面时,就会反射成拉伸波,对水泥块边缘地带的拉伸应力最大,高于动态抗拉强度,在该处引起材料破坏,裂口足够大时,整块的裂片便会携带着其中的动量而飞离。这种由压应力波在自由表面反射造成的动态断裂称为剥落或层裂。靠近边缘内部的拉应力会小于边缘地区的拉应力,不至于产生层裂,但会产生大量的损伤裂纹。实验中在水泥块剖面的边缘内侧看到的 U

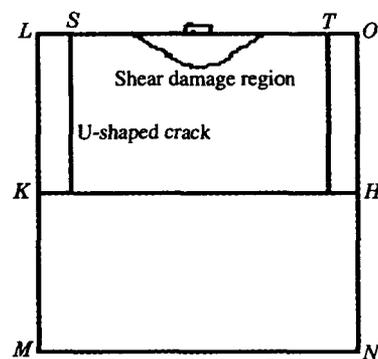


图 3 水泥试样破坏区域示意图

Fig. 3 The damage area of cement sample

型裂纹,就是这样形成。在水泥块顶面看到的 S—T 环向裂纹是这些损伤破坏在顶面的一种反映,数值模拟取水泥块中的单元从左到右依次是 S2774、S2781、A3051、S2774 单元拉应力最大,最容易破坏,和实验结果吻合。(图 5 中负为压,正为拉,下同)。

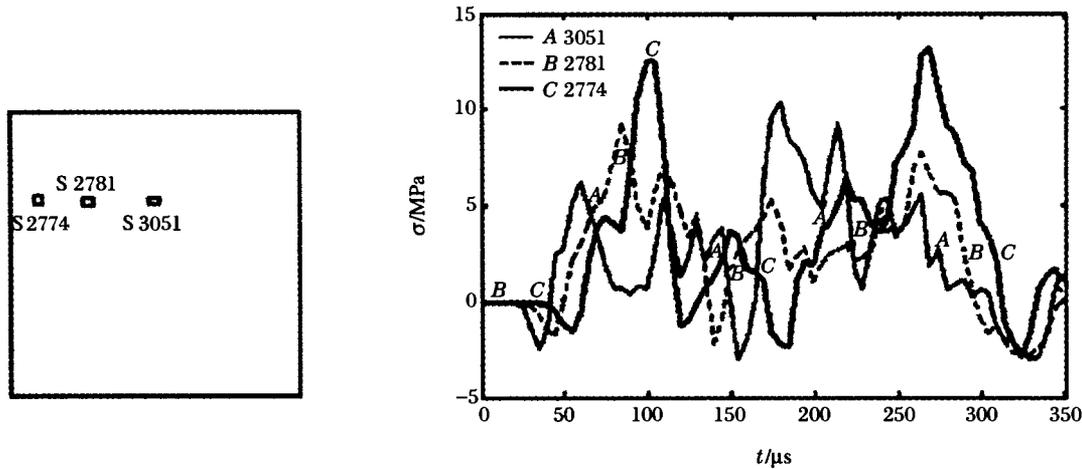


图 5 U 型裂纹分析——水泥试样单元最大主应力图

Fig. 5 Analysis of U-shaped crack—maximum primary stress of concrete sample element

3.2 中间裂纹 K—H 的分析

入射到试样与水体界面和水体自由面的压缩波经反射形成拉伸波,反射回来的拉伸波与入射压缩波的后续部分相互作用,其结果有可能在试样的某个区域造成拉应力,如果所形成的拉应力满足某种动态的断裂准则,就会产生很强的作用效果,在实验中看到的贯穿水泥块中部的 K—H 裂纹就这样形成。

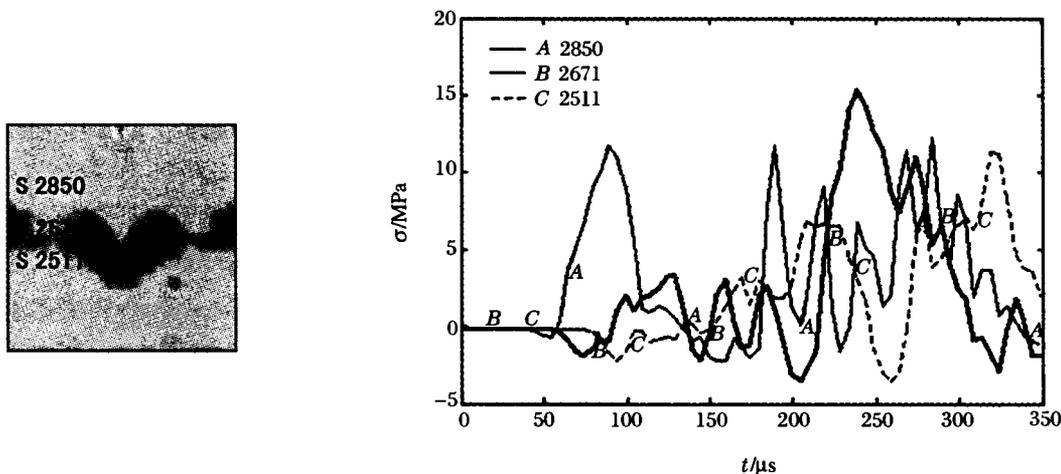


图 6 水泥试样中的拉伸带及其单元最大主应力图

Fig. 6 The tensile zone and maximum primary stress of the tensile zone

在模拟激波在水泥块中传播的过程中,可以看到一条连续而且明显的拉伸带,见图 6 的灰色带,为 $t=239.52 \mu\text{s}$ 时刻形成了一条带内的单元都处于拉伸波的作用的状态。取水泥块中的单元进行分析,在拉伸带中的单元 S2671 最大拉应力要高于其它单元的最大拉应力,说明在这一点侧面的反射拉应力与底面反射的拉应力叠加最大,并超过水泥试样的抗拉强度,判断裂纹水泥试样是由两端起裂并水平扩展,裂尖将顺着这一时刻的拉伸带延伸,形成贯穿的裂纹。

3.3 角点破坏分析

当激波传播到侧面,反射回来的拉伸波和上下底面反射的拉伸波相遇,就会大大增强拉伸波,在顶部和底部周角处形成很大的拉应力,形成一个角形破裂面,将上下底角处的水泥块拉断。在实验现象中

看到了水泥块上下底角的碎块。数值模拟中,取水泥块单元进行分析,在最大主应力图中上下角点单元的拉应力远高于其它单元的拉应力,是最容易破坏区,见图 7。

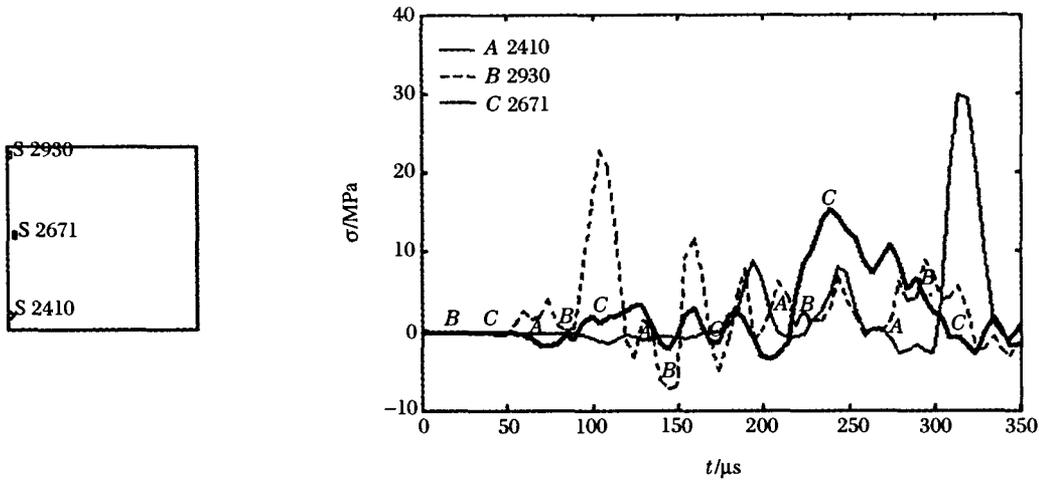


图 7 水泥试样角点单元最大主应力图

Fig. 7 Maximum primary stress of the corner point of cement sample

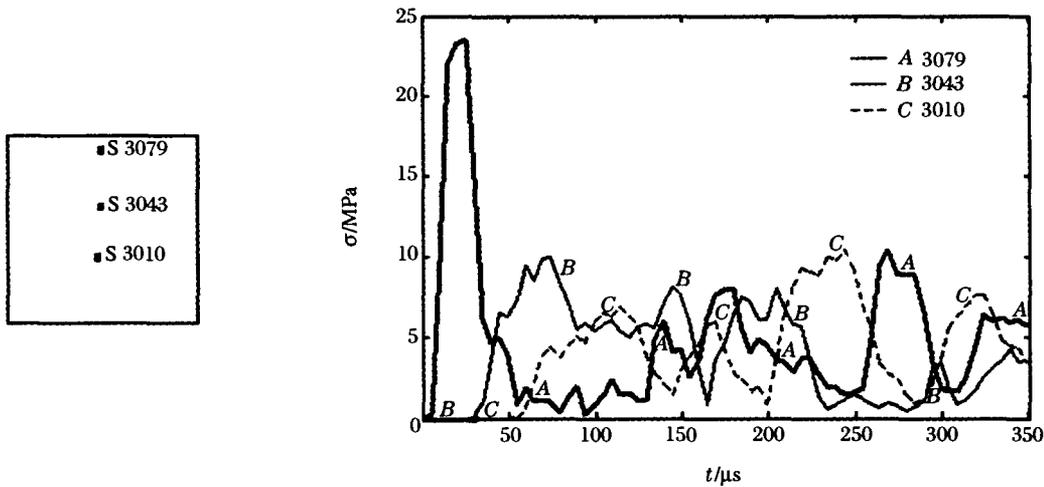


图 8 水泥块单元最大剪应力图

Fig. 8 Maximum shear stress of element

3.4 顶部剪切带分析

在最大剪应力图 8 中,激波对于水泥块顶部邻近炸药区域的剪切作用最大,顶部受到的压应力大大高于其屈服应力,使这部分区域的水泥块发生错动,造成剪切破坏。从数值模拟剪切应力传播图 9((a) $t=39.639 \mu\text{s}$, (b) $t=64.991 \mu\text{s}$ 中估算水泥块中最大剪切应力作用宽度范围约为 14~18 cm,深度范围约为 5~8 cm,和实验中观测到的剪切破坏范围一致。

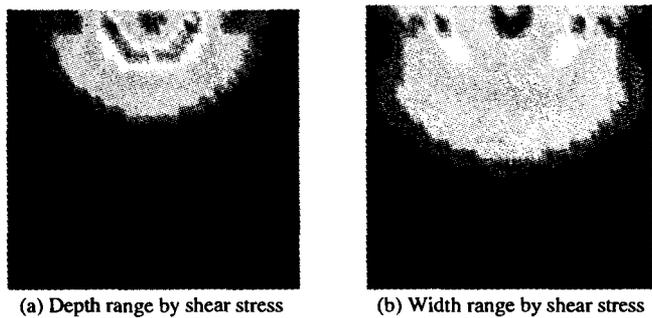


图 9 水泥块剪切应力传播图

Fig. 9 The shear-stress propagation of cement sample

4 结 语

(1) 模拟水中爆炸激波在水泥试样中的传播, 采用弹塑性模型可以定性分析不同区域水泥试样的破坏, 和实验结果吻合, 并和文献^[5]中的规律也是吻合的; 数值模拟揭示了激波在水泥试样中的传播规律, 为进一步的实验提供参考。

(2) 作为“层内爆炸”的基础性研究, 水泥只是在实验条件下的一种替代材料, 由于条件所限, 没有测定水中激波压力, 因此只能从现象入手定性分析, 要进行定量的分析, 还要考虑特征尺度等多方面因素的影响, 由爆炸相似率、量纲分析得出更普遍的规律, 这将是下一步的工作。

参考文献:

- [1] 丁雁生, 陈力, 谢燮, 等. 低渗透油气田“层内爆炸”增产技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 90—96.
DING Yan-sheng, CHEN Li, XIE Xie, et al. The technique research used in low-permeated oil fields named “Exploding in oil layers”[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 90—96.
- [3] LSTC. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL[M]. 北京: ANSYS 股份公司北京办事处, 2003: 784—786.
- [2] 张学言, 阎澍旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.
- [4] Henrych J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987, 45—60.
- [5] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 65—68.

Numerical simulation analysis of effect on the cement sample by blast wave in the water

LIN Ying-song^{1,2*}, ZHU Tian-yu², JANG Jin-bao²,
YUAN Xin-fang², LI De-cong¹, DING Yan-sheng¹

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

*2. College of Petroleum Engineering, China University Of Petroleum,
Dongying 257061, Shandong, China)*

Abstract: Propagation of the blast wave in cement sample in the water was simulated. The damage causes of different areas in cement sample were explored by using the method analysizing the blast wave and stress acting on typical cement sample element. Numerical results are in agreement with the experiment.

Key words: mechanics of explosion; damage; numerical simulation; blast wave; cement sample; tensile destroy

* Corresponding author: LIN Ying-song
E-mail address: sdlinys@263.net
Telephone: 0546-8399080