

文章编号: 1673-5005 (2008) 03-0075-05

# 激波作用下岩石损伤试验及评价方法

蒋金宝<sup>1,2</sup>, 林英松<sup>1,3</sup>, 张宝康<sup>1</sup>, 刘兆年<sup>1</sup>, 丁雁生<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中原石油勘探局 钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001;  
3. 中科院 力学所, 北京 100081)

**摘要:**通过水中爆炸激波对试样的损伤试验来模拟激波对地层岩石的破坏作用。试验中观测了爆炸后试样内部裂纹形貌的分布,利用自制传感器测到了试样内部的激波压力,优化筛选出了损伤度模型。通过对试样弹性波速进行处理和分析,给出了试样的动态损伤阈值求解方法。结果表明,激波在试样中的传播符合指数衰减规律,相对损伤度、无量纲波速的平方、无量纲拉应力它们两两之间呈线性关系。

**关键词:**激波; 岩石损伤; 试验研究; 相对损伤度; 无量纲波速; 无量纲拉应力

**中图分类号:** TE 357 **文献标识码:** A

## Rock damage experiment and evaluation method by exploding wave

JIANG Jin-bao<sup>1,2</sup>, LIN Ying-song<sup>1,3</sup>, ZHANG Bao-kang<sup>1</sup>, LIU Zhao-nian<sup>1</sup>, DING Yan-sheng<sup>3</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;  
2. Drilling Research Institute, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang 457001, Henan Province, China;  
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The sample damage experiment by exploding wave in water, which is used to simulate the rock damage by exploding wave in reservoir, was carried out. The fractures distribution rule in sample was observed. The exploding wave pressure was measured by self-made sensor, and the selected damage model was optimized. By treating and analyzing the elastic wave velocity data, the solution method for dynamic damage threshold was obtained. The results show that the rule of exploding wave propagation in sample accords with exponential damping, and a linear relationship exists among relative damage, the square of dimensionless elastic wave velocity and dimensionless tensile stress.

**Key words:** exploding wave; rock damage; experimental research; relative damage; dimensionless wave velocity; dimensionless tensile stress

低渗透油藏通常需要增产改造才能维持正常生产。目前利用爆炸技术改善低渗透油藏的效果还不够理想,如地层岩石与加载方式、载荷的匹配关系不尽合理使得改造效果不稳定,裂缝短并且容易闭合,爆炸产物污染使得地层渗透率下降等。对于不同地层只有选择合适的加载方式、施加合适的载荷,才能得到理想的裂纹分布,并大幅度地提高地层渗透率。为了提高爆炸增产技术的效果,必须对爆炸增产技术相关问题进行深入研究,而炸药爆炸所产生的载

荷对储层岩石的损伤是其中比较关键的问题。炸药的爆炸对岩石的损伤作用可分为两部分,一是激波对岩石的损伤,一是爆炸产物对岩石的损伤。由于两者对岩石的损伤机理不同,两部分同时研究困难较大,从作用的先后顺序来看,激波要先于爆炸产物<sup>[1-2]</sup>。笔者建立爆炸激波作用下岩石损伤试验方案,观测激波掠过岩石内部的裂纹形貌分布,分析无量纲弹性波速与无量纲拉伸应力的关系及相对损伤度随无量纲拉应力的变化规律。

收稿日期: 2007 - 11 - 09

基金项目: 国家“863”计划项目(2007AA06Z208); 中国石油化工股份有限公司资助项目(P03051); 中国石油大学研究生创新基金项目(S2005-53)

作者简介: 蒋金宝(1981-),男(汉族),山东曹县人,博士研究生,主要从事油气井岩石力学及其应用研究。

# 1 爆炸激波对试样的冲击试验

## 1.1 试验方案

由于岩石类材料具有非均匀性和各向异性,试验测量数据散布范围较大,不易作对比研究。与岩石性质最为接近的是水泥,并且可以有效地控制其力学性质,因此本试验中采用水泥试样代替天然岩石。

为了避免把试样压碎,在炸药与水泥试样之间增加一层“水垫”,使得激波经过“水垫”的衰减之后才能到达试样。通过调整“水垫”的厚度和药量来调整激波到达试样时的压力,从而达到改变试样损伤程度的目的。

用两块直径 150 mm、高 70 mm 的水泥试样拼接成一块圆柱型试样,在试样正上方一定距离处,平行放置一定量的炸药。在拼接面(即预制剖面)的上下端各放置一个压电传感器,记录试样内部的激波压力值。试验后,掰开拼接试样,观察其内部的裂纹分布。图 1 为试验方案示意图和真实方案照片。

在试验方案设计中,采取在水中爆炸,一方面可以消除爆生气体对水泥试样的损伤作用,另一方面可以削弱反射拉伸波对水泥试样的破坏作用。采用预制剖面来观察水泥试样内部的裂纹,避免了试验后剖切试样带来的困难,并能消除剖切试样带来的新损伤。另外,采取在水中进行爆炸试验更接近于油藏的实际情况。

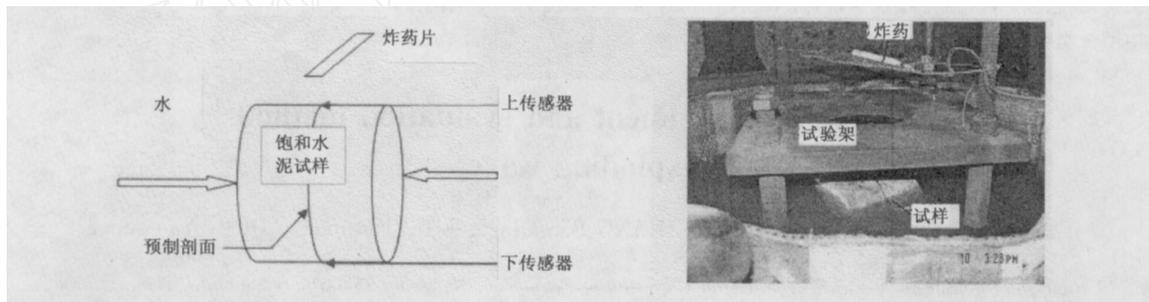


图 1 试验方案示意图及方案的真实照片

## 1.2 试验设备

(1)水泥试样。水泥试样由中国建筑材料科学研究院提供,直径 150 mm,高 70 mm,杨氏弹性模量为 68.95 GPa,剪切模量为 27.95 GPa,体积模量为 77.08 GPa,泊松比为 0.234。试样的性能参数差别控制在 5%以内。

(2)爆炸水箱。水箱的长、宽、高均为 1 m,由 2 cm 厚的钢板焊接而成。水箱内边缘底部固定一圈带有 1 mm 孔隙的塑料管,向管内注入压缩空气,产生气幕来保护水箱壁。水箱的 4 个角均用一根两头密封的钢管进行保护,中间的环形钢丝网用来阻止气幕向水箱中间发展,使试样周围的水保持静止,激波信号不受干扰(图 1 右图)。

(3)传感器。由于尺度的原因,目前的商业传感器不适合本研究,为此,自行设计和制作了传感器(厚度小于 1 mm,总面积小于 1 cm<sup>2</sup>),并进行了标定,传感器的结构见图 2。

(4)炸药。一定比例的黑索金和环氧树脂外加少量优质机油捻合而成塑性炸药。用排水法测量到炸药的密度是 1.42 g/cm<sup>3</sup>,激波管测得炸药的爆速为 6.9 km/s

(5)测量系统。该系统由电荷放大器、同步机、

数据采集装置组成。应用 A/D 数据采集软件可进行试验数据的自动采集。

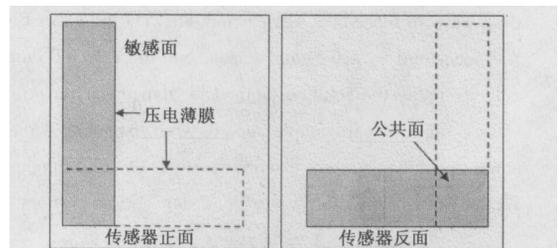


图 2 压电薄膜传感器示意图

## 1.3 试验过程

拼接圆柱试样,在拼接面的上下端放置传感器,用夹具把水泥试样加紧,固定在试验架上。

将配制好的炸药按照试验要求进行称量,然后与雷管捻合在一起,固定在试验架上,保证炸药在水泥试样正上方一定距离处,见图 1 右图。

将装配有炸药和水泥试样的试验架吊入爆炸水箱中,盖上防水雨布。检查起爆和数据采集线路,确保二者正确后,接雷管线。关闭爆炸洞门,鸣铃示意其他试验人员,确保安全,然后起爆。

测量完数据后,将试样吊出水箱,观测预制剖面上的裂纹。

根据理论分析的结果,分别测了炸药量为 5, 10, 15 和 20 g 时的 4 种情况,改变炸药到试样的距离,每个药量做 3~5 次试验。

### 2 激波作用后试样的裂纹形貌

炸药起爆后,产生的爆轰波经过“水垫”衰减为激波,经过试样与水的界面透入水泥试样中,上传感器先测得激波压力。激波在试样中继续传播并且强度不断衰减,当激波传播到试样底端的时候,下传感器也测得激波压力。激波在试样与水的界面上发生反射和透射,由于水泥试样的声抗远大于水的,因此向水中透射压缩波,同时向水泥试样反射拉伸波。由于水泥试样的抗拉强度远低于其抗压强度,试样极易被拉坏。

综合利用示踪剂和快速风干技术,观察到了激波对水泥试样的损伤作用(图 3)。在试样的顶部,个别试样可以看到剪切压实现象,但大部分试样都不明显,原因是由于激波压力太低,其最高值在 200 MPa 左右,试样的单轴抗压强度为 55 MPa 左右,岩石的动态强度为静态强度的 5~10 倍,而激波压力仅为抗压强度的 3.5 倍左右,因此,试样不会产生明显的压实破坏现象。反射拉伸波对水泥试样的破坏作用相对比较明显,从图 3 可以明显地看到,裂纹是从试样底部最低点开始起裂的。在反射拉伸应力的作用下,裂纹从起裂点开始扩展并生成两条弧线型主裂纹,由主裂纹衍生的微裂纹方向和形态是随机的。在试样的其他区域,可以看到密度不等的网格状裂纹。综合对比不同药量和不同距离的试样裂纹形貌发现,随着药量的增加和炸药与试样距离的降低,裂纹的尺度和密度增大<sup>[3-6]</sup>。

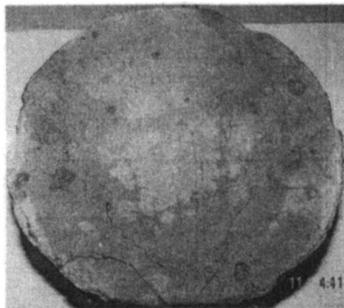


图 3 水泥试样预制剖面的损伤形貌

### 3 试样损伤程度定量评价

由于试样边界的裂纹主要是由于激波在边界的反射造成的,而地层中很难有大的边界(断层除

外),因此该区的研究没有太大的实用意义。另外,该区的裂纹很大,取心也非常困难,对该区没做细致的研究。试样预制剖面内部的裂纹是由于径向压缩而引起环向拉伸造成的,由于岩石材料的抗拉强度远低于其抗压强度,因此该区域在现场中极易出现,对地层渗透率增加的贡献也较大,为研究的重点区域。

#### 3.1 试样内部应力

通过量纲分析,得到激波压力  $p$  在试样中的衰减规律为

$$p = K \left( \frac{W^{1/3}}{R_{wc}} \right)^w \frac{2j_c}{j_c + j_w} \left[ \frac{R_{wc}}{R_{wc} + d} \right]^c \quad (1)$$

其中

$$w = 1.1524, \quad c = 2 - \frac{1}{1 - \nu}$$

式中,  $j_c$  和  $j_w$  分别为水泥试样和水的声抗,  $j = c/\rho$  ( $\rho$  为密度,  $c$  为声速);  $\tau$  为激波从水中透射到水泥的过程中所造成的能量损失系数;  $R_{wc}$  为水泥试样的顶层距雷管的距离;  $w$  和  $c$  分别为激波在水和水泥中的衰减指数;  $d$  为试样的直径;  $W$  为炸药质量;  $K$  为经验常数,通过对试验数据回归处理,可得  $K = 72.36 \text{ MPa}$ ;  $\nu$  为试样的泊松比。

由于水泥试样的微裂纹大部分都是拉伸破坏,因此对试样中的环形拉应力进行分析。对于水泥试样中某点三维状态下的物理方程进行分析和推导,可以得到环向拉伸应力  $\sigma_{\theta}$  与激波压力之间存在如下关系:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2}{(1 + \nu)(1 + 2\nu)} 3p \quad (2)$$

#### 3.2 损伤度定义及损伤模型的选取

损伤是指在外载荷和环境作用下,由于微观结构的缺陷引起的材料或结构的裂化过程<sup>[7]</sup>。从损伤的定义来看,损伤度可以反映出材料性能劣化的程度,基于这种思想定义的损伤度很多,最典型的是弹性模量法,其他的方法都是基于这种方式转化得到的。弹性模量法定义的损伤度  $D$  为

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (3)$$

式中,  $E_0$ ,  $E$  分别为损伤前、后的杨氏模量。

材料的弹性波速可以反映材料的综合性能,利用波速、泊松比对式(3)进行变形处理,得

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \frac{v_p^2}{v_{p0}^2} \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)(1 - \nu_0)}{(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)(1 - \nu)} \quad (4)$$

从试验的现象来看,试样的裂缝都很小,材料的密度有所降低,但变化的幅度很小,一稍小于 1;爆炸

之后,岩石的泊松比有所降低,  $[(1 + \nu)(1 - 2\nu)(1 - \nu_0)] / [(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)(1 - \nu)]$  略大于 1, 因此,  $\frac{v_p}{v_{p0}}$   $[(1 + \nu)(1 - 2\nu)(1 - \nu_0)] / [(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)(1 - \nu)]$   $\approx 1$  (误差小于 0.03), 因此损伤度的表达式可以简化为

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \frac{v_p^2}{v_{p0}^2} = 1 - \bar{\nu}^2 \quad (5)$$

式中,  $v_{p0}$ ,  $v_p$  分别为爆炸前、后试样的波速;  $\bar{\nu}$  为无量纲波速。

由于试样本身就存在损伤, 无损伤水泥试样的杨氏模量很难得到, 因此上式的应用出现了一定的困难。张全胜等<sup>[8]</sup>对法国的著名学者 Lemaitre 提出的等价应变原理进行推广, 提出了相对损伤度, 即爆炸后试样相对于爆炸前的损伤程度, 下文中提到的损伤度都是相对损伤度<sup>[7]</sup>。

### 3.3 损伤度随激波压力的变化关系

从公式 (5) 可得相对损伤度和无量纲波速的平方呈线性关系, 为此, 在研究相对损伤度与激波压力关系之前, 首先对无量纲波速与激波压力之间的关系进行研究。

#### 3.3.1 无量纲波速的确定

根据爆炸后试样裂纹形貌的分布规律, 对爆炸前、后的试样进行取心, 并按照声波的要求对岩心进行加工, 然后利用超声波测量岩心的波速。

对于未炸岩心, 由于试样具有较高的均匀性, 共在 2 个试样上取了 5 块岩心, 岩心的波速为 4 480 m/s, 误差在 1% 左右。炸过之后的试样, 共在 12 个试样上取得 48 块岩心, 考虑到载荷和试样的对称性, 取心的位置见图 4。由于部分岩心在取心、加工或维护时发生破碎, 共测得 35 个波速数据。

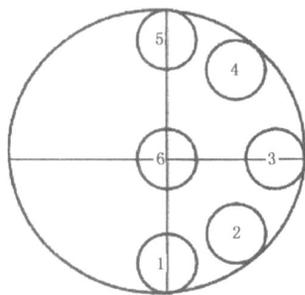


图 4 试样取心位置示意图

这里的无量纲波速取为爆炸之后的波速与爆炸之前波速的平均值之比。

#### 3.3.2 无量纲波速随无量纲拉应力的变化规律

从岩石的破碎机理来看, 激波对岩石的破坏程

度主要取决于两方面: 一是材料属性, 即材料强度, 动态抗拉强度损伤阈值  $\sigma_{td}$  等; 另外一个就是载荷强度特征, 激波的峰值压力  $p_{max}$  等。

由量纲分析可以得到  $p$  与  $\bar{\nu}$  具有相同的量纲, 因此可以推断,  $\left(\frac{v_p}{v_{p0}}\right)^2$  与  $\left(\frac{p_{max}}{p_{td}}\right)$  应该为线性关系, 并且取心区域的裂纹密度和尺度都不是很大, 可以认为  $\nu_0$  近似为 1, 因此,  $\left(\frac{v_p}{v_{p0}}\right)^2 \sim \left(\frac{p_{max}}{p_{td}}\right)$  为近似线性关系。

利用激波压力衰减公式 (1), 求解岩心中心点所在位置的激波压力, 表示岩心所受的平均应力, 利用环向拉伸应力计算式 (式 (2)) 来计算岩心的平均环向拉应力。

由于其单轴抗压强度为 55 MPa 左右, 由测得的最小激波压力折算得到的环向拉应力为 15 MPa, 则动态抗拉损伤阈值 (临界损伤压力) 为 15 ~ 30 MPa (图 5)。从图 5 可以看出: 当环向拉应力低于 18.51 MPa 时, 无量纲波速的平方很接近于 1; 当环向拉应力大于 18.51 MPa 时, 无量纲弹性波速的平方随环向拉应力增加开始出现线性衰减。在该试验条件下, 试样动态抗拉损伤阈值为 18.51 MPa。

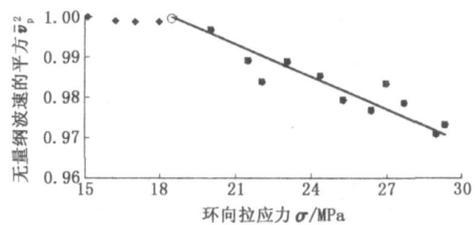


图 5 试样动态临界损伤阈值求解图

把折算的环向拉应力与试样动态抗拉损伤阈值的比值定义为无量纲拉应力  $\bar{\sigma}$ 。利用计算得到的环向拉力大于 18.51 MPa 的数据绘制的无量纲波速的平方与无量纲拉应力关系见图 6。

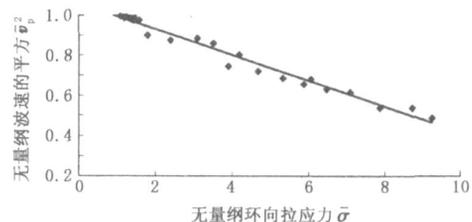


图 6 无量纲弹性波速的平方与无量纲拉应力的关系

从图 6 可以看到, 当无量纲弹性波速的平方为 1 时 (即无损伤), 无量纲拉应力为 0.991, 试样的折

合拉应力为 18.34 MPa,这与前面计算的动态抗拉损伤阈值很接近(误差不到 1%),这说明得到的动态抗拉损伤阈值较准确。

取无损伤的环向拉伸应力 18.34 MPa,重新作图,结果见图 7。从图 7 可以看出,当无量纲拉应力为 1 时,无量纲波速平方为 1,即激波载荷对试样的弹性波速无影响。另外,从图 7 也可以看出,无量纲波速的平方与无量纲拉应力之间呈较好的线性关系,

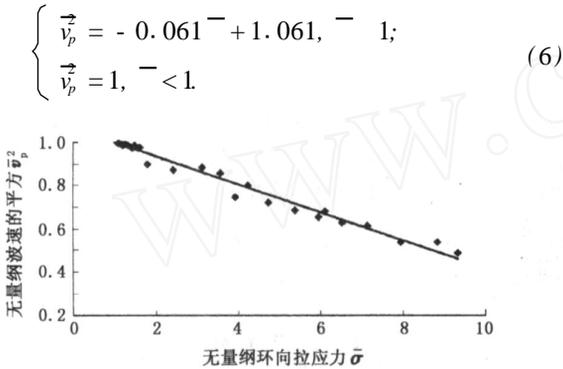


图 7 修正后的无量纲波速的平方与无量纲环向拉应力的关系

### 3.3.3 损伤度随无量纲拉应力的变化规律

综合分析公式 (5)和 (6)可得

$$\begin{cases} D = 1 - \vec{v}_p = 0.061\bar{\sigma} - 0.061, \bar{\sigma} \leq 1; \\ D = 0, \bar{\sigma} < 1. \end{cases} \quad (7)$$

从上述公式可以看出:当无量环向拉应力为 1 时,试样的损伤度为 0,试样没有损伤;当无量环向拉应力为 17.39 时,试样的损伤度为 1,试样完全破坏;当损伤度为 0.4 ~ 0.5 时,试样出现断裂<sup>[3,7,9-10]</sup>,本研究所对应的无量纲拉应力为 7.56 ~ 9.20。试验得到的最大无量纲拉应力为 9.24,取心时也出现了岩心破碎的现象,部分高损伤度数据源于破碎岩心拼接后进行的试验。

分析结果是用无量纲的方法得到的,不受试验尺度的限制,可以在一定的条件下进行推广使用。

## 4 结 论

- (1)水泥试样内部的微裂纹主要是由环向拉应力和反射拉应力造成的。
- (2)激波在试样中的传播符合指数衰减规律。
- (3)相对损伤度、无量纲波速的平方与无量纲拉应力它们两两之间呈线性关系。
- (4)研究结果不受试验尺度的限制,可以在一定的条件下进行推广使用。

## 参考文献:

[1] 蒋金宝,林英松,阮新芳,等. 低渗透油藏改造技术的研究与发展 [J]. 钻采工艺, 2005, 28 (5): 50-53  
JIANG Jin-bao, L N Ying-song, RUAN Xin-fang, et al Development of low permeability reservoir improvement [J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28 (5): 50-53

[2] 蒋金宝,林英松,阮新芳,等. 爆炸波对水泥试样损伤破坏的实验研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (2): 922-926  
JIANG Jin-bao, L N Ying-song, RUAN Xin-fang, et al Experimental research on damage and fracture by exploding wave on the surface sample in deep water [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (2): 922-926

[3] 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: 80-85.

[4] 林英松,蒋金宝,朱天玉,等. 爆炸载荷对水泥试样损伤破坏规律研究 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006, 30 (3): 55-58  
L N Ying-song, JIANG Jin-bao, ZHU Tian-yu, et al Research of cement sample damage and fracture by exploding load [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30 (3): 55-58

[5] 李翼祺,马素真. 爆炸力学 [M]. 北京:科学出版社, 1992: 378-417.

[6] 杨小林,王树仁. 岩石爆破损伤的断裂机理 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20 (3): 247-252  
YANG Xiao-lin, WANG Shu-ren Mesomechanism of damage and fracture on rock blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20 (3): 247-252

[7] 余寿文,冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京:清华大学出版社, 1997: 5-6

[8] 张全胜,杨更社,任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (1): 30-34  
ZHANG Quan-sheng, YANG Geng-she, REN Jian-xi New study of damage variable and constitutive equation of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (1): 30-34

[9] 易顺民,朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论 [M]. 北京:科学出版社, 2005: 3-6

[10] 谢和平,陈忠辉. 岩石力学 [M]. 北京:科学出版社, 2004: 199-229.

(编辑 李志芬)