爆炸载荷作用下水泥的破坏行为研究*

刘泳[1,2], 郝圣旺[3,4], 丁雁生[1], 汪海英[1], 柯孚久[1,3], 白以龙[1]

（1. 中国科学院 力学研究所，北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院，北京 100039; 3. 北京航空航天大学 理学院应用物理系，北京 100083; 4. 燕山大学 建筑工程与力学学院，秦皇岛 066004）

摘　要:“层内爆炸”采油是一项新的开发低渗透油气田的有效技术。本文在前期对层内爆炸模拟实验基础上，发展了考虑材料不均匀性和应力涨落效应的驱动阈值模型来刻画水泥中的损伤演化和破坏行为，并对实验过程进行了数值模拟。结果表明，所提出的模型可以较好地再现试样内裂纹的形成、长大和贯穿的过程，所预测的裂纹条数与实验结果基本一致，因此，该模型可为层内爆炸载荷的设计提供参考。并且，损伤演化的特征时间和应力波传播的特征时间相当，故分析中须考虑损伤演化和应力波传播的动力学耦合效应。

关键词: 层内爆炸；水泥；驱动非线性阈值模型；非均匀性；应力涨落

我国有超过 1/3 的油气田属于低渗透油气田。“层内爆炸”采油是一项新的开发低渗透油气田的有效技术[1]。层内爆炸过程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，其现象与机理都非常复杂，目前的理论和数值模型都难以对此过程给出令人满意的描述和预测[2-3]。

由于岩石的成分和性质非常复杂，其性能存在较大的分散性，这种分散性在样品尺寸较小时会更加严重。为了用较小尺寸的样品模拟岩石材料的行为，采用 7 天龄期胶砂水泥试样来模拟油岩，制成了内径、外径和高度分别为 15mm、150mm、70mm 的厚壁水泥圆筒试样。实验中，爆生气体通过管道通入水泥试样内筒，作用于内壁，导致试样中出现裂纹并破坏。实验结果表明，圆筒形样品在载荷作用下出现了多条贯穿的裂缝，裂缝的条数随着加载率、加载时间、压力峰值的增加而增加。对水泥样品断裂面的观察表明，水泥试样的破坏主要是由于拉应力造成的[4]。

由于水泥是一种典型的多孔复合材料[5]，其细观结构和性质很不均匀，我们采用驱动非线性阈值模型来刻画这种非均匀材料的破坏行为。假设 t 时刻 $\mathbf{x}$ 位置处的一个宏观单元中包含有很多细观单元，每个细观单元对应着一个失效阈值 σ_c，σ_c 服从统计分布函数 $\varphi(\sigma_c, t, \mathbf{x})$，当这个细观单元失效时，就将其从分布函数 $\varphi(\sigma_c, t, \mathbf{x})$ 中扣除。相应地，宏观损伤定义为

$$D(t,\mathbf{x}) = 1 - \int_0^\infty \varphi(\sigma_c, t, \mathbf{x}) \mathrm{d}\sigma_c \tag{1}$$

由于材料不均匀性，各细观单元的应力分布也不再均匀。为此，假设作用在各细观单元上的真实应力 σ 不再等于宏观单元的平均应力，而是可用分布函数 $\xi(\sigma; t, \mathbf{x})$ 来描述。

考虑到细观单元的失效是一个弛豫过程，我们可以假定损伤阈值的分布函数的演化服从：

$$\frac{\partial \varphi(\sigma_c; t, \mathbf{x})}{\partial t} = -\int_0^\infty \frac{\varphi(\sigma_c; t, \mathbf{x})}{\tau(\sigma, \sigma_c)} \xi(\sigma; t, \mathbf{x}) d\sigma \tag{2}$$

其中 τ 是弛豫时间，这里我们简单的假设为如下函数：

$$\tau = \begin{cases} \infty, & \sigma < \sigma_c \\ \tau_0, & \sigma \geq \sigma_c \end{cases} \tag{3}$$

其中 τ_0 是特征弛豫时间。由此，我们得到宏观损伤演化方程：

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}D(t,\mathbf{x})}{\mathrm{d}t} &= -\int_0^\infty \frac{\partial \varphi(\sigma_c, t, \mathbf{x})}{\partial t} \mathrm{d}\sigma_c \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\varphi(\sigma_c, t, \mathbf{x})}{\tau(\sigma, \sigma_c)} \xi(\sigma; t, \mathbf{x}) \mathrm{d}\sigma_c \mathrm{d}\sigma \end{aligned} \tag{4}$$

我们利用 ABAQUS，采用上述模型模拟了实验过程。通过用户子程序将上述损伤演化模型嵌入有限元

*国家重点基础研究发展计划资助”（2007CB814800）

通讯作者介绍：汪海英（1974-），女，副研究员，研究方向为材料的损伤破坏行为；Email: why@lnm.imech.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分析中。在模拟中假设 t=0 时刻，细观单元的失效阈值服从 Weibull 分布

$$\varphi(\sigma_c, t=0, \mathbf{x}) = m\frac{\sigma_c^{m-1}}{\eta^m}\exp\left[-\left(\frac{\sigma_c}{\eta}\right)^m\right]$$

（5）真实应力分布函数服从下面的分布：

$$\xi(\sigma,T,X)=\begin{cases}\dfrac{2F_0}{\sigma_2-\sigma_1}(\sigma-\sigma_1), & \sigma_1<\sigma\le\dfrac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\\ \dfrac{2F_0}{\sigma_2-\sigma_1}(\sigma_2-\sigma), & \dfrac{\sigma_1+\sigma_2}{2}<\sigma<\sigma_2\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\qquad(6)$$

其中 $\sigma_1=\dfrac{1-\sqrt{6kD}}{1-D}\sigma_0$，$\sigma_2=\dfrac{1+\sqrt{6kD}}{1-D}\sigma_0$，$F_0=\dfrac{1-D}{\sigma_0\sqrt{6kD}}$，$k=\overline{(\sigma-\bar{\sigma})^2}\Big/\left(D\left(\dfrac{\sigma_0}{1-D}\right)^2\right)$。为了反映材料中初始存在的气泡、微裂纹等缺陷，假设各单元存在随机分布的初始损伤 D_0，整个试样的初始平均损伤为 4.85×10^{-3}。模拟过程中，采用柱坐标系并假设试样内的损伤演化受作用的切应力控制。

结果表明，上述损伤演化模型可以较好地再现试样内裂纹的形成、长大和贯穿的过程（图 1）。并且，所模拟的多个试样最终形成的贯穿裂纹的条数与实验结果一致。这说明本文的损伤演化模型可为层内爆炸载荷的设计提供参考。

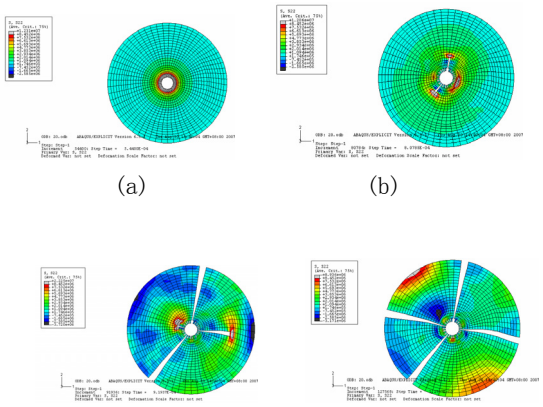

图 1 典型试样内裂纹的形成和演化过程

模拟发现，损伤演化的特征时间 τ_0 和应力波传播的特征时间都在微秒量级。因此，在分析过程中，既不能采用绝热近似，也不能采用准静态近似。也就是说，必须考虑损伤演化和应力波传播的动力学耦合效应。

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，石油勘探与开发，2001，28（2）：90－96

[2] 林英松，蒋金宝，朱天玉，阮新芳，丁雁生，等.爆炸再和对水泥试样损伤破坏规律研究，中国石油大学学报（自然科学版），2006，30（3）：55-58

[3] 林英松，蒋金宝，朱天玉，阮新芳，丁雁生，等.水中爆炸激波对水泥试样作用的数值模拟分析，爆炸与冲击，2006，26（5）：462-467

[4] 林英松，博士论文：爆生气体作用下孔壁岩石开裂规律研究，中国科学院力学研究所，2007 年

[5] 林枫，Meyer chirstian, 硬化水泥浆体弹性模量细观力学模型，复合材料学报， 24(2): 184-189

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net