

文章编号: 1006-7051(2005)03-0014-05

# 爆炸载荷作用下的岩石损伤断裂研究

林英松<sup>1,2</sup>, 阮新芳<sup>1</sup>, 蒋金宝<sup>1</sup>, 丁雁生<sup>2</sup>, 郑哲敏<sup>2</sup>, 陈力<sup>2</sup>, 朱天玉<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257062; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 岩石爆破机理是一个复杂的问题, 目前理论研究还不是很成熟。根据以往经典固体力学方法解释岩石在爆炸载荷作用下的力学行为, 是无法揭示岩石爆破破碎的全过程, 也难以确定岩石内的损伤和破坏程度; 采用细观力学方法可以深入了解岩石内部从损伤到破碎全过程。岩石爆破损伤断裂机理是由岩石爆破机理和岩石细观损伤力学理论组成的。本文在分析研究现有岩石爆破模型的基础上, 指出了现有的岩石爆破损伤模型存在的不足及发展方向; 并进行了水中爆炸实验, 分析了激波对水泥试样的损伤特性。

**关键词:** 岩石; 损伤; 爆炸载荷; 微裂纹

**中图分类号:** O382+.2; TU45 **文献标识码:** A

## STUDY ON ROCK DAMAGE AND FRACTURE UNDER EXPLOSION LOAD

LIN Ying-song<sup>1,2</sup>, RUAN Xin-fang<sup>1</sup>, JIANG Jin-bao<sup>1</sup>, DING Yan-sheng<sup>2</sup>,  
ZHENG Zhe-ming<sup>2</sup>, CHEN Li<sup>2</sup>, ZHU Tian-yu<sup>1</sup>

(1. China University of Petroleum, College of Petroleum Engineering, Dongying 257062, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China)

**ABSTRACT:** The rock blasting mechanism is a complicated subject and at present the study of its theory isn't mature. Using the ancient solid mechanics methods to explain mechanical behavior of rock under explosion load can't reveal the whole process of rock blasting, and meanwhile, it's difficulty to ascertain damage and fracture in rock. While using meso-damage mechanism and rock meso-damage mechanics can do it well. The mechanism of damage and fracture of rock blasting is composed of blasting mechanism and rock meso-damage theory. The present paper pointed out the deficiencies and development direction of the existing model of rock blasting based on the analysis of the existing damage model of rock blasting, and analyzed damage characteristic of cement sample through doing underwater blasting experiment.

**KEY WORDS:** Rock; Damage; Explosion load; Micro-fracture

## 1 引言

“层内爆炸采油技术”<sup>[1]</sup>的基本原理来源于井筒爆炸、核爆炸和高能气体压裂技术与水力压裂技术。利用水力压裂技术将乳胶状炸药压入油层裂缝, 采取不损毁井筒的技术措施起爆该炸药; 在水力

压裂裂缝的邻域造成碎裂带, 使主裂缝周围产生大量裂缝, 来提高地层的渗透率; 预计增产效益将会显著高于水力压裂, 并能提高难开采的低渗透油气田采收率、增加原油产量, 还可能把目前一些不能开采的超低渗透油气田改造成可采油气田。

与渗流有关的爆炸碎岩, 是“层内爆炸采油技术”的重要理论基础之一。为此, 本文调研了爆炸载荷作用下的岩石损伤断裂研究进展。

岩石类材料是含有孔洞、裂隙和微结构面的各

收稿日期: 2005-06-27

作者简介: 林英松, 副教授, 攻读博士学位。

向异性介质,其裂纹扩展等力学特征与材料的微观结构、受力状态和环境密切相关。在外载作用下,岩石内部微缺陷的成核、扩展以及在此过程中的时间和温度因素决定了岩石变形的特性。随着外载的增加,微缺陷进一步扩展,最终导致岩石材料的失效。在外载作用下的损伤破坏涉及微裂纹成核、扩展、连通直至宏观断裂等多个动力学过程,表现出复杂的力学行为特征。

## 2 爆炸条件下岩石损伤断裂分析

岩石作为一种脆性损伤材料,存在着大量的微裂隙、微裂纹等缺陷,即初始损伤。岩石动态损伤和破坏,是由于其内部大量微损伤在爆炸作用下的成核、扩展和连通而导致岩石最终失效或破坏的过程。

### 2.1 岩石爆破损伤断裂过程<sup>[2~6]</sup>

岩石爆破损伤断裂机理,是以岩石爆破机理和岩石细观损伤力学为基础的。岩石爆破作用包括两个部分:一是爆炸应力波的动态作用;二是爆轰气体的准静态作用。目前已基本上得到了共识,认为岩石爆破是二者共同作用的结果。

根据岩石爆破理论,岩石爆炸时在其内部分为近区粉碎区、中区裂缝区和远区弹性振动区。根据实验结果,发现在近区,岩石受到强烈压缩破坏,而远区的弹性振动区,则没有明显的损伤。因此,我们对岩石爆破损伤断裂的研究,主要集中在中区裂缝区。那么根据岩石的爆炸作用和损伤断裂细观机理,岩石爆破损伤断裂过程可分为以下两个阶段:

(1) 爆炸激波作用下岩石损伤断裂初期。该阶段,在爆破近区产生压实破坏,在爆破中区使裂缝激活并扩展,在远区激波衰减为弹性波,激发弹性振动。

(2) 爆生气体准静态作用后期。该阶段是在爆炸激波损伤场基础上,产生二次损伤断裂的过程,在爆破近区为爆生气体驱动下的裂缝扩展区,中区为爆生气体膨胀作用下的微裂缝扩展区,在远区爆生气体维持着逐渐衰减的弹性振动。

### 2.2 岩石损伤断裂模型的研究现状<sup>[7~9]</sup>

岩石爆破是一个复杂的动态演化过程。以往采用经典固体力学方法来解释岩石在爆炸载荷作用下的力学行为,无法揭示岩石爆破破碎的全过程,难以确定岩石内的损伤和破坏程度;而采用细观力学方法,可以深入了解岩石破碎的全过程。从细观损伤力学的角度看,在爆炸载荷作用下岩石的动态断裂是一个连续的损伤累积过程,其损伤机制可归结为

岩石内部微裂纹的动态演化。如何定量描述该动态演化过程,是主要的难题。

岩石爆破损伤模型的研究工作应以美国 Sandia 国家实验室为代表。Grady 和 Kipp (1980) 提出了岩石爆破各向同性损伤模型,即 GK 模型;该模型采用描述由拉伸应力激活的圆形裂纹所引起的岩石刚度劣化的方法,同时假定了这些裂纹数服从双参数的 Weibull 分布。他们采用该模型模拟爆炸载荷作用下油页岩的动态断裂和破碎,并根据能量平衡准则得到了与应变率有关的激活裂纹平均半径表达式。随后, Taylor、Chen 和 Kuszmaul (1986) 引进 Oconnell、Bur-dianshy (1976) 的有效体积模量和泊松比与裂纹密度的关系表达式,以及 Grady 给出的激活裂纹平均半径表达式,建立了损伤变量与裂纹密度之间的关系式,并将损伤变量耦合到动态本构方程中。该模型可以预测岩石在体积拉伸载荷下的动态响应。Kuszmaul (1987) 在以上两模型的基础上,提出了 KUS 模型,该模型考虑了高密度微裂纹的荫屏效应:即微裂纹周围产生应力所释放的材料能够重叠,在裂纹的激活率中考虑了有损伤所引起裂纹数目的减少。Thorne 等 (1990) 在 KUS 模型的基础上,考虑了激活裂纹数可能引起岩石体积的变化,并通过采用不同的损伤变量定义,提高了模型在大裂纹密度条件下的适应性。Yang 等 (1996)、Liu 等 (1997) 对以上模型在裂纹密度的分布及损伤变量的定义方面进行了修正,认为只有在体积应变大于某一临界体积应变后裂纹才能扩展,并考虑作用时间对裂纹密度的影响。他们在定义损伤变量时还引入了断裂概率的概念。

### 2.3 对上述模型的评价<sup>[7~9]</sup>

爆破损伤模型,对于将岩石视为均质、连续的弹性介质,以岩石的动态抗拉强度为破坏准则且不考虑岩石的损伤破坏演化过程的模型而言,是固体力学的一个重大突破,因而成为岩石爆破理论模型的发展方向之一。但是目前的模型在实际应用中存在很多问题有待解决。

(1) 由于美国 Sandia 国家实验室只提供了油页岩中的参数,尚未发现对其它类型岩石的说明。决定裂纹密度分布的两个材料参数  $k$ 、 $m$  的物理意义尚不明确,其值难以确定,以往的模型基本上都是采用他们的参数,这在应用上受到很大程度的限制。

(2) 在实验中很难确定损伤系数  $D$  的值,这对于评价岩石爆破损伤破坏的程度也是一个难题。如何合理地定义损伤变量及其演变率,是目前研究中

的一个主要方面。

(3) 爆炸激波对岩石形成的微损伤,在爆轰气体的作用下会进一步扩展,因此爆轰气体对岩石的损伤和破坏是不可以忽视的。但由于爆轰气体和爆炸激波对岩石的损伤和破坏作用机理不同,在理论模型中如何进行耦合尚待进一步研究。

(4) 上述模型中仅考虑了在体积拉伸条件下的损伤效应,并没有考虑到体积压缩对岩石的损伤效应,这与实际情况是有出入的,还需要进一步完善。

(5) Grady 和 Kipp 提到的 GK 模型,其激活裂纹平均半径表达式还存在一个疑问。由断裂力学知,裂纹扩展量  $a$  与质点位移量  $u$  存在某种函数关系,但不是线性关系。只有假设它们存在某种线性关系, GK 模型的激活裂纹平均半径表达式才可能成立。这两者成线性关系,是很勉强的假设。某些理论模型引用这个表达式,得到的结果可能会有一些偏差。

(6) 上述理论模型应用于一些计算软件,对岩石爆破损伤和破坏的过程进行了模拟,但由于其中某些参数不好确定,可能会与实际情况出现较大的差别,还需要实验结果来进一步修正。

### 3 微裂纹的形成<sup>[10,11]</sup>

王明洋、钱七虎等人从微观和细观的角度解释了地下防护工程中岩石微裂纹的成核、起裂及扩展。

在微观上,岩石构造缺陷水平的元素既可能是原子,也可能是构造缺陷(包括空穴和位错)。对于由晶粒组成的岩石,从塑性变形一开始,由于各种晶体具有不同的力学和热学性能,引起应力微集中,结果在颗粒内和颗粒边界上造成一些内在的位错。随着变形过程中位错密度增长,各种物理力学性质的微观不连续性就随之累积变化,当达到它的某些临界数值时,在比较长的晶格区域内就会丧失剪切稳定性,也就是这些区域中丧失了与作用载荷相适应的能力,进入局部的破坏状态。然而作为传输破坏的位错,只是导致形成与破坏相适应的内部边界,对于任何规模的裂缝扩展都需要积极的旋转。因此,在任意晶相方向上的较大距离上,结构的重新排列就成为可能,它们在中等应力集中区产生,经过许多构造单元扩展。

在细观上,岩石构造缺陷水平的元素既可能是颗粒接触点(晶粒内裂缝、沿多个颗粒的晶粒间裂缝和沿晶粒界的裂缝),也可能是构造上边界碎片的分层、夹杂物等。细观构造元素具有明显的内部边界

和特殊的物理-力学特征值,它们比微观尺寸大,但又不是宏观尺寸,包含有足够数量的构造元素以用来平均描述。

在变形过程中,那些早已具有的、或者是塑性变形产生的子构造元素的任何移动和旋转,都伴随着子构造内部元素的移动和旋转。不同尺度的、构造不均匀元素的细观体积中不均匀塑性变形的发展,形成了不均匀的应力场。在最大切应力的方向上就形成局部剪切带,变形构造元素内局部变形带约束的区域中,子构造元素内部的剪切变形不可能进一步发展,导致非相容变形的发生,进而导致在该处出现不连续性,称之为细观裂纹。

细观裂纹是否还会沿着细观构造元素边界或在它内部继续发展,这将取决于细观构造元素边界的状态、元素内部或它的边界上是否存在应力集中或非均质性等等。细观裂纹在变形子构造元素的边界上形成,并且经常是沿着局部剪切带扩展。

当这个过程进入到宏观水平,在宏观水平上形成了局部变形带和宏观裂缝,这意味着岩石的整体破坏——整体上丧失掉剪切稳定性。

可见,每一个构造水平上塑性变形机制的特征,决定着微观、细观和宏观水平上模拟变形过程的特殊方法。宏观水平上的描述利用泛函力学的方法;微观水平对变形过程可以通过位错理论来考虑;细观水平对变形过程的模拟可以在“剪切+旋转”变形图景下,通过考虑细观构造元素的演变和新的细观子构造元素的形成来实现。

岩石结构的力学响应更重要的方面是与基质颗粒、孔隙等细观结构相联系;细观裂纹的成核、扩展、连通及相互作用是导致宏观裂缝形成的主要原因。因此,从岩石细观结构出发,通过对细观结构变化的物理与力学过程的分析来研究岩石的损伤及其演化,是揭示岩石损伤破坏机理和规律的根本途径。

## 4 水中爆炸激波对饱和水泥试样的损伤实验研究

### 4.1 问题的提出

本研究基于“层内爆炸”改造低渗透油气田研究。岩石爆破是由爆炸激波和爆轰气体两部分共同作用的结果。本实验的目的是要观测爆炸激波对试样的作用。

### 4.2 试验介绍

用水中爆炸激波对饱和水泥试样冲击实验,来模拟“层内”爆炸中爆炸激波对岩石损伤作用。实验

记录试样上下表面入射和透射的激波压力曲线,观察激波掠过水泥试样的宏观与细观损伤破裂情况,探索使试样产生足够数量微裂纹的激波条件,结合渗透率测试和理论分析摸索渗流强化规律。图1为实验方案示意图。

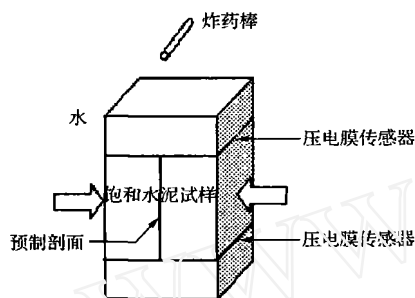


图1 实验方案示意图

Fig. 1 Sketch map of the experimental precept

由于岩石各向异性,本身存在很多偏差,实验是用标准净浆饱和水泥试样来模拟地下岩石;试样为圆饼状。图2是爆炸水箱和试样装配架。炸药和试样之间有一定的距离,目的是让炸药在水中爆炸,爆轰波传入水中转化为激波,压力可得到适当削弱,不至于把试样压碎,同时也消除了爆轰产物对试样的作用。试样放在足够深的水中,可以削弱反射稀疏波对试样开裂的影响;最终结果是由爆炸激波掠过水泥试样产生大量的微裂纹。

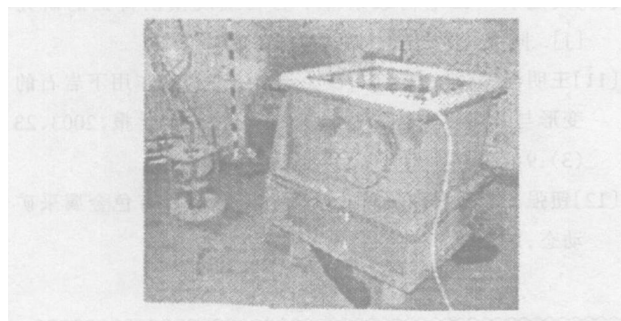


图2 爆炸水箱和试样装配架

Fig. 2 Explosive water tank and the sample-fitting frame

为了能进一步观察试样内部的损伤情况,我们用拼接的试样来预制观察面,避免剖切试样的困难,并可消除切割带来的新损伤。

对爆炸前后饱和水泥试样进行观察,发现在试样预制剖面上出现大量的“网状”裂纹,由两条主裂纹和大小不一的分叉裂纹组成。图3(a)(b)分别为爆炸前后饱和水泥试样预制剖面的照片。初步估计这可能是拉伸稀疏波作用的结果,并且可以将试样

分为损伤区和拉伸破坏区两个观察区。

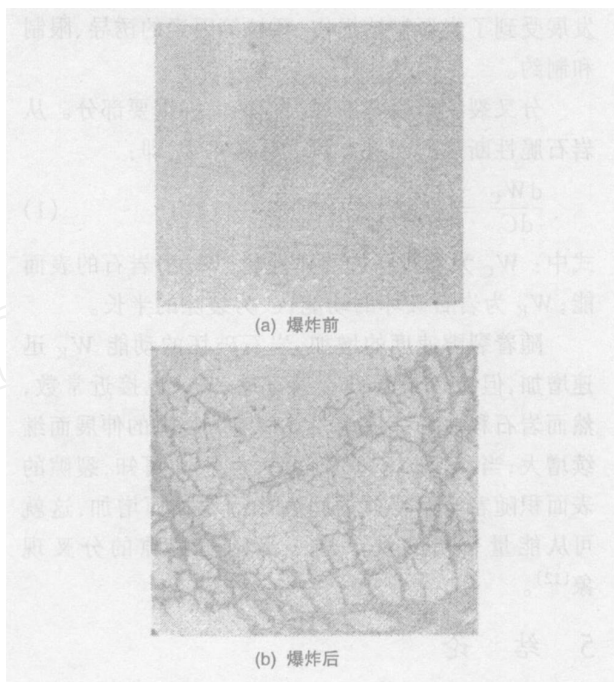


图3 爆炸前后饱和水泥试样的照片

Fig. 3 Photos of saturation cement samples before and after explosion

#### 4.3 微裂纹起裂扩展机制

实验表明,当激波到达水泥试样的下部边缘,激波发生反射,由于水的声抗比低于水泥试样的声抗比,激波向水投射压缩波,同时向水泥试样反射稀疏波,并同压缩波叠加。在某些位置可能稀疏波强度大于压缩波强度,水泥试样出现环向的拉伸应力,当该应力达到岩石的动态抗拉强度时,水泥试样出现拉伸损伤或破坏。基于水泥试样缺陷的存在,裂纹出现转向或者分叉而形成径向裂纹,由于环向拉伸作用,分叉所形成的径向微裂纹出现扩展,延伸到水泥试样的边缘。

#### 4.4 试样细观主裂纹与分叉裂纹的特征

从损伤演化发展到最终的断裂破坏过程中的一个重要特点就是主裂纹的形成,小尺寸试样的细观断裂过程也是一样的。主裂纹的形成对其断裂破坏起决定性作用。

从起裂点开始生成两条弧线型主裂纹,其主裂纹的局部方向和形态很随机。当反射波的波速是裂隙的扩展速度的3倍时,反射拉伸波在试样一半的位置与裂隙相交;当反射波的波速是裂隙的扩展速度的2倍时,反射的拉伸波在试样三分之二的位置与裂隙相交,由于拉应力与产生的径向裂纹成一个角度,从而促进了裂纹的分叉。岩石材料结构的

均匀性,使起始扩展裂纹(或新裂纹)的进一步演化发展受到了岩石初始损伤、颗粒等因素的诱导、限制和制约。

分叉裂纹是岩石细观损伤的又一重要部分。从岩石脆性断裂的能量方程表达式来看,即:

$$\frac{dW_C}{dC} = \frac{dW_S}{dC} + \frac{dW_K}{dC} \quad (1)$$

式中:  $W_C$  为岩石释放的弹性能;  $W_S$  为岩石的表面能;  $W_K$  为岩石破坏的动能;  $C$  为裂隙的半长。

随着裂隙速度的增加,岩石破坏的动能  $W_K$  迅速增加,但接近最终破裂速度时,  $W_K$  也接近常数,然而岩石释放的弹性能  $W_C$  却随着裂隙的伸展而继续增大;当  $W_K$  趋于一定值时,由上式可知,裂隙的表面积随着岩石释放的弹性能的增加而增加,这就可从能量平衡的观点进一步阐明裂隙的分叉现象<sup>[12]</sup>。

## 5 结 论

(1)通过调研,认识到岩石爆破的损伤断裂过程,即岩石内部微裂纹成核、扩展、连通的过程,包括两个不同的阶段,其相应的损伤断裂机理也应有所不同。

(2)对上述理论模型进行评价,发现这些模型还需要进一步的完善;损伤变量  $D$  难以确定,这对岩石的损伤断裂破坏程度的评价,仍然是一个难题。

(3)低渗储层的岩石也存在层理、节理、劈理等构造裂纹,只是低渗储层的这些构造裂纹贯通的极少。因此,可以认为低渗储层的岩石是一种含多个随机短裂纹的岩石介质。

(4)通过水中爆炸激波实验研究,得到了“网状”裂纹,这对于低渗透油田的开采是十分有意义的。室内实验只是初期阶段,还未能明确地得到产生“网

状”裂纹的条件;另外,这只是在水泥试样产生了这种结果,在其它类型的岩石上是否也会出现“网状”裂纹呢?这还需要进行大量的实验来验证。

## 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]. 石油勘探与开采,2001(2):90-96.
- [2] 张晓春,杨挺青,缪协兴. 岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展[J]. 力学进展,1999,29(1):97-104.
- [3] 王挥云,李忠华,李成金. 基于岩石细观损伤机制的岩爆机理研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2004,23(2):188-190.
- [4] 钟冬望. 岩体爆破破碎损伤机理探讨[J]. 武汉冶金科技大学学报,1998,21(4):387-390.
- [5] 邵鹏,贺永年. 脆性岩石细观损伤分析与临界破坏行为[J]. 煤炭科学技术,2001,29(7):31-34.
- [6] 杨小林,王树仁. 岩石爆破损伤断裂的细观机理[J]. 爆炸与冲击,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.
- [8] 凌建明,孙均. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报,1993,12(4):304-312.
- [9] 杨小林,王树仁. 岩石爆破损伤模型及评述[J]. 工程爆破,1999,5(3):71-75.
- [10] 凌建明. 压缩荷载条件下岩石细观损伤特征的研究[J]. 同济大学学报,1993,21(2):219-226.
- [11] 王明洋,葛涛,戚承志,钱七虎. 爆炸荷载作用下岩石的变形与破坏研究( ) [J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(3):9-20.
- [12] 钮强. 岩石爆破裂隙的形成与扩展[J]. 有色金属采矿动态,1979,2.

(上接第82页)

- [4] 张景林,崔国璋. 安全系统工程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2002,18-19.
- [5] 张云鹏,于亚伦. 爆破工程安全评价初探[J]. 工程爆破,2004,10(4):81-84.
- [6] 李发荣. 预先危险性分析在安全评价中的应用研究[J].

劳动保护科学技术,1999,19(5):56-60.

- [7] ROBERTO VERRO, MAURA CALLIERA. GIS - Based System for Surface Water Risk Assessment of Agricultural Chemicals. 1. Methodological Approach [J]. Environmental Science & Technology,2003,22(10):2508-2518.