

文章编号:1673-5005(2006)03-0055-04

爆炸载荷对水泥试样损伤破坏规律研究

林英松^{1,2}, 蒋金宝², 朱天玉², 阮新芳², 丁雁生¹, 付英军³, 孙丰成², 王莉²(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100081; 2. 中国石油大学石油工程学院,
山东东营 257061; 3. 中国海洋石油研究中心, 北京 100027)

摘要:从实验和数值模拟两方面对爆炸载荷对水泥试样的损伤破坏进行了研究。首先,在水中利用爆炸产生的爆炸冲击波对水泥试样进行损伤破坏,模拟“层内爆炸”采油技术中激波使岩石损伤开裂的现象;然后,利用波动力学理论,对激波在实验条件下对水泥试样的损伤破坏进行了数值模拟。结果表明,在冲击载荷作用下,水泥试样的损伤破坏可分为压实破坏、压实损伤、拉伸损伤、拉伸破坏4个区域,在压实损伤区水泥试样也具有较好的渗透性。数值模拟可以用来确定各种裂纹形成的应力条件,并可通过预制剖面上的裂纹分布来预测水泥试样内部裂纹分布的基本规律。

关键词:爆炸载荷;水泥试样;实验研究;数值模拟;损伤破坏;层内爆炸

中图分类号:TE 357.3 **文献标识码:**A

Research of cement sample's damage and fracture by exploding load

LIN Ying-song^{1,2}, JIANG Jin-bao², ZHU Tian-yu², RUAN Xin-fang²,
DING Yan-sheng¹, FU Ying-jun³, SUN Feng-cheng², WANG Li²(1. Institute of Mechanics in Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China;
2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;
3. Research Center in China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China)

Abstract: The cement sample's damage and fracture by exploding load was studied by experiment and numerical simulation method. First, the phenomenon of the rock damage and fracture by shock wave of exploding in fractures was simulated through the experiment of exploding on the surface of the cement sample in deep water. Second, the damage and fracture mechanism was numerically simulated by wave mechanics under the experimental condition. The results show that there exist four damage zones on the sample, which are compacted fracture zone, compacted damage zone, tensile damage zone and tensile fracture zone. And the cement sample has good permeability in compacted damage zone. And the stress conditions of all kinds fractures forming can be determined by numerical simulation. The basic distribution law of inner fracture of the cement sample can be predicted by fractures distribution on prefab section.

Key words: exploding load; cement sample; experimental study; numerical simulation; damage and fracture; exploding in fracture

目前低渗透油气田储量所占比例达到已探明储量的1/3,而且会越来越大,已经成为我国陆上石油工业稳定发展的重要资源。加快低渗透油气田的开发势在必行,而改善低渗储层岩石物性是开发此类油气田最有效的手段,因此有必要对低渗储层岩石

物性改造技术进行进一步的研究。目前我国在低渗透油气田开发中主要采用水力压裂、酸化等技术来改造油层岩石物性。但在渗透率很低的油气藏中,只有在水力压裂形成的主裂缝邻域的油气可以通过岩石中原有微小孔隙流入主裂缝产出,而离主裂缝

收稿日期:2006-02-20

基金项目:中国石油化工股份有限公司资助项目(P03051)

作者简介:林英松(1964-),女(汉族),山东乳山人,副教授,中国科学院力学研究所博士研究生,主要从事岩石力学在石油工程应用方面的研究。

较远的油气仍难以采出。用爆炸方法提高油气采收率是石油行业多年探寻的开采技术。中国科学院力学研究所于20世纪90年代提出一项“层内爆炸”技术^[1],其基本思路是:利用水力压裂技术将乳胶状爆燃药压入油层裂缝,并采取不损毁井筒的技术点燃爆燃药,从而在主裂缝周围产生大量裂缝,达到提高采收率的目的。“层内爆炸”增产技术是否可行,主要取决于3个方面:①药品能否压入含油气岩层裂缝;②药品压入岩层裂缝后能否发生爆炸;③爆炸后对岩石产生怎样的效果。对于工程应用来说,最重要的是爆炸后能否使地层产生油气开采所需的裂纹分布。层内爆炸对岩石的作用分为两部分,一是激波对岩石的损伤,二是爆炸产物对岩石的损伤。笔者利用水中炸药界面爆炸对饱和水泥试样损伤破坏实验来模拟层内爆炸中冲击波使岩石损伤开裂的现象,然后用数值模拟的方法对实验中不能观测到的激波传播过程及水泥试样内部复杂的受力情况进行分析。

1 实验方案

将一定尺度的水泥试样置于水中,把炸药贴在水泥试样的上表面,用雷管起爆,观察水泥试样损伤破坏的情况。

1.1 水泥试样的制备

为了问题简化,水泥试样尽量采取对称结构,本次实验采用的是圆柱水泥试样,直径为30 cm,高为30 cm。水泥是普通的硅酸盐水泥,28 d的强度在40 MPa左右,先把水和水泥按照一定比例配制成水泥浆,然后放入自制模具中成型,24 h后退模,最后放在水中养护28 d。为了观察水泥试样的内部裂纹,采用了预制剖面的方法,以避免实验后的切割给水泥试样带来新的损伤。图1的左图是预制剖面的水泥试样照片。



图1 爆炸前水泥试样及爆炸现场照片

1.2 炸药的装配

实验中,为避免把水泥试样炸碎而采用了一定长度的导爆索,其线密度为12 g/m。为了保证导爆索顺利起爆,在雷管和导爆索的连接处,放置了1.5

g炸药,该炸药为塑性炸药,用一定比例的黑索金和环氧树脂在一定条件下配置而成,实验前对其基本参数进行了测量。用探针法测得炸药的爆速为6900 m/s,用排水法测得炸药的密度为1.40 g/cm³。将雷管、炸药和导爆索装好后用胶带裹紧放置在水泥试样的表面,见图1右图。

1.3 实验方法

把预制好的水泥试样放在足够深的水中,然后把装配好的炸药贴在水泥试样的表面,用干电池通过导线引爆雷管,雷管引爆炸药和导爆索产生冲击载荷。

2 实验现象与结果分析

在水泥试样的表面和预制剖面上,可以观察到4个区域:压实破坏区、压实损伤区、拉伸损伤区和拉伸破坏区。

2.1 压实破坏区

在所做的4块试样的压实坑里,其中3块有3条裂缝,1块有1条压实裂缝。经分析,裂纹的条数与载荷的大小、能量、加载速度、材料本身的性质以及初始损伤有关(图2a)。

2.2 压实损伤区

在上表面每一块试样都有一个压实坑,形状基本上是半径为1~2 cm,深度为0.5~1 cm的近似球冠。坑内有大量径向裂纹分布。

在预制的剖面上可以观察到明显的剪切压实带。在该区域有一道道圆弧状的波纹,并且波纹基本上是同心的。经过分析,波纹是在激波的作用下,水泥试样发生剪切破坏形成的(图2b)。

为了验证压实损伤区的渗透性,在压出来的坑里用滴管滴水,发现水可以迅速渗透到压实区中,说明压实损伤区的渗透性很好,这可能是水泥破碎颗粒把裂缝支撑开的结果。图2c是压实损伤区渗透实验的照片。这一现象对于“层内爆炸”采油来说意义重大,在激波的作用下水力裂缝附近产生压实损伤区,该区的孔隙会变小,但产生的剪切裂缝具有自支撑作用,可使岩石原来的孔隙互相连通,有利于提高地层的渗透率。

2.3 拉伸损伤区

从上表面看,拉伸损伤区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,它们相互交错,形成裂缝网络,外侧的径向裂纹一般从边缘开始起裂,这些裂纹的起裂一般与气孔有关。

在预制剖面上,可以看到U型裂纹,裂纹的位

置位于距水泥试样顶部 2/3 的位置,距两侧的距离 大约为 5 cm,高度约为 10~12 cm。

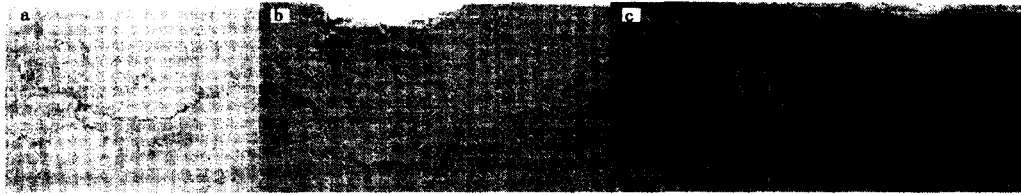


图 2 压实破坏区和压实损伤区照片

2.4 拉伸破坏区

在试样上还可以明显看到拉伸破坏区域,拉伸破坏区与拉伸损伤区的边界近似为 U 形,分析发现敞口 U 型的开口大小与炸药量和水泥试样的尺度有关。

2.5 预制剖面分析

通过观察拼接试样的侧面裂纹和上表面裂纹,发现裂纹吻合较好,这说明预制剖面对裂缝的分布规律影响不大,剖面上的裂纹特征可以近似代表试样内部裂纹的分布规律。

3 数值模拟

采用动力分析软件 LS-DYNA 模拟激波在水泥净浆试样中的传播,以分析激波对水泥试样的作用。

3.1 水泥试样的本构模型

在爆炸冲击过程中涉及岩石材料的塑性流动、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。尽管目前有不少岩土材料本构模型,但这些模型都不适用于爆炸冲击过程的仿真计算。实际上,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。本文中采用弹塑性本构模型,能够对材料的随动强化效应和各向同性强化效应及应变率效应加以描述,是模拟岩石、混凝土经常采用的一种模型,其参数容易确定,能够得出激波对岩石造成的损伤破坏的力学参数,从而分析破坏的原因。计算中采用的岩石参数为:密度 2400 kg/m³,弹性模量 40 GPa,泊松比 0.23,屈服应力 39 MPa,切线模量 2 GPa,强化系数 0.5。

3.2 炸药的 JWL 方程

炸药爆速为 6930 m/s,炸药密度为 1.40 g/cm³,CJ 点压力为 21 GPa,一端起爆。计算中炸药的状态方程采用 JWL 方程描述,表达式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \times \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E_0}{V}$$

式中, p 为爆炸产生的压力, GPa; V 为爆轰产物的相对体积(爆轰产物体积与初始体积之比); A, B, R_1, R_2, ω 为系数,取值为 $A = 3.74 \times 10^9, B = 3.23 \times 10^7, R_1 = 4.15, R_2 = 0.95, \omega = 0.3$; E_0 为爆轰产物初始内能,取 7 GPa。

3.3 数值计算的几何模型及其边界处理

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,上顶面宽 90 cm,下底面宽 45 cm,水泥块距水底 2 cm,距水面 10 cm,炸药换算的当量尺寸为 0.5 cm × 2 cm。水池壁为密度 1.8 g/cm³ 的泥质材料,厚度简化成 2 cm,这样就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,水和水池壁交界面也是反射边界。

3.4 激波传播过程及水泥试样破坏区域受力分析

通过数值模拟可以得到激波传播过程的大量信息,看到实验中无法观察到的激波在水泥试样及水中的传播和反射等过程,图 3 为不同时刻激波压力传播效果图。

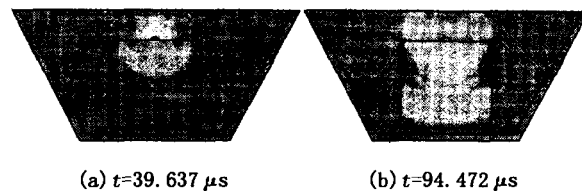


图 3 激波压力传播

炸药起爆后,压缩波会向水泥块和水泥块上部水域同时传播,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 4 所示,水泥块顶面 S-T 的环向破裂和 U 型裂纹是由从侧表面反射成的拉伸波造成的;K-H 裂纹是侧面与底面反射的拉伸波叠加形成的。拉应力满足某种动



图 4 水泥块的破坏区域示意图

态的断裂准则,在该处引起水泥块的断裂。

3.4.1 U型裂纹和S-T环向裂纹

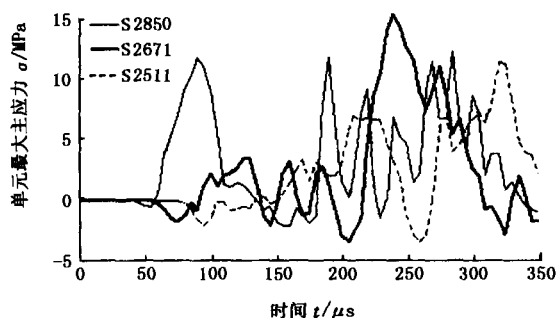
当爆炸压缩波传播到水泥块的侧表面时,就会反射成拉伸波,对水泥块边缘地带的拉伸应力最大,高于动态抗拉强度,在该处引起材料破坏,裂口足够大时,整块的裂片便会携带着其中的动量飞离。这种由压应力波在自由表面反射造成的动态断裂称为剥落或层裂^[3-6]。靠近边缘内部的拉应力会小于边缘地区的拉应力,不至于产生层裂,但会产生大量的损伤裂纹。实验中在水泥块剖面的边缘内侧看到的U型裂纹就是这样形成的,在水泥块顶面看到的S-T环向裂纹是这些损伤破坏在顶面的一种反映,与实验结果吻合。

3.4.2 中间K-H裂纹

入射到试样-水体界面和水体自由面的压缩波经反射会形成拉伸波,这些反射回来的拉伸波与人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,就会产生很强烈的作用效果,在实验中看到的贯穿水泥块中部的K-H裂纹就是这样形成的。拉伸带中单元最大主应力见图5。



(a) 作用效果示意图



(b) 应力曲线

图5 拉伸带中单元最大主应力

模拟激波在水泥试样中传播的过程中,可以看到一条连续而且明显的拉伸带,见图5(a)的深色带,即某一时刻形成了一条带内的单元都处于拉伸波作用的状态。取水泥块中的单元进行分析,在拉伸带中,单元S2671最大拉应力要高于其他单元,说明在这一点侧面反射的拉应力与底面反射的拉应力叠加最大(图5(b)),并超过水泥试样的抗拉强度,

水泥试样开始起裂并水平扩展。

3.4.3 顶部剪切带

激波对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。根据数值模拟结果估算水泥块中剪切作用的长度约为15 cm,深度约为6 cm,和实验中剪切破坏范围一致。

4 结 论

(1)在爆炸载荷作用下,水泥试样的损伤开裂分4个区域:压实破坏区、压实损伤区、拉伸损伤区、拉伸破坏区。

(2)压实损伤区具有较好的渗透特性,这对于水力裂缝层内爆炸采油技术的研究具有重要意义。

(3)预制剖面上的裂纹分布能反映出水泥试样内部裂纹分布的基本规律,但预制剖面对裂纹的起裂点及形成的裂纹尺度有影响。

(4)数值模拟计算分析获得了水泥试样中各种裂纹形成的应力条件,这对水泥试样内部裂纹起裂扩展机理的了解和“层内爆炸”技术施工参数的优化设计具有重要的指导意义。

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. On the stimulation of “exploding in fractures” in low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001,28(2):90-96.
- [2] 李传乐,王安仕,李文魁.国外油气井“层内爆炸”增产技术概述及分析[J].石油钻采工艺,2001,23(5):77-78.
LI Chuan-le, WANG An-shi, LI Wen-kui. The summarize and analysis of “exploding in fractures” in foreign countries[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001,23(5):77-78.
- [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,2002:62-65.
- [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] 张学言,闫澍旺.岩土塑性力学基础[M].天津:天津大学出版社,2004:55-59.
- [6] 李翼祺,马素真.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992:356-441.

(编辑 李志芬)