

爆炸波对水泥试样损伤破坏的实验研究

蒋金宝¹, 林英松¹, 阮新芳², 丁雁生³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中海油基地集团渤海研究院, 天津 300452; 3. 中国科学院力学研究所, 北京, 10081)

摘 要: 通过水中爆炸波对水泥试样的损伤破坏实验来模拟水力裂缝层内爆炸采油中激波使岩石损伤开裂的现象。结果表明, 试样预制剖面上的裂纹分布可以近似代表其内部的裂纹分布规律。观察到了四个破坏区域: 压实破坏区、压实损伤区、拉伸损伤区和拉伸破坏区, 并对这些区域特征做了详细描述; 利用冲击波的相关理论, 对水泥试样损伤开裂的机理做了初步分析。研究发现, 裂纹的起裂扩展与水泥试样的初始损伤有密切关系; 并且裂纹的形状受炸药与水泥试样尺度比值以及炸药的安放位置等条件控制。最后通过对压实破坏区渗透率实验, 发现压实破坏区也有较好的渗透性, 这对层内爆炸采油技术的深入研究具有重要意义。

关键词: 低渗透; 实验研究; 层内爆炸; 损伤破坏

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)06-0922-05

作者简介: 蒋金宝(1981-), 男, 博士研究生; 研究方向为油气井岩石力学与工程, 现主要做层内爆炸采油的基础研究工作。E-mail: jimmyboyupc@yahoo.com.cn.

Experimental research on damage and fracture by exploding waves on surface of samples in deep water

JIANG Jin-bao¹, LIN Ying-song¹, RUAN Xin-fang², DING Yan-sheng³

(1. College of Petroleum Engineering of China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, China; 2. Bohai Institute, COSL, Tangu 300452, China; 3. Institute of Mechanics, China Academy of Science, Beijing 10081, China)

Abstract: Based on the experiments of exploding on the surface of the cement sample, the phenomenon of the rock damage and fracture by shock waves in exploding was simulated. Through optimizing the experiment schemes and analyzing the experiment phenomenon, the damage and fracture of the cement sample by the shock waves were qualitatively and quantitatively described and explained. The damage and fracture was closely related with the initial damage, and the fracture form was closely related with the ratio of explosive and sample scale. It was shown that the fracture on the prefab section could nearly substitute the inner fracture of samples. The compressive area with finite permeability was found through simple experiments. It would be helpful to investigation of fracture in exploding.

Key words: low permeability; experimental research; exploding in fracture; damage and fracture

0 前 言

目前, 低渗透油气田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, 低渗透油藏的一个显著特点就是自然渗流能力差, 需要改造才能投产。低渗透油气藏常用的改造方法主要是水力压裂、高能气体压裂等。由于受到造缝机理的限制, 这些技术对低渗透油藏的改造效果尚不尽人意。如水力压裂, 裂缝的扩展受到地应力的控制, 裂缝具有方向性和单一性, 并且重复性较差, 二次改造效果不理想。高能气体压裂所产生的裂缝长度较短, 改造的范围有限。因此, 要实现低渗透油气藏的高效开发, 有必要研发新的改造技术。

为了高效开发低渗透油藏, 从造缝的作用机理出

发, 中国科学院力学研究所于 20 世纪 90 年代提出了层内爆炸改造低渗透油气田的设想。该设想的基本思路: 利用水力压裂技术将乳胶状炸药压入水力裂缝, 并采取不损毁井筒的技术措施点燃该炸药, 在激波和爆生气体的作用下, 水力裂缝周围的岩石产生大量的微裂纹, 这样, 地层渗透率就可得到大幅度提高, 整个地层的采收率也可得到大幅度提高^[1]。

裂缝内炸药爆炸对岩石的作用可分为两部分, 一是激波对岩石的损伤破坏, 二是爆炸产物对岩石的损伤破坏。由于二者对岩石破坏的机理不同, 同时研究

基金项目: 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)

收稿日期: 2006-06-21

难度较大, 并且从作用的先后顺序来看, 激波要先于爆炸产物。为此, 本文先用水中爆炸的方法对水泥试样进行激波损伤破坏实验研究。对于爆生气体对岩石的破坏作用, 以后会专门研究。

1 实验

由于岩石类材料本身具有非均匀性和各向异性, 做实验时测量数据散布较大, 不易做基础性研究。在自然界中跟岩石性质最为接近的就是水泥混凝土材料, 并且可以有效地控制水泥试样的力学性质, 使试样具有可重复性。

实验方法: 将一定尺度的水泥试样置于一定深度的水中, 把炸药紧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

试样材料为硅酸盐水泥, 按一定比例配制水泥浆, 注入自制的模具中成型, 24 h 后退模, 最后放在水中养护 28 d。单轴抗压强度在 40 MPa 左右。为了简化问题的复杂性, 水泥试样采取对称结构。本实验采用的是圆柱水泥试样, 直径为 30 cm, 高为 30 cm。为了观察水泥试样的内部裂纹, 采用了预制剖面, 这样就可以避免爆炸实验后, 水泥试样切割带来新的损伤。图 1 是预制剖面的水泥试样照片。



图 1 预制剖面水泥试样照片

Fig. 1 The photo of the sample

1.2 炸药的装配

在实验中, 为了避免把试样炸碎 (便于观察实验现象), 使用了一定长度的导爆索, 其密度 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 塑性炸药, 用探针法测得该炸药的爆速为 6900 m/s, 用排水法测得其密度为 1.42 g/cm³。将雷管、炸药和导爆索按顺序装好后用胶带裹紧, 紧贴在水泥试样的表面, 见图 2。实验之前对雷管做了防水处理。

1.3 实验过程

把预制好的水泥试样放在足够深的水中, 用水将爆生气体的作用消除, 然后把装配好的炸药贴在水泥

表面, 用干电池通过导线引爆雷管, 雷管引爆炸药和导爆索。在爆炸波的作用下, 水泥损伤开裂。



图 2 实验现场照片

Fig. 2 The in-situ photo of the exploding experiment

2 实验现象与结果分析

2.1 水泥试样损伤破坏区域描述

在水泥试样的表面和预制剖面上, 观察到了四个区域: 压实破坏区、压实损伤区、拉伸破坏区和拉伸损伤区。

(1) 压实破坏区

实验后发现, 所有试样在炸药的安放位置均出现了一个压实坑, 在压实坑的周围, 水泥试样的表面出现了剥蚀的痕迹。在压实坑中, 其中三块有三条裂缝 (见图 3), 长度大约为 2~3 cm, 在这三条裂缝中, 有一条与炸药的安放方向基本一致, 另外两条裂缝与炸药的安放方向大致成 120° 的夹角。还有一块只有一条压实裂缝 (见图 4)。经分析认为, 产生裂缝的条数, 与载荷的大小、加载速度以及材料本身的性质以及试样初始损伤有关。



图 3 三条裂纹照片

Fig. 3 The photo with 3 fractures in failure zone

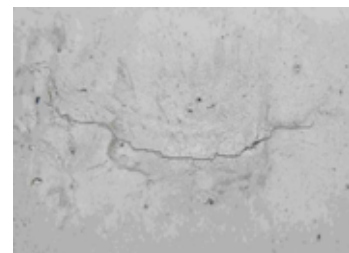


图 4 一条裂纹照片

Fig. 4 The photo with 1 fracture in failure zone

(2) 压实损伤区

从试样的上表面观察 压痕与导爆索的长度相关, 除了一块试样为 17 cm 之外, 还有一块为 12.5 cm, 后面两个都在 11 cm 上下, 宽度都差不多 2 cm 左右。在上表面, 每一块试样都有一个压实坑, 形状近似是半径为 1~2 cm 的球冠, 深度为 0.5~1 cm。坑的里面有大量的径向微裂纹分布。从预制的剖面上观察, 可以看到明显的半圆形波状剪切压实带。

图 5 是水泥试样剖面上损伤区的照片, 上表面有一个球冠状的圆坑, 从预制剖面上看, 圆坑的直径大约为 4 cm, 高度为 0.5 cm; 在预制剖面上, 观察到了一道道圆弧装的波纹, 波纹明显高于预制的剖面, 并且发现它们基本上是同心的。经过初步分析认为是在激波的作用下, 水泥试样发生剪切破坏造成的。

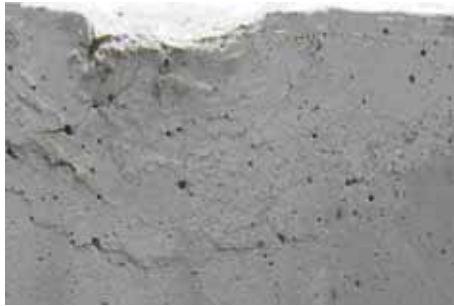


图 5 压实区照片

Fig. 5 The photo of the compressive damage zone

通过仔细观察压实损伤区后, 还发现, 在该区中, 剪切波纹与水泥试样的气孔关系密切。在气孔附近, 基本上都有剪切波纹分布。原因是气孔的存在降低了水泥试样的强度; 在激波作用下, 气孔附近产生应力集中, 所以该处更易于破坏。

为了验证压实区的渗透性好坏, 做了简易的渗透率实验, 发现水可以很快地渗透到压实区中, 通过预制剖面, 可以明显地观察到压实损伤区的颜色变深, 与饱和水泥试样的颜色接近, 如图 6 所示。分析认为, 在激波的作用下, 水泥试样发生剪切破坏, 形成大量贯穿的剪切微裂纹, 使该区域具有较好的渗透性。由于爆炸波在水力裂缝内对岩石的破坏作用是以压剪破坏为主, 因此本实验的分析结果对于层内爆炸采油技术的深入研究具有重要意义。

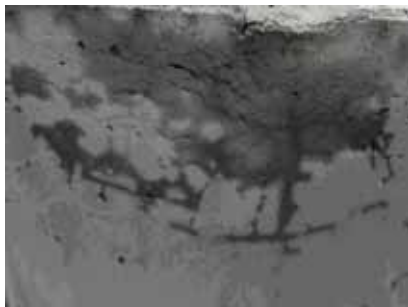


图 6 渗透实验

Fig. 6 The photo of the permeability test

(3) 拉伸损伤区

从试样上表面看 (图 7 (a)), 拉伸损伤区有近似同心环形裂纹, 长轴的方向基本上与装药的方向一致, 椭圆的长轴和短轴非常接近, 也可近似看作同心圆。它的位置、形状与炸药安放位置及其尺度等有关。在环形裂纹内侧和外侧布有许多径向裂纹和少量其他方向上的裂纹, 它们相互交错, 形成裂缝网络, 这些裂纹的起裂一般与气孔有关。环形裂纹缝宽大小不一, 基本上在 1 mm 以内。从表 1 的数据可以看到, 炸药的长度越短, 环形裂纹约接近圆形。环向裂纹特征见表 2 所示。

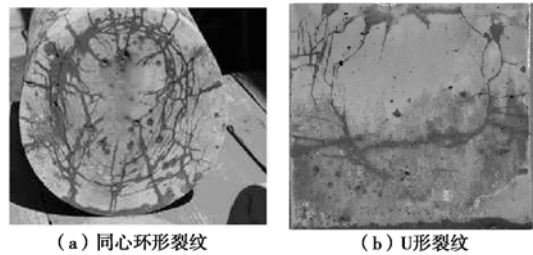


图 7 拉伸损伤区照片

Fig. 7 The photo of tensile damage zone

表 1 装药条件表

Table 1 Loading conditions for the sample

试样	装药条件
1	一个雷管 + 1.5 g 塑性炸药 + 15 cm 的导爆索
2	一个雷管 + 1.5 g 塑性炸药 + 9 cm 的导爆索
3	一个雷管 + 1.5 g 塑性炸药 + 8 cm 的导爆索
4	一个雷管 + 1.5 g 塑性炸药 + 8 cm 的导爆索

表 2 环向裂纹的特征表

Table 2 The characteristics for the hoop fracture 单位: cm

试样	压实坑距边缘最近距离	压痕方向上环型裂纹到边缘最近/最远距离	压痕垂向上环型裂纹到边缘最近/最远距离	环型裂纹的长轴/短轴
1	9.5	3.0/4.5	5.5/5.5	22.5/19.0
2	11.0	3.0/3.0	4.5/4.0	24.0/21.5
3	12.0	4.0/2.5	5.0/3.0	23.5/22.0
4	15.0	6.0/1.0	5.0/6.0	23.0/19.0

在试样的预制剖面上 (图 7 (b)), 看到了开口向上的近似 U 型裂纹, 裂纹距两侧的距离大约为 5 cm, U 形裂纹的高度大约 15~18 cm。

(4) 拉伸破坏区

从图 8 中可以明显地观察到试样的拉伸破坏区域, 其拉伸破坏区与拉伸损伤区的边界呈敞口 U 形。经过对比分析, 发现 U 形的敞口大小与炸药和水泥试样的尺度有关。

2.2 预制剖面分析

为了观察水泥试样内部的裂纹, 提出了在水泥试样上作预制剖面的设想, 但现在存在这样的疑问: 水

泥试样拼接面上的裂纹能否代表水泥试样内部的裂纹分布。从图9和图10中可以看到, 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, 可以认为剖面上的裂纹是可以近似代表试样内部裂纹的分布规律。

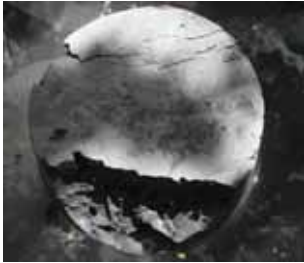


图8 拉伸破坏区照片

Fig. 8 The photo of tensile failure zone

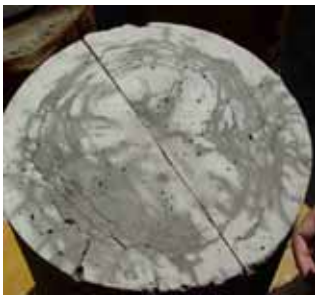


图9 预制剖面试样的上表面照片

Fig. 9 The photo for the top surface of the sample

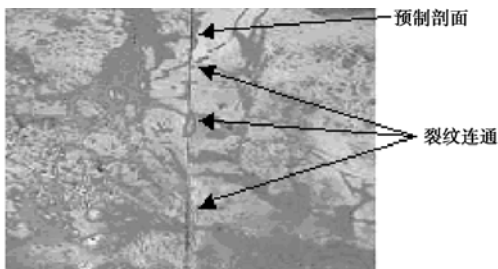


图10 试样的侧表面照片

Fig. 10 The photo for the side face of the sample

3 水泥试样损伤破坏的力学机理分析

3.1 动载条件下岩石微裂纹的起裂及扩展机理

(1) 动载作用下岩石微裂纹的起裂

Atkinson 通过大量的研究得出^[2]: 岩石介质所含随机微裂纹在动载作用下的演化, 是导致动载破岩的重要原因, 另外还提出了一个能量的观点, 认为岩石变形动能与新生表面能之和的极值, 是导致动载破岩主要原因。

王明洋、钱七虎^[3]等人从微观和细观的角度解释了岩石微裂纹的起裂。在微观水平上, 对于由晶粒构成的岩石, 由于各种晶体具有不同的力学和热力学性能, 在应力的作用下引起应力微集中, 结果就在颗粒

内部或者颗粒的边界上造成一些内在的位错, 位错发生的小距离移动引起部分粒内应力和粒间应力的松弛, 另一部分由于晶体间的摩擦阻力作用引起的应力累计以封闭的形式存在, 封闭应力随着热活化, 达到进一步松弛。随着变化过程中位错密度的增加, 各种物理的不连续就随之增加, 当达到它的临界数值时, 在较长的晶格区域内就会丧失剪切稳定性。进入局部破坏状态。在细观水平上, 初始或者在变形的过程中形成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。因此, 子构造内部应当与此相适应的塑性变形发展, 以保证子构造元素与相邻者之间的适应性, 并以此保证岩石变形的相容性。在不同的尺度的构造、不均匀元素的细观体积中的不均匀变形的发展, 形成了不均匀的应力场, 在最大且应力方向上就形成了局部剪切带, 在剪切带区域中, 子构造内部的剪切变形不可能进一步发展, 导致非相容变形的产生, 就导致在该处出现不连续, 就产生了细观裂纹。

(2) 动载条件下微裂纹的扩展

微裂纹扩展的实质上是多裂纹间起裂的竞争问题。裂纹扩展速度受到流体的补给速度的制约。在同一时刻, 多个初始裂纹中应力强度因子大的裂纹易扩展。若载荷不变, 随裂纹扩展其应力强度因子增加, 初始应力强度因子大的裂纹增加得最大; 若载荷随裂纹扩展衰减, 初始应力强度因子大的裂纹衰减得最慢。这将导致易已扩展的裂纹更易扩展, 即初始裂纹的小差别将导致最终结果的大差别。裂纹的扩展是一种结构响应, 不像激波响应那样快, 它需要一定时间。如果流体补给速度太快, 裂纹来不及扩展, 那么就会看到载荷迅速上升, 使得多个裂纹都能扩展。如果流体补给速度很慢, 那么就会看到载荷缓慢上升, 只有初始应力强度因子最大的裂纹能够扩展。

(3) 裂纹群的演互作用

裂纹之间的相互作用将产生局部的弱化并最终导致岩石的宏观失效^[4-5]。岩石材料的断裂过程的主要特征可由两种机制来描述: 第一种是与预存裂纹的有效扩展有关, 在裂纹扩展的后一阶段相互作用起主导作用, 这种机制引起劈裂破坏; 另一种机制是小裂纹的成核和新裂纹的形成与扩展, 在岩体内形成局部破坏区。在这一区域裂纹数量的增加比裂纹扩展更为敏感, 这一机制可以预测岩石的剪切断裂。

3.2 激波在水泥试样的传播过程以及裂纹的起裂扩展机理

(1) 上表面

在试样的上表面, 炸药起爆后激波以环形向外传播, 对水泥试样产生一径向压力, 岩石出现压剪破坏,

形成压实破坏区和损伤区。当激波的强度降到岩石的动态抗压强度损伤阈值时,激波所处的位置为试样损伤区的边界。

由于径向受压,水泥颗粒有个离心的位移,导致环向产生拉伸应力。由于水泥的抗拉性能差,因此出现径向裂纹并扩展。当该应力低于水泥试样的动态断裂韧性时,裂纹停止扩展。

当激波到达水泥试样的边缘,激波发生反射。由于水的声抗低于水泥试样的声抗,激波向水投射径向压缩波;同时,向水泥试样反射径向稀疏波,该稀疏波并同压缩波叠加,在某些位置叠加波的强度可能大于水泥试样的动态断裂韧性,因此,就会产生环状裂纹,由于径向的拉应力作用,在边缘处受到的环向拉伸应力最大,再加上该位置的应力集中效应,在边缘处水泥试样最先出现径向裂纹,在环向拉伸应力的作用下,向水泥试样内部扩展,部分裂纹与环向裂纹交错,形成网格状的裂纹(图9)。从上述分析可以发现,环形裂纹内外的径向裂纹产生的原因不同,环形裂纹内的环向应力是由于径向上的压缩,而环形裂纹之外的环向应力是由于径向上的拉伸引起的。

(2) 剖面

在剖面上,炸药起爆后,激波在水泥试样中向下传播,在其强度衰减到水泥试样的损伤阈值之前,水泥试样出现压剪破坏或者损伤,当冲击波的强度衰减到水泥试样的动态损伤阈值时,激波的位置为水泥试样压实损伤区的边界。

由于水泥试样的半径为15 cm,高为30 cm,因此激波首先到达侧边。激波发生反射,由于水的声抗低于水泥试样的声抗,激波向水投射压缩波;同时,向水泥试样反射稀疏波,并与压缩波叠加。在某些位置稀疏波的强度可能大于压缩波的强度,水泥试样出现径向的拉伸应力,该应力达到岩石的损伤阈值时,水泥试样出现拉伸损伤或破坏。

当激波达到底端时,激波发生反射,并向水泥试样反射轴向稀疏波,并与压缩波叠加。在某些位置稀疏波的强度大于压缩波的强度,水泥试样出现轴向拉伸应力。当该应力达到岩石的损伤阈值时,水泥试样出现拉伸损伤或破坏。当该应力低于岩石的损伤阈值时,裂纹停止扩展。当侧向反射的拉伸波和底面反射的拉伸波出现叠加时,拉伸裂纹就会出现转向,由于侧面反射拉伸波底端,拉伸波基本上是轴对称的,裂纹转向的位置也基本上是轴对称的,在两个拉伸应力的作用下,裂纹就会向中间扩展,这样,两个裂纹的尖端应力场就会出现叠加,使得裂纹迅速扩展直到连通,这就形成了我们在剖面上所看到的U型裂纹,U

型裂纹的位置在距水泥试样顶部三分之二的位置。

由以上分析可知,预制剖面上的U型裂纹主要是由于波的反射及其叠加造成的,因此,U型裂纹的几何特征以及其位置与炸药的位置、水深、水泥试样的尺寸特征(直径与高之比)等密切相关。

4 结 论

(1) 激波作用下,水泥试样损伤开裂,形成四种区域:压实破坏区、压实损伤区、拉伸损伤区、拉伸破坏区。

(2) 通过实验观察与理论分析,发现拉伸区上表面裂纹的形状与炸药、水泥试样的尺度的比值等有关;预制剖面上U型裂纹特征与炸药、水深、水泥试样尺寸等参数有关。

(3) 通过简易的渗透率实验,发现激波产生的压实区具有较好的渗透特性,这种现象对水力裂缝层内爆炸技术的深入研究具有重要意义。

(4) 从实验现象可以得到,裂纹的起裂扩展和水泥试样的初始损伤(如气孔)密切相关。

(5) 通过实验现象分析,证实预制剖面的裂纹就可以近似代表水泥试样内部裂纹的分布规律。

参考文献:

- [1] 丁雁生,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, et al. On the simulation of exploding in fractures in low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 90-96. (in Chinese))
- [2] ATKINSON B K. 岩石断裂力学[M]. 北京: 地震出版社, 1992. (ATKINSON B K. Fracture mechanics of rock[M]. Beijing: Seismic Press, 1992. (in Chinese))
- [3] 王明洋,等. 爆炸载荷作用下岩石的变形和破坏研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 9-20. (WANG Ming-yang et al. Study of deformation and failure of rock under explosion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(3): 9-20. (in Chinese))
- [4] 张晓春, 杨挺青. 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. (ZHANG Xiao-chun, YANG Ting-qing. The new advances of crack development and mechanical process of rock[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(1): 97-104. (in Chinese))
- [5] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. (YU Shou-wen, FENG Xi-qiao. Damage mechanics[M]. Beijing: TsingHua University Press, 1997. (in Chinese))