

利用爆炸技术改善低渗透储层的实验研究

蒋金宝^{1,2}, 林英松², 丁雁生³

(1. 中原石油勘探局 钻井工程技术研究院 博士后站, 河南 濮阳 457001; 2. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061;

3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100081)

摘要: 为了更好地开发低渗透油气藏, 首先介绍“层内爆炸”增产技术的基本思路, 然后用水中炸药界面爆炸对水泥试样损伤破坏的实验来模拟水力裂缝“层内爆炸”增产中激波使岩石损伤开裂的现象。通过实验观察到 3 个损伤区域: 压剪损伤区, 拉伸损伤区和边界损伤区, 并且微裂纹的启裂扩展与水泥试样的初始损伤有关。分析发现: 压剪损伤区和拉伸损伤区内裂纹的密度与装药量相关; 压剪损伤区和拉伸损伤区半径分别为装药当量半径的 2~5 和 20~30 倍; 量纲分析表明, 损伤区半径与装药当量半径成线性关系。通过简易渗透率实验, 发现压实区有一定的渗透率, 这对“层内爆炸”采油技术的研究具有重要意义。最后, 定性分析激波在试样中的传播过程以及试样微裂纹的启裂扩展机制。

关键词: 采矿工程; 低渗透储层; 实验研究; 层内爆炸; 损伤

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 2830 - 06

EXPERIMENT RESEARCH ON LOW PERMEABILITY RESERVOIR IMPROVED BY EXPLOSION TECHNOLOGY

JIANG Jinbao^{1,2}, LIN Yingsong², DING Yansheng³

(1. *Postdoctoral Station of Drilling Engineering Technology Institute, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan 457001, China;* 2. *School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;*

3. *Institute of Mechanics, China Academy of Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: In order to exploit the low permeability reservoir effectively, the stimulation technology of exploding in fracture is introduced. By the experiment of exploding on the surface of the cement sample in deep water, the phenomenon of the formation rock damage and fracture by exploding wave is simulated. Through optimizing the experiment scheme, there are 3 damage zones are observed, namely, the compressive shear damage zone, the tension damage zone and the damage zone on the boundary; and the initiation and propagation of the micro-fracture have a close relationship with the initial damage of the cement sample. The fracture density in the shear damage zone and tension damage zone has a relationship with the equivalent radius of the explosive load; and the scales of the compressive shear damage zone and the tensile damage zone are 2 - 5 times and 20 - 30 times of the equivalent radius of the explosive load respectively. By dimension analysis, it is found that the scales of the shear damage zone and the tension damage zone have a linear relationship with the equivalent radius of the explosive. By simple experiment, it is found that the compressive shear area has finite permeability, which has an important meaning to exploding in fracture. At last, the exploding wave propagation progress and the damage and fracture mechanism are both explained qualitatively.

Key words: mining engineering; low permeability reservoir; experimental research; exploding in fracture; damage

收稿日期: 2007 - 11 - 14; **修回日期:** 2008 - 01 - 10

基金项目: 国家高技术研究发展“863”计划重点项目(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, 2008 年于中国石油大学(华东)油气井工程专业获博士学位, 现为中原石油勘探局钻井工程技术研究院在站博士后, 主要从事动载破岩实验、钻井工程等方面的研究工作。E-mail: jimmyboyupc@yahoo.com.cn

1 引言

目前, 低渗透油气田已经成为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, 需要改造才能得到高效开采。

常用的低渗透油藏改增产技术主要有水力压裂、高能气体压裂等, 由于受地层造缝机制的限制, 这些技术对低渗透油藏的改造效果具有一定的局限性。如水力压裂, 一般只能产生一对裂缝, 且裂缝具有“方向性”; 高能气体压裂虽可产生多条径向裂缝, 但裂缝的长度较短, 这些技术对低渗透油藏的改善效果不尽满意。为了能高效开发低渗透油藏, 有必要研究新的改造方法。

2 水力裂缝“层内爆炸”增产技术简介

2.1 水力裂缝“层内爆炸”增产技术的提出

为了高效开发低渗透油藏, 从造缝的作用机制出发, 结合水力压裂和爆炸压裂的优势, 中国科学院力学研究所提出“层内爆炸”改造低渗透油气田的构想, 其基本思路是: 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, 在主裂缝周围产生大量微裂缝, 从而达到提高采收率的目的。层内爆炸增产技术不仅有希望显著提高难采低渗透油气田的采收率, 还有可能把一些目前还不可采的低渗透油气藏改造成可采资源^[1]。

2.2 水力裂缝“层内爆炸”增产技术可行性分析

“层内爆炸”增产技术是否可行, 存在着以下 4 个方面的技术问题: (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) 爆炸后对岩石产生何种效果; (4) 残余在地层内的颗粒会不会对地层造成严重污染。

经过多年的努力, 实验和理论都证实了这项技术的可行性:

(1) 药品可以通过压裂液携入水力裂缝中, 达到预定位置。图 1 为层内爆炸技术施工示意图, 右上角部分就是现场调配炸药和压入炸药的装置及工艺的示意图。由此看来借助水力压裂工艺技术, 将药品携入水力裂缝不难实现。

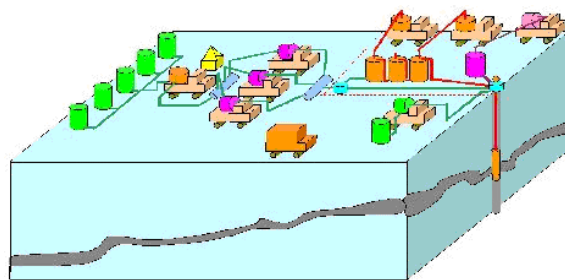


图 1 层内爆炸技术施工示意图

Fig.1 Sketch of construction technology of exploding in fracture

(2) 爆炸物理学研究表明, 炸药的爆轰爆燃存在一个临界尺度, 小于这个尺度炸药将不能稳定爆轰或者爆燃。在“层内爆炸”增产技术中, 使用的炸药为军工高能炸药, 其临界尺度在 1 mm 左右, 而水力压裂的缝宽一般在几个毫米至几十个毫米。由此可见, 炸药在地层内产生稳定爆轰爆燃是可行的。另外, 地层的高温高压等性能对炸药的稳定爆轰是有利的。

(3) 高能气体压裂、井内爆炸和核爆炸技术的研究表明, 炸药在油藏内爆炸可产生不受地应力控制的多条裂缝。图 2 给出了爆炸破岩效果图。



(a) 激波



(b) 爆生气体

图 2 爆炸破岩效果

Fig.2 Effect of rock damage and fracture by exploding

第 4 个问题的答案是: 层内爆炸使用的炸药为

有机炸药, 亲油的, 不会对地层造成太大的污染。

2.3 水力裂缝“层内爆炸”增产技术安全性分析

这项技术的安全性主要包括: 人身安全、设备安全和产出液后处理安全。在作业的过程中, 只要操作者按照操作规程作业, 人身和设备都是安全的, 产出液后处理的安全问题是人们最关心的问题, 丁雁生等^[1]对产出液的安全性做了全面分析, 认为产出液的后处理过程是安全的。

3 水力裂缝“层内爆炸”增产技术模拟实验研究

水力裂缝内爆药的爆炸对岩石的破坏作用可分为 2 个部分: 一部分激波对岩石的损伤, 另一部分是爆炸产物对岩石的损伤。由于二者对岩石的破坏机制不同, 同时研究困难较大, 并且从作用的顺序来看, 激波要先于爆炸产物, 为了便于研究, 首先研究激波对岩石的破坏作用, 为此本研究利用水中炸药爆炸对水泥试样损伤破坏实验来模拟“层内爆炸”增产中激波使岩石损伤开裂的现象。

由于岩石类材料具有很强的各向异性, 实验数据散布较大, 不易做基础研究。在自然界中跟岩石性质最为接近的是水泥材料, 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, 因此在本实验中, 拟采用水泥试样代替天然岩石。

本模拟实验的基本思想: 将一定尺度的试样置于水中, 把炸药紧贴在试样的上表面, 用雷管起爆, 观察水泥试样损伤破坏的情况。采取在水中做爆炸实验, 一方面可以消除爆炸产物对水泥试样的损伤破坏作用, 另一方面也可以削弱由于边界所造成的反射拉伸波对试样的损伤破坏作用^[2~6]。

另外, 研究中采用一系列措施确保实验结果与爆炸激波对地层岩石的损伤作用相似。由于地层中没有边界, 而水泥试样的尺度是有限的, 因此本实验是存在边界的, 在实验方案设计和实验过程中认真考虑了边界因素的影响, 并设法减少其影响; 在进行理论分析时, 利用相似原理进行分析, 确保实验结果具有一定程度的普适性。

3.1 水泥试样的制备

为了简化问题的复杂性, 试样采取对称结构: 圆柱水泥试样, 直径为 600 mm, 高为 200 mm。试样材料是普通硅酸盐水泥。制作时先把水和水泥按照一定的比例配制水泥浆, 然后注入自制模具中成型, 24 h 退模, 最后放在水中养护 28 d, 28 d 的强

度为 40 MPa 左右。水泥试样照片见图 3。为了观察水泥试样的内部裂纹, 采用了预制剖面的方法, 该方法可以避免实验后水泥试样的切割带来新的损伤。



图 3 水泥试样照片

Fig.3 Cement sample photo

3.2 炸药及其与试样的装配

实验所用炸药为塑性炸药, 在实验之前, 对其基本参数进行了测量: 用探针法测得炸药的爆速为 6 900 m/s, 用排水法测得炸药的密度为 1.42 g/cm³; 将捻和在一起的炸药和雷管紧贴在水泥试样上表面, 然后放入爆炸水箱中; 选择对应的通道连接测试线, 确定无误后, 盖上防水布, 将雷管线和起爆引线平放在地上, 延伸到安全地方, 便于操作; 检查实验设备, 确保无误后可以用雷管引爆炸药。

3.3 实验过程

将装配好的水泥试样放在足够深的水中, 用干电池通过导线引爆雷管, 雷管引爆炸药。在爆炸载荷的作用下, 水泥试样损伤开裂。

4 实验现象与结果分析

4.1 水泥试样损伤破坏区域描述与划分

在水泥试样的表面和预制剖面上可以观察到 3 个损伤区域: 压剪损伤区, 拉伸破坏区和边界损伤区^[6~11]。

(1) 压剪损伤区

炸药爆炸后, 水泥试样的破坏是一个相当复杂的动力学过程。首先是在炸药爆炸瞬间所产生的高强度爆炸激波作用下, 邻近装药的水泥材料受到强烈压缩, 结构完全破坏, 颗粒被压碎, 材料发生塑性流动。局部水泥材料因受激波的挤压而发生径向运动, 形成一个压实坑(见图 4)。在这个区域外围, 还存在一个水泥变形较高的区域。在此区域内可以观察到一道道圆弧状的波纹, 该波纹明显高于预制的剖面, 并且发现它们基本上是同心的。本文将由

一个压实坑和沿着压实坑呈半环形分布的裂隙区构成的区域定义为压剪损伤区。初步分析认为, 该区是在激波的作用下水泥试样发生剪切破坏所形成的。

通过仔细观察压实损伤区, 发现在该区中, 剪切裂纹与水泥试样的初始损伤(如气孔)关系密切, 原因之一是初始损伤的存在降低了水泥试样的强度, 使得该处的水泥易于破坏; 原因之二是在初始损伤附近(如气孔)附近, 水泥试样产生应力集中, 该处也容易破坏。

为了验证压实区的渗透性, 做了简易的渗透率实验, 发现水可以渗透到压实区中。在预制的剖面上, 明显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, 这就说明压剪损伤区具有一定的渗透率。原因如下: 在激波的作用下, 水泥试样发生剪切破坏, 在剪切微裂缝里面, 有水泥的破碎颗粒, 把裂缝支撑开, 保持较好的渗透性(见图 4(b)), 该现象对于层内爆炸采油的意义重大, 这是因为“层内爆炸”时, 在水力裂缝附近是要产生压剪损伤区的, 而该实验说明, 压剪损伤区内大量微裂纹的存在, 使得原先的孔隙以及新产生的微裂纹之间互相连通, 从而实现渗透率的大幅度提高。

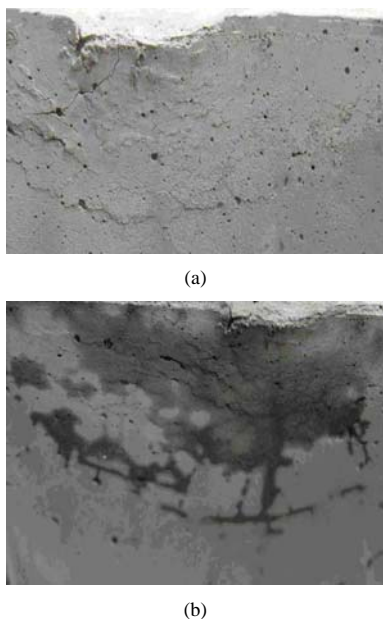


图 4 试样压剪损伤区照片
Fig.4 Shear damage zone photos of sample

通过量纲分析, 发现损伤区半径是装药当量半径的函数, 通过测量不同装药条件下压剪损伤区半径, 发现整个压剪损伤区半径为装药当量半径的 2~5 倍。通过对所测损伤区半径及与之对应的装药当量半径进行回归, 发现压剪损伤区半径与装药当

量半径呈线性关系(见图 5)。

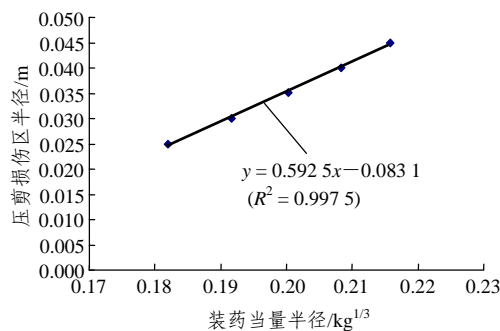
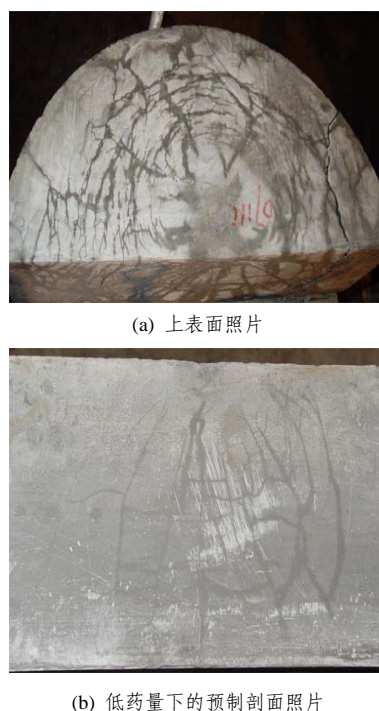


图 5 压剪损伤区半径与装药当量半径拟合图
Fig.5 Fitting curve of compressive shear damage zone radius and explosive equivalent radius

(2) 拉伸损伤区

经过压剪损伤区的衰减, 激波强度大幅度降低, 并以球面向外传播。试样在径向上受压, 而切向方向将产生拉应力和拉伸变形。由于水泥的抗拉强度远小于抗压强度, 试样易被拉断。当切向拉应力大于水泥的动态抗拉强度损伤阈值时, 该处的水泥被拉断, 构成与粉碎区连接的径向裂隙。当断裂强度因子小于试样的断裂韧性时, 裂纹停止扩展。在本文, 将径向裂隙区域定义为拉伸损伤区。

在上表面和预制剖面上观察到了大量的径向裂纹。图 6 爆炸后试样拉伸损伤区照片, 中图是低药量下的预制剖面照片, 右图为高药量下预制剖面照片, 比较图 6(b), (c)可以发现, 图 6(b)的裂纹密度明显小于图 6(c)的裂纹密度。



(b) 低药量下的预制剖面照片



(c) 高药量下预制剖面照片

图6 爆炸后试样拉伸损伤区照片

Fig.6 Extension damage zone photos of sample after explosion

通过量纲分析,发现拉伸损伤区半径也是装药当量半径的函数,通过测量不同装药条件下压剪损伤区半径,发现整个拉伸损伤区尺度为装药尺度20~30倍。通过对所测损伤区半径及与之对应的装药当量半径进行回归,发现拉伸损伤区半径与装药当量半径呈线性关系(见图7)。

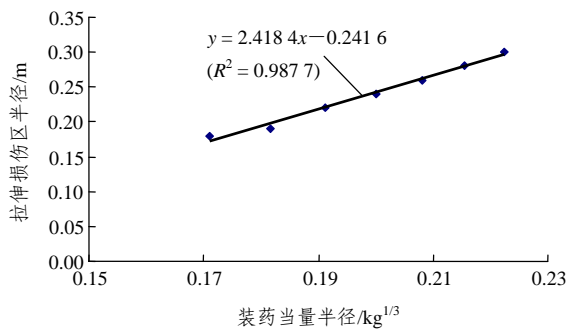


图7 拉伸损伤区半径与装药当量半径的拟合图

Fig.7 Fitting curve of tensile damage zone radius and explosive equivalent radius

(3) 边界损伤区

当激波传到水泥边界时,由于水的声抗低于水泥试样的声抗,应力波向水中投射压缩波,同时向水泥试样反射稀疏波,并同应力波叠加。在某些位置,当该应力达到水泥试样的动态抗拉强度损伤阈值时,水泥试样就会出现环向的拉伸损伤或破坏。由于环向上的拉伸作用,水泥颗粒出现向外运移,因此在径向上也有拉伸应力。在该拉伸应力的作用下,微裂纹出现扩展,延伸到水泥试样的边缘。在本文把该环形裂隙带及以外的区域定义为边界破碎区。

由于边界损伤区的成因主要是由于激波在边界的发射造成的,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,在此,

没做细致的研究。

4.2 激波在水泥试样中的传播过程以及裂纹的启裂扩展机制

为了便于研究,下面分别阐述激波在试样的表面和预制剖面上的传播过程,并分析了激波对水泥试样的破坏作用以及裂纹的起裂扩展机制^[12~15]。

(1) 上表面

炸药起爆后,爆轰波开始以环形向外传播,并逐步衰减为激波,此时水泥试样在径向上受压,在激波的强度大于水泥试样的动态抗压强度损伤阈值,岩石出现压剪破坏,就会形成所观察到的压剪损伤区。当激波的强度低于岩石的动态抗压强度损伤阈值的时候,裂纹停止扩展,此时激波所处的位置为压剪伤区的边界。

由于径向受压,因此在环向上产生拉伸应力。由于水泥的抗拉强度很低,易于被拉断,当该应力达到、超过水泥试样的动态抗拉强度损伤阈值时,试样就会出现径向的拉伸裂纹并扩展。当断裂因子小于水泥试样的动态断裂韧性时,裂纹停止扩展。此时激波所处的位置即为拉伸损伤区的边界。

(2) 剖面

在剖面上,炸药起爆后,爆轰波向下传播并衰减为激波,在其强度衰减到水泥试样的动态抗压强度损伤阈值之前,水泥试样出现压剪损伤,当冲击波的强度衰减到水泥试样的动态抗压强度损伤阈值时,激波的位置为水泥试样压实损伤的边界。

激波以半环形向下传播,试样在径向受压,因此在环向上产生拉伸应力。水泥的抗拉强度很低,易于被拉断,当该应力达到或超过试样的动态抗拉强度损伤阈值时,水泥试样就会出现环向的拉伸裂纹并扩展。当断裂因子小于水泥试样的动态断裂韧性时,裂纹停止扩展。此时激波所处的位置即为拉伸损伤区的边界。

由于边界损伤区的成因主要是由于激波在边界的发射造成的,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,在此,没做细致的研究。

5 结 论

(1) 水力裂缝“层内爆炸”增产技术可能成为开发渗透油气田最有效的方法之一。

(2) 水中炸药表面爆炸对饱和水泥试样损伤破

坏实验可以模拟激波使岩石损伤开裂的现象。在激波的作用下, 试样损伤开裂分 3 个区域: 压剪损伤区, 拉伸损伤区和边界损伤区。

(3) 压剪损伤区和拉伸损伤区内裂纹的密度与装药量相关, 其半径分别为炸药装药当量半径的 2~5 和 20~30 倍, 量纲分析表明, 压剪损伤区和拉伸损伤区半径与装药当量半径成线性关系。

(4) 分析发现, 微裂纹的启裂扩展与水泥试样的初始损伤密切相关。

(5) 压剪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的意义。

参考文献(References):

- [1] 丁雁生, 陈力, 谢变, 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 Yansheng, Chen Li, XIE Xie, et al. On the stimulation with exploding in fracture in low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 90 - 96.(in Chinese))
- [2] 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, 2006, 30(3): 55 - 58.(LIN Yingsong, JIANG Jinbao, ZHU Tianyu, et al. Research of cement sample's damage and fracture by exploding load[J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(3): 55 - 58.(in Chinese))
- [3] 蒋金宝, 林英松, 阮新芳, 等. 低渗透油藏改造技术的研究进展[J]. 钻采工艺, 2005, 28(5): 50 - 53.(JIANG Jinbao, LIN Yingsong, RUAN Xinfang, et al. Development of low permeability reservoir improvement[J]. Drilling and Production Technology, 2005, 28(5): 50 - 53.(in Chinese))
- [4] 阮新芳. 激波对水泥试样损伤分析及实验研究[硕士学位论文][D]. 东营: 中国石油大学, 2006.(RUAN Xinfang. Damage analysis and experimental study of cement sample under blast wave[M. S. Thesis][D]. Dongying: China University of Petroleum, 2006.(in Chinese))
- [5] 林英松, 蒋金宝, 孙丰成, 等. 爆炸技术与低渗透油气藏增产[J]. 钻采工艺, 2007, 30(5): 50 - 53.(LIN Yingsong, JIANG Jinbao, SUN Fengcheng, et al. Exploding technology and low permeability reservoir improvement[J]. Drilling and Production Technology, 2007, 30(5): 50 - 53.(in Chinese))
- [6] 王莉. 激波对饱和水泥试样损伤破碎尺度的实验研究[硕士学位论文][D]. 东营: 中国石油大学, 2007.(WANG Li. Experimental study of the scale of cement sample's damage and fracture zone by exploding wave[M. S. Thesis][D]. Dongying: China University of Petroleum, 2007.(in Chinese))
- [7] 陈士海, 王明洋, 钱七虎. 岩体中爆破破坏分区研究[J]. 爆破器材, 2004, 33(3): 33 - 36.(CHEN Shihai, WANG Mingyang, QIAN Qihu. Study on distinction of blasting crack zones and time course of stress in rocks[J]. Explosion Materials, 2004, 33(3): 33 - 36.(in Chinese))
- [8] 王明洋, 葛淘, 戚承志, 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 Mingyang, GE Tao, QI Chengzhi, et al. Study of deformation and failure of rock under explosion[J]. Journal of Disaster Prevision and Mitigation Engineering, 2003, 23(3): 9 - 20.(in Chinese))
- [9] 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(6): 917 - 921.(JIANG Jinbao, LIN Yingsong, RUAN Xinfang, et al. Experiment research on damage and fracture by exploding wave on surface of samples in deep water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 917 - 921.(in Chinese))
- [10] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005: 100 - 110.(TAN Qingming. Dimensional analysis[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005: 100 - 110.(in Chinese))
- [11] 田和金, 李 灏, 王爱华, 等. 岩石动力学实验及其在油气田开发中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 889 - 894.(TIAN Hejin, LI Dang, WANG Aihua, et al. Dynamic mechanics experience of rock and its application to development of oil field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 889 - 894.(in Chinese))
- [12] 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 Xiaochun, YANG Tingqing. The new advances of crack development and mechanical process of rock[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(1): 97 - 104.(in Chinese))
- [13] 林英松, 朱天玉, 蒋金宝, 等. 水中爆炸激波对水泥试样作用的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 462 - 467.(LIN Yingsong, ZHU Tianyu, JIANG Jinbao, et al. Numerical simulation analysis of effect on the cement sample by blast wave in water[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 462 - 467.(in Chinese))
- [14] 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: 70 - 104.(DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 70 - 104.(in Chinese))
- [15] 周 钟, 王肖钧, 赵 凯, 等. 水饱和岩石中爆炸应力波传播的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 296 - 302.(ZHOU Zhong, WANG Xiaojun, ZHAO Kai, et al. Numerical simulation for blast wave in water saturated rock[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 296 - 302.(in Chinese))