

文章编号: 1000-7598-(2008)09-2314-05

激波作用下水泥试样内部损伤试验方法研究

林英松¹, 蒋金宝^{1,2}, 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. 中原石油勘探局钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 通过优化试验方案, 实现了爆炸激波对水泥试样内部的损伤破坏试验, 观察到激波对试样的损伤破坏现象。根据试验需求, 设计、制作和标定了可用于测量水泥试样内部激波压力(或速度)的传感器, 并在水中与商业传感器一起进行了测试, 发现两种传感器获得的波形一致, 并且该传感器的尺度可以满足试验的需要。利用量纲分析的方法, 得到了激波在水泥试样中的衰减规律模型, 通过比较相同条件下实测压力与模型计算的压力, 发现计算压力要比实测压力高 5%~15%。

关键词: 试验研究; 激波; 损伤; 低渗透油藏; 层内爆炸

中图分类号: TU 502

文献标识码: A

Experimental study for cement sample inner damage by exploding wave

LIN Ying-song¹, JIANG Jin-bao^{1,2}, DING Yan-sheng³

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, China; 2. The Drilling Research institute, Zhongyuan Oilfield Petroleum Exploration Bureau, Puyang457001, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China;)

Abstract: By optimizing the experimental program, the cement sample inner damage by exploding wave in water is realized; and the phenomenon of shear damage and tensile damage by exploding wave are observed. The piezoelectric transducer, which can be used to measure the pressure or velocity of the exploding wave, is designed, manufactured and calibrated. The wave shape gained from self-designed transducer in water is compared with it of commercial transducer, and the result shows that the wave shapes coincide with each other well and the dimensions of the transducer can meet the need of the experiment. The exploding wave pressure in the cement sample is measured and compared with the pressure calculated by the model from the dimensional analysis; and the result shows that the pressure calculated by the model is 5%—15% higher than it measured in the experiment.

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

1 引 言

随着石油工业的发展, 低渗透油藏在油气勘探开发中的地位越来越重要。低渗透油气藏的一个显著特点是地层的渗透能力比较差, 一般需要改造才能得到经济有效的开采。目前, 可用于改造低渗透油气藏的技术很多, 如: 爆炸松动技术、高能气体压裂技术和水力压裂技术等, 尤其是高能气体压裂和水力压裂技术得到了广泛的应用。但总的来看, 增产效果还不尽如意, 高能气体压裂在近井眼地带可以产生多条径向裂纹, 但裂缝的长度较短, 对深部地层的增产效果不大; 水力压裂所产生的裂缝一般较长, 但只能产生一对裂缝, 对远离裂缝的深远

地层的增产效果不明显。为了更好地开发低渗透油气藏, 中国科学院力学研究所丁雁生和陈力提出了水力压裂“层内爆炸”改造低渗透油气藏的设想。其基本思路是: 利用水力压裂技术将乳胶状炸药压入油层裂缝, 并采取不损毁井筒的技术措施点燃该炸药, 使其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。此猜想的实现不仅可以提高目前难采低渗透油气藏的采收率, 而且还有可能把不可采的低渗透油气藏资源转化为可采的油气藏资源^[1]。

炸药的爆炸对岩石的损伤破坏作用可以分为两个方面: 一是爆炸激波的损伤破坏作用, 二是爆炸产物的破坏作用, 由于二者对岩石破坏作用的机制不同^[2], 同时研究难度较大, 并且从作用的先后

收稿日期: 2007-03-23

基金项目: 国家 863 项目 (No. 2007AA06Z208); 中国石油化工股份有限公司资助项目 (No. P03051); 中国石油大学研究生创新基金项目 (No. S2005-53)。
作者简介: 林英松, 女, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学在石油工程应用方面的研究。E-mail: sdlinsy@263.net

顺序来看, 激波要先于爆炸产物。为此, 本研究的目的是通过优化试验方案, 建立一种试验方法来模拟“层内爆炸”中激波对岩石的损伤破坏作用。对于爆生气体对岩石的破坏作用, 以后会专门研究。

2 试验方案设计

由于岩石类材料本身具有非均匀性和各向异性, 做试验时测量数据分散较大, 不易进行基础性研究。在自然界中与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, 本试验采用水泥试样代替天然岩石。

本试验的主要目的是获取爆炸激波在水泥试样中的衰减规律。为了避免把试样压碎, 采取在炸药与水泥试样之间增加一层“水垫”, 使得激波经过“水垫”的衰减之后, 才能到达试样。通过调整“水垫”的厚度和药量, 就可以调整激波到达试样时的压力。

用两块直径为 150 mm、高为 70 mm 的水泥试样拼接成一块圆柱型试样, 在试样正上方一定距离处, 平行放置一定量的炸药。在拼接试样表面(预制剖面)上下端各放置一个压电传感器记录试样内部的激波压力值; 试验完成后, 就可以掰开拼接试样, 观察水泥试样内部的裂纹。试验表明: 采用示踪剂和快速风干相结合的方法, 研究效果较好。图 1 给出了试验方案示意图。

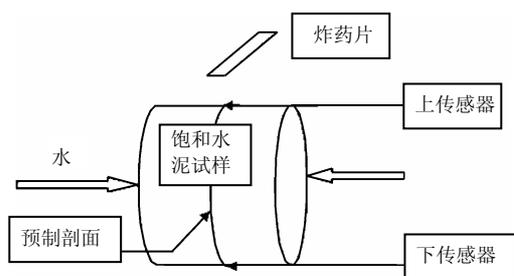


图 1 试验方案的设计示意图
Fig.1 The sketch map of experiment program

在试验方案设计中, 采取在水中爆炸, 一方面可以消除爆生气体对水泥试样的损伤作用, 另一方面可以削弱反射拉伸波对水泥试样的破坏作用; 采用预制剖面来观察水泥试样内部的裂纹, 避免了试验后剖切试样带来的困难, 并能消除切割试样带来的新损伤; 将压力传感器安放在待测试样之间, 可对试样内部两个主要点进行压力测量, 并根据理论分析和试验测量结果来分析激波在水泥试样中的衰减规律。

2 试验设备设计

试验设备设计包括爆炸水箱的建立、压电传感器的设计、制作、标定及数据采集设备等。

2.1 爆炸水箱的改建及保护措施设计

改建了如图 2 所示的爆炸水箱。水箱内边缘底部固定一圈带有 1 mm 孔隙的塑料管, 向管内注入压缩空气, 产生气幕来保护水箱壁; 水箱的 4 个角均用一根两头密封的钢管进行保护; 中间的环形钢丝网用来阻止气幕往水箱中间发展, 使试样周围的水保持静止, 保证激波信号不受干扰。



图 2 爆炸水箱照片
Fig.2 The photo of exploding tank

2.2 压电传感器的设计、制作及动态标定

目前, 商业传感器一般是圆柱状或钢笔状, 体积过大不适合在本试验中使用, 故不予采纳。因此, 需要自行设计一种传感器, 来满足本试验采集数据的需要。

(1) 设计和制作过程

①选购的压电薄膜厚度为 0.03 mm, 该薄膜耐高温、耐酸碱腐蚀, 故选用浓度为 50% 的浓硫酸进行腐蚀, 保留敏感面(阴影部分)。

②压电薄膜敏感面的面积为 1 mm², 总面积约为 20 mm², 参照图 3, 用大小合适的透明胶带将压电薄膜需要保留的敏感部分贴上, 其余部分用硫酸腐蚀, 后用干净棉纱对其表面进行擦拭、清洗硫酸溶液。

③用铜箔包裹压电薄膜, 同时要避免两侧的铜箔边缘与公共面接触。

④在铜箔上焊引线。

⑤用万用表进行电阻、电压测量, 该传感器要求电阻尽可能的大(万欧姆以上); 若符合要求, 继续下一步; 若不符合要求, 进行排查, 重新从第 2 步做起。

⑥密封、防水处理, 选用 704 胶和快速粘合胶。

⑦制作完毕, 平稳放置 24 h 以后, 放入水中并

再次用万用表进行测试，传感器要求电阻大。若不符合，返回第6步。

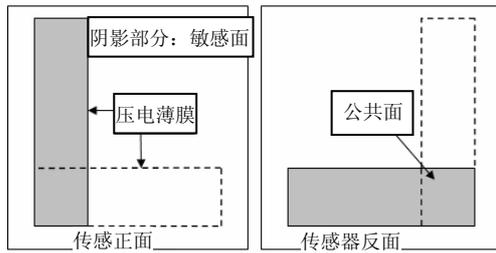


图3 压电薄膜传感器示意图

Fig.3 The sketch map of piezoelectric transducer

(2) 标定

目前，常用的激波压力传感器的标定方法有Hopkinson法和激波管方法。Hopkinson法属于破坏性标定，由于本传感器制作难度较大，该标定方法不适用；激波管法标定的压力太低也不适用。为此提出了一套“突然卸载”标定的方法，并设计一套专门的标定仪器（如图4）。该仪器的活塞可压缩液压油，用压力表测量液压油的压力，然后突然快速打开液阀，产生一个迅速下降的脉冲压力。与液压介质接触的压力传感器就会感受到突降的液体压力，经过测试仪器的转换，将以电压的形式输出。由此，利用测试压力数据和获得的电压数据就可以动态标定压力传感器的峰压灵敏度，标定具体步骤如图5所示。



图4 自行设计的传感器标定仪器

Fig.4 The photo of self-design calibration facility for piezoelectric transducer

标定系统的参数设置如下：测试压力从5~55 MPa，灵敏度统一设置为1，放大器为10倍，上下限频率分别为100 kHz和300 Hz。以其中一组数据为例，给出了传感器的拟合公式（见图6）。通过试验点发现：在电压数据较小或测试压力较低的时候，测试压力与获得的电压有比较好的线性关系；在电压数据较大或测试压力较高的时候，测试压力与获得电压为多项式关系。

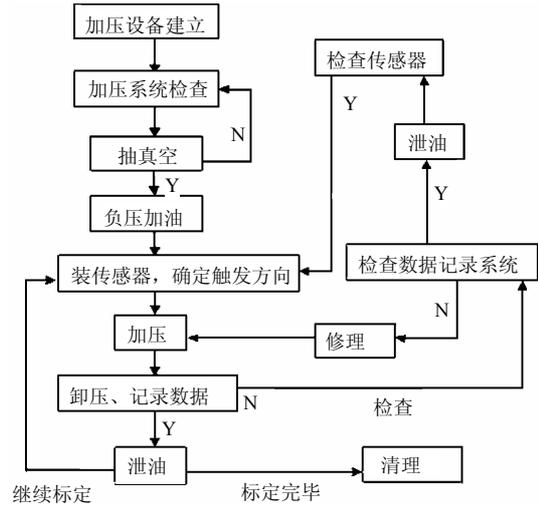


图5 动态液压卸载标定法的程序框图

Fig.5 The program chart for the piezoelectric transducer calibration

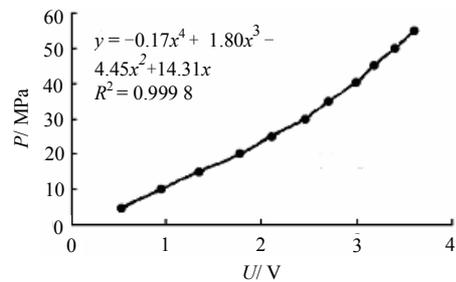


图6 传感器标定曲线拟合关系式

Fig.6 The fitting curve of the calibration data

(3) 传感器的性能测试：

选用自制传感器和商业传感器固定在一起进行激波测量试验。图7给出了A/D采样机得到的激波压力曲线图，其中：CH2，CH3，CH4表示3个数据采集通道。图8给出了两种传感器的信号对比曲线。由图可以看到，自制传感器与商业传感器的信号吻合较好，可以用于测量水泥试样中的激波压力。

传感器的设计制作是本试验的一个难点和创新点。本传感器具有以下两个特点，一是薄，压电膜

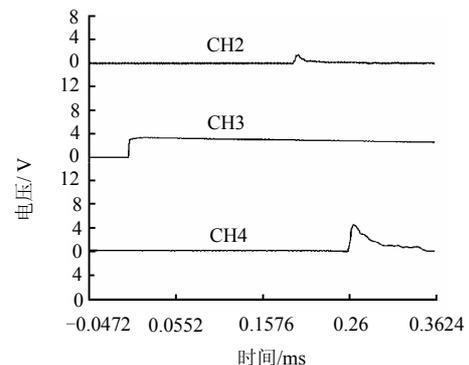


图7 A/D采样机得到的激波压力曲线图

Fig.7 Exploding wave curve obtained from A/D

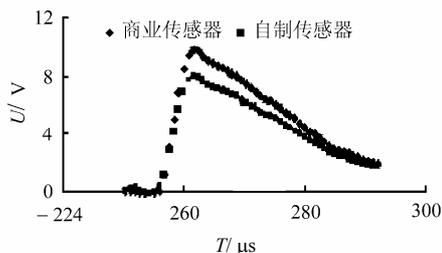


图 8 商业传感器与自制传感器信号对比图
Fig.8 comparison program between commercial transfer and self-design transfer

的厚度为 30 μm，整个传感器的厚度小于 0.2 mm；另外一个就是小，敏感面的面积大约 1 mm²，整个传感器的面积小于 1 cm²。

文献[3]中给出了激波在无限大水域中的衰减规律：

$$P = K_1 \left(\frac{m^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中：P 为测试点的压力 (MPa)；m 为炸药质量 (kg)；R 为测试点距炸药的距 (m)。

把试验数据代入，激波在试验条件下衰的减规律为 $P = 72.36 \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{R} \right)^{1.1524}$ 。

2.3 数据采集系统的准备

数据采集装置由电荷放大器、同步机、A/D 采样软件以及数据采集软件组成。

3 试验材料优选

试验材料包括炸药的配制、性能测量和水泥试样设计、制作及性能参数测量等。

3.1 炸药的准备

在试验中，使用的炸药为塑性炸药，成分是黑索金、环氧树脂及少量机油，用排水法测量得到炸药的密度是 1.42 g/cm³；探针法测得爆速为 6 900 m/s。炸药的尺度是直径 10 mm、长 70 mm 的圆柱形塑性棒炸药。

3.2 水泥试样的制备及主要参数的测量

水泥试样由中国建材院提供，材料为普通硅酸盐水泥；其直径为 150 mm，高为 70 mm；杨氏弹性模量为 68.95 GPa，剪切模量为 27.95 GPa，体积模量为 77.08 GPa，泊松比为 0.234；在规定的时间内，试样强度的误差可以控制在 5% 以内。

4 水泥试样的冲击试验

采用图 1 所示的试验方案，利用自制传感器测

量水泥试样内部的激波压力。图 9 给出了其中一炮的激波压力曲线，虚线为上传感器测量曲线，实线为下传感器测量曲线。激波经过“水垫”到达试样顶部，上传感器接收到感应同时记录数据（电压和时间）；激波继续在水泥试样中传播衰减，到达试样底部时下传感器接收到信号并记录数据。根据距离和时间间隔，得到激波在水泥试样中的传播速度大约在 4 000 m/s 左右，这与理论计算相吻合。

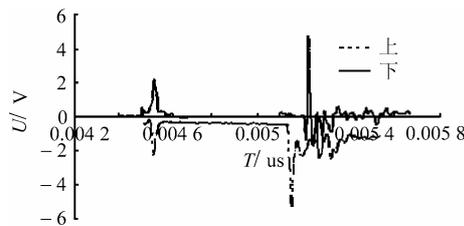


图 9 水泥试样中的激波压力曲线
Fig.9 The exploding wave in cement sample

利用水做示踪剂，结合快速风干技术，观察到了激波对水泥试样的损伤破坏作用（见图 10）。在试样的顶部，个别试样可以看到剪切压实现象，但大部分试样都不明显，原因是由于激波压力太低，最高在 200 MPa 左右，试样的单周抗压强度为 55 MPa 左右。前人研究表明^[3]，岩石的动态强度为静态强度的 5~10 倍，而激波压力仅为抗压强度的 3.5 倍左右，因此，试样不会产生明显的压实破坏现象。反射拉伸波对水泥试样的破坏作用相对比较明显，从图中可以明显地看到：裂纹是从试样底部最低点开始起裂的。在反射拉伸应力的作用下，裂纹从起裂点开始扩展并生成 2 条弧线型主裂纹，其主裂纹上的微裂纹方向和形态是随机的。在试样的其他区域，可以看到密度不等的网格状裂纹^[4]。



图 10 水泥试样预制剖面的损伤形貌
Fig.10 The Prefabricate profile photo of the cement sample after exploding

5 激波在水泥试样中衰减规律分析

炸药在水中爆炸时，激波参数的计算相当复杂。

但每一炮又具有几何和力学的相似性。影响炸药水中爆炸的主要参数有：炸药的密度 ρ_0 ，炸药的质量 m ，多方气体指数 γ ，爆速 D ；水的初始状态参数有：初始压力 P_{w0} ，密度 ρ_{w0} ，水的声速 C_{w0} [5]。

根据量纲分析的结果，得到水泥试样顶点的透射压力为

$$P_{C1} = K_1 \left(\frac{m^{\frac{1}{3}}}{R_{wc}} \right)^{\alpha_w} \frac{2j_c}{j_c + j_w} \lambda_T \quad (2)$$

到达水泥试样底面的压力为

$$P_{C2} = K_1 \left(\frac{m^{\frac{1}{3}}}{R_{wc}} \right)^{\alpha_w} \frac{2j_c}{j_c + j_w} \lambda_T \left(\frac{R_{wc}}{R_{wc} + d} \right)^{\alpha_c} \quad (3)$$

式中： P_{C1} ， P_{C2} 均为水泥试样测试点的激波压力； K_1 为试验常数； j_c ， j_w 分别为水泥试样和水的声抗， $j = \rho C$ ； λ_T 为激波从水中透射到水泥的过程中所造成的能量损失系数； R_{wc} 为水泥试样的顶层距雷管的距离； α_w ， α_c 均为激波在水和水泥中的衰减指数， $\alpha_w = 1.1524$ ， $\alpha_c = 2 - \frac{\mu}{1 - \mu}$ ； d 为试样的直径。

上述模型没有考虑反射拉伸波对激波压力峰值的影响，用该模型计算出来的压力要比真实的压力要高。计算时， λ 取 0.95，泊松比为 0.23。表 1 给出了部分实测激波压力与模型计算激波压力的对比结果。

表 1 实测压力与计算压力的对比表 (单位: MPa)
Table 1 Correlation table between the experimental pressure and calculation pressure (unit: MPa)

实测压力	计算压力	实测压力	计算压力
198.71	205.42	117.45	127.55
180.98	188.73	98.54	105.42
169.63	177.86	86.37	96.85
152.19	161.54	62.55	74.76

从表中可以看到，计算的数值要比实测的压力值高，大约高 5%~15% 左右，说明传感器测试的数据还是有效的，可以用于测试水泥试样内部的激波压力。

另外，笔者也分析了计算压力比测试压力高的主要原因，有以下 3 点：一是 λ 取值高，二是激波有

水泥进入水时，向水泥中反射稀疏波，在模型计算中没有考虑；三是高压下传感器的灵敏度发生了变化。

6 结 论

通过优化试验方案、设计相关试验设备和优选试验材料，实现了激波对水泥试样的损伤破坏试验。利用预制剖面，结合示踪剂和快速风干等技术，观察到了水泥试样内部压剪和拉伸损伤破坏现象；根据试验需求，设计、制作、标定了可用于测量水泥试样内部激波压力（或速度）传感器，并在水中与商业传感器一起进行了测试，发现自制传感器的性能良好，该传感器的尺度可以满足测量试样内部激波压力的需要；利用量纲分析的方法，得到了激波在水泥试样中的衰减规律模型；通过比较相同条件下实测压力与模型计算的数值，发现计算压力要比实测压力高 5%~15%。

通过该试验，虽然观察到了激波对水泥试样损伤的现象，获得了激波在水泥试样内部的压力。但激波对试样的压剪破坏作用不是很明显，建议做大尺度试样近距离试验；另外，从水中激波压力的数据可以看到传感器在高压下电压-压力为非线性关系，这将增大实测压力与真实压力之间的误差，建议对传感器进行更为细致的设计和制作。

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 simulation of “exploding in fractures” in low permeability reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 90—96.
- [2] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤的断裂机理[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 247—252.
YANG Xiao-lin, WANG Shu-ren. Meso-mechanism of damage and fracture on rock blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(3): 247—252.
- [3] 李翼祺, 马素真. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] Atkinson. 岩石断裂力学[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [5] 蒋金宝. 爆炸激波对水泥试样损伤规律研究[D]. 东营: 中国石油大学 (华东), 2008