

文章编号: 1001-1455(2011)06-0669-04

层内爆炸压裂岩石破碎颗粒尺寸的预测模型^{*}

赵志红, 郭建春

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要: 借鉴爆破工程经验, 结合层内爆炸压裂实际, 应用能量守恒原理, 将液体炸药爆炸形成的冲击波能量分为岩石破碎的表面能和岩石内部的应变能, 结合岩石断裂理论建立了粉碎区内岩石破碎粒径的预测模型。实例计算层内爆炸压裂形成的岩石颗粒直径为 1.43 mm。计算结果表明: 液体炸药层内爆炸后形成的岩石破碎颗粒与石油工业中水力压裂使用的支撑剂粒径相当, 能够支撑形成具有一定导流能力的裂缝。

关键词: 爆炸力学; 颗粒尺寸; 层内爆炸压裂; 岩石

中图分类号: O389

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

层内爆炸压裂是在水力压裂在油气层中形成一定长度的人工裂缝的基础上, 通过压裂车把液体炸药泵送到人工裂缝中的预定位置, 随后引爆人工裂缝内的液体炸药, 利用爆炸破碎裂缝壁面岩石产生的岩石碎屑支撑水力裂缝, 产生的爆生气体在水力裂缝附近产生多条微裂缝, 在油气层内形成一个高渗透带, 从而改进储层渗流条件的一种新型油气藏改造技术。

丁雁生等^[1]研究了层内爆炸压裂的可行性, 林英松等^[2]研究了爆炸载荷对水泥式样的损伤破坏规律, 通过实验分析了爆炸对岩石的破坏作用。20 世纪 40~70 年代进行的类似爆炸压裂现场应用, 取得了一定的增产效果^[3]。潘兆科等^[4]针对地面爆破形成的岩石破碎块度分布预测进行了大量的研究, 但没有针对粉碎区岩石颗粒大小预测进行研究。为了加深对层内爆炸压裂改造储层效果的认识, 必须深入研究爆炸对地层岩石的破坏作用和对储层改造的影响。本文中, 结合水力压裂与爆破工程经验, 建立爆炸后岩石颗粒粒径的预测模型, 为进一步分析层内爆炸后破碎颗粒对裂缝的支撑作用奠定基础。

1 破碎粒径预测模型

层内爆炸属于无限岩石中的炸药爆炸, 人工裂缝形成后, 将裂缝中充满液体炸药后引爆, 与常规的水压爆破不同, 液体炸药爆炸产生的冲击波直接作用在岩石上。同时, 在几千米的压裂管柱中充满的是将液体炸药顶进人工裂缝的顶替液, 几千米的液柱能够产生几十兆帕的压力, 与冲击波几十吉帕的压力相比较相当微小, 因而忽略液柱压力的影响。

液体炸药在水力裂缝中爆炸后, 产生冲击波和爆生气体, 冲击波在向地层深部衰减传播的过程中, 对地层岩石造成破坏, 形成破碎区和裂隙区, 裂隙区在后续爆生气体的进一步作用下形成几条主裂纹和大量细小裂纹。所以粉碎区岩石的破碎程度主要取决于冲击波对岩石的破坏程度, 本文中从能量角度分析冲击波对破碎区的作用, 进而预测岩石破碎颗粒尺寸。

根据层内爆炸压裂岩石破碎特点, 作如下假设: (1) 忽略地层岩石的弱面; (2) 人工裂缝为标准的矩形; (3) 岩石破碎颗粒为典型的正方体型。

爆炸冲击波使岩石破坏的能量包括 3 部分: 岩石表面破裂的能量、岩体内部发生应变的能量和岩体移动的动能。使岩石破坏, 必须克服岩石具有的内能, 包括使岩石破裂的表面能和岩体内部产生的应变能。按照能量守恒原理, 破碎区冲击波总能量分为使岩石破碎的表面能、岩石内部的应变能和岩体移动

* 收稿日期: 2010-07-21; 修回日期: 2010-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074138)

作者简介: 赵志红(1981—), 男, 博士, 讲师。

的动能3部分,则有

$$E_c = E_A + E_e + E_t \quad (1)$$

式中: E_c 为破碎区冲击波的总能量, E_A 为岩石破裂的表面能, E_e 为岩石内部的应变能, E_t 为岩体移动的动能。

层内爆炸压裂过程中,液体炸药在深埋地下几千米的裂缝中爆炸,产生的破碎颗粒不会发生飞溅等运动,被限制在狭小的地下岩体中,所以爆炸破碎颗粒的动能最终会转化为岩石破碎的表面能或岩石内部的应变能。因此,将破碎区冲击波的能量简化为岩石破碎的表面能和岩石内部的应变能2部分,则有

$$E_c = E_A + E_e \quad (2)$$

1.1 破碎区冲击波的总能量

层内爆炸过程中,液体炸药在高几十米的垂直裂缝中爆炸,近似为柱状装药,因此利用柱状耦合装药条件下的粉碎区半径来近似表征层内爆炸产生的粉碎区深度^[5]

$$R_c = r_b \left(\frac{p_d A}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{1/\alpha} \quad (3)$$

式中: R_c 为破碎区深度; r_b 为人工裂缝半宽; p_d 为透射入岩石的冲击波初始压力; $A = [(1+\lambda)^2 + (1-\lambda)^2 - 2\mu_d(1-\mu_d)(1-\lambda)^2]^{1/2}$,其中 μ_d 为岩石动态泊松比,在工程爆破的加载率范围内, $\mu_d = 0.8\mu_0$, μ_0 为岩石的静态泊松比, λ 为侧向压力系数, $\lambda = \mu_0/(1-\mu_0)$; σ_{cd} 为岩石单轴动态抗压强度, $\sigma_{cd} = \sigma_c \dot{\epsilon}^{1/3}$,其中 $\dot{\epsilon}$ 为岩石加载应变率(在压碎区^[6], $\dot{\epsilon} = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$); σ_c 为岩石的单轴静态抗压强度; α 为压力衰减系数,对于冲击波区 $\alpha \approx 3$ 。

取微元体厚度为 dr 、高度为 h 、宽度为 L 的柱面体,如图1所示,破碎区冲击波的总能量等于破碎区冲击波对岩石所作的功为^[7]

$$E_c = \int_{r_b}^{R_c} hL p_r dr \quad (4)$$

式中: p_r 为波阵面上的峰值压力。

根据柱状装药研究成果,岩石中冲击波峰值压力的衰减规律为

$$p_r = p_d (r/r_b)^{-\alpha} \quad (5)$$

式中: r 为计算点到装药中心的距离。

将式(5)代入式(4)并积分得

$$E_c = hL p_d (r_b - r_b^3/R_c^2) / 2 \quad (6)$$

1.2 岩石破碎表面能

按照岩石断裂力学理论,炸药爆炸破碎岩石形成新表面所需要的能量为^[8-9]

$$E_A = S G_{IC} \quad (7)$$

式中: S 为爆破后形成的岩石新表面积; G_{IC} 为岩石的单位表面能(临界能量释放率), $G_{IC} = K_c^2/E$,其中 K_c 为岩石的动态断裂韧度, E 为岩石动态弹性模量。

根据假设,设岩石碎屑颗粒为边长为 d 的正方体,那么单个岩石颗粒表面积和体积为

$$A = 6d^2, \quad V' = d^3 \quad (8)$$

式中: d 为碎屑颗粒平均直径。

由岩石单元可得破碎岩石的总体积

$$V = hLR_c \quad (9)$$

设岩石颗粒数为 n ,则根据破碎单元岩石总体积相等,由式(8)、(9)有

$$nd^3 = hLR_c \quad (10)$$

因此破碎岩石颗粒的总表面积

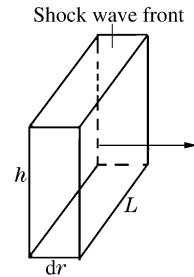


图1 冲击波波阵面上单位面积微小岩石单元
Fig.1 Shock wave front surface of tiny rock unit

$$S = nA = 6nd^2 = 6hLR_c/d \quad (11)$$

由式(7)、(11)求得微小岩石单元岩石破碎的总表面能

$$E_A = 6K_c^2 hLR_c / Ed \quad (12)$$

1.3 岩石内部的应变能

假设岩石为弹性体,破碎区内岩石都达到了动态弹性应变的极限,超过这个极限的岩石已经破裂成岩石破碎颗粒,因此,根据弹性体的功能原理,破碎区岩石内部的应变能

$$E_e = \int_{r_b}^{R_c} hL p_r \epsilon dr \quad (13)$$

式中: ϵ 为岩石的极限动态应变。

将式(5)代入式(13)并积分得

$$E_e = hL \epsilon p_d (r_b - r_b^3/R_c^2) / 2 \quad (14)$$

联立式(2)、(6)、(12)、(14)可得破碎颗粒边长计算公式

$$d = \frac{12K_c^2 R_c}{E p_d (r_b - r_b^3/R_c^2) (1 - \epsilon)} \quad (15)$$

式(15)即为层内爆炸产生的岩石颗粒计算公式,可以定性看出,岩石动态断裂韧性越大,破碎颗粒越大;杨氏模量越大,破碎颗粒越小;冲击波能量越大,岩石破碎颗粒越小。

2 计算分析

计算参数分别为冲击波初始压力 $p_d = 1$ GPa,压力衰减系数 $\alpha = 3$,动态裂缝宽度 $r_b = 12$ mm,岩石加载应变率 $\dot{\epsilon} = 1\ 000$ s⁻¹,岩石静态单轴抗压强度 $\sigma_c = 110$ MPa,动态断裂韧性 $K_c = 12$ MPa · s^{0.5},动态岩石模量 $E = 40$ GPa,静态岩石泊松比 $\mu_0 = 0.25$,岩石动态极限应变 $\epsilon = 0.2$ 。

利用推导的公式,可得 $d = 1.43$ mm。工程爆破中对爆破块度的研究较多,由于在石油工业中,层内爆炸压裂还处于探索阶段,没有现场试验条件和实验条件。工程爆破中现场试验^[10]表明,爆破产生的岩石粒径小于10 mm的含量为1.3%~12.25%,平均为6.44%,说明本公式具有一定的参考性。

在石油工业中,20世纪70年代美国和加拿大等使用液体炸药利用层内爆炸压裂技术已经实现了多口油气井的增产^[11],认为增产机理是爆炸使地层岩石破碎支撑了天然裂缝并产生了微裂缝,增加了地层的渗流能力,获得了与水力压裂相当的较高导流能力的支撑裂缝。常规水力压裂使用的支撑剂粒径通常在0.425~0.85 mm之间,与预测层内爆炸后产生的岩石颗粒粒径相当,有利于进一步研究层内爆炸压裂支撑裂缝导流能力。

3 结论

(1)从能量守恒方面分析了岩石破碎颗粒尺寸问题,对预测岩石爆破形成的岩石颗粒提出了新思路;(2)推导了液体炸药爆炸时粉碎区内岩石颗粒尺寸的预测公式,公式简单,计算结果具有一定的参考性;(3)计算表明层内爆炸产生的岩石颗粒与水力压裂常用的支撑剂颗粒粒径相当,为进一步研究层内爆炸压裂支撑裂缝的导流能力提供了参考。

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. Low-permeability oil and gas fields layer in-fracture explosive fracturing Technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001,28(2):90-96.
- [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(自然科学版),2006,30(3):55-58.
LIN Ying-song, JIANG Jin-bao, ZHU Tian-yu, et al. Research of cement samples damage and fracture by exploding load[J]. Jouruul of China Uuiversity of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006,30(3):55-58.

- [3] 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, 5(23): 77-78.
LI Chuan-le, WANG An-shi, LI Wen-kui. Foreign oil and gas well “layer explosion” technical overview and analysis of yield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 5(23): 77-78.
- [4] 潘兆科,刘志河. 矸石破碎块度的分形性质及计算方法[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(2): 115-117.
PAN Zhao-ke, LIU Zhi-he. Fractal properties of size distribution of gangue agumentation and routine calculation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(2): 115-117.
- [5] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 144-147.
DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2001, 20(2): 144-147.
- [6] 单仁亮. 岩石冲击破坏力学模型及其随机性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 1997.
- [7] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 735-739.
WU Liang, LU Wen-bo, ZHONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 735-739.
- [8] 张立国, 李守巨, 付增绵, 等. 炸药破碎岩石能量利用率的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1998, 17(2): 134-137.
ZHANG Li-guo, LI Shou-ju, FU Zeng-mian, et al. Research into energy utilizing ratio of rock fragment in explosive [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 1998, 17(2): 134-137.
- [9] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 15(24): 2603-2608.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 15(24): 2603-2608.
- [10] 谭英显, 周百川, 黄国君. 控制爆堆粒度实现块粉平衡[C]// 全国第五届岩石破碎论文集. 北京, 1992: 404-408.
- [11] 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): 48-52.
LING Ying-song, JIANG Jing-bao, SUN Feng-cheng, et al. Exploding technology and low permeability reservoir improvement[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 30(5): 48-52.

A size prediction model for rock particles generated by an explosion in fractured rock *

ZHAO Zhi-hong, GUO Jian-chun

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: According to the blasting experiences and actual explosion-in-rock induced rock fragmentation, the shock wave energy produced by the liquid explosive explosion was separated into the surface energy of the fractured rock and the strain energy in the rock by applying the energy conservation law. And based on the rock fracture mechanics principle, a model was proposed to predicate the fragmented rock particle sizes in the cracked region. A calculation example was given in which the diameter of the fragmented rock particles was 1.43 mm. The calculated results display that the diameter of the fragmented rock particle generated by the liquid explosive explosion in rock is equivalent to that of the hydraulic fracturing proppant particle in the oil industry.

Key words: mechanics of explosion; particles size; in-fracture explosive fracturing; rock

* Received 21 July 2010; Revised 10 October 2010

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51074138)

Corresponding author: ZHAO Zhi-hong, swpuzzh@163.com