

# 低渗透油田层内爆炸增产技术研究进展

李德聪<sup>1</sup>, 陈力<sup>1</sup>, 林英松<sup>1,2</sup>, 雁生<sup>1</sup>

(1 中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100190)

2 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061)

[摘要] 系统介绍了层内爆炸增产技术的技术思路、应用前景以及实现该技术所涉及的一系列关键性技术问题;详细介绍了近年来针对此项技术所开展的一系列研究工作,报告了取得的一些研究成果,并对今后的主要研究工作做了展望。

[关键词] 低渗透油田;爆炸力学;层内爆炸;安全性;模拟试验;力学模型

[中图分类号] TE348 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)09-0052-06

## 1 前言

随着国民经济的高速发展,石油作为最重要的能源和化工原料,消费量逐年增加。2004年,我国成为第二大石油消费国,石油进口总量也突破了亿吨<sup>[1]</sup>。近年来,石油进口量更是以每年10%的速度增长,对外依赖性日益增加,供需矛盾突出,这就需要进一步加大国内油藏资源的开发力度。

随着易采油藏储量逐渐衰竭,低渗透油田(渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )<sup>[2]</sup>储量在已探明储量中的比例不断增加。截至2008年底,我国低渗透油田的探明地质储量已达到 $141 \times 10^8 \text{ t}$ 约占已探明地质储量的49.2%,在近几年新探明的油气储量中,低渗透储量比重达到70%<sup>[3]</sup>。此外,低渗透油田分布十分广泛,几乎所有的陆上油区(如大庆、吉林、辽河、新疆、胜利、中原等)都有相当数量的油田属于低渗透油田。低渗透油田已成为稳定我国陆上石油工业发展的重要资源。如何提高低渗透油田的采收率,是我国石油行业亟待解决的问题。

低渗透油田基本的特点是储层的渗透能力差,自然生产能力低,需要进行油藏改造才能维持正常生产。针对低渗透油田的特点,了解到通过改善低渗透储层的物性来提高其采收率是开发低渗透油田最有效的手段。改善储层的物性主要就是在储层中

制造新裂缝或把储层中原有缝隙进行疏通,从而达到增强储层导流能力、提高采收率的目的。依此思路,历史上先后发展或尝试了多种方法。具体来讲,包括井内爆炸技术<sup>[4]</sup>、核爆炸技术<sup>[5]</sup>、水力压裂技术<sup>[6-8]</sup>、酸化技术<sup>[9]</sup>、高能气体压裂技术<sup>[10]</sup>、爆炸松动技术<sup>[11]</sup>等。

近二三十年来,我国低渗透油田开发中主要采用的是水力压裂技术和酸化技术。水力压裂技术主要利用静水压能量在井筒周围地层中形成两条高导流能力的长裂缝,使得长裂缝周围的油气可以通过岩石中原有的小孔隙流入该裂缝中产出。但其缺点也很明显,由于产生的裂缝方向单一,并且裂缝数量不多,使得远离主裂缝的油气仍难采出,因此还需发展新的开采技术。

20世纪90年代,中国科学院力学研究所郑哲敏院士针对地下核爆采油的弱点,指出化爆采油的可行性。丁雁生、陈力等结合油田开采现状提出了低渗透油田层内爆炸增产技术的构想<sup>[12]</sup>。

## 2 层内爆炸增产技术

在储层中造出大量缝隙是提高低渗透油田采收率最直接有效的措施。井筒周围地层中缝隙分布范围越广,对低渗透油田开采就越有利。此外,炸药化学反应释能是一种既经济又有效的能量利用方式,

[收稿日期] 2008-12-01;修回日期 2009-11-06

[作者简介] 陈力(1965-),男,辽宁沈阳市人,中国科学院力学研究所副研究员,博士,研究方向为爆炸力学;E-mail:chenl@imech.cas.cn

使用增益系数很大,已被广泛地应用于国防及国民生产建设的各个领域<sup>[13 14]</sup>,因此利用炸药的化学反应能仍然应该是新的低渗透油田开发技术首选的能量利用方式。层内爆炸增产技术正是基于这样的思路提出来的。

层内爆炸增产技术的基础是水力压力技术,并借鉴了诸如高能气体压裂等诸技术的成功经验。其基本思路是:在水力压裂产生两条主裂缝的基础上,把易流动的乳状炸药注入主裂缝中,并采取不损毁井筒的技术措施点燃乳状炸药,炸药爆燃产生的高温高压气体作用于主裂缝,在垂直于主裂缝壁面的方向产生大量的中小裂缝群,大大提高了储层另一个方向的导流能力,从而达到提高采收率、增产原油的目的<sup>[15]</sup>。

层内爆炸增产技术的关键是利用了爆燃作为乳状炸药释放能量的形式。一般来讲,炸药释放能量有3种形式:爆轰、爆燃(两者一般统称为爆炸)和燃烧。爆轰压力上升快且远大于岩石强度,容易使岩石产生密实圈,不利于储层的改造;而爆燃时压力上升速度适中且幅值大于岩石强度,易生成多裂缝,有利于储层的改造。在层内爆炸载荷的作用下,将在垂直与水力压裂缝的方向产生小尺度的裂隙群。裂隙群的范围与贯通程度与储层岩石性质、地应力水平以及乳状炸药的选取有着密切的关系。针对不同的现场条件,通过选择合适的乳状炸药可以形成适合开采的裂缝群。

由于层内爆炸技术是基于水力压裂技术之上的一种低渗透油田增产技术,所以目前能运用水力压裂技术进行有效改造的低渗透油田将来也可运用层内爆炸技术进行改造。而水力压裂技术是目前最主要的低渗透油田增产技术,相关的理论、经验及与现场配套的设备都比较完善,这些都为层内爆炸技术的实施提供了良好的基础,也有利于将来的技术推广,因此可以说,层内爆炸技术是一项有潜力的低渗透油田增产技术。

### 3 层内爆炸增产技术的小型原理实验

为了验证层内爆炸技术的基本原理是否可行,设计了小型原理实验。该原理实验并不要求严格满足于实际问题的相似性,主要要求能模拟包括炸药挤注、点火、爆燃以及破岩在内的一系列层内爆炸技术的基本过程,同时要求能够模拟地热与地压环境。实验装置如图1所示。

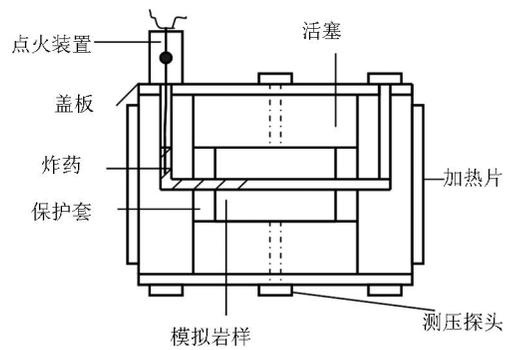


图1 小型原理实验装置示意图

Fig 1 Schematic of small scale experimental setup

该装置主体是一个外径320 mm,内径160 mm,高170 mm的缸体,其中上下各有一个活塞和一块盖板。上下盖板各配有8个螺栓,通过上紧螺栓压缩活塞可模拟地层压力。地层温度可以通过紧贴装置外部的电加热片来实现。地层压裂缝由两块水泥试样之间可调整的预留窄缝来模拟。在该装置上,顺利完成了炸药的挤注、点火、爆燃以及破岩一系列层内爆炸基本过程,证实了层内爆炸增产技术基本原理可行,并得到了石油部门相关专家的肯定。

层内爆炸增产技术从基本原理上可行,但能否在实际现场环境中实现,还需要先回答以下几个问题。a 乳状炸药能否注入水力压裂缝中? b 乳状炸药在岩层窄缝中能否爆燃? c 炸药爆燃后对岩石的作用效果如何? d 层内爆炸技术作业是否安全?

### 4 乳状炸药在窄缝中爆燃的模拟实验

乳状炸药能否在岩石窄缝中持续爆燃,是层内爆炸增产技术中一个至关重要的问题,为此笔者等建立了中型模拟实验装置,目的是观测乳状炸药在窄缝中爆燃的基本现象、研究其基本规律,最终得到适合层内爆炸增产技术的乳状炸药工业配方。

模拟实验装置实体如图2所示。装置主体部分呈圆筒型,全长2.5 m,直径20 cm。该装置包括实验和测量两部分。实验部分主要包括点火装置、窄缝实验段、手动加压装置、加热装置、调压装置、泄压装置、真空装置、水冷装置等部分。窄缝实验段是装置的核心部分,用来模拟水力压裂缝,位于与厚壁圆筒密切配合的内孔的中心部位,宽度为5 mm,厚度为20 mm,长度为2.3 m。药槽中的初始温度可由

实验装置外缘的电加热片及相应的温度传感器来控制。初始压力可通过压缩药槽内的机油来施加。测量部分主要包括测压装置、测速装置、测温装置以及数据采集系统等部分。



图 2 模拟实验装置实体图

Fig 2 Simulation experimental setup

在该实验装置上,可以对不同配方的乳状炸药进行实验,并且可以对乳状炸药在窄缝中爆燃的速度、爆燃面的温度以及窄缝内的压力进行实时测量。图 3和图 4是一组典型的药槽中的压力及乳状炸药爆燃速度曲线。在实验中,对乳状炸药爆燃速度的测量采用了电探针法。在乳状炸药等距离的位置处安装电探针传感器,当爆燃波传到时,炸药发生剧烈的化学反应,产物的电离可使探针的两极导通,从而触发一个脉冲放电电路,这样就可以记录爆燃波传到的时刻。图 4分别是在相邻的 3 个位置记录到的爆燃波,根据探针之间的距离,可计算出此次实验中爆燃波的平均速度约为 50 m/s

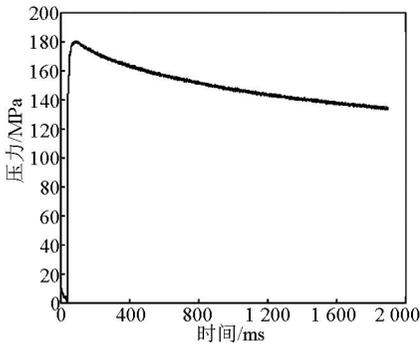


图 3 窄缝中压力曲线

Fig 3 Pressure curve in fracture

在该装置上,窄缝试验段内的初始压力以及初始温度可以按需求进行调整。在初始压力  $p_0$  在 0~40 MPa 范围,初始温度  $T_0$  在 15~80 °C 范围内对不同配方的乳状炸药进行了实验,测量了窄缝实验段内的压力以及爆燃传播的速度,找到一组适合层内

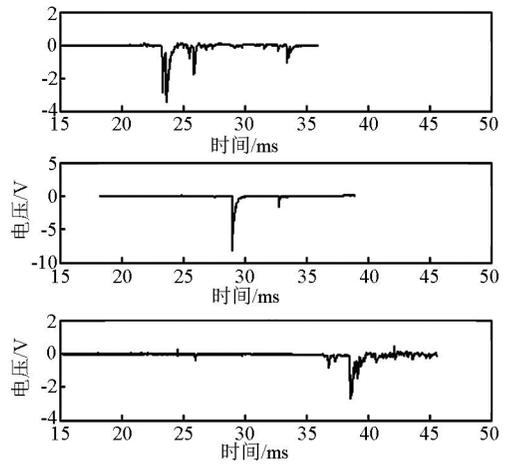


图 4 乳状炸药爆燃速度曲线

Fig 4 Deflagration velocity curve of milky explosive

爆炸增产技术的乳状炸药配方。

## 5 乳状炸药在窄缝中爆燃的理论模型<sup>[16]</sup>

为了从理论上证实乳状炸药在窄缝中爆燃的规律,建立了考虑化学反应的一维流体力学模型。模型假设:

- 1) 炸药的宏观性质均匀, 化学反应服从 Arrhenius 定律;
- 2) 裂缝长度无限, 且在炸药爆燃过程中不变形;
- 3) 爆燃药向周围岩石壁面的散热用牛顿冷却定律来描述;
- 4) 忽略爆燃药的质量损失;
- 5) 忽略药品的粘性;
- 6) 爆燃药的状态方程可表示  $p = p(T, \rho, \lambda)$ , 式中  $p$ ,  $\rho$  分别为爆燃药的压力和密度;  $\lambda$  为化学反应进程变量。

根据以上假设,乳状炸药在岩石窄缝中一维爆燃的基本方程可写作:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1a)$$

动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1b)$$

能量守恒方程:

$$\rho c_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho Q_m R(T, \lambda) - \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{2x}{\delta} (T - T_0) \quad (1c)$$

热传导定律：

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1d)$$

化学反应率方程：

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + u \frac{\partial \lambda}{\partial x} = A(1 - \lambda)(e^{-T_c T} - e^{-T_c T_0}) \quad (1e)$$

状态方程：

$$p = p(p, \varrho, \lambda) \quad (1f)$$

式(1a)至(1f)是一组带化学反应的一维可压缩流体力学方程组,考虑了流体内部的热传导、边界的热损失和阻尼。实际中,由于上覆岩石的重量,窄缝中的乳状炸药处在一定的初始压力下,材料的可压缩性很小,为了定性地研究影响乳状炸药在窄缝中爆燃的因素,作了流体不压缩假定以及爆燃波恒稳推进假定。这样原方程组就可化为如下的无量纲形式。

$$\frac{d^2 \bar{T}}{d\bar{\xi}^2} + \bar{w} \frac{d\bar{T}}{d\bar{\xi}} + \bar{Q}_m \cdot \bar{Z}(1 - \lambda) e^{-\frac{1}{\bar{T}}} = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{d\lambda}{d\bar{\xi}} = -\frac{\bar{Z}}{\bar{w}}(1 - \lambda) e^{-\frac{1}{\bar{T}}} \quad (2b)$$

边界条件为：

$$\bar{\xi} = 0, \bar{T}_p = \bar{T}_{max}, \lambda = 1;$$

$$\bar{\xi} = 1, \bar{T} = 0, \lambda = 0。$$

式(2a)和(2b)中,  $\bar{T} = \frac{T - T_0}{T_c - T_0}$ ,  $\bar{\xi} = \frac{\xi}{\delta}$  分别为

无量纲温度和无量纲长度;  $\bar{w} = \frac{\rho_p c_p w \delta}{k_p}$ ,  $\bar{Q}_m =$

$\frac{Q_m}{c_p(T_c - T_0)}$ ,  $\bar{Z} = \frac{\rho_p c_p \delta^2 Z}{k_p}$  为无量纲参数;  $\lambda$  为炸药

化学反应进程变量,  $\bar{T}_{max}$  为爆燃波阵面的无量纲温度。这是一个非线性常微分方程组,可通过数值方法求解,结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同频率因子及药层厚度下的爆燃速度

Table 1 Deflagration velocity of milky explosive under the condition of different frequency factors and thicknesses

界面传热系数 $/(w \cdot (m^2 \cdot deg)^{-1})$	频率因子 $/s^{-1}$	药层厚度 $/cm$	恒稳爆燃速度 $/(m \cdot s^{-1})$
0.5	$10^6$	0.1	10.8
		1.0	50
		10	100
1.000	$10^9$	0.1	6.1
		1	25.1
		10	40

表 2 不同界面传热系数及

药层厚度下的爆燃速度

Table 2 Deflagration velocity of milky explosive under the condition of different interfacial heat transferring coefficients and thicknesses

频率因子 $/s^{-1}$	界面传热系数 $/(w \cdot (m^2 \cdot deg)^{-1})$	药层厚度 $/cm$	恒稳爆燃速度 $/(m \cdot s^{-1})$
$10^6$	0.5	0.1	0.5
		1.0	1.1
		10	6.1
$10^9$	0.5	0.1	10.8
		1	50
		10	100
$10^{12}$	0.5	0.1	150
		1	452.4
		10	780.4

计算结果表明, a 稳恒的爆燃现象是存在的; b 化学反应频率因子越大, 药层厚度越大, 则爆燃速度越大; c 界面传热系数越大, 爆燃速度越小, 药层能爆燃的厚度存在下限。这些结果表明该模型可以真实地反映炸药在窄缝中爆燃的基本规律, 可以为炸药的选取提供一定的理论指导。

## 6 乳状炸药爆燃后对岩石的作用效果

层内爆炸增产技术增产效果是否明显, 关键在于炸药爆燃后对岩石的作用效果如何, 是否能生成适合油气开采的裂缝分布。针对该问题, 林英松等分别设计了两组实验进行研究<sup>[17-18]</sup>。一组实验是研究炸药在预制中心孔的岩石中爆燃对岩石的破坏机理; 另一组实验是研究炸药在岩石表面爆燃, 观测炸药爆燃对岩石的损伤破坏程度。图 5 和图 6 分别是两组实验的典型结果图。

林英松应用实验的方法系统研究了爆生气体作用孔壁岩石的开裂规律。得出了岩石开裂条数与载荷以及岩石力学性质之间的定量关系式：

$$n = k \left[ \frac{\Delta t}{a} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right]^\alpha \left[ \frac{P_m}{\sigma^d} \right]^\beta \quad (3)$$

式(3)中,  $P_m$  表示载荷幅值;  $\Delta t$  表示载荷脉宽;  $\rho$  表示岩石密度;  $E$  表示岩石的杨氏模量;  $\sigma^d$  表示岩石的动态抗拉强度;  $a$  表示岩石中心孔的尺寸;  $k, \alpha, \beta$  分别为拟合系数。通过对不同强度的岩石模拟试样进行了大量实验, 拟合出了  $k, \alpha, \beta$  的数值。实验中发现: 岩石试样中产生了径向贯通裂纹,

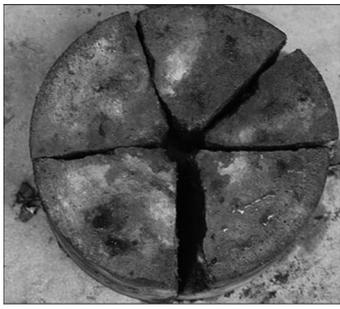


图 5 试样开裂图

Fig 5 The fracture picture of rock sample



图 6 试样表面裂缝图

Fig 6 The surface fracture picture of rock sample

邻近装药的部分损伤严重,爆炸载荷加载速率越高,试样的裂缝数就越多。此外,还应用数值模拟的方法对岩石开裂的机理进行了研究,建立了相应的力学模型,详细研究了不同初始裂纹分布对动载下孔壁岩石开裂的影响,有助于层内爆炸增产技术的现场预先评估。

对炸药爆燃直接作用于岩石表面的研究表明:在与炸药装药垂直的岩石试样内部,形成了大量的小裂缝。裂缝群特征尺度为炸药装药尺度的 20~40 倍。从图 6 中可以看出,这些裂缝互相贯通,连接成一个空间的裂纹群,这对提高岩石的导流能力是有利的。

## 7 层内爆炸增产技术作业的安全性问题

在实施层内爆炸增产技术时,需要考虑的安全性问题主要包括 3 个方面。

- 1) 爆炸操作者和施工作业的安全性问题;
- 2) 乳状炸药向水力压裂缝中挤注过程中的安全性问题;
- 3) 油井产出液后处理中的安全性问题。

对于问题 1), 只要按照安全规程操作, 就不会发生技术安全事故。而问题 2) 则需要进行特别的

考虑。由于乳状炸药的粘性, 在挤注过程中炸药与岩石窄缝壁之间不可避免地存在着强摩擦作用。摩擦生热可能导致炸药意外着火, 从而引起事故。笔者在模拟实验装置上对现有的乳状炸药配方进行了挤注模拟实验, 结果是安全可靠的。然而, 挤注的安全性问题和乳状炸药的配方密切相关, 因此还需要建立更大的模拟实验装备进行深入研究。对于问题 3), 涉及的安全性问题可以从以下 3 个方面进行考虑: a 未爆燃的炸药颗粒是否会随产出液流到井筒和地面? b 随产出液进入集输系统的残药颗粒能否分离? c 残留在分离后原油中的炸药进入炼油系统是否会发生爆炸?

刘小蘋等通过分析表明: 在压裂阶段, 如果存在未爆的炸药颗粒, 可随压裂回排液流到井口放空; 在生产阶段, 残留在岩缝中的未爆炸药颗粒随产液进入集输系统的残药颗粒浓度明显低于 1%, 原则上能用离心法进行分离, 在分离后原油进入常减压分馏塔前, 残留于产液中的微量炸药在温度约为 400 °C 的加热炉中已完全热分解, 残余的炸药浓度极低, 此时的热分解不可能导致爆炸<sup>[19]</sup>。层内爆炸油井产出液的后处理是安全的。

## 8 结语

层内爆炸增产技术是一项综合性很强的低渗透油田改造技术, 涉及到了采油工程、爆炸力学、岩石力学以及火炸药工程等不同领域的学科。实现层内爆炸增产技术, 将会显著改善我国目前低渗透油田的开发局面, 具有很好的应用前景。目前笔者研究团队在这方面已作了一定的工作, 在一些关键技术上取得了部分进展。然而, 要将层内爆炸增产技术很好地应用于低渗透油田开发, 今后还需要在以下几个方面做工作:

- 1) 完善实验室的模拟实验, 研究适合不同储层和油田地质环境的乳状炸药工业配方以及相关的理论;
- 2) 研制大型的炸药挤注实验室模拟设备, 并发展相应的理论, 为考察合适的乳状炸药提供条件;
- 3) 研制与实际油井相配套的设备以及研究层内爆炸增产技术合理的安全的操作流程;
- 4) 现场的井下实验。

致谢: 在层内爆炸增产技术的研究中, 得到了中国科学院力学研究所、中国科学院渗流研究所、中油

集团压裂中心、北京理工大学、中国石油大学(华东)、西安石油学院、中国北方化学工业公司、中国兵工工业 204 所等单位的众多专家学者支持与鼓励,同时得到了胜利油田、大庆油田、辽河油田等部门科技人员的鼓励与帮助,并倾注了课题组每位成员的辛勤努力,在此对他们表示衷心的感谢。

#### 参考文献

[1] 刘仕华,张辉耀,胡国松. 中国石油进口安全浅析[J]. 石油化工技术经济, 2005 21: 14- 17

[2] 李道品,罗迪强,刘雨芬. 低渗油田概念及我国储量分布状况[J]. 低渗透油气田, 1996 1(1): 1- 7

[3] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国工程科学, 2009 11(8): 29- 37

[4] Watson S C, Benson G R. Liquid propellant stimulation of shallow Appalachian basin wells[A]. SPE 13376 [C]. 1984

[5] 张朝琛. 核爆与核能在油气田开发中的应用[M]. 北京: 中国石油天然气总公司情报研究所, 1998

[6] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 北京: 石油大学出版社, 2000

[7] 王晓泉,陈作,姚飞. 水力压裂技术现状及发展展望[J]. 钻采工艺, 1998 21(2): 28- 32

[8] John I L G. 水力压裂技术新发展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995

[9] 裘亦楠,刘雨芬. 低渗透砂岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997

[10] 杨卫宏,周春虎. 浅议高能气体压裂设计方法[J]. 西安石油学院学报, 1991 6(4): 4- 13

[11] 田和金,张鼎业. 岩石的“压涨现象”与“爆炸松动”增产技术[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(增刊): 113- 117

[12] 丁雁生,陈力. 关于低渗透油田层内爆炸增产技术的构想[R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1996

[13] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005

[14] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008

[15] 丁雁生,陈力,谢燮,等. 低渗油气田层内爆炸增产新技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001 28(2): 90- 96

[16] 谢燮. 低渗油田层内爆炸增产技术的小尺度模拟实验研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2000

[17] 林英松. 爆生气体作用于孔壁岩石开裂规律研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007

[18] 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(2): 55- 58

[19] 刘小蘋,俞稼馨. 关于层内爆炸油井产出液安全性的初步调查[R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2000

## Advances in the technology of explosion in fractures used in low permeability reservoirs

Li Decong<sup>1</sup>, Chen Li<sup>1</sup>, Lin Yingsong<sup>1, 2</sup>, Ding Yansheng<sup>2</sup>

(1. Division of Engineering Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong 257061, China)

**[Abstract]** In this paper, the technical idea and the possible applications of this method were briefly introduced. Meanwhile, some related key technical problems were also particularly discussed. A series of research and corresponding advances achieved in recent years were reported in detail. In the end, some suggestion was made for further research.

**[Key words]** low permeability reservoirs; mechanics of explosion; explosion in fractures; security; simulation experiment; mechanical model