

低渗透油田“层内爆炸”增产技术研究进展

李德聪 陈力 丁雁生 林英松

中国科学院力学研究所 北京 100080

摘要:“层内爆炸”增产技术是用于低渗透油田开发的一项综合型技术。本文报告了中国科学院力学研究所近几年在此项工作中的一些研究进展,并提出了下一步工作的重点。

关键词:爆炸力学 低渗透油田 层内爆炸 模拟试验 力学模型

1. 引言

石油,素有“工业的血液”之称,是当今世界最重要的能源,又是有机化工的重要原料。历史上,石油的发现很早。早在东汉时期,我国便有关于石油产地及性质的记载^[1]。然而,石油的大规模开采和应用却是近一百五十年来的事。美、俄于19世纪50年代开始了他们的近代石油工业,其他国家稍晚一些。随着近代工业的兴起,对石油越来越迫切的需求促使石油工业蓬勃发展。我们知道,一口油井的原油的产量与该油井区域地层的渗透率密切相关。当油田中储油地层的渗透率低于某一界限(约为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)时,其产量将受到严重影响,称之为低渗透油田。到如今,在世界范围内,随着易采储量逐渐衰竭,低渗透油田储量在已探明储量中的比例不断增加,石油开采的成本也越来越高。

在我国,一般把储层渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 - 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油田称为低渗透油田^[2]。到2005年,我国低渗透油田的储量已达到80亿吨,占已探明储量中的29%,在近十年的新探明储量中占到一半以上。此外,低渗透油田的分布也相当广泛,几乎所有的陆上油区都有相当数量的油田属于低渗透油田,已经成为我国陆上石油工业稳定发展的重要资源。如何提高低渗透油田的采收率,是我国石油行业面临亟待解决的问题。

近二、三十年来,用于低渗透油田开发最有效的技术是水力压裂法。其技术原理是^[3]:利用地面高压泵组,将高粘液体以大大超过地层吸收能力的排量注入井内,在井底憋高压,当水压超过井筒周围岩石的抗拉强度时,便在井底附近岩石地层中产生两条长裂缝,使得远离井筒区域的油可通过水力压裂缝流入井筒中,从而提高了低渗油田的采收率。图1是水力压裂法的示意图,从中我们可以看出:水力压裂法的缺点是产生的裂缝方向单一,使得其采收率偏低。为了进一步提高低渗透油田的采收率,上世纪九十年代,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可行,丁雁生、陈力^[4]等结合油田开采现状提出了“层内爆炸”增产技术的构想。

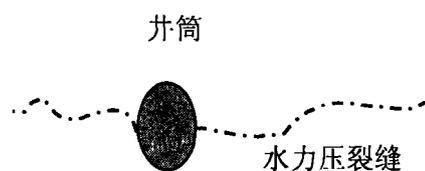


图1 水力压裂法

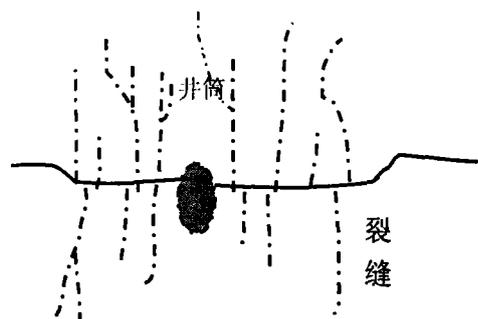


图2 “层内爆炸”法

2. “层内爆炸”增产技术^[5]

“层内爆炸”增产技术是在水力压裂法的基础上提出的，并借鉴了诸如高能气体压裂法等用于低渗透油田开发技术的成功经验。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该乳状炸药，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（见上图2），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。

“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，炸药释放能量有三种形式：爆轰、爆燃（两者统称为爆炸）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。

要实现“层内爆炸”这项增产技术，必须解决以下三个方面的问题：（1）炸药能否注入储层的水力压裂缝中？（2）炸药在岩层裂缝中能否持续爆燃？（3）炸药爆燃后对岩石的作用效果如何？此外，还要解决安全作业以及油井产出液后处理的安全性问题。

下文就从这几个方面展开，介绍中国科学院力学研究所近几年在低渗透油田“层内爆炸”增产技术研究方面的一些进展。

3. “层内爆炸”增产技术小型模拟实验^[6]

为了验证“层内爆炸”增产技术的原理可行性，设计了小型的模拟实验。该实验要求能够模拟包括挤注、点火、炸药爆燃以及岩石开裂在内的“层内爆炸”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3所示。该装置是一个外径320 mm、内径160 mm、高170 mm的缸体，其中上下各有两个活塞和两个盖板。上下盖板各配有8个螺栓，上紧螺栓可以模拟地层压力。地层温度可以通过紧贴在装置外部的加热片来实现。

在该实验装置上，顺利完成了挤注、点火、炸药爆燃以及岩石开裂等基本过程，证明了“层内爆炸”增产技术原理的可行性，同时对特种火药与乳状炸药的配方进行了初步的探索，为下一步的深入研究指明了方向。

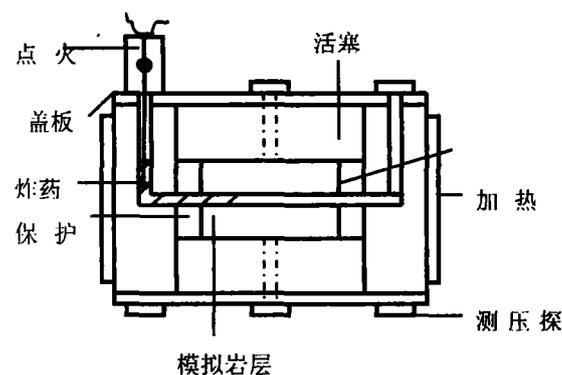


图3 小型模拟实验装置

4. “层内爆炸”增产技术中型模拟实验

这里所指的“中型”是相对前节所指的“小型”而言的。中型模拟实验的重点是要模拟乳状炸药在一定初始温度和初始压力下的长窄缝中的爆燃情况，目的是得到适合“层内爆炸”增产技术的乳状炸药工业配方。这里选用乳状炸药是从“层内爆炸”技术所要求的药品易流动性考虑的。图4是中型模拟装置的实物图。该实验装置的主体呈圆筒形，外径为200 mm，内径为50 mm，长2500 mm。

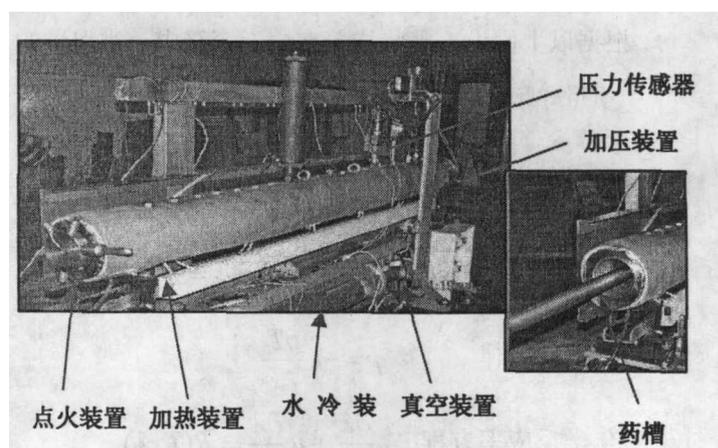


图4 中型模拟实验装置分

由实验部分和测量部分组成。实验部分包括厚壁圆筒、实验药槽、点火装置、加热装置、真空装置以及泄压装置等部组成。实验药槽是用来模拟水力压裂缝的，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 2300 mm。药槽中的初温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；而初压的施加可通过压缩药槽内的机油来实现。测量部分包括压力传感器、速度传感器、应变放大器、同步机、数据采集系统以及水冷装置等部分组成。该装置至少可耐动压 300 MPa，静压 100 MPa。同时，可以测量乳状炸药在药槽中爆燃的压力及速度，爆燃速度的测量采用了电探针法。图 5 和图 6 是典型的药槽中的压力及乳状炸药爆燃速度曲线。

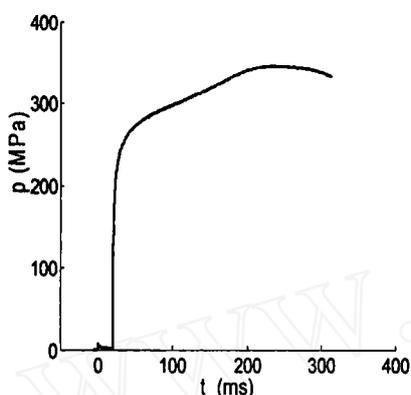


图 5 药槽中压力曲线

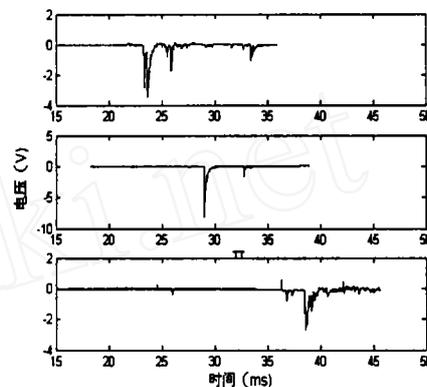


图 6 炸药爆燃速度曲线

通过中型模拟实验，可以研制出适合“层内爆炸”技术的乳状炸药工业配方，是进行现场实验的前提。

5. 乳状炸药在窄缝中持续爆燃的理论模型

为了从理论上证实乳状炸药在窄缝中持续爆燃的可行性，丁雁生、陈力^[5]等提出了考虑化学反应的一维可压缩流体力学模型，目的是为了分析乳状炸药在窄缝中持续爆燃的影响因素，找到持续爆燃的条件，为现场实验提供一定的理论指导。

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 ， ρ 分别为爆燃药的压力和密度， λ 为化学反应份额。

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：

$$\text{质量守恒: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量守恒: } \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\text{能量守恒: } \rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho Q_m R(T, \lambda) - \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{2\lambda}{\delta} (T - T_0) \quad (3)$$

$$\text{热传导定律: } q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

$$\text{化学反应率方程: } \frac{\partial \lambda}{\partial t} + u \frac{\partial \lambda}{\partial x} = R(T, \lambda) \quad (5)$$

$$\text{状态方程: } p = p(p, \rho, \lambda) \quad (6)$$

这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。通过对上述方程做稳恒推进以及不可压简化，上述方程组可简化为一组非线性常微分方程组。

计算结果表明：稳恒的爆燃现象是存在的；炸药化学反应热越大，化学反应频率因子越大，药层厚度越大，则爆燃速度越大；而界面传热系数越大，爆燃速度越小，则药层能爆燃的厚度存在下限。这些图像说明该模型是合理的。

6. 炸药爆燃后对岩石的作用效果

“层内爆炸”增产技术是否有效，关键在于炸药爆燃后对岩石的作用效果如何，是否能生成了适合油气开采的裂缝分布。“层内爆炸”载荷对岩石的作用包括两部分：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，需进行分别研究。

针对激波对岩石的损伤破坏的研究，林英松^[7-9]等从实验和数值模拟两方面展开工作。实验中采用了饱和水泥试样作为地层岩石的替代材料（见图7），并严格控制试样的强度。为了消除拉伸波对试样破坏的影响，实验在爆炸水箱中进行，并选用不同尺寸的水泥试样。为了方便观察试样的内部裂缝，在试样中预制一个剖面。实验对试样破坏后的形貌（见图8、图9）进行了定性和定量的描述。结果表明：（1）在激波作用下，水泥试样的损伤开裂分为三个区域：压碎区、拉伸损伤区、边界破坏区；（2）采用预制剖面的方法对裂纹的扩展影响不大，大的试样更容易观察损伤破坏的区域；（3）压碎区、拉伸损伤区的特征尺度分别约为装药尺度的2~5倍和20~30倍。数值模拟采用动力分析软件LS-DYNA，分析了饱和水泥试样在激波作用下的破坏形式，对照实验现象，详细解释了各损伤破坏的成因，并得到了激波在水泥试样中的衰减规律。

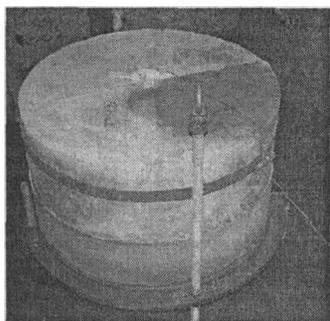


图7 饱和水泥试样

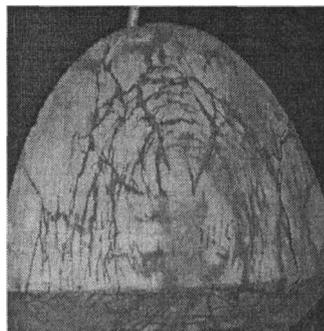


图8 水泥试样表面损伤破坏图



图9 水泥试样剖面损伤破坏图

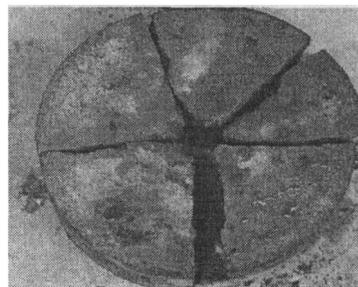


图10 试样产生5条裂纹的情况

针对爆炸产物对岩石作用的研究，同样也从实验和数值模拟两方面展开工作。实验主要研究了在爆炸产物作用下岩石的开裂规律，分析裂缝条数与爆炸载荷的定量关系。图10是典型的水泥试样开裂图像。此外，还运用数值模拟的手段分析了岩石开裂的起因、以及岩石缺陷对开裂的影响。

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，只要按照安全规程操作，就不会发生技术安全事故。

这里需要指出，乳胶状炸药从井筒挤进地层，经过狭窄的射孔时是否会着火，是个必须考察的技安问题。另一个重要的问题在于油井产出液的后处理是否安全，包括：（1）未爆燃的炸药颗粒是否会随产出液流到井筒和地面？（2）随产出液进入集输系统的残药颗粒能否分离？（3）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^[10]等通过分析表明：如果存在未爆的炸药颗粒，随产液进入集输系统的残药颗粒浓度明显低于 1%，可用离心法进行分离。在分离后进分溜塔之前，残留于产液中的微量炸药会完全热分解。“层内爆炸”油井产出液的后处理是安全的。

8. 小结

“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。当然，要将该技术实际应用于低渗透油田，还需要以下几个方面的工作：（1）完善实验室的中型模拟实验，研究乳状炸药工业配方以及相关的理论；（2）模拟炸药挤注安全装备的研制和挤注安全实验；（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。这些都需要各领域专家的关注与支持。

致谢：在“层内爆炸”增产技术的研究中，得到了领导机关的关心和许多专家学者的帮助，同时注入了课题组每位成员的辛勤努力。在这里无法一一罗列姓名，作者对他们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 中国大百科全书—矿冶卷[M]. 北京：中国大百科全书出版社.1984.
- [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].低渗油气田，1996，1（1）：1~7.
- [3] 张琪. 采油工程原理与设计[M].北京：石油大学出版社，2000.
- [4] 丁雁生，陈力. 关于低渗透油田“层内爆燃”增产技术的构想[R]，中国科学院力学研究所科技报告，1996年
- [5] 丁雁生，陈力等. 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.
- [6] 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]，中国科学院力学研究所，北京：2000
- [7] 林英松，蒋金宝等. 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.
- [8] 林英松，朱天玉等. 水中爆炸激波对水泥试样作用的数值模拟分析[J].爆炸与冲击，2006，26（5），462-467.
- [9] 王莉. 激波对饱和水泥试样损伤破碎尺度的实验研究[D]，中国石油大学，东营：2007.
- [10] 刘小蘋等. 关于“层内爆炸”油井产出液安全性的初步调查[R]. 中国科学院力学研究所科技报告，2000.