

# 低渗透油气田“层内爆炸”增产技术研究

丁雁生<sup>(1)</sup> 陈力<sup>(1)</sup> 谢燮<sup>(1)</sup> 张盛宗<sup>(2)</sup> 刘先贵<sup>(2)</sup>  
刘小蕨<sup>(1)</sup> 杨业敏<sup>(1)</sup> 俞稼槃<sup>(1)</sup>

(1)中国科学院力学研究所 (2)渗流流体力学研究所

## 前言

我国目前在低渗透油气田(渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ <sup>[1]</sup>)的开发中主要采用水力压裂和酸化技术改造油层。但在渗透率很低的油气藏,只有在水力压裂形成的主裂缝邻域的油气可以通过岩石中原有微小孔隙流入主裂缝产出,而离主裂缝较远的油气仍难采出。我国近10年探明的低孔低渗油层储量约占该期全国探明储量的一半,如何提高广泛分布的薄层互层低渗透油层的采收率,是我国石油工业面临的亟待解决的问题。

井筒爆炸(well shooting)法是出现于19世纪60年代的油田增产技术,早已不再采用。笔者吸取井内爆炸法增产失败的教训,借鉴新兴的高能气体压裂的成功经验,利用现代的水力压裂技术,提出了低渗透油气田“层内爆炸”增产新技术<sup>[2]</sup>:利用水力压裂技术将适当的爆燃药压入岩石裂缝,点燃那里的爆燃药,从而在主裂缝周围产生大量裂缝,达到提高地层渗透率的目的。研究这项增产技术是极具挑战性的工作,如能成功,对提高低渗透油气田的采收率将有重大意义。笔者经过小尺度实验初步证实其原理可行,本文介绍在该技术研究中已取得的部分成果,希望引起讨论,促成这一技术的进一步研究和试验。

## 爆炸法增产油气的回顾<sup>①</sup>

用爆炸法增产油气包括井内爆炸法、核爆炸法和高能气体压裂。

### 1 井内爆炸法

井内爆炸包括固态、液态和气态炸药在井筒内的爆轰和爆燃<sup>[3]</sup>,目的是使井筒周围地层产生多条裂缝,既消除在钻井过程中造成的表皮损害,又使天然裂缝

体系与井筒连通。1860年,美国Dennis H H首先在油井中使用黑火药爆炸方法激励了油井;1864年美国Roberts E A L申请了以枪用火药使油井增产的专利,1867年用效果更好的液态硝化甘油取代了黑火药<sup>[4]</sup>;后来,杜邦公司研制了低感度的硝化甘油炸药、固态硝化甘油炸药、凝胶炸药和油井特种炸药等<sup>[3]</sup>。在19世纪60年代到20世纪50年代,井内爆炸法被广泛应用,曾经带来增产效益<sup>[5]</sup>。

20世纪40~50年代,水力压裂兴起,逐渐取代了古老的爆炸法。其主要原因是井内爆炸造成的压缩应力波使井周岩石发生不可恢复的塑性变形,爆炸初期形成的大量裂缝或因残余应力场<sup>[6]</sup>(称为应力笼, stress cage<sup>[7]</sup>)的作用而重新闭合,或被爆炸残余物堵塞,有时反而使岩层渗透率下降,只有在某些情况下才可能提高产量。另外,井内爆炸易损毁井筒,硝化甘油类药剂过于敏感,这也是古老的爆炸法压裂失败的原因。我国在20世纪50~70年代多次试验井内爆炸法,未获成功,由于人身及井身安全等原因停止试验。要将井内爆炸法再应用于油气田开采,就必须解决爆炸增产效果不稳定和井筒损害、施工安全等问题。

### 2 核爆采油<sup>②</sup>

美国和前苏联在20世纪60~70年代进行过用核装置激励油气层的地下试验,未获商业化应用;我国在20世纪80~90年代也曾进行核爆炸采油的规划和现场试验设计,由于多方面原因未付诸实施。

井筒核爆炸会造成井沟通各种空洞,从而增加井筒周围岩石渗透率。美国和前苏联的试验结果显示,用核爆炸来提高采收率是可行的。美国在1967年12月施爆的Gasbuggy项目的核装置TNT当量为 $3 \times 10^4 \text{t}$ ,产生的爆穴半径约27m,由岩石崩落而形成的筒状通道(本身就是导流能力极好的区域)高约100m,极高温和极高压以及极强大的压缩激波,使通道周围大范围岩石产生复杂的裂缝网络。一般认为油层渗透率

① 谢燮,丁雁生等. 爆炸法采油的回顾与展望. 中国科学院力学研究所研究报告,2000.

② 张朝琛(主编). 核爆与核能在油气田开发中的应用. 中国石油天然气集团公司信息研究所,1998.

低于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的超低渗透油田不再有商业价值,但 Gasbuggy 项目储集层地下渗透率小于  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,仍获得一定天然气流<sup>②</sup>。所以,用核爆促产的优势使可开发油气田的范围大大加宽。

核爆能量巨大,储集层要有一定厚度才能实施核爆而形成一定格局和规模的裂缝;同时,核装置既要有足够的埋深以防止发生放射性泄漏,又不能太深,以防岩石静压使产生的裂缝重新闭合。Atkinson 和 Johansen 建议<sup>②</sup>,产层净厚度至少要 60m,安全的最小深度为 300m,最大深度约为 2500m;他们还指出,从较长时间尺度来看,在破裂半径内平均升温不到 1℃,破裂带升温仅 5℃,温度对提高采收率的作用不大。

核爆法产生的地震危害和核污染可以控制在可接受的程度。Rodean 认为<sup>②</sup>,地下核爆炸释放的巨大能量中一般只有 0.01% 到 1% 转化为地震能。如果  $3 \times 10^4 \text{t}$  TNT 当量的核爆炸有 0.1% 的能量转化为地震能,只相当于大约 3.7 级地震。放射性是人们十分关注的问题。据有关资料显示,在一次封闭的核爆之后,所有的在熔岩温度(1500~2000℃)下不是气体的放射性元素都会被封存在空穴“锅底”熔体中,几乎完全不会泄漏。Rulison 项目中所用的弹体,在裂变装置周围用碳化硼屏蔽,可使氙减少为原来的 1/3~1/4。如果把实施核爆井产出气和普通气井产出气均匀混合构成可控的稀释系统,人们遭受辐射的增量只不过是天然背景下放射性的 1%。从经济方面考虑,可以通过稀释或送往远处的发电站将其转化为另一种形式的能源。

笔者利用 Gasbuggy 项目的数据,取 6 倍隧道半径为核爆沿横向的影响范围,估算核爆破碎每立方米岩石消耗约 4kg 的 TNT(当量)。这比一般土岩爆破单位体积岩石所需药量大得多,因此核爆效率较低。

核爆法是否经济还在争论。也许有一天,技术进步和大量作业能使其成本下降到商业化应用的水平。

### 3 高能气体压裂

高能气体压裂(high energy fracturing)又称可控脉冲压裂(controlled pulse fracturing),是 20 世纪 60~70 年代在爆炸法压裂基础上发展起来的。我国自 20 世纪 80 年代开始试验高能气体压裂,由于施工简单、所需经费少和结果可控,已在国内一些油田得到应用,取得较好增产效果。高能气体压裂在井筒内使用火药、推进剂或推进剂与炸药混合物,利用它们爆燃产生的大量高温、高压气体在井筒周围产生多条辐射状裂缝,其造缝机制主要是高温、高压气体的楔入。高能气体

压裂的基本概念是药剂爆燃而不是爆轰<sup>[8]</sup>(但总能量与药剂爆轰相当),可以控制压力峰值和压力上升速度。是否能产生多条裂缝,与井筒内压力上升速度直接相关,压力上升时间短于 1ms 沿井筒产生多条对称裂缝,短于  $0.1 \mu\text{s}$  则使井周地层粉碎性破坏,或产生压实圈<sup>[9]</sup>。高能气体压裂是脉冲加载,一般来说脆性岩石的效果比较好;工艺关键是选择与储集层地质状况匹配的推进剂(对有些储集层温度较高的井,也许根本找不到适用的推进剂),既达到推进剂燃烧产生多条裂缝的目的,又不造成其它不利影响。

高能气体压裂形成的裂缝局限于近井地带,沿井筒方向长约 2~3m(最长 6m),垂直井筒方向长约 5~10m<sup>[4]</sup>,缝宽一般为 0.4~0.8mm<sup>[10]</sup>。高能气体压裂只有同其它技术结合,才能在低渗透油田的增产中发挥其应有的作用。例如可以作为酸化前的预处理技术,还可以与重复射孔、水力振荡、变压法、周期降压法、水力压裂等增产技术联合使用<sup>[11]</sup>。

## “层内爆炸”原理及小尺度模拟试验

低渗透油田“层内爆炸”增产技术的基本思路<sup>[2]</sup>是:利用水力压裂技术将乳胶状爆燃药压入油层裂缝,并采取不损毁井筒的技术措施点燃该爆燃药,从而在主裂缝周围产生大量裂缝,达到提高采收率、增产原油的目的。这一思路<sup>③、④</sup>依据井筒爆炸、高能气体压裂与核爆采油揭示的地下岩体中的爆炸现象,也依据水力压裂揭示的含油岩体开裂现象。

深部地层造缝的特征是压力高、能量大、加载空间狭窄,同时,力学原理是再大的静水压力也不能压裂岩石,只有偏应力足够大才能压裂岩石。水力压裂技术满足这些特征,爆破工程经验表明,炸药爆炸也能满足这些基本特征。

炸药释放能量有 3 种形式:爆轰、爆燃(二者统称为爆炸)和燃烧。爆炸时每千克炸药可瞬间释放约  $5 \times 10^6 \text{J}$  能量,使它有在狭窄环境做功。水力压裂时的注液压力一般为 50~100MPa(比相应深度岩层的平均静水压力要高一定值),其造压裂缝功率约为  $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \text{W}$ 。炸药爆轰的压力峰值高达 10GPa 量级,功率约为  $1 \times 10^{11} \text{W}$ ;爆燃压力可控制在 10~100 MPa 量级,功率约为  $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^{10} \text{W}$ 。据此估计,炸药爆轰、爆燃的压力和功率高于或相当于水力压裂时的注液压力和功率。

③丁雁生,陈力.关于低渗透油田“层内爆燃”增产技术的构想.中国科学院力学研究所科技报告,1996.

④丁雁生,陈力.关于低渗透油田“层内爆燃”增产措施的说明.中国科学院力学研究所科技报告 IMCAS STM-97001,1997.

通常认为地层深部水力压裂形成的缝宽约 2~3mm, 裂缝容积约 2~3L/m<sup>2</sup>, 可注入约 2~3kg 炸药。爆破工程中爆轰破碎单位体积岩石的耗药量约 1kg/m<sup>3</sup>, 按此估计, “层内爆炸”在爆轰时可破碎约 2~3m<sup>3</sup> 岩石, 耗药量应显著低于核爆法。由于爆轰压力上升太快且远大于岩石强度, 可能使岩石产生密实圈(即应力笼), 而爆燃压力既大于岩石强度, 压力上升快慢又适度, 为了不会毁坏井筒和产生“应力笼”, 因此笔者选择爆燃作为“层内爆炸”炸药释放能量的主要形式。用爆燃形式进行“层内爆炸”, 只会在岩石中造成多条分支裂缝, 且分支裂缝向主裂缝两侧延伸的长度长于 2m, 如果岩石破碎新增表面耗能大体为常数, 则岩层开裂体积至少会大于 2m<sup>3</sup>。

高能气体压裂的经验表明: 井筒内瞬态压力不超过 100MPa 时不损毁井筒; 同时, 造成的剪切裂缝两侧岩石有不可恢复的错动, 压裂缝内因存在岩屑而有自支撑效应。根据这些经验, “层内爆炸”要把井筒内瞬态压力控制在 100MPa 量级, 并且可以依靠自支撑效应维持油气层的渗透能力。

“层内爆炸”增产技术从原理上可行。但能否实现, 存在三方面技术问题: ①药品能否压入含油气岩层的裂缝中? ②压入裂缝后能否发生爆炸? ③爆炸后对岩石产生怎样的效果? 总结成理论问题即: ①含颗粒黏性流体在狭缝中的运动; ②爆燃药在狭缝中的爆炸; ③岩石的强动载破碎和渗流强化。其中的关键问题是爆燃药在狭缝中的爆炸, 首要问题是夹在岩石裂缝中的薄层爆燃药能否持续传爆。

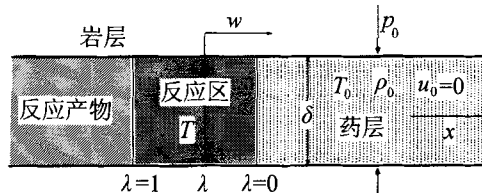
爆燃过程通常是不稳定的, 与点火条件和边界条件紧密相关。笔者设计了小尺度模拟实验装置, 在小尺度条件下通过模拟实验论证“层内爆炸”的可行性。实验结果表明, “层内爆炸”通过热传导实现点火并传爆, 爆燃的过程较缓慢。通过模拟实验, 至少找到了一组“层内爆炸”用的特种火炸药基本配方; 在近 200mm 尺度上实现了特种火炸药的挤注、点火和爆燃的基本过程, 其峰值压力在 100MPa 左右。该特种火炸药的经济、安全性可达到生产要求, 从而证实“层内爆炸”原理基本可行<sup>⑤</sup>。

## 薄层爆燃药爆炸的流体力学模型

为从理论上证实薄层药爆燃可行, 笔者提出了考虑化学反应的一维可压缩流体力学模型<sup>⑥</sup>。

### 1 岩缝内薄层爆燃药爆燃的基本图像

根据对实验现象的分析, 可以建立薄层爆燃药持续传爆的一维模型。考虑夹在岩石裂缝中的无限长的薄层爆燃药(或称“爆燃流体”)热传导传爆, 爆燃药向右推进的化学反应区如图 1 所示。



$x$ —药层长度;  $\delta$ —药层厚度(即裂缝宽度);  $T$ —爆燃流体温度;  $T_0$ —爆燃药初始温度(即岩层初始温度);  $\rho_0$ —爆燃药初始密度;  $p_0$ —岩层对爆燃药的初始压力;  $u_0$ —爆燃药初始质点速度;  $w$ —反应阵面恒定推进速度;  $\lambda$ —爆燃流体的化学反应率

图 1 岩缝内薄层爆燃药爆燃推进示意图

$t=0$  时, 在  $x=0$  处对药层施加一个沿宽度方向伸展的线型热脉冲, 使该处的爆燃药发生沿  $x$  方向推进的化学反应, 该化学反应区以稳定的或不稳定的速度向前推进。在未反应区,  $\lambda=0$ , 温度为  $T_0$ ; 在反应区,  $\lambda$  由 0 向 1 逐渐发展, 温度则大于  $T_0$ , 温度分布既取决于热传导, 又取决于化学反应升温, 还与界面散热有关; 反应区后  $\lambda=1$ 。若存在恒稳推进的爆燃, 则温度为  $T$ 、反应率为  $\lambda$  的反应阵面的推进速度  $w(T, \lambda)$  应为常数。

与混凝土类比, 估计岩石的导温系数约比爆燃药大一个量级(见表 1), 因此, 分析薄层药在岩缝中爆燃时, 需要考虑岩石界面的散热。另外, 反应前爆燃流体是固相药粒与水或油的混合物; 在反应过程中, 爆燃流体的气相成分逐渐增加, 热传导系数随之变化; 反应后药剂分解为气体, 水或油则可能气化, 温度也有改变, 所以爆燃流体的热传导系数变化很大。因此, 反应区内爆燃流体的热传导系数应记作  $k(\lambda, T)$ , 同理, 其密度应记为  $\rho(\lambda, T)$ 。

表 1 几种材料的导温系数 [ $k/(\rho c_v)$ ] 表

材料	导温系数(m <sup>2</sup> /s)	材料	导温系数(m <sup>2</sup> /s)
空气(20℃)	$2.1 \times 10^{-5}$	爆燃药	$6 \times 10^{-8}$
烟气	$1.7 \times 10^{-5}$	润滑油	$8 \times 10^{-8}$
水(20℃)	$1.4 \times 10^{-7}$	混凝土	$5 \times 10^{-7}$

注: 烟气组分是将空气的 O<sub>2</sub> 转为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O

### 2 岩缝内薄层药爆燃的基本假设

爆燃流体化学反应速率表示为

⑤丁雁生, 陈力, 杨业敏, 谢壁等. 低渗油田“层内爆燃”增产措施可行性研究总结报告. 中国科学院力学研究所科技报告 IMCAS CR-98010, 1998.

⑥丁雁生, 陈力. 对薄层乳胶状炸药爆燃恒稳或持续推进的一些预计. 中国科学院力学研究所研究报告, 1999.

$$d\lambda/dt = R_C(T, \lambda)$$

其中的反应速率函数  $R_C$  可用 Arrhenius 定律或其它经验公式描述。

爆燃药被压实,忽略内部的微气孔。爆燃过程进行较缓慢,须考虑爆燃药的热传导散热。另外,假设由爆燃药传向相邻岩石的热量与温差  $(T - T_0)$  呈正比关系,比例系数为  $\chi$ 。当爆燃流体内部热能传递遵循热传导机制时,界面传热系数  $(\chi)$  含有随时间变化的特征长度:刚开始传热时,传热尺度非常小,导致化学反应区附近  $\chi$  值非常大;随着化学反应区的推进,某一固定位置  $(x = x_0)$  处的  $\chi$  值逐渐下降。当爆燃流体内部热能传递遵循热对流机制时,  $\chi$  值变化与爆燃流体的流动有关。这里假设  $\chi$  为物性参数是一种近似。

此外,考虑爆燃过程的前期,可以忽略爆燃流体的质量损失;爆燃前期岩缝厚度来不及变化,忽略爆燃时岩缝厚度的变化;忽略爆燃流体的黏性,但考虑周边阻尼(阻尼项表示为  $2\tau/\delta$ )。

爆燃药为混相流体,由于忽略岩缝厚度的变化,反应前后密度变化不大。反应前后物质的相变间接地由反应率表示,所以压力随反应率明显变化,也随温度明显变化。

### 3 岩缝内薄层药一维爆燃的基本方程

据基本假设,岩缝内薄层爆燃药一维爆燃的基本方程组写作

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

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2\tau}{\delta} \quad (1b)$$

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

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

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + u \frac{\partial \lambda}{\partial x} = R_C(T, \lambda) \quad (1e)$$

$$p = p(\rho, T, \lambda) \quad (1f)$$

这是一组带化学反应的一维可压缩流体力学方程,考虑了流体内部的热传导、边界的热损失和阻尼。其中, (1f) 式为爆燃药的状态方程。

## 薄层药爆燃一维流体模型简化计算<sup>①</sup>

### 1 恒稳推进简化

如果存在以恒定速度  $w$  正向推进的反应阵面(即一种弱间断),则取  $\xi = x - wt$  对(1)式基本方程组进行坐标变换。令  $\partial p / \partial \rho = c^2$ ,  $w > u$  且  $c > w - u$ , 于是(1)式可改写为

$$\frac{d\rho}{d\xi} = \frac{-\frac{2\tau}{\delta} + \frac{\partial p}{\partial \lambda} \frac{R_C}{w-u} + \frac{\partial p}{\partial T} \frac{q}{k}}{c^2 - (w-u)^2} \quad (2a)$$

$$\frac{du}{d\xi} = \frac{w-u}{\rho} \frac{-\frac{2\tau}{\delta} + \frac{\partial p}{\partial \lambda} \frac{R_C}{w-u} + \frac{\partial p}{\partial T} \frac{q}{k}}{c^2 - (w-u)^2} \quad (2b)$$

$$\frac{dq}{d\xi} = \rho Q_m R_C - \frac{\rho c_v}{k} (w-u) q - \frac{2\chi}{\delta} (T - T_0) - \frac{p(w-u)}{\rho} \frac{-\frac{2\tau}{\delta} + \frac{\partial p}{\partial \lambda} \frac{R_C}{w-u} + \frac{\partial p}{\partial T} \frac{q}{k}}{c^2 - (w-u)^2} \quad (2c)$$

$$dT/d\xi = -q/k \quad (2d)$$

$$\frac{d\lambda}{d\xi} = -\frac{1}{w-u} R_C(T, \lambda) \quad (2e)$$

这是五元一阶常微分方程组。若给定状态方程  $p(\rho, T, \lambda)$  和反应速率函数  $R_C(T, \lambda)$  的具体形式,适当选取物性参数,由(2)式应能得到以阵面速度  $w$  和药厚  $\delta$  为参数的稳定传播的爆燃解。其定解条件为:当  $\xi = \xi_e$  时,  $\lambda = 1$ ,  $T = T_e$ ,  $q = q_e < 0$ ,  $\rho = \rho_e$ ,  $u = u_e$ 。调整  $T_e$ 、 $q_e$ 、 $\rho_e$  和  $u_e$  的值,使得在  $\xi$  足够大时,满足  $\lambda = 0$ ,  $T = T_0$ ,  $q = 0$ ,  $\rho = \rho_0$ ,  $u = 0$ 。

### 2 不可压缩简化

考虑爆燃药在地层原始压力作用下已被压实,同时在不考虑后期效应时爆燃阶段材料的可压缩性很小,可以忽略,压力  $p = p(\rho_0, T, \lambda)$ ;此外,由于假设药层无限长、质点速度也永远为零,无须考虑质量守恒、动量守恒,于是只剩下3个基本方程,即

$$\rho_0 c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_0 Q_m R_C(T, \lambda) - \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{2\chi}{\delta} (T - T_0) \quad (3a)$$

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3b)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = R_C(T, \lambda) \quad (3c)$$

若假设比热  $c_v$  和导热系数  $k$  为常数,消去热流  $q$ ,得

①谢燮,丁雁生,陈力.薄层药爆燃一维流体模型的简化计算.中国科学院力学研究所研究报告,2000.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho_0 c_V} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q_m}{c_V} R_C(T, \lambda) - \frac{2\chi(T - T_0)}{\rho_0 c_V \delta} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = R_C(T, \lambda) \quad (4b)$$

(4)式即为不可压缩爆燃流体方程组,其中的(4a)式是带非齐次项的抛物型方程。

忽略药剂在初始温度下的化学反应,设化学反应速率函数为

$$R_C(T, \lambda) = Z(1 - \lambda)(e^{-T_c/T} - e^{-T_c/T_0}) \quad (5)$$

约束条件是:当  $T \leq T_c$  时,  $\lambda = 0$ 。

如果能持续传播的爆燃是恒稳推进的,取  $\xi = x - \omega t$ ,变换(3)式;再令  $c_V$  和  $k$  为常数,取特征尺度  $\delta$ 、特征温度  $T_c$  和热传导系数  $k$ ,构造无量纲量为

$$\bar{\xi} = \xi/\delta \quad \bar{T} = T/T_c \quad \bar{\chi} = \chi\delta/k$$

$$\bar{q} = \frac{\delta}{kT_c} q \quad \bar{R}_C = \frac{\rho_0 c_V \delta^2}{k} R_C$$

于是,(3)式可改写为无量纲方程组

$$\frac{d\bar{q}}{d\bar{\xi}} = \frac{Q_m}{c_V T_c} \bar{R}_C - \frac{\rho_0 c_V \delta \omega}{k} \bar{q} - 2\bar{\chi}(\bar{T} - \bar{T}_0) \quad (6a)$$

$$\frac{d\bar{T}}{d\bar{\xi}} = -\bar{q} \quad (6b)$$

$$\frac{d\lambda}{d\bar{\xi}} = -\frac{k}{\rho_0 c_V \delta \omega} \bar{R}_C \quad (6c)$$

定解条件为:当  $\bar{\xi} = \bar{\xi}_e$  时,  $\lambda = 1, \bar{T} = \bar{T}_e, \bar{q} = \bar{q}_e < 0$ 。调整  $\bar{T}_e$  和  $\bar{q}_e$  的值,使得当  $\bar{\xi}$  足够大时,满足  $\lambda = 0, \bar{T} = \bar{T}_0, \bar{q} = 0$ 。

(6)式中的各项无量纲系数具有明确的物理意义。(6a)式右端第一项的系数为单位质量药剂的反应热  $Q_m$  与开始反应时的热量  $c_V T_c$  的比值;第三项的系数为爆燃药边界散热与内部导热之比。由于  $\chi$  隐含特征长度且与时间相关,  $\bar{\chi}$  不能简单地随药厚改变而改变。

### 3 薄层药爆燃恒稳推进的简化计算结果

虽然上述不可压缩简化不能反映流场的压力,但可以加深对“层内爆炸”过程的认识,了解各参数的取值及其对恒稳推进速度的影响;而且上述方程的求解需要多次试算,计算量较大,简化减少了计算量,克服了今后在更一般意义下求解的盲目性。

在  $\bar{\xi} = 0$  处给定某组  $\bar{T} = \bar{T}_e, \bar{q} = \bar{q}_e < 0, \lambda = 1$ ,用(6)式计算的结果列于表2至表4,试算曲线见图2。

表2 不同频率因子条件下恒稳推进速度和反应区温度峰值表

参数	频率因子 (1/s)	药层厚度(m)		
		0.1	0.01	0.001
恒稳推进 速度(m/s)	$10^6$	6.1	1.1	0.5
	$10^9$	100	50	10.8
	$10^{12}$	780.4	452.4	150
温度峰值 (K)	$10^6$	3105	3105	3109
	$10^9$	3105	3105	3113
	$10^{12}$	3105	3105	3118

注:界面传热系数为  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

表3 不同界面传热系数和化学反应热条件下恒稳推进速度表

参数	恒稳推进速度(m/s)				
	药厚0.1	药厚0.01	药厚0.001	药厚0.0001	
传热系数	0.5	100	50	10.8	7.4
	10 000	40	25.1	6.1	35
反应热 (kJ/kg)	3 238	100	50	10.8	7.4
	5 000	150	90	45	

注:药厚单位为 m

表4 不同频率因子条件下的药层临界厚度和推进速度表

参数	频率因子( $10^6 \text{ s}^{-1}$ )					
	0.012	0.12	1.2	12	120	1200
临界厚度(mm)	2.8	1	0.5	0.1	0.1	0.03
推进速度(m/s)	4	8	9	35	89	285

注:传热系数为  $1 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

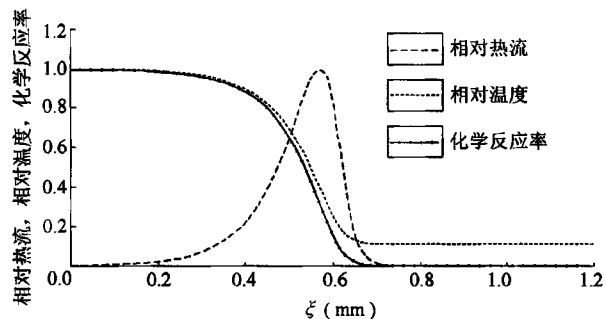


图2 不可压缩假设下薄层药爆燃恒稳推进的参数分布图

由图2可见,随  $\xi$  增大,化学反应率逐渐下降,相对温度上升,相对热流由负值向正值变化。当相对热流变到零时,相对温度即达最大值,其后温度渐降,导致(6a)式右端第一项逐渐减小,使热流梯度由正向负改变。在  $\bar{\xi}$  大于热流梯度零点位置处,热流随  $\bar{\xi}$  增大而逐渐下降。在反应区前沿刚刚达到  $\lambda = 0$  处尚有热流,  $T > T_0$ ,至  $\bar{\xi}$  足够大时才趋于  $\bar{q} = 0$  且  $T = T_0$ 。

通过计算得到如下认识:

1,如果反应区无量纲温度  $\bar{T}_e$  设定值不合适,方程根本无解,或方程的解发生振荡。

2,  $\bar{\xi}$  足够大时只能近似满足定解条件( $\lambda = 0, \bar{T} = \bar{T}_0, \bar{q} = 0$ )。

3, 给定药层厚度,  $\bar{T}_0$  与恒稳推进速度只有唯一匹配的解, 而且反应区温度被限制在很窄的范围内(见表2)。另外, 计算结果反映, 药层越薄, 维持反应需要的温度越高; 药层越厚, 恒稳推进速度越大。爆轰速度有直径效应, 直径小的速度略低。薄层药爆燃恒稳推进速度的尺度效应与此相仿是可以理解的。

4, 与化学反应率有关的频率因子取值不同时, 恒稳推进速度不同, 频率因子越大, 恒稳推进速度也越大(见表2), 这在物理上是合理的。根据资料显示, 猛炸药爆轰时频率因子在  $10^{18} \text{s}^{-1}$  量级, 但将此值代入方程计算无解。这是因为本文方程描述的是爆燃药的爆燃过程, 化学反应率比炸药发生爆轰时的化学反应率小, 所以反映爆燃的频率因子可能较小, 其取值问题值得探讨。

5, 爆燃药与岩石界面的传热系数( $\chi$ ) 隐含有随时间变化的特征长度, 该如何取值也需研究。刚开始传热时, 传热尺度非常小, 导致化学反应区附近  $\chi$  值非常大, 随着化学反应区的推进, 某一固定位置处的  $\chi$  值逐渐下降。本文的一维恒稳问题无法反映上述不定常过程。笔者在计算过程中将  $\chi$  定为常数。由计算结果(见表3)可见, 较大的传热系数所得到的恒稳推进速度较小, 这符合一般认识。当药层厚度较大时,  $\chi$  取值大小对恒稳推进速度大小的影响不大; 但随着药层厚度减小,  $\chi$  取值大小的影响越来越大。在  $\chi$  取值较大而药层厚度较薄的情下方程不再解, 也就是说存在一个药层厚度的下限。由表4可见, 频率因子越大, 相应的药层临界厚度越小。

6, 爆燃药的化学反应热也是影响恒稳推进速度的参数, 化学反应热越大, 恒稳推进速度也越大(见表3)。

#### 4 简化计算小结

简化计算表明, 一维恒稳爆燃现象可能发生, 并且其推进的条件是苛刻的, 需要多个参数的匹配。频率因子越大、化学反应热越大、药层厚度越大, 恒稳推进速度就越大; 而界面传热系数越大, 恒稳推进速度越小; 药层能爆燃的厚度存在下限。该计算结果的物理图像符合常理, 说明本文模型有一定合理性。上述理论分析和计算为进一步的实验工作提供了理论指导。

### 油井产出液后处理的安全性<sup>⑧</sup>

在实施“层内爆炸”采油技术时, 操作者人身安全

和施工作业安全, 只要按照安全规程操作, 就不会发生技术安全事故。油井产出液的后处理安全主要问题在于: ①未爆炸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后是否会爆炸?

#### 1 油井产液携带的未爆的炸药颗粒的安全问题

“层内爆炸”用炸药呈颗粒状, 粒径为  $10 \sim 200 \mu\text{m}$  (中位粒径约  $50 \mu\text{m}$ )。支撑条件下主岩缝的渗流通道为厚  $h$  的狭缝, 粒径大于  $h$  的炸药颗粒将被卡在岩缝里, 只有粒径小于  $h$  的颗粒有可能被液体带出岩缝。然而, 液体的黏性使小颗粒贴向岩壁, 由于附面层对颗粒的“粘附效应”而粘附在那里; 重力和阻力还共同造成颗粒在黏性流体中的“沉降效应”。这两种力学效应都阻碍液体将粒径小于  $h$  的炸药颗粒带出岩缝。

##### (1) 回排压裂液携带的未爆的炸药颗粒

根据压裂经验估计, 层内爆炸后压裂液回排速度在井筒为  $10 \sim 100 \text{cm/s}$ , 在主压裂缝为  $1 \sim 10 \text{cm/s}$ 。这时狭缝尺度的雷诺数为  $10^1 \sim 10^2$  量级, 颗粒尺度的雷诺数为  $10^0 \sim 10^1$  量级。用层流估计, 颗粒的沉降速度约为  $2 \text{mm/s}$ , 明显小于主压裂缝的回排速度。所以, 回排压裂液中若有未爆的炸药颗粒, 它应随回排液从地层流到井筒。

未爆的炸药颗粒随回排压裂液流到井筒时, 井筒尺度的流体雷诺数达到  $10^3 \sim 10^4$  量级, 颗粒尺度的雷诺数为  $10^1 \sim 10^2$  量级。按湍流估计, 颗粒的沉降速度约为  $3 \text{cm/s}$ ; 按层流估计, 颗粒的沉降速度约为  $2 \text{mm/s}$ 。井筒直径远大于颗粒尺度, 在井筒里“粘附效应”的作用明显小于“沉降效应”。由此看, 未爆的炸药颗粒的沉降速度为  $0.2 \sim 3 \text{cm/s}$ , 明显小于回排液在井筒的回排速度, 因而其中的大部分应被从井筒携带出井口。

由于压裂回排液按例在井口放空, 所以可能被带出的炸药颗粒不进入集输系统。

##### (2) 油井产液携带的未爆的炸药颗粒

排出压裂液后主压裂缝闭合, 靠岩渣和狭缝(剪切缝)自支撑, 维持厚度约为  $100 \mu\text{m}$  的渗流通道。在低渗井的产油阶段, 以油井日产液约  $10 \text{m}^3$  计算, 液体在井筒流速约为  $1 \text{cm/s}$ , 渗流通道内的产液速度为  $1 \text{mm/s}$  量级; 日产液若以  $40 \text{m}^3$  计算, 液体在井筒流速约为  $4 \text{cm/s}$ , 在渗流通道的流速为  $4 \text{mm/s}$  量级。中位粒径(约  $50 \mu\text{m}$ )炸药颗粒沉降速度约为  $1 \text{mm/s}$  量级, 相当于液体在狭缝的渗流速度, 再加上附面层对颗粒的“粘附效应”, 可以判断: 未爆的炸药大颗粒因“沉降效应”

⑧刘小颖, 俞稼繁, 丁雁生等. 关于“层内爆炸”油井产出液安全性的初步调查. 中国科学院力学研究所研究报告, 2000.

难以随产液排出岩缝;中、小颗粒的大部分因“粘附效应”也难以随产液排出岩缝;只有部分未爆的炸药颗粒在产油阶段能随产液排出岩缝。

产液平均炸药浓度远低于注入炸药量与注入液总量之比(不超过百分之几),而且随累计产液量增加而递减。估计可能进入集输系统的产液中未爆的炸药颗粒浓度低于1%。

## 2 产液中炸药颗粒的分离

“层内爆炸”用的炸药粒度大于 $10\mu\text{m}$ ,密度约为原油的两倍,与油水密度差达 $0.8\sim 1.0\text{ g/cm}^3$ ,体积浓度小于1%。管式、碟式等离心机可处理粒度约 $1\mu\text{m}$ 、体积浓度小于1%、沉降物与沉降液最小密度差达 $0.01\sim 0.02\text{ g/cm}^3$ 的悬浮液。因此,在油气集输系统中,原则上可用离心法把炸药颗粒从油井产液中分离出来。

## 3 含残药原油中炸药的热分解

“层内爆炸”所用炸药不挥发,部分溶于环己烷,在明显低于 $400^\circ\text{C}$ 的温度下已熔化并分解。由于环己烷在原油中含量很低,因此溶解炸药在原油中的含量低于1%,在产液中的含量则远低于1%。实验室研究表明,当炸药与足够多的油、水混合后,在强点火条件下,炸药的燃烧热不能使炸药浓度低于30%<sup>⑨</sup>和低于45%<sup>⑨</sup>的两种乳胶状炸药达到并维持点火温度,因而不能引燃。所以,在炸药浓度低于或明显低于1%时,它已根本不会发生燃烧爆炸,只可能像在差热分析实验中那样,在温度上升时缓慢热分解。

原油进入常减压分馏塔之前,在加热炉已升温到 $400^\circ\text{C}$ ,可能残留在原油中的少量炸药此时已分解殆尽,绝不会爆炸。“层内爆炸”所用炸药处于负氧平衡,其热分解产物没有剩余氧,不易导致原油发生氧化反应,即使存在炸药热分解产物,对原油也是安全的。

电脱盐时原油流经 $15\times 10^3\text{V}$ 电极,它含的盐分在强电场下电解产生电流,导致原油升温。油是绝缘介质,盐含量低时电流很小,原油升温较低;盐含量高时电流稍大,原油升温较高。控制电流,可将电脱盐时原油升温限于 $160^\circ\text{C}$ 以下。由于“层内爆炸”所用炸药不挥发,在约 $150^\circ\text{C}$ 的温度下很少分解,电脱盐时含在原油中的微量炸药也是安全的。

## 4 油井产出液后处理安全性问题小结

上述分析表明:①在压裂阶段,未爆炸的炸药颗粒可能随压裂回排液流到井口并放空。②在油井生产阶段,残留在岩缝的未爆炸的炸药颗粒难以流出地层。③随产液进入集输系统的残药颗粒浓度明显低于1%,原则上能用离心法分离。④在分离后原油进入常减压

分馏塔之前,残留于产液中的微量炸药在温度约 $400^\circ\text{C}$ 的加热炉中已经完全热分解,而残留炸药浓度很低,热分解不可能导致爆炸。所以,“层内爆炸”油井产出液的后处理应该是安全的。

## 前景展望与今后工作

“层内爆炸”增产技术利用水力压裂技术,在水力压裂缝邻域造成碎裂带,预期增产效益显著高于水力压裂,可能显著提高难采的低渗透油气田的采收率,还可能把一些目前还不可采的超低渗透油气藏改造成可采油气藏,有可能形成低渗透油气田开采的新局面。考虑到现有水力压裂设备的最高压力水平,“层内爆炸”增产技术适用于开裂压力不高于 $100\text{MPa}$ 的岩层,即埋藏不深于 $4000\text{m}$ 的低渗透产层。

笔者通过5年的实验室模拟实验和论证分析,已逐渐勾勒出低渗透油气田“层内爆炸”增产技术在低渗透油气田增产中的潜在的应用前景。“层内爆炸”增产技术是一项具有战略性、前瞻性的创新技术。要将该技术实际应用于低渗透油气田,今后主要有以下四方面工作:①实验室放大试验与相关理论研究;②安全技术研究;③现场试验用工艺设备研制;④现场井下试验。这些工作都需要研究部门与油田生产部门共同进行,笔者衷心希望这项技术的进一步研究工作能得到有关方面的关注和大力支持。

原中国石油天然气总公司开发局是“层内爆炸”增产技术可行性前期研究的主要资助者,中国科学院力学研究所也给予了经费支持。

在“层内爆炸”增产技术可行性前期研究中,渗流流体力学研究所领导和有关专家曾给予深入指导,胜利油田开采院刘泽凯总工程师和毛致新副总工程师、中油集团压裂中心单文文主任曾给予热情支持。西安石油学院李瑛教授和高承泰教授曾给予支持和鼓励。中国北方化学工业公司王文京高工、北京理工大学焦清介教授和204所燃爆公司张双计教授级高工等曾给予热情帮助。胜利油田王成龙副总工程师提出“层内爆炸”油井产出液的后处理安全问题,在此方面的调查分析中,中国科学院理化中心俞稼镛研究员、力学所汪建敏研究员和中国石油勘探开发研究院钻井研究所杨静波硕士给予热情帮助。大庆油田、辽河油田有关科技人员对此项目的关心是对研究工作的有力激励。

(下转第106页)

⑨谢莹等.“层内爆炸”用特种炸药的平板点火实验.中国科学院力学研究所实验报告,2000.

似,勘探上有值得借鉴之处。

7,由于勘探程度低,油源规模不清,盖层条件有待进一步认识,盆地构造还处于活动状态,活油苗具有多重意义,因此艾伯特盆地是风险与潜力并存的盆地。

### 参 考 文 献

- 1 Patton D K, Kashambuzi R and Rubondo E N T. Active seeps, Investment climate draw interest to Uganda. Oil and Gas Jurnal, May, 1997.
- 2 Bally B W and Wohlenberg J. Structure and evolution of the Kenya Rift Valley. Nature, 1971, 229: 538~542.
- 3 朱华良. 世界地理概览. 北京: 东方出版中心, 1997.
- 4 陆克政等. 石油构造地质学(二). 北京: 石油工业出版社, 1998.

- 5 Scott D L and Rosendahl B. North viking graben: An East Africa perspective. AAPG, 1989, 73 (2): 155~165.
- 6 Morley C K etc. Transfer zones in the East Africa Rift System and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. AAPG, 1990, 74 (8): 1234~1253.
- 7 童晓光. 渤海湾盆地油气空间分布规律. 见: 中国油气藏论文集. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- 8 Harding T P. Graben hydrocarbon occurrence and structural style. AAPG Bulletin, 1984, 68: 333~362.

第一作者简介 张兴,男,40岁,高级工程师,获博士学位,现在中国石油天然气勘探开发公司任职。地址:北京市东城区青年湖南街1号,邮政编码 100724。

收稿日期 2000-04-29

(编辑、绘图 梁大新)

### (上接第 96 页)

中国科学院力学研究所郑哲敏院士多年来关心爆炸采油问题,原爆炸力学系主任邢维复研究员曾给予大力支持,俞善炳研究员对力学模型提出宝贵建议,向长美、卜云来、山岳、王林清等同志参与了许多工作。

笔者在此一并表示衷心感谢。

### 符 号 注 释

$T$ ——爆燃流体的温度, K;  $T_0$ ——地层和爆燃流体的原始温度, K;  $T_c, T_e$ ——化学反应特征温度和反应区温度, K;  $\rho, \rho_0, \rho_e$ ——爆燃药密度和其初始密度、反应区密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda$ ——爆燃流体的反应率;  $w$ ——反应阵面推进恒定速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $R_C$ ——反应速率函数,  $\text{s}^{-1}$ ;  $k$ ——爆燃药的热传导系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\chi$ ——爆燃流体与岩石界面的传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;  $\delta$ ——岩缝厚度(药层厚度),  $\text{m}$ ;  $x$ ——药层长度,  $\text{m}$ ;  $\tau$ ——爆燃流体与岩石边界阻力,  $\text{Pa}$ ;  $u, u_0, u_e$ ——爆燃药的质点速度、初始质点速度和反应区质点速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $q, q_e$ ——热流量和反应区热流量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $Q_m$ ——单位质量药剂反应放热总量,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $Z$ ——频率因子,  $\text{s}^{-1}$ ;  $t$ ——时间,  $\text{s}$ ;  $c_V$ ——比热,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

### 参 考 文 献

- 1 李道品, 罗迪强, 刘雨芬. 低渗透油田概念及我国储量分布状况. 低渗透油气田, 1996, 1(1): 1~7.
- 2 丁雁生, 陈力, 张盛宗等. 油田层内爆炸处理方法. 专利申请号: 99126375.8, 1999年12月17日.

- 3 E. I. DU PONT DE EMOURS & COMPANY (INC.). Blasters' Handbook. Sesquicentennial (Thirteenth) Edition, Revised, Chapter XXXII, 1954.
- 4 韩常省, 阳庆云. 可控脉冲压裂技术的发展及应用. 西安石油学院学报, 1992, 7(2): 13~20.
- 5 Watson S C and Benson G R. Liquid propellant stimulation of shallow appalachian basin wells. SPE 13376, 1984.
- 6 Schmidt Richard A, Boade Rodney R and Bass Robert C. A new perspective on well shooting - behavior of deeply buried explosions and deflagrations. JPT, July, 1981.
- 7 Schmidt Richard A, Boade Rodney R and Bass Robert C. A new perspective on well shooting — the behavior of contained explosions and deflagrations. SPE 8346, September, 1979.
- 8 Schmidt Richard A, Warpinski Norman R and Cooper Paul W. In situ evaluation of several tailored-pulse well-shooting concepts. SPE/DOE 8394, 1980.
- 9 黄毓林. 爆燃压裂工艺技术. 油气井测试, 1993, 2(4): 24~33.
- 10 王仲茂, 王怀彬, 胡之力. 高新采油技术. 北京: 石油工业出版社, 1998. 53~78.

第一作者简介 丁雁生,男,59岁,研究员,1967年研究生毕业,主要从事爆炸力学研究工作。地址:北京市海淀区中关村,中国科学院力学研究所工程科学部,邮政编码 100080;电话:(010)62545533-2097。E-mail: ysding@mail.imech. an. cn

收稿日期 2000-12-04

(编辑、绘图 王孝陵)



一种定量测定油藏岩石润湿性的新方法[刊]/鄢捷年//石油勘探与开发.-2001,28(2).-83~86

在前人工作基础上,建立了一种定量测定油藏岩石润湿性的新方法,即经改进的自吸速率法。该测定方法所依据的原理是,当岩石与流体接触时,其表面的润湿性是影响自吸速率的一个关键因素。通过采用无因次时间( $t_D$ )代替实际自吸时间,可以消除油/水界面张力、液体黏度、孔隙结构,以及岩心的形状与尺寸等其它因素对自吸速率的影响。由自吸过程中所测得的拟毛管压力曲线,可定量确定岩石表面在某一特定条件下的润湿指数( $W_R$ )。 $W_R$ 值越大,则水湿性越强。 $W_R$ 值的大小,既取决于自吸速率,又取决于自吸的液体总量。在进行自吸实验时,将岩样吊挂在电子天平上,并浸入盐水中。盐水组成应与建立束缚水饱和度时所用盐水相同。自岩样浸入盐水的瞬间开始,记录岩样质量随时间的变化,直至岩样质量保持恒定时为止(通常约需72h)。根据每一时刻岩样质量的变化和油、盐水的密度差,求出该时刻油相的自吸采收率( $R_{im}$ ),并绘制每一岩样的 $R_{im}$ 与 $t_D$ 关系曲线。然后分别计算不同 $t_D$ 值所对应的拟毛管压力( $p_{c,ps}$ )和水饱和度( $S_w$ ),并绘制出每一岩样的 $p_{c,ps}$ 与 $S_w$ 关系曲线。根据该曲线的下包面积,求出每一岩样的润湿指数( $W_R$ )。实测结果表明,使用该方法测得的润湿指数与使用传统的Amott法所测的润湿指数( $I_{w,o}$ )有较好的可比性。与Amott法相比,该方法测定精度更高,且实验操作简便,便于推广使用,但该方法只适用于从中性润湿至强亲水岩样润湿性的测定。一般来讲, $W_R$ 对较强亲水岩石的润湿性有较高的分辨率,而 $I_{w,o}$ 对较弱亲水岩石的润湿性具有较高的分辨率。图3表1参10(鄢捷年摘)

关键词 油藏 岩石 润湿性 自吸速率 测定 方法

TE311

20010226

原油沥青沉降模拟方法[刊]/李闯,孙雷...//石油勘探与开发.-2001,28(2).-87~89

油气体系相平衡问题是十分复杂而又有实际应用意义的研究课题,以往的研究主要停留在气-液二相相平衡上,但原油中常常含有大量的有机固相物质,要准确描述油气体系的相平衡问题,必须对气-液-固三相相平衡进行研究。目前对气-液-固三相相平衡的研究相对较少,特别对气-液-沥青三相相平衡的研究仍然停留在定性认识上。在沥青是与附着在其表面的胶质形成的胶束一起沉降的这一认识基础上,提出用状态方程模拟沥青沉降来定量预测沥青的沉降量。用三相闪蒸方程与考虑沥青

沉降三相闪蒸数值算法量化模拟沥青沉降,拟合所需参数少,便于实现计算机模拟计算。图2表4参9(李闯摘)

关键词 状态方程 沥青 沉降 闪蒸计算 逸度 饱和 压力

·油气层保护与改造·

TE357.3

20010227

低渗透油气田“层内爆炸”增产技术研究[刊]/丁雁生,陈力...//石油勘探与开发.-2001,28(2).-90~96,106

回顾爆炸法(井内爆炸法、核爆炸法和高能气体压裂)增产油气的历史,提出低渗透油气田“层内爆炸”增产技术的基本思路:利用水力压裂技术将乳胶状爆燃药压入油层裂缝,并采取不损毁井筒的技术措施点燃该爆燃药,从而在水力压裂主裂缝邻域造成碎裂带,达到提高采收率、增产原油的目的。至少已找到一组特种火炸药基本配方,在200mm小尺度模拟实验中实现了“层内爆炸”挤注、点火和爆燃的过程,证实技术原理基本可行。考虑流体内部的热传导、边界热损失和阻尼,提出了有化学反应的薄层药爆燃—维可压流体力学模型,并对此模型进行恒稳推进和不可压缩简化,计算结果的物理图象符合常理,从理论上证实了薄层药爆燃可行。“层内爆炸”油井产出液的后处理,原则上是安全的:残留在岩缝的未爆炸炸药颗粒在生产阶段难以流出地层;进入集输系统的残药颗粒浓度低于1%,原则上能用离心法分离;残留在分离后原油中的微量炸药在400℃加热炉已完全热分解,热分解不可能导致爆炸。“层内爆炸”增产技术的研究是具有战略性、前瞻性的科技创新课题,预期增产效益显著高于水力压裂,有可能形成低渗透油气田开采的新局面,还可能使一些目前不可采的低渗透油气资源成为可采资源。今后工作主要有四方面:室内放大试验与相关理论研究;安全技术研究;现场试验用工艺设备研制;现场井下试验。图2表6参9(王孝陵摘)

关键词 低渗透油气藏 爆炸压裂 层内爆炸 增产措施 实验室试验 数学模型 安全

·应力场研究·

TE25

20010228

油田套管损坏的压力与压差联合作用机制[刊]/刘建中,周胜民...//石油勘探与开发.-2001,28(2).-97~99

大庆油田采油一厂萨中地区是套管损坏的多发区,套管损坏集中在标准层附近,并且成片发生。经现场应力测试,室内岩

wettability indices determined using this method is considerably comparable with the wettability indices,  $I_{w-o}$ , determined using the traditional Amott method. Compared with the Amott method, the accuracy of the results determined using the new method is higher, and the experimental procedures are simpler. It is therefore convenient for applying more widely. However, the method is only suitable for the determination of wettability ranging from neutral wet to strongly water-wet condition. In general, the resolving power of  $W_R$  is higher for the strongly water-wet rocks, while the resolving power of  $I_{w-o}$  is higher for the weakly water-wet rocks.

**Subject heading:** Oil reservoir, Rock, Wettability, Spontaneous imbibition rate, Determination, Method

**A technique for modeling asphaltene precipitation in oil.** LI Min; et al. (Southwest Petroleum Institute, Sichuan 637001, P. R. China). *Shiyou Kantan Yu Kaifa* 2001, 28(2), 87-89. Phase equilibrium in oil and gas system is very complex but a research topic of practical application. In the past, research on phase equilibrium in oil and gas system was restricted to two-phase equilibrium of gas and liquid. However, there are a large amount of organic solids in the oil and gas. In order to describe phase equilibrium in oil and gas system accurately, research on three-phase equilibrium has to be done. Up to now, study of three-phase equilibrium has been done little. Especially research on phase equilibrium of gas-liquid-asphaltene has remained in qualitative description level. In the light of the precipitation mechanism of asphaltene that asphaltene precipitates with resin absorbed on the asphaltene surface simultaneously, the paper put forward a method for modeling asphaltene precipitation with EOS. With three phase flash equation and algorithm of three phase flash which take asphaltene precipitation into consideration, it is able to model asphaltene precipitation quantitatively with a small number of parameters. **Subject heading:** State equation, Asphalt, Settling, Flash calculation, Fugacity, Saturation pressure

**On the stimulation with "exploding in fractures" in low permeability reservoirs.** DING Yan-sheng; et al. (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China). *Shiyou Kantan Yu Kaifa* 2001, 28(2), 90-96, 106. A basic idea was brought forward about the stimulation with "exploding in fractures" in low permeability reservoirs on the basis of review of the stimulation with exploding, including well shooting, nuclear explosion and high energy fracturing. Explosives are pressed into the fractures in oil layers with the technology of

hydraulic fracturing and lit up without any damages to wells. After exploding, fractured zones are generated around the original main hydraulic fractures. And then, the recoveries are enhanced and more oils are produced. At least a group of basic ingredients of the special explosives and powders have been found. The processes of injection, lighting up and deflagration have been realized in the laboratory simulation experiments of the scale of 200mm. That means the basic idea is practical. A one-dimension model of compressible fluid with the chemical reaction of the explosives and the powders in thin fractures has been proposed, which takes into consideration the heat conduction in the fluid, heat loss on boundaries and damp. The computational results are reasonable on the assumption of steady propagation and simplification of incompressible fluid. It demonstrates in theory that it is possible for the deflagration of the explosives and powders in fractures. It is safe in principle to treat with the liquid from the wells after "exploding in fractures". It is difficult for the residual explosives that were not ignited in rock fractures to come out to the ground during the production stages. The concentration of the residual explosives is less than 1% in oil gathering systems and these residual explosives can be separated with centrifugal methods. Micro mass of the explosives after separation will be decomposed in heating furnaces of 400°C. Such a thermal decomposition cannot induce explosion. It is a strategic, advanced and initiation research of the stimulation with "exploding in fractures" in low permeability reservoirs. It is expected that the increased production due to "exploding in fractures" is much more than that due to hydraulic fracturing. The technology of "exploding in fractures" may make the extraction in low permeability reservoirs much improved and change the low permeability resources impossible to produce at present to the extractable resources in future. The future research should be focused on large-scale laboratory tests and related theories, technology of safety, techniques and equipment for the tests in-situ, and in-situ tests. **Subject heading:** Low permeability pools, Exploding fracturing, Exploding in fractures, Stimulation, Laboratory test, Mathematical model, Safety

**The combined action mechanism of the pressure and pressure differential in casing damage.** LIU Jian-zhong; et al. (Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, P. R. China). *Shiyou Kantan Yu Kaifa* 2001, 28(2), 97-99. The central unit of Saertu oil reservoir in Daqing oil field is an area of frequent casing damage, the casing damage mainly occurs near the datum bed, and group by group. Through