

李传亮 著

石油科学新探索

李传亮精选论文集

New Probes in Petroleum Science
A selection of Li Chuanliang's papers

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石油科学新探索

李传亮精选论文集

李传亮 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书为李传亮精选论文集,由李传亮 53 篇第一作者学术论文结集而成,内容包括油藏工程、石油地质和岩石力学三大部分,主要是李传亮在石油领域的最新科学探索成果。

本书适合作为石油工程、石油地质及相关专业的硕博士研究生和矿场研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石油科学新探索:李传亮精选论文集/李传亮著.
—北京:中国石化出版社,2016.11
ISBN 978-7-5114-4313-7

I. ①石… II. ①李… III. ①石油工程—文集 IV. ①TE-52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 252098 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路 9 号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京富泰印刷有限责任公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 482 千字
2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷
定价:56.00 元

序

自 1859 年人类开始规模化开采和利用石油以来，石油一直是社会发展的重要能源形式，石油开采也一直是人类重要的生产活动。生产实践离不开理论的指导，于是，石油科学便应运而生了。

石油科学不是独立的科学体系，而是基础科学在石油领域的应用，属于应用科学的范畴。基础科学是通过应用科学来指导生产实践的，没有石油科学作为桥梁和纽带，基础科学的理论无法在石油领域应用，也无法有效指导石油开采。因此，把基础科学有效转化成石油科学是石油科研工作者的重要任务之一。

石油开采是一个实践性很强的行业，生产实践经常走在理论研究的前面。缺乏理论指导的实践，显得盲目而没有方向，实践只能在探索中前行。实践的探索结果会催生新理论的诞生。从实践中总结提升和发现新的科学理论，也是石油科学研究的重要途径之一。

本人从事石油领域的教学、生产和科研工作几十年，对石油科学有很多新的探索，我把工作中探索到的新理论都写成了论文发表出来，并与同行们进行交流，以促进石油科学的向前发展。

在缺少成熟理论指导的情况下，石油开采只能在经验指导下进行。石油行业积累了大量的实践经验，有些经验以公式的形式整理出来就成了经验公式。但是，经验缺少理性的思考，其有效性受到很多条件的限制，超出应用范围即成谬误，也就是伪科学。石油领域充斥着伪科学，许多伪科学还严重误导石油的生产实践。为了石油行业的健康发展，必须及时清除其中的伪科学成分。笔者在清除石油伪科学方面做了大量的工作，成绩也比较显著，有许多论文发表，在业界引起了广泛的讨论和争鸣。

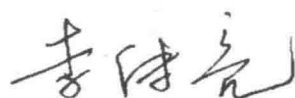
迄今为止，笔者以第一作者的身份共发表了 140 余篇学术论文，它们是思想和汗水的结晶，我非常珍爱。这些论文散见于各种学术期刊，阅读起来很不方便，不利于科学传播。现从所有论文中精选了 53 篇有一定代表性和重要性的学术论文结集出版，精选论文分为油藏工程、石油地质和岩石力学三大部分。论文集的出版是对自己过去工作的一个总结，也是对石油行业及同仁的一个交代。

在发表学术论文的过程中，曾得到许多期刊编辑部和编辑们的大力支持，他们认真研读每一个句子，仔细斟酌每一个标点符号，精心修饰论文的修辞和文法，使论文更加严谨和规范，在此向每一位为论文发表付出过辛勤劳动的编辑致以衷心的感谢。

衷心感谢中国石化出版社及程庆昭编辑的大力支持，让这本论文集得以顺利面世，读者们会感谢你们为石油科学的传播所做的努力。

愿将此书献给那些挚爱石油科学的人们！

是为序。



2016 年春于成都

目 录

第一部分 油藏工程

修正 Dupuit 临界产量公式	(3)
利用矿场资料确定底水油藏油井临界产量的新方法	(9)
带隔板底水油藏油井临界产量计算公式	(13)
带气顶底水油藏油井临界产量计算公式	(17)
带隔板底水油藏油井见水时间预测公式	(26)
带隔板底水油藏油井射孔井段的确定方法	(31)
底水油藏的压锥效果分析	(37)
底水油藏不适合采用水平井	(41)
多相渗流的数学模型研究	(45)
油藏水侵量计算的简易新方法	(49)
异常高压气藏开发上的错误认识	(53)
管流与渗流的统一	(58)
孔喉比对地层渗透率的影响	(61)
再谈启动压力梯度	(65)
渗吸的动力不是毛管压力	(72)
地下没有亲油的岩石	(77)
地下岩石的润湿性分析	(80)
低渗透储层容易产生高速非 Darcy 流吗?	(85)
油井产能评价新方法	(90)
油藏天然能量评价新方法	(96)
长水平井的产能公式	(102)
水平井的表皮因子	(108)
扩散不是页岩气的开采机理	(116)
水驱油效率可达到 100%	(123)
特殊情况下的压力系数和自喷系数计算方法	(129)
综合形式的水平井产量公式	(134)
关于油藏含水上升规律的若干问题	(140)

再谈滑脱效应 (147)

储层岩石连续性特征尺度研究 (156)

双重各向异性介质的发现及其渗透率模型的建立 (161)

第二部分 石油地质

油气初次运移理论新探 (169)

孔隙度校正缺乏理论根据 (183)

岩石欠压实概念质疑 (187)

毛管压力是油气运移的动力吗? (192)

油水界面倾斜原因分析 (197)

油气倒灌不可能发生 (201)

等效深度法并不等效 (208)

气水可以倒置吗? (213)

页岩气其实是自由气 (220)

煤层气其实是吸附气 (224)

第三部分 岩石力学

多孔介质的双重有效应力 (233)

岩石强度条件分析的理论研究 (239)

多孔介质的流变模型研究 (245)

岩石压缩系数与孔隙度的关系 (251)

岩石压缩系数测量新方法 (256)

油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究 (259)

射孔完井条件下的岩石破裂压力计算公式 (264)

岩石的外观体积和流固两相压缩系数 (268)

应用压缩系数确定地震波速的新方法 (275)

储层岩石的应力敏感性评价方法 (281)

岩石应力敏感指数与压缩系数之间的关系式 (286)

储层岩石的两种应力敏感机制 (292)

关于应力敏感测试方法的认识误区 (296)

附录 第一作者论文名单 (302)

跋 (306)



第一部分

油藏工程

修正 Dupuit 临界产量公式

摘 要: 底水油藏的油井生产时会出现底水锥进现象, 水锥刚好锥进到井底的产量, 为油井的临界产量。矿场上一般用 Dupuit 临界产量公式计算油井的临界产量。由于 Dupuit 临界产量公式没有考虑油井的伤害, 实际计算时会出现一些偏差。真实的油井都存在不同程度的伤害, 为了反映油井的真实情况, 本文对 Dupuit 临界产量公式进行了修正, 在公式中引入了油井的表皮因子, 并称其为修正 Dupuit 临界产量公式。计算结果表明, 表皮因子对油井的临界产量产生一定的影响。

关键词: 油藏工程; 产量; 临界产量; 公式; 伤害

0 引言

J. Dupuit 于 1863 年在研究地下水工程时提出了著名的临界产量公式, 后人则称之为 Dupuit 临界产量公式^[1]。Dupuit 临界产量公式最初是针对采水井而提出的, 后来引用到了油藏工程领域, 并用于采油井的计算。开始引用时, 油藏工程领域对地层伤害的概念还知之甚少。但是, 经过几十年的发展, 人们对地层伤害的研究已经十分深入, 并且在几乎所有有关油井产量的计算公式中都引入了表皮因子, 以反映地层伤害程度对油井生产动态的影响。地层伤害已是油藏工程中一个极其重要的概念, 并且已渗透到诸如压裂酸化设计、油井评价等许多方面。但是, 开采底水油藏油井的临界产量计算公式还依然采用最初的形式, 而没有考虑地层的伤害问题。本文的目的就是对最初的 Dupuit 临界产量公式的原形进行修正, 以便能反映地层伤害的情况, 使其更好地服务于底水油藏的开发管理。

1 Dupuit 临界产量公式

为防止底水锥进, 开采底水油藏油井的射孔井段一般都位于含油层段的顶部, 底部留有一定的避水高度(图 1)。油井投产之后, 周围会形成一个“漏斗”状的压力分布, 通常称之为压降漏斗。地层压力从井底沿径向距离向供给边界逐渐升高。由于油井从油层部位采油, 因而油层的压力则低于底水的压力。在水、油压力差(动力)的作用之下, 底水向上锥进。同时, 由于水的密度大于油的密度, 重力(阻力)的作用又抑制水锥的形成。当水油压差与重力作用达到平衡时, 即形成一个稳定的山峰似的水锥。

显然, 油井的产量越大, 井底周围的压降漏斗就越深, 水锥的高度也就越大。当水锥刚好锥进到井底时的油井产量, 称作油井的临界产量(图 1)。当油井的实际产量大于油井的临界产量时, 油井必将见水; 当油井的实际产量小于油井的临界产量时, 油井则不会见水。为了防止油井产水, 可以把油井的产量控制在临界产量之下。因此, 临界产量就成了油井的一个特征产量, 也是决定和控制油井是否见水的一个重要参数。开发底水油藏必须认真研究并确定油井的临界产量数值, 油井临界产量计算也是底水油藏研究的一项重要内容。

Dupuit 临界产量是在以下假设条件下导出的：Darcy 稳定渗流、均质地层、忽略毛管压力、油水密度及黏度为常数。图 1 为底水油藏油井以临界产量生产时的流动形态和油井打开程度示意图。

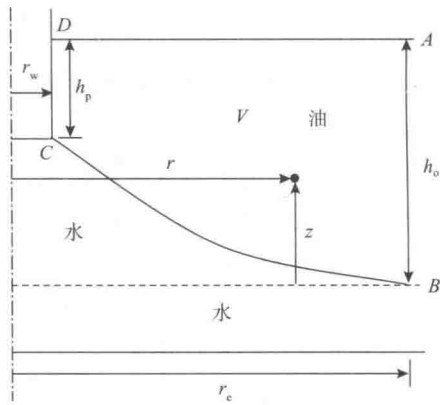


图 1 均质无污染地层临界水锥形态

根据 Darcy 定律，流体的渗流速度为^[2]

$$V = - \frac{k}{\mu} \nabla \Phi \tag{1}$$

- 式中 V ——渗流速度矢量；
- k ——地层渗透率，D；
- μ ——流体黏度，mPa·s；
- Φ ——流体势，MPa。

流体势的表达式为

$$\Phi = p + \rho g z \tag{2}$$

- 式中 p ——流体压力，MPa；
- ρ ——流体密度，g/cm³；
- g ——重力加速度，m/s²；
- z ——垂向坐标(图 1)，向上为正，向下为负，m。

根据渗流力学理论^[2]，流体稳定渗流的连续性方程为

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{3}$$

式(3)表明渗流速度的散度为 0。

把式(1)代入式(3)，得

$$\nabla \cdot \nabla \Phi = \nabla^2 \Phi = \Delta \Phi = 0 \tag{4}$$

式(4)表明，流体势 Φ 满足 Laplace 方程。

如果油井以临界产量生产，则底水不流动，底水的流体势为常数

$$\Phi_w = p_w + \rho_w g z = \text{常数} \tag{5}$$

- 式中 Φ_w ——水相势，MPa；
- p_w ——水相压力，MPa；
- ρ_w ——水的密度，g/cm³。

由于忽略了毛管压力，则油水界面两侧的油、水相压力应相等，即在任意高度 z 处的油水界面处

$$p_o(z) = p_w(z) = \Phi_w - \rho_w gz \quad (6)$$

式中 p_o ——油相压力，MPa。

因此，油水界面处的油相势为

$$\Phi_o(z) = p_o(z) + \rho_o gz = \Phi_w - \rho_w gz + \rho_o gz = \Phi_w - \Delta\rho_{wo}gz \quad (7)$$

式中 Φ_o ——油相势，MPa；

ρ_o ——油的密度， g/cm^3 ；

$\Delta\rho_{wo}$ ——水油密度差， g/cm^3 。

在井点处， $z = h_o - h_p$ 、 $r = r_w$ ，则

$$\Phi_o = \Phi_w - \Delta\rho_{wo}g(h_o - h_p) \quad (8)$$

式中 r ——径向距离，m；

r_w ——油井半径，m；

h_o ——油柱高度，m；

h_p ——射孔厚度(图1)，m。

在外边界处， $z=0$ 、 $r=r_e$ ，则

$$\Phi_o = \Phi_w \quad (9)$$

把 Green 第二公式应用到油相所占据的油藏体积 V 中(图1)。Green 第二公式为^[3]：对于两个定义在体积 V 内具有一、二阶连续导数的函数 U 和 W ，下式成立

$$\iiint_V (W\Delta U - U\Delta W) dV = \iint_S \left(W \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial W}{\partial n} \right) dS \quad (10)$$

式中 S ——体积 V 的表面；

n ——表面 S 的外法线单位矢量。

对于底水油藏， U 和 W 可以取作

$$U = \Phi_o \quad (11)$$

$$W = \ln \frac{r}{r_w} \quad (12)$$

由于 U 和 W 都满足 Laplace 方程，因此，式(10)可以写成

$$\iint_S \left[\ln \frac{r}{r_w} \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} - \Phi_o \frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{r}{r_w} \right) \right] dS = 0 \quad (13)$$

在图1中，表面 S 由径向对称元素 AB 、 BC 、 CD 和 DA 四个曲面组成。在这些边界上，式(13)中的积分可按下面的步骤进行计算。

沿 AB 线

$$\ln \frac{r}{r_w} = \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Phi_o}{\partial n} = \frac{q_c \mu_o}{2\pi k h_o r_e} \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{r}{r_w} \right) = \frac{1}{r_e} \quad (16)$$

$$dS = 2\pi r_e dz \quad (17)$$

沿 BC 线(图2)

$$\frac{\partial \Phi_o}{\partial n} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{r}{r_w} \right) = - \frac{\sin \theta}{r} \quad (19)$$

$$dS = 2\pi r dl = \frac{2\pi r dz}{\sin \theta} \quad (20)$$

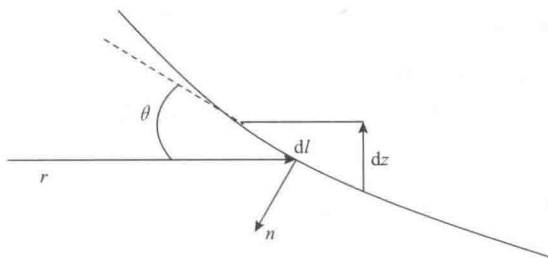


图2 油水界面单元

沿 CD 线

$$\ln \frac{r}{r_w} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{r}{r_w} \right) = - \frac{\partial}{\partial r} \left(\ln \frac{r}{r_w} \right) = - \frac{1}{r_w} \quad (22)$$

$$dS = 2\pi r_w dz \quad (23)$$

沿 DA 线

$$\frac{\partial \Phi_o}{\partial n} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{r}{r_w} \right) = 0 \quad (25)$$

把式(14)~式(25)代入式(13), 得

$$\frac{q_c \mu_o}{2\pi k} \ln \frac{r_e}{r_w} = \int_0^{h_o} \Phi_o(r_e) dz - \int_0^{h_o-h_p} \Phi_o(z) dz - \int_{h_o-h_p}^{h_o} \Phi_o(r_w) dz \quad (26)$$

把边界条件式(8)和式(9)代入式(26), 得油井的 Dupuit 临界产量计算公式

$$q_c = \frac{\pi k \Delta \rho_{wo} g (h_o^2 - h_p^2)}{\mu_o \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (27)$$

式中 q_c ——油井的临界产量(地下), m^3/Ms 。

2 修正 Dupuit 临界产量公式

Dupuit 临界产量公式是在均质地层的假设条件下导出的, 该公式未考虑油井的表皮因子。如果地层受到了伤害, 即油井带有了一个表皮, 则整个地层为一个非均质地层。为了导

出非均质地层的油井临界产量，可以把非均质地层划分成两个均质地层：内区和外区（图3）。内区区域为 V_s ，渗透率为 k_s ，内边界为 r_w ，外边界为 r_s ，外边界处的油柱高度为 h_s ；外区区域为 V ，渗透率为 k ，内边界为 r_s ，外边界为 r_e ，外边界处的油柱高度为 h_o 。

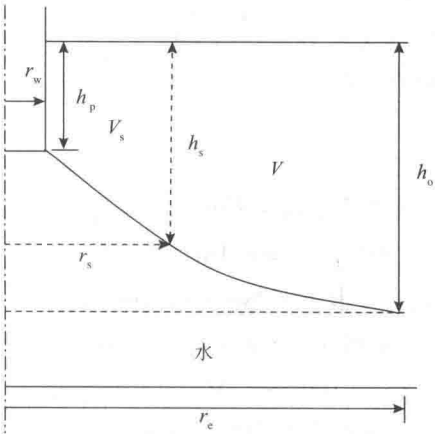


图3 非均质地层底水锥进示意图

对于外区的均质区域 V ，Dupuit 临界产量公式为

$$q_c = \frac{\pi k \Delta \rho_{wo} g (h_o^2 - h_s^2)}{\mu_o \ln \frac{r_e}{r_s}} \tag{28}$$

对于内区的均质区域 V_s ，Dupuit 临界产量公式为

$$q_c = \frac{\pi k_s \Delta \rho_{wo} g (h_s^2 - h_p^2)}{\mu_o \ln \frac{r_s}{r_w}} \tag{29}$$

式(28)也可以写成

$$h_o^2 - h_s^2 = \frac{q_c \mu_o}{\pi k \Delta \rho_{wo} g} \ln \frac{r_e}{r_s} \tag{30}$$

式(29)也可以写成

$$h_s^2 - h_p^2 = \frac{q_c \mu_o}{\pi k_s \Delta \rho_{wo} g} \ln \frac{r_s}{r_w} \tag{31}$$

式(30)和式(31)相加，并整理后得

$$q_c = \frac{\pi k \Delta \rho_{wo} g (h_o^2 - h_p^2)}{\mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \tag{32}$$

式中 s ——油井的机械表皮因子，dless。

s 的计算公式为^[4]

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \tag{33}$$

s 大于0，表明油井为受伤害井， s 的数值越大，油井受到的伤害程度就越高； s 小于0，表明油井为超完善井， s 的数值越小，油井的超完善程度就越高； s 等于0，油井为理想井。

式(32)为引入表皮因子之后的临界产量公式,即修正 Dupuit 临界产量公式。
式(32)计算的临界产量为地层条件下的体积流量,若用地面条件表示,则为

$$q_c = \frac{\pi k \Delta \rho_{wo} g (h_o^2 - h_p^2)}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (34)$$

式中 B_o ——地层原油体积系数, dless。

3 应用举例

某油藏油井系统的基本参数如下: $h_o = 17\text{m}$, $h_p = 11\text{m}$, $k = 0.4\text{D}$, $\rho_w = 1.1\text{g/cm}^3$, $\rho_o = 0.7\text{g/cm}^3$, $\mu_o = 0.5\text{mPa}\cdot\text{s}$, $r_e = 500\text{m}$, $r_w = 0.1\text{m}$, $B_o = 1.5$ 。

把 $s = 0$ 代入式(34), 得 $q_c = 129.5\text{m}^3/\text{Ms} = 11.2\text{m}^3/\text{d}$;

把 $s = 3$ 代入式(34), 得 $q_c = 95.8\text{m}^3/\text{Ms} = 8.3\text{m}^3/\text{d}$;

把 $s = -3$ 代入式(34), 得 $q_c = 199.9\text{m}^3/\text{Ms} = 17.3\text{m}^3/\text{d}$ 。

从上面的计算可以看出, 考虑和不考虑地层伤害的油井临界产量完全不一样, 对于存在地层伤害的油井, 直接用 Dupuit 临界产量公式计算的结果偏大, 或者说受伤害油井的临界产量比理想井低; 而对于压裂或酸化过的超完善油井, 直接用 Dupuit 临界产量公式计算的结果偏小, 或者超完善油井的临界产量比理想井高。

4 结论

(1) 本文给出了考虑地层伤害的底水油藏油井的临界产量计算公式, 并称之为修正 Dupuit 临界产量公式。

(2) 受伤害油井的临界产量比理想井低。

(3) 超完善油井的临界产量比理想井高。

参 考 文 献

- [1] Hagoort J. Fundamentals of gas reservoir engineering[M]. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1988: 215-222.
- [2] 贝尔 J 著, 李竞生 译. 多孔介质流体动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 93-94.
- [3] 南京工学院编. 数学物理方程与特殊函数[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [4] 秦同洛, 李璽, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 182.

利用矿场资料确定底水油藏油井 临界产量的新方法

摘 要: 底水油藏油井的临界产量可以用修正 Dupuit 临界产量公式进行计算。但是, 修正 Dupuit 临界产量公式需要事先知道油藏和油井的许多参数, 这在矿场上往往很难做到, 因而限制了公式的实际应用。对修正 Dupuit 临界产量公式进行了改造, 把其中未知的参数组合后由已知矿场资料参数加以替代, 从而使公式的计算问题成为可能。新提出的通过矿场资料计算油井临界产量的公式称作矿场实用公式, 该公式简便可靠, 实用性强, 不仅适用于油井, 也适用于气井。

关键词: 底水油藏; 油井; 产量; 临界产量; 稳定试井; 静压梯度

0 引言

开采底水油藏, 人们最担心底水的锥进问题。对于开采底水油藏的油井, 人们想尽早知道该井的临界产量有多大, 以便确定油井的合理工作制度。油藏工程一般用 Dupuit 临界产量公式^[1]和修正 Dupuit 临界产量公式计算油井的临界产量^[2], 但是, 使用该公式必须事先知道油藏和油井的许多参数, 而这些参数在油井投产初期是很难确定的, 即使在油田开发后期其中的某些参数也难以准确确定出来。因此, 实际计算时不得不假设一些参数值, 粗略地估计一下油井的临界产量。这种估计有时偏差较大, 甚至导致油井工作制度的错误建立。笔者经过研究, 给出了利用矿场稳定试井和静压梯度资料确定底水油藏油井临界产量的新方法, 并用实例说明了该方法的使用过程及其优点。

1 矿场实用公式

底水油藏油井的修正 Dupuit 临界产量公式为^[2]

$$q_c = \frac{\pi k \Delta \rho_{wo} g (h_o^2 - h_p^2)}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (1)$$

式中 q_c ——油井临界产量, m^3/Ms ;

k ——油藏渗透率, D ;

$\Delta \rho_{wo}$ ——水油密度差, g/cm^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

h_o ——油柱高度, m ;

h_p ——射孔厚度(从油层顶界起算), m ;

B_o ——地层原油体积系数, $dless$;

μ_o ——地层原油黏度, mPa·s;

r_e ——油井泄油半径, m;

r_w ——油井完井半径, m;

s ——油井表皮因子, dless。

用式(1)计算油井的临界产量需要知道很多参数, 其中大部分参数都是无法精确确定的, 因此式(1)实际上也是无法直接使用的。若用实验室测量的岩心参数进行计算, 则不能代表地下的情况, 计算结果偏差较大。为了计算油井的临界产量, 把式(1)改写成

$$q_c = \frac{h_p}{2b} \frac{2\pi k}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \Delta \rho_{wo} g h_o (1 - b^2) \quad (2)$$

式中 b ——油层的打开程度, f。

b 的计算公式为

$$b = \frac{h_p}{h_o} \quad (3)$$

根据油井的稳定试井资料, 可以确定出油井的采油指数^[3,4], 即

$$J_o = \frac{q_o}{\Delta p} = \frac{2h_p}{1+b} \frac{2\pi k}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (4)$$

式中 J_o ——油井采油指数, m³/(Ms·MPa);

q_o ——油井产量, m³/Ms;

Δp ——油井生产压差, MPa。

把式(4)代入式(2), 得

$$q_c = \frac{1+b}{4b} J_o \Delta \rho_{wo} g h_o (1 - b^2) \quad (5)$$

式(5)就是油井临界产量的矿场实用公式, 其中的主要参数都可以通过矿场资料加以确定。油柱高度(油层厚度)可以通过测井方法或取心资料加以确定。射开厚度及打开程度为已知参数。

式(5)中的采油指数 J_o 可以通过稳定试井获得, 图1为稳定试井获得的油井生产指示曲线, 指示曲线的方程为下面的式(6), 曲线的斜率即为采油指数

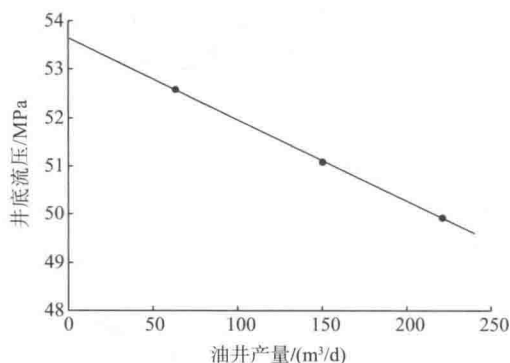


图1 油井生产指示曲线