

塔河

复杂油气藏

含水上升规律研究

陈 青 吴婷婷 何彦庆 石世革 王旭东 / 著



科学出版社

塔河复杂油气藏含水上升 规律研究

陈 青 吴婷婷 何彦庆 石世革 王旭东 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以塔河油田复杂油气藏为例,在利用水驱特征曲线研究砂岩油藏含水变化规律的基础上,介绍缝洞型碳酸盐岩油藏的含水变化规律及油水分布模式,包括油藏含水率曲线及用于识别水窜时的分类,油井水窜的判断标准,堵水方式的适应性评价,水驱曲线特征和单井水驱曲线多样性分析,缝洞单元油水界面评价以及流体分布模式;分析塔河一、九区底水砂岩油藏水平井的出水规律,包括油藏产水特征,水平井出水判别、渗流特征以及出水模式。

本书主要适用于油田勘探开发领域的研究人员以及石油相关院校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

塔河复杂油气藏含水上升规律研究/陈青等著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-054234-2

I. ①塔… II. ①陈… III. ①砂岩油气藏-水压驱动-研究-塔河县
IV. ①TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 210308 号

责任编辑:张 展 郑述方/ 责任校对:江 茂

封面设计:墨创文化/ 责任印制:罗 科

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:15

字数:360千字

定价:158.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

在油藏注水开发过程中，随着注水工作的不断深入，油井逐渐见水，且含水率将不断升高，含水上升必然影响油田的产量和有关的开发技术政策，给油田开发带来一系列棘手的问题，因此研究含水上升规律，根据含水上升规律和特点，控制或延缓含水上升速度，对保持油田稳产、降低开采成本非常重要。

通常油田含水上升规律的研究采用水驱特征曲线法，即水驱油藏全部投入开发并达到稳产后，其含水率达到一定程度并逐步上升时，累积产水量与累积产油量或水油比与累计产油量在半对数坐标轴上构成的关系。塔河油田缝洞型碳酸盐岩油气藏具有严重的非均质性，油井含水上升的变化规律与常规砂岩油气藏表现出很大的不同。因此，将底水砂岩油藏与缝洞型碳酸盐岩油藏进行对比研究，利用油田开发中的实际生产数据，进而分析、认识塔河复杂性油藏的含水变化规律特征，为制定油田规划、调控技术对策提供依据。

本书编写的内容分为4章，第1章介绍砂岩油藏水驱特征曲线的理论推导、反演以及水驱特征曲线的分类，并且对直线段及上翘部分进行研究，分析砂岩油藏水驱特征曲线的适用条件及目前的主要应用方面。第2章详细介绍含水率曲线的分类、含水率曲线用于油井水窜识别时的几种分类情况，并给出油井水窜的判断标准和类型判定，在此基础上评价堵水方式的适应性，此外针对塔河缝洞型油藏的水驱曲线特征和单井水驱曲线多样性特征进行介绍。第3章对油藏油水分布模式进行研究，基于塔河油田缝洞型油藏多年来的开发经验，阐述其地质开发的特殊性，以此分析塔河油藏缝洞单元油水分布模式的特殊性，并以实例为基础详细介绍缝洞单元油水界面的评价方法。第4章主要介绍塔河一、九区底水砂岩油藏水平井的出水规律，包括油藏的产水特征分析、水平井出水模式分析。在本书的研究和撰写过程中，要衷心感谢闫长辉老师为我们提出的建议，以及何勇明、刘伟老师的大力协助，同时我们参考了大量的资料和书籍，其中一部分已在书后参考文献中列出，在此谨对原作者表示深切的谢意！

由于我们水平有限，在编写过程中难免有遗漏和错误，我们诚挚地欢迎广大读者批评指正和提出宝贵意见，使本书日渐完善。

作者

目 录

第1章 砂岩油藏水驱特征曲线研究	1
1.1 经典水驱特征曲线理论推导	1
1.2 主要水驱特征曲线的反演	4
1.3 水驱特征曲线的分类	14
1.4 砂岩油藏水驱曲线直线段及上翘部分研究	17
1.4.1 水驱曲线直线段研究	17
1.4.2 水驱曲线上翘部分研究	19
1.4.3 实例分析	23
1.5 砂岩油藏水驱特征曲线的适用条件及应用	26
1.5.1 砂岩油藏水驱特征曲线的适用条件	26
1.5.2 砂岩油藏水驱特征曲线的应用	28
1.5.3 实例分析	30
第2章 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏的含水规律	32
2.1 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏含水率曲线的分类	32
2.2 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏油井水窜的识别	35
2.2.1 油井水窜识别标准	35
2.2.2 油井水窜类型判定	42
2.2.3 油井水窜强度与堵水方式的适应性	47
2.3 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏水驱曲线特征	49
2.4 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏水驱油机理研究	57
2.4.1 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏水驱油机理	57
2.4.2 实例分析	72
第3章 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏油水分布模式研究	101
3.1 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏的地质开发特殊性	101
3.1.1 油藏地质特征	101
3.1.2 油藏构造特征	103
3.1.3 断裂发育特征	104
3.1.4 古岩溶环境特征	106
3.2 塔河碳酸盐岩缝洞单元的油水分布模式	107
3.2.1 缝洞单元内油水界面的评价	107

3.2.2 缝洞单元流体的分布形式	122
第4章 塔河底水砂岩油藏水平井出水规律	205
4.1 油藏产水分析	207
4.1.1 生产动态分析	207
4.1.2 单井产水特征	207
4.1.3 油藏产水特征	209
4.2 水平井出水模式分析	211
4.2.1 水平井出水类型的划分	211
4.2.2 水平井出水判别方法	214
4.2.3 水平井渗流特征分析	217
4.2.4 水平井出水模式分析	218
参考文献	230

第 1 章 砂岩油藏水驱特征曲线研究

生产实践表明,一个天然水驱或人工水驱的油藏,当它全部投入开发并达到稳产后,其含水率达到一定程度并逐步上升时,累计产水量(W_p)与累计产油量(N_p)或水油比(WOR)与累计产油量(N_p)在半对数坐标纸上构成的关系图,称为水驱特征曲线。水驱特征曲线是水驱油田开发动态的基本曲线,是地层岩石相渗特征在生产规律上的宏观反映,表征含水率与采出程度的关系曲线,是预测水驱油田未来开发动态和最终采收率的重要手段,并已得到广泛应用。

水驱特征曲线法可用来研究油田含水规律、预测开采指标以及标定可采储量,该方法主要是利用油田开发中的实际生产数据,经一定的数学模型与辨识,来分析、认识含水规律,提高预测指标的可靠性,并为制定油田规划、调控技术对策提供依据^[1]。

1.1 经典水驱特征曲线理论推导

水驱特征曲线首先以经验公式的形式出现,以苏联学者建立的水驱曲线为代表,1981年我国学者童宪章在油藏水驱规律曲线研究的基础上,首次将水驱曲线分为三种形式:甲型、乙型和丙型,阐述了三种水驱曲线的绘制方法以及其所反映的基本规律。随后,陈元千基于油水两相的驱替理论及相关实验研究,对已有的水驱曲线关系进行了较为完善的理论推导,并赋予其物理意义。

近年来,水驱特征曲线的发展已经比较完善,目前常用的水驱特征曲线已有 40 多种应用于油田^[2],可以对累计产油、累计产水、累计产液、产油量、产水量、产液量、含水率、水油比、可采储量等各项指标进行预测。

经典水驱特征曲线理论推导,以陈元千对甲型水驱关系式的推导为例,该型水驱曲线关系式的推导如下^[2]。

在油水两相渗流的条件下,油水两相的相对渗透率比随出口端含水饱和度的变化,可由如下的指数关系式表示:

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = \frac{K_o/K}{K_w/K} = \frac{K_o}{K_w} = n e^{-m S_w} \quad (1-1)$$

式中, K_{ro} 、 K_{rw} 分别为油、水相对渗透率,无量纲; S_w 为含水饱和度, %。

在水驱的稳定渗流条件下,油水的相渗透率比与油、水产量之间存在如下关系式:

$$\frac{K_o}{K_w} = \frac{Q_o \mu_o B_o \gamma_w}{Q_w \mu_w B_w \gamma_o} \quad (1-2)$$

式中, Q_o 为(地下)产液量, 万 m^3 ; μ_o 、 μ_w 分别为地层原油和地层水黏度, cP; γ_o 、 γ_w 分别为地层原油和地面水比重; B_w 为地层水体积系数。

将式(1-2)带入式(1-1)得产水量:

$$Q_w = Q_o \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{n \mu_w B_w \gamma_o} e^{m S_w} \quad (1-3)$$

已知油田的累计产水量为

$$W_p = \int_0^1 Q_w dt \quad (1-4)$$

将式(1-3)代入式(1-4)得

$$W_p = \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{n \mu_w B_w \gamma_o} \int_0^1 Q_o e^{m S_w} \cdot dt \quad (1-5)$$

在注水保持地层压力的条件下, 原油目前体积系数 $B_o = B_{oi}$, 因此水驱油田累计产油量可表示为

$$N_p = 100 F h \phi \frac{\gamma_o}{B_{oi}} (\bar{S}_w - S_{wi}) \quad (1-6)$$

式中, N_p 为累计产油量, 万 m^3 ; F 为含油面积, km^2 ; h 、 ϕ 分别为油层有效厚度和孔隙度, %; S_{wi} 为束缚水饱和度, %。

结合 Welge 方程和艾富罗斯的实验理论研究, 地层内的平均含水饱和度可表示为

$$\bar{S}_w = \frac{2}{3} S_{we} + \frac{1}{3} (1 - S_{or}) \quad (1-7)$$

式中, S_{we} 为水驱油出口端含水饱和度, %; S_{or} 为残余油饱和度, %。

再将式(1-7)代入式(1-6)得

$$N_p = 100 F h \phi \frac{\gamma_o}{B_{oi}} \left[\frac{2}{3} S_{we} + \frac{1}{3} (1 - S_{or}) - S_{wi} \right] \quad (1-8)$$

由式(1-8)对时间 t 求导数后得产油量:

$$Q_o = \frac{dN_p}{dt} = 100 F h \phi \frac{\gamma_o}{B_{oi}} \frac{2}{3} \frac{dS_{we}}{dt} \quad (1-9)$$

将式(1-9)的分子与分母同乘以 $(1 - S_{wi})$ 得

$$Q_o = \frac{100 F h \phi (1 - S_{wi}) \gamma_o / B_{oi}}{(1 - S_{wi})} \frac{2}{3} \frac{dS_{we}}{dt} \quad (1-10)$$

水驱油田地质储量可以由下式表示:

$$N_o = 100 F h \phi (1 - S_{wi}) \gamma_o / B_{oi} \quad (1-11)$$

将式(1-11)代入式(1-10)得

$$Q_o = \frac{N_o}{(1 - S_{wi})} \frac{2}{3} \frac{dS_{we}}{dt} \quad (1-12)$$

将式(1-12)代入式(1-5)得

$$W_p = \frac{N_o}{(1 - S_{wi})} - \frac{2 \mu_o B_o \gamma_w}{3 n \mu_w B_w \gamma_o} \int_{S_{wi}}^{S_{we}} e^{m S_{we}} dS_{we} \quad (1-13)$$

对式(1-13)积分得

$$W_p = \frac{2 N_o \mu_o B_o \gamma_w}{3 m n \mu_w B_w \gamma_o (1 - S_{wi})} (e^{m S_{we}} - e^{m S_{wi}}) \quad (1-14)$$

若令

$$D = \frac{2N_o\mu_o B_o \gamma_w}{3mn\mu_w B_w \gamma_o (1 - S_{wi})} \quad (1-15)$$

则得

$$W_p = D(e^{mS_{we}} - e^{mS_{wi}}) \quad (1-16)$$

再令

$$C = De^{mS_{wi}} \quad (1-17)$$

又得

$$W_p = De^{mS_{we}} - C \quad (1-18)$$

将式(1-18)改写为下式:

$$W_p + C = De^{mS_{we}} \quad (1-19)$$

油水两相流的出口端含水饱和度:

$$S_{we} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_p S_{or}}{N_o} + S_{wi} \right) - \frac{1}{2} (1 - S_{or}) \quad (1-20)$$

再将式(1-20)代入式(1-19)得

$$\begin{aligned} W_p + C &= De^m \left[\frac{3}{2} \left(\frac{N_p S_{or}}{N_o} + S_{wi} \right) - \frac{1}{2} (1 - S_{or}) \right] \\ &= De^{\left[\frac{3mS_{or}N_p}{2N_o} + \frac{m}{2} (3S_{wi} + S_{or} - 1) \right]} \end{aligned} \quad (1-21)$$

再令

$$E = \frac{m}{2} (3S_{wi} + S_{or} - 1) \quad (1-22)$$

则得

$$W_p + C = De^{\left[\frac{3mS_{or}N_p}{2N_o} + E \right]} \quad (1-23)$$

对式(1-23)取常用对数后得

$$\lg(W_p + C) = \lg D + \frac{E}{2.303} + \frac{3mS_{oi}}{4.606N_o} N_p \quad (1-24)$$

若令

$$A = \lg D + \frac{E}{2.303} \quad (1-25)$$

$$B = \frac{3mS_{oi}}{4.606N_o} \quad (1-26)$$

则得

$$\lg(W_p + C) = A + BN_p \quad (1-27)$$

由式(1-27)可以看出, 累计产水量必须加上一个常数, 才能与累计产油量在半对数坐标轴上呈一完整的直线关系。但是, 随着油田的持续生产, 含水率和累计产水量的持续增加, 常数 C 的影响逐渐减少。因而, 在油田开发的中、后期, 累计产水量和累计产油量在半对数坐标上便呈一条直线关系。此时即可得到水驱曲线的甲型关系式为

$$\lg W_p = A + BN_p \quad (1-28)$$

若令

$$\beta = BN_o = 3mS_{oi}/4.606$$

(1-29)

$$R_o = N_p/N_o$$

(1-30)

则得

$$\lg W_p = A + \beta R_o$$

(1-31)

式中, β 为水驱曲线直线斜率; R_w 、 R_o 分别为采水程度和采油程度, 无因次; C 、 D 、 E 、 m 、 n 分别为不同的常数。

陈元千基于油水两相的驱替理论、Welge 的平均含水饱和度方程以及艾富罗斯的实验理论研究成果, 对水驱曲线的基本关系式进行了较为完整的理论推导, 从而赋予其物理意义。乙型和丙型水驱曲线基本关系式可参照甲型关系式进行推导。

1.2 主要水驱特征曲线的反演

水驱特征曲线表征累计产油与累计产水、累计产油与累计产液之间的关系, 为了对油田最终采收率进行标定, 在分析稳定水驱的开发数据时, 则需要把水驱特征曲线经过微分变换, 转换成含水率与采出程度的关系式, 取极限含水率并求出对应的采出程度作为油田的最终水驱采收率。一般将这一过程称为水驱特征曲线的反演^[1]。

以某区块的开发数据为例, 如表 1-1 所示, 分别介绍以下常用的水驱曲线。该区块的动用地质储量为 2043 万 t。

表 1-1 区块开发数据表

时间/年	N_p /万 t	W_p /万 t	f_w/f
投产前	14.6528	0.1613	0.0108
1	37.5710	0.2157	0.0024
2	115.6383	1.1238	0.0115
3	197.3828	4.6454	0.0413
4	272.1961	16.2356	0.1341
5	336.9429	42.0967	0.2854
6	381.747	78.5794	0.4488
7	415.9279	104.8244	0.4343
8	439.7088	143.2142	0.6175
9	453.7176	179.6759	0.7224
10	465.2331	206.9068	0.7028
11	472.2743	232.1899	0.7822
12	475.2173	244.8331	0.8112

1. 马克西莫-童宪章曲线〔(甲型)未校正〕

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln W_p \tag{1-32}$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{a + b \ln b}{N} + \frac{b}{N} \ln \left(\frac{f_w}{1 - f_w} \right) \tag{1-33}$$

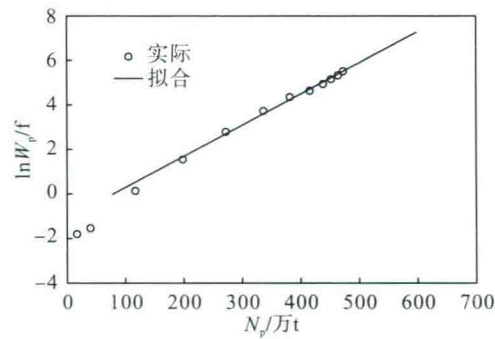


图 1-1 水驱特征曲线(一)

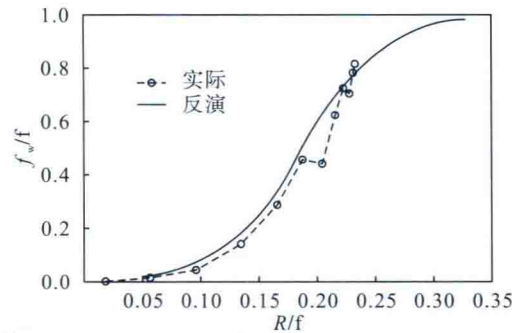


图 1-2 含水率与采出程度曲线(一)

2. 沙卓洛夫曲线 〔(乙型)未校正〕

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln L_p \tag{1-34}$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{a + b \ln b}{N} + \frac{b}{N} \ln \left(\frac{1}{1 - f_w} \right) \tag{1-35}$$

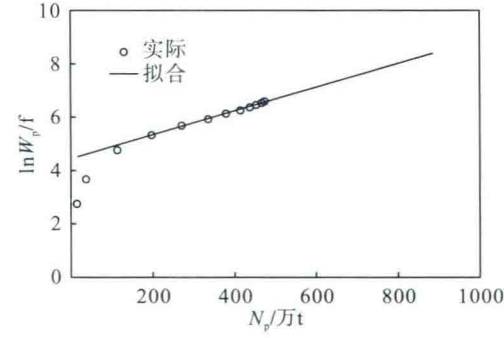


图 1-3 水驱特征曲线(二)

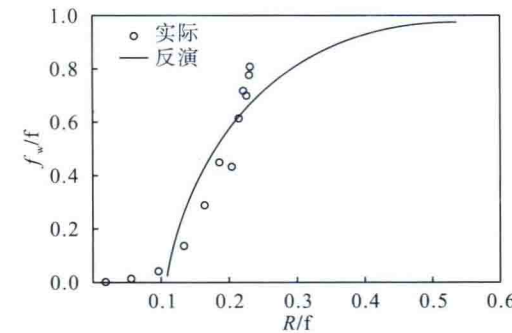


图 1-4 含水率与采出程度曲线(二)

3. 西帕切夫曲线 〔(丙型)未校正〕

水驱特征曲线:

$$\frac{L_p}{N_p} = a + bL_p \quad (1-36)$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{1}{bN} - \frac{1}{bN} \sqrt{a(1-f_w)} \quad (1-37)$$

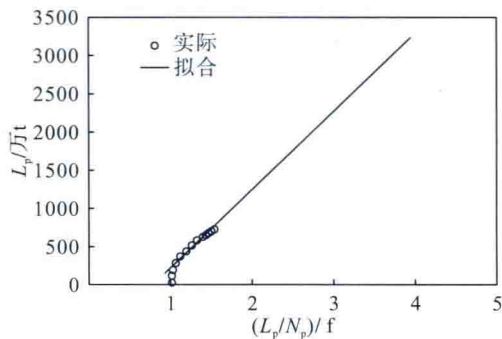


图 1-5 水驱特征曲线(三)

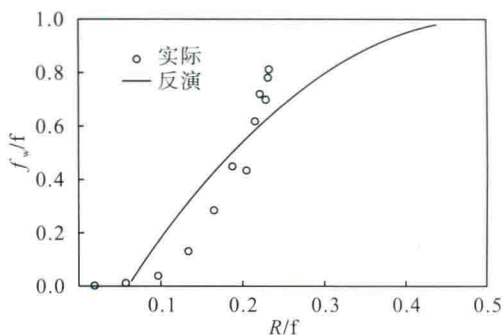


图 1-6 含水率与采出程度曲线(三)

4. 纳扎洛夫曲线 [(丁型)未校正]

水驱特征曲线:

$$\frac{L_p}{N_p} = a + bW_p \quad (1-38)$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{1}{bN} - \frac{1}{bN} \sqrt{\frac{(a-1)(1-f_w)}{f_w}} \quad (1-39)$$

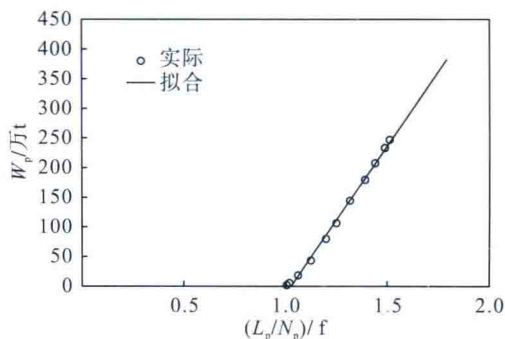


图 1-7 水驱特征曲线(四)

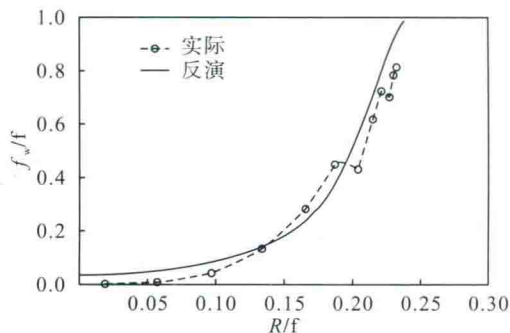


图 1-8 含水率与采出程度曲线(四)

5. 马克西莫-童宪章曲线 [(甲型)校正]

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln(W_p + C) \quad (1-40)$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{a + b \ln b}{N} + \frac{b}{N} \ln \left(\frac{f_w}{1 - f_w} \right) \quad (1-41)$$

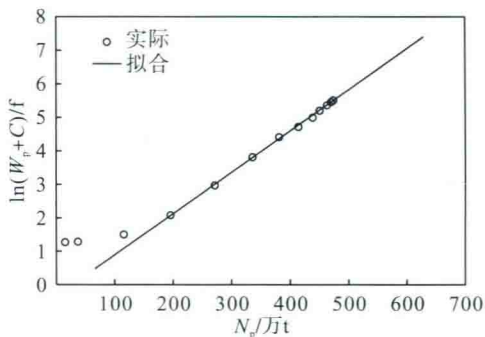


图 1-9 水驱特征曲线(五)

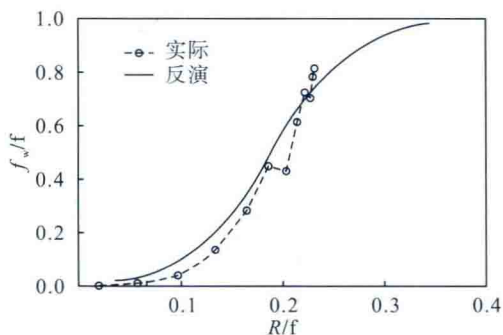


图 1-10 含水率与采出程度曲线(五)

6. 沙卓洛夫曲线 [(乙型)校正]

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln(L_p + C) \quad (1-42)$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{a + b \ln b}{N} + \frac{b}{N} \ln \left(\frac{1}{1 - f_w} \right) \quad (1-43)$$

7. 西帕切夫曲线 [(丙型)校正]

水驱特征曲线:

$$\frac{L_p + C}{N_p} = a + b L_p \quad (1-44)$$

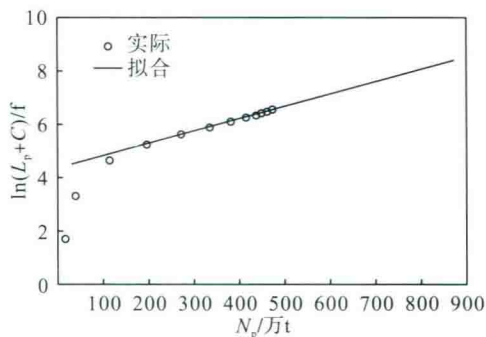


图 1-11 水驱特征曲线(六)

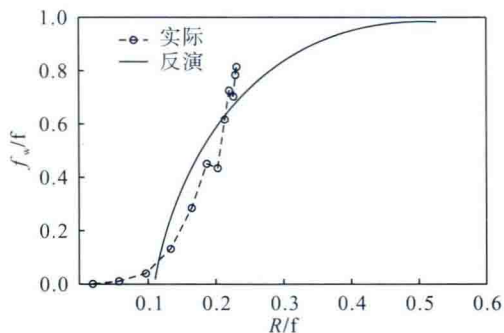


图 1-12 含水率与采出程度曲线(六)

反演为 R - f_w 曲线:

$$R = \frac{1}{bN} - \frac{1}{bN} \sqrt{(a - bC)(1 - f_w)} \quad (1-45)$$

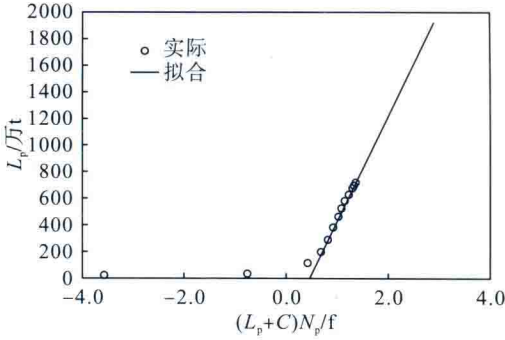


图 1-13 水驱特征曲线(七)

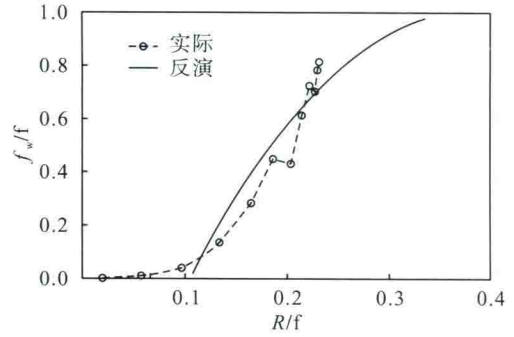


图 1-14 含水率与采出程度曲线(七)

8. 纳扎洛夫曲线 [(丁型)校正]

水驱特征曲线:

$$\frac{L_p + C}{N_p} = a + bW_p \quad (1-46)$$

反演为 $R-f_w$ 曲线:

$$R = \frac{1}{bN} - \frac{1}{bN} \sqrt{\frac{(a - bC - 1)(1 - f_w)}{f_w}} \quad (1-47)$$

9. 万吉业 S-凸形曲线

水驱特征曲线:

$$\ln\left(1 - \frac{N_p}{N}\right) = a - b \ln(L_p + C) \quad (1-48)$$

反演为 $R-f_w$ 曲线:

$$\ln(1 - R) = \frac{a - b \ln(bN)}{1 + b} - \frac{b}{1 + b} \ln\left(\frac{1}{1 - f_w}\right) \quad (1-49)$$

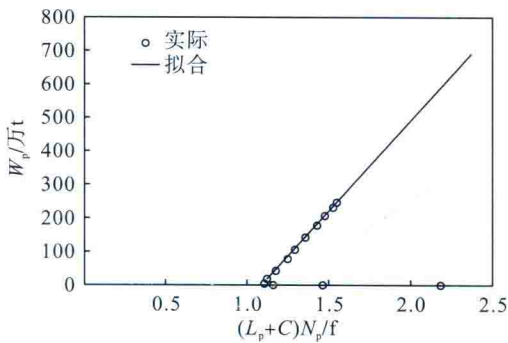


图 1-15 水驱特征曲线(八)

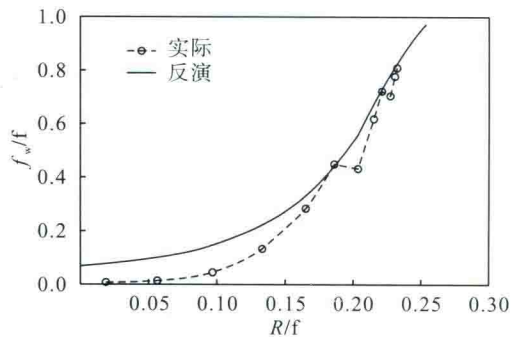


图 1-16 含水率与采出程度曲线(八)

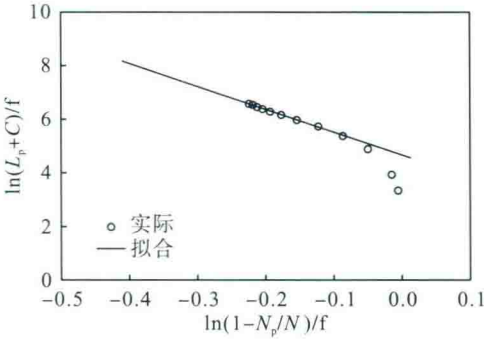


图 1-17 水驱特征曲线(九)

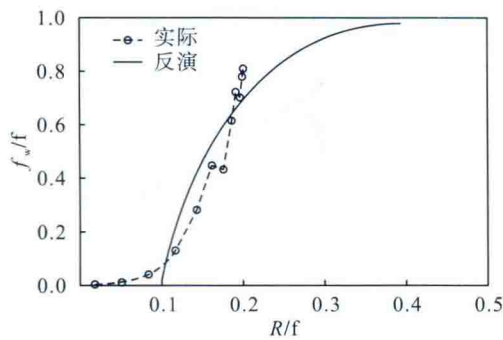


图 1-18 含水率与采出程度曲线(九)

10. 布雷吉曲线(双对数曲线)

水驱特征曲线:

$$\ln N_p = a + b \ln(W_p + C) \quad (1-50)$$

反演为 $R-f_w$ 曲线:

$$\ln R = \frac{a + b \ln b}{1 - b} - \ln N + \frac{b}{1 - b} \ln \left(\frac{f_w}{1 - f_w} \right) \quad (1-51)$$

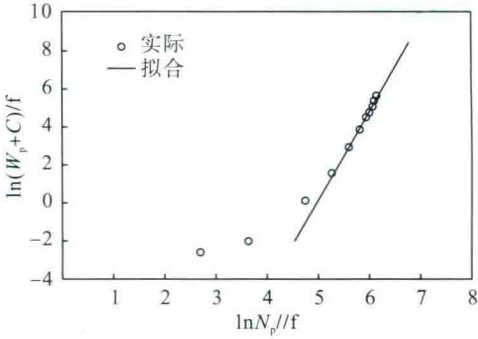


图 1-19 水驱特征曲线(十)

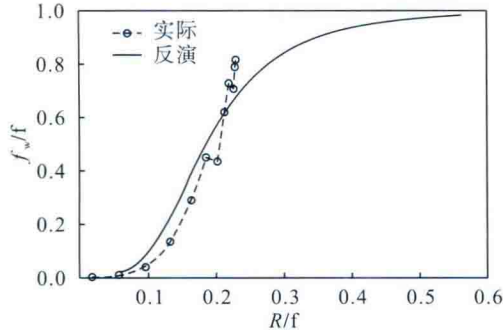


图 1-20 含水率与采出程度曲线(十)

11. 万吉业超凸形曲线

水驱特征曲线:

$$\ln N_p = a + b \ln(L_p + C) \quad (1-52)$$

反演为 $R-f_w$ 曲线:

$$\ln R = \frac{a + b \ln b}{1 - b} - \ln N + \frac{b}{1 - b} \ln \left(\frac{1}{1 - f_w} \right) \quad (1-53)$$

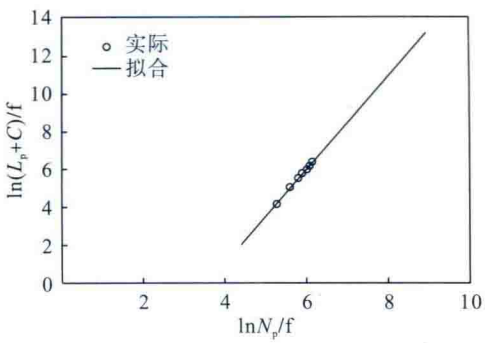


图 1-21 水驱特征曲线(十一)

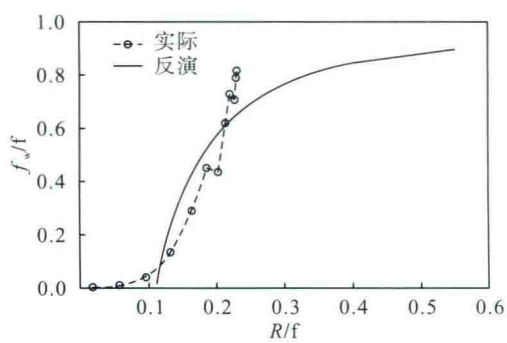


图 1-22 含水率与采出程度曲线(十一)

12. 俞启泰曲线(广义丁型)

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln W_p^n \tag{1-54}$$

反演为 $R-f_w$ 曲线:

$$R = \frac{a}{N} + \frac{b}{(bn)^{n/(n-1)} N} \left(\frac{1-f_w}{f_w} \right)^{n/(n-1)} \tag{1-55}$$

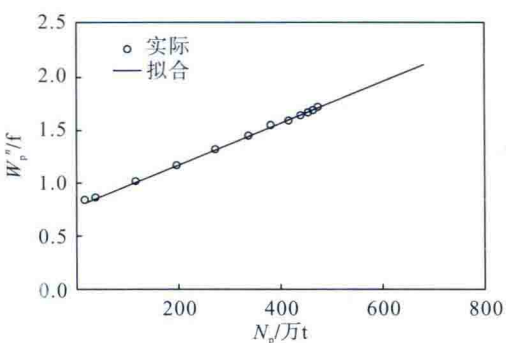


图 1-23 水驱特征曲线(十二)

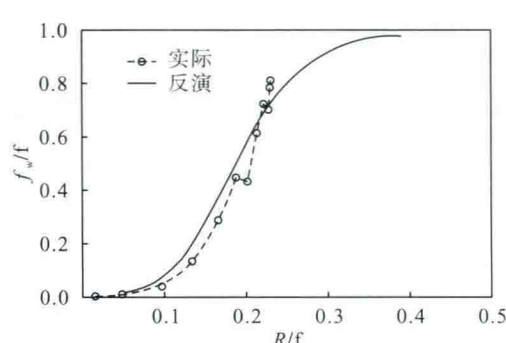


图 1-24 含水率与采出程度曲线(十二)

13. 卡扎柯夫曲线(广义丙型)

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln L_p^n \tag{1-56}$$

反演为 $R-f_w$ 曲线:

$$R = \frac{a}{N} + \frac{b}{(bn)^{n/(n-1)} N} (1-f_w)^{n/(n-1)} \tag{1-57}$$

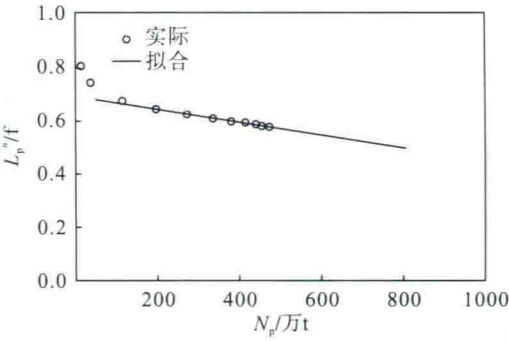


图 1-25 水驱特征曲线(十三)

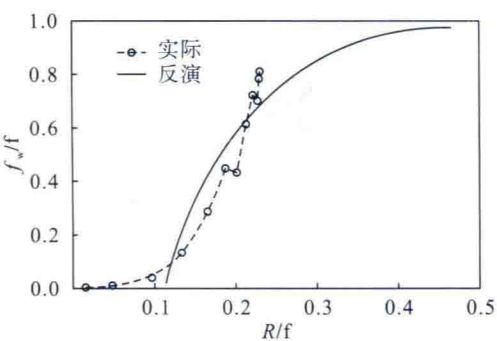


图 1-26 含水率与采出程度曲线(十三)

14. 陈元千曲线

水驱特征曲线:

$$N_p = a + b \ln \frac{W_p + C}{N_p} \tag{1-58}$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$R + \frac{b}{N} \ln \left(\frac{b}{N} + R \right) = \frac{a + b \ln(b/N)}{N} + \frac{b}{N} \ln \left(\frac{f_w}{1 - f_w} \right) \tag{1-59}$$

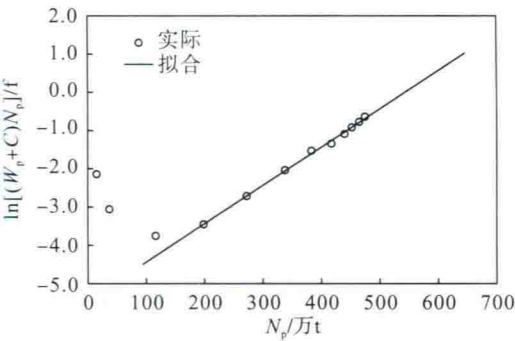


图 1-27 水驱特征曲线(十四)

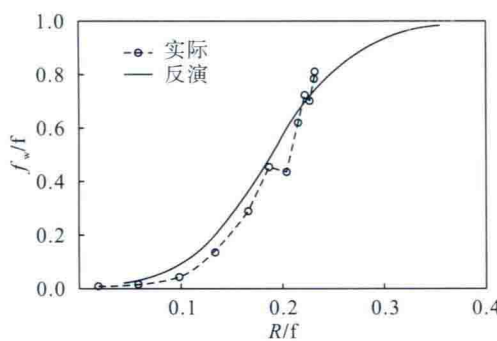


图 1-28 含水率与采出程度曲线(十四)

15. 过渡 I 型曲线

水驱特征曲线:

$$\ln \left(1 - \frac{N_p}{N} \right) = a - b \ln(W_p + nN_p + C) \tag{1-60}$$

反演为 R - f_w 曲线:

$$\ln(1 - R) = \frac{a - b \ln(bN)}{1 + b} - \frac{b}{1 + b} \ln \left[\frac{f_w + n(1 - f_w)}{1 - f_w} \right] \tag{1-61}$$