

油水井生产测试解释

赵人寿 张朝琛 译

石油工业出版社

油水井生产测试解释

Production Log Interpretation

Schlumberger 1970

内 容 提 要

本书译自美国 Schlumberger 公司《Production Log Interpretation》，介绍生产测试在油田开发中的地位和作用。全书共分八章，着重叙述各种测试方法的用途及其解释技术，对测试仪器的结构、性能也作了一定的介绍。

本书可供从事测井、试井工作的工程技术人员及有关院校师生参考。

油水井生产测试解释

Production Log Interpretation

Schlumberger 1970

*

石油工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)
地质印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{2}$, 印张 $8 \frac{7}{8}$, 插页 8 字数 246 千字印数 1—6,000

1978 年 8 月北京第 1 版 1978 年 8 月北京第 1 次印刷

书号 15037·2053 定价 1.30 元

限 国 内 发 行

前 言

评价注、采井的动态通常都是以地面计量，如用量油罐、分离器等所获得的资料为依据的。诸如此类的数据既不完善而且一般也不精确，因为它们无法说清楚井内从每一点产出（或注入）的流体的性质和体积。

生产测试可以提供对一口井作逐层分析所必须的资料，这类测试可以回答：各分层注采量“有多少，是些什么，而又来自何方？”

应用生产测试资料可以对新井进行全面评价，摸清该井是否按规划运营，揭示该井出现问题的机械条件或储层特性。

用各种生产测试方法对储层进行定期复查，能够查明储油层现状和监控储层消耗的进程，从而得到最大的采出量。

在修井之前进行生产测试，可以把修井作业安排得更合理。对井的故障判断的准确，会使修井工作措施正确、工艺简化，对井和储集层的危害也小。生产测试几乎可以对一切油气生产问题给予可靠而又经济的分析。

本书提供了掌握和应用生产测试所必须的资料。其中包括：多相流体垂向流动，生产测试仪器的说明和使用，各种解释方法以及实例，此外还提供了解释所必须的图版和诺模图。

符 号 和 略 语

A	面 积	$\bar{v}$	平均速度
B	地层体积系数	w	质量流量
B/D	桶/天	y	各相流体相对体积百分数(存容比)
BHP	井底压力	z	气体压缩系数
BHT	井底温度	ν	动力粘度
C_p	恒定压力下的比热	ρ	密 度
d	直 径	μ	粘 度
f	频率(周/秒, 转/秒)	σ	界面张力
GOR	油气比	δ	(电磁学的)趋肤深度
g	重力常数		
h	高度或液压头	足 码	
IPR	液流入井关系曲线	b	泡 点
J	产油指数	f	流 体
Mcf/D	1×10^3 英尺 ³ /天	g	气 体
MMscf/D	1×10^6 标准英尺 ³ /天	h	井 眼
P	压 力	hp	重质相
PVT	压力-体积-温度	liq	液 体
q	体积流量	lp	轻质相
R	油气比	m	混合液
scf	标准立方英尺	o	原 油
STP	标准压力和温度	s	滑脱, 地表, 溶解气
T	温 度	sc	标准状况
TC	时间常数	t	总 的
t	时 间	w	水
V	体 积	wf	喷油井
v	速 度	ws	静态井

目 录

符号和略语

第一章 生产测试的应用	1
一、引 言	1
二、井的稳定	1
1. 静态稳定	1
2. 动态稳定	2
3. 短期关井后的重新稳定	2
4. 周期和间歇产油	2
三、用生产测试搞清注采井的问题	3
1. 生产井的问题	3
2. 注入井的问题	5
第二章 井内流体的状态	6
一、引 言	6
1. 生产测试解释所需要的流体数据	6
2. 流体性质的数据来源	6
二、流体参数的校正	7
1. 天然气的地层体积系数	7
2. 天然气比重及其在井底的密度	7
3. 烃类气体的粘度	9
4. 天然气在油中的溶解度	10
5. 油的地层体积系数	11
6. 原油处于泡点以上压力时的压缩率	11
7. 井底条件下原油的密度	12
8. 原油粘度	13
三、地层水的性质	13
1. 水的地层体积系数, B_w	13
2. 井底水的密度	14
3. 地层水的粘度	15
4. 油-水混合液的粘度	16
第三章 垂直管流	17
一、引 言	17
二、单相液流	17
1. 层流和湍流	17
2. 油井中常见的各种液流参数范围	18
3. 流量的测量	18
三、在垂向液流中的压力梯度	19

1. 单相流动	19
2. 两相流动	19
3. 压力梯度的测量	20
四、流 型	20
1. 定 义	20
2. 各种流型的边界	21
五、存容比和滑脱	22
1. 存容比	22
2. 滑 脱	22
3. 估算滑脱速度	22
六、结 论	23
第四章 连续生产测试仪及其测量	26
一、引 言	26
二、井下流量计	27
1. 工作原理	27
2. 用 途	27
3. 使用范围	27
4. 流速响应情况	28
5. 体积流量计算	28
三、井温计	32
1. 工作原理	32
2. 主要性能	33
3. 用 途	33
4. 用井温测试辨认液体类型的不可靠性	33
四、密度梯压计	34
1. 工作原理	34
2. 主要性能	34
3. 测量精度	34
4. 用 途	35
5. 读数的校正	36
6. 压力梯度曲线的形态	36
7. 在静止井中测压和进行密度梯压测试	37
8. 从密度梯压测试数据求重质油存容比	37
五、能通过油管的井径仪	39
1. 工作原理	39
2. 仪器性能	39
3. 主要用途	39
第五章 胀式封隔器测试仪	40
一、工作原理	40
二、限用的最大流量	40
三、传感器的响应状况	40

1. 封隔器井下流量计	40
2. 井下密度计	42
3. 含水率仪	44
第六章 特殊的生产测试仪器	48
一、放射性示踪剂	48
1. 操作原理	48
2. 仪器和示踪剂材料的性能	48
3. 用途	48
4. 测试技术	49
5. 测量结果的展示	51
二、生产流体取样器	51
1. 用途	51
2. 主要性能	51
3. 样品的递送	52
三、电磁测厚仪	52
1. 操作原理	52
2. 设备	53
3. 定性解释	53
4. 套管厚度的确定	55
第七章 解释方法	56
一、注入井	56
1. 注入井	56
2. 涡轮流量计	56
3. 放射性示踪剂	57
4. 井温录井及其解释方法	57
5. 蒸汽注入井	62
6. 现场实例	65
二、生产井	66
1. 单相生产	66
2. 在两相流中进行密度梯压和流量测试	69
3. 三相流动	74
三、井况评价	80
1. 产液量的评价	80
2. 地层处理效果的评价	80
3. 气井的评价	81
四、串通情况的查测	82
1. 温度及流量测试的解释	82
2. 现场实例——套管外有气体窜槽	85
五、抽油井	85
1. 抽油井的密度梯压测试	86
2. 抽油井的封隔器流量计测试	86
3. 现场实例——抽油井的进水口	88

4. 流体界面的分析	89
六、解释实例	90
第八章 解释图版	95
参考文献	147

第一章 生产测试的应用

一、引言

生产测试，是指注采井投产后所进行的那些井下测量工作。其目的是想得到井内各种流体性质和流动状况的资料。

生产井搞此类测试包括两个方面：即确定储集层的动态和了解生产井存在的问题。

储层动态研究在于了解其产液剖面，以便确定各分层产出的流体的性质和数量，确定油井的产油指数或气井的畅流能力(无阻流量)。井在早期所进行的生产测试，可供以后进行的各项测试做对比依据，诸如监控储层的消耗进程或判断问题的根源。

由于套管破损或其他完井事故引起的，或由于套管外串通等引起的各种井下问题，都可以用生产测试方法来判断和定位。在修井作业开始之前就搞清井下问题所在，修复就比较简单，耗资也自然会省些。很多修复工作甚至可用缆系修井工具从油管下入井内进行，很少甚至不会干扰井的正常生产。

生产测试可用于评价压裂，酸化或其他地层处理措施的效果。

对于注入井，在注入量(方/日)一定的条件下，知道每个吸水层的吸水量是很重要的。一口注入井无法投注总不外乎是由于该井的机械故障，或者因地层特性不宜所造成的。生产测试可用来确定吸水剖面，揭示出与预期情况为何有出入。

生产测试还可以用来判定套管和封隔器漏失位置和其他出现机械故障的地方。注入井的解释工作毕竟简单得多，因为注入流体是单相的，流体性质也是已知的。

这一章叙述在注采井中可能发生的各种类型的井下故障，并扼要论述如何用生产测试方法来弄清楚这些问题。

二、井的稳定

除了少数特殊情况外，本书所述的各种解释技术应用于生产情况相对稳定的井中。现在趁机明确一下什么是稳定状况。

1. 静态稳定

对于一口井，当在地面关井后，可从井底压力来判断是否恢复到静止状况。恢复历程可能要数周或数月，这要看储集层的渗透性和流体的性质而定。而从关井后测压 72 小时的数据外推所得出的储层静压，可以恰当地认为已接近于真实的储层压力。

显然，我们不会把密度梯压计和流量计在井中停放 72 小时之久，这是不必要的，因为这些仪器的分辨率已无法检测出微弱的液流了。当每隔半小时测一次的读数已显示出，密度梯压计和流量计再也无法觉察出井内流体的运动，就可以认为该井已达到进行关井读数所要求的稳定状况。

从测量油、气和水柱的静止梯度来说，关井两个小时就足够了。但是，应该记住，在地面把井口出油管关掉，井底各层段之间的互渗或返渗回地层的可能性并不能排除。

一口井要趋近于热学上的稳定，也可能需要数天、数周、甚或是若干个月，这要视由于

注采而引起的扰动时间的长短和扰动程度及范围的大小。从另一角度来说,当井的产量达到稳定时,对于大多数的井温测试来说,则可以认为该井已在注采的动力条件下达到热学上的稳定状况。

2. 动态稳定

在一口井安排生产测井以前,要仔细地测量几天产量,以便确定该井是否已经达到稳定。倘如某井由于修井或其他原因已经关闭,那末要使其产率趋于稳定也许需要数周。这仍然是取决于产量大小和储层的特性。

3. 短期关井后的重新稳定

1) 自喷井和气举井

生产测试通常都是在按正常产量采油的井中进行。测试仪器的直径与油管的内径差不多,所以在测试仪与油管之间的环形空间内,会形成很大的摩擦压力降,工程师可以选择,在下入测试仪表时是否要关井。(倘如下入仪器遇阻必须关井才能通过,那末也要确知除非是再次关井,下井仪器不会遇阻就再次被顶回来;这样就可以避免测试仪被冲出井口的危险。)

临时关过的井,在测试前必须重新使其稳定。如果该井临时关闭一小时左右,重新稳定用不了几个小时,倘如该井只是在测试仪器要穿过油管柱中截面变小的地方暂时关一下,那么重新稳定所需要的时间就会更短。通常,假若油管头压力隔半小时仍然不变的话,那么就可以把该井视为已达到稳定状况。

2) 抽油井

倘如由于各种意外原因曾经中断抽油,要达到重新稳定所需的抽油时间将取决于停抽时间的长短,环形空间的面积以及油井的采油指数。请参阅第七章第三节。

4. 周期和间歇产油

油井产油可以是周期的或间歇的。在这里我们只讨论不规律出油的两种可能的起因,即间歇喷油和间歇气举。

1) 间歇气举

为了节省耗气量,举油的气体可以靠一套地面控制器间断地注入井内,也可以靠井下的气举凡尔自动调节,在达到预定压力时气举凡尔就能动作而进行气举。

此类油井若要搞生产测试,应该让它能以最佳的精度进行连续气举。在气举流量计算时,当然不应把举油用气也算成是产出气量。

2) 间歇喷油

一口新井在完井时不下封隔器,就可以有足够的能量和流量通过油管维持稳定自喷。然而,储层的能量终将降到某一程度,此时该井开始抽搐般地喷油,即短暂喷油后随之而来的是一段长时间不能喷油。这种喷喷停停的周期会越来越长,一直到该井变成“间歇式”喷油。

在那些可把地层能量储存在油管-套管环形空间内的井中,也即井内没有下封隔器而环空又与地面隔绝的情况下,间歇喷油是经常出现的。

在这种情况下要进行测试是有困难的,事实上这样做也是比较危险的。危险就在于,如果把测试器具下出油管外,对于一口间歇自喷井来讲,往往会由于有一段液柱快速地被气顶起而把仪器也顶上来并使电缆卷缠在一起打结。比较保险的做法是,倘如能办到的话应换油嘴使井恢复到稳定状况。

地层内部呈现间歇出油的情况则是少有的。只有那些碳酸盐地层,由于推油的能量存储

于缝隙和孔洞中时，才会出现层内间歇出油。

油管间歇喷油则是由于在自喷管柱中，自行积聚成一大段一大段的气和液体而引起的。此类间歇式顶油吐气通常都是在近地表处形成，虽然井口油管头压力表会显现出短暂的晃动，但这种效应在井底，或者说是井下生产测试仪中则几乎显不出来。

在任何情况下，如某井靠换油嘴憋回或用其他措施都已无法使生产稳定下来，则应力求在所有待测层段上下都固定读数。这些读数应该至少包括两到三次间歇周期，那末才可以得出一个比较说得过去的平均值。

三、用生产测试搞清注采井的问题

1. 生产井的问题

由于经济原因，往往要求一口井能用一套油管柱，把多个层段一起完井并进行合采。

可是又往往不可能使井底压力保持某一合宜的数值，使各个层段都能按规定的产量一起出油。用各种生产测试法，可以把来自每一层段的各种流体含量和产出量都测量出来。这样就可能采取适当步骤，促使储层在合宜的状况下进行排油。

生产测试提供了一套办法，可以迅速而又廉价地一起把产水和高油气比层段的位置定出来。生产测试不仅比那些常规的逐层测试要便宜些，而且所得的结果也往往更具有代表性，这是因为用钻杆测试法对个别层段分头测量时，这些层段的生产状况与所有层段同采时的状况几乎很少有共同之处。

当井的产量是来自某一单一的巨厚层，则免不了要确定那些惹人嫌的流体究竟是从厚层的顶部还是底部进来的，或是从某一层段穿入的，还是由于管外窜槽从另一层段拐过来的。

1) 产油井中与气体有关的各种问题

在原始储层压力下溶于油中的气体，将随油一道采出，到地面则成自由气释出。溶解气与采出油一道产出是必不可免的。然而，如产出气量大大地超过按储层流体的 PVT 计量所预测的气量，则意味着有在储层条件下已成游离状态的气体被产出。

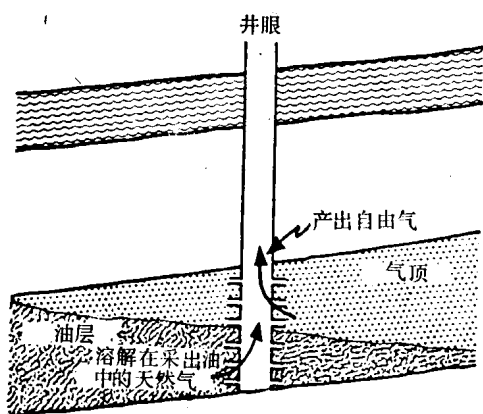


图 1-1 与油一起被采出的气是来自连通的气顶和油中的溶解气

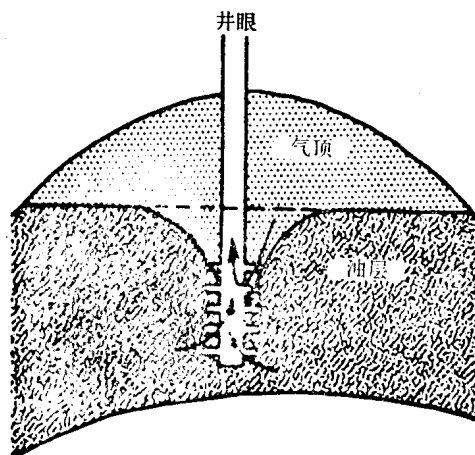


图 1-2 自由气穿越层面以锥状进入井中

控制生产油气比是攸关重要的，因为，除非把额外多采的气体重新注回，否则由于储层能量耗失和由于溶解气逸失使原油粘度增大的缘故，原油的最终采收率必将大为降低。

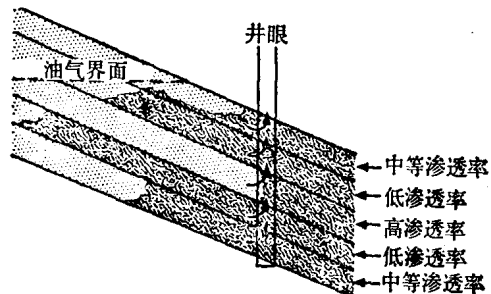


图 1-3 气体沿叠状储集层中的高渗性层窜入形成不规则的气侵

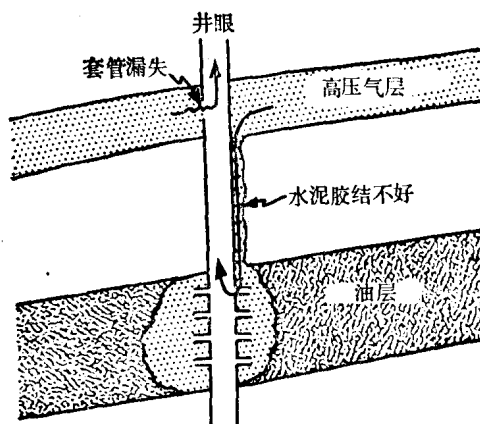


图 1-4 产出的自由气是从套管漏洞和管外水泥窜槽进入井内

在很多情况下，产出自由气也可能主要来自气顶，譬如当气顶扩张向下到达射开层段的时候就是如此(图 1-1)。倘如层段的垂向渗透率较高的话，这种产出自由气的情况还会由于气锥的缘故而更加严重(图 1-2)。

在那些呈叠层状渗透性的厚地层中，气顶中的自由气会在毗邻层段的油尚未耗竭以前就呈指状下伸而插入井底(图 1-3)。

最后一种可能，如果因井窜槽或者套管上有漏洞，那么邻近层段中的自由气也会被采出(图 1-4)。

产气的层段完全可以用密度梯压计来判定，它与流量计和温度录井一道，可以提供搞清问题和作出灵巧的修井措施所必须的资料。

2) 产油井含水率过高的问题

在有含水层面的油藏中，存在着一个油水过渡带，在它以下只能产水，而在它上面则可以产无水油。那些在过渡带位置完成的油井，油与水会一道产出。事实上，若想达到最佳的采油水平，往往会有相当可观的水量一起采出。

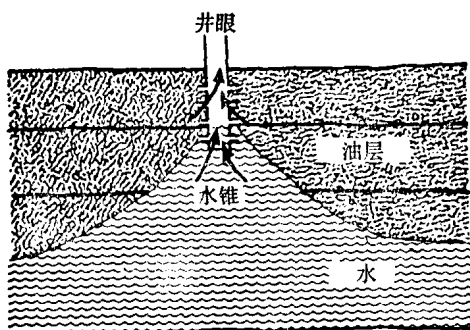


图 1-5 水穿越层面呈锥状窜入井内

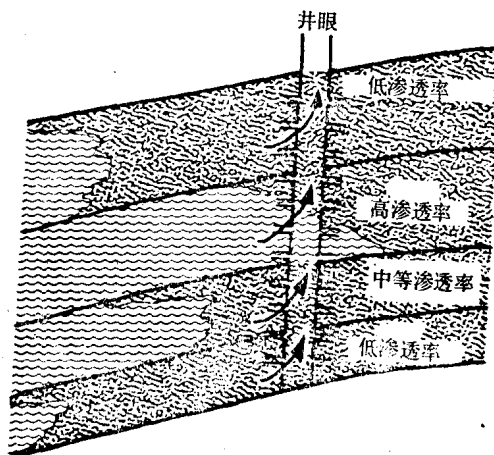


图 1-6 水沿高渗性层窜入形成不规则的水侵

与上面讨论的高油气比的情况类似,含水率过高只可能是由于随着采油的进程,水逐渐上升到射孔层段。在具有较高的垂向渗透性的厚地层中,倘如产油量比较高,就会出现水锥穿入射孔层段的情况(图 1-5)。

在较厚的、渗透性不同的叠层层段中,水会沿渗透性较好的夹层从过渡带下面“指进”而侵入井中,此时在较厚的层段中仍有相当可观的油剩下来而未能采出(图 1-6)。

产水过量有时是因为管外窜槽,或者是套管上有漏洞,水从含水砂层沿着这些小道进入井内(图 1-7)。

与油一道产出的,从经济上认为还可以容许的水量,则取决于在具体情况下把它采出来和加以排除的费用高低。自喷井含水率过高,就要把储层控制在正常压力范围内;反之,增大油管中的静水压头甚至能够急速地减低产油量,还可能最后把井憋死不能喷油。

在进行堵水修井作业以前,用来检测水夹层的生产测试的程序,在高产(产量超过 800 桶/天)和出现油水两相的井中,应当包括密度梯压计,流量计,以及温度录井等。井产量较低(如少于 800 桶/天)和出现三相流体(油+水+气)时,建议除密度梯压计和温度录井等测试项目以外,还应进行封隔器型流量计-流体分析器的测试工作。

2. 注入井的问题

把水和气注入储层,可以将油推向生产井。如果从单一管柱把流体注入到若干层段中去,注入流体可能不是按规定比例分配到各层,而是被一或两个层段所截获。

倘如这种情况未能及时察觉和采取恰当措施,那么驱替前沿将不是匀称地推进,从而就可能在所有可采烃类从其余各层扫集出来以前,注入流体就过早地突入各生产井。要做到最佳的驱替效率,掌握被注入每一层段的流体数量是必不可少的。

监控驱替过程的最好办法是掌握在注入井中定期录得的注入量分布剖面。为达到这一目标可以使用各种不同的流量测试仪器,其中包括连续型和封隔器型的涡轮流量计,温度录井,和各种放射性示踪法。选择那种测试手段合适要视井的状况、注入流体的性质、井眼大小和注入量高低等才能确定。关于这一专题在第七章还要作详细探讨。

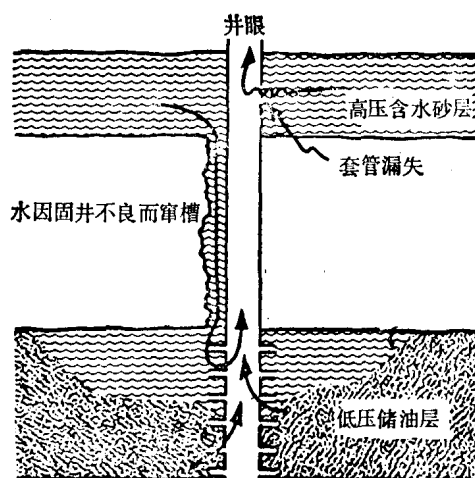


图 1-7 水从套管漏入和从管外窜槽处进入井内

第二章 井内流体的状态

一、引言

存在于油藏的孔隙空间，随后又能进入井内而被采出的流体包括：自由气；原油及其中的溶解气；地层水；以及其他一些被划为杂质的流体，诸如氮气、二氧化碳、硫化氢和氨气等。在钻井和随后进行的各种井下作业时漏入地层的各种流体，也仍可以被采出。

本章的目的是阐明，在生产测试解释时要用到那些流体参数，以及如何按压力、温度和气体溶解度来校正这些参数。

1. 生产测试解释所需要的流体数据

要把油气比、产液含水率、产量，以及其他各种地面计量项目，按井筒温度和压力的测量值加以校正，需要用到下列的流体数据：

油：库存油的比重或密度， $^{\circ}\text{API}$ 或克/厘米³

井筒中油密度，克/厘米³

原油的地层体积系数

井筒中油的粘度，厘泊

溶解油气比，英尺³/桶或米³/米³

泡点(原始饱和)压力，磅/英寸²或公斤/厘米²

气：比重，(空气比重=1)

井筒中气的密度，克/厘米³

天然气的地层体积系数

井筒中天然气的粘度，厘泊

水：含盐量或在地面的密度，ppm(毫克/升)或克/厘米³

水的地层体积系数

井筒中水的密度，克/厘米³

井筒中水的粘度，厘泊

2. 流体性质的数据来源

1) 如果已对天然气或凝析物作过化学全分析，那么流体性态资料就可按各个烃类组分的数据予以算出，各种烃类组分的性态数据可以从“天然气加工厂供应商协会”出版的《工程数据集》中查出。由于如此详尽的化学分析很少搞，而且测井解释实际上也不需要如此细致的资料，所以这种方法在下面就不再讨论了。

2) 储层流体性态的最可靠的数据，应当在实验室用有代表性的井下流体样品直接测量(即所谓的 PVT 数据)。

3) 井筒内油、水和游离气柱的密度，可以用密度梯压计或者是用“压力弹”在关井停产并经过相当时间使流体能按重力分离后，下入井中直接测出。

4) 当需要的流体参数无法从上述来源得出时，那么也可以按公开发表的“平均”物性与油的 API° 比重度或气体密度，在各种不同温度和压力下的相关资料予以估算。按相关数据

编制的一整套流体物性图版已在第八章中给出。利用这些图版可以查出：

- (1) 井筒中油的密度
- (2) 在泡点压力下的溶解油气比
- (3) 原油在泡点压力下的地层体积系数
- (4) 井下/地面的气体密度比
- (5) 原油在井筒中的平均粘度
- (6) NaCl(氯化钠)水溶液的密度

二、流体参数的校正

1. 天然气的地层体积系数

整个油气工业的气量计量,都是以标准温度 60°F (15.6°C) 和一个大气压 (14.7 磅/英寸²) 的压力下的体积为准。这些条件通称为标准温度和压力,并以符号 STP 表示。在这些条件下计量的气量单位,即标准立方英尺,有时以 scf 的符号代表。

天然气地层体积系数 B_g , 是某一重量的气体在储层温度和压力下所占据的体积与同一重量的气体在标准状况下所占的体积之比。

$$B_g = \frac{\text{在储层温度和压力下所占体积}}{\text{在标准状况下所占体积}}$$

天然气地层体积系数可用气样进行 PVT 量测而求出,它也可用下列关系式进行计算:

$$\frac{P_{sc} V_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} = \frac{P_{ws} V_{ws}}{Z_{ws} T_{ws}}$$

从而

$$B_g = \frac{V_{ws}}{V_{sc}} = \frac{P_{sc} T_{ws} Z_{ws}}{P_{ws} T_{sc} Z_{sc}}$$

式中足码 sc 是指标准状况,而足码 ws 则表示井筒条件。根据这一相关式编制的图版,在已知气体比重、温度和压力时,可查出 $1/B_g$ (气体地层体积系数的倒数)。

$$\frac{\text{在地面的体积}}{\text{在地层中的体积}} = \frac{1}{B_g}$$

例:试求出 400 标准英尺³ 的比重为 0.7 的天然气,在 200°F 和 2000 磅/英寸² (绝对) 时所占的体积。

计算步骤:

1) 选出 API 单位中气体比重为 0.7 的图版 (完整的图版包括公制和 API 单位两种,已在第八章第一节中给出)。

2) 查出在地面与在 200°F 和 2000 磅/英寸² (绝对) 下气体的体积比为 120。

3) 在井筒条件下气体所占的体积,是同一质量的气体在标准温度和压力下所占体积的 1/120,即:

$$400 \times \frac{1}{120} = 3.33 \text{ 英尺}^3$$

2. 天然气比重及其在井底的密度

比重,在石油工业中被广泛用来表征天然气的特性。我们所讲的比重,是指天然气的密度与空气的密度 (在标准压力和温度下) 的比。

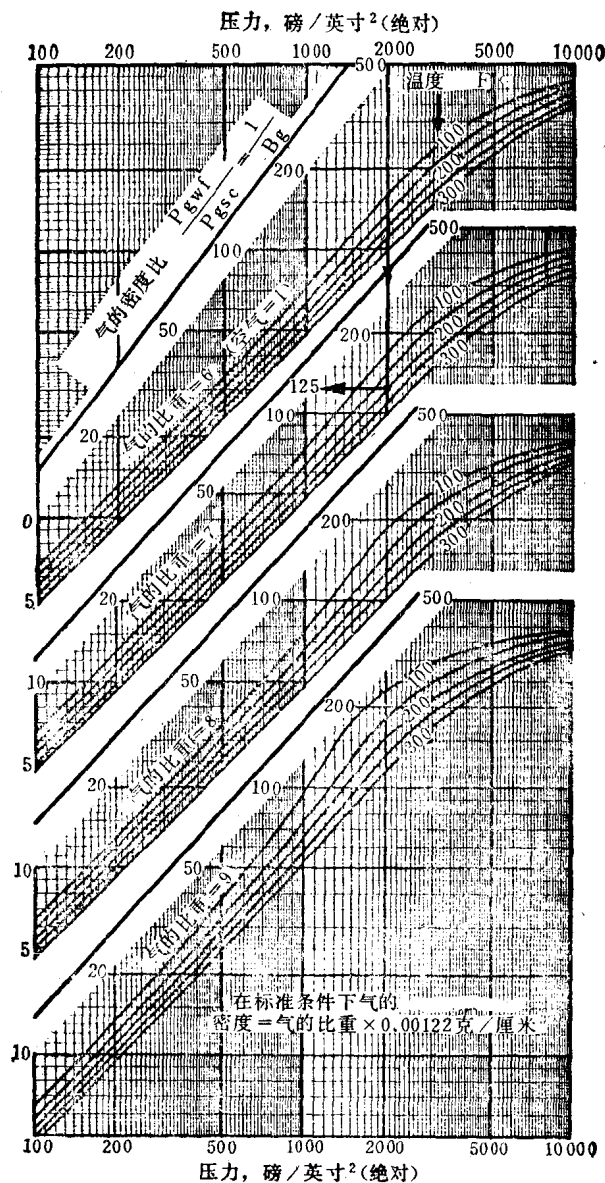


图 2-1 井底/地面的气体密度比，相当于地面/井底的气体体积比

$$\text{天然气比重} = \frac{\text{在标准状况下天然气密度}}{\text{在标准状况下空气密度}}$$

因为空气在标准状况下的密度是已知值(0.00122 克/厘米³ 或 0.0762 磅/英尺³)，所以，任一体积的天然气的重量，只要把气体的体积量乘以天然气的比重即得。

例：500 英尺³ 比重为 0.55 的天然⁴气重量是多少？

$$500 \times 0.55 \times 0.0762 = 20.95 \text{ 磅}$$

例：就我们探讨的目标来说，一个更为实际的问题是：某一比重为 0.7 的天然⁴气在 2000