

大庆生产测井
研究所 编译

生产测井仪器 分析与解释

石油工业出版社

北京)

生产测井仪器分析与解释

大庆生产测井研究所编译

谭廷栋 审校

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书是一本实用性较强的生产测井用书。内容包括储层中流体的特性,流体的流动理论,生产测井仪器及解释方法。书中用较大的篇幅论述了单相流、两相流及三相流的解释方法,注意事项和解释中存在的问题。本书具有理论论述精简,可操作性强等特点,是现场测井工程师,油藏工程师,开发工程师一本较好的参考书,同时也可作为大专院校有关师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生产测井仪器分析与解释 /大庆生产测井研究所 编译
—北京:石油工业出版社, 1995. 2

ISBN 7-5021-1214-6

I. 生…

II. 大…

III. 生产测井—仪器—分析

IV. TE15

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

北京计量印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开 6.5 印张 页 152 千字 印 1-2000

1995 年 2 月北京第 1 版 1995 年 2 月北京第 1 次印刷

定价: 5.50 元

编译委员会

主任:乔贺堂

副主任:张宝群 尚芝喜 玉宝春

编译审校人员:马贵福 肇丽娜 袁 爽

编译者的话

生产测井是油田开发过程中进行动态监测的一种重要手段,可为油田生产提供所需的大量资料,为油田高产稳产提供重要的保证。

近年来,作为中国石油天然气总公司生产测井中心的大庆生产测井研究所,努力加快企业改革的步伐,不断加强国际间的技术交流与合作,逐步走上了科研、生产、制造、培训、服务“五位一体”的运行机制,形成了油气水井生产动态测井、井身结构工程技术状况测井和产层参数评价测井三大主体测井系列,先后为国内十多个油气田提供了测井技术服务。但是,就目前我们掌握的技术水平而言,还不能完全满足油田发展的需要,还必须在生产测井工艺和解释方法上有所突破。而国外一些测井公司在生产测井技术方面有自己的独到之处,值得我们学习和借鉴。

为了让国内测井工作者更多地了解阿拉伯测井公司的生产测井现状,我们组织编译出版了这本书。本书较系统地介绍了生产测井仪器和定量解释方法,内容全面,技术先进,具有一定的参考价值。

在本书的编译过程中,得到了有关领导和专家的大力支持和帮助,经过全体人员的努力,在短时间内就同读者见面了。但由于编译者水平有限,经验不足,书中难免存在不当之处,恳请测井界同仁不吝赐教。

编译者

1994年12月

前 言

在初始完井之后进行的井下测量称之为生产测井。其目的是获得井内流体的原始特性及其运动状态的资料。在生产井中进行生产测井有两个方面的应用：描述油藏动态和确定油井存在的问题。

1、油藏动态研究

油藏动态研究包括确定油井中各层产出的流体特性及其数量的流动剖面，以及油井的生产指数或者气井的敞喷能力。在一口井中，生产初期测的资料可与以后测的资料进行对比，以便为监测储层枯竭过程或者为确定油井问题的原因提供依据。

2、油井问题

使用生产测井资料可以确定套管或完井硬件损坏，或者确定管外窜槽的位置。在油井大修之前，确定油井存在的这些问题，修井就比较简单，而且通常也比较节省费用。使用生产测井资料评价、压裂、酸化，或其它修井作业的效果。在注入井中，弄清总注入的各层吸收流体量是重要的。注入井中的故障可能是由井的机械问题或未预料到的地层特性造成的。生产测井资料还可用来确定流动剖面 and 套管、封隔器漏点，以及其它机械问题。

通常，不可能保持井底压力使所有产层按所设计的产量生产。生产测井方法可测量每个产层的产量和流体含量。这样就可以采取相应的措施使储集层在最佳状态下生产。

生产测井可以提供一种快速、廉价的确定产水层和高气油比(GOR)产层的方法。通常，生产测井方法不仅比常规逐层测试节省费用，而且测井结果也比较有代表性。因为在对各层进行中途测试时，各层是在相同的方式下以原始状态生产而不是所有层段一起生产时的测量成果。

当一个单独的大厚层生产时，主要是确定产出流体是从该层顶部产出还是从该层底部产出，以及是从整个层段产出的或者是通过管外窜槽从第一产层产出的。

目 录

第一章 油藏流体特性	(1)
一、气体定律	(1)
二、气体的密度和比重	(2)
三、气体的标准运算	(2)
四、气体压缩系数	(3)
五、比重与准临界温度、压力的相互关系	(7)
六、地面与井下体积的转换系数	(7)
七、粘度(μ_o, μ_g, μ_w)	(9)
八、实例及计算	(9)
第二章 储层流体的相特性	(12)
一、油和气分类	(12)
二、相特性	(13)
三、相图	(13)
四、术语	(16)
五、混合气、油和单组分气的相特性	(17)
第三章 流体流动理论	(20)
一、单相流流动理论	(20)
二、多相流流动理论	(23)
三、例题和计算	(26)
第四章 生产测井仪器	(28)
一、流量计	(28)
二、流体密度测井仪	(31)
三、含水率计	(32)
四、微差井温测井仪(TCCL)	(34)
五、自然伽马测井仪	(42)
六、压力计	(44)
第五章 生产测井定量解释	(46)
一、单相流解释	(46)
二、两相流解释	(54)
三、三相流解释	(81)
四、单相、两相和三相流解释中存在的计算问题	(86)
附录 A API 与比重数据的关系	(92)
附录 B 公制、API 英制和美制度量单位间的转换系数	(93)
附录 C 套管的基本性能	(94)

第一章 油藏流体特性

生产测井解释要求准确了解油藏的流体特性。这些特性可以直接从 PVT 实验室测量获得,如果没有实验室测量值,也可以根据图版来估计。

一、气体定律

根据气体分子运动理论,对一给定气体质量的压力、体积和温度之间存在如下关系:

(一)波义耳定律

理想气体的体积与其恒温下的压力成反比:

在恒温下:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

(二)查理定律

理想气体的体积与恒压下绝对温度成正比:

$$V_1/T_1 = V_2/T_2$$

(三)阿伏伽德罗定律

在压力和温度相同的条件下,等体积的理想气体包括相同数目的分子(每克摩尔含 6.024×10^{23} 个原子或分子,每磅摩尔含 2.73×10^{26} 个分子)。这与在所给温度和压力下任何理想气体的克分子重量占有同样的体积这一论点相同。在 60°F 和 14.7psi 下,任何气体的克分子重量(单位为磅)所占体积为 379ft³。

(四)理想的气体定律

把波义耳定律,查理定律和阿伏伽德罗定律组合起来,理想的气体定律变为:

$$PV = nRT$$

式中 P —— 气体的绝对压力, atm;

V —— 气体的体积, cm³;

n —— 克—摩尔或磅—摩尔气的分子数;

R —— 气体常数, 82.05;

T —— 绝对温度; K。

这表明,任何 1 摩尔理想气体在所给压力和温度下将占有同样的体积。

(五)道尔顿局部压力定律

在混合气体中,每种气体施加的局部压力与其本身单独在混合气体所占体积内施加的压

力相等。因此,在体积 V 、温度 T 下混合气体的压力等于:

$$P = \sum n_i \frac{RT}{V}$$

二、气体的密度和比重

任何物质的密度称为该物质的质量/单位体积。因此,在已知温度和压力下,理想气体的密度可以通过重新整理理想气体定律获得,如下式:

$$d_g = \text{密度} = \frac{m}{V} = \frac{PM_w}{RT}$$

式中 m —— 从事研究的气的质量;

M_w —— 气的分子重量。

空气的密度是:

$$d_{\text{空气}} = \frac{P \times 28.96}{RT}$$

式中,28.96 是空气的视克分子重量。

通常,比重定义为一种物质的密度与一种标准物质的密度的比值。对于气体而言,通常以空气为标准物质。

$$G_g = \frac{d_g}{d_{\text{空气}}} = \frac{M_w}{28.96}$$

这个方程说明,以上定义的比重可以根据气体的克分子重量来单独计算,而与压力和温度无关。

三、气体的标准运算

气体组分是用摩尔百分数、摩尔分数、体积百分数和重量百分数表示的:

$n\%$ = 摩尔百分数;

Y = 气中的摩尔分数;

$V\%$ = 组分体积百分数;

$W_i\%$ = 组分重量百分数;

$$(\text{重量}\%)_i = \frac{W_i}{\sum W_i} \times 100;$$

$$(\text{体积}\%)_i = \frac{V_i}{\sum V_i} \times 100;$$

$$(\text{摩尔}\%)_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100;$$

$$y_i = \frac{n_i}{\sum n_i};$$

摩尔分数代表系统中的分子分数。这说明,1 摩尔任何气体都包含相同数目的分子。如果混合气体中的每一种气体都遵循阿伏伽德罗定律,那么 i 组分体积就一定与特定组分中的摩尔数成正比:

$$V_i \propto n_i \quad \text{或} \quad V_i = kn_i$$

式中, k 是比例常数。

$$(\text{体积 } \%)_i = \frac{kn_i}{\sum kn_i} \times 100 = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100 = (\text{摩尔 } \%)_i$$

由此得出, 体积百分数与摩尔百分数相等。另外, 如果已给组分 i 在混合气体中的摩尔分数是 y_i , 组分 i 的重量为 $y_i \times$ 分子量 i 。因此:

$$(\text{重量 } \%)_i = \frac{y_i \times M_i}{\sum y_i \times M_i} \times 100$$

把重量百分数转换为体积百分数或摩尔百分数, 可以使用下列关系式:

$$(\text{摩尔 } \%)_i = \frac{W_i/M_{wi}}{\sum W_i/M_{wi}} \times 100$$

尽管它是纯气体即分子量等于其视分子量, 混合气体也具有下列特点:

$$AM_w = \sum (y_i \times M_{wi})$$

由此得出:

$$GG = \frac{\sum y_i \times M_{wi}}{28.96}$$

则

$$GG = \frac{AMW}{28.96}$$

四、气体压缩系数

大多数气体只在一个大的压力和温度范围内才遵循理想气体定律, 其原因是, 理想气体定律是通过假定气体分子不占据空间, 并且相互之间不施加任何吸引力的条件下推导出来的, 而对于实际的气体却并非如此。这些气体表明, 与高温高压下的理想气体差别较大。压缩系数“ Z ”是使理想气体定律变换形式用的气体组分, 温度和压力的函数形式变换如下:

$$PV = ZnRT$$

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{Z_2 T_2}$$

在将任意气体还原成相应状态之后, 也就是当所有气体距临界状态相同或者任何两种变化特性具有相同的换算值比率时, 所有的气体状态相同, 可以使用图 1—1 中的综合图版来估算任意气体的压缩系数 Z 。

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \quad P_r = \frac{P}{P_c}, \quad V_r = \frac{V}{V_c}$$

式中, 角标 c 和 r 分别为临界值和换算值。

1) 只有是单分子式的气体, 可根据物理特性表来求其临界温度和压力。

2) 对于混合气体, “准临界”压力和温度通过取每一种气体组分的摩尔平均值计算出来。

$$P_c = \Sigma(y_i \times P_{ci})$$

$$T_c = \Sigma(y_i \times T_{ci})$$

式中 y_i ——组分 i 的摩尔分数;
 P_{ci} ——组分 i 的临界压力;
 T_{ci} ——组分 i 的临界温度。

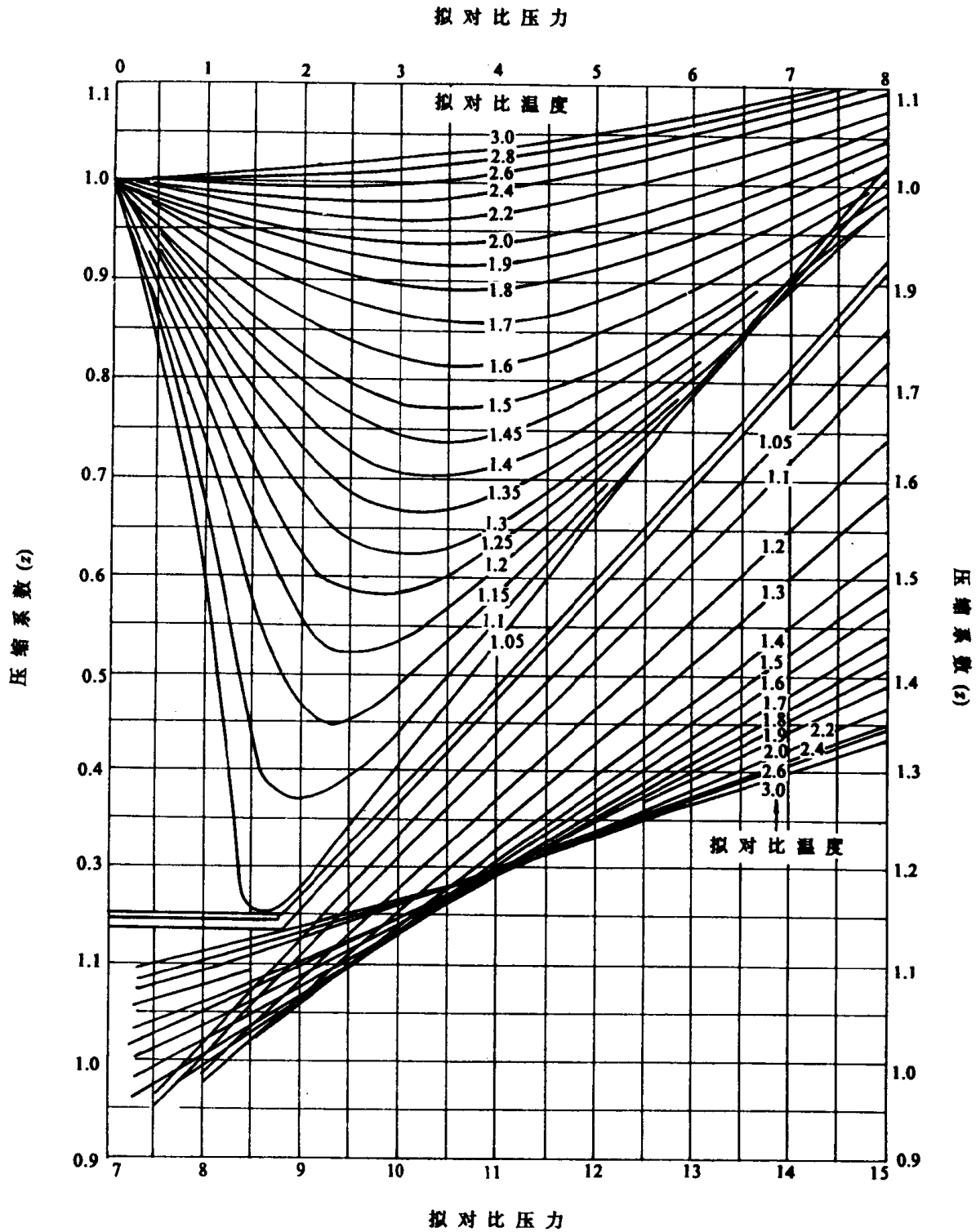


图 1 1a 天然气的压缩系数

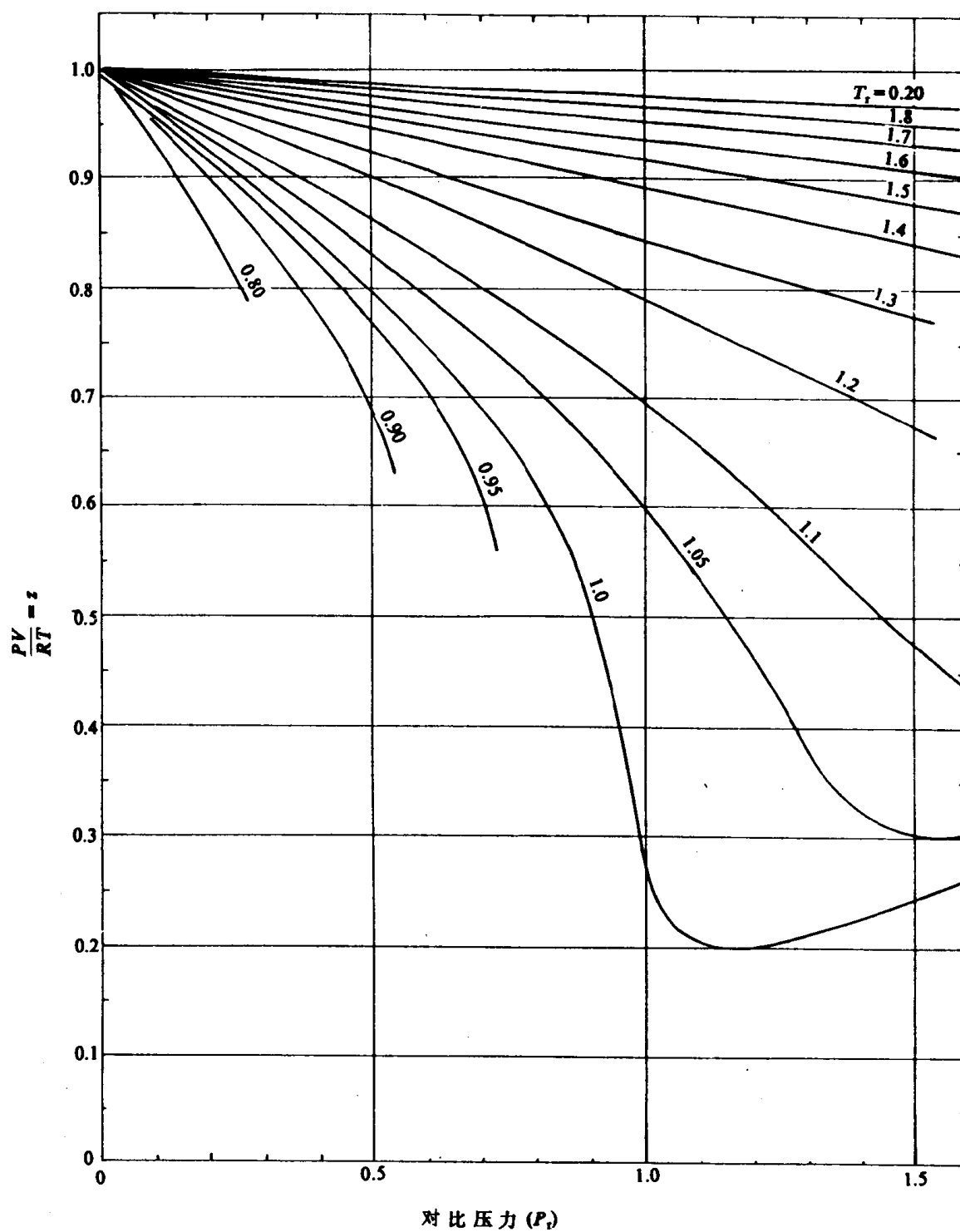


图 1—1 b 在低对比压力下绘制的压缩系数曲线

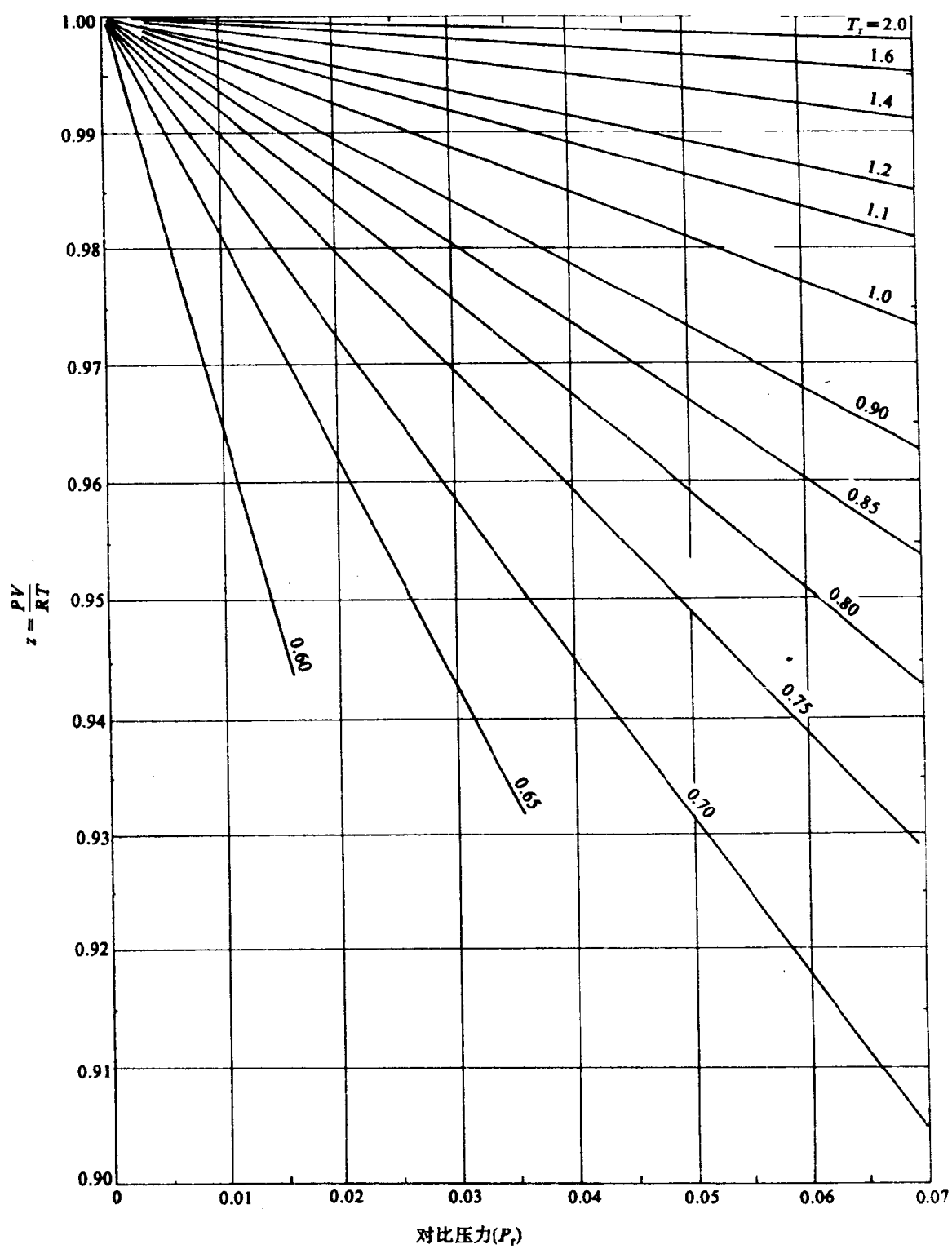


图1-1c 接近常压时的气体压缩系数

五、比重与准临界温度、压力的相互关系

在混合气体中,如天然气,需要对其各个组分进行详细分析。如果没有现成数据,那么下面的相互关系是分析天然气的一个方便方法。比重与准临界温度之间的关系如图 1—2,比重与准临界压力的关系如图 1—3。

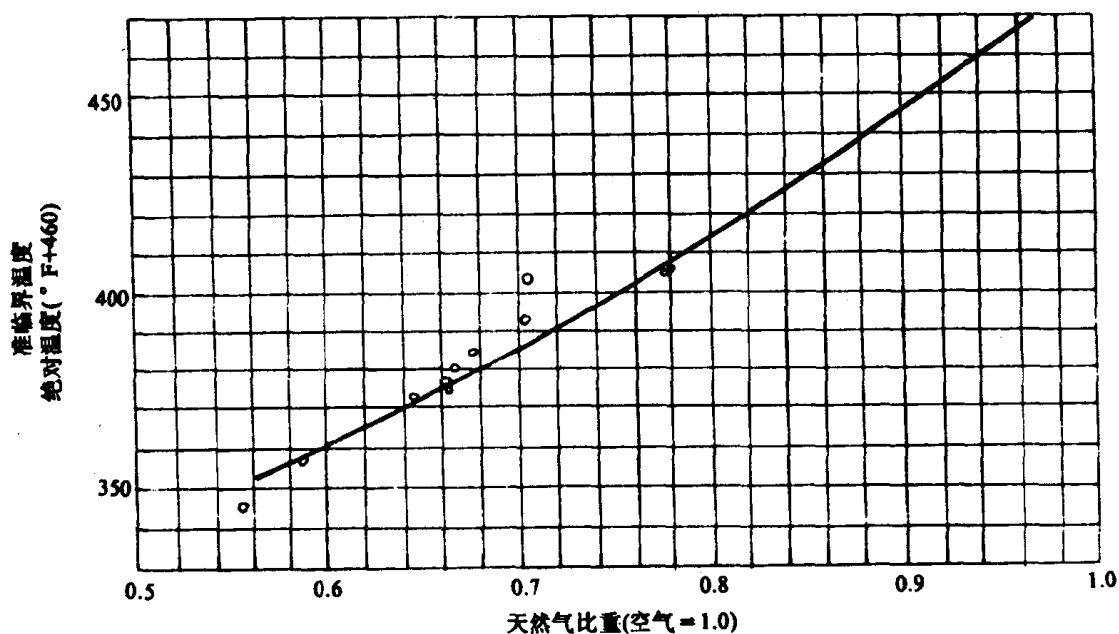


图 1 2 近似准临界温度与天然气比重的关系

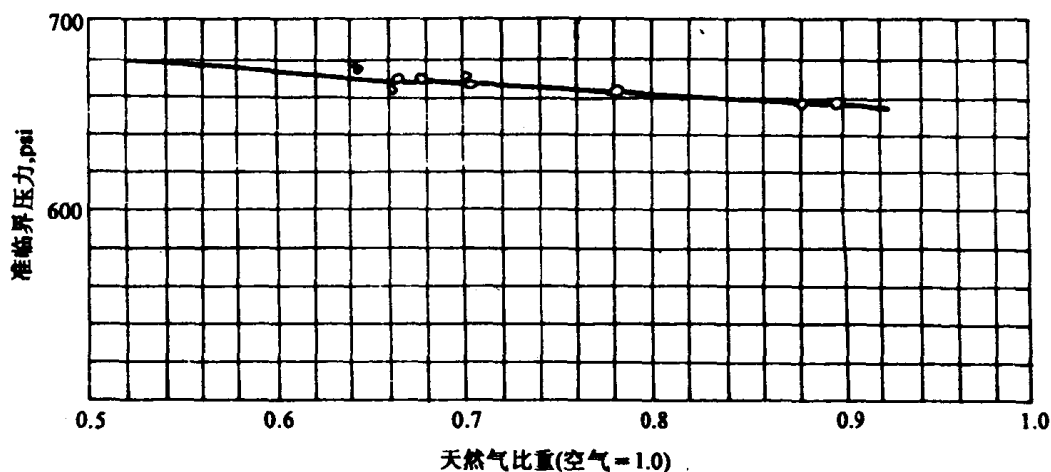


图 1 3 近似准临界压力与天然气比重的关系

六、地面与井下体积的转换系数

为了解决由溶解和压缩产生的总体变化,要把储层流体(气、油或水)转换成地面条件下的

相同体积。

转换系数和溶解定义如下：

气体的地层体积系数(B_g)的定义是1标准立方英尺的气在储层压力和温度条件下所占的体积,单位为桶。

$$B_g = \frac{\text{井下温度和压力下的体积}}{(60^\circ\text{F}, 14.7\text{psi})}$$

B_g 可根据气体采样的 PVT 测量值获得,或使用下列关系式计算出来:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1 Z_1} = \frac{P_{sc} V_{sc}}{T_{sc} Z_{sc}} = \frac{14.7 \times 1}{(60 + 460) \times 1}$$

因为 $B_g = \frac{V_1}{V_{sc}}$

所以 $B_g = 0.00504 \frac{Z_1 T_1}{P_1}$

原油的地层体积系数(B_o)的定义是在储层压力和温度下1桶储罐原油加上溶解气所占的体积,单位为桶(见图1—4)。

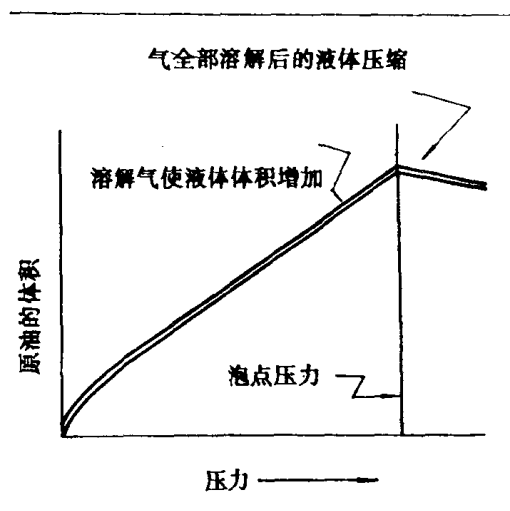


图1—4 原油体积与压力的关系

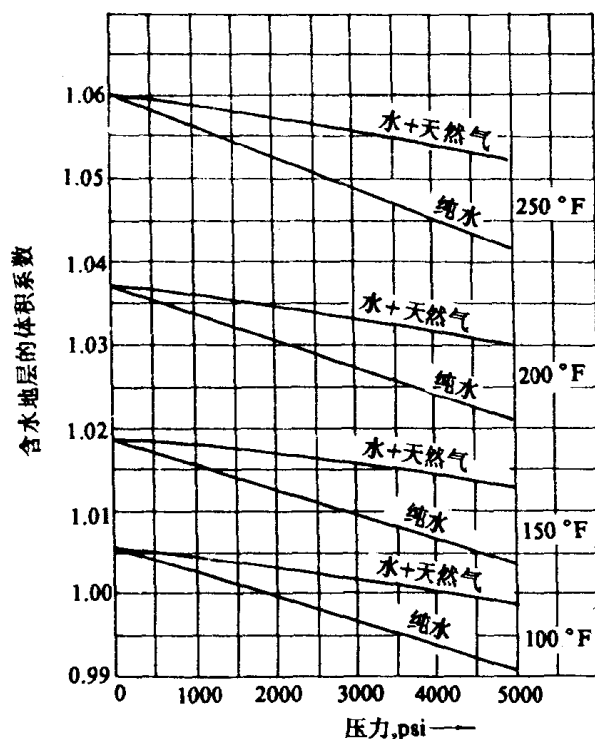


图1 5 纯水、水 and 气混合的地层体积系数与不同温度下的压力关系

$$B_o = \frac{\text{井下条件下油的体积(包括溶解气)}}{\text{标准条件下油的体积}(60^\circ\text{F}, 14.7\text{psi})}$$

B_o 最好根据储层流体采样的 PVT 测量值来确定。

水的地层体积系数(B_w),由于天然气在盐水中的溶解度很低,所以液体相的收缩性相对也很小。

图1—5示出低于饱和压力水的的海层体积系数实验值。

在饱和压力以上的压力下, B_w 值是根据气饱和和束缚水的压缩系数确定的。

收缩系数:收缩系数定义为油地层体积系数的倒数。

溶解度(R_s):气体溶解度的定义为标准条件下测得的气体的立方英尺数,即在储层温度和压力下1桶储罐原油中溶解气的立方英尺数。

气分离有两种基本类型:闪蒸分离和差异分离。在闪蒸分离中,压力以有限量下降,达到平衡以后,气体逸出并保持压力恒定。在差异分离中,放出的气体从油界面上连续分离。只有气在给定压力下分离时液体压力才达到平衡状态。

而在超过有限压力范围分离时,液体压力达不到平衡状态。应指出的是, R_s 主要取决于溶解气量,并且在由液体压缩系数确定的速度下,在泡点之上随压力增加溶解气量减小。气的溶解度 R_s 与此压力系统成正比。

七、粘 度(μ_o, μ_g, μ_w)

一种流体的粘度是其对此种流体运动产生阻力的计量单位,将其定义为单位面积上的作用力,单位达因。一般对液体来说,粘度随温度的增加而降低,并且原油随溶解气的增加而其粘度下降。

很明显,在一般情况下,气体粘度都比液体粘度低。对于理想气体来说,粘度随温度增加而增加,而与压力无关。粘度可以从流体采样中直接测出,但最常用的方法是从图版中进行估算。对于确定做为温度、压力、溶解度和原油比重的函数 μ_o 来讲,存在某种相互关系。对于 μ_g ,是做为气比重和规定压力下的温度的函数。对于 μ_w ,是温度和单位为 ppm 的盐水浓度的函数。图 1—6 是典型的关系图版。

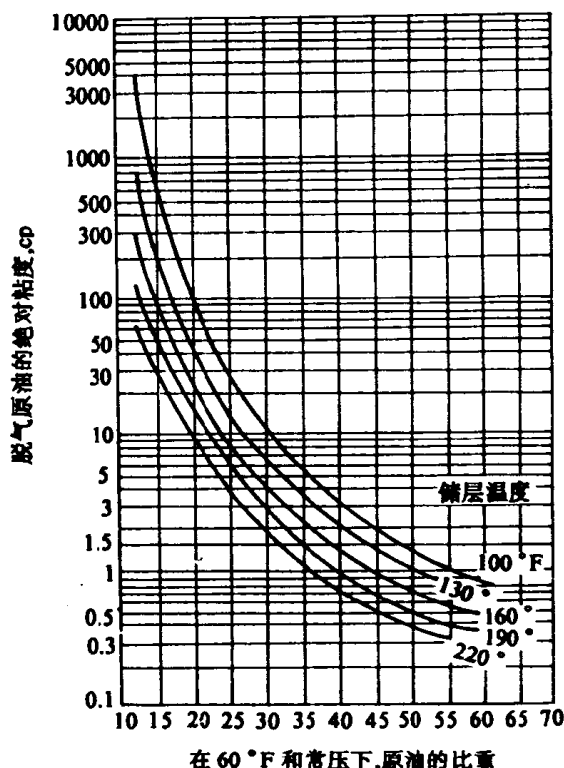


图 1 6 常压下油层原油和粘度

八、实例及计算

(一) 实 例 一

求 2000psi 和 150 F 下,比重为 0.75 的气体的压缩系数 Z 。

1) 根据图 1—2 和图 1—3:

$$P_c = 665 \text{ psi}, T_c = 405^\circ \text{R}$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_c} = \frac{460 + 150}{405} = 1.63$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_c} = \frac{2000 + 14.7}{665} = 3.03$$

2) 将 1.63 和 3.03 代入图版(图 1—1)中,求得 $Z=0.84$ 。

(二) 实 例 二

表 1 给出气体中的组分。

表 1

组 分	体积%或摩尔%
甲烷	86.02
乙烷	7.70
丙烷	4.26
异丁烷	0.57
正丁烷	0.87
异戊烷	0.11
正戊烷	0.14
正己烷	0.33
总计	100

求 750psi, 150 F 下各组分的压缩系数 Z 。

其解见表 2。

表 2

组 分	V 或 n , 分数	T_c, R	P_c, psi	$V \cdot T_c$	$V \cdot P_c$
甲 烷	0.8602	343.5	673	296	572
乙 烷	0.0770	550.1	708	42.4	54.3
丙 烷	0.0426	666.2	617	284	26.3
异丁烷	0.0057	733.2	530	4.2	3.0
正丁烷	0.0087	765.6	551	6.7	4.8
异戊烷	0.0011	8300	482	0.9	0.5
正戊烷	0.0014	847.0	485	1.2	0.7
正己烷	0.0033	914.6	434	3.0	1.4
	1.000			$\Sigma 382$	$\Sigma 663.2$

因此, 准临界特性是

$$T_{pc} = 382.2 \quad \text{并且} \quad P_{pc} = 663.2$$

$$T_{pr} = \frac{610}{328.8} = 1.59 \quad P_{pr} = \frac{750}{663.2} = 1.13$$

根据图 1—1 可知 $Z=0.91$

(三) 计 算 三

1) 已知: $P=1,840\text{psi}$, $T=180\text{ F}$, $GG=0.65$

求解: Z, B_g 。

2) 已知: $P=3,750\text{psi}$, $T=260\text{ F}$

$GG=0.60$, $Q_g=10\text{MSCF/d}$

求解: Z, B_g, BGPD 。