

二氧化碳气井测试与评价方法

二氧化碳气井 测试与评价方法

张川如 虞绍永 编著



(北京)

7.45

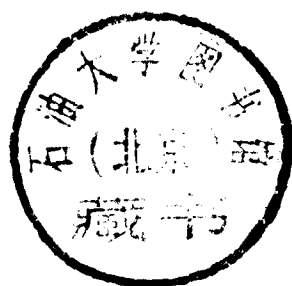
06

石油工业出版社

书号	124115
分类号	TE357.45
卷次号	006

二氧化碳气井测试与评价方法

张川如 虞绍永 编著



石油0117048

石油工业出版社

内 容 提 要

本书描述了二氧化碳气体的物理化学性质及相态特征,分析了二氧化碳气体与烃类气体的区别。同时,介绍了二氧化碳气井的测试工艺、产能评价及储量计算方法,从理论及实践上分析了二氧化碳气井测试工艺中应注意的事项,具有一定的实用价值。

本书可供现场从事气井测试与评价的技术及管理人员使用,也可供院校相关专业师生参考。

17 / 4

图书在版编目(CIP)数据

二氧化碳气井测试与评价方法/张川如,虞绍永编著.
北京:石油工业出版社,1999.2
ISBN 7-5021-2439-X

I.二…

II.①张…②虞…

III.①二氧化碳井-测试技术②二氧化碳井-评价

IV.TE15

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第30501号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里三区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 7 $\frac{3}{4}$ 印张 186千字 印1—1000

1999年2月北京第1版 1999年2月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-2439-X/TE·2012

定价:15.00元

前 言

随着工农业的发展,地下的 CO_2 资源已日益被人们所重视。据统计,国内外 CO_2 的应用已有 40 多项。我国在油气勘探开发过程中,已在 16 个省市的 31 个地区先后发现了天然 CO_2 资源;这些地区包括江苏黄桥、广东三水、吉林万金塔、河北任丘、天津大港、胜利滨南以及东海、南海等。国内部分地区已对天然 CO_2 资源进行了开采,并应用于机械、化工、食品、饮料等领域。在提高原油采收率的技术中,江苏富民地区已将天然 CO_2 气应用于石油开采的吞吐工艺技术,并取得了较好的经济效益。

为了更好地、合理科学地开采 CO_2 气田资源,必须对 CO_2 气田进行测试及评价。然而, CO_2 气井的测试在我国还是一个新的问题。据广泛调研,国内外有关 CO_2 气井测试和开采技术的有关文献也发表得很少。对于 CO_2 气井测试资料的分析,由于其独特的相态特征,也必须用独特的方法进行分析。1977 年广东三水第一口高产 CO_2 气井失控井喷,损耗天然 CO_2 气 $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该井在测试过程中因孔板管线冰堵,测试产量与压力稳定程度都达不到要求。1982 年在吉林万金塔地区,对三口 CO_2 气井进行了测试,采用油嘴保温措施方法,结果也没有解决好孔板与管线的冰堵难题,测试未获成功。1983 年原地质矿产部华东石油地质局在苏北黄桥地区发现了高产 CO_2 气田,并开始了对 CO_2 气井测试工艺的研究工作。在后来的测试过程中,运用基础科学有关 CO_2 的理化特性,结合油气井测试的相关技术,研究出了一套适合于 CO_2 气井测试的独特方法。该方法不采取地面保温措施,也能保证气井测试成功。

近年来,运用该方法已对 10 多口气井进行了成功的测试。由于 CO_2 气体和烃类气体在本质特性上有较大的差别,因此,对 CO_2 气井及烃类气井的测试也有很大不同。总结其影响测试的工艺特点,有以下几点:

(1) CO_2 气井具有较大的流体密度,在标准状态下, CO_2 的密度较甲烷密度约大 3 倍。在气层条件下是超临界气体,其密度可达 $500 \sim 700 \text{ kg/m}^3$,流体密度近似于液体的密度值。

(2) CO_2 气井在垂向井筒内的相态分布主要受临界温度的影响。在静止状态下,垂向井筒的流体密度为(包括液相、气相或饱和蒸汽相等) $800 \sim 500 \text{ kg/m}^3$,其上部为液相,下部为气相,流体密度分布呈上大下小的反向特征。在流动状态下,液相转变为饱和蒸汽相或不饱和蒸汽相,流体密度呈上小下大的正常重力分布。

(3) CO_2 的偏差系数较烃类气体有较大的区别。如果在储气空间体积相同的条件下,由于 CO_2 的偏差系数小,流体密度大,因此,气藏的地质储气丰度较烃类气体大。

(4) CO_2 气井测试过程会产生连续相态变化,因此,当降压吸热时,地面管线设备将凝结成很厚的白色冰霜。当温度降到 0°C 时,则会形成测试管串中的冰堵,影响测试资料的准确性。

(5) 由于 CO_2 在井筒内气体相态复杂, CO_2 气井测试无法应用井口压力来换算地层压力与流动压力,必须下入井底压力计实测地层压力与地层温度。

(6) CO_2 对井下设备和地面管线有腐蚀作用,腐蚀速度取决于 CO_2 气在水溶液中的含

量，在生产测试过程中要考虑用缓蚀剂抑制 CO_2 对设备管线的腐蚀。

(7) CO_2 的开采是非连续性的，因销售市场而定。因此，产气量是不稳定的，无法采取常规的动态分析方法，例如产量递减曲线法，来预测气藏的动态特征。

(8) CO_2 虽然是无毒无害和不可燃的气体，但当地面浓度超过 2% 时，对人体有窒息作用，将危及人身安全。因此，在开采和测试过程中必须采取有效的安全防范措施。

总之，本书正是考虑了以上 CO_2 气体的独特的理化特性，从理论和实践中研究和总结出了 CO_2 气井的测试和评价方法。近年来，通过在吉林、江苏及辽河等地的多口 CO_2 气井的应用，证明所用的方法和理论是可行的。本书的编写目的就是要将这些方法介绍给广大的现场工程技术人员，以便科学合理地开发 CO_2 气田。

此外，本书主要作者由于长期在油田从事现场工作，理论水平有限，因此，书中难免会有各种缺点和错误，敬请专家和有关技术人员指正。

本书编写分工为：张川如编写了第一、二、三、五、六章的初稿；虞绍永编写第四章，并对一、二、三、五、六章的内容进行了修改整理。四川石油管理局的王鸣华在早期曾给予很大的帮助；陈元千教授对初稿提出了一些修改意见；刘慰宁教授对本书稿进行了审阅并写出了书面评语。另外，高焕章、胡承先、田相媛、周正平、何宏现、叶芳春等同志也做过一些工作，特在此一并表示衷心的感谢。

目 录

第一章 二氧化碳的物理化学特征	(1)
第一节 CO ₂ 的物理性质和有关图表	(1)
第二节 CO ₂ 的状态方程与流体密度方程	(4)
第三节 CO ₂ 气体的偏差系数	(7)
第四节 CO ₂ 气体的粘度和混合气体粘度	(14)
第五节 CO ₂ 气体的饱和蒸汽压曲线	(16)
第六节 超临界 CO ₂ 气体的特性及其共生的烃类油气	(18)
第七节 CO ₂ 的物理参数	(21)
参考文献	(22)
附表	(23)
第二章 二氧化碳气井测试的相态分析	(25)
第一节 相态的识别方法	(25)
第二节 静止状态垂直井筒的相态规律	(25)
第三节 流动状态垂直井筒的相态规律	(30)
第四节 测试过程中地层条件下的相态特征	(33)
参考文献	(38)
第三章 二氧化碳气井测试工艺	(39)
第一节 CO ₂ 气井测试方案的讨论	(39)
第二节 CO ₂ 气井防冰堵测试工艺及流程	(42)
第三节 临界速度流量计产气量计算	(47)
参考文献	(50)
第四章 二氧化碳气井测试资料解释方法	(51)
第一节 CO ₂ 气井与烃类气体的渗流特征	(51)
第二节 CO ₂ 气井不稳定试井拟压力计算方法	(52)
第三节 CO ₂ 气井压力不稳定试井的常规试井分析方法	(54)
第四节 CO ₂ 气井测试资料的现代试井解释方法	(57)
第五节 封闭气藏拟稳态压降测试资料的分析	(60)
第六节 多产量 CO ₂ 气井测试分析及湍流系数的确定方法	(63)
第七节 CO ₂ 气井实例测试资料的解释	(66)
参考文献	(70)

第五章 二氧化碳气井产能评价及储量计算方法..... (72)

第一节 CO₂ 气井的产气方程 (72)

第二节 CO₂ 气井（藏）的分类 (75)

第三节 CO₂ 气田储量计算方法 (78)

参考文献..... (93)

第六章 关于二氧化碳气井测试与开采的几个问题..... (95)

第一节 混合气体的偏差系数计算..... (95)

第二节 CO₂ 开采的几个问题 (106)

第三节 CO₂ 驱油及吞吐 (107)

参考文献..... (111)

附表..... (112)

第一章 二氧化碳的物理化学特征

第一节 CO₂ 的物理性质和有关图表^{[1][2]}

在标准状态下, CO₂ 是无色无臭略有酸味的气体, 比空气重, 相对密度为 1.5192, 不能燃烧。CO₂ 气体是一种容易被液化的真实气体。随着环境温度与压力的变化, 其物理状态可有气态、液态和固态三相。在常温下 (31℃ 以下) 能压缩呈液体, 常压下 (0.535MPa 以下) 能冷凝呈固体——干冰, 随着温度的升高, 固态干冰又可升华呈蒸汽。图 1-1 为 CO₂ 气体的相态分布图。

表 1-1, 表 1-2 分别给出了 CO₂ 密度随温度变化的规律。对于液态 CO₂, 其密度(ρ)值将随温度增高而降低, 变化范围为 $\rho = 463.9 \sim 1177.9 \text{ kg/m}^3$; 而汽态 CO₂ 密度则随着温度增高而增高, 范围为 $\rho = 13.8 \sim 463.9 \text{ kg/m}^3$ 。固态干冰的密度值范围为 $1512.4 \sim 1595.2 \text{ kg/m}^3$ (-100℃ 时); 随着温度的增加, 其值将少有下降。图 1-2 为 CO₂ 两相区的密度图。

图 1-3 是用 CO₂ 温熵图所作的相态分布图。该图表明: 高于临界温度 (31.15℃) 是气相区。而当温度低于临界温度时, 可划分为三种物理状态: (1) 压力高于饱和蒸汽压线所对应的温度, 即饱和液体线左方是过冷液相区; (2) 压力低于饱和蒸汽压线所对应的温度, 即干饱和蒸汽压线右方是过热蒸汽区 (或叫不饱和蒸汽区); (3) 饱和液体线和干饱和蒸汽线所包围的区域称作为汽液两相区, 亦称饱和蒸汽区。在汽液两相区, 因其汽液两相的比例不同 (亦称作干湿程度不同), 可划分不同的区域。

设 X 为含液体量的湿度, 则: $X = 0$ 为饱和液体线; $X = 0.1, X = 0.2, \dots$, 随着 X 增大, 含液体的比例减少; $X = 1$ 是干饱和蒸汽线, 此时其液相含量为零。

在两相区内, 因其干湿程度不同, 其密度有较大变化, 故其偏差系数也将有较大变化。

对于 CO₂ 流体来说, 如图 1-1 所示, 临界温度是至关重要的物性参数。当温度高于临界温度时, 在任何压力值下, CO₂ 都不会变成液体。

临界压力是划分单相区和多相区的分界线; 当压力高于临界压力时, CO₂ 呈单相气体或单相液体; 当温度高于临界温度时呈超临界气相; 当温度低于临界温度时呈过冷液相。当压力低于临界压力时, 则将出现汽相区、液相区和两相区。如果温度再继续降低到 -56.6℃ 时, 则还可能出现汽、固、液三相点或固、汽两相区。

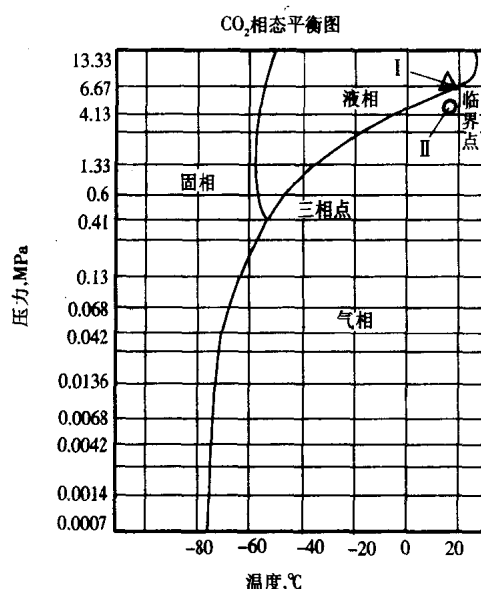


图 1-1 CO₂ 相态分布图

I—174 井静态实测点; II—174 井流量实测点

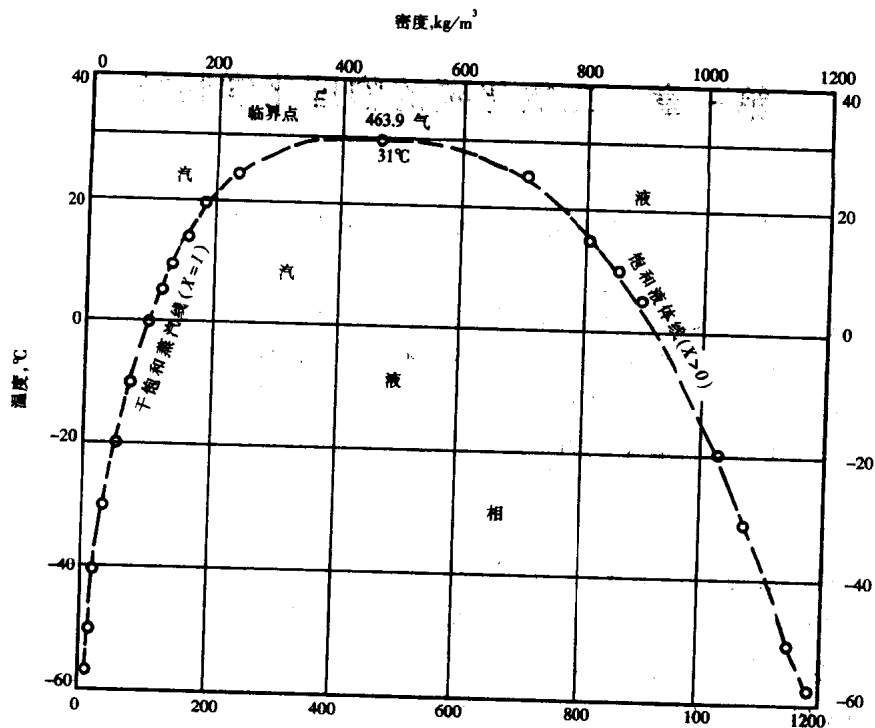


图 1-2 两相区的密度图

表 1-1 二氧化碳的密度随温度的变化

温度 ℃	密度, kg/m ³		温度 ℃	密度, kg/m ³	
	液体	蒸汽		液体	蒸汽
31.0	463.9	463.9	-12.5	993.8	65.3
30.0	596.4	334.4	-15.0	1006.1	60.2
27.5	661.0	275.1	-17.5	1018.5	55.7
25.0	705.8	240.0	-20.0	1029.9	55.4
22.5	741.2	212.0	-22.5	1041.7	47.5
20.0	770.7	190.2	-25.0	1052.6	43.8
17.5	795.5	178.7	-27.5	1063.6	40.2
15.0	817.9	158.0	-30.0	1074.2	37.0
12.5	838.5	144.7	-32.5	1084.5	33.9
10.0	858.0	133.0	-35.0	1094.9	31.2
7.5	876.0	122.3	-37.5	1105.0	28.7
5.0	893.1	113.0	-40.0	1115.0	26.2
2.5	910.0	104.3	-42.5	1125.0	23.9
0.0	924.8	96.3	-45.0	1134.5	21.8
-2.5	940.0	89.0	-47.5	1144.4	19.9
-5.0	953.8	82.4	-50.0	1153.5	18.1
-7.5	968.0	76.2	-55.0	1172.1	14.8
-10.0	980.8	70.5	-56.6	1177.9	13.8

表 1-2 二氧化碳的密度随温度的变化

温度 ℃	密度 ρ , kg/m ³		温度 ℃	密度 ρ , kg/m ³	
	固体	蒸汽		固体	蒸汽
-56.6	1512.4	13.84	-80	1566.1	2.510
-60.0	1521.9	10.97	-85	1574.8	1.672
-65.0	1534.6	7.74	-90	1582.2	1.087
-70.0	1546.1	5.39	-95	1588.9	0.693
-75.0	1556.5	3.71	-100	1595.2	0.428
-78.9	1564.0	2.74			

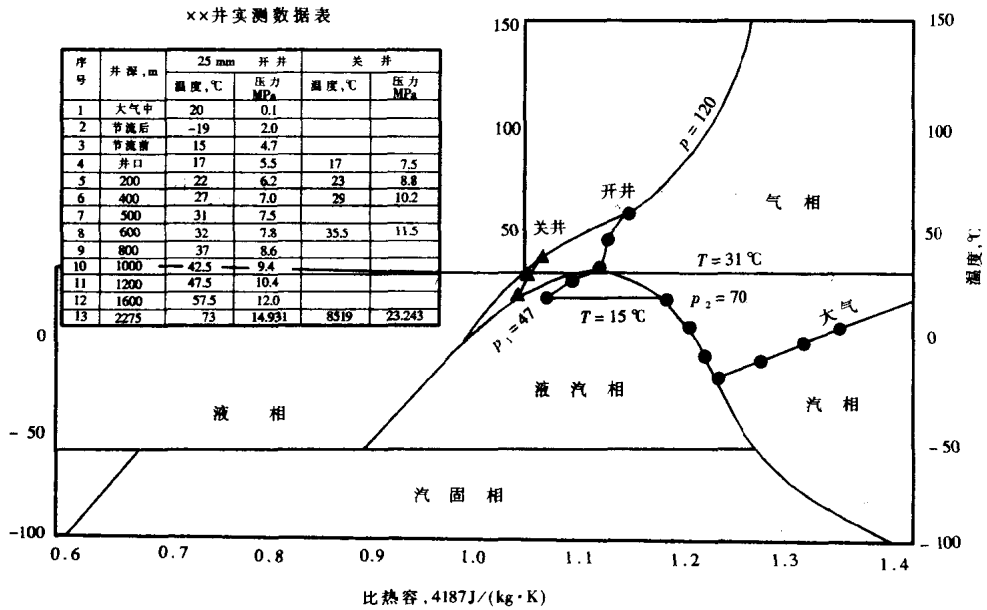


图 1-3 CO₂ 气井相态分布图

图 1-4 是安德鲁在 1869 年通过对 CO₂ 所作的等温压缩实验, 得到的 CO₂ 气、液等温线图。该图纵坐标为压力, 横坐标为比容^[3]。

据热工学的定义: 比容为密度的倒数, 它是单位工质质量所占有的容积, 用符号 v (m³/kg) 来表示:

$$v = \frac{V}{m} \tag{1-1}$$

式中 V ——容积, m³;
 m ——质量, kg。

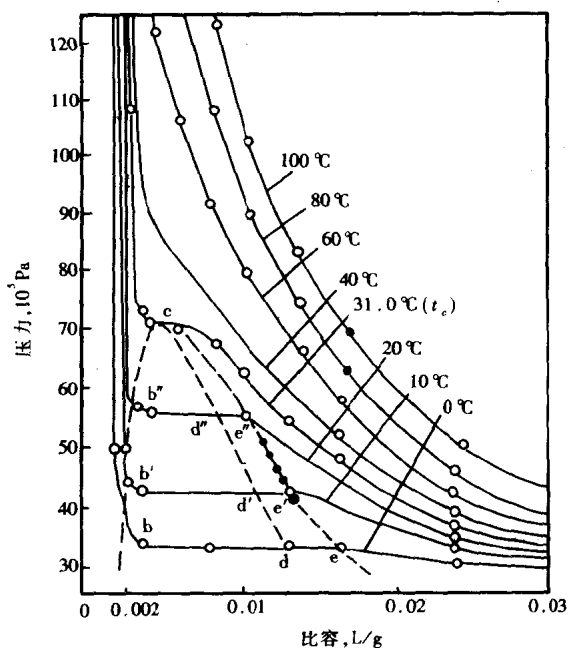


图 1-4 CO₂ 的压容图

该实验在压容图上有一些等温线簇，即：(1) 当温度高于 31℃ 时，等温线簇近似于理想气体的等温线，呈等轴双曲线形状。(2) 当温度低于 31℃ 时，不同的等温线簇中都有一段水平线段，这些线段说明气体凝结成液体的过程。例如：点 e, d, b 为不同压力下的气体凝结，至点 b 为凝结结束后呈液相区。当温度升高到 31℃ 时，相应于两相共存的水平线段浓缩呈一点，说明温度高于临界温度以后就不再液化。(3) 如果将开始凝结的各点 e', e'', e, c 连成一条线，则该线即为饱和蒸汽压线。如果再将凝结终结点 b, b', b'', c 连成一条线，则该线为饱和液体线。该曲线左方为比容最小（即密度最大）的液相区；饱和蒸汽压线的右方为不饱和汽相区。

第二节 CO₂ 的状态方程与流体密度方程

一、CO₂ 的状态方程

据波义耳—查理定律，理想气体的状态方程式可用下式来表示：

$$pV = n \cdot R \cdot T \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的绝对压力，MPa；
 V ——气体的体积，m³；
 T ——气体的绝对温度，K；
 n ——在 p, V, T 条件下的摩尔数；
 R ——气体常数。

按我国法定计量单位，通用气体常数的定义是：在标准状态下（即压力为 0.101325MPa；温度为 273.15K 时）1 摩尔的气体所占据 22.4m³ 的标准容积。故通用气体常数的值计算如下：

$$R = \frac{0.101325 \times 22.4}{1 \times 273.15} = 0.008314 \quad \frac{\text{MPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

或

$$R = 8.3143 \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8314.3 \quad \text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

在有些情况下，真实气体也可以近似地看成理想气体。如远离液态的真实气体皆可以看

成接近于理想气体。但接近液态的真实气体都必须作为真实气体。

CO₂ 在常规的条件下 (25℃, 0.1MPa) 较空气重 50%。当温度低于 31℃ 时会产生液化, 流体密度变大, 并有较低的偏差系数。考虑 CO₂ 的特性必须按真实气体来对待, 其气体常数与通用气体常数亦应该有一定的区别。

据文献 [1] [2], 在标准状态下, 1 摩尔气态的 CO₂ 将占据 22.26m³ 的容积 (分子容积 22.26m³/kg)。如果仍沿用以上公式, 则 CO₂ 的气体常数应为:

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{0.101325 \times 22.26}{1 \times 237.15} = 0.0082573 \quad \frac{\text{MPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

若采用法定计量单位, 则 $R_{\text{CO}_2} = 8314.3/44.01 = 188.9 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。如果应用上述的 R_{CO_2} 常数值, 则 $R_{\text{CO}_2} = 8257.3/44.01 = 187.6 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。其中 CO₂ 气体的相对分子质量 $M = 44.01$ 。

以上计算结果表明: 两种方法所计算的气体常数与通用气体常数误差并不太大。

二、CO₂ 的密度方程

密度是质量 (m) 与体积 (V) 的比值, 即:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-3)$$

气体的摩尔数 (n) 是质量 (m) 与相对分子质量之比, 故有:

$$n = \frac{m}{M} \quad (1-4)$$

代入式 (1-2), 即得:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1-5)$$

考虑偏差系数对真实气体的影响, CO₂ 的密度可计算为:

$$p = \frac{m}{V} \cdot \frac{RTZ}{M} \quad (1-6)$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{pM}{ZR_{\text{CO}_2}T} \quad (1-7)$$

气体的相对分子质量可表示为:

$$M = M_{\text{ai}} \cdot r_g \quad (1-8)$$

式中 M_{ai} ——空气的相对分子质量 (28.97);

M ——CO₂ 的相对分子质量 (44.01);

r_g ——CO₂ 的相对密度, 纯 CO₂ 的相对密度为 $r_g = 1.5192$ 。

故, 式 (1-7) 又可以写成:

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{28.97 r_k p}{Z R_{\text{CO}_2} T} \quad (1-9)$$

在石油与天然气工业中，常用压力梯度的概念，故，若将井筒内某点的 CO_2 的密度 (kg/m^3) 用压力梯度 (单位为 $\text{MPa}/100\text{m}$) 来表示，则上式可改写为：

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{2897 r_k G_D}{Z R_{\text{CO}_2} T} \quad (1-10)$$

其中

$$G_D = \frac{dp}{dD}$$

式中 G_D ——井筒内某点的压力梯度， $\text{MPa}/100\text{m}$ ；

D ——深度， m 。

在实际 CO_2 气井测试过程中，由于井下流体密度的复杂性，常用垂直井筒实测压力梯度 (即井下压力计每 100m 的压力差值) 来表示 CO_2 气井垂直井筒内的流体密度变化。据实际 CO_2 气井测试资料表明，应用式 (1-7) 所计算的流体密度和压力计实测的流体密度相一致。由于 CO_2 的气体常数与通用气体的气体常数误差并不太大，实际计算时还可选用通用气体的气体常数。表 1-3 为随压力和温度变化的 CO_2 密度数据表，该表列出了不同压力、温度下的密度值。因此可以利用数据表查出不同压力和温度下的流体密度 (也可以进行内插求值)。

表 1-3 二氧化碳的密度 (kg/m^3)

压力, 10^2kPa 温度, $^{\circ}\text{C}$	25	50	75	100	150	200	250	300	350
0	60.1 ^①	947 ^②	954 ^②	969 ^②	997 ^②	1017 ^②	1035 ^②	1053 ^②	1067 ^②
10	56.1 ^①	864 ^②	891 ^②	914 ^②	950 ^②	977 ^②	1000 ^②	1019 ^②	1035 ^②
20	52.7 ^①	142.3 ^①	810 ^②	855 ^②	901 ^②	933.5 ^②	960 ^②	983.2 ^②	1003 ^②
30	49.9 ^①	126.1 ^①	655	782	850	888.7	919	946	968.5
40	47.6	113.5	230.5	638	785	841.5	877.1	907.7	933.9
50	45.6	105.2	193.2	390.1	705	785.5	834.7	868.7	899
60	43.7	98.4	172.6	286.8	604	724	788.9	829.2	863.4
70	42.1	93.0	158.4	247.8	504	660.5	737.9	788.2	827
80	40.6	88.3	146.9	221.5	430	593.5	687.2	746.6	789.8
90	39.1	84.5	138.1	201.9	373	532.5	635.9	704	752.2
100	37.8	81.0	130.5	187.7	333	481.5	588	663	716
150	32.5	67.4	105.4	146.1	233.7	326.7	415.1	492.5	554.9
200	28.8	58.6	89.0	122	190	259.1	327.1	390.7	449.1

注：①数据为汽相区；

②数据为液相区。

根据表 1-3 可以绘出 CO_2 密度图 (如图 1-5 所示)。图 1-5 表明, CO_2 的密度和压力呈正比关系, 即压力越高, 密度越大; 与温度却呈反比关系, 即温度越高, 密度越小。当温度低于 31°C 时, 汽液两相区的密度变化较大。通过对数口 CO_2 气井的实际资料分析发现: 静止状态时, 垂直井筒内的流体密度变化是上大下小, 呈反向特征; 而在流动状态时, 垂直井筒内的流体密度则呈正常重力分布特征。

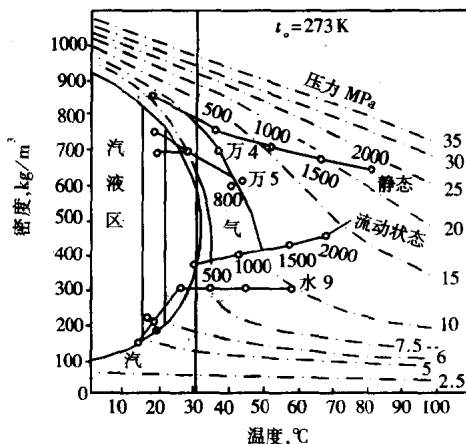


图 1-5 CO_2 的密度图

第三节 CO_2 气体的偏差系数^[3]

一、 CO_2 气体的偏差系数

偏差系数亦称为压缩因子, 系指在相同压力与温度条件下的实际气体体积与理想气体体积的比值。

令阿马格数 A 为:

$$A = \frac{pV}{p_0 V_0} \quad (1-11)$$

偏差系数 Z 为:

$$Z = \frac{V_0}{V} \quad (1-12)$$

而

$$Z = \frac{pV}{RT} \text{ 或 } Z = \frac{pV}{p_0 V_0} \cdot \frac{T_{sc}}{T} \quad (1-13)$$

故

$$Z = A \cdot \frac{T_{sc}}{T} \quad (1-14)$$

式中 p_0, V_0 ——理想气体的压力与体积;

p, V ——真实气体的压力与体积;

T_{sc} ——标准状态的气体温度, K;

T ——实际气体温度, K。

偏差系数 Z 和对比压力与对比温度有关。相同的对比压力和对比温度下应具有相同的

偏差系数。

对于常规烃类天然气来说，其偏差系数 Z 的求取，可采用凯氏定律 (Kay's Rule) 和压缩系数图版 (图 1-6) 法。使用时应先求得混合气体的对比温度及对比压力，公式如下：

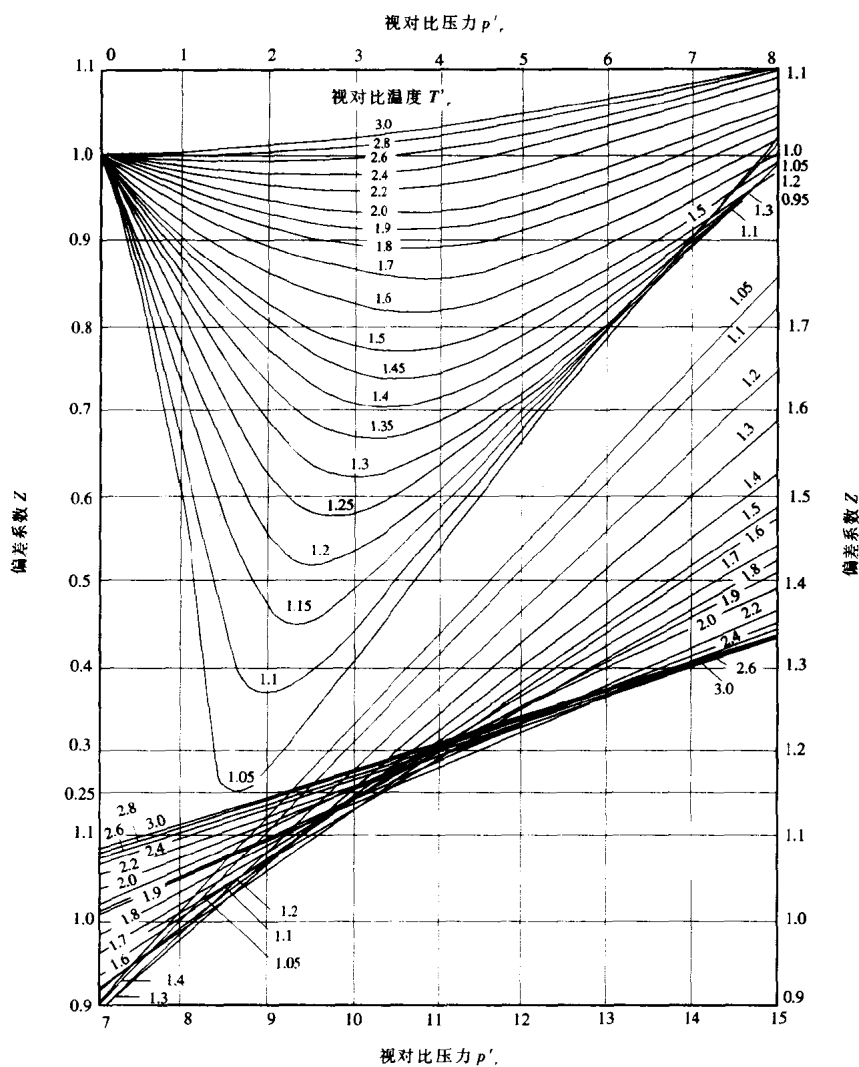


图 1-6 烃类气体的压缩系数图版

对比温度：

$$T_r = T/T_c \quad (1-15)$$

对比压力：

$$p_r = p/p_c \quad (1-16)$$

式中 T_c ——气体的临界温度，K；
 p_c ——气体的临界压力，MPa；
 T ——真实气体的绝对温度，K；
 p ——真实气体的绝对压力，MPa。

然后,再利用 T_r 与 p_r 的值在图 1-6 中查取 Z 值。

对于 CO_2 气体,由于其相态变化较大, Z 值的变化幅度也大,因此, CO_2 气体的 Z 值求取不能简单采用通用气体的偏差系数图版。

通常求取 CO_2 的 Z 值的方法有如下三种:

(1) 实验室内用天然 CO_2 试样测定偏差系数。具体方法是:首先在气藏平均压力和温度下测定某一试样的体积,然后,在大气压下,在能使气样为蒸汽相的温度下再测定其体积,最后用气体方程式计算出气体的偏差系数;

(2) 查实验数据表。文献 [1] [2] 给出了纯 CO_2 的偏差系数与压力和温度的相关数据表。

因此,若已知其温度和压力,即可求得纯 CO_2 的偏差系数;

(3) 查图。利用图 1-8 的压缩度图版查得 A 值,再利用式 (1-14) 计算实际气体的偏差系数值;或利用图 1-11 直接查出 CO_2 气体的偏差系数。

因烃类天然气的组分以 CH_4 为主,故可以通过作出 CH_4 与 CO_2 的 $Z-T$ 关系曲线图(图 1-7),比较烃类气体与 CO_2 气体的偏差系数变化规律的区别。图 1-7 中,纵坐标为偏差系数 Z ,横坐标为温度 T 值(取值范围为 $-20 \sim 100^\circ\text{C}$)。观察 CH_4 与 CO_2 的等压线簇(压力取值范围 $1 \sim 30\text{MPa}$),可以发现甲烷的等压线簇位于图幅上部, Z 值范围为 $0.7 \sim 1$,变化幅度小,说明因甲烷的临界温度低(-84°C),在图幅取值范围内的甲烷是气态而不会液化。然而, CO_2 的等压线簇均位于图幅中部或下部, Z 值的变化幅度大($Z = 0.03 \sim 1$),特别是在低压与低温条件下变化幅度更大。原因是由于此时 CO_2 的相态变化较大。

在图 1-7 中取相同的温度与压力条件,比较两种气体 Z 值的大小区别如表 1-4 所示。

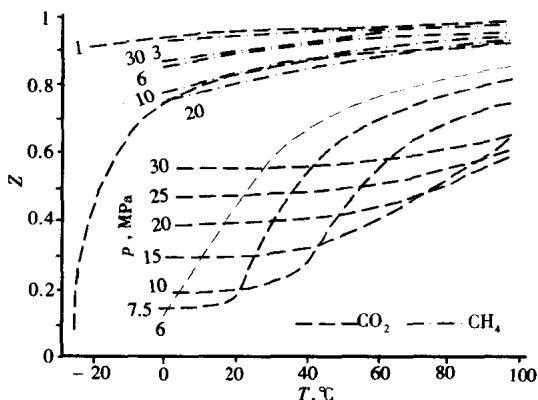


图 1-7 CH_4 与 CO_2 的 $Z-T$ 关系曲线图

表 1-4 两种气体 Z 值的大小区别

温度, $^\circ\text{C}$	压力, MPa	甲烷的 Z 值	CO_2 的 Z 值
0	6	0.85 (气态)	0.12 (液态)
100	6	0.955 (气态)	0.86 (气态)

二、 CO_2 压缩度图

据文献 [1] [2] 压缩度数据表,由于在低压区(两相区) Z 值的变化比较大,故采用半对数坐标作图,目的在于提高低压区 Z 值的精度。查阅文献 [1] [2] 中临界状态下的 A 和 Z 值,得: $A = 0.315$, $Z = 0.274$ 。分别将饱和蒸汽相的两相区汽液密度代入以下公式,反求汽液两相区的 A 和 Z 值:

$$Z = \frac{pM}{\rho RT} \quad (1-17)$$

$$A = Z \cdot \frac{T}{T_{sc}} \quad (1-18)$$

两相区的 Z , A 计算结果见表 1-5。

表 1-5 两相区的 Z , A 值

温度 ℃	压力 MPa	Z		A	
		液相	汽相	液相	汽相
31	7.383	0.274	0.274	0.305	0.305
20	5.697	0.135	0.545	0.145	0.585
10	4.502	0.0987	0.637	0.1023	0.660
0	3.482	0.0740	0.708	0.0740	0.708
-10	2.650	0.0547	0.761	0.0527	0.733
-25	1.690	0.0343	0.824	0.0312	0.749
-40	1.006	0.0206	0.877	0.0176	0.749
-50	0.695	0.0144	0.918	0.0118	0.750

将上述计算结果与文献 [1] [2] 压缩度数据合并作图, 即得 CO_2 气体压缩图图版 (图 1-8)。

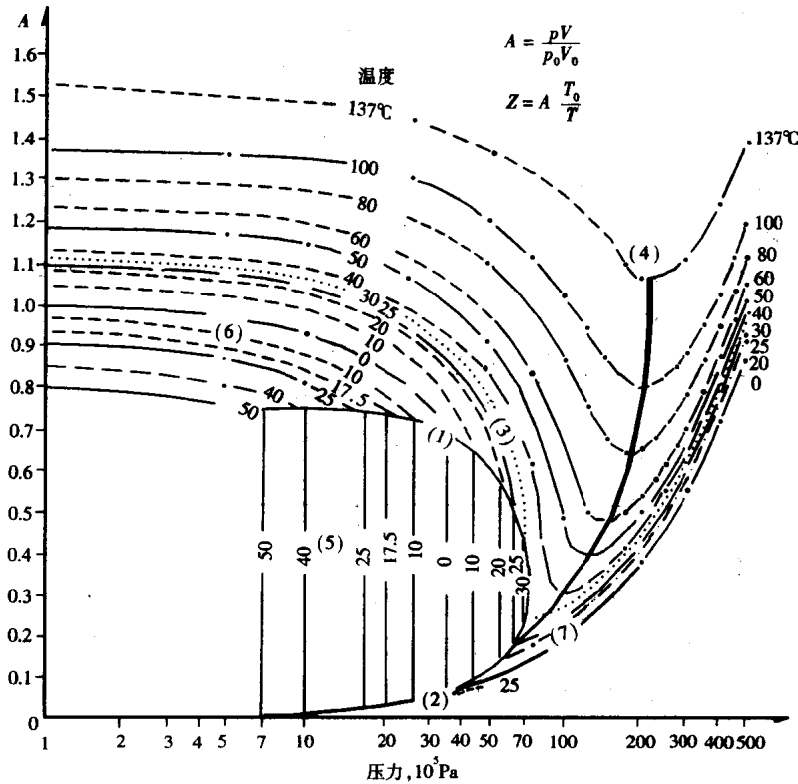


图 1-8 纯 CO_2 压缩度图版

- (1) 饱和蒸汽压线; (2) 饱和液体线; (3) 临界温度线 ($t = 31^\circ\text{C}$);
 (4) 波义耳轴线; (5) 汽液两相区; (6) 汽相区 (过热蒸汽区), 其液相
 体积为零; (7) 液相区, 其汽相体积为零