

二氧化碳气井测试中的相态问题

张川如 胡承先 戴益富 田相媛

(地质矿产部华东石油地质局)

二氧化碳测试是一项新课题, 由于二氧化碳临界温度接近常温(31℃), 因此在测试过程中不同于一般烃类气体, 它经常出现多相流动, 给测试和分析带来了许多困难。

本文借助于二氧化碳的温熵图对气井测试中的相态进行分析, 并对二氧化碳的偏差系数和二氧化碳使用临界速度流量计的误差也做了较详细的讨论。

一、二氧化碳的一般特征

二氧化碳也同其他化合物一样, 具有它自己的物理和化学性质。在常温常压下为无色、无味的气体, 随着外界温度和压力的变化, 其物理状态可相互转化, 或气态、或液态, 或固态。另外, 由于它具有在常温下能压缩成液体和在常压下能冷凝成固体等特性, 因此它在工业上或其它方面具有很高的经济价值。

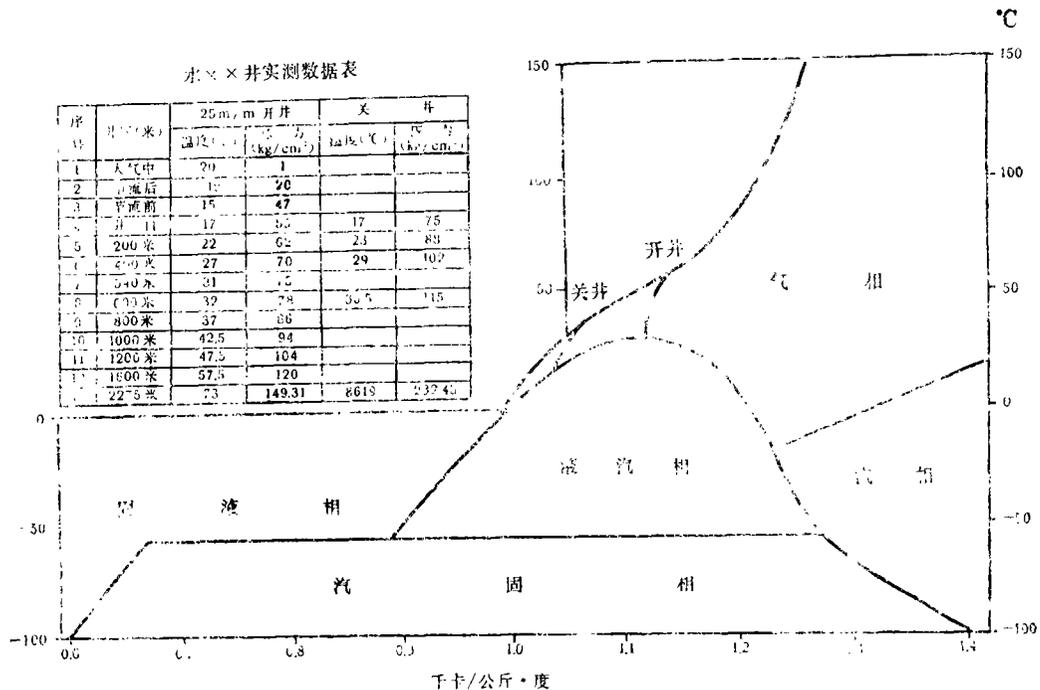


图1 二氧化碳相态分布图

图1是在二氧化碳温-焓图基础上作的开井和关井时的二氧化碳相分布图。该图表明，温度高于31.1℃（临界温度）时纯二氧化碳均为气态；低于临界温度和临界压力（73大气压），则二氧化碳具有液相和汽相之分；当压力低于5.28大气压，温度低于-56.6℃，则纯二氧化碳转化为固相（干冰），当温度高于-56.6℃固态干冰又可直接升华为气体。

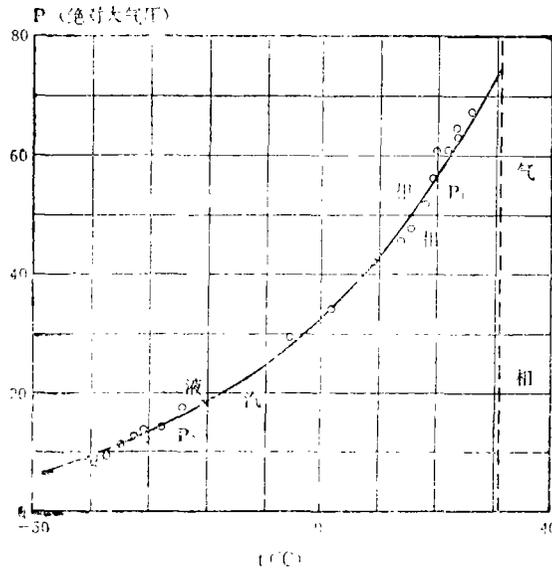


图2 二氧化碳饱和压-温关系曲线图

二、二氧化碳的偏差系数

二氧化碳的偏差系数即在同温、同压条件下二氧化碳比容与理想气体比容的比值。

$$Z = \frac{R \cdot V}{R \cdot T} = \frac{V_0}{V_1} \quad (1)$$

《深冷手册》、《氮肥工艺手册》和现场上常用压缩度(即阿马格数A)表示二氧化碳与理想气体的区别。

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0 \cdot Z_0} \text{ (理想气体)} = \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot Z_1} \text{ (实际气体)} \quad (2)$$

式中： $T_0 = 273K$ $Z_0 = 1$ $P_0 = 760m/m$ 汞柱

$$Z_1 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_0 \cdot V_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}$$

令 $A = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_0 \cdot V_0}$

则 $Z_1 = A \cdot \frac{T_0}{T_1} \quad (3)$

从图2可看出，二氧化碳在31℃以上是气态，31℃以下是两相区；在两相区内，压-温线下方温度高于所对应的压力属汽相区，压-温线上方温度低于所对应的压力为液相区，饱和蒸汽压线是两相区。

二氧化碳的偏差系数（压缩度）与压力关系曲线是近似双曲线，当温度低于31℃时Z值变化很大。我们将不同温度的Z值最低点连在一起这条线叫波义耳轴，波义耳轴的两侧反映了气体分子两种不同的作用情况。

轴左侧的曲线随压强增大而Z值减小，表明为气体的分子吸引力随压力增大而增大。轴右侧的曲线随压强增大而Z值增大，反映了气体分子的压缩到一定体积后分子间的吸引力居于次要地位，而分子间的斥力则将成为主要方面，波义耳轴即分子吸力与斥力相平衡而分子的体积处于最小的临界状态。

对比甲烷和二氧化碳偏差系数的区别（图3）：

1. 甲烷的Z-T线均大于二氧化碳，甲烷Z值变化较小，二氧化碳的Z值变化较大。
2. 二氧化碳的Z值在压力高和温度高的时候变化小，在压力低、温度低的时候变

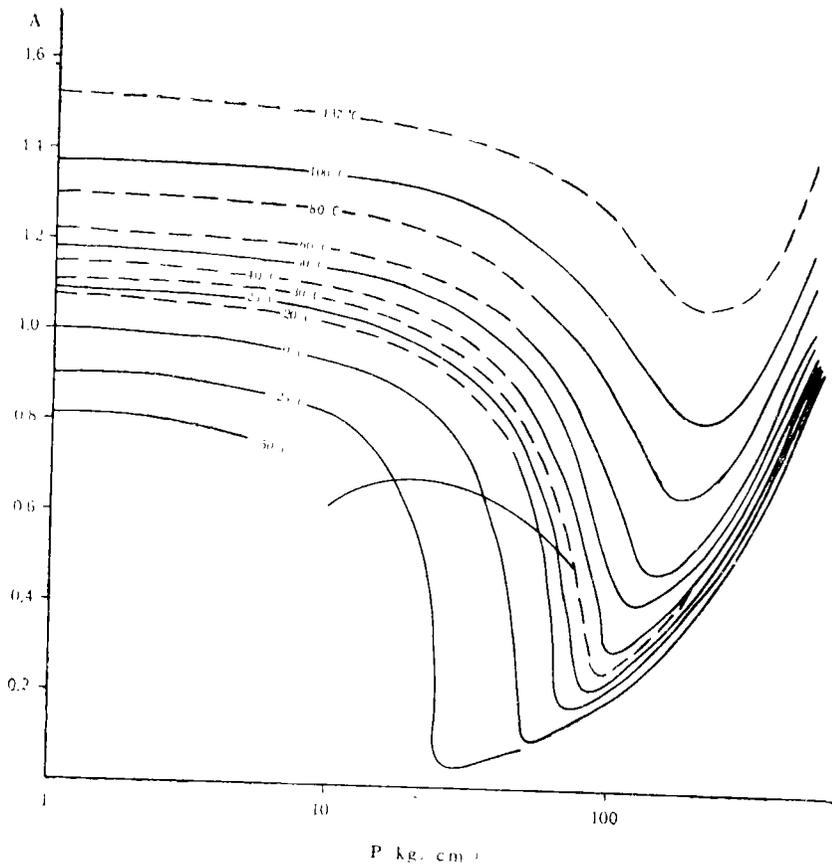


图3 二氧化碳压缩系数图（根氮肥工艺设计手册）

化大。Z值的变化与相态有关。

3. 因二氧化碳和甲烷偏差系数的差异，当处于相同的压力、温度条件下，二氧化碳气藏的储量要大于烃类气藏的储量。同理，在测试气体流量时压力、温度在相同条件下，二氧化碳的流量要大于烃类气体的流量。

用临界速度流量计测量二氧化碳流量，在孔板节流时往往处于饱和蒸汽相，上下流压力、温度均遵循饱和蒸汽压-温线，即一定的饱和压力总是对应着一定的饱和温度。据这一“热工理论”规律，在压缩系数（偏差）标出了饱和蒸汽压-温线，使求二氧化碳的偏差系数变得较为简便和准确。也容易从偏差系数图版上看出测点的相态位置。

三、测试中的相态分析

为了弄清测试中CO₂在静态和动态条件下，从井底到井口、流量计至出气口的相态变化规律，现场实测了静止状态和流动状态的压力梯度和温度梯度，并整理绘制了开井关井压力梯度图（图4）、开井关井温度梯度图（图5）、相分布图（图1、6、7）。

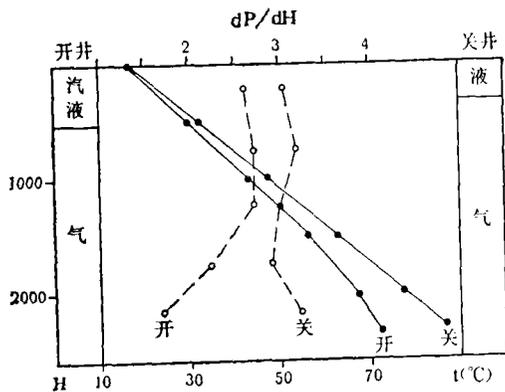


图4 开、关井压力梯度图

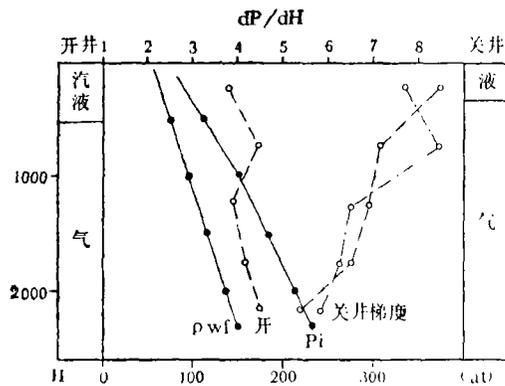


图5 开、关井温度梯度图

1. 静态的井筒内相态分析

关井时，井筒内垂向流体密度由上向下变小（图4），因井口压力高于临界压力，井深340米处温度为临界温度，故自井口到井深340米为液相，实测密度约为850公斤/度米³。井深340米以下为高压气相，实测密度717—536公斤/立方米，逐渐降低，地温梯度3.1℃/100米。

2. 动态（开井）中的相分析

20毫米、25毫米孔板开井测试时，流动压力分别为130.87公斤/厘米²和149.31公斤/厘米²，流动温度70.5—72—73℃。实测压力梯度变化规律不够明显，流体密度为320—450公斤/立方米，平均温度梯度2.4℃/100米。由此可见，井深0—540米为液汽相，井深450米以下是高压气相。刚开井时，井口由泡点线向两相区过渡到饱和蒸汽相。

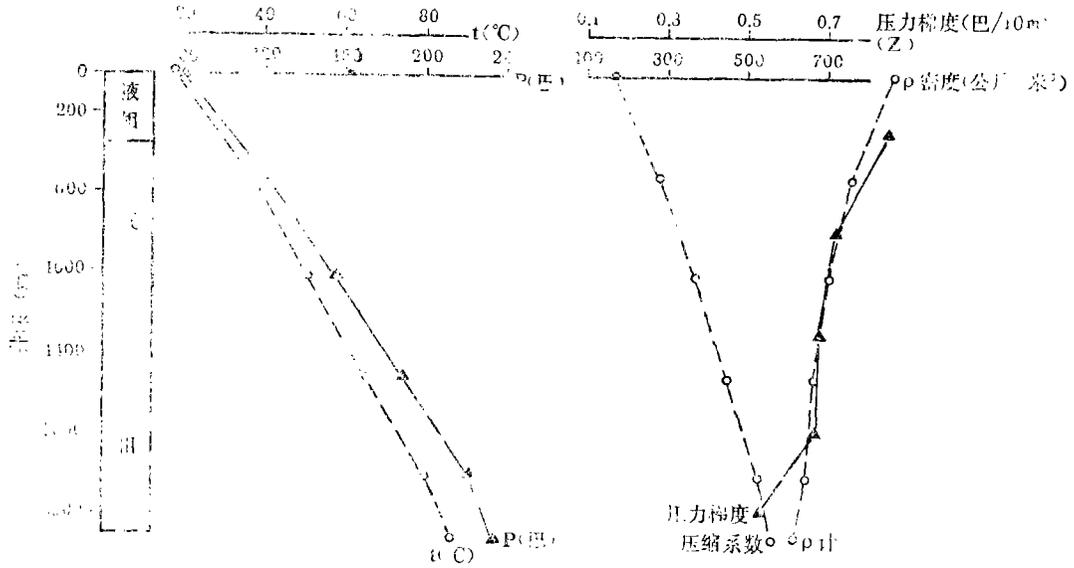


图6 二氧化碳静止相态图

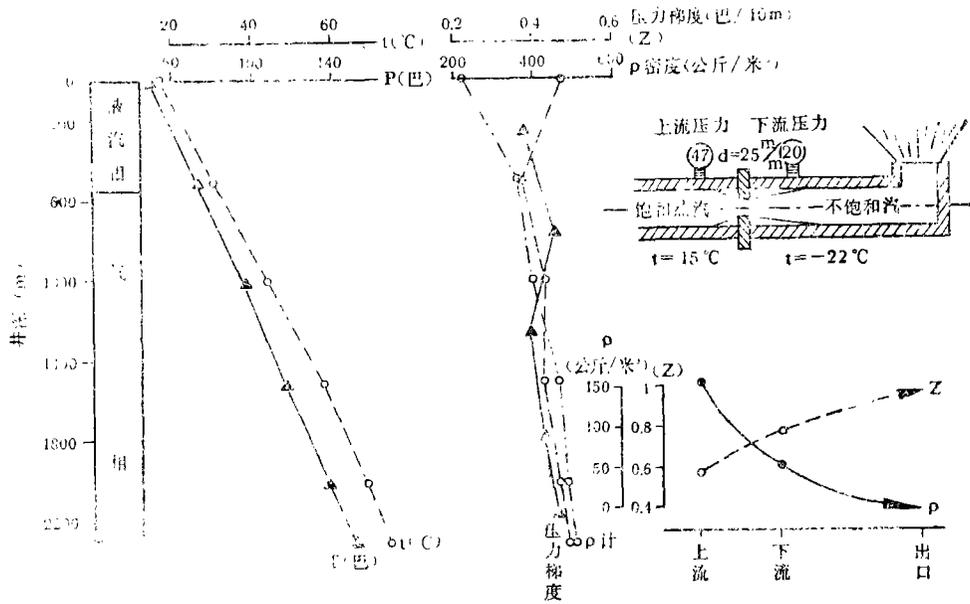


图7 二氧化碳测试相态图

从井口到临界速度流量计孔板前（未采用油嘴节流）、压力下降较少约为2公斤/平方厘米、温度下降约1℃。从相态来说，它处于由泡点线向露点线即由液态膨胀转变为饱和蒸汽的最活跃相区，该相区密度变化最大，节流点前后即上流、下流压力和温度基本上遵循着饱和蒸汽压-温线变化（图2），结合温熵图可认为是饱和蒸汽相。

出口处为不饱和蒸汽，密度小，当温度低于-56.60℃还可能出现干冰，造成出口处短时间的冰堵抽搐。

四、应用临界速度流量计测量二氧化碳流量

测量二氧化碳气体流量常用气体流量计，当气量较大时用临界速度流量计，其计算公式是否适用，作以下讨论。

测量气体的过程是一个绝热放气过程，节流是不可逆的存在着摩擦阻力，节流前后的压力、温度呈比例下降。

$$PV^K = C \text{ (常数)}$$

$$K = \text{绝热系数}$$

如节流后的压力 P_2 小于节流前的压力 P_1 约0.55倍。即 $P_2 \leq 0.55P_1$ ，气体流动速度等于声速称临界速度。此时若增加节流前的压力只能增加气体的流量和密度，不会引起流速的增加。

不同气体有不同的绝热系数

类型	绝热系数 (K)	临界压力比 (β)
单原子气体	1.67	0.487
双原子气体	1.4	0.528
多原子气体	1.3	0.546
不饱和蒸汽 (过热蒸汽)	1.3	0.546
饱和蒸汽	1.135	0.577

二氧化碳的定压比热 $C_P = 0.1989$ 千卡/公斤·度 (20℃·760m/m汞柱)

定容比热 $C_V = 0.1535$ 千卡/公斤·度 (20℃·760m/m汞柱)

$$K = \frac{C_P}{C_V} = 1.295 \approx 1.3 \quad (20^\circ\text{C}, 760\text{m/m汞柱})$$

当二氧化碳节流测试呈饱和蒸汽相时 $K = 1.135$ $\beta = 0.577$

气体在喷嘴中喷出，其流速公式：

$$W_t = \sqrt{g \cdot K \cdot P_1 \cdot V}$$

$$g = \text{重力加速度} \quad V = \text{气体比容} \quad P_1 = \text{上流压力}$$

则可导出饱和气体流量系数

$$Q = 277.253 \sqrt{K \cdot \left(\frac{2}{K+1} \right)^{(K+1)/(K-1)}} \cdot \frac{P_1}{\sqrt{S, T, Z}} \quad (\text{m}^3/\text{日})$$

S = 气体比重,

将K = 1.135代入上式, 设C' = 277.253 $\sqrt{K \cdot \left(\frac{2}{K+1}\right)^{(K+1)/(K-1)}}$

$$C' = 176d^2$$

饱和蒸汽相的二氧化碳流量计使用公式:

$$Q = \frac{176d^2 \cdot P_1}{\sqrt{T \cdot S \cdot Z}}$$

常规气体计算公式:

$$Q = \frac{186d^2 \cdot P_1}{\sqrt{S \cdot T \cdot Z}}$$

误差范围: $e = \frac{186d^2}{176d^2} = 105.7\%$, 偏高5.7%

五、结 论

1. 二氧化碳气井测试过程中的相态规律:

(1) 静止状态: 如某井段的压力和温度不对应, 温度在31℃以下, 压力高于饱和蒸汽压-温线的压力(即高压和低温), 则井内有液相, 液相位于井口至450米(因地温梯度影响常在350米左右)。随着深度增加、温度增加而超过31℃, 液相过渡为汽相。汽液密度的差异, 液滴下沉, 又因温度上升, 液体变成汽相, 比重减轻, 轻的蒸汽相又上升, 这样轻重分离, 往往复复, 在温度31℃形成液气交换的过渡相。

例 2 某井:	压力	温度	压力梯度
100 -	62.06		6.00
200 - 液	74.06	25.5	
300 - 相			5.79
400 -	85.63	31.5	
500 - 气			5.04
600 - 相	95.71	37.5	

如某井压力等于或低于所对应的温度(即低压高温)则井内是饱和蒸汽或不饱和蒸汽, 一般压力高时呈对应的饱和蒸汽相, 压力低呈不饱和蒸汽。

		压力	压力梯度	温度
100	饱和蒸汽相	61.36	2.71	25.5
200		63.05		
300		65.76	3.39	
400		69.15		
500	气相	72.88	3.73	31.7
		75.93	3.05	34.7

计算二氧化碳密度296—245公斤/立方米，低于液态密度。

(2) 流动状态：二氧化碳在井筒内流动，随井深变浅而压力温度下降，其临界温度即气液相或气汽相分界位置。低于临界温度、压力，其温度、压力常呈对应关系，一般却是饱和蒸汽相。如果该气井产量较小，井口压力很低，井温高于对应压力，则井筒内为不饱和蒸汽相。出口处密度很低，为不饱和蒸汽。

2. 据“一定的饱和压力总对应着一定的饱和温度。”在二氧化碳偏差系数图上画出了饱和蒸汽压-温线，其优点：(1) 从偏差系数图上很容易看出不同相态的偏差系数差别；(2) 在测试时测点上找偏差系数非常简便和准确。

3. 临界速度流量计测量二氧化碳，气相或不饱和蒸汽相（压力和温度在饱和蒸汽压-温线不对应时）用一般公式 $C' = 186d^2$ ，测量饱和蒸汽（压力和温度呈对应关系），用修正公式 $C' = 176d^2$ 。

4. 在高产二氧化碳气井测试时，应选择合理的上流压力，既可控制上下流压力或两倍比例保证气体呈临界速度，又可控制较高的温度，不用保温措施即可防止井口冰堵。

（收稿日期：1986年4月17日）

ANALYSES ON THE PHASES OF GAS WELL TESTINGS FOR CARBON DIOXIDE

Zhang Chuanrú

Hu Chengxian

Dai Yifu

Dian Xiangai

(Northeast China Bureau of Petroleum Geology,
Ministry of Geology and Mineral Resources)

Abstract

Based on CO_2 T - S diagram, the phases of gas well testings are analysed in this paper, and the CO_2 deviations and the errors of the flow meters for CO_2 critical speeds are discussed in details as well.