

石油流体性质

(美) 威廉 D. 麦凯恩, JR. 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对石油工作者经常遇到的石油液体、气体的性质进行了详尽的论述,着重研究了在油藏工作中最常用到的物理化学性质,给出了这些烃类混合物的基本概念、结构、状态方程及各种系数的计算方法和相互关系。每章末尾并附有习题。

本书可供石油科技人员、大专院校师生学习参考,也可作石油工作者自学和培训使用。

THE PROPERTIES OF PETROLEUM FLUIDS

WILLIAM D. McCAIN, JR.

1973 The Petroleum Publishing Company

Printed in the United States of America

*

石油流体性质

[美]威廉D.麦凯恩, JR. 著

罗梯夫 罗景琪 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 9印张 1插页 221千字 印1—3,900

1984年8月北京第1版 1984年8月北京第1次印刷

书号: 15037·2440 定价: 1.15元

专 用 术 语

英文

a, b	凡·德·瓦尔状态方程中的常数
a, b, c, A_0, B_0	贝蒂-布里奇曼状态方程中的常数
$a, b, c, A_0, B_0,$	
C_0, α, γ	本尼迪克特-韦布-鲁宾状态方程中的常数
A	阿弗加德罗数, 2.733×10^{26} / 磅分子
A	塞奇和奥尔兹 B_g 相关法中的系数
A, B, E	贝蒂-布里奇曼状态方程的贝蒂修正式中的系数
$^{\circ}\text{API}$	以 $^{\circ}\text{API}$ 为单位的原油比重
b	地层体积系数的倒数, 标准条件下的体积除以 储层条件下的体积
b_g	气体地层体积系数的倒数
b_o	原油地层体积系数的倒数(收缩率)
B	地层体积系数, 储层条件下的体积除以标准条件下的体积
B_g	气体地层体积系数
B_{go}	气体-凝析油地层体积系数
B_o	原油地层体积系数
B_{ob}	泡点条件下的原油地层体积系数
B_t	总(两相)地层体积系数
B_w	水地层体积系数
B_{wb}	水泡点下的水地层体积系数
c	等温压缩系数
c_g	气体等温压缩系数
c_o	液体等温压缩系数
c_{pi}	等温压缩假对比系数
c_r	等温压缩对比系数

c_w	水的等温压缩系数
C	比例常数, 积分常数
$\text{EXP}(x)$	相当于 e^x
K	平衡比 (y/x)
K_j	组分 j 的平衡比
$\ln$	自然对数, 以 e 为底
$\log$	普通对数, 以 10 为底
L	长度
L_v	蒸发潜热
m	质量
m'	一分子质量
M	分子量
M_a	表观分子量
M_j	组分 j 的分子量
M_{STO}	储罐油的分子量
M_{OR}	储层油的分子量
n	总克分子数
n'	分子总数
n_g	气体克分子数
n_j	组分 j 的克分子数
n_L	液体克分子数
$\bar{n}_g$	n_g/n
$\bar{n}_{g1}, \bar{n}_{g2}$	在多级分离器流程的一、二级中, 每一克分子进料形成的 气体克分子数
$\bar{n}_L$	n_L/n
n_{Lr}	在微分蒸发结束时剩留的液体克分子数
n_{Li}	在微分蒸发开始时液体的克分子数
$\bar{n}_{L1}, \bar{n}_{L2}$	多级分离器流程的一、二级中每克分子形成的液体克分子 数
p	压力
p_b	泡点 (饱和) 压力
p_c	临界压力
p_d	露点压力

P_j	混合气中组分j的分压力
P_{po}	假临界压力
P_{pr}	假对比压力
P_r	对比压力
P_{so}	标准条件下的压力
P_v	蒸气压力
P_{vj}	组分j的蒸气压力
R	生产油气比
R	通用气体常数(一克分子)
R_s	溶解油气比(气在油中的溶解度)
R_{sb}	在泡点条件下的溶解油气比
R_{sp}	分离器油气比
R_{sT}	储罐油气比
R_{sw}	气在水中的溶解度
T	温度
T_b	泡点温度
T_c	临界温度
T_d	露点温度
T_{po}	假临界温度
T_{pr}	假对比温度
T_r	对比温度
T_{so}	标准条件下的温度
v	比容或分子速度
V	体积
V_j	混合气中组分j的分体积
V_M	每克分子的体积
V_{Mg}	气体克分子体积
V_{ML}	液体克分子体积
V_R	储层条件下的气体体积
V_{so}	标准条件下的体积
V_1	储层温度和14.7磅/英寸 ² (绝)下的体积
ΔV_p	在卡兹的B ₀ 相关法中压力下降时的液体体积变化
ΔV_T	在卡兹的B ₀ 相关法中温度下降时的液体体积变化

ΔV_{wP}	在 B_w 相关法中压力下降时的液体体积变化
ΔV_{wT}	在 B_w 相关法中温度下降时的液体体积变化
w_j	组分j的重量比
x_i	液相中组分j的克分子比
x_{ji}	初始条件下液相中组分j的克分子比
x_{jf}	最后条件下液相中组分j的克分子比
y_i	气相中组分j的克分子比
y_{ji}	初始条件下气相中组分j的克分子比
y_{jf}	最终条件下气相中组分j的克分子比
z	气体压缩因数($z = pV/nRT$)
z_c	临界点下气体压缩因数
z_j	混合物中组分j的克分子比
Z_{sg}	标准条件下气体压缩因数

希腊文

β	热膨胀的等压系数
γ	比重
γ_g	气体比重
γ_o	原油比重
γ_{sto}	储罐油比重
γ_w	水比重
μ	粘度(动力粘度)
μ_g	气体粘度
μ_{g1}	一个大气压下的气体粘度
μ_o	原油粘度
μ_w	水粘度
ν	运动粘度
ρ	密度
ρ_c	临界点下密度
ρ_g	气体密度
ρ_o	原油密度
ρ_{ob}	泡点条件下原油密度
ρ_{oj}	组分j的密度
ρ_{vo}	原油的假液体密度

ρ_{pr}	假对比密度
ρ_r	对比密度
ρ_{OR}	储层条件下的原油粘度
ρ_{STO}	储罐油密度
ρ_w	水密度
脚码	
a	表观
actual	实际
air	空气
A	氩
A, B, C	不同化合物, 混合物的各组分
b	泡点或饱和
c	临界
$C_1 C_2 C_3$	甲烷, 乙烷, 丙烷...
d	露点
f	最终值或最终条件
g	气体
gc	气体凝析油
gl	一个大气压下的气体
i	初始值或初始条件
ideal	理想
j	组分j
L	液体
M	摩尔(一般用于体积 V_M)
N_2	氮
o	原油或液体
ob	泡点条件下的原油(一般用于地层体积系数, Bob)
O_2	氧
p	压力
pc	假临界
po	假液体
pr	假对比
r	对比

R	储层(根据需要,仅用来区分同一式中的量,如 ρ_{OR} 和 ρ_{STO})
s	溶解
sc	标准条件
sp	分离器条件
ST	储罐条件
STO	储罐油(根据需要,仅用来区分同一式中的量,如 ρ_{OR} 和 ρ_{STO})
t	总,总系统
T	温度
w	水
1.2.3	主要用来表明不同的温度压力条件,其次也用作所处位置的下标,还用来表明分离的级数

缩写字

°API	度(美国石油协会)
°C	摄氏度
°F	华氏度
°K	绝对温度(开氏)
ln	自然对数
log	普通对数
max	最大
ppm	百万分之几
°R	绝对温度(兰氏)

目 录

第一章 天然石油流体的组分	1
一、有机化学	3
1. 结构理论	4
2. 化学键	4
3. 离子键	5
4. 共价键	5
5. 有机化合物的键	6
6. 有机化学物质的命名	9
7. 碳氢化合物	10
8. 系	10
二、链烷	11
1. 链烷的命名	13
2. 链烷的物理化学性质	15
三、链烯	18
1. 链烯的命名	18
2. 链烯的物理化学性质	20
四、二烯属烃、三烯属烃和四烯属烃	21
五、链炔烃	21
1. 链炔的命名	22
2. 链炔的物理化学性质	23
六、脂族环烃	23
1. 环烷	23
2. 环烷的命名	24
3. 环烷的物理化学性质	25
4. 环烯和环二烯	26
七、芳香族化合物	28

1. 苯	28
2. 苯键	29
3. 苯衍生物的命名	30
4. 芳香烃的物理化学性质	31
八、其它有机化合物	33
九、硫化化合物	35
1. 硫化氢	35
2. 硫醇	35
3. 烷基硫	35
习题	36
第二章 态的变化	38
一、纯物质	39
1. 纯物质的相态图	40
2. 蒸气压力曲线	40
3. 临界点	40
4. 三相点	40
5. 升华-压力曲线	40
6. 熔点曲线	41
7. 相态图的应用	41
8. 纯物质的蒸气压力	43
9. 克劳斯-克拉皮让方程	43
10. 纯物质的压力-体积图	48
11. 泡点和露点	49
12. 饱和包络线	50
13. 纯物质的密度-温度图	50
二、双组分系统	51
1. 双组分混合物的蒸气压力	53
2. 泡点和露点	53
3. 双组分系统的临界点	53
4. 临界凝析温度和临界凝析压力	56
5. 反转凝析	56
6. 双组分系统的压力-体积图	57
三、多组分混合物	58

1. 低收缩原油	58
2. 高收缩原油	59
3. 反转凝析气	60
4. 湿气	60
5. 干气	61
习题	62
参考资料	66
第三章 气体的性质	67
一、理想气体	67
1. 波义耳定律	67
2. 查理定律	68
3. 阿弗加德罗定律	68
4. 理想气体的状态方程	68
5. 理想气体的密度	71
6. 气体的动力学理论	72
二、理想气体的混合物	75
1. 道尔顿分压定律	75
2. 阿马格特定律	76
3. 气体混合物的表现分子量	76
4. 气体的比重	78
三、实际气体的状态特征	79
1. 压缩状态方程	79
2. 对应态定律	80
3. 气体混合物的压缩状态方程	85
四、实际气体的其它状态方程	90
1. 凡·德·瓦尔状态方程	90
2. 贝蒂-布里奇曼状态方程	91
3. 本尼迪克特-韦布-鲁宾状态方程	95
五、气体的等温压缩系数	96
1. 理想气体的等温压缩系数	98
2. 实际气体的等温压缩系数	98
六、气体的地层体积系数	102
七、气体的粘度系数	105

1. 纯烃气的粘度	105
2. 气体混合物的粘度	106
习题	114
参考资料	119
第四章 储层液的性质	121
一、液体的比重	121
二、液体的密度	122
1. 应用理想溶液原理计算液体密度	122
2. 应用理想溶液原理计算储层液在饱和压力下的密度	124
3. 已知饱和液体的组成, 迭代法	124
4. 已知饱和液体的组成, 斯坦丁和卡兹(Standing and Katz) 相关法	129
5. 已知气体溶解度、气体组成及液体比重	131
6. 已知气体溶解度、气体比重及液体比重	133
7. 压力高于泡点的储层液密度计算	135
三、液体的等温压缩系数	136
1. 计算液体等温压缩系数的特鲁伯法	141
2. 修正后的特鲁伯法	141
四、液态烃混合物的假临界性质	143
1. 估算液态烃假临界温度的特鲁伯法	143
2. 计算假临界温度及假临界压力的特鲁伯近似法	145
3. 凝析油中己烷及其它重质组分的假临界特性	146
五、液体的等压热膨胀系数	146
六、原油的地层体积系数	147
1. 利用理想溶液原理计算饱和压力下的原油地层体积系数	149
2. 使用斯坦丁(Standing)相关法计算饱和压力下的原油地层体积 系数	150
3. 用卡兹法计算饱和压力下的原油地层体积系数	152
4. 估算低于泡点压力下的原油地层体积系数	154
5. 计算高于泡点压力下的原油地层体积系数	155
七、总地层体积系数	156
八、凝析油的地层体积系数	159
1. 用复合法计算凝析油的地层体积系数	159

2. 用油井气体比重相关法计算凝析油的地层体积系数	163
3. 根据斯坦丁总体积系数相关法计算凝析油的地层体积系数	166
4. 用塞奇(Sage)及奥尔兹(Olds)相关法计算凝析油的地层体积系数	666
九、液体的粘度系数	167
1. 泡点压力和低于泡点压力下的原油粘度计算	169
2. 高于泡点压力下的粘度计算	170
习题	174
参考资料	177
第五章 气液平衡	178
一、理想溶液	178
1. 拉乌耳定律	178
2. 道尔顿定律	179
3. 理想溶液平衡态下气、液相的组成及数量	179
4. 理想溶液的泡点压力计算	182
5. 理想气体溶液的露点压力计算	182
二、非理想溶液	183
1. 实际溶液中气、液两相在平衡态下的组成及数量	184
2. 实际液体泡点压力的计算	187
3. 组成未知的液态烃泡点压力的测定	189
4. 拉萨特(Lasater)泡点压力相关法	189
5. 斯坦丁泡点压力相关法	192
6. 实际气体的露点压力计算	192
7. 平衡比相关法	192
8. 收敛压力	193
9. 平衡比取值误差的影响	201
三、闪蒸	203
四、微差蒸发	212
1. 微差蒸发计算方法, 已知最终压力	215
2. 微差蒸发计算方法, 已知欲蒸发逸出的分子数	217
五、气体溶解度	218
1. 用比尔(Beal)相关法估算气体溶解度	220
2. 用拉萨特或斯坦丁泡点压力相关法估算气体溶解度	220

习题	222
参考资料	229
第六章 油田水的性质	230
一、油田水的组成	230
二、油田水的密度	234
三、水的等温压缩系数	235
四、油田水的地层体积系数	236
五、油田水的粘度系数	240
六、天然气在水中的溶解度	241
七、水在天然气中的溶解度	243
八、水在液态烃中的溶解度	245
九、气体水合物	245
1. 气体水合物的形成条件	247
2. 天然气压力降低而形成水合物	254
习题	257
参考资料	259
附录	261

第一章 天然石油流体的组分

石油工作者常见的天然石油矿是由有机化学物组成的。由小分子组成的化学混合物在常温常压下呈气态,称作“天然气”。表1-1列出了典型的天然气组分。

较大分子组成的混合物在常温常压下呈液态,称作石油或原油。典型原油中含有几百种不同的化合物,实际上不可能把它分离成各种单一的化学物质。因此通常按化合物的沸点范围将石油分成若干种馏分。表1-2列出了典型的石油馏分。

根据较大分子隶属于芳香族化学物还是石蜡族化学物,原油可分为芳香基或石蜡基。从主要成分为石蜡族分子的原油气-

表1-1 典型天然气的组分

天 然 气		
烃	甲烷	70~98%
	乙烷	1~10%
	丙烷	痕量~5%
	丁烷	痕量~2%
	戊烷	痕量~1%
	己烷	痕量~0.5%
	庚烷+	痕量~(通常没有)
非烃	氮	痕量~15%
	二氧化碳 ^①	痕量~1%
	硫化氢 ^①	偶含痕量
	氫	最多达5%,通常痕量或没有

①有时发现天然气绝大部分成分为二氧化碳或硫化氢

续表

油 井 伴 生 气		
烃	甲烷	50~92%
	乙烷	5~15%
	丙烷	2~14%
	丁烷	1~10%
	戊烷	痕量~5%
	己烷	痕量~3%
	庚烷 +	无~1.5%
非烃	氮	通常痕量~最多达10%
	二氧化碳	痕量~4%
	硫化氢	无~痕量~6%
	氢	无

表1-2 典型原油馏分

原油馏分	沸点°F (熔点)	化学组成	用 途
烃类气体		C ₁ ~C ₄	天然气, 瓶装燃料气
石油醚	至160	C ₅ ~C ₆	溶剂, 涂料稀释剂, 清洁剂
汽油	160~400	C ₇ ~C ₈	汽车燃料溶剂
煤油	400~575	C ₁₀ ~C ₁₆	灯油, 柴油机燃油, 内燃发动机燃料, 裂化原料
轻柴油	575~850	C ₁₆ ~C ₃₀	润滑油, 药用油, 变压器油, 矿物油, 裂化原料
重柴油	850~1, 100	C ₃₀ ~C ₅₀	润滑油, 船用燃料, 筑路油
渣油(残渣)	1200 + (200 +)	C ₅₀ +	焦油, 柏油, 沥青, 石蜡, 树脂, 木沥青, 矿物油, 屋面料, 木材防腐剂, 筑路油焦炭, 铺路沥青

油馏分中可提取优质的润滑油，从渣油中可提取石蜡。若较大分子为芳香族，则原油的重馏分可用作硬沥青、屋面料、铺路沥青，以及其它类似用途。

采自不同油藏的原油特性差异甚大。有的原油呈黑色，重质，而且粘稠类似煤焦油；有的呈褐色或非常清澈，粘度、比重都很小。据分析，所有原油的元素含量基本不超出表 1-3 所示的范围。由于这些有机化学物主要为 CH_2 团所组成的各种不同结构，所以一致性是不足为奇的。

表1-3 典型原油元素分析

元 素	重量百分数
碳	84~87
氢	11~14
硫	0.06~2.0
氮	0.1~2.0
氧	0.1~2.0

石油工作者的职业工作对象为有机化学物，所以对于组成混合物的有机化合物的各种类型、它们的名称、它们的相互关系、挥发度、活化度，以及其它性质有所了解是很重要的。因此，须从评价组成地层流体的化合物的化学性质入手来研究这类流体的性质。

一、有机化学

有机化学是一门研究碳化合物的化学。所谓有机，是过去的错误用词，那时曾把化合物按其来源分为两类，即无机和有机。无机化合物源自矿物，而有机化合物则来自有机生物所产生的物质。

自从发现有机化合物能通过实验获得以来，上述概念便失去意义。由于碳化合物化学在日常生活中比其它元素的化学更