

# 天然气 预处理 和加工

第三卷

## 先进技术及应用

[美] R.N.马道克斯 J.H.埃巴

GAS CONDITIONING  
AND  
PROCESSING

Volume 3

ADVANCED TECHNIQUES  
AND APPLICATIONS  
ROBERT N. MADDOX  
JOHN H. ERBAR

石油工业出版社

# 天然气预处理和加工

第三卷

先进技术及应用

[美] R.N.马道克斯 J.H.埃巴  
蔡尔范 黄俊英 叶雅文 译

石油工业出版社



B 728.44

## 内 容 提 要

本书为《天然气预处理和加工》第三卷。本卷内容主要介绍了天然气加工和预处理方面的新技术，特别是在研究和加工天然气过程中，对烃类系统的相特性、热力学性质的预测方法，连续蒸馏的原理以及一些塔的原理、设计等都做了详细的介绍。同时，选择了专门的技术资料，提供了为分析计算机预测结果的准则。

本书适于从事化工、天然气研究的科技人员及有关大专院校的师生学习参考。

GAS CONDITIONING AND PROCESSING  
VOLUME 3  
ROBERT N. MADDOX AND JOHN H. ERBAR  
Campbell Petroleum Series 1982

## 天然气预处理和加工

第 三 卷

先进技术及应用

(美) R.N.马道克斯 J.H.埃巴  
赛尔范 黄俊英 叶雅文 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 18<sup>3</sup>/<sub>4</sub>印张 459千字 印1—1,590

1990年12月北京第1版 1990年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0231-0/TE·227

定价：5.10元

# 目 录

第一章 绪论 .....	( 1 )
参考文献 .....	( 3 )
第二章 烃类系统的相特性 .....	( 4 )
一、纯组分的相特性 .....	( 4 )
二、多组分的相特性 .....	( 6 )
三、相特性对实际应用 .....	( 10 )
四 小结 .....	( 11 )
参考文献 .....	( 11 )
第三章 热力学性质预测方法 .....	( 12 )
一、热力学性质的基本方程 .....	( 12 )
二、状态方程求解方法 .....	( 17 )
三、热力学性质预测方法的评价 .....	( 21 )
四、热力学性质预测方法的选择 .....	( 24 )
五、小结 .....	( 24 )
符号说明 .....	( 24 )
参考文献 .....	( 25 )
第四章 平衡计算 .....	( 26 )
一、引言 .....	( 26 )
二、基本平衡计算 .....	( 26 )
三、平衡计算失败 .....	( 34 )
第五章 己烷以上(C <sub>6</sub> +)馏分性质的预测 .....	( 43 )
一、C <sub>6</sub> + 馏分的有效性 .....	( 47 )
二、小结 .....	( 60 )
参考文献 .....	( 60 )
第六章 先进的C <sub>6</sub> + 表征法 .....	( 61 )
一、引言 .....	( 61 )
二、资料要求 .....	( 62 )
三、临界性质的估算方法 .....	( 62 )
四、方法的验证 .....	( 64 )
五、推荐方法对工艺计算的影响 .....	( 69 )
六、小结 .....	( 71 )
符号说明 .....	( 71 )
参考文献 .....	( 71 )
第七章 两组分连续蒸馏的原理 .....	( 73 )
一、引言 .....	( 73 )

二、最小塔盘数.....	( 82 )
三、最小回流.....	( 83 )
四、复杂的分馏塔.....	( 84 )
五、小结.....	( 86 )
参考文献.....	( 86 )
<b>第八章 多组分连续蒸馏</b> .....	( 87 )
一、最小塔盘数.....	( 88 )
二、最小回流.....	( 92 )
三、操作回流和塔盘数.....	( 100 )
四、进料板的位置.....	( 102 )
五、进料汽化的影响.....	( 103 )
六、小结.....	( 106 )
参考文献.....	( 106 )
<b>第九章 逐板计算</b> .....	( 108 )
一、路易斯-马锡进法.....	( 108 )
二、蒂勒-格迪斯法.....	( 113 )
三、现代逐板计算方法.....	( 117 )
四、热力学性质的预测方法和 $C_p$ 特性.....	( 118 )
五、蒸馏塔模拟推荐的方法.....	( 120 )
六、“判断”逐板输出.....	( 121 )
参考文献.....	( 123 )
<b>第十章 吸收</b> .....	( 124 )
一、引言.....	( 124 )
二、图解计算.....	( 124 )
三、吸收塔如何操作.....	( 125 )
四、多组分吸收.....	( 126 )
五、解吸.....	( 132 )
六、多组分的解吸.....	( 133 )
七、逐板计算.....	( 136 )
八、复杂吸收塔的计算.....	( 141 )
参考文献.....	( 147 )
<b>第十一章 塔的尺寸计算</b> .....	( 149 )
一、塔板(塔盘)塔.....	( 149 )
二、液体的水力效应.....	( 161 )
参考文献.....	( 164 )
<b>第十二章 压缩</b> .....	( 165 )
一、预测方法.....	( 165 )
二、莫里尔图(焓焓图)法.....	( 166 )
三、气体定律法.....	( 167 )
四、真多变法.....	( 170 )
五、根据操作数据确定效率.....	( 171 )
六、方法比较.....	( 173 )

七、效率比较	(179)
八、校正预测气体需用的功率	(180)
九、最佳锁回压力	(180)
十、热力学性质预测对压缩机评价的影响	(182)
十一、离心压缩机的特性参数	(185)
十二、二级效率计算	(186)
十三、小结	(189)
参考文献	(191)
<b>第十三章 膨胀过程</b>	(192)
一、绝热膨胀过程	(192)
二、深冷膨胀机工艺过程	(197)
参考文献	(216)
<b>第十四章 天然气-水系统</b>	(218)
一、天然气-水系统的相特性	(218)
二、预测水含量的方法	(222)
三、甲醇-烃-水系统相分布状态	(231)
四、小结	(239)
参考文献	(239)
<b>第十五章 脱水作用</b>	(241)
一、三甘醇的脱水作用	(241)
二、分子筛固体干燥剂的水化作用	(249)
三、脱水作用的计算机程序	(259)
四、甘醇的脱水作用	(259)
五、固体干燥剂的脱水作用	(260)
参考文献	(262)
<b>第十六章 流体流动</b>	(263)
一、可压缩流体流动	(266)
二、喷流	(271)
三、两相流	(273)
四、地下管线的热传导	(284)
五、两相流中的液体流动特性	(293)
六、小结	(293)
参考文献	(293)

# 第一章 绪 论

当前天然气加工工业中大多数设计和评价计算都是用计算机完成的。对于较简单的、甚至大多数常规计算都已编好了计算机程序。这样可以避免运算错误，并以计算机令人眩目的速度得出高质量的结果。遗憾的是，很多工程检验人员认为，这样所得到的是质量较低的，而不是较高的结果。

这个论调可以通过对某些工程技术人员利用计算机的方法进行分析而得到部分解释。他们对要求解的问题只有一个模糊的想法，企图站在旁边等待，计算机就应能编写程序、能准备输入数据、能利用人类所积累的解决该问题的有关知识，得出完整无疑的答案，并最后写出报告。当然，所有这些工作都是在无人照管下瞬时完成的。可惜，计算机还没有发展到这种程度。虽然上述说法可能多少有些夸大，但它指出了两个越来越严重的问题——工程师越来越少地亲自参与他想解决的问题，而对计算机的要求却很高，已超过了它的可能。减少对问题的亲自参与会带来很多后果，其中主要的两个后果是：

1. 工程师不再发展称为工程判断、背景情况或生产经验等的所谓“第六感觉”；
2. 当分析计算结果或分析解题所需数据时，工程师就不那么严格要求了。

人们有个弱点，总是期望计算机根据不充分的资料而能得出高质量的结果。人们都想能不付出代价而得到某些东西。应该通过一条国际法，要求计算机输出每一页前面打印上：“输入无用数据，只能得到垃圾”也许这个微妙的警句会提醒工程师们来探究计算机所有的计算结果，能花更多时间来获得有关该问题的更多更好的数据，并以批判的态度分析计算机的任何一个计算结果。

换句话说，一个人如果对于要分析的某一特定运算系统所包含的物理原理有基本了解，并理解其力学和物理的限制条件，才有可能有效地利用计算机。计算机可以算出用户的课题，然而却不能解释输出结果的意义。应当记住，计算机只能给出纯理论的运算结果，而在实际工作中，计算机得到的大量数据，只不过是作为最后决定所需输入数据的一部分。

这里所阐述的问题没有简单的解决办法。通过改进正规教育、在职培训以及职业教育规划等可以部分地得到解决。然而，解决问题主要取决于工程师个人——其作用是通过自学扩大他的技术能力，发挥其对任何计算结果能提出问题的能力，并深入钻研此问题，从而发挥他本人的专业才能。

能帮助工程师不借助于大型计算机解决问题的一个办法就是发展微型计算机。这种计算机是小型台式装置，但对解决工程问题却有惊人的能力<sup>[1-12]</sup>。微型计算机，在改进工程计算中和可编程程序的袖珍计算器具有相同功能。将微型计算机放到工程师桌子上，能完成主要的工艺计算。此外，工程师通过键盘输入所进行的工作，使其再次参与了问题的求解。表1-1为MINI-SIM典型的输入程序<sup>[1-22]</sup>。该程序可用于很多计算实例和本书中的一些例題。微型计算机的对话能力似乎提高了工程师参与解决问题的能力。

本卷为“天然气预处理和加工”丛书的第三卷，它是前两卷材料的逻辑延伸。前两卷

表 1-1 MINI'SIM闪蒸程序所要求的典型输入

```
.MNT O
.RUN MINI'SIM
ENTER DRIVE O
ENTER TITLE? DEMO PROBLEM
ANY HYPO'S?
ENTER CALC OPTION? 5
ENTER PRINT OPTION? 1
ENTER FEED OPTION? 1
ENTER UNIT OPTION? 1
ENTER H/S OPTION?
ENTER SPEC TEMP? - 60
ENTER SPEC PRES? 200
ENTER ESTM L/F?
ENTER COMP ID AND FEED RATE FOR
    COMP ( 1)?2,200
    COMP ( 2)?3,50
    COMP ( 3)?4,30
    COMP ( 4)?5,10
    COMP ( 5)?6,5
    COMP ( 6)?7,2
    COMP ( 7)?8,1
    COMP ( 8)?
CPC MINI'SIM
PAGE 1
DEMO PROBLEM
FLASH - VARY L/F, FIX T1, P1
温度 = [- 60.00°F] - 51.1°C; = (200.00PSIA)1.88MPa
```

组 分 名 称	进 料 MOL	液 体 MOL分数	液 体 MOL	液 体 MOL分数	蒸 汽 MOL	蒸 汽 MOL分数	K 值
CH <sub>4</sub>	200.00	0.6711	11.11	0.1498	188.89	0.8440	5.53614
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	50.00	0.1678	21.13	0.2847	28.87	0.1290	0.46302
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	30.00	0.1007	24.70	0.3328	5.30	0.0237	0.07114
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	10.00	0.0336	9.45	0.1274	0.55	0.0024	0.01915
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	5.00	0.0168	4.84	0.0652	0.16	0.0007	0.01130
iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2.00	0.0067	1.98	0.0267	0.02	0.0001	0.00300
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1.00	0.0034	0.99	0.0134	0.01	0.0000	0.00188
小 计	298.00	1.0000	74.21	1.0000	223.79	1.0000	
焓MJ	452	1.517	-255.5	-3.444	707.5	3.162	
H(KBTU)	[428.42]	[1.438]	[-242.22]	[-3.264]	[670.64]	[2.997]	
熵MJ/K							
S <sub>1</sub> (KBTU/R)	[11.76]	[0.039]	[3.00]	[0.040]	[8.76]	[0.039]	
分子 焓	23.987		40.007		18.675		
密度(LB/FT <sup>3</sup> )			[30.724]		[.960]		
KG/M <sup>3</sup>			492.4		15.4		

注: °F = 1.80°C + 32; 1psia = 6.895 × 10<sup>-2</sup>Pa; 1KBTU = 1.055MJ; 1KBTU/R = 1.9MJ/K;  
1lb/ft<sup>3</sup> = 16.028kg/m<sup>3</sup>.



书提供了石油工业生产或加工部门所使用的最通用设备和装置的基本原理和应用。所提出的大部分计算对手工计算都是有用的，并能得到可靠的结果。不论根据正常可得到数据的数量或质量，或根据计算特性而言，某些答案与计算机得到的结果同样好。事实上，为了方便，很多方程都已编写了程序。

在其它情况下，只能有效地应用计算机。例如非稳态和两相流，某些分馏和吸收过程，液体通过节流器和膨胀器时的膨胀，PVT以及闪蒸计算等等，它们包括反复计算或凑凑法计算。这些计算用手算在时间上是不合适的。

为了有利于培训，本卷中对前两卷的资料作了某些扼要的重述。然而，为有效地应用本卷，读者必须熟悉前两卷的内容。为表明此情况，使用本卷的课程称之为“现代天然气预处理和加工”。

本卷的目的在于帮助工程师研究加工过程，选择专门的技术资料（编写本书时最适用的），同时提供一些为分析计算机预测结果用的某些准则。专门技术资料的质量会随时间降低，因为新知识可能逐渐地取代这里所给的资料。我们相信，分析结果用的这些准则在近年内是适当的。它们已被作者们和气体加工工业中很多同行用了多年。这里将给出编制程序的某些设想，以及计算机典型程序的逻辑框图。我们不教怎样编制程序，我们要讨论的程序是现成的，并在石油工业中已被作者及其他人士广泛地应用着。

这里提出的方法不是处方，它们是一些原则，还必须靠使用者良好的判断与才智来补充。你所用的程序可以与这里提供的不同，只要你认识到所用程序的局限性，并且对它在过去使用中的情况有所了解，以及对其结果所用的解释方法能体现出影响系统性能的是一些非数学因素，那么，程序的不同是无关紧要的。在最后分析中，我们的目标是改善人机对话。

### 参 考 文 献

- (1-1) Moshfeghian, M., J.H. Erbar and R. N. Maddox, "Applications of Mini-Computers in Chemical Engineering," Proceedings of First International Conference on Micro and Mini Computers, Houston, November 1979.
- (1-2) Erbar, J.H., MINI\*SIM Documentation, Chemical Process Consultants, Inc., Stillwater, June, 1979.
- (1-3) Campbell, John M., "Gas Conditioning and Processing," Vol. I, Campbell Petroleum Series, Norman, Oklahoma (1976).

(蔡尔范译 黄俊英校)

## 第二章 烃类系统的相特性

烃类系统的压力-体积-温度（相态）特性对于石油和天然气工业所属的很多部门都是一个复杂而困难的课题。 $p$ - $V$ - $T$ 关系通常用图表示，并表明各种温度与压力组合下的液量和气量，因此称为相图。相图涉及到油气藏的动态预测、对油气藏采出气体和/或液体的评价及其对今后油气藏生产的影响。设计师必须选择工艺条件，该条件应与加工过程中在烃类相特性基础上好的工程实践相一致。操作工程师可以利用所加工的物流相图，了解其造成工艺设备性能差的原因。可以通过恰当地利用加工流体的相图来改进油气分离设备及管线的设计和作。相图的适当解释对气体加工过程的各个方面都是关键。

烃类系统的相图可以由实验方法测定，也可以用后面要讨论的热力学性质预测方法之一来预测，但预测决不能代替相图的实验测定。在某些情况下，预测的相图可能与实验测定的相图同样精确，甚至更为精确。但对于天然存在的系统，这种情况是罕见的。然而，在温度和/或压力较窄的范围内，对一给定系统的实验数据，可以通过有效地利用热力学性质预测方法和对系统“适当”描述相结合，将其延伸到更宽的温度-压力范围。这些方法将在以后几章内叙述。

虽然，通常希望能精确地描述烃类系统的相图，但对相图能作定性描述往往就足够了。本章的任务是评述烃类相特性的基本原理，并给出一些应用相图解决设计/操作问题的实例。这些例子决不可能包括所有的应用，但给出了利用相图的基本准则。希望读者在日常工程实践中去发现相图更多的应用。

为了便于读者阅读，本章与第一卷第四章的形式相似。

### 一、纯组分的相特性

在天然气/石油工业实践中，纯组分是很少碰到的（将丙烷、氨或某些其它纯组分用于冷冻系统可能是个例外）。由于纯组分相特性是多组分相特性的极端情况，因此可用来引出相特性的研究。

纯组分的压力-温度图见图2-1。

HF, HD和HC线分别表示不同的相分界线，除了相分界外，这些线还表示邻近相处于平衡或饱和状态下的温度-压力条件。HC线表示由三相点（H点）到临界点（C点）饱和液体的蒸气压曲线，HF为饱和固体的蒸气压曲线。在FHC线上任意一点处，可以认为在恒压容器内有一定量的流体。改变系统的能量值而温度不变，将会引起饱和蒸气和液体或饱和蒸气和固体相对量改变。如果从系统中除去能量，蒸气将“冷凝”成液体或固体。增加能量会使蒸气量增加。如果从系统中除去或输入的能量值大到足以完全蒸发或冷凝，则系统会进入过热蒸气区或过冷液体区。最终温度将比饱和点温度高（增加能量）或低（除去能量）。

如果人们要恰当地理解相图所表示的烃类特性，则对临界点的理解是极其重要的。对于纯组分，临界温度可定义为高于此点液体就不存在的温度。临界压力是在临界温度下纯组分所产生的蒸气压力。在临界点（或在与其很接近的范围内）“气”和“液”相具有相同的性质——密度、摩尔折射、焓等等。人们不可能用物性的明显差别来区分这两相。在临界点附近烃类的光学性质有惊人的变化：可观察到荧光；物质变为乳白色；（象激光这样的）一束光线散射。这些性质可用来确定纯组分的临界点。然而，对于大多数高分子量烃类临界点可以（用若干方法中的一种）计算，而不用测定。因为高分子量烃类在比临界点低得多的温度下就会分解（热解）。

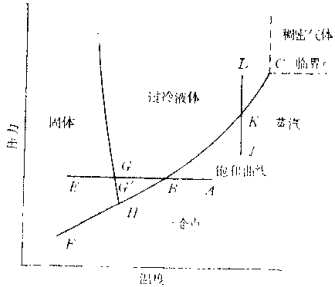


图 2-1 典型纯组分的压力-温度图

因为高分子量烃类在比临界点低得多的温度下就会分解（热解）。

现在研究一下，由E点向A点移动的效应（见图2-1），即在恒压下由 $T_E$ 向 $T_A$ 移动。E点的位置可以这样确定，即在 $T_E$ 情况下物质为固态，当温度增加时，与固-液平衡线相交。在固-液平衡线和E-A线交点处（G点）的压力-温度条件下，物体将变为液体。如果温度进一步沿着EA线增加，则达到气-液平衡曲线（B点）。在B点的温度-压力条件下，液体会变为气态。进一步增加温度将产生过热蒸气。

如果考虑恒温过程（如J-K-L线所定义的），则系统一开始就处于过热蒸气区。

压力增加到 $P_K$ ，蒸气开始冷凝，这点为露点。当除去能量以保持恒温时，就会形成越来越多的液体。在两相期间饱和液体和饱和蒸气两者都存在。最后，所有的蒸气都将冷凝，只有饱和液体存在。压力进一步向 $P_L$ 增加，则将产生过冷液体。

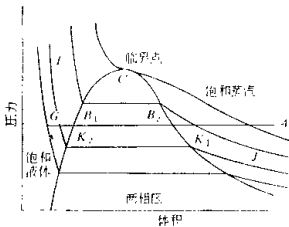


图 2-2 典型纯组分的压力-体积图

在恒温 and 恒压下变化。相当于A点的体积变化见图2-1。同样，沿着J-K<sub>1</sub>-K<sub>2</sub>-L线移动，在K<sub>1</sub>-K<sub>2</sub>区内产生恒温恒压下相和体积的变化。

在讨论中还没有说明和评价系统能量的转换，将使压力-温度-体积发生变化。这些能量变化的评价方法将在以后讨论。

对于纯组分系统，HC线为系统的泡点线和露点线（以及气-液饱和及蒸气压力曲线）。对于纯组分，这四项是同义的。

图2-2为另一种形式的相图，压力-体积图。这种相图的特点是未表明固态区，但用等温线表示。

在该图上表明前面已描述过的两条轨迹G-B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>-A和J-K<sub>1</sub>-K<sub>2</sub>-L以说明其穿过气-液平衡曲线时的影响。当温度增加向 $T_A$ 时，在B<sub>1</sub>点将遇到饱和液体曲线。

从B<sub>1</sub>点到B<sub>2</sub>点，系统的体积和相态将

## 二、多组分的相特性

描述多组分相特性比描述单组分相特性要困难得多。多组分压力-温度图取决于所有的各种分子种类及每种分子的相对浓度。典型的天然气压力-温度图见图2-3。描述多组分相特性常用的术语也见图。

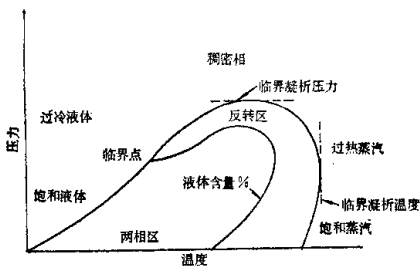


图 2-3 典型天然气混合物的相包络线

请注意图2-1与2-3之间的区别：(a) 对于多组分系统，饱和蒸汽压力-温度曲线与饱和液体压力-温度曲线不重合；露点（即饱和蒸汽）温度不同于（大于）泡点（即饱和液体）温度。在给定压力下，纯组分系统饱和液体和蒸汽温度相同。(b) 多组分混合物在高于临界点时就能存在饱和蒸汽（液体）。该现象表明，至少有一部分混合物在高于临界温度下可能液体（汽化）。这对纯组分系统是不可能的。

混合物的临界凝析压力为露点线所达到的最大压力。数学上，该最大压力可表示为  $(\partial p_{d,s} / \partial T) = 0$ 。临界凝析温度为露点线所达到的最大温度。它可以定义为  $(\partial T_{d,s} / \partial p) = 0$ 。临界凝析压力和临界凝析温度的大小和位置取决于所具有的分子种类及每一种分子的相对浓度。天然气系统的临界凝析温度在  $-140^{\circ}\text{C}$  ( $-230^{\circ}\text{F}$ ) 与  $400^{\circ}\text{C}$  ( $700^{\circ}\text{F}$ ) 之间。临界凝析温度的大小与位置取决于产品质量规格，这在工程计算中是很重要的。例如，如果产品规格需要的最大烃类露点温度小于任一压力下的设计温度，则必须确定临界凝析温度的位置。用预测热力学性质的现代方法可以相当可靠地预测临界凝析温度的位置。除所举的例子外，临界凝析压力和临界凝析温度的位置，对于制定工艺条件和确定平衡计算方法只需要有个定性的了解。

纯组分临界点的经典定义——高于该混度在任何压力下，系统都不可能液化，但对于多组分混合物显然不是这样。混合物的临界点可定义为气相露点和液相泡点相等时的温度和压力。（可以认为是温度-压力的结合，高于该温度-压力下的所有混合物都不可能液化）。临界性质应考虑到其光学的，热力学的，组分的和输送的特性。实验测定混合物的临界点很困难。然而，目前可以用热力学性质的预测方法来预测近似的临界点 ( $\pm 15^{\circ}\text{F}$ )  $10^{\circ}\text{C}$ ;  $\pm [30\text{psia}]200\text{kPa}$ 。

混合物的实际临界点，不能用凯 (Kay) 的摩尔分数平均 (拟临界) 值的规则来预测：

$$T'_c = \sum y_i T_{c,i} \quad (2-1)$$

$$P'_c = \sum y_i P_{c,i} \quad (2-2)$$

用这些方程预测的临界温度和压力值并不是实际的临界点。事实上，用方程2-1与2-2所预测的临界点从任何方面都与混合物的实际临界点无关。用方程式2-1和2-2预测的临界温度和临界压力是有价值的，它们可以很方便地从综合相关关系确定所选择的热力学性质。当用热力学性质相关关系预测实际临界点时，不能与热力学综合相关关系一起使用。因为这些相关关系大多数是建立在凯准则所预测的临界温度和临界压力的基础上。

凯准则是许多所谓“组合准则”中的一个，用来组合混合物中每种分子的性质，以求出该混合物的某些综合特性。得到的值称为拟临界值，在本书中用右上角的撇号“'”表示，以表明它不是实际临界值。应记住“拟”字的意思是“假的”。

图2-4为方程2-1计算的拟临界温度值与实验测定的实际临界值的比较<sup>[2-1]</sup>。其差别似

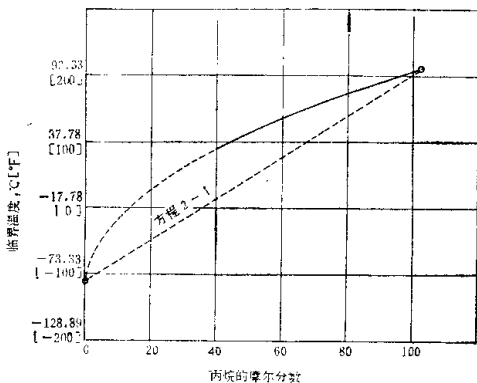


图 2-4 甲烷-丙烷两组分的组成—临界温度图

乎并不明显，特别是当在绝对温度基础上进行比较时，图2-5为临界压力与方程2-2比较。组分对临界压力的影响很明显，并清楚地表明方程2-2不能很好地用来预测混合物的实际临界压力。通常，在两组分混合物中，组分的沸点差别越大则用方程式2-1和2-2所预测的拟临界值与混合物的实际临界值之间的差别就越明显。

确定混合物实际临界点的唯一理由是为了更好地选择处理条件。如果两相的密度相等——不能利用重力效应，可以想象要分离气液相是很困难的。在一些高温200°C(400°F)高压3000kPa(400psia)的蒸馏塔中，可能接近于实际临界点。如果在塔中确实出现实际临界点，由于气相与液相的密度相同，则该塔就不能正常运行。因此，了解混合物的实际临界点对分析运行设备和选择设计条件很重要。作者曾碰到过一些加工条件非常接近临界点

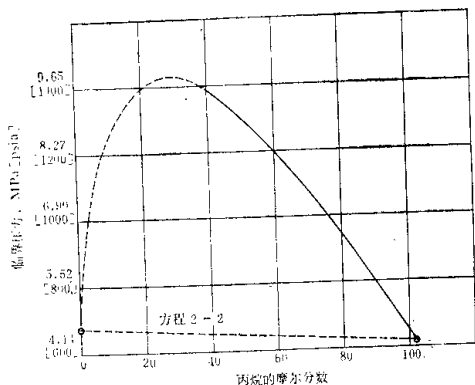


图 2-5 甲烷-丙烷两组分的组成-临界压力图

或就在多组分的临界点上的情况。这时，拟临界条件会导致得出完全错误的结论。

应注意到，图2-3临界点以上为稠密相区。在该区内，混合物具有气体的表现性质，而且有一些介于气-液之间的物理性质。如果增加液体的压力（在恒温下），只要一进入稠密相区就没有明显的相态变化，液体开始失去其通常的表现性质，变得看不见了（象气体），这说明其分子是重新排列了。因此，用一般液体和气体的相关关系就不准确。

可以观察到，混合物的浓度变化和各种分子类型对压力-温度相态包络线形状有明显的影晌。图2-6表示典型的加工过程和油气藏流体的某些相态包络线。应认识到，压力-温度相态包络线只是能得到的压力-温度相态包络线范围的典型形状。组分或分子种类微小的变化都能显著地改变图2-6中任何一个示意图的形状。这些示意图并不用来估计任何一个特定混合物的压力-温度相态包络线的形状。对于特定混合物的压力-温度相态包络线，可以用预测热力学性质的可靠方法和高质量的实验数据仔细分析来精确绘制。

压力-温度相态包络线上的临界点位置是分子种类和各类分子相对浓度的函数。图2-7表示压力-温度包络线上临界点位置的可能范围。临界点的理论可能范围从A点到D点。天然混合物的实际可能范围从A到C点。天然气相对贫气藏系统（甲烷的摩尔分数大于80%）和典型的天然气加工过程，临界点位于A与B点之间。当气藏流体较富时（即含有较多的丙烷、丁烷、戊烷及凝析油或原油），临界点将由A点向B点或C点移动。C点可能代表大多数原油油藏流体的临界点。

气液相特性中最难理解的一个现象是反凝析和/或反汽化。“反”的意思就是逆转，或为正常的反向。多组分系统的反特性化，是由于混合物实际临界点的位置以及求泡点和露点的方法是互相分开的。图2-8为有反转区的典型的多组分系统相态包络线。图2-8上的反转区为压力-温度图的一部分，它落在混合物实际临界点的右边。在该区内压力和温度的变化都不会产生象对纯组分描述的那种类型的相特性。在恒压下增加温度可以产生凝析液

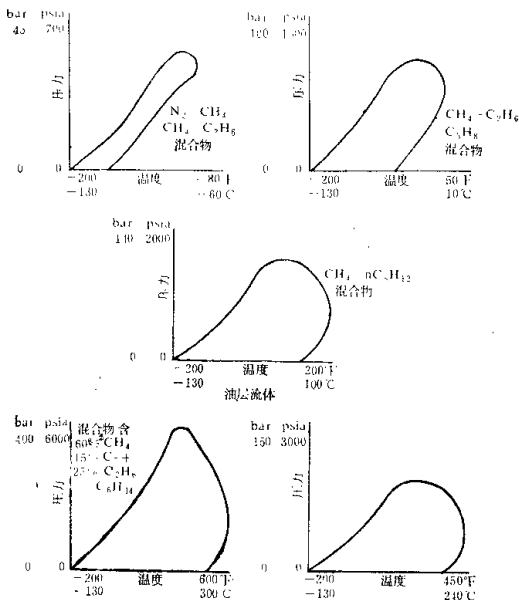


图 2-6 各种混合物的典型压力-温度相态包络线

体。在恒温下提高压力会使液体汽化。而这对纯组分是不可能发生的。

用图2-8中的1—2线来描述恒压过程。在1点处，混合物是过冷的（未饱和的）液体，在A点处液体首先开始汽化（泡点）；在A与G点之间有两相混合物存在；G点处所有的液体汽化。继续向2点变化，蒸汽变成过热蒸汽。

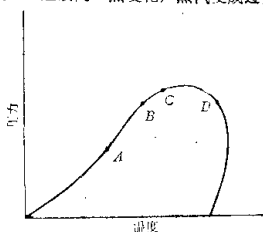


图 2-7 压力-温度相态包络线上可能的临界点位置

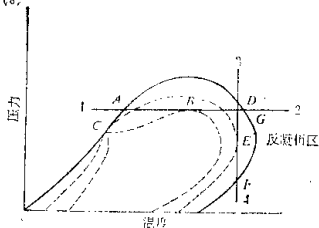


图 2-8 反凝析特性

一般情况下，只要1—2线高于临界点并低于临界凝析压力，A与G点间的特性取决于1—2线位置与质量线之间的关系。这些质量线表示该线上的气液比是常数。图2-8上四条这样的质量线用虚线表示。其闭合线为蒸汽含量更多的露点线。

如果1—2线高于弯曲的质量线（如图所示），可以设想A与G点之间会发生什么变化。当加工过程在A点的右边进行时，此线与第一条质量线相交。当到达B点时，与第二条质量线相交。在两相系统中就会有更多的液体。于是液体将由于加热而产生——这与正常情况相反。当达到B点右边时，生成的液体再汽化。

如果线1—2在相态包络线上很低，则这种反转特性就不会出现。

图2-8上的3—4线表示的是出现反转特性的另一种方式。在3点处，物质最初是处于单相稠密流体区，当压力等温下降时，在D点处达到两相包络线时将开始凝析。压力进一步降低，液量会增加，一直到D与F点之间的某点处为止。然后压力进一步向F点下降后，就会使已生成的液体汽化。压力进一步降到4点，结果形成过热蒸汽。这类特性经常可以在凝析气藏和集气管线中遇到。

用对系统的高质量实验数据和任何一种目前可用的较好的预测热力学性质相关关系方法适当结合，就可以精确地预测反转特性。所需实验数据的类型和数量，以及有效地利用热力学性质相关关系，将在以后几章里讨论和论证。现在先承认这种情况，即预测热力学性质的相关关系与有限的实验数据一起使用，可以预测出较大温度-压力条件范围内的反转/相态包络线特性。其关键是适量的数据和成熟的技术。

### 三、相特性对实际问题的应用

根据作者经验，这里提出两个例题来说明相态包络线在解决天然气加工问题中的应用。

#### 例题2-1

考虑两个不同的计划回注天然气。一个方案是在气源附近设置一个压气站。将气体压缩到某个中间压力再将气体输送到要回注的地方，在那里气体压缩到回注压力。第二个方案只在气源附近设置压气站，将气体压缩到需要回注的压力输送到回注的地方。两个方案的管线相态包络线和压力-温度见图2-9。其每一个方案有些什么优点和不足呢？显然，“方案1”在整条管线长度内是两相流动，而“方案2”则为单相流动。“方案1”用的是低压管线，而“方案2”为小直径管线。两者之中哪一个“更好”一些呢？只有对每个方案作详细的经济与风险结合分析以后才有可能得到最终答案。然而，如果没有相态包络线方面的知识“方案1”只按干管线设计，则管径可能过分为小。

#### 例题2-2

将气体涡轮机所用的燃料气需从油田分离器通过管线输送到涡轮机所在的地方。该管线约长25km[15mile]，分离器操作压力为4.0MPa[580psia]，温度50°C[120°F]，管线和相应控制设备的压降约为2.7MPa[390psia]。用来清除管线污垢、灰尘等的小洗涤剂安装在气体涡轮机的上游。气体涡轮机的保养记录很糟，叶片经常被烧毁。这是什么问题呢？

燃料气体的相图和管线的压力-温度曲线见图2-10。



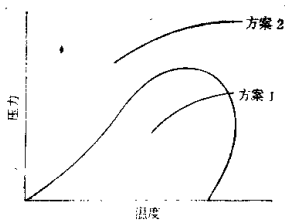


图 2-9 例2-1的相态包络线

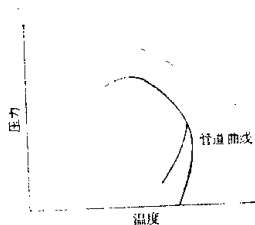


图 2-10 例2-2的相态包络线

显然，在气体涡轮机入口处燃料气体处于两相区。如果燃料气的热值量太高，即如果气体中含有液体，气体涡轮机的叶片就可能烧坏。气体涡轮机必须有能接受进入液体的装置。小洗涤剂必须用更有效的分离器来代替。

#### 四、小 结

要总结这个课题是有风险的。需要花很多时间来讨论天然气系统相特性的细微差别理论和实际应用。这里所提供的资料对整个课题是很肤浅的。然而，我们相信，你对此课题已得到了较好的了解，对有关相特性知识的价值已有足够的认识，并已为进一步讨论打下了基础。

#### 参 考 文 献

- (2-1) Katz, D.L., D. Cornell, R. Kobayashi, F.H. Poettman, J.A. Vary, J.R. Elenbaas and C.F. Weinaug, "Handbook of Natural Gas Engineering", McGraw-Hill, 1959.

(慕尔范 译 黄俊英 校)