

涡轮膨胀机在天然气 处理系统中的应用

〔苏〕A. B. 亚齐克 著



石油工业出版社



涡轮膨胀机 在天然气处理系统中的应用

〔苏〕 A.B.亚齐克 著

杨燕生 邓启明 雷良韦 王启珍 译

袁修干 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对油气田采用的涡轮膨胀机装置的结构、基本理论、计算方法、试验研究以及使用经验作了详细和全面的论述。该书还对使用涡轮膨胀制冷的油气田综合处理的优化设计,在理论上作了分析和探讨。

本书可供从事油气集输专业的有关大专院校师生及工程技术人员使用。

责任编辑:包文德

封面设计:赵国侯

А. В. ЯЗИК
ТУРБОДЕТАНДЕРЫ В СИСТЕМАХ
ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА
МОСКВА < НЕДРА > 1977

*

涡轮膨胀机在天然气处理系统中的应用

[苏] А. В. 亚齐克 著

杨燕生 邓启明 雷良韦 王启珍 译

袁修干 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲 36 号)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 5⁵/₈ 印张 48 千字 印 1—1,200

1988 年 1 月北京第 1 版 1988 年 1 月北京第 1 次印刷

书号: 15037·2835 定价: 1.10 元

科技新书目: 160—183



译者说明

国外从五十年代开始采用涡轮膨胀机制冷新工艺来液化回收天然气和石油伴生气。采用这项新工艺，可以创造很高的经济效益。因此，各国都很重视这项新技术的开发研究和应用。

我国石油开采工业发展很快，随之而来的天然气和石油伴生气的液化回收以及综合处理问题，也得到了相应地重视。

为了借鉴国外经验和进一步提高我国综合处理油田气的工艺水平，我们翻译了本书，供从事研制和使用涡轮膨胀机综合处理油田气的工程技术人员参考。

本书较详细地论述了油气田采用涡轮膨胀制冷装置的理论、涡轮膨胀机工作过程的计算，提供了大量的试验数据和使用经验，并指出了这门新技术在油田综合处理系统中的今后发展方向。这是一本全面介绍天然气涡轮膨胀制冷装置的参考书。

参加本书翻译的同志有：杨燕生（第三章）、王启珍（第二章）、邓启明（序言、第一章、第五章、结束语）、雷良韦（第四章）。邓启明作了全书译稿的文字校对，王启珍对全书译稿作了技术校对。最后，我们请北京航空学院袁修干博士对全书译稿作了审校，在此表示衷心感谢。

译者

一九八四年六月

目 录

序言

第一章 油气田采用制冷方法处理天然气的

热力学基础 (4)

一、 涡轮制冷装置的工质——天然气的基本特性 ... (4)

二、 天然气的状态方程 (8)

三、 天然气的热物理特性 (13)

四、 碳氢化合物在涡轮制冷装置元件中的 冷凝过程 (16)

五、 液相分离和分离器在涡轮制冷装置中 的作用 (21)

第二章 涡轮膨胀机在涡轮制冷装置中的工作过程 (23)

一、 涡轮膨胀机的工作原理 (23)

二、 涡轮膨胀机在气体综合处理装置中的应用 (26)

三、 气流热力学的基本方程 (28)

四、 气体一元流的理论基础 (32)

五、 涡轮膨胀机的效率和功率 (35)

六、 涡轮膨胀机特性的控制和调节 (38)

七、 涡轮制冷装置的热力学分析 (42)

第三章 涡轮膨胀机组的试验研究和使用经验 (42)

一、 T-3油气田涡轮膨胀机组的结构 (42)

二、 涡轮膨胀机喷管环的模型研究 (60)

三、 T-3涡轮膨胀机组的试验台和测量仪表 (65)

四、 涡轮膨胀机组试验结果的处理方法 (68)

五、 涡轮膨胀机的试验特性 (73)

六、 部分进气对涡轮膨胀机特性的影响 (77)

七、	压气机的试验特性	(82)
八、	涡轮膨胀机和压气机的共同工作	(87)
九、	谢别林油气田T-3涡轮膨胀机组的气体 综合处理工业性试验装置	(90)
十、	T-3涡轮膨胀机组气体综合处理装置的 稳定工作状态	(92)
十一、	T-3涡轮膨胀机组在气体综合处理装 置中的过渡工作状态	(99)
十二、	涡轮膨胀机气体综合处理装置的使 用经验	(104)
第四章	油气田动力工艺系统的物理-数学模拟 和最佳化	(112)
一、	凝析气田的简化物理-数学模拟	(112)
二、	“储气层”和“油气井”分系统的数 学模拟	(118)
三、	管网线性段的数学模拟	(122)
四、	涡轮制冷装置的数学模拟	(125)
五、	分离器的模拟和对凝析油产量的计算	(133)
六、	水化物阻化剂注入过程的数学模拟	(134)
七、	增压压气站的数学模拟	(137)
八、	油气田动力工艺系统的静态特性	(140)
九、	油气田的最佳控制问题	(143)
十、	装有涡轮制冷装置的气体综合处理装置的 控制问题和效率准则	(146)
十一、	对效率准则的分析	(148)
十二	系统发展的最佳化途径	(155)
第五章	涡轮制冷技术在天然气工业中的应用远景	(164)
结束语		(172)
参考文献		(174)

序 言

天然气工业是一个装备有大量现代化动力和工艺设备的部门，该部门包括气田、地下气库以及备有压缩机站的天然气输送管网。天然气是一种很重要的载能体，它对国民经济各个主导部门的发展起着促进作用，是提高社会生产率的一个极为重要的因素。苏联天然气工业的一个显著特点是：大约80%的天然气是由凝析气田中开采出来的。苏联在第九个五年计划期间，开采了秋明地区和土库曼苏维埃社会主义共和国境内的大型凝析气田。这两个地区的气田，在一九七四年至一九七五年间所提供的天然气约占全苏开采量的75%，而奥伦堡尔格（Оренбург）气田提供的约占20%。

这个部门的地理条件不断变化，导致输送气体的平均距离大大增加，因此提高了处理凝析气田天然气的要求。苏联在国民经济的主要发展方向的报告中指出，必须综合利用油田伴生气和气井气，并从中制取凝析油、硫、氮和其它伴生组分。一九七七年开始实施“可燃性天然气的管道压力输送”ОСТ51.49—74全苏标准。根据该标准处理油气田的天然气时，应当保证被输送气体的水分和重烃露点（在压力为55公斤力/厘米²时）不超过下列值：

	冬季	夏季
温带和热带， °C		
ПГУ-1	-10	-3
ПГУ-2	-5	0
寒带， °C		
ПГХ-1	-25	-15
ПГХ-2	-20	-5

注：ПГУ——温带和热带的天然气；

ПГХ——寒带的天然气。

处理凝析气田天然气的基本方法是低温分离法。气田开采初期，气井的出口压力大大超过集气管端的气压，这时可采用节流法制冷的低温分离装置。节流过程的热效率低，因而有效地使用这种装置的时间受到了一定的限制（以开采天然气的现有速度，可使用十年左右）。在今后的10~15年或更长的时间里，必须采用外加冷源，因此增加了油气田设备的基本投资和天然气的成本。

苏联于一九六七年在加兹利（Газль）油气田上第一次采用人工冷却装置。当时使用的是装备氨蒸发压缩机的冷却站，它是在10ГКН机组的基础上发展起来的。

一九七一年苏联国家各部门联合委员会，通过了用于谢别林（Щебелин）油气田^①的国产第一台工业涡轮膨胀制冷装置的鉴定。该装置上的T-3涡轮膨胀机组（表1）是由乌克兰天然气科学研究所（УкрНИИгаз）研制的。

从表1中可知，涡轮膨胀机组具有许多很重要的优点。这是苏联天然气工业部门组织研究并广泛采用这种机组的一个主要原因。

一九六五年，作者在乌克兰天然气科学研究所领导的压缩机及制冷装置试验室设计了一种流量为2.5百万（米）³/日的工业涡轮膨胀机组。在开采含有各种凝析油的气田的整个阶段，该机组都可以使低温分离装置有效地工作。一九六八年，压缩机制造厂专业设计室（喀山市）生产了一台这样的机组并做了台架试验，并从一九七一年起在谢别林油气田进行工业性试验。试验表明，该机组的效率和工作性能良好。因此，国家各部门联合委员会建议在油气田广泛采用该机组。

一九七五年，各部门联合委员会在谢别林油气田通过了ТКО—25/64涡轮膨胀机组的鉴定，并建议投入生产。该机组是由压缩机制造厂专业设计室利用T-3机组作样机而研制成的。同年，天然气工业部联合委员会在乌克蒂里（Уктыль）油气田通过

^①谢别林油气田在苏联顿涅茨盆地。——译者

表1 制冷装置的技术-经济指标

指 标	带氨蒸发, 压缩机 的制冷站 (加兹利)	ВАНУ-2 (ВНИПИгаз— добыча)①	涡轮膨胀机组 (乌克兰天然气 科研所)
单位基本投资, 千卢布/(1百万千卡/ 时)	214	270	50
设备的单位金属用量, 吨/(1百万千卡/时)	108	155	5
操作一台设备的工人数	50	无数据	定期值班维护
制冷装置的单位耗能量, 千卡/千卡	1.22	3.82	0
增压站用于增压气体的 单位耗能量, 千卡/千卡	0.44	0.44	1.29
水电用量: 电能, 千瓦/(1百万千 卡/时)	100	245	0
水, 米 ³ /(1百万千卡/ 时)	1.54	1.2	.
对生物层是否有危害	有	有	无

① “ВНИПИгаз-добыча” 为“全苏石油科学研究和设计院”的缩写。——译者
用了用涡轮膨胀机组处理天然气的工艺鉴定。该油气田的特点是：
气体中含的凝析油多（在200克/米³以上）。因此，建议把这项工
艺用于天然气中含凝析油多的油气田。

一九七五至一九七六年间，在诺沃特罗伊茨克（Ново-Тро
ицк）油气田上，对涡轮膨胀机组进行了试验。该油 气田的天
然气中含有400克/米³以上的重烃。在这种情况下，根据气体（对

水分和重烃而言)所达到的露点,还是取得了良好的结果。

一九七六年所作出的鉴定认为,涡轮膨胀机组与其它类型的制冷装置相比,具有折算费用低、金属用量少、自动化程度高的特点。在与现有的分离装置及热交换装置组装配使用后,可保证苏联任何凝析气田在整个开采期内,所处理的天然气都符合OCT51.40—74标准的要求。

在关于开发和应用天然气及凝析气的开采、运输、加工和贮藏的先进技术设备和方法(其中包括适合极北地带条件的设备和方法)、组织生产油气田处理天然气的自动化成套装置的决议中,喀山压缩机制造厂承担了TKO-25/64型涡轮膨胀机的批量生产。天然气工业部全行业科研生产联合体“天然气涡轮联合装置组”研制了一系列的涡轮膨胀机组,以便充分满足本部门的需要,并组织本部门的工厂为乌克兰、中亚细亚、极北地带和西伯利亚的油气田生产了成套的自动化涡轮膨胀机组。

这样,涡轮膨胀制冷装置就成了在凝析气田开采后期处理天然气的主要设备。

第一章 油气田采用制冷 方法处理天然气的热力学基础

在研究和设计处理天然气的制冷装置的过程中，要求熟悉天然气的热物理性质。由于各个油气田的气体组分不同，而且在开采过程中气体组分还有变化。这样，在大的温度和压力的变化范围内，用试验方法来确定所需要的特性是很困难的。因此，计算方法就显得特别重要。因为这些方法要在所需的温度和压力范围内，根据天然气的组分能够预测出它的热物理性能。这个问题之所以复杂，是因为天然气是多组分的混合物，其性质与理想气体的性质大不相同。要把这种混合物分离成液相和气相，计算中也会遇到许多其它困难。

一、涡轮制冷装置的工质——天然气的基本特性

涡轮制冷装置的工质是天然气，它是碳氢化合物与一定量的非碳氢化合物混合在一起的一种复杂的多组分混合物。各个油气田的天然气组分，无论是主要组分（甲烷），还是其它次要组分（表2），其含量都各不相同。组分（乙烷、丙烷等）的相对含量，可以采取不同的方法表示。例如，可以用天然气的克分子量以及不同的气体常数来表示。天然气组分对凝析气的基本热物理特性（比热、可压缩性系数、节流系数等）同样也有影响。

天然气性质还与非碳氢化合物（氮、二氧化碳、硫化氢）的含量有关。酸性物质（ CO_2 、 H_2S ）对工艺设备的金属有很强烈的腐蚀作用。在比较低的温度下，碳氢化合物与水相互作用所形成的水化物，可以堵塞管道及设备的流通截面。甚至天然气中含有少量的硫化氢混合物，也可使形成水化物的温度急剧提高。

凝析因子是天然气的一个极重要的特性（见表2），它是一立

表2 各油气田天然气组分和特性

油 气 田	气体组分, %							克分子量③, 公斤/千克分子	气体常数, 公斤力·米/ (公斤·°C)	气体密度, 公斤/米³	凝析因子, 厘米/米³ (非稳定的凝析油)	
	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	C ₆ ⁺	氮					二氧化 化碳
乌连戈伊(谢诺曼)	98.47	0.15	0.0014	0.0003	—	—	0.9283	0.45	—	52.014	0.705	0.3~0.4
奥 伦 堡	83.51	5.22	1.74	0.835	0.62	0.122	5.59	0.783	1.58	44.112	0.831	145
那 伊 普	92.74	3.83	1.12	0.42	0.62	—	0.84	0.43	—	48.063	0.763	40.3
沙 特 雷 克	95.36	2.19	0.25	0.07	0.04	0.03	0.86	1.2	—	50.078	0.732	80
乌 克 蒂 利	79.175	8.725	3.603	1.492	1.56	0.761	1.684	—	—	40.624	0.903	600
古 固 尔 特 利	92.84	4.63	0.95	0.36	0.26	0.1	0.59	0.27	—	48.530	0.756	20
沙 赫 帕 赫 蒂	84.85	3.88	0.91	0.36	0.07	—	9.5	0.43	—	46.355	0.791	无 数 据
克 列 斯 季 申	91.624	3.672	1.499	0.349	0.659	0.16	1.876	0.161	—	47.417	0.773	73.6
索 洛 欣	90.57	3.98	1.18	0.40	0.68①	—	0.7	2.49	—	46.431	0.790	80
克基切夫	93.4	4.00	0.77	0.29	0.16①	—	1.25	0.13	—	49.235	0.745	19
麦利霍夫	92.84	3.36	0.82	0.26	0.87①	—	1.74	0.11	—	48.227	0.760	42

① C₁⁺

②原文为公斤/克分子。——译者注

方米混合液中凝析油所占的体积。根据凝析气层的形成条件，凝析油本身包括几种不同类型的原油（石蜡烷烃、芳香烃、环烷族烃）。很明显，凝析油的组分（表3）决定了它作为燃料或化工原料的价值。

表3 各油气田天然气凝析油的物理化学性能〔48、49〕

油 气 田	密度, 吨/米 ³	克分子 ^① 量, 公斤/千克分子	平均沸点 °C	碳氢化合物的重量比, %		
				石蜡烃	芳香烃	环烷族烃
别 列 赞	0.7684	110	132.55	31	45	24
乌克蒂利	0.7286	117	97.3	54.6	12.2	33.2
那 伊 普	0.8112	113	165.8	36	无数据	无数据
斯塔罗明	0.7150	100.5	87.7	61	12	27
索洛霍夫	0.7892	无数据	168.8	62	8	30
谢 别 林	0.7687	同 上	157.8	48	15	37
迈 科 普	0.7625	109	无数据	52	20.3	27.7

①原文为公斤/克分子。——译者注

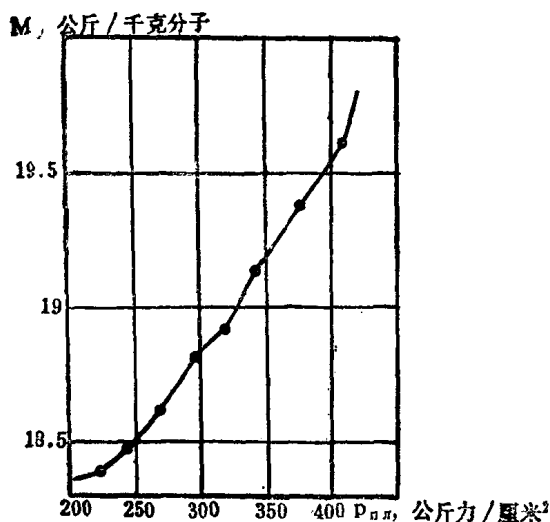


图1 卡拉达格油气田在地层压力降低时克分子量的变化

油气田通常可以连续开采数十年。在开采过程中天然气和凝析油的压力、温度、组分、凝析因子及其它指数是不断变化的，气体的基本物理性质也随之改变。一些参数，例如气体的地层温度，与时间的关系不大；而另外一些参数则变化很大。气体参数随时间变化的特点主要与油气田的开采状态有关。地层条件改变，使得碳氢化合物混合液的相平衡也改变。当地层压力下降时，部分重烃凝结在地层内，引起被开采的气体组分改变，克分子量减少（图1）。

油气田最佳开采方案的选择和集输气设备的选型，应当考虑气体状态参数及其热物理特性的动态变化。

二、天然气的状态方程

计算天然气的热物理特性时，首先必须根据温度 T 和压力 p 确定气体的单位体积 v 。当气体为理想气体时，气体的单位体积服从于克拉伯龙（Клапейрон）状态方程

$$pV = RT \quad (1)$$

式中 V ——气体的克分子体积，它与单位体积 v 和克分子量 M 有关，即 $V = Mv$ ；

R ——通用气体常数。

对于真实气体（包括天然气在内），这个方程式只有在低压和高温时才可近似地使用。真实气体的性质与理想气体的性质之间的差异可用所谓的压缩系数这一无量纲量来表示，其形式如下

$$z = \frac{pV}{RT} \quad (2)$$

理想气体的压缩系数等于1，而真实气体的压缩系数是温度和压力的函数。例如，在临界点上，甲烷的压缩系数等于0.29，其体积值将比用方程（1）计算的数值小三分之一。有了气体压缩系数与温度及压力的关系式，便可用以下公式确定单位体积

$$v = \frac{zRT}{Mp} \quad (3)$$

由Дж. 迈尔 (Дж. Майер) 和 Н. Н. 博戈柳博夫 (Н. Н. Боголюбов) 求得的有关真实气体的精确的状态方程为

$$pV = RT \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n+1} \cdot \frac{B_n}{V^n} \right) \quad (4)$$

式中 n —— 多变曲线指数。

B_n 叫做维里系数, 它只是温度的函数, 而方程 (4) 叫做 维里方程。当 $V \rightarrow \infty$ 时, 迈尔-博戈柳博夫方程可转换成克拉伯龙方程。如果只用纯理论的方法, 而不引用试验数据, 维里系数的值是计算不出来的。然而, 实际上只有第二个维里系数才可精确地求出来。确定第三个维里系数具有较大的误差, 而按试验数据求第四个维里系数的可靠值, 实际上已无可能性。因此, 通常是用描述气态的或液态和气态的经验式或半经验式来代替方程 (4)。范德华 (Ван-дер-Ваальс) 也提出一个真实气体的状态方程

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (5)$$

常数 a 和 b 具有确切的物理意义。可以解释为: 常数 b 是分子本身所占体积的四倍。常数 a 是修正分子之间相互作用力的。 a 和 b 的值根据下面临界点的条件求得

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_{\tau}^{\kappa p} = 0 \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2} \right)_{\tau}^{\kappa p} = 0 \quad (7)$$

应用方程 (5) 和条件 (6)、(7), 则得

$$a = \frac{27}{64} \cdot \frac{R^2 T_{\kappa p}^2}{p_{\kappa p}} \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{3} V_{\kappa p} \quad (9)$$

式中 $T_{\kappa p}$ 、 $p_{\kappa p}$ 、 $V_{\kappa p}$ —— 分别为临界点上的温度、压力和克分

子体积。

范德华方程是一个正确的定性方程，但对 p 、 V 、 T 之间得不出正确的定量关系。

于是有人提出了一些更为复杂的真实气体状态方程。目前对于碳氢化合物广泛应用的是列德利赫-克旺 (Редлих-Квонг) 和本尼迪克特-韦布-鲁宾 (Бенедикт-Вебб-Рубин) ① 形式的状态方程。

列德利赫-克旺方程为

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T^{1/2}V(V+b)} \quad (10)$$

式中的常数 a 和 b ，与范德华方程中的 a 和 b 同义，其值也是根据方程 (6) 和 (7) 来确定。列德利赫-克旺方程对气体的克分子体积与压力及温度之间的关系论述得十分清楚，但对于近临界范围的液相并不适用。

论证得最充分而又精确的是本尼迪克特-韦布-鲁宾形式的状态方程

$$p = \frac{RT}{V} + \frac{1}{V^2} \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) + \frac{1}{V^3} (bRT - a) \\ + \frac{1}{V^6} \alpha a + \frac{c}{V^3 T^3} \left(1 + \frac{\gamma}{V^2} \right) \exp \left(-\frac{\gamma}{V^2} \right) \quad (11)$$

式中 A_0 、 B_0 、 C_0 、 a 、 b 、 c 、 α 、 γ ——给定物质的系数。

除近临界区外，无论是液相还是气相碳氢化合物，一直到饱和线为止，BWR方程能把气体分子体积与温度的关系论述得很清楚。

如果把方程 (5) 和 (10) 中的压力、温度和克分子体积表示成换算值之间关系的话，那么，这两个方程式还可加以简化。这

① 本尼迪克特-韦布-鲁宾方程，英语缩写为BWR方程。以后文中采用此英语缩写。——译者

些换算值可用参数的变量与其临界点的数值之比（对比值）来确定

$$\pi = \frac{p}{p_{\kappa p}} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{T}{T_{\kappa p}} \quad (13)$$

$$\omega = \frac{V}{V_{\kappa p}} \quad (14)$$

这时，考虑方程（8）和（9）后，范德华方程具有以下形式

$$\left(\pi + \frac{3}{\omega^2} \right) (3\omega - 1) = 8\tau \quad (15)$$

方程（15）不包含任何一个与某个物质性能有关的常数，也就是说，它对一切物质都一样。这就可以提出物质热力学相似的假设和作出对比态定律：如果热力学相似的物质中有两个换算的状态参数相同，那么，第三个状态参数同样也相同。真实气体的准确状态方程不可能写成换算参数。这就是说，不存在热力学相似的物质。事实上，对比态定律不可能用试验方法证明。然而，对于化学相似的一类物质，（例如卤素、惰性气体、碳氢化合物等）用对比态定律可以近似地算出上述物质的性能以及这些物质的多组分混合物的性能。

为了满足混合物的对比态定律，需选定方程（12）～（14）中的分母为定值，这个定值不是混合物的实际临界参数，而必须是假临界参数。假临界参数是由组分的相应临界参数的克分子比 y_i 的平均值来确定（ K_{κ} 定律），即

$$p_{\pi \cdot \kappa p} = \sum_i y_i p_{\kappa p i} \quad (16)$$

$$T_{\pi \cdot \kappa p} = \sum_i y_i T_{\kappa p i} \quad (17)$$