

气体分离用透平机械

高原 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是空气分离装置和轻烃回收装置的操作人员和技术人员用书。书中详细介绍了这两种装置用的离心压缩机和透平膨胀机的工作原理、基本结构、调节特性、操作方法以及其他有关的重要基础知识。

本书也可供有关中等专业学校和技工学校的师生参考。

气体分离用透平机械

高原 编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 9⁷/₁₆ 印张 2 插页 258 千字 印 1—2000

1991 年 9 月北京第 1 版 1991 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0550-6/TE·524

定价: 3.75 元

前 言

目前，我国已形成工业规模的空气分离装置和油田气分离装置（即轻烃回收装置）的用户，都面临着急需提高操作人员和技术人员的有关理论和操作维护水平的任务。对于新兴的油田气分离装置用户来说，这项任务更为迫切。离心压缩机和透平膨胀机是上述气体分离装置中的最关键机械。它们能否正常运转，直接关系到装置能否正常生产。考虑到过去尚未单独编写出版过适合操作人员和技术人员培训和阅读的这种透平机械的教材，而已经出版过的少量空分装置综合性读物中有关透平机械部分又过于简单，有些内容也显陈旧。因此，作者在近几年曾给武钢、威钢、大港石油管理局等单位的技校制氧班、制氧工培训班、轻烃回收装置短训班多次讲课的基础上，编写了这本《气体分离用透平机械》，以满足上述气体分离装置的操作人员和技术人员的需要。

本书的第一章简要地介绍离心压缩机和透平膨胀机的一般概况。第二章综合地介绍了离心压缩机和透平膨胀机共同的必要的基础知识。第三章和第四章分别详细地介绍了离心压缩机和透平膨胀机的工作原理、基本结构、调节特性以及与操作有关的技术问题。

本书力求文字通俗易懂，注重讲清概念和对问题的分析。并把离心压缩机和透平膨胀机的共同基础知识和类似的技术问题有机地联系在一起介绍，以便对比分析，加深理解。

本书除供从事离心压缩机和透平膨胀机操作维护工作以及有关工作的工人和技术人员学习使用外，还可供中等专业学校、技工学校有关专业的师生参考。

我国油田气分离技术近十年来发展较快。编者对这方面的国内外资料和国内的生产实践知识也还处在学习之中。本书在这方

面的有关内容还需今后不断丰富和完善。由于缺乏经验，本书一定会存在不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。

在本书的出版过程中，得到了中国石油天然气总公司、武钢氧气厂、大港石油管理局等单位的有关领导和同志的大力支持，肖翔同志在描图和誊写书稿工作中做了大量工作，在此向他们表示衷心的感谢。

编者

1990年2月于武汉 华中理工大学

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 透平机械在气体分离装置中的应用.....	(1)
一、透平机械在空分装置中的应用.....	(1)
二、透平机械在油田气分离装置中的应用.....	(4)
第二节 透平机械的分类和特点.....	(12)
一、气体透平机械的分类.....	(12)
二、气体透平机械的特点.....	(15)
第三节 透平机械的工作原理和结构简介.....	(16)
一、离心压缩机的工作原理和结构.....	(16)
二、透平膨胀机的工作原理和结构.....	(20)
第二章 透平机械的基础知识	(23)
第一节 气体的热力性质.....	(23)
一、气体的状态参数.....	(23)
二、气体的状态方程式.....	(27)
三、混合气体的组成.....	(30)
第二节 气体的压缩过程、膨胀过程和过程方程式.....	(32)
一、压缩过程.....	(32)
二、膨胀过程.....	(35)
三、过程方程式.....	(36)
第三节 气体在透平机械通流部分中的流动.....	(38)
一、气体在叶轮中的流动.....	(39)
二、气体在固定变截面流道中的流动.....	(41)
第四节 运动气体的流量连续方程式.....	(41)
第五节 透平机械的欧拉公式.....	(43)
一、离心压缩机的欧拉公式表达式.....	(43)
二、透平膨胀机的欧拉公式表达式.....	(46)
第六节 运动气体的能量方程式.....	(49)

第七节 透平机械的转子和轴承	(53)
一、透平机械转子的轴向力及其平衡	(53)
二、透平机械转子的临界转速	(59)
三、透平机械的轴承	(78)
第三章 离心压缩机	(85)
第一节 级中损失和级效率	(85)
一、级中损失简介	(85)
二、级效率	(89)
第二节 工作轮和转子	(91)
一、工作轮的结构	(91)
二、工作轮叶片对气体做功	(93)
三、工作轮进出口气体参数的确定	(100)
第三节 通流部分的固定元件	(105)
一、扩压器	(105)
二、弯道和回流器	(112)
三、吸气室	(114)
四、蜗壳	(115)
第四节 其他零部件和辅助系统	(117)
一、密封	(118)
二、机壳	(120)
三、增速器	(122)
四、气体冷却器	(125)
五、油路系统	(128)
第五节 离心压缩机的特性曲线和调节	(132)
一、离心压缩机的特性曲线	(132)
二、离心压缩机与管网联合工作	(135)
三、离心压缩机的调节	(136)
四、离心压缩机的自动调节装置简介	(145)
五、离心压缩机的喘振和防喘振调节装置	(146)
第六节 离心压缩机的保护和操作	(149)
一、离心压缩机的温度保护	(149)
二、离心压缩机的压力保护	(151)
三、离心压缩机的机械保护	(153)

四、离心压缩机的操作	(156)
五、空气离心压缩机的常见故障及处理方法	(163)
第四章 透平膨胀机	(171)
第一节 喷嘴环	(171)
一、喷嘴环的作用和结构	(171)
二、气体在喷嘴环中的流动规律	(177)
三、喷嘴环主要结构尺寸的确定	(184)
第二节 工作轮	(186)
一、工作轮的作用和结构	(186)
二、气体在工作轮中的流动规律	(189)
三、工作轮主要结构尺寸的确定	(194)
第三节 蜗壳和扩压器	(195)
一、蜗壳	(195)
二、扩压器	(198)
三、余速损失	(200)
第四节 透平膨胀机的主要损失和效率	(201)
一、主要损失和效率	(201)
二、透平膨胀机中气体工作过程在焓-熵图上的表示	(207)
三、影响透平膨胀机效率的主要参数及其选择	(209)
第五节 透平膨胀机的热力计算举例	(216)
一、国产产氧气量 $1500\text{m}^3/\text{h}$ 空分装置配套用透平膨胀机的热力计算	(216)
二、油田气分离装置配套用透平膨胀机的热力计算	(221)
第六节 透平膨胀机的制动器	(226)
一、制动器的作用和类型	(226)
二、制动风机和增压器	(227)
三、制动电机	(236)
第七节 透平膨胀机制冷量的调节	(239)
一、透平膨胀机的效率特性曲线	(240)
二、透平膨胀机在变工况时的流量变化	(242)
三、透平膨胀机制冷量的调节方式	(243)
第八节 透平膨胀机的结构	(253)
一、透平膨胀机的结构特点	(253)

二、透平膨胀机机组的组成.....	(254)
三、透平膨胀机的典型结构零部件.....	(256)
第九节 透平膨胀机的操作和常见故障分析.....	(261)
一、透平膨胀机的操作要点.....	(261)
二、与国产产氧气量 $3200\text{m}^3/\text{h}$ 空分装置配套的PLK-75 $\times$ 2/ 5.0-0.4型透平膨胀机的操作步骤.....	(262)
三、透平膨胀机的常见故障分析.....	(267)
参考文献.....	(271)
附录1 单位换算表	(273)
附录2 低温工质的基本物理-化学性质.....	(276)
附录3 油田气常见组分的基本性质	(278)
附录4 空气的热力性质图表	(279)
附录5 氮的热力性质图表	(292)
附录6 液态及气态空气的动力粘度 μ ($10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	(304)
附录7 液态及气态氮的动力粘度 μ ($10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	(306)

第一章 绪 论

第一节 透平机械在气体分离装置中的应用

气体分离装置，主要是指以空气或天然气、油田气、焦炉气、合成氨尾气等多组分气体为原料，采用低温精馏分离的方法制取氧、氮、氩、氦、氖、氪、氙、氢、丙烷、丁烷等不同纯度物质的分离装置。其中包括空气分离装置（简称空分装置）、稀有气体提取装置、天然气分离装置、油田气分离装置、焦炉气分离装置、水煤气分离装置和合成氨尾气分离装置等。目前我国已具有工业规模用户的主要是空分装置和油田气分离装置（又叫轻烃回收装置）。在这两种气体分离装置中，应用得最为普遍的透平机械是离心压缩机和向心式透平膨胀机。由于本书主要是为这两种气体分离装置的操作者及有关技术人员编写的，故本书的重点是讨论透平机械中的离心压缩机和向心式透平膨胀机。

一、透平机械在空分装置中的应用

空分装置是以空气为原料生产氧、氮、氩、及其他稀有气体的装置。空分装置是用人工制冷的方法使空气液化，然后根据各组分沸点的不同，在精馏塔内进行精馏分离以获得氧、氮，或同时制取一种或几种稀有气体。在多数情况下，空分装置只用来生产氧和氮，所以习惯上称它为制氧机。

图 1-1 为全低压流程空分装置的一种经简化后的典型流程。空气从吸入口吸入，进入离心压缩机1压缩，先经氮水预冷器2预冷后，再经切换式换热器（又叫可逆式换热器）3被返流低温气冷却后送入精馏塔10的下部。从精馏塔分离出的氮气从上塔顶部引出，经液氮过冷器9过冷液氮后返回切换式换热器复热后送出装置。从精馏塔分离出的氧气由上塔下部引出，经切换式换热器

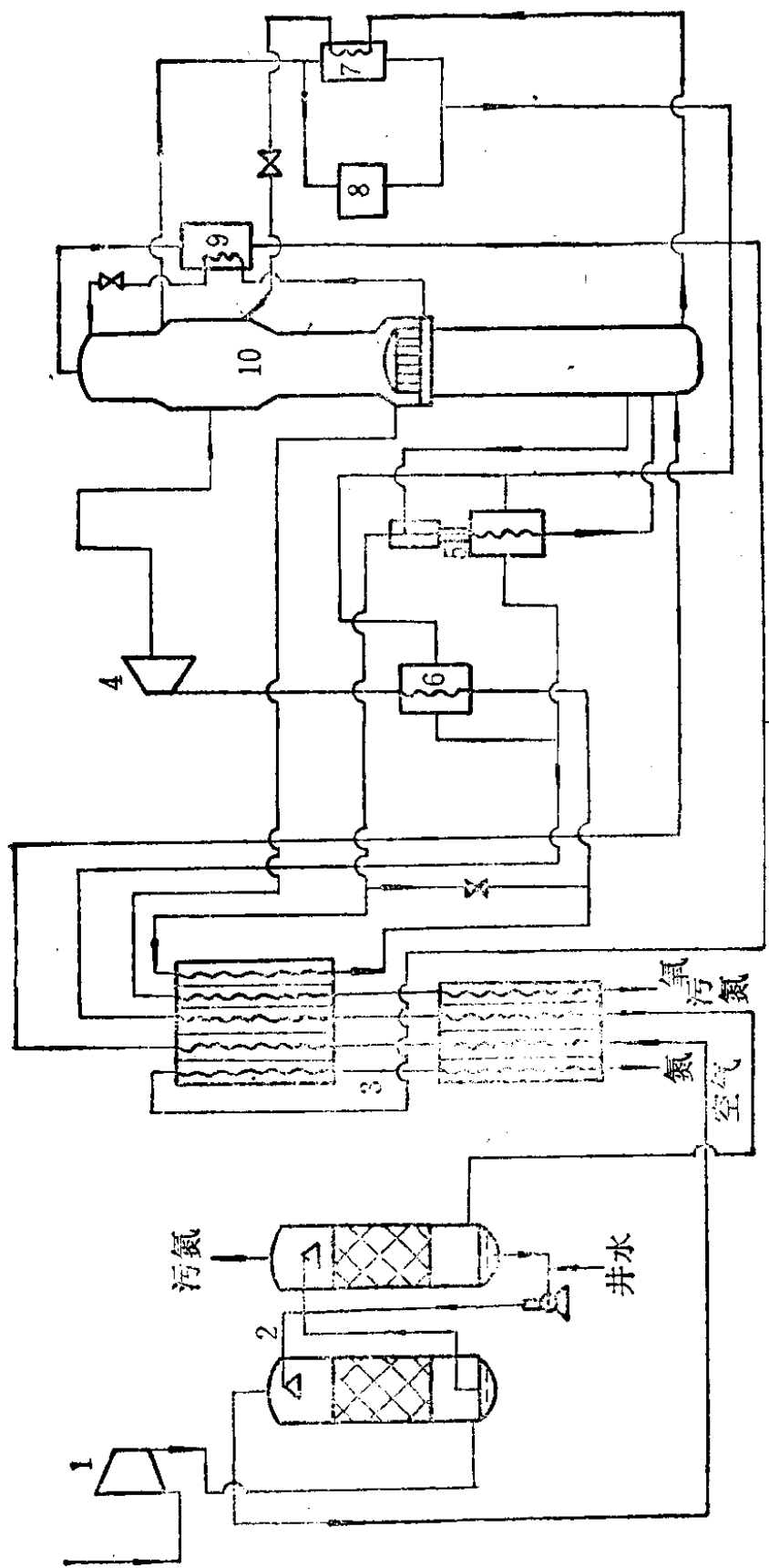


图 1-1 全低压空分装置的典型流程

1—离心压缩机; 2—氮水预冷器; 3—切换式换热器; 4—透平膨胀机; 5—分离器-液化器;
6—膨胀换热器; 7—液空过冷器; 8—液氧过冷器; 9—液氮过冷器; 10—精馏塔

复热后输出装置。从精馏塔下塔底部引出部分经洗涤过的空气，经分离器-液化器5去掉液滴，并且有部分空气与污氮进行换热后液化，被分离和液化的液态空气仍回流到下塔底部。另一部分空气又分为两路，一路经切换式换热器冷段作为环流空气；另一路旁通，与从切换式换热器冷段流出的环流空气汇合后去膨胀换热器6与污氮进行换热后再进入透平膨胀机4膨胀制冷，膨胀后的空气进入上塔中部参与精馏。从精馏塔上塔上部引出的污氮，先经液空过冷器7过冷液空后再进入液化器和膨胀换热器初步复热，最后再经切换式换热器复热后送出装置。在切换式换热器中，正流空气通道和返流污氮气通道定时切换（切换式换热器因此而得名），用以达到使原料空气中的水分和二氧化碳等杂质自行被清除掉的目的。

从上述原理流程可以看出，要使空气在空分装置中得以分离，首要条件是必须在空分装置中造成低温，使空气液化以保证精馏工况的正常进行。对于生产气体产品的空分装置来说，如果没有外界热量的传入，即没有所谓的跑冷损失，如果从精馏塔分离出来的氧、氮等冷气体的冷量能充分复热回收利用，在已有气体产品输出的正常生产时，就不再需要冷量了。然而，由于换热设备的传热温差不可避免地存在，造成了冷气体复热不足的不可逆损失；又由于分离设备（即保冷箱内所有设备的总称）的绝热材料也不可能完全阻挡外界热量的传入，即总是或多或少地存在跑冷损失。这两部分损失的冷量在空分装置正常运行时必须不断补充。此外，在空分装置的启动过程中要将保冷箱内的分离设备冷却到低于常温的正常工作温度和精馏塔内积累液态空气，就更需要大量冷量，这部分冷量虽然是暂时性的，但也是必不可少的。上述这些冷量，就是靠空分装置中的空气离心压缩机和透平膨胀机、节流阀共同完成的等温节流效应（又叫焦耳-汤姆逊效应）所得到的制冷量，以及离心压缩机和透平膨胀机共同完成的向外输出机械功所得到的制冷量来提供的。空气节流以后温度会降低，而降温的空气当恢复到节流以前温度时就有吸收热量的能力，这就

是等温节流效应所得到的制冷量。压缩空气在节流后所具有的这种制冷能力，是由于压缩和冷却而产生的，即在压缩过程中不但将压缩功转化成的热量传给了环境介质，而且将等温压缩的焓降也以热量的方式传给环境介质，所以这种制冷能力是在等温压缩时获得的，但通过节流才能表现出来。

空气在膨胀机中绝热膨胀时要对外做功，空气本身的焓值和温度都要降低，通常把空气经膨胀机中转换为外功的焓降称为膨胀机的制冷量。此外，经膨胀机后的空气也有相当于经节流阀膨胀后所具有的等温节流效应制冷量。

对于全低压空分装置来说，等温节流效应制冷量所占的比例是很小的，在正常生产时，装置所需冷量的85%~90%由膨胀机输出外功所产生，这是因为在相同的绝热膨胀条件下，膨胀机输出外功所得制冷量比等温节流效应所得制冷量要大得多的缘故。

显然，空气压缩机和膨胀机是空分装置制取冷量的关键机器。

效率较高、结构紧凑、通流部分无油、适用于较大流量和压升比不太高的离心压缩机，和效率高、结构紧凑、通流部分无油、适用于较大流量和膨胀比不太大的向心式透平膨胀机，在低压中、大型空分装置中得到了广泛应用。通常这种中、大型空分装置的氧、氮气产品也是用离心压缩机压送到用户所在地。近年来，还出现了用单级离心压缩机（通常叫增压器）作为透平膨胀机的制动器的空分装置。

表1-1和表1-2列出部分空气离心压缩机和透平膨胀机在国产空分装置中的应用情况。

二、透平机械在油田气分离装置中的应用

目前我国，已具有一定工业规模用户的油田气分离装置，是将油田气分离为轻油（即戊烷以上的烷烃），液化石油气（即丙烷，丁烷混合物）和干气（即甲烷、乙烷和氮气混合物）3个馏分的装置。液化石油气，在不太高的压力和常温下呈液态，是良好的民用燃料；在常压和常温下呈液态的轻油可用以制成石油

表 1-1 部分国产空分装置配套的空气离心压缩机的主要参数

型 号	级数	进口容量 (m ³ /min)	进口 压力 (MPa)	进口 温度 (°C)	出口 压力 (MPa)	轴 功 率 (kW)	电动机 容 量 (kW)	压缩机 转 速 (r/min)	配套空分 装置容量
DA120—61	单轴 6 级	125	0.093	20	0.62	660	800	13900	产氧气量 1000m ³ /h
DA150—61	单轴 6 级	155	0.085	30	0.57	720	800	12640	产氧气量 1000m ³ /h
1TY—110/ 5.3	单轴 5.3 级	134	0.089	30	0.62		1000	15000	产氧气量 1000m ³ /h
DA200—61	单轴 6 级	209	0.088	25	0.62	1040	1250	11543	产氧气量 1500m ³ /h
H200—6.3/ 0.97	双轴 4 级	200	0.095	32	0.62	954	1250	{15064 18995}	产氧气量 1500m ³ /h
DA350—61	单轴 6 级	400	0.095	20	0.72	1940	2500	8600	产氧气量 3200m ³ /h
H400—6.3/ 0.97	双轴 4 级	400	0.095	32	0.62	1905	2500	{10800 13200}	产氧气量 3200m ³ /h
DH63—1	双轴 4 级	776	0.098	33.1	0.676		4100		产氧气量 6000m ³ /h
DH80—1	双轴 4 级	1083	0.097	25	0.647		5400		产氧气量 10000m ³ /h

表 1-2 部分国产空分装置配套的透平膨胀机的主要参数

型 号	膨胀 工质	流 量 (kg/s)	进口 压力 (MPa)	进口 温度 (K)	出口 压力 (MPa)	功 率 (kW)	转 速 (r/min)	配套空分装置容量
PLK19.2×2/ 4.8~0.37	空气	0.385	0.58	132	0.137	12.8	41108	与产氧气量600m ³ / h空分装置配套
ZLP33.2×2/ 4.7~0.35	空气	① {0.79 0.934	0.57	122	0.135	24.5	35000	与产氧气量1000m ³ / h空分装置配套
PLK2500×2/ 4.83~0.37	空气	① {0.90 1.08	0.583	124.5	0.137	30.5	30500	与产氧气量1500m ³ / h空分装置配套
PLK4500×3/ 4.83~0.37	空气	① {1.44 1.62 1.80	0.583	130	0.137	50.4	23190	与产氧气量3200 m ³ /h 空分装置配套
PLK8000×3/ 4.5~0.35	空气	① {2.52 2.88 3.24	0.55	128	0.135	87.5	19000	与产氧气量6000 m ³ /h 空分装置配套
PLK175×1/ 4.75~0.35	空气	3.78	0.575	140	0.135	250	20700	与产氧气量10000 m ³ /h空分装置配套

①表中所列流量为原固定喷嘴透平膨胀机的流量值，现在均已改为转动叶片喷嘴，其产品型号和某些参数也有少许变化。

醚或掺入汽油中使用；在压力不太高的常温下呈气态的干气，可用作油田或气田的动力用或生活用燃料。因而这种分离方法提高了油田气的利用率，具有较大的经济意义；此外还具有流程比较简单，产品易于处理，对于大型及小型装置均适用等优点。特别是对于井区比较分散的油田，这是对油田气进行处理的最可行的方法。

图1-2是将油田气分离为轻油，液化石油气和干气三种馏分的一种典型工艺流程，它是利用中压透平膨胀机制冷回收丙、丁烷的。

经压缩机压缩到3800kPa并冷却到接近常温的原料气（如果油田气的压力高于此压力，则不需此压缩机），先经卧式分离器1初步除去游离态的油和水，再经原料气过滤器2和立式分离器3除掉其中的固体微粒和微小的油滴和水滴，然后去吸附器组4脱除原料气中的水分，经吸附器干燥后的气体再经吸附过滤器5过滤掉从吸附器中带来的吸附剂粉末。净化过滤后的原料气分为两路，约90%的原料气经预冷器6和换热器7与返流干气进行换热；其余的原料气经换热器8与返流冷凝液烃进行换热，然后两路原料气汇合后通入平衡分离器9进行气液分离，以便将其中的少量冷凝重烃分离出来，液体经节流阀膨胀减压到1700kPa，从平衡分离器出来的气体经冷箱过滤器10、膨胀前过滤器11进入透平膨胀机12绝热膨胀到1700kPa，温度也随之降到196K左右，并汇合前述经节流阀膨胀后的液体一起进入分离器13进行气液分离，分离后的气体即干气通过换热器7，预冷器6回收冷量复热后输出装置；分离出来的冷凝液烃经换热器8回收冷量复热后进入平衡分离液罐16进行气液分离，分离后的气体和液体分别送入脱乙烷塔17的不同位置，塔顶有轻油喷淋，塔底有再沸器，气体和液体在脱乙烷塔17中进行精馏分离，以乙烷为主的干气从塔顶排出装置，塔底得到无乙烷的烃液，再送入稳定塔18。该塔顶部有冷凝器，塔底部有再沸器，烃液在塔中精馏后从塔顶排出丙烷、丁烷，作为液化石油气产品输出；而塔底排出轻油，其中部分轻油作为脱

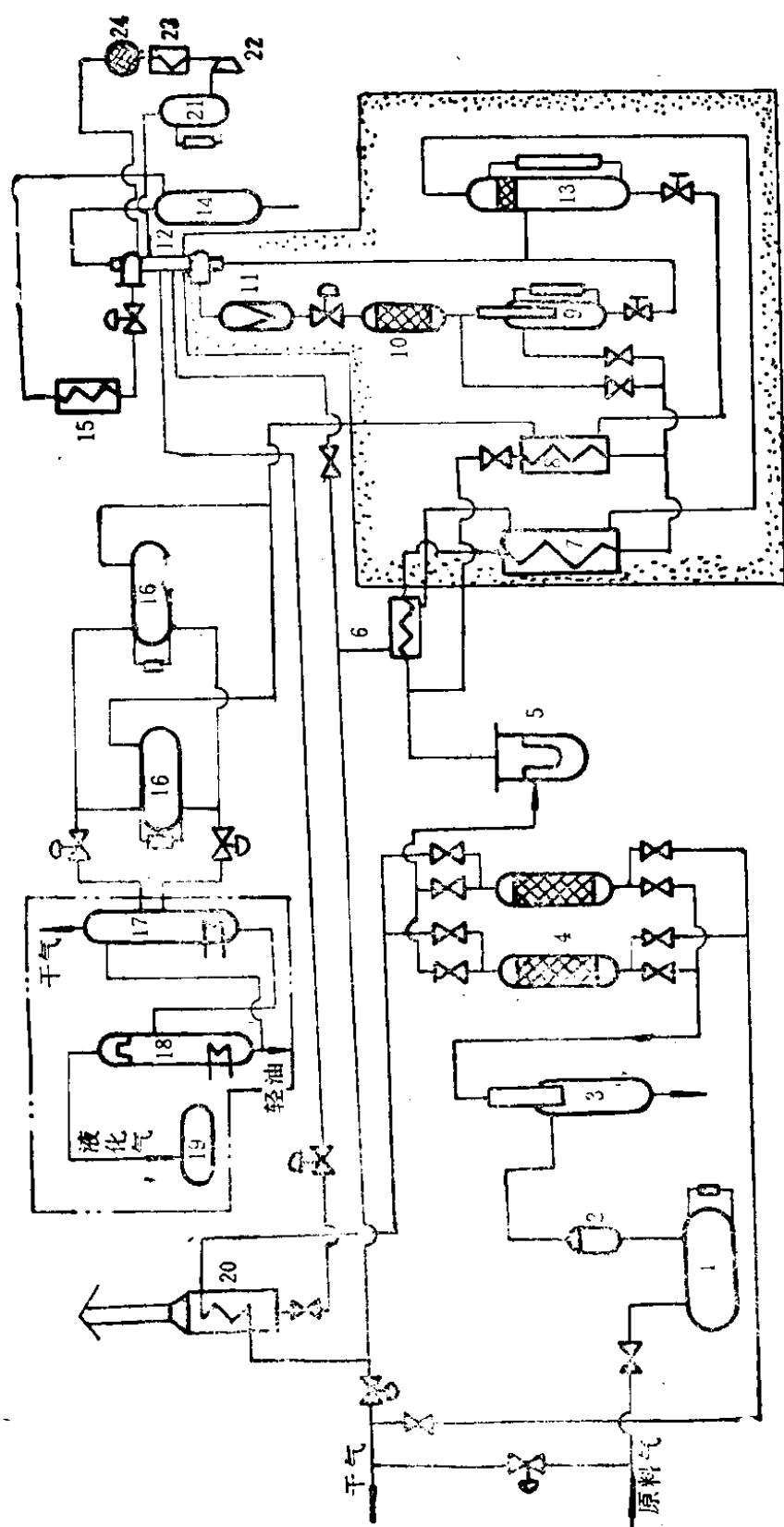


图 1-2 回收丙、丁烷的油田气分离装置的工艺流程图

- 1—卧式分离器; 2—原料气过滤器; 3—立式分离器; 4—吸附器组; 5—吸附过滤器; 6—预冷器; 7—换热器 I;
8—换热器 II; 9—平衡分离器; 10—冷箱过滤器; 11—膨胀过滤器; 12—透平膨胀机; 13—分离器;
14—平衡器; 15—水冷却器; 16—平衡分离液罐; 17—脱乙烷塔; 18—稳定塔; 19—液化气罐; 20—加热炉;
21—油箱; 22—油泵; 23—油水冷却器; 24—油过滤器

表 1-3 四川空分设备厂天然气透平膨胀机的主要参数

型 号	进口压力 (MPa)	进口温度 (K)	出口压力 (MPa)	流 量 ($10^4 \text{m}^3/\text{d}$)	转 速 (r/min)	等 熵 效 率 (%)	轴 功 率 (kW)	膨 胀 轮 外 径 (mm)	制 动 轮 外 径 (mm)	调 节 方 式	制 动 方 式	轴 承 型 式	带 液 量 (Wt%)
PLPT-48/39-4	4.0	223	0.5	7	53000	65~75	43	84/105	105	背压+节流	风机	圆柱油	3
PLPT-63.5/9-1.5	1.0	213	0.25	10	55100	65~70	72	105	97.8	背压+节流	增压器	圆柱油	4
PLPT-300/39-14	4.0	225	1.5	50	34000	72~78	220	140	152	可调喷嘴	增压器	三油叶	6.3
PLPT-200/36.5-17.8	3.75	213	1.88	30	38200	≈ 73	95	100	100	可调喷嘴	增压器	三油叶	7.8
PLPT-85/17.2-3.6	1.82	241	0.46	15	43200	≈ 68	90	135	130	可调喷嘴	增压器	三油叶	
PLPT-31/7.2-1.7	0.82	218	0.27	5	52000	≈ 72	30	100	80	可调喷嘴	增压器	三油叶	
PLPT-175/29.6-7	3.06	218	0.8	30	37700	≈ 76	167	150	140	可调喷嘴	增压器	三油叶	
PLPT-78/17-3	1.8	220	0.4	10	56000	≈ 76	95	100	80	可调喷嘴	增压器	三油叶	7.8
PLPT-70/26-17	2.7	218	1.8	10	40600	≈ 70	22	84	95	可调喷嘴	增压器	三油叶	

表 1-4 中国航空附件研究所天然气透平膨胀机的主要参数

型 号	进口压力 (MPa)	进口温度 (K)	出口压力 (MPa)	流 量 (10 ⁴ m ³ /d)	转 速 (r/min)	等 梯效率 (%)	膨胀轮外径 (mm)	制动轮外径 (mm)	调 节 方 式	制 动 压 升 比 (MPa/MPa)	轴 承 型 式	带 液 量 (Wt%)	用 户
FW904	0.385	253	0.15	5~7	36000	80	140	140	节流	0.295/0.395	滚珠	4~8	中原油田
FW906	0.385	253	0.15	7~10	35000	80	140	130	节流	0.295/0.395	滚珠	4~8	中原油田
FW906A	0.385	253	0.15	9~12	35000	80	134	143	节流	0.295/0.395	滚珠	4~8	大港油田
FW907	2.1	237	0.4	3.5~7.5	70000	>65	70	90	节流	0.38/0.575	滚珠	4~8	华北油田
FW907A	2.1	237	0.4	3.5~7.5	50000	>65	97.5	120	节流	0.38/0.575	滚珠	4~8	南阳油田
FW907C	1.58	240	0.375	1.6~4.2	50000	>65	97.5	115	节流	0.35/0.49			
FW907D	2.1	241	0.494	5	50000	>65	97.5	115	节流	0.464/0.644	滚珠	4~8	
FW908	1.45	253	0.93	120	11000	80	300	290	节流	0.806/0.1	滚珠	4~8	大港油田
FW909	0.75	255	0.21	7.5	35000	80	160	165	节流	0.2/0.25	滚珠	4~8	中原胜利油田
FW909A	2.0	214	0.5	20	35000	80	160	165	节流	1.6/2.5	滚珠	4~8	大庆油田
FW909B	0.65	253	0.185	6	35000	80	160	165	节流	0.16/0.25	滚珠	4~8	辽河油田
FW909C	0.65	258	0.185	10	35000	80	160	165	节流	0.16/0.25	滚珠	4~8	大庆油田
FW909D	0.65	253	0.185	20	35000	80	160	165	节流	0.16/0.25	滚珠	4~8	辽河油田
FW909F	0.95	265.5	0.32	20	35000	80	160	165	节流	0.725/0.98	滚珠	4~8	
FW912	2.034	262	0.47	50	28000	80	240	230	节流	1.48/2.19	滚珠	4~8	
FW913	3.3			20					节流		滑动	4~8	