



TOUPING YASUOJI

YURE HUISHOU JISHU ZAI HAISHANG SHENGCHAN
SHESHI DE YUNYONG HE TUIGUANG

透平压缩机 余热回收技术在海上生产 设施的运用和推广

叶冠群 主编



化学工业出版社

透平压缩机 余热回收技术在海上生产 设施的运用和推广

叶冠群 主编



化学工业出版社

·北京·

本书以东方终端余热回收项目为主线，主要介绍了燃气透平压缩机组余热回收技术、透平机组烟气余热回收研究、东方终端余热回收项目实施全过程等技术内容，重点介绍了东方终端余热回收项目创新技术、透平机组余热回收装置运行管理以及透平烟气余热回收技术运用及推广。

本书可供从事油气田开发生产管理以及电站运行管理的研究和设计、施工人员、工程技术人员、运行和维修管理人员使用，也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

透平压缩机余热回收技术在海上生产设施的运用和推广/叶冠群主编. —北京: 化学工业出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-122-30957-0

I. ①透… II. ①叶… III. ①透平式压缩机-废热回收-应用-海上工程 IV. ①TH454

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 274141 号

责任编辑: 刘 军 张 艳 冉海滢 文字编辑: 向 东
责任校对: 王 静 装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 三河市延风印装有限公司
装 订: 三河市胜利装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{2}$ 字数 192 千字
2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 120.00 元

版权所有 违者必究

前言

东方作业公司是中海石油（中国）有限公司湛江分公司（以下简称“湛江分公司”）下属的作业单位之一，主要负责莺歌海海域的天然气开发，所属气田包括东方气田群和乐东气田群。

东方气田群位于南海北部湾莺歌海海域，距海南省莺歌海镇约 100km，距东方市 113km，所处海域水深 70 余米。目前已建生产设施包括东方 1-1CEPD 中心平台、东方 1-1WHPA 井口平台、东方 1-1WHPB 井口平台、东方 1-1WHPE 井口平台、东方 1-1WHPF 井口平台、平台间管线和上岸管线等。乐东气田群位于南海西部海域莺歌海盆地，气田群所处海域平均水深约 100m，气田群由乐东 15-1 气田和乐东 22-1 气田组成。乐东 22-1 气田西距乐东 15-1 气田 21km，气田范围内水深约 96m。东方终端接收并处理来自东方气田群和乐东气田群的天然气和凝析油，处理后的天然气供给中海油化学公司、洋浦电厂等工业用户，并向海口市提供清洁的能源，处理后的凝析油直接销售。

在借鉴国内外余热利用成熟经验的基础上，依托湛江分公司多年来积累的生产工艺改造实践和多项创新技术，东方作业公司首次在中海油系统成功实施了东方终端透平压缩机余热回收项目。此项目于 2013 年 2 月 1 日获得中海石油（中国）有限公司正式批准实施，于 2014 年 7 月 25 日投用。设计生产蒸汽 15t/h，实际运行生产蒸汽 18.8t/h，项目效果好于预期，大大提高了东方终端供热的安全性和可靠性，产生了巨大的经济效益和社会效益。

为了给类似项目的设计、调试及运行管理提供经验，亟需相关的书籍，来总结东方终端余热回收项目成果。为此，本书对透平烟气余热回收的关键环节进行了全面深入的总结，主要包括

燃气透平压缩机组及余热回收技术、余热资源利用方向、余热资源计算方法、余热锅炉换热技术、三通挡板门密封技术、烟道减阻技术、余热回收节能量计算方法、余热回收装置运行管理办法、余热回收技术推广运用等。每个部分对理论依据、关键因素以及技术创新等进行介绍，以供同类型项目参考借鉴，助力中海石油（中国）有限公司湛江分公司节能减排工作。本书可供从事油气田开发生产管理及电站运行管理的研究和设计人员、施工人员、工程技术人员、运行和维修管理人员使用，也可供相关专业院校师生参考。

编者

2017年10月

目 录

第 1 章 燃气透平压缩机组及余热回收技术简介 | 001

1.1 燃气透平机组基本原理和结构	003
1.1.1 燃气透平机组基本原理	003
1.1.2 燃气透平机组基本结构	011
1.1.3 燃气透平发电机简介	020
1.1.4 透平压缩机简介	030
1.2 燃气透平余热利用现状	034
1.2.1 透平发电机烟气余热利用	035
1.2.2 透平压缩机烟气余热利用	037
1.3 余热锅炉选型	045
1.3.1 按汽水循环方式分类	045
1.3.2 按有无外加燃烧设备分类	046
1.3.3 按布置方式分类	046
1.3.4 按压力种类分类	047
1.4 透平烟气余热回收关键技术概述	047

第 2 章 透平压缩机烟气余热回收技术研究 | 049

2.1 透平压缩机烟气余热回收技术现状	051
2.2 透平压缩机烟气余热回收技术研究内容	051
2.2.1 掌握余热资源精确计算的能力	051
2.2.2 长距离余热回收装置烟道减阻技术研究	055
2.2.3 开齿型翅片换热管流动温度场分布研究	056

2.2.4	透平余热回收节能量计算方法研究	057
2.2.5	余热锅炉效率计算方法研究	061

第3章 东方终端余热回收项目 | 069

3.1	东方终端简介	071
3.2	东方终端燃气透平及蒸汽系统现状	072
3.2.1	东方终端透平压缩机主要技术参数	072
3.2.2	东方终端蒸汽系统现有主要设备性能参数	073
3.2.3	东方终端蒸汽需求及燃气耗量	074
3.3	东方终端余热回收改造方案及工艺	075
3.3.1	增加余热蒸汽锅炉方案	076
3.3.2	设备布置	079
3.3.3	设备制造和安装	082
3.3.4	设备检测和验收	087
3.3.5	系统调试和运行	089
3.4	东方终端余热回收项目创新技术	090
3.4.1	余热锅炉换热技术	090
3.4.2	三通挡板门密封技术	094
3.4.3	余热回收装置减阻技术	102
3.4.4	项目实施效果	124

第4章 透平机组余热回收装置运行管理 | 127

4.1	影响透平机组余热回收装置运行的关键因素	129
4.2	余热锅炉操作程序	129
4.2.1	点炉前的检查工作	129
4.2.2	启炉步骤	129
4.2.3	停炉	131
4.2.4	锅炉排污	133
4.2.5	锅炉取样	133

4.3	三通挡板门操作程序	134
4.3.1	检查工作	134
4.3.2	启动步骤	134
4.4	常见故障及处理措施	137
4.4.1	系统调节阀故障	137
4.4.2	余热锅炉故障	137
4.4.3	三通挡板门故障	138

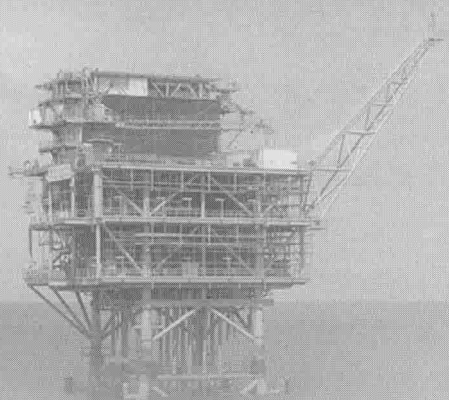
第 5 章 透平烟气余热回收技术运用及推广 | 139

5.1	涠洲 12-1PUQB 透平机组余热回收	141
5.1.1	涠洲 12-1PUQB 平台简介	141
5.1.2	涠洲 12-1PUQB 平台热负荷	141
5.1.3	项目背景	143
5.1.4	项目改造内容	143
5.1.5	项目效果分析	145
5.1.6	结论	147
5.2	余热电站技术运用	147
5.2.1	涠洲终端西门子 Typhoon 透平发电机组	148
5.2.2	涠洲终端余热发电项目	161
5.3	东方终端 UGT6000 型透平机组进气冷却提高机组效率	178
5.3.1	实施透平进气冷却的意义	178
5.3.2	UGT6000 型透平机组前端冷却对机组出力的影响	180
5.3.3	分析透平机组进气温度与出力的关系	183
5.3.4	东方终端 UGT6000 型透平机组进气冷却方案	184
5.4	Solar C40 燃气轮机进气冷却与 Typhoon 燃气轮机进气冷却可行性分析	196
5.4.1	Solar C40 燃气轮机进气冷却对机组出力的影响	196

5.4.2	Solar C40 前端冷却效果分析计算	198
5.4.3	Typhoon 燃气轮机进气冷却对机组出力的 影响	199
5.4.4	Typhoon 前端冷却效果分析计算	200
5.4.5	两种透平发电机的必要性分析	201
5.4.6	总结	201

附录 | 203

参考文献 | 206



第1章

燃气透平压缩机组及 余热回收技术简介



1.1.1 燃气透平机组基本原理

1.1.1.1 工质的热物性计算

在以机理为基础的燃气轮机建模过程中，工质的热物性计算是极其重要的一个环节，工质热物性计算结果的准确度直接影响模型仿真计算的结果。

气体的热力学性质是指气体的压力 p 、体积 V 、温度 T 、焓 H 、熵 S 、内能 U 、自由能 F 、吉布斯自由能 G 、逸度 f 等。其中， p 、 V 、 T 是气体的基本热力学性质，可以通过实验直接测量，而其他热力学性质，如焓 H 、熵 S 、内能 U 、自由能 F 等不便于直接测量，需要以气体的数据为基础，利用热力学基本关系式进行推算。

(1) 实际气体状态方程

对于单相纯物质气体，任意确定 p 、 V 、 T 三者中的两个，则第三个物理量就可以确定，从而气体的状态完全确定，其状态方程为：

$$f(p, V, T) = 0 \quad (1-1)$$

理想气体方程是最简单的状态方程：

$$pV = nRT \quad (1-2)$$

式中， p 为气体的压力； T 为气体的热力学温度； V 为气体的摩尔体积； R 为通用气体常数。当 p 、 V 、 T 采用标准单位时， R 的值为 $8.134 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

理想气体没有考虑分子本身占有的体积，并且假定分子之间不存在

作用力, 实际气体只有在压力极低的时候才能近似按理想气体处理。历史上, 人们提出了许多实际气体的状态方程, 这些方程在一定的范围内能够较准确地描述气体状态。如基于统计力学而导出的 Virial 方程, 以 van der Waals 为代表的立方方程以及其他非解析方程。

立方方程通式如下:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + ubV + \omega b^2} \quad (1-3)$$

常用立方状态方程的常数如表 1-1 所示。

表 1-1 常用立方状态方程的常数

方程	u	ω	b	a
van der Waals	0	0	$\frac{RT_c}{8p_c}$	$\frac{27}{64} \times \frac{R^2 T_c^2}{p_c}$
R-K	1	0	$\frac{0.08664RT_c}{p_c}$	$\frac{0.42748R^2 T_c^{2.5}}{p_c T^{1/2}}$
S-R-K	1	0	$\frac{0.08664RT_c}{p_c}$	$\frac{0.42748R^2 T_c^2}{p_c} [1 + f_w (1 - T_r^{1/2})]^2$ 其中, $f_w = 0.48 + 1.574\omega - 0.176\omega^2$
P-R	2	-1	$\frac{0.077796RT_c}{p_c}$	$\frac{0.457235R^2 T_c^2}{p_c} [1 + f_w (1 - T_r^{1/2})]^2$ 其中, $f_w = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$

van der Waals 方程是由范德瓦尔斯于 1873 年提出的对理想气体状态方程的修正式。式中, a 、 b 是与气体种类相关的正常数, 称为范德瓦尔斯常数。van der Waals 方程是半经验的状态方程, 可以较好地描述实际气体的基本特性, 虽然不精确, 但是对后来新状态方程的发现具有重要指导作用。

1949 年, Redlich 和 Kwong 对压力项进行了修正, 得到了 R-K 方程。1972 年, Soave 对 R-K 方程进行了修正, 得到了 S-R-K 方程, 该方程是 PRO/II 热物性仿真计算的默认状态方程。P-R 方程对方程引力项进行了修正, 克服了 R-K 方程预计物质液相密度误差大的缺陷。

(2) 实际气体的热力学性质

实际气体在高温低压的状态下, 其性质与理想气体相近, 涠洲终端西门子 Typhoon 机组燃料气, 温度在 300~400K, 压力最高不超过

5MPa, 且由于是混合气体, 各组分气体的分压均小于总压, 除少数重组分气体外, 其他组分的临界压力高、临界温度低, 在上述温度和压力范围内可以近似认为处于高温低压的状态, 可以使用理想气体相关知识指导热物性计算。

对于实际气体, 测得其压力足够低时的定压比热容, 在已知状态方程的前提下, 即可由下式求得任意压力下的定压比热容。

$$c_p = c_{p_0} - T \int_{p_0}^p \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_p dp \quad (1-4)$$

已知状态方程的实际气体, 其焓可以由式(1-5) 计算得到:

$$dh = c_p dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (1-5)$$

(3) 混合物的热力学性质

① 混合规则 对于实际气体, 由于增加了组分, p 、 V 、 T 不能完全确定气体的状态方程。气体混合物的自由度 f 、组分数 N 和相数 ϕ 之间的关系为:

$$f = N - \phi + 2 \quad (1-6)$$

对于气体混合物, 其相数 $\phi = 1$, 因此其自由度为:

$$f = N + 1 \quad (1-7)$$

对于纯物质, 若 $N = 1$, 则 $f = 2$, 因此当纯物质的 p 和 T 确定时, 体系的 V 便可确定。对于气体混合物, 当 p 和 T 确定时, 还必须有 $N - 1$ 个组分参数才能确定 V 。由于混合物的 p - V - T 关系需要大量的实验数据, 因此通常的研究方法是看作一种虚拟的纯物质, 具有纯物质所具有的特征参数, 当将这些虚拟特征参数代入适用于纯物质的 p - V - T 关系, 就能较为准确地表达混合物的行为, 这些虚拟参数, 是由组成混合物的各个纯物质的特征参数及混合物的组成比例按照一定的混合规则得到的。不同的状态方程, 有不同的混合规则, 可以参阅化工热力学相关文献。

② 均相混合物的热力学性质计算 设混合气体总物质的量为 n , 组分 i 的物质的量为 n_i , 则有:

$$n = \sum n_i \quad (1-8)$$

混合气体的总内能为 nU ，总熵为 nS ，总体积为 nV ，其中 U 、 S 、 V 分别为每摩尔混合物所具有的内能、熵、体积。对于开口系，混合气体的总内能可表示为如下函数：

$$nU = U(nS, nV, n_1, n_2, \dots, n_i, \dots) \quad (1-9)$$

上式的全微分：

$$\begin{aligned} d(nU) = & \left[\frac{\partial(nU)}{\partial(nS)} \right]_{nV, n} d(nS) + \left[\frac{\partial(nU)}{\partial(nV)} \right]_{nS, n} d(nV) + \\ & \sum \left[\frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{nS, nV, n_j \neq i} dn_i \end{aligned} \quad (1-10)$$

对于定组分的混合气体，其热力学基本关系有：

$$d(nU) = T d(nS) - p d(nV) \quad (1-11)$$

由此可得：

$$\left[\frac{\partial(nU)}{\partial(nS)} \right]_{nV, n} = T \quad (1-12)$$

$$\left[\frac{\partial(nU)}{\partial(nV)} \right]_{nS, n} = -p \quad (1-13)$$

因此：

$$d(nU) = T d(nS) - p d(nV) + \sum \left[\frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{nS, nV, n_j \neq i} dn_i \quad (1-14)$$

$$d(nH) = T d(nS) + (nV) dp + \sum \left[\frac{\partial(nH)}{\partial n_i} \right]_{nS, p, n_j \neq i} dn_i \quad (1-15)$$

$$d(nA) = -(nS) dT - p d(nV) + \sum \left[\frac{\partial(nA)}{\partial n_i} \right]_{T, nV, n_j \neq i} dn_i \quad (1-16)$$

$$d(nG) = -(nS) dT + (nV) dp + \sum \left[\frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T, p, n_j \neq i} dn_i \quad (1-17)$$

由 $nH = nU + p(nV)$ ，得：

$$d(nH) = d(nU) + p d(nV) + (nV) dp \quad (1-18)$$

代换 $d(nU)$ 得：

$$d(nH) = d(nU) + (nV) dp + \sum \left[\frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{nS, p, n_j \neq i} dn_i \quad (1-19)$$

与基本关系相比：

$$\sum \left[\frac{\partial(nH)}{\partial n_i} \right]_{nS, p, n_j \neq i} dn_i = \sum \left[\frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{nS, nV, n_j \neq i} dn_i \quad (1-20)$$

同理可得四个总性质对于组分量的偏导数彼此相等，定义为化学势 μ_i ：

$$\begin{aligned}\mu_i &= \left[\frac{\partial(nH)}{\partial n_i} \right]_{nS, p, n_j \neq i} = \left[\frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{nS, nV, n_j \neq i} = \\ &= \left[\frac{\partial(nA)}{\partial n_i} \right]_{T, nV, n_j \neq i} = \left[\frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T, p, n_j \neq i}\end{aligned}\quad (1-21)$$

化学位是状态函数，并且具有强度性质，常用的是以自由焐定义的化学位。化学位等于保持混合气体的温度、压力不变的条件下，在无限多的混合气体中加入 1mol i 组分时体系的自由焐变化值。以化学位表示的变组分混合气体热力学基本关系式：

$$d(nU) = Td(nS) - pd(nV) + \sum \mu_i dn_i \quad (1-22)$$

$$d(nH) = Td(nS) + (nV)dp + \sum \mu_i dn_i \quad (1-23)$$

$$d(nA) = -(nS)dT - pd(nV) + \sum \mu_i dn_i \quad (1-24)$$

$$d(nG) = -(nS)dT + (nV)dp + \sum \mu_i dn_i \quad (1-25)$$

对于燃气轮机压气机，通常处于稳定流动，压缩过程没有化学反应，组分不发生变化，因此可以认为是闭口系，此时， $dn_i = 0$ ，上式简化为定组分均相混合气体热力学基本关系式。

③ 理想气体混合物 理想气体混合物的热力学性质取决于组分的热力学性质及比例，若各组分全部处于理想气体状态，则其混合物也处于理想气体状态，具有理想气体的一切特性，因此可以把理想气体混合物看作气体常数和摩尔质量分别为 R_{mix} 和 M_{mix} 的某种假想理想气体。

混合理想气体各组分占据相同的体积 V ，满足理想气体状态方程：

$$p_i V = n_i RT \quad (1-26)$$

式中， p_i 为组分分压，满足道尔顿分压定律。

$$p_{\text{mix}} = \sum_i p_i \quad (1-27)$$

理想气体混合物摩尔分数：

$$x_i = \frac{n_i}{n_{\text{mix}}} \quad (1-28)$$

质量分数：

$$w_i = \frac{m_i}{m_{\text{mix}}} = \frac{M_i x_i}{\sum_i M_i x_i} \quad (1-29)$$

理想气体混合物的比焓：

$$h = \sum_i w_i h_i \quad (1-30)$$

式中， h_i 为组分在压力 p_i 和温度 T 时的焓值。

理想气体混合物的比热容：

$$c_p = \sum_i w_i c_{p,i} \quad (1-31)$$

式中， $c_{p,i}$ 为组分在压力 p_i 和温度 T 时的定压比热容。

理想气体混合物的密度：

$$\rho_{\text{mix}} = \sum_i \rho_i \quad (1-32)$$

式中， ρ_i 为组分在分压 p_i 和温度 T 时的密度。

(4) 多组分混合工质的部分冷凝

压气机的多组分混合工质中常常含有易液化的重组分。在中间冷却时，经过压缩的混合工质温度降低到入口温度范围，而压力基本维持不变，当温度低于部分某些组分在分压下对应的饱和温度时，组分常常出现部分冷凝，部分冷凝直接影响进入下一段的工质组分情况，因此下一段混合工质的摩尔质量和质量流量也会发生变化。

多组分混合工质部分冷凝可以通过理论值计算，设混合工质含有 c 种组分，摩尔流量为 F (kmol/h)，组分摩尔分数为 z_i ；温度为 T ，压力为 p ；气相流量为 V (kmol/h)，组分摩尔分数为 y_i ；液相流量为 L (kmol/h)，组分摩尔分数为 x_i 。

对处于相平衡的混合工质中的组分 i ，其热力学条件为气相逸度和液相逸度相等：

$$f_i^V = f_i^L \quad (1-33)$$

分析多组分工质部分冷凝的任务是在给定 F 、 z_i 、 T 、 p 的条件下，求取气相组分摩尔分数 y_i 和液相组分摩尔分数 x_i 。

相平衡方程：

$$y_i = K_i x_i \quad (1-34)$$