

基于天然气管网压力能回收的联合循环构思

王松岭¹, 论立勇¹, 谢英柏¹, 崔洪刚²

(1. 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003; 2. 温州发电有限责任公司, 浙江 温州 325602)

摘 要: 随着天然气大量应用及其相关技术的不断发展, 天然气管网的输送压力也越来越高, 蕴含巨大的压力能。本文提出一种回收天然气管网压力能的燃气蒸汽联合循环系统: 高压天然气通过在膨胀机内膨胀回收一部分能量, 承担部分压气机消耗功, 膨胀后的低温天然气用来依次冷却压气机进气和蒸汽轮机排气, 然后回收部分排烟余热。本文定性分析了该系统流程相关部分给联合循环带来的收益, 显示出提高联合循环效率和能源综合利用率的潜力。

关 键 词: 天然气管网; 压力能; 燃气蒸汽联合循环; 膨胀机

中图分类号: TK01 文献标识码: A

1 概 述

面对长期以来以煤炭为主的能源结构给生态环境造成的巨大影响, 我国制定了更合理的能源中长期发展规划和相关环境法规。作为清洁能源的天然气在一次能源消费中的比例将不断提高。根据国家十五规划, 2005 年天然气在我国能源结构中的比重要达到 5%, 预计到 2010 年将增长到 8%。与之对应, 我国天然气输送管网也得到了迅速发展。目前, 国家已把发展天然气远距离管道输送列入国家重点基础建设项目, 到 2010 年, 我国的天然气管道总长将达到约 7 000 km, 管道运输将成为继铁路、公路、水运、航空运输之后发展起来的第五大运输业^[1]。目前, 陕京线、西气东输、陕京二线和忠武线等已经或即将投入运营。

天然气管网的压力远远高于大气压力, 蕴藏有大量的压力能。天然气从高压管网进入低压管网时, 存在着很大的压力能损失。以西气东输管道为例, 2004 年即西气东输投入商业运行当年, 供气就已达 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2005 年, 预计供气量达 120×10^8

m^3 , 如此巨大的气量, 压力能的损失也是巨大的。本文提出了一种基于回收天然气管网压力能的燃气蒸汽联合循环, 高压天然气经过膨胀机膨胀, 回收一部分压力能后, 压力温度都降低, 然后用于冷却燃气轮机进气和汽轮机排气, 提高燃气轮机和蒸汽轮机出力, 最大限度地回收管网压力能。

2 天然气管网输送压力现状

世界上早期的输气管线压力仅为 2.5 MPa, 到了 20 世纪 70 年代, 压力大约为 6 MPa^[2]。目前, 西欧和北美地区的天然气管线压力普遍都在 10 MPa 以上, 像阿意输气管道最高出站压力达 21 MPa(穿越点处), 挪威 Statepipe 管线输气压力为 13.5 MPa, 新近建成的 Alliance 管道最大许用运行压力为 12 MPa。

在给定的输气量下, 采用高输气压力可以减小管径, 从而节省管材和施工费用; 小管径下可以增大壁厚, 提高管线安全性; 降低流速, 从而使摩阻减少, 降低运营成本。所以, 从世界范围来看天然气管网输送压力不断提高。表 1 所示为我国部分天然气管道的基本参数。

表 1 国内部分天然气管道参数

	直径/mm	输气压力/MPa
北京—石家庄输气管道	508	6.3
涩宁兰输气管道	660	6.4
忠武输气管道	711	6.4
陕—京一线输气管道	660	6.4
陕—京二线输气管道	1 016	10
冀宁联络线输气管道	1 016	10
西气东输管道	1 016	10

收稿日期: 2005-06-05; 修订日期: 2005-08-03

基金项目: 华北电力大学博士学位教师基金资助项目(93102011)

作者简介: 王松岭(1954-), 男, 河北博野人, 华北电力大学教授。

同欧美等发达国家相比, 我国天然气管道在设计、施工等方面还有一定的差距。近年来, 随着我国能源结构的调整, 天然气在我国一次能源消费中比例不断提高, 天然气开采和输运技术都发展很快, 输送管线压力也不断提高, 如当前西气东输管线和陕—京二线等一些管道的输气压力已达 10 MPa^[3], 与国外先进国家的差距正在不断缩小。

在当前天然气管道普遍采用大管径, 高压力的发展趋势下, 天然气管网蕴含的压力能也越来越高, 如果不回收这部分能量造成的浪费是巨大的。

3 天然气管网可用压力能

焓是某种能量在理论上能够可逆地转换为功的最大数量, 称为该能量中具有的可利用能, 利用焓分析法来评价天然气管网可以利用的压力能是比较科学的。

从热力学角度分析, 天然气管网可以看作一种开口系统。单位质量的稳定物流的焓焓为:

$$e_{x,h} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

式中: T_0 —环境温度; h_0 、 s_0 —物流在环境状态下对应的比焓和比熵; h 、 s —物流所在状态下的比焓和比熵。

根据热力学中熵的关系式:

$$\Delta S_{1-2} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

和开口系统稳定流动时焓焓的表达式可得:

$$\begin{aligned} e_{x,h} &= h - h_0 - T_0(c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0}) \\ &= h - h_0 - T_0 c_p \ln \frac{T}{T_0} + T_0 R \ln \frac{P}{P_0} \\ &= e_{x,\tau} + e_{x,p} \end{aligned} \quad (3)$$

$e_{x,\tau}$ 为温度焓:

$$e_{x,\tau} = h - h_0 - T_0 c_p \ln \frac{T}{T_0} \quad (4)$$

$e_{x,p}$ 为压力焓:

$$e_{x,p} = T_0 R \ln \frac{P}{P_0} \quad (5)$$

压力焓相当于工质等温流动时由于膨胀做出的技术功, 计算中假定天然气全部由甲烷构成, 取环境压力为 0.1 MPa, 环境温度为 20 °C, 不同输气管网压力下, 单位质量天然气具有的压力焓如图 1 所示。

在同一输气管网压力下, 当不同用户需求压力不同时, 能够回收的压力能也不同, 以西气东输管路为例, 管网压力为 10 MPa, 在不同压力需求的用户供气时能够回收的压力能如图 2 所示。

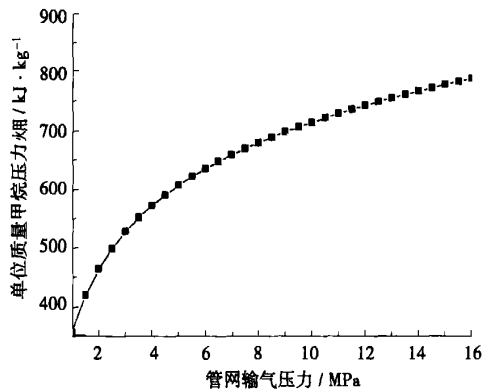


图 1 不同压力下单位质量天然气的焓

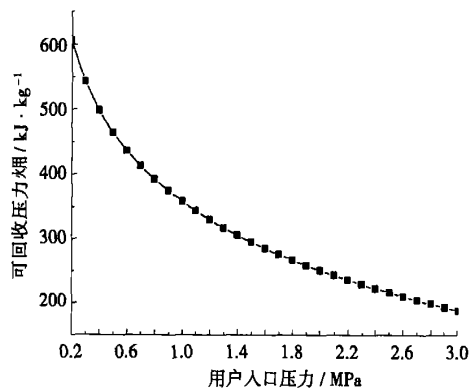


图 2 不同供气压力下管网的可用压力能

当管网压力为 10 MPa, 用户采用中压供气方式, 压力取 0.3 MPa^[4], 则可回收的最大压力能为 534.2 kJ/kg。西气东输干线管道设计输气量 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 如果取 0.1 MPa, 20 °C 时甲烷比容 $1.5 \text{ m}^3/\text{kg}$, 管路质量流量为 $80 \times 10^8 \text{ kg/a}$, 那么每年可回收的最大压力能为 $42\,736 \times 10^8 \text{ kJ}$, 相当于装机 489.2 MW 的电站一年的发电量。

由此可见, 天然气管网蕴含的压力能是相当大的, 如能采取适当措施进行回收, 将在很大程度上提高能源利用率和天然气管网运行的经济性。

4 基于天然气管网压力能回收的燃气—蒸汽联合循环

汽联合循环

该联合循环主要通过 3 个途径回收天然气输送管网压力能来提高循环效率, 从而提高能源的综合利用率, 系统流程如图 3 所示。

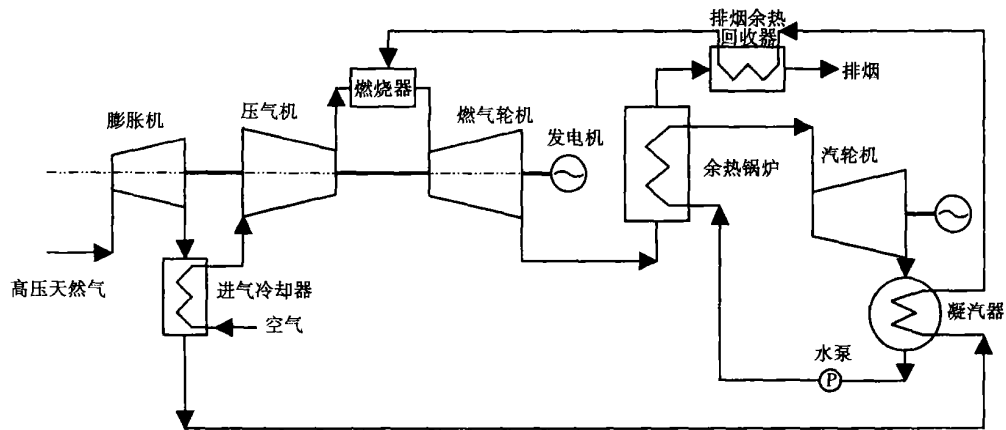


图 3 基于天然气管网压力能回收的燃气—蒸汽联合循环系统图

高压天然气首先通过膨胀机膨胀做功，膨胀后温度和压力都降低，然后通过空气进气冷却器，利用膨胀后低温天然气冷却进入压气机的空气，接着通过凝汽器，进一步吸收蒸汽轮机排气热量，最后经过排烟余热回收器进一步加热后送入燃烧室与从压气机进入的空气混合燃烧。

从以上流程中可以看出，回收天然气能量、提高联合循环的效率和能源的综合利用率主要通过 4 个部分完成：膨胀机部分、进气冷却部分、提高凝汽器真空部分和排烟余热回收部分。

4.1 膨胀机部分

高压天然气经过膨胀机膨胀做功，带动压气机工作，在一定程度上减少了燃气轮机消耗在压气机上的功，从而增大对外输出功，增加了发电量，通过膨胀回收能量的大小如上文所述。

4.2 进气冷却部分

根据燃气轮机变工况运行理论，当大气温度下降时，会使机组进气密度上升，进入压气机和燃气透平的空气质量增加，使得燃气轮机的出力随之上升；由热力学可知，气体温度愈低，其分子运动的速度也愈低，达到同样压比所需的压缩功也就愈小。在等熵压缩时，压气机比功与进气初温成正比^[3]：

$$W_c = c_p T_1 (\pi^{(k-1)/k} - 1) \quad (7)$$

式中： c_p —空气定压比热； T_1 —进气初温； π —压比。因此，进气温度越低，燃气轮机出力越大，压气机耗功越小，发电功率越高。

图 4 为 GE 公司提供的机组性能曲线。对于其它燃气轮机从中可以推断出热耗率、进气质量流量和动力输出与进气温度的定性关系大致如此。

目前，燃气轮机机组进气冷却主要采用压缩式

制冷、吸收式制冷、蓄冷以及直接接触水冷等方式，不但增加了额外投资和维修等费用，还需要消耗一定的能量。

与以上几种冷却方式相比，本文提到的方法更有优势。高压天然气经过膨胀机膨胀后温度和压力都大大降低，以初始状态为 25 °C(环境温度)和 10 MPa(西气东输干线压力)的天然气，全部按甲烷处理，并在理想状况下等熵膨胀到某一指定压力如 2 MPa 为例，膨胀后温度为 -80 °C 左右。通过换热器冷却压气机进气，不但具有更好的冷却效果，且减少了设备投资，不需消耗额外能量。

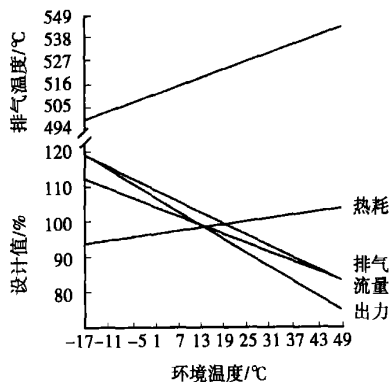


图 4 压气机进气温度与燃气轮机机性能关系^[9]

4.3 提高凝汽器真空部分

电厂凝汽器一般运行经验表明，凝汽器真空下降 1 kPa，汽轮机组热耗会增加 1.5%~2.5%，而且，凝汽器真空下降，会使排气温度升高，会使汽轮机轴承中心偏移，严重时会使机组产生振动^[7]。因此，应努力提高凝汽器真空。

文献[8]中分析了循环水进口温度与排气压力

的关系。

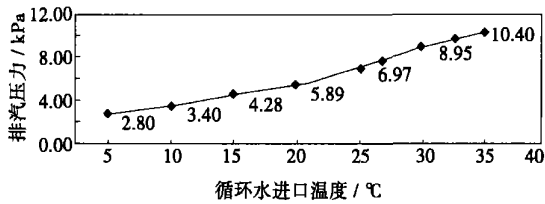


图 5 循环水进口温度与排气压力的关系

可以看出随着进口水温不断降低, 排气压力也在降低, 据有关资料机组排汽压力每升高 1 kPa, 相应地机组供电煤耗将升高约 1.65 g/(kWh)。据此按照循环水进口温度变化, 机组煤耗推算结果如表 2 所示^[8]。

表 2 循环水进口温度变化与煤耗的关系

循环水进口温度变化范围/°C	煤耗变化率/g·((kW·h)·°C) ⁻¹
5~10	0.20
10~15	0.29
15~20	0.37
20~25	0.53
25~30	0.65
30~33	0.80

以上分析看出, 循环水进口温度对循环效率的影响, 本文采用膨胀后的天然气通到凝汽器, 虽然不是循环水但道理是相同的, 对整个机组的影响结果也是相似的。通过进气冷却器后天然气温度仍然很低, 远远低于通常用于凝汽器冷却的循环水。因此, 使用膨胀后的天然气通到凝汽器中冷却排气, 将大大降低排气温度, 从而降低饱和压力, 提高凝汽器真空, 可以降低机组煤耗, 提高系统效率和出力。

4.4 排烟余热回收部分

这部分主要是根据空气与排气两次换热后的温度决定, 可以和旁路系统配合, 主要保证进入燃烧室的燃料温度比较合适。

以上是对基于天然气压力能的联合循环的定性分析, 图 3 也只是系统的示意图, 具体的管路布置要根据实际机组的参数进行热力计算确定, 对于凝汽器部分可以通过乙二醇溶液实现间接冷却, 不一定非要直接通入天然气直接冷却。

5 结 语

通过以上的定性分析可以看出, 如果将天然气

管线蕴藏的巨大压力能采用本文提出的系统方案进行回收, 不但可以避免天然气管线压力能的浪费, 还能提高燃气蒸汽联合循环的循环效率, 在很大程度上提高了能源的综合利用率, 在当前能源形势日趋紧张和提倡节约型社会的今天有一定的先进性。

参考文献:

- [1] 秦云. 我国将大力发展天然气远距离管道输送[J]. 能源工程, 1999(3): 44.
- [2] 潘家华. 西气东输工程[J]. 焊管, 2000, 23(3): 21-25.
- [3] 吴宏. 西气东输管道工程介绍(上)[J]. 天然气工业, 2003, 23(6): 117-122.
- [4] 臧子璇, 彭晓青. 城市燃气中压供气输配系统压力级制的浅析[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(4): 13-15.
- [5] 孔水源, 孔祥伟, 张秋耀. 燃气轮机进气制冷技术[J]. 燃气轮机技术, 1999, 12(3): 33-37.
- [6] 何语平, 祝耀坤. 采用进气冷却技术提高燃气轮机的出力和热效率[J]. 浙江电力, 2004(3): 25-29.
- [7] 郑李坤, 顾昌, 闫桂焕. 运行参数变化对凝汽器真空影响的探讨[J]. 汽轮机技术, 2002, 44(6): 362-364.
- [8] 翟培强. 凝汽器循环水进口温度变化对机组经济性影响的探讨[J]. 华中电力, 2002, 15(6): 52-54.

书 讯

吸附作用应用原理

该书由赵振国编著

本书全面地介绍了在气液、固气和固液界面上的吸附基本理论及应用条件、存在问题和近代发展, 并用实例讨论了吸附规律和影响吸附的因素。书中针对广为应用的活性炭、硅胶、分子筛等多种吸附剂, 着重分析了其表面性质、结构特点与吸附性质的关系, 重点介绍了吸附作用在研究固体表面分形性质、气体吸附分离、水处理、纳米粒子制备、表面活性剂在固液界面上的吸附胶团加溶和吸附胶团催化等方面的应用原理。

读者对象: 相关科技人员, 高等院校相关专业师生。

2005年9月出版

tive diagnosis result can be obtained through a comparison with the established rules. Then, with respect to the fault modes with the same qualitative features but different quantitative values appropriate quantitative information can be fed into the SDG in connection with a fuzzy theory. By calculating and comparing the subordination degree of the mode being diagnosed to a known fault mode a system fault can be determined. The test results of several case studies indicate that the method devised by the authors is feasible. **Key words:** sign directed graph, fault diagnosis, reasoning rules, qualitative model, quantitative analysis

不同材质花瓣形扁通道内翅换热管的实验研究 = **Experimental Study of Internally Finned Heat Exchange Tubes Made of Different Materials and with Petal-shaped Flat Channels** [刊, 汉] / LI Zhi (Institute of Civil & Refrigeration Engineering under the Harbin University of Commerce, Harbin, China, Post Code: 150028) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 624 ~ 627

Through an experimental method studied was the convective heat exchange and resistance-characteristics of internally finned heat-exchange tubes with petal-shaped flat channels. A fitting of the experimental correlation of convective heat exchange and resistance within the range of measured Reynolds number was carried out. Moreover, by employing the three criteria of equal mass flow rate, equal pump power and equal resistance compared was the heat transfer effectiveness of finned tubes and ordinary bare tubes when different materials were used. It has been found that the material used for the fins has a relatively great influence on heat-exchange intensification effectiveness. However, irrespective of the kinds of materials used, internally finned tubes with petal-shaped channels enjoy relatively high heat exchange effectiveness. The intensification effectiveness is especially conspicuous under the condition of a low Reynolds number. **Key words:** internally finned tube, experimental study, intensified heat transfer, fully developed zone

基于天然气管网压力能回收的联合循环构思 = **Combined Cycle System Concept for the Recovery of Pressure Energy of a Natural-gas Pipe Network** [刊, 汉] / WANG Song-ling, LUN Li-yong, XIE Ying-bai (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), CUI Hong-gang (Wenzhou Power Generation Co. Ltd., Wenzhou, China, Post Code: 325602) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 628 ~ 631

With the widespread application of natural gas and the incessant development of related technologies the transmission pressure of natural-gas pipe networks is becoming higher and higher, resulting in the accumulation of tremendous pressure energy. The authors have come up with a gas and steam combined cycle system for recovering the pressure energy of a natural-gas pipe network. Through the expansion of high-pressure natural gas in an expansion engine some portion of the energy is recovered to make up for a portion of the consumed work of a compressor. The low-pressure natural gas after expansion is used to cool consecutively the compressor inlet air and steam turbine exhaust steam followed by the recovery of some portion of the flue-gas waste heat. A qualitative analysis of the economic benefit created by the relevant portion of the system flow path for the combined cycle was conducted, exhibiting the high potential of enhancing the combined cycle efficiency and of utilizing energy in a comprehensive way. **Key words:** natural-gas pipe network, pressure energy, gas and steam combined cycle, expansion engine