

# 论燃气轮机在天然气输气管道上的选用和配套

陈仁贵

(塔里木石油勘探开发指挥部, 新疆 库尔勒 841000)

**摘 要:** 简要分析了天然气输气管道、天然气压缩机、燃气轮机的主要特性, 进而论述了在天然气输气管道中选用和配套燃气轮机时应该注意的一些问题。

**关 键 词:** 天然气输气; 压缩机; 燃气轮机

中图分类号: TE832 文献标识码: A

## 1 总论

燃气轮机在天然气输气管道上作为压缩机的动力装置, 已经占据了绝对统治的地位。在国外众多的大容量天然气输气管道中, 都无一例外地选择燃气轮机作为压缩机的动力装置。

但是, 燃气轮机的种类有许多种。到底哪种燃气轮机更适合在天然气管道上应用? 在设计和配套上应该注意哪些事项? 这里涉及到许多理论问题和实际问题。这主要考虑天然气管道、压缩机和燃气轮机的各自特征和要求。

## 2 天然气输气管道、压缩机和燃气轮机的主要特性

### 2.1 管道压降与管道长度不成线性关系

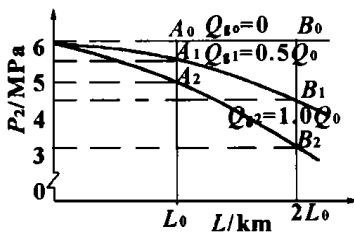


图 1 某输气管道流量  $Q_q$ 、压降  $P_2$ 、长度  $L_0$  关系图

由于天然气具有可压缩性, 并具有  $PV = RT$  的关系, 因此, 在同一直径的管道上, 虽然各处质量流速相等, 但体积流速不等。从而具有如图 1 所示的管道流量、压降与长度的特定关系。

管道在运行中, 输气量是不可能均衡的。特别是投产初期, 实际输气量与设计输气量相差很大, 有时

采取隔站输气的方式运行。为此, 必须将管道的这一特性与天然气压缩机和燃气轮机的变工况特性结合起来统一考虑。

### 2.2 输气管道的惯性

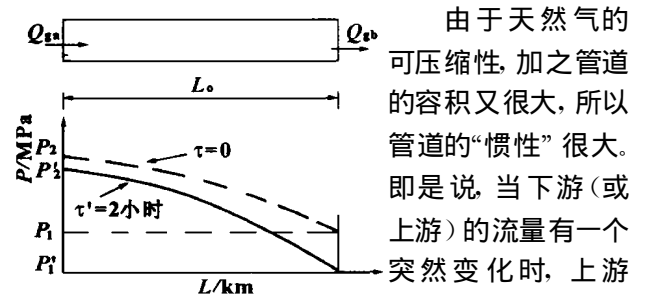


图 2 输气管道惯性示意图

由于天然气的可压缩性, 加之管道的容积又很大, 所以管道的“惯性”很大。即是说, 当下游(或上游)的流量有一个突然变化时, 上游(或下游)的管道压力  $P_2$ (或  $P_1$ ) 在同一时刻内几乎不会有

变化。只有经过一段很长的时间(约为 7 000 ~ 10 000 秒)上游的压力  $P_2$  或下游的压力  $P_1$  才会有一个变化, 其特性如图 2 所示。

为了充分利用管道的承载能力, 减少输气功率的消耗, 管道在运行中应保持出站压力  $P_2$  为一常数, 并以  $P_2$  为燃气轮机的主调节回路。当调节回路测得  $P_2$  有变量时, 燃机调节系统将立即调节供油量, 以改变燃机的转速, 以期达到新的平衡。燃气轮机调节系统的时间常数为 0.1 ~ 0.2 秒, 燃气轮机转子带动压缩机转子的时间常数一般为 15 ~ 20 秒, 它们的反映相当快。但是, 由于管道惯性的存在,  $P_2$  变化十分缓慢, 天然气压缩机将会沿“等压比线”运行, 造成燃气轮机功率猛然上升, 使燃机进入温度控制线。为避免发生这种情况, 在确定调节方案时, 应该考虑到管道的惯性。

### 2.3 天然气压缩机的主要特性

目前, 输气管道上通常采用离心式或轴流式压缩机。这类压缩机的做功过程都可视为“绝热压缩”过程。压缩机的输气量、压缩功、转速、排气压力的关系如图 3 所示。

结合图 3 分析: 在稳态情况下, 若压缩机转速从

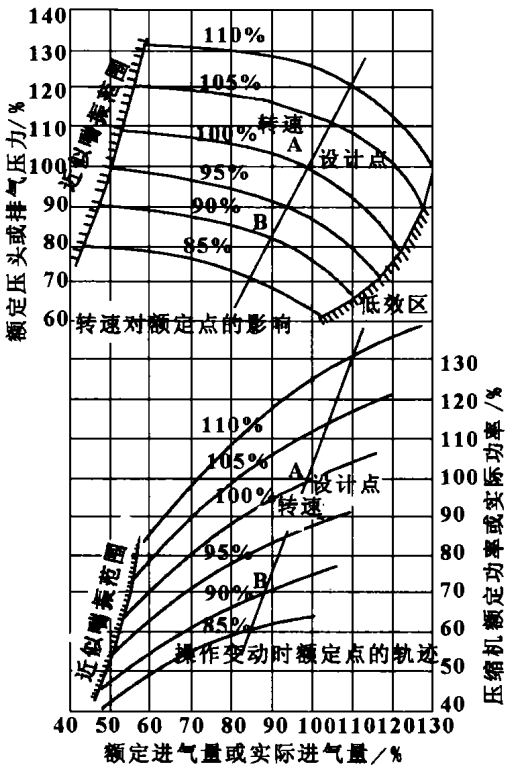


图 3 离心式压缩机的性能曲线

90% 升至 100% (B 点 → A 点), 流量从 90% 亦升至 100%, 但压缩功从 70% 升至 100%, 出口压力从 80% 升至 100%。由于输气管道“惯性”的影响, 在转速调节的初始阶段, 压缩机将沿“等压比线”运行一段时间, 这种瞬态的变化过程十分复杂。为保证输气管道能在较大的工作范围内稳定可靠地工作, 这就首先要求燃气轮机的功率、转速有尽可能大的调节范围, 而不产生超温、喘振等意外情况。

### 2.4 单轴燃气轮机的特点、特性

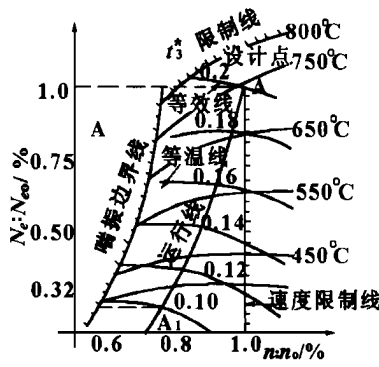


图 4 某单轴燃气轮机特性曲线图

围一般为  $0.7n_0 \sim 1.0n_0$ 。

单轴燃气轮机是使用最广泛的一种燃机。它结构简单、紧凑, 启动快, 运行维护很方便, 能充分体现燃气轮机的所有特点。它的特性曲线如图 4 所示。从图 4 可以发现:

(1) 由于受喘振线和最高燃气温度限制, 速度可调范围

(2) 随着功率的降低, 燃气轮机的热效率也在降低。如燃机在 100% 功率时热效率  $\eta_t$  为 20%, 在 32%  $N_{e0}$  时热效率  $\eta_t$  仅为 10%。

单轴燃气轮机适合于带动恒速或负荷变化不大的荷载。

### 2.5 分轴燃气轮机的特点、特性

由于分轴燃机动力透平转速不受燃气发生器转速的约束, 这不仅使动力透平转速可调范围变得宽广, 而且也改善了各种负荷下的热效率。

图 5 是某分轴燃气轮机的特性图。从图 5 可以发现: (1) 分轴燃气轮机转速的可调范围大大拓宽, 最佳工作范围可达  $0.5 \sim 1.0n_2$  (动力透平转速), 即使在  $0.5n_2$  转速下工作, 燃气轮机仍能发出 0.80 左右的额定功率 (见 B 点)。(2) 整个工作范围内热效率变化不大。如在设计点时热效率  $\eta_e = 0.30$ , 当负荷降至 10% 时, 仍有 0.15 的热效率 (见 C 点)。一般情况下, 分轴燃机空载时的燃料消耗率也比单轴燃机好得多。

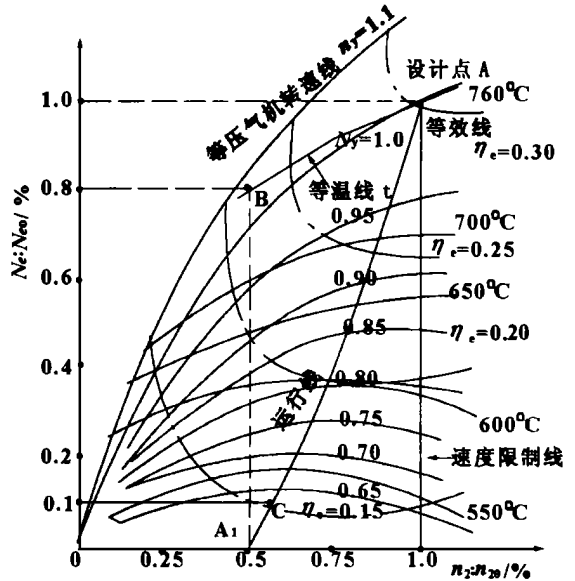


图 5 某分轴燃气轮机特性曲线图

与单轴燃气轮机相比, 分轴燃气轮机结构较为复杂。在同等功率情况下, 分轴燃机要比单轴燃机贵一些。尽管如此, 分轴燃气轮机还是得到愈来愈广泛的应用。

### 3 管道、压缩机、燃气轮机的联合运行

典型的天然气管道、压缩机和燃气轮机联合运行图如图 6 所示。图中 a-b-c-d-e-f-g-h 为设

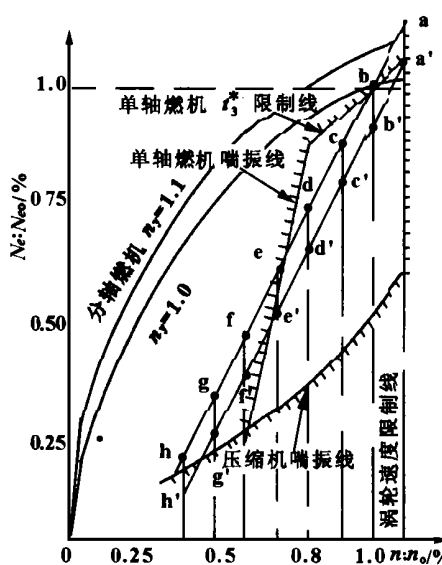


图 6 管道、压缩机、燃气轮机联合运行图

计运行线,即每站增压线,  $L = L_0$ ; a-b-c-d-e-f-g 为隔站增压线,即  $L = 2L_0$ ; 对于与分轴燃机功率相等的单轴燃气轮机压缩机组,它们的运行线为 b-c-d,

当实行隔站输气增压时,它们的运行线为 a-b-c-d-e (这时输气量会大幅度降低), 同样,对于分轴燃机驱动的机组,设计运行线的工作点为 b-c-d-e-f-g-h, 实行隔站增压时的运行线为 a-b-c-d-e-f-g. 很显然,分轴燃气轮机允许的工作范围比单轴燃机允许的工作范围要大得多,管道运行灵活、方便、经济。

### 4 燃气轮机在选用和配套上应注意的一些问题

#### 4.1 选用

通过以上分析,我们自然得出这样的结论:在天然气输气管道中,应优先选择分轴燃气轮机。而在输气量比较稳定,天然气的价格又比较低廉(如气井集输站)的地方,也可以选择单轴燃气轮机。

在管线末端,燃料价格较高,应尽量选择热效率高的燃气轮机,并考虑采用带回热器。在有热负荷的地区,应配置余热锅炉,充分利用燃气轮机尾气的余热。

#### 4.2 空气净化

空气的清洁程度对燃机的安全运行影响很大,会导致燃机喘振、功率损失、压气机压比降低和进气量减小。其原因如下:

(1) 沙尘以极高的速度(200~600 m/s)冲刷燃机叶片,使叶片很快磨损,有的沙粒将叶片打豁。空气密封装置也很快失效。

(2) 沙尘在燃机高温部件烧结结垢,改变了叶片的叶型,缩小了燃气流通面积。

(3) 涡轮导向器、叶片等热部件的微细空气冷却通道被堵塞,冷却效果变差,造成高温热部件烧蚀。

(4) 空气中微量的钠、钾有可能与燃料中微量的硫、钒在燃料过程中产生硫酸盐或钒的共熔体,这些物质会在透平的热通道产生严重的腐蚀。

因此,燃气轮机在设计配套时应十分重视空气的净化。目前,燃气轮机一般都配置“脉冲自清式空气过滤器”。要求对 10 μm (轻型燃机是 3~5 μm) 以上沙尘的过滤精度在 99.9% 以上。空气尘埃中含有钾、钠成分的盐碱地区应选用水洗式空气过滤器,这对降低空气中盐份效果显著。

#### 4.3 考虑大气温度对燃机运行的影响

燃机做功的能力与进气质量  $G_0$  有直接关系。大气温度愈高,燃机进气质量愈差,做功本领愈低。一般是大气温度每升高 1 °C,功率降低 1%。图 7、图 8 分别是单轴燃气轮机和分轴燃气轮机大气温度对燃机运行影响的关系曲线。

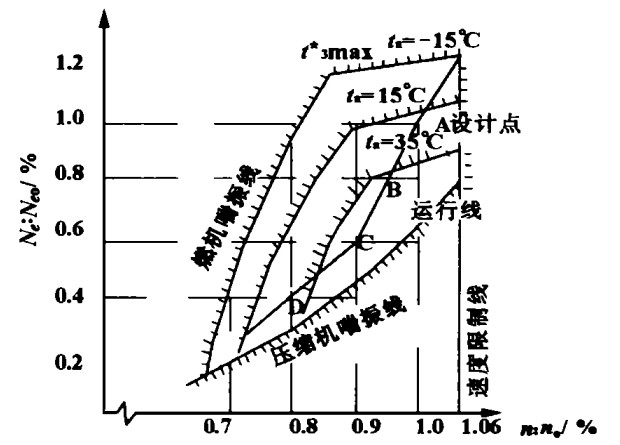


图 7 大气温度对单轴燃气轮机运行范围影响

图 7 中,当大气温度为 15 °C 时,燃机的可运行范围是 A-B-C-D 各点之间;当温度升高至 35 °C 时,燃机的运行范围为 B-C 之间。输气量上限、下限都受到影响。

图 8 中,当大气温度为 15 °C 时,燃机的可运行范围为 A-B-C-D-E 各点之间;当温度升高至 35 °C 时,燃机的运行范围为 B-C-D-E 之间。就是说,大气温度对分轴燃机只影响供气量上限,而不影响供气量下限。

为了避免大气温度对燃机可用功率的影响,目前一般是按大气最高温度时燃机的可用功率来选择燃

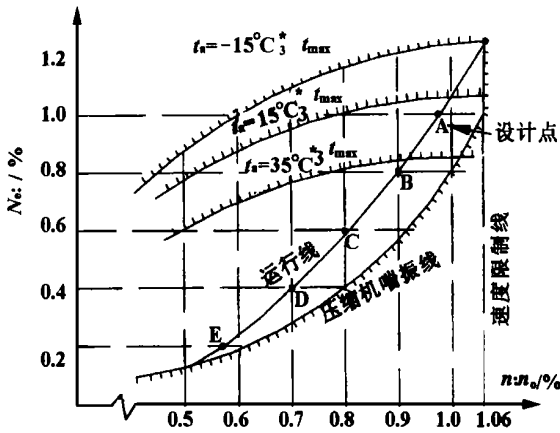


图 8 大气温度对分轴燃机运行范围影响

机。这显然要增加相当数量的基建投资。在低温季节时, 燃机的潜在功率得不到应用。

降低燃气进气温度是提高燃机在高温季节可用功率、扩大管道运行范围唯一经济有效的办法。具有代表性的方法有两种: 冷媒换热法和蒸发冷却法。

冷媒换热法的优点是降温幅度大, 不受气候条件的限制, 如无锡华达电厂的 AMS 系统。缺点是设备投资大, 运行成本高, 本身要消耗一定量的能源和水。

在干燥炎热的地区, 采用蒸发冷却法具有投资少、运行费用低、操作维护简单等一系列优点。特点是喷雾蒸发冷却技术, 进气损失小, 技术先进。

塔里木油田公司与 703 所合作研制成这种新颖的喷雾蒸发冷却装置, 得到了预期的效果。在一台模拟装置上进行了试验 (SOLAR 公司 TAURUS-60 机组)。试验结果表明, 当大气温度在  $30.2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度在  $20.6\% \sim 8.6\%$  范围内, 喷雾蒸发冷却器能使进气温度降至  $16.7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降幅为  $13.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 27.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对 TAURUS-60 燃机而言, 燃机出力提高  $11\% \sim 27.7\%$ , 热效率增加  $5\% \sim 10.6\%$ 。试验表明, 空气的干球温度愈高, 相对湿度愈小, 蒸发冷却效果愈好。

#### 4.4 燃料气供应系统

据统计, 以天然气为燃料的燃气轮机的非正常停机, 70% 以上都来自燃料气供应系统。而且常常发生在冬季。分析其原因, 这与燃料气供应系统的设计和配套有关。

按规定, 进入燃机的燃料气除不含水, 不含杂质外, 供气温度必须高于露点温度  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。绝对不允许含有液态烃。

在冬季, 当机组停运一段时间时, 管道内停止流动的燃料气的温度会慢慢下降。由于管道内的供气压力比较高, 这使燃料气中的重组份很快以液态析出, 并流到燃料气系统的最低端。这时如果启机, 这些液态烃会很快进入燃机点火系统和主燃料系统。同样体积液态烃的低热值是气态烃的低热值的数百至千倍。而且所有燃机在启机过程中对  $t_3$  的温度控制又特别严格, 所以过量的燃料供给常常使燃机因  $t_3$  温度高而启机失败。

燃料气中含有微量的液态烃, 不仅使燃机运行不稳, 而且极易造成事故。因为液态烃的燃烧时间比较长, 火焰常常延伸至燃烧器之外, 这很容易烧坏涡轮导向器等燃机热部件。

因此, 在设计燃料气供应系统时, 一定要设计自动排液装置、油雾分离器和功率足够大的燃料气加热器。同时, 在燃机停机时, 能自动关闭燃料气供气阀, 自动放空供气阀后燃料气系统内残存的燃料气。保证进入燃机的燃料气在任何情况下都不含液, 温度始终在露点以上。

#### 4.5 站控和集中控制系统

理论和实践表明, 为了保证整个输气系统经济合理的运行, 在建立输气压缩站的同时, 应该配套先进合理的站控系统 (SCS) 和集中控制系统 (DCS)。该系统的设计和使用效果是基于以下两个基本条件:

(1) 各种运行参数和物性参数必须准确, 并有一个合理的可变范围, 以此确定接口信号的种类、数量和型式;

(2) 压缩机和燃气轮机在各自的工作范围内运行特性的变化, 以及这种变化对邻近站 (或部分输气系统) 的影响。

很显然, 这是一个十分复杂而庞大的软件工程, 应该由专业的软件公司来设计。这种设计除有软件工程师外, 更重要的是要有工艺工程师和设备工程师参加。应该先建立起数学模型, 在计算机上先模拟运行一段时间, 与管线的实际运行结果进行比较。经过不断修改、不断优化, 最后再投入运行。

#### 参考文献:

- [1] 焦树建, 倪维斗. 燃气轮机 [M]. 北京: 电力出版社, 1978.
- [2] 朱行健, 王雪瑜. 燃气轮机工作原理及性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.

(复 编辑)

direct-flow slit type burner. The 360 MW boiler is a product of French Stein Co. With the help of a hot-wire anemometer the velocity distribution of a flow field in the furnace was measured and the flow field diagram of W-shaped air flow in the furnace under various operating conditions obtained. An analysis has been performed with respect to the following: the law of air flow velocity distribution of the flow field under different operating regimes, the filling fullness of air within the furnace, the air flow path, velocity excursions at the furnace outlet, etc. Also studied are the in-furnace aerodynamic field characteristics and their variation law and mechanism along with a measurement of flame short circuiting of the W-shaped flame boiler and the velocity excursions at the furnace outlet. **Key words:** W-shaped flame, boiler, flame short circuiting, velocity excursion, cold-state model test, aerodynamic field

水平管道细粉高浓度分层流动阻力特性的试验研究 = **Experimental Research of the Resistance Characteristics of High-concentration Fine Powder Stratified Flow in a Horizontal Pipe** [刊, 汉] / Qiu Peng-hua, Chen Li-zhe, Wang Hong, *et al* (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —23 ~ 25, 72

With a progressively better understanding of the advantages of a high-concentration fine powder conveying system the latter has recently become an object under extensive study by numerous scholars. A stratified flow in a horizontal pipe represents the most important form of high-concentration powder transport flow. In view of this the study of its resistance characteristics is of great significance. On the basis of a review of their work in this area over the past fifty years the authors have analyzed the merits and demerits of empiric formulas presented by various scholars. Through a series of tests on a test rig of high-concentration pneumatic conveying system, deduced is a formula for calculating the resistance characteristics of a high-concentration fine powder stratified flow in a horizontal pipe. An error analysis indicates that the above-mentioned formula can well meet the relevant requirements of general engineering design. **Key words:** pneumatic transport, hydrodynamic characteristics, resistance characteristics, gas-solid two-phase flow

论燃气轮机在天然气输气管道上的选用和配套 = **The Selection of Gas Turbines for Use in a Natural Gas Transmission Pipeline and the Supply of Necessary Supporting Auxiliaries** [刊, 汉] / Chen Reng-gui (Tarimo Petroleum Exploration and Development Command Headquarters, Kurlu City, Xingjiang Autonomous Region, China, Post Code: 841000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —26 ~ 29

A brief analysis was conducted of the major features of natural gas transmission pipelines, natural gas compressors and gas turbines. On this basis some problems are highlighted, which merit special attention in the course of the selection of gas turbines for use in natural gas transmission pipelines and the appropriate provision of necessary supporting auxiliaries. **Key words:** natural gas transmission, compressor, gas turbine

新模式热电联产供热系统用热终端高效换热器的分析 = **The Analysis of a High-efficiency Heat Exchanger at the Heat User End for a New Mode of Cogeneration Heat Supply System** [刊, 汉] / Qiu Lin (Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, Post Code: 100044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —30 ~ 32

The present paper has proposed for a new mode of cogeneration low-grade heat supply system a high-efficiency heat exchanger at heat user's end, which is composed of a new type of fan coil tubes. A discussion and analysis was conducted from the perspective of technical feasibility, energy-saving potential and cost-effectiveness. The aim of the above is to provide a theoretical basis for the implementation of a new mode of cogeneration heat supply system. **Key words:** co-production of heat and electrical power, low-grade heat supply, exergy efficiency

300 ~ 3 000 K 水蒸气红外辐射谱带模型参数 = **Infrared Radiative Spectral Band-model Parameters for Water Vapor in the 300 - 3000 K Temperature Range** [刊, 汉] / Dong Shi-kui, Tan He-ping, Yu Qi-zhang, Liu Lin-hua