# 天然气城市门站调压过程的㶲分析*

郑 志[1]　王树立[1]　王帮华[2]
1.江苏工业学院·江苏省油气储运技术重点实验室　2.中海广东天然气有限责任公司

**郑志等**.天然气城市门站调压过程的㶲分析.天然气工业,2009,29(5):104-106.

**摘　要**　长距离高压管输天然气送至终端用户前,需经城市门站调压,满足一定压力等级后方可进入城市燃气输配管网。传统的节流阀工艺存在着巨大的过程㶲损,且需辅以电伴热才能维持正常运行。为了提高管网运行的经济性和能源的利用效率,对调压过程进行了能量分析,指出在完成相同调压任务的情况下,采用透平膨胀机流程较之节流阀流程,可显著减少过程㶲损、提高系统㶲效率,具有明显的技术优势;进而提出了天然气管网调压过程物理㶲回收利用流程,将压力能(压力㶲)用于发电,将调压工艺冷能(温度㶲)用于制冷循环,以实现按质用能、能尽其用。

**关键词**　㶲分析　天然气　城市门站　能量回收　透平膨胀机
DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.05.025

长距离高压管输天然气在送抵终端用户前,需经城市门站调压,满足一定压力等级后方可进入城市燃气输配管网[1-2]。传统方法是通过节流阀膨胀降压[3],在运行过程中,管道、阀件外壁常形成厚实的冰冻层。为避免工况恶化而影响正常管输,需采用电伴热,此举需耗费大量的电能。为此,在能量分析法的基础上,对调压过程进行了㶲分析,诊断出能量利用的薄弱环节,提出了针对性的节能改进措施。

## 1　㶲的基本概念及㶲分析的意义

### 1.1　㶲的基本概念

一定形式的能量或一定状态的物质,经过完全可逆的变化过程(传热、传质、化学反应等)后,达到与环境完全平衡的状态,这个过程中该能量或物质所能做的最大可用功称为㶲[4]。

在稳定状态下,㶲是个确定的参数。能量系统中任一点的㶲都可由其他参数算出,这些参数可通过对系统的每个过程建立能量平衡关系来确定[5]。实际能量系统中不可避免地存在着摩擦、温差等,会引起能的品质贬值,产生㶲损[6]。将㶲损的概念应用于能量系统可得平衡方程[7]:

体系中的㶲积累=进入体系的㶲-离开体系的㶲-体系中的㶲损失　(1)

㶲效率=体系输出的有效㶲/体系输入的有效㶲=1-㶲损/体系输入的有效㶲　(2)

### 1.2　㶲分析的意义

运用㶲和㶲损失的概念,对能量利用和转化过程中㶲的传递、转化、利用、损失等进行热力学分析,可揭示出能量利用体系中㶲损失的部位、大小和原因,为改善过程的能量利用效率指出方向和途径。现行的分析方法有基于热力学第一定律的能量分析法和基于以热力学第二定律为主的㶲分析法。

能量分析法利用能量数量上的平衡,揭示了能量数量的利用程度,反应了能量数量的"外部损失"。㶲分析法除了考虑量的利用程度外,还考虑了质的匹配问题,将不同形式、不同量和质的能量统一用做功能力来表示,揭示出系统内部存在的能量质的贬值[8]。

### 1.3　稳定流动物质的物理㶲和焓㶲

稳流物质在只跟环境交换热量的情况下,从任意状态可逆变化到不完全平衡环境状态时所能做出的最大有用功,称为稳流物质的物理㶲。将稳流能量方程从任意状态到环境状态进行积分[9],可得稳流物质的物理㶲:

$$E_x = W_{U,\max} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) + \frac{1}{2}mC^2 + mgZ \quad (3)$$

式中:$H$ 为焓,kJ;$H_0$ 为环境状态焓,kJ;$T_0$ 为环境温度,K;$S$ 为熵,kJ/K;$S_0$ 为环境状态熵,kJ/K;$m$

*本文受到江苏省教育厅基金项目(编号:04KJB440030)和江苏省科技厅基金项目(编号:BS2007028)的资助。

**作者简介**:郑志,1983年生,硕士研究生;主要从事天然气输送技术的研究。地址:(213016)江苏省常州市江苏工业学院(白云校区)油气储运技术重点实验室。电话:15961476799。E-mail:zheng_zh@tom.com

为质量，kg；$C$ 为速度，m/s；$g$ 为重力加速度，m/s$^2$；$Z$ 为高度，m。

单位质量稳流物质的“比物理烟”为：

$$e_x = w_{u,\max} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{1}{2}C^2 + gZ \tag{4}$$

式中：$h$ 为比焓，kJ/kg；$h_0$ 为环境状态比焓，kJ/kg；$s$ 为比熵，kJ/(kgK)；$s_0$ 为环境状态比熵，kJ/(kgK)。

当不考虑或可忽略不计宏观动能和位能[10-11]时，稳流物质的物理烟可用稳流物质总能量中的焓来进行计算，由式(4)可得在工程中应用最多的单位质量稳流物质的“(比)焓烟”的计算式：

$$e_{x,h} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \tag{5}$$

根据热力学中熵的关系式得：

$$e_{x,h} = h - h_0 - T_0\left(c_p \ln\frac{T}{T_0} - \frac{R}{M}\ln\frac{p}{p_0}\right) = \left(h - h_0 - T_0 c_p \ln\frac{T}{T_0}\right) + T_0\frac{R}{M}\ln\frac{p}{p_0} = e_{x,T} + e_{x,p} \tag{6}$$

式中：$c_p$ 为定压比热，kJ/(kgK)；$p$ 为压力，MPa；$R$ 为摩尔气体常数，8.314 kJ/(kmolK)；$M$ 为气体摩尔质量，g/mol。

因此稳流物质的焓烟可分解为在压力 $p$ 情况下系统与环境之间因热不平衡而具有的温度烟 $e_{x,T}$ 和在环境温度 $T_0$ 时系统与环境之间因力不平衡而具有的压力烟 $e_{x,p}$ 两部分。

天然气管网是一种典型的开口系统[12]，通过焓烟分析发现天然气输配过程中蕴含着巨大的压力烟[13]和优质的温度烟[14]。从能否直接转换为功的角度来说，压力烟较温度烟更为宝贵和重要，因为其本身可直接转换为功，同时为温度烟的转换创造条件。

## 2　调压过程的烟分析

### 2.1　节流阀流程的烟分析

考虑到电伴热输入的热量烟 $e_{x,q}$，节流阀的烟平衡方程可表示为：

$$e_{x,h进} + e_{x,q} = e_{x,h出} + e_{x,h损} \tag{7}$$

由于绝热节流焓值不变，即 $h_{进} = h_{出}$，$e_{x,q} = \dfrac{PL}{\rho_g q_v}$（式中，$P$、$L$ 分别为电伴热带的功率和长度，$\rho_g$、$q_v$ 分别为天然气的密度和体积流量），故节流阀的烟损可表示为：

$$e_{x,h损} = e_{x,q} + T_0(s_{出} - s_{进}) \tag{8}$$

烟效率为：$\eta_x = 1 - \dfrac{e_{x,h损}}{e_{x,h进} + e_{x,q}}$　　(9)

### 2.2　膨胀机流程的烟分析

节流阀调压虽能满足工艺要求，但蕴藏在高压天然气中的压力烟和温度烟得不到合理利用[15]。能量回收装置——透平膨胀机[16-17]利用气体体积膨胀向外输出机械功，在气体温度降低过程中获得冷量[18]，可显著减少过程烟损，对节约能源和提高天然气管道烟效率有着重大的现实意义。

膨胀机烟平衡方程为：

$$e_{x,h进} = e_{x,h出} + W_e + e_{x,h损} \tag{10}$$

式中：$W_e$ 为膨胀机的输出功。

考虑稳流工质的焓烟表达式，其烟损可表示为：

$$e_{x,h损} = (h_{进} - h_{出}) + T_0(s_{出} - s_{进}) - (h_{进} - h_{出})\eta = (h_{进} - h_{出})(1 - \eta) + T_0(s_{出} - s_{进}) \tag{11}$$

式中：$\eta$ 为膨胀机的绝热效率。

烟效率为：$\eta_x = 1 - \dfrac{e_{x,h损}}{e_{x,h进}}$　　(12)

## 3　实例与数据分析

以南方某城市门站为研究对象，选取夏、冬季代表性工作日，对其运行参数进行计算分析。

### 3.1　基础数据处理

3.1.1　气源的物性参数(详见表 1)

表 1　天然气组分及其摩尔分数表　　%

| 组分 | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_3H_8$ | $C_4H_{10}$ | $CO_2$ | $N_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 摩尔分数 | 96.12 | 1.37 | 0.26 | 0.12 | 1.65 | 0.48 |

3.1.2　门站的运行参数

该站 8:00 开机，22:00 关机，输气量 34 000 m$^3$/h，每隔 2 h 对站内运行参数(进出站温度、压力等)进行 1 次记录。用绝热效率为 85% 的透平膨胀机代替原有流程中的节流阀，在进站温度、压力不变的条件下，完成相同的调压任务，使出站压力稳定在 2.50 MPa。整理后的数据列于表 2 中。

表 2　门站运行参数表

| 流程 | 状态 | 夏季 | | 冬季 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 温度(K) | 压力(MPa) | 温度(K) | 压力(MPa) |
| 节流阀 | 进站 | 300.90 | 5.52 | 297.40 | 5.91 |
| 膨胀机 | 出站 | 285.65<br>256.71 | 2.50 | 279.01<br>250.87 | 2.50 |
| | 环境 | 293.00 | 0.101 325 | 273.00 | 0.101 325 |

### 3.2　计算结果及其分析

计算结果详见表 3。

表 3　计算结果表

| | 㶲损(kJ/kg) | | 㶲效率(%) | |
|---|---|---|---|---|
| | 夏季 | 冬季 | 夏季 | 冬季 |
| 节流阀流程 | 358.339 | 584.712 | 38.05 | 24.20 |
| 膨胀机流程 | 41.636 | 43.069 | 92.80 | 92.65 |

通过分析表 3 中的数据,可以得出以下认识:

1)在相同的工况下,采用透平膨胀机代替原有调压流程中的节流阀,能使过程㶲损失大为减少,㶲效率显著提高;门站单位运行时间可回收可用能 7 554 760 kJ/h(夏季)和 12 920 569 kJ/h(冬季),若将其转化为电能上网,可创造巨大的经济效益。

2)调压过程中㶲的利用情况受外界环境温度的影响。较之夏季,冬季采用膨胀机代替节流阀不仅可利用更多数量的㶲,而且在其利用程度上增幅也更大。

## 4　结论与展望

通过对传统节流阀调压流程和带膨胀机的调压流程进行㶲分析,发现透平膨胀机在减少㶲损、回收可用能方面的卓越性能。鉴于此,针对调压流程作出节能改进优化,以回收利用高压管网的压力㶲和温度㶲,提高能源利用率。

图 1 给出了一种典型的回收利用天然气管网调压过程物理㶲的工艺流程:上游来气经净化、脱水、预冷后,进入透平机中膨胀降压,输出机械功驱动同轴发电机,产生的电能可供站内生产、生活使用,或供入电网,或用于分布式制氢;膨胀制冷的低温天然气与载冷剂换热,可为空分、低温粉碎、轻烃回收等制冷循环提供冷量而使调压工艺冷能得以回收;复热后的天然气供入城市燃气系统。目前,冷能利用项目大都是单一用户,且存在"低温高用",今后应在采用国外成熟单项技术的基础上,自主创新,开发温度对口、梯级利用的调压工艺冷能集成优化利用技术。

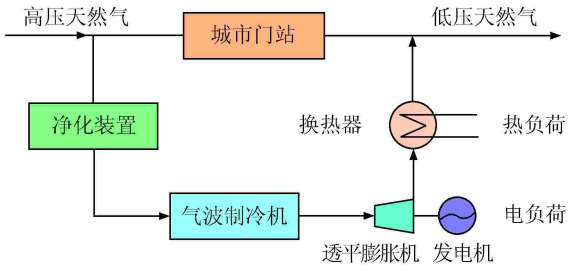


图 1　管网调压物理㶲回收利用流程图

参　考　文　献

[1]郑志,王树立,王婷,等.天然气输配过程流体压力能回收技术现状与展望[J].天然气与石油,2009,27(1):11-15.

[2]王树立,赵会军.输气管道设计与管理[M].北京:化学工业出版社,2006:58-69,239-248.

[3]JAROSLA　POZIVIL. Use of expansion turbines in natural gas pressure reduction station [J]. Acta Montanistica,2004,9(3):258-260.

[4]郑宏飞.㶲　一种新的方法论[M].北京:北京理工大学出版社,2004:8-39,46-48.

[5]黄志潜.能量系统的㶲分析方法[M].北京:机械工业出版社,1984:39-40,94-112.

[6]MAHMOOD FARZANEH-GORD,SHAHRAM HASHEMI,MEISAM SADI.Energy destruction in Iran's natural gas pipe line network[J].Energy Exploration & Exploitation,2007,25(6):393-406.

[7]甄志,崔晓钢,陈鸿伟,等.㶲分析方法及在工程领域中的应用[J].电力科学与工程,2003,3(1):62-65.

[8]童钧耕,吴孟余,王平阳.高等工程热力学[M].北京:科学出版社,2006:45-61.

[9]吴存真,张诗针,孙志坚.热力过程㶲分析基础[M].杭州:浙江大学出版社,2000:17-49,80-120.

[10]闻菁,徐明仿.天然气管网压力能的回收及利用[J].天然气工业,2007,27(7):106-108.

[11]论立勇,谢英柏,杨先亮.基于管输天然气压力能回收的液化调峰方案[J].天然气工业,2006,26(7):114-116.

[12]王松岭,论立勇,谢英柏,等.基于天然气管网压力能回收的联合循环构思[J].热能动力工程,2005,20(6):628-632.

[13]广州市煤气公司.利用天然气压力能的方法[P].中国:200810026979.4,2008-08-20.

[14]熊永强,华贲,罗东晓,等.天然气管网压力能用于废旧橡胶粉碎的制冷装置[J].现代化工,2007,27(1):49-52.

[15]JESSE D,MADDALONI,ANEREW M. Natural gas exergy recovery powering distributed hydrogen production [J]. Hydrogen Energy,2007,32(5):557-566.

[16]顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,等.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2003:18-20,87-88,185-188.

[17]中国百科网.通用机械:膨胀机[EB/OL].http://www.chinabaike.com/article/316/408/2007/20070325102737.html,2007-03-25.

[18]郑志,王树立,石清树,等.城市天然气门站调压过程中工艺冷能的回收利用[J].长江大学学报:自然科学版,2008,5(4):162-164.

(修改回稿时间　2009-03-25　编辑　何　明)