

# 天然气加气站压缩机组效率的计算方法

徐秀芬<sup>1</sup> 李泓霏<sup>1</sup> 刘国豪<sup>2</sup>

1. 东北石油大学机械科学与工程学院 2. 中国石油天然气股份有限公司管道分公司管道科技研究中心

**摘 要** 电驱往复压缩机是天然气加气站的主要耗能设备,也是加气站开展节能降耗工作的重点所在。加气站压缩机效率是合理表征、科学评价加气站能效水平的关键指标之一,但天然气处理和输送系统中通用的压缩机效率测试和计算方法仅适用于压缩机出口压力恒定的工况,并不适用于加气站压缩机出口压力和温度实时变化的工况。为此,根据热力学理论,采用焓差法计算压缩机输出的有效总能量,用输出的有效总能量与机组耗电量之比计算加气站压缩机的平均效率,并采用该方法对加气站压缩机进行现场测试与计算。研究结果表明:①加气站压缩机效率理论计算方法虽然较为精确,但可操作性较差,现场测试时几乎无法操作;②该加气站压缩机平均效率的计算方法具有所需测试参数少、计算过程简单、可操作性强等优点,更加适用于现场测试和工程应用。结论认为,相关监测部门可依据该计算方法来测试、计算、评价加气站压缩机的能效水平,为加气站制订效率提高方案提供理论基础和技术支持,从而加快推进加气站的节能降耗工作。

**关键词** 天然气加气站 压缩机效率 电驱往复压缩机 加气站节能 REFPROP 节能降耗 现场测试

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.11.014

## A calculation method of compressor set efficiency at a natural gas filling station

Xu Xiufen<sup>1</sup>, Li Hongfei<sup>1</sup> & Liu Guohao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Pipeline Technology Research Center, PetroChina Pipeline Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 39, ISSUE 11, pp.105-111, 11/25/2019. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** An electric-driven reciprocating compressor set is the main energy-consuming equipment of a natural gas filling station, and the efficiency of a compressor set is one of the key indicators in reasonably characterizing and scientifically evaluating the energy efficiency level of the gas filling station. As the general compressor set efficiency tests and calculation methods for a natural gas processing and transportation system is only applicable to the working conditions with constant compressor outlet pressure, but not to the working conditions of a gas filling station with real-time changes in compressor outlet pressure and temperature. In this regard, this paper developed a new method for calculating the compressor set efficiency at a natural gas filling station. According to the theory of thermodynamics, the total effective output energy of a compressor set is calculated using the enthalpy potential method, and the average efficiency of a compressor set at a gas filling station is calculated based on the ratio of total effective output energy to energy consumption of the compressor set. Then, this method was applied to a compressor set of a gas filling station for field testing and calculation verification. And the following research results were obtained. First, the traditional theoretical method for calculating the efficiency of a compressor set at a gas filling station is relative accurate, but it is of poor operability and can be hardly operated during field testing. Second, the new method for calculating the average efficiency of a compressor set at a gas filling station is advantageous with fewer test parameters, simple calculation process and strong operability, and it is more suitable for field testing and engineering application. In conclusion, the relevant departments can apply this method to calculate and evaluate the energy efficiency level of a compressor set at a gas filling station. The research results provide a theoretical basis and technical support for formulating the efficiency improvement scheme of a gas filling station so as to accelerate the energy saving and consumption reduction work of gas filling stations.

**Keywords:** Natural gas filling station; Efficiency of compressor set; Electric-driven reciprocating compressor set; Energy saving of a gas filling station; REFPROP; Energy saving and consumption reduction; Field testing

**基金项目:** 石油天然气行业标准制订项目《天然气加气站耗能设备能耗测试和计算方法》《国家能源局综合司关于下达 2018 年能源领域行业标准制(修)订计划及英文版翻译出版计划的通知》[国能综通科技(2018)100号](编号:能源 20180205)。

**作者简介:** 徐秀芬, 1966 年生, 教授, 博士; 主要从事油气田机械采油、注水以及地面集输系统的节能理论和节能技术方面的研究工作。地址:(163318) 黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街 99 号。ORCID: 0000-0002-3593-4650。E-mail:1538937270@qq.com

## 0 引言

对天然气加气站的总体能耗进行分析发现,电驱往复压缩机(天然气加气站)和潜液电泵机组(液化天然气加气站)在整个加气站工艺过程中的能耗最大。压缩机效率和潜液电泵机组效率作为评价这两种设备能效水平的重要指标<sup>[1-2]</sup>,许多专家都曾对其进行了深入研究和探讨,其中潜液电泵机组效率通常利用泵流量、扬程、重力加速度的乘积与电动机输入功率的比值进行计算<sup>[3]</sup>,目前这种方法在行业内被广泛采用,几乎没有异议;而对于加气站压缩机效率,至今仍未有准确、可靠、操作性强的计算方法<sup>[4]</sup>。因此,在明确传统理论计算方法的基础上,首次提出压缩机平均效率(也称压缩机效率)的计算方法,并对加气站的多台压缩机进行了测试与计算,以验证该方法的准确度和可靠性,期为相关部门对压缩机效率的计算和监测提供依据。

## 1 压缩机组的精确效率计算

压缩机的指示功是指压缩机中直接消耗于气体的功,即由示功器记录的压力-容积图所对应的功<sup>[5]</sup>。通常压缩机的实际示功图很复杂,很难直接得到计算公式,理论上可采用机械示功器、电子示功器及计算机采集数据绘制指示图的方法得到压缩机的示功图<sup>[5-6]</sup>,然后利用求积仪或按式(1)~(3)的计算方法计算,得到压缩机的指示功率。压缩机每转的指示功为:

$$W_k = \sum_{i=1}^m p_i A (S_{i+1} - S_i) / 1000 \quad (1)$$

式中  $W_k$  表示压缩机每转的指示功, kJ;  $p_i$  表示第  $i$  个时刻压缩机气缸内的压力, Pa;  $A$  表示压缩机活塞面积,  $m^2$ ;  $S_i$ 、 $S_{i+1}$  表示第  $i$ 、 $i+1$  个时刻压缩机活塞位移, m;  $m$  表示压缩机的一个循环过程按时间被平均划分的份数。

压缩机的指示功率为:

$$P_k = W_k n / 60 \quad (2)$$

式中  $P_k$  表示压缩机指示功率, kW;  $n$  表示压缩机转速, r/min。

压缩机组效率按下式计算:

$$\eta_{jq} = \frac{P_k}{P_d} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $\eta_{jq}$  表示压缩机组效率;  $P_d$  表示压缩机组输入功率, kW。

天然气加气站压缩机的特殊之处在于,因储气设施内的压力随压缩机的工作而不断增大,导致压缩机每转的指示功率不完全相等,且压缩机上通常不加装活塞的位置传感器和缸内压力传感器,要准确测试和计算压缩机的指示功率十分困难。因此,这种计算方法在现场测试中较难操作,需研究探索更为简便、准确的方法来对压缩机组的输出能量进行计算。

## 2 压缩机组的平均效率计算

当压缩机对气体做功,将气体注入加气站储气设施(包括车载储气瓶组、埋地储气瓶组和储气井)时,储气设施内的原有气体也会因新注入的高压天然气而有能量的增加。因此,压缩机组输出能量不仅包括储气设施内新增气体携带的能量,还应包括储气设施内原有气体能量的增加值。在计算过程中,首先应确定测试阶段内储气设施内的新增气量以及启动压缩机前储气设施内的原有气量,根据压缩前后气体的焓差<sup>[7]</sup>,计算得到储气设施内所有气体总能量的增加值,即为压缩机组的输出能量。压缩机组的输出能量与耗电量的比值即为该压缩机组的平均效率。

### 2.1 测试阶段内的新增气量

测试阶段内的新增气量是指在测试阶段内加气母站槽车气瓶的新增加气量,或标准站、机械子站及液压活塞子站压缩机组的通过气量。

压缩机启机时储气设施中原有气体的状态方程为:

$$p_1 V_d = Z_1 n_1 R T_1 \quad (4)$$

式中  $p_1$  表示启机时储气设施中天然气的绝对压力, Pa;  $V_d$  表示储气设施的设计容积,  $m^3$ ;  $Z_1$  表示启机时储气设施中气体的压缩因子;  $n_1$  表示启机时储气设施中存留气体的量, mol;  $R$  表示摩尔气体常数,数值约为  $8.3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T_1$  表示启机时储气设施中气体的温度, K。

储气设施中原有的  $n_1 \text{ mol}$  气体在标准状况(0.1 MPa,  $20^\circ\text{C}$ )下的状态方程为:

$$p_0 V_1 = Z_0 n_1 R T_0 \quad (5)$$

式中  $p_0$  表示一个标准大气压,数值为  $101325 \text{ Pa}$ ;  $V_1$  表示  $n_1 \text{ mol}$  气体在标准状况下的体积,  $m^3$ ;  $Z_0$  表示标准状况下气体压缩因子,可采用 AGA8-92DC 方法<sup>[8-10]</sup>进行计算;  $T_0$  表示标准状况下温度,数值为

293.15 K。

由式 (4)、(5) 可得压缩机启机时储气设施中原有气体在标准状况下的体积为：

$$V_1 = \frac{p_1 T_0 Z_0}{p_0 T_1 Z_1} V_d \quad (6)$$

压缩机停机时储气设施中所储存气体的状态方程为：

$$p_2 V_d = Z_2 n_2 R T_2 \quad (7)$$

式中  $p_2$  表示停机时储气设施中天然气的绝对压力, Pa;  $Z_2$  表示停机时储气设施中气体的压缩因子;  $n_2$  表示停机时储气设施中所储存气体的量, mol;  $T_2$  表示停机时储气设施中天然气温度, K。

压缩机停机时储气设施中所储存的  $n_2$  mol 气体在标准状况下的状态方程为：

$$p_0 V_2 = Z_0 n_2 R T_0 \quad (8)$$

式中  $V_2$  表示停机时储气设施中所储存气体在标准状况下的体积,  $m^3$ 。

由式 (7)、(8) 可得压缩机停机时储气设施气体在标准状况下的体积为：

$$V_2 = \frac{p_2 T_0 Z_0}{p_0 T_2 Z_2} V_d \quad (9)$$

压缩机停机时与启机时储气设施内气体量的差值, 即测试阶段内的新增气量  $\Delta V$ , 按下式计算：

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (10)$$

## 2.2 天然气比焓值计算

任意工况下实际天然气的比焓值可由两种方法计算：①参照式 (11) ~ (21) 进行估算<sup>[11]</sup>；②将实测的天然气体组分输入软件进行计算。

天然气视分子质量按下式计算：

$$M = \sum M_i x_i \quad (11)$$

式中  $M$  表示天然气视分子质量;  $M_i$  表示天然气第  $i$  组分相对分子质量;  $x_i$  表示天然气第  $i$  组分摩尔分数。

天然气气体常数 ( $R_g$ ) 按下式计算：

$$R_g = R/M \quad (12)$$

天然气组分的质量分数按下式计算：

$$y_i = M_i/M \quad (13)$$

式中  $y_i$  表示天然气第  $i$  组分的质量分数。

理想气体进 (出) 口比焓值按下式计算：

$$h^0 = \sum h_i^0 y_i \quad (14)$$

式中  $h^0$  表示天然气比焓值, kJ/kg;  $h_i^0$  表示天然气第  $i$  组分的理想气体比焓值, kJ/kg, 其值与进 (出) 口温度有关。各组分的比焓值如图 1 所示。

天然气视临界压力按下式计算：

$$p_c = \sum x_i p_{ci} \quad (15)$$

式中  $p_c$  表示天然气视临界压力, MPa;  $p_{ci}$  表示天然气第  $i$  组分临界压力, MPa, 部分烃类及非烃类组分的临界压力如表 1 所示。

天然气进、出口视对比压力按下式计算：

$$p_{rinj} = p_{inj}/p_c \quad (16)$$

$$p_{rouj} = p_{outj}/p_c \quad (17)$$

式中  $p_{rinj}$ 、 $p_{rouj}$  表示第  $j$  级压缩机进、出口天然气视对比压力;  $p_{inj}$ 、 $p_{outj}$  表示第  $j$  级压缩机进、出口压力, MPa。

天然气视临界温度按下式计算：

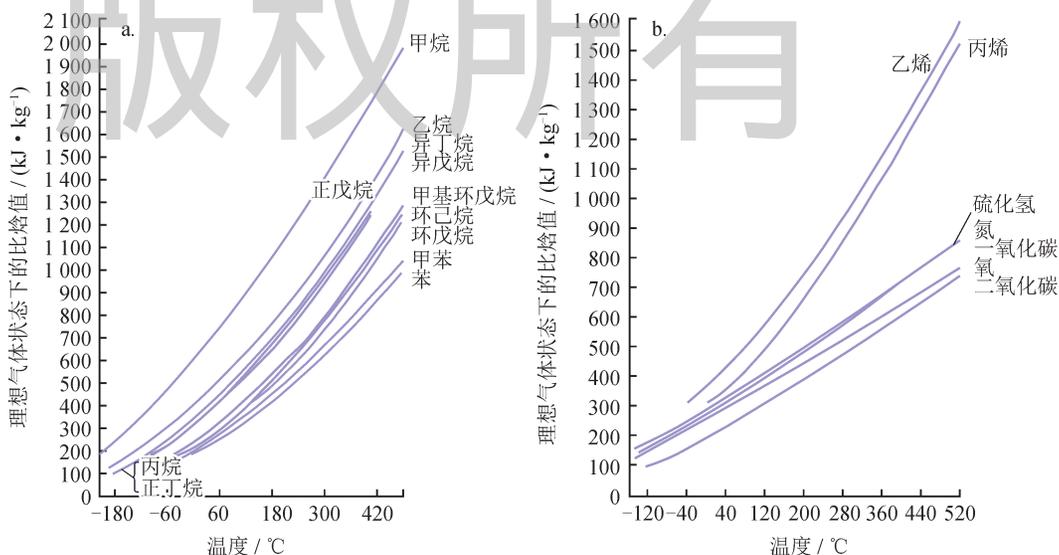


图 1 天然气各组分理想气体比焓值图

表 1 部分烃类及非烃类组分的物理化学常数表

组分	分子式	相对子质量	临界力 / MPa	临界温度 / K
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.043	4.456	190.58
乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	4.723	305.42
丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	4.113	369.82
异丁烷	<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	3.530	408.09
正丁烷	<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	3.675	425.18
异戊烷	<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	3.272	460.43
正戊烷	<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	3.261	469.65
正己烷	<i>n</i> -C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.178	2.916	507.43
正庚烷	<i>n</i> -C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.205	2.648	540.26
空气	—	28.964	3.650	132.43
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.010	7.147	304.21
一氧化碳	CO	28.010	3.383	133.15
氮气	N <sub>2</sub>	28.013	3.290	126.26
氢气	H <sub>2</sub>	2.016	1.254	33.26
硫化氢	H <sub>2</sub> S	34.076	8.715	373.54
氧气	O <sub>2</sub>	31.999	4.917	154.76

$$T_c = \sum x_i T_{ci} \quad (18)$$

式中  $T_c$  表示天然气视临界温度, K;  $T_{ci}$  表示天然气第  $i$  组分临界温度, K, 部分烃类及非烃类组分的临界温度见表 1。

天然气进、出口视对比温度按下式计算:

$$T_{rinj} = T_{inj} / T_c \quad (19)$$

$$T_{rouj} = T_{outj} / T_c \quad (20)$$

式中  $T_{rinj}$ 、 $T_{rouj}$  表示第  $j$  级压缩机进、出口天然气视对比温度;  $T_{inj}$ 、 $T_{outj}$  表示第  $j$  级压缩机进、出口温度, K。

实际气体比焓值按下式计算:

$$h = h^0 - \delta(T_c R_g) \quad (21)$$

式中  $\delta$  表示实际气体比焓值的修正系数, 可根据  $p_{rinj}$ 、 $T_{rinj}$  和  $p_{rouj}$ 、 $T_{rouj}$  查图 2 得到<sup>[12]</sup>。

上述比焓值的计算方法需要读取图中数值, 计算复杂且准确度较差; 也可采用美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 研制的 REFPROP 软件对不同工况下实际天然气的比焓值进行计算<sup>[13]</sup>, 该方法简单方便且准确度较高。

首先点击 Substance-Define New Mixture, 根据气质分析报告中天然气各组分的摩尔分数 (Mole Fraction) 或质量分数 (Mass Fraction) 新建天然气流体; 点击 Calculate-Isoproperty Tables, 选择 Tem-

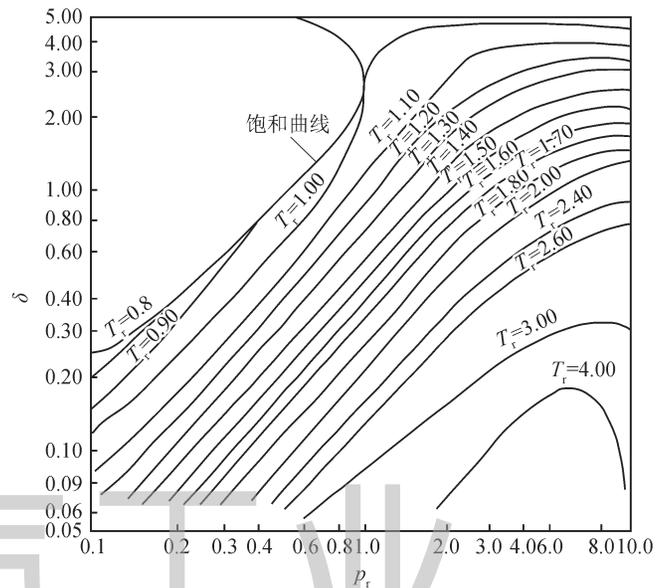


图 2 实际气体比焓值的修正系数图

perature-Pressure (或 Pressure-Temperature), 输入该工况下的温度、压力区间及步长, 即可得到该气体组分的天然气在给定工况下的实际比焓值 (Enthalpy)。同时, 也可点击 Plot-Setup Pressure vs. Enthalpy Plot(或 Temperature vs. Enthalpy Plot), 观察该气体在给定压力、温度变化范围内比焓值的变化趋势。

### 2.3 计算压缩机组输出总能量

电驱往复压缩机输出总能量即储气设施中因引进天然气而获得的总能量, 包括测试阶段内新增加气量的能量增加值 ( $W_{T1}$ ) 和压缩机组启机时储气设施中原有气量的能量增加值 ( $W_{T2}$ )。

测试阶段内新增加气量的能量增加值 ( $W_{T1}$ ) 可按下式计算:

$$W_{T1} = \rho_q \Delta V (h_{out} - h_{in}) \quad (22)$$

式中  $\rho_q$  表示标况下天然气的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $h_{out}$  表示停机时压缩机出口气体比焓值, kJ/kg;  $h_{in}$  表示启机时母站或标准站压缩机进口气体比焓值, 或测试开始时机械子站、液压活塞子站槽车气瓶中气体比焓值, kJ/kg。

压缩机组启机时储气设施中原有气量的能量增加值 ( $W_{T2}$ ) 按下式计算:

$$W_{T2} = \rho_q V_1 (h_{out} - h_{in1}) \quad (23)$$

式中  $V_1$  表示母站压缩机组启机时槽车气瓶中气量, 或标准站、机械子站及液压活塞子站储气瓶组 (井) 中的气量, m<sup>3</sup>;  $h_{in1}$  表示启机时母站槽车气瓶中气体比焓值、标准站和机械子站或液压活塞子站储气瓶

组（并）中气体比焓值，kJ/kg。

$h_{out}$ 、 $h_{in}$  与  $h_{in1}$  按 2.2 中方法计算。电驱往复式压缩机组输出总能量（ $W_T$ ）按下式计算：

$$W_T = W_{T1} + W_{T2} = \rho_q [\Delta V (h_{out} - h_{in}) + V_1 (h_{out} - h_{in1})] \quad (24)$$

### 2.4 压缩机组平均效率

电驱往复式压缩机组平均效率按下式计算：

$$\eta_{dq} = \frac{W_T}{3600P_{dq}} \times 100\% \quad (25)$$

式中  $\eta_{dq}$  表示电驱往复式压缩机组平均效率； $P_{dq}$  表示测试阶段内机组耗电量，kW·h。

### 3 现场测试与计算方法的应用

在一定测试阶段内对天然气加气站的多台电驱往复式压缩机组进行现场测试，表 2 为某天然气加气母站的气质组成情况，利用 2.2 中推荐的 REFPROP 软件计算得到压缩机进口气体比焓值  $h_{in}$ 、停机时压缩机出口气体比焓值  $h_{out}$  以及启机时槽车内气体比焓值  $h_{in1}$ ，该气体比焓值随压力、温度的变化趋势如图 3 所示，测试参数及计算结果如表 3 所示。

表 2 天然气气质组成表

组分	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	二氧化碳	氮气
摩尔分数	93.69%	3.47%	0.60%	0.09%	0.09%	0.04%	0.02%	1.20%	0.80%
质量分数	87.19%	6.05%	1.54%	0.30%	0.30%	0.16%	0.09%	3.07%	1.30%

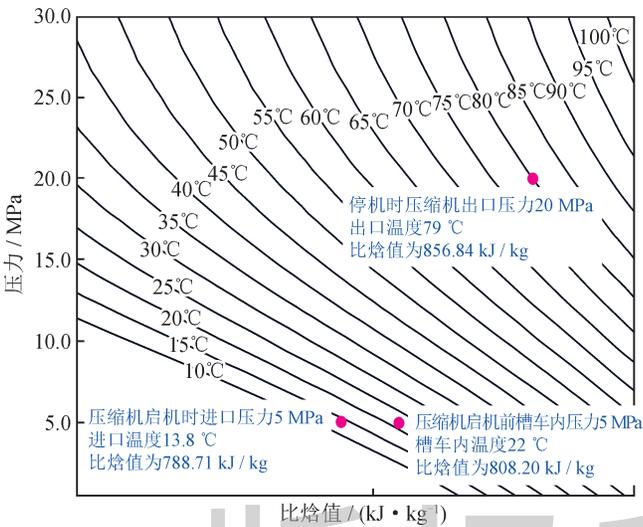


图 3 该气体比焓值图

压缩机启机前槽车内气量：

$$V_1 = \frac{V_d p_1 T_0 Z_0}{p_0 T_1 Z_1} = \frac{22.2 \times 5 \times 293.15 \times 0.874}{0.1 \times (273.15 + 22) \times 0.919} = 1\,048.494 \text{ m}^3 \quad (26)$$

压缩机停机后槽车内气量：

$$V_2 = \frac{V_d p_2 T_0 Z_0}{p_0 T_2 Z_2} = \frac{22.2 \times 20 \times 293.15 \times 0.874}{0.1 \times (273.15 + 79) \times 0.941} = 3\,432.95 \text{ m}^3 \quad (27)$$

压缩机加气量：

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 2\,384.456 \text{ m}^3 \quad (28)$$

压缩机组平均效率：

表 3 基础参数及计算结果表

参数名称及单位	数值
启机前槽车中压直充量 / m <sup>3</sup>	254.39
启机时槽车气瓶内压力 / MPa	5
启机时槽车气瓶内温度 / °C	22
压缩机进口压力（天然气进站压力）/ MPa	5
压缩机进口温度 / °C	13.8
停机时压缩机出口压力 / MPa	20
停机时压缩机出口温度 / °C	79
槽车设计容积 / m <sup>3</sup>	22.2
天然气密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	0.719
压缩机组耗电量 / (kW·h)	186.45
天然气气体常数 / [J·(mol·K) <sup>-1</sup> ]	0.482
启机时槽车内气体比焓值 / (kJ·kg <sup>-1</sup> )	808.20
压缩机进口气体比焓值 / (kJ·kg <sup>-1</sup> )	788.71
停机时压缩机出口气体比焓值 / (kJ·kg <sup>-1</sup> )	856.84

$$\eta_{dq} = \frac{\rho_q [\Delta V (h_{out} - h_{in}) + V_1 (h_{out} - h_{in1})]}{3600P_{dq}} \times 100\% = \frac{\{0.719 \times [2\,384.456 \times (856.84 - 788.71) + 1\,048.494 \times (856.84 - 808.20)]\}}{3\,600 \times 186.45} \times 100\% = 25.46\% \quad (29)$$

单位加气量电耗是指测试阶段内压缩机组累计耗电量与加气量的比值，经计算该压缩机组的单位加气量电耗为 0.078 19 (kW·h) / m<sup>3</sup>。

对测试的多台天然气加气站压缩机组的平均效率和单位加气量电耗进行计算,结果如表4所示,其变化趋势如图4所示。由图4可知,各压缩机组

的平均效率与其单位加气量电耗呈反比,单位加气量电耗较低的压缩机组平均效率较高,也可侧面反映平均效率计算方法的科学性与合理性<sup>[14-20]</sup>。

表4 多台压缩机组平均效率及单位加气量电耗计算结果表

压缩机组编号	1	2	3	4	5	6
平均效率	50.75%	45.64%	41.23%	36.54%	25.46%	15.37%
单位加气量电耗 / [(kW·h)·(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	33.02	52.36	58.12	64.35	78.19	109.41

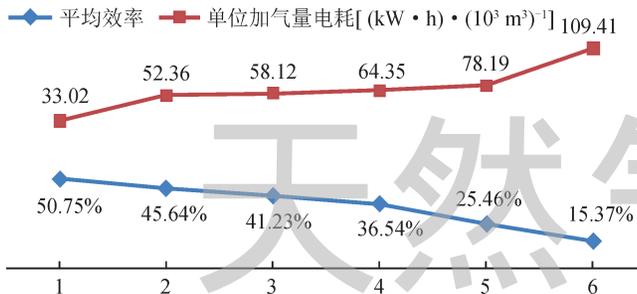


图4 各压缩机组平均效率与单位加气量电耗变化趋势图

## 4 结论

通过现场测试与计算,压缩机组平均效率的计算方法较传统的理论计算方法具有所需测试参数少、计算过程简单、可操作性强、结果可靠等优点,相关监测部门和工作人员经测试和计算即可得到压缩机组效率。因此,该加气站压缩机组平均效率的计算方法可为评价压缩机组及加气站的能效水平提供理论支持,从而提高压缩机组的经济性能,全面推进加气站的降本增效。

### 参 考 文 献

- [1] 党美娟. CNG加气站能耗分析与节能途径研究[D]. 成都:西南石油大学, 2015.  
Dang Meijuan. Energy consumption analysis and energy saving research of CNG filling station[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [2] 张秋萍, 陈燕飞, 李森, 王璠. 车用压缩天然气新标准 GB 18047—2017 解读[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(5): 90-95.  
Zhang Qiuping, Chen Yanfei, Li Sen & Wang Fan. Interpretation of the revised standard GB 18047-2017 for compressed natural gas as vehicle fuel[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47(5): 90-95.
- [3] 李云杰, 赵堂玉, 王春荣, 杨景丽, 刘国豪, 杨光. 天然气压缩机组运行效率的测试与分析[J]. 油气储运, 2009, 28(7): 55-57.  
Li Yunjie, Zhao Tangyu, Wang Chunrong, Yang Jingli, Liu Guohao & Yang Guang. Testing and analysis of operation efficiency

of gas compressor sets[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(7): 55-57.

- [4] 刘国豪, 张鑫, 陈其彬, 姜勇, 王书浩, 张轩. CNG加气站电驱往复压缩机组节能监测分析[J]. 石油石化节能, 2014, 4(12): 15-16.  
Liu Guohao, Zhang Xin, Chen Qibin, Jiang Yong, Wang Shuhao & Zhang Xuan. Energy-saving monitoring analysis of electric drive reciprocating compressor unit of CNG filling station[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2014, 4(12): 15-16.
- [5] 姬忠礼, 邓志安, 赵会军. 泵和压缩机[M]. 北京:石油工业出版社, 2008.  
Ji Zhongli, Deng Zhi'an & Zhao Huijun. Pumps and compressors[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [6] 安定纲. 往复压缩机技术问答[M]. 2版. 北京:中国石化出版社, 2006.  
An Dinggang. Technical questions and answers on reciprocating compressors[M]. 2<sup>nd</sup> Edition. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [7] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2007.  
Shen Weidao & Tong Jungeng. Engineering thermodynamics[M]. 4<sup>th</sup> Edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [8] 梁光川, 左果. 基于气体组成的天然气压缩因子计算方法[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(4): 395-400.  
Liang Guangchuan & Zuo Guo. Calculation methods of natural gas compressibility factor based on the gas composition[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(4): 395-400.
- [9] 罗勤, 许文晓, 周方勤, 黄黎明, 常宏岗, 李万俊, 等. 天然气压缩因子的计算 第1部分: 导论和指南: GB/T 17747.1—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.  
Luo Qin, Xu Wenxiao, Zhou Fangqin, Huang Liming, Chang Honggang, Li Wanjun, et al. Natural gas—Calculation of compression factor—Part 1: Introduction and guidelines: GB/T 17747.1-2011[S]. Beijing: China Standards Press, 2011.
- [10] 罗勤, 许文晓, 周方勤, 黄黎明, 常宏岗, 李万俊, 等. 天然气压缩因子的计算 第2部分: 用摩尔组成进行计算: GB/T 17747.2—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.  
Luo Qin, Xu Wenxiao, Zhou Fangqin, Huang Liming, Chang Honggang, Li Wanjun, et al. Natural gas—Calculation of compression factor—Part 2: Calculation using molar-composition analysis: GB/T 17747.2-2011[S]. Beijing: China Standards Press,

- 2011.
- [11] 李建良, 周书仲, 刘冰, 赵国星, 刘国豪, 耿欢, 等. 天然气输送管道系统能耗测试和计算方法: SY/T 6637—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- Li Jianliang, Zhou Shuzhong, Liu Bing, Zhao Guoxing, Liu Guohao, Geng Huan, et al. The method of energy consumption test and calculation for natural gas pipeline transport system: SY/T 6637-2018[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [12] 李长俊, 汪玉春, 陈祖泽, 梁光川, 黄泽俊. 天然气管道输送[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- Li Changjun, Wang Yuchun, Chen Zuze, Liang Guangchuan & Huang Zejun. Natural gas pipeline transportation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [13] 赵朔. 天然气压缩机设计关键物性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- Zhao Shuo. Research on key physical properties in the design of natural gas compressor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [14] 李金生. CNG 压缩机节能技术与试验探析[J]. 中国石油石化, 2016(增刊 1): 244.
- Li Jinsheng. Analysis on energy saving technology and experiment of CNG compressor[J]. China Petrochem, 2016(S1): 244.
- [15] 杨远, 唐文洁, 齐安彬, 孙贵杰, 朱华, 马玉华. 大型 LNG 工厂能耗分析及节能措施[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(4): 103-108.
- Yang Yuan, Tang Wenjie, Ji Anbin, Sun Guijie, Zhu Hua & Ma Yuhua. Energy consumption analysis and energy saving measures of large LNG plant[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(4): 103-108.
- [16] 胥泽文. CNG 压缩机能耗分析及节能措施探讨[J]. 石油库与加油站, 2016, 25(1): 15-17.
- Xu Zewen. Analysis on energy consumption of CNG compressors and advice for energy saving[J]. Oil Depot and Gas Station, 2016, 25(1): 15-17.
- [17] 周日峰, 赵雯晴, 张健中, 许光. CNG 常规站压缩机充气效率及能耗分析[J]. 油气储运, 2016, 35(10): 1136-1140.
- Zhou Rifeng, Zhao Wenqing, Zhang Jianzhong & Xu Guang. Gas-filling efficiency and energy consumption by compressor in CNG conventional fueling station[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(10): 1136-1140.
- [18] 梁政, 李双双, 田家林, 朱小华, 梅庆刚, 张力文. CNG 压缩机节能技术与试验分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 95-98.
- Liang Zheng, Li Shuangshuang, Tian Jialin, Zhu Xiaohua, Mei Qinggang & Zhang Liwen. An experimental study of technical measures for energy saving of CNG compressors[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 95-98.
- [19] 范勇, 荣蕾, 李胜利, 李麟, 孙德静, 田涛. 压缩机厂房可燃气体泄漏扩散的数值模拟[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(1): 115-120.
- Fan Yong, Rong Lei, Li Shengli, Li Lin, Sun Dejing & Tian Tao. Numerical simulation of combustible gas leakage and diffusion in compressor workshop[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47(1): 115-120.
- [20] 贾绪平. 某 CNG 加气母站往复压缩机节能技术分析[J]. 压缩机技术, 2018(3): 45-48.
- Jia Xuping. Analysis of the energy-saving technique for a CNG gas parent station reciprocating compressor[J]. Compressor Technology, 2018(3): 45-48.

(修改回稿日期 2019-09-09 编辑 何明)

## 雪峰山西缘页岩气调查取得重要进展

近日, 自然资源部中国地质调查局岩溶地质研究所和成都地质调查中心对雪峰山西缘油气地质进行联合调查, 在贵州都匀地区部署实施的贵都地 1 井在寒武系九门冲组—牛蹄塘组获得天然气和页岩气发现, 在灯影组发现沥青。

寒武系九门冲组和牛蹄塘组现场气测显示共 8 层气测异常段, 其中牛蹄塘组见 2 段较好页岩气层, 气测最高全烃含量为 6.2%, 现场解吸含气量介于 0.71 ~ 0.81 m<sup>3</sup>/t; 牛蹄塘组顶部页岩和九门冲组泥灰岩气测全烃含量最高为 2.4%。寒武系非常规油气资源的发现, 将雪峰山西缘含气范围向南推进约 30 km, 扩大了雪峰山西缘页岩气有利调查区面积。

震旦系灯影组发现优质白云岩岩溶缝洞型储层, 可见斑点状沥青。井段 1 261.1 ~ 1 261.5 m 白云岩次生溶缝、晶洞中发现亮黑色沥青, 呈斑点状、侵染状分布; 井段 1 276.0 ~ 1 291.0 m 发现一套厚约 15 m 白云岩次生岩溶缝洞型储层, 储集空间以溶缝、溶蚀孔洞为主, 部分孔洞可达到 5 cm, 储层面孔率介于 10% ~ 20%, 为一套优质岩溶缝洞型储层。这表明在贵州都匀地区灯影组有良好的油气储集条件, 具有勘探前景, 打破了该地区“灯影组为斜坡相、油气前景差”的观念, 取得了勘探认识的新突破。

下一步将根据油气调查最新进展, 重新评估雪峰山西缘震旦系—寒武系油气资源潜力, 评价优选有利区, 提出震旦系—寒武系油气勘查攻关方案, 力争长江上游雪峰山西缘油气调查获得更大突破。

(天工 摘编自国际燃气网)