

天然气压缩机组现场性能测试计算方法对标研究

刘国豪^{1,2,3}, 侯磊^{1,2*}, 潘腾³, 赵一桦⁴, 陈林³, 李清平^{1,2}

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室/石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

3 国家管网集团北方管道有限责任公司, 廊坊 065000

4 中国石油长庆油田分公司第一采气厂第五净化厂, 西安 710000

* 通信作者, houleicup@126.com

收稿日期: 2021-03-03

中国石油天然气股份有限公司科研项目《管道压缩机组和输油泵机组能效测试方法国际接轨研究》(2015B-3410-0501)、石油天然气行业标准修订项目《天然气输送管道系统能耗测试和计算方法》《国家能源局综合司关于下达2017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》(能源 20170228)联合资助

摘要 在长输天然气管道能耗中, 天然气压缩机组能耗占比超过95%, 其能耗高低对天然气企业运行成本影响最大。国内采用行业标准SY/T 6637-2012测试和计算其实际的性能曲线和能效情况, 近年使用该标准计算出的压缩机多变压缩功、多变效率、机组效率等压缩机组能效关键参数与国外厂家提供的数据不一致的问题, 极大影响了天然气管道的优化模型准确度、与国外先进管道对标、机组能效分析等能源管理工作。通过对比分析国内外多项标准的差异, 发现标准SY/T 6637-2012在多变指数、焓值以及多变压缩功计算方法等方面与国际主流标准存在较大差异。本研究针对差异, 逐项进行了对比计算, 并与出厂数据和现场实际数据进行了两次验证。研究表明: ①气体焓值以NIST软件计算结果为基准, 人工查图法计算焓值的误差为6.55%左右, BWRS、RKS、PR共3种状态方程计算方法的误差分别为1.75%、2.75%、0.57%; ②SY/T 6637-2012在计算多变压缩功时未考虑实际天然气的压缩性, 未对结果进行修正, 未加入多变压缩功修正因子; ③多变效率的计算以NIST软件计算结果为基准, SY/T 6637-2012、BWRS、RKS、PR、CTO的计算偏差分别为: 6.12%、2.27%、3.26%、0.12%、0.53%。根据以上对标分析结论完善后的标准SY/T 6637-2018已于2019年3月发布实施, 经过一年以上在实际天然气管道站场的应用, 证明该计算方法与生产厂家、国外标准保持了高度一致; 修改后的测试方法适合国内站场能耗计量仪表和安装位置的实际情况, 为国内天然气管道压缩机组提供了可靠的能效计算方法。

关键词 天然气管道压缩机; 多变指数; 多变压缩功; 多变效率; 测试方法; 计算方法; 标准修订

Improvement of standards and field performance test calculation methods for natural gas compressor units

LIU Guohao^{1,2,3}, HOU Lei^{1,2}, PAN Teng³, ZHAO Yihua⁴, CHEN lin³, LI Qingping^{1,2}

1 National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, Beijing 102249, China

2 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 PipeChina North Pipeline Company, Langfang 065000, China

引用格式: 刘国豪, 侯磊, 潘腾, 赵一桦, 陈林, 李清平. 天然气压缩机组现场性能测试计算方法对标研究. 石油科学通报, 2021, 04: 657-664

LIU Guohao, HOU Lei, PAN Teng, ZHAO Yihua, CHEN lin, LI Qingping. Improvement of standards and field performance test calculation methods for natural gas compressor units. Petroleum Science Bulletin, 2021, 04: 657-664. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.047

4 The Fifth Purification Plant of the First Gas Production Plant of Changqing Oilfield, Xi'an 710000, China

Abstract In long distance natural gas pipelines, the energy consumption of the natural gas compressor units account for more than 95%, and their energy consumption has a great influence on natural gas enterprises. Domestically the industry standard SY/T 6637-2012 is used to test and calculate the practical performance curve and the energy efficiency status. In recent years, the standard has been used to calculate the polytropic efficiency of compressors and the unit efficiency. But the calculated results weren't consistent with the contributed data by foreign manufacturers. This inconsistency greatly influenced the accuracy of gas pipeline optimization models and foreign advanced pipelines as the yardstick of energy management. By the comparison and analysis of domestic and foreign standards, it was found that standard SY/T 6637-2012 is quite different from the mainstream international standards in terms of variable index, enthalpy value and variable compression work calculation. In view of the differences, the comparison and calculation were carried out, and the results were verified twice with factory data and actual field data. The results show that: (1) In terms of enthalpy of gas, the error of calculating enthalpy by the looking up the chart method is 6.55%, and the error of calculating method of BWRS, RKS and PR is 1.75%, 2.75% and 0.57%, respectively. (2) In the calculation of variable compression work, SY/T 6637-2012 didn't consider the compressibility of gas, modify the results, and add the variable compression work correction factor. (3) In the calculation of polytropic efficiency, based on the calculation results of NIST software, the calculation deviations of SY/T 6637-2012, BWRS, RKS, PR and CTO were 6.12%, 2.27%, 3.26%, 0.12% and 0.53% respectively. Based on the above analysis, SY/T 6637-2018 has been released and implemented in March 2019. After one year application, the calculation method is consistent with the manufacturers' and foreign standards, and the calculation results are consistent. The test method is suitable for the actual situation of domestic stations and yard energy consumption meters and installation location, and provides a reliable energy efficiency calculation method for natural gas pipeline compressor units.

Keywords natural gas pipelines; compressors; polytropic index; polytropic compression work; polytropic efficiency; test methods; calculation methods; standard revision

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.047

0 引言

在长输天然气管道企业的能耗中,天然气压缩机组能耗占比超过95%,其能耗对天然气企业影响最大。对于目前干线管道上的燃驱压缩机组和电驱压缩机组,一般采用行业标准SY/T 6637-2012《天然气输送管道系统能耗测试和计算方法》^[1]对其实际的性能曲线和能效情况进行测试与计算^[2-3]。但在现场测试与应用中发现,该标准计算出的机组效率与厂家提供的数据不一致,机组效率不一致主要是由于压缩机多变效率数值差别较大,国内压缩机多变效率主要集中在84%~91%区间内,而国外厂家提供的压缩机多变效率普遍在80%~87%范围内,由于压缩机多变效率为关键能耗数据之一,数据的不一致对国内长输天然气管道的优化模型准确度、与国外先进管道对标等能源管理工作影响极大^[4]。

为解决该问题,本研究通过分析国内外标准的差异,从压缩机实际性能测试的测试项目、测试方法以及相关计算方法方面寻找更为科学、合理的方法来完善国内压缩机性能测试的标准,为国内天然气企业和国外对标工作提供理论指导,也为开展一带一路国家的天然气管道能耗测试提供技术支持^[5]。

1 测试项目及测量方法分析

考虑到国内天然气管道用天然气压缩机大部分采用进口的美国通用GE或英国RR机组,故选用国际广泛应用且认可度较高的两项压缩机标准ISO 5389《Turbo compressors-Performance test code》^[6]以及ASME PTC 10《Performance test code on compressors and exhausters》^[7]作为主要对比标准,最后使用一项俄罗斯标准CTO进行全面的对比验证^[8]。

国内依据SY/T 6637-2012在站场开展现场能效测试、计算、绘制天然气压缩机实际性能曲线。现场测试的项目主要有:压缩机进口和出口压力、进口和出口温度、工艺气体组分、被压缩介质流量、压缩机的实际转速以及原动机提供的能量、环境压力和温度等;在计算方法方面,采用查图法计算天然气实际气体焓值。

通过对比发现,SY/T 6637-2012与ISO 5389以及ASME PTC 10在测试项目与测试方法的差异主要体现在以下方面:

①国内标准在压力方面仅规定了测试仪表的精度等级,没有对动压做出说明,但考虑到目前国内测试条件与仪表精度等级,且动压对于全压的影响较小,

国内标准目前所采用的仪表直接测量的静压作为全压处理, 所得结果能够满足现场测试要求。

②国内标准在温度方面仅规定了测试仪表的精度等级, 没有对总温做出说明, 但考虑到目前国内测试条件与仪表精度等级, 总温计算对于现场测试环境较难实现, 动温对于总温影响较小, 因此, 国内标准目前所采用的仪表直接测量的温度值作为总温处理, 所得结果能够满足现场测试要求。

③国内标准在流量测量方面对测试仪器的精度提出了不低于 2.0 级的要求, 可以满足压缩机现场实际性能测试的需要。国外标准注重出厂台架试验, 缺少对现场实际流量测量方面界定与要求。

④国内标准在气体组分测量方面目前采用的方法主要为气相色谱法, 与 ASME PTC 10 中提出的方法相一致, 可以满足压缩机性能测试的需要; 而 ISO 5389 中对于气体组分测试方法没有做出明确说明。

⑤国内标准在天然气密度测量方面和 ASME PTC10 中均没有相关测量方法的描述。由于在压缩机性能测试中天然气气体组分是已知的, 因此气体密度可由状态方程式确定。

⑥国内标准在转速测量方面目前没有关于转速测量方法的描述。国外标准 ISO5389 中采用具有一定精度等级的数字转速计、测速仪、频率计等来测量转速; ASME PTC10 对于测量转速的仪器没有明确要求, 仅规定选择的仪器必须能够连续指示转速的波动。因此, 国内相关测试标准中应当明确转速的测试设备与测试精度。

⑦国内标准在功率测量方面并没有给出直接的测量方法, 在计算相关参数的时候, 压缩机的轴功率采用的是类似国外标准中热平衡法的简化间接方法, 即在计算压缩机轴功率的过程中忽略了压缩机表面热损失、机械损失以及气体泄漏等损失的影响, 直接按照气体压缩功进行计算, 该方法与国内现场没有安装扭矩仪等设备有关, 测试精度经对比, 满足现场需要,

可继续使用。而 ISO5389 与 ASME PTC10 中采用的方法较为一致, 均提出了扭矩仪法、驱动电机的电输入测量法以及热平衡法, 该方法准确性更高, 但目前国内现场条件无法满足。

根据上述国内外压缩机性能测试方法对比看出, 建议标准 SY/T 6637-2012 在测试方法方面进行如下修订: ①采用气相色谱法测试天然气气体组分; ②采用精度等级高于 2 级的流量测试仪器测量压缩机工艺气通过量; ③采用精度等级高于 1.5 级的压力测试仪器测量压缩机进出口压力 P_1 、 P_2 ; ④采用精度等级高于 0.2 级的温度测试仪器测量压缩机进出口温度 T_1 、 T_2 。

2 计算方法分析

经国内外标准对比后发现, 标准 SY/T 6637-2012 在多变指数、焓值以及多变压缩功计算方法存在较大差异, 接下来分别进行分析。

2.1 多变指数

3 项标准对压缩机多变指数的计算方法对比见表 1。

由表 1 可知, 国外标准结合实际气体特性, 考虑压缩过程中压缩系数变化这一因素的影响, 分别将进口、出口气体的压缩因子代入公式进行计算; 而国内标准将输送天然气按照理想气体来计算, 忽略了压缩因子对多变指数计算结果产生的影响。

相同现场运行工况数据下, 分别采用国内外标准的计算方法对压缩机的多变指数进行计算, 计算结果见表 2。

以国外标准的计算结果为基准, 国内标准在不考虑压缩因子的影响下, 计算结果的误差为 12.5%。相比之下, 国外标准在计算多变指数的过程中更加符合气体实际压缩过程, 计算结果更为准确。因此应在计

表 1 国内外标准中压缩机多变指数的计算方法对比

Table 1 Comparison of calculation methods of compressor polytropic index in domestic and foreign standards

标准编号	SY/T 6637-2012	ISO 5389	ASME PTC 10
计算方法	$\varepsilon_i = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ $m_i = \frac{\ln \varepsilon_i}{\ln \varepsilon_i - \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right)}$	$n = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{v_1}{v_2}} = - \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{P_2}{P_1} - \ln \left[\frac{Z_2 \cdot T_2}{Z_1 \cdot T_1} \right]}$	与 ISO 5389 同

注: 公式中的参数符号与标准 SY/T 6637-2012 中表述一致, 直接引用, 下文均同。

算中考虑实际气体特性,将压缩因子代入到多变指数计算公式中去。

2.2 压缩气体焓值计算

3项标准对压缩气体焓值的计算方法对比见表3。

受历史原因及计算机水平影响,目前国内在实际气体焓值的计算方面一直采用人工查图法对理想气体焓值进行修正,该图取自李长俊主编的《天然气管道输送》^[9],如图1所示,图中横坐标 p_r 表示压缩机视对比压力(单位兆帕),纵坐标 δ 表示实际气体比焓值的修正系数。由于该图横纵坐标刻度均采用指数形式,分布不均,图表本身存在误差且读数容易受人为读数

误差因素的影响,导致压缩机多变效率的计算不够准确。

相同工况的运行数据下,3项标准对压缩气体不同的焓值计算方法结果对比见表4。

ISO5389中针对气体焓值的描述是采用BWRS、LK或RKS状态方程进行求解,以NIST软件计算结果为标准,查图法计算焓值的误差为6.55%左右,BWRS、RKS、PR 3种状态方程计算方法的误差分别为1.75%、2.75%、0.57%,可见采用状态方程计算的结果更为精确。由于状态方程式复杂,手工计算繁琐,不利于工程应用,因此开发了相应的状态方程软件,其中以国际上权威的NIST(美国国家标准技术研

表2 相同工况下不同多变指数计算方法结果对比

Table 2 Comparison of results of different polytropic index calculation methods under the same working condition

标准编号	SY/T 6637-2012	ISO 5389	ASME PTC10
计算结果	1.399	1.598	1.598

表3 国内外标准中压缩气体焓值的计算方法对比

Table 3 Comparison of calculation methods of compressed gas enthalpy in domestic and foreign standards

标准编号	SY/T 6637-2012	ISO 5389	ASME PTC 10
计算方法	气体实际焓值通过查图法得到	气体实际焓值按照BWRS、LK或RKS状态方程进行求解	未对焓值计算明确说明

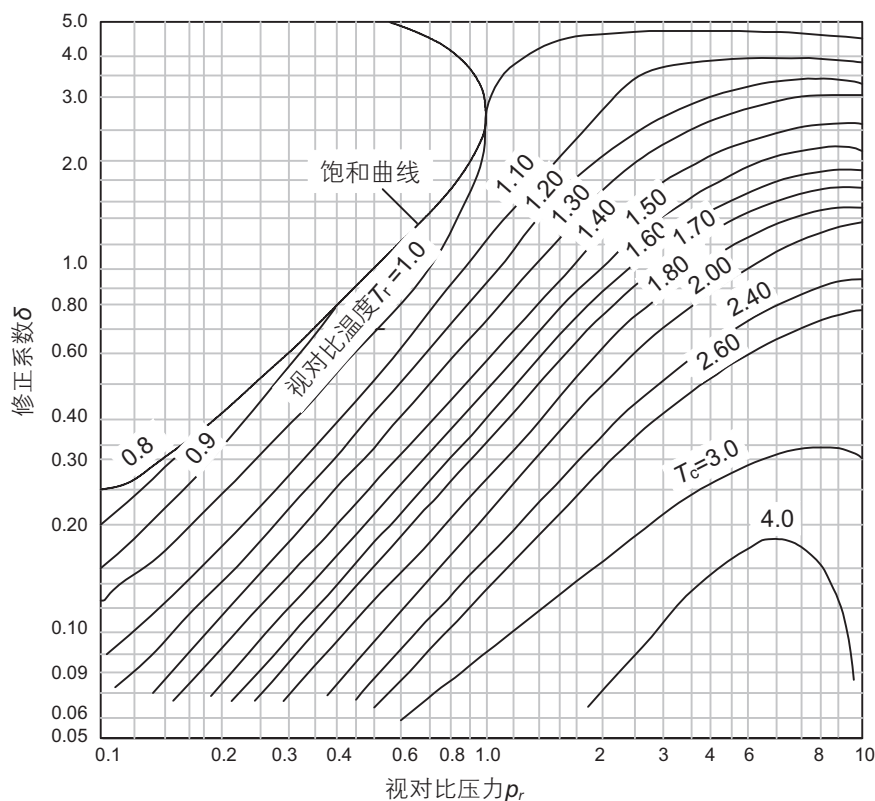


图1 实际气体比焓值的修正系数图

Fig. 1 the correction coefficient diagram of the actual specific enthalpy of the gas

表 4 相同工况下不同焓值计算方法结果对比

Table 4 Comparison of calculation results of different enthalpy values under the same working condition

标准编号	SY/T6637-2012	ISO 5389			
焓值/(kJ/kg)	查图法	BWRS	RKS	PR	NIST软件
	34.385	33.089	33.427	32.298	32.340

究所)研发的REFPROP状态方程软件最为权威和方便。该软件内嵌上述常用的状态方程,计算的结果更为精确,同时也可以有效避免人为误差和查图法的误差影响,同时满足实际工程应用要求的准确和快捷的要求。因此,应当对国内标准进行修订,首先在焓值计算中引入状态方程计算焓值,提高计算准确度与国际认可度,同时为了提高工程应用方便,建议引入使用NIST软件工具进行计算。

2.3 气体多变压缩功计算

3项标准中对气体多变压缩功的计算方法对比见表5。

由表5可知,ISO5389中关于气体多变压缩功的计算方法与ASME PTC10中的实际气体压缩功计算方法一致;而国内标准的计算方法与ASME PTC10中的理想气体压缩功计算方法相一致,因此目前国内所采用的方法仍旧是针对理想气体而言的,在计算多变功时未考虑气体的压缩性,未加入多变功因子对结果进行修正,导致计算结果存在一定的偏差。

相同工况下,分别采用国内外标准的计算方法气

表 5 国内外标准中气体多变压缩功的计算方法对比

Table 5 Comparison of calculation methods of gas polytropic compression work in domestic and foreign standards

标准编号	计算方法
SY/T 6637-2012	$H_E = R \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot \frac{m_i}{m_i - 1}$
ISO 5389	$y_p = f \cdot R \cdot Z_1 \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$
	$f = \frac{h_{2s} - h_1}{\frac{k_v}{k_v - 1} \cdot (p_2 \cdot v_{2s} - p_1 \cdot v_1)}$
ASME PTC10	$W_p = f \cdot \left(\frac{n}{n-1} \right) \cdot (p_d \cdot v_d - p_i \cdot v_i)$
	$f = \frac{h'_d - h_i}{\frac{n_s}{n_s - 1} \cdot (p_d \cdot v'_d - p_i \cdot v_i)}$

体多变压缩功进行计算,计算结果见表6。可看出国内标准与ISO5389相比的计算误差为12.8%。

通过计算与分析,对于气体多变压缩功的计算方法,国内标准修订时应考虑实际气体特性,将压缩因子以及修正系数*f*代入到相关计算公式中去。

2.4 多变效率计算

3项标准中对多变效率的计算方法对比见表7。

在计算多变效率方面,国内外计算方法相一致,但由于之前多变效率、焓值以及多变压缩功的计算方法与国外标准存在差异,导致目前国内多变效率的计算结果仍与国外标准存在偏差。

在相同工况下,额外加入俄罗斯标准CTO,4个国内外标准的计算结果对比见表8。

从表8计算结果看出:①焓差方面,以NIST软件计算结果为标准,查图法计算焓值的误差为6.55%左右,BWRS、RKS、PR3种状态方程计算的误差分别为1.75%、2.75%、0.57%,对比可得,查图法误差较大,且容易受人为因素的影响,因此必须使用状态方程计算焓值和焓差提高准确度;②多变压缩功的计算方面,SY 6637-2012在计算多变压缩功时未考虑

表 6 相同工况下不同气体多变压缩功计算方法结果对比(单位: kJ/kg)

Table 6 Comparison of calculation results of multi-variable compression work for different gases under the same working condition (unit: kJ/kg)

标准编号	SY/T6637-2012	ISO 5389	ASME PTC10
多变压缩功	30.039	26.622	26.540

表 7 国内外标准中压缩机多变效率计算方法对比

Table 7 Comparison of the calculation methods of compressor variable efficiency in domestic and foreign standards

SY/T 6637-2012	ISO 5389	ASME PTC 10
$\eta_p = \frac{H_E}{h_d - h_i}$	$\eta_p = \frac{y_p}{h_d - h_i}$	$\eta_p = \frac{W_p}{h_d - h_i}$

气体的压缩性,也未对结果进行修正,即未加入多变压缩功因子;③多变效率的计算方面,以NIST软件计算结果为基准,SY/T 6637-2012、BWRS、RKS、PR、CTO(俄罗斯标准)的计算偏差分别为:6.12%、2.27%、3.26%、0.12%、0.53%。从计算结果来看,相较于国内标准,ISO、ASME标准计算结果更为准确,并且俄罗斯标准CTO的计算结果与NIST软件结果也十分接近,与ISO以及ASME计算方法不冲突。

3 结果验证

3.1 与厂家出厂性能测试结果对比

为验证状态方程法计算压缩机多变效率的准确性,以GE机组与RR机组出厂性能测试参数为参考,在相同工况下分别采用BWRS状态方程与NIST软件进行计算,对比结果如下表9所示。

表8 国内外标准中相同工况下压缩机多变效率计算结果对比

Table 8 Comparison of the calculation results of multi-variable efficiency of compressors under the same working conditions in domestic and foreign standards

标准编号	SY/T6637-2012	ISO 5389				ASMEPTC10		CTO
	查图法	BWRS	RKS	PR	NIST软件	BWRS	—	
焓差/(kJ/kg)	34.385	33.089	33.427	32.298	32.340	33.089	—	
多变功/(kJ/kg)	30.039	26.622	—	—	—	26.540	—	
多变效率/%	87.36	80.45	79.64	82.42	82.32	80.21	81.88	

表9 NIST软件及BWRS状态方程法与机组出厂性能测试计算结果对比验证表

Table 9 Verification table for comparison of NIST software and BWRS equation of state method with factory performance test results

机型	方法	多变功/(kJ/kg)	焓差/(kJ/kg)	多变效率/%
GE	出厂测试	47.365	53.801	88.038
	NIST软件	47.283	53.16	88.945
	BWRS方程	47.360	53.918	87.836
RR	出厂测试	19.330	22.627	85.43
	NIST软件	19.302	22.37	86.287
	BWRS方程	19.312	22.667	85.203

表10 GE机组实际现场数据计算结果对比验证表

Table 10 Verification table for comparison of actual field data calculation results of GE unit

项目		工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7	工况8
焓差/(kJ·kg ⁻¹)		40.75	35.69	30.11	27.02	46.87	43.73	39.48	36.22
多变功/(kJ·kg ⁻¹)	国内	7068.9	7337.6	7427.5	7048.8	8453.4	9019.3	9074.8	9055.7
多变效率/%		88.63	87.87	85.09	81.43	88.70	88.29	87.49	86.85

由表9可知,采用NIST软件计算压缩机多变效率对比GE、RR机型出厂性能曲线误差分别为0.907%、1.003%,采用BWRS状态方程法的误差结果分别为0.202%与0.266%。从计算结果可以看出,采用BWRS状态方程法计算压缩机多变效率更为接近机组出厂性能测试结果,验证了不同的状态方程方法中,BWRS状态方程法在压缩机性能测试计算中更准确与可靠^[10]。

3.2 现场测试数据对比

为进一步验证采用状态方程计算压缩机多变效率的准确性,使用8组实际天然气现场GE、RR机组测试数据分别进行对比验证,验证结果分别见表10、表11。

从上述计算结果验证可以看出,以NIST软件作为基准,目前国内计算方法在计算多变效率方面误差范围在4%~14%之间,而BWRS方法的误差范围在1%

(续表)

项目		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
焓差 /kJ·kg ⁻¹		38.34	33.96	29.70	27.08	44.13	41.35	37.85	35.68
多变功 /kJ·kg ⁻¹	BWRS	7112.98	7376.69	7465.39	7083.24	8514.02	9079.65	9129.25	9109.19
多变效率 /%		84.00	82.90	77.20	72.81	84.12	83.38	81.94	79.20
焓差 /kJ·kg ⁻¹		38.02	33.69	29.48	26.89	43.83	40.97	37.51	35.42
多变功 /kJ·kg ⁻¹	NIST	7112.98	7376.69	7465.39	7083.24	8514.02	9079.65	9129.25	9109.19
多变效率 /%		84.71	83.55	77.78	73.31	84.69	84.16	82.69	79.78
多变效率较NIST结果的误差	国内	4.63%	5.17%	9.39%	11.07%	4.73%	4.91%	5.81%	8.87%
	BWRS	-0.83%	-0.78%	-0.76%	-0.69%	-0.68%	-0.92%	-0.90%	-0.72%

表 11 RR 机组现场数据计算结果对比验证表

Table 11 Verification table for comparison of actual field data calculation results of RR unit

项目		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
焓差 /kJ·kg ⁻¹		43.42	41.24	39.09	37.10	35.82	38.13	34.75	32.64
多变功 /kJ·kg ⁻¹	国内	10 842.2	11 093.0	11 332.2	11 402.3	11 402.2	8134.3	8846.8	9171.8
多变效率 /%		87.32	86.62	86.08	85.44	83.29	88.21	88.60	86.49
焓差 /kJ·kg ⁻¹		41.16	38.85	37.10	35.51	33.95	36.96	33.43	31.30
多变功 /kJ·kg ⁻¹	BWRS	10 895.78	11 143.82	11 382.11	11 450.81	11 448.67	8171.94	8881.89	9202.35
多变效率 /%		82.31	82.16	81.00	79.73	78.47	80.92	81.84	80.16
焓差 /kJ·kg ⁻¹		40.80	38.52	36.78	35.25	33.68	36.68	33.15	31.02
多变功 /kJ·kg ⁻¹	NIST	10 895.78	11 143.82	11 382.11	11 450.81	11 448.67	8171.94	8881.89	9202.35
多变效率 /%		83.03	82.86	81.70	80.33	79.10	81.54	82.54	80.87
多变效率较NIST结果的误差	国内	5.17%	4.54%	5.36%	6.36%	5.30%	8.18%	7.35%	6.95%
	BWRS	-0.87%	-0.84%	-0.86%	-0.74%	-0.79%	-0.77%	-0.84%	-0.88%

以内，验证结果进一步说明BWRS方法的准确性，同时也证明BWRS方法对于国内压气站开展现场性能测试来说是适用和准确的。

4 结论

与国外标准相比，国内标准SY/T 6637-2012在多变指数、焓值以及多变压缩功的计算方法上存在差异；多变效率国内外计算方法相一致，但由于之前多变指数、焓值以及多变压缩功的计算方法与国外标准存在差异，导致多变效率的计算结果与厂家、国外标准存在高4%~5%的偏差。从计算结果来看，相较于国内标准，ISO、ASME标准计算结果更为准确，并且俄罗斯标准CTO的计算结果与NIST软件结果较为接近，与ISO以及ASME计算方法不冲突。

根据上述国内外压缩机性能测试方法算例对比，建议对现有国内压缩机性能现场实际测试与方法的标准SY/T 6637-2012进行修订完善。在测试方法方面：采用气相色谱法测试天然气气体组分；采用精度等级高于2级的流量测试仪器测量压缩机工艺气通过量；采用精度等级高于1.5级的压力测试仪器测量压缩机进出口压力 P_1 、 P_2 ；采用精度等级高于0.2级的温度测试仪器测量压缩机进出口温度 T_1 、 T_2 。在计算方法方面：在计算中需要按照实际气体特性来考虑压缩过程中压缩系数变化这一因素的影响，分别将进出口气体的压缩因子代入到多变指数计算公式中；采用状态方程求解天然气实际气体焓值，该方法较目前国内采用的人工查图法更为科学和精确，准确性方面首选BWRS方程，加上工程应用的快捷要求，首推使用NIST状态方程软件，同时满足了准确性和便捷性的工

程应用要求;考虑气体的压缩性,加入多变压缩因子对多变压缩功计算进行修正;相应调整多变效率的计算公式。

根据以上分析结论修订后的SY/T 6637-2018已于2018年10月发布,2019年3月实施。经过一年以上在国内天然气管道站场现场性能测试与计算中的实际应用,实际效果显示计算方法与厂家、国外标准均保

持了一致,计算结果一致;测试方法适合国内站场能耗计量仪表和安装位置的实际情况,为国内天然气管道压缩机组提供了可靠的能效计算方法,通过实际应用再次验证了对标工作的科学性和准确性,也为开展企业间主要耗能设备能效对标工作提供了统一的计算基础^[11]。

参考文献

- [1] 李建良,周书仲,刘冰,等.输气管道系统能耗测试和计算方法:SY/T 6637-2012[S].北京:石油工业出版社,2012:5-8.[LI J L, ZHOU S Z, LIU B, et al. The method of energy consumption test and calculation for natural gas pipeline transport system: SY/T 6637-2012[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 5-8.]
- [2] 张巍,张鹏,王华青,等.天然气管道压气站燃气轮机的性能测定与分析[J].油气储运,2016,35(3):311-313.[ZHANG W, ZHANG P, WANG H Q, et al. Performance measurement and analysis on gas turbines in gas pipeline compressor stations[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(3):311-313.]
- [3] 刘国豪,管维均,张旭东,等.“十一五”油气输送管道系统耗能设备的节能监测[J].油气储运,2013,32(11):35-37.[LIU G H, GUAN W J, ZHANG X D, et al. Energy-saving monitoring of energy-consuming equipments in oil and gas pipeline transportation systems during China's 11th Five-Year Plan[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(11): 35-37.]
- [4] 王华青,张鹏,刘国豪,等.跨国输气管道的节能监测[J].油气储运,2016,35(2):152-153.[WANG H Q, ZHANG P, LIU G H, et al. Energy saving monitoring of transnational gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(2): 152-153.]
- [5] 田建伟,陈海红,李志忠,等.企业能效对标管理标准化研究[J].标准科学,2013(10):22-26.[TIAN J W, CHEN H G, LI Z Z, et al. Standardization study on energy efficiency benchmarking management for enterprises[J]. Standard Science, 2013(10): 22-26.]
- [6] Turbo compressors - Performance test code: ISO 5389 [S]. IX-ISO, 2005: 30-33.
- [7] Performance test code on compressors and exhausters: ASME PTC 10 [S]. US-ASME, 1997: 23-31.
- [8] CTO Газпром: CTO Газпром: 2-3.5[S]. Russia-CTO, 2007: 113-115.
- [9] 李长俊.天然气管道输送[M].北京:石油工业出版社,2000:21-22.[LI C J. Natural Gas Pipeline Transportation [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2000: 21-22.]
- [10] 张轩,姜进田,王华青,等.基于回归分析法的离心式压缩机性能模型[J].油气储运,2018,37(2):197-199.[ZHANG X, JIANG J T, WANG H Q, et al. A centrifugal compressor performance model based on regression analysis method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(2): 197-199.]
- [11] 刘冰.油气管道能效管理[M].北京:地质出版社,2011:4-6.[LIU B. Energy efficiency management for oil and gas pipelines[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 4-6.]

(责任编辑 王雨墨 编辑 马桂霞)