

编者按:在逐步加强能源计量管理工作的同时,大家逐渐意识到,计量技术机构与企业的节能计量技术创新是能源计量工作持续、深入开展的重要保障。为推动能源计量工作的深入开展,促进企业节能降耗,本刊特推出“节能计量技术”专题,探讨计量技术机构为企业能源计量提供的具体技术服务、企业应用计量技术获得节能降耗的实例、节能计量技术成果介绍、能源计量器具本身的节能问题等。

弯管流量计的计量特性及其在热电行业的节能效益验证

□肖晖 赵武

流量仪表在实现有效计量的同时,也会造成能量损耗。科学选择流量仪表,以有效解决准确计量与计量仪表耗能这一矛盾,是做好能源计量工作的重要工作。经过理论分析和实践总结,笔者认为,在气体流量测量中以弯管流量计替代常见的孔板式差压流量测量装置,既能准确测量气体的流量,又可免除孔板节流装置的压损,达到节能的效果。

一、弯管流量计的测量原理和节能原理

1. 弯管流量计的测量原理

理论研究和大量的实验研究表明:流体在流经弯管时,由于弯曲管壁的导流作用,使流体在流经弯管时其内侧流速会逐渐增大,而外侧流速却逐渐减小,这就形成了各个过流断面的近似梯形速度分布,且这种梯形速度分布状态在弯管45°截面处达到极限状态。弯管45°截面各质点流速分布如图1所示。

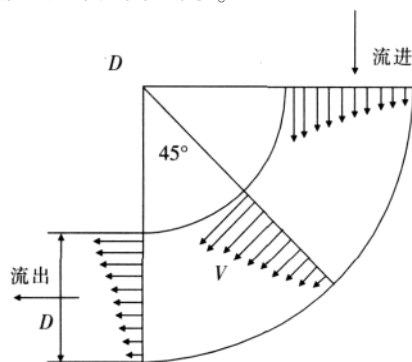


图1 弯管45°截面各质点流速分布图

由于流体流经弯管流量计过程的复杂性,致使不可能用通常的理论方法推导出一个简单的数学表达式,而只能借助于量纲分析的方法建立一个涵盖全部可能影

响因素而形式上复杂的数学表达式。根据量纲分析原理:流过弯管流量计流体的平均流速 \bar{v} 与弯管内、外侧压力差 Δp 的关系可以用欧拉数 Eu 表示:

$$Eu = f_{\alpha}(Re, Fr, Ma, \frac{R}{D}, \frac{L_1}{D}, \frac{L_2}{D}, \frac{\lambda_1}{D}, \frac{\lambda_2}{D}, \frac{\lambda_3}{D}, \frac{\lambda_4}{D}, \frac{\Delta}{D}, \beta_1, \beta_2) \quad (1)$$

$$Eu = \frac{\rho \bar{v}^2}{\Delta p} \quad (2)$$

式中: Re ——雷诺数; Fr ——费劳德数; Ma ——马赫数; R/D ——弯径比; L_1, L_2 ——前后直管长度; λ_1, λ_2 ——外侧取压孔位置; λ_3, λ_4 ——内侧取压孔位置; Δ ——管道内壁粗糙度; β_1, β_2 ——前后直管段与弯管的夹角; D ——管道的公称内径。

根据欧拉数 Eu 的定义,式(2)可以进一步改写为

$$\bar{v} = f_{\alpha}(Re, Fr, Ma, \frac{R}{D}, \frac{L_1}{D}, \frac{L_2}{D}, \frac{\lambda_1}{D}, \frac{\lambda_2}{D}, \frac{\lambda_3}{D}, \frac{\lambda_4}{D}, \frac{\Delta}{D}, \beta_1, \beta_2) \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

式中: α ——流量系数。

$$\alpha = f_{\alpha}(Re, Fr, Ma, \frac{R}{D}, \frac{L_1}{D}, \frac{L_2}{D}, \frac{\lambda_1}{D}, \frac{\lambda_2}{D}, \frac{\lambda_3}{D}, \frac{\lambda_4}{D}, \frac{\Delta}{D}, \beta_1, \beta_2) \quad (4)$$

式(3)建立了流体流过弯管流量计的工作原理表达式,根据欧拉数 Eu 的定义,弯管流量计工作原理可以表述为:流过弯管流量计的流体动能($\rho \bar{v}^2$)与弯管内外的压力差(Δp)具有比例关系。其比例系数(流量系数) α 是雷诺数、费劳德数、马赫数、弯径比、前后直管段长度、取压孔(内、外侧)位置、直管段与弯管的连接角度,以及弯管内

表面的粗糙度等影响因素的函数。

式(4)给出了理论流量系数 α 的函数表达式,对于该系数的确定可以通过求解包含相关影响因素的纳维-斯托克斯微分方程确定。

2. 弯管流量计的节能原理

对于火力发电企业,弯管流量计取代孔板节流装置是否具有节能效果,可以通过发电机组的汽轮机功率间接计算。

孔板的节流会使蒸汽压力降低,意味着做功能力减小,造成不可恢复的能量损失。孔板产生的压力损失通常根据式(5)计算:

$$\delta p = (1 - \beta^{1.9}) \Delta P \quad (5)$$

式中: β ——节流件直径比; ΔP ——节流孔板差压值,kPa。

发电机组的汽轮机功率 P_i 的计算:

$$P_i = \frac{D(h_0 - h_h)\eta_i}{3600} \eta_m \eta_g \quad (6)$$

式中: D ——汽轮机组蒸汽流量; h_0 ——进汽机蒸汽焓值; h_h ——供热蒸汽焓值; η_i ——汽轮机相对内效率(约为82%); η_m ——汽轮机机械效率(约为98%); η_g ——发电机效率(约为98%)。

初始参数(入口蒸汽参数) p_1, T_1, h_1 和抽汽参数 p_2, T_2, h_2 直接影响汽轮机的功率。

电厂为了监测和计量需要,通常在锅炉出口和汽轮机入口的管道上加装节流孔板,造成初压 p_1 降低;在汽轮机外供蒸汽总管加装节流孔板,造成供热总出口蒸汽压力 p_2 升高,这两个参数的变化均会造成汽轮机有效发电功率的降低。

而弯管流量计是安装在管道转弯处,取代现有的弯头的,没有增加新的阻力,因此在使用中不会使蒸汽品质下降。如用弯管流量计替代孔板节流装置,在锅炉出口压力不变的情况下,将提高汽轮机初压 p_1 并降低供热总出口压力 p_2 ,从而提高汽轮机发电效率,减少节流元件带来的能量损耗,达到节能的目的。

二、弯管流量计系数的实流标定

评价弯管流量计替代孔板的实际效果,首先要保证弯管流量计替代孔板后计量准确度不下降。笔者在此次验证实验中,采用测量不确定度为0.25%($k=2$)的常压临界流速喷嘴标准装置,用空气作为检测介质,对出厂编号分别为JZ123和JZ124的两只DN200的弯管流量计计量装置(由弯管流量传感器、流量积算仪以及温

度和差压变送器组成的测量系统)进行流量计系数实流标定。其中,编号为JZ123的弯管流量计计量装置的检定结果如表1所示。

表1 检定结果

弯管流量计的常用流量测量范围为(1800~4500)m ³ /h			
标准装置的流量值 (m ³ /h)	流量计指示流量值 (m ³ /h)	示值误差 (%)	重复性 (%)
1792	1795	0.17	0.11
2702	2712	0.37	0.09
3592	3604	0.33	0.11
4481	4499	0.40	0.08

检定时的环境条件: $P_{\text{大气}} = 100.58\text{kPa}, T_{\text{环境}} = 24^\circ\text{C}$
弯管流量计实际流量系数: $\alpha(R \cdot D) = 0.58$

由表1数据可以得出如下结论:经过精密加工的弯管流量计计量装置的计量特性稳定可靠,通过实流标定确定弯管流量计的流量系数,弯管流量计可以在较宽的流量测量范围内达到1.5%的准确度,在计量特性方面完全可以替代传统的孔板式差压流量计。

三、节能效益实例分析

下面结合南京新苏热电厂蒸汽测量系统的技改实例,分析弯管流量计取代孔板流量计的节能效果。该厂共2炉1机,通常1炉1机运行,锅炉出口和汽轮机进汽入口均安装的是孔板流量计。当1#炉运行时,锅炉出口蒸汽流过孔板、阀门等阻流件到达汽机入口,压力降低2kg;2#炉运行时,压力降低更是降低了3kg,造成汽机入口压力始终低于设计值0.8kg左右。他们急需解决2#炉运行压损过大的问题,原来计划扩大管径,但投资较大。后来决定淘汰产生压损的主要部件——两台孔板流量计。该厂2#炉进行技改前的相关参数如表2、表3所示。

表2 2#炉出口相关参数

安装位置	2#炉出口		
流量计量系统所采用的节流装置	标准孔板		
刻度流量	100t/h	最高差压	250kPa
常用流量	75t/h	常用差压	140.6kPa
工作表压	3.68MPa	工作温度	437℃
直径比 β	0.765877	最大压力损失	101.682kPa

1. 阻力损失

以上参数为流量计计算书中的真实数据,根据式(1)可以算出常用流量为75t/h时2#炉和汽轮机两道孔板产生的压力分别为55.9kPa、54.4kPa,总压损高达110.3kPa。为了蒸汽计量而造成如此高的能量损

表3 汽轮机入口相关参数

安装位置	汽轮机入口		
节流装置	标准孔板		
刻度流量	120t/h	最高差压	250kPa
常用流量	75t/h	常用差压	98kPa
工作表压	3.38MPa	工作温度	436℃
直径比β	0.65329	最大压力损失	139.1kPa

失,会使汽轮机少发很多电,这是一笔不小的长期性的能源浪费。

2.节能计算

蒸汽流经锅炉出口和汽轮机入口的节流孔板是一个绝热节流过程,蒸汽焓值不变。汽轮机功率的变化可以用莫里尔焓熵图进行计算(见图2, h 为焓值, s 为熵)。已知节流前的状态 P_1, t_1 及节流后的压力 P_1' , 根据节流

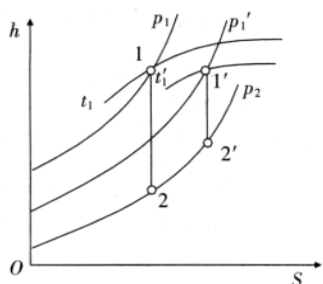


图2 汽轮机主蒸汽节流对汽轮机功率的影响

前后焓值相等的特点,可在 $h-s$ 图上确定节流后的各状态参数。如图2所示,点1的参数是 P_1, t_1 及 h_1 , 在图2上过点1按定焓画水平线与 P_1' 相交得1', 即可得节流后的参数。汽轮机的

做功为可逆绝热膨胀过程(即等熵过程),水蒸气在节流前由点1经可逆绝热膨胀至抽汽压力 P_2 时,可利用的焓降为 h_1-h_2 , 而经节流后的水蒸气,同样经可逆绝热膨胀至压力 P_2 时,可利用的焓降为 $h_1'-h_2'$, 显然 $h_1-h_2 > h_1'-h_2'$, 节流以后蒸汽可做功减少。

(1)无节流件时汽轮机入口压力将提高0.1103MPa, 初参数 $P_0=(3.38+0.1103)=3.4903\text{MPa}$, $T_0=437^\circ\text{C}$, 根据工程热力学,可计算出 $h_0=3305.185\text{kJ/kg}$, $s_0=6.95348$ 。

(2)加节流后初参数 $P_0'=3.38\text{MPa}$, 由图2查得 $h_0'=h_0$, 求得 $s_0=6.96756$ 。

(3)节流前供热抽汽压力 $P_h=0.7\text{MPa}$, $s_h=s_0$, 则 $h_h=2893.8458\text{kJ/kg}$ 。

(4)节流后抽汽参数 $P_h'=P_h=0.7\text{MPa}$, $s_h'=s_0'$, 由图2查得 $h_h'=2900.8642\text{kJ/kg}$ 。

由式(2)计算出汽轮机功率下降值 P_x 为

$$P_x = P - P'$$

$$= \frac{D(h_0-h_h)\eta_i}{3600} \eta_m \eta_g - \frac{D(h_0'-h_h')\eta_i}{3600} \eta_m \eta_g$$

$$= \frac{D(h_h'-h_h)\eta_i}{3600} \eta_m \eta_g$$

$$= \frac{75000 \times (2900.8642 - 2893.8458) \times 0.82}{3600} \times 0.98 \times 0.98$$

$$= 115.15\text{kW}$$

汽轮机前两道孔板节流所产生的能量损失使得汽轮机每小时少发电115.15kW·h, 按通常每千瓦时电0.4元上网电价计算,为46.06元/h。考虑全年330天运行,则少发电合人民币46.06×24×330=36.48万元。用弯管流量计替代孔板,可以实现增收36.48万元/年,节能效果非常明显。弯管流量计使用3个月节能的钱即可将整套流量计设备技术改造投资全部收回。如果同时考虑节能带来的环保效益和弯管耐磨损(计量特性稳定)、无跑冒滴漏等优点,则优势更加明显。

3.改造前后数据对比

(1)2#炉改造前相关数据如表4所示。

表4 2#炉改造前相关数据

序号	2#炉主汽流量 (t/h)	2#炉主汽压力 (MPa)	2#炉主汽温度 (°C)	汽机进汽压力 (MPa)
1	69.2	3.71	438	3.42
2	70.6	3.65	437	3.35
3	70.0	3.64	439	3.35
4	70.7	3.65	442	3.36
5	69.9	3.72	443	3.44

(2)2#炉改造后运行数据如见表5所示。

表5 2#炉改造后相关数据

序号	2#炉主汽流量 (t/h)	2#炉主汽压力 (MPa)	2#炉主汽温度 (°C)	汽机进汽压力 (MPa)
1	74.7	3.61	438	3.40
2	74.8	3.66	437	3.45
3	75.0	3.62	439	3.42
4	70.7	3.60	442	3.41
5	62.1	3.66	443	3.54
6	62.5	3.61	440	3.47

由2#炉技改实施前后的实际对比数据(见表4、表5)可知,技改前2#炉主汽管70t/h流量经过两套孔板流量计进汽机时,总压降平均为0.3MPa,包括孔板压力损失、管道沿程阻力损失、局部阻力损失。改造后,总压降为0.2MPa,压力损失减少0.1MPa。通过对2#炉主蒸汽流量与进水流量、汽机入口流量的对比,也进一步验证了弯管流量计在1:5的量程范围内的准确度可

(下转第78页)

表1 伴生气加热与不加热两种方法检测的相对密度对比表

月份	不加热相对密度	加热后相对密度	相对密度变化, %
2008.2	0.6854	0.6904	0.73
2008.3	0.6958	0.7004	0.66
2008.4	0.6999	0.7035	0.51
2008.5	0.6994	0.7027	0.47
2008.6	0.6988	0.7018	0.43
2008.7	0.6957	0.6985	0.40
2008.8	0.7113	0.7138	0.35
2008.9	0.7020	0.7043	0.34

气的流速和色谱柱的温度成比例关系。一般来说,适当升高色谱柱的温度更有利于天然气中重组分的馏出,减少重组分在色谱柱上的吸附损失,从而使检测的实际相对密度提高。为摸清色谱柱温度与密度大小的关系,我们创建了ANA1、ANA2、ANA3、ANA4等4种方法,使每种方法的色谱柱温度均不相同(ANA1为厂家推荐的方法),检测时将用于分离C₄H₁₀~C₉H₂₀重组分的OV-1色谱柱温度适当升高,用于分离CH₄、C₂H₆、CO₂和N₂的Plot U色谱柱温度适当降低。实验样品采用供气处理厂的原料气,分析参数变化及检测结果如表2所示。

表2 4种检测方法参数及检测的相对密度对比表

方法	ANA1	ANA2	ANA3	ANA4
OV-1柱温(°C)	95	110	120	130
Plot U柱温(°C)	70	65	65	65
运行时间(s)	320	300	270	230
实测相对密度(kg/m ³)	0.7430	0.7435	0.7480	0.7410
相对密度变化(%)	/	+0.07	+0.67	-0.27

通过表2所列数据可以看出,当OV-1色谱柱温度由ANA1的95℃升高到ANA2的110℃时,各组分分析的结果基本没有变化,相对密度值无明显变化(0.7435);当温度升高到ANA3的120℃时,C₃H₁₂以后的重组分含量明显升高,并检测出了C₉H₂₀,说明120℃的柱温有利于重组分脱吸,从而使相对密度值增加(0.7480),增加约有

(上接第63页)

达到1.5%,计量性能优于原孔板流量计,完全满足蒸汽流量测量的准确度要求。

四、研究结论

以上从理论、实验到现场实际应用等方面对弯管流量计性能作了综合阐述,由实流标定实验可以看出,弯

0.67%;当温度升高到ANA4的130℃时,也能看到有C₉H₂₀组分馏出,但C₃H₈、C₄H₁₀、C₅H₁₂组分含量反而减少了,相对密度值也变小(0.7410),这说明柱温升得太高,使得C₃H₈、C₄H₁₀、C₅H₁₂组分馏出太快,分离效果降低了。因此,色谱柱的温度并不能无限制地提高,120℃的柱温既能实现完全分离,又最大限度地提升了相对密度,是个比较合理的设定温度。而降低Plot U柱温,即由70℃降到65℃,可使得N₂与CH₄完全分离,避免N₂被误当作CH₄定量,使样品相对密度偏小,这对提高检测的重复性和定量的准确度起到了非常关键的作用。

3.快速分析样品,提高机动能力,减少输差损失

Agilent 3000A移动检测系统现场采样、现场分析,检测结果真实反映了管道集输天然气气质,相对密度的检测结果比同时用钢瓶取的样品带回室内分析的结果明显要高,尤其在冬季,最大可以相差3%。由于Agilent 3000A不需要长时间预热,检测一个样品只要5min左右,有效避免了个别用户利用检测过程期间进行流程调整作弊的行为。2008年9月,我们在某联合站检测伴生气气质时,该站技术人员得知检测人员到达后,立刻对交接的管道天然气进行降温并调减输气量,天然气相对密度在20min内从0.8440降到了0.8198,变化幅度达3%,反映在气量上就形成了1.5%的负输差。由于移动检测系统分析速度快、机动灵活,在管道气体密度异常降低前就完成了一组数据录取工作,当再次分析发现相对密度已经大幅变化时,工作人员很快得知有人正在作弊,从而避免了重大输差损失。

三、结束语

油田伴生气气质波动大,容易造成气量计量输差损失。通过采取有效措施,使伴生气检测方法更为科学,确保了数据准确。检测结果现场完成交接,避免了因交接一方曲解而产生计量纠纷,使计量工作始终在公平、合理的前提下进行,交接双方原存异议被彻底消除,有效化解了计量交接纠纷,避免了矛盾的升级,确保了企业和客户的利益,同时为油田计量管理工作树立了良好的形象。

作者单位【中原油田分公司天然气产销厂】

管流量计准确度高、性能稳定,完全满足工业应用条件;现场应用前后的对比数据则充分展示了无压力损失的节能效果,在当前能源日趋紧张的情况下具有重要意义,值得在热电等行业大力推广应用。

作者单位【肖晖 江苏省质量技术监督气体流量计检测中心、赵武 河北理工大学智能仪器厂】