

试验研究

煤粉炉掺烧乙烯火炬气热力计算分析

李庆华¹, 韩淑燕¹, 罗凯², 林世华²

(1.北京东方石油化工有限公司化工四厂,北京 102400;2.北京东方石油化工有限公司
东方化工厂,北京 101149)

摘要:以企业自备电厂中 65 t/h 煤粉炉掺烧乙烯火炬气为对象,对我厂煤粉炉的基本情况和乙烯火炬气的特性进行了介绍,根据混合燃料的特点建立了热力计算模型,分别对 100 %和 70 %两种负荷下的纯煤和最大量掺烧四种极端工况进行了热力校核计算,并对混合燃料特性、炉膛辐射换热、对流换热和锅炉热效率等四个方面的影响进行了分析;同时,剖析了掺烧改造的火炬气回收和供气、燃气燃烧器和安全保护等三个关键系统,论述了掺烧比例的确定、掺烧位置的选择、运行和配风优化等需要重点关注的三个问题,为企业回收利用工业废气,锅炉掺烧非设计燃料,实现节能创效提供了理论和实践参考。

关键词:乙烯火炬气;煤粉炉;煤气掺烧;热力计算

中图分类号:TK212

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2015)03-0014-04

我厂乙烯装置规模为 16 万吨/年,生产过程中产生的火炬气总量在 4 500~5 000 Nm³/h,低位发热量约为 23.7 MJ/Nm³,具有很好的回收利用价值。近些年,工厂采取多项回收利用措施,但仍有部分富余火炬气通过高架火炬燃烧排放,既污染环境又浪费能源。2010 年,公司决定将 65 t/h 煤粉炉掺烧火炬气技术开发与工业化应用列为科研项目,将火炬气引入自备电厂的两台煤粉炉作为辅助燃料,不仅要实现工厂火炬气的全部回收利用,而且要将燃气锅炉退出运行,提高背压机组的发电负荷,减少锅炉辅助用柴油,从而降低装置能耗和生产成本,提高企业经济效益。本文以我厂 65 t/h 煤粉炉掺烧乙烯火炬气为对象,对 100 %和 70 %两种负荷下的掺烧工况和纯煤工况进行了热力计算和影响分析,为燃煤锅炉掺烧工业废气提供了理论和实践参考。

1 装置概况

我厂现有两台武汉锅炉厂设计和生产的煤粉炉,锅炉采用单锅筒、自然循环、门型布置、钢结构、四角布置直流燃烧器;燃烧器布置在两侧墙上,形成四角喷射,假想燃烧切圆为 $\Phi 519$ mm,每

组燃烧器布置有三个二次风、两个一次风和一个三次风,一、二次风相间布置,三次风布置在上二次风的上面;设计为油煤混烧锅炉,渣油喷嘴布置在最上方,但由于燃料结构调整,锅炉现为纯煤运行,燃油系统也全部拆除;制粉系统为钢球磨中间储仓式热风送粉,一炉配置一磨,磨的储备系数为 1.59。锅炉设计参数有:额定蒸发量 65 t/h,额定蒸汽压力 3.82 MPa,额定蒸汽温度 450 °C,给水温度 105 °C,连续排污率 3 %,冷风温度 20 °C,热空气温度 320 °C,排烟温度 152 °C,设计热效率 90 %,锅炉炉膛截面 5 620×5 620 mm,净高为 11.8 m,容积为 370.5 m³,总辐射受热面为 306.1 m²,全煤工况下燃料消耗量为 8.5 t/h。

2 乙烯火炬气的特性

我厂的火炬气主要为乙烯装置裂解过程中产生的工业废气,其组分中氢气(H₂)为 26.71 %,甲烷(CH₄)为 58.4 %,其余绝大部分为氮气(N₂)等不可燃气体,测定火炬气的热值为 23.722 MJ/Nm³,完全可以在炉内形成可靠的稳燃火焰,起到良好的稳燃、助燃作用。火炬气中的可燃成分完全燃烧时所放出的热量,若按煤的发热量 24.283 MJ/kg 计算,则燃烧 1000 Nm³ 火炬气可节约煤约

0.98 t,具有很好的经济效益。火炬气具有气体燃料比重小、扩散快、易混合均匀、流动压损小等优点;气体燃料扩散是分子级扩散,与其相比,煤粉无论如何制备,其比表面积都不可能达到气体燃料的水平,因此进入炉膛后,气体的着火和燃尽时间都远低于煤粉,且火焰传播的稳定性和速度高于煤粉气流。如果将火炬气喷嘴布置在锅炉最下层,则在火炬气投入时,炉膛整体火焰稳定性大大提高,可以降低锅炉最低稳定运行负荷。同时,用乙炔火炬气作锅炉燃料进行点停炉和稳燃时,不仅可以节约大量燃油,创造可观的经济效益,而且完全避免了投油时不能投入电除尘而引起的烟气不能达标排放等问题。

3 热力计算与分析

3.1 热力计算方法的确定

目前,各种锅炉设计手册中只有对全烧煤或全烧气体燃料的热力计算方法,两种计算方法完全不同。通常,固体燃料以单位质量为基准,燃烧计算所需的空气和产生的烟气的单位均为 m^3/kg ;而气体燃料以单位体积为基准,燃烧计算所需的空气和产生的烟气的单位均为 m^3/m^3 ,所以在进行固体燃料和气体燃料掺烧的热力计算时,必须采取特殊的数据处理方法。一种方法是混合燃料法,将煤和燃气按照质量百分比折算成一种新的、特殊的假想煤进行热力计算,使掺烧燃气的燃煤锅炉的热力计算变成一种我们熟悉的计算方式;另一种方法是附件燃料法,热力计算不按每千克混合燃料进行,仍然按 1 kg 固体燃料进行,同时根据煤和气体燃料的热量份额,将气体燃料(Nm^3)附加折算到 1 kg 固体燃料上去。气体燃料的质量流量与气体的密度有关,它随气体的温度和压力的变换而变化,测量比较困难,影响因素也较多,在工厂实际应用中,常测量其体积流量,因此选用附加法进行热力计算更为恰当,这也是《锅炉机组热力计算标准方法》中推荐采用的计算方法,其附加量及热值计算见公式(1)和公式(2)^[1]。

$$X = \frac{1-q_1}{q_1} \times \frac{Q_1}{Q_2} \quad (1)$$

$$Q = Q_1 + XQ_2 \quad (2)$$

式中: X 为 1 Kg 固体燃料的附加气体燃料量, Nm^3/Kg ; q_1 为固体燃料的热量份额,%; Q_1 为固体燃料低位发热量, MJ/kg ; Q_2 为气体燃料低位发热

量, MJ/kg ; Q 为混合燃料低位发热量, MJ/kg 。

3.2 热力计算模型

为了完整地分析燃煤锅炉在不同工况下掺烧工业废气后的热力数据变化情况,我们依据《锅炉机组热力计算标准方法》和《锅炉计算手册》以 Excel 表格的形式建立了锅炉的热力计算模型,每台锅炉掺烧总量定为 $1\ 500\ \text{Nm}^3/\text{h}$,这样我厂任意三台燃煤锅炉运行,火炬气均能够全部回收利用。计算的内容主要包括:(1)、锅炉辅助数据的计算,包括燃料消耗量、燃烧产物容积、特性参数、空气及烟气焓、锅炉热平衡计算;(2)、炉膛热力计算;(3)、凝渣管热力计算;(4)、高温过热器热力计算;(5)、低温过热器热力计算;(6)、高温省煤器热力计算;(7)、二级空预器热力计算;(8)、低温省煤器热力计算;(9)、一级空预器热力计算^[2,3]。

不仅对锅炉在额定负荷 $65\ \text{t/h}$ (100% 负荷)下,纯燃煤和掺烧火炬气量为 $1\ 500\ \text{Nm}^3/\text{h}$ 两种工况进行了计算,而且对我厂锅炉经常运行的负荷 $45.5\ \text{t/h}$ (70% 负荷)下,纯燃煤和掺烧火炬气量为 $1\ 500\ \text{Nm}^3/\text{h}$ 两种工况进行了计算,同时对 100% 负荷下的最大掺烧量和设计掺烧量下燃烧器布置在不同位置时进行了热力计算,每种工况下的热力计算数据大约为 600 余项。特别是 100% 和 70% 负荷下的纯煤和掺烧设计火炬气量是我厂煤粉经常运行的四种极端工况,只要在极端情况下锅炉各项参数满足工艺和技术要求,其余工况必定介于这四种工况之间,锅炉各项参数也必定符合工艺和技术要求。

3.3 热力计算结果分析

3.3.1 对燃料燃烧特性的影响

对燃料燃烧特性的影响分析,重点是考虑燃料燃烧的稳定性 and 烟气总量变化后对锅炉送、引风机的影响。计算结果表明:锅炉掺烧火炬气后,虽然火炬气低位发热量略低于煤粉的低位发热量,但火炬气附加到燃煤上时新燃料的低位发热量必然增加,计算燃煤消耗量减少;锅炉掺烧火炬气后,混合燃料的理论燃烧温度将下降,下降幅度随掺烧比例增加而增加;火炬气中有较多的不可燃气体,每公斤燃料燃烧所需空气量和产生的烟量均增加。

在锅炉 100% 、 70% 负荷下掺烧 $1500\ \text{Nm}^3/\text{h}$ 火炬气以后,火炬气热负荷比例为 17.24% ,火炬气附加量分别为 0.21 、 $0.33\ \text{Nm}^3/\text{kg}$,燃料理论燃烧

温度分别为 1 832 ℃和 1 753 ℃,较纯煤粉燃烧时分别降低 141 ℃和 206 ℃。在该燃烧温度下,不仅不会对煤粉颗粒的着火和燃尽造成影响,还可以适当降低 NO_x 的生成量。在锅炉 100 %负荷下,掺烧后燃料燃烧所需空气量增加了 6 299 Nm³/h,送风总量为 67 061 Nm³/h,在送风机的出力(90 500 m³/h)范围内;掺烧后烟气量增加了 9 319 Nm³/h,烟气总量标态为 88 333 Nm³/h,热态为 130 238 m³/h,也在引风机的出力(147 000 m³/h)范围内,但调节范围大幅度较小。锅炉 100 %、70 %负荷下,掺烧 1 500 Nm³/h 火炬气前后燃料特性数据分别见表 1、表 2。

表 1 100%负荷下掺烧 1500 Nm³/h 火炬气前后燃料特性数据

项目名称	低位发热量 MJ/kg	燃料消耗量 kg/s	理论燃烧温度/℃	空气量 Nm ³ /kg	空气总量 Nm ³ /h	烟气量 Nm ³ /kg	烟气总量 Nm ³ /h
纯煤工况	24.283	2.357	1973	7.161	60763	9.312	79014
掺烧工况	29.164	1.986	1832	9.3797	67061	12.355	88333
变化量	+4.881	-0.371	-141	+2.219	+6299	+3.043	+9319

表 2 70%负荷下掺烧 1500Nm³/h 火炬气前后燃料特性数据

项目名称	低位发热量 MJ/kg	燃料消耗量 kg/s	理论燃烧温度/℃	空气量 Nm ³ /kg	空气总量 Nm ³ /h	烟气量 Nm ³ /kg	烟气总量 Nm ³ /h
纯煤工况	24.283	1.624	1959	7.161	41866	9.312	54442
掺烧工况	32.047	1.249	1753	10.69	48071	14.153	63638
变化量	+7.764	-0.375	-206	+3.529	+6205	+4.841	+9196

3.3.2 对炉膛辐射换热的影响

在 100 %负荷工况下,掺烧 17 %火炬气后,混合燃料理论燃烧温度降低了 141 ℃,炉膛出口烟气的终点温度由 1 044 ℃上升到 1 051 ℃,上升了 7 ℃。在 70 %负荷工况下,掺烧 24%火炬气后,燃料理论燃烧温度降低了 206 ℃,炉膛出口烟气的终点温度由 915 ℃上升到 932 ℃,上升了 17 ℃。原因是锅炉掺烧火炬气后,一方面由于火炬气中的不具备辐射能力的不可燃气体较多,在炉膛内也会吸收大量的燃烧生成热,降低了炉内燃烧产物的温度水平,炉内烟气辐射的热量减少;另一方面随着烟气流量的增加,炉膛内烟气流速增加,烟气在炉内的停留时间缩短,同时掺烧火炬气后,炉膛具有辐射能力的粒子减少,炉膛黑度降低,水冷壁辐射吸热量减少,两种负荷下,锅炉掺烧 1 500 Nm³/h 火炬气后炉膛辐射吸热量较纯煤燃烧工况分别减少了 1 995、2 174 kJ/s,所以炉膛出口温度上升,

并且随着掺烧比例的增加而增加。同时,不同掺烧位置对炉膛出口烟温影响较大,在 100 %负荷下掺烧设计火炬气量时,当掺烧位置为下二次风和三次风之上时,后者炉膛出口温度增加了 5 ℃,减温焓降增加了 7.8 kJ/kg,几乎达到减温器的最大减温能力。炉膛水冷壁掺烧 1 500 Nm³/h 火炬气前后主要热力数据见表 3。

表 3 炉膛水冷壁掺烧 1 500 Nm³/h 火炬气前后热力数据

项目名称	100%负荷			70%负荷		
	炉膛烟气热量	辐射吸热量	炉膛出口温度	炉膛烟气热量	辐射吸热量	炉膛出口温度
纯煤工况	63355	32936	1044	43334	25219	915
掺烧工况	65202	30941	1051	44669	23045	932
变化量	+1847	-1995	+7	+1335	-2174	+17

注:以上表中单位除温度为 ℃;其余均为 kJ/s。

3.3.3 对锅炉对流换热的影响

由于火炬气中有将近 15 %的不可燃气体,锅炉掺烧火炬气后,烟气总量将增加,烟气流速相应增加,因此尾部受热面的对流换热系数增加,对流换热面吸热量也增加。两种负荷下,锅炉掺烧火炬气前后对流吸热总量分别由 19 238、11 367 KJ/s 增加到 2 1054、13 288 KJ/s,分别增加了 1 816、1 921 KJ/s,具体数据见表 4。

表 4 掺烧 1500Nm³/h 火炬气前后对流受热面吸热量

项目名称	100%负荷			70%负荷		
	掺烧前	掺烧后	变化量	掺烧前	掺烧后	变化量
凝渣管	2194	2241	+47	1452	1517	+65
高温过热器	7132	7806	+674	4028	4712	+684
低温过热器	4622	5144	+522	2622	3185	+563
高温省煤器	3707	4207	+500	2226	2793	+567
低温省煤器	1583	1656	+73	1019	1101	+82
总吸热量	19238	21054	+1816	11347	13308	+1961

注:以上表中单位均为 KJ/s。

对流受热面吸热量增加后,需要重点校核减温器的减温能力,如果高低温过热器吸收热量增加太多,超过减温器的减温能力时,将使过热器超温,影响设备的安全运行。从计算结果看,当锅炉 100 %负荷时,锅炉掺设计量火炬气后,所需减温焓降最大,为 227 kJ/kg。由于我厂两台煤粉炉设计时考虑了油煤混烧比例 49 %+51 %和 100 %纯煤运行两种工况,因此锅炉设计时对流受热面,特别是过热器受热面的布置按照全煤燃烧工况进行考虑,在油煤各半混烧时,受热面就显得过大,为了解

决此种工况下过热器超温问题,表面式减温器的设计受热面积较常规设计增加了 23.5%,减温焓降由正常情况下的 190 kJ/kg 增加到了 235 kJ/kg。锅炉掺烧设计火炬气量时,虽然不会出现蒸汽超温情况,但已经接近上限,掺烧比例必须控制在合理范围之内。在 100% 负荷下制约火炬气掺烧量的关键因素为过热蒸汽的温度,当掺烧比例为 19% 时(掺烧量为 1 692 Nm³/h),需要的减温焓降为 235 kJ/kg,超过此值,便超出减温器的减温能力,过热器蒸汽就会超温,锅炉被迫降负荷运行。对于表面式减温器,减温焓降提高后,将提高省煤器进出口给水水温,因此,我们还必须对高温省煤器出口给水温度进行校核,将其控制在饱和温度或合理的沸腾度下。100% 负荷下,锅炉掺烧 1 500 Nm³/h 火炬气前后高温过热器热力数据见表 5。

表 5 100% 负荷下掺烧 1500 Nm³/h 火炬气前后高温过热器热力数据

项目名称	烟气流速 m/s	换热系数 W/(m ² ·°C)	换热量 kJ/s	蒸汽减温焓降 kJ/kg	省煤器出口水温/°C
纯煤工况	6.3	42.94	7132	142	209
掺烧工况	7.1	46.85	7806	227	226
变化量	+0.8	+3.91	+674	+85	+17

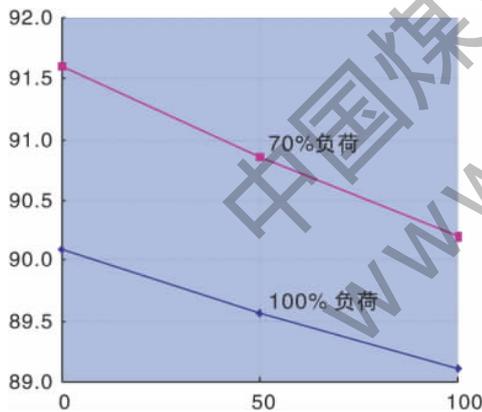


图 1 掺烧火炬气对锅炉热效率的影响

3.3.4 对锅炉热效率的影响

锅炉掺烧火炬气后,100% 和 70% 两种负荷下,锅炉热效率分别降低了 1.07%、1.4%。通过增加掺烧 50% 设计量计算,绘制了锅炉掺烧火炬气对热效率的影响趋势图(见图 1),在相同负荷下,锅炉效率随着掺烧比例的增加而降低。分析其原因,主要是锅炉烟气量增加后,相同温度下烟气的焓值增加,烟气带走的热量增加,从热力计算结果分析,两种工况下,排烟温度均为 150 °C 时,烟气焓值由纯煤燃烧时的 1954.45 kJ/kg 分别增加到 2587.7、2961.8 kJ/kg,增加幅度分别为 32.4%、51.54

%。由于烟气量增加所带走的热量与炉膛辐射吸热减少的热量之和大于对流受热面传热系数提高所增加的吸热量,锅炉排烟温度提高,排烟热损失增加,锅炉热效率降低。因此,两种负荷下,掺烧设计的火炬气总量后,锅炉的排烟温度分别升高了 7 °C 和 9 °C,最高达到 160 °C(100% 负荷下掺烧最大掺烧量时),不会对后续系统如布袋除尘器和脱硫造成影响,由于烟气量增加的比例较大,分别为对应纯煤工况的 111.8%、116.9%,最终使锅炉效率分别降低了 1.17%、1.4%,但掺烧所创造的效益远远大于锅炉热效率降低造成的损失。

4 结束语

(1) 乙炔火炬气在我厂煤粉锅炉中的掺烧利用是企业实现节能减排的有效方法之一,能给企业带来了显著的经济效益、环保效益和社会效益,在石化企业中具有很好的应用和推广价值。

(2) 我厂煤粉炉掺烧火炬气后,燃料理论燃烧温度降低,烟气体积增大,炉膛内辐射吸热量减少,炉膛出口烟温上升,各对流受热面吸热量增加,由于炉膛内部吸热减少量大于受热面吸热增加量,锅炉排烟温度上升,锅炉热效率略有降低,在 70% 负荷下,掺烧设计火炬气量(1 500 Nm³/h)时,锅炉热效率降低了 1.4%。

(3) 燃煤锅炉在掺烧火炬气改造过程中,要综合考虑送引风机的出力、蒸汽系统可靠性和安全性、设备安装尺寸、锅炉热效率等因素,对掺烧比例做出合理的选择。我厂煤粉炉在 100% 负荷下,最大掺烧比例受到减温器减温能力的制约,掺烧最大量为 1 692 Nm³/h(掺烧比例为 19%)。

(4) 煤粉炉的炉膛火焰中心高度对炉膛出口烟温和主蒸汽温度影响较大,应优先选择下二次风位置,并对燃烧器的负荷分配和配风进行优化,最大限度降低火焰中心高度,降低炉膛出口温度,确保锅炉各项参数受控。

参考文献

- [1] 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京:机械工业出版社,1976:6-9.
- [2] 冯俊凯,沈佑庭,杨瑞昌. 锅炉原理及计算(第三版)[M]. 北京:科学出版社,2007:268-332.
- [3] 宋贵良. 锅炉计算手册(上册)[M]. 辽宁:辽宁科学技术出版社,1995:725-1277.