

大型干法水泥生产线 纯低温余热发电热量利用分析

彭 岩, 姚敏娟

(中信重型机械公司, 洛阳 471039)

摘 要:结合蒸汽动力朗肯循环,通过对国内5 000t/d新型干法水泥熟料生产线排放的纯低温废气余热的定量计算,分析研究现代水泥窑余热的有效利用情况和发电效率。结果表明,大型干法水泥生产线纯低温余热发电系统其总效率约为22%,发电功率占窑头窑尾总排放废气量约11%,占烧成系统热耗的3.5%左右。

关键词:干法水泥;低温余热;利用分析

近年来,国内水泥工业的建设规模和技术水平都有较大的进步,现代新型干法水泥生产线的综合能耗已有了较大幅度的降低,但由于生产规模的扩大,烧成系统仍有大量的低温废气余热被排放,得不到充分利用。另一方面,水泥生产时又要消耗大量的电能,而当前国内电力供应紧张,电价持续上涨,已严重制约了水泥工业的发展。同时结合国家实施的节能、环保等一系列的政策措施,就使得低温废气余热发电技术的研究、开发、推广应用尤为必要。被排放的低温废气余热如果用于发电,余热的有效利用率究竟有多少,以吨熟料发电能力来评价为何会出现差异?被排放的低温废气余热最大发电能力到底有多大?……这是每位业主都非常关心的问题。因此,本文将通过一些有针对性的定量计算,来分析余热的有效利用率及

余热发电效率。

1 有效发电功率的计算

锅炉有效利用的热量用于产生蒸汽并驱动汽轮机发电系统产生电能。一定热量下产生电能的多少,取决于热力发电系统的效率。

蒸汽动力装置的理想循环就是朗肯循环,其动力设备如图1。根据焓熵图以及水蒸气性质表计算得到朗肯循环的各点状态参数,计算方法如图2。朗肯循环的T-s图见图3。

点1: $P_1=1.7\text{MPa}$ 、 $T_1=330^\circ\text{C}$

$h_1=3\ 100.70\text{kJ/kg}$ 、 $s_1=6.970\ \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

点2: $P_2=0.008\text{MPa}$ 、 $T_2=41.53^\circ\text{C}$

$h_2=2\ 180.78\text{kJ/kg}$ 、 $s_2=6.970\ \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

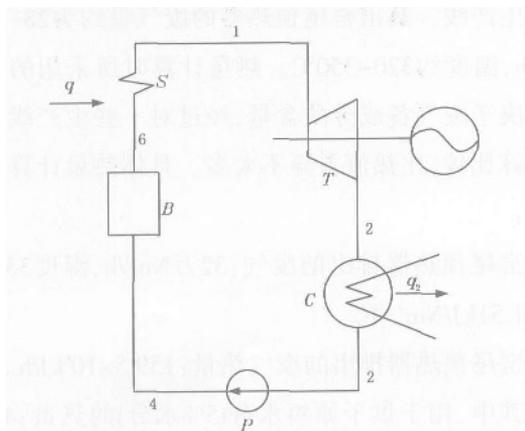


图1 简单朗肯循环图

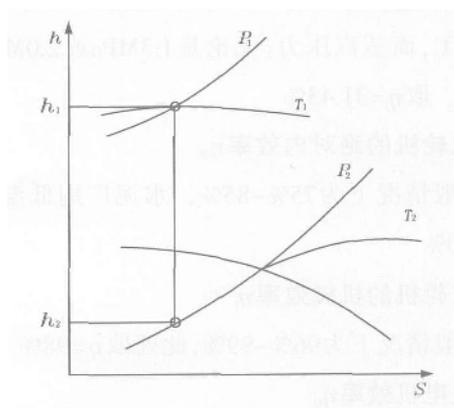


图2 朗肯循环计算方法

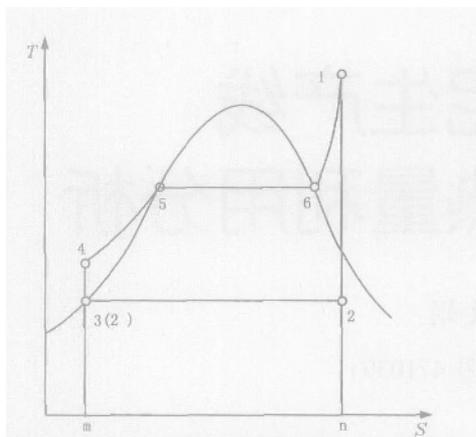


图3 朗肯循环T-s图

点3: $P_3=0.008\text{MPa}$ 、 $T_3=41.53^\circ\text{C}$

$$h_3=173.87\text{kJ/kg}, s_3=0.5925\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})。$$

点4: $P_4=1.7\text{MPa}$ 、 $T_4=41.59^\circ\text{C}$

$$h_4=175.57\text{kJ/kg}, s_4=0.5925\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})。$$

点 $_{2\text{act}}$: $P_{2\text{act}}=0.008\text{MPa}$ 、 $h_{2\text{act}}=2373.7\text{kJ/kg}$

$$s_{2\text{act}}=7.55\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})。$$

忽略不计水泵功,循环热效率 η 的近似计算公式为:

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} = \frac{3100.70 - 2180.78}{3100.70 - 173.87} = 31.43\%$$

1.1 锅炉效率 η_{gl}

余热锅炉吸收的热量,考虑2%的锅炉排污率等热损失,其余全变成蒸汽去发电,则此处可认为锅炉效率 $\eta_{\text{gl}}=98\%$ 。

1.2 管道效率 η_{gd}

一般情况下若不计工质损失为99%,考虑到水泥厂纯低温余热发电系统相距较远,主蒸气有压降、温降,此处取 $\eta_{\text{gd}}=98\%$ 。

1.3 循环热效率 η_t

因朗肯循环的1点状态参数,温度影响较大,废气温度在 350°C 左右,决定了朗肯循环的1点蒸汽温度 $<330^\circ\text{C}$,而蒸汽压力(无论是 1.3MPa 或 2.0MPa) h_1 变化不大。取 $\eta_t=31.43\%$ 。

1.4 汽轮机的绝对内效率 η_{ai}

一般情况下为75%~85%,水泥厂用低温汽轮机取 $\eta_{\text{ai}}=80\%$ 。

1.5 汽轮机的机械效率 η_j

一般情况下为96%~99%,此处取 $\eta_j=98\%$ 。

1.6 发电机效率 η_d

与冷却方式有关,对于中小容量的空气冷却机组

其效率在97%~98%,一般取 $\eta_d=98\%$ 。

1.7 总效率 η

将以上各项效率考虑以后,则大型干法水泥生产线纯低温余热发电系统的总效率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{\text{gl}} \times \eta_{\text{gd}} \times \eta_t \times \eta_{\text{ai}} \times \eta_j \times \eta_d \\ &= 0.98 \times 0.98 \times 0.314 \times 0.8 \times 0.98 \times 0.98 = 23.19\% \end{aligned}$$

若汽轮机的绝对内效率取 $\eta_{\text{ai}}=75\%$,则系统的总效率为21.74%。

综合分析大型干法水泥生产线纯低温余热发电系统的总效率为:21%~23%。

2 废气余热利用分析

由于各个水泥生产线的规模、工艺流程、原燃料特性、气象条件等原始资料不尽相同,废气排放量、废气成分和温度也有所差异。为了方便分析计算,使余热利用情况以数量化的形式展现,下面以5000t/d熟料生产线为例,对水泥窑废气热量进行定量分析计算。其它规模生产线的分析可大致依此类推比较。

2.1 窑尾预热器和窑头熟料冷却机废气排放的热量

2.1.1 窑尾预热器废气排放的热量

目前国内水泥生产线的燃料有采用烟煤的,也有采用无烟煤的,煤质不同,燃烧后产生的烟量也有所差异,高挥发分的煤和质量较差的煤其烟量产生量较多。另外受预热器系统换热效率和分离效率的影响,不同的工艺配置将使出预热器系统的废气温度有所不同。经过现场调研和查阅资料,我们了解到目前国内新型干法水泥生产线单位熟料窑尾预热器排出废气量约为 $1.34\sim 1.63\text{Nm}^3/\text{kg}$ 熟料,那么对于5000t/d熟料生产线,其出窑尾预热器的废气量约为 $28\sim 34\text{万Nm}^3/\text{h}$,温度约 $320\sim 350^\circ\text{C}$ 。热量计算时所采用的比热值取决于废气各成分的含量,经过对一些生产线的取值计算比较,比热值差异不太多。具体热量计算取值如下:

窑尾预热器排出的废气: $32\text{万Nm}^3/\text{h}$,温度 330°C ,比热 $1.51\text{kJ}/\text{Nm}^3\cdot^\circ\text{C}$ 。

窑尾预热器排出的废气热量: $159.5 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ 。

其中,用于烘干原料水分(5%水分)的热量: $45.5 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ 。

扣除烘干原料热量后，窑尾排放的废气热量：
114×10⁶kJ/h。

2.1.2 窑头熟料冷却机废气排放的热量

目前多数生产线配置的第三代充气梁篦冷机热回收效率可达72%~75%，单位熟料冷却风量降至1.9~2.2Nm³/kg熟料，余风排放量也相应降低。由于不同生产线的工艺配置和原燃料特性的不同，窑用二次风和分解炉用三次风也有所不同，加之煤磨在窑头或窑尾的配置不同，均对余风排放量有所影响，但其大致范围在1.34~1.48Nm³/kg熟料，那么对于5 000t/d熟料生产线，其余风排放量约为28~31万Nm³/h，温度约200~250℃。冷却机排出气体主要是空气，所以比热可按自由空气的比热取值。热量计算时取值如下：

窑头熟料冷却机排出的废气：30万Nm³/h，温度250℃，比热1.3kJ/Nm³·℃

窑头熟料冷却机排出的废气热量：97.5×10⁶kJ/h

2.1.3 窑头窑尾总排放的废气热量

经过上述计算可知，窑头窑尾实际排放的废气总热量为211.5×10⁶kJ/h，折合单位熟料总排放的废气热量为1 015.2kJ/kg熟料。

现代新型干法水泥熟料生产线烧成热耗~3 010kJ/kg熟料，那么窑头窑尾总排放的废气热量占水泥熟料烧成热耗的百分比为33.7%。

2.2 余热锅炉有效利用热量

2.2.1 窑尾SP炉有效利用热量

由于窑尾出SP炉的废气要用于烘干原料，因此，要根据原料水分含量，通过原料磨系统的热平衡计算，确定出SP炉的废气温度。根据当前国内多数5 000t/d生产线的工艺配置情况，当煤磨在窑头、原料磨采用立磨时，确定出SP炉的废气温度按230℃计。如果煤磨在窑尾，或原料磨采用管磨时，还须结合原料磨和煤磨系统的热平衡计算，另行确定出SP炉的废气温度，此处为简化计算，不再一一列出。确定了进出SP炉的废气量、废气温度、漏风量、废气含尘浓度等参数后，即可根据锅炉热平衡计算，求得SP炉有效利用的废气热量。计算取值和结果见表1。

表1 窑尾有效利用热量计算值

项 目	一般值	最小值	最大值
进SP炉废气量 (万Nm ³ /h)	32	28	34
进SP炉废气温度 (°C)	330	330	350
出SP炉废气温度 (°C)	230	230	230
SP炉有效利用热量 (×10 ⁶ kJ/h)	49.5	43.2	63.7
单位有效利用热量 (kJ/kg熟料)	237.6	207.4	305.8

2.2.2 窑头AQC炉有效利用热量

窑头熟料冷却机排出的废气温度一般为200~250℃，此温度下的热量品位较低，很难进行动力回收，影响吨熟料发电能力。因此这部分废气一般都不直接进AQC炉，而在篦冷机中部开设抽气口，抽出360℃左右的中温废气，进行余热动力回收。中部抽出中温废气量的多少，须结合篦冷机的物料气体温度分布曲线，并根据风量平衡和热量平衡的原理，在不影响窑用二次风、分解炉用三次风和煤磨用风的前提下，经过计算确定中部抽气量。进出AQC炉的各项参数确定后，即可根据锅炉热平衡计算，确定AQC炉有效利用废气热量。中部抽气量和AQC炉有效利用废气热量的计算值见表2。（篦冷机排气量和温度如与实际运行值有出入，可与相关单位共同商讨）。

表2 AQC炉有效利用废气热量计算值

项 目	一般值	最小值	最大值
改造前冷却机尾部排气量 (万 Nm ³ /h)	30	28	31
改造前冷却机尾部排气温度 (°C)	250	200	250
改造后冷却机尾部排气量 (万 Nm ³ /h)	13.3	18.3	13.7
改造后冷却机尾部排气温度 (°C)	120	120	120
改造后冷却机中部抽气量 (万 Nm ³ /h)	16.7	97.0	17.3
改造后冷却机中部抽气温度 (°C)	350	350	350
进 AQC 炉废气量和温度可按改造后冷却机中部抽气量和温度计			
出 AQC 炉废气温度 (°C)	95	95	95
AQC炉有效利用热量 (×10 ⁶ kJ/h)	55.1	31.9	56.9
单位有效利用热量 (kJ/kg熟料)	264.5	153.1	273.1

2.2.3 窑头窑尾锅炉总有效利用热量

经过以上计算，窑头窑尾锅炉总有效利用热量可汇总于表3。如果热力发电系统效率按21%计，可以将有效发电功率也一并计算列于表3。

当采用一般值时，锅炉有效利用热量占窑头窑尾总排放的废气热量的百分比为49.5%。

从上述计算不难看出，吨熟料发电能力与水泥生

表3 窑头窑尾锅炉总有效利用热量

项 目	一般值	最小值	最大值
窑头窑尾锅炉 总有效利用热量 ($\times 10^6 \text{kJ/h}$)	104.6	75.1	120.6
单位有效利用热量 (kJ/kg 熟料)	502.1	360.5	578.9
有效发电功率 (kW)	6 102	4 380	7 035
吨熟料发电能力 (kWh/t 熟料)	29.3	21.03	33.8

产线排出的废气参数密切相关,而不同的生产线工艺配置、原燃料资源、环境条件等都有差异,即便生产能力相同,排出的废气参数也有所不同。因此,单纯地以吨熟料发电能力来衡量热力发电系统的效率是不合理的,而应以水泥生产系统实际排出废气热量的回收率来评价热力发电系统。

当采用一般值时,锅炉有效利用热量占窑头窑尾总排放的废气热量的百分比为49.5%。

3 纯低温余热发电热力系统

目前针对水泥窑废气余热特点,具有工业应用价值的低温余热发电热力系统有以下三种形式:

3.1 单压系统

应用单压系统时,由于废气温度较低,余热锅炉的蒸发与过热受热面的匹配与尽可能的利用余热之间较难一致,为了充分利用低位热能,必须降低蒸汽饱和温度,降低主蒸汽压力,以保证主蒸汽有较高的过热度。由于主蒸汽压力低,汽轮机叶片的开发和制造难度较大。

3.2 双压系统

为了降低锅炉排气温度,充分利用低位热能,在锅炉(AQC炉)上设置两个汽包,以高低两个压力系统的工质分别吸收高位和低位热能,采用补汽式汽轮机引入高压和低压蒸汽做功。如果低压蒸汽参数提高,则可以提高系统效率,但锅炉排烟温度则相应提高,余热利用量降低;如果低压蒸汽参数低,则吸收热量多,蒸汽量大,发电量增加,但对汽轮机的体积和末级叶片的要求会相应提高,另外凝汽器的循环水量也要增大,从而增加电站自用电量。因此需根据设备配置,优化系统参数设计,从而选择最佳参数。

3.3 闪蒸系统

同双压系统不同的是,闪蒸系统不是另设一个低

压部分,而是利用闪蒸原理(即高温高压水在压力突然降低时部分瞬间蒸发为饱和蒸汽的现象),加大省煤器中的工质流量,充分吸收低位热能,闪蒸出饱和蒸汽进入汽轮机做功。此项技术对汽轮机的结构和材质要求较高,同时给水泵流量较大,用电量较大,部分抵消了其充分多利用热能的优势。

通过以上纯低温余热发电系统的定量分析,对于具有五级预热器的国产5 000t/d新型干法生产线,窑头窑尾锅炉总有效利用的热量 $\sim 104.6 \times 10^6 \text{kJ/h}$,转化为有效发电功率时为6 100kW,单位熟料发电能力约为29kWh/t。发电有效利用热量为 $\sim 22 \times 10^6 \text{kJ/h}$,占烧成系统热耗的17%左右。从而可以对余热利用情况有较清晰的量化了解,以进一步研究开发有效措施,充分回收利用废气余热。

4 结论

(1)由于不同生产线的热耗不同,排放的废气参数不同,单纯以吨熟料发电能力来评价纯低温余热发电系统的优劣是不妥的,应以系统的发电效率作为主要评价指标。

(2)废气温度确定后,由朗肯循环可确定纯低温余热发电系统的最大效率。废气量确定后,纯低温余热发电系统的最大发电功率也就确定了。

(3)窑头窑尾总排放的废气热量占水泥熟料烧成热耗的百分比约为33.7%。

锅炉有效利用热量占窑头窑尾总排放的废气热量的百分比约为49.5%,占烧成系统热耗的17%左右。

大型干法水泥生产线纯低温余热发电系统的总效率约为22%,发电功率占窑头窑尾总排放的废气热量的11%,占烧成系统热耗的3.5%左右。

参考文献:

[1]陈全德. 新型干法水泥技术原理及应用. 第一版. 北京:中国建材工业出版社, 2004年01月.
 [2]西安电力学校汽轮机教研组. 小型火力发电厂汽轮机设备及运行. 第二版. 北京:水利电力出版社, 1989年07月.
 [3]沈维道. 工程热力学. 第二版. 北京:高等教育出版社, 1987年02月.
 [4]水泥厂纯低温余热发电峰会资料, 杭州萧山. 2005年03月.
 [5]大型干法水泥生产线烟气排放设计及标定资料.□