

干熄焦锅炉系统热效率经济性分析与应用

李 涛 赵建平 (唐钢美锦(唐山)煤化工有限公司, 河北 唐山 063000)

摘 要: 干熄焦是回收利用焦化生产过程中焦炭显热的重要技术, 本文以典型干熄焦系统的设计工况为计算基础, 以锅炉系统经济性运行为前提, 对干熄焦锅炉系统的能量平衡进行了理论研究; 同时, 在能量平衡计算的基础上, 利用 EUD 图像法对余热锅炉进行焓损分析, 并结合 EUD 图像法分析锅炉系统换热焓损随运行参数的变化关系, 找出影响余热锅炉热效率的经济性能指标。通过对干熄焦的系统运行参数进行优化调整, 进一步提高锅炉系统热效率, 实现经济性运行。

关键词: 余热锅炉; 热效率; 经济性; 焓值; 经济性能指标

1 干熄焦锅炉系统概述

干熄焦锅炉系统是干熄焦工艺系统中的一个重要组成部分, 一般为余热锅炉, 作用是降低干熄焦系统循环冷却气体的温度并吸收其热量, 产生蒸汽用于发电或外送用户, 可节约产生相同吨数蒸汽的燃煤 (或油、气等), 减少了这些燃煤 (或油、气等) 燃烧后对大气的污染, 尤其减少了 SO_2 、 CO_2 向大气的排放, 我国在干熄焦系统工艺技术方面的研究有了很大的进展, 采用干熄焦技术可回收约 80% 的红焦显热, 即干熄 1t 红焦可产生中压过热蒸汽约 0.5~0.6t。

2 余热锅炉热效率的计算

2.1 热力回收计算模型建立

干熄焦工艺作为一个系统工程, 其生产过程中许多结果的影响因素是多样而非单一的。通过对其进行热平衡计算, 可以得出锅炉的热效率。

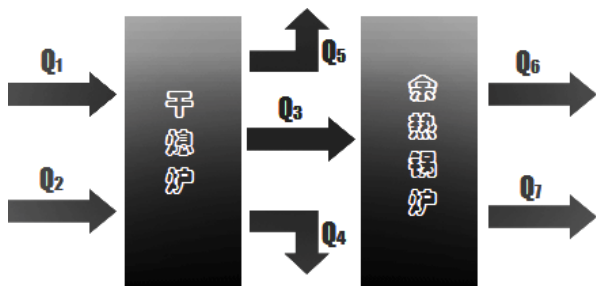


图1 余热锅炉热力回收计算模型

图1为余热锅炉热力回收的计算模型。图中, Q_1 为干熄炉内焦炭冷却放出的热量; Q_2 为由于焦炭烧损放出的热量; Q_3 为惰性循环气体吸收的热量; Q_4 为由于系统中吸入空气和漏损循环气体所损失的热量; Q_5 为干熄炉冷却段表面散失于环境的热量; Q_6 为锅炉侧汽水的吸热量; Q_7 为锅炉系统散失于周围大气的热量。

干熄炉侧的热平衡关系式为:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (1)$$

锅炉侧的热平衡关系式为:

$$Q_3 = Q_6 + Q_7 \quad (2)$$

2.1.1 Q_1 的计算

$$Q_1 = (C_{j1} \cdot T_{j1} - C_{j2} \cdot T_{j2}) \cdot G \quad (3)$$

式中: C_{j1} 、 C_{j2} 为干熄炉进出口焦炭的平均比热容, 其值取决于焦炭中的含碳量、挥发分和矿物杂质含量, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_{j1} 、 T_{j2} 干熄炉进出口焦炭的温度, K ; G 干熄炉的焦炭处理 kg/h 。

对于已知组份的焦炭, 平均比热容可以用下式计算:

$$c_j = \frac{A^0}{100} \cdot c_A + \frac{\omega_{(C)}}{100} \cdot c_C + \frac{V^0}{100\rho} \cdot c_r \quad (4)$$

式中: A^0 焦炭的灰分 (质量), %; C_A 灰分的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\omega_{(C)}$ 焦炭中碳的质量分数, %; C_C 碳的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V^0 焦炭的挥发分 (质量), %; C_r 焦炭挥发分单位体积的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; ρ 标准状态下挥发分的密度, kg/m^3 。

2.1.2 Q_2 的计算

干熄炉内焦炭与循环气体换热时, 不可避免的出现焦炭烧损, 由于焦炭烧损放出的热量 Q_2 为:

$$Q_2 = G \cdot \phi \cdot (1 - A) \cdot q \quad (5)$$

式中: q 焦炭的热值, $q = 32700 \text{ kJ/kg}$; ϕ 焦炭烧损率, %; A 焦炭的灰分, %。

整个干熄焦锅炉系统的余热回收效率可通过余热锅炉内生产蒸汽的有效利用热量与高温烟气带入锅炉的总热量之比来计算。余热回收效率不仅取决于焦炭的初始温度、最终温度, 而且也取决于余热锅炉中的换热系数和热损失。

余热锅炉的热效率为:

$$\eta = Q_6 / Q_3$$

由于干熄焦系统的设备都是在设计工况的基础上

进行设计制造和调试运行,并以设计工况为基准进行各个设备以及整个系统的运行状态评价。实际运行时,系统的运行工况往往偏离设计工况,对其特性分析是系统优化运行的基础,即研究负荷与运行条件变化时系统特性的变化规律以及最佳的控制方案。

2.2 能量平衡计算

选定干熄炉的设计焦炭处理能力是 150t/h,以系统的设计工况为计算基础,对其进行热平衡计算。其他的相应参数选取如下:干熄炉的散热损失取 2%,焦炭烧损率取 1.5%,余热锅炉排污率取 2%,余热锅炉保热系数取 0.98,给水压力取汽包压力的 1.2 倍,主蒸汽管道温降取 15℃,主蒸汽管道压降取 5%。干熄焦系统惰性循环气体成分主要为: N_2 (70.7%)、 CO (1.85%)、 CO_2 (12.8%) 等,计算余热锅炉入口、出口及干熄炉入口循环气体的平均比热容,分别为: 1.2224、1.1008、1.1025 kJ/(k·K)。

干熄焦系统中焦炭的成分组成为: 固定碳 86.8%,灰分 12%,挥发分 1.2%; 通过公式 (4) 计算出干熄炉进出口焦炭的平均比热容。干熄炉入口焦炭比热容为 1.5384 kJ/(kg·K),干熄炉出口焦炭比热容为 0.9983 kJ/(kg·K)。

由上述说明推算可知,干熄焦系统的输入与输出热量,可参考表 1。

表 1 干熄焦系统的输入与输出热量

名称	热量 / (GJ/h)
焦炭冷却放出的热量 Q_1	218.85
焦炭烧损放出的热量 Q_2	65.53
惰性循环气体吸收的热量 Q_3	261.1
吸入空气和漏损循环气体的热量损失 Q_4	6.58
干熄炉的散热损失 Q_5	7.59
锅炉侧蒸汽吸收的热量 Q_6	240.26
锅炉的散热损失 Q_7	7.13

热平衡法是以系统能量平衡概念的热力学第一定律为基础,其特点是不同质的能量在数量上的平衡,由于它仅考虑能的数量,而忽略能的品位,所以无法揭示系统内部存在的能量“质”的贬值和损耗;而基于热力学第二定律的焓分析法考虑了过程的不可逆性,即因过程的熵增而造成的不可逆损失,发生能的贬值变质,深刻揭示了能量损耗的本质,使人们得以从“质”和“量”相结合的角度去科学评价能量的利用过程。相比于热平衡法,焓分析法更科学、更深入也更全面,它在揭露能量损失的原因、部位以及改进方向等方面发挥独特的作用,为系统能量利用效率的提高指明了方向。

3 余热锅炉热效率经济性能指标分析

通过热平衡与焓平衡计算对比分析,可得到:

在干熄焦余热发电系统中,以惰性循环气体作为中间载热体回收红热焦炭显热,红热焦炭带入干熄炉的总热量值与总焓值相差 158.26 GJ/h,循环气体带入余热锅炉的总热量与总焓值相差 104.77 GJ/h,这主要是由余热源的品位决定的,通常温度越低,热源的焓值越小,差值越大。通过调节气料比,调整循环气体流量,控制余热锅炉进口气体温度,以提高循环气体进入余热锅炉时所携带的能量品位;循环气体温度的升高也会造成排焦温度的升高,使热量的损失增大,因此需要确定合理的气料比。

EUD 图像焓分析是基于能的品位概念,将系统能量变化、能的品位变化与能量传递过程焓损失三者有机结合,并共用一个图像描述这三者的内在联系,可以通过图像信息进一步明确指出系统改进和集成的方向侧与接收侧之间的面积即为余热锅炉内的换热焓损。将余热锅炉内的换热过程分成三段:省煤器段、蒸发器段和过热器段,分别计算各部分的面积,省煤器段面积 1.83 MW,占锅炉换热焓损 15.06%,蒸发器段面积 7.41 MW,占锅炉换热焓损 60.98%,过热器段面积 2.91 MW,占锅炉焓损失 23.96%;可见,余热锅炉内焓损最大的部位在蒸发器内,可以发现,蒸发器段接收侧的能级基本保持不变,但饱和水变成饱和蒸汽需要吸收大量的汽化潜热,造成蒸发器段汽水焓变很大,这是由水的汽化潜热决定的,汽化潜热大导致蒸发器段的宽度长,造成蒸发器内焓损大。一般汽化潜热随压力升高而减小,释放侧(循环气体)的能量品位主要取决于干熄炉内的换热过程,当循环气体的能量品位一定时,如果提高汽包压力,蒸发器段的面积减小,换热焓损减小;提高吸收侧(汽水)的能级是降低余热锅炉内换热焓损的另一重要措施,提高锅炉蒸汽参数,是汽水能级升高,降低锅炉内换热焓损,然而,蒸汽参数的提高对锅炉设备的要求也提高,使成本增加,经济效益降低,因此,需要选取合适的主汽参数。

针对锅炉热效率经济性能指标分析,进行以下工艺调整,具体包括以下三方面:

3.1 干熄焦系统生产操作的精细控制

实际生产中,干熄炉料位、气料比、排焦温度等工艺参数的波动,都会对锅炉的运行效率产生影响,综合前面的热平衡与焓平衡计算考量。重点对气料比、

主蒸汽参数进行优化。

3.1.1 气料比的优化

在一定范围内, 余热回收率随着气料比的增大而增大, 随着气料比的增大, 系统的热效率也随之增大, 当气料比大于 $1700\text{Nm}^3/\text{t}$ 时, 热效率和焓效率曲线都趋于平缓, 此时再继续增大循环风量, 效率增加的效果并不明显, 相反, 增大循环风量而造成的风机耗功却增加显著; 当气料比为 $1795\text{Nm}^3/\text{t}$ 时, 系统的焓效率达到最大值 33%, 处于经济运行的峰值。

3.1.2 主蒸汽压力优化

当循环气体的能量品位一定时, 提高主蒸汽压力, 汽包压力将随之升高, 蒸发器段换热焓损将减小; 从中可以看出, 提高主蒸汽压力可以降低余热锅炉内的换热焓损, 具体来说, 对蒸发器段的换热焓损影响较大, 对省煤器和过热器段的换热焓损影响较小。

3.1.3 主汽温度优化

相比于提高主汽压力, 提高主汽温度对减小余热锅炉的换热焓损效果更为显著。分别计算余热锅炉内省煤器、蒸发器和过热器三部分的面积, 即余热锅炉内各段换热焓损。余热锅炉内能量释放侧(循环气体)的能级基本保持不变, 提高主蒸汽温度, 过热器段和蒸发器后段吸收侧(汽水)能级升高较为明显, 而省煤器段和蒸发器前段吸收侧(汽水)能级变化较小; 主汽温度的升高使过热器内的过程延长, 相对缩短了蒸发器内的蒸发过程, 这些因素都使蒸发器段换热焓损减少的更为显著, 而省煤器段和过热器段的换热焓损变化相对较小, 但余热锅炉内总换热焓损随主汽温度的升高一直减小。

然而, 主汽的温度也不能无限制的升高, 主汽温度升高, 锅炉内换热温差将减小, 使得换热面积增加导致钢材的使用量急剧增加, 大大降低的余热锅炉的经济性; 同时主汽温度的提高也受到金属材料的制约, 随着主汽温度升高, 金属材料的强度极限、屈服点以及蠕变极限都要随之降低, 高温下金属也会发生氧化, 甚至金相结构变化, 导致热力设备零部件强度大为降低, 乃至毁坏。因此, 适度提高主汽温度对余热锅炉的经济运行是有利的。

3.2 循环气体中可燃成份的控制

干熄焦生产中, 因种种原因, 循环气体中 H_2 、 CO 等可燃成份的浓度会逐渐升高, 为保证人员及设备的安全, 必须对 H_2 、 CO 等可燃成份的浓度进行控制。一般情况下循环气体中 H_2 浓度应控制在 2% 以下,

CO 浓度应控制在 8% 以下。实际操作中, 导入空气燃烧法和导入 N_2 稀释法都能有效控制循环气体中 H_2 、 CO 等可燃物的浓度, 但导入空气法更为经济, 可直接促进循环烟气中的 CO 、 H_2 等可燃成分与空气中的 O_2 发生反应。通过实际操作验证, 采用导入空气燃烧法, 将 CO 控制在 4% 左右, H_2 控制在 0.5% 以下, 有利于提高锅炉入口温度, 可稳定保持在 $880\sim 930^\circ\text{C}$ 之间, 锅炉蒸发量 $\geq 95\text{t/h}$, 吨焦产汽量 ≥ 0.52 , 进而提升锅炉运行效率。

3.3 焦炭烧损率控制

干熄焦生产中存在一定的焦炭烧损, 这也是绝大多数独立焦化企业最为关心的问题, 在观察冶金焦产量无明显变化, 且不影响焦炭质量(焦炭灰分含量不超标)的情况下, 适当多导入一些空气, 除可降低循环系统中的可燃成分含量外, 可进一步加剧焦炭(主要是焦粉)的燃烧, 借此提高输入锅炉系统的热量, 以烧损率的增加推动提升锅炉运行效率。要注意, 烧损率应控制在 2% 以下, 才能保证锅炉处于热效率高位运行。

4 结论

通过上干熄焦余热锅炉系统能量转换过程的梳理, 我们找出了影响余热锅炉运行效率经济性的几方面主要因素, 建立了干熄焦余热锅炉系统优化模型, 以气料比(循环风量和排焦量之比)、余热锅炉主蒸汽参数、循环气体可燃成分作为可控运行参数, 同时结合 EUD 图像法分析干熄焦余热锅炉系统换热焓损随运行参数的变化关系, 分别对于干熄炉系统和余热锅炉系统的主要参数控制作了调整, 在实际生产运行中, 以主蒸汽设计参数为基准, 适当合理的提高主蒸汽参数, 并将气料比控制在 $1600\sim 1700\text{Nm}^3/\text{t}$ 范围内, 此时余热锅炉的换热焓损相对较小, 热效率可达致最大, 经济效益较为显著。在今后的生产中, 要结合干熄焦主体设备运行情况, 不断优化操作模式, 达到最佳工艺指标。

参考文献:

- [1] 唐赛, 李翱. 浅谈影响锅炉热效率的因素以及提高热效率的措施 [J]. 轻工科技, 2021(09):11.
- [2] 谷毅, 何小镔. 干熄焦装置焦炭烧蚀损失反应动力学研究 [J]. 燃料与化工, 2017, 48(5):5.

作者简介:

李涛(1984-), 男, 汉族, 河北赵县人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 焦化。