

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180407

干熄焦余热回收与转化系统的效率分析

陈时选¹, 杜梅芳¹, 赵梦然¹, 郭欣维², 于娟³

(1. 上海理工大学理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093;
3. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 根据某钢厂的干熄焦余热回收与利用系统的工艺流程,绘制了能流图和烟流图。采用热平衡和烟平衡对干熄焦系统的余热转化效率状况进行研究。结果表明,干熄炉、余热锅炉的热效率分别为 82.39%、67.35%,烟效率分别为 82.13%、65.77%,整个系统的热效率和烟效率分别为 74.33%、55.32%。通过烟分析发现,影响余热回收和利用的主要因素为干熄炉和余热锅炉的内部换热烟损失,对此提出了一些优化措施,以提高干熄焦系统的能量利用效率。

关键词: 干熄焦; 余热转化效率; 余热回收利用; 热效率; 烟效率; 热平衡; 烟平衡

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)06-0114-07

Efficiency analysis of CDQ waste heat recovery
and conversion system

CHEN Shi-xuan¹, DU Mei-fang¹, ZHAO Meng-ran¹, GUO Xin-wei², YU Juan³

(1. College of Science,University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Environment and Architecture,University of Shanghai for Science and Technology,Shanghai 200093, China;
3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the process of the waste heat recovery from the CDQ and the utilization system, the energy flow diagram and the exergy flow diagram were drawn. The waste heat conversion efficiency of the CDQ system was studied by means of the thermal balance method and the exergy balance method. The results show that the thermal efficiencies of the dry quenching furnace and the waste heat boiler were 82.39% and 67.35%, respectively, and the corresponding energy efficiencies were 82.13% and 65.77%. The thermal efficiency and the system energy efficiency were 74.33% and 55.32%, respectively. Through the exergy analysis calculation, it was found that the two parts, the internal heat transfer process of dry quenching furnace and the waste heat boiler have serious exergy loss. According to the results of the exergy analysis, two main devices of the CDQ waste heat utilization system were optimized to improve the energy utilization efficiency of the dry quenching system.

Key words: CDQ; waste heat conversion efficiency; waste heat recovery and utilization; thermal efficiency; exergy efficiency; thermal balance; exergy balance

目前,中国钢铁工业总能耗占全国总能耗的 16.3%,钢铁工业能耗约占工业总能耗的 23%,钢铁工业是能源消耗大户。在焦炉的生产能耗中,高温红焦带出的显热约占 37%,高温荒煤气带出的显热约占 36%,焦炉烟道气显热约占 17%,焦炉散热约占 10%^[1-2]。其中,红焦显热采用干熄焦技术能够进行较好地回收,但在余热回收利用方面,往往只考虑了回收能量的“量”的多少,对能量“质量”价值重视不够。基于此,本文以某钢厂的干熄焦余热回收转化系统为研究对象,采用热平衡分析法和烟平衡分析法对整个干熄焦余热回收和转化系统中各种

余热在数量和质量上进行研究,分析了余热资源在随着物流转移过程中的热量耗散损失、烟量损失、热效率和■效率。找出整个系统中余热回收的潜力环节及影响余热回收效率的关键因素,为提高余热回收转化效率提供理论依据并提出具体的改进建议^[3-5]。

1 余热回收与利用系统工艺流程

国内某钢铁公司的两座 55 孔 6 m 焦炉,年产焦炭 110 万 t,配套 140 t/h 的干熄焦装置,备用新型湿法熄焦,以及配套的热力系统。干熄焦炉焦炭运行流程为:从炭化室推出焦炭进入干熄炉的红焦温

作者简介: 陈时选(1992—),男,硕士生; E-mail: csx9527@163.com; 收稿日期: 2018-10-29
通讯作者: 杜梅芳(1959—),女,硕士,副教授; E-mail: zhzhx222@163.com

度为 950~1 050 ℃,装入干熄炉的红焦在预存段预存一段时间后,随着排焦的进行,红热焦炭向下流动进入冷却段,在冷却段从干熄炉底部进入的 130 ℃ 低温循环气体向上流动,两者进行逆流换热,焦炭被冷却到 200 ℃ 以下从干熄炉底部排出。循环气体温度升为 900~960 ℃。干熄焦炉循环气体运行流程

为:循环气体经过环形烟道排出干熄炉,再经过一次除尘器后进入余热锅炉进行热交换产生蒸汽,循环气体温度降至 160~180 ℃ 从余热锅炉底部出来,经过二次除尘器后进入给水预热器,温度降至约 130 ℃ 后再进入干熄炉循环使用^[6]。干熄焦余热利用系统的具体流程如图 1 所示。

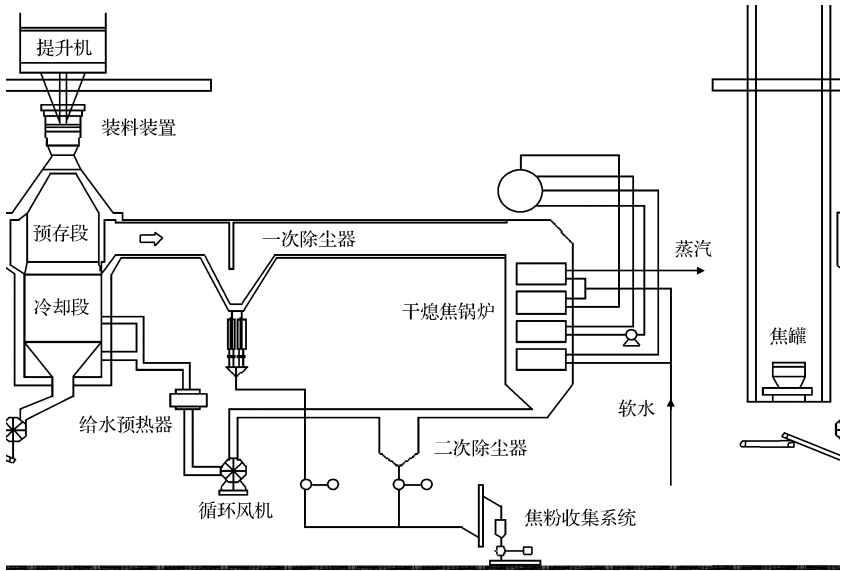


图 1 干熄焦余热回收与转化系统的工艺流程

Fig. 1 Process of waste heat recovery from CDQ and conversion system

2 能量分析数学模型

能量分析的目的是为了确定能量损失的大小、分布和性质以及能量利用率方向。能量分析的方法可分为热平衡分析和焓平衡分析。同时引入热效率和焓效率作为能量评价的指标。

2.1 热量与焓量的计算

物体吸收或放出的热量为

$$Q = (c_1 T_1 - c_2 T_2) \cdot G \tag{1}$$

各状态水和蒸汽焓值为

$$E_x = D_x [h_x - h_0 - T_0 (s_x - s_0)] \tag{2}$$

废气携带的焓值为

$$E_x = \rho V \int_{T_0}^{T_x} c_p \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT \tag{3}$$

式中: Q 为吸收或放出的热量, kJ/h ; c_1 、 c_2 分别为物体进出口平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_1 、 T_2 分别为物体进出口温度, K ; G 为物体流量, kg/h ; E_x 为各状态点的焓值, kJ/h ; D_x 为各状态点蒸汽流量, kg/h ; h_x 为各状态点焓值, kJ/kg ; s_x 为各状态点熵值, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_0 为环境状态温度, K ; h_0 为环境状态点焓值, kJ/kg ; s_0 为环境状态点熵值, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ 为废气密度, kg/m^3 ; c_p 为定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

V 为废气流量, m^3/h 。

2.2 焓平衡方程与焓效率

在任何热力系统中,输出的各种焓值总和永远小于进入的焓值总和。这两者的差值就是热力过程中的焓损 ΔE_i 。由此可得到通用性的焓平衡式为

$$\sum_{i=1}^n E_{\text{in},i} = \sum_{i=1}^n E_{\text{out},i} + \Delta E_1 \tag{4}$$

热力系统整个过程的焓损 ΔE_1 是能量转化过程中所有相关热力设备焓损总和,即

$$\Delta E_1 = \sum_{i=1}^n \Delta E_i \tag{5}$$

热力系统焓效率为

$$\eta_e = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{in},i} - \sum_{i=1}^n \Delta E_i}{\sum_{i=1}^n E_{\text{in},i}} \times 100\% \tag{6}$$

式中: E_{in} 为热力系统输入焓值, kg/h ; E_{out} 为热力系统输出焓值, kg/h ; ΔE_i 为热力系统的焓损, kJ/h ; η_e 为热力系统焓效率, %。

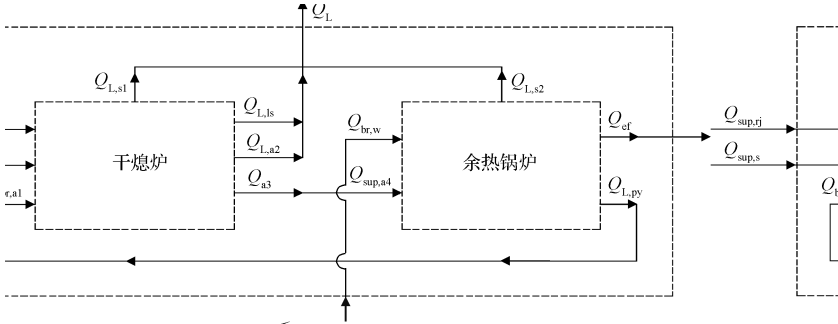
焓是反映能量在品位方面最本质的热力学参数,可以从数量和质量上综合评价能量的品位。焓效率反映了系统中焓的利用程度,是评价热力学完

善度的重要标准^[9-11]。

3 余热回收与转化的能量分析

根据余热回收系统的工艺流程图,建立余热回

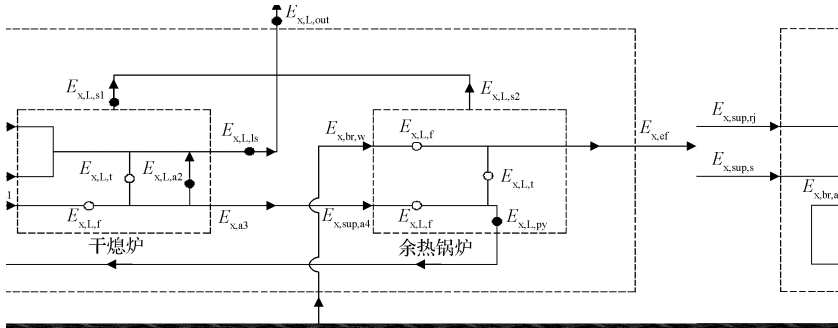
收系统的能流图和焓流图。通过能流图和焓流图分别对干熄炉和余热锅炉两个子系统绘制热平衡表和焓平衡表,用以分析两个设备热量和焓量的利用情况。能流及■流分别如图 2 和图 3 所示。



$Q_{sup,rj}$ 、 $Q_{sup,s}$ —焦炭、焦炭烧损带入系统的热量； $Q_{br,a1}$ 、 $Q_{br,w}$ —循环气体、给水带入系统的热量； $Q_{L,a2}$ —吸入空气和漏损循环气体热量的损失； Q_{a3} —循环气体带入锅炉的热量； $Q_{sup,a4}$ —循环气体带入锅炉的热量； $Q_{L,py}$ —炉尾循环气体带出的热量； $Q_{L,s1}$ 、 $Q_{L,s2}$ —干熄炉、余热锅炉散热损失； $Q_{L,ls}$ —冷却焦炭带走的热量； Q_L —整个系统的热损失； Q_{ef} —有效热量。

图 2 干熄焦余热回收与转化系统的能流

Fig. 2 Energy flow of CDQ during heat recovery and conversion system



$E_{x,sup,rj}$ 、 $E_{x,sup,s}$ —焦炭、焦炭烧损带入系统的焓量； $E_{x,br,a1}$ 、 $E_{x,br,w}$ —循环气体、给水带入系统的焓量； $E_{x,L,a2}$ —吸入空气和漏损循环气体焓量的损失； $E_{x,a3}$ —循环气体带入锅炉的焓量； $E_{x,L,s1}$ 、 $E_{x,L,s2}$ —干熄炉、余热锅炉散热焓损； $E_{x,sup,a4}$ —循环气体带入锅炉的焓量； $E_{x,L,py}$ —炉尾循环气体带走的焓量； $E_{x,L,f}$ —克服流阻焓损； $E_{x,L,t}$ —温差传热焓损； $E_{x,L,ls}$ —冷却焦炭带走的焓量； $E_{x,L,out}$ —外部焓损； $E_{x,ef}$ —有效焓量。

图 3 干熄焦余热回收与转化系统的焓流

Fig. 3 Exergy flow of CDQ during heat recovery and conversion system

3.1 计算参数

根据钢厂提供的数据,利用能量计算模型对干熄焦系统各部分进行热量计算和焓计算。干熄焦系统主要热工参数见表 1。

3.2 系统的热计算及分析

根据干熄焦余热回收与转化系统的能流图,分别对干熄炉和余热锅炉绘制热平衡表,用来分析这两个设备的能量转化利用情况,计算结果分别见表 2 和表 3。

3.2.1 干熄炉的热平衡分析

根据表 2,对干熄炉系统的热平衡分析可得到

以下结果:干熄炉的总热量收入为 459.96 GJ/h,其中主要是红焦显热,占总收入的 61.96%,焦炭烧损热量占 13.94%,循环气体热量占 24.10%;热输出中,有效利用的热量为循环气体显热,循环气体的显热为 378.95 GJ/h,占干熄炉热输入的 82.39%。热量总损失为 81.01 GJ/h,占总输入量的 17.61%,热损失主要分为 3 个部分:一是排出焦炭的显热损失,占干熄炉热损失的 81.63%;二是吸入空气和漏损循环气体热量损失,占干熄炉热损失的 8.12%;三是干熄炉散热损失,占干熄炉热损失的 10.25%。因此,影响干熄炉系统余热回收效率的主要因素是排焦热量损失。

表 1 系统热工参数
Table 1 System parameters

名称	设计工况	名称	设计工况
排焦量/(t·h ⁻¹)	140	余热锅炉出口气体温度/℃	170
红焦温度/℃	1 050	给水预热器进口气体温度/℃	160
排焦温度/℃	200	给水预热器出口气体温度/℃	130
循环气体流量/(m ³ ·h ⁻¹)	199 000	汽包压力/MPa	5.88
干熄炉进口气体温度/℃	130	主蒸汽压力/MPa	5.3
干熄炉出口气体温度/℃	—	主蒸汽温度/℃	450
余热锅炉进口气体温度/℃	970		

表 2 干熄炉热平衡表
Table 2 Heat balance of dry quenching furnace

干熄炉热收入量			干熄炉热输出量		
项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%	项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%
红焦显热	284.97	61.96	冷却后焦炭热量	66.13	14.38
焦炭烧损热量	64.14	13.94	循环气体带出热量	378.95	82.39
干熄炉入口气体	110.84	24.10	吸入空气和漏损循环气体热量损失	6.58	1.43
			干熄炉散热	8.31	1.81
合计	459.96	100.00	合计	459.96	100.00

表 3 余热锅炉热平衡表
Table 3 Heat balance of waste heat boiler

余热锅炉热收入量			余热锅炉热输出量		
项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%	项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%
循环气体带出热量	378.95	94.38	中压蒸汽物理热	259.69	67.35
给水物理热	6.63	1.65	循环气体出口热量	110.84	28.75
			锅炉散热	7.13	1.85
			锅炉排污	2.05	0.53
			其他热损失	5.87	1.52
合计	385.58	100.00	合计	385.58	100.00

3.2.2 余热锅炉热平衡分析

根据表 3,对余热锅炉系统热平衡分析可知:余热锅炉总的热收入为 385.58 GJ/h,主要热输入为循环气体带入热量,其热量为 378.95 GJ/h,占热量总收入的 94.38%;热输出中,有效利用的热量为中压蒸汽物理热,占 67.35%,影响余热锅炉效率的主要因素为循环气体的出口温度,排出的循环气体显热占总输入热量的 28.75%。

3.2.3 干熄炉-余热锅炉的热平衡分析

根据表 2、表 3 以及系统的能流图,对干熄炉-余热锅炉系统进行热平衡分析可知:整个系统的热输入为 349.12 GJ/h(循环气体显热为内部循环热量,

不算入整个系统的热收入),整个系统有效利用的热量为中压蒸汽的物理热(259.69 GJ/h),占整个系统热效率的 74.33%。系统主要的损失为排焦热损失(66.13 GJ/h),占整个系统热输入的 18.94%。因此,要提高整个系统的热效率,应当从干熄炉着手,降低排焦温度,从而提高整个系统的热效率。

干熄炉运行时,循环风量应当与焦炭的处理量相匹配,两者的比值称为风焦比,它的大小直接影响干熄炉内换热效果。增大风焦比时,排焦温度会降低,焦炭冷却效果提高,但会导致余热锅炉入口温度偏低,进而造成锅炉产汽参数达不到要求。当风焦比过小时,排焦温度升高,达不到焦炭的冷却要求,

余热锅炉入口循环气体温度升高,影响锅炉安全运行。因此,确定合理的风焦比对提高干熄炉效率和系统的安全运行十分重要。

3.3 系统的烟计算及分析

热平衡只是考虑了能量在数量上的守恒,但是

能量的损失不仅仅是能量的数量,更重要的是能量的质量。烟分析方法就是综合考虑了能的“量”与“质”这两个方面,能够真正地反映出能量损耗的实质,比热平衡方法更为客观、准确。系统的烟流分布见表 4 和表 5。

表 4 干熄炉烟平衡表
Table 4 Exergy flow of dry quenching furnace

干熄炉烟收入量			干熄炉烟输出量		
项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%	项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%
红焦温度烟	126.68	64.84	排焦温度烟	5.54	2.84
焦炭烧损烟量	64.14	32.83	循环气体带出烟量	160.47	82.13
循环气体带入余热锅炉总热量	4.56	2.33	吸入空气和循环气体漏损烟量	0.37	0.19
			干熄炉散热烟	3.73	1.91
			干熄炉内部换热烟损失	25.27	12.93
合计	195.38	100.00	合计	195.38	100.00

表 5 余热锅炉烟平衡表
Table 5 Exergy flow of waste heat boiler

余热锅炉烟收入量			余热锅炉烟输出量		
项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%	项目	数量/(GJ·h ⁻¹)	比例/%
循环气体温度烟	160.47	99.91	中压蒸汽物理烟	105.63	65.77
给水物理烟	0.14	0.09	循环气体出口烟	4.56	2.84
			锅炉散热烟损	3.05	1.90
			排污烟损	0.56	0.35
			锅炉内部换热烟损	43.34	26.98
			给水预热器烟损	1.58	0.98
			除氧器烟损	1.35	0.84
			其他散热烟损	0.54	0.34
合计	160.61	100.00	合计	160.61	100.00

3.3.1 干熄炉系统的烟分析

根据表 4,对干熄炉系统烟分析可知:干熄炉的烟收入为 195.38 GJ/h,其中主要烟收入为红焦温度烟,占干熄炉烟收入的 64.84%,其次为焦炭烧损烟量,占干熄炉烟收入的 32.83%。干熄炉的烟输出主要是循环气体带出烟,占干熄炉收入烟的 82.13%。有效利用烟为循环气体带出烟,其烟量为 160.47 GJ/h。影响干熄炉烟利用效率的主要因素有干熄炉内部气固换热的不可逆烟损、排焦温度烟损、干熄炉散热烟损。

3.3.2 余热锅炉系统的烟分析

余热锅炉的烟收入为 160.61 GJ/h,收入烟几乎全部来自循环气体的温度烟;在烟输出中,有效利用的烟为中压蒸汽物理烟,其烟量为 105.63 GJ/h,余

热锅炉的烟效率为 65.77%。

3.3.3 干熄炉-余热锅炉系统的烟分析

根据表 4、表 5 以及整个系统的烟流图,对干熄焦-余热锅炉系统进行烟分析可知:

(1)整个系统的烟收入为 190.96 GJ/h(循环气体的温度烟为系统的内部循环烟,不是外部烟收入),有效利用烟为中压蒸汽物理烟,数值为 105.63 GJ/h,因此整个系统的烟效率为 55.32%。烟损主要来源于干熄炉内部换热和余热锅炉内部换热,其烟损分别为 25.27 和 43.34 GJ/h。

(2)整个系统烟损可以分为内部烟损和外部烟损。内部烟损占总烟收入的 37.46%,其中干熄炉、余热锅炉子系统的内部烟损分别占内部总烟损的 35.32% 和 60.58%,外部烟损占总收入的

7.22%。

(3)干熄炉-余热锅炉系统的主要烟损为内部换热烟损。因此要提高整个系统的烟效率就必须降低这部分的烟损。在干熄炉系统中,内部烟损主要发生在冷却段的换热过程以及环形烟道段的燃烧和换热过程中。在冷却段,焦炭和循环气体之间的换热强度决定了烟损的大小,降低这部分烟损的做法是:1)通过改变冷却段内的循环风量、焦炭的下降速度、布料和布风等措施来提高冷却段的换热效果,从而降低换热烟损;2)减小焦炭和循环气体之间的换热温差,进而减小换热烟损。在环形烟道处,焦粉和可燃性气体燃烧放出热量,通常燃料的化学能的品位

都比较高,这就导致了干熄炉环形烟道段的换热烟损失较大。因此,降低焦炭的烧损率可以大大降低因焦炭烧损而产生的换热烟损。

在余热锅炉系统中,内部烟损失主要是锅炉内部换热烟。因此,要提高余热锅炉效率就必须减小锅炉内部换热烟损。

3.4 中温中压、高温高压、高温超高压锅炉的烟效率分析

影响余热锅炉烟效率的主要原因是锅炉内部换热烟损失,因此,对中温中压、高温高压、高温超高压锅炉的烟效率进行对比分析。三种类型锅炉生产运行参数见表 6^[12-13]。

表 6 三种类型锅炉的主要工艺参数
Table 6 Main process parameters of three types of boilers

锅炉类型	排焦量/ (t·h ⁻¹)	锅炉入口温度/℃	锅炉出口温度/℃	出口蒸汽温度/℃	出口蒸汽压力/MPa	出口蒸汽流量/ (t·h ⁻¹)	给水温度/℃
中温中压锅炉	140	970	170	450	5.3	83.2	104
高温高压锅炉	140	960	176	540	9.8	81.0	104
高温超高压锅炉	150	960	168	540	14.0	87.3	120

根据烟效率公式计算出不同锅炉的烟效率,结果见表 7。

表 7 三种类型锅炉的烟效率

Table 7 Exergy efficiency of three types of boilers			
锅炉类型	输入烟/(GJ·h ⁻¹)	输出烟/(GJ·h ⁻¹)	烟效率/%
中温中压锅炉	160.61	105.63	65.77
高温高压锅炉	165.34	121.97	73.88
高温超高压锅炉	173.67	132.89	76.52

根据表 7 可以看出。随着蒸汽参数的提高,锅炉的烟效率也随之提高。

(1)高温高压锅炉的烟效率比中温中压锅炉的烟效率高 8.11%,高温超高压锅炉的烟效率比高温高压锅炉的烟效率高 2.64%。中温中压、高温高压、高温超高压锅炉内部换热烟损分别占锅炉烟收入的 26.98%、19.62%、18.25%。提高蒸汽参数可以减小锅炉内部换热烟损,从而提高锅炉烟效率。

(2)对比中压锅炉和高压锅炉的参数和烟效率可以发现,提高蒸汽压力和温度,使得烟效率提高明显。因为蒸汽参数的提高使得汽水能级提高,因此锅炉内部换热烟损减小。

(3)对比高温高压锅炉和高温超高压锅炉的参数和烟效率可以发现,提高汽包压力可以减小锅炉

内部换热损失。这是因为在蒸发器段,饱和水变成饱和蒸汽需要吸收大量的汽化潜热,但此时能级基本不变,因此这部分的烟损较大。随着压力的提高,汽化潜热将逐渐减小,因此,提高汽包压力减小了换热烟损失。

4 结论

(1)从热力学第一、第二定律出发,采用热平衡法和烟平衡法分别从能量的数量和质量这两个角度对干熄焦余热回收系统整个用能过程进行了分析和评价,为系统的优化提供理论依据。

(2)在热平衡分析中,干熄焦系统的主要热损失为排焦热量损失。但从烟分析的角度来看,排出焦炭的热量虽然较大,但由于温度较低,品位较低,做工的能力较差,所以这部分的烟损并不高。系统主要的烟损失来源于干熄炉和余热锅炉的内部换热过程引起的不可逆损失。减小这两部分的烟损失将有利于提高整个系统的效益。

(3)整个系统回收利用了总烟收入的 55.32%,内部烟损和外部烟损分别占 37.46%和 7.22%。提高整个系统烟利用效率的重要途径为:通过改变冷却段内的循环风量、焦炭的下降速度和布风等措施来提高冷却段的换热效果,从而降低换热烟损,控制空气导入量将 CO 浓度控制在 4%~6%^[14],从而降

低焦炭的烧损率,以减小干熄炉换热烟损;提高主蒸汽参数和温度,从而降低余热锅炉的内部换热烟损,达到提高干熄焦余热发电系统效率的目的。

参考文献:

[1] 郑文华,刘洪春,周科. 中国焦化工业现状及发展[J]. 钢铁, 2004,39(3):67. (ZHENG Wen-hua,LIU Hong-chun,ZHOU Ke. Status and development of coking industry in China[J]. Iron and Steel,2004,39(3):67.)

[2] 蔡久菊,王建军,陈春霞,等. 钢铁企业余热资源的回收与利用[J]. 钢铁,2007,42(6):1. (CAI Jiu-ju,WANG Jian-ju, CHEN Chun-xia,et al. Recovery of residual heat integrated steelworks[J]. Iron and Steel,2007,42(6):1.)

[3] 郑文华. 焦化厂余热回收利用技术[C]//2013 年干熄焦技术交流研讨会论文集. 银川:中国金属学会,2013:247. (ZHENG Wen-hua. Coking plant waste heat recovery and utilization technology[C]//Proceedings of 2013 Technical Communication Seminar on Coke Dry Quenching Technology. Yinchuan:The Chinese Society for Metals,2013:247.)

[4] 张欣欣,张安强,冯妍卉,等. 焦炉能耗分析与余热利用技术[J]. 钢铁,2012,47(8):1. (ZHANG Xin-xin,ZHANG An-qiang,FENG Yan-hui,et al. Energy consumption analysis and technologies of waste heat utilization for coke oven[J]. Iron and Steel,2012,47(8):1.)

[5] 蔡九菊,王建军,陆钟武,等. 钢铁企业物质流与能量流及其相互关系[J]. 东北大学学报,2006,27(9):27. (CAI Jiu-ju, WANG Jian-jun,LU Zhong-wu,et al. Material flow and energy flow in iron and steel industry and correlation between them[J]. Journal of Northeastern University,2006,27(9):27.)

[6] 杨玖林. 干熄焦余热发电系统分析与运行优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2015. (YANG Jiu-lin. Analysis and Operation Optimization Study on the Waste Heat Power Generation

Systems of Coke Dry Quenching[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.)

[7] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005. (FU Qin-sheng. Thermodynamic Analysis Method of Energy System[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2005.)

[8] 朱明善. 能量系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,1988. (ZHU Ming-shan. Exergy Analysis of Energy System[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1988.)

[9] 汤学忠. 热能转换与利用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002. (TANG Xue-zhong. Heat Energy Conversion and Utilization [M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2002.)

[10] 冯妍卉,张欣欣,吴懋林. 干熄焦炉内焦炭下降运动的实验研究[J]. 钢铁,2007,42(7):15. (FENG Yan-hui,ZHANG Xin-xin,WU Mao-lin. Experimental study of coke descent in CDQ cooling chamber[J]. Iron and Steel,2007,42(7):15.)

[11] 董厚忱. 分析与锅炉设计[J]. 动力工程,2008,28(1):1. (DONG Hou-chen. Exergy analysis and boiler design[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2008,28(1):1.)

[12] 程竹静,郁鸿凌,李国俊,等. 高压自然循环干熄焦余热锅炉热力特性研究[J]. 工业锅炉,2006(5):8. (CHENG Zhu-jing,YU Hong-ling,LI Guo-jun,et al. Research for thermal characteristics in coke drying quenching boiler with high-pressure and natural circulation[J]. Industrial Boiler,2006(5):8.)

[13] 陶全胜. 高温超高压干熄焦余热锅炉的开发设计[J]. 工业锅炉,2018(3):25. (TAO Quan-sheng. Design and development of high temperature-ultrahigh pressure heat recovery boiler for coke dry quenching[J]. Industrial Boiler,2018(3):25.)

[14] 张素芬,向宇,张良,等. 干熄焦焦炭烧损率的优化措施[J]. 河南冶金,2013,21(1):27. (ZHANG Su-fen,XIANG Yu,ZHANG Liang,et al. Optimizing measure to coke burning loss in CDQ[J]. Henan Metallurgy,2013,21(1):27.)



(上接第 102 页)

[17] 吴胜利,张永忠,苏博,等. 影响烧结工艺过程 NO_x 排放质量浓度的主要因素解析[J]. 工程科学学报,2017,39(5):693. (WU Sheng-li,ZHANG Yong-zhong,SU Bo,et al. Analysis of main factors affecting NO_x emissions in sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering,2017,39(5):693.)

[18] ZHOU Hao,ZHOU Ming-xi,LIU Zi-hao,et al. Modeling NO_x emission of coke combustion in iron ore sintering process

and its experimental validation[J]. Fuel,2016(179):322.

[19] 刘瑞鹏. 铁矿石烧结过程中的氮氧化物排放规律及其影响因素试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2015. (LIU Rui-peng. Experimental Study on Nitrogen Oxide Emissions and Its Factors during Iron Ore Sintering[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2015.)

[20] CHEN Yan-guang,GUO Zhan-chen,WANG Zhi,et al. NO_x reduction in the sintering process[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2009,16(2):143.