

# 干熄焦余热回收与转化系统的效率分析

李心宇\* 孙秀茁

华泰永创(北京)科技股份有限公司 北京 100176

**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;余热回收;转化系统

**DOI:** <https://doi.org/10.37155/2717-5189-0403-21>

## 引言

干熄焦余热发电系统可分为余热回收系统和余热利用系统两部分。而余热回收系统主要是在干熄炉与余热锅炉中进行,通过惰性循环气体回收红焦显热,并将余热锅炉中的水加热成具有一定参数的过热蒸汽,实现热量的传递。

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%。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、热效率和烟效率。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。

## 1 余热回收与利用系统工艺流程

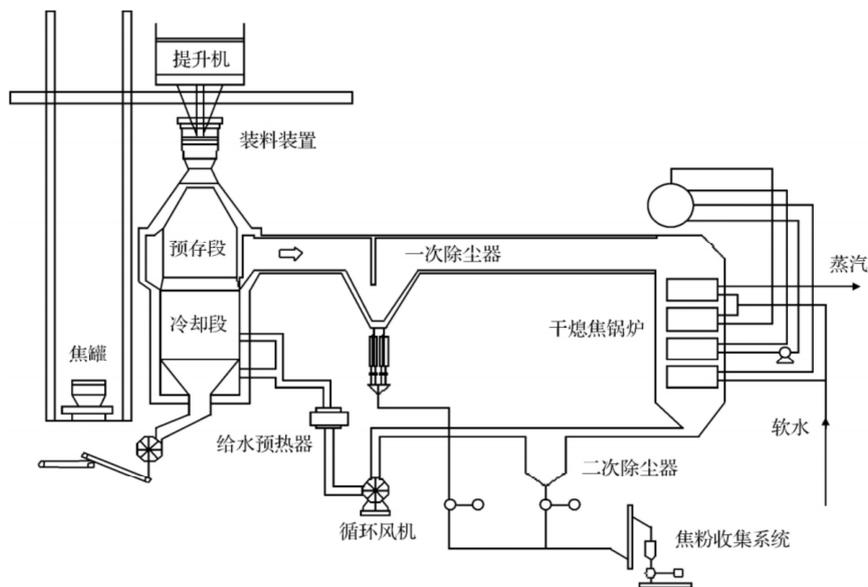


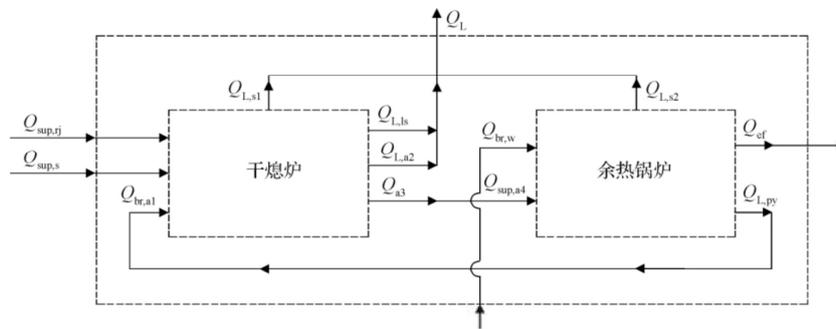
图 1

\*通讯作者: 李心宇, 1987.04.02, 男, 汉族, 辽宁鞍山人, 中级工程师职称, 本科学历, 研究方向: 热力相关, 主要从事干熄焦项目的热力设计工作。

国内某钢铁公司的两座55孔6m焦炉，年产焦炭110万 t，配套140t/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度为950-1050℃，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。干熄焦余热利用系统的具体流程如图1所示。

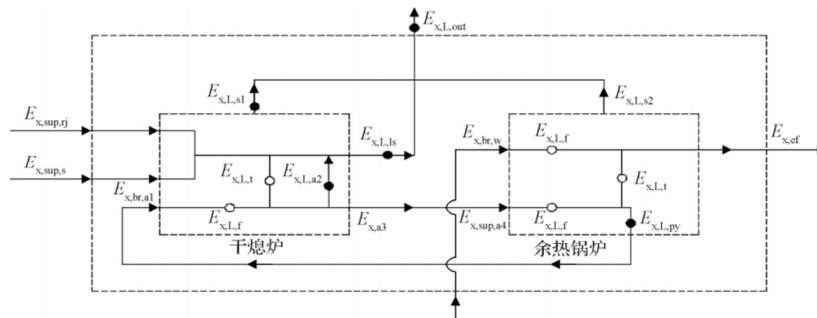
## 2 余热回收与转化的能量分析

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。能流及焓流分别如图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；  $Q_{L,s1}$ 、 $Q_{L,s2}$ —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



$E_{x, sup,rj}$ 、 $E_{x, sup,s}$ —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；  $E_{x, L,s1}$ 、 $E_{x, L,s2}$ —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、余热锅炉散热焓量；  $E_{x, sup,a4}$ —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；  $E_{x, L,ls}$ —冷却焦炭带走的热量；  $E_{x, L,out}$ —外部焓损；  $E_{x, ef}$ —有效焓量。

图 3

### 2.1 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。

### 2.2 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。

### 2.2.1 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

名称	设计工况	名称	设计工况
排焦量/(t·h <sup>-1</sup> )	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 <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	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

干熄炉热收入量			干熄炉热输出量		
项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	比例/%	项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	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

余热锅炉热收入量			余热锅炉热输出量		
项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	比例/%	项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	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

### 2.2.2 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385.58GJ/h,主要热输入为循环气体带入热量,其热量为378.95GJ/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%。

### 2.2.3 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34

9.12GJ/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(259.69GJ/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(66.13GJ/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 系统的焓计算及分析

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。焓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。系统的焓流分布见表4和表5。

表 4

干熄炉焓收入量			干熄炉焓输出量		
项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	比例/%	项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	比例/%
红焦温度焓	126.68	64.84	排焦温度焓	5.54	2.84
焦炭烧损焓量	64.14	32.83	循环气体带出焓量	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焓量	0.37	0.19
			干熄炉散热焓	3.73	1.91
			干熄炉内部换热焓损失	25.27	12.93
合计	195.38	100.00	合计	195.38	100.00

表 5

余热锅炉焓收入量			余热锅炉焓输出量		
项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	比例/%	项目	数量/(GJ·h <sup>-1</sup> )	比例/%
循环气体温度焓	160.47	99.91	中压蒸汽物理焓	105.63	65.77
给水物理焓	0.14	0.09	循环气体出口焓	4.56	2.84
			锅炉散热焓损	3.05	1.90
			排污焓损	0.56	0.35
			锅炉内部换热焓损	43.34	26.98
			给水预热器焓损	1.58	0.98
			除氧器焓损	1.35	0.84
			其他散热焓损	0.54	0.34
合计	160.61	100.00	合计	160.61	100.00

#### 3.1 干熄炉系统的焓分析

根据表4,对干熄炉系统分析可知:干熄炉的焓收入为195.38GJ/h,其中主要焓收入为红焦温度,占干熄炉焓收入的64.84%,其次为焦炭烧损焓量,占干熄炉焓收入的32.83%。干熄炉的输出主要是循环气体带出焓,占干熄炉收入的82.13%。有效利用焓为循环气体带出焓,其焓量为160.47GJ/h。影响干熄炉焓利用效率的主要因素有干熄炉内部气固换热的不可逆焓损、排焦温度焓损、干熄炉散热焓损。

#### 3.2 余热锅炉系统的焓分析

余热锅炉的焓收入为160.61GJ/h,收入焓几乎全部来自循环气体的温度;在焓输出中,有效利用的焓为中压蒸汽物理焓,其焓量为105.63GJ/h,余热锅炉的焓效率为65.77%。

### 3.3 干熄炉—余热锅炉系统的焓分析

根据表4、表5以及整个系统的焓流图,对干熄焦—余热锅炉系统进行焓分析可知:(1)整个系统的焓收入为190.96GJ/h(循环气体的温度焓为系统的内部循环焓,不是外部焓收入),有效利用焓为中压蒸汽物理焓,数值为105.63GJ/h,因此整个系统的焓效率为55.32%。焓损主要来源于干熄炉内部换热和余热锅炉内部换热,其焓损分别为25.27和43.34GJ/h。(2)整个系统焓损可以分为内部焓损和外部焓损。内部焓损占总收入的37.46%,其中干熄炉、余热锅炉子系统的内部焓损分别占内部总焓损的35.32%和60.58%,外部焓损占总收入的7.22%。

## 4 结论

(1)从热力学第一、第二定律出发,采用热平衡法和焓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。但从焓分析的角度来看,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,所以这部分的焓损并不高。系统主要的焓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焓收入的55.32%,内部焓损和外部焓损分别占37.46%和7.22%。提高整个系统利用焓效率的重要途径为: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,从而降低换热焓损,控空气导入量将CO浓度控制在4%~6%,从而降低焦炭的烧损率,以减小干熄炉换热焓损;提高主蒸汽参数和温度,从而降低余热锅炉的内部换热焓损,达到提高干熄焦余热发电系统效率的目的。

### 参考文献:

[1]杨政林.干熄焦余热发电系统分析与运行优化研究[D].华北电力大学,2015.