

石油焦煅烧冷却机显热回收方案研究

段全斌

(中海油惠州石化有限公司, 广东 惠州 516082)

[摘要] 本文介绍了石油焦煅烧冷却机装置及工艺现状,并分析冷却机热平衡,针对性地设计了一套高温石油焦显热的回收方案。根据热收支分析,冷却机冷却水汽化吸热和筒壁散热约占煅后焦总热的71%,说明在煅后焦冷却过程中巨大的显热资源被传统的处置方式浪费。针对这个问题,在现有筒体的基础上增设一个内筒,使内筒与外筒间构成一个密闭的夹层环腔,进而通过夹层环腔中的水流来实现热量的转移和利用。该方案改变了现有的冷却方式,实现冷却过程显热的有效回收,年可节约461.95万元,具有较好的社会效益、经济效益和环境效益。

[关键词] 石油焦; 冷却机; 显热回收; 水冷法; 夹层环腔; 回转窑; 传热

[中图分类号] TF806.1 [文献标志码] B [文章编号] 1008-5122(2021)03-0035-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.03.009

Research on Sensible Heat Recovery Scheme of Petroleum Coke Calcining Cooling Machine

DUAN Quan-bin

Abstract: This paper introduced the equipment and process status of petroleum coke calcination cooler, analyzed the heat balance of the cooler, and designed a set of recovery schemes for sensible heat of high-temperature petroleum coke. According to the analysis of heat budget, the vaporization and heat absorption of cooling water and heat dissipation of tube wall of cooler account for about 71% of the total heat of calcined coke, indicating that the huge sensible heat resources in the cooling process of calcined coke were wasted by traditional disposal methods. To solve this problem, an inner cylinder was added on the basis of the existing cylinder to form a closed ring coelom between the inner cylinder and the outer cylinder, and then the heat transfer and utilization were realized through the water flow in the ring coelom. The proposed scheme can change the existing cooling mode, realize the effective recovery of sensible heat in the cooling process, and save about 4.6195 million yuan per year, which had good social, economic and environmental benefits.

Key words: petroleum coke; cooler; sensible heat recovery; cold water method; ring coelom; rotary kiln; heat transfer

0 前言

回转窑装置因其具有产能大、寿命长和自动化

程度高等优点,被国内多数石油焦煅烧厂家采用^[1]。目前,回转窑高温煅后焦的冷却处理均采用常规传统的直接水冷法。虽然后期大部分改进型回转窑在设计上,将冷却机直冷水汽化后的饱和蒸汽和冷却过程中产生的废热气,作为后续单元的预热“空气”而“粗放”利用,但高温煅后焦的显热利用未能彻底改善。如何有效回收这部分显热,日益成为石油焦生产企业不可回避的现实问题。本文以国内某公司石油焦煅烧冷却机为研究对象,基于固相流

[收稿日期] 2021-01-05

[作者简介] 段全斌(1969—),男,山西运城人,本科,工程师,长期从事石油焦煅烧回转窑生产技术管理工作。

[引用格式] 段全斌.石油焦煅烧冷却机显热回收方案研究[J].有色冶金节能,2021,37(3):35-39.

体间壁传热机理^[2-3],设计了一套干法回收煨后焦显热的方案,并已申请相关专利^[4]。

1 冷却装置现状

1.1 冷却机结构

回转窑冷却机由筒体、支承装置、传动装置、挡轮组、进排溜管和进排料罩等部分组成。其中,冷却机筒体为冷却机的主体,一般由 20 ~ 25 mm 厚的 16Mn 钢板卷制^[5],并通过滚圈倾斜放置于支撑托轮组上,在传动机构及挡轮组的作用下实现一定区间的连续回转。通常为避免高温煨后焦对金属筒体的热冲击及提高冷却处理效果,除在进料端内筒壁上布设一定长度及厚度的耐火材料外,还在冷却机

中后部区域设有扬料板、冷风筒等附属部件。

1.2 冷却工艺

在石油焦煨烧系统中,冷却机的作用是在负压条件下,将回转窑的高温煨烧焦采用雾化水、顺流空气进行共同冷却,使其温度由 1 200 °C 左右逐步降至 80 ~ 140 °C。目前,国内除部分冷却机仍采用内喷与外淋的方式(图 1)对煨烧焦进行冷却处理外^[6],多数均采用了类似于美国 METSO 公司典型技术的单一直冷水法(图 2)。该方法冷却过程产生的大量饱和蒸汽和固体颗粒经旋风除尘器分离后,作为预热的“二次空气”,再经引风机送至后燃烧室进行焚烧处理。虽然单一直冷水法利用了冷却过程中的热能,但效率较低下。

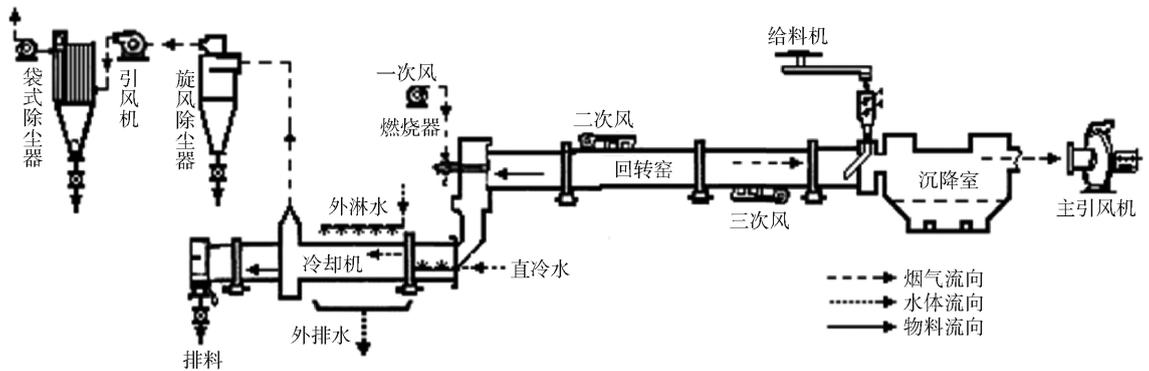


图 1 典型石油焦煨烧回转窑系统工艺流程简图

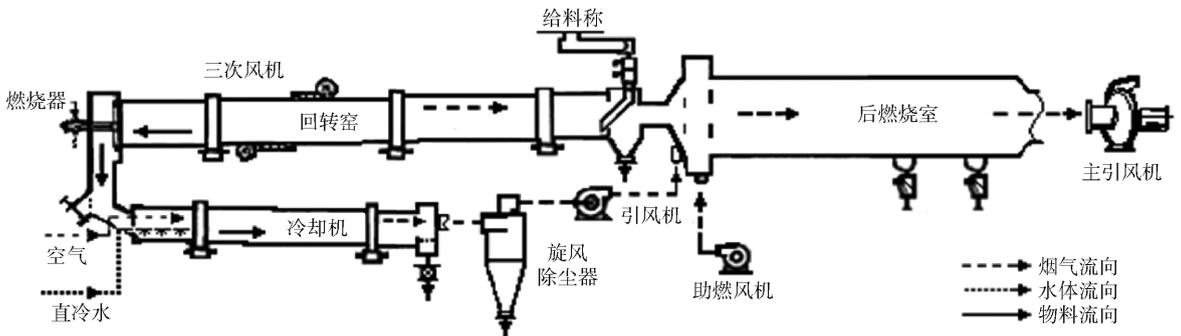


图 2 新型石油焦煨烧回转窑系统工艺流程简图

2 冷却机显热回收分析及存在问题

2.1 冷却机参数

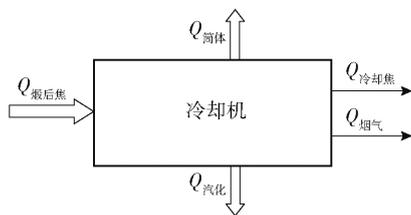
国内某公司引进的大规格石油焦煨烧冷却机,相关参数见表 1。

2.2 热平衡分析

冷却机热收入全部来自回转窑高温煨后焦的显热。本文以某公司煨前加工量 32 t/h、成品率 74% 等参数为依据,计算冷却机生产过程中的相关热收支项。其热平衡如图 3 所示。

表 1 新型冷却机相关参数

项目	参数
冷却机规格/m	φ2. 895 × 24. 000
主电机功率/kW	30
入口料量/t·h ⁻¹	≤25
冷却水压力/MPa	0. 30 ~ 0. 55
冷却水温度/°C	25 ~ 30
斜度/%	4. 20
引风机功率/kW	315
入口物料温度/°C	1 180 ~ 1 280
冷却水用量/L·min ⁻¹	≤265
产品出口温度/°C	80 ~ 140



$Q_{\text{煅后焦}}$ —煅后焦带入热; $Q_{\text{筒体}}$ —冷却机外壁面散热; $Q_{\text{汽化}}$ —冷却水汽化吸热; $Q_{\text{冷却焦}}$ —煅后焦冷却带走热; $Q_{\text{烟气}}$ —烟气带走热

图3 冷却机热收支平衡示意图

2.2.1 热收入

煅后焦产量为:

$$G_{\text{煅后焦}} = 32\,000 \times 74\% = 23\,680 \text{ kg/h}$$

根据实测,冷却机入口煅后焦平均温度 t_1 为 $1\,240\text{ }^\circ\text{C}$,煅后焦比热 C 取 $1.59 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 计,则煅后焦显热:

$$Q_{\text{煅后焦}} = 23\,680 \times 1\,240 \times 1.59 = 46\,687\,488 \text{ kJ/h}$$

2.2.2 热支出

由图3知,热支出项主要包括冷却水汽化吸热、筒体表面散热,以及冷却焦和烟气带走的热等。

2.2.2.1 冷却水汽化吸热

1)据实测,煅后焦冷却用水量约 $230 \text{ L}/\text{min}$,水密度取 $1 \text{ kg}/\text{L}$,则小时用水量为:

$$G_{\text{冷却水}} = 230 \times 60 \times 1 = 13\,800 \text{ kg/h}$$

2)假定加入冷却机的冷却水全部转化为蒸汽,其水汽化潜热按 $2\,260 \text{ kJ}/\text{kg}$ 计算,则冷却水汽化吸热:

$$Q_{\text{汽化}} = 13\,800 \times 2\,260 = 31\,188\,000 \text{ kJ/h}$$

2.2.2.2 冷却机筒体表面散热

已知冷却机筒壁直径为 2.895 m ,长 24 m ,环境温度取 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。为便于计算,通过测量筒壁温度,将筒壁(从进料端起)划分为 L_1 、 L_2 、 L_3 三个区段。其中, L_1 段为 $0\sim 3 \text{ m}$ 区段,平均温度为 $185\text{ }^\circ\text{C}$; L_2 段为 $3\sim 7 \text{ m}$ 区段,平均温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$; L_3 段为 $7\sim 24 \text{ m}$ 区段,平均温度为 $119\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据工业炉窑炉壁散热计算公式^[7]:

$$q = 4.18 \left\{ 4.88\varepsilon \left[\left(\frac{273+t_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+t_e}{100} \right)^4 \right] + a_d(t_b - t_e) \right\} \pi dL \quad (1)$$

式中: q ——热量, kJ/h ;

ε ——炉壳表面黑度,取 $\varepsilon = 0.8$;

t_b ——炉体平均外表面温度, $^\circ\text{C}$;

t_e ——环境温度, $^\circ\text{C}$;

a_d ——对流给热系数,当风速 $w_f < 5 \text{ m}/\text{s}$ 时,

取: $a_d = 5.3 + 3.6w_f, \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$;

d ——筒体直径, m ;

L ——筒体有效长度, m 。

当取环境风速为 $2 \text{ m}/\text{s}$ 时,则 L_1 、 L_2 、 L_3 区段的壁面散热量分别为:

$$q_{\text{壁}L_1} = 4.18 \left\{ 4.88 \times 0.8 \left[\left(\frac{273+185}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+20}{100} \right)^4 \right] + (5.3 + 3.6 \times 2)(185 - 20) \right\} \times$$

$$3.14 \times 2.895 \times 3 = 398\,126.27 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{壁}L_2} = 4.18 \times \left\{ 4.88 \times 0.8 \times \left[\left(\frac{273+80}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+20}{100} \right)^4 \right] + (5.3 + 3.6 \times 2)(80 - 20) \right\} \times$$

$$3.14 \times 2.895 \times 4 = 162\,395.50 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{壁}L_3} = 4.18 \times \left\{ 4.88 \times 0.8 \times \left[\left(\frac{273+119}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+20}{100} \right)^4 \right] + (5.3 + 3.6 \times 2)(119 - 20) \right\} \times$$

$$3.14 \times 2.895 \times 17 = 1\,208\,979.11 \text{ kJ/h}$$

因此,冷却机筒体外壁面总散热量为:

$$Q_{\text{筒体}} = q_{\text{壁}L_1} + q_{\text{壁}L_2} + q_{\text{壁}L_3} = 398\,126.27 + 162\,395.50 + 1\,208\,979.11 = 1\,769\,500.89 \text{ kJ/h}$$

2.2.2.3 其他支出项

为便于研究分析冷却机的显热回收,冷却焦和烟气显热等热支出项,在此不做考虑。通过上述粗略计算,冷却机中冷却水汽化吸热和壁面散热项约占煅后焦总热比为:

$$\eta = (Q_{\text{汽化}} + Q_{\text{筒体}}) / Q_{\text{煅后焦}} = (31\,188\,000 + 1\,769\,500.89) / 46\,687\,488 = 71\%$$

冷却水汽化吸热和筒壁散热约占煅后焦总热的 71% ,说明在煅后焦冷却过程中,巨大的显热资源被传统的处置方式浪费。如何有效回收过程热能,成了一个亟待解决的现实问题。

3 显热回收装置改造

3.1 可行性分析

据文献报道,自20世纪80年代初日本NKK公司开发的内冷转鼓法热能回收装置^[8],到1986年中国在乌克兰开发的炉渣干式粒化方案基础上改造的连铸连轧法熔渣余热回收工艺^[9],再到2011年中国华中科技大学开发的炉渣热水回收锅炉^[10],30多年间,类似石油焦状固相颗粒的高炉渣干式热能回

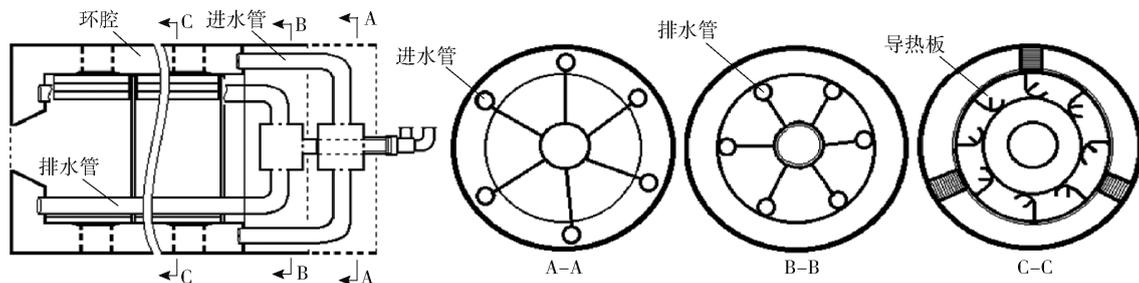


图5 显热回收换热器局部断面示意图

间采用双层弹性摩擦钢片来实现动态密封。

换热器改造的技术要求包括:1)所预置的新筒体需与原装置负载相匹配;2)内筒壁与外筒壁间的环腔有效间距需满足冷却用水需求;3)换热器中所选用的管、材、阀等均需满足耐磨、耐压、耐热等热工需求;4)换热器内所有的静态结合面,应严格按照工业锅炉、火力发电厂金属技术规程等相关要求规范施工,必要时应实施探伤检测,确保焊接质量及耐压强度;5)对于冷却机中可能出现的正压扬尘问题,必要时可保留机体适度的负压引力功能。

4 效益评估

改造后,按冷却机内衬1年大修一次计,每年可节约施工及材料费用约26万元。

若实现无水化生产,每年生产时间按照330d计,年可减少原水消耗10.93万t,以水价格2.2元/t计,则年节约水费24.05万元。

若废气引风机315kW电机停运,年运行330d,且电价按0.58元/kW·h计,则年节约电费144.70万元。

按32t/h煅前加料量,年运行330d,标煤热值29307000kJ/t计,则冷却机年显热回收以标煤计:

$$M_{\text{煤}} = (31\ 188\ 000 + 1\ 769\ 500 \cdot 89) \times 24 \times 330 \div 29\ 307\ 000 = 8\ 906.52\ \text{t}$$

按照国家标准,节约1t标煤奖励300元,则可获得国家奖励267.20万元。

从效益评估来看,冷却机改造后每年可节约461.95万元。

5 结束语

对冷却机体内部结构进行重新设计,将原有的直冷水法转变为间接水冷法,能充分回收石油煅后焦的显热。冷却机所回收热能,可用于余热锅炉除氧器,燃气预热、物料干燥、管线保温、工厂采暖、制

冷等。其社会效益、经济效益和环境效益均将有着广阔的市场前景和深远的现实意义。

煅后焦冷却处理是石油焦煅烧工艺过程中的关键一环,煅后焦所含显热高,要实现既能维持工业化生产,又能有效克服固态间换热效率低下问题,仍需进行大量的科学研究和实践探索。

[参考文献]

- [1] 段全斌. 浅谈 METSO 石油焦煅烧回转窑旁通烟道闸门的控制优势[J]. 炭素技术, 2016, 35(2): 54-57.
- [2] 刘志军, 高文元, 盛展武, 等. 粉粒体间壁换热器的传热过程分析[J]. 化工设备设计, 1997, 34(1): 12-15.
- [3] 刘军祥. 高炉渣余热回收装置传热特性实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009, 6(2): 13-21.
- [4] 段全斌. 一种粉粒体显热干式回收换热器: CN 108870985 A[P]. 广东, 2018-11-23.
- [5] 崔慧君, 师长军. 冶金炉筒体选材分析[J]. 冶金设备, 2009(S3): 40-41, 21.
- [6] 梁和奎, 许海飞. 炭素回转窑生产工艺对比浅析[J]. 轻金属, 2010(7): 45-47, 64.
- [7] 钱惠国. 工业炉窑壁面散热及热污染控制的研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- [8] 张西鹏, 周守航. 高炉渣显热回收前景分析[C]//第七届(2009)中国钢铁年会大会论文集(中). 北京: 冶金工业出版社, 2009: 1621-1624.
- [9] 徐永通, 丁毅, 蔡漳平, 等. 高炉熔渣干式显热回收技术研究进展[J]. 中国冶金, 2007, 17(9): 1-8.
- [10] 黄云辉, 刘运成. 硫铁矿渣热回收技术[J]. 磷肥与复肥, 2011, 26(5): 45-47.
- [11] 刘瑞祥, 刘永启, 郑斌, 等. 高温煅后焦余热回收换热器传热特性试验研究[J]. 炭素技术, 2015, 34(2): 46-49.
- [12] 夏德宏, 肖琳姝, 李一帆, 等. 间壁式固体散料余热回收器的开发[J]. 冶金能源, 2009, 28(4): 47-50.
- [13] 明文雪, 罗立军. 基于 CFD 的罐式煅烧炉冷却水套的优化研究[J]. 炭素技术, 2013, 32(3): 64-66.