

引用格式:于欢. 罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的协同性分析[J]. 有色设备, 2024, 38(2): 12-18.

YU Huan. Synergy analysis of petroleum coke calcination and waste heat utilization process on vertical shaft kiln[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(2): 12-18.

# 罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的协同性分析

于欢

(沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001)

**[摘要]** 罐式炉煅烧石油焦过程复杂、能耗较高,物质流、能量流交叉耦合运行。通过建立物质流、能量流协同运行的数学、物理模型,可有效分析系统用能过程,对其用能的不合理性进行优化。通过模拟实例研究,分析罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的用能特点和存在问题,进而提出一种优化新工艺,改进了子系统有序度和全系统协同度,夏季发电量达到 12.85 MW·h,冬季产汽达到 59.77 t/h,原系统夏、冬两季的协同度分别提高至 0.744 和 0.696。并为炭素厂未来节能降耗发展指明方向和夯实理论基础。

**[关键词]** 石油焦煅烧; 余热回收; 协同性; 罐式炉; 物质流; 能量流; 节能降耗

**[中图分类号]** TF35 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)02-0012-07

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.02.003

## 0 引言

石油焦源自石油炼制过程的副产品,依据上游焦化工艺的不同分为延迟石油焦、釜式焦和流化焦,其中延迟石油焦具有多纹理纤维、易石墨化、低热胀系数、低电阻率等特点,广泛用于铝用预焙阳极的骨料<sup>[1]</sup>。同时,为了提高铝用阳极的生产操作性能,需要对石油焦进行预处理——煅烧过程,从而去除其中的挥发分和水分,并且提高导电性、机械强度和真密度等理化性能。目前,石油焦煅烧主要有回转窑煅烧和罐式炉煅烧 2 种成熟工艺<sup>[2]</sup>,本文以罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程为研究对象,开展其能量流和协同性的相关研究。

罐式炉煅烧石油焦系统主要包括罐式炉、余热锅炉及热力除氧器 3 个主要设备,是一种多因子“流”汇集组成的交叉能量运输系统,在一个由不同功能工序组成的复杂网络结构中,按照一定的“指令”,从无序到有序的进行,完成各项物理、化学变化<sup>[3]</sup>。因此,引入协同学理论<sup>[4]</sup>,对其用能和节能过程进行分析,从而找到合理的用能方式,对其稳

定生产运营具有重要意义。

## 1 基础理论

协同学理论起源于 20 世纪 70 年代的欧洲<sup>[5]</sup>,而后随着国内物质流、能量流和信息流的快速发展以及能量应用日趋复杂,应用协同理论研究 3 种“流”的相互交叉作业过程,成为国内外学者的研究重点。同时,基于协同学的理念,引入序参量的概念作为定量评价子系统之间相互作用的表征量,其规定着宏观系统的有序状态、相应有序度的变化和结构性能。

1) 物质流分析的方法是基于质量守恒定律,在指定空间范围内,对特定的某些物质进行工业代谢的研究,从而从物质流向、流量角度,在全生命周期范围内研究物质对环境的影响,并通过优化物流路径来改善生态环境。

2) 能量流分析的方法是基于热力学第二定律,以物质流路径为载体,又作为物质流的驱动力,驱动着物质朝能量利用最优的方向发展,同时在特定的程序下,支撑着物质动态、有序地进行一系列物理和化学转变,实现多“流”指标的优化。

3) 多“流”运动互相影响,因此引入协同概念去研究多个物流和能量转换或传递的单元过程,并以设备为基准点,联结物质流和能量流,反映能量流的驱动,使系统更有序地完成原料物流到产品物流的工艺转换。

**[收稿日期]** 2024-01-15

**[作者简介]** 于欢(1989—),女,山东即墨人,高级工程师,硕士,主要研究方向为热力工艺及设备研发和设计。

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(51934002)。

## 2 主要设备

罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程主要由 3 种

设备构成,即罐式炉、余热蒸汽锅炉、热力除氧器。其相关信息和参数见表 1。

表 1 主要工艺设备  
Table 1 Key process equipments

设备	功能要求	参数	供应商	备注
罐式炉	罐式炉是整套工艺的核心设备,依靠石油焦自身逸出的挥发分在火道内燃烧,通过产生的大量化学热间接加热料罐内的石油焦,使其达到煅烧过程所需的温度(1 150 ~ 1 300℃)和时间(24 ~ 36 h)的要求,具有过程“零”能耗、产品质量好、余热稳定等特点	8 层火道	沈阳铝镁设计研究院有限公司	自主研发
余热蒸汽锅炉	通过气-水换热有效回收高温烟气余热,使其附着于高品质蒸汽内	3.82 MPa、450 ℃	太湖锅炉厂、郑州锅炉厂等	标准设备
热力除氧器	通过高温介质传热去除除盐水中的氧离子,从而提高锅炉省煤器管寿命	0.025 MPa、104 ℃	太湖锅炉厂、郑州锅炉厂等	

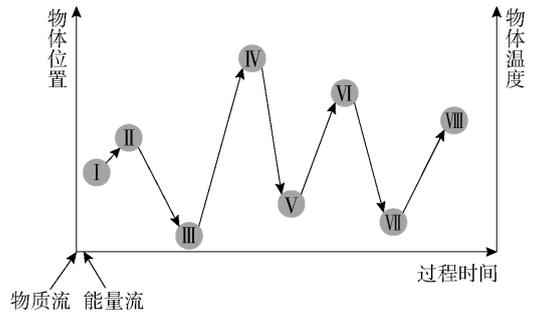
## 3 模型搭建

### 3.1 基础物理模型

图 1 为基于罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程。这是依据宏观动力学概念,以碳素流为载体,将物质流与能量流串联起来的全生命周期动态轨迹图,是本文后续物理和数学模型搭建的理论基础。

始于原油的炼制,终于铝电解槽上的阳极反应,按位置沿特定的空间-时间轨迹曲线将其运动形态描绘出来,反映动态-无序-有序的系统运行状态。

现有罐式炉煅烧石油焦及余热回收系统工艺流程如图 2 所示。石油焦经过破碎、配料后送入罐式炉中进行煅烧,去除自身的水分、挥发分,提高相应理化指标,而产生的高温烟气通入余热锅炉进行余热回收,降温后进行脱硫、脱硝等处理,蒸汽



I—原油蒸馏; II—渣油延迟焦化; III—石油焦原料库; IV—石油焦煅烧; V—阳极成型; VI—阳极焙烧; VII—阳极组装; VIII—电解铝用阳极

图 1 石油焦动态运行轨迹

Fig. 1 The dynamic running track of petroleum coke

则供给下游用户使用,同时锅炉给水需稳定热源进行热力学除氧。

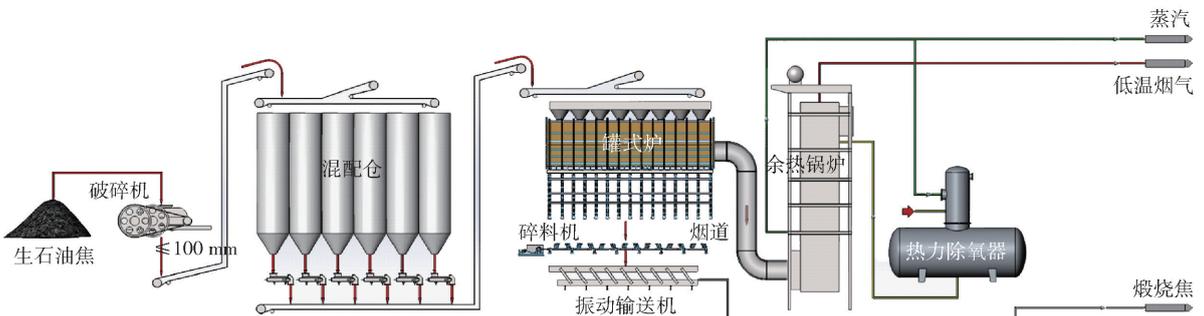


图 2 罐式炉煅烧石油焦及余热回收系统

Fig. 2 The system of petroleum coke calcination and waste heat recovery in vertical shaft kiln

### 3.2 物质流模型

基于物质流理论,对罐式炉煅烧石油焦及余热

利用过程进行梳理,如图 3 所示。

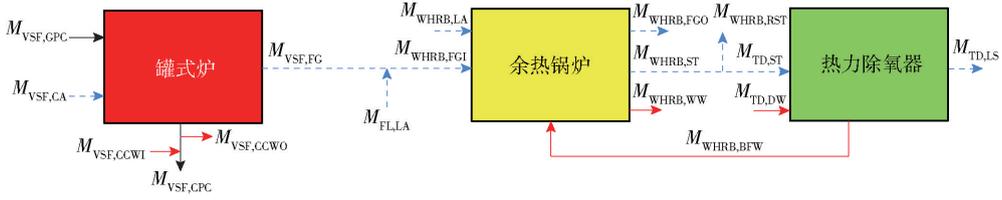


图 3 罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的物质流计算模型

Fig. 3 The material flow model of the petroleum coke calcination and waste heat recovery system

从图 3 中可以看到,进入罐式炉的主要物质包括生石油焦和空气,产出主要包括烟气和煅烧石油焦;对于余热锅炉,其物质输入主要包括上游高温烟气,从热力除氧器输送过来的除氧锅炉给水以及少量冷空气,产出主要包括低温烟气、废水及蒸汽;热力除氧器的输入物质有蒸汽、除盐水,输出包括锅炉给水和损失蒸汽。因此,对于罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的主要设备罐式炉、余热锅炉及热力除氧器,其物质流运动属于多源输入-多流输出的复杂物流转化过程,且依附形态为固、液、气混合多相形式<sup>[6-9]</sup>。因此,对其物质流建立模型如下。

#### 1) 罐式炉物质流计算模型

$$\sum M_{VSF,IN} = M_{VSF,GPC} + M_{VSF,CA} + M_{VSF,CCWI} \quad (1)$$

$$\sum M_{VSF,OUT} = M_{VSF,CPC} + M_{VSF,FG} + M_{VSF,CCWO} \quad (2)$$

式中: $M_{VSF,IN}$ 和 $M_{VSF,OUT}$ 分别为罐式炉的物质流总输入和物质流总输出; $M_{VSF,CA}$ 、 $M_{VSF,GPC}$ 和 $M_{VSF,CCWI}$ 分别为罐式炉入口物质流中的助燃空气、生石油焦和循环冷却水进口; $M_{VSF,CPC}$ 、 $M_{VSF,CCWO}$ 和 $M_{VSF,FG}$ 分别为罐式炉出口物质流中的煅烧焦、循环冷却水出口和烟气。

#### 2) 余热锅炉物质流计算模型

$$\sum M_{WHRB,IN} = M_{WHRB,FGI} + M_{WHRB,LA} + M_{WHRB,BFW} \quad (3)$$

$$\sum M_{WHRB,OUT} = M_{WHRB,FGO} + M_{WHRB,ST} + M_{WHRB,WV} \quad (4)$$

式中: $M_{WHRB,IN}$ 和 $M_{WHRB,OUT}$ 分别为余热锅炉物质流总输入和物质流总输出; $M_{WHRB,BFW}$ 、 $M_{WHRB,FGI}$ 和 $M_{WHRB,LA}$ 分别为余热锅炉入口物质流中的锅炉给水、烟气和漏风; $M_{WHRB,ST}$ 、 $M_{WHRB,FGO}$ 和 $M_{WHRB,WV}$ 分别为余热锅炉出口物质流中的蒸汽、烟气和废水。

#### 3) 热力除氧器物质流计算模型。

$$\sum M_{TD,IN} = M_{TD,ST} + M_{TD,DW} \quad (5)$$

$$\sum M_{TD,OUT} = M_{TD,LS} + M_{WHRB,BFW} \quad (6)$$

式中: $M_{TD,IN}$ 和 $M_{TD,OUT}$ 分别为热力除氧器物质流总输入和物质流总输出; $M_{TD,DW}$ 和 $M_{TD,ST}$ 分别为热力除氧器入口的除盐水和蒸汽; $M_{TD,LS}$ 为余热锅炉出口的损失蒸汽。

### 3.3 能量流模型

基于能量流理论,对罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程进行梳理,如图 4 所示。从图 4 中可看出,能量流的路径与物质流基本一致,驱动着物质流的流向和

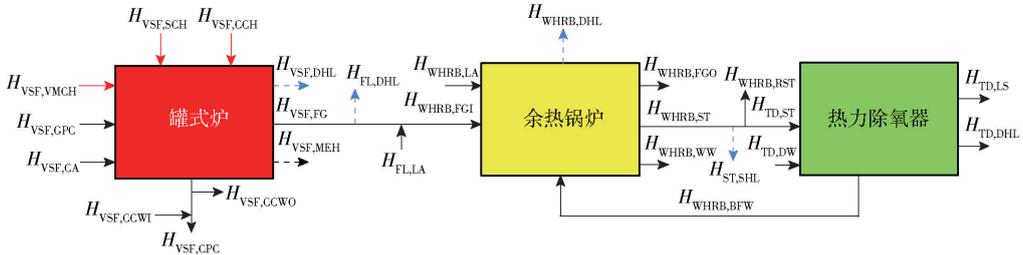


图 4 石油焦煅烧及余热回收系统能量流计算模型

Fig. 4 The enthalpy flow model of the petroleum coke calcination and waste heat recovery system

位移。①罐式炉的能量输入主要包括助燃空气和生石油焦的物理热、挥发分化学热、碳粉燃烧化学热及硫分化学热,热支出主要包括循环冷却水带走热、煅烧焦物理热、烟气物理热、水分的汽化潜热及炉体散热损失;②对于余热锅炉,能量输入主要包括锅炉给水、入口烟气和漏入空气的物理热,热支出主要包括出口烟气、废水、蒸汽的物理热及炉体散热损失;③热力除氧器的热输入主要包括除盐水和蒸汽的物理热,热支出主要包括锅炉给水物理热、损失蒸汽热和设备散热损失。

因此,罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的能量流不仅含有复杂的化学热和物理热,还伴随着能量内部循环和回收、二次利用过程。

### 3.4 协同模型

基于序参量概念,本文依据熵值法对系统主要序参量进行标准化处理,然后协同建模,进而求解和优化。

$$K_{a,b} = \frac{1 - S_{a,b}}{M - \sum_{m=1}^M S_{a,b}} \quad (7)$$

$$S_{a,b} = -\frac{1}{\ln N} \sum_{n=1}^N (\theta_{a,b}^n \ln \theta_{a,b}^n) \quad (8)$$

$$\theta_{a,b}^n = \frac{Q_{a,b}^n - \min\{Q_{a,b}^n\}}{\max\{Q_{a,b}^n\} - \min\{Q_{a,b}^n\}} \quad (9)$$

$$\theta_{a,b}^n = \frac{\max\{Q_{a,b}^n\} - Q_{a,b}^n}{\max\{Q_{a,b}^n\} - \min\{Q_{a,b}^n\}} \quad (10)$$

式中: $K_{a,b}$ 为标准权重系数; $S_{a,b}$ 为熵值; $\theta_{a,b}$ 为标准化处理值; $K$ 为变量个数; $N$ 为样本数量个数; $Q$ 为控制变量; $M$ 为样本序参数个数。

从式(9)可看出,变量与结果正相关;从式(10)可看出,变量与结果负相关。

根据罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的生产操作特点,确定罐式炉炭质烧损( $A_{1,1}$ )、罐式炉湿基实收率( $A_{1,2}$ )、吨焦产汽率( $A_{1,3}$ )、系统连续化程度( $A_{1,4}$ )、系统热效率( $A_{2,1}$ )、系统烟效率( $A_{2,2}$ )、全生命周期总碳排放值( $A_{3,1}$ )和总净碳排放值( $A_{3,2}$ )为本系统的序参量值,分别考察子系统有序度  $OD$  和全系统协同度  $SD$ 。

## 4 实例研究

以山东某铝用阳极企业为研究对象,其罐式炉煅烧工艺参数和边界条件见表2。

表2 主要工艺参数

Table 2 Key process parameters

工艺参数	数值	工艺参数	数值
煅烧焦产能/( $t \cdot h^{-1}$ )	34.56	余热锅炉出口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	450
罐式炉单台料罐数量/(罐数/台)	72	余热锅炉出口蒸汽压力/MPa	3.82
罐式炉台数/台	4	余热锅炉排烟温度/ $^{\circ}C$	190
生石油焦水分/%	8	余热锅炉排废率/%	5
生石油焦挥发分/%	11	余热锅炉漏风系数/%	2
生石油焦灰分/%	0.3	余热锅炉处理能力/( $t \cdot h^{-1}$ )	44.01
生石油焦固定碳/%	88.7	热力除氧器进口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	104
罐式炉出口高温烟气温度/ $^{\circ}C$	925	热力除氧器进口蒸汽压力/MPa	0.025
生石油焦入炉温度/ $^{\circ}C$	25	热力除氧器蒸汽损失率/%	2
煅烧焦出炉温度/ $^{\circ}C$	80		

### 4.1 模型计算结果与分析

根据本文前述所搭建的数学和物理模型,结合应用实例的边界条件、物性参数,进行应用实例研究,得到相关计算结果见表3。

从表3中可以看到,全系统协同度为0.318,子

系统有序度分别为0.524、0.125和0.493,能量流系统有序度偏低是造成全协调协同度过低的主要原因。因此,需要从整个系统用能合理性角度出发,优化能量流动、改进能量回收系统,从而保证整个系统协同、稳定运行。

表3 模型计算结果

Table 3 The calculated results of the model

参数	$A_{1,1}/\%$	$A_{1,2}/\%$	$A_{1,3}/$ (t/t CPC)	$A_{1,4}/$ %	$A_{2,1}/$ %	$A_{2,2}/$ %	$A_{3,1}/$ (t CO <sub>2</sub> e/t CPC)	$A_{3,2}/$ (t CO <sub>2</sub> e/t CPC)
$\theta_{a,b}$	2.5	79.76	1.273	82	55.98	29.78	1.2106	0.9314
$\theta_{a,b}^{ul}$	4	81.90	2.229	85	77.71	33.88	1.3239	0.9696
$\theta_{a,b}^{ll}$	2	76.89	1.066	78	53.04	29.17	1.1423	0.8604
$S_{a,b}$	0.196	0.291	0.280	0.291	0.231	0.110	0.268	0.334
$K_{a,b}$	0.273	0.241	0.245	0.241	0.464	0.536	0.524	0.476
$OD_a$	0.524				0.125		0.493	
$SD$	0.318							

### 4.2 系统协同性优化

罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程是多因子流、多序参量耦合的复杂过程,基于协同学理论和工艺操作特点,从节点和路径层面寻求提高系统协同性的优化方向。首先,探求系统余热利用潜力,其中串联工序之间气相流动的高温烟气,由于最后排烟温度低于 200 °C,且压力较低,因此热回收价值不大,但是固相物质煅烧石油焦的高温余热并未得到有效利用,目前行业主要是以冷却循环水对其进行冷却,并未有效回收其高温物理热,因此提高此节点的余热回收效率成为本文研究的关键;其次,优化热价值载体蒸汽流运行路径,原有系统将余热锅炉产

出的中温中压过热蒸汽全部通入汽轮机和热力除氧器,忽略了二者对蒸汽品位需求的不同,优化方向是将低品位蒸汽通入热力除氧器、高品位蒸汽通入汽轮机发电,实现能量的梯级回收利用。

综上,通过改进罐式炉冷却水套结构,将其改成汽化冷却的结构形式,同时优化高、低品位蒸汽路径,将汽化水套产生的蒸汽用于热力除氧器除氧和厂区供暖,将高温烟气换热产生的高品位蒸汽用于汽轮机发电,从而实现系统的协同优化,改进后的罐式炉煅烧石油焦及余热利用新工艺如图 5 所示。

通过新工艺的改进,系统在夏、冬两季的协同度分别提高至 0.744 和 0.696,如图 6 所示。

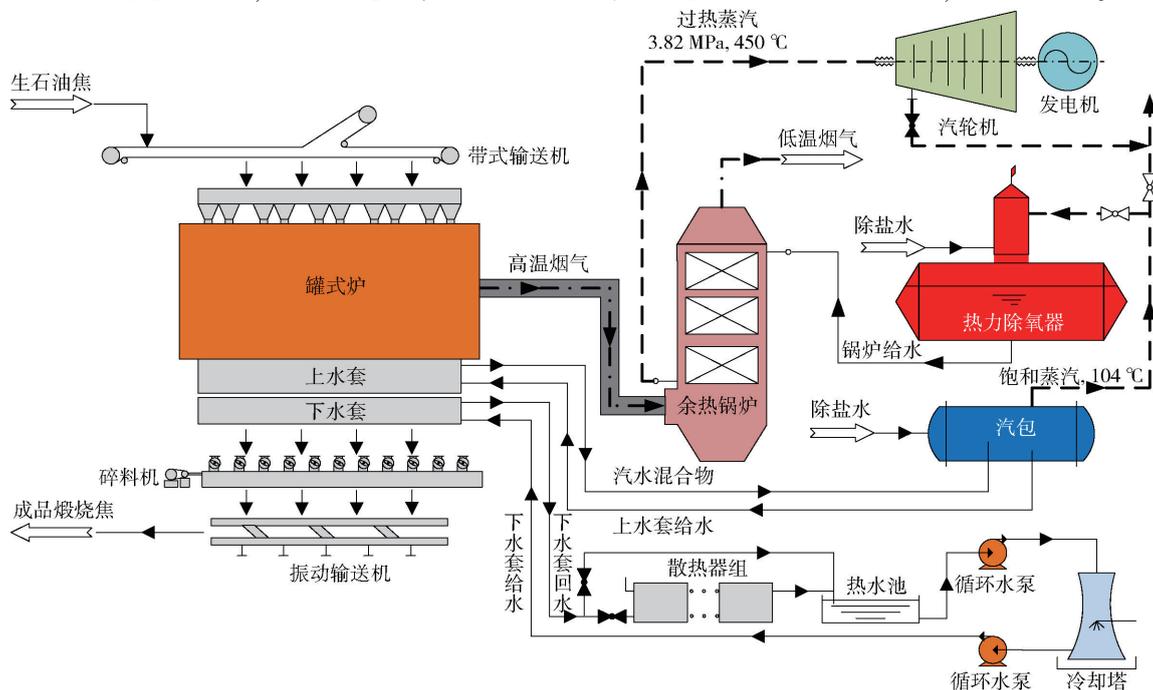


图5 罐式炉煅烧石油焦及余热利用新工艺流程图

Fig. 5 The flow diagram of petroleum coke calcination and waste heat utilization new process on vertical shaft kiln

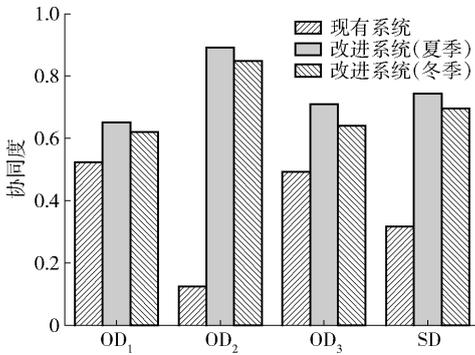


图 6 系统协同性对比

Fig. 6 Contrast of synergy between different systems

### 4.3 改进后效果

通过新工艺的改进,系统在夏、冬两季的物质流数据,如图 7 和 8 所示。从图 7 和 8 可以看出,新工艺系统额定工况下夏季发电量增幅 16.82%,从 11.00 MW·h 增加至 12.85 MW·h;同时冬季额定工况下可以产出 59.77 t/h 蒸汽,较原有系统有较大幅度提升。

### 5 结论

1) 基于物质流和能量流研究的基础上,建立适合于罐式炉煅烧石油焦及余热利用过程的协同分析

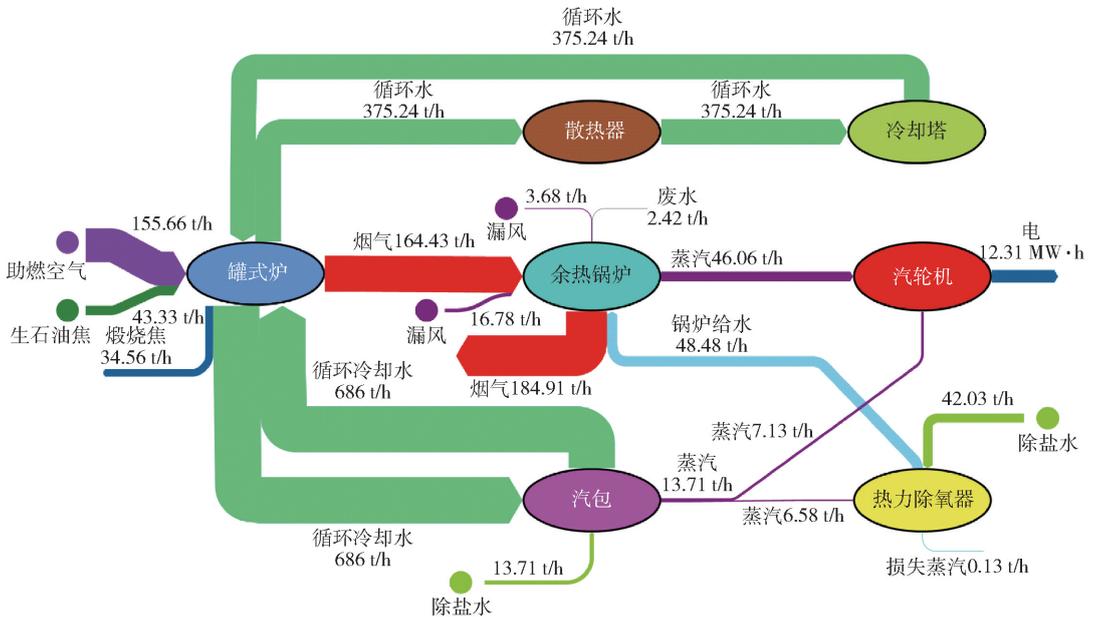


图 7 新工艺系统物质流桑基图(冬季)

Fig. 7 The material flow sankey diagram of the new system (in winter)

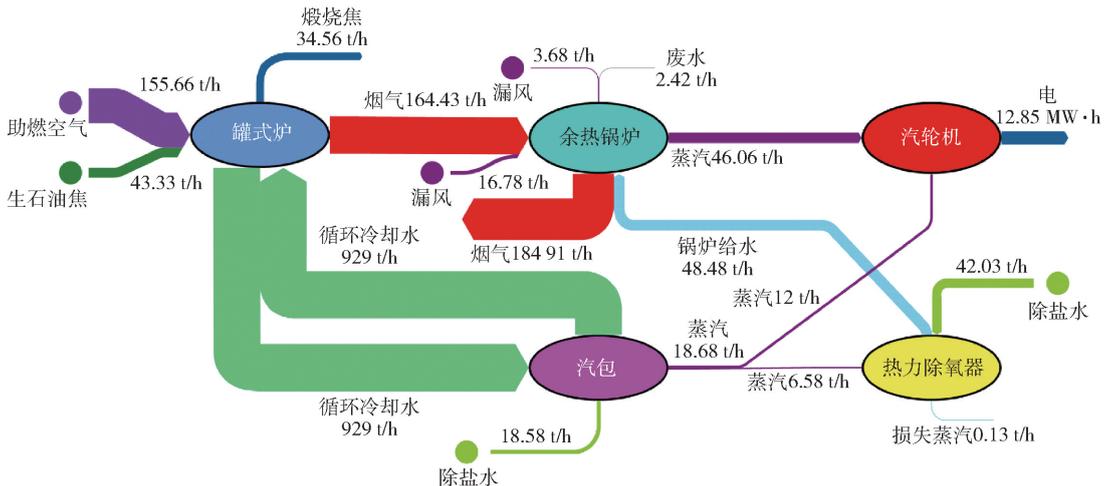


图 8 新工艺系统物质流桑基图(夏季)

Fig. 8 The material flow sankey diagram of the new system (in summer)

模型,从而有效分析系统的用能过程,找到优化路径。

2)提出了一种罐式炉煅烧石油焦及余热利用新工艺,通过改进罐式炉冷却水套结构,优化蒸汽路径,从而将原系统夏、冬两季的协同度分别提高至0.744和0.696。

3)能量流有序度(0.125)过低是制约罐式炉煅烧石油焦及余热利用全系统协同发展的关键问题,通过新工艺对余热回收路径的改进,夏、冬两季的能量回收率大幅提升,夏季发电量达到12.85 MW·h,冬季产汽达到59.77 t/h。

#### [参考文献]

- [1] 刘凤琴. 铝用炭阳极制备关键技术研究及工程化应用[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [2] ELKANZI E M, MARHOON F S, JASIM M J. Kinetic analysis of the coke calcination processes in rotary kilns[J]. Simulation and Modeling Methodologies, Technolo-

gies and Applications, 2014, 256: 45 - 54.

- [3] 李静,黄金堤,肖劲. 基于三维离散元法的罐式炉排料运动行为[J]. 中国有色金属学报,2018,28(7):1471 - 1481.
- [4] 孙玲. 协同学理论方法及应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [5] HAKEN H, GRAHAM R. Synergetik-die lehre vom zusammenwirken[J]. Umschau in Wissenschaft und Technik, 1971, 6: 191 - 195.
- [6] 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.
- [7] 犹子涵,肖劲,于谱生,等. 煅烧温度对煅后石油焦微观结构演变的影响[J]. 中国有色冶金,2024,53(1):8 - 16.
- [8] 孟庆雨,冯卫华,刘升会. 四环锌镉综合回收厂烟气余热利用现状分析[J]. 有色设备,2022,36(6):93 - 96.
- [9] 付维琴,于站良,刘俊场,等. 石油焦加压碱浸脱硫试验研究[J]. 湿法冶金,2016,35(2):136 - 138.

## Synergy analysis of petroleum coke calcination and waste heat utilization process on vertical shaft kiln

YU Huan

(Shenyang Aluminum & Magnesium Engineering & Research Institute Co. Ltd., Shenyang 110001, China)

**Abstract:** The process of calcining petroleum coke *via* vertical shaft kiln is complex and requires high energy consumption, with cross coupling operation of material flow and energy flow. By establishing mathematical and physical models for the coordinated operation of material flow and energy flow, the energy consumption process of the system can be effectively analyzed and the irrationality of its energy consumption can be optimized. Through simulation case studies, this paper analyzes the energy consumption characteristics and existing problems of the petroleum coke calcination and waste heat utilization process on vertical shaft kiln, and proposes an optimized new process that improves the ordering degree of subsystems and the coordination degree of the entire system. The summer power generation reaches 12.85 MW·h, winter steam production is 59.77 t/h, and the synergy degrees of the original system in summer and winter are increased to 0.744 and 0.696, respectively. It also points out the direction and consolidates the theoretical foundation for the future energy conservation and consumption reduction development of carbon plants.

**Key words:** petroleum coke calcination; waste heat utilization; synergy; vertical shaft kiln; material flow; energy flow; energy conservation and consumption reduction ▲