

氧化铝生产过程能耗的㊀分析

陈乔平^{1,2}, 闫红杰¹, 葛世恒¹, 周子民¹

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 中国铝业公司 河南分公司, 郑州 450041)

摘 要: 以㊀传递理论与㊀分析方法为基础, 建立混联法氧化铝生产过程㊀耗复杂灰箱模型; 选取某氧化铝企业 2008 年两个月生产数据进行计算, 得到氧化铝生产过程中各子工序的供给㊀、㊀损及㊀效率。计算结果表明: 供给㊀主要消耗在熟料烧成、焙烧、管道化溶出和蒸发工序, 占总供给㊀的 85%左右; 熟料烧成工序㊀效率最低, 仅为 7%左右; 针对㊀损较大的工序展开节能改造可有效降低生产能耗。采用㊀分析方法对流程工业能耗状况进行分析, 可以有效评价企业能源利用状况及能量损失, 有利于有针对性地挖掘企业节能潜力, 降低企业能耗。

关键词: 系统节能; ㊀分析; 氧化铝生产; 流程工业

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

Exergy analysis on energy consumption in alumina production

CHEN Qiao-ping^{1,2}, YAN Hong-jie¹, GE Shi-heng¹, ZHOU Jie-min¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Henan Branch, Aluminum Corporation of China, Zhengzhou 450041, China)

Abstraction: A complex grey-box model of alumina production in mixed-combined process was built on the basis of exergy transfer theory and analysis means. According to the two months production data obtained from a certain aluminum corporation, the loss and efficiency of the exergy were calculated. The calculation results show that the supplied exergy is mainly consumed in such unit processes as slurry sintering, aluminium trihydrate calcining, tube digestion and evaporation, which consumes about 85% of the exergy in the alumina production. The slurry sintering process has the lowest exergy efficiency of about 7%. The innovation for energy saving can be proceeded on the unit process with low exergy efficiency. It is not only effective for evaluation of enterprise utilization of energy and quality of energy loss, but also advantageous for making the best of the potential energy saving capacity of enterprise by using exergy analysis method.

Key words: system energy saving; exergy analysis; alumina production; process industry

以系统的观点对流程工业进行能耗分析对于提高企业能源利用效率、降低能耗具有重要意义。以热力学第一定律为基础进行系统能耗分析可以从“量”的角度分析企业能源利用状况, 挖掘企业节能潜力; 而利用㊀理论从“品质”角度对系统能耗进行分析, 则可以帮助企业更有针对性地进行节能改造, 达到节能降耗目的^[1-2]。由于㊀分析兼顾能的“动态”与“静态”特性, 又可将能的“质”与“量”有机地结合, 能够

反映能的真正价值, 对于优化传递过程, 提高用能水平具有很高的学术价值和实际意义^[3]。

20 世纪 70 年代以后, 随着基本概念、基准态模型的建立、㊀值计算、能级分析以及能理论研究的不断深入, ㊀理论得到迅速发展, 工程应用逐渐展开。通过对生产工艺系统的㊀分析, 可以展示系统㊀分布状况, 揭示㊀损分布规律, 由此得到对系统能量和能质利用的科学评价。目前, 国内外在石化、动力、冶

金、制冷等技术领域及能源管理部门中,焓分析理论得到日益广泛的应用^[4-10]。然而,由于在焓传递现象的描述、传递机理及焓分析的计算系统模型等方面研究不足,工程应用领域的焓评价与分析方法尚需进行进一步的研究^[11]。本文作者选定混联法氧化铝生产工艺系统为研究对象,通过建立其焓分析模型,对氧化铝生产过程能耗现状进行分析与评价。

1 焓分析模型

在流程工业能源和资源的合理配置过程中,工程决策不仅要考虑能量的“数量”,更要考虑其“品质”。通过建立合理的系统焓分析模型,求解焓在系统中的时空分布,可以全面正确地反映用能系统中不同各子系统用能的“量”与“质”,进而确定降低不可逆焓损的方向。目前,常用的焓分析模型主要有黑箱模型、白箱模型与灰箱模型^[12-15]。

1) 黑箱模型

黑箱模型是借助于输入、输出子系统的能流信息来研究子系统内部用能过程宏观特性的一种方法只能对子系统的用能状况做出粗略分析。

其控制方程如下:

$$E_x^g + E_{x,br} = E_{x,ef} + E_{x,inef} + E_{x,irr} \quad (1)$$

式中: E_x^g 为供给焓,由焓源或具有焓源作用的物质供给体系的焓,通常有燃料焓、蒸汽焓和电焓等。燃料焓包括物理焓和化学焓; $E_{x,br}$ 为带入焓, $E_{x,br}$ 是除焓源以外的物质带入到体系的焓,如送入炉内助燃的空气焓,生产子系统的原料焓等; $E_{x,ef}$ 为有效焓,是被子系统有效利用或由子系统输出可有效利用的焓。对于动力装置即为输出的机械能,对于工艺子系统即为达到工艺要求的产品离开系统所具有的焓,如锅炉生产的蒸汽焓,水泵出口的压力焓、动能焓等; $E_{x,inef}$ 为无效焓,体系输出的总焓中除有效焓以外的部分。通常无效焓即是体系的外部焓损; $E_{x,irr}$ 为耗散焓,是体系内的不可逆性所引起的能量耗散,即内部焓损。

2) 白箱模型

采用黑箱模型不能分析体系内部的各用能过程的情况,对于一些重要的耗能设备来说,单有黑箱分析显然是不够的。白箱模型为了克服黑箱模型的缺陷,将分析对象看作是由“透明”的边界所包围的系统,从

而可以对系统内的各个用能过程逐个进行解剖,计算出各过程的耗散焓。因此,白箱模型不仅可以计算子系统的焓效率和热力学完善度,而且还能计算出体系内各过程的焓损系数,揭示系统中用能不合理的“薄弱环节”,模型是一种精细的焓分析。

定义子系统供给焓为 $E_{x,sup} = \sum E_{x,sup,i}$, 带入焓为 $E_{x,br} = \sum E_{x,br,i}$, 外部焓损 $E_{x,L,out} = \sum E_{x,inef,i}$, 内部焓耗为 $E_{x,L,in} = \sum E_{x,irr,i}$, 则有

$$\sum E_{x,sup,i} + \sum E_{x,br,i} = E_{x,ef} = \sum E_{x,inef,i} + \sum E_{x,irr,i} \quad (2)$$

3) 灰箱模型

从节能的实际效益考虑,单元子系统的焓分析只能解决个别的、局部的问题,总能系统的焓分析才能解决整体的、全局的问题。灰箱模型主要用于对系统整体用能状况的评价及对系统中薄弱环节的判别。

灰箱模型是将系统中所有设备均视为黑箱,黑箱与黑箱之间以主焓流线连接起来形成网络。因此,灰箱模型实际上是一种黑箱网络模型。

无论何种设备,按黑箱模型分析都是5个量,即供给焓、带入焓、有效焓、内部焓损和外部焓损。为使网络单元能以简化形式表示,将上述5个量组合为4个量,即:供给焓,以 E_x^g 表示;带入焓,有效焓(输出净收益焓)。总焓损为内、外焓损之和,以 $E_{x,L}$ 表示。因此,系统中的任何子系统或设备均可以表示为4个量组成的网络单元,如图1所示。

以黑箱网络表示的灰箱模型有下面两种基本形式:

1) 黑箱串联网模型(串联模型)。若系统中的所

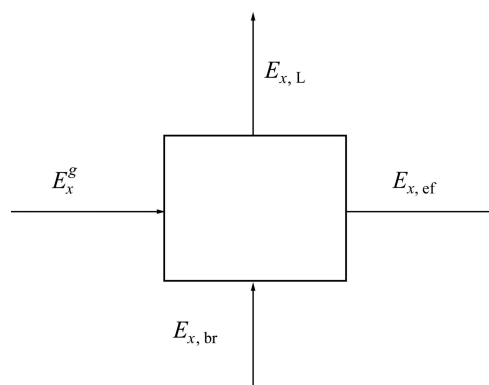


图1 黑箱网络单元

Fig.1 Black box network unit

有设备都是由主烟流线或主物流线串联起来的, 该系统就可以表示为串联网络模型。

2) 黑箱并联网络模型(并联模型)。一个由多台设备组成的系统, 各台设备的主要物流或主烟流线都互相平行而不相交, 且各台设备的输出有效烟最终汇集在一起后再向外输出, 这样的系统叫做并联网络系统。当将系统内所有设备视为黑箱组成灰箱模型时, 就构成黑箱并联网络模型。

2 氧化铝生产工艺过程烟分析模型的建立

本实验所研究氧化铝企业的生产工艺为混联法, 各子工序之间的关系既有串联、又有并联, 个别还有混联关系, 因此, 根据氧化铝生产过程的特点, 采用复杂灰箱模型对其进行烟分析比较合理。

在建立混联法氧化铝生产工艺烟分析模型的过程中, 作了如下考虑:

1) 以工序为控制单元, 将氧化铝生产工艺过程中每个工序看作单独的黑箱模型进行分析, 其中由于氢氧化铝是不定晶型, 相关热力学参数不全, 因此, 把晶种分解和焙烧看作是一个黑箱模型。

2) 每个工序的的烟分析模型都包括原料(上游工序来料)的带入烟、中间设备或能源的供给烟、有效烟和烟损 4 个部分。

3) 由于 2008 年企业能耗波动较大, 故采用 2008 年上半年工艺能耗最高的 2 月份和工艺能耗最低的 6 月份的生产数据进行计算分析。通过纵向和横向的比较, 分析各个环节的用能状况, 以及各环节用能随生产状况改变时的变化情况。

4) 所有计算的烟流均是计算周期内每产 1 t 氧化铝该工序的烟流量, 单位为 GJ/t。

氧化铝生产工艺过程的烟流程图如图 2 所示。在对各子工序进行烟分析计算时, 遵循热力学第一定律, 烟平衡方程如下:

$$E_{x,br} + E_x^g = E_{x,ef} + E_{x,L} \quad (3)$$

式中: $E_{x,br}$ 为原料(或上级工序来料)的带入烟, GJ/t; E_x^g 为能源或设备的供给烟, GJ/t; $E_{x,ef}$ 为工序有效烟, GJ/t; $E_{x,L}$ 为工序烟损, GJ/t。

则烟效率可以定义为

$$\eta_e = \frac{E_{x,ef}}{E_{x,br} + E_x^g} \times 100\% \quad (4)$$

3 氧化铝生产工艺过程烟耗计算与分析

通过对氧化铝生产工艺烟分析灰箱模型的合理分解, 对各子工序采用黑箱模型进行求解, 其吨氧化铝各生产工序的烟耗、烟损和烟效率如表 1 和 2 所列, 计算结果分析如下:

1) 从表 1 和 2 可以看出, 氧化铝生产过程供给烟主要集中在熟料烧成、焙烧、管道化溶出和蒸发工序。2008 年 2 月份, 上述 4 个工序供给烟占整个生产过程供给烟的 86.55%; 6 月份, 上述 4 个工序供给烟占整个生产过程供给烟的 85.83%。提高单个工序或单体设备能源利用率的研究应主要针对这 4 个工序展开。

2) 2008 年 6 月份, 该企业氧化铝生产过程吨氧化铝供给烟为 16.363 2 GJ/t, 比 2 月份的 17.337 4 GJ/t 降低 5.62%。在整体能耗下降的情况下, 2008 年 6 月份, 焙烧工序和石灰煅烧工序的能耗反而有所上升, 说明上述两个工序主要设备运行状况与操作存在一定问题。

3) 由于氧化铝生产过程基本封闭进行, 外排物质较少, 因此各工序烟效率较高。但熟料烧成和石灰煅烧工序烟效率很低, 分别在 6%~8%和 49%左右。这是由于熟料烧成和石灰煅烧生产工序中, 都涉及燃料的燃烧过程, 而燃料的燃烧过程的不可逆烟损(内部烟损)较大, 一般占燃料烟的 20%~30%以上。这是造成工序烟利用效率低的一个主要原因。

表 1 2008 年 2 月份各生产工序供给烟、烟损和烟效率

Table 1 Supplied exergy, exergy loss and exergy efficiency of processes in February, 2008

Process	Supplied exergy/(GJ·t ⁻¹)	Exergy loss/(GJ·t ⁻¹)	Exergy efficiency/%
Slurry sintering	8.180 4	8.589 3	6.62
Aluminium trihydrate calcining	2.779 5	—	—
Tube digestion	2.219 5	1.505 1	74.87
Evaporation	1.825 3	1.540 2	75.43
Lime calcining	1.082 1	0.551 7	49.00
Caldron digestion	0.443 1	0.362 7	76.22
Digestion and desilication	0.423 2	0.242 1	82.41
Precipitation	0.201 4	—	—
Material preparation	0.182 9	1.581 4	78.95

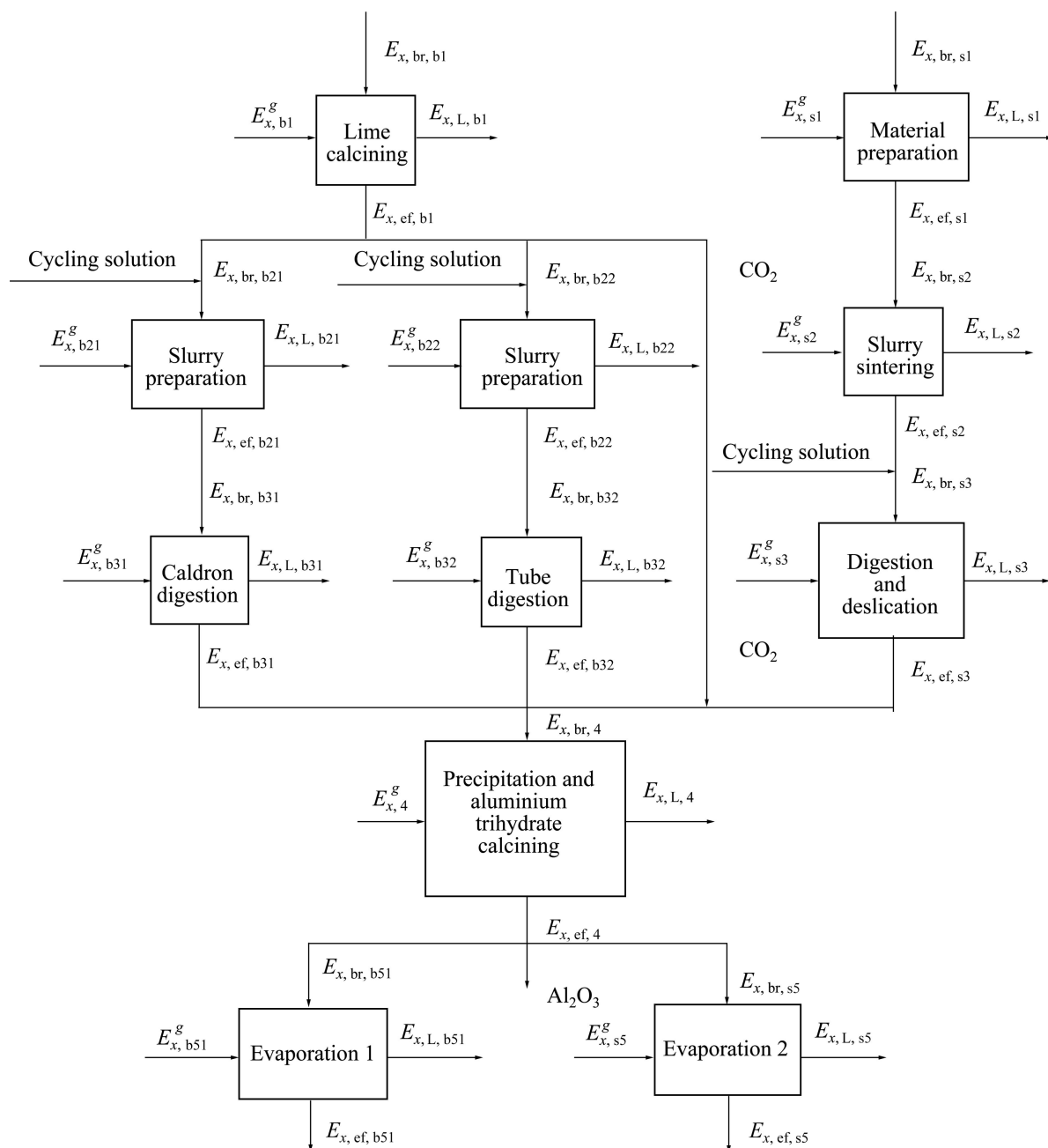


图 2 氧化铝生产工艺焓分析模型示意图

Fig.2 Exergy analysis model of alumina production process (The third subscript is code of alumina production process)

4) 工序焓利用效率低的另一个主要原因为外部焓损。外部焓损是系统向外界无意义的泄露和排放的能量。管道化溶出、高压溶出和熟料溶出工序向生产系统外界排出赤泥(部分赤泥送入烧结法工序继续利用), 虽然热含量很大, 但能量的能级低, 且赤泥的形态特殊, 难以利用。

5) 熟料烧成是用能最多、焓效率最低的工序。焓损失甚至超过供给焓, 其主要原因除了燃烧过程的不可逆热损失以外, 该工序还向系统外排放了大量含水

蒸汽的烟气, 导致较高的外部焓损, 回收这部分烟气的焓将有助于提高工序的能源利用效率, 降低生产成本。该工序另一个主要的外部焓损为设备表面散热带来的焓损。由于熟料烧成设备为回转窑, 表面温度较高, 散热损失较大, 且余热回收困难。如果能够通过技术研发解决回收回转窑表面余热的难题, 将使熟料烧成工序的焓效率提高到一个新的水平。石灰煅烧工序产生的 CO_2 用于二精液的碳酸化分解, 烟气带走的热量得以充分利用, 且石灰炉散热损失较少, 减少

表 2 2008 年 6 月份各生产工序供给烟、烟损和烟效率
Table 2 Supplied exergy, exergy loss and exergy efficiency of processes in June, 2008

Process	Supplied exergy/(GJ·t ⁻¹)	Exergy loss/(GJ·t ⁻¹)	Exergy efficiency/%
Slurry sintering	7.045 0	7.475 0	7.12
Aluminium trihydrate calcining	3.193 6	—	—
Tube digestion	1.9827	1.498 6	75.17
Evaporation	1.823 2	0.812 5	87.70
Lime calcining	1.119 6	0.564 3	49.60
Caldron digestion	0.422 1	0.402 5	72.83
Digestion and desilication	0.395 1	0.227 4	82.44
Precipitation	0.203 4	—	—
Material preparation	0.178 5	1.732 5	77.92

外部烟损，因此，尽管存在燃烧过程的不可逆烟损，但该工序的烟效率相对于熟料烧成工序较高。

6) 由于氢氧化铝是非定型晶体，无法计算出其化学烟，因此把分解工序和焙烧工序合并，看成一个黑箱模型。该模型的主要能源供应在焙烧工序，2 月份和 6 月份的烟效率分别是 45.12%和 46.78%。焙烧工序中不但存在燃烧过程的不可逆烟损，且烟气、成品氧化铝带走一定量的能量，这必将导致该工序烟损大，烟效率低，可以考虑回收烟气余热以提高烟效率。

7) 蒸发工序烟效率为 75%~88%。烟损主要原因是由于该工序末效蒸发器从原液蒸发出的大量蒸汽采用水喷淋吸收、自然降温的方法处理，这部分余热未得到有效利用。

在利用烟分析灰箱模型计算的基础上，绘制出混

表 3 熟料烧成工序烟损分布
Table 3 Distribution of exergy loss in process of slurry sintering

Exergy loss source	Exergy loss/(GJ·t ⁻¹)	Distribution/%	Exergy loss source	Exergy loss/(GJ·t ⁻¹)	Distribution/%
Combustion	1.806 5	21.03	Solid emission	1.314 8	15.31
Physical exergy of gas	0.286 0	3.33	Evaporation	1.168 8	13.61
Chemical exergy of gas	0.772 1	8.99	Chemical reaction	0.071 7	0.84
Air preheating	0.226 5	2.64	Others	2.896 9	33.54
Surface heat loss	0.049 8	0.58			

联法氧化铝生产工艺过程的烟流图(2008 年 2 月份数据)如图 3 所示。从图 3 可以清晰看出，氧化铝生产工艺过程中能量流动与分布状况。

4 氧化铝生产过程单个工序烟损分布计算

生产过程中的烟损，一般是由机械、热与化学 3 种不可逆因素引起的。氧化铝生产是湿法冶金过程，生产流程比较封闭，除熟料烧成、石灰煅烧和分解与焙烧工序外，其他各工序烟效率均较高；这些工序主要的烟损是内部的燃烧过程、传热过程以及化学反应过程的不可逆烟损和外部的排放烟损。

熟料烧成工序为烟效率较低的工序，因此，对 2008 年 2 月份熟料烧成工序主要烟损分布进行了计算，结果列于表 3。从表 3 可以看出：1) 生料浆水分蒸发、烟气化学烟、主要化学反应、空气预热等过程的烟损占熟料烧成工序总烟损的 26.08%，这部分烟损主要为不可逆烟损，比较难以回收，但合理降低生料浆含水量可有效降低水分蒸发所造成的不可逆烟损。2) 绝热燃烧过程的烟损占工序总烟损的 21.03%，提高助燃空气温度，减少空气过剩系数是降低绝热燃烧烟损主要方式。3) 烟气物理烟损、外排杂质及炉体散热造成的烟损占工序总烟损的 19.22%，针对这些过程强化余热回收利用，减少不必要的烟损，可有效提高能源利用效率。以烟气物理烟损和炉体散热烟损计算，尽管两者仅占工序烟损的 3.91%，但折合成标准煤为 $1\,193 \times 10^3 \text{ kg/a}$ (34 919.11 GJ/a)，其经济效益与社会效益非常可观。4) 其他烟损主要包括流动、混合、副化学反应、传热(不含生料浆水分蒸发部分)等过程产生的烟损，占工序烟损的 33.54%。这部分烟损就目前设备状况难以回收利用，但可采用优化操作结构与参

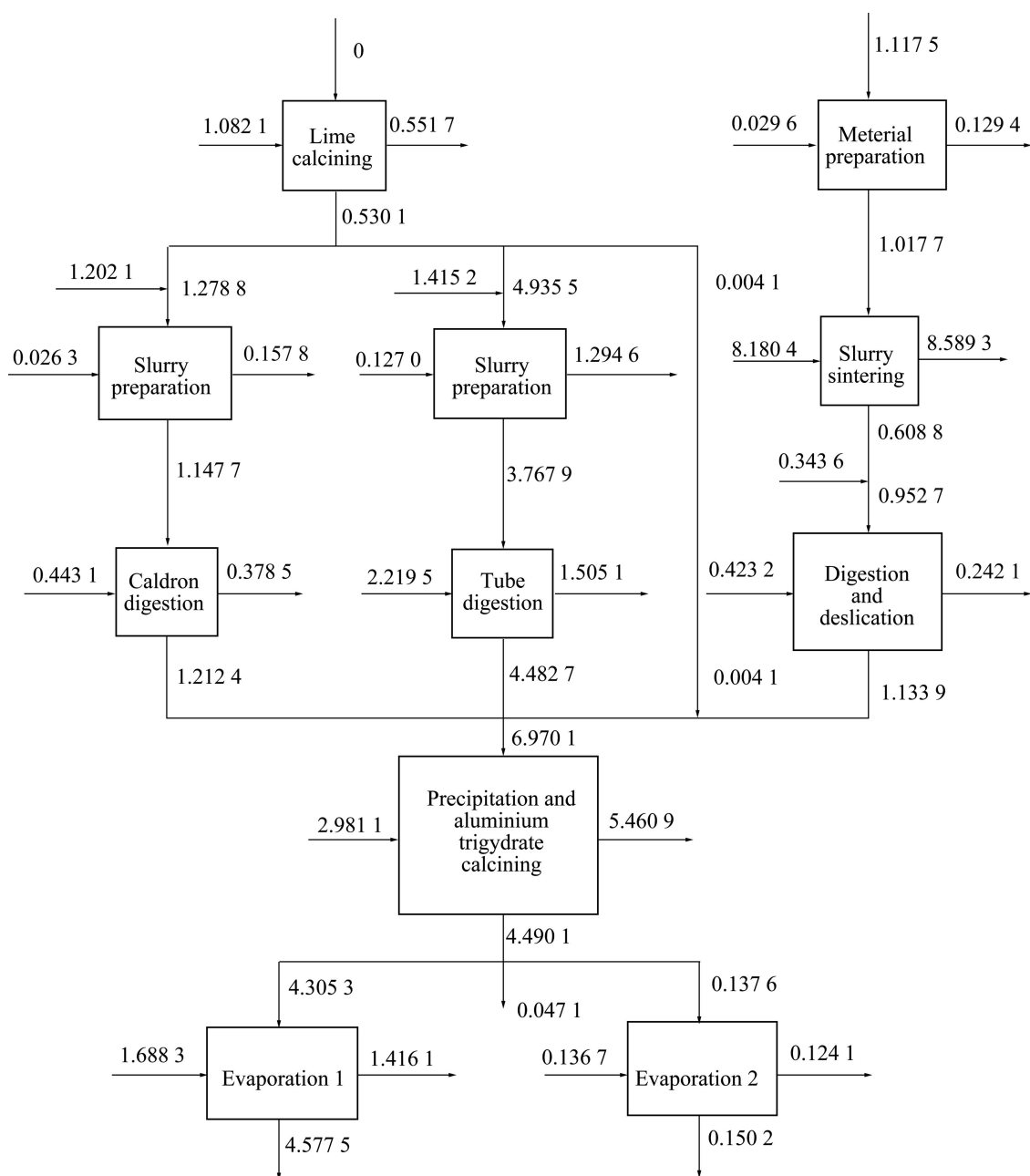


图 3 2008 年 2 月份吨氧化铝的焓流图

Fig.3 Exergy flow diagram per ton alumina in February, 2008 (GJ/t)

数的方式, 如提高生料预热温度和强化烧结过程等进行改善, 以达到提高设备的能源利用率和降低能耗的目的。

5 结论

1) 对流程工业采用焓分析的方法进行企业生产过程能耗水平分析, 可以有效评价工艺过程中能源品质与使用效率, 有利于企业合理调配资源, 更有针对

性地挖掘企业节能潜力。

2) 以中国铝业某分公司氧化铝厂生产工艺系统为研究对象, 以焓传递理论及焓分析方法为基础, 建立混联法氧化铝生产工艺系统焓分析的灰箱模型, 并对生产过程进行合理分解, 形成独立的单元子系统, 便于计算分析。

3) 对混联法氧化铝生产过程能耗进行了计算与分析, 结果表明, 熟料烧成、焙烧、管道化溶出和蒸发 4 个工序的供给焓较大, 占整个生产工艺过程总供给焓的 86% 左右, 应着重关注这 4 个工序的能源利用

效率。

4) 熟料烧成与石灰煅烧工序烟效率较低,对熟料烧成工序的烟损分布进行了计算与分析,提出了节能建议。

REFERENCES

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 72-112
YIN Rui-yu. Metallurgical process engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 72-112.
- [2] DAI Yi-ping, WANG Jian-feng, GAO Lin. Exergy analysis, parametric analysis and optimization for a novel combined power and ejector refrigeration cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 1983-1990.
- [3] 成庆林, 周海莲, 项新耀. 烟传递系数的定义及其影响机制[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(3): 43-46.
CHENG Qing-lin, ZHOU Hai-lian, XIANG Xin-yao. The definition of exergy transfer coefficient and its influence mechanism[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(3): 43-46.
- [4] 成庆林, 刘 扬, 项新耀. 烟传递—热力学理论研究的新领域[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(4): 63-67.
CHENG Qing-lin, LIU Yang, XIANG Xin-yao. Exergy transfer—new field of thermodynamics theory study[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(4): 63-67.
- [5] 李亚奇, 何雅玲, 王巍巍. 碟式集热器驱动斯特林热机系统烟效率分析[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(6): 911-914.
LI Ya-qi, HE Ya-ling, WANG Wei-wei. Exergy efficiency analysis of Stirling heat engine driven by solar dish collector based on FTT[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(6): 911-914.
- [6] 冯俊小, 张 宇, 谢知音, 张 材, 果乃涛. 回转窑内铁矿氧化球团焙烧过程的能量和烟分析[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(3): 33-37.
FENG Jun-xiao, ZHANG Yu, XIE Zhi-yin, ZHANG Cai, GUO Nai-tao. Energy and exergy analysis of iron ore pellets induration in the kiln[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(3): 33-37.
- [7] ROSEN M A, DINCER I. Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal systems and processes[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 1633-1651.
- [8] CAMDALI U, TUNC M. Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 2255-2267.
- [9] BECERRA-LOPEZ H R, GOLDING P. Dynamic exergy analysis for capacity expansion of regional power-generation systems: Case study of far west Texas[J]. Energy, 2007, 32: 2167-2186.
- [10] OLADIRAN M T, MEYER J P. Energy and exergy analysis of energy consumptions in the industrial sector in South Africa[J]. Applied Energy, 2007, 84: 1056-1067.
- [11] 谷雅秀, 吴裕远. 烟传递与烟经济分析的研究进展与展望[J]. 西安交通大学学报: 社会科学版, 2005, 25(2): 21-25.
GU Ya-xiu, WU Yu-yuan. Research progress and prospect of exergy transfer and exergoeconomic analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University: Social Sciences Edition, 2005, 25(2): 21-25.
- [12] 朱明善. 能量系统的烟分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 195-201.
ZHU Ming-shan. Exergy analysis on energy systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 195-201.
- [13] GARDEL A. Energy-economy and prospective[M]. Pergamon Press, 1981: 30-92.
- [14] 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: 78-134.
FU Qing-sheng. Thermodynamics analysis method of energy system[M]. Xian: Xian Jiaotong University Press, 2005: 78-134.
- [15] REISTAD G M, FABRYCKY W J. Available-energy costing, thermodynamics: Second law analysis[J]. ACS Symposium Series, 1980, 122: 143-159.

(编辑 龙怀中)