



中华人民共和国国家标准

GB/T 40816.11—2021/ISO 13579-11:2017

工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及 能效计算方法 第 11 部分：各种效率评估

Industrial furnaces and associated processing equipment—
Method of measuring energy balance and calculating energy efficiency—
Part 11: Evaluation of various kinds of efficiency

(ISO 13579-11:2017, IDT)

2021-10-11 发布

2022-05-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 通用术语	2
3.2 平衡表	3
4 符号	3
4.1 能量/焓符号	4
4.2 其他符号	5
5 边界条件和能量(焓)	7
5.1 评估范围构成	7
5.2 边界条件分类	8
5.3 能量(焓)分类	8
5.4 能量(焓)计算	10
6 焓效率	15
6.1 通用公式	15
6.2 典型效率示例	15
7 焓效率	16
7.1 一般原则	16
7.2 边界条件	17
7.3 焓分类	17
7.4 焓计算	17
7.5 效率	20
8 命名	21
8.1 一般要求	21
8.2 各独立的项目模块	21
8.3 操作类型	22
8.4 能量来源	22
8.5 示例	22
9 测量	23
10 评估报告	23
附录 A (资料性) 能量效率评估示例	24
附录 B (资料性) 连续加热炉的焓效率和焓效率对比	33
附录 C (资料性) 燃烧炉节能效果评价程序	40
参考文献	50

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 40816《工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及能效计算方法》的第11部分。GB/T 40816 已发布了如下部分：

——第11部分：各种效率评估。

本文件使用翻译法等同采用 ISO 13579-11:2017《工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及能效计算方法 第11部分：各种效率评估》。

本文件做了下列编辑性修改：

——删除了 ISO 13579-11:2017 的 4.2 中的 $c_{pm,ex}$ (因为 $c_{pm,ex}$ 与 c_g 定义重复,且 $c_{pm,ex}$ 在文中没有使用)；

——删除了 ISO 13579-11:2017 的 C.4.3.2 中的列项 f) 和列项 g) [因为列项 f)、列项 g) 与列项 d)、列项 e) 内容重复], 式(38)后面的公式序号顺改。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国工业电热设备标准化技术委员会(SAC/TC 121)归口。

本文件起草单位：西安电炉研究所有限公司、佛山市质量和标准化研究院、安徽汉和电气有限公司、广东中鹏新能科技有限公司、厦门程灿工业设备有限公司、重庆赛迪热工环保工程技术有限公司、广东飞成新材料有限公司、西安晶中生科技有限公司、河南天利热工装备股份有限公司、惠州市璞愿化工有限公司、山东佐耀智能装备股份有限公司、阳江十八子集团有限公司、广州维港环保科技有限公司、漳州明德工贸有限公司。

本文件主要起草人：余维江、李琨、杨佳、李朋、曹姣、张攀辉、吴国辉、肖尚发、田加团、皮凤梅、段春芳、易仲辉、李振庆、吴成伟、王洪伟、李积回、雷鸣、叶永顺。

引 言

工业炉及相关工艺设备是利用燃料燃烧或电能转化的热量,将物料或工件加热的热工设备。为了评估工业炉及相关工艺设备的能效,制定 GB/T 40816《工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及能效计算方法》。GB/T 40816 旨在规定工业炉和相关工艺设备的能量平衡测试和能效计算方法,拟由 5 个部分构成。

- 第 1 部分:通用方法。目的在于描述工业炉及相关工艺设备能量平衡测试及能效计算的通用方法。
 - 第 2 部分:钢用再热炉。目的在于描述钢用再热炉能量平衡测试及能效计算的特殊方法。
 - 第 3 部分:间歇式熔铝炉。目的在于描述间歇式熔铝炉能量平衡测试及能效计算的特殊方法。
 - 第 4 部分:保护性或反应性气氛炉。目的在于描述保护性或反应性气氛炉能量平衡测试及能效计算的特殊方法。
 - 第 11 部分:各种效率评估。目的在于描述工业炉及相关工艺设备的各种效率评估方法。
- 其他各部分根据通用部分制定,与通用部分配合使用。

工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及 能效计算方法 第 11 部分:各种效率评估

1 范围

本文件规定了工业炉及其相关工艺设备(TPE)的能效评估方法的分类和名称,包括焓与焓方面的能效。

本文件不适用于以下 TPE 类型:

- 高炉、碱性氧化炉、焦炉;
- 产生的气体用作燃料的炉子(包括副产物气体);
- 特殊气体发生器;
- 为化工厂或石油厂设计的工业炉;
- 在露天环境下进行加热或燃烧的设施;
- 燃烧固体燃料的装置;
- 垃圾焚烧炉。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 13574:2015 工业炉及相关工艺设备 词汇(Industrial furnaces and associated processing equipment—Vocabulary)

ISO 13579-1:2013 工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及能效计算方法 第 1 部分:通用方法(Industrial furnaces and associated processing equipment—Method of measuring energy balance and calculating efficiency—Part 1:General methodology)

ISO 13579-2:2013 工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及能效计算方法 第 2 部分:钢用再热炉(Industrial furnaces and associated processing equipment—Method of measuring energy balance and calculating efficiency—Part 2:Reheating furnaces for steel)

ISO 13579-3:2013 工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及能效计算方法 第 3 部分:间歇式熔铝炉(Industrial furnaces and associated processing equipment—Method of measuring energy balance and calculating efficiency—Part 3:Batch-type aluminium melting furnaces)

3 术语和定义

ISO 13574:2015、ISO 13579-1:2013 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

以下地址是 ISO 和 IEC 标准化术语数据库:

- ISO 在线浏览平台: www.iso.org/obp
- IEC 电力百科: www.electropedia.org

3.1 通用术语

3.1.1

边界 boundary

为能量平衡评估对象所定义的封闭部分。

注：一旦边界设置，能效评估是可行的。

3.1.2

产品 product

在 TPE 中的处理物，包括辅助材料。

示例：除主要材料外，加入废料熔炼过程中的辅助材料。

注 1：产品不包括热处理过程中形成的副产物（例如：氧化物的形成，如铁渣和氧化铝）。

注 2：产品不包括其附件，如：与产品同时加热的夹具或固定装置。

[来源：ISO 13574:2015, 2.134, 有修改]

3.1.3

能量平衡分析 energy balance analysis

通过测量和计算产生的能量，包括通过放热反应和对边界的吸热反应流出的能量，将能量值分为输入能量或输出能量。

注：总输入能量和总输出能量本质上平衡。

3.1.4

能效 energy efficiency

效率被定义为比能输出(3.1.5)与比能输入(3.1.6)的比值。

注：能效用%表示。本文件定义了具体能效输入和具体能效输出。

3.1.5

比能输出 specific energy output

本文件所定义的比能是来自作为评估 TPE 能效指数的边界的有效能量输出。

示例：通过 TPE 加工产品过程积累的焓。

3.1.6

比能输入 specific energy input

在本文件所定义的能量供给量作为边界能量用来计算能效指数。

3.1.7

可用热量 available heat

在指定操作或设备环境下，从加热室中获得的热量。

注 1：可用热量是 6.2.5 中所定义的一种能量输出形式。

注 2：“可用能量”在焓方面有不同概念。

注 3：见 A.2.5。

3.1.8

可用热比率 available heat ratio

能效指数定义为可用热量(3.1.7)除以燃料热值。

注：这个术语是燃烧炉的重要指标之一。

3.1.9

燃料当量电能 fuel equivalent energy of electricity

相当于发电所消耗的燃料输入热值的初始能量。

3.1.10

燃料当量能量转换 fuel equivalent energy conversion

将电能消耗转换为燃料当量电能(3.1.9)。

注 1: 一般可用的计算因数不考虑接电站和 TPE 接电终端之间的能耗损耗。

注 2: 通用单位为: kJ/kWh。

注 3: 不同政府和地区, 燃料当量能量转换值有区别。

注 4: 宜在转换时注明。

3.1.11

能量性能指示 energy performance indicator

每个具体的生产元件或每个辅助设备的单位功率所消耗的能量。

3.1.12

焓 exergy

在环境温度下提取的最大功, 定义为:

$$EX = \Delta H - T_0 \Delta S$$

式中:

EX —— 焓(最大功);

ΔH —— 焓变;

T_0 —— 环境温度, 单位为开尔文(K);

ΔS —— 熵变。

注: 在燃烧系统中有化学焓、压力焓、混合焓和热量焓。但是压力焓和混合焓忽略不计。

3.1.13

焓损失 exergy loss

从目标边界(3.1.1)流入和流出的焓之间的差异。

3.1.14

炉子结构 furnace structure

炉壁、冷却水设备、炉膛开口等的总称。

3.2 平衡表

注: 见表 A.3 和表 A.7 示例。

3.2.1

能量平衡表 energy balance table

列出能量输入和输出明细的表格。

3.2.2

效率评估表 efficiency evaluation table

将能量平衡表(3.2.1)的重组表分类为比能输入(3.1.6)或比能输出(3.1.5)等能量组, 以计算效率指标, 同时保持能量平衡。

4 符号

下列符号适用于本文件。

4.1 能量/焓符号

符号	定义
E_{aux}	生产每吨产品辅助设备消耗的能量
$E_{\text{available}}$	生产每吨产品可用热量
$E_{\text{available I}}$	基准可用热量,单位为兆焦每吨(MJ/t)
$E_{\text{available II}}$	采用节能措施后的可用热量,单位为兆焦每吨(MJ/t)
E_{ex}	生产每吨产品废气显热
$E_{\text{ex,ir}}$	生产每吨产品热回收设备入口处燃料废气显热
$E_{\text{ex,oc}}$	生产每吨产品在燃烧室出口处的燃料废气显热
$E_{\text{ex,or}}$	生产每吨产品热回收设备出口燃料废气显热
$E_{\text{exrm,ir}}$	生产每吨产品在热回收设备入口处的原料废气显热
$E_{\text{exrm,oc}}$	生产每吨产品在燃烧室出口的原料废气显热
$E_{\text{exrm,or}}$	生产每吨产品在热回收设备出口的原料废气显热
$E_{\text{fe,el}}$	生产每吨产品的燃料当量能量
E_{h}	生产每吨产品输入到加热室的能量
$E_{\text{h,el}}$	电加热生产每吨产品的热量
$E_{\text{h,fuel}}$	生产每吨产品的燃料热值
$E_{\text{h,fuel I}}$	基准的能量消耗(燃料热值),单位为兆焦每吨(MJ/t)
$E_{\text{h,fuel II}}$	使用节能措施后预计的能耗,单位为兆焦每吨(MJ/t)
$E_{\text{h,re}}$	生产每吨产品回收热量
$E_{\text{h,recx}}$	生产每吨产品的废气显热回收热量
$E_{\text{h,repr}}$	生产每吨产品的显热回收热量
E_{l}	生产每吨产品的热能损失
$E_{\text{l,atm}}$	生产每吨产品通过大气气体的能量损失
$E_{\text{l,eg}}$	生产每吨产品的发电损失
$E_{\text{l,eh}}$	生产每吨产品的电热能量损失
$E_{\text{l,exrm}}$	生产原料废气能量损失
$E_{\text{l,fs}}$	生产每吨产品炉膛结构能量损失
$E_{\text{l,j}}$	生产每吨产品加热夹具和其他物质所需的能量
$E_{\text{l,hs}}$	生产每吨产品炉体的储热所需的能量
$E_{\text{l,other}}$	生产每吨产品其他能耗
$E_{\text{l,uc}}$	生产每吨产品未燃烧含量的能量损失
E_{pl}	加载到边界时每吨产品的焓值
E_{p2}	生产每吨产品从边界吸收的焓值
E_{pr}	生产加工每吨产品所需要的能量
$E_{\text{pr,en}}$	生产每吨产品的焓变
$E_{\text{pr,ev}}$	生产每吨产品干燥和蒸发所需要的能量
$E_{\text{pr,re}}$	加热材料(产品)的吸热反应所需的能量
E_{rcy}	生产每吨产品的回收能源

符号	定义
$E_{s,air}$	生产每吨产品未预热的燃烧空气或其他氧化剂的显热
$E_{s,atomize}$	雾化每吨产品的显热
$E_{s,fuel}$	生产每吨产品的燃料显热
$E_{s,fluid}$	生产每吨产品入口处液体的显热
$E_{s,infil}$	生产每吨产品渗透空气的显热
E_{sp-in}	生产每吨产品的具体能量输入
E_{sp-out}	生产每吨产品的具体能量输出
$E_{react,exo}$	生产每吨产品的放热反应热
$E_{u,gen}$	生产每吨产品耗用的能源
EX_{aux}	辅助设备生产每吨产品消耗的烟
$EX_{available}$	生产每吨产品的可用烟
$EX_{ex,ir}$	每吨产品在热回收设备入口处废气烟
$EX_{ex,oc}$	每吨产品在燃烧室出口处废气烟
$EX_{ex,or}$	每吨产品在热回收设备出口处废气烟
$EX_{h,el}$	每吨产品的电源输入烟
$EX_{h,fuel}$	每吨产品燃料烟
$EX_{h,re}$	每吨产品回收烟
$EX_{l,atm}$	每吨产品给定的焓至大气中的烟
$EX_{l,eh}$	每吨产品电热烟损失
$EX_{l,fs}$	每吨产品炉膛结构的能量消耗烟
$EX_{l,hs}$	每吨产品的炉体结构蓄热所需能量的烟
$EX_{l,j}$	每吨产品加热夹具和其他物质所需的烟
$EX_{l,other}$	每吨产品其他能量损失的能量的烟
$EX_{pr,en}$	给定焓对每吨产品的烟
$EX_{pr,ev}$	每吨产品干燥和蒸发所需能量的烟
$EX_{pr,re}$	加热材料的吸热反应所需的热能
$EX_{react,exo}$	每吨产品放热反应的能量
EX_{sp-in}	每吨产品的比烟输入
EX_{sp-out}	每吨产品的比烟输出
$EX_{s,fluid}$	入口处液体显热烟
EX_{rcy}	每吨产品的回收能源烟
$EX_{u,gen}$	生产每吨产品产生公共事业烟耗
EX_v	以蒸汽回收的烟

4.2 其他符号

符号	定义
A_0	单位燃料消耗的理论燃烧空气体积,单位为立方米(m^3)
c	液体燃料中所含碳的质量分数

符号	定义
c_a	空气的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
c_g	废气的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
$c_{pm,fl}$	流体(燃料和燃烧空气)的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
$c_{pm,c}$	燃烧气体的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
$c_{pm,w}$	液态水的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
$c_{pm,ph}$	预热物品(例如产品,流体)的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
$c_{pm,v}$	水蒸气的平均比热容,单位为千焦每千克开尔文[kJ/(kg·K)]
e_c^0	每单位燃料的化学能量,单位为千焦每立方米(kJ/m ³)
G_0	每单位燃油消耗量理论体积,单位为立方米(m ³)
h	液体燃料中所含的氢的质量分数
H_{ex}	每单位燃油消耗量在燃烧室出口排气的显热量,单位为兆焦每立方米或兆焦每千克(MJ/m ³ 或 MJ/kg)
H_h	单位燃料的总发热量,单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m ³)
H_l	单位燃料的净热值,单位为焦耳每千克或千焦每立方米(J/kg 或 kJ/m ³)
H_r	每单位燃油消耗量预热燃烧空气的明显热量,单位为兆焦每标准立方米或兆焦每千克(MJ/m ³ 或 MJ/kg)
H_v	每吨产品产生蒸汽回收焓,单位为千焦每吨(kJ/t)
ΔH	每吨产品焓变化,单位为千焦每吨(kJ/t)
L	水的蒸发潜热,单位为千焦每千克(kJ/kg)
M	空气比
m_I	空气比基准
m_{II}	节能措施后的空气比
m_{ex}	每吨产品废气质量,单位为千克每吨(kg/t)
m_{fl}	每吨产品流体(燃料或燃烧空气)质量,单位为千克每吨(kg/t)
$m_{fl,c}$	每吨产品流体质量和与燃料量对应的理论燃烧气体质量的总和,单位为千克每吨(kg/t)
m_{ph}	每吨产品预热项目(如产品、流体)质量,单位为千克每吨(kg/t)
m_{v1}	每吨产品所需作为雾化剂的蒸汽的质量,单位为千克每吨(kg/t)
m_{v2}	每吨产品所需废气能量回收的蒸汽的质量,单位为千克每吨(kg/t)
O	液体燃料中氧的质量分数
R	气体常数
s	液体燃料中硫的质量分数
ΔS	每吨产品熵变,单位为千焦每开尔文吨[kJ/(K·t)]
t_a	预热燃烧空气温度,单位为开尔文(K)
t_{gout}	燃烧室出口废气温度,单位为开尔文(K)
T_{ad}	绝热火焰温度,单位为开尔文(K)
T_0	环境温度,单位为开尔文(K)
T_{ex}	指定位置废气温度,单位为开尔文(K)
T_{fc}	炉内温度,单位为开尔文(K)

符号	定义
T_{fl}	流体温度(燃料或燃烧空气),单位为开尔文(K)
T_{ph}	余热项目(如产品、流体)温度,单位为开尔文(K)
T_{v1}	作为雾化剂的水蒸气的温度,单位为开尔文(K)
T_{v2}	从废气能量回收的水蒸气温度,单位为开尔文(K)
V_f	生产每吨产品消耗燃料,单位为立方米每吨或千克每吨[m ³ /t 或 kg/t]
x_i	燃料组分 i 的体积分数
α_{es}	节能率(%)
η	焓比能效率
η_1	与 ISO 13579-1:2013 一致的总效率
η_2	在总热值基础上的热效率
η_3	在提供热值基础上的热效率
η_5	燃烧的燃料比
η_7	燃烧炉余热回收率
η^*	可用热率
η_I^*	基准可用热率
η_{II}^*	采用节能措施后预计可用热率
η_0^*	不考虑余热回收的转换可用热率
η_e	发电效率
η_{exh}	燃烧废气余热与燃料热值的比值
η_{ex}	比焓效率
η_{ex}^*	可用热焓与输入焓的比值
η_{ex1}	使用燃料吉布斯自由能计算与 ISO 13579-1:2013 一致的总焓效率
η_{ex2}	使用吉布斯自由能计算全热值基础上的热焓效率
η_{exh}	燃烧废气余热与燃料热值的比值
η_R	燃烧炉有效余热回收率
η_{RI}	基准燃烧炉有效余热回收率
η_{RII}	燃烧炉采用节能措施后的有效余热回收率
$\eta_{recy, steam}$	所产生的蒸汽回收焓与蒸汽发生器提供的全部焓的比值

5 边界条件和能量(焓)

5.1 评估范围构成

本文件的评估范围一般包括以下内容:

- 加热室(标引序号 1);
- 烧嘴(标引序号 2);
- 热回收设备(使用废气预热设备)(标引序号 3);

- 发电机(标引序号 4)；
- 电气辅助设备(如风力动力机、压缩机)(标引序号 5)；
- 公共事业发生器(如吸热气体发生器)(标引序号 6)；
- 电加热(标引序号 7)。

注：标引序号见图 1。

5.2 边界条件分类

评估 TPE 能源效率评估边界条件分类代码见表 1。

表 1 边界条件分类

符号	边界条件类别	描述
EB1	TPE 全过程	按 ISO 13579-1:2013 的规定,当不考虑燃料当量能量转换时,发电机 ^a 可以排除在外。适用于本边界条件的典型效率见 6.2.2
EB2a	带热回收设备的加热室	回收热可视为内部循环热,辅助设备 ^b 和公共事业发生器 ^c 应排除在外。 适用于本边界条件的典型效率见 6.2.4、6.2.5 和 6.2.7
EB2b	带有热回收设备的加热室和冷却区	
EB3a	加热室	热回收设备应在本边界条件外部。辅助设备 ^b 和公共事业发生器 ^c 应排除在外。 适用于本边界条件的典型效率见 6.2.3、6.2.5 和 6.2.7
EB3b	加热室和冷却区	
EB4	热回收设备	边界条件应临近热回收设备 ^d 。 适用于本边界条件的典型效率见 6.2.6
EB4a	燃烧空气预热设备	
EB4f	燃料预热设备	
EB4p	产品预热设备	
EB5	辅助设备	应明确地指定 ^e 辅助设备 ^b
EB6	公共事业发生器	应明确地指定 ^f 公共事业发生器 ^c
^a 见图 1 中标引序号 4。 ^b 见图 1 中标引序号 5。 ^c 见图 1 中标引序号 6。 ^d 见图 1 中标引序号 3。 ^e 例如:风机。 ^f 例如:O₂ 发生器。		

5.3 能量(焓)分类

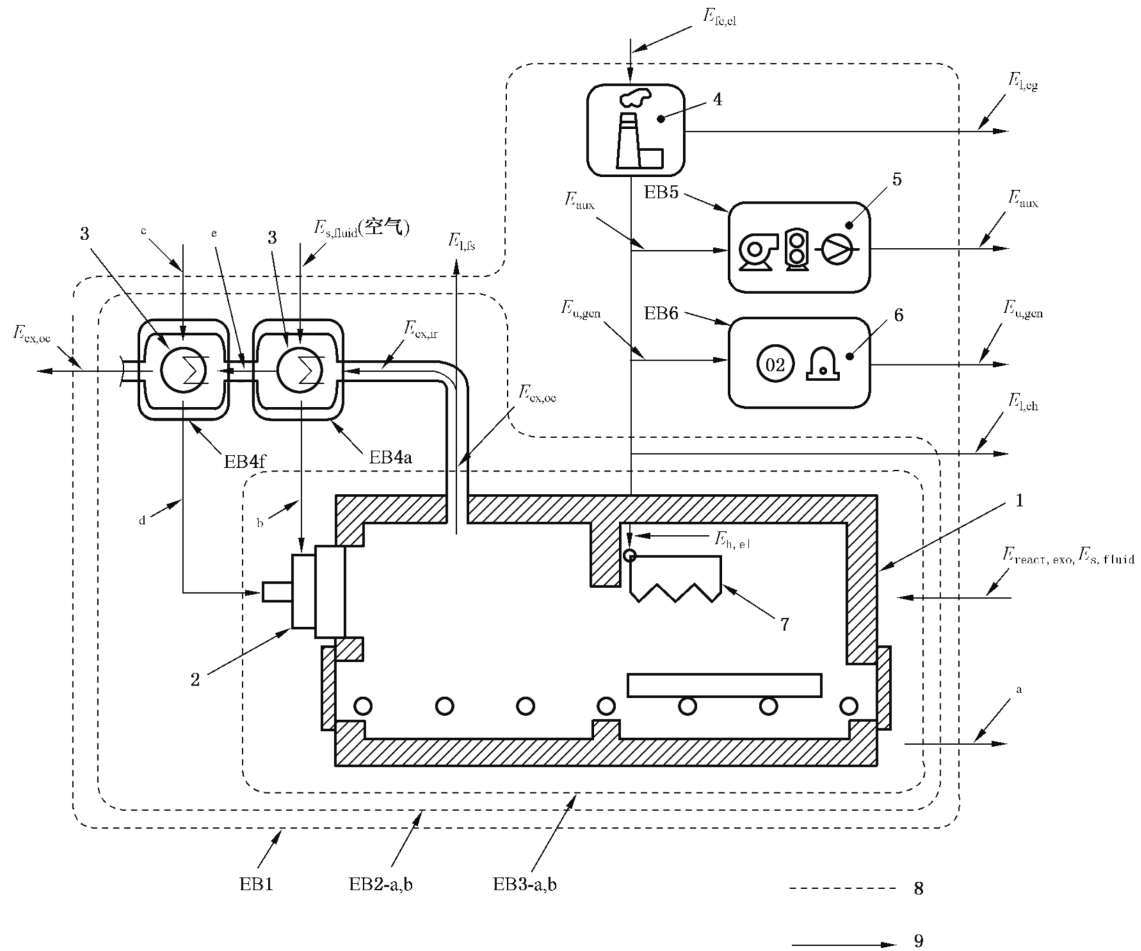
表 2 所示的能量类型和符号分类适用于本文件。

除非特殊说明,表 2 中所示能量的基本单位为 1 kJ/t(即 1 000 kg)。

各类能量计算见 5.4。

表 2 能量分类

分类		符号	描述 章条号
加热室输入能量	电源输入能量	E_h	5.4.1
		$E_{h,el}$	5.4.1.2
	燃料热值	$E_{h,fuel}$	5.4.1.3
	放热反应热	$E_{react,exo}$	5.4.1.4
	流体入口显热	$E_{s,fluid}$	5.4.1.5
工艺流程所需能量	干燥和蒸发所需能量	E_{pr}	5.4.2
		$E_{pr,ev}$	5.4.2.2
	保温材料(产品)吸热反应所需能量	$E_{pr,re}$	5.4.2.3
	产品焓变	$E_{pr,en}$	5.4.2.4
燃烧室出口废气显热	燃料废气显热	$E_{ex,oc}$	5.4.3.1
	原料废气显热	$E_{exrm,oc}$	5.4.3.2
热回收设备出口废气显热	燃料废气显热	$E_{ex,or}$	5.4.4.1
	原料废气显热	$E_{exrm,or}$	5.4.4.2
热回收设备入口废气显热	燃料废气显热	$E_{ex,ir}$	5.4.5.1
	原料废气显热	$E_{exrm,ir}$	5.4.5.2
回收热	热回收	$E_{h,re}$	5.4.6
	废气显热回收热	$E_{h,reex}$	5.4.6.2
	产品显热回收热	$E_{h,repr}$	5.4.6.3
热能损失	未燃烧组分热能损失	E_l	5.4.7
		$E_{l,uc}$	5.4.7.2
	加热夹具和其他器具所需能量	E_{lj}	5.4.7.3
	炉体结构能量损失	$E_{l,fs}$	5.4.7.4
	炉体结构蓄热所需能量	$E_{l,hs}$	5.4.7.5
	环境气体能量损失	$E_{l,atm}$	5.4.7.6
	原料废气能量损失	$E_{l,exrm}$	5.4.7.7
	其他能量损失	$E_{l,other}$	5.4.7.8
电加热电能损失	电加热过程电能损失	$E_{l,eh}$	5.4.8
额外的(附加的)能耗	辅助设备能耗	E_{aux}	5.4.9
	公共事业产生能耗	$E_{u,gen}$	5.4.10
发电损失	发电损失	$E_{l,eg}$	5.4.11
燃料当量电能	燃料当量电能	$E_{fe,el}$	5.4.12
TPE 外使用能量	回收能量	E_{recy}	5.4.13
注：见图 1。			



标引序号说明：

1——加热室/燃烧室；

2——烧嘴；

3——热回收设备；

4——发电机；

5——电气辅助设备；

^a 工艺过程所需能量(E_{pr})和热能损失(E_l)。

^b $E_{s,fluid}$ (空气) + $E_{h,reo}$ 。

^c $E_{h,fuel}$ + $E_{s,fluid}$ (燃料)。

^d $E_{h,fuel}$ + $E_{s,fluid}$ (燃料) + $E_{h,reo}$ 。

^e $E_{ex,or}$ 或 $E_{ex,ir}$ 。

6——公共事业发生器；

7——电加热；

8——效率评估边界条件；

9——能量流。

图 1 TPE 组成和效率评估边界条件示例

5.4 能量(焓)计算

5.4.1 加热室输入能量(E_h)

5.4.1.1 一般要求

用式(1)计算加热室每吨产品输入能量：

$$E_h = \sum E_{hi} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

E_{hi} ——生产每吨产品输入加热室的各种可用能。

可按以下条款计算各可用能：

- 5.4.1.2 定义的电源输入能量($E_{h,el}$)；
- 5.4.1.3 定义的燃料热值($E_{h,fuel}$)；
- 5.4.1.4 定义的放热反应热($E_{react,exo}$)；
- 5.4.1.5 定义的流体入口显热($E_{s,fluid}$)。

5.4.1.2 电源输入能量($E_{h,el}$)

此类能量以电加热作为能源,包含电阻加热、感应加热、电弧加热、介质加热和微波加热。燃料当量能量转换是否必要,取决于能量评估条件(例如 E_{BI} 中的情况)。

5.4.1.3 燃料热值($E_{h,fuel}$)

此类能量是通过气体或液体燃料的燃烧反应产生的,不包括燃料或空气热显。

如果适用,燃料热值可按 ISO 13579-1:2013 的 9.2.1 计算。

5.4.1.4 放热反应热($E_{react,exo}$)

此类能量是由放热反应产生的,如产品氧化反应、辅助材料放热反应或电极氧化反应产生的热值。根据能量评估的情况,产品所需能量的计算可将放热反应热排除在外。

如果适用,形成钢产品氧化层产生的热量可按 ISO 13579-2:2013 的 9.2.5 计算。

如果适用,形成氧化铝产生的热量可按 ISO 13579-3:2013 的 9.2.7 计算。

5.4.1.5 流体入口显热($E_{s,fluid}$)

此类能量是除回收热量之外的加热室入口流体和/或空气显热的总和。此类能量包含渗透空气和雾化剂显热。当提供水/水分时,应考虑蒸发显热和潜热(负值)。当此能量与输入总能量相比足够小时,可忽略不计。

用式(2)计算每吨产品流体输入显热：

$$E_{s,fluid} = \sum E_{s,fluid\ i} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$E_{s,fluid\ i}$ ——生产每吨产品各种可用流体输入显热,如燃料显热、燃烧空气显热、雾化剂显热、渗透空气显热等。

如果适用,各流体显热可按相应的标准条款计算：

- 燃料显热($E_{s,fuel}$)按 ISO 13579-1:2013 的 9.2.4.1 计算；
- 燃烧空气显热($E_{s,air}$)按 ISO 13579-1:2013 的 9.2.5 计算；
- 雾化剂显热($E_{s,atomize}$)按 ISO 13579-1:2013 的 9.2.6 计算；
- 渗透空气显热($E_{s,infil}$)按 ISO 13579-1:2013 的 9.2.8 计算。

5.4.2 工艺流程所需能量(E_{pr})

5.4.2.1 一般要求

此类能量是计划工艺流程本身所需净能量。工艺流程所需能量是以下三类能量的任意组合之和：

- 5.4.2.2 定义的干燥和蒸发所需能量($E_{pr,ev}$)；
- 5.4.2.3 定义的保温材料吸热反应所需能量($E_{pr,re}$)；
- 5.4.2.4 定义的产品焓变($E_{pr,en}$)。

5.4.2.2 干燥和蒸发所需能量($E_{pr,ev}$)

此类能量是在热工艺过程中干燥和蒸发所需能量。

5.4.2.3 保温材料(产品)吸热反应所需能量($E_{pr, re}$)

此类能量是保温材料在热工艺过程中发生化学反应所需能量,为化学反应吸收能量,如: $\text{CaCO}_3 + E_{pr, re} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 。

5.4.2.4 产品焓变($E_{pr, en}$)

此类能量是在边界条件内产品的焓变值。

用式(3)计算产品焓变:

$$E_{pr, en} = E_{p2} - E_{p1} \dots\dots\dots (3)$$

依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.1.2.1 计算进入边界条件时每吨产品的焓值(E_{p1})。

依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.1.2.2 计算从边界条件提出时每吨产品的焓值(E_{p2})。

5.4.3 燃烧室出口废气显热

5.4.3.1 燃料废气显热($E_{ex, oc}$)

此类能量是燃烧室出口处燃料废气显热。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.4 计算废气显热。

5.4.3.2 原料废气显热($E_{exrm, oc}$)

此类能量为燃烧室出口处原材料废气显热。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.4 计算废气显热。

5.4.4 热回收设备出口废气显热

5.4.4.1 燃料废气显热($E_{ex, or}$)

此类能量为热回收设备出口处废气显热。在这种情况下,热回收设备是在燃烧室内的整体结构。这表明描述热回收设备的结构是必要的。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.4 计算废气显热。

5.4.4.2 原料废气显热($E_{exrm, or}$)

此类能量为热回收设备出口处废气显热。在这种情况下,热回收设备是在燃烧室内的整体结构。这表明描述热回收设备的结构是必要的。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.4 计算废气显热。

5.4.5 热回收设备入口废气显热

5.4.5.1 燃料废气显热($E_{ex, ir}$)

此类能量为远离燃烧室的热回收设备入口处的废气显热。此类能量用于热回收设备部件的评价。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.4 计算废气显热。

5.4.5.2 原料废气显热($E_{exrm, ir}$)

此类能量为远离燃烧室的热回收设备入口处的废气显热。这类显热用于热回收设备部件的评价。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.4 计算废气显热。

5.4.6 热回收($E_{h, re}$)

5.4.6.1 一般要求

此类能量是指从排气能量(如废气热)回收的可用回收热。回收热用于预热燃料、燃烧空气和/或提供给边界的产品。

5.4.6.2 废气显热回收热($E_{h, reex}$)

此类能量是指从废气回收的可用回收热。

5.4.6.3 产品显热回收热($E_{h, repr}$)

此类能量是指从产品回收的可用回收热。

5.4.7 热能损失(E_l)

5.4.7.1 一般要求

热能损失(E_l)是下述 6 种能量的任意组合之和:

- 5.4.7.2 定义的未燃烧成分能量损失($E_{l, uc}$);
- 5.4.7.3 定义的加热夹具和其他器具所需能量($E_{l, j}$);
- 5.4.7.4 定义的炉体结构能量损失($E_{l, fs}$);
- 5.4.7.5 定义的炉体结构蓄热所需能量($E_{l, hs}$);
- 5.4.7.6 定义的环境气体能量损失($E_{l, atm}$);
- 5.4.7.7 定义的原材料废气能量损失($E_{l, exrm}$);
- 5.4.7.8 定义的其他能量损失($E_{l, other}$)。

5.4.7.2 未燃烧成分能量损失($E_{l, uc}$)

此类能量是指废气热值能量损失。

5.4.7.3 加热夹具和其他器具所需能量($E_{l, j}$)

此类能量是指用于产品和其他物质(如来自产品的氧化物)运输的夹具、车厢、小车的焓变值。

注: 依据能量评价的条件, 这个能量损失通常可视为特殊能量输出的一部分。

如果适用, 可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.2 计算夹具/车厢能量损失。

5.4.7.4 炉体结构能量损失($E_{l, fs}$)

用式(4)计算每吨产品炉体结构能量损失:

$$E_{l, fs} = \sum E_{l, fs i} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$E_{l, fs i}$ ——每吨产品炉体结构的每种可用能量损失, 如炉壁能量损失、冷却水能量损失、开炉能量损失等。

注: 依据能量评价的条件, 这个能量损失通常可视为特殊能量输出的一部分能量损失。

各能量损失计算的参考标准列举如下:

- 依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.7 计算炉壁能量损失;
- 依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.11 计算冷却水能量损失;
- 依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.9 计算开炉能量损失;

——依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.10 计算炉壁安装部件能量损失。

5.4.7.5 炉体结构蓄热所需能量($E_{l,hs}$)

此类能量是指在间歇式炉壁预热过程中存储的热能。

注：依据能量评价的条件，这个能量损失通常可视为特殊能量输出的一部分能量损失。

如果适用，可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.5 计算炉体结构蓄热所需能量。

5.4.7.6 环境气体能量损失($E_{l,atm}$)

此类能量是指当适用气体间接加热 TPE 时，特殊气氛气体焓变能量损失。

注：依据能量评价的条件，这个能量损失通常可视为特殊能量输出的一部分能量损失。

如果适用，可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.1.6 计算环境气体能量损失。

5.4.7.7 原料废气能量损失($E_{l,exrm}$)

此类能量是指原材料的废气显热量的能量损失。

注：依据能量评价的条件，这个项目通常可视为一部分特殊能量输出的能量损失。

5.4.7.8 其他能量损失($E_{l,other}$)

此类能量是指作为能量平衡的剩余项计算的能量损失。

当计算结果显示负值时，有必要检测计量精度。

定义见 ISO 13579-1:2013 的 3.1.5.13。

5.4.8 电加热过程电能损失($E_{l,eh}$)

此类能量是指电加热过程中电能损失，如变压器、整流器、导体能量损失。当不测量这些能量时，可计入 5.4.7.8 所述的其他能量损失。

5.4.9 辅助设备能耗(E_{aux})

此类能量是指辅助设备(如泵、鼓风机、风扇、压缩机、真空泵)消耗能量。

用式(5)计算辅助设备每吨产品能耗：

$$E_{aux} = \sum E_{aux\ i} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$E_{aux\ i}$ ——每种辅助设备每吨产品能耗。

如果适用，可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.2 计算每种辅助设备能耗。

注：在 ISO 13579-1:2013 中，辅助设备能耗的符号为 E_{aux} 。

5.4.10 公共事业产生能耗($E_{u,gen}$)

此类能量是指用于产生公共事业(如特殊气氛气体、氮气、氧气、压缩空气、蒸汽)的能量。

用式(6)计算每吨产品公共事业产生能耗：

$$E_{u,gen} = \sum E_{u,gen\ i} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$E_{u,gen\ i}$ ——每种公共事业产生能耗。

注：公共事业的发电能量可以通过公共事业的数量和具体发电消耗来计算。

如果适用，可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.3 计算公共事业产生能耗。

5.4.11 发电损失($E_{l, eg}$)

此类能量是发电过程能量损失。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.4 计算发电损失。

5.4.12 燃料当量电能($E_{fe, el}$)

此类能量是指每一个发生在边界上的电能消耗转换的燃料当量电能的总和。

如果适用,可依据 ISO 13579-1:2013 的 9.3.4 计算燃料当量电能。

5.4.13 回收能量(E_{rcy})

此类能量是指从 TPE 热损失中回收,并在 TPE 外部使用的能量。

根据能量评价的条件,转换成燃料当量能量是必要的。

6 焓效率

6.1 通用公式

用式(7)计算比焓效率:

$$\eta = \frac{E_{sp-out}}{E_{sp-in}} \dots\dots\dots (7)$$

比能输入(E_{sp-in})和比能输出(E_{sp-out})包含 5.3 能量分类中的一种或者任意组合。

6.2 典型效率示例

6.2.1 一般原则

使用表 2 中定义的符号,对典型效率的示例进行详述。

6.2.2 与 ISO 13579-1:2013 一致的总效率

用式(8)计算与 ISO 13579-1:2013 一致的总效率:

$$\eta_1 = \frac{E_{pr}}{E_h - E_{rcy}} \dots\dots\dots (8)$$

此效率通常适用于边界条件“EB1”。

6.2.3 在总热值基础上的热效率

用式(9)计算在总热值基础上的热效率:

$$\eta_2 = \frac{E_{pr}}{E_h + E_{h, re}} \dots\dots\dots (9)$$

此效率通常适用于边界条件“EB3a”。

6.2.4 在供热值基础上的热效率

用式(10)计算在供热值基础上的热效率:

$$\eta_3 = \frac{E_{pr}}{E_h} \dots\dots\dots (10)$$

此效率通常适用于边界条件“EB2a”。

6.2.5 可用热比率

用式(11)计算可用热量:

$$E_{\text{available}} = E_{\text{pr}} + E_{\text{l}} \dots\dots\dots (11)$$

用式(12)计算可用热比率:

$$\eta^* = \frac{E_{\text{available}}}{E_{\text{h, fuel}}} \dots\dots\dots (12)$$

注 1: 可用热量的定义(见 3.1.7)。
注 2: 可用热比率应用的详细信息见附录 C。

6.2.6 燃烧效率

用式(13)计算燃烧燃料与供给燃料比:

$$\eta_5 = \frac{E_{\text{h, fuel}} - E_{\text{l, uc}}}{E_{\text{h, fuel}}} \dots\dots\dots (13)$$

6.2.7 燃烧炉有效余热回收率

用式(14)计算燃烧炉有效余热回收率:

$$\eta_{\text{R}} = \frac{E_{\text{h, re}}}{E_{\text{ex, oc}}} \dots\dots\dots (14)$$

此效率通常适用于边界条件“EB2”或“EB3”。
注: 提高燃烧炉有效余热回收率(6.2.7 定义)可提升节能效果, 因为节能效果与可用热比率(按 6.2.5 的定义)相关, 热回收率计算的示例见附录 A 和附录 B。

6.2.8 作为热回收设备性能指标的余热回收率

用式(15)计算作为热回收设备性能指标的余热回收率:

$$\eta_7 = \frac{E_{\text{h, re}}}{E_{\text{ex, ir}}} \dots\dots\dots (15)$$

此效率通常适用于边界条件“EB4”。

6.2.9 燃烧废气余热占燃料发热值比

用式(16)计算燃烧烟废气余热占燃料发热值比:

$$\eta_{\text{exh}} = \frac{E_{\text{ex, oc}}}{E_{\text{h, fuel}}} \dots\dots\dots (16)$$

此效率通常适用于边界条件“EB3”或“EB2”。

6.2.10 不考虑余热回收的转换可用热率

用式(17)计算不考虑余热回收的转换可用热率:

$$\eta_0^* = 1 - \eta_{\text{exh}} \dots\dots\dots (17)$$

7 焓效率

7.1 一般原则

本章规定一个可作为 TPE 能量效率评价的选择焓的定义。每一个定义对应第 6 章中焓效率的定义。本文件不包括每个过程中熵的增加。

7.2 边界条件

本质上排除发电作为焓效率的边界。

7.3 焓分类

焓的分类和符号见表 3。

除非另有规定,表 3 中指定的焓的基本单位为 1 千焦每吨(1 kJ/t)。

焓计算见 7.4。

表 3 焓的分类

分类		符号	描述 章条号
加热室输入焓	电源输入焓	$EX_{h,el}$	7.4.1
	燃料焓	$EX_{h,fuel}$	7.4.2
	放热反应焓	$EX_{react,exo}$	7.4.3
	流体入口显热焓	$EX_{s,fluid}$	7.4.4
产品所需能量焓	干燥和蒸发所需能量焓	$EX_{pr,ev}$	7.4.5
	加热材料吸热反应所需焓	$EX_{pr,re}$	7.4.6
	产品给定焓焓	$EX_{pr,en}$	7.4.7
废气焓	在燃烧室出口	$EX_{ex,oc}$	7.4.8
	在热回收设备出口处	$EX_{ex,or}$	
	在热回收设备入口处	$EX_{ex,ir}$	
回收焓	回收焓	$EX_{h,re}$	7.4.9
能量损失焓	加热夹具和其他材料所需焓	$EX_{l,j}$	7.4.10
	炉体结构热损失焓	$EX_{l,fs}$	7.4.11
	炉体结构蓄热所需能量焓	$EX_{l,hs}$	7.4.12
	气氛气体在给定焓下的焓	$EX_{l,atm}$	7.4.13
电加热电能损失	电热损失焓	$EX_{l,eh}$	7.4.14
间接能量消耗	辅助设备消耗焓	EX_{aux}	7.4.15
	公用发电消耗焓	$EX_{u,gen}$	7.4.16
TPE 外部使用能量	回收利用能量焓	EX_{rcy}	7.4.17

7.4 焓计算

7.4.1 电源输入焓($EX_{h,el}$)

这种分类是电加热应用比热焓。

电源输入焓等于从电源输入的能量,见式(18):

$$EX_{h,el} = E_{h,el} \dots\dots\dots (18)$$

7.4.2 燃料焓($EX_{h, \text{fuel}}$)

7.4.2.1 气体燃料

通过各组分焓的求和计算气体燃料焓,见式(19):

$$EX_{h, \text{fuel}} = (\sum x_i e_{c,i}^0 + RT_0 \sum x_i \ln x_i) \times V_f \quad \dots\dots\dots (19)$$

7.4.2.2 液体燃料

7.4.2.2.1 一般要求

通过 7.4.2.2.2 所述的 Rant's 近似公式计算或者 7.4.2.2.3 所述的 Nobusawa's 公式计算液体燃料焓。

7.4.2.2.2 Rant's 近似公式

焓计算见式(20):

$$EX_{h, \text{fuel}} = 0.975 H_h \times V_f \quad \dots\dots\dots (20)$$

注: 式(20)中 H_h 用来替代 H_l 。

7.4.2.2.3 Nobusawa's 公式

焓计算见式(21):

$$EX_{h, \text{fuel}} = H_l \left(1.0038 + 0.1365 \frac{h}{c} + 0.0308 \frac{o}{c} + 0.0104 \frac{s}{c} \right) \times V_f \quad \dots\dots\dots (21)$$

注: 如果已知 h 、 o 、 s , 则用式(21), 否则用式(20)。

7.4.3 放热反应焓($EX_{\text{react}, \text{exo}}$)

放热反应焓等于 5.4.1.4 定义的放热反应热, 见式(22):

$$EX_{\text{react}, \text{exo}} = E_{\text{react}, \text{exo}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

7.4.4 流体入口显热焓($EX_{s, \text{fluid}}$)

7.4.4.1 一般要求

每吨产品的流体显热焓计算见式(23):

$$EX_{s, \text{fluid}} = \sum EX_{s, \text{fluid } i} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$EX_{s, \text{fluid } i}$ ——生产每吨产品各可用流体显热焓。例如以下各流体的显热焓:

- 燃料(见 7.4.4.2);
- 助燃空气(见 7.4.4.2);
- 渗透空气(见 7.4.4.2);
- 雾化剂(见 7.4.4.3)。

7.4.4.2 燃料和空气显热焓

将燃料或者空气显热换算为焓, 见式(24)和式(25):

$$EX_{s, \text{fluid}} = \Delta H - T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\Delta S = m_{\text{fl}} c_{\text{pm,fl}} \ln \frac{T_{\text{fl}}}{T_0} \quad \dots\dots\dots (25)$$

7.4.4.3 蒸汽焓(雾化剂)

蒸汽(雾化剂)显热换算为焓,见式(24)和式(26):

$$\Delta S = m_{\text{vl}} \left(c_{\text{pm,w}} \ln \frac{373.15}{T_0} + \frac{L}{373.15} + c_{\text{pm,v}} \ln \frac{T_{\text{vl}}}{373.15} \right) \quad \dots\dots\dots (26)$$

7.4.5 干燥和蒸发所需能量焓($EX_{\text{pr,ev}}$)

这种分类是热处理过程中干燥和蒸发所需能量焓。

计算产品给定焓下的焓见式(27):

$$EX_{\text{pr,ev}} = E_{\text{pr,ev}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{fc}}} \right) \quad \dots\dots\dots (27)$$

7.4.6 加热材料吸热反应所需焓($EX_{\text{pr,re}}$)

这种分类是热处理过程中加热材料化学反应所需能量焓。

计算产品给定焓下的焓见式(28):

$$EX_{\text{pr,re}} = E_{\text{pr,re}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{fc}}} \right) \quad \dots\dots\dots (28)$$

7.4.7 产品给定焓焓($EX_{\text{pr,en}}$)

这种分类是产品热交换过程的焓。

计算产品给定焓下的焓见式(29):

$$EX_{\text{pr,en}} = E_{\text{pr,en}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{fc}}} \right) \quad \dots\dots\dots (29)$$

7.4.8 废气焓($EX_{\text{ex,oc}}$ 、 $EX_{\text{ex,or}}$ 、 $EX_{\text{ex,ir}}$)

将废气显热换算为焓,见式(30)~式(33):

$$EX_{\text{ex,oc}} = E_{\text{ex,oc}} - T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$EX_{\text{ex,or}} = E_{\text{ex,or}} - T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$EX_{\text{ex,ir}} = E_{\text{ex,ir}} - T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$\Delta S = m_{\text{ex}} c_{\text{pm,ex}} \ln \frac{T_{\text{ex}}}{T_0} \quad \dots\dots\dots (33)$$

7.4.9 回收焓($EX_{\text{h,re}}$)

将预热项目(如产品、流体)显热换算为焓,见式(34)和式(35):

$$EX_{\text{h,re}} = E_{\text{h,re}} - T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$\Delta S = m_{\text{ph}} c_{\text{pm,ph}} \ln \frac{T_{\text{ph}}}{T_0} \quad \dots\dots\dots (35)$$

燃料和空气显热的回收焓见 7.4.4.2。

7.4.10 加热夹具和其他材料所需焓($EX_{\text{i,j}}$)

夹具和其他材料在给定焓下的焓计算见式(36):

$$EX_{l,j} = E_{l,j} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}} \right) \dots\dots\dots (36)$$

7.4.11 炉体结构热损失焓($EX_{l,fs}$)

炉体结构热损失焓计算见式(37):

$$EX_{l,fs} = E_{l,fs} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}} \right) \dots\dots\dots (37)$$

7.4.12 炉体结构蓄热所需能量焓($EX_{l,hs}$)

炉体结构蓄热所需能量焓计算见式(38):

$$EX_{l,hs} = E_{l,hs} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}} \right) \dots\dots\dots (38)$$

7.4.13 气氛气体在给定焓下的焓($EX_{l,atm}$)

炉体结构蓄热所需能量焓计算见式(39):

$$EX_{l,atm} = E_{l,atm} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}} \right) \dots\dots\dots (39)$$

7.4.14 电热损失焓($EX_{l,eh}$)

电热损失焓等于 5.4.8 中定义的电加热电损失能,见式(40):

$$EX_{l,eh} = E_{l,eh} \dots\dots\dots (40)$$

7.4.15 辅助设备消耗焓(EX_{aux})

辅助设备消耗焓等于 5.4.9 中定义的辅助设备能量消耗值,见式(41):

$$EX_{aux} = E_{aux} \dots\dots\dots (41)$$

7.4.16 公用发电消耗焓($EX_{u,gen}$)

公用发电消耗焓等于 5.4.10 中定义的公用发电所消耗的能量值,见式(42):

$$EX_{u,gen} = E_{u,gen} \dots\dots\dots (42)$$

当用燃料提供公用发电消耗能量时,用 7.4.2 所示公式规定的每吨产品燃料消耗(V_f)等于每吨产品公用发电消耗。

7.4.17 回收利用能量焓(EX_{rcy})

这种分类是在 TPE 中热损失回收利用和在 TPE 外使用的回收利用能量焓。从再生能源转换(E_{rcy})取决于循环能源转化能量的方式。

当再生能源的形式是蒸汽时,回收利用能量焓的计算见式(43)和式(44):

$$EX_{rcy} = E_{rcy} - T_0 \Delta S \dots\dots\dots (43)$$

$$\Delta S = m_{v2} \left(c_{pm,w} \ln \frac{373.15}{T_0} + \frac{L}{373.15} + c_{pm,v} \ln \frac{T_{v2}}{373.15} \right) \dots\dots\dots (44)$$

7.5 效率

7.5.1 通用公式

焓效率计算的通用公式见式(45):

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{EX_{\text{sp-out}}}{EX_{\text{sp-in}}} \dots\dots\dots (45)$$

7.5.2 典型效率示例

7.5.2.1 一般要求

典型效率的示例使用表 3 中定义的符号。

7.5.2.2 与 ISO 13579-1:2013 一致的总焓效率

使用燃料吉布斯自由能计算与 ISO 13579-1:2013 一致的总焓效率,见式(46):

$$\eta_{\text{ex1}} = \frac{EX_{\text{pr,ev}} + EX_{\text{pr,re}} + EX_{\text{pr,en}}}{EX_{\text{h,el}} + EX_{\text{h,fuel}} + EX_{\text{react,exo}} + EX_{\text{s,fluid}} - EX_{\text{rcy}}} \dots\dots\dots (46)$$

7.5.2.3 全热值基础上的热焓效率

使用燃料吉布斯自由能计算全热值基础上的热焓效率,见式(47):

$$\eta_{\text{ex2}} = \frac{EX_{\text{pr,ev}} + EX_{\text{pr,re}} + EX_{\text{pr,en}}}{EX_{\text{h,el}} + EX_{\text{h,fuel}} + EX_{\text{react,exo}} + EX_{\text{s,fluid}} + EX_{\text{h,re}}} \dots\dots\dots (47)$$

7.5.2.4 可用热焓占输入焓的比例

可用热焓计算见式(48):

$$EX_{\text{available}} = (EX_{\text{pr,ev}} + EX_{\text{pr,re}} + EX_{\text{pr,en}}) + (EX_{\text{l,j}} + EX_{\text{l,fs}} + EX_{\text{l,hs}} + EX_{\text{l,atm}} + EX_{\text{l,other}}) \dots\dots (48)$$

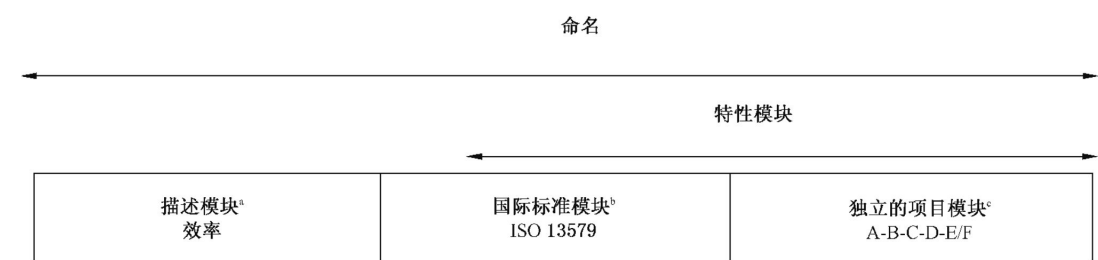
可用热焓占输入焓的比例计算见式(49):

$$\eta_{\text{ex}}^* = \frac{EX_{\text{available}}}{EX_{\text{h,fuel}}} \dots\dots\dots (49)$$

8 命名

8.1 一般要求

描述模块和国际标准模块的代码见图 2。



^a “效率”被指定为描述模块。
^b “ISO 13579”被指定为国际标准号模块。
^c 各独立的项目模块见 8.2。

图 2 命名系统的结构

8.2 各独立的项目模块

依据 ISO 13579,TPE 效率独立项目模块具有如下形式:A-B-C-D-E/F。

在项目模块中,各要素的定义如下:

- A——8.3 详述的操作类型符号;
- B——8.4 详述的能量来源符号;
- C——5.2 详述的 TPE 能量效率评估边界条件符号;
- D——能量类型符号(EN:焓,EX:焔);
- E——比能输出符号;
- F——比能输入符号。

当一个特定的符号不一定赋值时,使用(*)符号替代。

8.3 操作类型

下列符号适用于各种操作类型。

- COD:直接加热连续式炉;
- BAD:直接加热间歇式炉;
- D:直接加热炉;
- COI:间接加热连续式炉;
- BAI:间接加热间歇式炉;
- I:间接加热炉。

注 1: 间歇式炉需要炉壁蓄热能。

注 2: 如果适用,间接加热炉需要考虑环境气体能量损失。

8.4 能量来源

下列代码适用于各种能量来源。

- E:仅电能;
- F:仅燃烧;
- M:电能和燃烧;
- EC:仅燃料当量能量转换电能;
- MC:电能和燃料当量能量转换燃烧。

8.5 示例

依据 ISO 13579,TPE 效率的名称示例见表 4。

表 4 TPE 效率名称示例

描述	名称	章条号
与 ISO 13579 一致的总效率	效率 ISO 13579 D-MC-EB1-EN—— $E_{pr}/(E_h - E_{rcy})$	6.2.2
总热值基础上的热效率	效率 ISO 13579 D-M-EB2B-EN—— $E_{pr}/(E_h + E_{h,rc})$	6.2.3
供热值基础上的热效率	效率 ISO 13579 D-M-EB2S-EN—— E_{pr}/E_h	6.2.4
可用热率	效率 ISO 13579 COD-F-EB2B-EN—— $E_{available}/E_{h,fuel}$	6.2.5
燃烧效率	效率 ISO 13579* -F-EB2B-EN—— $(E_{h,fuel} - E_{l,uc})/E_{h,fuel}$	6.2.6
燃烧炉有效废热回收率	效率 ISO 13579 COD-F-EB2-EN—— $E_{h,rc}/E_{ex,oc}$	6.2.7
作为热回收设备指标的废热回收率	效率 ISO 13579* -*-EB4A-EN—— $E_{h,rc}/E_{ex,ir}$	6.2.8

9 测量

如果必要,使用 ISO 13579-1:2013 第 8 章指定的测量方法。

10 评估报告

使用 ISO 13579-1:2013 第 10 章指定的 TPE 效率评估报告。

如果必要,应加入本文件中指定的名称。

附录 A
(资料性)
能量效率评估示例

A.1 概述

本附录提供了一个能量平衡表及其转换的例子,以展示两种 TPE 的有效能指数。

A.2 钢用连续加热炉示例

A.2.1 TPE 概述

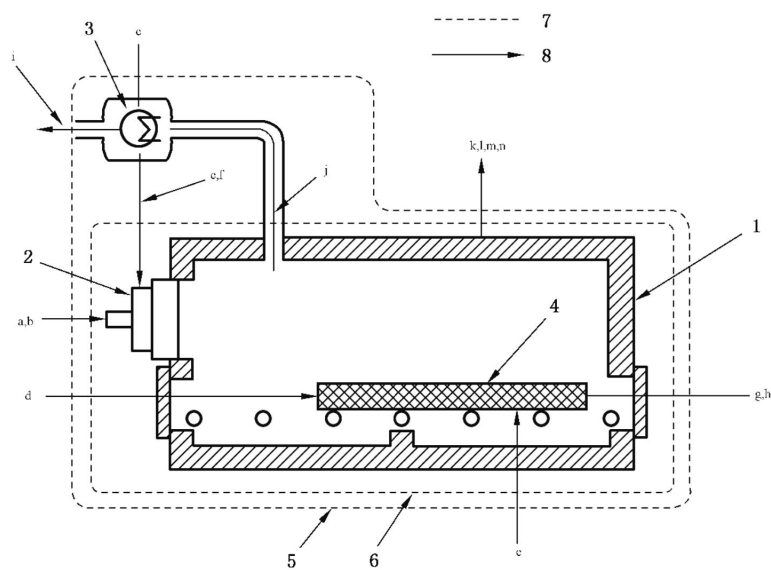
能量评估示例的 TPE 简要概述见表 A.1。

表 A.1 TPE 简要概述

类型	钢用连续加热炉
标称容量	300 t/h
燃烧器类型	具有一般热回收设备的燃烧器
产品材料	碳钢板坯

A.2.2 边界条件

效率评估的边界条件见图 A.1。



- 标引序号说明：
- 1——加热室；
- 2——燃烧器；
- 3——热交换器；
- 4——产品；
- 5——边界条件 EB2a(见表 1)；
- 6——边界条件 EB3a(见表 1)。
- a 燃料热值, $E_{h, \text{fuel}}$ 。
- b 燃料显热, $E_{s, \text{fuel}}$ 。
- c 燃烧空气显热, $E_{s, \text{air}}$ 。
- d 入口处产品焓, E_{p1} 。
- e 放热反应热, $E_{\text{react}, \text{exo}}$ 。
- f 废气回收热, $E_{h, \text{recx}}$ 。
- g 从边界提取时产品焓, E_{p2} 。
- h 氧化物质显热, $E_{l, j}$ 。
- i 废气显热(热回收出口), $E_{\text{ex}, \text{or}}$ 。
- j 废气显热(燃烧室出口), $E_{\text{ex}, \text{oc}}$ 。
- k 炉壁损失, $E_{l, \text{fs}(1)}$ 。
- l 炉门辐射热损失, $E_{l, \text{fs}(2)}$ 。
- m 冷却水损失, $E_{l, \text{fs}(3)}$ 。
- n 其他能量损失, $E_{l, \text{other}}$ 。

图 A.1 钢用连续加热炉效率评估边界条件

A.2.3 测量数据

测量数据见表 A.2。

表 A.2 测量数据

生产速度	300 t/h	
产品装料温度	20 ℃	
产品出料温度	1 250 ℃	
环境温度	20 ℃	
大气压力	101.2 kPa	
相对湿度	60 %	
燃料	类型	COG(焦炉煤气)
	CO ₂	2.38 %
	C ₂ H ₂	2.42 %

表 A.2 测量数据 (续)

燃料	O ₂	0.1%	
	CO	7.06%	
	H ₂	57.39%	
	CH ₄	24.55%	
	N ₂	6.1%	
	热值	17.23 MJ/m ³	
	流率	22 809 m ³ /h	
	供气温度	20 ℃	
雾化剂		无	
燃烧空气	体积	空气比, $m=1.15$, 通过计算得到	
	温度	热回收设备入口温度为 20 ℃	
	温度	燃烧器入口温度为 750 ℃	
富氧		无	
渗透空气		无	
气氛气体		无	
废气	温度	900 ℃	燃烧室出口
	空气比	1.15	
炉子外壁	位置	温度	面积
	侧面	110 ℃	612 m ²
	顶部	120 ℃	820 m ²
	底部	120 ℃	612 m ²
	前/后	110 ℃	186 m ²
水冷	间接	供水温度	35 ℃
		出水温度	49 ℃
		体积流量	300 t/h
		供水压力	0.5 MPa
	直接	供水温度	35 ℃
		出水温度	49 ℃
		体积流量	70 t/h
		供水压力	0.5 MPa
	供水管	500 DN(直径 0.5 m)	
注 1: 本表中提供的数据基于 ISO 13579-2:2013。			
注 2: 如有必要, 可考虑烟气。			

A.2.4 能量平衡表的变化及各种效率

表 A.3 显示了使用表 A.2 提供的数据变换能量平衡表以得到各种效率的示例。

表 A.3 热能平衡表转换及各种效率示例

单位为兆焦每吨

能量类型、符号		边界条件				
		1	2	3	4	5
		EB2a ^a	EB3a ^b	EB2a ^c	EB3a ^d	EB3a ^e
热能输入	燃料热值 $E_{h, fuel}$	1 310	1 310	1 310	1 310	1 310
	燃料显热 $E_{s, fuel}$	2	2	2	2	2
	燃烧空气显热 $E_{s, air}$	9	9	9	9	9
	入口处产品焓 E_{p1}	15	15			
	放热反应热 $E_{react, exo}$	28	28	28	28	
	渗透空气显热 $E_{s, infiltr}$	0	0	0	0	0
	废气回收热 $E_{h, reex}$		210		210	210
	总和	1 364	1 574	1 349	1 559	1 531
热能输出	从边界提取时产品焓 E_{p2}	850	850			
	产品焓变 $E_{pr, en} = (E_{p2} - E_{p1})$			835	835	
	$E_{pr, en} - E_{react, exo}$					807
	氧化物显热 $E_{l, j}$	7	7	7	7	7
	废气显热(热回收出口处) $E_{ex, or}$	177		177		
	废气显热(燃烧室出口处) $E_{ex, oc}$		562		562	562
	炉壁损失 $E_{l, fs(1)}$	42	42	42	42	42
	炉门辐射热损失 $E_{l, fs(2)}$	8	8	8	8	8
	冷却水损失 $E_{l, fs(3)}$	102	102	102	102	102
	其他能量损失 $E_{l, other}$	3	3	3	3	3
	总和	1 364	1 574	1 349	1 559	1 531
效率	供热值基础上的热效率, η_3^f			0.619		
	在全热值基础上的热效率, η_2^g				0.536	
	$(E_{pr, en} - E_{react, exo}) / (E_{h, fuel} + E_{s, fluid} + E_{h, re} + E_{h, el})$					0.554
注 1: 来源: ISO 13579-2:2013 的附录 B。 注 2: 如果排出的冷却水/蒸汽的热含量被用在工业炉系统之外, 则考虑应用 ISO 13579-1(参考文献[3])。						
^a 边界条件 EB2a 包含加热室和热回收设备, 本文件并未显示回收热。入口处产品焓值(E_{p1})和出口处产品焓值(E_{p2})被分别列入能量输入和能量输出。 ^b 边界条件 EB3a 仅包含加热室, 明确规定了回收热。入口处产品焓值(E_{p1})和出口处产品焓值(E_{p2})被分别列入能量输入和能量输出。 ^c 边界条件 EB2a 包含加热室和热回收设备。 ^d 边界条件 EB3a 仅包含加热室。 ^e 边界条件 EB3a 仅包含加热室, 在能量输入和输出中均减去放热反应热值。 ^f 见 6.2.4, $E_{pr, ev} = 0, E_{pr, re} = 0$。 ^g 见 6.2.3, $E_{pr, ev} = 0, E_{pr, re} = 0$。						

A.2.5 可用热能量平衡表

通过表 A.3 中边界条件 4 的能量平衡转换,创建表 A.4,以评价可用热。

表 A.4 可用热能量平衡

单位为兆焦每吨

能量类型、符号		
热能输入	燃料热值 $E_{h, fuel}$	1 310
	废气回收热 $E_{h, re}$	210
	总和	1 520
热能输出	可用热 $E_{available}$	958
	废气显热(燃烧室出口处) $E_{ex, oc}$	562
	总和	1 520
效率	燃烧室内余热回收率 η_R^a	0.374
	燃烧废气余热与燃料热值的比值 η_{exh}^b	0.429
	不考虑余热回收时的转换可用热率 η_0^c	0.571
	可用热率 η^d	0.731
注 1: 燃料热值($E_{h, fuel}$)可以通过计算可用热($E_{available}$)和可用热率(η^*)进行估算。		
注 2: η^* 、 η_R 和 η_0^* 的关系见式(C.3)。		
^a 见 6.2.7。		
^b 见 6.2.9。		
^c 见 6.2.10。		
^d 见 6.2.5。		

A.3 水泥回转窑示例

A.3.1 TPE 概述

表 A.5 简要概述了本示例 TPE 的效率评估。

表 A.5 TPE 概述

类型	悬浮预热器窑	
回转窑	内径	5,2 m
	长度	84 m
	有效容积	1 784 m ³
预热器	阶段数	4

A.3.2 边界条件

图 A.2 显示了效率评估的边界。

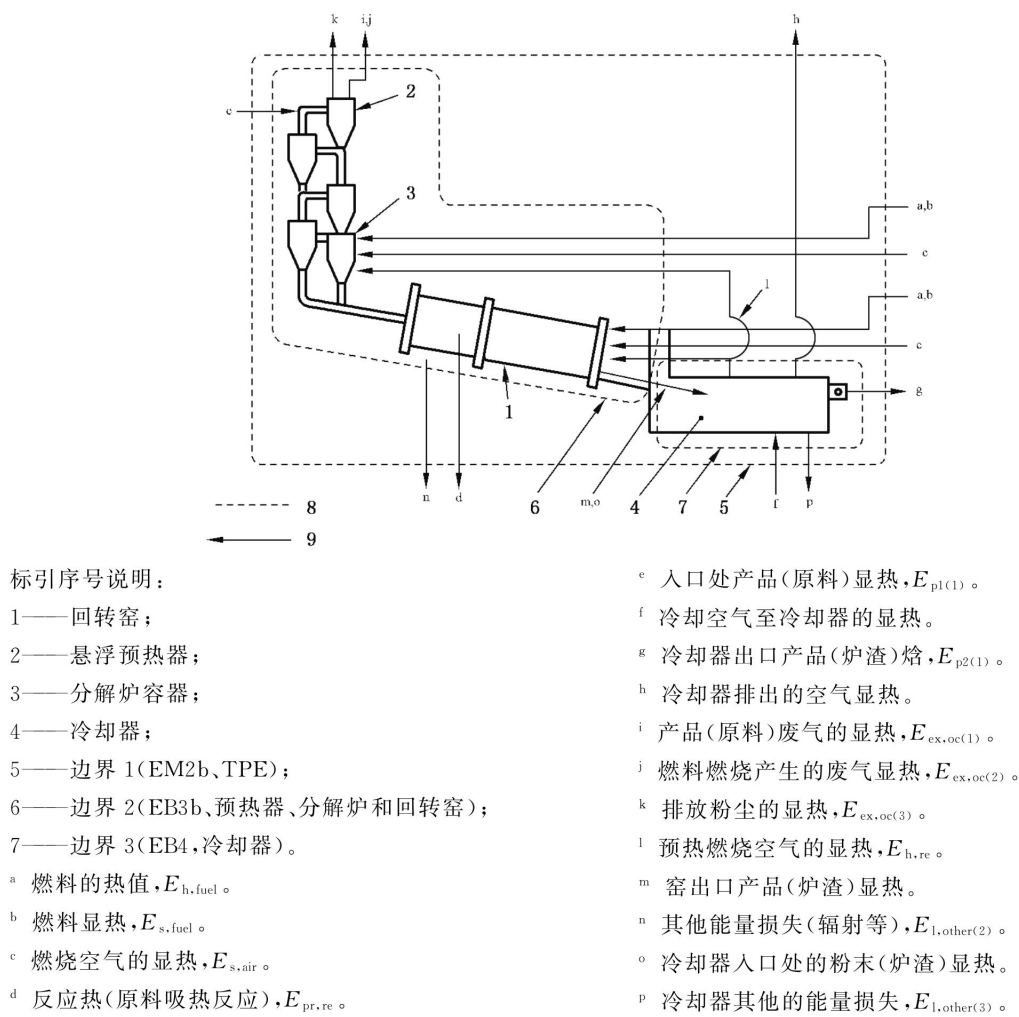


图 A.2 水泥回转窑效率评估边界

A.3.3 测量数据

表 A.6 列出了测量数据。

表 A.6 测量数据

项目		测量数据	单位
炉渣	生产率	202.6	t/h
	SiO ₂	22.4	%
	Al ₂ O ₃	5.5	%
	Fe ₂ O ₃	3.3	%
	CaO	66.0	%
	MgO	1.2	%
	石灰饱和比(LSD)	0.92	
	冷却器进口温度	1 350	℃
	冷却器出口温度	110	℃

表 A.6 测量数据 (续)

项目		测量数据	单位	
干燥原料产生的废气	水蒸气比率	24 ^a	m ³ /t ^b	
	酸性气体比率	271 ^a	m ³ /t ^b	
原料	输入比率	1 558 ^a	kg/t ^b	
	含水量	0.0	%	
	温度	70	℃	
燃料	类型:重油			
	总热值	43 535	kJ/kg	
	净热值	40 814	kJ/kg	
	温度	110	℃	
	消耗量(回转窑)	32.6	kg/t ^b	
	消耗量(分解炉)	48.7	kg/t ^b	
燃烧空气(未预热)	回转窑	体积	35.2	m ³ /t ^b
		温度	20	℃
	分解炉	体积	52.6	m ³ /t ^b
		温度	20	℃
燃烧空气(预热)	回转窑	体积	321 ^a	m ³ /t ^b
		温度	891 ^a	℃
	分解炉	体积	501	m ³ /t ^b
		温度	700	℃
回转窑废气	体积		452	m ³ /t ^b
	温度		1 150	℃
	CO ₂		23.2	%
	O ₂		2.0	%
	CO		0.0	%
	N ₂		74.8	%
	空气比率		1.11 ^a	
预热器出口废气	体积		1 486	m ³ /t ^b
	温度		391	℃
	CO ₂		30.4	%
	O ₂		4.0	%
	CO		0.0	%
	N ₂		65.0	%
	空气比率		1.30 ^a	

表 A.6 测量数据 (续)

项目		测量数据	单位
冷却空气	体积	2 387	$\text{m}^3/\text{t}^{\text{b}}$
	温度	30	$^{\circ}\text{C}$
冷却器排出的空气	体积	1 565	$\text{m}^3/\text{t}^{\text{b}}$
	温度	230	$^{\circ}\text{C}$
预热器/窑出口排出的灰尘	质量	0.13	$\text{t}/\text{t}^{\text{b}}$
	温度	391	$^{\circ}\text{C}$
^a 计算值。 ^b 每吨熟料产量。			

A.3.4 能量平衡表和各种效率的变化

表 A.7 显示了利用表 A.6 中提供的数据转换能量平衡表和各种效率的示例。

表 A.7 热能平衡表示例

能量类型、符号		边界条件		
		1 ^a	2 ^b	3 ^c
热能输入	燃料热值 $E_{\text{h},\text{fuel}}$	3 318	3 318	
	燃料显热 $E_{\text{s},\text{fuel}}$	14	14	
	燃烧空气的显热 $E_{\text{s},\text{air}}$	0	0	
	原料燃烧热 $E_{\text{react},\text{exo}}$	0	0	
	预热器入口产品(原料)显热 $E_{\text{p1}(1)}$	65	65	
	未预热燃烧空气的显热 $E_{\text{s},\text{air}}$	0		
	冷却器入口产品(熟料)显热 $E_{\text{p1}(2)}$			1 437
	冷却器入口处的空气显热	16		16
	从冷却器回收热量 $E_{\text{h},\text{re}}$		857	
	总计	3 413	4 254	1 453
热能输出	炉渣吸热反应(反应、蒸发)所需能量 $E_{\text{pr},\text{re}}$	1 809	1 809	
	冷却器出口产品(熟料)显热 $E_{\text{p2}(1)}$	71		71
	回转窑出口产品(炉渣)显热 $E_{\text{p2}(2)}$		1 437	
	从冷却器排出的空气显热	431		431
	产品(原料)产生的废气显热 $E_{\text{ex},\text{oc}(1)}$	208	208	
	燃料燃烧产生的气体显热 $E_{\text{ex},\text{oc}(2)}$	631	631	
	排放气体的显热	44	44	
	从冷却器回收热量 $E_{\text{h},\text{re}}$			857
	其他能量损失(TPE) $E_{\text{l},\text{other}(1)}$	219		

表 A.7 热能平衡表示例 (续)

能量类型、符号		边界条件		
		1 ^a	2 ^b	3 ^c
热能输出	其他能量损失(预热器、分解炉和回转窑) $E_{1,other(2)}$		125	
	其他能量损失(冷却器) $E_{1,other(3)}$			94
	总计	3 413	4 254	1 453
效率	提供热值基础上的热效率 η_3^d	0.530		
	全热值基础上的热效率 η_2^e		0.425	
	余热回收率: $E_{h, re}/E_{pl(2)}^f$			0.596
注: 来源: JIS Z 9202-1991 附录 5。				
^a 边界 1: EB2b 边界(见图 A.2)。 ^b 边界 2: EB3b 边界(见图 A.2)。 ^c 边界 3: EB4 边界(见图 A.2)。 ^d $E_{pr} = E_{pr, re}$。 ^e $E_{pr} = E_{pr, re}$。 ^f 余热回收率:$E_{h, re}/E_{pl(2)}$。				

附录 B

(资料性)

连续加热炉的焓效率和烟效率对比

B.1 计算汇总

本附录利用表 B.1 中给出的连续加热炉的数据,考虑三种形式的热回收[见图 B.1a)、b)、c)],对焓效率和烟效率进行对比。

表 B.1 按热回收形式分列的钢用加热炉能量平衡表

炉型概述 容量:130 t/h(本表测量的常用操作基础数据,最大 200 t/h) 类型:步进梁(双线加料) 炉体温度:最高 1 250 °C 钢板温度:20 °C(加料)。					
案例 a 不进行热回收[见图 B.1a)]					
能量输入项	×10 ³ kJ/t	备注	能量输出项	×10 ³ kJ/t	备注
燃料热值	1 884.96		产品显热	834.27	
燃料显热	3.77		废气显热	923.43	约 950 °C
雾化剂显热	33.91		氧化皮显热	15.07	
燃烧空气显热	18.42	20 °C	冷却水损失	112.18	
产品显热	13.40	20 °C	炉壁损失	126.42	
反应热(氧化皮)	56.93		其他损失	0.00	
合计	2 011.37		合计	2 011.37	
案例 b 带换热器的热回收[见图 B.1b)]					
能量输入项	×10 ³ kJ/t	备注	能量输出项	×10 ³ kJ/t	备注
燃料热值	1 509.47		产品显热	834.27	
燃料显热	2.93		废气显热	724.60	约 900 °C
雾化剂显热	27.21		氧化皮显热	15.07	
燃烧空气显热	202.60	约 400 °C	冷却水损失	112.18	
产品显热	13.40		炉壁损失	126.42	
反应热(氧化皮)	56.93		其他损失	0.00	
合计	1 812.54		合计	1 812.54	
案例 c 蓄热式燃烧器系统[见图 B.1c)]					
能量输入项	×10 ³ kJ/t	备注	能量输出项	×10 ³ kJ/t	备注
燃料热值	1 147.80		产品显热	834.27	
燃料显热	2.09		废气显热	619.95	
雾化剂显热	20.93		氧化皮显热	15.07	

表 B.1 按热回收形式分列的钢用加热炉能量平衡表（续）

燃烧空气显热	466.74		冷却水损失	112.18	
产品显热	13.40		炉壁损失	126.42	
反应热(氧化皮)	56.93		其他损失	0.00	
合计	1 707.89		合计	1 707.89	
注：蓄热式燃烧器系统： ——预热温度：1 050 ℃； ——入口废气温度：1 200 ℃； ——出口废气温度：300 ℃； ——炉头温度(泄漏)：900 ℃； ——废气泄漏比率：20％。					

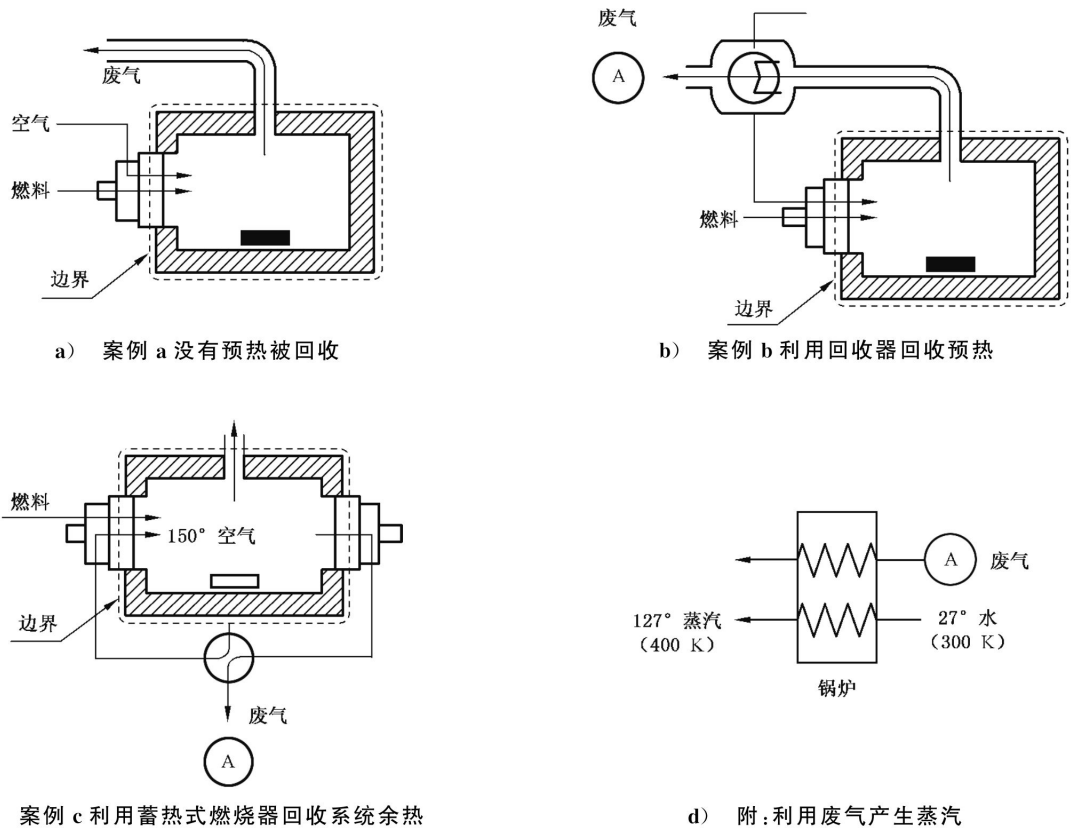


图 B.1 热回收形式

此外，每一种形式的热回收都考虑使用蒸汽产生废气[见图 B.1d)]。

以下效率符号根据表 B.2 中的等级组合进行应用。

表 B.2 每种类型效率的使用符号

效率符号	描述	等级 1	等级 2
η	额定焓效率	I	a
η_{ex}	额定焓效率		
η^*	基于焓的可用热比率	I	b
η_{ex}^*	基于焓的可用热比率		
η'	额定焓效率	II	a
η'_{ex}	额定焓效率		
η'^*	基于焓的可用热比率	II	b
η'_{ex}^*	基于焓的可用热比率		
注 1: 对于等级 1,以下适用: I 不通过产生蒸汽进行热回收的情况; II 通过产生蒸汽进行额外热回收的情况。 注 2: 对于等级 2,以下类型的能量作为比能输出($E_{\text{sp-out}}$)适用: a 产品发生焓变($E_{\text{pr,en}}$); b 根据 6.2.5 规定的可用热($E_{\text{available}}$)。			

B.2 计算结果

表 B.3 和表 B.4 给出了基于表 B.5 数据的计算结果。表中使用的符号尽可能多地引用本文件正文中给出的符号。

如表 B.4 所示,在不进行热回收的情况下[案例 a],效率值为 $\eta=41.86\%$ 以及 $\eta_{\text{ex}}=37.47\%$,表明与其他形式的热回收相比,效率值最低。此外,焓效率(η)和焓效率(η_{ex})的绝对值也相对接近。同样的模式也可以在可用热比率(η^* 和 η_{ex}^*)中观察到。

然而,在有蒸汽产生的效率情况下,焓效率(η')和焓效率(η'_{ex})之间存在显著差异。即:由于蒸汽的介入, η' 的效率提升了 30%或更高,而 η'_{ex} 的效率只提升了 6%。同样的结果也可以应用到 η'_{ex} 和 η_{ex}^* 的关系中。因此,虽然基于焓值的效率有显著的提高,但基于焓的效率评价效果并不大。

其次,在三种案例的热回收中, η' 值几乎是相同的[案例 a: $\eta'=75.88\%$,案例 b: $\eta'=75.64\%$,案例 c: $\eta'=74.99\%$]。另一方面,在案例 b 以及案例 c 中 η'_{ex} 的效率是逐步增加的[案例 a: $\eta'_{\text{ex}}=44.12\%$,案例 b: $\eta'_{\text{ex}}=51.08\%$,案例 c: $\eta'_{\text{ex}}=61.82\%$]。即:通过预热燃烧空气进行热回收对提升焓效率是非常有效的。

从表 B.1 可以得出,随着热回收形式从案例 a 到案例 b,再从案例 b 到案例 c 的转变,燃料能源消耗显著降低。因此可以得出结论,基于焓的评价可以更准确地反映出节能措施实施效果,因为焓效率无法完全显示在有蒸汽介入的废热回收时燃料能源的消耗情况,而焓效率值可以在无论是否使用蒸汽热回收的情况下,都能准确反映出燃料能源的消耗变化。

表 B.3 计算结果(1/2)

单位为千焦每吨

输入		a)不进行废热回收		b)使用回收器的热回收		c)蓄热式燃烧器系统	
		焓	烟	焓	烟	焓	烟
燃料发热值	$E_{h, fuel}$	1 884.06	1 733.33	1 508.75	1 388.05	1 147.25	1 055.47
燃料显热	$E_{s, fuel}$	3.77	0.12	2.93	0.10	2.09	0.07
雾化热显热	$E_{s, fluid}$	33.89	5.97	27.20	4.79	20.92	3.69
燃烧空气显热	$E_{s, air}$	18.41	0.60	202.51	72.64	466.52	266.41
产品显热	E_{pl}	13.39	0.64	13.39	0.64	13.39	0.64
反应显热(渣料)	$E_{react, exo}$	56.90	56.90	56.90	56.90	56.90	56.90
合计		2 010.41	1 797.56	1 811.67	1 523.12	1 707.07	1 383.18
输出		焓	烟	焓	烟	焓	烟
产品显热	E_{p2}	833.87	673.38	833.87	673.38	833.87	673.38
废气显热	$E_{ex, oc}$	922.99	742.99	724.25	583.00	619.65	498.80
渣料显热	$E_{l, j}$	15.06	12.12	15.06	12.12	15.06	12.12
冷却水损失	$E_{l, fs(1)}$	112.13	90.26	112.13	90.26	112.13	90.26
炉壁损失	$E_{l, fs(2)}$	126.36	101.71	126.36	101.71	126.36	101.71
其他损失	$E_{l, other}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合计		2 010.41	1 620.47	1 811.67	1 460.49	1 707.07	1 376.29
注：计算基于表 B.5 的数据。							

表 B.4 计算结果(2/2)

项目	符号		a)不进行废热回收		b)使用回收器的热回收		c)蓄热式燃烧器系统	
	焓	烟	焓	烟	焓	烟	焓	烟
输入/(kJ/t)	E_{sp-in}	EX_{sp-in}	1 992.00	1 796.96	1 609.17	1 450.48	1 240.56	1 116.77
无蒸汽循环的输出/(kJ/t)	E_{sp-out}	EX_{sp-out}	833.87	673.38	833.87	673.38	833.87	673.38
无可用蒸汽循环的输出/(kJ/t)	$E_{available}$	$EX_{available}$	1 087.42	878.13	1 087.42	878.13	1 087.42	878.13
蒸汽循环输出/(kJ/t)	E'_{sp-out}	EX'_{sp-out}	1 511.58	792.78	1 217.19	740.91	930.31	690.37
有可用蒸汽循环的输出/(kJ/t)	$E'_{available}$	$EX'_{available}$	1 765.13	997.53	1 470.74	945.66	1 183.86	895.12
额定效率/%	η	η_{ex}	41.86	37.47	51.82	46.42	67.22	60.30
可用热比率/%	η^*	η_{ex}^*	54.59	48.87	67.58	60.54	87.66	78.63
额定效率包括生成蒸汽/%	η'	η'_{ex}	75.88	44.12	75.64	51.08	74.99	61.82
可用热比率包括生成蒸汽/%	$\eta^{* '}$	$\eta_{ex}^{* '}$	88.61	55.51	91.40	65.20	95.43	80.15
注：计算基于表 B.5 的数据。								

表 B.5 材料初始条件和属性值总结

项目	符号	a) 不进行废热回收	b) 使用回收器的热回收	c) 蓄热式燃烧器系统
产品温度(提取)	$T_{\text{prod, ex}}/\text{K}$	1 503.15	1 503.15	1 503.15
产品温度(装料)	$T_{\text{prod, lo}}/\text{K}$	322.90	322.90	322.90
环境温度	T_{o}/K	239.15	239.15	239.15
产品的比热容	$c_{\text{p, prod}}/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	0.45	0.45	0.45
炉子温度	$T_{\text{furnace}}/\text{K}$	1 523.15	1 523.15	1 523.15
燃料温度(初始)	T_{fuel}/K	313.15	313.15	313.15
燃料的比热容(甲烷 2.2)	$c_{\text{p, fuel}}/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	2.20	2.20	2.20
燃料质量(每千克产品)	$m_{\text{fuel}}/\text{kg}$	0.09	0.07	0.05
燃烧空气温度	T_{air}/K	313.15	673.15	1 323.15
空气的比热容	$c_{\text{p, air}}/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	1.30	1.30	1.30
空气质量(每千克产品)	m_{air}/kg	0.71	0.41	0.35
蒸汽循环效率	$\eta_{\text{rcy, steam}}$	0.75	0.75	0.75
蒸汽温度	T_{vap}/K	400.00	400.00	400.00
水的比热容, 液体	$c_{\text{p, wl}}/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	4.19	4.19	4.19
水的比热容, 400 K 蒸汽	$c_{\text{p, wv}}/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	4.26	4.26	4.26
水的潜热	$L/(\text{kJ}/\text{kg})$	334.00	334.00	334.00
水的比热容, 297 K 液体至 400 K 蒸汽	$C_{\text{water}}/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	783.34	783.34	783.34
雾化的蒸汽质量(每千克产品)	m_{vap}/kg	0.04	0.03	0.03
回收蒸汽质量(每千克产品)	m_{vap}/kg	0.87	0.49	0.12
各回收系统效率 (换热器、蓄热器等)	η_{rcy}	0.95	0.95	0.95
蒸汽回收的焓	H_{vap}	677.71	383.31	96.44
蒸汽回收的熵变	ΔS_{vap}	1.90	1.08	0.27
蒸汽回收的焓	EX_{vap}	119.39	67.53	16.99

B.3 焓效率计算详细逻辑和假设

B.3.1 能量和焓输入

B.3.1.1 燃料

燃料的焓值是用较高的热值计算的。这个值可以从反应物和生成物之间的生成能差来计算。计算是假设在以下情况下进行：

- 燃料是甲烷；
- 根据 Rant's 近似公式, 假设焓值为 $E = 0.92 H_{\text{h}}$ (高热值)。

因此应用式(B.1):

$$E_{h, \text{fuel}} \times 0.92 = EX_{h, \text{fuel}} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

注: 这个值也可以在 7.5.2.2 中的吉布斯自由能公式中获得。

焓和烟的计算公式分别见 5.4 和 7.4。

另外, 本计算不包括燃料和空气混合造成的能量损失。

能量输入时的压力(例如气氛压力)等于环境气体压力。

B.3.1.2 燃料以外的焓和烟输入

关于燃料以外的输入项($E_{\text{sp-in}}$ 和 $EX_{\text{sp-in}}$), 包含以下项目:

- 燃料显热;
- 雾化剂显热;
- 产品显热;
- 放热反应显热。

不包括燃烧空气显热, 因为通常认为燃烧空气显热是通过废气热回收来提供的。

焓和烟的计算公式分别见 5.4 和 7.3。

B.3.2 输出项目条件

B.3.2.1 一般要求

作为输出的项目如下(如 B.1 所述):

- a) 废气产生蒸汽时的回收能(和烟);
- b) 来自产品材料的热能(和烟);
- c) 热损失(和这些热损失的烟)通过炉壁和冷却水消散。

这些项目的计算方法在 B.3.2.2~B.3.2.4 中有说明。

B.3.2.2 通过产生蒸汽回收焓和烟

B.3.2.2.1 焓回收

通过产生蒸汽回收焓的计算见式(B.2):

$$H_v = \eta_{\text{rcy, steam}} E_{\text{ex, oc}} (1 - \eta_R) \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

生成蒸汽的质量计算见式(B.3):

$$m_{v2} = \frac{H_v}{c_{\text{pm, w}} (373.15 - T_0) + L + c_{\text{pm, v}} (T_{v2} - 373.15)} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$\eta_{\text{rcy, steam}} = 0.75$ 为估值;

$\eta_{\text{rcy}} = 0.95$ 为估值。

B.3.2.2.2 烟回收

蒸汽回收烟的计算见式(B.4)和式(B.5):

$$EX_v = H_v - T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\Delta S = m_{v2} \left\{ c_{\text{pm, w}} \ln \frac{373.15}{T_0} + \frac{L}{373.15} + c_{\text{pm, v}} \ln \frac{T_{v2}}{373.15} \right\} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

B.3.2.3 产品材料吸收的焓和烟

每吨产品的比能输出, 吸收焓的计算见式(B.6):

$$E_{\text{sp-out}} = E_{\text{p2}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

每吨产品额定烟输出,吸收烟的计算见式(B.7):

$$EX_{\text{sp-out}} = E_{\text{p2}} \left(1 - \frac{T}{T_{\text{fc}}}\right) \quad \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

式中:

$T_{\text{fc}} = 1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为估值。

B.3.2.4 焓和烟包括炉壁损失、冷却水损失、氧化皮损失和产品材料吸收烟/焓

B.3.2.4.1 吸收焓

吸收焓计算见式(B.8):

$$E_{\text{available}} = E_{\text{p2}} + E_1 \quad \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

B.3.2.4.2 吸收烟

吸收烟计算见式(B.9):

$$EX_{\text{available}} = E_{\text{available}} \left(1 - \frac{T}{T_{\text{fc}}}\right) \quad \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

式中:

$T_{\text{fc}} = 1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为估值。

B.3.3 额定焓效率和额定烟效率的计算

式(B.10)、式(B.11)、式(B.12)和式(B.13)描述焓效率:

$$\eta = \frac{E_{\text{sp-out}}}{E_{\text{sp-in}}} = \frac{E_{\text{p2}}}{E_{\text{h,fuel}} + E_{\text{s,fuel}} + E_{\text{s,atomize}} + E_{\text{p2}} + E_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.10})$$

$$\eta^* = \frac{E_{\text{available}}}{E_{\text{sp-in}}} = \frac{E_{\text{p2}} + E_1}{E_{\text{h,fuel}} + E_{\text{s,fuel}} + E_{\text{s,atomize}} + E_{\text{p2}} + E_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.11})$$

$$\eta' = \frac{E'_{\text{sp-out}}}{E_{\text{sp-in}}} = \frac{E_{\text{p2}} + H_{\text{v}}}{E_{\text{h,fuel}} + E_{\text{s,fuel}} + E_{\text{s,atomize}} + E_{\text{p2}} + E_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

$$\eta^{*'} = \frac{E'_{\text{available}}}{E_{\text{sp-in}}} = \frac{E_{\text{p2}} + E_1 + H_{\text{v}}}{E_{\text{h,fuel}} + E_{\text{s,fuel}} + E_{\text{s,atomize}} + E_{\text{p2}} + E_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

式(B.14)、式(B.15)、式(B.16)和式(B.17)描述烟效率:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{EX_{\text{sp-out}}}{EX_{\text{sp-in}}} = \frac{EX_{\text{p2}}}{EX_{\text{h,fuel}} + EX_{\text{s,fuel}} + EX_{\text{s,atomize}} + EX_{\text{p2}} + EX_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.14})$$

$$\eta_{\text{ex}}^* = \frac{EX_{\text{available}}}{EX_{\text{sp-in}}} = \frac{EX_{\text{available}}}{EX_{\text{h,fuel}} + EX_{\text{s,fuel}} + EX_{\text{s,atomize}} + EX_{\text{p2}} + EX_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.15})$$

$$\eta_{\text{ex}}^{*'} = \frac{EX'_{\text{sp-out}}}{EX_{\text{sp-in}}} = \frac{EX_{\text{p2}} + EX_{\text{v}}}{EX_{\text{h,fuel}} + EX_{\text{s,fuel}} + EX_{\text{s,atomize}} + EX_{\text{p2}} + EX_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.16})$$

$$\eta_{\text{ex}}^{*'} = \frac{EX'_{\text{available}}}{EX_{\text{sp-in}}} = \frac{EX_{\text{available}} + EX_{\text{v}}}{EX_{\text{h,fuel}} + EX_{\text{s,fuel}} + EX_{\text{s,atomize}} + EX_{\text{p2}} + EX_{\text{react,exo}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.17})$$

附录 C

(资料性)

燃烧炉节能效果评价程序

C.1 概述

TPE 燃烧过程中消耗的燃料热值($E_{h, \text{fuel}}$)见式(C.1):

$$E_{h, \text{fuel}} = E_{\text{available}} / \eta^* \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

注: 可用热和可用热比率的定义见 6.2.5。

考虑到来自电源的能量输入($E_{h, \text{el}}$)不产生废气损失[即: η^* (可用热比率)=1], 其计算见式(C.2):

$$E_{h, \text{el}} = E_{\text{available}} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

因此, 在评价 TPE 的燃烧节能效果时, 需要分析两个因素(可用热和可用热比率)。而在评价电加热设备时, 只需分析可用热就可以了。

C.2 确定边界并编制能量平衡表

为了评价加热室的节能效果, 有必要对加热室的能量平衡表进行评价。

制作一个边界为 EB3a 的能量平衡表, 然后计算:

- 燃烧炉有效废热回收率 η_R , 定义见 6.2.7;
- 燃烧废气废热与燃料热值的比值 η_{exh} , 定义见 6.2.9;
- 不考虑废热回收的换算有效热比率 η_0^* , 定义见 6.2.10;
- 可用热比率 η^* , 定义见 6.2.5。

C.3 节能效果估算

C.3.1 通用公式

效率各指标之间的关系如式(C.3)所示:

$$\eta^* = \eta_0^* + (1 - \eta_0^*) \cdot \eta_R \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

节能率估算见式(C.4):

$$\alpha_{\text{es}} = (1 - E_{h, \text{fuel II}} / E_{h, \text{fuel I}}) \times 100 = \left(1 - \frac{E_{\text{available II}}}{E_{\text{available I}}} \times \frac{\eta_{\text{I}}^*}{\eta_{\text{II}}^*}\right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

当可用热一定时, 节能率见式(C.5):

$$\alpha_{\text{es}} = (1 - \eta_{\text{I}}^* / \eta_{\text{II}}^*) \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

C.3.2 可用热比率估算

如果通过预热燃烧空气进行热回收, 可利用燃烧空气和废气的温度计算出有效热比率的近似值, 而空气比率是根据废气用式(C.6)进行分析, 并不依靠于具体的测量。

$$\eta^* = (E_{h, \text{fuel}} + E_{h, \text{re}} - E_{\text{ex, oc}}) / E_{h, \text{fuel}} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

燃料的热值($E_{h, \text{fuel}}$)、回收热($E_{h, \text{re}}$)和燃烧室出口废气的显热($E_{\text{ex, oc}}$)计算见式(C.7)、式(C.8)和式(C.9):

$$E_{h, \text{fuel}} = H_{\text{f}} \times V_{\text{f}} \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

$$E_{h, \text{re}} = H_{\text{r}} \times V_{\text{f}} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

$$E_{\text{ex, oc}} = H_{\text{ex}} \times V_{\text{f}} \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

预热燃烧空气单位燃料消耗的显热(H_r)计算见式(C.10):

$$H_r = t_a \times c_a \times m \times A_0 \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

单位燃料消耗量(H_{ex})燃烧室出口废气的显热按式(C.11)计算:

$$H_{ex} = t_{gout} \times c_g \times [G_0 + (m - 1)A_0] \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

C.3.3 单独参数估算

C.3.3.1 余热回收效果

当可用热量恒定且燃油率没有变化时,炉膛出口温度根据有效余热回收率的变化,用式(C.12)计算节能率:

$$\alpha_{es} = \frac{(\eta_{RII} - \eta_{RI}) \times (1 - \eta_0^*)}{\eta_0^* + \eta_{RII} (1 - \eta_0^*)} \times 100 \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

注:燃烧炉有效余热回收的定义见 6.2.7。

C.3.3.2 改善空气比的效果

提高空气比的节能率定义见式(C.13):

$$\alpha_{es} = \frac{(1 - \eta_R) \times t_{gout} \times c_g \times (m_I - m_{II}) \times A_0}{H_I - (1 - \eta_R) \times t_{gout} \times c_g \times [G_0 + (m_{II} - 1) \times A_0]} \times 100 \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

C.3.4 节能率估算实例

C.3.4.1 概述

在这个例子中:

- 使用了 A.2 中给出的一个钢用连续加热炉模型;
- 边界确定为图 A.1 中规定的 EB2a;
- 能量平衡表和表 A.4 中给出的效率用作基线。

C.3.4.2 余热回收的改进

见表 C.1。

表 C.1 余热回收的改进对节能率的效果

η_R	η^*	α_{es}	备注
0	0.570	基线	没有热回收:参照条件
0.20	0.656	13.1%	
0.40	0.742	23.2%	
0.60	0.828	31.2%	
0.637	0.834	32.5%	

C.3.4.3 提高空气比

表 C.2 显示了当空气比从 1.15 变为 1.05 和 1.25 时,节能率估值的变化。

表 C.2 空气比变化对节能率的影响

空气比 m	1.15	1.05	1.25
H_1	1 723	1 723	1 723
A_0	4 176	4 176	4 176
G_0	4 828	4 828	4 828
c_g	1 511	1 511	1 511
t_{gout}	900	900	900
η_R	0.673	0.673	0.673
α_{es}	基线	8%	-7.7%

C.3.4.4 预热产品

表 C.3 显示了通过余热回收进行产品预热时的节能率估算值。

表 C.3 预热产品对节能率的影响

产品在入口处的温度/°C	30	100	200	300	400
$E_{\text{pr,en}}/(\text{MJ/t})$	835	801	743	682	607
$E_{\text{available}}/(\text{MJ/t})$	958	924	866	805	730
$E_{\text{h,fuel}}/(\text{MJ/t})$	1 136	1 095	1 026	954	865
α_{es}	基线	3.6%	9.7%	16.0%	23.9%

C.3.4.5 减少热损失的效果示例

当表 A.3 中的 $E_{\text{l,fs(1)}}$ 和 $E_{\text{l,fs(3)}}$ 之和减少一半时,通过改善隔热,可用热量从 958 MJ/t 减少到 922 MJ/t。因此,可使用式(C.1)换算为式(C.14)来计算所需的燃料热值。

$$E_{\text{h,fuel}} = E_{\text{available}} / \eta^* = 922 / 0.843 = 1\,093 \text{ MJ/t} \dots\dots\dots (\text{C.14})$$

注: 由于本次估算是在生产率不变的前提下进行的,因此燃料投入率和单位产量燃料消耗率的折减率是常见的。

C.4 典型炉简化模型节能评价实例

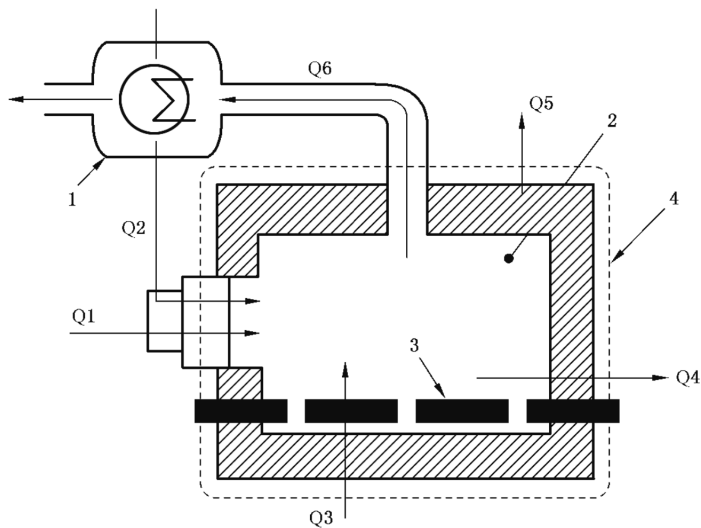
C.4.1 连续加热炉

C.4.1.1 边界 EB3a 热平衡

关于连续加热炉的焓类型的关系用式(C.15)描述:

$$E_{\text{h,fuel}} + E_{\text{h,rex}} = E_{\text{pr,en}} + E_{\text{ex,oc}} - E_{\text{react,exo}} \dots\dots\dots (\text{C.15})$$

连续加热炉的基本结构见图 C.1。



标引序号说明：

- 1 —— 废气热回收设备；
- 2 —— 加热室；
- 3 —— 产品；
- 4 —— 边界(EB3a)；
- Q1—— 燃料热值($E_{h,fuel}$)；

- Q2—— 从废气中回收的热量($E_{h,recx}$)；
- Q3—— 氧化热($E_{react,exo}$)；
- Q4—— 产品焓变($E_{pr,en}$)；
- Q5—— 热能损失(E_l)；
- Q6—— 燃料废气显热($E_{ex,oc}$)。

图 C.1 连续加热炉简化配置示例

用式(C.16)计算热能损失(Q5)：

$$Q5 = Q51 + Q52 \dots\dots\dots (C.16)$$

式中：

- Q51—— 炉子结构的能量损失($E_{l,fs}$)；
- Q52—— 其他能量损失($E_{l,other}$)。

C.4.1.2 节能公式

a) 可用热比率

利用式(C.17)计算可用热比率：

$$\eta^* = (E_{h,fuel} + E_{h,recx} - E_{ex,oc}) / E_{h,fuel} \dots\dots\dots (C.17)$$

利用式(C.18)计算换算后的可用热比率：

$$\eta_0^* = (E_{h,fuel} - E_{ex,oc}) / E_{h,fuel} \dots\dots\dots (C.18)$$

b) 有效余热回收率

利用式(C.19)计算燃料废气显热的有效余热回收率：

$$\eta_R = E_{h,recx} / E_{ex,oc} \dots\dots\dots (C.19)$$

c) 可用热量

利用式(C.20)计算可用热量：

$$E_{available} = E_{pr,en} + E_l - E_{react,exo} \dots\dots\dots (C.20)$$

d) 燃料热值

利用式(C.21)计算燃料热值：

$$E_{h,fuel} = E_{available} / \eta^* \dots\dots\dots (C.21)$$

e) 节能率

利用式(C.22)计算节能率：

$$\alpha_{\text{es}} = \left(1 - \frac{E_{\text{h, fuel II}}}{E_{\text{h, fuel I}}} \right) \dots\dots\dots (C.22)$$

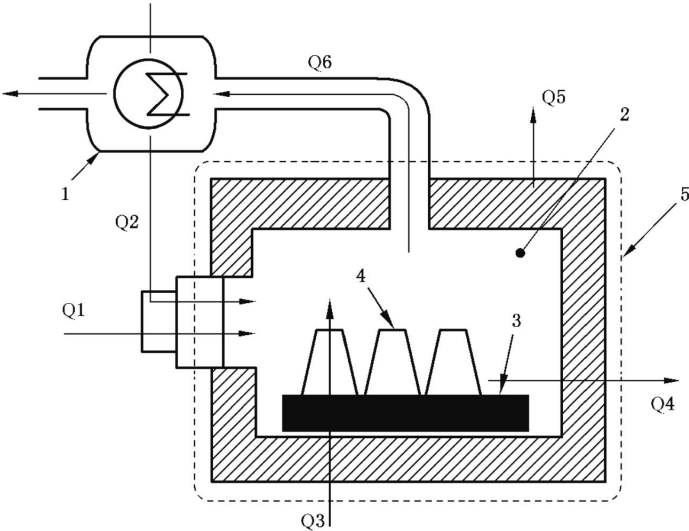
C.4.2 间歇式加热炉

C.4.2.1 边界 EB3a 热平衡

间歇式加热炉的焓型关系如式(C.23)所示：

$$E_{\text{h, fuel}} + E_{\text{h, reex}} = E_{\text{pr, en}} + E_{\text{ex, oc}} - E_{\text{react, exo}} \dots\dots\dots (C.23)$$

连续加热炉的基本结构见图 C.2。



标引序号说明：

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 —— 废气热回收设备； | Q2 —— 从废气中回收的热量($E_{\text{h, reex}}$)； |
| 2 —— 加热室； | Q3 —— 氧化热($E_{\text{react, exo}}$)； |
| 3 —— 小车、夹具等； | Q4 —— 产品焓变($E_{\text{pr, en}}$)； |
| 4 —— 产品； | Q5 —— 热能损失(E_{l})； |
| 5 —— 边界(EB3a)； | Q6 —— 燃料废气显热($E_{\text{ex, oc}}$)。 |
| Q1 —— 燃料热值($E_{\text{h, fuel}}$)； | |

图 C.2 间歇式加热炉简化配置示例

用式(C.24)计算热能损失(Q5)：

$$Q5 = Q51 + Q52 + Q53 + Q54 \dots\dots\dots (C.24)$$

式中：

- Q51——炉子结构的能量损失($E_{\text{l, fs}}$)；
 Q52——加热夹具和其他物质所需的能量($E_{\text{l, j}}$)；
 Q53——炉子结构体蓄热所需能量($E_{\text{l, hs}}$)；
 Q54——其他能量损失($E_{\text{l, other}}$)。

C.4.2.2 节能公式

a) 可用热比率

利用式(C.25)计算可用热比率：

$$\eta^* = (E_{\text{h, fuel}} + E_{\text{h, reex}} - E_{\text{ex, oc}}) / E_{\text{h, fuel}} \dots\dots\dots (C.25)$$

利用式(C.26)计算换算后的可用热比率：

$$\eta_0^* = (E_{h, fuel} - E_{ex, oc}) / E_{h, fuel} \dots\dots\dots (C.26)$$

b) 有效余热回收率
利用式(C.27)计算燃料废气显热的有效余热回收率:

$$\eta_R = E_{h, reex} / E_{ex, oc} \dots\dots\dots (C.27)$$

c) 可用热量
利用式(C.28)计算可用热量:

$$E_{available} = E_{pr, en} + E_1 - E_{react, exo} \dots\dots\dots (C.28)$$

d) 燃料热值
利用式(C.29)计算燃料热值:

$$E_{h, fuel} = E_{available} / \eta^* \dots\dots\dots (C.29)$$

e) 节能率
利用式(C.30)计算节能率:

$$\alpha_{es} = \left(1 - \frac{E_{h, fuel II}}{E_{h, fuel I}}\right) \dots\dots\dots (C.30)$$

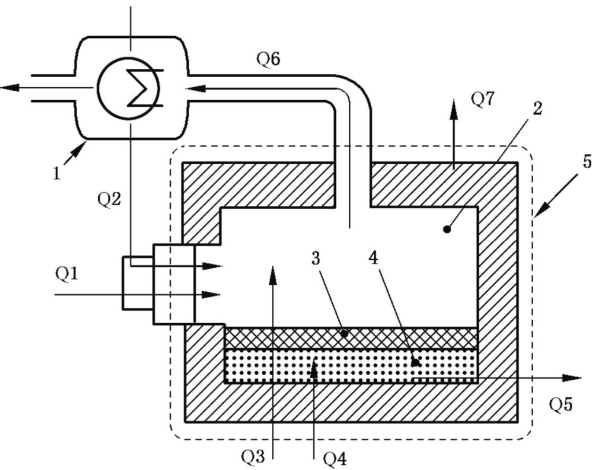
C.4.3 间歇式熔炼炉

C.4.3.1 边界 EB3a 热平衡

间歇式熔炼炉的焓型关系如式(C.31)所示:

$$E_{h, fuel} + E_{h, reex} = E_{pr, en} + E_1 + E_{ex, oc} - E_{react, exo(1)} - E_{react, exo(2)} \dots\dots\dots (C.31)$$

连续间歇式熔炼炉的基本配置见图 C.3。



标引序号说明:

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 —— 废气热回收设备; | Q2 —— 废气余热回收($E_{h, reex}$); |
| 2 —— 加热室; | Q3 —— 氧化反应热($E_{react, exo(1)}$); |
| 3 —— 产品(熔融金属); | Q4 —— 废物燃烧热($E_{react, exo(2)}$); |
| 4 —— 炉渣; | Q5 —— 产品焓变($E_{pr, en}$); |
| 5 —— 边界; | Q6 —— 燃料废气的显热($E_{ex, oc}$); |
| Q1 —— 燃料热值($E_{h, fuel}$); | Q7 —— 热能损失(E_1). |

图 C.3 间歇式熔炼炉简化配置示例

利用式(C.32)计算热能损失(Q7):

$$Q7 = Q71 + Q72 + Q73 + Q74 \dots\dots\dots (C.32)$$

式中:

Q71——炉子结构的能量损失($E_{l,fs}$);

Q72——加热夹具和其他物质所需的能量[$E_{l,j(1)}$];

Q73——炉渣显热的能量损失[$E_{l,j(2)}$];

Q74——其他能量损失($E_{l,other}$)。

C.4.3.2 节能公式

a) 可用热比率

利用式(C.33)计算可用热比率:

$$\eta^* = (E_{h,fuel} + E_{h,ree} - E_{ex,oc}) / E_{h,fuel} \quad \dots\dots\dots (C.33)$$

利用式(C.34)计算换算后的可用热比率:

$$\eta_0^* = (E_{h,fuel} - E_{ex,oc}) / E_{h,fuel} \quad \dots\dots\dots (C.34)$$

b) 有效余热回收率

利用式(C.35)计算燃料废气显热的有效余热回收率:

$$\eta_R = E_{h,ree} / E_{ex,oc} \quad \dots\dots\dots (C.35)$$

c) 可用热量

利用式(C.36)计算可用热量:

$$E_{available} = E_{pr,en} + E_l - E_{react,exo(1)} - E_{react,exo(2)} \quad \dots\dots\dots (C.36)$$

d) 燃料热值

利用式(C.37)计算燃料热值:

$$E_{h,fuel} = E_{available} / \eta^* \quad \dots\dots\dots (C.37)$$

e) 节能率

利用式(C.38)计算节能率:

$$\alpha_{es} = \left(1 - \frac{E_{h,fuel II}}{E_{h,fuel I}} \right) \quad \dots\dots\dots (C.38)$$

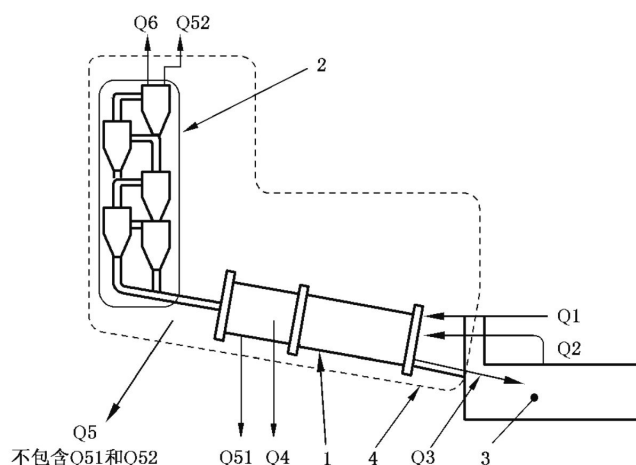
C.4.4 水泥回转窑

C.4.4.1 边界 EB3a 热平衡

水泥回转窑的焓型关系如式(C.39)所示:

$$E_{h,fuel} = E_{pr,en} + E_{pr,re} + E_l + E_{ex,oc} - E_{h,repr} \quad \dots\dots\dots (C.39)$$

水泥回转窑的基本配置见图 C.4。



标引序号说明：

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 —— 回转窑； | Q3 —— 产品焓变($E_{pr,en}$)； |
| 2 —— 原料预热器； | Q4 —— 加热产品电加热所需能量($E_{pr,re}$)； |
| 3 —— 产品冷却器； | Q5 —— 热能损失(E_l)； |
| 4 —— 边界(EB3a)； | Q51 —— 炉结构的能量损失($E_{l,fl}$)； |
| Q1 —— 燃料热值($E_{h,fuel}$)； | Q52 —— 原料废气显热($E_{exrm,oc}$)； |
| Q2 —— 产品回收热($E_{h,repr}$)； | Q6 —— 燃料废气显热($E_{ex,oc}$)。 |

图 C.4 简化水泥窑示例

使用式(C.40)计算热能损失(Q5)：

$$Q5 = Q51 + Q52 + Q53 \quad \dots\dots\dots (C.40)$$

式中：

- Q51——炉子结构的能量损失($E_{l,fs}$)；
 Q52——原料废气的显热($E_{exrm,oc}$)；
 Q53——其他能量损失($E_{l,other}$)。

C.4.4.2 节能公式

a) 可用热比率

利用式(C.41)计算可用热比率和换算后的可用热比率：

$$\eta^* = \eta_0^* = (E_{h,fuel} - E_{ex,oc}) / E_{h,fuel} \quad \dots\dots\dots (C.41)$$

b) 产品显热回收率

利用式(C.42)计算产品显热回收率：

$$\eta_{rp} = E_{h,repr} / E_{pr,en} \quad \dots\dots\dots (C.42)$$

c) 可用热量

利用式(C.43)计算可用热量：

$$E_{available} = E_{pr,en} + E_l - E_{react,exo(1)} - E_{react,exo(2)} \quad \dots\dots\dots (C.43)$$

d) 燃料热值

利用式(C.44)计算燃料热值：

$$E_{h,fuel} = E_{pr,en} / \eta^* \quad \dots\dots\dots (C.44)$$

e) 节能率

利用式(C.45)计算节能率：

$$\alpha_{es} = \left(1 - \frac{E_{h,fuel II}}{E_{h,fuel I}} \right) \quad \dots\dots\dots (C.45)$$

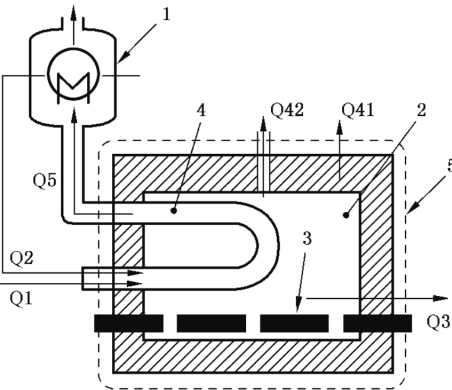
C.4.5 间接加热热处理炉

C.4.5.1 边界 EB3a 热平衡

间接加热热处理炉的焓型关系如式(C.46)所示：

$$E_{h, \text{fuel}} + E_{h, \text{rex}} = E_{\text{pr, en}} + E_l + E_{\text{ex, oc}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.46})$$

间接加热热处理炉的基本结构见图 C.5。



标引序号说明：

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 —— 废气热回收设备； | Q2 —— 废气余热回收($E_{h, \text{reex}}$)； |
| 2 —— 加热室； | Q3 —— 产品焓变($E_{\text{pr, en}}$)； |
| 3 —— 产品； | Q4 —— 热能损失(E_l)； |
| 4 —— 间接加热设备(辐射管)； | Q41 —— 炉子结构能量损失($E_{l, \text{fl}}$)； |
| 5 —— 边界(EB3a)； | Q42 —— 大气气体能量损失($E_{l, \text{atm}}$)； |
| Q1 —— 燃料热值($E_{h, \text{fuel}}$)； | Q5 —— 燃料废气显热($E_{\text{ex, oc}}$)。 |

图 C.5 简化间接加热热处理炉示例

使用式(C.47)计算热能损失(Q4)：

$$Q4 = Q41 + Q42 + Q43 \quad \dots\dots\dots (\text{C.47})$$

式中：

- Q41——炉子结构的能量损失($E_{l, \text{fs}}$)；
 Q42——气氛气体的能量损失($E_{l, \text{atm}}$)；
 Q43——其他能量损失($E_{l, \text{other}}$)。

C.4.5.2 节能公式

a) 可用热比率

利用式(C.48)计算可用热比率：

$$\eta^* = (E_{h, \text{fuel}} + E_{h, \text{reex}} - E_{\text{ex, oc}}) / E_{h, \text{fuel}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.48})$$

利用式(C.49)计算换算后的可用热比率：

$$\eta_0^* = (E_{h, \text{fuel}} - E_{\text{ex, oc}}) / E_{h, \text{fuel}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.49})$$

b) 有效余热回收率

利用式(C.50)计算燃料废气显热的有效余热回收率：

$$\eta_R = E_{h, \text{reex}} / E_{\text{ex, oc}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.50})$$

c) 可用热量

利用式(C.51)计算可用热量：

- d) 燃料热值
利用式(C.52)计算燃料热值:

$$E_{\text{available}} = E_{\text{pr, en}} + E_{\text{l}} \dots\dots\dots (\text{ C.51 })$$
$$E_{\text{h, fuel}} = E_{\text{available}} / \eta^* \dots\dots\dots (\text{ C.52 })$$
- e) 节能率
利用式(C.53)计算节能率:

$$\alpha_{\text{es}} = \left(1 - \frac{E_{\text{h, fuel II}}}{E_{\text{h, fuel I}}} \right) \dots\dots\dots (\text{ C.53 })$$

参 考 文 献

- [1] ISO 13579-4 Industrial furnaces and associated processing equipment—Method of measuring energy balance and calculating efficiency—Part 4:Furnaces with protective or reactive atmosphere
 - [2] JISZ 9202—1991 General rules for heat balance
 - [3] MÄRTENSSON A,Energy improvement by measurement and control—A case study of reheating furnaces in the steel industry, Proceedings from the 14th National Industrial Energy Technology Conference, Houston, TX, April 22-23, 1992.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

工业炉及相关工艺设备 能量平衡测试及
能效计算方法 第 11 部分:各种效率评估

GB/T 40816.11—2021/ISO 13579-11:2017

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.org.cn

服务热线:400-168-0010

2021 年 10 月第一版

*

书号:155066·1-68708



GB/T 40816.11—2021

版权专有 侵权必究