ICS 77.120

CCS H 01

ICS 77.120

**中华人民共和国工业和信息化部 发 布**

××××-××-××实施

××××-××-××发布

**重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法**

**(吹炼转炉)**

Methods of determination and calculation of heat balance in metallurgical

furnaces for heavy non-ferrous metals

(Converter)

（预审稿）

**YS/T** 118.15—202\*

代替YS/T 118.15—2012

YS

H01

××××-××-××发布

**中华人民共和国有色金属行业标准**

目 次

[前 言 III](#_Toc29745)

[1 范 围 1](#_Toc2185)

[2 热平衡测定与计算基准 1](#_Toc23194)

[2.1 基准温度和压力 1](#_Toc3916)

[2.2 热平衡测定体系 1](#_Toc10227)

[2.3 计算单位 1](#_Toc21374)

[3 设备概况与生产工艺流程 1](#_Toc25421)

[3.1 设备概况 1](#_Toc25535)

[3.2 生产流程示意图 2](#_Toc23866)

[4 热平衡测定条件 2](#_Toc8455)

[4.1 测定条件 2](#_Toc8915)

[4.2 测定时间 2](#_Toc23556)

[4.3 测定前炉子运行技术参数 2](#_Toc16932)

[5 热平衡测定项目与方法 3](#_Toc12892)

[6 物料平衡 7](#_Toc13016)

[6.1 物料平衡计算 7](#_Toc21290)

[6.1.1 吹炼转炉物料平衡计算 7](#_Toc3411)

[6.1.2 余热锅炉物料平衡计算 8](#_Toc19498)

[6.2 物料平衡表 9](#_Toc19363)

[6.2.1 吹炼转炉物料平衡表 9](#_Toc19819)

[6.2.2 余热锅炉物料平衡表 10](#_Toc27373)

[7 热平衡 10](#_Toc32648)

[7.1 热平衡计算 10](#_Toc14654)

[7.1.1 吹炼转炉热平衡计算 10](#_Toc10425)

[7.1.2 余热锅炉热平衡计算 12](#_Toc15079)

[7.2 热平衡表 14](#_Toc32557)

[7.2.1 吹炼转炉热平衡表 14](#_Toc11223)

[7.2.2 余热锅炉热平衡表 14](#_Toc15257)

[7.3 热效率 15](#_Toc1156)

[7.3.1 炉子热效率 15](#_Toc21728)

[7.3.2 余热回收率 15](#_Toc26470)

[7.3.3 炉子系统热效率 15](#_Toc22068)

[7.4 热流图 15](#_Toc17176)

[8 主要能耗指标 16](#_Toc2863)

[9 热平衡测定结果分析与改进建议 17](#_Toc5776)

[附录A（资料性）本文件使用统一量的符号 18](#_Toc22955)

[附录B（资料性）水和水蒸汽性质表 19](#_Toc17611)

[附录C（资料性）常见气体的平均体积热容 20](#_Toc20405)

[附录D（资料性）常见气体的平均体积热容 21](#_Toc14902)

# 前 言

本文件按照GB/T1.1-2020《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。

本文件代替YS/T 118.15-2012《重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法（吹炼转炉）》。与YS/T 118.15-2012相比，除编辑性改动外，主要技术变化如下：

a）更改了设备技术参数，增加了“炉膛有效容积”、“固定烟罩结构”和“密封烟罩结构”（见表1，2012年版的表2）；

b）更改了前一个月炉子运行技术测定参数，增加了“转炉渣质量”和“吹炼转炉喷溅物量”的内容（见表2，2012年版的表2）；

c）更改了热平衡测定项目与方法，“三、入炉气体”增加了“氧气纯度”，“五、烟气和烟尘”增加了“转炉出口逸散烟气流量”（见表3，2012年版的表3）；

d）更改了吹炼转炉物料平衡计算，增加了氧气纯度内容（见表4，2012年版的表4）；

e）更改了吹炼转炉物料平衡计算支出项目，增加了“逸散烟气质量”内容（见表4和表6，2012年版的表4和表6）；

f）更改了吹炼转炉热平衡计算表，在“二、热支出项”中增加了“逸散烟气带走热”内容（见表8和表10，2012年版的表8和表10）。

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。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）提出并归口。

本文件起草单位：金川集团股份有限公司、金川集团铜贵有限公司、金川集团镍钴有限公司。

本文件主要起草人：张燕、彭东清、李睿、曹涛、杨述凯、吴晓沛、李自玺、罗耀斌、龚思杰、王绒香。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——本文件1992年首次发布为YS/T 118.15—1992，2012年第一次修订；

——本次为第二次修订。

重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法

(吹炼转炉)

# 1 范围

本文件规定了吹炼转炉热平衡测定与计算基准、设备概况与生产工艺流程、热平衡测定条件、热平衡测定项目与方法、物料平衡、热平衡、主要能耗指标、热平衡测定结果分析与改进建议。

本文件适用于吹炼铜冰铜或低冰镍的卧式转炉。

# 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。

# XXXX

# 3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

# 4 热平衡测定与计算基准

## 2.1 基准温度和压力

采用吹炼转炉环境温度为基准温度。基准压力为1个标准大气压，即101325帕(Pa)。

## 2.2 热平衡测定体系

本文件以吹炼转炉为热平衡体系。物料平衡和热平衡从入炉风、炉料的入口至粗铜或高镍锍、炉渣、余热锅炉烟气出口为止。

## 2.3 计算单位

物料平衡和热平衡均以一炉操作周期为计算基准，计算单位分别采用kg/炉和kJ/炉。

# 3 设备概况与生产工艺流程

## 3.1 设备概况

吹炼转炉设备概况按表1填写。

表 1 设备概况

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 单位 | 数值 |
| 1 | 炉子编号 | — |  |
| 2 | 炉子规格(直径×长) | m×m |  |
| 3 | 标称容量 | t |  |
| 4 | 风口数量 | 个 |  |
| 5 | 风口直径 | mm |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 表1（续） | | | |
| 序号 | 名称 | 单位 | 数值 |
| 6 | 风口总面积 | cm² |  |
| 7 | 炉口面积 | m² |  |
| 8 | 大修炉寿命(1个大修周期炉次) | 炉 |  |
| 9 | 平均日出炉数 | 炉/日 |  |
| 10 | 平均产量 | t/炉 |  |
| 11 | 余热锅炉型号 | — |  |
| 12 | 年运转率 | % |  |
| 13 | 炉膛有效容积 | m3 |  |
| 14 | 固定烟罩结构 | 密封/半密封 |  |
| 15 | 密封烟罩结构 | 水冷/无水冷 |  |

## 3.2 生产流程示意图

吹炼转炉生产工艺流程如图1所示。

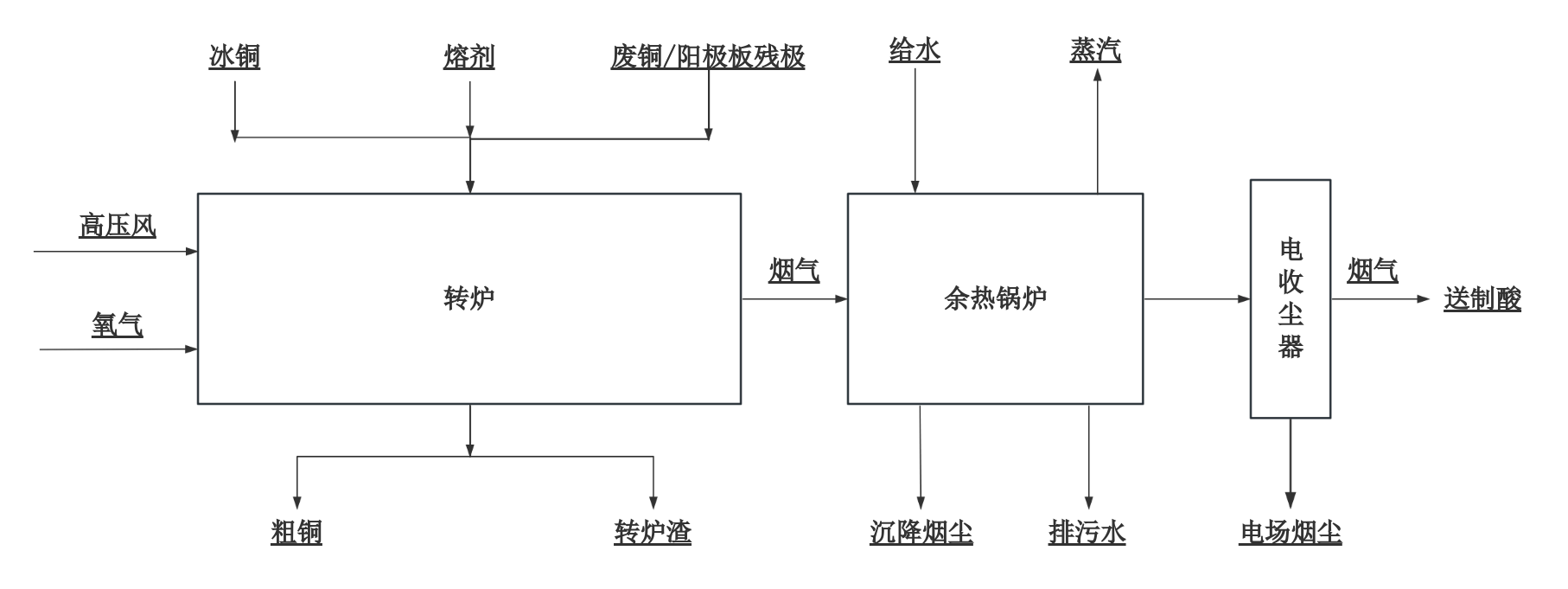


图1 吹炼转炉生产工艺流程

# 4 热平衡测定条件

## 4.1 测定条件

测定时，吹炼转炉生产须在正常工况条件下，各项技术参数在工艺技术规定的指标范围内，炉况相对稳定，无设备故障，产量达正常生产水平时进行一炉期连续测定。

## 4.2 测定时间

以每炉次生产操作时间为测定单元，不少于两个测定单元。

## 4.3 测定前炉子运行技术参数

按表2填写测定前一个月吹炼转炉运行技术参数。

表2 测定前一个月炉子运行技术参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序 号 | 名 称 | 单 位 | 数 值 |
| 1 | 高压风量 | m³/h |  |
| 2 | 氧气量 | m3/h |  |
| 3 | 加料量 | t/炉 |  |
| 4 | 粗铜或高镍锍产量 | t/炉 |  |
| 5 | 余热锅炉出口烟气量 | m³/h |  |
| 6 | 生产统计炉数 | 炉 |  |
| 7 | 送风时率 | % |  |
| 8 | 熔剂率 | % |  |
| 9 | 冷料率 | % |  |
| 第一周期(适用铜转炉) | % |  |
| 第二周期(适用铜转炉) | % |  |
| 10 | 平均吹炼时间 | h |  |
| 第一周期 (适用铜转炉) | h |  |
| 第二周期 (适用铜转炉) | h |  |
| 11 | 转炉渣质量 | t |  |
| 12 | 吹炼转炉喷溅物量 | t |  |

# 5 热平衡测定项目与方法

热平衡测定项目与方法按照表3填写。

表3 热平衡测定项目与方法

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测定项目 | | | 符号 | 单位 | 测点位置 | 测定仪器 | 测定频率 | 取值  原则 | 测定数据 |
| 一、大气条件 | 环境温度 | 干球 | *t*e | ℃ | 转炉作  业区域 | 干湿球  温度计 | 1次/2 h | 算术  平均 |  |
| 湿球 | *t*s | ℃ |  |
| 大气压力 | | *p* | Pa | 室外 | 气压计 | 1次/2 h | 算术平均 |  |
| 二、入炉物料 | 1.铜冰铜或低冰镍 | | | | | | | | |
| 质量 | | *m*1 | kg/炉 | 给料包 | 吊车秤或地中衡 | 连续测 | 累计 |  |
| 温度 | | *t*1 | ℃ | 快速  热电偶 | 2次/包 | 算术  平均 |  |
| 元素成分 | |  | % | 化学分析 | 2个混合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、  Fe、S等 |
| 物相成分 | |  | % | 物相  分析仪 | 算术  平均 |  |

表3（续）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测定项目 | | 符号 | 单位 | 测点位置 | 测定仪器 | 测定频率 | 取值  原则 | 测定数据 |
| 二、入炉物料 | 2.熔剂 | | | | | | | |
| 质量 | *m*2 | kg/炉 | 运输机 | 计量秤 | 连续测 | 累计 |  |
| 温度 | *t*2 | ℃ | 加料仓 | 热电偶 | 1次/4h | 算术平均 |  |
| 含水量 | *w* | % | 加料仓 | 水分  分析仪 |  | 算术  平均 |  |
| 元素成分 |  | % | 化学分析 | 2个混合样/炉 | 算术  平均 | SiO2、CaO、 MgO等 |
| 3.冷料 | | | | | | | |
| 质量 | *m*3 | kg/炉 | 给料包 | 吊车秤  或地中衡 | 连续测 | 累计 |  |
| 运输机 | 计量秤 |
| 温度 | *t*3 | ℃ | 给料包  加料仓 | 热电偶 | 1次/4h | 算术  平均 |  |
| 元素成分 |  | % | 化学分析 | 2个混合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、  Fe、S等 |
| 物相成分 |  | % | 物相  分析仪 | 算术  平均 |  |
| 三、入炉 气体 | 1.空气 |  | | | | |  | |
| 体积 | *V*k | m3/炉 | 空气管道 | 流量计 | 连续 | 累计 |  |
| 温度 | *t*k | ℃ | 热电偶 | 1次/2h | 算术平均 |  |
| 2.氧气 | | | | | | | |
| 体积 | *V*o | m3/炉 | 氧气管道 | 流量计 | 连续 | 累计 |  |
| 温度 | *t*o | ℃ | 热电偶 | 1次/2h | 算术平均 |  |
| 氧气纯度 | *x* | % | 分析仪 | 连续 | 算数平均 |  |
| 3.吸入烟罩空气 | | | | | | | |
| 体积 | *V*x | m3/炉 | 转炉烟罩 | 热线  风速仪 | 2次/炉 | 测算 |  |
| 温度 | *t*x | ℃ | 热线  风速仪 | 2次/炉 | 算术  平均 |  |
| 四、出炉 物料 | 1.粗铜或高镍锍 | | | | | | | |
| 质量 | *m'*1 | kg/炉 |  | 天车秤  或地中衡 | 1次/包 | 累计 |  |
| 温度 | *t'*1 | ℃ | 出料包 | 快速  热电偶 | 2次/包 | 算术  平均 |  |
| 元素成分 |  | % |  | 化学分析 | 2个混合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、  Fe、S等 |
| 物相成分 |  | % |  | 物相  分析仪 |  | 算术  平均 |  |

表3（续）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测定项目 | | 符号 | 单位 | 测点位置 | 测定仪器 | 测定频率 | 取值  原则 | 测定数据 |
| 四、出炉 物料 | 2.转炉渣 | | | | | | | |
| 质量 | *m'*2 | kg/炉 | 渣包 | 天车秤  或地中衡 | 1次/包 | 累计 |  |
| 温度 | *t'*2 | ℃ | 快速  热电偶 | 2次/包 | 算术  平均 |  |
| 元素成分 |  | % | 化学分析 | 2个混合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、Fe、S、SiO2等 |
| 物相成分 |  | % | 物相分析仪 | 算术  平均 |  |
| 3.喷溅物 | | | | | | | |
| 质量 | *m'*3 | kg/炉 | 安全坑 | 地中衡 | 1次/炉 | 累计 |  |
| 温度 | *t'*3 | ℃ | 炉口 | 红外  测温仪 | 2次/炉 | 算术  平均 |  |
| 元素成分 |  | % | 安全坑 | 化学分析 | 2个混  合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、Fe、  S、SiO2等 |
| 五、烟气 和烟尘 | 1.转炉出口(余热锅炉进口)烟气 | | | | | | | |
| 流量 | *V*y | m3/h | 转炉出口 (余热锅炉进口) | 测算 |  |  |  |
| 温度 | *t*y | ℃ | 铂铑-铂  热电偶 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 含水量 | *w*y | % | 测算 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 干烟气成分 |  | % | 气体  分析仪 | 1次/2h | 算术  平均 | N2 、SO₂、  O2、CO2等 |
| 转炉出口逸  散烟气流量 | *V*ys | m3/h | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 2.余热锅炉出口烟气 | | | | | | | |
| 流量 | *V'*y | m3/h | 余热锅炉出口 | 烟尘平行  采样仪 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 温度 | *t'*y | ℃ | 热电偶 | 1次/2h | 算术平均 |  |
| 含水量 | *w'*y | % | 烟尘平行  采样仪 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 干烟气成分 |  | % | 气体分析仪 | 1次/2h | 算术  平均 | CO₂ 、SO₂、 N₂、O₂等 |

表3（续）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测定项目 | | 符号 | 单位 | 测点位置 | 测定仪器 | 测定频率 | 取值  原则 | 测定数据 |
| 五、烟气 和烟尘 | 3.余热锅炉沉降烟尘 | | | | | | | |
| 质量 | *m'*4 | kg/炉 | 余热锅炉  下灰口 | 地中衡 | 1次/炉 | 累计 |  |
| 温度 | *t'*4 | ℃ | 热电偶 | 2次/炉 | 算术平均 |  |
| 元素成分 |  | % | 化学分析 | 2个混合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、Fe、 S、SiO2等 |
| 物相成分 |  | % | 物相  分析仪 |  | 算术  平均 |  |
| 4.余热锅炉出口烟气带走烟尘 | | | | | | | |
| 含尘浓度 | *d*u | g/m³ | 余热锅炉出口 | 烟尘平行  采样仪、  天平 | 1次/2 h | 算术  平均 |  |
| 温度 | *t'*yc | ℃ | 热电偶 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 元素成分 |  | % | 电场  下灰口 | 元素分析 | 2个混  合样/炉 | 算术  平均 | Cu、Ni、Fe、 S、SiO₂等 |
| 物相成分 |  | % | 物相  分析仪 | 算术  平均 |  |
| 六、冷却水 | 质量 | *m*w | kg/炉 | 进水管 | 流量计 | 1次/2h | 累计 |  |
| 进口温度 | *t*wi | ℃ | 温度计 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 出口温度 | *t*wo | ℃ | 出水管 | 温度计 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 七、其他 | 炉体表面积 | *A* | m² |  | 查图纸 |  |  |  |
| 表面温度 | *t*1b | ℃ | 炉体表面多点测试 | 表面热电  偶、红外  测温仪 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 炉口面积 | *A*g | m² |  | 查图纸 |  |  |  |
| 炉口温度 | *t*lk | ℃ | 炉口 | 红外  测温仪 | 2次/炉 | 算术  平均 |  |
| 八、余热 锅炉 | 表面积 | *A*b | m² |  | 查图纸 |  |  |  |
| 表面温度 | *t*b | ℃ | 余热锅炉炉前、炉中、炉后 | 表面热电  偶、红外  测温仪 | 1次/2 h | 算术  平均 |  |
| 给水质量 | *m*g | kg/炉 | 给水管 | 流量计 | 1次/2h | 累计 |  |
| 给水温度 | *t*g | ℃ |  | 温度计 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 给水压力 | *p*g | MPa |  | 压力表 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 产蒸汽量 | *m'*g1 | kg/炉 | 蒸汽管 | 流量计 | 连续 | 累计 |  |

表3（续）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测定项目 | | 符号 | 单位 | 测点位置 | 测定仪器 | 测定  频率 | 取值  原则 | 测定数据 |
| 八、余热 锅炉 | 蒸汽温度 | *t'*g1 | ℃ | 蒸汽管 | 热电偶 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 蒸汽压力 | *p'*g1 | MPa | 压力表 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 排污水质量 | *m'*g2 | kg/炉 | 排污  水口 | 计量秤 | 1次/炉 | 累计 |  |
| 排污水温度 | *t'*g2 | ℃ | 温度计 | 1次/2h | 算术  平均 |  |
| 九、时间 | 总操作时间 | *θ*z | h |  | 计时器 | 连续 | 累计 |  |
| 净吹炼时间 | *θ*j | h |  | 计时器 |  | 累计 |  |
| 停吹时间 | *θ*z- j | h |  | 计时器 |  | 累计 |  |

# 6 物料平衡

## 6.1 物料平衡计算

### 6.1.1 吹炼转炉物料平衡计算

吹炼转炉物料平衡计算按表4的规定进行。

表4 吹炼转炉物料平衡计算

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 一、收入项 | | | | | |
| 1 | 铜冰铜或低冰镍质量 | *m*1 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2 | 熔剂质量 | *m*2 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 3 | 冷料质量 | *m*3 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 4 | 入炉空气质量 | *m*4 | kg/炉 | *m*4=*V*k**·** *ρ*k |  |
| 1) 空气体积 | *V*k | m²/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 空气密度 | *ρ*k | kg/m³ | 查表 |  |
| 5 | 吸入烟罩空气质量 | *m*5 | kg/炉 | *m*5=*V*x **·***ρ*k |  |
| 1) 空气体积 | *V*x | m³/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 空气密度 | *ρ*x | kg/m² | 查表 |  |
| 6 | 鼓入炉内氧气质量 | *m*6 | kg/炉 | *m*6=*V*o***·*** *x****·****ρ*o |  |
| 1) 氧气体积 | *V*o | m²/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 氧气密度 | *ρ*o | kg/m² | 查表 |  |
| 1. 氧气纯度 | *x* | % | 实测数据 |  |
| 7 | 其他炉料质量 | *m*7 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 收入项之和 | | *∑m* | kg/炉 | *∑m*=*m*1+*m*₂+*m*3+*m*4+*m*5+*m*6+*m*7 |  |

表4（续）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 二、支出项 | | | | | |
| 1 | 粗铜或高镍锍质量 | *m'*1 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2 | 转炉渣质量 | *m'*2 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 3 | 喷溅物质量 | *m'*3 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 4 | 出口烟气质量 | *m*y | kg/炉 | *my*=*V*y**·***ρ*y**·** *θ*j |  |
| 1)烟气流量 | *V*y | m³/h | 测算 |  |
| 2)烟气密度 | *ρ*y | kg/m³ | *ρy*=∑*a*yi**·***ρ'*yi |  |
| 3)烟气成分 | *a*yi | % | 实测数据 |  |
| 4)成分*i*密度 | *ρ'*yi | kg/m³ | 查表 |  |
| 5 | 逸散烟气质量 | *m*ys | kg/炉 | *my*=*V*ys**·***ρ*ys**·** *θ*j |  |
| 1)转炉出口逸散烟气流量 | *V*ys | m³/h | 测算 |  |
| 2)逸散烟气密度 | *ρ*ys | kg/m³ | *ρ*ys=∑*a*ys**·***ρm* |  |
| 3)逸散烟气成分 | *a*ys | % | 实测数据 |  |
| 4)逸散烟气成分*m*密度 | *ρ*m | kg/m³ | 查表 |  |
| 6 | 烟尘质量 | *m*yc | kg/炉 | *m*yc=*m'*4+*m'*5 |  |
| 1) 沉降烟尘质量 | *m'*4 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 锅炉出口烟尘质量 | *m'*5 | kg/炉 | *m'*5=*V'*y**·** *d*u**·** *θ*j/1000 |  |
| 3) 烟气流量 | *V'*y | m³/h | 实测数据 |  |
| 4) 烟气含尘浓度 | *d*u | g/m3 | 实测数据 |  |
| 7 | 差值 | △*m* | kg/炉 | △*m*=∑*m*-(*m'*1+*m'*2+*m'*3+*m*y+*m*ys+*myc*) |  |
| 支出项之和 | |  | kg/炉 | *∑m'*=*m'*1+*m'*2+*m'*3+*m*y+*m*ys*+m*yc+△*m* |  |

### 6.1.2 余热锅炉物料平衡计算

余热锅炉物料平衡计算按照表5规定进行。

表5 余热锅炉物料平衡计算

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 一、收入项 | | | | |  |
| 1 | 进口烟气质量 | *m*y | kg/炉 | *m*y=*V*y**·** *ρ*y**·** *θ*j |  |
| 1）烟气流量 | *V*y | m3/h | 测算 |  |
| 2）烟气密度 | *ρ*y | kg/m3 | *ρ*y=∑*a*yi**·** *ρ*yi |  |
| ① 烟气*i*成分 | *a*yi | % | 实测数据 |  |
| ② 成分*i*密度 | *ρ*yi | kg/m3 | 查表 |  |
| 3）净吹炼时间 | *θ*j | h | 实测数据 |  |
| 2 | 进口烟尘质量 | *m*yc | kg/炉 | 测算 |  |

表5 （续）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 2 | 1）沉降烟尘质量 | *m'*4 | kg/每炉 | 实测数据 |  |
| 2）出口烟尘质量 | *m'*5 | kg/每炉 | *m'*5=*V'*y**·** *d*u**·** *θ*j /1000 |  |
| 3 | 给水质量 | *m*g | kg/每炉 | 实测数据 |  |
| 收入项之和 | | *∑m* | kg/每炉 | ∑*m*=*m*y+*m*yc+*m*g |  |
| 二、支出项 | | | | |  |
| 1 | 出口烟气质量 | *m'*y | kg/炉 | *m*'y=*V'*y**·** *ρ'*y**·** *θ*j |  |
| 1）烟气流量 | *V'*y | m3/h | 测算 |  |
| 2）烟气密度 | *ρ'*y | kg/m3 | *ρ'*y=∑*a*yi**·** *ρ*yi |  |
| ① 烟气中i成分含量 | *a*yi | % | 实测数据 |  |
| ② 成分中i密度 | *ρ*yi | kg/m3 | 查表 |  |
| 2 | 1）沉降烟尘质量 | *m'*4 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 3 | 2）出口烟尘质量 | *m'*5 | kg/炉 | *m'*5=*V'*y**·***d*u**·** *θ*j/1000 |  |
| 4 | 蒸汽质量 | *m'*g1 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 5 | 排污水质量 | *m'*g2 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 6 | 差值 | ∆*m'* | kg/炉 | ∆*m'*=∑*m* - (*m'*y+*m'*4+*m'*5+*m'*g1+*m'*g2) |  |
| 收入项之和 | | ∑*m'* | kg/炉 | ∑*m'*=*m'*y+*m'*4+*m'*5  +*m'*g1+*m'*g2+∆*m'* |  |

## 6.2 物料平衡表

### 6.2.1 吹炼转炉物料平衡表

吹炼转炉物料质量的测定和计算结果按表6填写。

表6 吹炼转炉物料平衡

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 收入 | | | | 支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| kg/炉 | % | kg/炉 | % |
| *m*1 | 铜冰铜或低冰镍质量 |  |  | *m'*1 | 粗铜或高镍锍质量 |  |  |
| *m*2 | 熔剂质量 |  |  | *m'*2 | 转炉渣质量 |  |  |
| *m*3 | 冷料质量 |  |  | *m'*3 | 喷溅物质量 |  |  |
| *m*4 | 入炉空气质量 |  |  | *m*y | 烟气质量 |  |  |
| *m*5 | 吸入烟气罩空气质量 |  |  | *m*yc | 烟尘质量 |  |  |
| *m*6 | 鼓入氧气质量 |  |  | *m*ys | 逸散烟气质量 |  |  |
| *m*7 | 其他炉料质量 |  |  | *∆m* | 差值 |  |  |
| ∑*m* | 合计 |  | 100 | *∑m'* | 合计 |  | 100 |

### 6.2.2 余热锅炉物料平衡表

余热锅炉物料质量的测定和计算结果按表7填写。

表7 余热锅炉物料平衡表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 收入 | | | | 支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| kg/炉 | % | kg/炉 | % |
| *m*y | 进口烟气质量 |  |  | *m'*y | 出口烟气质量 |  |  |
| *m*yc | 进口烟尘质量 |  |  | *m'*4 | 沉降烟尘质量 |  |  |
| *m*g | 给水质量 |  |  | *m'*5 | 出口烟尘质量 |  |  |
|  |  |  |  | *m'*g1 | 蒸汽质量 |  |  |
|  |  |  |  | *m'*g2 | 排污水质量 |  |  |
|  |  |  |  | ∆*m'* | 差值 |  |  |
| ∑*m* | 合计 |  | 100 | ∑*m'* | 合计 |  | 100 |

# 7 热平衡

## 7.1 热平衡计算

### 7.1.1 吹炼转炉热平衡计算

热平衡计算按表8规定内容和方法进行。

表8 吹炼转炉热平衡计算表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 一、热收入项 | | | | | |
| 1 | 铜冰铜或低冰镍带入热 | *Q*1 | kJ/炉 | *Q*1=*m*1**·** *c*1**·** ( *t*1 - *t*e ) |  |
| 1) 铜冰铜或低冰镍质量 | *m*1 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 铜冰铜或低冰镍温度 | *t*1 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 铜冰铜或低冰镍比热 | *c*1 | kJ/(kg**·**℃) | 测试或计算 |  |
| 2 | 氧化反应放热 | *Q*2 | kJ/炉 | *Q*2=Σ*mi***·** △*Hi* |  |
| 1) 被氧化的物质*i*质量 | *mi* | kg/炉 | 按分析结果及反应式计算 |  |
| 2) 物质*i*反应生成热 | △*Hi* | kJ/kg | 查表 |  |
| 3 | 造渣反应放热 | *Q*3 | kJ/炉 | *Q*3=Σ*msi***·**△*Hsi* |  |
| 1) 物质*i*造渣消耗SO2质量 | *msi* | kg/炉 | 按分析结果及反应式计算 |  |
| 2) 按SiO₂反应生成热 | △*Hsi* | kJ/kg | 查表 |  |
| 4 | 入炉空气带入热 | *Q*4 | kJ/炉 | *Q*4=*m*4**·** *c*k**·** ( *t*k - *t*e ) |  |
| 1) 空气质量 | *m*4 | kg/炉 | 实测数据及计算 |  |
| 2) 空气温度 | *t*k | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 空气比热 | *c*k | kJ/(kg **·**℃) | 查表 |  |

表8 （续）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 5 | 鼓入氧气带入热 | *Q*5 | kJ/炉 | *Q*5=*m*6 **·** *c*o**·** ( *t*o - *t*e ) |  |
| 1) 氧气质量 | *m*6 | kg/炉 | 实测数据及计算 |  |
| 2) 氧气温度 | *t*o | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 氧气比热 | *c*o | kJ/(kg **·**℃) | 查表 |  |
| 6 | 其他物料带入热 | *Q*6 | kJ/炉 | *Q*6=*m*7**·** *c*7**·** ( *t*7 - *t*e ) |  |
| 1) 其他物料质量 | *m*7 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 其他物料比热 | *c*7 | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 3) 其他物料温度 | *t*7 | ℃ | 实测数据 |  |
| 收入热量之和 | | Σ*Q* | kJ/炉 | Σ*Q*=*Q*1+*Q*2+*Q*3+*Q*4+*Q*5+*Q*6 |  |
| 二、热支出项 | | | | |  |
| 1 | 粗铜或高镍锍带走热 | *Q'*1 | kJ/炉 | *Q'*1=*m'*1**·** *c'*1**·** ( *t'*1 - *t*e ) |  |
| 1) 粗铜或高镍锍质量 | *m'*1 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 粗铜或高镍锍温度 | *t'*1 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 粗铜或高镍锍比热 | *c'*1 | kJ/(kg **·**℃ ) | 测试或计算 |  |
| 2 | 转炉渣带走热 | *Q'*2 | kJ/炉 | *Q*'2=*m'*2**·** *c'*2**·** ( *t'*2 - *t*e ) |  |
| 1) 转炉渣质量 | *m'*2 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 转炉渣温度 | *t'*2 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 转炉渣比热 | *c'*2 | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 3 | 喷溅物带走热 | *Q'*3 | kJ/炉 | *Q'*3=*m'*3**·** *c'*3**·** ( *t'*3 - *t*e ) |  |
| 1) 喷溅物质量 | *m'*3 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 喷溅物温度 | *t'*3 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 喷溅物比热 | *c'*3 | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 4 | 烟气带走热 | *Q'*4 | kJ/炉 | *Q'*4=*m*y**·** *c*y**·** ( *t*y - *t*e ) |  |
| 1) 烟气质量 | *m*y | kg/炉 | 测算 |  |
| 2) 烟气温度 | *t*y | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 烟气比热 | *c*y | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 5 | 逸散烟气带走热 | *Q*ys | kJ/炉 | *Q*ys=*m*ys**·** *c*ys**·** ( *t*ys - *t*e ) |  |
| 1) 逸散烟气质量 | *m*ys | kg/炉 | 测算 |  |
| 2) 逸散烟气温度 | *t*ys | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 逸散烟气比热 | *c*ys | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 6 | 出口烟尘带走热 | *Q'*5 | kJ/炉 | *Q'*5=*m*yc **·***c*yc**·** ( *t*y - *t*e ) |  |
| 1) 烟尘质量 | *m*yc | kg/炉 | 测算 |  |
| 2) 烟尘温度 | *t*y | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 烟尘比热 | *c*yc | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 7 | 水分蒸发吸热 | *Q'*6 | kJ/炉 | *Q'*6=Σ*mi***·** ( *h*y - *hi* ) |  |
| 1) 空气、熔剂等含水质量 | *mwi* | kg/炉 | 计算数据 |  |
| 2) 入炉水焓值 | *hi* | kJ/kg | 查表 |  |
| 3) 出口水蒸气的焓值 | *h*y | kJ/kg | 查表 |  |
| 8 | 表面散热量 | *Q'*7 | kJ/炉 | *Q'*7=*K*b**·***A***·** *θ*z**·** ( *t*b - *t*e ) |  |
| 1) 表面积 | *A* | *m*² | 查图纸 |  |

表8 （续）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 8 | 2) 表面温度 | *t*lb | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 综合换热系数 | *k*b | kJ/(m²**·**h**·**℃) | 计算 |  |
| 4) 总操作时间 | *θ*z | h | 实测时间 |  |
| 9 | 辐射散热量 | *Q'*8 | kJ/炉 | *Q'*8= *ε* **·** *σ*o**·** *A*k**·** *θz-*j**·** *φ*× **·**  [()4 - )4] |  |
| 1) 黑度系数 | *ε* |  | 查表 |  |
| 2) 黑体辐射系数 | *σ*0 | W/(m² **·**K4) | 查表 |  |
| 3) 炉口面积 | *A*g | m² | 实测数据 |  |
| 4) 停吹时间 | *θ*z-j | h | 实测数据 |  |
| 5) 遮敞系数 | *φ* |  | 查表 |  |
| 6) 炉口温度 | *t*lk | ℃ | 实测数据 |  |
| 7) 环境温度 | *t*e | ℃ | 实测数据 |  |
| 10 | 冷却水带走热 | *Q'*9 | kg/炉 | *Q'*9=*m*w **·***c*w **·** ( *two* - *twi* ) |  |
| 1) 冷却水质量 | *m*w | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 冷却水出口温度 | *two* | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 冷却水进口温度 | *twi* | ℃ | 实测数据 |  |
| 4) 冷却水比热 | *c*w | kJ/(kg **·**℃) | 查表 |  |
| 11 | 差值 | Δ*Q* | kJ/炉 | △*Q=*Σ*Q*-(*Q'*1+*Q'*2+*Q'*3+*Q'*4+  *Q'*5+*Q'*6+*Q'*7+*Q'*8+*Q'*9+*Q*ys） |  |
| 支出热量之和 | | *ΣQ'* | kJ/炉 | Σ*Q*'=*Q*'1+*Q*'2+*Q*'3+*Q*'4+*Q*'5+  *Q*'6+*Q*'7+*Q*'8+*Q*'9+*Q*ys+Δ*Q* |  |

### 7.1.2 余热锅炉热平衡计算

余热锅炉热平衡计算按表9规定内容进行。

表9 余热锅炉热平衡计算表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 一、热收入项 | | | | | |
| 1 | 进口烟气带入热 | *Q'4* | kJ/炉 | *Q'4=m*y***·*** *c*y***·***( *t*y *- t*e ) |  |
| 1) 烟气质量 | *m*y | kg/炉 | 测算 |  |
| 2) 烟气温度 | *t*y | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 烟气比热 | *c*y | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 2 | 进口烟尘带入热 | *Q'5* | kJ/炉 | *Q'5=m*yc***·*** *c*yc***·***( *t*y *- t*e ) |  |
| 1) 烟尘质量 | *m*yc | kg/炉 | *m*yc=*m'*4*+m'*5 |  |
| 2) 烟尘温度 | *t*y | ℃ | 实测数据 |  |

表9 （续）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项 目 | 符号 | 单位 | 计算依据 | 数值 |
| 2 | 3) 烟尘比热 | *c*yc | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 3 | 给水带入热 | *Q*g | kJ/炉 | *Q*g*=m*g***·*** *h*g |  |
| 1) 给水质量 | *m*g | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 给水温度 | *t*g | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 给水压力 | *p*g | MPa | 实测数据 |  |
| 4) 给水热焓 | *h*g | kJ/kg | 查表 |  |
| 热收入总计 | | ∑*Q* | kJ/炉 | ∑*Q=Q'*4*+Q'*5*+Q*g |  |
| 二、热支出项 | | | | | |
| 1 | 出口烟气带走热 | *Q'*y | kJ/炉 | *Q'y* = *m'*y **·** *c'*y **·** ( *t'*y - *t*e ) |  |
| 1) 烟气质量 | *m'*y | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 烟气温度 | *t'*y | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 烟气比热 | *c'*y | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 2 | 沉降烟尘带走热 | *Q'*c4 | kJ/炉 | *Q'c*4 = *m'*4 **·** *c'*c4 **·** ( *t'*4 - *t*e ) |  |
| 1) 烟尘质量 | *m'*4 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 烟尘温度 | *t'*4 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 烟尘比热 | *c'*c4 | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 3 | 出口烟尘带走热 | *Q'*c5 | kJ/炉 | *Q'*c5=*m'*5 **·** *c'*c5 **·** ( *t'*y - *t*e ) |  |
| 1) 烟尘质量 | *m'*5 | kg/炉 | *m'*5=*V'*y **·** *d*u **·** *θ*j /1000 |  |
| 2) 烟尘温度 | *t'*y | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 烟尘比热 | *c'*c5 | kJ/(kg **·**℃) | 测试或计算 |  |
| 4 | 蒸汽带走热 | *Q'*g1 | kJ/炉 | *Q'*g1 = *m'*g1 **·** *h'*g1 |  |
| 1) 蒸汽质量 | *m'*g1 | kg/炉 | 实测数据 |  |
| 2) 蒸汽温度 | *t'*g1 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 蒸汽压力 | *p'*g1 | MPa | 实测数据 |  |
| 4) 蒸汽热焓 | *h'*g1 | kJ/kg | 查表 |  |
| 5 | 排污水带走热 | *Q'*g2 | kJ/炉 | *Q'*g2 = *m'*g2 **·** *h'*g2 |  |
| 1) 排污水质量 | *m'*g2 | kg/炉 | 实测计算 |  |
| 2) 排污水温度 | *t'*g2 | ℃ | 实测数据 |  |
| 3) 排污水热焓 | *h'*g2 | kJ/kg | 查表 |  |
| 6 | 表面散热损失 | *Q'*b | kJ/炉 | *Q'*b=*K*b **·** *A*b **·** *θ*z **·** ( *t*b - *t*e ) |  |
| 1) 表面温度 | *t*b | ℃ | 实测数据 |  |
| 2) 表面积 | *A*b | m² | 查图纸或实测 |  |
| 3) 综合换热系数 | *K*b | kJ/(m²**·** h**·**℃) | 计算 |  |
| 4) 散热时间 | *θ*s | h | 实测数据 |  |
| 7 | 差值 | △*Q′* | kJ/炉 | △*Q'*=*∑Q* - (*Q'*y+*Q'*c4+*Q'*c5+*Q'*g1  +*Q'*g2+*Q'*b) |  |
| 热支出总计 | | *∑Q'* | kJ/炉 | *∑Q'*=*Q'*y+*Q'*c4+*Q'*c5+*Q'*g1  +*Q'*g2+*Q'*b+△*Q'* |  |

## 7.2 热平衡表

### 7.2.1 吹炼转炉热平衡表

吹炼转炉热平衡计算结果按表10填写。

表10 吹炼转炉热平衡表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 热收入 | | | | 热支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| kg/炉 | % | kg/炉 | % |
| *Q*1 | 铜冰铜或低冰镍带入热 |  |  | *Q'*1 | 粗铜或高镍锍带走热 |  |  |
| *Q*2 | 氧化反应放热 |  |  | *Q'*2 | 转炉渣带走热 |  |  |
| *Q*3 | 造渣反应放热 |  |  | *Q'*3 | 喷溅物带走热 |  |  |
| *Q*4 | 入炉空气带入热 |  |  | *Q'*4 | 烟气带走热 |  |  |
| *Q*5 | 鼓入氧气带入热 |  |  | *Q*'5 | 出口烟尘带走热 |  |  |
| *Q*6 | 其他物料带入热 |  |  | *Q*'6 | 水分蒸发吸热 |  |  |
|  |  |  |  | *Q'*7 | 表面散热量 |  |  |
|  |  |  |  | *Q*'8 | 辐射散热量 |  |  |
|  |  |  |  | *Q*'9 | 冷却水带走热 |  |  |
|  |  |  |  | *Q*ys | 逸散烟气带走热 |  |  |
|  |  |  |  | ∆*Q* | 差值 |  |  |
| ∑Q | 合计 |  | 100 | *∑Q'* | 合计 |  | 100 |

### 7.2.2 余热锅炉热平衡表

余热锅炉热平衡计算结果按表11填写。

表11 余热锅炉热平衡表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 热收入 | | | | 热支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| kg/炉 | % | kg/炉 | % |
| *Q'*4 | 进口烟气带入热 |  |  | *Q'*y | 出口烟气带走热 |  |  |
| *Q'*5 | 进口烟尘带入热 |  |  | *Q'*c4 | 沉降烟尘带走热 |  |  |
| *Q'*g | 给水带入热 |  |  | *Q'*c5 | 出口烟尘带走热 |  |  |
|  |  |  |  | *Q'*g1 | 蒸汽带走热 |  |  |
|  |  |  |  | *Q'*g2 | 排污水带走热 |  |  |
|  |  |  |  | *Q'*b | 表面散热损失 |  |  |
|  |  |  |  | ∆*Q'* | 差值 |  |  |
| *∑Q* | 合计 |  | 100 | *∑Q'* | 合计 |  | 100 |

## 7.3 热效率

7.3.1 吹炼转炉热效率(***η***lx)

吹炼转炉热效率*η*LX按公式（1）计算：

**×100%………………………… (1)

式中：

*Q'*1——粗铜或高镍锍带走热，kJ/炉；

*Q'*2——转炉渣带走热，kJ/炉；

*Q*1——铜冰铜或低冰镍带入热，kJ/ 炉；

*Q*2——氧化反应放热，kJ/炉；

*Q*3——造渣反应放热，kJ/ 炉；

*Q*4——入炉空气带入热，kJ/炉；

*Q*5——鼓入氧气带入热，kJ/炉；

*Q*6——其他物料带入热，kJ/炉。

7.3.2 余热回收率(***η***yr)

吹炼转炉余热回收率(ηyr)按公式（2）计算：

……………………………………(2)

式中：

*Q'g*1——蒸汽带走热，kJ/炉；

*Q'*4——余热锅炉进口烟气带入热，kJ/炉；

*Q'*5——余热锅炉进口烟尘带入热，kJ/炉；

*Q*g ——余热锅炉给水带入热，kJ/炉。

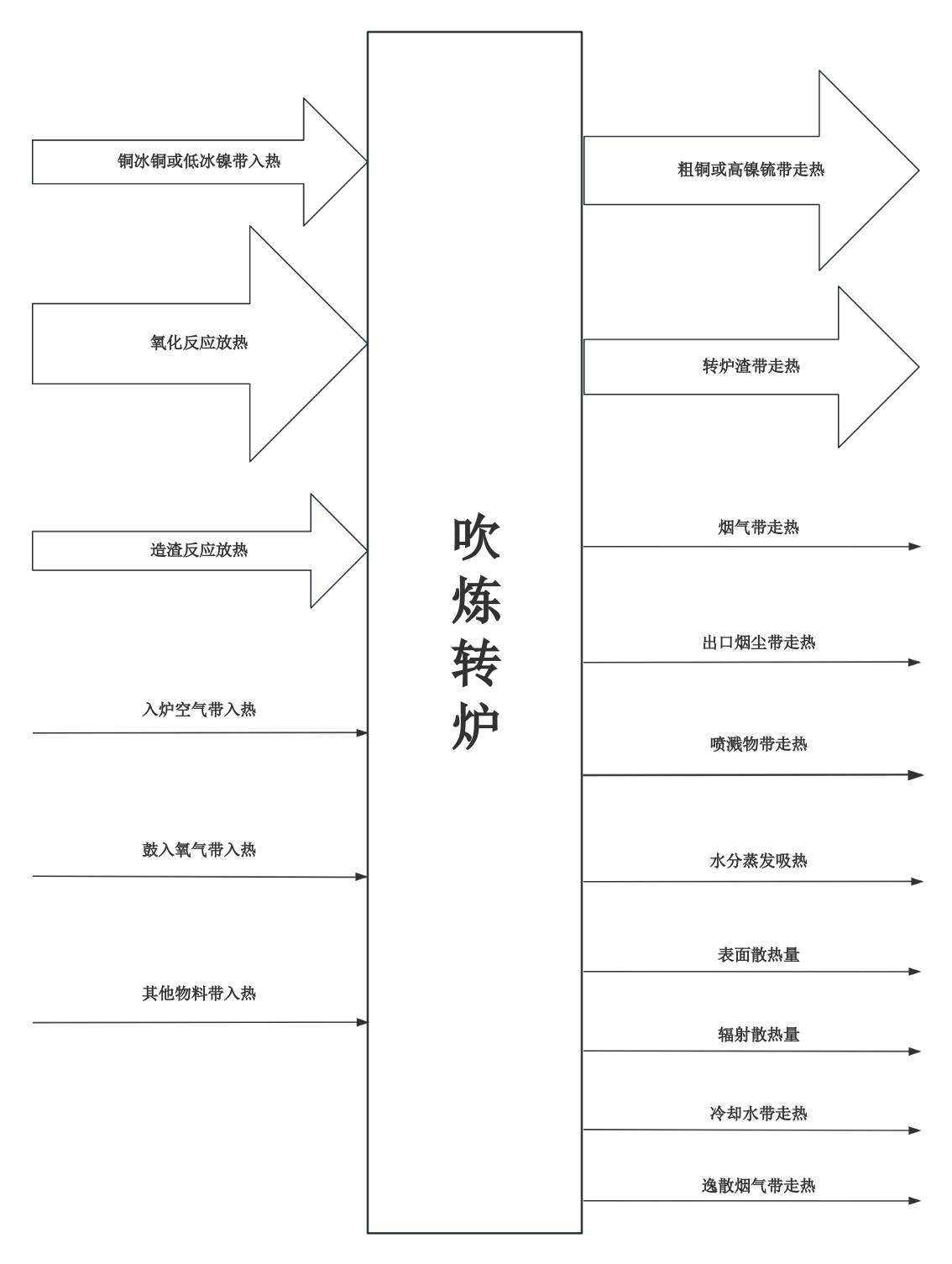
7.3.3 炉子系统热效率(***η***xt)

………………………… (3)

式中符号意义同上。

## 7.4 热流图

根据热平衡测定结果绘制吹炼转炉热流图，如图2所示。



# 8 主要能耗指标

按表12规定计算主要能耗指标。

表12 吹炼转炉主要能耗指标

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 符号 | 计算公式 | 单位 | 数值 |
| 1 | 单位产品空气消耗量 | *V*α | *V*k/*m'*1 | m3/t |  |
| 2 | 单位产品氧气消耗量 | *V*β | *V*o/*m'*1 | m3/t |  |
| 3 | 鼓风利用率 | *η*gf | (*V*k+*V*o)氧**·**造 /(*V*k+*V*o)鼓**×**100% | % |  |
| 4 | 送风时率 | *η*sf | *θ*j /*θ*z×100% | % |  |

# 9 热平衡测定结果分析与改进建议

9.1 对设备工艺状况、操作制度、能源消耗等进行分析。

9.2 评价热效率及主要技术指标。

9.3 节能改造途径。

9.4 改进建议及研究课题。

# 附 录 A

# (资料性)

# 本文件使用统一量的符号

本文件中所使用统一量的符号见表A.1。

表**A.1** 本文件使用统一量的符号

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 量的名称 | 量的符号 | 单位 |
| 1 | 质量 | *m* | kg |
| 2 | 热量 | *Q* | kJ |
| 3 | 体积 | *V* | m3 |
| 4 | 压力（压强） | *p* | Pa |
| 5 | 密度（重度） | *ρ* | kg/m3 |
| 6 | 面积 | *A* | m2 |
| 7 | 热焓 | Δ*H* | kJ/kg |
| 8 | 温度 | *t* | ℃ |
| 9 | 时间 | *θ* | h(小时) |
| 10 | 含水量 | *w* | % |
| 13 | 黑度 | *ε* | - |
| 14 | 炉窑热效率 | *η*lx | - |
| 15 | 余热锅炉余热回收率 | *η*yr | - |
| 16 | 炉子系统热效率 | *η*xt | - |
| 17 | 鼓风利用率 | *η*gf | - |
| 18 | 送风时率 | *η*sf | - |
| 19 | 出口烟气成分 | *α*yi | % |
| 20 | 逸散烟气成分 | *α*ys | % |
| 21 | 比热（容） | *c* | kJ/(kg **·**℃) |
| 22 | 余热锅炉出口烟气带走烟尘含尘浓度 | *d*u | kg |
| 23 | 比焓 | *h* | kJ/kg |
| 24 | 综合换热系数 | *k*b | kJ/(m²·h·℃) |
| 25 | 氧气纯度 | *x* | % |
| 26 | 炉体黑体辐射系数 | *σ*0 | W/(m² ·K4) |
| 27 | 遮敞系数 | *φ* | - |

# 附 录 B

# (规范性)

# 水和水蒸汽性质表

本文件中水和水蒸汽焓（饱和状态）性质见表 B.1。

表B.1 水和水蒸汽焓（饱和状态）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 温度 | 压力 | 焓 | |
| t/℃ | *p* /MPa | *h*(水) /kJ/kg | *h`*(蒸汽) /kJ/kg |
| 0 | 0.000611 | 0 | 2501.6 |
| 10 | 0.0012274 | 41.99 | 2520 |
| 20 | 0.0023377 | 83.86 | 2538 |
| 30 | 0.0042428 | 125.65 | 2556.5 |
| 40 | 0.0073771 | 167.47 | 2574.5 |
| 50 | 0.0012339 | 209.26 | 2592 |
| 60 | 0.0199271 | 251.08 | 2609.6 |
| 70 | 0.031176 | 292.99 | 2626.8 |
| 80 | 0.047372 | 334.9 | 2643.5 |
| 90 | 0.070092 | 376.94 | 2660.3 |
| 100 | 0.10136 | 419.06 | 2676.2 |
| 110 | 0.1433 | 461.3 | 2695.5 |
| 120 | 0.19861 | 503.71 | 2705.9 |
| 130 | 0.27023 | 546.29 | 2719.7 |
| 140 | 0.3615 | 589.12 | 2733.1 |
| 150 | 0.47618 | 632.16 | 2745.3 |
| 160 | 0.61832 | 675.46 | 2756.6 |
| 170 | 0.79226 | 719.12 | 2767.1 |
| 180 | 1.003 | 763.13 | 2776.3 |
| 190 | 1.2556 | 807.51 | 2784.2 |
| 200 | 1.5554 | 852.39 | 2790.9 |
| 210 | 1.9084 | 897.73 | 2796.4 |
| 220 | 2.3207 | 943.66 | 2799.7 |
| 230 | 2.7986 | 990.26 | 2801.8 |
| 240 | 3.3489 | 1037.5 | 2802.2 |
| 250 | 3.9789 | 1085.6 | 2800.6 |
| 260 | 4.6959 | 1135 | 2796.4 |
| 270 | 5.5077 | 1185.3 | 2789.7 |
| 280 | 6.4224 | 1236.8 | 2780.4 |
| 290 | 7.4478 | 1290 | 2767.5 |
| 300 | 8.5956 | 1345.2 | 2751.1 |
| 310 | 9.8734 | 1402.6 | 2730.2 |
| 320 | 11.2933 | 1462.5 | 2703.8 |
| 330 | 12.8668 | 1526.5 | 2670.3 |

# 附 录 C

# (资料性)

# 常见气体的平均体积热容

本文件中所使用的常见气体平均体积热容见表C.1。

表C.1常见气体在不同温度下的平均体积热容

单位为千焦每立方米摄氏度

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t/℃ | 干空气 | 湿空气 | 水蒸气 | O₂ | N₂ | CO | H₂ | CO₂ | SO₂ | CH₄ | C₂H₄ |
| 0 | 1.298 | 1.323 | 1.495 | 1.306 | 1.294 | 1.298 | 1.277 | 1.599 | 1.733 | 1.549 | 1.825 |
| 100 | 1.302 | 1.327 | 1.507 | 1.319 | 1.298 | 1.302 | 1.290 | 1.700 | 1.813 | 1.641 | 2.064 |
| 200 | 1.306 | 1.336 | 1.524 | 1.336 | 1.298 | 1.306 | 1.298 | 1.788 | 1.888 | 1.758 | 2.282 |
| 300 | 1.315 | 1.344 | 1.541 | 1.357 | 1.306 | 1.314 | 1.298 | 1.863 | 1.955 | 1.888 | 2.495 |
| 400 | 1.327 | 1.356 | 1.566 | 1.377 | 1.315 | 1.327 | 1.302 | 1.930 | 2.018 | 2.014 | 2.688 |
| 500 | 1.344 | 1.369 | 1.591 | 1.398 | 1.327 | 1.344 | 1.306 | 1.989 | 2.068 | 2.139 | 2.864 |
| 600 | 1.357 | 1.386 | 1.616 | 1.415 | 1.340 | 1.357 | 1.310 | 2.043 | 2.114 | 2.261 | 3.027 |
| 700 | 1.369 | 1.398 | 1.641 | 1.436 | 1.352 | 1.373 | 1.314 | 2.089 | 2.152 | 2.378 | 3.169 |
| 800 | 1.382 | 1.411 | 1.666 | 1.449 | 1.365 | 1.386 | 1.318 | 2.098 | 2.181 | 2.495 | 3.308 |
| 900 | 1.398 | 1.427 | 1.696 | 1.465 | 1.377 | 1.389 | 1.322 | 2.169 | 2.215 | 2.600 | 3.433 |
| 1000 | 1.411 | 1.440 | 1.725 | 1.478 | 1.390 | 1.411 | 1.331 | 2.202 | 2.236 | 2.700 | 3.546 |
| 1100 | 1.424 | 1.453 | 1.750 | 1.491 | 1.403 | 1.424 | 1.335 | 2.236 | 2.261 | 2.788 | 3.655 |
| 1200 | 1.432 | 1.461 | 1.775 | 1.503 | 1.415 | 1.436 | 1.344 | 2.265 | 2.278 | 2.864 | 3.751 |
| 1300 | 1.444 | 1.474 | 1.788 | 1.511 | 1.424 | 1.449 | 1.352 | 2.290 | 2.299 | 2.889 |  |

# 附 录 D

(资料性)

常见气体的平均体积热容

本文件中所使用的常见气体平均体积热容见表D.1。

表D.1 常见气体在不同温度下的平均体积热容

单位为千焦每立方米摄氏度

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t/℃ | 干空气 | 湿空气 | 水蒸气 | O₂ | N₂ | CO | H₂ | CO₂ | SO₂ | CH₄ | C₂H₄ |
| 0 | 1.298 | 1.323 | 1.495 | 1.306 | 1.294 | 1.298 | 1.277 | 1.599 | 1.733 | 1.549 | 1.825 |
| 100 | 1.302 | 1.327 | 1.507 | 1.319 | 1.298 | 1.302 | 1.290 | 1.700 | 1.813 | 1.641 | 2.064 |
| 200 | 1.306 | 1.336 | 1.524 | 1.336 | 1.298 | 1.306 | 1.298 | 1.788 | 1.888 | 1.758 | 2.282 |
| 300 | 1.315 | 1.344 | 1.541 | 1.357 | 1.306 | 1.314 | 1.298 | 1.863 | 1.955 | 1.888 | 2.495 |
| 400 | 1.327 | 1.356 | 1.566 | 1.377 | 1.315 | 1.327 | 1.302 | 1.930 | 2.018 | 2.014 | 2.688 |
| 500 | 1.344 | 1.369 | 1.591 | 1.398 | 1.327 | 1.344 | 1.306 | 1.989 | 2.068 | 2.139 | 2.864 |
| 600 | 1.357 | 1.386 | 1.616 | 1.415 | 1.340 | 1.357 | 1.310 | 2.043 | 2.114 | 2.261 | 3.027 |
| 700 | 1.369 | 1.398 | 1.641 | 1.436 | 1.352 | 1.373 | 1.314 | 2.089 | 2.152 | 2.378 | 3.169 |
| 800 | 1.382 | 1.411 | 1.666 | 1.449 | 1.365 | 1.386 | 1.318 | 2.098 | 2.181 | 2.495 | 3.308 |
| 900 | 1.398 | 1.427 | 1.696 | 1.465 | 1.377 | 1.389 | 1.322 | 2.169 | 2.215 | 2.600 | 3.433 |
| 1000 | 1.411 | 1.440 | 1.725 | 1.478 | 1.390 | 1.411 | 1.331 | 2.202 | 2.236 | 2.700 | 3.546 |
| 1100 | 1.424 | 1.453 | 1.750 | 1.491 | 1.403 | 1.424 | 1.335 | 2.236 | 2.261 | 2.788 | 3.655 |
| 1200 | 1.432 | 1.461 | 1.775 | 1.503 | 1.415 | 1.436 | 1.344 | 2.265 | 2.278 | 2.864 | 3.751 |
| 1300 | 1.444 | 1.474 | 1.788 | 1.511 | 1.424 | 1.449 | 1.352 | 2.290 | 2.299 | 2.889 |  |

