中华人民共和国工业和信息化部　发布

YS

××××-××-××实施

××××-××-××发布

重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法

(塔式锌精馏炉)

**Methods of determination and calculation of heat balance in**

**metallurgical furnaces for heavy non-ferrous metals**

**Zine refining column**

**（送审稿）**

（2015.1.24）

YS/TXXXXX—XXXX

代替YS∕T 118.12-1992

中华人民共和国有色金属行业标准

ICS 77.120

CCS H 01

**目次**

[目 次 I](#_Toc18352)

[前 言 II](#_Toc18352)

[1 范围 1](#_Toc19715)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc8384)

3 术语和定义 1

[4 热平衡测定与计算基准 1](#_Toc24407)

[5 设备概况与生产工艺流程 1](#_Toc14489)

[6 热平衡测定条件 2](#_Toc26224)

[7 热平衡测定项目与方法 3](#_Toc1541)

[8 物料平衡 7](#_Toc27177)

[9 热平衡及热效率计算 8](#_Toc31364)

[10 主要能耗指标 1](#_Toc17099)4

[11 热平衡测定结果分析和改进建议 1](#_Toc12001)4

[附 录A标准使用统一量的符号 1](#_Toc18352)5

[附 录B水和水蒸汽性质表 1](#_Toc18352)6

附 录C重有色冶金炉中常见物理化学反应表 18

[附 录D气体燃料的平均比热 2](#_Toc19715)1

[附 录E常见物质的定压比热 2](#_Toc8384)2

附 录F常见气体的平均定压容积比热 24

[附 录G某些硫化物及氧化物在高温下平均比热 2](#_Toc24407)5

# 

# 前 言

本部分按照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/T118.12-1992《重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方案（塔式锌精馏炉）》，与YS/T118.12-1992相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下:

a)增加了技术指标“天然气流量”（见6.3）；

b)增加了测定项目“粗铅产量”、“入炉天然气流量”、“入炉天然气温度”、“入炉天然气成分”、“天然气发热值”（见第7章）；

c)增加了物料平衡及与热平衡有关的数据项目“入炉天然气质量”和“粗铅产量”（见8.1）

d)增加了物料平衡项目“入炉天然气质量”、“粗铅产量”（见8.2）；

e)增加了铅（B#）塔热平衡计算项目“天然气带入热”、“天然气燃烧热”、“空气带入热”、“入塔粗<B#>锌带入热”项目（见9.1）；

f)增加了镉塔热平衡计算项目“金属锌沸点温度”“金属锌气态比热”项目（见9.1）；

g)增加了铅（B#）塔总体热平衡项目“天然气带入热”、“天然气燃烧热”、“空气带入热”、“入塔粗<B#>锌带入热”（见9.2）；

h)增加了镉塔总体热平衡项目“天然气带入热”、“天然气燃烧热”、“空气带入热”、“入塔含镉锌带入热”项目（见9.2）；

i)增加了“铅（B#）塔热流图”及“镉塔热流图”（见9.4）；

j)更改了生产工艺流程示意图中的燃料项目，用天然气替代了煤气（见5.2，1992年版的4.2）；

k)更改了热平衡计算中“总热收入”计算公式（见9.1，1992年版的8.1）；

l)更改了铅（B#）塔、镉塔热平衡计算热支出项，用“回流锌蒸发热”代替回流部位散热损失（见9.1，1992年版的8.1）；

m)更改了热平衡计算中“高镉锌升温蒸发热”项的计算公式（见9.1，1992年版的8.1）；

n)更改了“有效热”“热收入”的计算公式（见9.3，1992年版的8.3）；

o)更改了主要耗能指标“单位产品热耗”、“单位炉料热耗”、“单位产品燃烧消耗”的计算公式（见第10章，1992年版的第9章）；

p)删除了“煤气预热温度”技术参数（见1992年版的5.2）；

q)删除了“入炉煤气流量”、“入炉煤气温度”、“入炉煤气成分”、“煤气发热值”测定项目（见1992年版的第6章）；

r)删除了物料平衡计算中“入炉煤气质量”项（见1992年版的7.1）；

s)删除了物料平衡表中“入炉煤气质量”项（见1992年版的7.2）；

t)删除了热平衡计算表中“煤气带入热”、“煤气燃烧热”、“烟气CO含量”项（见1992年版的8.1）；

u)删除了热平衡表中“煤气带入热”、“煤气燃烧热”项（见1992年版的8.2）；

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/TC243）归口。

本文件起草单位：深圳市中金岭南有色金属股份有限公司韶关冶炼厂、深圳市中金岭南有色金属股份有限公司、中南大学、矿冶科技集团有限公司、葫芦岛锌业股份有限公司、株洲火炬工业炉有限责任公司、韶关市节能技术中心。

本文件主要起草人员：苏飞、王国富、李旭、刘宇航、刘紫薇、刘柳、闫红杰、黄正宗、江秋月、戴汝鹏、李良东、孟庆武、熊家政、汪洋洋、林冬、郭儒。

本文件所代替文件的历次版本发布情况为:

—1992年首次发布为YS/T118.12-1992；

—本次为第一次修订。

重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法

(塔式锌精馏炉)

# 1 范围

本文件规定了塔式锌精馏炉的规范性引用文件、术语和定义、热平衡测定与计算基准、设备概况和工艺流程、热平衡测定条件、热平衡测定项目和方法、物料平衡、热平衡及热效率计算、主要能耗指标和热平衡测定结果分析与改进建议。

本文件适用于塔式锌精馏炉热平衡测定和计算。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

GB/T 2587 《用能设备能量平衡通则》

GB/T 17357 《设备及管道绝热层表面热损失现场测定热流计法和表面温度法》

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

4.1基准温度

采用精馏炉送风口处的环境温度。

4.2燃烧用空气

采用空气的体积百分数。即O2：21.0％、N2 79.0％。

4.3燃料发热量

采用实际测得的应用基低（位）发热量。

4.4热平衡测定范围

铅塔（B#塔）锌精馏炉；镉塔锌精馏炉（不包括熔化炉、精炼炉、纯锌槽）。

4.5计算单位

塔式锌精馏炉为连续作业炉，物料平衡和热平衡计算单位以kg/h和kJ/h为基准。

5 设备概况与生产工艺流程

5.1设备概况

塔式锌精馏炉用于冶炼精锌，运用连续分馏原理分布脱除粗锌中的杂质，即用铅塔脱除高沸点杂质、镉塔脱除低沸点杂质。铅塔及镉塔的状况按表1填写。

表1 塔式锌精馏炉设备概况（镉、铅、B#塔）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 单位 | 规格 | 数值 |
| 1 | 塔盘外形尺寸 | mm | mm×mm×mm |  |
| 2 | 塔盘受热总面积 | m2 |  |  |
| 3 | 塔盘数量 | 块 |  |  |
| 4 | 塔体高度 | mm |  |  |
| 5 | 冷凝器冷却面积 | m2 |  |  |
| 6 | 换热室换热面积 | m2 |  |  |

5.2生产工艺流程示意图

精馏炉生产工艺流程见图1

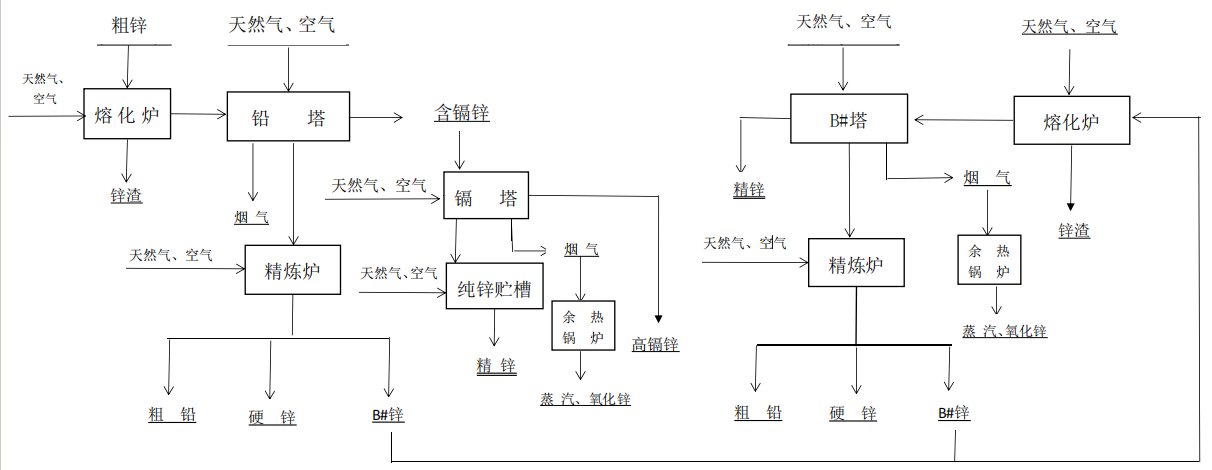


图1 塔式锌精馏炉生产工艺流程示意图

6 热平衡测定条件

6.1测定期间的生产条件

测定时原料（粗锌）与燃料（天然气）的成分、规格及加入量应达到工艺规定值，测定期应生产稳定，主要工艺参数在工艺要求规定的指标范围内，产量达到正常水平。

6.2测定时间

锌精馏炉的生产是连续的，炉况一般是稳定的，因此测定各参数时可以不同时进行。本标准规定的测定周期为一周，测定单元为一个班时，测定时间在炉役中间。

6.3测定前炉窑运行技术参数

按表2规定填写测定前一个月塔式锌精馏炉运行技术参数。

表2 测定前一个月塔式锌精馏炉运行技术参数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **技术指标** | **单位** | **数值** | **备注** |
| 1 | 炉日处理量 | t/d |  |  |
| 2 | 炉顶馏出物产量 | t/d |  | 铅塔为含镉锌，B#塔为精锌，镉塔为高镉锌。 |
| 3 | 炉顶馏出物温度 | ℃ |  |  |
| 4 | 炉底馏出物产量 | t/d |  | 铅塔、B#塔馏出物为B#锌、硬锌及粗铅，镉塔为精锌。 |
| 5 | 炉底馏出物温度 | ℃ |  |  |
| 6 | 入炉锌液温度 | ℃ |  |  |
| 7 | 燃烧室温度 | ℃ |  | 以燃烧室上部温度为参考 |
| 8 | 空气预热温度 | ℃ |  |  |
| 9 | 直升墙排烟温度 | ℃ |  |  |
| 10 | 换热室排烟温度 | ℃ |  |  |
| 11 | 天然气流量 | Nm3/h |  |  |

7 热平衡测定的项目与方法

热平衡测定项目与方法按表3执行。

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** |
| 铅  （B#）  塔 | 1、铅塔粗锌加料量 | m1 | kg/h | 车间称重点 | 磅秤 | 每次加料 | 累计平均值 |  |
| 2、粗锌中铅、铁浓度 |  | % | 入炉口 | 光谱仪 | 每班 | 累计平均值 |  |
| 3、含镉锌（精锌）产量 | m2 | kg/h |  |  |  | 累计平均值 |  |
| 4、B#锌产量 | m3 | kg/h | 车间称重点 | 磅秤 | 每次放锌 | 累计平均值 |  |
| 5、硬锌产量 | m4 | kg/h | 车间称重点 | 磅秤 | 每次捞硬锌 | 累计平均值 |  |
| 6、粗铅产量 | m5 | kg/h | 车间称重点 | 磅秤 | 每次放底铅 | 累计平均值 |  |
| 7、入炉天然气流量 | V1 | m3/h | 单炉天然气管 | 流量计 | 每小时 | 累计平均值 |  |
| 8、入炉空气流量 | V2-k | m3/h |  |  |  | 按天然气流量，烟气流量，烟气成分做氧或氮平衡计算 |  |
| 9、出炉烟气流量 | V3-y | m3/h | 精馏炉两侧烟道 | 皮托管 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 10、粗锌入塔温度 | t1 | ℃ | 铅塔加料器 | 热电偶 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 11、出炉顶含镉锌（精锌）蒸汽温度 | t2 | ℃ |  |  |  | 取锌沸点温度 |  |
| 12、出炉底B#锌温度 | t3 | ℃ | 下延部流槽 | 热电偶 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 13、入炉天然气温度 | t4 | ℃ | 入炉燃气管 | 温度计 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 14、出炉烟气温度 | t5 | ℃ | 精馏炉两侧烟道 | 热电偶 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 15、环境温度 | te | ℃ | 精馏炉进风口 | 水银温度计 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 16、燃烧室、换热室表面温度 | tei | ℃ | 炉体表面 | 点温计 | 每测试单元四次 | 区域平均值 |  |
| 17、燃烧室、换热室表面辐射强度 | lei | kJ/(m2∙h) | 距炉体表面0.1米处 | 辐射强度计 | 每测试单元四次 | 区域平均值 |  |
| 18、燃烧室、换热室表面附近环境温度 | tei | ℃ | 距炉体表面0.5-1米处 | 点温计 | 每测试单元四次 | 区域平均值 |  |
| 19、入炉天然气成分 |  | Vol.% | 入炉天然气管 | 气质分析报告 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 20、出炉烟气成分 |  | Vol.% | 精馏炉两侧烟道 | 气质分析报告 | 每测试单元两次 | 算术平均值 | CO2 H2O NOx |
| 21、天然气发热值 | QyDW | kJ/m3 |  |  |  | 按天然气成分计算 |  |
| 镉  塔 | 1、含镉锌加料量 | m1 | kg/h |  |  |  | 累计平均值 |  |
| 2、含镉锌镉浓度 |  | % | 入炉口 | 光谱仪 | 每班 | 累计平均值 |  |
| 3、高镉锌产量 | m2 | kg/h |  | 磅秤 | 每班 | 累计平均值 |  |
| 4、精锌产量 | m3 | kg/h |  | 磅秤 | 每班 | 累计平均值 |  |
| 5、入炉天然气流量 | V1 | m3/h | 入炉天然气管 | 流量计 | 每小时 | 算术平均值 |  |
| 6、入炉空气流量 | V2-k | m3/h |  |  |  | 按天然气流量，烟气流量，烟气成分做氧或氮平衡计算 |  |
| 7、出炉烟气流量 | V3-y | m3/h | 精馏炉两侧烟道 | 皮托管 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 8、入塔含镉锌温度 | t1 | ℃ | 镉塔加料器 | 热电偶 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 9、出塔顶高镉锌蒸汽温度 | t2 | ℃ |  |  |  | 取锌沸点温度 |  |
| 10、出塔底精锌温度 | t3 | ℃ | 下延部流槽 | 热电偶 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 11、入炉天然气温度 | t4 | ℃ | 入炉天然气管 | 水银温度计 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 12、出炉烟气温度 | t5 | ℃ | 精馏炉两侧烟道 | 热电偶 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 13、环境温度 | te | ℃ | 精馏炉进风口 | 水银温度计 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 14、燃烧室、换热室表面温度 | tei | ℃ | 炉体表面 | 点温计 | 每测试单元四次 | 区域平均值 |  |
| 15、燃烧室、换热室表面辐射强度 | lei | kJ/(m2∙h) | 距炉体表面0.1米处 | 辐射强度计 | 每测试单元四次 | 区域平均值 |  |
| 16、燃烧室、换热室表面附近环境温度 | tei | ℃ | 距炉体表面0.5-1米处 | 点温计 | 每测试单元四次 | 区域平均值 |  |
| 17、入炉天然气成分 |  | Vol.% | 入炉天然气管 | 气质分析报告 | 每测试单元两次 | 算术平均值 |  |
| 18、天然气发热值 | QyDW | kJ/m3 |  |  |  | 按天然气成分计算 |  |
| 19、出炉烟气成分 |  | Vol.% | 精馏炉两侧烟道 | 气质分析报告 | 每测试单元两次 | 算术平均值 | CO2 H2O NOx |
| 20 、高镉锌成分 |  | Vol.% | 小冷凝器出口 | 化学分析 | 每测试单元两次 | 算术平均值 | Zn Cd |

8 物料平衡

8.1物料平衡计算

按表4规定进行物料平衡计算。

表4 物料平衡及与热平衡有关的数据计算表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 符号 | 单位 | 依据或计算式 | 数值 |
| 铅（B#） 塔 | | | | | |
| 1 | 铅塔加料量 | m1 | kg/h | 测试值 |  |
| 2 | 含镉锌（精锌）产量 | m2 | kg/h | 测试值 |  |
| 3 | B#锌产量 | m3 | kg/h | 测试值 |  |
| 4 | 硬锌产量 | m4 | kg/h | 测试值 |  |
| 5 | 粗铅产量 | m5 | kg/h | 测试值 |  |
| 6 | 入炉天然气质量 | m6 | kg/h | ρ1·V1 |  |
| （1） | 天然气密度 | ρ1 | kg/m3 | 按天然气成分查表计算 |  |
| （2） | 入炉天然气流量 | V1 | m3/h | 测试值 |  |
| 7 | 入炉空气质量 | m6-k | kg/h | ρ2·V2-k |  |
| （1） | 空气的密度 | ρ2 | kg/m3 | 查表 |  |
| （2） | 入炉空气流量 | V2-k | m3/h | 计算值 |  |
| 8 | 出炉烟气质量 | m7-k | kg/h | ρ3·V3-y |  |
| （1） | 烟气密度 | ρ3 | kg/m3 | 按烟气成分查表计算 |  |
| （2） | 出炉烟气流量 | V3-y | m3/h | 测试（计算）值 |  |
| **镉塔** | | | | | |
| 1 | 含镉锌加料量 | m1 | kg/h | 测试值 |  |
| 2 | 高镉锌产量 | m2 | kg/h | 测试值 |  |
| 3 | 精锌产量 | m3 | kg/h | 测试值 |  |
| 4 | 入炉天然气质量 | m4 | kg/h | ρ1·V1 |  |
| （1） | 天然气密度 | ρ1 | kg/m3 | 按天然气成分查表计算 |  |
| （2） | 入炉天然气流量 | V1 | m3/h | 测试值 |  |
| 5 | 入炉空气质量 | m5-k | kg/h | ρ1·V2-k |  |
| （1） | 空气密度 | ρ2 | kg/m3 | 查表 |  |
| （2） | 入炉空气流量 | V2-k | m3/h | 计算值 |  |
| 6 | 出炉烟气质量 | m6-y | kg/h | ρ3.V3-y |  |
| （1） | 烟气密度 | ρ3 | kg/m3 | 按烟气成分查表计算 |  |
| （2） | 出炉烟气流量 | V3-y | m3/h | 测试（计算）值 |  |

8.2物料平衡表

将测试值及计算值填入表5、表6。

表5 物料平衡表（铅/B# 塔）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 收入 | | | | 支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| kg/h | % | kg/h | % |
| m1 | 铅塔粗锌加料量 |  |  | m2 | 含镉锌(精锌)产量 |  |  |
| m6 | 入炉天然气质量 |  |  | m3 | B#锌产量 |  |  |
| m6-k | 入炉空气质量 |  |  | m4 | 硬锌产量 |  |  |
|  |  |  |  | m5 | 粗铅产量 |  |  |
|  |  |  |  | m7-k | 出炉烟气质量 |  |  |
|  |  |  |  |  | 差值 |  |  |
|  | 合计 |  | 100% |  | 合计 |  | 100% |

表6 物料平衡表（镉塔）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 收入 | | | | 支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| kg/h | % | kg/h | % |
| m1 | 含镉锌加料量 |  |  | m2 | 高镉锌产量 |  |  |
| m4 | 入炉天然气质量 |  |  | m3 | 精锌产量 |  |  |
| m5-k | 入炉空气质量 |  |  | m6-y | 出炉烟气质量 |  |  |
|  |  |  |  |  | 差值 |  |  |
|  | 合计 |  | 100% |  | 合计 |  | 100% |

9 热平衡及热效率计算

9.1热平衡计算

按表7的规定进行热平衡计算

表7 热平衡计算表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 符号 | 项目 | 符号 | 单位 | 依据或算式 | 数值 |
| 铅（B#）塔热平衡计算 | | | | | |
| 一、热收入项 | | | | | |
| 1 | 天然气带入热 | Q1 | kJ/h | C1·V1·[t4-te] |  |
| （1） | 天然气比热 | C1 | kJ/(m3·℃) | 按天然气成分查表计算 |  |
| （2） | 入炉天然气流量 | V1 | m3/h | 测试值 |  |
| （3） | 入炉天然气温度 | t4 | ℃ | 测试值 |  |
| （4） | 环境温度 | te | ℃ | 测试值 |  |
| 2 | 天然气燃烧热 | Q2 | kJ/h | QyDW·V1 |  |
| （1） | 天然气发热值 | QyDW | kJ/m3 | 测试值 |  |
| 3 | 空气带入热 | Q3 | kJ/h | C2·V2-k·[t4-k-te] |  |
| （1） | 空气比热 | C2 | kJ/(m3·℃) | 按te查表计算 |  |
| （2） | 入炉空气流量 | V2-k | m3/h | 计算值 |  |
| （3） | 入炉空气温度 | t4-k | ℃ | 测试值 |  |
| 4 | 入塔粗<B#>锌带入热 | Q4 | kJ/h | m1·C3·[t1-te] |  |
| （1） | 铅塔粗锌加料量 | m1 | kg/h | 测试值 |  |
| （2） | 入炉粗锌比热 | C3 | kJ/(m3·℃) | 按t1查表计算 |  |
| （3） | 粗锌入塔温度 | t1 | ℃ | 测试值 |  |
| 5 | 总热收入 | ∑Q | kJ/h | Q1+Q2+Q3+Q4 |  |
| 二、热支出项 | | | | | |
| 1 | 含镉锌(精锌)升温蒸发热 | Q1’ | kJ/h | m2[C4(t2-te)+r1] |  |
| （1） | 含镉锌(精锌)产量 | m2 | kg/h | 计算值 |  |
| （2） | 金属锌液态比热 | C4 | kJ/(kg·℃) | 按t1~t2查表 |  |
| （3） | 出塔顶含镉锌(精锌)蒸汽温度 | t2 | ℃ | 取锌沸点温度（查表） |  |
| （4） | 粗锌入塔温度 | t1 | ℃ | 测试值 |  |
| （5） | 金属锌汽化潜热 | r1 | kJ/kg | 查表 |  |
| 2 | B#锌、硬锌、粗铅升温热 | Q2’ | kJ/h | (m3+m4+m5)·C4·(t3-te) |  |
| （1） | B#锌产量 | m3 | kg/h | 测试值 |  |
| （2） | 硬锌产量 | m4 | kg/h | 测试值 |  |
| （3） | 粗铅产量 | m5 | kg/h | 测试值 |  |
| （4） | 出炉底B#锌、硬锌、粗铅混合物温度 | t3 | ℃ | 测试值 |  |
| 3 | 回流锌蒸发热 | Q3’ | kJ/h | m·r1 |  |
| （1） | 回流锌量 | m | kg/h | m=0.175~0.25m1  原料含铅、铁高时取最大值 |  |
| 4 | 出炉烟气带出热 | Q4’ | kJ/h | C3-y·V3-y·(t5-te) |  |
| （1） | 烟气比热 | C3-y | kJ/(m3·℃) | 按烟气成分及t5查表 |  |
| （2） | 出炉烟气流量 | V3-y | m3/h | 测试值 |  |
| （3） | 出炉烟气温度 | t5 | ℃ | 测试值 |  |
| 5 | 燃烧室、换热室表面散热 | Q5’ | kJ/h |  |  |
| （1） | 散热面划分数 | n | 块 | 按实际情况划分 |  |
| （2） | 某散热面面积 | Ai | m3 | 查图或实测 |  |
| （3） | 某散热面平均辐射强度 | Iei | kJ/(m2·h) | 测试值 |  |
| （4） | 某散热面表面平均温度 | ti | ℃ | 测试值 |  |
| （5） | 某散热面表面附近环境温度 | tei | ℃ | 测试值 |  |
| （6） | 散热表面对流给热系数 | α |  | 4.1816(ti-tei)0.25·B  垂直表面B=2.2  向上表面B=2.7  向下表面B=2.17 |  |
| 6 | 差值 | ΔQ |  | ∑Q-(Q1’+Q2’+Q3’+Q4’+Q5’) |  |
| 7 | 总热支出 | ∑Q’ |  | Q1’+Q2’+Q3’+Q4’+Q5’+ΔQ |  |
| 8 | 误差 |  |  | ≤5% |  |
| 镉塔热平衡计算 | | | | | |
| 一、热收入项 | | | | | |
| 1 | 天然气带入热 | Q1 | kJ/h | C1·V1·[t4-te] |  |
| （1） | 天然气比热 | C1 | kJ/m3·℃ | 按天然气成分及t4查表计算 |  |
| （2） | 入炉天然气流量 | V1 | m3/h | 测试值 |  |
| （3） | 入炉天然气温度 | t4 | ℃ | 测试值 |  |
| （4） | 环境温度 | te | ℃ | 测试值 |  |
| 2 | 天然气燃烧热 | Q2 | kJ/h | QyDW·V1 |  |
| （1） | 天然气发热值 | QyDW | kJ/m3 | 测试值 |  |
| 3 | 空气带入热 | Q3 | kJ/h | C2-y·V2-k·[t4-k-te] |  |
| （1） | 空气比热 | C2-y | kJ/(m3·℃) | 按te查表计算 |  |
| （2） | 入炉空气流量 | V2-k | m3/h | 测试值 |  |
| （3） | 入炉空气温度 | t4-k | ℃ | 测试值 |  |
| 4 | 入塔含镉锌带入热 | Q4 | kJ/h | m1·C4·[t1-te] |  |
| （1） | 铅塔含镉锌加料量 | m1 | kg/h | 测试值 |  |
| （2） | 金属锌液态比热 | C4 | kJ/(m3·℃) | 按t1查表计算 |  |
| （3） | 入塔含镉锌温度 | t1 | ℃ | 测试值 |  |
| 5 | 总热收入 | ∑Q | kJ/h | Q1+Q2+Q3+Q4 |  |
| 二、热支出项 | | | | | |
| 1 | 高镉锌升温蒸发热 | Q1’ | kJ/h | m2[Zn][C2(t8-te)+r1+C5(t2-t8)]  +m2[Cd][C3(t7-te)+r2+C4(t2-t7)] |  |
| （1） | 高镉锌产量 | m2 | kg/h | 测试值 |  |
| （2） | 高镉锌含Zn | [Zn] | % | 测试值 |  |
| （3） | 高镉锌含Cd | [Cd] | % | 测试值 |  |
| （4） | 出炉顶高镉锌蒸汽温度 | t2 | ℃ | 取锌沸点温度（查表） |  |
| （5） | 环境温度 | te | ℃ | 测试值 |  |
| （6） | 金属锌沸点温度 | t8 | ℃ | 查表 |  |
| （7） | 金属镉沸点温度 | t7 | ℃ | 查表 |  |
| （8） | 金属锌汽化潜热 | r1 | kJ/kg | 查表 |  |
| （9） | 金属镉汽化潜热 | r2 | kJ/kg | 查表 |  |
| （10） | 金属锌液态比热 | C2 | kJ/(kg·℃) | 查表 |  |
| （11） | 金属镉液态比热 | C3 | kJ/(kg·℃) | 查表 |  |
| （12） | 金属锌汽态比热 | C5 | kJ/(kg·℃) | 查表 |  |
| （13） | 金属镉汽态比热 | C4 | kJ/(kg·℃) | 查表 |  |
| 2 | 精锌升温热 | Q2’ | kJ/h | m3·C5·(t2-te) |  |
| （1） | 精锌产量 | m3 | kg/h | 测试值 |  |
| 3 | 回流锌蒸发热 | Q3’ | kJ/h | m·r1 |  |
| （1） | 回流锌量 | m | kg/h | m=0.4~0.55m1  原料含镉高时取最大值 |  |
| 4 | 出炉烟气带出热 | Q4’ | kJ/h | C4-y·V3-y·(t5-te) |  |
| （1） | 烟气比热 | C4-y | kJ/m3·℃ | 按烟气成分及t5查表计算 |  |
| （2） | 出炉烟气流量 | V3-y | m3/h | 测试（计算）值 |  |
| （3） | 出炉烟气温度 | t5 | ℃ | 测试（计算）值 |  |
| 5 | 燃烧室、换热室表面散热 | Q5’ | kJ/h |  |  |
| （1） | 散热面划分数 | n | 块 | 按实际情况划分 |  |
| （2） | 某散热面积 | Ai | m3 | 查图或实测 |  |
| （3） | 某散热面平均辐射强度 | Iei | kJ/m2·h | 测试值 |  |
| （4） | 某散热面平均温度 | ti | ℃ | 测试值 |  |
| （5） | 某散热面表面附近环境温度 | tei | ℃ | 测试值 |  |
| （6） | 散热表面对流给热系数 | α |  | 4.1816(ti-tei)0.25·G  垂直表面G=2.2  向上表面G=2.7  向下表面G=2.17 |  |
| 6 | 差值 | ΔQ | kJ/h | ∑Q-(Q1’+Q2’+Q3’+Q4’+Q5’) |  |
| 7 | 总热支出 | ∑Q’ | kJ/h | Q1’+Q2’+Q3’+Q4’+Q5’+ΔQ |  |
| 8 | 误差 |  |  | ≤5% |  |

9.2热平衡表

将热平衡计算结果填入热平衡表8、表9。

表8 铅（B#）塔总体热平衡表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 收入 | | | | 支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数据 | | 符号 | 项目 | 数据 | |
| 103 kJ/h | ％ | 103 kJ/h | ％ |
| Q1 | 天然气带入热 |  |  | Q1’ | 含镉锌(精锌)升温蒸发热 |  |  |
| Q2 | 天然气燃烧热 |  |  | Q2’ | B#锌、硬锌、粗铅升温热 |  |  |
| Q3 | 空气带入热 |  |  | Q3’ | 回流锌蒸发热 |  |  |
| Q4 | 入塔粗<B#>锌带入热 |  |  | Q4’ | 出炉烟气带出热 |  |  |
|  |  |  |  | Q5’ | 燃烧室、换热室表面散热 |  |  |
|  |  |  |  | ΔQ | 差值 |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| ∑Q | 合计 |  | 100 | ∑Q1’ | 合计 |  | 100 |

表9 镉塔总体热平衡表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 收入 | | | | 支出 | | | |
| 符号 | 项目 | 数值 | | 符号 | 项目 | 数值 | |
| 103 kJ/h | ％ | 103 kJ/h | ％ |
| Q1 | 天然气带入热 |  |  | Q1’ | 高镉锌升温蒸发热 |  |  |
| Q2 | 天然气燃烧热 |  |  | Q2’ | 精锌升温热 |  |  |
| Q3 | 空气带入热 |  |  | Q3’ | 回流锌蒸发热 |  |  |
| Q4 | 入塔含镉锌带入热 |  |  | Q4’ | 出炉烟气带出热 |  |  |
|  |  |  |  | Q5’ | 燃烧室、换热室表面散热 |  |  |
|  |  |  |  | ΔQ | 差值 |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| ∑Q | 合计 |  | 100 | ∑Q1’ | 合计 |  | 100 |

9.3热效率计算

9.3.1塔式锌精馏炉有效热Qyx

塔式锌精馏炉有效热按公式（1）计算：

Qyx=Q1’+Q2’+Q3’-Q4.....................................................（1）

式中：

Q1’—高镉锌升温蒸发热，单位为103kJ/h

Q2’—精锌升温热，单位为103kJ/h

Q3’—回流锌蒸发热，单位为103kJ/h

Q4 —入塔含镉锌带入热，单位为103kJ/h

9.3.2塔式锌精馏炉热收入QGG

塔式锌精馏炉热收入按公式（2）计算：

QGG=Q1+Q2+Q3+Q4.........................................................（2）

式中：

Q1—天然气带入热，单位为103kJ/h

Q2—天然气燃烧热，单位为103kJ/h

Q3—空气带入热，单位为103kJ/h

Q4 —入塔含镉锌带入热，单位为103kJ/h

9.3.3塔式锌精馏炉热效率ηLx

塔式锌精馏炉热效率按公式（3）计算：

ηLx=(Qyx/QGG)×100％...................................................（3）

9.4热流图

根据精馏炉的热平衡项目，绘制热流图。

入炉粗<B#>锌带入热

B#锌、硬锌、粗铅升温热热%2.89%

精馏炉表面散热

天然气带入热

回流锌蒸发热

空气带入热

**铅**

**（B#）**

**塔**

**热**

**流**

**图**

含镉锌/精锌蒸发带走热01%2.89%

天然气燃烧热

出炉烟气带走热

图2 铅（B#）塔热流图

入炉含镉锌带入热

精锌升温热

精馏炉表面散热

天然气带入热

回流锌蒸发热

空气带入热

**镉**

**塔**

**热**

**流**

**图**

高镉锌蒸发带走热2.89%

天然气燃烧热

出炉烟气带走热

图3 镉塔热流图

10 主要能耗指标

按表10的规定进行计算。

表10 主要能耗指标

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 符号 | 单位 | 计算公式 | 数值 |
| 1 | 单位产品热耗 | QCH | kJ/t | (Q1+Q2+Q3+Q4)×1000/A\* |  |
| 2 | 单位炉料热耗 | QLL | kJ/t | (Q1+Q2+Q3+Q4)×1000/B\* |  |
| 3 | 单位产品燃料消耗 | QRL | m3/t | (Q1+Q2+Q3+Q4) ×1000/(QyDW×A\*) |  |

注：A\*在铅塔中指含镉锌产量；在镉塔中指精锌产量。

B\*在铅塔中指粗锌净加入量；在镉塔中指含镉锌加入量。

11 热平衡测定结果分析和改进建议

11.1对设备结构、操作制度的分析。

11.2评价热效率及主要技术经济指标。

11.3节能改造途径。

11.4改进建议及研究课题。

附 录 A

（参考件）

标准中所使用的符号见表A。

表A 标准使用统一量的符号

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 | 速度 | u | m/s |  |
| 5 | 压力 | P | Pa |  |
| 6 | 密度（重度） | ρ | kg/m3 |  |
| 7 | 面积 | A | m2 |  |
| 8 | 含值 | i | kJ/kg |  |
| 9 | 热焓 | ∆H | kJ/kg |  |
| 10 | 温度 | t | ℃ |  |
| 11 | 时间 | T | h(小时) |  |
| 12 | 潜热 | r | kJ/kg |  |
| 13 | 空气系数 | ɑ |  |  |
| 14 | 热流 | Φ | kJ/(m2·h) |  |
| 15 | 辐射强度 | le | kJ/(m2·h) |  |
| 16 | 百分含量 | a | ％ |  |
| 17 | 含水率 | ω | ％ |  |
| 18 | 电量 | W | kw·h |  |
| 19 | 黑度 | ε |  |  |
| 20 | 炉窑热效应 | ηLX | ％ |  |
| 21 | 余热回收率 | ηyr | ％ |  |
| 22 | 系统热效应 | ηxt | ％ |  |

附 录 B

（参考件）

标准中水和水蒸汽性质见表B。

表B 水和水蒸汽性质表

饱和状态

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 温度 | | 压力 | 含 | |
| t ℃ | T K | P bar | h′(水) kJ/kg | h′′(蒸汽) kJ/kg |
| 0 | 273.15 | 0.0061 | -0.0416 | 2501 |
| 1 | 274.15 | 0.0065 | 4.17 | 2503.4 |
| 5 | 278.15 | 0.0087 | 21.01 | 2510.7 |
| 10 | 283.16 | 0.0122 | 41.99 | 2519.9 |
| 15 | 288.15 | 0.0170 | 62.94 | 2529.1 |
| 20 | 293.15 | 0.0233 | 83.86 | 2538.2 |
| 25 | 298.15 | 0.0316 | 104.77 | 2547.3 |
| 30 | 303.15 | 0.0424 | 125.66 | 2556.4 |
| 35 | 308.15 | 0.0562 | 146.56 | 2565.4 |
| 40 | 313.15 | 0.0737 | 167.45 | 2576.2 |
| 45 | 318.15 | 0.0998 | 188.35 | 2583.3 |
| 50 | 323.15 | 0.1233 | 209.26 | 2592.2 |
| 55 | 328.15 | 0.1574 | 230.17 | 2601.0 |
| 60 | 333.15 | 0.1992 | 251.09 | 2609.7 |
| 65 | 338.15 | 0.2501 | 272.02 | 2618.4 |
| 70 | 343.15 | 0.3116 | 292.97 | 2626.9 |
| 75 | 348.15 | 0.3835 | 313.94 | 2635.4 |
| 80 | 353.15 | 0.4736 | 334.92 | 2643.8 |
| 85 | 358.15 | 0.5780 | 355.92 | 2652.0 |
| 90 | 363.15 | 0.7011 | 376.94 | 2660.1 |
| 95 | 368.15 | 0.8453 | 397.99 | 2668.1 |
| 100 | 373.15 | 1.0133 | 419.06 | 2676.0 |
| 105 | 378.15 | 1.2080 | 440.17 | 2683.7 |
| 110 | 383.15 | 1.4327 | 461.32 | 2691.3 |
| 115 | 388.15 | 1.6906 | 482.50 | 2698.7 |
| 120 | 393.15 | 1.9854 | 503.72 | 2706.0 |
| 125 | 398.15 | 2.3210 | 524.99 | 2713.0 |

续表B 水和水蒸汽性质表

饱和状态

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 温度 | | 压力 | 含 | |
| t ℃ | T K | P bar | h′(水) kJ/kg | h′′(蒸汽) kJ/kg |
| 130 | 403.15 | 2.7013 | 546.31 | 2719.9 |
| 135 | 408.15 | 3.131 | 567.68 | 2726.6 |
| 140 | 413.15 | 3.614 | 589.10 | 2733.1 |
| 145 | 418.15 | 4.115 | 610.60 | 2739.3 |
| 150 | 423.15 | 4.760 | 632.15 | 2745.4 |
| 155 | 428.15 | 5.433 | 653.78 | 2751.2 |
| 160 | 433.15 | 6.181 | 675.47 | 2756.7 |
| 165 | 438.15 | 7.008 | 697.25 | 2762.0 |
| 170 | 443.15 | 7.920 | 719.12 | 2767.1 |
| 175 | 448.15 | 8.924 | 741.07 | 2771.8 |
| 180 | 453.15 | 10.027 | 763.12 | 2776.3 |
| 185 | 458.15 | 11.233 | 785.26 | 2780.4 |
| 190 | 463.15 | 12.551 | 807.52 | 2784.3 |
| 195 | 468.15 | 13.987 | 829.88 | 2787.8 |
| 200 | 473.15 | 15.549 | 852.37 | 2790.9 |
| 210 | 483.15 | 19.077 | 897.74 | 2796.2 |
| 220 | 493.15 | 23.198 | 943.67 | 2799.9 |
| 230 | 503.15 | 27.976 | 920.26 | 2802.0 |
| 240 | 513.15 | 33.478 | 1037.6 | 2802.2 |
| 250 | 523.15 | 39.776 | 1085.8 | 2800.4 |
| 260 | 533.15 | 46.943 | 1134.9 | 2796.4 |
| 270 | 543.15 | 55.053 | 1185.2 | 2789.9 |
| 280 | 553.15 | 64.202 | 1236.8 | 2780.4 |
| 290 | 563.15 | 74.461 | 1290.0 | 2867.6 |
| 300 | 573.15 | 85.927 | 1345.0 | 2751.0 |
| 310 | 583.15 | 98.700 | 1402.4 | 2730.0 |
| 320 | 593.15 | 112.89 | 1462.6 | 2703.7 |
| 330 | 603.15 | 128.63 | 1526.5 | 2670.2 |
| 340 | 613.15 | 146.05 | 1595.5 | 2626.2 |
| 350 | 623.15 | 165.35 | 1671.9 | 2567.7 |
| 360 | 633.15 | 186.75 | 1764.2 | 2485..5 |
| 370 | 643.15 | 210.54 | 1890.2 | 2342.8 |
| 374 | 647.15 | 220.80 | 2046.3 | 2155.0 |
| 374.15 | 647.30 | 221.20 | 2107.4 | 2107.4 |

临 界 常 数

温度 374.15℃ 含 2107.4 kJ/kg

压力 221.20 bar 比熵 4.4429 kJ/kg

比容 0.00317 m3/kg

附 录 C

(补充件)

标准中涉及的物理化学反应见表C。

表C 重有色冶金炉中常见物理化学反应表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 反应式 | H 298 | | 备注 |
| kcal/kg | k/kg |
| 2FeS+302=2FeO+2SO2 | -1275 | -5332 | 按FeS计 |
| 3FeS+5O2=Fe3O4+3SO2 | -1561 | -6527 | 按FeS计 |
| 4FeS+7O2=2Fe2O3+4SO2 | -1667 | -6971 | 按FeS计 |
| 4FeS2+11O2=2Fe2O3+8SO2 | -1645 | -6879 | 按FeS2计 |
| FeS+10Fe2O3=7Fe3O4+SO2 | 780 | 3262 | 按FeS计 |
| FeS+6CuO=3SCu2O+SO2+FeO | -106 | -443 | 按FeS2计 |
| FeS2=FeS+1/2S2 | -134 | -560 | 按FeS2计 |
| FeS=Fe+S | 259 | 1083 | 按FeS计 |
| FeO+C=Fe+CO | 520 | 2174 | 按FeO计 |
| 4Fe2O3+3C=8FeO+CO2+2CO | 203 | 849 | 按Fe2O3计 |
| 2Fe+O2+SiO2=2FeO ·SiO2 | -2320 | - 9701 | 按SiO2计 |
| 2FeS+3O2+SiO2=2FeO·SiO2+2SO2 | - 3940 | -16476 | 按SiO2计 |
| 2NiS+3O2=2NiO+2SO2 | - 1235 | -5164 | 按NiS计 |
| NiO+C=Ni+CO | 429 | 1794 | 按NiO计 |
| 2PbS+3O2=2PbO+2SO2 | - 421 | -1760 | 按PbS计 |
| PbS+2PbO=3Pb+SO2 | 230 | 962 | 按PbS计 |
| PbS+2O2=PbSO4 | -823 | -3441 | 按PbS计 |
| Pb(OH)2=PbO+H2O | 53.3 | 223 | 按P(OH)2计 |
| PbO+C=Pb+CO | 115 | 481 | 按PbO计 |
| 2CuS+3O2=2CuO+2SO2 | -1010 | -4223 | 按CuS计 |
| 2C2S+3O2=2Cu2O+2SO2 | -578 | -2417 | 按Cu2S计 |
| Cu2S+2O2=2CuO+SO2 | -797 | -3333 | 按Cu2S计 |
| Cu2S+2Cu2O=6Cu+SO2 | 220 | 920 | 按Cu2S计 |
| 2CaFeS2+6O2=Cu2O+Fe2O3+4SO2 | -1311 | -5482 | 按CaFeS2计 |
| 2CuFeS2-C=2S+2FeS+S | - 400 | -1673 | 按S计 |
| 2Cu3FeS3=3Cu2S+2FeS+S | -400 | -1673 | 按S计 |
| CuO+C=Cu+CO | 137 | 573 | 按CuO计 |

续表C 重有色冶金炉中常见物理化学反应表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 反应式 | H 298 | | 备注 |
| kcal/kg | k/kg |
| 2ZnS+3O2=2ZnO+2SO2 | -1085 | -4537 | 按ZnS计 |
| ZnS+2O2=ZnSO4 | -1910 | -7987 | 按ZnS计 |
| Zn(OH)2=ZnO+H2O | 129.3 | 541 | 按Zn(OH)2计 |
| ZnO+C=Zn+CO | 700 | 2927 | 按ZnO计 |
| 2Sb2S3+9O2=2Sb2O3+6SO2 | -1010 | -4223 | 按Sb2S3计 |
| Sb2S3+3Fe=2Sb+3FeS | -96 | -401 | 按Sb2S3计 |
| 3Na2O+Sb2S3=3Na3S+Sb2O3 | -273 | -1142 | 按Sb2S3计 |
| S+O2=SO2 | -2220 | -9283 | 按S计 |
| 2S+3O2=2SO3 | -2950 | -12336 | 按S计 |
| 2SO2+4C=S2+4CO | 284 | 1188 | 按SO2计 |
| CaCO3=CaO+CO2 | 378 | 1581 | 按石灰中CaCO3计 |
| CaCO3=CaO+CO2 | 425 | 1777 | 按结晶中CaCO3计 |
| Ca(OH)2=CaO+H2O | 358 | 1497 | 按Zn(OH)2计 |
| CaSO4·2H2O=CaSO4+2H2O | 147 | 615 | 按CaSO4·2H2O计 |
| CaSO4·2H2O=CaSO4(H2O)0.5+1.5H2O | 98 | 410 | 按CaSO4·2H2O计 |
| CaSO4=CaS+2O2 | 1670 | 6983 | 按CaSO4计 |
| 2CaO+ SiO2=2CaO·SiO2 | -364 | -1522 | 按SiO2计 |
| CaO+SiO2=CaO·SiO2 | -343 | -1434 | 按SiO2计 |
| CaO+A12O3=CaO·A12O3 | -370 | -1547 | 按CaO计 |
| CaMg(CO3)2=CaMgO2+2CO2 | 400 | 1673 | 按CaMg(CO3)2计 |
| MgCO3=MgO+ CO2 | 314 | 1313 | 按MgCO3计 |
| Mg(OH)2=MgO+H2O | 344 | 1438 | 按Mg(OH)2计 |
| MgO+C=Mg+CO | 2930 | 12252 | 按MgO计 |
| 2CdS+3O2=2CdO+2SO2 | -684 | -2860 | 按CdS计 |
| CdS+2O2=CdSO4 | -1299 | -5432 | 按CdS计 |
| Na2CO3=Na2O+CO2 | 725 | 3032 | 按Na2CO3计 |
| Na2O·A12O3·3SiO2=Na2O+A12O3+3SiO2 | 181 | 757 | 按反应物计 |
| Na2O+SiO2=Na2O·SiO2 | -1150 | -4621 | 按SiO2计 |

续表C 重有色冶金炉中常见物理化学反应表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 反应式 | H 298 | | 备注 |
| kcal/kg | k/kg |
| Na2O+A12O3=Na2O·A12O3 | -887 | -3709 | 按Na2O计 |
| Na2O+Fe2O3=Na2O·Fe2O3 | -684 | -2860 | 按Na2O计 |
| 2A1(OH)3=A12O3+3H2O | 276 | 1154 | 按A1(OH)3计 |
| 3A12O3+ 2SiO2=3A12O3·SiO2 | -1545 | -6461 | 按SiO2计 |
| MnO+SiO2=MnO·SiO2 | -65 | -272 | 按SiO2计 |
| CO2+C=2CO | 955 | 3993 | 按CO2计 |
| SnO2+2C=Sn+2CO | 570 | 2384 | 按SnO2计 |
| 2SnO2+3C=2Sn+2CO+CO2 | 434 | 1815 | 按SnO2计 |
| CuCO3·Cu(OH)2=Cu2O+CO2+0.5O2+H2O | 261 | 1092 | 按CuCO3·Cu(OH)2计 |
| 2CuS=Cu2S+S | 18o | 753 | 按CuS计 |
| 2 FeO+SiO2=2 FeO·SiO2 | -182 |  | 按SiO2计 |

附 录 D

(补充件)

标准中涉及气体燃料的平均比热见表D。

表D 气体燃料的平均比热 (P=760mmHg)kJ/m3·T

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| t℃ | 发生炉煤气 | 炼焦煤气 | 水煤气 | 天然气 |
| 0 | 1.313 | 1.364 | 1.648 | 1.564 |
| 100 | 1.328 | 1.405 | 1.686 | 1.665 |
| 200 | 1.338 | 1.443 | 1.719 | 1.765 |
| 300 | 1.355 | 1.489 | 1.757 | 1.886 |
| 400 | 1.368 | 1.531 | 1.790 | 2.012 |
| 500 | 1.385 | 1.569 | 1.824 | 2.129 |
| 600 | 1.397 | 1.602 | 1.857 | 2.246 |
| 700 | 1.414 | 1.644 | 1.891 | 2.355 |
| 800 | 1.430 | 1.681 | 1.924 | 2.464 |
| 900 | 1.447 | 1.719 | 1.953 | 2.568 |
| 1000 | 1.460 | 1.753 | 1.983 | 2.669 |
| 1100 | 1.471 | 1.786 | 2.012 | 2.752 |
| 1200 | 1.489 | 1.815 | 2.037 | 2.828 |
| 1300 | 1.502 | 1.840 | 2.058 | 2.865 |
| 1400 | 1.514 | 1.861 | 2.079 | 2.886 |

附 录 E

(补充件)

标准中涉及常见物质的定压比热见表E。

表G 常见物质的定压比热

计算公式：Cp=a+bT+CT2 或 Cp=a+bT+C′/T2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 物 质 | 温度范围  K | Cp298  kJ/kg·℃ | 方程式Cp=φ(T)的系数 | | | |
| a | b·103 | C′·10-5 | C·106 |
| 石墨 C | 298~2300 | 0.721 | 1.430 | 0.365 | -0.733 |  |
| 铅 Pb | 273~600.5 | 0.0309 | 0.0298 | 0.00772 |  |
| 铜 Cu | 298~1357 | 0.385 | 0.356 | 0.0987 |  |
| 单斜晶S | 368.6~392 | 0.737 | 0.464 | 0.908 |  |
| 斜方晶S | 298~368.6 | 0.704 | 0.467 | 0.814 |  |
| 锌 Zn | 298~692.7 | 0.394 | 0.352 | 0.158 |  |
| 氯化钡BaC1 | 273~1193 | 0.0931 | 0.0880 | 0.0173 |  |
| 方解石CaCO3 | 298~1200 | 0.818 | 1.044 | 0.219 | -0.259 |
| 氯化钙CaC12 | 298~1055 | 0.654 | 0.647 | 0.115 | -0.023 |
| 氧化钙CaO | 298~1800 | 0.763 | 0.870 | 0.081 | 0.116 |
| 氢氧化钙Ca(OH)2 | 276～373 | 1.140 | 1.203 |  |  |
| 硫酸钙CaSO4 | 273~1373 | 0.175 | 0.136 | 0.161 | -0.012 |
| 氯化铜CuCl2 | 273~773 | 0.591 | 0.522 | 0.264 |  |
| 氯化亚铜CaCl | 298~695 |  | 0.444 | 0.410 |  |
| 硫酸铜CuSO4 | 273~873 | 0.631 | 0.673 | 0.113 | -0.056 |
| 氧化铜CuO | 298~1250 | 0.531 | 0.487 | 0.252 |  |
| 氧化亚Cu2O | 298~1200 | 0.444 | 0.435 | 0.167 |  |
| 菱铁矿FeCO3 | 298~885 | 0.708 | 0.420 | 0.967 |  |
| 氧化亚铁FeO | 298~1200 | 0.669 | 0.690 | 0.094 | -0.043 |
| 黄铁矿FeS2 | 273~773 | 0.516 | 0.373 | 0.466 |  |
| 赤铁矿Fe2O3 | 298~1100 | 0.655 | 0.812 | 0.451 | -0.0807 |
| 磁铁矿Fe3O4 | 298~1100 | 0.619 | 0.721 | 0.341 | -0.181 |
| 菱镁MgCO3 | 298~750 | 0.895 | 0.923 | 0.684 | -0.206 |
| 氯化钠NaC1 | 298~1073 | 0.850 | 0.786 | 0.279 |  |
| 碳酸钠Na2CO3 |  | 1.037 | 0.885 | 1.279 |  |

续表G 常见物质的定压比热

计算公式：Cp=a+bT+CT2 或 Cp=a+bT+C′/T2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 物 质 | 温度范围  K | Cp298  kJ/kg·℃ | 方程式Cp=φ(T)的系数 | | | |
| a | b·103 | C′·10-5 | C·106 |
| 硅酸钠 Na2SiO3 | 298~1361 | 0.915 | 1.076 | 0.329 | -0.222 |  |
| 硫酸镍 NiSO4 |  | 0.893 | 0.813 | 0.268 |  |  |
| 氯酸铅 PbCI2 | 298~771 | 0.277 | 0.240 | 0.120 |  |  |
| 红的氧化铅PbO | 298~1000 | 0.221 | 0.199 | 0.075 |  |  |
| 卵黄的氧化铅PbO | 298~900 | 0.217 | 0.170 | 0.120 |  |  |
| 硫酸铅 PbSO4 | 298~1100 | 0.343 | 0.151 | 0.427 | 0.058 |  |
| α一石英SiO2 | 298~848 | 0.739 | 0.781 | 0.571 | -0.188 |  |
| β一石英SiO2 | 848~2000 |  | 1.003 | 0.135 |  |  |
| 氧化锌 ZnO | 298~1600 | 0.494 | 0.602 | 0.063 |  | -0.112 |
| 硫化锌 ZnS | 298~1200 | 0.463 | 0.522 | 0.053 | -0.058 |  |
| 硫酸锌 ZnSO4 | 298~1000 | 0.725 | 0.442 | 0.539 |  |  |

附 录 F

(补充件)

标准中涉及的常见气体的平均定压容积比热见表D。

表H 常见气体的平均定压容积比热 （单位：kJ/kg·℃）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t℃ | 空气 | N2 | CO2 | H2O | O2 | CO | SO2 | H2 | H2S | CH4 |
| 0 | 1.254 | 1.301 | 1.606 | 1.497 | 1.305 | 1.301 | 1.732 | 1.275 | 1.505 | 1.547 |
| 100 | 1.300 | 1.301 | 1.715 | 1.506 | 1.318 | 1.301 | 1.811 | 1.292 | 1.530 | 1.639 |
| 200 | 1.309 | 1.305 | 1.799 | 1.523 | 1.334 | 1.305 | 1.886 | 1.296 | 1.560 | 1.756 |
| 300 | 1.322 | 1.313 | 1.870 | 1.539 | 1.355 | 1.318 | 1.953 | 1.300 | 1.593 | 1.886 |
| 400 | 1.334 | 1.322 | 1.937 | 1.564 | 1.380 | 1.330 | 2.016 | 1.300 | 1.631 | 2.011 |
| 500 | 1.347 | 1.334 | 1.995 | 1.589 | 1.397 | 1.343 | 2.066 | 2.305 | 1.668 | 2.141 |
| 600 | 1.364 | 1.347 | 2.050 | 1.615 | 1.418 | 1.359 | 2.112 | 1.309 | 1.706 | 2.258 |
| 700 | 1.376 | 1.359 | 2.096 | 1.640 | 1.435 | 1.372 | 2.150 | 1.313 | 1.744 | 2.375 |
| 800 | 1.389 | 1.372 | 2.142 | 1.665 | 1.451 | 1.389 | 2.179 | 1.317 | 1.781 | 2.492 |
| 900 | 1.401 | 1.385 | 2.179 | 1.694 | 1.464 | 1.401 | 2.212 | 1.321 | 1.815 | 2.597 |
| 1000 | 1.414 | 1.397 | 2.213 | 1.723 | 1.477 | 1.414 | 2.234 | 1.330 | 1.852 | 2.697 |
| 1100 | 1.426 | 1.410 | 2.246 | 1.748 | 1.489 | 1.426 | 2.259 | 1.334 | 1.882 | 2.785 |
| 1200 | 1.439 | 1.422 | 2.267 | 1.774 | 1.502 | 1.439 | 2.275 | 1.342 | 1.907 | 2.860 |

附 录 G

(补充件)

标准中涉及的某些硫化物及氧化物在高温下平均比热见表G。

表K 某些硫化物及氧化物在高温下平均比热

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 化合物 | 在下列温度下的平均比热 kJ/kg·℃ | | | | | |
| 0~300℃ | 0~400℃ | 0~600℃ | 0~800℃ | 0~1000℃ | 0~1200℃ |
| Cu2O | 0.707 | 0.669 | 0.619 | 0.581 | 0.573 |  |
| NiS | 1.087 |  |  |  |  |  |
| ZnS | 0.514 | 0.523 | 0.531 | 0.535 |  |  |
| PbS | 0.213 | 0.217 | 0.226 |  |  |  |
| FeS | 0.845 | 0.790 | 0.761 | 0.736 | 0.736 |  |
| NiO | 0.648 |  | 0.669 |  | 0.686 |  |
| FeO | 0.723 |  | 0.753 |  | 0.769 |  |
| Fe2O3 | 0.786 |  | 0.857 | 0.903 |  |  |
| SiO2 | 0.907 | 0.947 | 1.012 | 1.054 | 1.075 | 1.087 |
| A12O3 | 0.891 |  | 0.786 |  | 0.974 |  |
| ZnO | 0.544 |  | 0.566 |  | 0.581 |  |
| CaO | 0.811 |  | 0.832 |  | 0.849 |  |