

团 体 标 准

T/CIECCPA 072—2025

氟化体系稀土熔盐电解槽能量平衡测试与 计算方法

Testing and calculation method for energy balance of rare earth
electrolysis cells in fluoride system

2025 - 05 - 28 发布

2025 - 06 - 05 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会 发 布

CLECCRA

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 通则与基本量	2
4.1 稀土电解基本过程的总反应式	2
4.2 物料平衡	2
4.3 稀土电解槽的电压平衡	5
5 上插阴阳极敞开式电解槽各部温度测量	8
5.1 测量器具	8
5.2 温度测量	8
6 稀土电解槽能量平衡的计算方法	10
6.1 能量平衡计算温度基础	10
6.2 能量平衡的计算体系	10
6.3 能量收入、支出平衡的计算时间单位	11
6.4 能量平衡方程式	11
6.5 电能产生的热量计算	11
6.6 稀土电解反应热计算	11
6.7 稀土氧化物吸热计算	12
6.8 稀土氧化物分解耗能计算	12
6.9 体系向周围空间的散热计算	12
6.10 阳极气体带走的热量计算	13
7 稀土电解槽能量平衡分析	14
7.1 能量利用率评价	14
7.2 能量平衡分析评价	14
7.3 槽壳温度分布	15
参考文献	15

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。

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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：包头稀土研究院、中稀（凉山）稀土有限公司、包头市三隆稀有金属材料有限责任公司、中国北方稀土(集团)高科技股份有限公司、北京低碳绿标信息技术咨询有限公司。

本文件主要起草人：刘玉宝、张全军、黄海涛、徐明钟、苏严、王昊、刘国栋、邓向辉、孙硕怡、薛飞、孔钦可、呼斯乐图、杜鑫、李旺、张文婷、梁晓苏、李成功。

氟化体系稀土熔盐电解槽能量平衡测试与计算方法

1 范围

本文件规定了氟化物体系稀土熔盐电解槽的通则与基本量、上插阴阳极敞开式电解槽的物料、电压、能量平衡计算方法、能量平衡分析。

本文件适用于6kA规模以上的上插阴阳极敞开式电解槽的物料、电压及能量平衡的测试与计算。

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。

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的标识和判定

GB/T 15676 稀土术语

YS/T 481-2005 铝电解槽能量平衡测试与计算方法 五点进电和六点进电预焙阳极铝电解槽

3 术语和定义

GB/T 15676界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

惰性阴极 inert cathode

惰性阴极是不易得电子，只起导电作用，在电解过程中不参与电化学反应的电极。

3.2

活性阴极 active cathode

活性阴极是易得电子，在电解过程中参与电化学反应的电极。

3.3

阳极母线 anode bus

阳极母线是连接整流电源与电解槽阳极的用于传输电能的铜（铜排）或铝质导线。

3.4

阴极母线 cathode bus

阴极母线是连接整流电源与电解槽阴极的用于传输电能的铜（铜排）或铝质导线。

3.5

稀土总收率 total rare earths yield

稀土总收率是实际得到的稀土金属产出量与消耗的稀土氧化物、氟化物中含有的稀土元素总量之比。

稀土总收率=稀土金属产出量/(氧化物量折算稀土金属量+氟化物量折算稀土金属量)×100%。

3.6

直接料比 direct material ratio

直接料比=消耗氧化物量/稀土金属产出量。

3.7

总料比 total material ratio

总料比=(消耗氧化物量+消耗氟化物量折算氧化物含量)/稀土金属产出量。

3.8

碳阳极单耗 specific graphite consumption

石墨单耗=消耗石墨量(t)/金属量(kg)。

3.9

电单耗 unit power consumption

电单耗=用电量(kW·h)/金属量(t)。

3.10

电流效率 current efficiency

电流效率是指在电化学反应中, 实际有效反应与电流所产生的理论反应的比值。

电流效率=(实际金属产出量/理论金属产出量)×100%, 其中理论金属产出量=电化当量C(g/A·h)×电解电流I(A)×时间t(h)。

3.11

电能效率 electric energy efficiency

电能效率是稀土氧化物电解还原时理论所需电能与实际所耗电能之比。

3.12

能量平衡测试 energy balance test

能量平衡测试是通过对电解槽各项能量输入和输出进行测量和分析以确定能量平衡状态的过程。

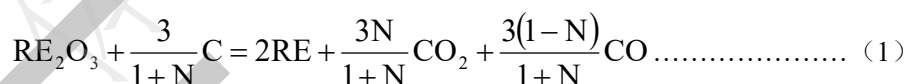
3.13

接点压降 contact voltage drop

接点压降是指电流通过导电材料接触点时, 接点处的压降。通常由接点电阻引起, 电压损失在接点两侧之间产生。

4 通则与基本量

4.1 稀土电解基本过程的总反应式



式中:

RE—稀土元素;

N—阳极气体中CO₂中的体积百分比, $N=[\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{CO})]\times 100\%$ 。

4.2 物料平衡

4.2.1 电解槽每小时产金属或合金量

电解槽每小时产金属或合金量见公式(2)。

以惰性阴极制备出的稀土金属或合金, 其电解槽每小时产金属或合金量为:

$$M = CI\eta \dots\dots\dots (2)$$

以活性阴极制备出的稀土金属或合金, 其电解槽每小时产金属或合金量为:

$$M = \frac{CI\eta}{W_{\text{RE}}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

M—电解过程每小时产出稀土金属或稀土合金量，单位为克每小时(g/h)；

C—稀土元素的电化学当量，单位为克每安培小时[g/(A·h)]；

I—电解过程电流强度，单位为安培(A)；

η —电流效率，单位为百分数(%)；

W_{RE} —合金中稀土元素的含量，单位为质量百分数(%)。

4.2.2 稀土氧化物消耗量

稀土氧化物消耗量 P_{REO} 的计算见公式(4)：

$$P_{REO} = C_{REO} I \eta \dots\dots\dots (4)$$

式中：

REO —稀土氧化物；

P_{REO} —稀土氧化物的消耗量，单位为克每小时(g/h)；

C_{REO} —稀土元素的电化学当量，单位为克/安培·小时[g/(A·h)]。

4.2.3 稀土氧化物理论单耗

依据稀土电解总反应式(1)计算，生产一吨稀土金属的稀土氧化物的理论消耗 P_{REO} 为：

$$P_{REO} = \frac{M_{REO} + 24}{M_{RE}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

M_{RE} —稀土原子的摩尔质量，单位为克每摩尔(g/mol)；

M_{REO} —稀土氧化物的摩尔质量，单位为克每摩尔(g/mol)。

4.2.4 碳的理论(最小)消耗量

生产1吨稀土金属且阳极氧化过程中产生的一次气体全部为 CO_2 时，按稀土电解总反应式(1)计算，碳的理论消耗为：

$$P_c = \frac{3 \times M_c}{4M_{RE}} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

P_c —阳极氧化过程中产生的一次气体全部为 CO_2 时的碳的理论消耗，单位为克每吨稀土金属(g/t-RE)；

M_c —碳的摩尔质量，单位为克每摩尔(g/mol)；

M_{RE} —稀土原子的摩尔质量。

4.2.5 含氟气体

对于非正常电解过程所产生的少量HF、 CF_4 等含氟元素气体不会影响整体的测试结果，本文件中不予考虑。

4.2.6 碳生成 CO_2 和CO的电化学当量

引用行业标准YS/T 481-2005；

碳生成 CO_2 的电化学当量为0.112 g/(A·h)；

碳生成CO的电化学当量为0.224 g/(A·h)。

4.2.7 CO₂的生成量

CO₂的生成量 P_{CO_2} (或 P'_{CO_2})计算见公式(7)：

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{3N}{1+N} \times \frac{44}{54}$$

或

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{3}{4} \left(2 - \frac{1}{\eta} \right) \times \frac{44}{27} \dots\dots\dots (7)$$

或

$$P'_{\text{CO}_2} = \frac{3}{4} \left(2 - \frac{1}{\eta} \right) \times \frac{44}{27} M$$

式中：

P_{CO_2} (或 P'_{CO_2})—CO₂的生成量，单位为克每小时(g/h){或克每克稀土金属(g/g-RE)}；

M—电解过程每小时产出稀土金属或稀土合金量，单位为克每小时(g/h)；

η —电流效率，单位为百分数(%)。

4.2.8 CO的生成量

CO的生成量 P_{CO} (或 P'_{CO})计算见公式(8)：

$$P_{\text{CO}} = \frac{3(1-N)}{1+N} \times \frac{28}{54}$$

或

$$P_{\text{CO}} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \times \frac{28}{27} \dots\dots\dots (8)$$

或

$$P'_{\text{CO}} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \times \frac{28}{27} M$$

式中：

P_{CO} (或 P'_{CO})—CO的生成量，单位为克每小时(g/h){或克每克稀土金属(g/g-RE)}。

4.2.9 烟气流量、压力和温度的监测

在电解槽集气罩的采样位上，采用奥氏气体分析仪对电解烟气中CO和CO₂的流量和压力进行测定；采用点温计对电解烟气的温度进行测定。

4.2.10 烟气中CO和CO₂测定

在进行阳极气体中CO和CO₂的体积百分比测定之前，确定需要测定的电解槽，在电解质液面上方放置一个密闭性集气罩，在集气罩上开一个圆形的洞，洞口大小与烟气采样器的采集口相当，集气罩与电解槽其他接触处要完全密封。

把烟气采样器的采集口对准所开的洞口，对好后把采集口周围的空隙封堵好，防止外界空气进入烟气采样器。烟气采样器的另一端接双联球，操作双联球进行烟气采集。采集到的电解槽烟气通过奥氏气体分析仪，分析烟气中CO和CO₂的百分含量。

4.2.11 生产技术条件、物料单耗

将电解槽生产技术条件和物料单耗及作业制度填写在表1中,作为计算物料、能量平衡时的基础数据,其数值按照GB/T 8170规定进行修约。

表1 生产技术条件、物料单耗

序号	项目	单位	指标值
1	稀土金属种类	-	
2	实际电流强度	A	
3	阳极电流密度	A/cm ²	
4	阴极电流密度	A/cm ²	
5	工作电压	V	
6	极 距	cm	
7	电解质组成及配比	%	
8	电解质中添加剂	%	
9	直接料比	kg/kg—RE	
10	氟化稀土单耗	kg/t—RE	
11	总料比	kg/kg—RE	
12	氟化锂单耗	kg/t—RE	
13	添加剂单耗	kg/t—RE	
14	碳阳极单耗	kg/t—RE	
15	电单耗	kW·h/t	
16	电流效率	%	
17	电能效率	%	
18	稀土总收率	%	

4.3 稀土电解槽的电压平衡

4.3.1 体系内总压降

体系内总压降计算见公式(9):

$$V_{\text{体系内}} = V_{\text{阳极}} + V_{\text{阴极}} + V_{\text{分解}} + V_{\text{电解质}} + V_{\text{结构}} \dots\dots\dots (9)$$

4.3.2 电解槽的阳极压降

氟盐体系氧化物熔盐电解制备稀土金属过程中石墨阳极的电阻率 ρ_t 与温度 t 的关系为:

$$\rho_t = \rho_{1000} + \alpha(t - 1000) \dots\dots\dots (10)$$

式中:

ρ_t —石墨阳极在 t 摄氏度的电阻率,单位为欧姆·平方毫米每米($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

ρ_{1000} —石墨阳极1000℃的电阻率,单位为欧姆·平方毫米每米($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

α —石墨阳极的电阻温度系数,单位为每摄氏度($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

t —石墨阳极的温度，单位为摄氏度（℃）；

石墨阳极的压降可根据其平均电阻率等参数积分获得，即：

$$V_{\text{阳极}} = \int_0^L \frac{\rho_t(L-x)dx}{S_{\text{阳}}L} \cdot I = \frac{\rho_t IL}{2S_{\text{阳}}} \dots\dots\dots (11)$$

由于： $D_{\text{阳}} = I/S$

$$\text{故： } V_{\text{阳极}} = \frac{\rho_t L}{2} D_{\text{阳}}$$

式中：

$V_{\text{阳极}}$ —石墨阳极的压降，单位为伏特（V）；

L —阳极插入深度，单位为毫米（mm）；

$S_{\text{阳}}$ —石墨阳极的截面积，单位为平方毫米（mm²）；

I —流过石墨阳极的电流，单位为安培（A）；

$D_{\text{阳}}$ —石墨阳极的截面电流密度，单位为安培每平方毫米（A/mm²）；

4.3.3 电解槽的阴极压降

氟盐体系氧化物熔盐电解制备稀土金属过程中阴极材料主要是钨，钨的电阻率与温度的关系见表2。

表2 钨的电阻率与温度的关系

温度/℃	电阻率/(Ω·mm ² /m)
20	0.055
300	0.2714
1200	0.40
2000	0.66
2430	0.811
3030	1.033

电解过程中阴阳极插入深度相同，同阳极类似，钨阴极的电压计算公式为：

$$V_{\text{阴极}} = \frac{\rho_w L}{2} D_{\text{阴}} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$V_{\text{阴极}}$ —钨阴极的压降，单位为伏特（V）；

ρ_w —钨阴极的电阻率，单位为欧姆·平方毫米每米（Ω·mm²/m）；

$D_{\text{阴}}$ —钨阴极的截面电流密度，单位为安培每平方毫米（A/mm²）；

4.3.4 电解质的压降

电解质的电阻率与电解质的成分和温度有关。电解质的理论压降 $V_{\text{电解质}}$ 按下式积分获得：

$$V_{\text{电解质}} = \int_r^R \rho_{\text{电解质}} dr / 2\pi L r = \rho_{\text{电解质}} I / 2\pi L \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \dots\dots\dots (13)$$

进而得到:

$$V_{\text{电解质}} = \rho_{\text{电解质}} D_k r \ln \left(\frac{D_k}{D_A} \right) = \frac{1}{k} D_k r \ln \left(\frac{D_k}{D_A} \right) \dots \dots \dots (14)$$

式中:

$V_{\text{电解质}}$ —电解质的压降, 单位为伏特 (V);

$\rho_{\text{电解质}}$ —电解质的电阻率, 单位为欧姆·平方毫米每米 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

r —阴极半径, 单位为毫米 (mm);

R —阳极半径 (内), 单位为毫米 (mm);

D_k —阴极电流密度, 单位为安培每平方毫米 (A/mm^2);

D_A —阳极电流密度, 单位为安培每平方毫米 (A/mm^2);

k —电解质的电导率, 单位为西门子每米 (S/m)。

4.3.5 电解过程的理论分解电压

电解过程的理论分解电压, 其与化学反应的生成吉布斯自由能的关系如下:

$$E_T^0 = -\Delta G_T^0 / nF \dots \dots \dots (15)$$

式中:

E_T^0 —为理论分解电压, 单位为伏特 (V);

ΔG_T^0 —为化学反应的生成吉布斯自由能, 单位为焦耳每摩尔 (J/mol);

n —为反应得失电子数;

F —为法拉第常数, $96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

4.3.6 电解槽的结构压降

电解过程槽电压为各结构压降、电解质压降和分解电压的总和。电解槽的结构压降包括阴阳极母线压降和接点压降, 测量器具采用压降测试仪, 具体测试内容如表3和图1所示, 其数值要符合GB/T 8170规定进行修约, 稀土电解槽电压平衡见表4。

表3 结构电压测量项目

序号	项目
a-b	阳极母线压降
b-($c_1 \dots c_n$)	阳极母线、卡具接点压降
($c_1 \dots c_n$)-($i_1 \dots i_n$)	阳极卡具、阳极接点压降
c-d	阴极母线压降
d-f	阴极母线与阴极支架接点压降
f-g	阴极支架横、竖臂接点压降
g-h	阴极钨、铜接点压降

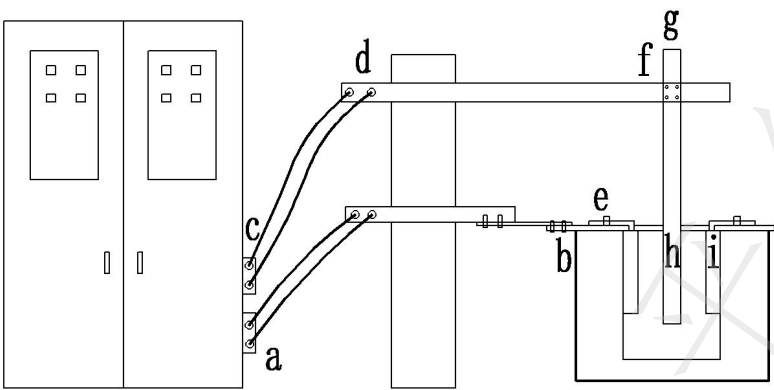


图 1 电解槽设备结构连接示意图

表 4 稀土电解槽电压平衡表

序号	项目	单位	指标值
1	阳极电压降	V	
2	阴极电压降	V	
3	电解质电压降	V	
4	分解电压降	V	
5	结构压降	V	
总计		V	

5 上插阴阳极敞开式电解槽各部温度测量

5.1 测量器具

- 5.1.1 点温计，测量范围-40~1200℃，测量精度≤5%。
- 5.1.2 热电偶及补偿导线。
- 5.1.3 热流计。
- 5.1.4 气体分析仪。
- 5.1.5 流量测定仪。
- 5.1.6 红外线测温仪。

5.2 温度测量

5.2.1 槽壳底部

槽壳底部温度测量点分布按图2或图3进行。

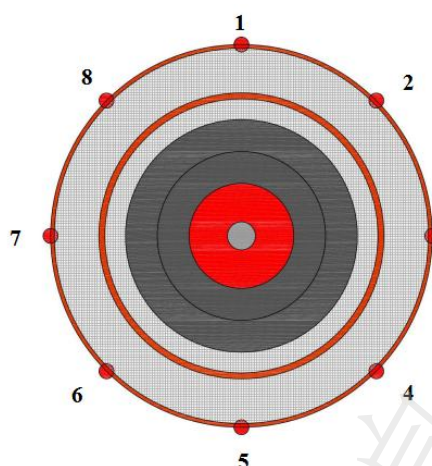


图2 圆形槽壳底部各测温点分布示意图

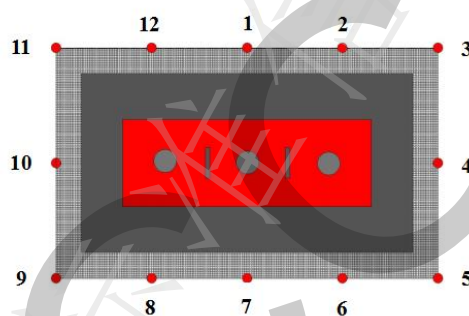


图3 方形槽壳底部各测温点分布示意图

5.2.2 槽壳侧部

槽壳侧部温度测量选在外钢套表面进行布置测温点，布点位置对应于槽壳底部测温点垂直线，沿槽壳底部测温点竖直方向上以间隔200 mm进行测温，即分为5组测温带。

5.2.3 炉盖板

槽沿板温度测量，选在槽沿板外侧面布测温点，布点位置应对应于槽壳大面和端面的侧部测温点位置，每个位置测量1点温度。

5.2.4 阴极钨棒

阴极钨棒的测温点，选择在每根阴极棒的铜—钨焊接位置进行测温。

5.2.5 竖铜排

铜排的测温点，选在竖铜排的中部位置，测点为每根竖铜排的内外侧各1点。

5.2.6 横铜排

横铜排的测温点，选在横铜排的中部位置，测点为每根横铜排的外侧1点。

5.2.7 电解质温度

从电解质液面表面到内部，每隔200 mm设定一个温度检测平面，每个检测平面设置三个测量点，取其平均值作为测量平面的温度。电解槽熔盐内部的测量点选定如图4和图5所示。

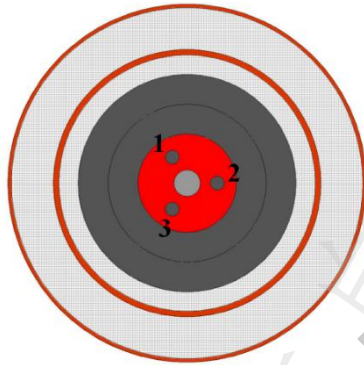


图 4 圆形槽电解质各测温点分布示意图

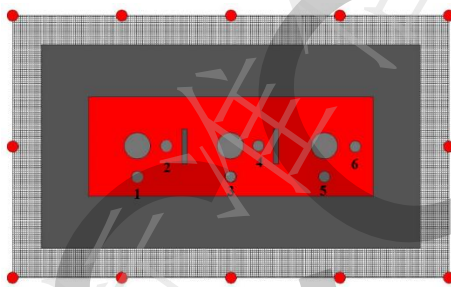


图 5 方形槽电解质各测温点分布示意图

5.2.8 环境温度

在测量各部位温度的同时，测量附近的空气环境温度。包括：

- a) 炉口环境温度；
- b) 槽体上部（炉盖板上方）环境温度；
- c) 槽体侧面环境温度；
- d) 槽底环境温度；
- e) 槽烟道端环境温度。

6 稀土电解槽能量平衡的计算方法

6.1 能量平衡计算温度基础

计算稀土电解槽能量平衡的温度基础，取 $T_k=298K$ （ $25^{\circ}C$ ）为温度基础。

6.2 能量平衡的计算体系

稀土电解槽的能量平衡计算体系，包括电解槽的热收入和热支出，其中电解槽的热收入包括通入电解槽直流电产生的热 $Q_{电}$ 和各种化学反应所产生的热 $Q_{化}$ ；电解槽的热支出主要包括加热电解原料至电解温度所需的能量 $Q_{熔}$ 、电化学过程分解稀土氧化物所需的能量 $Q_{分}$ 、体系向周围空间的散热损失 $Q_{散}$ 和阳极气体带走的热量 $Q_{气}$ 。

6.3 能量收入、支出平衡的计算时间单位

能量收入、支出平衡的计算时间单位以1h为计算时间单位。

6.4 能量平衡方程式

根据计算温度基础和计算体系，确定能量平衡方程式，见公式（16）：

$$Q_{\text{电}} + Q_{\text{化}} = Q_{\text{熔}} + Q_{\text{分}} + Q_{\text{散}} + Q_{\text{气}} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$Q_{\text{电}}$ —通入电解槽直流电产生的热，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$Q_{\text{化}}$ —化学反应放热产生的能量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$Q_{\text{熔}}$ —加热不断加入体系的稀土氧化物至电解温度所消耗的能量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$Q_{\text{分}}$ —分解稀土氧化物所需的能量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$Q_{\text{散}}$ —体系向周围空间的散热，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$Q_{\text{气}}$ —阳极气体带走的热量，单位为千焦每小时（kJ/h）。

6.5 电能产生的热量计算

通入电解槽直流电产生的热 $Q_{\text{电}}$ 为：

$$Q_{\text{电}} = 3.6VI \dots\dots\dots (17)$$

式中：

3.6为1kW·h的热当量；

V —电解槽槽电压，单位为伏特（V）；

I —实际工作电流，单位为千安（kA）。

6.6 稀土电解反应热计算

化学反应热主要是阳极气体与石墨阳极的化学反应放热。



$$\Delta G_1 = -232.6 - 0.1678 T \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$



$$\Delta G_2 = -395.39 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

根据现场实测阳极气体中 CO_2 与 CO 的体积百分含量，可计算出每小时相应的 CO 与 CO_2 的摩尔量，分别代入式(18)、(19)得到相应的 ΔG_1 与 ΔG_2 ，故可得：

$$Q_{\text{化}} = \frac{1}{2} \Delta G_1 + \Delta G_2 \text{ kJ/h} \dots\dots\dots (20)$$

总的能量收入：

$$Q_{\text{入}} = Q_{\text{电}} + Q_{\text{化}} \dots\dots\dots (21)$$

6.7 稀土氧化物吸热计算

加热不断加入体系的稀土氧化物至电解温度所消耗的能量：

$$Q_{\text{熔}} = \frac{m_{\text{REO}}}{M_{\text{REO}}} q_{\text{REO}} \dots\dots\dots (22)$$

$$q_{\text{REO}} = \int_{298\text{K}}^T C_p dT \dots\dots\dots (23)$$

式中：

m_{REO} —每小时加入体系的稀土氧化物的质量，单位为克（g）；

M_{REO} —稀土氧化物的摩尔质量，单位为克每摩尔（g/mol）；

q_{REO} —稀土氧化物物化反应吸热热量，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

C_p —稀土氧化物热容，单位为千焦每开尔文（kJ/K）。

6.8 稀土氧化物分解耗能计算

分解稀土氧化物所需的能量为：

$$Q_{\text{分}} = 3.6V_{\text{分解}}I \dots\dots\dots (24)$$

式中：

$V_{\text{分解}}$ —稀土氧化物分解电压，单位为伏特（V）；

I —电流强度，单位为千安（kA）。

6.9 体系向周围空间的散热计算

6.9.1 槽侧壁的热损失

热量由外壁面以对流和辐射2种形式向外散失，所以槽壳的热损失应为对流传热和辐射传热2项之和。依据各自的传热速率方程式可求得总的散热量：

$$Q_{\text{壁}} = a_t F (t_w - t) \dots\dots\dots (25)$$

式中：

$a_t = a_c + a_r$ ，为对流辐射联合传热系数，单位为瓦特每平方米摄氏度（W/m²·℃）；

a_c —对流传热系数，单位为瓦特每平方米摄氏度（W/m²·℃）；

a_r —辐射传热系数，单位为瓦特每平方米摄氏度（W/m²·℃）；

F —槽侧壁面积，单位为平方米（m²）；

t_w —槽侧壁温度，单位为摄氏度（℃）；

t —车间温度，单位为摄氏度（℃）。

对于平面外壁向周围环境散热的对流辐射联合传热系数的近似公式为：

$$a_t = 9.8 + 0.07(t_w - t) \dots\dots\dots (26)$$

6.9.2 槽底热损失

由于槽底直接坐于地面上，所以槽底的热量是以传导传热的方式散失出去。槽底的热量损失为：

$$Q_{\text{底}} = KF(t_2 - t_1) \dots\dots\dots (27)$$

式中:

K—传热系数, 单位为瓦特每平方米摄氏度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

F—槽底面积, 单位为平方米 (m^2);

t_2 —槽内壁处温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$);

t_1 —槽内部钢板处的温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)。

6.9.3 槽上盖的热损失

槽上盖的热损失分成两部分计算: 一部分是石墨坩埚和阳极之间的部分, 由于这部分下面是高温电解质, 所以上盖温度很高; 另一部分是与槽壁相接触的部分, 这部分温度相对较低, 热损失应为对流传热和辐射传热两部分之和。

根据式(31):

$$Q_{\text{上}} = a_t F(t_w - t) \dots\dots\dots (28)$$

6.9.4 电解质直接向空间的散热损失

由于电解槽是敞口操作, 高温电解质将直接以辐射和对流的方式向外散热, 故其热量 $Q_{\text{盐}}$ 公式为:

$$Q_{\text{盐}} = CH \left[\left[\frac{T_2}{T_1} \right]^4 - \left[\frac{T_1}{100} \right]^4 \right] F + \alpha (T_2 - T_1) F \dots\dots\dots (29)$$

式中:

CH—辐射系数, 4.96;

F—熔盐表面积, 单位为平方米 (m^2);

T_2 —熔体温度, 单位为开尔文 (K);

T_1 —车间温度, 单位为开尔文 (K);

α —对流换热系数, 单位为瓦特每平方米摄氏度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

最后可得该体系总的散热损失为 $Q_{\text{散}} = Q_{\text{壁}} + Q_{\text{底}} + Q_{\text{上}} + Q_{\text{盐}}$ 。

6.10 阳极气体带走的热量计算

阳极气体主要是CO和 CO_2 , 根据二者实测的CO(n_{CO})和 CO_2 (n_{CO_2})含量分别计算带走的热量:

$$\text{CO的热容:} \quad C_{\text{P,CO}} = 28.4 + 4.1 \times 10^{-3} T - 0.46 \times 10^{-5} T^{-2} \dots\dots\dots (30)$$

$$Q_{\text{CO}} = n_{\text{CO}} \int_{298\text{K}}^T C_{\text{P,CO}} dT \dots\dots\dots (31)$$

$$\text{CO}_2的热容: \quad C_{\text{P,CO}_2} = 44.14 + 9.04 \times 10^{-3} T - 8.54 \times 10^{-5} T^{-2} \dots\dots\dots (32)$$

$$Q_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \int_{298\text{K}}^T C_{\text{P,CO}_2} dT \dots\dots\dots (33)$$

阳极气体带走的总热量:

$$Q_{\text{气}} = Q_{\text{CO}} + Q_{\text{CO}_2} \dots\dots\dots (34)$$

总的热支出：

$$Q_{\text{出}} = Q_{\text{熔}} + Q_{\text{分}} + Q_{\text{散}} + Q_{\text{气}} \dots\dots\dots (35)$$

7 稀土电解槽能量平衡分析

7.1 能量利用率评价

能量利用率等于电解有效能量与输入能量的百分比。稀土电解有效能量为在电解温度下进行稀土电解反应，在单位时间内产生各种电解产物所消耗能量总和。

7.2 能量平衡分析评价

7.2.1 能量平衡分析

根据测试与计算结果，结合电解槽的槽壳、内衬结构特点、工艺技术条件、操作制度等，对槽各部位能量平衡进行如下方面的分析评价：

- a) 能量收支平衡的测试与计算误差，应控制在±5%以内，即： $|\Delta Q/Q| \times 100\% \leq 5\%$ ；
- b) 分析槽能量利用率的高低及其合理性，评价槽技术条件、作业制度、槽结构参数等因素的影响趋势；
- c) 采用类比法(与同类型槽或设计参数)，分析槽体各部位散热损失能量的分布特点，评价其合理性。

7.2.2 能量平衡综合评价

综合评价能量平衡测试与计算结果，可结合电解槽的工艺技术条件、操作与管理制度和槽炉膛内形等方面的测试情况同时进行，以便能更好地准确判断和分析，并提出合理的改进意见和建议。

7.2.3 电解槽能量平衡

电解槽能量收入与支出平衡见表 5，其数值要符合 GB/ T 8170 规定进行修约，通过表中数据可以评价电解槽能量利用情况。

表 5 上插阴阳极敞开式电解槽能量平衡表

热收入		热支出		占总 收入%
项目	单位，kJ/h	项目	单位，kJ/h	
电能产生的 热量 $Q_{\text{电}}$		稀土氧化物吸热 $Q_{\text{熔}}$		
电解反应热 $Q_{\text{化}}$		稀土氧化物分解吸热 $Q_{\text{分}}$		
		体系向周围空间的散热 $Q_{\text{散}}$		
		阳极气体带走的热量 $Q_{\text{气}}$		
总收入= $Q_{\text{电}}+Q_{\text{化}}$		总支出= $Q_{\text{REO}}+Q_{\text{分}}+Q_{\text{散}}+Q_{\text{气}}$		
差额				

7.3 槽壳温度分布

根据测试结果，结合槽内衬结构，操作条件和槽内炉膛测试等情况，分析评价电解槽侧部、端部和槽底温度的特征值如最高温度、平均温度及其温度分布规律的合理性。

参 考 文 献

- [1] 尹小东, 刘中兴, 曹运涛. 稀土熔盐电解槽的热平衡计算[J]. 包头钢铁学院学报, 2002, 21(01):19-22
- [2] 陈国华, 王小青, 张志宏, 刘中兴, 伍永福. 稀土熔盐电解槽的电压平衡计算[J]. 稀土, 2013, 34(01):86-89
-