



中华人民共和国有色金属行业标准

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

Aluminium cell test for energy balance and its calculating method
—Five-point feed current and six-point feed current
prebaked anode aluminium cell

2005-05-18 发布

2005-12-01 实施

国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言 Ⅲ

1 范围 1

2 通则与基本量 1

3 密闭型预焙槽各部温度测量 3

4 预焙槽能量平衡的计算方法 6

5 铝电解槽能量平衡分析..... 10

附录 A（规范性附录） 五点进电和六点进电预焙阳极铝电解槽电压平衡测试与计算方法 12

前 言

随着我国铝电解槽技术的发展,各种进电方式的大容量预焙阳极铝电解槽投产运行,其中大面五点进电和大面六点进电铝电解槽是大容量铝电解槽技术的发展方向。本标准是结合我国铝电解发展实际情况,本着科学性、合理性、适用性的制标原则、为指导铝电解生产合理用能而制定的。

本标准附录 A 为规范性附录。

本标准由全国有色金属标准化技术委员会提出并归口。

本标准由全国有色金属标准化技术委员会负责解释。

本标准由中国铝业股份有限公司广西分公司和贵阳铝镁设计研究院起草。

本标准主要起草人:刘永刚、易小兵、张庚民、杨朝红、王晔、王朝鹏。

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

1 范围

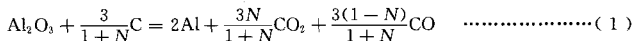
本标准规定了冰晶石-氧化铝熔盐电解法密闭型中间点式下料大面五点和六面六点进电预焙阳极铝电解槽能量平衡的测试方法与计算方法。

本标准适用于冰晶石-氧化铝熔盐电解法密闭型中间点式下料大面五点和六面六点进电预焙阳极铝电解槽能量平衡的测试与计算。

2 通则与基本量

2.1 铝电解基本过程的总反应式

铝电解基本过程的总反应式见公式(1)。



式中:

N ——阳极气体中 CO_2 的体积百分比, $N = [\text{CO}_2 / (\text{CO}_2 + \text{CO})] \times 100\%$, 其测定方法为:

在进行阳极气体中 CO_2 的体积百分比测定之前, 确定需要测定的电解槽, 在电解质结壳面上, 凿开一个圆形的洞, 洞口大小与烟气采样器的采集口相当, 电解槽内的其他火孔要堵上。

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_2 的百分含量。

2.2 物料平衡

2.2.1 电解槽每小时产铝量

电解槽每小时产铝量见公式(2)。

$$M = 0.3355 I \eta \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

M ——电解槽每小时原铝产量, 单位为千克每小时(kg/h);

0.3355——铝的电化学当量, 单位为克每安培小时[g/(A·h)];

I ——电解槽通过的电流强度, 单位为千安(kA);

η ——电流效率, 单位为百分数(%)。

2.2.2 氧化铝消耗量

氧化铝消耗量 $P_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 的计算见公式(3):

$$P_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.634 I \eta \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$P_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ ——氧化铝的消耗量, 单位为千克每吨铝(kg/t-Al);

0.634——氧化铝的电化学当量, 单位为克每安培小时[g/(A·h)]。

2.2.3 氧化铝理论单耗

氧化铝的理论单耗 $P_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{理}}$ 为 1889.7 kg/t-Al。

2.2.4 碳的理论(最小)消耗量

阳极氧化过程中产生的一次气体全部为 CO_2 时, 按铝电解总反应式(1)计算, 碳的理论消耗量为

YS/T 481—2005

333. 3kg/t—Al。

2.2.5 碳生成 CO_2 和 CO 的电化学当量碳生成 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)。2.2.6 CO_2 的生成量 CO_2 的生成量 p_{CO_2} (或 p'_{CO_2}) 计算见公式(4):

$$\left. \begin{array}{l} p_{\text{CO}_2} = \frac{3N}{1+N} \times \frac{44}{55} \\ \text{或} \quad p_{\text{CO}_2} = \frac{3}{4} \left(2 - \frac{1}{\eta} \right) \times \frac{44}{27} \\ \text{或} \quad p'_{\text{CO}_2} = \frac{3}{4} \left(2 - \frac{1}{\eta} \right) \times \frac{44}{27} M \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

 p'_{CO_2} (p_{CO_2}) —— CO_2 的生成量, 单位为千克每小时(kg/h) {或千克每千克铝(kg/kg—Al)}。2.2.7 CO 的生成量 CO 的生成量 p_{CO} (或 p'_{CO}) 计算见公式(5):

$$\left. \begin{array}{l} p_{\text{CO}} = \frac{3(1-N)}{1+N} \times \frac{28}{54} \\ \text{或} \quad p_{\text{CO}} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \times \frac{28}{27} \\ \text{或} \quad p_{\text{CO}} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \times \frac{28}{27} M \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

 p'_{CO} (或 p_{CO}) —— CO 的生成量, 单位为千克每小时(kg/h) {或千克每千克铝(kg/kg—Al)}。

2.3 铝电解槽的电压平衡

2.3.1 电压平衡按附录 A 的规定计算。

2.3.2 体系内电压降计算见公式(6):

$$\begin{aligned} E_{\text{体系内}} &= U_{\text{阳极}} + U_{\text{极化}} + U_{\text{电解质}} + U_{\text{阴极}} + U_{\text{效应}} \\ &= V_{\text{立柱母线}} + V_{\text{阳极母线}} + V_{\text{阳极}} + V_{\text{炉底}} + V_{\text{阴极母线}} + V_{\text{效应分槽}} + V_{\text{极间}} \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

公式(6)中各参数的计算和说明见附录 A。

2.3.3 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。

表 1 生产技术条件、物料单耗

序 号	项 目	单 位	指 标 值
1	实际电流强度	kA	
2	阳极电流密度	A/cm ²	
3	铝液水平高度	cm	
4	电解质水平高度	cm	
5	工作电压	V	
6	极距	cm	
7	平均分子比	—	
8	电解质中添加剂	%	

表 1(续)

序 号	项 目	单 位	指 标 值
9	效应系数	次/台·日	
10	氧化铝单耗	kg/t—Al	
11	氟化铝单耗	kg/t—Al	
12	氧化钙单耗	kg/t—Al	
13	冰晶石单耗	kg/t—Al	
14	炭阳极单耗	kg/t—Al	

3 密闭型预焙槽各部温度测量

3.1 测量器具

- 3.1.1 点温计:测量范围 0~500℃。
- 3.1.2 表面温度计:测量范围 0~500℃。
- 3.1.3 热电偶及补偿导线。
- 3.1.4 热流计。
- 3.1.5 气体分析仪。
- 3.1.6 流量测定仪。
- 3.1.7 红外线测温仪。

3.2 温度测量

3.2.1 槽壳底部

槽壳底部温度测量分布按图 1 进行,测温布点可选择在网格点的中心位置,并尽量等距离布点。

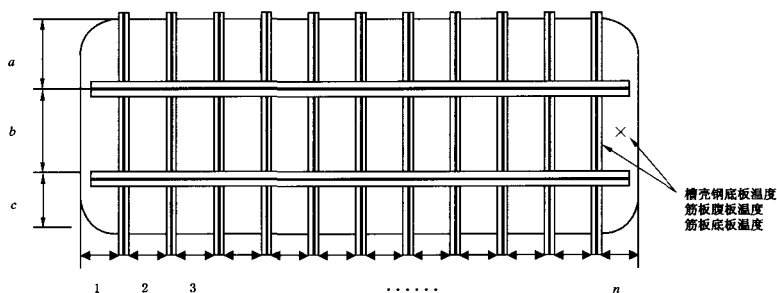


图 1 槽壳底部各测温点分布示意图

在测量槽壳底部钢板温度的同时,需测量各底筋工字梁的腹板和底板温度。

3.2.2 槽壳侧部

槽壳侧部温度测量按图 2 进行布置测温点。

高度方向:以端部(或侧部)双围带对应的中部、每个阴极钢棒窗口上、下部位布点,即分为 3 组测温带。

长度方向:每隔一组摇篮架布置一测点,位置选在两组摇篮架之间的槽壳钢板中点。

YS/T 481—2005

测槽壳侧部温度同时,需测量各侧筋工字梁的腹板和底板温度。

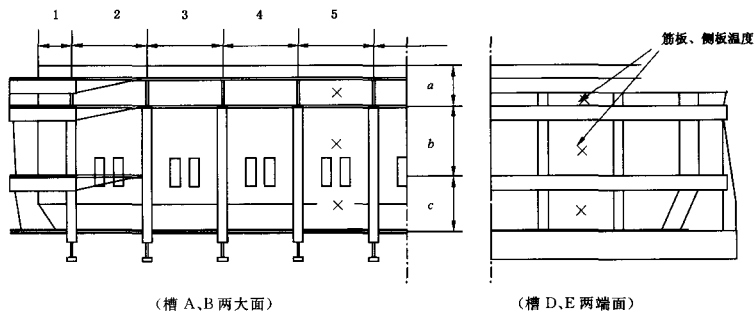


图2 槽壳侧部测温点位置示意图

3.2.3 密封集气罩

密封罩各部温度的测量按图3进行布置测温点:

- 侧部罩:每组槽罩上、中、下各布一测温点;
- 端部罩:方形槽罩上、中、下各一测温点,三角槽罩1~2点;
- 水平罩:在槽两侧每两组导杆对应的中部位置上布置测温点。

3.2.4 槽沿板

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。

3.2.5 阴极钢棒

阴极钢棒的测温点,选择在每根阴极棒的内、外两侧各布置1个点。每根阴极钢棒的铝-钢焊(或压接)片的铝头侧布置1个测温点。

3.2.6 铝导杆

铝导杆的测温点,选在槽罩上每根铝导杆的外露点至卡具之间的中部位置,测点为每根铝导杆的内、外侧各1点。

3.2.7 摇篮架

摇篮架测温点布置,对应于槽壳侧部钢板的筋板温度测量方法。

3.2.8 电解质温度

在电解槽A、B两个大面的加工面中部,出铝端、烟道端各选一个电解质温度测量点。

3.2.9 烟气流量、压力及温度

在电解槽排烟支管的观测孔上,采用专用仪器对电解烟气的流量和压力进行测定。同时测量电解烟气的温度。

3.2.10 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:

- 槽(间)侧面上部(操作面)环境温度;
- 槽(间)侧面下部环境温度;
- 槽出铝端环境温度;
- 槽烟道端环境温度;
- 槽底环境温度。

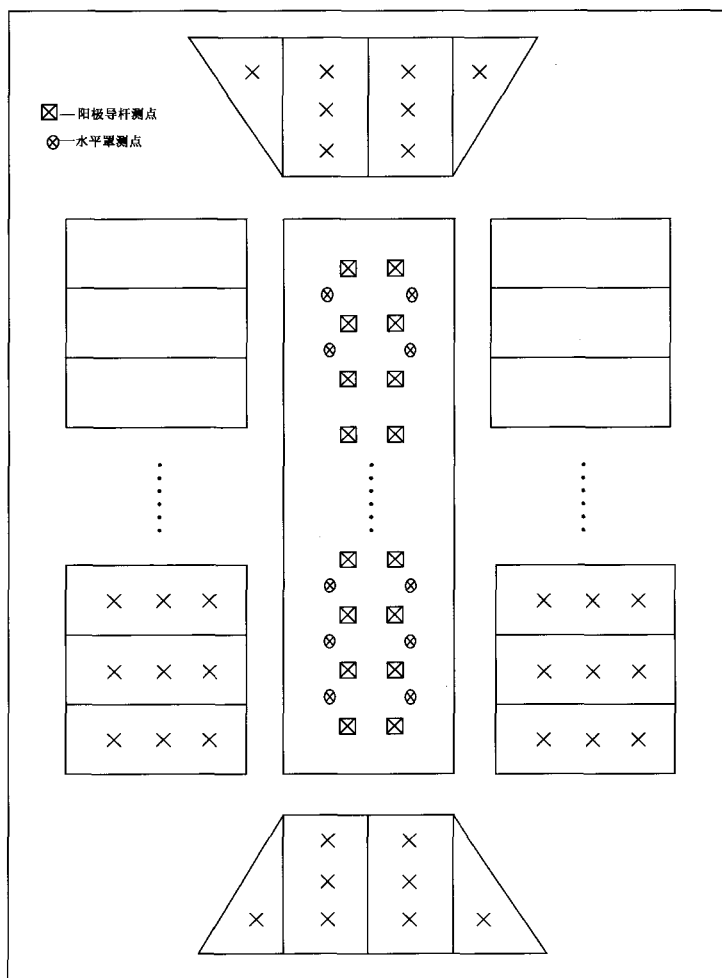


图3 槽罩、阳极导杆各部位测温布点示意图

3.2.11 残极温度

残极测温点,选在更换出的残阳极的上表面1~4点。

3.2.12 钢爪温度

选择1~2组处于正常更换周期的中期生产阳极碳块,对其每根钢爪进行1点温度测量。

4 预焙槽能量平衡的计算方法

4.1 能量平衡的计算原则

4.1.1 能量平衡计算温度基础

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

4.1.2 能量平衡的计算体系

密闭型预焙槽的能量平衡计算体系见图 4,应包括:

槽底—槽壳侧部(包括端部)—阴极钢棒头—槽沿板—四面侧部槽罩—顶部水平罩—铝导杆

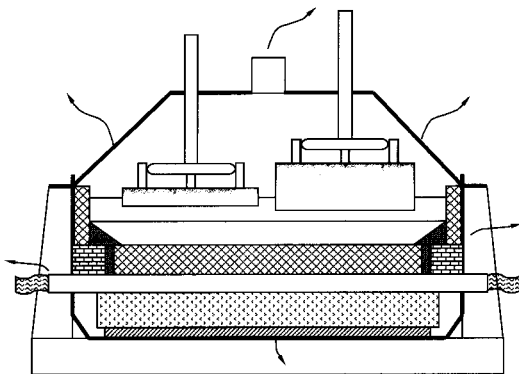


图 4 电解槽能量平衡计算体系示意图

4.1.3 槽体散热损失计算部位

为了准确地计算电解槽的槽体散热损失,将槽体分为如下几个部分进行计算:

- a) 槽壳侧钢板;
- b) 槽壳端钢板;
- c) 槽底钢板;
- d) 槽壳侧部及端部筋板;
- e) 槽沿板;
- f) 槽四周槽罩;
- g) 槽顶水平罩;
- h) 铝导杆;
- i) 阴极钢棒。

4.1.4 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。

4.1.5 体系内电压降计算

计算体系内电压降按公式(6)进行(见 2.3.2)。

4.1.6 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(7):

$$Q_{\text{电能}} = Q_{\text{反应}}^k + Q_{\text{气体}}^{k \sim t_1} + Q_{\text{铝}}^{k \sim t_2} + Q_{\text{残级}}^{k \sim t_3} + Q_{\text{原材料}}^{k \sim t_4} + Q_{\text{热损}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$Q_{\text{反应}}^k$ ——在计算温度 t_k 下发生电化学反应所耗的全能,单位为千焦每小时(kJ/h);

$Q_{\text{气体}}^{k \sim t_1}$ ——电解烟气离开体系时(温度为 t_1)所带走的热量,单位为千焦每小时(kJ/h);

$Q_{\text{析}}^{k \sim t_2}$ ——产物铝液离开体系时(温度为 t_2)所带走的热量,单位为千焦每小时(kJ/h);

$Q_{\text{残液}}^{k \sim t_3}$ ——更换出的残阳极离开体系时(温度为 t_3)所带走的热量,单位为千焦每小时(kJ/h);

$Q_{\text{原材料}}^{k \sim t_{\text{环}}}$ ——原材料加热的热量补偿,单位为千焦每小时(kJ/h);

注:当环境温度 $t_{\text{环}}$ 小于计算温度 t_k 时,原材料需加热至 t_k ,所需热量为正值。当 $t_{\text{环}} < t_k$ 时,对计算体系而言,需带走热量为负值。一般而言,体系计算温度与环境温度差值不大,此项可忽略不记。

$Q_{\text{散热}}$ ——体系向周围环境通过对流、辐射和传导而损失的散量,单位为千焦每小时(kJ/h)。

4.1.7 铝电解反应能计算

按铝电解总反应式,即公式(1)可知:

$$\Delta H_{\text{反应}}^0 = \left[2\Delta H_{\text{反应}}^0 + \frac{3N}{1+N}\Delta H_{\text{反应}}^0 + \frac{3(1-N)}{1+N}\Delta H_{\text{反应}}^0 \right] A - \left[\Delta H_{\text{反应}}^0 + \frac{3}{1+N}\Delta H_{\text{反应}}^0 \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta H_{\text{反应}}^0 = \frac{\Delta H_{\text{反应}}^0}{2 \times 27} M \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

4.1.8 对流热损失的计算

对流热损失的计算见公式(10):

$$Q_{\text{对}} = \alpha_{\text{对}} (t_1 - t_2) S \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$Q_{\text{对}}$ ——对流散热损失,单位为千焦每小时(kJ/h);

t_1 ——环境温度(距散热体 0.5 米高处),单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

t_2 ——给热面温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

S ——给热面面积,应按图纸资料查出或按实测进行计算,单位为平方米(m^2);

$\alpha_{\text{对}}$ ——对流换热系数,单位为千焦每平方米小时摄氏度 $[\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})]$;

对于水平向上的给热壁: $\alpha_{\text{对上}} = 1.3\alpha_{\text{对}}$;

对于水平向下的给热壁: $\alpha_{\text{对下}} = 0.7\alpha_{\text{对}}$;

$$\alpha_{\text{对}} = A_3 (t_2 - t_1)^{\frac{1}{4}}$$

$$t_{\text{对}} = \frac{1}{2} (t_2 - t_1)$$

对于介质为空气的紊流情况, A_3 与 $t_{\text{对}}$ 的关系如图 5 所示,各散热面的 $\alpha_{\text{对}}$ 值应按实测温度计算出 $t_{\text{对}}$,再按图 5 曲线 A_3 ,算出 $\alpha_{\text{对}}$ 。

4.1.9 辐射热损失计算

辐射热损失的计算见公式(11):

$$Q_{\text{辐}} = \epsilon c_0 \varphi \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] S \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$Q_{\text{辐}}$ ——辐射热损失,单位为千焦每小时(kJ/h);

ϵ ——散热面的黑度系数;

c_0 ——绝对黑体的辐射系数,其值为 $20.7665 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$;

φ ——角度系数;

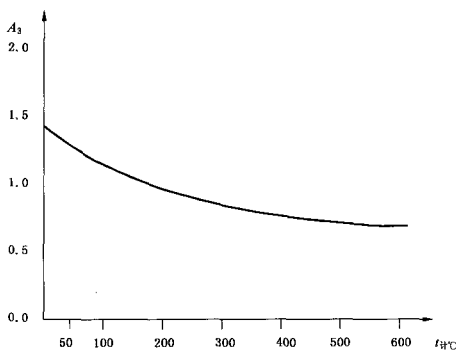
S ——辐射面积,单位为平方米(m^2)。

YS/T 481—2005

4.2 能量收入的计算

能量收入(即 $Q_{\text{电能}}$)的计算见公式(12):

$$Q_{\text{电能}} = 3\,600 I E_{\text{体系内}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

图5 A_3 与 $t_{\text{计}}$ 关系图

4.3 能量支出的计算

4.3.1 铝电解反应能

按公式(1), 反应所需要的总能量计算见公式(13):

$$\Delta H_{\text{反应}}^0 = \frac{\Delta H_{\text{铝98反应}}^0}{2 \times 27} M \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (13)$$

4.3.2 CO 、 CO_2 气体带走热量 CO 、 CO_2 气体带走热量($Q_{\text{CO}} + Q_{\text{CO}_2}$)计算见公式(14):

$$Q_{\text{CO}} + Q_{\text{CO}_2} = (\Delta H_{\text{CO}} + \Delta H_{\text{CO}_2}) / \frac{M}{54} \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta H_{\text{CO}} = \frac{3(1-N)}{1+N} \int_{T_1}^{T_2} C_{p_{\text{CO}}} dT \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta H_{\text{CO}_2} = \frac{3N}{1+N} \int_{T_1}^{T_2} C_{p_{\text{CO}_2}} dT \quad \dots\dots\dots (16)$$

公式(14)和公式(15)中:

$$C_{p_{\text{CO}_2}}} = 10.55 + 2.16 \times 10^{-8} T - 2.04 \times 10^5 T^{-2};$$

$$C_{p_{\text{CO}}} = 6.79 + 0.98 \times 10^{-8} T - 0.11 \times 10^5 T^{-2};$$

 $T_1 = 273 + t_1$ ——厂房环境温度, 单位为开尔文(K); $T_2 = 273 + t_2$ ——槽上排烟管中测量的烟气温度, 单位为开尔文(K)。

4.3.3 空气带走热量

空气带走的热量 $Q_{\text{空气}}$ 的计算见公式(17):

$$Q_{\text{空气}} = m_{\text{空}} c (T_2 - T_1) V_{\text{空}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

 $m_{\text{空}}$ ——该系统每立方米空气的重量, 单位为千克每立方米(kg/m^3); c ——空气比热, 单位为千焦每千克开尔文 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; T_2 ——烟气离开体系时的绝对温度, 单位为开尔文(K); T_1 ——环境的绝对温度, 单位为开尔文(K);

当 $T_2 \neq 273 + 30\text{K}$ 时, 应查表修正 $m_{\text{空}}$ 及 c 的数值。

$V_{\text{空}}$ ——自然对流进入罩内空气的流量, $V_{\text{空}} = V_{\text{槽}} - (V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_2})$, 单位为立方米每小时 (Nm^3/h);

$V_{\text{槽}}$ ——电解槽烟气流量, 单位为立方米每小时 (Nm^3/h);

V_{CO_2} —— CO_2 气体流量, $V_{\text{CO}_2} = \frac{3N}{1+N} \times \frac{M}{54} \times 22.4$, 单位为立方米每小时 (Nm^3/h);

V_{CO} —— CO 气体流量, $V_{\text{CO}} = \frac{3N(1-N)}{1+N} \times \frac{M}{54} \times 22.4$, 单位为立方米每小时 (Nm^3/h)。

4.3.4 产物铝液带走热量

产物铝液带走的热量 Q_{Al} 分为 3 部分, 其计算见公式(18):

$$Q_{\text{Al}} = Q_{\text{Al固}} + Q_{\text{Al熔}} + Q_{\text{Al液}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$Q_{\text{Al固}} = c_1 M(t_1 - t_k) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$Q_{\text{Al熔}} = \lambda M \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_{\text{Al液}} = c_2 M(t_2 - t_1) \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

c_1 ——铝在 $20^\circ\text{C} \sim 658^\circ\text{C}$ 的平均比热, 其值为 $c_1 = 0.967 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_1 ——铝的熔融温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$);

t_k ——体系温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$);

λ ——铝的熔化热, 其值为 $\lambda = 395.733 \text{kJ}/\text{kg}$;

c_2 ——液体铝熔点以上的平均比热, 其值为 $c_2 = 1.075 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_2 ——铝水离开体系时温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)。

4.3.5 残极块带走热量

残极块带走的热量 $Q_{\text{残极}}$ 计算见公式(22):

$$Q_{\text{残极}} = \frac{n}{D} mc(T_1 - T_k) \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

$\frac{n}{D}$ ——每小时换极数;

m ——残极重量, 单位为千克 (kg);

c ——碳块比热, 其值为 $c = 0.709 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T_k ——体系计算温度, 单位为开尔文 (K);

T_1 ——换出残极绝对温度, 单位为开尔文 (K), 其值为 $T_1 = (t_2 + t_3)/2 + 273$;

其中: t_2 和 t_3 分别为实测得到的换出残极上表面的温度和电解温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)。

4.3.6 钢爪带走热量

钢爪带走的热量 $Q_{\text{爪}}$ 计算见公式(23):

$$Q_{\text{爪}} = \frac{n}{D} mc(T_1 - T_k) \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$\frac{n}{D}$ ——每小时换极数;

m ——每组阳极的钢爪重量, 单位为千克 (kg);

c ——钢爪比热, 其值为 $c = 0.5004 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T_1 ——钢爪的绝对温度, 单位为开尔文 (K);

T_k ——计算体系的绝对温度, 单位为开尔文 (K)。

4.3.7 换块散失的热量

换块散失的热量 $Q_{\text{换块}}$ 计算见公式(24):

$$Q_{\text{换块}} = \frac{t}{60} \frac{n}{D} S(Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}) \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

t ——每次换块所用的时间,单位为分钟(m);

$\frac{n}{D}$ ——每小时换极数;

S ——每组阳极底掌的面积,单位为平方米(m^2);

$Q_{\text{耐}}$ 、 $Q_{\text{蓄}}$ ——按公式(10)、(11)计算,其中 $\alpha_{\text{耐上}} = 1.3\alpha_{\text{耐}}$,黑度系数 $\epsilon = 0.9$,辐射角度系数 $\varphi = 1.0$ 。

4.3.8 电解槽体系内各部的散热损失

当预焙槽的各部位热流量,采用热流计仪表直接测量电解槽各部散热损失热量的方式时,计算各部散热损失的方法可按表2的计算公式及参数进行计算,将测量后的计算结果,或用算法法计算的结果,填写在表3中并进行热平衡计算。

表2 预焙阳极铝电解槽能量平衡计算公式及参数表

位 置	面积 m^2	平均温度 $^{\circ}\text{C}$	环境温度 $^{\circ}\text{C}$	$C_0 \epsilon \varphi$	A_3	$\alpha_{\text{耐}}$	计算公式
1、集气罩							
水平罩				$20.7665 \times 1 \times 1$		$1.3\alpha_{\text{耐}}$	$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
侧 罩				$20.7665 \times 0.15 \times 0.8$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
端 罩				$20.7665 \times 0.8 \times 0.3$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
2、导 杆				$20.7665 \times 0.15 \times 0.7$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
3、槽沿板				$20.7665 \times 0.82 \times 1$		$1.3\alpha_{\text{耐}}$	$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
4、槽 壳							$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
侧板、侧筋				$20.7665 \times 0.82 \times 0.7$		$1.3\alpha_{\text{耐}}$	$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
端板、端筋				$20.7665 \times 0.82 \times 0.7$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
底 板				$20.7665 \times 0.82 \times 0.5$		$0.7\alpha_{\text{耐}}$	$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
5、阴极棒头				$20.7665 \times 0.82 \times 0.5$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
6、铝 头				$20.7665 \times 0.15 \times 0.1$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$
7、换 块				$20.7665 \times 0.63 \times 1.0$			$Q_{\text{耐}} + Q_{\text{蓄}}$

5 铝电解槽能量平衡分析

5.1 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。铝电解有效能量为在电解温度下进行铝电解反应,在单位时间内产生各种电解产物所消耗能量的总和。

5.2 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:

- 1) 能量收支平衡的测试与计算误差,应控制在 $\pm 5\%$ 以内,即: $|\Delta Q / \Sigma Q| \times 100\% \leq 5\%$
- 2) 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;
- 3) 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。

5.3 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,分析评价电解槽测部、端部和槽底钢板温度的特征值如最高温度、平均温度及其温度分布规律性的合理性。

5.4 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。

表 3 预焙阳极铝电解槽能量平衡表

热 收 入		热 支 出		占总收入 %
项 目	kJ/h	项 目	kJ/h	
I、Q _{电能}		a、铝电解反应耗能		
		b、CO、CO ₂ 气体带走热量		
		c、产物铝带走热量		
		d、残极块带走热量		
		e、钢爪带走热量		
		f、换块散失热量		
		g、烟气带走热量		
		h、槽体系散热损失		
		(1) 槽壳侧板及筋板		
		(2) 槽壳底部		
		(3) 槽沿板		
		(4) 盖板及水平罩		
		(5) 阴极钢棒头		
		(6) 铝导杆		
总收入 = I		总支出 = a + b + + h		
差 额				

附录 A

(规范性附录)

五点进电和六点进电预焙阳极铝电解槽电压平衡测试与计算方法

A.1 立柱母线压降 $V_{\text{立柱母线}}$

A.1.1 每根立柱母线均为三部分并分别进行测试：立柱软母线段 $V_{\text{立1}}$ 线段，立柱压接 $V_{\text{立2}}$ 段，及立柱硬母线 $V_{\text{立3}}$ ，每段测点取定见图 A.1，分别按图示位置标记，各立柱母线电压降分别记为 $V_{\text{立}i}$ 。5 根立柱母线电压降分别记 $V_{\text{立1}}, V_{\text{立2}} \dots V_{\text{立5}}$ 。 ($i=1 \sim 5$, 分别表示 5 根立柱不同段电压降)；6 根立柱母线电压降分别记 $V_{\text{立1}}, V_{\text{立2}} \dots V_{\text{立6}}$ 。 ($i=1 \sim 6$, 分别表示 6 根立柱不同段电压降)

A.1.2 数据处理

各立柱母线电压降计算见公式(A.1)：

$$V_{\text{立}i} = V_{\text{立1}} + V_{\text{立2}} + V_{\text{立3}} = \frac{V_{1\text{左前}} + V_{1\text{左后}} + V_{1\text{右前}} + V_{1\text{右后}}}{4} + \frac{V_{2\text{左前}} + V_{2\text{左后}} + V_{2\text{右前}} + V_{2\text{右后}}}{4} + \frac{V_{3\text{左上}} + V_{3\text{左下}} + V_{3\text{右上}} + V_{3\text{右下}}}{4} \dots \dots \dots (A.1)$$

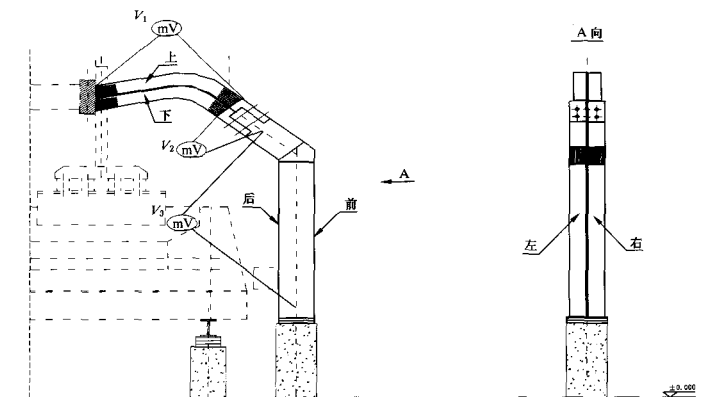


图 A.1 立柱母线电压测点示意图

根据公式分别计算各立柱母线电压降。立柱母线总电压降记为 $V_{\text{立柱母线}}$ 。

五点进电立柱母线电压降计算见公式(A.2)：

$$V_{\text{立柱母线}} = \frac{\sum_{i=1}^5 (V_{\text{立}i} V_{\text{立柱等距电压降}})}{\sum_{i=1}^5 V_{\text{立柱等距电压降}}} \dots \dots \dots (A.2)$$

六点进电立柱母线电压降计算见公式(A.3)：

$$V_{\text{立柱母线}} = \frac{\sum_{i=1}^5 (V_{\text{立}i} V_{i\text{立柱等距压降}})}{\sum_{i=1}^5 V_{i\text{立柱等距压降}}} \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

注: $V_{\text{立}i}$ 的处理方法采用平均法的原因是大多数立柱母线各段均用焊板连接为一体。若立柱规格不一致时, $V_{i\text{立柱等距压降}}$ 根据实测数据进行校正。

A.2 阳极母线压降 $V_{\text{阳极母线}}$

阳极母线由电解槽 A 侧、B 侧(包含平衡母线)构成。

A.2.1 A 侧阳极母线压降 $V_{\text{阳A}}$

A.2.1.1 A 侧阳极横母线测点如图 A.3~A.6 所示, 记做 $V_{A1} \dots\dots V_{Ai}$, 同时测定各导杆等距压降记做 $V_{Ai\text{导杆等距压降}}$ 。

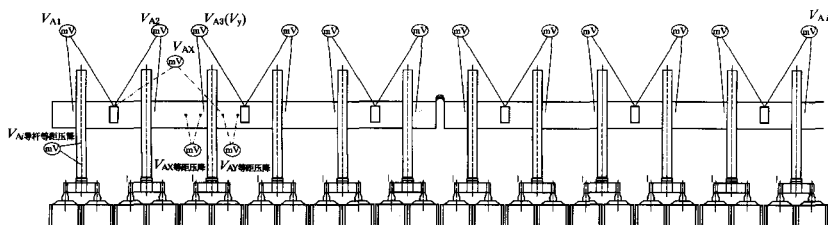


图 A.2 六点进电阳极横母线测点示意图

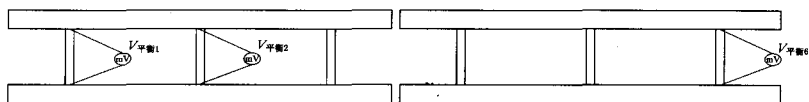


图 A.3 六点进电平衡母线测点示意图

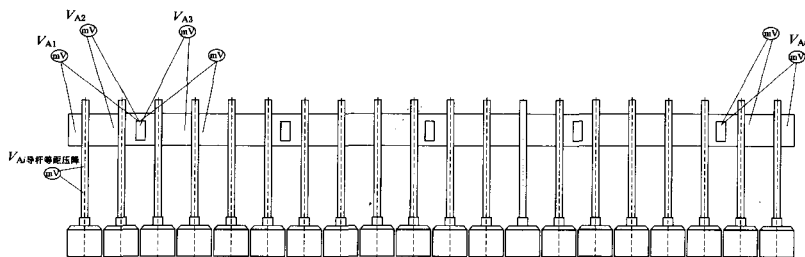


图 A.4 五点进电阳极横母线测点示意图(单阳极)

A.2.1.2 数据处理方法见公式(A.4):

$$V_{\text{阳A}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Ai} V_{Ai\text{导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{Ai\text{导杆等距压降}}} \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

YS/T 481—2005

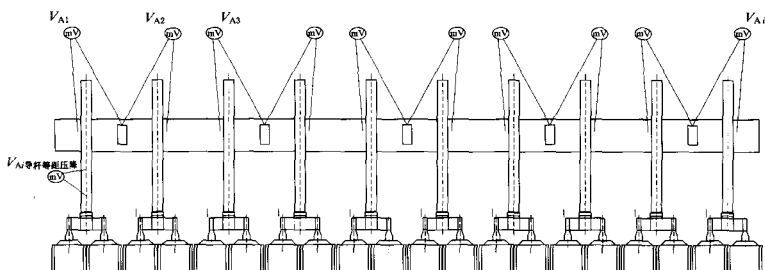


图 A.5 五点进电阳极横母线测点示意图(双阳极)

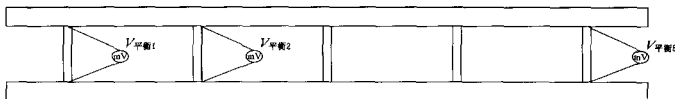


图 A.6 五点进电平衡母线测点示意图

测量过程中,如出现某段阳极导杆同时有来自两侧的电流则需同时增测该段电压值,如图 A.2 虚线测点所示,假设导杆 3 有来自两侧电流同时汇流情况,需增测 V_{Ax} 和 V_{Ay} 及其两侧的阳极等距压降 V_{Ax} 等距压降和 V_{Ay} 等距压降。此时该区功率由原来的 V_{A3} 变为 V'_{A3} ,见公式(A.5):

$$V'_{A3} = V_{Ax} + \frac{V_{Ay} \text{等距压降}}{V_{Ax} \text{等距压降} + V_{Ay} \text{等距压降}} V_{A3} \quad (\text{A.5})$$

依此类推,将各段电压公式(A.5)代入公式(A.4),即可计算出 $V_{阳A}$ 。

A.2.2 B 侧阳极母线压降 $V_{阳B}$

A.2.2.1 B 侧阳极母线压降由 B 侧横母线压降 $V_{阳B横}$ 及平衡母线压降 $V_{平衡}$ 构成。

A.2.2.1.1 平衡母线压降 $V_{平衡母线}$ 的测点如图 A.3 及 A.6 所示($V_{平衡1} \dots V_{平衡n}$),计算见公式(A.6):

$$V_{平衡母线} = \frac{k_1 V_1^2 + k_2 V_2^2 \dots + k_n V_n^2}{k_1 V_1 + k_2 V_2 \dots + k_n V_n} \quad (\text{A.6})$$

式中:

k_n ——平衡母线断面修正系数,可按图纸进行修正,如断面相同,则 $k_n = 1$ 。

A.2.2.1.2 B 侧阳极横母线压降,其测试方法及数据处理与 A 侧阳极横母线相同,数据处理见公式(A.7):

$$V_{阳B横} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Bi} V_{Bi \text{导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{Bi \text{导杆等距压降}}} \quad (\text{A.7})$$

则

$$V_{阳B} = V_{平衡} + V_{阳B横} \quad (\text{A.8})$$

A.2.3 阳极母线压降

阳极母线压降计算见公式(A.9):

$$V_{阳极母线} = \frac{V_{阳A} \sum_{i=1}^n V_{Ai \text{导杆等距压降}} + V_{阳B} \sum_{i=1}^n V_{Bi \text{导杆等距压降}}}{\sum_{i=1}^n V_{Ai \text{导杆等距压降}} + \sum_{i=1}^n V_{Bi \text{导杆等距压降}}} \quad (\text{A.9})$$

A.3 阳极电压降 $V_{\text{阳极}}$

阳极压降计算见公式(A.10):

$$V_{\text{阳极}} = V_{\text{卡具}} + V_{\text{导杆}} + V_{\text{爆}} + V_{\text{侧爪}} + V_{\text{阳极炭块}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.10})$$

A.3.1 阳极卡具电压降 $V_{\text{卡具}}$

A.3.1.1 测定方法:卡具电压降是阳极横母线与阳极导杆间的压降,测试方法见图 A.7。A、B 两侧卡具压降依次分别记作 $V_{\text{卡}1} \dots\dots V_{\text{卡}i}$ 。

A.3.1.2 阳极卡具电压降数据处理方法见公式(A.11):

$$V_{\text{卡具}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{卡}i} V_{i\text{导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{i\text{导杆等距压降}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.11})$$

A.3.2 铝导杆电压降 $V_{\text{导杆}}$

A.3.2.1 测定方法:依次测 A、B 两侧导杆电压降,测试值记作 $V_{\text{导}1} \dots\dots V_{\text{导}i}$ 见图 A.7。

A.3.2.2 铝导杆电压降数据处理方法见公式(A.12):

$$V_{\text{导杆}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{导}i} V_{i\text{导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{i\text{导杆等距压降}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.12})$$

A.3.3 爆炸焊片电压降 $V_{\text{爆}}$

A.3.3.1 测定方法:依次测 $V_1, V_2 \dots\dots V_i$ 爆炸焊片压降,测试值记作 $V_{\text{爆}i}$, 见图 A.7。

A.3.3.2 爆炸焊片电压降数据处理方法见公式(A.13):

$$V_{\text{爆}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{爆}i} V_{i\text{导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{i\text{导杆等距压降}}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.13})$$

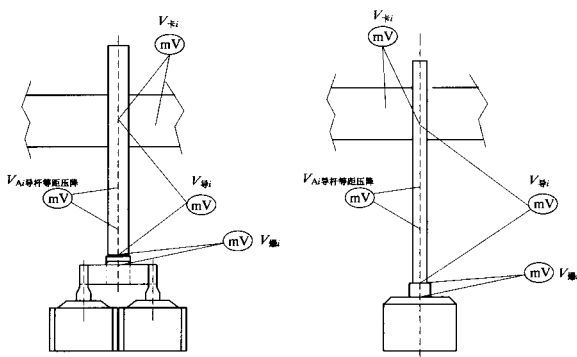


图 A.7 阳极导杆、爆炸焊测点示意图

YS/T 481—2005

A.3.4 钢爪电压降 $V_{\text{钢爪}}$ (mV)A.3.4.1 测定方法:依次测 $V_1 \cdots V_i$ 每块(组)阳极钢爪电压降,记作 $V_{i1} \cdots V_{im}$ 。见图 A.8。

A.3.4.2 数据处理方法

先用算术平均法计算每块(组)阳极的 m 个钢爪(单极为三或四个钢爪,双极为六或八个钢爪)压降 $V_{\text{钢爪}}$,再用功率法计算全部钢爪的平均压降 $V_{\text{钢爪}}$,见公式(A.14)和(A.15):

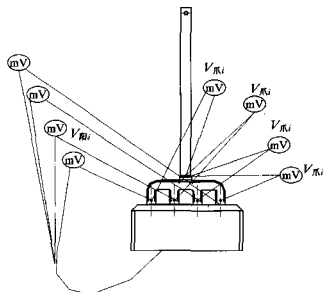


图 A.8 阳极钢爪及炭块示意图

$$V_{\text{钢爪}} = (V_{i1} + V_{i2} + \cdots + V_{im}) / m$$

$$V_{\text{钢爪}} = (V_{i1} + V_{i2} + \cdots + V_{im}) / m \quad \cdots \cdots \cdots (A.14)$$

$$V_{\text{钢爪}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{钢爪}} V_{i \text{ 导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{i \text{ 导杆等距压降}}} \quad \cdots \cdots \cdots (A.15)$$

A.3.5 阳极炭块电压降 $V_{\text{阳极炭块}}$

A.3.5.1 测定方法

揭开炉盖,用多功能天车打测定洞。测定棒一端插在阳极钢爪与炭块相切位置,另一端钩在阳极底表面上,见图 A.8。

A.3.5.2 数据处理方法

先用算术平均计算每块阳极的 m 个钢爪至底掌的压降,见公式(A.16);再用功率法计算阳极炭块压降见公式(A.17)。

$$V_{\text{阳}} = (V_{i1} + V_{i2} + \cdots + V_{im}) / m \quad \cdots \cdots \cdots (A.16)$$

$$V_{\text{阳极炭块}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{阳}} V_{i \text{ 导杆等距压降}})}{\sum_{i=1}^n V_{i \text{ 导杆等距压降}}} \quad \cdots \cdots \cdots (A.17)$$

A.4 炉底电压降 $V_{\text{炉底}}$

A.4.1 测定方法:在电解槽 A、B 侧各均匀取 n 个点(可根据槽型选择测点个数)的位置揭开相应的炉盖,用多功能天车打测定洞 $2n$ 个,见图 A.9。

A.4.2 炉底电压降数据处理方法见公式(A.18):

$$V_{\text{炉底}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{A \text{ 侧}} + \sum_{i=1}^n V_{B \text{ 侧}}}{2n} \quad \cdots \cdots \cdots (A.18)$$

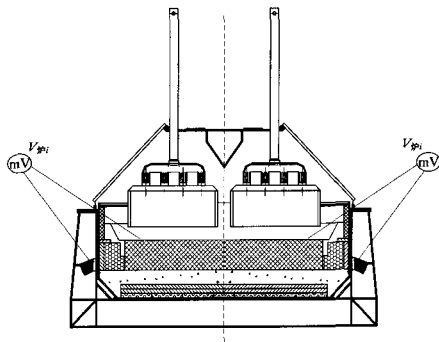


图 A.9 炉底电压降测点示意图

A.5 阴极母线电压降 $V_{\text{阴极母线}}$

A.5.1 测定方法

将汇流到同一根立柱的 A、B 侧阴极母线及对应的阴极软带视为一个区，有 N 根立柱就有 N 个小区，每区电压降记为 $V_{\text{阴}N}$ 。六点进电的电解槽测点共分成 6 个区， $V_{\text{阴}N}$ 为 $V_{\text{阴}1}$ 、 $V_{\text{阴}2}$ …… $V_{\text{阴}6}$ ；五点进电的电解槽测点共分成 5 个区， $V_{\text{阴}N}$ 记做 $V_{\text{阴}1}$ 、 $V_{\text{阴}2}$ …… $V_{\text{阴}5}$ 。每个区内从每根阴极钢棒焊头至阴极母线对应的立柱汇流点为测点，分别记做 V_{N1} …… V_{Ni} ，同时测定每根阴极软带的压降值记做 $V_{N\text{阴软带}i}$ ，测点见图 A.10、A.11。（图 A.10、A.11 分别为六点、五点进电母线配置实例之一。）

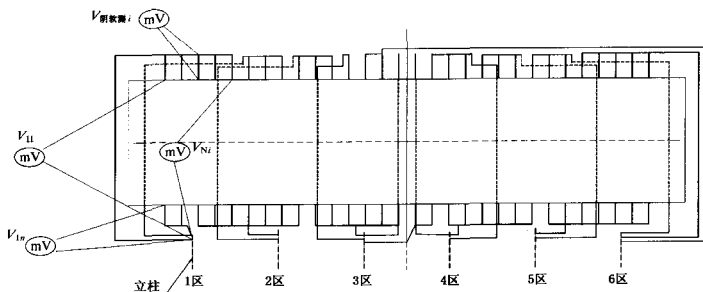


图 A.10 六点进电阴极母线电压降测点示意图

A.5.2 数据处理

在处理数据时，考虑到电解槽阴极软母线形式不同，在计算时，实测阴极软带压降应乘以相应的电流分布修正系数 K_1 …… K_i （含温度及等导校正，等导校正按阴极软带实际尺寸计算，不同配置母线系统，该系数不同）。各小区压降数据处理见公式（A.19）：

$$V_{N\text{阴软带}i} = K_i V_{N\text{阴软带}i} V_{\text{阴}N} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{N1} V_{N\text{阴软带}i})}{\sum_{i=1}^n V_{N\text{阴软带}i}} \dots\dots\dots (\text{A.19})$$

YS/T 481—2005

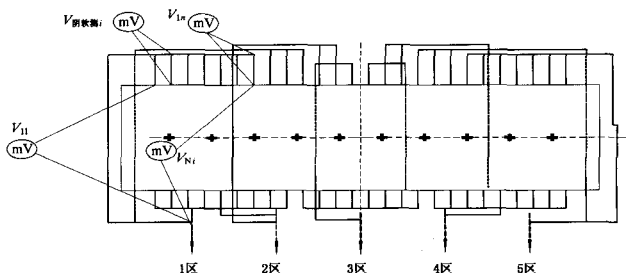


图 A.11 五点进电阴极母线电压降测点示意图

式中 n 为第 N 小区内各阴极软带到对应立柱电流回路数量。

计算出 6 (或 5) 个小区内电压降后再计算总的阴极母线电压降 $V_{\text{阴极母线}}$ 。

六点进电电解槽阴极母线压降计算见公式 (A.20)：

$$V_{\text{阴极母线}} = \frac{V_{\text{阴1}} \sum_{i=1}^n V_{1\text{阴软条}i} + V_{\text{阴2}} \sum_{i=1}^n V_{2\text{阴软条}i} + \dots + V_{\text{阴6}} \sum_{i=1}^n V_{6\text{阴软条}i}}{\sum_{i=1}^n V_{1\text{阴软条}i} + \sum_{i=1}^n V_{2\text{阴软条}i} + \dots + \sum_{i=1}^n V_{6\text{阴软条}i}} \quad (\text{A.20})$$

五点进电电解槽阴极母线压降计算见公式 (A.21)：

$$V_{\text{阴极母线}} = \frac{V_{\text{阴1}} \sum_{i=1}^n V_{1\text{阴软条}i} + V_{\text{阴2}} \sum_{i=1}^n V_{2\text{阴软条}i} + \dots + V_{\text{阴6}} \sum_{i=1}^n V_{5\text{阴软条}i}}{\sum_{i=1}^n V_{1\text{阴软条}i} + \sum_{i=1}^n V_{2\text{阴软条}i} + \dots + \sum_{i=1}^n V_{5\text{阴软条}i}} \quad (\text{A.21})$$

A.6 效应分摊电压 $V_{\text{效应分摊}}$

效应分摊电压计算见公式 (A.22)：

$$V_{\text{效应分摊}} = \frac{n(V_{\text{效}} - V_{\text{工}})t}{1440} \quad (\text{A.22})$$

式中：

n ——效应系数，单位为次/(槽·日)；

$V_{\text{工}}$ ——槽工作电压，单位为伏(V)；

$V_{\text{效}}$ ——效应发生时电压，单位为伏(V)；

t ——效应持续时间，单位为分钟(min)。

A.7 极间电压 $V_{\text{极间}}$

A.7.1 短路法

A.7.1.1 确定进行电压平衡测试的电解槽，要求炉膛比较大，规整，以防止阳极下降受阻或电解质溢流。

A.7.1.2 测定步骤：立柱母线电压降、阳极母线电压降、阳极电压降、炉底电压降、阴极母线电压降测定完毕之后，测电解质电压和反电动势。先与计算机联系，打印该槽状态表，确定当时槽工作电压记作 V_1 。确认当时回转计数值为 m_1 (并有现场观察记录)，通知计算机室将该槽短路，当阳极全部浸入铝液中为止。计算机室立即自动记录整个过程，打印槽状态表，该槽电压为 V_2 ，回转计数值为 m_2 。

短路法计算极间电压的方法见公式(A.23)和公式(A.24)：

$$V_3 - V_2 = V_{\text{极间}} = V_{\text{电解质}} + V_{\text{极化}} \quad \cdots \cdots (A.23)$$

$$V_{\text{槽工作}} = V_{\text{立柱母线}} + V_{\text{阳极母线}} + V_{\text{阳极}} + V_{\text{炉底}} + V_{\text{阴极母线}} + V_{\text{电解质}} + V_{\text{极化}} \quad \cdots \cdots (A.24)$$

A.7.2 反减法

将立柱母线电压降、阳极母线电压降、阳极电压降、炉底电压降、阴极母线电压降、效应分摊电压降测定完之后，通过数据处理，用测试期槽平均电压减去已知测试计算的槽各部电压降，求极间电压，见公式(A.25)。

$$V_{\text{极间}} = V_{\text{槽平均}} - (V_{\text{立柱母线}} + V_{\text{阳极母线}} + V_{\text{阳极}} + V_{\text{炉底}} + V_{\text{阴极母线}} + V_{\text{效应分摊}}) \quad \cdots \cdots (A.25)$$

A.7.3 “电压—极距”法

电解质电压降采用“电压—极距法”进行测量，测量时先升阳极三次，每次 5 mm，然后分三次降阳极回原位，记录每次升降阳极的槽电压及有关数据，同时用极距测定棒测量槽极距值，利用测量结果计算出电解质电压降。

A.7.4 反电动势

由于反电动势只能在停电时测量，为避免停电中测量反电动势造成的槽况波动，一般情况下，其值按经验值取定(预焙阳极电解槽可取 1.65V)。

A.8 计算结果

六点、五点进电预焙阳极铝电解槽电压计算结果见表 A.1。

表 A.1 六点、五点进电预焙阳极铝电解槽电压平衡情况

项 目		电压降/mV	点总电压的百分数/%
一、立柱母线	立柱 1		
	立柱 2		
	立柱 3		
	立柱 4		
	立柱 5		
	立柱 6*		
	总电压降		
二、阳极母线	1 A 侧		
	2 B 侧		
	总电压降		
三、阳极	1、卡具		
	2、铝导杆		
	3、爆炸焊		
	4、钢爪		
	5、阳极碳块		
	总电压降		
四、炉底			

表 A. 1(续)

项 目		电压降/mV	点总电压的百分数/%
五、阴极母线	1 区		
	2 区		
	3 区		
	4 区		
	5 区		
	6 区*		
	总压降		
六、效应分摊			
七、极间			
总 计			
瞬时槽电压			
误 差(%)			
电 流(A)			
测 量 时 间			
槽 龄			
* : 五点进电预焙阳极铝电解槽电压平衡计算结果不包括带“*”项。			