

铝电解槽壳散热模型^①

李 洪 梅 焱 王前普 游 旺

(中南工业大学热能工程系, 长沙 410083)

摘 要 将铝电解槽壳底部及侧部分解成三种散热单元, 这三种散热单元可排列与组合成各种现代铝电解槽壳表面结构。提出了开口向下水平平板肋的稳态自然对流与表面辐射的耦合传热新模型, 并结合另外两种单元的耦合传热模型对肋板的温度分布、散热量等进行计算求解, 对肋板性能进行分析。用三种检验方法检验三种散热模型, 设计编写的数值计算程序和近似计算程序能简单、精确、快速地计算不同类型的电解槽壳的散热, 计算结果较原有行业算法包含更多的信息量。

关键词 数值计算 铝电解槽壳 表面散热

能量平衡的测定是检验设计是否正确并指导生产的重要手段, 电解槽系列能否取得好的技术经济指标的关键是电解槽的热平衡变化很小和操作十分稳定, 因此对热平衡的测量和研究历来受到广泛重视^[1-3]。在能量平衡的测量与计算中, 热损失计算的准确度直接影响能量平衡计算的可靠性, 所以探讨准确地计算铝电解槽壳热损失的方法是很有必要的。

目前国内外热能工程计算热损失的一般方法是: 测定各散热表面上若干点的温度, 并把各个表面近似看作一个平板, 计算平板与环境之间辐射热损失; 再利用相似原理, 计算表面对流换热损失。但就实际电解槽来说, 随着电解槽容量增大, 电解槽结构由简单到复杂, 槽壁有加固肋板和型钢(单, 双围带)。肋板对槽散热具有一定的影响, 特别是在电解槽间通风较好的情况下, 利用上述方法计算热损失将产生较大的误差。因此, 研究电解槽壳散热问题, 对于槽壳结构合理的设计及精确地计算槽壳底部与侧部的散热将有十分重要的意义。

1 铝电解槽壳散热单元模型

目前国外大部分铝电解槽和国内 80 年代

后新建的铝电解槽都朝着预焙下料式大型槽发展^[4], 电解槽槽壳倾向于采用摇篮式及臂撑式结构, 为此选择贵州铝厂 160kA 电解槽壳, 湖北铝厂 60kA 托架式槽壳, 贵阳铝厂 180kA 电解槽及新设计的 280 kA 电解槽壳为代表, 分析这几种槽壳结构。电解槽侧部肋板可分解成图 1 及图 2 两种具有代表性的研究单元, 电解槽底部可分解成图 3 型式的研究单元, 这三种单元可以排列组合成各种型式的现代电解槽槽壳。

1.1 开口向下水平平板肋的稳态自然对流与表面辐射的耦合传热模型

1.1.1 物理模型

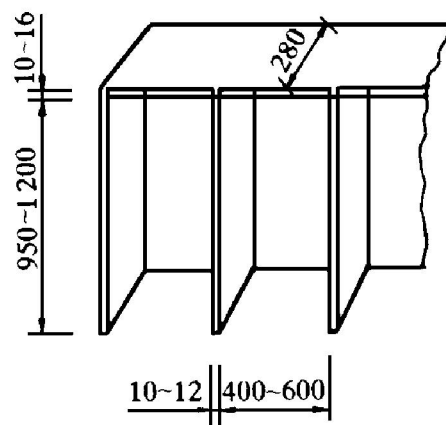


图 1 垂直平板肋

① 收稿日期: 1995-06-19; 修回日期: 1995-09-25 李 洪, 男, 30 岁, 硕士

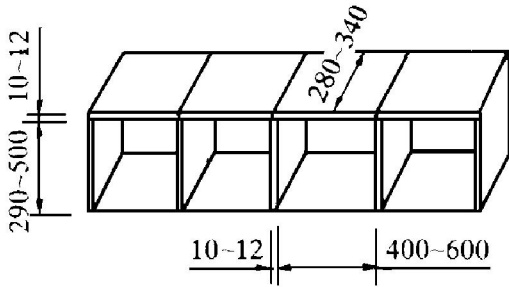


图2 开口空腔

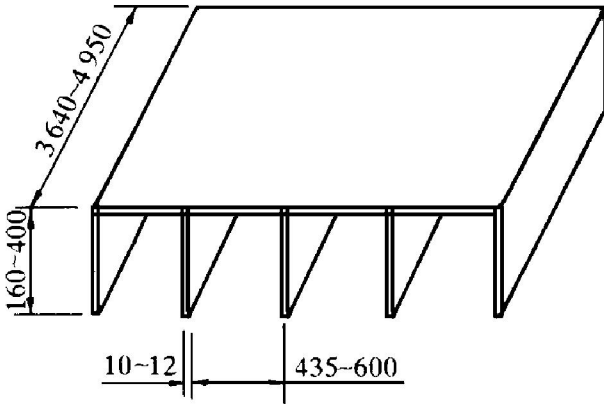


图3 开口向下水平平板肋

开口向下水平平板肋简化几何示意图见图4, 并以下面的基本假设为基础: (1) 肋板温度场处于稳态; (2) 肋板为矩形剖面, 在垂直方向的高度很大, 肋的厚度 2δ 相对于肋高度 a 相当小(即 $\delta \ll a$), 因此肋的导热可视为一维导热; (3) 肋的表面为灰体漫射表面, 所有表面辐射率 ε 相同; (4) 在研究的温度范围内, 肋的导热率 k 为常数, 不随温度变化。

1.1.2 无量纲控制方程

$$X = x/a, W = b/a, T = T^*/T_2^*,$$

$$T_0 = T_0^*/T_2^*, H = G/(\sigma T_2^{*4}),$$

$$B = J/(\sigma T_2^{*4}), R = Q_r/(\sigma T_2^{*4}),$$

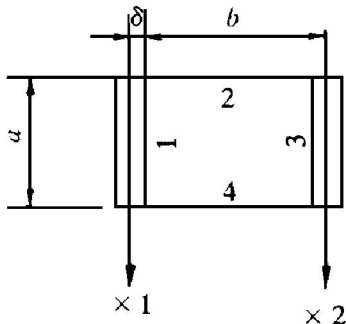


图4 水平平板肋

$$A_r = \sigma T_2^{*3} a^2 / (\varepsilon k), A_h = h a^2 / (\varepsilon k),$$

$$A_c = a h^3 / k \quad (1)$$

$$\frac{d^2 T_1(X_1)}{dX_1^2} = A_r R_1(X_1) + A_h (T_1(X_1) - T_0) \quad (2)$$

边界条件:

$$X_1 = 0, T_1(X_1) = 1, X_1 = 1, dT_1(X_1)/dX_1 = 0 \quad (3)$$

$$B_2(X_2) = \varepsilon + (1 + \varepsilon) (2 \int A_1 B_1(X_1) dF_{dA_2-dA_1} + T_0^4 F_{A_2-A_4}) \quad (4)$$

$$R_1(X_1) = B_1(X_1) - \int A_2 B_2(X_2) dF_{dA_1-dA_2} - \int A_3 B_3(X_3) dF_{dA_1-dA_3} - T_0^4 F_{A_1-A_4} \quad (5)$$

$$B_1(X_1) = T_1^4(X_1) - R_1(X_1)(1 - \varepsilon)/\varepsilon \quad (6)$$

$$B_1(X_1) = B_3(X_3) \quad (7)$$

各个表面微元面辐射角系数参见文献[5]。每个肋板导热散热量:

$$Q_1 = -2k\delta \left. \frac{dT_1(X_1)}{dX_1} \right|_{X_1=0} = -2k\delta T_2^* \cdot \left. \frac{dT_1(X_1)}{a dX_1} \right|_{X_1=0} \quad (8)$$

每块肋壁辐射量:

$$Q_2 = -\frac{2a^2 l \sigma T_2^{*4}}{1 - \varepsilon} \int_0^w (B_2(X_2) - 1) dX_2 \quad (9)$$

每块肋壁对流换热量:

$$Q_3 = h_1 b (T_2^* - T_0^*) = h_1 b (1 - T_0) T_2^* \quad (10)$$

$$Q = \sum_{i=1}^3 Q_i \quad (11)$$

在有辐射的情况下, 一般采用加肋系数对肋板性能进行评价。无肋板单位散热量:

$$Q_0 = h_2 (b + 2\delta) (T_2^* - T_0^*) + \varepsilon (b + 2\delta) (T_2^{*4} - T_0^{*4}) = h_2 (b + 2\delta) (1 - T_0) T_2^* +$$

$$\varepsilon(b + 2\delta) \cdot (1 - T_0^*) T_2^{*4} \quad (12)$$

加肋系数:

$$\eta = Q/Q_0 \quad (13)$$

1.1.3 计算结果

(1) Q 随 k 的变化

图 5 绘出 180 kA 电解槽当 $a = 0.36$ m, $b = 0.55$ m, $\delta = 0.01$ m, $\varepsilon = 0.8$ 时, 换热量 Q 随导热系数 k 的变化曲线。 k 值增大到一极值后再增加, 换热量 Q 的变化率反而减少。因此采用 k 值很大的铜或铝质肋板是不实际的。这是因为当 k 值很大时, 肋板顶端温度与基部温度很接近, 辐射屏蔽增大, 辐射散热量显著减少的原故。

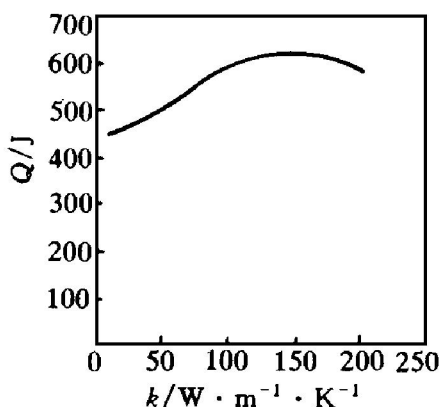


图 5 换热量 Q 与导热系数 k 的关系

(2) Q 随辐射率 ε 的变化

图 6 绘出 180 kA 电解槽当 $a = 0.36$, $b = 0.55$, $\delta = 0.01$, $k = 50$ W/(m·K) 时, Q 随 ε 的变化曲线。由于辐射换热量与 T_2' 有关, 所以, T_2' 越高, Q 随 ε 的增加便越显著, 这就从定量角度上给出在计算中忽略辐射的不合理性。

1.1.4 近似处理方法

运用前文所述方法可以数值计算肋板的温度分布及传热特性, 但由于角系数的计算复杂, 求解式(2)需逐次迭代, 同时还需要对有效辐射进行迭代, 这样就构成了双重迭代, 在一般微机上运算速度较缓慢。目前许多热能工程中采用导热率高的材料, 温度沿肋高下降较小, 因此可采用总换热系数的概念, 并假设其沿肋高均匀, 对这一问题进行分析求解。经与数值计算比较, 当壁温不太高时, 其精度是可

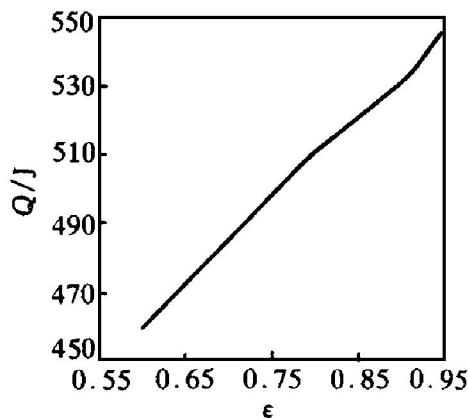


图 6 换热量 Q 与辐射率 ε 的关系

以信赖的, 且计算过程比数值计算大为简化。

(1) 数学模型

如图 7 所示的矩形直肋, 其温度分布微分方程式及边界条件如下^[6]:

$$d^2\theta/dx^2 - m^2\theta = 0 \quad (14)$$

$$x = 0, \theta = \theta_0 \quad (15)$$

$$x = a, d\theta/dx = 0,$$

$$\theta/\theta_0 = (T_1^*(x) - T_0^*) / (T_2^* - T_0^*) \quad (16)$$

$$m = \sqrt{h_{tot}/(k\delta)} \quad (17)$$

求解式(14), (15)得如下公式:

$$(T - T_0^*) / (T_2^* - T_0^*) = e^{-ma} e^{mx} / (e^{-ma} - e^{ma}) + e^{ma} e^{-ma} / (e^{ma} - e^{-ma}) \quad (18)$$

$$Q_1 = -2k\delta \frac{dT_1^*(x_1)}{dx_1} \Big|_{x=0} \quad (19)$$

假定 h_{tot} 的初始值, 由式(18)解出温度分布后, 再取其沿肋高方向的平均值:

$$T' = (T_2^* - T_0^*) \int_0^a (T - T_0^*) dx / ((T_2^* - T_0^*) + T_0^*) \quad (20)$$

引入辐射换热系数后, 可绘出沿肋高的总平均换热系数:

$$h_{tot} = h + \varepsilon(\sigma T'^4 - B'_1) / [(1 - \varepsilon)(T' - T_0^*)] \quad (21)$$

式中 B'_1 —沿肋高的平均有效辐射, 且

$$B'_1 = \varepsilon\sigma T'^4 + (1 - \varepsilon)B'_3 F_{14} + \sigma T_0^{*4} F_{14} \quad (22)$$

$$B'_2 = \delta\varepsilon T_2^{*4} + 2(1 - \varepsilon)B'_1 F_{21} + (1 - \varepsilon)\sigma T_0^{*4} F_{24} \quad (23)$$

$$B'_3 = B'_1 \quad (24)$$

角系数参见文献[5]。

由式(22), (24)得:

$$B'_1 = [\varepsilon T'^4 + \sigma(1-\varepsilon)F_{14}T_0^{*4} + (1-\varepsilon)^2 F_{12}F_{24}\sigma T_0^{*4} + \varepsilon(1-\varepsilon)F_{12}\sigma T_2^{*4}] / [1 - (1-\varepsilon)F_{13} - 2(1-\varepsilon)^2 F_{12}F_{21}] \quad (25)$$

(2) 计算结果

由式(18)、(19)可解出肋板中的温度分布及散热量, 由于 T'_2 对近似解的精度影响最大, 所以在图8中画出180kA槽肋板数值计算散热量 Q (用 $l=1.0$ 表示) 及近似计算散热量 Q (用 $l_j=1.0$ 表示) 与 T'_2 的关系, 并与数值方法计算的结果进行比较, 在规定范围内, Q_1 的误差最大不超过4%, 这个精度是可以满足一般工程实际工况的。

1.2 垂直平板肋的稳态自然对流与表面辐射的耦合传热模型

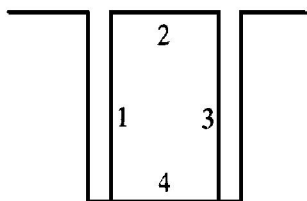


图7 矩形直肋

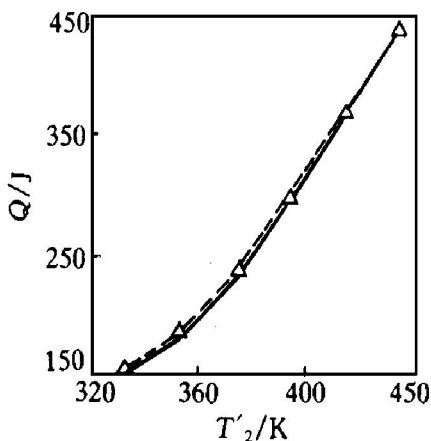


图8 肋板数值计算散热量 Q 和近似计算散热量 Q 与 T'_2 的关系

180kA 槽; $a=0.36$; $b=0.55$;

$\delta=0.01$; $k=50$; $\varepsilon=0.8$

其物理模型、数学模型及近似处理方法^[7-8]与水平平板肋的耦合传热模型基本相同。

1.3 开口空腔的稳态自然对流与表面辐射的耦合传热模型

其物理模型、数学模型参见文献[9]。

2 组合模型

2.1 组合模型数值计算

由现场测量及图纸获得原始数据, 输入三种模型计算程序, 可分别计算获得单个开口向下水平平板肋、单个水平无肋板平面、单个垂直平板肋、单个垂直无肋板平面、单个开口空腔及单个无开口空腔平面的散热量 Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_{v1} 、 Q_{v2} 、 Q_{c1} 及 Q_{c2} , 则总的散热量为:

$$Q = n_{p1}Q_{p1} + n_{p2}Q_{p2} + n_{v1}Q_{v1} + n_{v2}Q_{v2} + n_{c1}Q_{c1} + n_{c2}Q_{c2} \quad (26)$$

2.2 三种数值计算模型的检验

为检验数值计算程序的准确性, 分别于1993年1月、10月、12月及1994年4月分别对160kA及180kA电解槽进行现场测试。

(1) 图8证明这两种数值计算方法之间可以相互检验, 这可作为数学模型的可靠性的有力证明之一。

(2) 表1表示180kA电解槽数值计算槽底部及侧部的热平衡与实测的热平衡, 结果表明数值计算的槽底部及侧部的散热量与实测值大体相吻合, 这可作为数学模型的可靠性的有力证明之二。

(3) 表2表示160kA电解槽垂直平板肋数值计算与现场实测值, 表3表示180kA电解槽水平平板肋数值计算与实测值, 结果表明计算值与实测值大体吻合, 这可作为数学模型的可靠性的有力证明之三。

3 结论

(1) 将铝电解槽壳侧部及底部分解成三种

散热单元来研究槽壳散热, 通过计算与现场实测证明是一种可行的方法;

(2) 用三种检验方法验证了开口向下水平平板肋等三种单元散热模型的可靠性;

(3) 本论文设计编写的槽壳底部及侧部散热计算机程序能简单、精确、快速地计算不同类型的电解槽壳的散热; 程序计算结果较原有色行业算法包含更多的信息量;

(4) 有助于提高现有的电解槽热场解析程序关于电解槽侧部及底部热损失计算的准确性。

符号说明

A_i 、 A_j 、 A_k 、 A_l —无量纲微元面积; a —肋板高度, m ;
 a^*/a —无量纲系数; B 、 b_1 、 b_2 —无量纲入射辐射;
 b —肋板间距, m ; b^*/b —无量纲系数; ε —槽

壳黑度; F 、 F_{ij} —角系数; h 、 h_1 、 h_2 —对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; J —有量纲有效辐射, J ; l —肋板长度或微元体长度, m ; k —导热系数, $W/(m \cdot K)$; l_1 、 l_2 、 l_3 —肋板长度, m ;
 G —有量纲入射辐射, J ; n_{p1} —单个开口向下水平平板的数量; n_{p2} —单个水平无肋板肋平面的数量; n_{v1} —单个垂直平板肋的数量; n_{v2} —单个垂直无平板肋平面的数量; n_{c1} —单个开口空腔的数量; n_{c2} —单个无开口空腔平面的数量;
 δ —肋板厚度的一半, m ; σ —斯蒂芬-波尔兹曼常数 $W/(m^2 \cdot K^4)$; η —加肋系数; T_2 、 T'_2 —槽内壁温度或面 2 温度, K ; T_1 —槽外壁温度或面 1 温度, K ; T_0 —环境温度或肋顶温度, K ; x_i —有量纲坐标; T_i —无量纲温度; X_i —无量纲坐标; 上标'—平均值; 上标*—有

表 1 180 kA 2 号槽能量平衡表(1993 年 12 月)

热输入/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$		热支出 $Q/\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$				占总收入百分比/%	
项目	计算值	项目	计算值	实测	计算	实测	计算
1A 的 电能	2.601×10^6	1 铝电解反应能		1.157×10^6	--	44.48	--
		2 产物铝带走热		7.46×10^4	--	2.87	--
		3 残极带走热		0.9×10^4	--	0.35	--
		4 钢爪带走热		0.17×10^4	--	0.07	--
		5 换阳极块损失热		0.433×10^4	--	0.17	--
		6 烟气带走热		0.724×10^4	--	27.8	--
		7 槽体散热				21.96	22.54
		(1) 槽壳底部及侧部		31.16×10^4	32.67×10^4	11.98	12.56
		(2) 槽上部盖板及水平罩		19.10×10^4	--	7.34	--
		(3) 阴极钢棒		2.50×10^4	--	0.96	--
		(4) 铝导杆		1.26×10^4	--	0.48	--
		(5) 槽沿板		3.10×10^4	--	1.2	--
		总支出		2.542×10^6	2.557×10^6	97.73	98.31
		差 额		5.9×10^4	4.4×10^4	2.27	1.69

表 2 160 kA 电解槽垂直平板肋的温度分布(1994 年 4 月), T/K

项 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
第一层计算	373	369	363	357	351	346	341	336	331	326	323
实测	373			354				337			323
第二层计算	456	447	435	424	414	404	394	384	374	365	358
实测	456			419				390			358

表 3 180 kA 电解槽水平平板肋的温度分布(1994 年 4 月), T/K

项 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
计 算	360	355	348	342	336	331	325	320	315	310	307
实 测	360		344						313	307	

量纲量; R —无量纲辐射量; 下标 tot —总的; q —热流密度, W/m^2 ; Q —散热量, W 。

参考文献

- 1 Grjotheim K *et al.* Aluminium Electrolysis-fundamentals of Hall- Herault Process (2th edition). Düsseldorf: Aluminium Press, 1982.
- 2 Qiu Zhuxian, Grjotheim K *et al.* Aluminium, 1986, 62(7): 524- 527.
- 3 沈泽方. 见: 第二届全国轻金属冶金学术论文集. 青海: 中国有色金属学会轻金属冶金学术委员会, 1990: 329- 335.
- 4 张永注. 轻金属, 1993, (8): 19- 24.
- 5 扬贤荣. 辐射换热系数手册. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- 6 梅 焱. 冶金传递过程原理. 长沙: 中南工业大学出版社, 1986.
- 7 李 洪. 硕士论文. 长沙: 中南工业大学, 1995.
- 8 李 洪, 梅 焱, 王前普. 见: 中国金属学会热工热能第八届学术年会. 石家庄: 中国金属学会热能与热工工学会, 1995: 9.
- 9 林成先, 辛明道, 张洪济. 重庆大学学报, 1991, 14(6): 1- 6.

MODELS FOR HEAT TRANSFER FROM ALUMINIUM REDUCTION CELL SHELLS

Li Hong, Mei Chi, Wang Qianpu, You Wang
*Department of Applied Physics and Heat Engineering,
Central South University
of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT The heat transfer was analysed numerically by the conduction, natural convection and radiation on the aluminium reduction cell shells. The temperature, the heat dissipation and other data of the fins were calculated, and the characteristics of which were analysed and tested by in-situ measurement. The numerical programs have been designed, by which the calculated results of the heat dissipation of different kinds of aluminium reduction shells can be obtained easily and quickly. Besides, the programs provide more information than any other existing algorithms.

Key words numerical calculation aluminium reduction cell shells heat dissipation

(编辑 吴家泉)