[仿真模拟]

铝氧化银电池漏电电流计算

文/中国电子科技集团第18研究所　孙昕昊　韩　超

采用数值模拟的方法，利用Ansys Maxwell软件计算了复杂的液相电阻阻值，对铝银电池漏电时单体内部的电阻进行了计算分析，从而得到每个单体漏电电流及整个电堆的漏电电流分布情况。与以往计算液相电阻的方法相比，该模型的建立和数值模拟的方法适应性更强，计算所得漏电流值更加接近实测值。

铝氧化银电池是鱼雷动力电池的重要体系，是电动鱼雷的主要发展方向。保证鱼雷有足够的航速和航程是鱼雷动力电池的最重要使命，这就要求铝银电池不但要具有更小的体积，还要有更高的比能量。但是由于铝氧化银电池中存在固有漏电电流，会降低电池效率，消耗电池的活性物质。因此对漏电电流值的研究、量化和控制尤为重要。

漏电问题普遍存在于具有共用电液通道的双极性堆式电池中，一般将流过液相电阻的电流称为漏电电流，而将流过单体电池的电流称作电流损耗。电堆液相电阻的计算准确与否，影响整个电堆漏电电流值的准确性。以往的研究中，液相电阻的计算方法比较简单，没有明确单体进出口液相电阻的计算方法。

为进一步研究单体液相电阻，通过数值模拟的方法计算复杂空间结构的液相电阻阻值，对铝氧化银电池漏电时单体内部电阻进行计算分析，更精确地计算出每个单体及电池回路中各部分的电阻，所建立的数学模型和计算结果更接近实测值，为计算液相电阻阻值提供了更准确的计算方法。

双极性堆式结构电池漏电流计算

1．数学模型

通过建立数学模型，将参与漏电的双电极看做是一个等效电压源，将漏电流流经的液相通道等效为电阻，利用数值模拟的方法求出单体分液盘电阻，从而将电池中参与漏电的部分等效为一个线性电路模型再加以计算。电池分模块供液结构图如图1所示，电池等效电路图如图2所示。

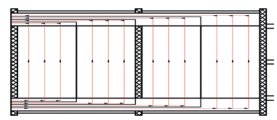


图1　分四模块供液的电池结构图

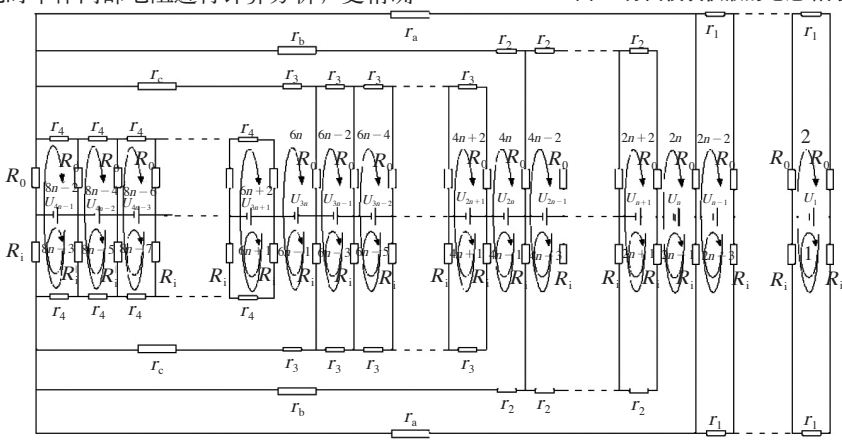


图2　电池电路等效模型

由图2可以看出此电路模型为线性电路模型，且为平面电路。n为每个模块的单体数；U_1、U_2、…、U_{4n-1}表示参与漏电的双电极的输出电压；R_i表示单体入口通道的液相电阻；R_0表示单体出口处的液相电阻；r_1为模块一单体间总管处的液相电阻；r_2为模块二单体间总管处的液相电阻；r_3为模块三单体间总管处的液相电阻；r_4为模块四单体间总管处的液相电阻；r_a为模块一到出入口的汇流管的液相电阻；r_b为模块二到出入口的汇流管的液相电阻；r_c为模块三到出入口的汇流管的液相电阻。

根据基尔霍夫定律，应用回路电流法，可以将电路图画出$8n-2$条回路，列写每一个回路的电阻电路方程如下。

$$\begin{aligned}
&R_{11}i_1+R_{12}i_1+\cdots+R_{1k}i_k+\cdots+R_{1(8n-2)}i_{(8n-2)}=u_1\\
&R_{21}i_1+R_{22}i_2+\cdots+R_{2k}i_k+\cdots+R_{2\ (8n-2)}i_{(8n-2)}=u_2\\
&\cdots\\
&R_{k1}i_1+R_{k2}i_2+\cdots+R_{kk}i_k+\cdots+R_{k\ (8n-2)}i_{(8n-2)}=u_k\\
&\cdots\\
&R_{(8n-2)1}i_1+R_{(8n-2)2}i_2+\cdots+R_{(8n-2)k}i_k\\
&\quad+\cdots+R_{(8n-2)(8n-2)}i_{(8n-2)}=u_{8n-2}
\end{aligned}\tag{1}$$

式（1）中，i_k表示回路k的环流电流；R_{kk}（$k=1$、2、…、$8n-2$）是第k个回路的自电阻，它等于第k个回路所包含各支路电阻之和，电阻为正值；R_{jk}（$j=1$、2、…、$8n-2$；$j\neq k$）是第j个回路与第k个回路所共有的电阻之和，即i_k、i_j流经的电阻，并且当i_k、i_j流经共同电阻方向一致时 R_{jk}的值乘以+1，相反时R_{jk}的值乘以−1，若回路j、k没有共同电阻时$R_{jk}=0$；u_k（$j=1$、2、…、$8n-2$；$j\neq k$）是第k个回路中各电源电压代数和，凡电源电压参考方向与回路电流参考方向相反时有正号；否则有负号。

可以列写出一个包含$8n-2$个方程的方程组，将其写成矩阵方程的形式

$$AX=B \tag{2}$$

式（2）中，A为（$8n-2$）×（$8n-2$）阶矩阵，X为（$8n-2$）×1阶矩阵，B为（$8n-2$）×1阶矩阵。

对应电路可知，A矩阵是一个关于液相电阻R_i、R_0、r_1、r_2、r_3、r_4、r_a、r_b、r_c的矩阵，它是一个主对角线占优且主对角线对称的矩阵

$$B=[U_1\ \ 0\ \ U_2\ \ 0\ \ \cdots\ \ \cdots\ \ U_{4n-1}\ \ 0]^{\mathrm{T}}$$

$$X=[i_1\ \ i_2\ \ i_3\ \ i_4\ \ \cdots\ \ \cdots\ \ i_{8n-3}\ \ i_{8n-2}]^{\mathrm{T}}$$

解矩阵方程得到矩阵X，矩阵X为一个列向量，其中的奇数项的元素与双电极上流过的漏电流一一对应，即$I_1=i_1$、$I_2=i_3$、$I_3=i_5$、…、$I_{4n-1}=i_{8n-3}$。

I_1、I_2、…、I_{4n-1}分别表示流过双电极U_1、U_2、…、U_{4n-1}的漏电流。

2．漏电流计算

电池的结构参数及液相电阻的公式为

$$R_{液}=\rho\frac{L}{S} \tag{3}$$

式（3）中，ρ为电液的电阻率，单位为Ω·mm；L/S为电液通道电流方向上的长度，单位为mm；S为电液通道电流方向上的截面积，单位为mm^2。

可得$R_i=6.55\rho$、$R_0=3.86\rho$、$r_1=0.0076\rho$、$r_2=0.00767\rho$、$r_3=0.01044\rho$、$r_4=0.01044\rho$、$r_a=1.433\rho$、$r_b=0.972\rho$、$r_c=0.627\rho$。只要代入ρ和各双电极电压U_1、U_2、…、U_{239}，运用MATLAB解矩阵方程即可算得流过各单体的漏电流。

原计算方法的漏电流模型推算使用的参数中单体液相电阻均由公式计算得出，而L/S为电液通道电流方向上的长度与截面积之比，由于单体进出口的空间结构复杂，以往情况下使用人工划分为几块较规则的形状计算再进行串并联组合得出L/S的一个平均值。通过数值模拟的方法计算单体液相电阻可以更精确，所得漏电流值更加准确。

单体液相电阻计算

1．数值模型

所应用的电场控制方程为安培环路定律

$$\oint_L H\mathrm{d}l=\int_S\left(J+\frac{\partial D}{\partial t}\right)\mathrm{d}S \tag{4}$$

式（4）中，J为传导电流密度矢量，单位为A/m^2；$\frac{\partial D}{\partial t}$为位移电流密度；$D$为电通密度，单位为$C/m^2$。

式（4）对应微分形式的麦克斯韦方程组为

$$\nabla\times H=J+\frac{\partial D}{\partial t} \tag{5}$$

电磁场计算中，对上述偏微分进行简化，以便能用分离变量法、格林函数等解得电磁场的解析解。

标量电势定义为

$$E=-\nabla\phi \tag{6}$$

根据安培环路定律，推导出电场偏微分方程

$$\nabla^2\phi-\mu\varepsilon\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=-\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{7}$$

2．建立液相电阻模型

（1）几何模型

为了便于分析和方便计算，对单体结构进行

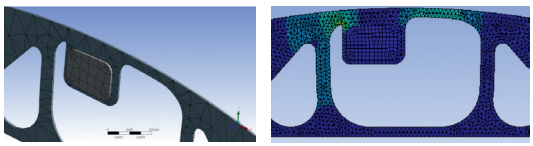
简化建立模型，图3、图4为单体进、出口分液盘几何模型，其中绿色部分为液体，灰色部分是固体材料且不导电。单体进出口分别为独立计算域。位于计算域中间的凸起台为单体分液盘的进（出）液口，即兜口，如图5a所示。

图3　单体分液盘出口几何模型

图4　单体分液盘进口几何模型

（2）离散模型

为保证质量，所有网格均使用copper网格。加密后网格size在0.085 mm。局部细节及整体网格密度如图5a、图5b及图6所示。



(a)　(b)

图5　加密前、加密后局部网格模型对比

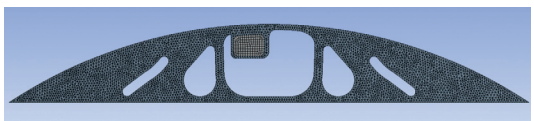


图6　加密后整体网格模型

3．设置及边界条件

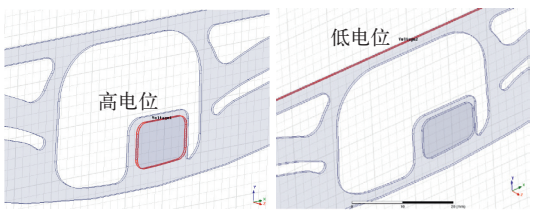
（1）求解器设置

建立maxwell 3D Design，选择静态电场作为分析求解器。

（2）物性参数及边界条件

1）流体域中流动介质定义为water_sea。其物性参数按水设置，电阻率为50 Ω·mm。

2）高、低电位加载位置如图7所示。固定计算域电压为2 V。



(a)　(b)

图7　高电位、低电位加载位置对比

4．计算结果

（1）电压和电流密度云图

电压和电流密度云图如图8～图11所示。

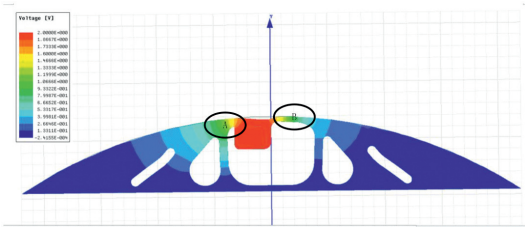


图8　单体出口分液盘电压密度云图

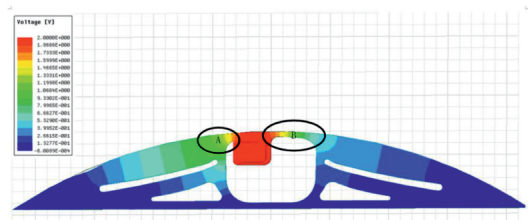


图9　单体进口分液盘电压密度云图

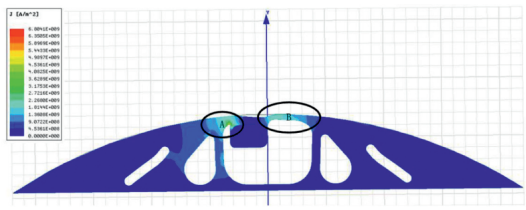


图10　单体出口分液盘电流密度云图

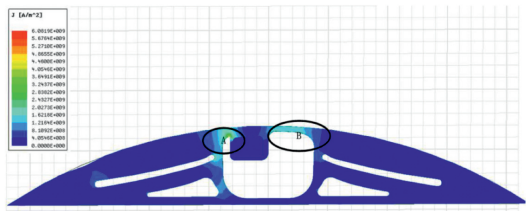


图11　单体进口分液盘电流密度云图

1）分液盘左右两侧电压分布不完全对称，A侧的电压值较高。

2）电流分布不完全对称，A侧电流密度大。A、B两侧差别明显，且电流生热的温度分布云图与电流密度云图相同。

3）兜口分液盘两侧支路电流云图阶梯性变化明显。分液盘两侧支路A、B位置电流值大并且电压高，发热功率高，温度最高。

4）兜口上方位置电压正常，无电荷经过。

（2）实验验证

实验测得漏电电流值与仿真计算值对比如

下表所示。

原方法与实测值计算误差在16%～50%之间，误差相对较大；仿真计算值与实测值计算误差在5%～24%之间，与原方法相比，仿真计算可以降低与实测值的误差。更好地预估电池漏电情况。

表　实验测得漏电电流值与仿真计算值对比

	原计算方法		仿真计算方法		实测值/A
	计算值/A	与实测值差距（%）	计算值/A	与实测值差距（%）	
模块1平均漏电	0.58	16	0.53	5	0.5
模块2平均漏电	1.34	31	1.21	19	1.05
模块3平均漏电	1.71	35	1.50	18	1.27
模块4平均漏电	1.08	50	0.89	24	0.72
总平均漏电	1.18	34	1.03	18	0.88

所采用的仿真计算方法及设计的几何模型更直接、精确地模拟了实验情况。用仿真得到的单体进出口电阻代入方程计算，其漏电流值比原方法更加接近实验所测得漏电流值。如图12所示。

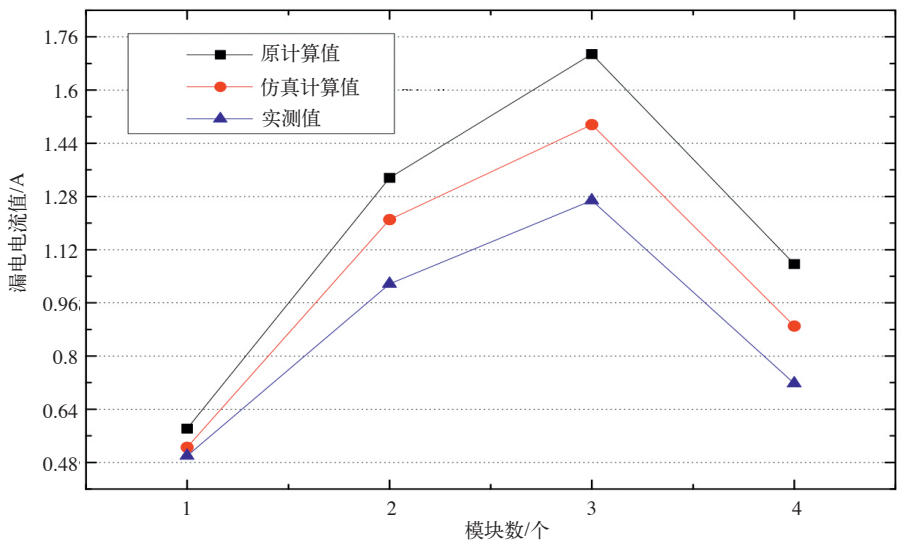


图12　原计算值、仿真计算值与实测值散点图

结束语

1）提供了一种仿真计算方法，使计算的漏电流值更接近实验值，计算结果与实验吻合更好。此计算方法更加合理、准确，可以应用在电堆漏电流计算中液相电阻值的计算。

2）通过数值模拟分液盘电流及电压云图，可以看出分液盘在通电过程中各位置的电流密度及发热功率，可以更好地分析模型的工作状态。

①分液盘出口两侧支路电流云图阶梯性变化明显，电流密度云图梯度较大位置存在于分液盘两侧的支路（A、B位置）与分液盘交接处，分液盘两侧支路（A、B位置）电流值大并且电压高，发热功率高，此处温度最高。应当适当改用耐高温材料，并且此处流经宽度小，不利于整个单体分液盘散热，可以调整尺寸，增加散热功率。

②分液盘A位置电流密度明显大于B位置，发热功率高，分液盘一侧产生的形变较大。

③A、B位置电流密度大，A、B位置的加工尺寸及精度对整个单体漏电流影响较大。

④通过数值模拟得到的电压和电流密度云图可以看出兜口上方基本不参与电荷迁移，对这个位置可以进行删减。

3）在数值模拟结果的基础上对分液盘进行优化设计；通过仿真计算可以节约设计成本与时间，并且提高漏电流估算精度，针对不同位置的单体漏电流值大小对每个单体的容量进行精确设计，有效减轻电池重量。EA

（收稿日期：2016.04.09）
（编辑：刘群点）