

矩形截面铜包铝导电排的导电性能及断面形状结构的影响

罗奕兵 刘新华 谢建新

北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083

摘要 建立了矩形截面包覆材料交流功率损耗的数值计算模型, 分析了铜包铝导电扁排断面形状结构对交流功率损耗的影响. 结果表明: 当断面积为 $S=600\text{ mm}^2$ 时, 功率损耗系数随扁排宽厚比 b/a 的增大而增加; 断面积为 $S=800\text{ mm}^2$ 和 1000 mm^2 时, 随宽厚比 b/a 的增加, 功率损耗系数先增大后减小; 而当断面积为 $S=1200\text{ mm}^2$ 时, 随宽厚比 b/a 的增大, 功率损耗系数减小且减小趋势逐渐变缓. 当扁排厚度为 $a=10\text{ mm}$, 断面积 S 为 $800\sim 1200\text{ mm}^2$ 时, 交流功率损耗随窄边和宽边的铜层厚度比 ($\delta_h/\delta_w=0.5\sim 3.0$) 增加而减小; 铜层厚度之比对功率损耗的影响随包覆层面积比 ($S_A=15\%\sim 45\%$) 的增加而增大. 在单位长度直流电阻和载流量与铜扁排相等时, 选择合适的扁排断面形状结构, 铜包铝扁排可较为明显地降低功率损耗.

关键词 包覆材料; 导电排; 数值分析; 功率损耗; 集肤效应

分类号 TM 201.4; TM 154.1

Effects of sectional form and configuration on the conductivity of copper cladding aluminum bars with a rectangle section

LUO Yi-bing, LIU Xin-hua, XIE Jian-xin

New Materials Technologies Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT A numerical calculate model of alternating current (AC) power loss of clad materials with a rectangle section was presented. The effects of sectional form and configuration on the AC power loss of copper cladding aluminum (CCA) conductive flat bars were analyzed. The results indicate that when the sectional area of the bar is 600 mm^2 , the power loss coefficient increases with the width-to-thickness ratio of the bar increasing; when the area is 800 mm^2 or 1000 mm^2 , the coefficient increases firstly then decreases; and when the area is 1200 mm^2 , the coefficient decreases and the tendency becomes weak with the width-to-thickness ratio increasing. As the thickness of the bar is 10 mm and the sectional area of the bar is in the range of 800 to 1200 mm^2 , the AC power loss decreases with the rate of copper thickness of the bar's narrow side to broadside increasing in the range of 0.5 to 3.0 . The effect of the rate of clad thickness on the AC power loss strengthens as the rate of the copper layer's area to the whole sectional area of the copper cladding aluminum bar increases in the range of 15% to 45% . When the direct current resistance per unit length and current capacity are the same as a copper flat bar's, the AC power loss of the copper cladding aluminum bar is less than that of the copper bar by adjusting the sectional form and configuration.

KEY WORDS clad materials; busbar; numerical analysis; power loss; skin effect

与矩形(扁平)铜排相比, 铜包铝导电扁排具有密度低、价格便宜等优点^[1-3], 可广泛用于建筑中配电母线槽, 中、高频加热设备, 化工冶金领域的大型汇流排等. 扁排在传导工频大电流时, 受集肤效

应^[4-7]的影响, 导体自身的功率损耗增加, 功率损耗是母排热稳定性设计及校核的依据. 以断面积为 $250\sim 1200\text{ mm}^2$ 的铜扁排为例, 工频功率损耗与交流功率损耗相比增大 $3\%\sim 25\%$. 在工程上, 集肤效

收稿日期: 2008-11-10

基金项目: 北京市科技计划资助项目(No. 207000300700707)

作者简介: 罗奕兵(1975-), 男, 博士研究生; 谢建新(1958-), 男, 教授, 博士生导师. E-mail: jxxie@mater.ustb.edu.cn

应程度常采用交流功率损耗 P_{AC} 与直流功率损耗 P_{DC} 之比 k_f 来表征, $k_f = P_{AC}/P_{DC}$, 其中 k_f 称为功率损耗系数. k_f 越小, 表明由于集肤效应所引起的功率损耗越小. 异形截面导体电磁场的边界条件^[7] 无法用数学公式表达, 因此不能利用积分或微分方程求解而获得解析解. 较为常见的异形截面导体功率损耗系数的求解方法^[7-10] 有数值分析(数值积分)法、有限元法和有限差分法等. 数值积分法物理概念明确, 理论推导过程严格, 对于只关心导体截面的电流分布^[10] 问题, 与有限元法、有限差分法相比更加简单和直观.

功率损耗系数 k_f 与材料的电导率、磁导率、截面尺寸、断面形状及电流频率有关. 对于铜包铝复合导电排而言, 由于铜和铝的电导率不同, 铜层的分布位置及铜包覆层面积比对功率损耗系数具有较大影响. 同时, 当采用平辊轧制方法将圆形铜包铝坯料轧制成扁排时^[3], 由于不均匀变形, 轧后扁排容易出现侧边铜包覆层较厚的不均匀分布现象. 因此, 研究铜包铝扁排的断面结构和包覆层面积比对交流功率损耗(导电性能)的影响具有重要的实际意义. 本文采用数值分析法, 建立矩形截面包覆材料的交流功率损耗数值积分计算模型, 分析铜包铝导电扁排断面形状结构对交流功率损耗的影响.

1 功率损耗的数值积分算法

只有当电流频率达到 10^{17} Hz (紫外光谱) 时, 金属导体中的位移电流大小才可能与传导电流相当^[11]. 但是, 电力传输的电流频率(工频)远远小于 10^{17} Hz, 因而金属导体的位移电流与传导电流相比极为微小, 可以忽略. 由于时变电磁场不再是保守场, 为了求解方便, 进行势的变换, 设向量位 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

为了唯一确定 \mathbf{A} , 引入库仑条件 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, 则由导体电流 \mathbf{J}_s 所产生的向量位 \mathbf{A} 为^[9]:

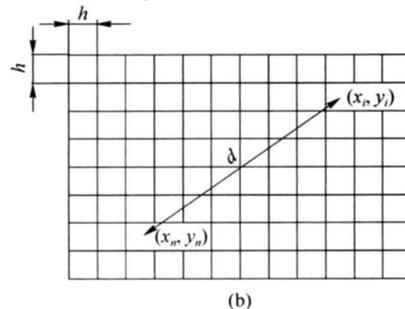
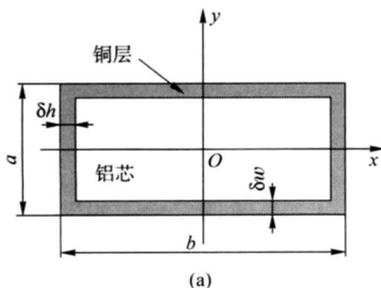


图 1 数值计算模型. (a) 断面结构; (b) 网格划分

Fig. 1 Numerical calculation model: (a) sectional configuration; (b) mesh generation

$$\mathbf{A} = -\frac{\mu}{2\pi} \iint_S \mathbf{J}_s \ln r dS \quad (2)$$

依麦克斯韦方程, 导体截面的电流密度 \mathbf{J} 可表达为:

$$\mathbf{J} = -\sigma \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \cdot \varphi \right\} \quad (3)$$

式中, $\nabla \cdot \varphi = -\left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)$, \mathbf{B} 为磁通量密度, t 为时间, σ 为导体材料电导率, S 为导体截面积, μ 为导体材料磁导率, \mathbf{E} 为电场强度. 因此, 时变电场的纵场部分可由 φ 描述, 横场部分可由 \mathbf{A} 描述.

在实际应用中, 扁排截面的边角一般采用圆角, 已有文献^[12] 研究表明圆角对功率损耗系数具有一定的影响. 考虑到这种影响方向的一致性和数值算法特点, 设导体为矩形截面无限长直导体, 导体轴线与直角坐标系的 z 轴重合, 取导体横截面作为 xoy 面(图 1(a)). 假定导体周围介质为空气, 导体内通以角频率为 ω 的正弦交流电流, 则式(3)的时变场可表达为:

$$\mathbf{J}_z = -j \frac{\omega \sigma \mu}{2\pi} \iint_S \frac{\partial \mathbf{J}_z}{\partial t} \ln r dS - \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (4)$$

式中, \mathbf{J}_z 为 S 截面 z 方向的电流密度; j 为复数虚部单位. 由于扁排为一长直导体, 电流有唯一方向为 z 向, 横截面 xoy 必为一等势面, 否则在 xoy 面内就会产生电流与电场. 因此, 截面内任意一点的电位在 z 向的梯度变化 $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$ 相等.

忽略复合界面层对电流分布的影响, 认为铜层和铝芯直接接触, 因而在铜层和铝芯界面处存在着电导率的跳跃. 采用 N 个边长为 h 的正方形网格(其中铜层金属网格数量为 M) 划分导体横截面(图 1(b)). 若网格划分足够小, 则每个网格内的电流密度可以近似的作为定值处理. 于是便可将(4)式离散为:

$$\mathbf{J}_{z,n} = -j \frac{\omega \sigma \mu}{2\pi} \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{z,i} \cdot \iint_{S_i} \ln \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2} dS - J_s \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N J_{z,i} = I \tag{6}$$

式中, $J_s = \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}$; $i=1, 2, 3, \dots, N$; x_i, y_i 为第 i 个网格中心点的坐标; x_n, y_n 为第 n 个网格中心点的坐标; I 为导体的载流量; $J_{z,n}$ 为第 n 个网格 z 方向的电流密度.

依据网格间的距离 d 的大小^[9-10], 对式(5)的积分部分进行不同方法近似后, 式(5)等价于以下方程组:

$$BJ_n + C \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N J_i \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2} + J_s = 0 \tag{7}$$

式中, J_i 为第 i 个网格中心 z 方向的电流密度; B, C 分别为:

$$B = 1 + j \frac{\omega \mu \sigma}{2\pi} h^2 \ln(0.44705h) \tag{8}$$

$$C = j \frac{\omega \mu \sigma}{2\pi} h^2 \tag{9}$$

式(7)联立式(6)可得一个 $N+1$ 阶的复数线性代数方程组. 将此方程组写成如下矩阵形式:

$$[K][J] = [I] \tag{10}$$

由式(11)可求得电流密度矩阵 J , 从而获得截面内各个网格的电流密度值. 根据各网格电流密度, 可计算出导体单位长度的交流功率损耗 P_{AC} , 求得功率损耗系数 k_f .

$$P_{AC} = \sum_{i=1}^M \frac{|J_i|^2 \cdot h^2}{\sigma_{Cu}} + \sum_{i=M+1}^N \frac{|J_i|^2 \cdot h^2}{\sigma_{Al}} \tag{11}$$

$$k_f = P_{AC} / I^2 R \tag{12}$$

式中, R 为导体单位长度的直流电阻.

从以上功率损耗系数的计算方法的建立过程可以看出, 数值积分法的难点在于系数矩阵 K 的生成和复数线性方程组的求解. Matlab 软件在矩阵计算方面具有非常强大的功能, 因此, 本文采用 Matlab 编程计算.

由于 J_s 在复合界面处存在跳跃, 为降低网格参数赋值的难度及提高计算精度, 在采用边长 h 的网格对截面分割时, 应尽可能使得 $a, b, \delta w$ 和 δh 均是 h 的整数倍; 而当扁排断面尺寸为 h 的非整数倍时, 功率损耗系数可采取插值法^[13]近似计算.

本文计算实例是针对铜包铝扁排集肤效应的功率损耗系数, 但该方法同样可以拓展到其他包覆或层状复合材料的集肤效应和邻近效应功率损耗计算, 只是生成网格的方法和系数矩阵稍有差别, 基本原理和分析方法相同.

2 计算条件

参考有关数据手册, 计算时取铜和铝的电导率^[14]分别为 $\sigma_{Cu} = 5.8 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $\sigma_{Al} = 3.77 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, 铜和铝的磁导率^[14]为 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$. 工频电流频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 网格尺寸 $h = 0.5 \text{ mm}$.

首先, 选择包覆层厚度均匀, 包覆层面积比为 $S_A = 15\%$, 总断面积 S 分别为 600, 800, 1 000 和 1 200 mm^2 的铜包铝扁排为例, 分析宽厚比 b/a 对功率损耗系数的影响; 以断面积 $S = 800 \text{ mm}^2$ 为例, 分析不同包覆层面积比 (15%、30% 和 45%) 条件下, 宽厚比 b/a 对交流功率损耗的影响.

其次, 选择断面尺寸分别为 80 $\text{mm} \times 10 \text{ mm}$ 、100 $\text{mm} \times 10 \text{ mm}$ 、120 $\text{mm} \times 10 \text{ mm}$ 的铜包铝扁排为例, 分析窄边和宽边铜层厚度比 $\delta h / \delta w$ 对功率损耗的影响.

关于包覆层面积比对交流功率损耗影响的研究, 在载流量为 $I = 1500 \text{ A}$, 窄边和宽边铜层厚度比 $\delta h / \delta w$ 分别为 1 和 3 时, 以 100 $\text{mm} \times 10 \text{ mm}$ 铜包铝扁排为对象, 分析包覆层面积比 (即包覆层厚度按 $\delta h / \delta w$ 之比发生变化) 对交流功率损耗的影响.

最后, 以典型规格之一 80 $\text{mm} \times 10 \text{ mm}$ 铜扁排的交流功率损耗为比较, 在单位长度直流电阻 R 和载流量 I 相等的条件下, 分析四种不同断面结构铜包铝扁排的导电性能.

3 计算结果及分析

3.1 扁排宽厚比对功率损耗的影响

当包覆层厚度均匀, 包覆层面积比为 $S_A = 15\%$ 一定时, 扁排宽厚比 b/a 对功率损耗的影响如图 2(a) 所示. 从图中可以看出: 随扁排断面积 S 大小的不同, 宽厚比 b/a 对功率损耗系数的影响规律不同. 当断面积为 $S = 600 \text{ mm}^2$ 时, 随宽厚比 b/a 的增大, 功率损耗系数先逐渐增大然后趋于不变; 断面积为 $S = 800$ 和 1 000 mm^2 时, 随宽厚比 b/a 增大, 功率损耗系数先增大趋于减小. 当断面积为 $S = 800 \text{ mm}^2$, 宽厚比 $b/a = 8$ 时, 功率损耗系数达到最大为 1.097; 而当断面积为 $S = 1200 \text{ mm}^2$ 时, 随宽厚比 b/a 的增大, 功率损耗系数逐渐减小, 且其趋势逐渐变缓, 宽厚比 b/a 从 1.33 增大为 12, 功率损耗系数由 1.183 减小到 1.160.

这是因为当断面积较小时, 扁排的厚度 a 小, 电流密度在厚度方向的不均性变化较小, 当宽厚比 b/a 增大时, 扁排在宽度方向电流分布的不均匀性

增加, 功率损耗系数增加; 而当断面积较大和宽厚比较小时, 扁排的厚度 a 远大于金属的集肤效应影响深度(铝的集肤效应影响深度为 11.6 mm), 电流密度在厚度方向的分布不均匀性过大, 导致功率损耗系数较大, 当宽厚比增大, 厚度方向的电流分布不均减小, 功率损耗系数降低. 从以上分析可知: 当包覆层厚度均匀, 且断面积较小时, 可以采用较小宽厚比(厚度 a 较大)的断面结构; 而当断面积较大时, 可以采用较大宽厚比的断面结构.

当包覆层厚度均匀, 断面积为 $S = 800\text{ mm}^2$ —

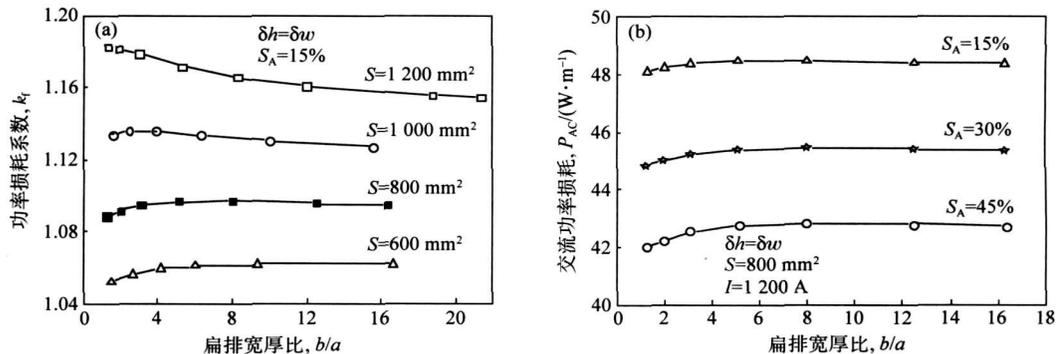


图 2 宽厚比 b/a 对功率损耗的影响. (a) 对功率损耗系数的影响; (b) 对交流功率损耗的影响

Fig. 2 Effect of width-to-thickness ratio b/a on power loss: (a) effect on power loss coefficient; (b) effect on AC power loss

3.2 窄边和宽边铜层厚度比对功率损耗的影响

当载流量为 $I = 1500\text{ A}$, 扁排厚度为 $a = 10\text{ mm}$ 时, 铜包铝扁排的窄边与宽边铜层厚度比 $\delta h/\delta w$ 对功率损耗的影响如图 3 所示. 从图 3(a)中可以看出, 随铜层厚度比 $\delta h/\delta w$ 的增加, 交流功率损耗 P_{AC} 呈减小趋势且随包覆层面积比的增加, P_{AC} 减小

的趋势增大. 从图 3(b)中可以看出, 当包覆层面积为 $S_A = 30\%$ 时, 复合扁排断面积越大功率损耗系数随铜层厚度比 $\delta h/\delta w$ 减小的趋势增大. 例如, 当断面为 $120\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 铜层厚度比 $\delta h/\delta w$ 从 1 增大为 3, 功率损耗系数减小 1.8% .

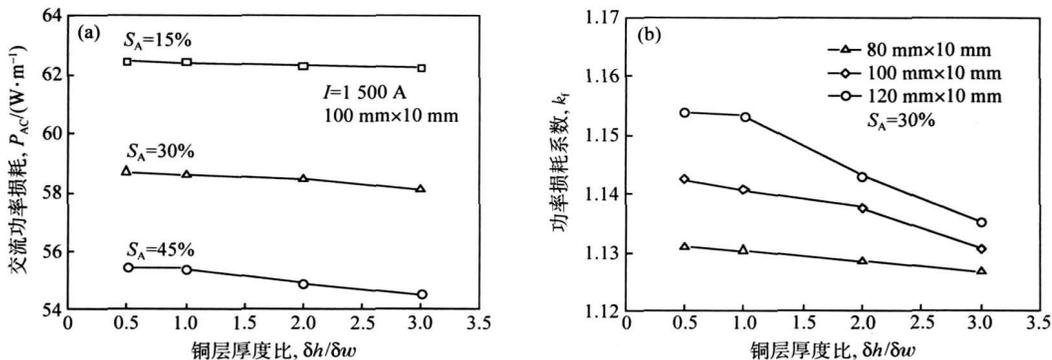


图 3 铜层厚度比 $\delta h/\delta w$ 对功率损耗的影响. (a) 对交流功率损耗的影响; (b) 对功率损耗系数的影响

Fig. 3 Effect of the thickness ratio $\delta h/\delta w$ of the copper layer on power loss: (a) effect on AC power loss; (b) effect on power loss coefficient

功率损耗产生以上变化的原因, 是受集肤效应影响下导体截面的电流分布特点所决定的. 集肤效应产生的感应涡流, 使远离扁排中心线的端部电流密度增大, 而中部的电流密度减小. 铜包铝复合扁排结构有利于铜包覆层承受较高的电流密度, 而心

部铝层承受较小的电流密度, 使扁排的电流密度与断面材料的电导率分布较为一致. 另外, 当铜层厚度之比 $\delta h/\delta w$ 增大, 即扁排断面两端部位置的铜层面积相对较多, 中部位置铜层相对减少, 从而有利于断面的电流分布较为均匀, 交流导电性能相对提高.

3.3 包覆层面积比对功率损耗的影响

当载流量为 $I=1500\text{ A}$, 扁排断面为 $100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 时, 两种断面铜层结构 ($\delta h/\delta w=1$ 和 3) 扁排的包覆层面积比对交流功率损耗 P_{AC} 的影响如图 4 所示. 从图中可见, 铜包铝扁排的交流功率损耗 P_{AC} 并不与包覆层面积比成简单线性关系. 在包覆层面积比相等时, 铜层厚度比 $\delta h/\delta w=3$ 的交流功率损耗小于铜层厚度比 $\delta h/\delta w=1$ 的扁排; 且随包覆层面积比增加, 两种断面结构的交流功率损耗之差值先增大后减小.

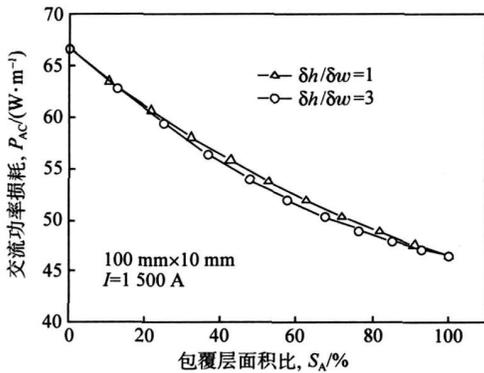


图 4 包覆层面积比对交流功率损耗的影响

Fig. 4 Effect of the area ratio of the cladding layer on AC power loss

3.4 铜包铝扁排的导电性能

从上分析可知, 在断面积较大时, 铜包铝扁排形状宜为大的宽厚比, 断面铜包覆层为均厚或窄边铜

层较厚结构. 以替代 $80\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 铜扁排的导电性能(单位长度电阻和功率损耗系数)为例, 选择包覆层面积比为 $S_A=15\%$ 和 30% 的铜包铝扁排, 扁排选择厚度为 $a=10\text{ mm}$, 断面铜层结构为 $\delta h/\delta w=1$ 和 $\delta h/\delta w=3$. 铜和铜包铝五种扁排的性能参数如表 1 所示. 从表中可见, 在直流电阻 R 相等时, 相比 $80\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 铜扁排, 四种铜包铝扁排的功率损耗系数降低 $1\%\sim 2\%$.

长时间工作的扁排将维持在一个较高温度, 以使功率损耗与环境散热之间维持平衡, 即:

$$P_{AC} = \alpha \cdot S_b \cdot \Delta T \quad (13)$$

式中, α 为扁排导体与环境之间的当量换热系数; S_b 为扁排单位长度的表面积; ΔT 为扁排温度与环境温度之差.

假定环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 铜扁排稳定工作时的温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$. 以表 1 中扁排为例, 在单位长度电阻和载流量相等时, 因铜包铝扁排的散热面积 S_b 增大 $29\%\sim 38\%$, 在扁排导体与环境的当量换热系数相同时, 铜包铝扁排的工作温度下降至 $51\sim 52\text{ }^\circ\text{C}$. 但是, 铜和铝的电阻率随温度降低而减小, 铜和铝的电阻温度系数^[14]取为 $\alpha_t = 4 \times 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 则铜包铝扁排电阻相对减小约 3.2% . 综合分析, 在单位长度电阻和载流量相等的条件下, 选择合适的断面形状结构, 同时由于散热面积增大致使工作温度相对降低, 铜包铝扁排的功率损耗与铜扁排相比将减小 $4\%\sim 5\%$.

表 1 铜包铝扁排和铜扁排的性能参数对比

Table 1 Comparing characteristic parameters of CCA flat bus-bar and copper's

扁排断面规格	直流电阻, $R/$ ($10^{-5}\ \Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	功率损耗 系数, k_r	功率损耗, $P_{AC}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$	断面铜面 积/ mm^2	单位长度质 量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	原材料价格/ (元 $\cdot \text{m}^{-1}$)
$80\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (Cu)	2.16	1.157	36.0	800	7.12	235
$114\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (CCA), $\delta h/\delta w=1, S_A=15\%$	2.15	1.148	35.5	171	4.14	79
$114\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (CCA), $\delta h/\delta w=3, S_A=15\%$	2.15	1.146	35.5	171	4.14	79
$106\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (CCA), $\delta h/\delta w=1, S_A=30\%$	2.15	1.150	35.6	318	4.83	115
$106\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (CCA), $\delta h/\delta w=3, S_A=30\%$	2.15	1.140	35.3	318	4.83	115

注: 铜、铝的价格分别为 $3.3\text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $1.1\text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$, 载流量为 $I=1200\text{ A}$.

采用水平连铸直接复合+平辊轧制技术制备铜包铝扁排^[3,15]的制造成本与铜扁排基本相当. 由表 1 可见, 与铜扁排相比铜包铝扁排的原材料成本可降低 $2/3\sim 1/2$. 因此, 在对扁排的断面尺寸没有严格要求的条件下, 可以采用铜包铝导电扁排替代铜扁排, 在节省铜资源和成本的同时, 可较明显地降低线路损耗.

4 结论

(1) 建立了矩形截面包覆导体材料交流功率损耗的数值计算模型.

(2) 当断面积 $S=600\text{ mm}^2$ 时, 功率损耗系数随扁排宽厚比 b/a 的增大而增加; 当断面积为 $S=800\text{ mm}^2$ 和 1000 mm^2 时, 随 b/a 增大, 功率损耗系

数先增大后减小;而当断面积为 $S=1\ 200\ \text{mm}^2$ 时,随宽厚比增大,功率损耗系数逐渐减小.当扁排的断面积一定时,包覆层面积比增加,宽厚比对交流功率损耗的影响增大.

(3) 当扁排厚度为 $a=10\ \text{mm}$,断面积 S 为 $800\sim 1\ 200\ \text{mm}^2$ 时,交流功率损耗随窄边和宽边铜层厚度比($\delta h/\delta w=1\sim 3$)的增加而减小; $\delta h/\delta w$ 对交流功率损耗的影响随包覆层面积比($S_A=15\%\sim 45\%$)的增加而增大.

(4) 在满足单位长度电阻和载流量相等的条件下,选择合适的复合扁排断面形状结构,同时因散热面积增大致使工作温度相对降低,铜包铝扁排可较为明显地降低功率损耗.复合扁排的单位长度质量降低 $30\%\sim 40\%$,原材料成本下降 $2/3\sim 1/2$.

参 考 文 献

- [1] Perrard W. Strategies for optimizing cable design and performance through the use of bimetallic wire. *Wire J Int*, 2001, 34(7): 154
- [2] Xie J X, Liu X H, Liu X F, et al. *Horizontal Continuous Direct Composite Cast Forming Equipment and Technology of Cladding Materials*; China patent, ZL200610112817.3. 2008-04-02
(谢建新,刘新华,刘雪峰,等.一种包复材料水平连铸直接复合成形设备与工艺;中国专利,ZL200610112817.3.2008-04-02)
- [3] Xie J X, Liu X H, Liu X F, et al. *A High Performance Rectangular Cross Section Copper Cladding Aluminum Composite Electric Bus-bar and Manufacturing Process*; China patent, Application No. 200810057668.4. 2008-02-04
(谢建新,刘新华,刘雪峰,等.一种高性能铜包铝矩形横断面复合导电扁排及其制备工艺;中国专利,200810057668.4.2008-02-04)
- [4] Shapoorabadi R J, Konrad A, Sinclair A N. Comparison of three formulations for eddy-current and skin effect problems. *IEEE Trans Magn*, 2002, 38(21): 617
- [5] Costache G I, Nemes M V, Petriu E M. Finite element method analysis of the influence of the skin effect, and eddy currents on the internal magnetic field and impedance of a cylindrical conductor of arbitrary cross-section// *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Canadian, 1995: 253
- [6] Andrzej R. Influence of the skin effect on eddy current losses in the plane for single and multidomain wall models. *IEEE Trans Magn*, 1984, 20(6): 2109
- [7] Stool R L. *Eddy Current Analysis*. Shi N Z, Translated. Haierbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1983
(斯托尔 R L. 涡流分析. 史乃主,译. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1983)
- [8] Ortiz S, Suaya R. Efficient implementation of conduction modes for modelling skin effect. *IEEE Comput Soc Annu Symp VLSI*, 2007, 42: 500
- [9] Li J B, Niu X X, Zhou D F, et al. 2D numerical analysis of the skin effect. *Microelectron Comput*, 2007, 24(1): 9
(李建兵,牛忠霞,周东方,等.电流趋肤效应的二维数值分析.微电子学与计算机,2007,24(1):9)
- [10] Song H. Electric current skin effect in single phase and three phase bus bar with rectangle section. *J Harbin Inst Electr Technol*, 1982, 5(1):15
(宋红.单相和三相矩形汇流排中电流集肤效应.哈尔滨电工学院学报,1982,5(1):15)
- [11] Cai S S, Zhu Y. *Classical Electrodynamics*. Shanghai: Fudan University Press, 1985
(蔡圣善,朱耘.经典电动力学.上海:复旦大学出版社,1985)
- [12] Huang H J, Jia Z, Yuan X G, et al. Simulation of the electric characteristics of Cu-Al-Cu cladding plate. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2007, 27(5): 354
(黄宏军,贾真,袁晓光,等.铜-铝-铜复合板导电特性的模拟.特种铸造及有色合金,2007,27(5):354)
- [13] Xu Z Q. The calculation on the coefficient of skin effect and the impedance of rectangular bus. *Low Voltage Apparatus*, 1997 (2):27
(徐志强.矩形母线集肤效应系数与阻抗的计算.低压电器,1997(2):27)
- [14] Wang R. *Physical Property of Metal Materials*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985
(王润.金属材料物理性能.北京:冶金工业出版社,1985)
- [15] Liu X H, Luo Y B, Wu Y F, et al. A novel technology for fabricating copper clad aluminum composite materials with rectangle section// *The 9th International Conference on Technology of Plasticity*. Chejudao, 2008: 884