

# 基于不同结构新型方形超导线材的交流损耗仿真研究<sup>\*</sup>

穆柯舟, 马勇虎<sup>†</sup>

延边大学工学院电子信息通信学科, 延吉 133002

收稿日期: 2019-07-24; 接收日期: 2019-12-30

**【摘要】** 高温超导体的交流损耗直接影响超导设备的价格及其商用化。对于高温超导体, 降低其交流损耗有助于优化电力传输性能并降低运行成本。对于不同堆叠结构的 YBCO 超导方形线材, 本文使用有限元分析软件 Comsol Multiphysics 基于 H 方程计算了不同种类方形线材的交流损耗。通过数据汇总计算与结果分析, 验证了仿真计算的有效性、准确性和合理性。

**关键词:** YBCO 超导方形线材, 自场损耗, 有限元仿真, 新型

**PACS:** TM26

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.06.003

## Simulation and Research on AC Loss of Different Structure of New Type Square Superconductor

MU Kezhou, MA Yonghu<sup>†</sup>

Department of Electronics & Communication Engineering of Yanbian University, Yanji 133002, China

Received date: 2019-07-24; accepted date: 2019-12-30

**【Abstract】** AC loss of high temperature superconductors are directly affected by the price of superconducting equipment and its commercialization. As for high-temperature superconductors, reducing AC losses is helpful to optimize power transmission performance and reduce operating costs. For different stacking structures of YBCO superconducting square wires, AC losses of different kinds of square wires are calculated by using finite element analysis software Comsol Multiphysics based on H equation in this passage. The validity, accuracy and rationality of this simulation are verified by the summarization and calculation of data with result analysis.

**Keywords:** YBCO superconducting square wire, self-field loss, finite element simulation, new type

**PACS:** TM26

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.06.003

**Reference method:** MU Kezhou, MA Yonghu, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0390 (2019)

<sup>\*</sup> 吉林省大学生创新创业训练计划项目(ydcxxy2018188)资助的课题。

<sup>†</sup> yhma@ybu.edu.cn

## 1 引言

近年来,高温超导体的应用十分广泛。在强电领域内,人们开始使用高温超导体充当电缆、变压器等电力传输设备的原材料。而交流损耗是高温超导体的一项重要性能指标。当交流电通过超导线材时,或超导线材处于交变磁场环境中都将产生交流损耗,损耗的能量转化为导体对外散失的热能<sup>[1]</sup>。研究超导线材的交流损耗可以提前预知欲设计导体制冷机的工作参数,进而有依据的优化超导设备的设计、降低制冷设备的运行成本并提高线材的稳定性。

在历史上,Naoyuki Amemiya 仿真研究了单根超导带材交流损耗与  $n$  值的关系,M. Zhang 使用三维 H 方程解决了超导体传输电流与背景磁场的电磁问题<sup>[2]</sup>。在超导带材堆叠方面的研究,Ainslie M. D 使用二维 H 方程研究了 150 根超导带材堆叠结构在不同磁性基板下的交流损耗,研究发现磁性基板会增加堆叠结构的交流损耗<sup>[3]</sup>。本文为了补充研究新型方形超导带材的交流损耗,使用二维有限元法数值仿真模型中基于磁场的 H 方程及其  $E-J$  指数方程仿真计算了 YBCO(钇钡铜氧化物)超导带材经切割后的 1mm 单根窄带,以及 2+4、4+2、6+0 模型(窄带+铜基带)方形线材的自场损耗,使用商业仿真软件 Comsol Multiphysics 进行建模计算<sup>[4]</sup>,分析典型 YBCO 方形超导线材在自场下<sup>[5]</sup>的损耗,将仿真结果与实验值做比较,以证明仿真计算的真实性与有效性。

## 2 仿真模型

本文所用 YBCO 超导带材的几何模型如图 1 所示,其为 4 mm 宽的带材:

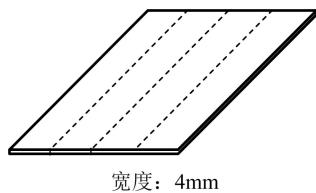


图 1 YBCO 超导带材示意图

Fig. 1 Graph of YBCO superconducting tape

上海交通大学研制出的新型方形线材为该模型的切割模型,其可切分为 4 根宽为 1 mm 的窄带,每一根又称为单根窄带。堆叠结构可分为三种,即 2+

4、4+2、6+0 模型(窄带+铜基带)的方形线材。模型尺寸均为 1 mm×1 mm。由于该模型超导部分是规则的矩形,用三角形映射网格对应超导线材,可以提高仿真精确度。切割后的单根窄带仿真模型如图 2 所示:

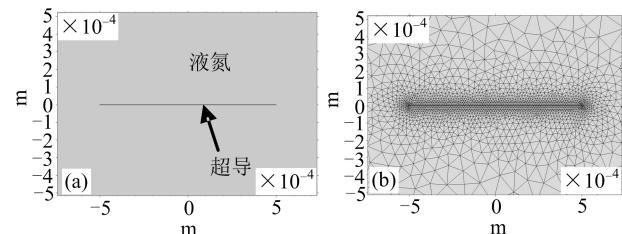


图 2 单根窄带模型(a)及其三角形网格剖分模型(b)

Fig. 2 Single narrowband model (a) and its triangular mesh generation model (b)

仿真堆叠带材的模型设置与超导体间隔如表 1 所示:

表 1 超导带材堆叠结构参数表  
Table 1 Parameter table of stacking structures of superconducting tape

堆叠模型	宽度 /mm	间距 /mm	堆叠层数/mm	临界电流 /A (77 k)
2+4	1	0.16	2	80
4+2	1	0.16	4	146
6+0	1	0.16	6	170

2+4 至 6+0 模型方形线材的仿真模型结构如图 3~图 5 所示:

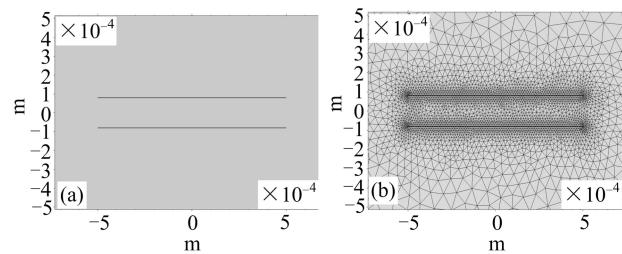


图 3 2+4 模型的方形线材(a)及其三角形网格剖分模型(b)

Fig. 3 Square wire model 2+4 (a) and its triangular mesh generation model (b)

在建立上述几何模型的基础上,使用基于 H 方程及其  $E-J$  指数关系方程的数值模型,仿真计算交流损耗。使用 Comsol Multiphysics 首先分析单根

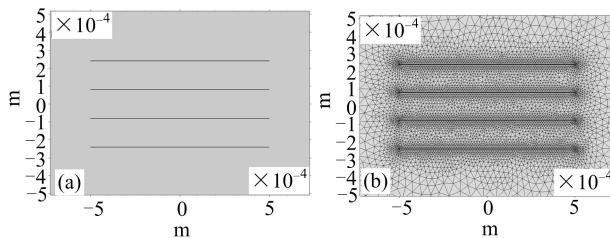


图 4 4+2 模型的方形线材(a)及其三角形网格剖分模型(b)

Fig. 4 Square wire model 4+2 (a) and its triangular mesh generation model (b)

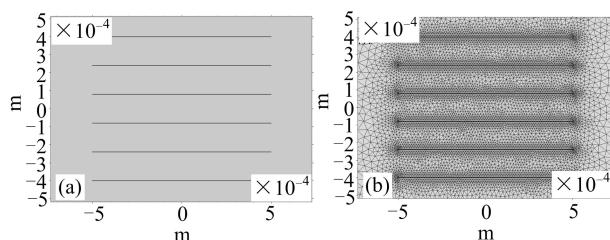


图 5 6+0 模型的方形线材(a)及其三角形网格剖分模型(b)

Fig. 5 Square wire model 6+0 (a) and its triangular mesh generation model (b)

YBCO 窄带在 50 Hz 下的自场损耗. 通过改变堆叠层数与临界电流  $I_c$ , 即在模型中改变相关参数, 建立“一般形式偏微分方程”物理场. 使用有限元法利用下式所示的 H 方程<sup>[6]</sup>求解交流损耗:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( E_0 \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)^n \right) \right] = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( E_0 \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)^n \right) \right] = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (1)$$

其中使用 Kim 模型<sup>[7]</sup>的 E-J 指数关系为:

$$E = E_0 \left( \frac{J}{J_c(B)} \right)^n \quad (2)$$

由于计算 YBCO 单根窄带及堆叠模型的方形线材的磁场强度, 所以设定边界圆条件为  $J = H_{yx} - H_{xy}$ ,  $E = \rho_{air} \cdot J$ . 并在“一般形式偏微分方程”中进行仿真计算. 再对超导带材的表面积分结果截取 50 Hz 为频率的一个周期, 分析电磁场分布和电流密度, 最终求解出超导带材的带内损耗/(W · m<sup>-1</sup>).

接下来, 根据线材的临界电流  $I_c$ 、超导结构, 可利用计算单根带材的诺里斯方程(Norris)<sup>[8]</sup>求出超导交流损耗中的自场损耗  $Q_{sf}$  理论值加以对比:

$$Q_{sf} = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} [(1-\beta) \ln(1-\beta) + (1+\beta) \ln(1+\beta) - \beta^2] \text{ (J/m/cycle)} \quad (3)$$

其中  $\beta = \frac{I_p}{I_c}$ ,  $I_c$  为超导带材的临界电流. 对于单根窄带, 本仿真计算  $I_c$  取值 42 A. 由于存在劣化现象, 使得 2+4, 4+2, 6+0 型堆叠结构中每根窄带的临界电流不能达到 42 A, 故 2+4, 4+2, 6+0 模型方形线材的临界电流  $I_c$  分别取 80 A, 146 A 和 170 A.  $I_p$  为传输交流电的幅值. 通过察看典型交流电数值情况下的超导体自场损耗变化趋势, 估测超导体交流损耗的特性.

### 3 讨论与结果分析

根据仿真计算与诺里斯方程计算的结果, 在不同幅值交流电的通过条件下, 经过归一化 ( $\beta = \frac{I_p}{I_c}$ ,  $0.1 \leq \beta \leq 1$ ) 处理后得到如下图所示的对比图.

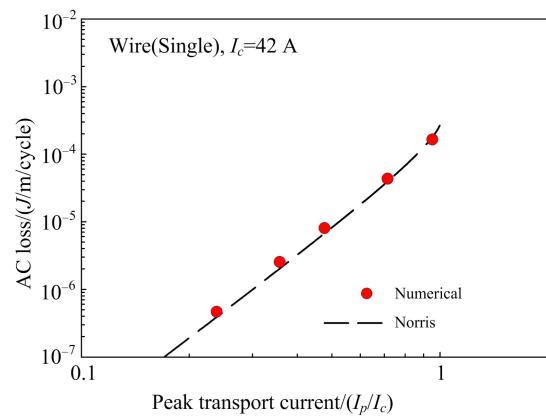


图 6 单根窄带的自场损耗仿真结果

Fig. 6 Simulation results of self-field loss of single narrow band

单根窄带的自场损耗仿真结果如图 6 所示. 图中的圆点表示仿真模型  $I_p$  依次取值 10 A、15 A、20 A、30 A、40 A 的自场损耗, 各  $I_p$  对应的  $\beta$  值为 0.2381、0.3571、0.4762、0.7143、0.9524. 图中的虚线是单根窄带诺里斯方程在临界电流  $I_c$  取值 42 A 时的归一化  $\beta$  曲线, 表征  $\beta$  从 0.1~1 的自场损耗值. 结果显示, 单根窄带的自场损耗仿真值与 Norris

方程计算结果基本一致,表明单根情况下的仿真模型具有一定的准确性。

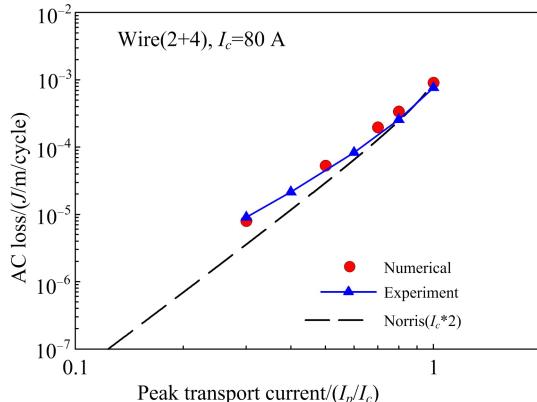


图 7 2+4 模型的方形线材自场损耗值

Fig. 7 Simulation results of self-field loss of square wire model 2+4

2+4 模型的方形线材自场损耗值如图 7 所示。图中圆点代表仿真结果,  $I_p$  依次取值 24 A、40 A、56 A、64 A、80 A, 对应  $\beta$  值为 0.3、0.5、0.7、0.8、1, 共 5 个点。为了更直观的对比, 从 2 根带材的堆叠分析开始引入实心三角形连线代表的实验值, 其  $I_p$  依次取值 24 A、32 A、48 A、64 A、80 A, 对应  $\beta$  值为 0.3、0.4、0.6、0.8、1。图中虚线是单根窄带诺里斯方程在临界电流取值 80 A 时的归一化  $\beta$  曲线, 其单根临界电流为 40 A, 忽略堆叠带材的间隙。由于单根窄带诺里斯方程在临界电流取值 40 A 下两倍自场损耗的归一化  $\beta$  曲线, 即在忽略堆叠带材间互相的磁场作用的情况下, 诺里斯方程曲线与仿真值和实验值均相离较远, 则本文不对比该方法的自场损耗值(4+2, 6+0 模型亦同)。在 2+4 模型的方形线材下, 仿真值与实验值一致, 证明了仿真的有效性。且在电流较小的区域, Norris 方程与其他值有较小的差距, 随着电流增大, 差距逐渐缩小, 直至重合。说明忽略了堆叠带材间隙的仿真曲线计算方法存在一定误差, 但总体可行, 具备应用性。

4+2 模型的方形线材自场损耗值如图 8 所示。图中圆点表示不同通电电流下的自场损耗, 实心三角形连线表示电流取值不同的实验值。这两种情况下的自场损耗值如图中的 10 个点所示。图中虚线是单根窄带诺里斯方程在临界电流  $I_c$  取值 146 A 时的归一化  $\beta$  曲线。理论上的临界电流为 160 A, 由于存在带材间的劣化现象, 单根临界电流降为 36.5 A,

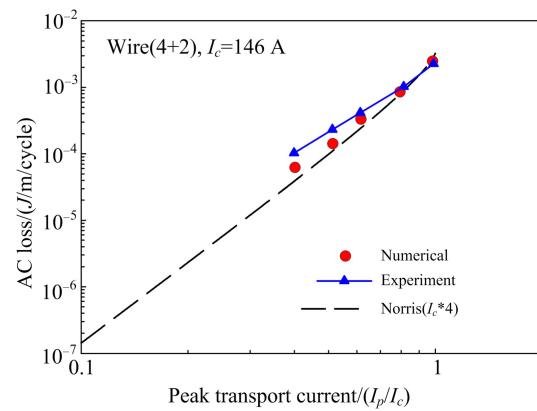


图 8 4+2 模型的方形线材自场损耗值

Fig. 8 Simulation results of self-field loss of square wire model 4+2

且忽略堆叠带材的间隙。由图观察发现, 仿真值与实验值在电流较大的区域结果一致, 在电流较小的区域有一定的差距。具体表现为在 0.5 倍  $I_c$  以上的点基本一致, 0.5 倍  $I_c$  以下的点有偏差。

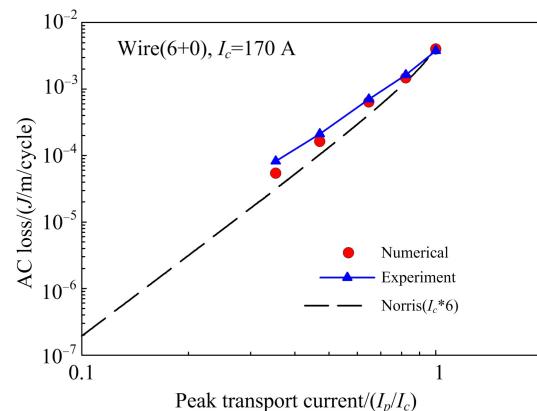


图 9 6+0 模型的方形线材自场损耗值

Fig. 9 Simulation results of self-field loss of square wire model 6+0

6+0 模型的方形线材自场损耗值如图 9 所示。图中 6+0 模型的临界电流为 170 A, 理论上临界电流应为 240 A, 但是实际多次实验后发现由于 6+0 方形线材的机械性能不稳定容易产生劣化, 导致 6+0 方形线材的实际临界电流值下降到 170 A。为了实验与仿真的一致性, 临界电流值取为 170 A 进行仿真计算。图中虚线是单根窄带诺里斯方程在临界电流取值 170 A 时的结果。由图可知, 以上各点与 4+2 模型的方形线材情况基本相同, 仿真值与实验值在全电流范围内基本一致, 比诺里斯方程结果

稍大.

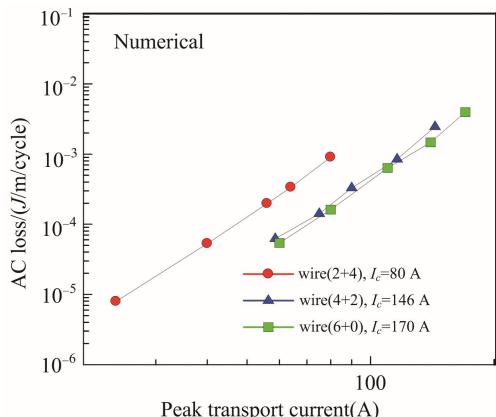


图 10 2+4、4+2、6+0 模型的方形线材的自场损耗仿真结果

Fig. 10 Simulation results of self-field loss of 2+4, 4+2, 6+0 model square wires

图 10 是 2+4、4+2、6+0 方形线材的仿真值在实际通电电流下的结果对比图. 结果表明, 2+4 方形线材在同一电流下损耗值最大, 4+2 与 6+0 线材的损耗结果基本一致. 由此可知同样的截面积下自场损耗最大的是 2+4 线材, 6+0 线材由于机械

性能的不稳定导致损耗值接近 4+2 线材. 反观 4+2 线材的自场损耗趋近于 6+0 线材, 机械性能比 6+0 模型更为稳定, 更加适合应用于实际的电力设备中.

#### 4 结语

研究超导体的交流损耗有助于优化超导体的设计、降低超导体的制冷成本. 本文中使用了软件仿真分析的方法建立了超导体 YBCO 的堆叠模型, 以更方便地为超导复杂结构的应用提供依据和支撑. 本文的分析表明, 使用有限元分析软件 Comsol Multiphysics 分析超导带材的交流损耗是一种十分有效的仿真分析方法. 之后又利用 Norris 公式分析了各种超导带材堆叠结构的自场损耗值, 发现仿真结果与理论公式吻合较好, 且在三种堆叠结构的方形超导线材中, 4+2 模型的性能更为稳定. 本文目前研究了不同模型下临界电流和交流电幅值对交流损耗中自场损耗参数的影响, 还有其他复杂结构的堆叠模型待后续研究, 并进一步探索降低超导体交流损耗的有效方法.

#### 参 考 文 献

- [1] 张润理, 张京业, 辛昭昭, 等, 低温与超导, **43** (2015), 36.
- [2] M. Zhang, T. A. Coombs, , *Superconductor Science & Technology*, **25** (2012), 015009.
- [3] M. D. Ainslie, T. J. Flack, A. M. Campbell, , *Physica C-Superconductivity and its Applications*, **472** (2012), 50.
- [4] 堡益高 2014 硕士学位论文(无锡:江南大学)
- [5] 刘俊杰 2017 硕士学位论文(北京:华北电力大学)
- [6] 刘宏伟, 曹彬, 李光熹, 低温物理学报, **37** (2015), 191.
- [7] 吴昊 2018 硕士学位论文(兰州:兰州大学)
- [8] 赵炯, 汪良斌, 低温与超导, **40** (2012), 29.