第 50 卷 第 11 期：5125-5131 高电压技术 Vol.50, No.11: 5125-5131
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231458

缺陷带材对多层高温超导电缆交流损耗的影响

朱汉山[1]，陈向荣[1]，王恩哲[1]，阴　凯[1]，朱光宇[2]
（1. 浙江大学电气工程学院，杭州 310027；2. 国网辽宁省电力有限公司电力调度控制中心，沈阳 110002）

摘　要：在拉伸、扭转和弯曲条件下，超导带材会出现缺陷，从而导致临界电流的降低，为了对钇钡铜氧(yttrium barium copper oxide，YBCO)涂层导体组成的多层高温超导电缆进行缺陷情况下的数值仿真分析，建立了不同分布的缺陷带材在同一导体层和不同导体层中的仿真模型，研究了不同分布的缺陷带材在不同临界电流退化率下对多层高温超导电缆交流损耗的影响。结果表明：当缺陷发生在同一层时，交流损耗与缺陷的数量和程度有关，但与缺陷的分布无关；多层高温超导电缆在不同导体层发生缺陷时，靠近最外层缺陷越多，损耗越大，而靠近中间层缺陷越多，损耗越小；当 56 根超导带材中出现 8 根缺陷带材时，D34(40)的最大交流损耗相比于无缺陷超导带材增加了 18.80%，为了避免缺陷造成的额外交流损耗，需要在实际运行中考虑保留冷却系统一定的余量。所做工作为缺陷带材对多层高温超导电缆交流损耗的研究提供了理论依据和应用参考。

关键词：高温超导；缺陷带材；多层导体；超导电缆；交流损耗

Effect of Defective Tapes on AC Loss of Multi-layer HTS Cables

ZHU Hanshan[1], CHEN Xiangrong[1], WANG Enzhe[1], YIN Kai[1], ZHU Guangyu[2]
(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Power Dispatching and Control Center, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110002, China)

Abstract：Under tensile, torsional and bending conditions, the superconducting tape may become defective, reducing its critical current. In this paper, the numerical simulation analysis of multi-layer high-temperature superconducting cable composed of yttrium barium copper oxide (YBCO) coated conductors was carried out in the case of defects. Different models of defective tapes with different distributions in the same and different conductor layers were built. From these models, the effects of different distributions of defective tapes on the critical current and in turn, the AC loss in multi-layer HTS cables were analyzed. It is found that, in the case of defective tapes in the same conductor layer, the AC loss depends on the quantity and degree of defect, whereas it is independent of defect distribution. In the case of defects in different conductor layers in multi-layer HTS cable, a higher loss is observed when most defects are located near the outermost layer, whereas a smaller loss is observed when most defects are present near the middle layer. When 8 defective tapes are present in 56 tapes, the maximum AC loss is observed in C3 and C4 conductor layers with a critical current degradation rate of 40%, which is 18.80% higher than that of non-defective tapes. In order to avoid the additional AC loss caused by defects, it is necessary to consider retaining a certain margin of the cooling system in actual operation. The work provides a theoretical basis and application reference for the study of AC loss of multi-layer HTS cable with defective tapes.

Key words：high-temperature superconductors; defective tapes; multi-layer conductor; superconducting cables; AC loss

0　引言

凭借几乎零电阻的优势，高温超导有可能通过实现更高效、可靠和可持续的电力系统来彻底改变电力工业[1-2]。高温超导被广泛应用于故障限流器[3]、电力电缆[4]、变压器[5]、磁储能[6-7]等。然而，单股超导带材的载流能力有限，多股并联使用是不可避免的。在传统的多股并联超导电缆的生产中，导线的扭转和弯曲是一根非常困难的过程。为了解决这些技术问题，世界各地的研究人员探索了基于稀土钡铜氧化物(REBCO)带材的新型高温超导电缆结构，如 Roebel 组装涂层导体(RACC)[8]、圆芯导体(CORC)[9]、扭曲堆叠带材电缆(TSTC)[10]、简单堆叠高温超导导体(SSC)[11]、扭绞圆股线(RS)[12]、高温超导交叉导体(HTS-croco)[13]和准各向同性导体

基金资助项目：国家电网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS21N004)。
Project supported by Science-technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Company (5211DS21N004).

(QI-S)[14]。

超导电缆以其传输容量大、交流损耗小等优点在高负荷密度区域具有广阔的应用场景。然而，低温系统的成本和稳定性问题使得超导电缆的交流损耗要求更加严格。钇钡铜氧(yttrium barium copper oxide，YBCO)带材由于其在平行于带材表面的磁场中极低的交流损耗特性而引起了极大的关注[15]。已有的理论和实验研究表明，以圆柱形支撑结构，将超导带材以多边形形式排列，可以有效减少互场的影响，从而降低整体交流损耗[16]。因此，超导电缆通常采用多层结构来增加传输容量。

大量研究探讨了多层电缆中交流损耗特性与几何参数之间的关系[17-18]。研究表明：在采用 YBCO 带材组合的多层电缆中，减小带宽和带间间隙，并将导体层置于带外，可有效降低交流损耗。但带材宽度和间隙对电缆半径和超导电缆带材数量有一定的约束，具体参数应在实际工程约束范围内确定。减少带材宽度和间隙也可能减少电缆的临界电流。采用堆叠、螺旋缠绕、扭转、收窄等技术可以减小垂直于带材表面的磁场分量，从而提高载流性能，降低交流损耗[19]。然而，理论和实验研究表明，在拉伸、扭转和弯曲条件下，超导带材的力学性能临界值可能会降低，产生的缺陷可能导致临界电流的降低[20-21]。目前，关于超导缺陷对交流损耗影响的研究很少。

因此，考虑由涂层导体组成的多层高温超导电缆可能存在的缺陷，研究其对交流损耗的影响至关重要。本文研究了多层高温超导电缆中不同位置缺陷带材对交流损耗的影响，模型采用了单根冷绝缘高温超导电缆本体结构中的导体层和屏蔽层的实际几何形状，提高了模型的可靠性。同时，系统地分析和比较了不同分布和不同数量的缺陷带材在不同临界电流退化率下对 YBCO 涂层导体组成的多层高温超导电缆交流损耗的影响。综上所述，本文对多层高温超导缺陷的研究为多层高温超导电缆的设计和实际工程中冷却系统余量的考虑提供了理论依据和应用参考。

1 超导电缆建模

1.1 建模基本原理

采用二维有限元模型进行了数值计算。模型采用 H 方程，结合法拉第定律、安培定律、欧姆定律和本构定律推导出控制方程[22-23]如下：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho\left(\dfrac{\partial H_y}{\partial x}-\dfrac{\partial H_x}{\partial y}\right)}{\partial x}=\mu_0\mu_{\mathrm{r}}\dfrac{\partial H_y}{\partial t} \\ \dfrac{\partial \rho\left(\dfrac{\partial H_y}{\partial x}-\dfrac{\partial H_x}{\partial y}\right)}{\partial y}=-\mu_0\mu_{\mathrm{r}}\dfrac{\partial H_x}{\partial t} \end{cases} \tag{1}$$

式中：ρ 是电阻率；H_x 和 H_y 分别表示与超导带材平面平行和垂直的磁场强度。真空磁导率 μ_0 为 1.256 6×10^{-6} N/A^{2}时，超导带与空气的相对磁导率μ_{r}为 1。

超导区局部电场 E 与局部电流密度 J 的非线性关系用 E-J 幂律表示，如式(2)所示[22-23]。

$$E(J)=E_{\mathrm{c}}\left(\frac{|J|}{J_{\mathrm{c}}(B)}\right)^{n-1}\cdot\frac{J}{J_{\mathrm{c}}(B)} \tag{2}$$

式中：E_0=10^{-4} V/m；n=30；J_{c}(B)为依赖于外加磁场的临界电流密度，用式(3)中的各向异性模型描述[22]：

$$J_{\mathrm{c}}(B)=J_{\mathrm{c}0}\Big/\left(1+\frac{\sqrt{k^2\left|B_x\right|^2+\left|B_y\right|^2}}{B_0}\right)^{\alpha} \tag{3}$$

式中：77 K 时的自场临界电流密度$J_{\mathrm{c}0}$为2.675×10^8 A/m^2；B_x 和 B_y 分别表示与超导带材平面平行和垂直的磁通密度；B_0=0.301，k=0.295，α=0.7 为超导带各向异性曲线拟合参数[5,24]。

为了在超导体中施加一定的输运电流(即电流流动)，在超导带的横截面上施加电流密度的面积积分约束，如式(4)所示。

$$\int J\,\mathrm{d}s-i(t)=0 \tag{4}$$

为避免模拟前半周期计算结果中瞬态分量带来的误差，只采用仿真后半周期的稳定值进行积分，计算式如式(5)所示。

$$Q=\frac{2}{T}\int_{T/2}^{T}\mathrm{d}t\int EJ\mathrm{d}s \tag{5}$$

式中：Q 为交流损耗；T 为时间。

1.2 仿真模型及参数

仿真模型采用的是冷绝缘高温超导电缆结构的简化模型。为了提高建模的可靠性，通过建立 4 层导体层和 2 层屏蔽层的实际几何结构，讨论了缺陷带材对多层高温超导电缆交流损耗的影响。多层电缆交流损耗分析的几何参数和计算参数见表 1。

在多层电缆中，导体重叠排列时的交流损耗远高于不重叠排列时的交流损耗[15]。因此，有必要控制每层中超导带材数量相同，以确保结构不重叠。考虑到实际工作中电流只流过超导层，因此在建模

表 1　高温超导电缆的几何参数和计算参数

Table 1　Geometric and computational parameters of HTS cable

参数	数值
第 1、2、3、4 层导体层外半径/mm	13.10、13.35、13.60、13.85
第 1、2、3、4 层导体层带材根数	14、14、14、14
第 1、2 层屏蔽层外半径/mm	27.80、28.05
第 1、2 层屏蔽层带材根数	30、30
77 K 时单根超导带材临界电流/A	107
YBCO 层厚度/mm	0.01
带材厚度和宽度/mm	0.25, 4

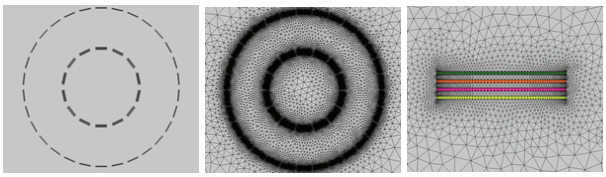
中只考虑导体层和屏蔽层中的超导层。COMSOL 仿真软件中的几何模型如图 1(a)所示，由内到外分别为第 1、第 2、第 3、第 4 层导体层和第 1、第 2 层屏蔽层。用积分约束对各层超导带材施加传输电流，对边界条件进行设定。细化网格剖分和局部网格剖分图如图 1(b)和图 1(c)所示。单根超导带材模型长 4 mm，宽 0.01 mm，对超导带材预定义分布设置分布单元数为 60，单元大小比为 5 的映射网格，对空气域采用常规的自由三角形网格剖分，对于计算求解的超导带材区域进行细致的网格剖分，以保证原有网格剖分精度的同时缩短仿真时间。最后对求解器进行设置，设置仿真时间及仿真步长等。

为便于讨论，将第 1、第 2、第 3、第 4 层导体层和第 1、第 2 层屏蔽层分别简称为 C1、C2、C3、C4 和 S1、S2。不同传输电流下导体和屏蔽层的交流损耗计算如图 2 所示，C_t、S_t 为对应总损耗。图 2 中的 F 指单根高温超导带的峰值传输电流 I_t 与临界电流 I_c 的比值。每层导体的临界电流(I_c)固定为 1 498 A(14×107 A) (文中所有电流均以峰值表示)。

可以看出，导体层的交流损耗占总损耗的比重较大，但随着传输电流峰值的增大，该比重减小。单导体层的交流损耗由内层自外层增加，而单屏蔽层的交流损耗由内层自外层减少，如图 2 所示。图 3 所示为 F=0.5 时不同时刻 x 方向磁场强度。导体层(13~14 mm)的磁场强度随弧长增加而增大，屏蔽层(27.5~28.5 mm)的磁场强度随弧长增加而减小。这很好地解释和验证了图 2 中的交流损耗现象。

为了比较不同缺陷条件下的交流损耗，所有的模型模拟都是在相同的传输电流下进行的，每根涂层导体携带 0.5I_c (53.5 A)，以便进一步研究。

为了研究不同位置的缺陷带材对多层高温超



(a) 几何模型　(b) 网格剖分图　(c) 局部网格剖分图

图 1　超导带材几何模型和网格剖分图

Fig.1　Geometric model and grid division of superconducting tape

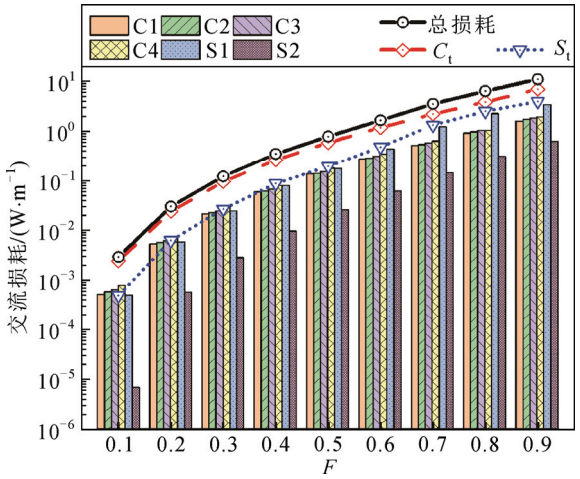


图 2　不同传输电流下导体和屏蔽层的交流损耗

Fig.2　AC loss of conductor and shielding layers under different transmission currents

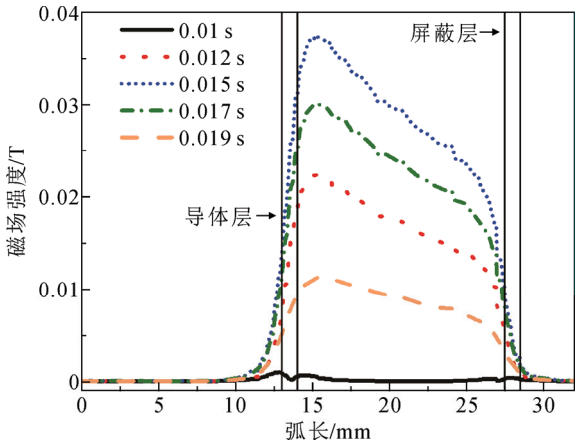


图 3　F=0.5 时不同时刻的磁场强度

Fig.3　Magnetic field intensity at different times when F=0.5

导电缆中交流损耗的影响，文中提前设计了一组数字编号来表示每根涂覆导体在相应导体层数中的位置，如图 4 所示。图 4 (a)和 4(b)分别显示了 7 根带材的均匀分布情况和最不均匀分布情况。有缺陷的带材在图 4 中用红色(深色)表示。关于带缺陷的多

层高温超导电缆的细节将在下文讨论。

2 结果和讨论

2.1 同一导体层有不同分布的缺陷带材

带材缺陷会导致临界电流的降低。为了测量不同程度的缺陷，引入临界电流的退化率(d)来表示缺陷带材的临界电流。由于每根涂层导体携带 $0.5I_c$ 传输电流，故 d 取 10%、20%、30%、40%作进一步讨论。为研究不同缺陷等级及分布对多层高温超导电缆交流损耗的影响，分别计算 d 为 10%、20%、30%、40%时各导体层 7 根缺陷带材的交流损耗，如图 5 所示。为方便讨论，将 C1、C2、C3 和 C4 中 d=10%的带材缺陷情况分别简称为 D1(10)、D2(10)、D3(10)、D4(10)，其他不同缺陷情况的表示方式以此类推。

计算结果表明，导体层的缺陷对屏蔽层的损耗完全没有影响，其主要原因是足够厚的绝缘层将导体层和屏蔽层分开。因此，不同情况下屏蔽层的交流损耗均等于无缺陷情况。首先，计算了 7 根缺陷带材在导体层的两种不同分布下的交流损耗。计算结果表明，在不同缺陷等级下，图 4 中两种不同形式缺陷分布的总交流损耗相等。为了探讨这一现象，以 D3(40)为例，计算情况 1 和情况 2 的每一根带材的交流损耗，如图 6 所示。可以观察到，在蓝球所代表的无缺陷情况下，同一层中各带的交流损耗几乎相等。为了与非缺陷进行比较，用黑色球和红色球分别表示情况 1 和情况 2。与无缺陷带材相比，C3 中编号 1—7 号缺陷带材的交流损耗较大，而编号 8—14 号无缺陷带材的交流损耗相等。虽然缺陷发生在 C3 层，但同样的损耗变化发生在非缺陷层。注意情况 1 缺陷下 C1、C2 和 C4 中编号 1—7 号带材是无缺陷的，然而它们的交流损耗均大于无任何缺陷带材情况下的 1—7 号带材，而编号 8—14 号在两种情况下带材损耗相等。同样，对于情况 2，C3 中 7 根缺陷带材的交流损耗大于非缺陷带材，而 7 根非缺陷带材的交流损耗相等。对比情况 1 和情况 2，虽然缺陷带材的顺序不同，但黑球与红球重叠表明单根缺陷带材的交流损耗几乎相等。这说明当缺陷发生在单层时，交流损耗与缺陷的分布无关。

不同临界电流退化率下，C1、C2、C3 和 C4 中 7 根带材缺陷导体层的交流损耗见图 5。可以看出，导体层的总损耗均高于无缺陷(0.585 W/m)，用黑色短虚线表示。当缺陷发生在同一导体层时，缺

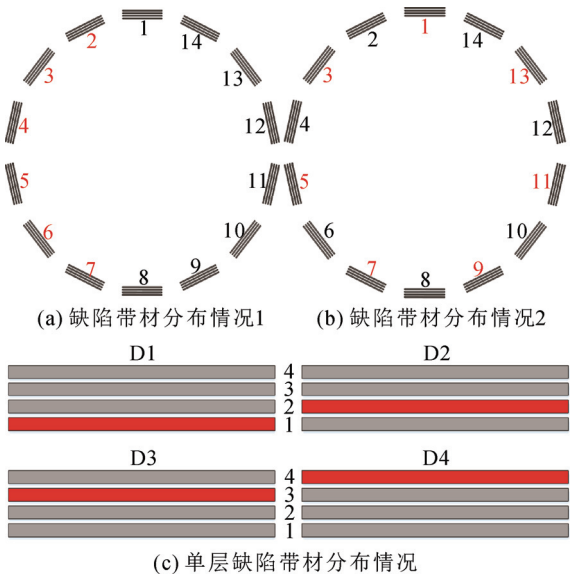


图 4 7 根缺陷带材在导体层的分布

Fig.4 Distribution of seven defective tapes in the conductor layer

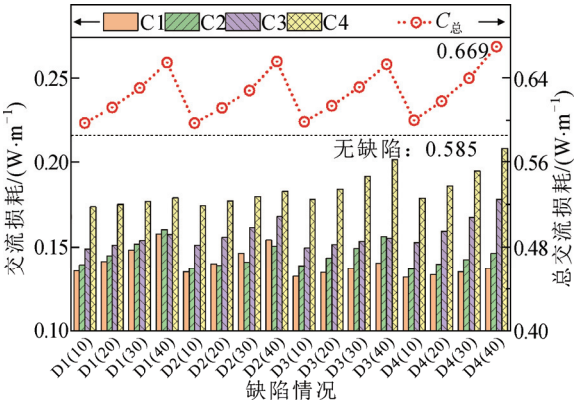


图 5 不同临界电流退化率下 C1、C2、C3 和 C4 带 7 根缺陷带材导体层的交流损耗

Fig.5 AC loss of conductor layer with 7 damaged tapes in C1, C2, C3, and C4 under different critical current degradation rate

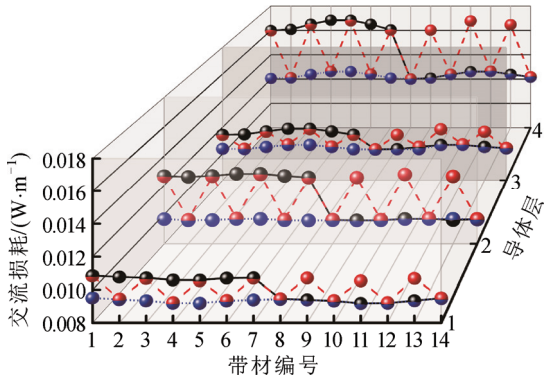


图 6 d=40%条件下，C3 中 7 根带材(情况 1 和情况 2)缺陷时导体层各带材的交流损耗

Fig.6 AC loss of each tape in conductor layer when 7 damaged tapes (case 1 and case 2) in C3 with d=40%

陷级别越高，临界电流退化率(d)和交流损耗越高。D4(40)的总交流损耗(0.669 W/m)在图 5 中最高，与无缺陷相比增加了 14.36%。主要原因是 C4 中 d=40%的缺陷导致 C3 和 C4 的交流损耗大幅增加。值得注意的是，D1(40)中 C2 的交流损耗高于 C1 和 C3，而正常工作时外层的交流损耗大于内层。同样，D2(20、30、40)中 C1 的交流损耗高于 C2，D4(40)中 C2 的交流损耗高于 C4。结果表明：当多层高温超导电缆同一层发生缺陷时，相邻层的交流损耗明显增加，而远处层的交流损耗略有增加。当缺陷发生在第一层或最后一层时，缺陷层和相邻层的交流损耗明显增加。可以发现，在临界电流退化率相同的情况下，C1、C2、C3 和 C4 缺陷带材的总交流损耗差异不大。

2.2 不同导体层不同分布的缺陷带材

考虑到实际缺陷带材不仅出现在同一层，计算了不同导体层缺陷带材的交流损耗。同样，将 d 为 20%、40%的 C1 和 C2 出现缺陷带材的情况分别简称为 D12(20)、D12(40)。图 7 显示了 2 根缺陷带材(编号 1 号)在不同导体层中的不同分布，其中红框(深色)表示有缺陷的带材，1、2、3、4 表示导体层数。可以观察到 2 种缺陷带材在不同导体层中的分布：D12、D13、D14、D23、D24、D34。

图 8 分别计算了 2 根、4 根、6 根和 8 根缺陷带材不同情况下导体层的交流损耗。其中，2 根有缺陷的带材编号选择为 1 号位置的 2 层，如图 7 所示。4 根有缺陷的带材编号选择为 1 号和 2 号位置的两层。6 根有缺陷的带材编号选择为 1 号、2 号和 14 号位置的两层。8 根有缺陷的带材编号选择为 1 号、2 号、3 号和 14 号位置的 2 层。根据图 7(a)和(b)可以看出，当 d=20%时出现 2 根和 4 根带材缺陷时，D12、D13、D14、D23、D24 和 D34 的总交流损耗几乎相等，并且不存在内层交流损耗大于外层交流损耗的现象。图 8(c)和(d)分别为 6 根和 8 根带材缺陷情况下导体层的交流损耗。可以清楚地看到，存在内层交流损耗大于外层交流损耗的现象。因此，可以说明只有在出现一定数量的缺陷带材时才会出现这种现象。值得注意的是，D34(40)的总交流损耗高于 D4(40)，说明相同数量的缺陷带材的总交流损耗与缺陷分布层有关。

但由于 2 根缺陷带材占 56 根缺陷带材的比例很小，所以除了 D34(40)的最大损耗值(0.633 W/m)比非缺陷情况下增加 8.21%外，其他不同类型分布的损耗差异不大。

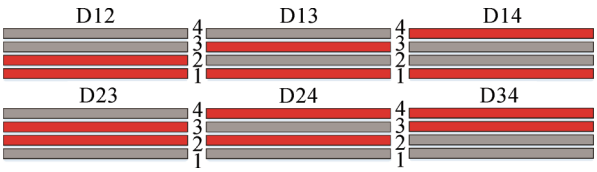


图 7 2 根缺陷带材在不同导体层的分布不同

Fig.7 Different distribution of 2 defective tapes in different conductor layer

为了清楚地比较不同分布类型下各导体层的交流损耗，图 9 绘制了两幅交流损耗雷达图，分别为 d=20%和 d=40%时，8 根缺陷带材不同类型分布情况下各导体层的交流损耗。由图 8(a)可以看出，D12 中 C1，D13 中 C2，D24 中 C3，D34 中 C4 的交流损耗明显增加，说明除了第一层和最后一层受损外，缺陷对相邻层的影响大于缺陷层。C4 的交流损耗从 D1(40)到 D4(40)逐渐增大，而 C1 的交流损耗从 D1 到 D4 逐渐减小，说明多层中缺陷层越靠近边界层，交流损耗越大。当层间有缺陷时，相邻层的交流损耗明显大于缺陷层。虽然 D4(40)和 D1(40)的总交流损耗高于 D3(40)和 D2(40)，但 D14(40)的总交流损耗并不是最大的。总交流损耗 D34(40)>D12(40)>D23(40)，说明多层高温超导电缆在不同导体层发生缺陷时，最外层缺陷越多，损耗越大，靠近中间层缺陷越多，损耗越小。这主要是由于最外层的损耗最大，最外层及其邻近层的损耗大大增加。C4 的交流损耗顺序如下：D34(40)>D24(40)>D23(40)>D14(40)>D13(40)>D12(40)，很好地证明这一点。

3 结论

1）当缺陷发生在同一层时，交流损耗取决于缺陷的数量和程度，而与缺陷的分布无关。此外，超导带材出现缺陷不仅增加了缺陷层的交流损耗，而且也增加了非缺陷层的损耗。当有缺陷的带材占总带材的 7%时(4 根缺陷带材占 56 根带材)，交流损耗比无缺陷的带材增加不到 10%。

2）多层高温超导电缆在不同导体层发生缺陷时，最外层附近缺陷越多，交流损耗越大。相反，靠近中间层的缺陷越多，交流损耗越小。

3）当 56 根带中出现 8 根缺陷带材且临界电流退化率为 40%时，C3 和 C4 导体层发生缺陷时交流损耗最大，导体层的交流损耗比无缺陷情况提高了 18.80%。因此，为了解决缺陷造成的额外交流损耗

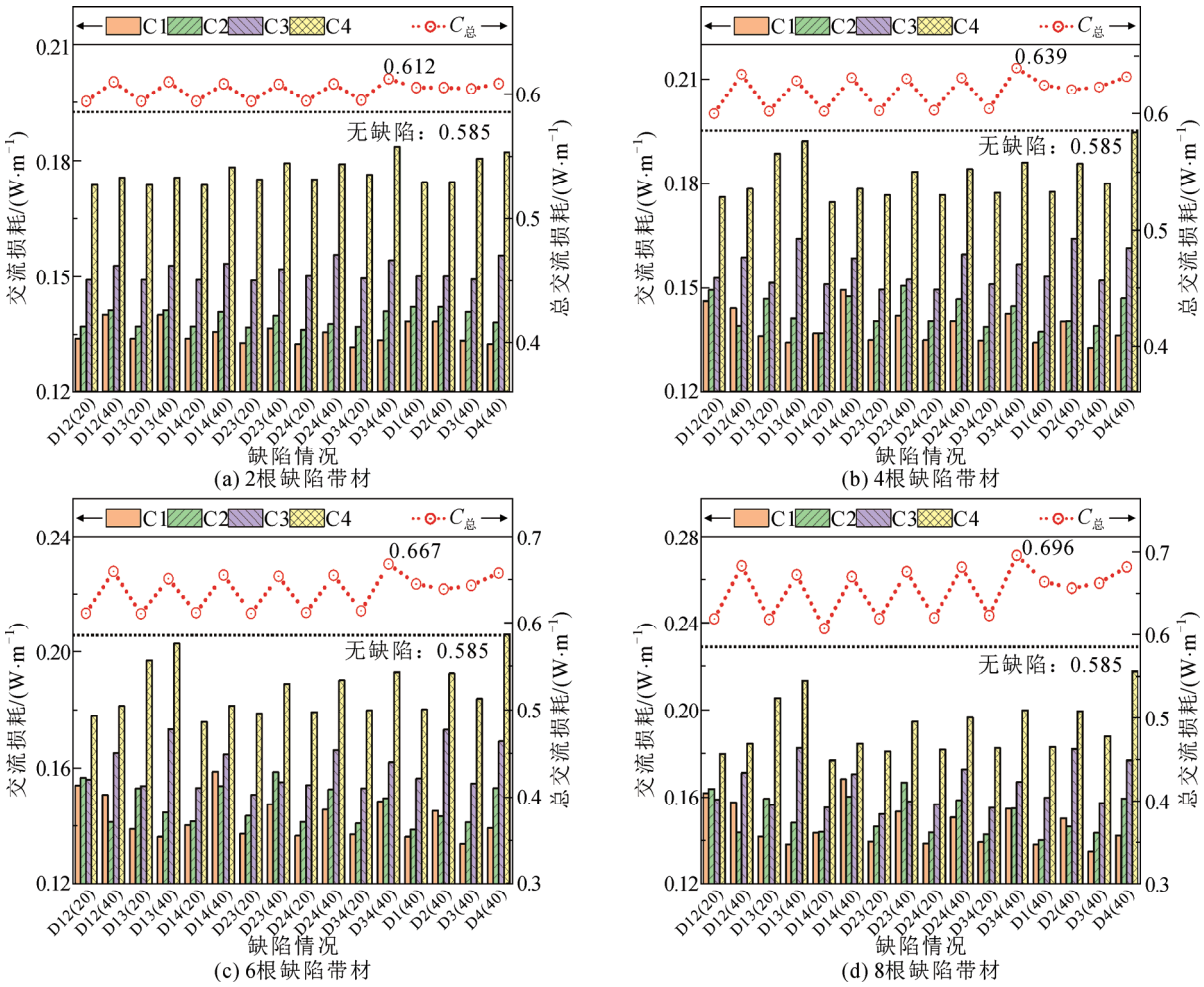


图 8 不同类型缺陷下导体层的交流损耗

Fig.8 AC loss of conductor layer under different situations

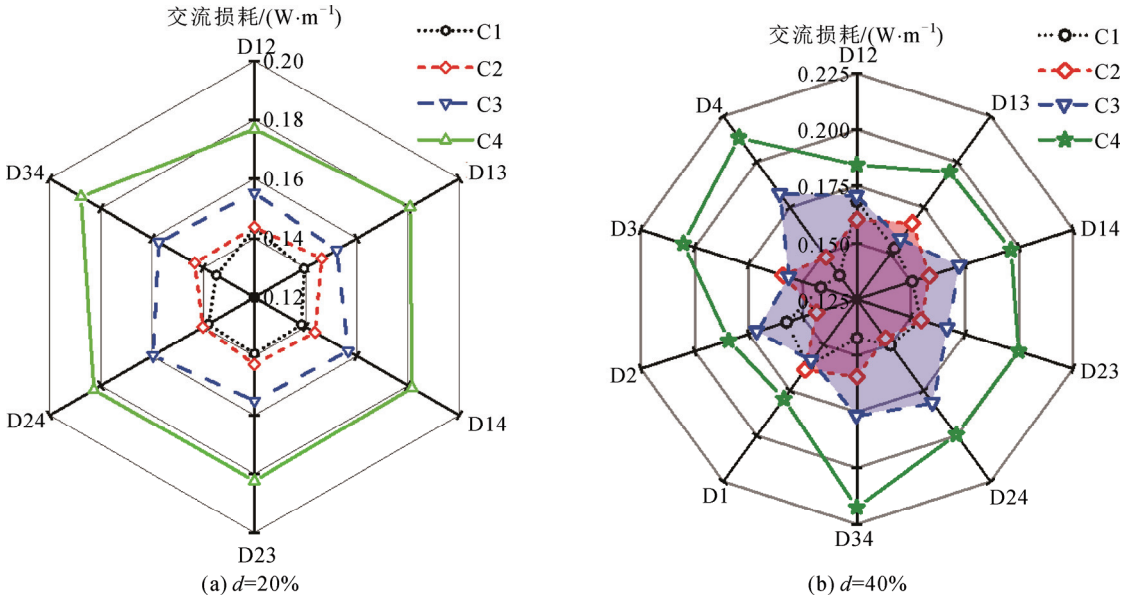


图 9 不同分布下 8 根缺陷带材的各导体层交流损耗

Fig.9 AC loss of each conductor layer with 10 damaged tapes under different distributions

问题，在实际操作中需要考虑低温系统有一定的余量。

参考文献 References

[1] DOUKAS D I. Superconducting transmission systems: review, classification, and technology readiness assessment[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 5401205.

[2] MACMANUS-DRISCOLL J L, WIMBUSH S C. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors[J]. Nature Reviews Materials, 2021, 6(7): 587-604.

[3] 郭佩乾，袁志昌，宋 萌，等. 160 kV 1 kA 电阻型超导直流限流器设计与应用[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3221-3231.
GUO Peiqian, YUAN Zhichang, SONG Meng, et al. Design and application of 160 kV 1 kA resistive type superconducting DC current limiter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3221-3231.

[4] PARAMANE A, AWAIS M, CHANDRASEKARAN T, et al. A review on insulation and dielectrics for high- temperature superconducting cables for power distribution: progress, challenges, and prospects[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, 33(6): 4801831.

[5] 皮 伟，田宾一，马元通，等. 500 kVA/10 kV 高温超导变压器设计及稳态特性研究[J]. 低温与超导，2022，50(5)：6-11，36.
PI Wei, TIAN Binyi, MA Yuanlong, et al. Design and steady - state characteristics of a 500 kVA/10 kV HTS transformer[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2022, 50(5): 6-11, 36.

[6] 冬 雷，王帅兵，刘依依，等. 用于轨道炮的超导储能脉冲电源设计[J]. 高电压技术，2017，43(12)：4006-4012.
DONG Lei, WANG Shuaibing, LIU Yiyi, et al. Design of superconducting energy-storage pulsed power supply for railgun[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4006-4012.

[7] 李永凯，雷 勇，林晓冬. 超导磁储能-限流器用于提高光伏并网发电系统暂态稳定性[J]. 高电压技术，2020，46(1)：90-98.
LI Yongkai, LEI Yong, LIN Xiaodong. Application of superconducting magnetic energy storage-current limiter to improve the transient stability of photovoltaic grid-connected power generation system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 90-98.

[8] SNITCHLER G, GAMBLE B, KING C, et al. 10 MW class superconductor wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1089-1092.

[9] SCHLACHTER S I, GOLDACKER W, GRILLI F, et al. Coated conductor Rutherford cables (CCRC) for high-current applications: concept and properties[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 3021-3024.

[10] VAN DER LAAN D C, LU X F, GOODRICH L F. Compact $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications[J]. Superconductor Science and Technology, 2011, 24(4): 042001.

[11] TERAZAKI Y, YANAGI N, ITO S, et al. Critical current measurement of 30 kA-class HTS conductor samples[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 4801305.

[12] TERAZAKI Y, YANAGI N, ITO S, et al. Measurement and analysis of critical current of 100-kA class simply-stacked HTS conductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 4602905.

[13] WOLF M J, BAYER C M, FIETZ W H, et al. Toward a high-current conductor made of HTS CrossConductor strands[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 4801504.

[14] WOLF M J, FIETZ W H, BAYER C M, et al. HTS CroCo: a stacked HTS conductor optimized for high currents and long-length production[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(2): 19-24.

[15] LI Y, WANG Y S, MIAO J Y, et al. Investigation on critical current properties of quasi-isotropic strand made from coated conductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 6600805.

[16] FUKUI S, OGAWA J, SUZUKI N, et al. Numerical analysis of AC loss characteristics of multi-layer HTS cable assembled by coated conductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 1714-1717.

[17] LI Z Y, GU F, MA Y H, et al. Influence of transport modes on AC loss characteristics of cylindrical single-layer conductors consisting of various HTS tapes[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2020, 569: 1353589.

[18] JIANG Z N, AMEMIYA N, NAKAHATA M. Numerical calculation of AC losses in multi-layer superconducting cables composed of coated conductors[J]. Superconductor Science and Technology, 2008, 21(2): 025013.

[19] 王东妮，穆永春，张莉莉，等. 堆叠扭转高温超导复合导体的交流损耗仿真研究[J]. 成都大学学报(自然科学版)，2022，41(3)：303-307.
WANG Dongni, MU Yongchun, ZHANG Lili, et al. Simulation study on ac loss of twisted-stacked high temperature superconducting composite conductor[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2022, 41(3): 303-307.

[20] HARTWIG Z S, VIEIRA R F, SORBOM B N, et al. VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable[J]. Superconductor Science and Technology, 2020, 33(11): 11LT01.

[21] CHEN Y, CHEN X Y, JIANG S, et al. Modeling of HTS high-current stacked conductors with defective tapes in different locations[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2023, 606: 1354224.

[22] SHEN B Y, GRILLI F, COOMBS T. Overview of *H*-formulation: a versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 100403-100414.

[23] 陈海宇，方 进，华俊威. 基于 COMSOL 的超导带材交流损耗仿真分析[J]. 低温与超导，2021，49(12)：15-21.
CHEN Haiyu, FANG Jin, HUA Junwei. Simulation and analysis of AC loss in HTS strip based on COMSOL[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(12): 15-21.

[24] 冯 斌，丁开忠，诸嘉慧，等. 10 kV 三相同轴高温超导电缆力学性能分析[J]. 低温与超导，2023，51(2)：34-40.
FENG Bin, DING Kaizhong, ZHU Jiahui, et al. Mechanical analysis of three-phase coaxial 10 kV HTS power cable[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2023, 51(2): 34-40.



朱汉山
1999—，男，硕士生
主要从事电力电缆系统节能降损、谐波治理等仿真计算研究工作
E-mail: hanshanzhu345@163.com

ZHU Hanshan



陈向荣(通信作者)
1982—，男，教授，博导
主要研究方向为先进电气材料与先进电气材料与高压绝缘测试技术，先进电力装备与新型电缆系统，高电压新技术等
E-mail: chenxiangrongxh@zju.edu.cn

CHEN Xiangrong
Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-09-12 修回日期 2024-01-20 编辑 曹昭君