

④ 166-172

第 23 卷第 2 期
2000 年 4 月合肥工业大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGYVol. 23 No. 2
Apr. 2000

HT-7U 装置环向场线圈涡流损耗分析

杜世俊¹, 高静¹, 吴维越²

TL 631.24

(1. 合肥工业大学 电气工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 文章分析了由等离子体电流和真空室感应电流在 HT-7U 装置环向场超导磁体中产生的涡流损耗。超导磁体中变化的磁场被分解为切向和法向两个分量, 通过将超导线圈分为适当单元可求出磁场两个分量产生的涡流损耗。文中给出涡流损耗的分布及其随时间变化情况。计算结果表明涡流损耗不仅沿线圈周长分布不均匀而且在线圈的断面上也不均匀。

关键词: 等离子体; 环向场; 超导磁体; 涡流损耗

中图分类号: TM154.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-5060(2000)02-0166-07

HT-7U 装置 线圈

托卡马克装置
Analysis of eddy current losses in the toroidal field
coils of the HT-7U tokamak

DU Shi-jun¹, GAO Jing¹, WU Wei-yue²

(1. School of Electrical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The eddy current losses in the toroidal field superconducting magnet of the HT-7U tokamak, produced by plasma current and the eddy currents on the vacuum vessel, are analyzed. The time varying field in superconducting magnet is resolved into the tangential and normal components. By dividing the superconducting coil into reasonable segments, the eddy current losses due to two field components can be calculated. The distribution and time evolution of the eddy current losses are also discussed in this paper. The results show that the distributions of the eddy current losses are nonuniform not only along the coil perimeter but also on the cross section of the coil.

Key words: plasma; toroidal field; superconducting magnet; eddy current loss

HT-7U 装置是一个大型超导托卡马克核聚变实验装置, 其角向场和环向场磁体均采用超导体。超导磁体能否稳定运行对装置来说是极为重要的。影响超导磁体稳定性的一个重要因素是超导线圈中的涡流损耗, 因此在磁体设计中必须对涡流产生的损耗进行分析, 以保证磁体能稳定运行。

超导线圈中的涡流损耗是由磁场变化引起的, 装置运行时角向场线圈电流和等离子体电流变化将在环向场磁体中产生涡流损耗, 特别当等离子体发生破裂时, 等离子体电流在极短的时间内衰减到零, 这将在环向场磁体中产生较大的涡流损耗。对超导磁体来说, 必须保证磁体在这种极端情况下也能可靠运行, 因此分析涡流损耗的分布及其随时间的变化情况对超导磁体和低温系统的设计是极为重要的。本

收稿日期: 1999-04-16

作者简介: 杜世俊(1950-), 男, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师。

文对等离子体电流破裂极端情况下环向场超导磁体中涡流损耗进行分析。

1 真空室感应电流计算

图1为HT-7U装置结构简图,环向场线圈产生沿环向的恒定磁场,角向场线圈产生形成一定等离子体位形并维持其平衡的磁场,真空室是一封闭的环形壳体,真空室内部是等离子体。HT-7U装置的主要参数为,等离子体大半径 $R = 1.7 \text{ m}$,小半径 $a = 0.4 \text{ m}$,等离子体电流 $I_p = 1 \text{ MA}$ 。从图1可以看出,当等离子体电流变化时真空室上将感应电流,感应的电流也在环向场磁体中产生涡流损耗,因此应首先解出真空室上感应的电流,然后确定线圈上磁场的分布情况及变化关系,由此得到涡流损耗。

HT-7U装置真空室由厚 14 mm 的不锈钢焊接而成,其断面成 D 形,如图2所示。

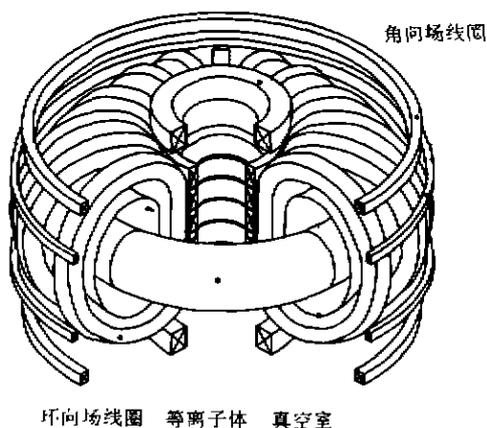


图1 HT-7U装置结构简图

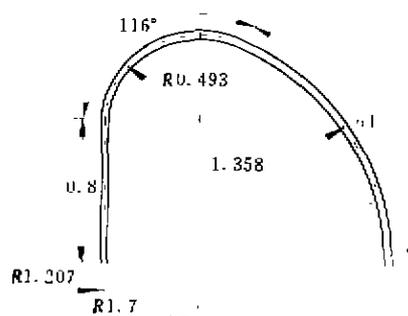


图2 真空室结构简图

上面已经提到当等离子体发生破裂时等离子体电流在极短的时间内衰减到零,在此期间角向场线圈电流来不及变化,真空室上的感应电流仅由等离子体电流变化感应产生。由于等离子体电流和真空室沿大环方向是轴对称的,将真空室沿角向分解为若干单元,每个单元可以看作是沿大环方向闭合的环形导体。在等离子体电流变化情况下可以得出下面的方程

$$\left. \begin{aligned} M_{11}i'_1 + \dots + M_{1n}i'_n + M_{1p}i'_p + i_1R_1 &= 0 \\ \vdots & \\ M_{n1}i'_1 + \dots + M_{nn}i'_n + M_{np}i'_p + i_nR_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

上式中 n 为真空室单元数, R 为单元电阻, M 为真空室单元之间的互感或自感, i 和 i' 分别为真空室上单元电流及其变化率, M_p 为等离子体与真空室单元之间互感, i'_p 为等离子体电流变化率。

(1)式的矩阵形式为

$$[M](I') + [R](I) + (M_p)i'_p = 0 \quad (2)$$

式中 $[M]$ 和 $[R]$ 为真空室单元的电感和电阻矩阵, (M_p) 为真空室单元与等离子体的电感矩阵。

如果等离子体电流变化规律已知,从(2)式可以解出真空室上感应的电流。理论分析和实验研究表明,等离子体发生破裂时等离子体电流通常按指数规律衰减,其衰减时间常数约为 $2 \sim 5 \text{ ms}$ ^[1~3]。对于HT-7U装置,等离子体电流破裂的衰减时间常数取 $\tau = 3 \text{ ms}$ 。

图3示出了等离子体电流 $I_p = 1.0 \text{ MA}$ 以时间常数 $\tau = 3 \text{ ms}$ 衰减时真空室上感应的电流 I_v , 大约在 6.3 ms , 真空室感应电流达到最大值 0.692 MA 。真空室上的感应电流衰减与其自身的等效时间常数有关,从图3可以看出当等离子体电流衰减接近至零时真空室上的感应电流才开始衰减,这是由于真空

室等效时间常数比等离子体电流衰减时间常数大。当等离子体破裂时,由于电流急剧的变化,将在真空室上感应很大的电流。这些快速变化的电流在环向场线圈上产生较大的磁场变化率,从而引起了较大的损耗。

2 环向场线圈上磁场分布

HT-7U 装置环向场系统由 16 个沿大环方向均匀分布的超导线圈构成,超导线圈采用浸泡式冷却方式。图 4 为环向场线圈结构,图中下方示出了线圈盒的断面结构,线圈盒由非导磁的不锈钢材料构成。

为计算环向场线圈及线圈盒的涡流损耗,应首先求出线圈中磁场分布。将线圈上磁场分解为垂直于线圈表面和平行于线圈表面的法向分量 B_n 和切向分量 B_t 。产生这些磁场的电流应当包括等离子体电流及真空室上感应的电流。由于电流在大环方向是对称的,因此线圈上的磁场只有 B_r 和 B_z 两个分量。在求出这两个磁场分量后,可以确定线圈各单元上磁场的法向分量 B_n 和切向分量 B_t ,如图 5 所示。

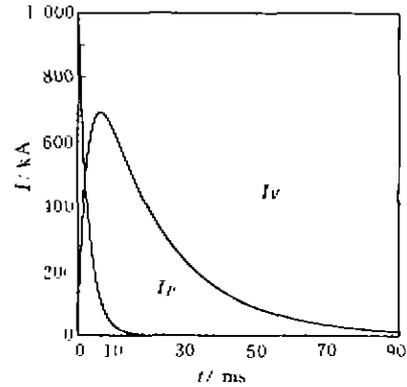


图 3 破裂时等离子体电流和真空室感应电流

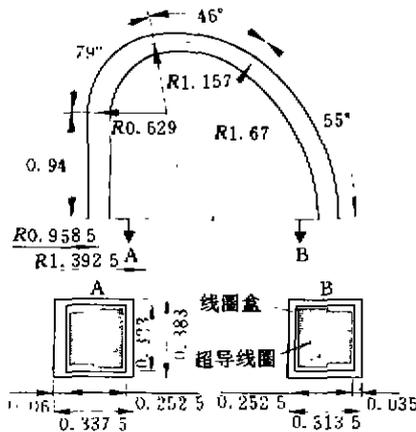


图 4 环向场线圈结构简图

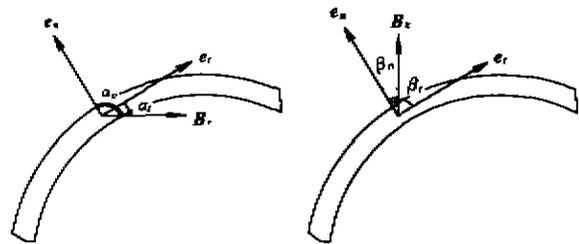


图 5 线圈上磁场的分解

在图 5 中,按顺时针方向规定磁场的两个分量 B_r 和 B_z 超前于线圈表面单元法向量 e_n 和切向量 e_t 时,它们的夹角 β 和 α 为正。如果 α_t 已确定,则

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= \alpha_t + 90^\circ \\ \beta_t &= \alpha_t - 90^\circ \\ \beta_n &= \alpha_t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

磁场的两个分量 B_t 及 B_n 由下式给出

$$\left. \begin{aligned} B_n &= B_r \cos \alpha_t \\ B_n &= B_z \cos \beta_t = B_z \sin \alpha_t \\ B_t &= B_r \cos \alpha_n = -B_r \sin \alpha_t \\ B_t &= B_z \cos \beta_n = B_z \cos \alpha_t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由上式可知,对线圈的每个单元,只要求出该单元磁场的两个分量 B_r 、 B_z 并确定 B_r 与线圈单元上

单位切向量的夹角即可求出磁场的切向分量及法向分量。

前面已经指出, 当等离子体破裂时, 可以认为角向场线圈电流保持不变。由于线圈中的涡流损耗与磁场变化率有关, 因此在求解线圈上磁场及线圈损耗时, 需要确定等离子体电流和真空室感应电流在线圈上产生的磁场。图 6 为当等离子体电流从 1.0 MA 以时间常数 $\tau = 3$ ms 衰减时, 线圈上两个特定部位磁场随时间变化情况。从图 3 可知, 大约在 $t = 15$ ms 时, 等离子体电流衰减接近于零, 但由于真空室感应电流的作用, 线圈上的磁场仍然维持一定数值。

图 7 给出了等离子体破裂发生后 1.5 ms 时刻磁场两个分量沿线圈周长分布情况。在线圈靠近对称轴的内侧, 磁场较强而且切向磁场分量 B_t 远大于法向磁场分量 B_n 。在后面的分析中可知, 在这种结构的环向场磁体中, 超导线圈中的涡流损耗主要取决于磁场法向分量的变化率, 线圈盒中的涡流损耗主要取决于磁场切向分量的变化率。从图 6 和图 7 可以看出, 由于线圈内侧磁场较强且在等离子体破裂的初始阶段磁场变化率很大, 因此该部位线圈盒上产生的损耗不仅在空间分布而且在时间分布上非常集中, 也就是在等离子体破裂初始阶段的很短时刻内, 大量的损耗将短时地集中在这些特定部位。磁场的法向分量在线圈及线圈盒中产生的损耗由于磁场变化率较弱, 因而产生的损耗较小。

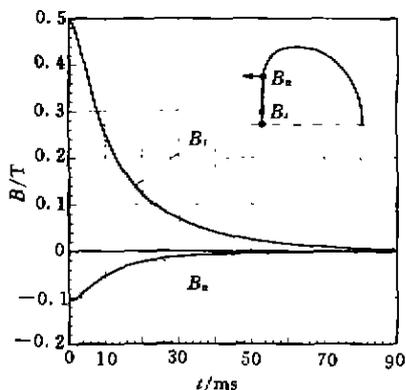


图 6 等离子体破裂时线圈上磁场随时间变化

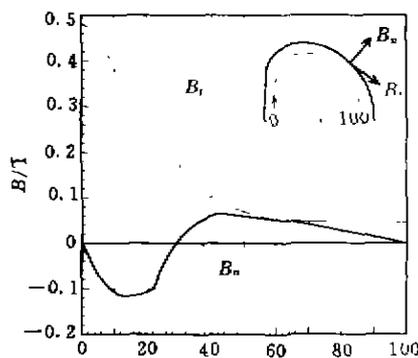


图 7 线圈上磁场分布

3 环向场磁体的涡流损耗

环向场超导线圈和超导母线截面如图 8 所示, 每个线圈共有 444 匝, 为减小损耗, 线圈采取竖立绕制形式。超导母线由铜基和在其中并排放 30 根铌钛超导导线组成, 超导线圈工作在液氮温度下 (4.2 ~ 4.5 K)。当超导线圈上的磁场发生变化时, 线圈盒和线圈中将感应电流, 这些电流在线圈盒和超导母线的铜基中产生焦耳损耗。

首先考察环向场超导磁体线圈盒中的涡流损耗, 图 9 示出了线圈盒上感应涡流的总体分布情况, 垂直于线圈盒表面的法向磁场 B_n 感应的涡流 I_m 沿线圈盒表面结构形成闭合的回路。与 B_n 方向一致的竖立的左、右两块盒壁也将产生类似的涡流。切向磁场 B_t 与线圈盒断面垂直, 因此将在线圈盒断面矩形回路中感应涡流 I_m 。从上面磁场分布情况来看, 由于切向磁场及其变化率较大, 而且由线圈盒断面构成的电流回路电阻较小, 因此将感应较大的涡流并产生较大的损耗。

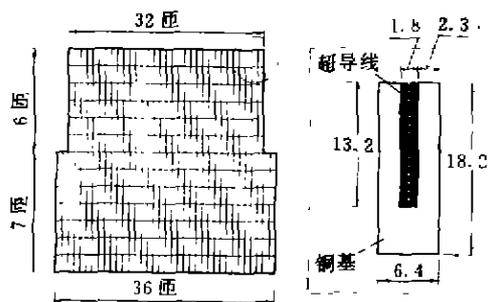


图 8 超导线圈和超导母线结构

图 10 为若干个线圈盒单元展开的情况,法向磁场 B_n 的方向为垂直于 XY 平面,每单元感应电流如图中所示。每个单元感应电流是与外部电流产生的磁场以及线圈所有单元感应涡流产生的磁场有关,因此严格地求解每个单元的涡流应是求解一组联立的耦合方程,这将是十分复杂的计算。由于线圈的结构形状使涡流产生的磁场要远小于外部电流产生的磁场,在计算中假定每个线圈盒单元上的磁场仅与外部电流有关。

从图 10 可以看出,如果连续若干个单元上法向磁场的方向一致,则在此范围内涡流将形成闭合回路,每个单元涡流的流向应当一致。从图 10 也可见,相邻两个单元 Y 方向的电流 I_{ey} 方向相反,总的涡流路径应当是如图 9 所示的一系列闭合回路,绝大部分涡流是沿 X 轴方向。由于这一原因,为简单起见,忽略每个单元上 Y 方向电流 I_{ey} 的差别及电阻,即认为损耗仅由 X 方向的电流 I_{ex} 产生。

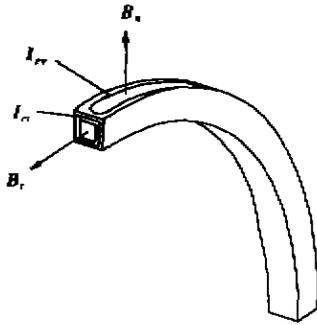


图 9 线圈盒上感应涡流的分布情况

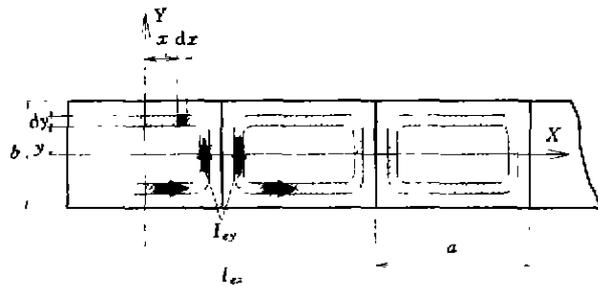


图 10 线圈盒单元涡流损耗计算示意图

设线圈盒导体沿 Z 轴方向的高度为 h ,单元 X 方向长度为 a , Y 方向宽度为 b ,同时认为单元电流路径满足以下关系^[4,5]

$$\frac{y}{x} = \frac{b}{a} \quad (5)$$

对图 10 所示的单元上任意位置处涡流回路的感应电势为

$$E = 4xy \frac{dB_n}{dt} = \frac{4b}{a} x^2 \frac{dB_n}{dt} \quad (6)$$

式中 $\frac{dB_n}{dt}$ 为法向磁场变化率。

该回路 X 方向的电阻为

$$R_n = \frac{4\rho}{h} \frac{x}{dy} = \frac{4\rho}{bdx} \quad (7)$$

式中 ρ 为电阻率。

回路的电流则为

$$dI = \frac{E}{R_n} = \frac{h}{\rho} \frac{b^2}{a^2} \frac{dB_n}{dt} x dx \quad (8)$$

每个单元上损耗功率为

$$P_n = \int dP = \int E dI = \int_0^{a/2} \frac{4h}{\rho} \cdot \frac{b^3}{a^3} \cdot \left(\frac{dB_n}{dt}\right)^2 x^3 dx = \frac{h}{\rho} \cdot \left(\frac{dB_n}{dt}\right)^2 \frac{b^3}{16} \cdot a \quad (9)$$

切向磁场分量 B_t 垂直于线圈盒断面,线圈盒感应的电流是沿其断面的矩形回路自行闭合,该闭合回路的电阻取矩形回路的平均电阻

$$R_t = \rho \frac{L_t}{ac} \quad (10)$$

式中 L_t 为闭合回路平均长度, a 为线圈沿小环方向的单元长度, c 为线圈盒平均壁厚,如图 11 所示。

由切向磁场产生的每单元损耗功率由下式确定

$$P_t = \frac{A^2}{R_t} \left(\frac{dB_t}{dt} \right)^2 \quad (11)$$

式中 A 为线圈盒断面的平均截面积, dB_t/dt 为切向磁场变化率。

精确的求解切向磁场分量 B_t 在线圈盒中产生的涡流损耗应当确定感应的电流的分布,详细的求解方法参阅参考文献[4]。两种计算结果表明,误差在 5% 以内。

法向磁场 B_n 在超导导线本身产生的损耗,可采取类似的计算方法。切向磁场 B_t 在超导导线中产生的涡流损耗应当考虑线圈盒中感应电流的影响,超导母线上切向磁场 B_t 应当是等离子体电流、真空室感应电流和线圈盒中感应电流共同产生。由于两个环向场线圈之间距离较远,为简单起见,求解超导母线上切向磁场分量仅考虑自身线圈盒中感应电流的作用,在考虑线圈盒单元之间相互耦合作用后可得超导母线上切向磁场分量。

在涡流损耗计算中,不锈钢的电阻率取 $\rho_{st(4.2K)} = 0.51 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$,超导母线铜基的电阻率取 $\rho_{cu(4.2K)} = 0.336 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$,考虑到法向磁场在超导导线铜基中引起的电阻率变化,铜的电阻率按下式修正^[6]

$$\rho' = \rho_{cu(4.2K)} + 4.8B_n \times 10^{-11} \Omega \cdot m \quad (12)$$

式中 B_n 为超导导线中的法向磁场。

图 12 为等离子体电流从 $I_p = 1.0 \text{ MA}$ 以时间常数 $\tau = 3 \text{ ms}$ 衰减时 16 个线圈盒和超导线圈中的总损耗功率变化情况,其功率最大值分别为 $P_C = 7.62 \text{ MW}$ 和 $P_L = 2.32 \text{ MW}$ 。由于等离子体破裂时线圈上磁场剧烈变化,因此损耗功率的瞬时值较大。随着电流快速衰减,损耗功率也很快降为零。在 90 ms 时间内,线圈盒和线圈上总的焦耳损耗为 $W_C = 87.5 \text{ kJ}$ 和 $W_L = 26.46 \text{ kJ}$ 。

图 13 表示等离子体电流破裂情况下在 90 ms 时间内一个线圈单位长度损耗沿线圈周长分布情况。线圈盒和线圈上单位周长最大涡流损耗分别为 $W'_{Cmax} = 4.6 \text{ kJ} \cdot m^{-1}$ 和 $W'_{Lmax} = 0.9 \text{ kJ} \cdot m^{-1}$ 。

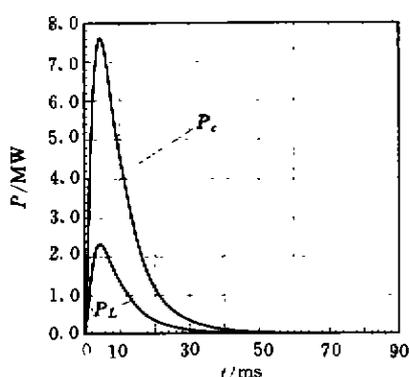


图 12 线圈上涡流损耗随时间变化

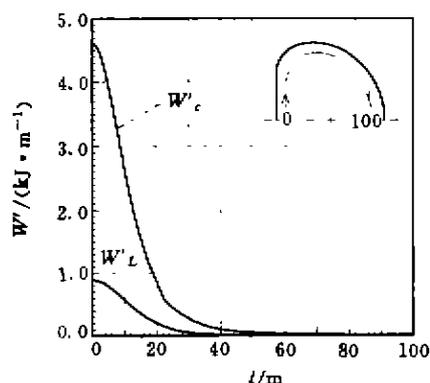


图 13 线圈上涡流损耗分布

上面给出的超导线圈损耗分布是平均值,由于线圈中磁场沿线圈的径向分布不同,因此对于超导线圈来说即使是在同一断面,每匝导体的损耗也不同,图 14 表示在线圈单位长度损耗最大的一个截面上,一匝导体单位长度损耗沿线圈高度的变化情况。从图中可见,在线圈内侧,即靠近等离子体处单位长度损

耗最大,外侧则最小。

当等离子体破裂时,环向场线圈的损耗是与等离子体电流衰减的时间常数有关,图15反映了线圈的损耗与时间常数之间的关系。图中给出了 $\tau = 1$ ms到 $\tau = 6$ ms范围内超导线圈(W_L)和线圈盒(W_C)涡流损耗的变化情况,损耗随时间常数的增加而减小。

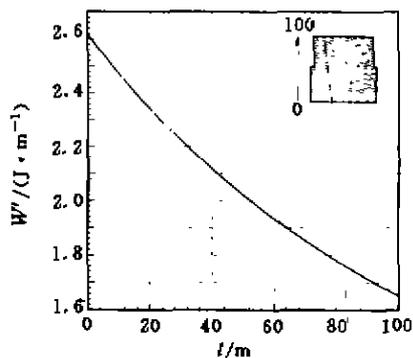


图14 涡流损耗沿线圈高度的变化

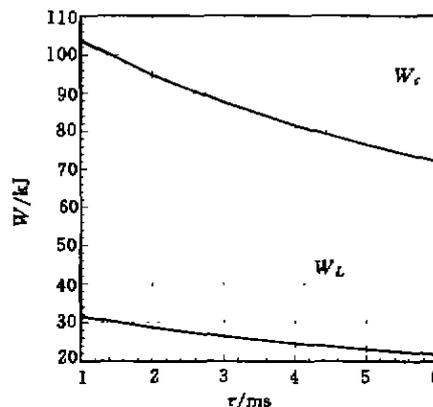


图15 涡流损耗与衰减时间常数关系

4 结束语

从上面的分析和计算中可知,在等离子体破裂初始阶段,环向场超导磁体中产生很大的涡流损耗,这是由于线圈上磁场快速变化引起的。对于HT-7U装置的环向场磁体,在等离子体电流从1.0 MA以 $\tau = 3$ ms衰减后的90 ms时间内,超导线圈和线圈盒将产生26.46 kJ和87.5 kJ的焦耳损耗,超导线上的单位体积平均损耗为 $3.69 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$,线圈盒上单位体积平均损耗为 $15.56 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。这些损耗是在一段时间内整个线圈上的平均值,但正如本文分析所表明,涡流损耗在空间上的分布是不均匀的,因此在某些特定部位,单位体积损耗要大于以上数值。线圈在靠近对称轴直线段的内侧,是涡流损耗集中处,这些局部位置的涡流损耗会对超导线圈的正常运行产生一些不利的影响。

致谢:本项工作得到王绍华、毕延芳、虞清泉、武松涛的帮助,表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] Andrew P, Noll P, Riccardo V. The relation between HALO current and plasma displacement/deformation in JET[A]. In: Proceeding of the 17th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research[C]. San Diego: IEE Inc, 1997. 108-111.
- [2] Rubinacci G. The thermo-magnetic transient in the vacuum vessel of a high field compact experiment[A]. In: Proceeding 11th Symposium on Fusion Technology[C]. Oxford: Pergamon Press, 1980. 322-328.
- [3] Rubinacci G. Numerical computation of the eddy currents on the vacuum vessel of a Tokamak[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1983, 19(6): 2478-2481.
- [4] Kslet S S, Hopper R J. Calculation of eddy current losses in toroidal field coil casing[A]. In: Proceeding of the 9th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research[C]. Chicago: IEEE Inc, 1981. 131-134.
- [5] Bloemer B, Farfaletti-Casali F. Consideration on heat deposition by eddy currents in the cold structure of INTOR/NET[A]. In: Proceeding 12th Symposium on Fusion Technology[C]. Julich: Pergamon Press, 1982. 965-969.
- [6] Wilson M. Superconducting Magnets[C]. Oxford: Oxford University Press, 1983. 253-258.

(责任编辑 朱华新)