

# HT-7U 管内电缆导体稳定性的仿真与实验研究

方进<sup>1</sup>, 张永<sup>1</sup>, 丘明<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044;

2. 中国科学院电工研究所应用超导重点实验室, 北京市 海淀区 100080)

## Simulation and Experimental Study on HT-7U Cable-in-conduit Conductor Stability

FANG Jin<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, QIU Ming<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China; 2. Key Lab of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100080, China)

**ABSTRACT:** The cable-in-conduit conductor(CICC) is a kind of preferred conductor for the large scale superconducting magnets. It is applied in superconducting nuclear fusion experimental device and superconducting energy storage magnet with its unmatched advantage. In order to reduce the expense of conductor, the frame of superconducting strands mixing with pure copper strands is suggested. Because increasing the copper fraction in the cable is favourable for conductor stability, four CICC with pure copper strands are fabricated and applied in HT-7U superconducting Tokamak. The author applied a 1-D mathematical model(Gandalf) to simulate stability of CICC at real operating modes of Tokamak. The relation of stability margin of CICC to mass flow rate, magnetic field, operating current and copper fraction is investigated. Meanwhile, theoretical results are compared with experimental results so that the author can get the effective ratios of separate copper in samples.

**KEY WORDS:** cable-in-conduit conductor; stability; critical current; superconducting Tokamak

**摘要:** 管内电缆导体(cable-in-conduit conductor, CICC)是目前大型超导磁体的首选导体,它在大型超导核聚变实验装置及超导储能磁体中的应用具有不可比拟的优越性。为了减小导体的成本,提出超导体和铜股线混合在一起的结构,因为增加铜比对导体稳定有利,该文制作了4个带有纯铜股线的管内电缆导体,并应用于HT-7U超导托克马克中。利用一维数学模型(Gandalf)对托克马克实际运行模式下CICC的稳定性进行仿真,研究了CICC的稳定性裕度与质量流速率、磁场、运行电流和铜比之间的关系。同时,将理论结果和实验结果进行比较,得到了样品中分离铜的有效比率。

**关键词:** 管内电缆导体; 稳定性; 临界电流; 超导托卡马克

## 0 引言

超导材料的飞速发展加速了其在强电领域的应用<sup>[1-4]</sup>。管内电缆导体(cable-in-conduit conductor, CICC)是一种新型低温超导电缆,是目前大型低温超导磁体的首选导体,其在大型超导核聚变实验装置<sup>[5-8]</sup>及超导储能磁体中的应用具有十分突出的优点<sup>[9]</sup>。为降低导体成本,提出了在CICC中采用低铜比的超导股线配以纯铜股线的设计方案,因此开展含纯铜股线CICC稳定性机理理论及实验研究,对CICC在高科技中的应用有重大意义。

与CICC稳定性相关的3个方面:①CICC内固体和与液氦的热交换;②CICC内各种干扰源产生的热扰动(包括外界传热、机械扰动和电缆所处的变化电磁场所产生的电磁扰动);③在电缆空间可得到的热容量(超导线仍不失超),即CICC有一个大的稳定性裕度(抗干扰能力)<sup>[10-15]</sup>。本文以上述3点为基础,利用CICC稳定性分析的理论模型,采用数值计算与分析方法,对CICC在受到热扰动下的稳定性进行计算机模拟,研究CICC的稳定性裕度。

## 1 CICC的稳定性分析模型及数值方法

### 1.1 CICC的稳定性分析模型

CICC的内部结构很复杂,可以用方程来表示迫流冷却CICC的传热规律<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho(V_b a_b + V_h a_h)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho V_b}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_b^2}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -2\rho f_b \frac{V_b |V_b|}{D_{h-b}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho V_h}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_h^2}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -2\rho f_h \frac{V_h |V_h|}{D_{h-h}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho (V_b a_b + V_h a_h) e}{\partial x} + \frac{\partial P (V_b a_b + V_h a_h)}{\partial x} = \left( \frac{P_{w-b} h_b}{A_{He}} + \frac{P_{w-h} h_h}{A_{He}} \right) (T_{St} - T_{He}) + P_{ja-He} h_{ja-He} (T_{ja} - T_{He}) \quad (4)$$

$$A_{St} C_{St} \frac{\partial T_{St}}{\partial t} + A_{St} \frac{\partial}{\partial x} (K_{St} \frac{\partial T_{St}}{\partial x}) = \dot{q}_{EXT} + \dot{q}_{joule} - P_{w-h} h_h (T_{St} - T_{He-h}) - P_{ja-St} h_{ja-St} (T_{St} - T_{ja}) \quad (5)$$

$$A_{ja} C_{ja} \frac{\partial T_{ja}}{\partial t} + A_{ja} \frac{\partial}{\partial x} (K_{ja} \frac{\partial T_{ja}}{\partial x}) = \dot{q}_{EXT} - P_w h (T_{ja} - T_{He}) - P_{ja-St} h_{ja-St} (T_{ja} - T_{St}) \quad (6)$$

$$A_{He} C_{He} \frac{\partial T_{He}}{\partial t} + A_{He} \frac{\partial}{\partial x} (K_{He} \frac{\partial T_{He}}{\partial x}) = \dot{q}_{EXT} - P_{w-b} h_b (T_{He-b} - T_{St}) - P_{w-h} h_h (T_{He-h} - T_{St}) - P_w h_{ja-He} (T_{He} - T_{ja}) \quad (7)$$

$$e = i + V^2 / 2 \quad (8)$$

式中： $t$ 为时间； $T$ 为温度； $C$ 为容积比热； $\rho$ 为液氮的密度； $P$ 为压力； $V$ 为流动速率； $f$ 为空隙率； $A$ 为横截面积； $D_h$ 为水力直径； $a_b$ 、 $a_h$ 分别为股线中液氮和中心孔中液氮占总液氮的百分比； $e$ 为总比能； $i$ 为内比能； $V^2/2$ 为动比能； $K$ 为热导率； $P_w$ 为冷却周长； $C_p$ 为液氮定压比热； $h$ 为热传递系数；下标b、h、w、St、ja、He分别表示股线中液氮、中心孔中液氮、电缆、超导股线、外壳和液氮。方程式(1)~(4)分别表示质量流方程、股线中液氮的动量平衡方程、中心管道中液氮的动量平衡方程及能量平衡方程；方程式(2)、(3)的右边描述空隙率在CICC内部产生的降压；方程(5)~(7)分别描述了股

线、外壳和液氮的热平衡方程； $\dot{q}_{EXT}$ 和 $\dot{q}_{joule}$ 分别表示单位长度上外界传热功率和焦耳热功率。为了求焦耳热 $\dot{q}_{joule}$ ，设导体中的运行电流为 $I_{op}$ ，若 $I_{op}$ 大于超导线的临界电流 $I_c$ 时，这时有一部分电流 $I_{op}-I_c$ 流进了超导电缆的稳定铜基中，其产生的电场为

$$E = \rho_{Cu} (I_{op} - I_c) / A_{Cu} \quad (9)$$

这时，在超导线中的电流为 $I_c$ ，产生的焦耳热 $\dot{q}_{joule}$ （单位长度上单位时间产生的焦耳热）为

$$q_{joule} = EI_{op} = \rho_{Cu} I_{op} (I_{op} - I_c) / A_{Cu} \quad (10)$$

在应用上述计算模型分析CICC稳定性时，应特别注意方程组中的热转移系数 $h$ 在热扰动时的变化。当有热扰动时，开始的1 ms内， $h$ 有一个很大的值（峰值），在以后的几毫秒到大约100 ms范围内， $h$ 值按与时间的平方根成反比的规律衰减，其规律可用式(11)表示<sup>[17]</sup>：

$$h_t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3.14 K_{He} C_p \rho}{t}} \quad (11)$$

式中： $K_{He}$ 为液氮的热导率； $\rho$ 为液氮的密度； $C_p$ 为液氮定压比热容； $t$ 为时间。当CICC的稳定热边界层形成后， $h$ 的值将不再随时间减小，而是保持一定值<sup>[17]</sup>：

$$h(T, T_{He}) = 0.0259 \frac{K_{He}}{D_h} Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.0259 [V \cdot \rho]^{0.8} K_{He}^{0.6} c_p^{0.4} D_h^{-0.2} \nu^{-0.4} \left( \frac{T_{He}}{T} \right)^{0.716} \quad (12)$$

式中： $D_h$ 为CICC的水力直径； $Re$ 、 $Pr$ 分别为雷诺数和普朗特数，是与液氮物性有关的参数，与液氮的流速 $V$ 、热导率 $K_{He}$ 和粘滞度 $\nu$ 有关，可查表得出。热转移系数 $h$ 在热转移过程中是一个变量，在计算过程中，要考虑这种变化的影响。CICC的水力直径 $D_h$ 可以由式(13)求出<sup>[17]</sup>：

$$D_h = 4A_{He} / P_w \quad (13)$$

式中： $P_w$ 为冷却周长； $K_{He}$ 为液氮的截面积。

为了计算CICC的稳定性裕度，需要改变模型中外界对导体的能量输入，计算不同的外界能量扰动对CICC稳定性的影响。当外界扰动能量为某一值，从式(1)~(8)中解出的超导股线温度恰好低于超导临界温度时，超导体仍能够恢复超导态；当外界扰动能量大于这一值时，超导股线就会失超，把这时的外界能量扰动值称为CICC的稳定性裕度。超导临界温度可表示为<sup>[18]</sup>

$$T_c = 9.2(1 - B/14.5)^{0.59} \quad (14)$$

式中： $B$ 为磁场强度； $T_c$ 为超导临界温度。

## 1.2 数值研究方法

应用有限元方法求解式(1)~(8)，在进行网格划分时，对导体中加热区域的网格密度增加2~5倍，以提高计算的准确性，详细计算方法参考文献[19]。在研究中，首先给出初始条件，包括运行电流、初始温度、导体长度、加热区域长度、加热时间、导体中液氮的流速和电缆中各组成部分的截面积。给出这些条件后，通过改变对CICC导体的热扰动能量，可得到导体的稳定性裕度。

## 2 实验原理及方法

稳定性研究在瑞士核能研究所的SULTAN实验装置上进行<sup>[20]</sup>。实验中，利用脉冲磁体，在加热区施加一个脉冲场，在加热区产生的涡流可以提高导体温度，从而实现输入能量进入导体。通过在液氮入口处增加一个铜加热线圈的方法改变液氮和导体

的温度，研究温度对稳定性的影响。实验装置中的背景磁体可以提供最高为 11 T 的背景场，通过改变磁场，研究磁场对稳定性的影响。同时通过冷却控制系统来改变液氦的流速，研究质量流速率对稳定性的影响。

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 试验参数

研究的 CICC 如图 1 所示。图中，2 根超导线和 2 根纯铜线组成 1 级子缆，3 个 1 级子缆组成 2 级子缆，4 个 2 级子缆组成 3 级子缆，在 3 级子缆上用不锈钢带进行花包，6 个 3 级子缆组成全缆，另外中心处 21 个铜线组成一个铜线子缆，然后把全缆用不锈钢带包扎后放入不锈钢管中，扎成方形的管内电缆导体(CICC)。

为了定量研究 CICC 的稳定性裕度，表 1 给出了超导股线的主要参数，表 2 给出了 4 种 CICC 导体的主要参数。由表 1 和表 2 的参数，可以计算得到 CICC 的铜、超导体、不锈钢和液氦的截面积，同时也可以计算出空隙率、冷却周长和水力直径，为计算机仿真提供初始值。

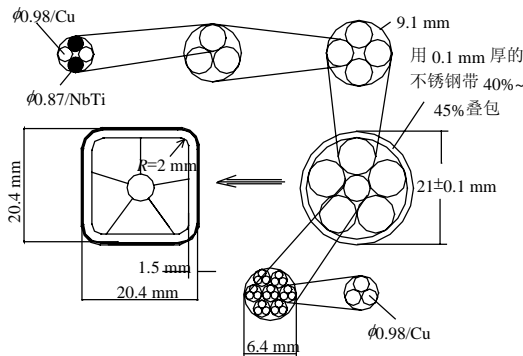


图 1 HT-7U TF 和 PF CICC 截面图

Fig. 1 HT-7U TF and PF CICC configuration

表 1 NbTi 股线的参数

Tab. 1 Parameters of NbTi strand

参数	数值	参数	数值
NbTi 股线直径/mm	0.87	超导芯线扭距/mm	10
铜超比	1.38	RRR 值	100
超导芯线数	8910	Pb-30Sn-2Sb 层厚度/ $\mu\text{m}$	2-3
超导芯线直径/ $\mu\text{m}$	6	Ni layer 层厚度/ $\mu\text{m}$	2-3

表 2 TF, PF1, PF2 和 PF3 CICC 的描述

Tab. 2 Description of TF, PF1, PF2 and PF3 CICC

导体	绞线模式	NbTi 股线数	Cu 股线数	各级扭距/mm	表面镀层材料
TF	(2Sc+2Cu) × 3 × 4 × 5	120	141	50/86/117/200	Pb-30Sn-2Sb
PF1	(2Sc+2Cu) × 3 × 4 × 5	120	141	40/86/117/260	Pb-30Sn-2Sb
PF2	(2Sc+2Cu) × 3 × 4 × 5	120	141	40/86/117/260	Ni
PF3	(2Sc+2Cu) × 3 × 4 × 5	120	141	40/86/117/260	Ni

#### 3.2 液氦质量流速率和温度对稳定性裕度的影响

为了提高 CICC 的稳定性，可以改善传热条件、增加冷却剂流速和减小冷却剂温度来实现提高 CICC 稳定性的目的。为了研究稳定性裕度与质量流速率及温度之间的关系，必须给出入口和出口的压力，在给出入口压力和流速率的情况下，可以用来计算出口压力，再利用式(1)~(8)计算出不同质量流速率下的 CICC 稳定性裕度。

一般情况下 CICC 内部的压力差可以用式(15)计算<sup>[17]</sup>：

$$\Delta P = \frac{(\dot{m})^2 L f}{2 \rho_{\text{He}} 981 D_h A_{\text{He}}^2} \quad (15)$$

式中： $\Delta P$ 为 CICC 出口和入口的压力差； $\dot{m}$ 为质量流速率； $\rho_{\text{He}}$ 为氦的平均密度； $D_h$ 为水力直径； $A_{\text{He}}$ 为氦的横截面积； $L$ 为冷却通道的长度； $f$ 为摩擦系数。摩擦系数可以通过式(16)计算<sup>[17]</sup>：

$$f = \frac{1}{f_{\text{He}}^{0.72}} \left[ \frac{19.5}{Re^{0.88}} + 0.051 \right] \quad (16)$$

式中 $f_{\text{He}}$ 为空隙率。雷诺数由式(17)定义<sup>[17]</sup>：

$$Re = \frac{\dot{m} D_h}{A_{\text{He}} \mu} \quad (17)$$

式中 $\mu$ 为粘着系数。

初始条件：CICC 的总长为 200 m，加热长度为 10 m (从 95~105 m 处)，加热时间为 10 ms，初始运行电流为 14.5 kA，最大磁场为 5.0 T，运行温度分别是 4 和 4.2 K，入口处的压力是  $4 \times 10^5$  Pa。通过式(15)研究每个位置与入口的压力差，得到每点的压力，再利用初始条件求解式(1)~(8)，从而得到不同扰动下导体的温度。

图 2 为导体在受到外部热扰动后，沿导体长度上不同位置的温度分布。其中，水平线表示超导体的临界温度。当输入的能量小于稳定性裕度时，从图 2(a)可以看出，在热扰动后，再次处于热平衡，导体上每点温度小于临界温度  $T_c$ ，这时导体处于超导状态；当输入的能量大于稳定性裕度时，超导体上每点的温度高于临界温度时，超导体将失超，如图 2(b)所示。

当输入的能量达到导体保持超导态的最大允许值时，就得到了 CICC 的稳定性裕度。改变质量流速率，得到不同流速下的稳定性裕度，选取分离铜的有效比率如表 3 所示 (关于分离铜的有效比率结果参考第 3.5 节)。稳定性仿真结果如图 3 所示。

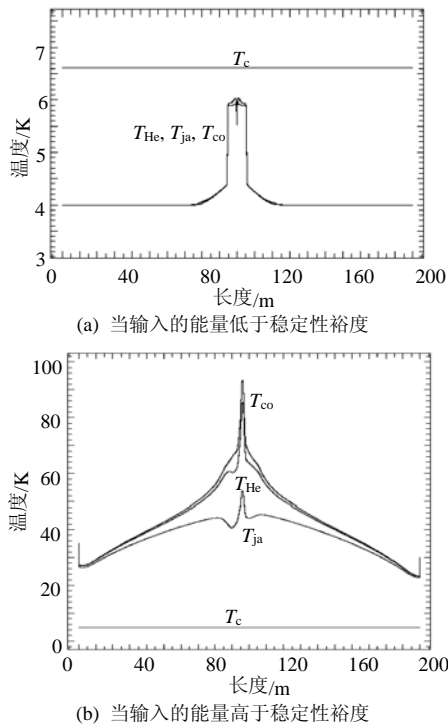


图2 沿导体长度方向不同位置上导体的温度  
Fig. 2 Conductor temperature of different position along conductor length

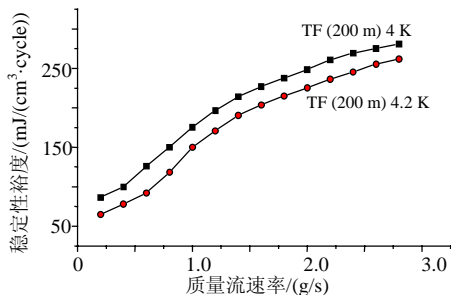


图3 TF CICC 稳定性裕度与冷却剂流速的关系  
Fig. 3 Stability margin of TF CICC vs. coolant speed

从图3可看出，随着质量流速的增加，稳定性裕度呈现上升趋势。这从式(12)可得到解释，质量流速 $V$ 越大，热传递系数 $h$ 越大，代入式(5)~(7)中，可以看到，在 $q_{EXT}$ 和 $q_{joule}$ 不变的条件下，热传递系数 $h$ 越大，等式右边的值越小，相应等式左边的值也越小，而导体各组分面积和容积热是不变的，所以各部分的温度 $T$ 将变小，因而稳定性裕度就会提高。

从图3还可看出，4 K时的稳定性裕度均高于4.2 K时的稳定性裕度，说明冷却剂的温度越高，稳定性裕度越低。关于温度和稳定性的关系可以从式(18)、(19)中找到答案<sup>[21]</sup>：

$$\Delta E = (1 - f_{Cu} - f_{nc}) \rho C_p (1 - \alpha) (T_c - T_{op}) / (f_{Cu} + f_{nc}) \quad (18)$$

$$\alpha = I_{op}^2 / [P_w h A_{Cu} (T_c - T_{op})] \quad (19)$$

式中： $\Delta E$ 为稳定性裕度； $C_p$ 为定压比热； $\rho_{He}$ 为液

氦的密度； $f_{Cu}$ 为铜的比例； $f_{nc}$ 为非铜组比例； $P_w$ 冷却周长； $h$ 为传热系数； $A_{Cu}$ 为铜的截面积。从式(18)和(19)可以看出，当运行温度 $T_{op}$ 上升时， $\alpha$ 增大，在临界温度 $T_c$ 不变情况下，稳定性裕度便会下降。这就解释了图3中的结果。

### 3.3 电流对能量裕度影响的仿真研究

初始条件：导线长度为200 m，加热长度为10 m(从95~105 m处)，加热时间为10 ms，运行磁场为4.5 T或5.8 T，液氦的质量流速为2~5 g/s，液氦的初始压力为 $4 \times 10^5$  Pa，初始温度为4.2 K，入口处压力为 $4 \times 10^5$  Pa，出口处压力为 $3.464 \times 10^5$  Pa。归一化电流 $i = I_{op} / I_c$ 的范围为0.1~0.65。对于铜的截面积，选取分离铜的有效比率如表3所示。稳定性仿真结果如图4所示。

从图4可以看出，随着电流的增加，4个样品的稳定性裕度都在减小。从式(18)、(19)可以看出，当电流增加时， $\alpha$ 增大，稳定性裕度减小。同时看到TF和PF1的稳定性裕度大于PF2和PF3稳定性裕度。关于这点，可以理解如下：由于铜的截面积 $A_{Cu}$ 为超导体中的铜基体的截面积 $A_{Cu1}$ 和分离铜线有效截面积 $X_e A_{Cu2}$ 的和，即 $A_{Cu} = A_{Cu1} + X_e A_{Cu2}$ ，TF和PF1对应的分离铜的有效比率 $X_e$ 较大(参看第3.5节)，所以对应的铜的截面积 $A_{Cu}$ 较大，由式(18)、(19)可知，TF和PF1对应的 $\alpha$ 较小，TF和PF1的稳定性裕度较大，PF2和PF3的稳定性裕度较小。

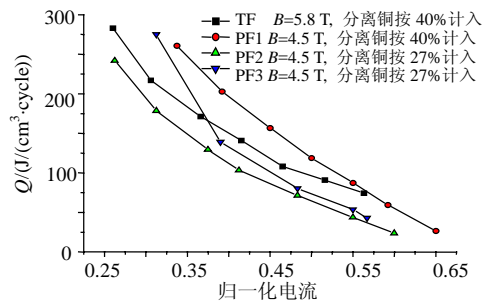


图4 不同电流下，TF、PF1、PF2和PF3 CICC导体的稳定性裕度计算结果

Fig. 4 Calculation results of stability margins of TF, PF1, PF2 and PF3 CICC conductors at different currents

### 3.4 磁场对能量裕度影响的仿真研究

初始条件：导线长度200 m，加热长度为10 m(从95~105 m处)，加热时间为10 ms，运行电流为14.5 kA，运行温度分别为4和4.2 K，液氦质量流速为2 g/s，液氦的初始压力为 $4 \times 10^5$  Pa，初始温度为4.2 K，入口处压力为 $4 \times 10^5$  Pa，出口处压力为 $3.464 \times 10^5$  Pa。运行磁场分别取为1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5 T，共10个值。仿真结果如图5所示。

由式(14)可以看出,当运行磁场 $B$ 增大时,临界温度 $T_c$ 会降低;由式(18)可以得出,随着 $T_c$ 的下降,稳定性裕度会逐渐下降。由此可以得出:运行磁场越大,稳定性裕度越低。仿真的结果也很好证明了这点。同时,在图5中可看出,温度在4.0 K下的稳定性裕度高于4.2 K下的稳定性裕度,也反映了在相同的磁场下,温度越高,稳定性裕度越低的特点。

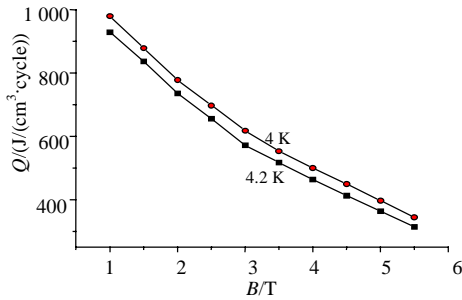
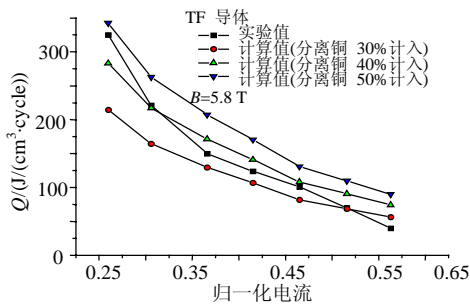


图 5 TF CICC 稳定性裕度与磁场的关系

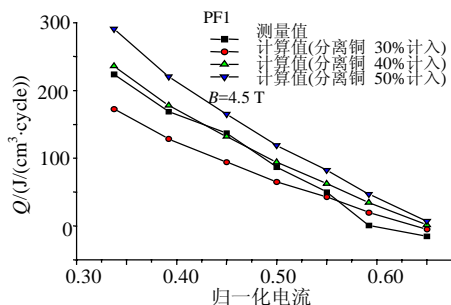
Fig. 5 Stability margin of TF CICC vs. magnetic field

### 3.5 分离铜线对能量裕度影响的仿真与实验研究

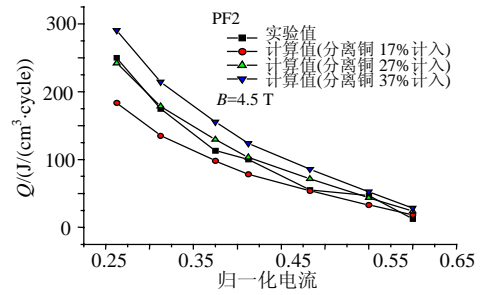
图 6 给出了不同电流下稳定性裕度的实验结果和仿真计算结果。从图 6 中可以看到,当电流增加时,TF,PF1,PF2 和 PF3 导体稳定性裕度的测量结果和计算结果都在减小;同时也发现,对 TF 和 PF1 而言,在横截面上,当分离铜线取 40% 计入导体截面中,稳定性裕度的理论计算值和实验值符合的较好;而对 PF2 和 PF3 而言,在横截面上,当分离铜线取 27% 计入导体截面中,稳定性裕度的理论计算值和实验值符合的较好。说明分离铜线在 CICC 导体的稳定性方面起一定作用,所得结果如表 3 所示。



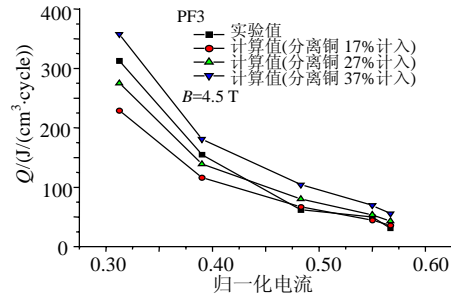
(a) TF 导体稳定性裕度的实验值与计算值的比较



(b) PF1 导体稳定性裕度的实验值与计算值的比较



(c) PF2 导体稳定性裕度的实验值与计算值的比较



(d) PF3 导体稳定性裕度的实验值与计算值的比较

图 6 不同电流下, TF, PF1, PF2 和 PF3 CICC 导体稳定性裕度的测量结果和计算结果比较

Fig. 6 Comparison of measurement and calculation results of stability margins of TF, PF1, PF2 and PF3 CICC conductors at different currents

表 3 样品中分离铜的有效比率

Tab. 3 Effective ratios of separate copper in samples

样品	TF	PF1	PF2	PF3
分离铜有效比率 $X_e$	40%	40%	27%	27%

为了理解分离铜在稳定性方面的作用,可以从导体内部结构进行分析。当截面中加入分离铜股线后,会增加铜的截面和冷却周长,这对稳定性有利。一方面,铜截面增加会对局部因为热扰动、应力和超导线的缺陷造成的失超有保护作用,当局部失超后,电流可以从超导线中分流到铜线中,可以减小超导线的发热,有利于超导线的恢复。另一方面当 CICC 冷却周长增加时,导体内部的冷却作用加强,导体中产生的热会更快的被带走,更有利于导体保持超导状态。

超导芯线以铜作为基体形成超导线,分离铜线中的铜和超导线中的铜都对超导体的稳定有利,当局部受到热扰动时,电流接近或超过临界电流时,电流就会分流到铜基体或分离铜线中,这样有利超导态的恢复,提高了稳定性。但两者的对导体的稳定效果有所不同。超导线中超导芯线与铜基体接触良好,电流容易从超导体中分流到铜基体中,但铜线和复合超导线表面都镀了电阻层,增加了横向电阻率,不利于电流分流到铜线中。这样,分离铜在稳定性方面发挥的作用就没有超导线中铜基体发挥的作用大。因此就出现了分离铜在稳定性方面

发挥的作用在 20%~40%之间。另外也发现, 发挥作用的大小与镀层的电阻率有关, TF 和 PF1 表面镀层为 Pb-30Sn-2Sb 合金, 而 PF2 和 PF3 表面镀层为金属 Ni, Pb-Sn 合金的电阻率远小于金属 Ni 的电阻率, 所以在 TF 和 PF1 中, 电流更容易分流到铜线中, 其分离铜线的稳定作用也较大。因此分离铜线在 TF 和 PF1 中取 40% 计入导体截面中, 而分离铜线在 PF2 和 PF3 中取 27% 计入导体截面中。

#### 4 结论

CICC 稳定性裕度随质量流速率的增加而增加; 随运行电流、磁场、温度的增加而减小; 分离铜在稳定性方面起部分作用。实验研究发现, TF 和 PF1 CICC 的稳定性裕度高于 PF2 和 PF3 CICC 的稳定性裕度。通过仿真计算和实验结果比较, 可以发现, 在超导股线和铜线上镀铅锡合金的 TF 和 PF1 CICC 中, 分离铜在稳定性上发挥作用的比率为 40%, 而在超导股线和铜线上镀镍的 PF2 和 PF3 CICC 中, 分离铜发挥作用的百分比率为 27%。虽然分离铜在提高 CICC 稳定性方面不能 100% 发挥作用, 但可以发挥部分作用, 这对大型磁体十分重要, 同时分离铜可以减少导体成本。在 HT-7U 超导托卡马克实验装置中的磁体采用了这样的导体, 节约了将近 1/3 的成本, 同时通过实验验证含分离铜的超导 CICC 导体可以满足在核聚变实验装置中等离子体放电下的超导体稳定性要求。

#### 参考文献

- [1] 徐德鸿, 正田英介. 超导储能装置用 GTO PWM 电流型变流器模块方阵[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 124-130.  
Xu Dehong, Eisuke Masada. GTO PWM current converter array for superconducting magnetic energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 124-130(in Chinese).
- [2] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-8.  
Ye Lin, Lin Liangzhen. Superconducting fault current limiter applications in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-8(in Chinese).
- [3] 王付胜, 刘小宁. 饱和铁心型高温超导故障限流器数学模型的分析与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 135-139.  
Wang Fusheng, Liu Xiaoning. Model analysis of a high temperature superconducting fault current limiter and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 135-139(in Chinese).
- [4] 方进, 翁佩德, 陈灼民, 等. 运行温度对 NbTi 管内电缆导体瞬态稳定性的影响的实验研究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 113-118.  
Fang Jin, Weng Peide, Chen Zhuomin, et al. Experimental research and analysis of the influence of operating temperature on nbtic cicc transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 113-118(in Chinese).
- [5] Xiao Bingjia, Weng Peide. Thermal performance of TF coils in HT-7U under plasma disruption[J]. Cryogenics, 2003, 43(3-5): 173-178.
- [6] Zanino R, Richard L S. A review of thermal-hydraulic issues in ITER cable-in-conduit conductors[J]. Cryogenics, 2006, 46(7-8): 541-555.
- [7] Renard B, Martinez A, Duchateau J L, et al. Transverse heat transfer coefficients on a full size dual channel CICC ITER conductor [J]. Cryogenics, 2006, 46(7-8): 530-540.
- [8] Volker P. Numerical investigation of buoyancy effects in vertical ITER-TF-CICC at normal operating conditions[J]. Cryogenics, 2006, 46(7-8): 563-568.
- [9] Lawrence D. Twenty years of cable-in-conduit conductors: 1975-1995 [J]. Journal of Fusion Energy, 2001, 29(1): 39-47.
- [10] Soren P, Stacy S, Cesar L, et al. Quench simulation of a CICC model coil subjected to longitudinal and transverse field pulses [J]. Cryogenics, 2000, 40(8-10): 511-517.
- [11] Weng P D, Bi Y F, Chen Z M, et al. HT-7U TF and PF conductor design[J]. Cryogenics, 2000, 40(8-10): 531-538.
- [12] Lelekhov S A. A physical model and numerical method for losses investigation in superconducting cable-in-conduit conductors(CICC) [J]. Cryogenics, 2006, 46(1): 1-8.
- [13] Inaguchi T, Hasegawa M, Koizumi N, et al. Quench analysis of an ITER 13 T-40 kA Nb3Sn coil(CS insert)[J]. Cryogenics, 2004, 44(2): 121-130.
- [14] Kazuya H, Yoshikazu T, Kunihiro M, et al. Effect of electromagnetic force on the pressure drop and coupling loss of a cable-in-conduit conductor[J]. Cryogenics, 2004, 44(1): 45-52.
- [15] Nicollet S, Duchateau J L, Hertout P, et al. Heat transfer from plates to conductors: from toroidal field model coil tests analysis to ITER model[J]. Cryogenics, 2003, 43(3-5): 209-214.
- [16] Fang Jin, Chen Zhoumin, Wu Songtao, et al. Research of the CICC stability by the numerical code Gandalf[J]. Plasma Science & Technology, 2000, 2(4): 383-396.
- [17] Fang Jin, Weng Peide, Chen Zhoumin, et al. Investigation on the relation of CICC stability margin to mass flow rate and operating temperature of helium[J]. Plasma Science & Technology, 2001, 3(2): 715-720.
- [18] 方进, 翁佩德, 武松涛, 等. 管内电缆导体稳定性理论和实验研究[J]. 低温与超导, 2001, 29(1): 39-47.  
Fang Jin, Weng Peide, Wu Songtao, et al. The theoretical and experimental research on CICC stability[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2001, 29(1): 39-47(in Chinese).
- [19] Bottura L. Stability and protection of CICC: an updated designer's view[J]. Cryogenics, 1998, 38(1): 491-502.
- [20] Weng P D, Bruzzone P, Chen Z M, et al. Test results and analyses of conductor short samples for HT-7U[J]. Cryogenics, 2003, 43(3-5): 165-171.
- [21] Bottura L. Limiting current and stability of cable-in-conduit conductors [J]. Cryogenics, 1994, 34(10): 787-794.

收稿日期: 2007-12-07。

作者简介:

方进(1963—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为超导磁体、超导电缆、超导电机、超导限流器及超导磁悬浮装置, 同时进行超导材料制作及超导材料电性能的理论 and 实验研究, fangseer@sina.com;

丘明(1968—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为超导电机、超导磁悬浮系统及高温超导带材。

(责任编辑 王剑乔)