

HT-7U 超导磁体导体摩擦系数的测定*

白红宇 毕延芳 翁佩德 马登奎 宋伟容 石磊

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 HT-7U 超导托卡马克的纵场磁体 (TF) 和极向场磁体 (PF) 都将采用 3.8 K 超临界氦迫流冷却的 CICC (Cable in Conduit Conductor)。描述了 HT-7U 超导托卡马克 CICC 的摩擦阻力实验。实验采用常温的氮气作工质, 雷诺数 Re 范围达到 300~6000。利用 Katheder 经验公式对实验的摩擦阻力系数进行了重新拟合, 它与经验公式的计算结果存在一定的误差。给出了适于测试导体摩擦阻力系数的经验公式, 以及导体在工作状态下的摩擦阻力损失。

主题词 摩擦系数 CICC 超导磁体 HT-7U

1 前言

CICC (Cable in Conduit Conductor) 因其满足高电流、高电压、低损耗而被发展用在核聚变装置超导磁体中。CICC 采用超临界氦迫流冷却, 需要较大的氦质量流量。迫流氦在导体中的阻力损失对泵送功率影响很大。而在流量一定时, 阻力损失取决于摩擦系数。阻力损失与摩擦系数和流速的关系为

$$\Delta p = f \frac{\rho v^2 L}{2D_h} \quad (1)$$

这里 f 为摩擦系数, ρ 、 v 为流体的密度和流速, D_h 为导体的当量直径, L 为冷却通道的长度。

摩擦系数也是 CICC 稳定性分析的一重要参数^[1], 同时它也是迫流冷却导体的其它热工水力特性分析的重要参数, 如失超后 CICC 中升高的最大压力。

摩擦系数测量原理是基于上面的公式 (1), 分析它与雷诺数的关系。采用常温氮气、常温的水、常温的氮气分别对 W7-X 及 ITER CICC 的摩擦系数进行了测定, 他们的结果与 Katheder 的经验公式^[4]基本一致, 但也存在一定的差别。

HT-7U 超导托卡马克的纵场磁体 (TF) 和极向场磁体 (PF) 都将采用 3.8 K 超临界氦迫流冷却的 CICC。这里对 HT-7U 导体设计的四个样品的摩擦系数进行了测试, 采用常温氮气作介质, 得到了其摩擦系数与雷诺数的关系。

* 国家“九五”大科学工程 HT-7U 超导托卡马克项目资助。白红宇, 男, 30 岁, 工程师。
修改稿于 2002 年 4 月 3 日收到。

2 导体的参数及实验装置

HT-7U 极向场 (PF) CICC 超导电缆样品——1#、2#、3# 样品, 分别由 120 根超导线和 (120 + 21) 根铜股线通过四级绞缆构成。1# 样品所有股线的表面热涂 3 μm 厚的 Pb-30Sn-2Sb 软钎料; 2# 和 3# 样品所有股线的表面电镀 2 μm 厚的 Ni 层。1# 和 2# 样品的第三级子缆用 0.05 mm 厚的不锈钢箔 ~ 70% 花包, 3# 样品的第三级子缆不花包。纵场 (TF) 导体样品也是由 120 根超导线和 (120 + 21) 根铜股线通过四级绞缆构成, 所有股线的表面热涂 3 μm 厚的 Pb-30Sn-2Sb 软钎料。最终的电缆, 即第四级子缆, 是由五根第三级子缆围绕着一个铜电缆芯 (Copper Cable Core - CCC) 构成, 并用 0.1 mm 厚的不锈钢带 40% ~ 45% 迭包。实验样品的具体参数如表 1 所示。

表 1 CICC 样品的基本参数^[6,7]

项目	符号	PF1 #	PF2 #	PF3 #	TF
电缆配置	/	(2Sc + 2Cu) \times 3 \times 4 \times 5 + 1CCC			
超导线 (Sc) 股数	N_{Sc}	120			
铜线 (Cu) 股数	N_{Cu}	120 + 21			
Sc 股线直径/mm	d_{Sc}	0.85	0.85	0.85	0.85
Cu 股线直径/mm	d_{Cu}	0.95	0.95	0.95	0.95
CICC 外形尺寸/mm	$a \times a$	20.8 \times 20.8	20.8 \times 20.8	20.47 \times 20.47	20.4 \times 20.4
导体样品长度/m	L	4.02	2.53	2.53	2.53
316LN 不锈钢管壁厚/mm	δ_1	1.5	1.5	1.5	1.5
不锈钢带厚度/mm	δ_2	0.1	0.1	0.1	0.1
镀层厚度/mm	δ_3	0.003	0.002	0.002	0.003
镀层	/	Pb-30Sn-2Sb	Ni	Ni	Pb-30Sn-2Sb
圆角半径/mm	R	2	2	2	2
缆区总截面积/mm ² $A_{\text{ca}} = (a - 2\delta_1 - 4\delta_2)^2 - [4r^2 - \pi r^2]$	A_{ca}	300	300	288.0	285.6
总绞缆系数	K	1.042	1.042	1.041	1.051
Cu、Sc 的总面积/mm ² $A_{\text{st}} = \pi r^2 [N_{\text{Cu}} \cdot (d_{\text{Cu}} + 2\delta_3)^2 + N_{\text{Sc}} \cdot (d_{\text{Sc}} + 2\delta_3)^2] / 4$	A_{st}	194.3	194	177.3	179.0
导体的空隙率 $\text{Void} = A_{\text{He}} / A_{\text{ca}}$	Void	36.67%	36.67%	38.44%	37.32%
导体中氮的截面积/mm ²	A_{He}	110	110	110.7	106.6
三级子缆有无花包	/	有	有	无	无
花包后第三级子缆的直径/mm		9.2	9.2	/	/
湿周长/m	U	0.875 8	0.875 8	0.704 6	0.710 9
当量直径/mm $D_{\text{h}} = 4A_{\text{He}} / U$	D_{h}	0.502 4	0.502 4	0.628 4	0.599 8

摩擦系数的测试装置简图如图 1 所示, 实验的 CICC 为直导体。导体前后都安装有压力和温度测量仪表。导体出口安装一玻璃转子流量计。在雷诺数较大时, 需提高流量计的进口压力以增加流量计的测量范围。

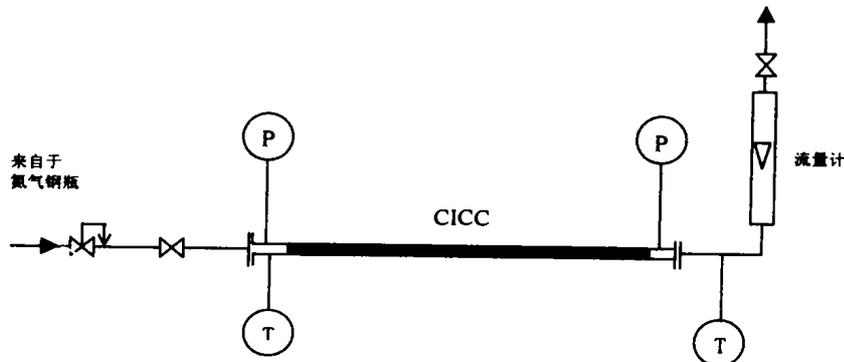


图 1 摩擦系数测试装置简图

实验采用带压的氮气作介质, 由一组氮气钢瓶提供。通过调节阀门的开度来调节通过导体的流量。

3 实验结果及数据处理

(1) 导体的湿周和当量直径

PF1 # 和 PF2 # 导体采用花包, 其湿周计算方法为

导体的湿周 = 湿周系数 × (所有 Cu 及超导线股的圆周长之和 + 导管的内周长 + 花包不锈钢带的周长之和) (2)

这里, 湿周系数取 5/6, 三级子缆的不锈钢带花包湿周按双面计算。忽略最后一级电缆的包带影响。

PF3 # 和 TF 导体没有采用花包, 其湿周也采用上面的计算公式, 只是没有花包的周长这一项。

导体的当量直径为 $D_h = \frac{4A_{He}}{U}$ (3)

(2) 雷诺数的计算

Re 与质量流量、粘性系数和湿周长有关, 即

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu U} \quad (4)$$

在导体内沿流动方向上的不同截面上, 其质量流量一样, 对于均匀加工的导体, 其湿周长也视为一样。只有粘性系数略有不同。对于 293 K 的氮气, 其粘性系数在 0.1 MPa 与 1.5 MPa 时的只差别为 1.3%。对于 0.5 MPa 的氮气, 其粘性系数在 280 K 与 300 K 的差别为 5.1%。这说明在导体各个截面上的 Re 基本相同。

HT-7U 导体在工作状态下 (0.4 MPa, 4 K) 的雷诺数 Re 与质量流量的关系如图 2 所示。

(3) 摩擦系数

$$f = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot D_h}{\rho v^2 L} \quad (5)$$

这里 Δp 为所测得的压差。由于用氮气作实验，氮气沿导体方向不断膨胀，流速不断增加。因而用上式计算摩擦系数时涉及到如何选取密度和流速的问题，即选取哪一截面上的参数来计算摩擦系数。

$$\text{气体流速 } v = \dot{m} / \rho_{\text{aver}} A_{\text{He}} \quad (6)$$

$$\text{则 } f = \frac{2 \Delta p D_h \rho_{\text{He}}^2}{\dot{m}^2 L} = C_1 \frac{\Delta p}{L \rho}$$

当氮气在常温、压力不太高时接近于理想气体，可采用理想气体状态方程计算密度。由于沿导体方向， D_h 、 D_{He} 、 \dot{m} 均为一样，所以可把它们合并成一个常数。于是将上式写成微分的形式有

$$dp = -f \frac{1}{C_1 \rho} dL = -f \frac{RT}{C_1 p} dL$$

$$\int_{p_{\text{in}}}^{p_{\text{out}}} p dp = - \int_0^L f \frac{RT}{C_1} dL$$

由于摩擦系数沿导体长度方向基本不变，温度 T 也基本不变，因而上式积分有

$$\frac{1}{2} (p_{\text{in}}^2 - p_{\text{out}}^2) = f \frac{RT}{C_1} L \quad (7)$$

从而得到

$$f = C_1 \frac{(p_{\text{in}}^2 - p_{\text{out}}^2)}{2} \frac{1}{RTL} = C_1 \frac{(p_{\text{in}} - p_{\text{out}})(p_{\text{in}} + p_{\text{out}})/2}{RT}$$

因此我们可选取进出口平均压力截面上的参数计算。平均压力截面上的密度为

$$\rho_{\text{aver}} = \frac{(p_{\text{in}} + p_{\text{out}})/2}{RT}$$

(4) 实验结果

通过对实验结果进行分析，其摩擦系数与雷诺数 Re 的关系如图 3 所示。图 3 中的两条曲线对应着文献 [3] [4] 中的结果。从图中可看出用文献中的公式计算 HT-7U 导体的摩擦系数存在一定的误差。图 4 中给出了对实验结果的拟合曲线，其中 PF3 和 TF 采用同一拟合曲线。

对实验数据进行重新拟合，得到如下的准则关系。对于没花包的 TF 和 PF3 # 导体，其拟合公式为

$$f = \left(\frac{1}{\text{Void}}\right)^{0.72} \left(0.0265 + \frac{19.5}{Re^{0.843}}\right) \quad (8)$$

对于花包的 PF1 # 和 PF2 # 导体，其拟合公式分别为

$$f = \left(\frac{1}{\text{Void}}\right)^{0.72} \left(0.0039 + \frac{19.5}{Re^{0.83}}\right) \quad (9)$$

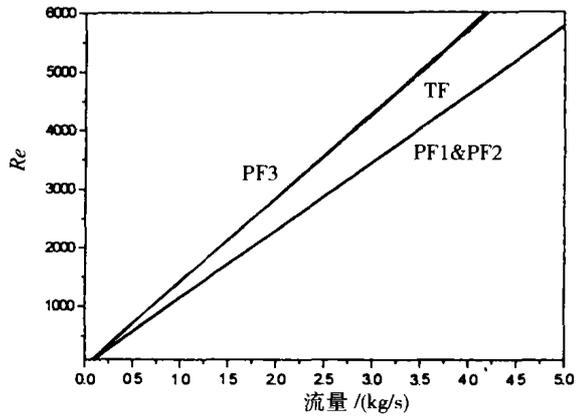


图 2 导体工作状态下雷诺数与质量流量的关系

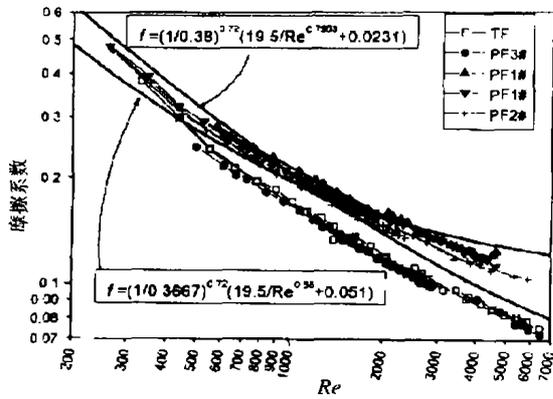


图3 实验结果——摩擦系数与 Re 数的关系

$$f = \left(\frac{1}{Void}\right)^{0.72} \left(0.0036 + \frac{19.5}{Re^{0.835}}\right) \quad (10)$$

本文并没作摩擦系数与空隙率的关系实验，因而上面摩擦系数与空隙率的关系从文献中得来。根据拟合得到的关系式，可计算得到摩擦阻力损失。图5给出了以不同质量流量下100 m长导体在工作条件0.4 MPa, 4 K下的阻力损失。对带花包的导体，其阻力损失明显高于没花包的导体。

4 结论

作者对 HT-7U 超导托卡马克导体样品的摩擦系数进行了测定。实验的雷诺数 Re 范围达到 300~6 000，覆盖了 CICC 工作状态下的雷诺数范围。测定的结果用 Katheder 经验公式进行拟合，得到了不同导体的摩擦系数与雷诺数的关系。

本文工作得到了国家“九五”大科学工程 HT-7U 超导托卡马克项目的资助。作者在此对 HT-7U 导体的其他设计人员及参与实验的其他同事表示感谢。

参 考 文 献

- 1 白红宇, 毕延芳. 迫流冷却超导磁体稳定裕量的计算. 低温工程, 1999, (5)
- 2 Blau B, Jacob B, Pasztor G, Vecsey G. Evaluation of a NbTi Cable-in-Conduit Prototype Superconductor for the Wendelstein 7-X Magnet System. IEEE Trans On Mag, 1996, 32 (4)
- 3 Nicollet S, Cloez H, Duchateau J L, Serries J P. Hydraulic of the ITER Toroidal Field Model Coil Cable-In-Conduit Conductor. Proceedings of SOFT98: 771 ~ 74
- 4 Katheder H. Optimum Thermohydraulic Operation Regime for Cable in Conduit Superconductors (CICS). Cryogenics, 1994, 34, ICEC Supplement 595

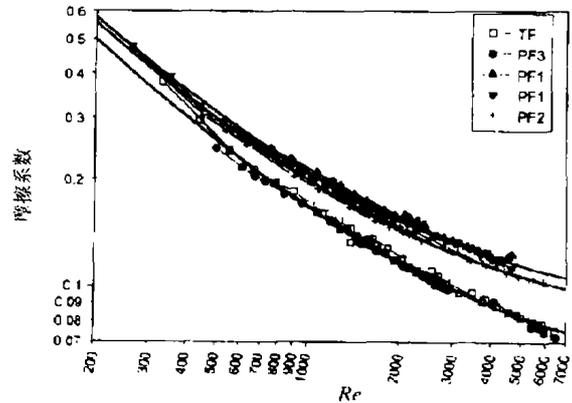


图4 摩擦系数拟合的关系曲线

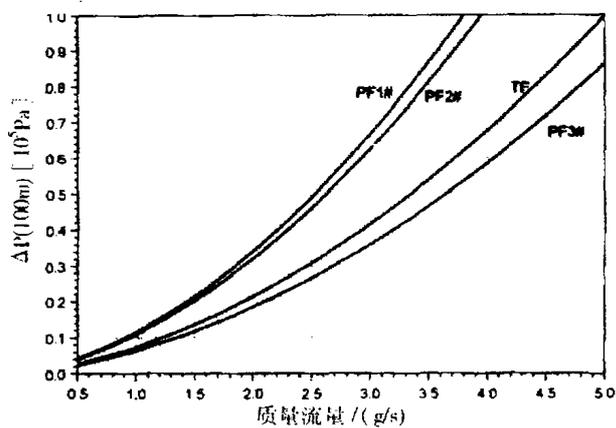


图5 阻力损失与质量流量的关系

(下转第28页)

- 2 吴刚. 采用平箔动压气体轴承透平膨胀机的小型空气制冷机的研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1998
- 3 H.D. 贝尔. 工程热力学理论基础及工程应用. 北京: 科学出版社, 1983
- 4 Ahern J E. The exergy method of energy systems analysis. New York: Wley, Inc. 1980
- 5 孙光三, 周兴禧, 邹根南, 鲍士雄 等编译. 制冷中的节能. 上海: 上海交通大学出版社, 1987
- 6 计光华 编. 透平膨胀机 (修订本). 西安: 西安交通大学出版社, 1988

THE EXERGY ANALYSIS OF REVERSE-BRAYTON CIRCLE AIR REFRIGERATOR

Zhu Zhaohui Hou Yu Xiong Lianyou Yang Jinhuan Chen Chunzheng

(Institute of Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049)

ABSTRACT The exergy loss of Reverse-Brayton circle air refrigerator has been analyzed with the method of exergy. The exergy model of the refrigerator has been established. The exergy efficiency was calculated, and the possible approach to improve the performance has also been pointed out.

KEYWORDS Reverse-Brayton circle; air refrigerator; exergy efficiency

(上接第 15 页)

MEASUREMENT ON THE FRICTION FACTOR OF HT-7U CICC

Bai Hongyu Bi Yanfang Weng Peide Ma Dengkui Song Weirong Shi Lei

(Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

ABSTRACT The toroidal field magnets and poloidal field magnets of HT-7U superconducting tokamak are made of Cable in Conduit Conductor (CICC) cooled by forced flow supercritical helium of 3.8 K. This paper describes the pressure drop test for CICC samples of HT-7U. The conductors are tested with nitrogen at room temperature. The Reynolds number starts from 300 and reaches about 6000 in the experiment. The experiment data are fitted again in the form of Katheder general formula and there is some difference between them. The correlation of friction factor dependent on the Reynolds number are presented. The pressure loss of the conductors in operation condition calculated from the correlation are also presented in this paper.

KEYWORDS friction factor; CICC; superconducting magnets; HT-7U
