

Nb₃Sn 超导磁体低温冷却设计

许少峰¹, 刘旭峰², 宋云涛²

(1. 中国科学技术大学 核科学技术学院, 安徽 合肥 230029;

2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:介绍了聚变堆用 Nb₃Sn 超导磁体管内电缆导体(CICC)的结构型式和参数,以及超导磁体的运行工况,采用一维数学模型 Gandalf 对超临界氦迫流冷却回路进行压降计算,从理论上确定了较为合理的液氦质量流率。

关键词:管内电缆导体;压降计算;迫流冷却;Nb₃Sn

中图分类号:TL622

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2013)01-0147-04

doi:10.7538/yzk.2013.47.01.0147

Cryogenic Cooling Design of Nb₃Sn Superconducting Magnet

XU Shao-feng¹, LIU Xu-feng², SONG Yun-tao²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The structure and parameters of the cable-in-conduit conductor (CICC) and the operation condition of the Nb₃Sn superconducting magnet used in fusion experimental device in China were introduced. A one-dimensional mathematical model, Gandalf, was used to calculate the pressure drop in CICC under the circulating mode of forced flow cooling which used supercritical helium as coolant, and consequently the relatively reasonable mass flow of liquid helium in theory was obtained.

Key words: cable-in-conduit conductor; pressure drop calculation; forced flow cooling; Nb₃Sn

管内电缆导体(CICC),即在电缆外套不锈钢管,既可作为液氦容器,又可承载电磁力。CICC 以其优良的性能广泛应用于大型超导核聚变实验装置^[1-3]以及超导储能磁体中,国家大科学工程项目 EAST 装置、国际热核反应堆(ITER)等核聚变实验装置均采用 CICC。

核聚变装置中大型超导磁体的冷却采用的

即为超临界氦迫流冷却方式,优点如下:CICC 导体直接与氦流接触,传热系数稳定,结构紧凑。而超流氦浸泡冷却的方式易出现气液共存两相流,对强磁场装置的稳定性威胁较大,所以前种冷却方式相对于后者,优势较为明显。

国内首个聚变堆用大型 Nb₃Sn 超导磁体模型线圈的设计工作温度为 4.2 K、磁场为

4 T,磁体采用超临界氦迫流冷却,共有5个冷却回路,冷却回路压降计算是CICC型超导磁体设计的重要任务之一,更是验证超导磁体低温冷却设计可行性的必要前提。因此,对于超临界氦在CICC中流动压降的研究,对超导磁体的低温冷却设计具有十分重要的意义。

1 CICC的结构型式和参数

磁体CICC采用4级绞缆结构,绞缆的配置为(2Sc+1Cu)×3×3×3。即第1级缆为2根超导线和1根铜线扭绞,第2级缆为3个第1级缆扭绞,以此类推。因此,整个导体中含超导线54根,铜导线27根,为了避免在穿管过程中损伤超导线,在最后1级缆外也用0.1 mm的不锈钢带进行半叠包。超导缆通过穿管、压方后形成CICC导体。具体绞缆配置如图1所示。

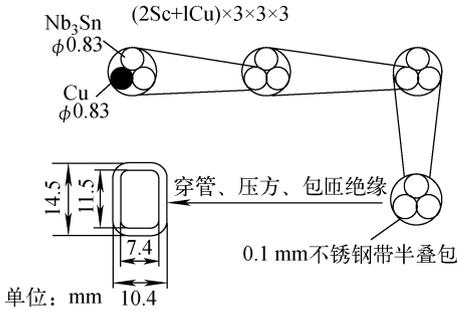


图1 模型线圈绞缆配置

Fig. 1 Configuration of model coil

2 CICC冷却回路压降计算

2.1 理论计算

一般情况下,流体压降计算公式通常用伯努利方程表示:

$$\Delta p = \frac{\xi a_t \rho \omega^2}{2} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\dot{m}}{\rho A_{\text{He}}} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{1}{v^{0.72}} \left(\frac{19.5}{Re^{0.88}} + 0.051 \right) \quad (3)$$

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

其中: Δp 为管道或设备进出口压力差; ω 为流体平均速度; A_{He} 为CICC内液氦截面积; \dot{m} 为流体质量流率; ξ 为摩擦系数^[4],无量纲,由

Hagen-Poiseuille公式计算得出,对于CICC,对应摩擦系数由Katheder^[5]提出; ρ 为流体平均密度; v 为CICC空隙率; a_t 为管道长度与冷却通道当量直径之比,无量纲,若在管道内计算压降,则取 $a_t = l/d_h$,其中 l 为管道长度, d_h 为冷却通道当量直径; P_w 为湿润周长; μ 为动力粘度,取 $\mu \approx 3.57 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将式(2)~(4)分别代入式(1),得到压降公式为:

$$\Delta p = \frac{b \dot{m}^{1.12} (19.5 P_w^{0.88} \mu^{0.88} + 0.173 \dot{m}^{0.88})}{6.774 v^{0.72} d_h \rho A_{\text{He}}^2} \quad (5)$$

该模型线圈CICC相关参数列于表1。

表1 CICC参数

Table 1 Parameters of CICC

| 参数 | 量值 |
|----------------------|------------------------|
| 超导线线径 | 0.83 mm |
| 铜面积 | 29.856 mm ² |
| Nb ₃ Sn面积 | 14.928 mm ² |
| 氦面积 | 27.818 mm ² |
| 电缆空间面积 | 83.165 mm ² |
| 空隙率 | 0.335 |
| 铜组分 | 0.359 |

如给定液氦质量流率,将表1中的数据代入式(5)便可计算出流体压降。

至此,液氦质量流率的取值成为问题关键。若氦的质量流率过小,则无法快速将失超的热量带走;若氦的质量流率过大,则又会导致冷却回路两端压差过大,造成制冷机的负荷加大。因此,合理确定质量流率与氦压差的关系便显得非常重要。

2.2 Gandalf模拟计算

采用一维流体程序Gandalf软件^[6]对该模型线圈进行模拟分析,本文计算结果由Gandalf V2.2计算得到。

设定的初始条件包括导体运行电流、初始温度、导体长度、加热区域长度、加热时间,以及电缆中各组成部分的截面积等参数。具体为:导体长度46 m,运行电流12 kA,运行温度4.2 K,加热区域长度6 m(从20 m到26 m处),加热时间10 ms,入口处压力0.4 MPa。

在给出质量流率的情况下,可得出出口压力,从而得出压力差,最终得出不同质量流率下冷却回路压差 Δp ,具体如图 2 所示。

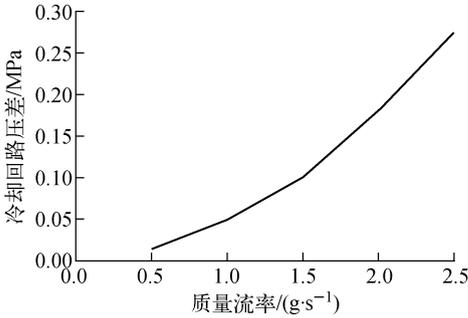


图 2 不同质量流率下冷却回路两端压差
Fig. 2 Pressure drop in CICC at different mass flow rates

完成压降计算仅表明超临界氦能顺利通过 CICC,满足水利工况要求。至此,还应参考不同质量流率下的雷诺数,雷诺数决定流体的流动状态,流体的流动状态为层流或层流向湍流的过渡区间,迫流过程伴随的传热效果较好,所以,雷诺数也是选择合理质量流率的重要因素。

利用 Gandalf 计算的不同质量流率下的雷诺数如图 3 所示。

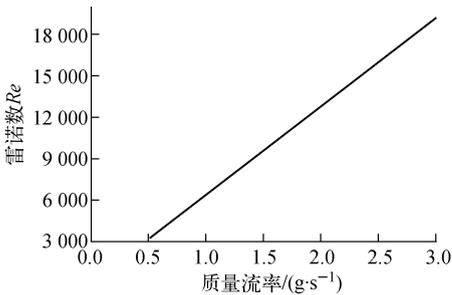


图 3 不同质量流率下的雷诺数

Fig. 3 Reynolds number at different mass flow rates

由图 3 可见,雷诺数随液氦质量流率呈线性增加。雷诺数小于 2 320 时,流体的流动状态为层流;雷诺数大于 4 000 时,此时流体的流动状态为湍流;雷诺数介于这两者之间时,流体呈过渡状态。

但也不能仅考虑雷诺数,一味降低液氦质量流率。如果液氦质量流率过小,迫流超临界氦并不能很好地冷却磁体,如果有外界热扰动,

过小的液氦流不能及时带走热量,可能导致磁体失超,因 CICC 的稳定性裕度随液氦质量流率的增大呈上升趋势,对此需引入热传递系数 h 来解释其中的原因。

Giarratano 等^[7]提出了改进的第塔斯-波尔特(Dittus-Boelter)方程:

$$Nu = 0.025Re^{0.8}Pr^{0.4}\left(\frac{T_{He}}{T_w}\right)^{0.716} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hd_h}{k} \quad (8)$$

其中: T_w 为 CICC 导管壁温度; T_{He} 为流体液氦温度; c_p 为液氦比定压热容; k 为流体热导率。

由式(2)、(4)、(6)~(8)可得热传递系数 h 的表达式:

$$h = 0.076k^{0.6}\left(\frac{c_p}{\mu}\right)^{0.4}\left(\frac{\omega A_{He}}{P_w}\right)^{0.8}\left(\frac{T_{He}}{T_w}\right)^{0.716} \quad (9)$$

由式(10)可知,液氦流速 ω 越大,即液氦质量流率越大,热传递系数 h 越大。由于本文针对的 CICC 无中心管道,超导电缆、外壳和液氦温度的变化规律^[8]如下:

$$A_{st}c_{V,st}\frac{\partial T_{sc}}{\partial t} + A_{st}\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{st}\frac{\partial T_{sc}}{\partial x}\right) = \dot{q}_{Ext} + \dot{q}_{Joule} - p_{ja-st}h_{ja-st}(T_{st} - T_{ja}) \quad (10)$$

$$A_{ja}c_{V,ja}\frac{\partial T_{ja}}{\partial t} + A_{ja}\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{ja}\frac{\partial T_{ja}}{\partial x}\right) = \dot{q}_{Ext} - p_w h(T_{ja} - T_{He}) - p_{ja-st}h_{ja-st}(T_{ja} - T_{st}) \quad (11)$$

$$A_{He}c_{V,He}\frac{\partial T_{He}}{\partial t} + A_{He}\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{He}\frac{\partial T_{He}}{\partial x}\right) = \dot{q}_{Ext} - p_w h_h(T_{He} - T_{ja}) \quad (12)$$

式中: T 为温度; A 为横截面积; c_V 为比定容热容; K 为热导率; p 为压力;下标“st”、“ja”、“He”分别表示超导股线、外壳和液氦; \dot{q}_{Ext} 和 \dot{q}_{Joule} 分别为单位长度上外界热扰动和电缆焦耳热。

从式(10)~(12)可看出,外界热扰动和电缆焦耳热不变,热传递系数 h 越大,等式右边值越小,故相应的温度会降低。所以,对于相同的外界热扰动和电缆焦耳热,液氦质量流率越大,CICC 的稳定性裕度越高,由此得到解释。

由此得出:对液氦质量流率的选择需综合

考虑液氦质量流率对 CICC 导体的稳定性裕度、制冷机的负荷以及流体流动状态对传热效果的影响。

考虑到冷却回路两端压差过大,会造成制冷机的负荷加大,故不宜选取过大的液氦质量流率;同时液氦质量流率对 CICC 稳定性裕度的影响决定了其值不能太小。鉴于此,通过 Gandalf 计算得出,当 $\dot{m}=0.8 \text{ g/s}$ 时,导体的稳定性裕度达相对较大值,且此时的冷却回路压降由图 2 看出为 0.032 MPa ,因要维持氦的超临界状态,其压力不应小于 0.3 MPa ,因此选取入口压力 $p_{\text{in}} \approx 0.4 \text{ MPa}$,则出口压力 $p_{\text{out}} \approx 0.368 \text{ MPa}$,该数据定可满足导体流动压力的需求。

3 结论与讨论

文中给出了磁体 CICC 的结构型式和参数以及超导磁体的运行工况,采用一维数学模型 Gandalf 对超临界氦迫流冷却回路压差进行模拟计算,在理论上得到较为合理的液氦质量流率 $\dot{m}=0.8 \text{ g/s}$ 。原因在于此时的 CICC 具有相对较大的稳定性裕度,此时对应的冷却回路压差为 0.032 MPa ,完全满足导体的流动压力需求,超临界氦能够顺利通过 CICC,且液氦能较好地冷却磁体,所以低温冷却设计的方案在理论上是初步可行的。

此外,还有一些思考:1) 文中的冷却回路压差分析利用经验公式并结合 Gandalf 软件,由于 CICC 结构的差异,可通过对一小段样品进行低温实验重新拟合经验公式,这样可得到更加精确的计算结果;2) 在理论上得到液氦质量流率为 $\dot{m}=0.8 \text{ g/s}$ 时冷却效果较好,具体还需在低温实验中验证,液氦质量流率可根据实

际情况进行适当调整。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] VOLKER P. Numerical investigation of buoyancy effects in vertical ITER-TF-CICC at normal operating conditions[J]. *Cryogenics*, 2006, 46(7-8): 563-568.
- [4] NICOLLET S, DUCHATEAU J L, FILLUNGER H, et al. Calculations of pressure drop and mass flow distribution in the toroidal field model coil of the ITER project[J]. *Cryogenics*, 2000, 40(8/10): 569-575.
- [5] KATHEDER H. Optimum thermohydraulic operation regime for cable in conduit superconductors (CICS)[J]. *Cryogenics*, 1994, 34(1): 595-598.
- [6] BOTTURA L. A numerical model for the simulation of quench in the ITER magnets[J]. *Journal of Computational Physics*, 1996, 125(1): 26-41.
- [7] GIARRATANO P J, ARP V D, SMITH R V. Forced convection heat transfer to supercritical helium[J]. *Cryogenics*, 1971, 11(5): 385-393.
- [8] FANG Jin, CHEN Zhuomin, WU Songtao, et al. Research of the CICC stability by the numerical code Gandalf[J]. *Plasma Science & Technology*, 2000, 2(4): 383-396.