

模拟超临界氦迫流冷却系统

武玉 高秉钧

TB 657.5
~~06~~ 0514

43-47

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 为 CICC (cable-in-conduit conduct) 子缆及子缆接头试验而设计的超临界氦迫流冷却系统由高压氦气钢瓶、汇流排、减压阀、流量控制阀、换热器等部件组成。换热器由三部分组成, 分别为液氮浸泡冷却换热器, 由样品回流冷却的逆流冷却换热器、液氮浸泡冷却换热器。已完成的实验表明此系统可以提供 (0~0.1) g/s, (0.3~0.6) MPa, 4.5 K 超临界氦, 满足子缆及接头试验需要。

⑧ **关键词** 超临界氦, 换热器, 低温, 传热, 冷却系统

1 引言

经国家批准的重大科学工程“HT-7U”超导托卡马克核聚变实验装置是纵场、极向场全超导装置。导体选用 CICC 形式, 导体冷却方式为超临界氦迫流, 冷却剂进口温度与压力 4.5 K, 0.45 MPa。磁体选用的超导材料为直径 0.85 mm 的股线, 从股线到导体经过多级绞线, 穿管, 最后挤压成型。在超导体股线绕制成磁体以及磁体安装在托卡马克装置前, 股线、各级子缆、线圈、超导接头等需要进行一系列低温下的电磁性能、超导稳定性能、热工水力性能、机械性能等测试, 以确保聚变装置的可靠运行。

对于磁体低温试验, 迫流超临界氦由氮液化制冷机、低温泵等组成的低温系统提供; 对于子缆以及接头试验, 由于需用氦流量较小, 试验时间较短, 如果用大型低温系统提供迫流超临界氦显然不经济; 一种由高压氦气经过多级冷却, 以及适当的压力控制, 流量控制, 达到超临界氦状态的模拟超临界氦系统可满足子缆及接头试验需要。

2 模拟超临界氦系统设计

模拟超临界氦系统主要有高压氦气源、减压阀、流量控制阀、流量计、氦传输管道、换热器、温度计、杜瓦等组成, 其系统组成见图 1。系统主要部件是换热器, 为了减少液氮消耗量, 室温氦气首先由液氮预冷, 然后用杜瓦管传输到液氮杜瓦内, 再由从样品流出的 4.5 K 左右的氦逆流冷却; 最后由液氮浸泡冷却至 4.3 K~4.5 K, 达到试验需要的超临界状态。

本文于 1999 年 9 月 13 日收到, 修改稿于 1999 年 11 月 30 日收到, 武玉, 男, 36 岁, 工程师。

3个换热器分别为换热器 I、换热器 I、换热器 II。

换热器 I 的作用是把室温氦气冷却至 80 K 左右,冷却介质是液氮,换热器 I 放置在 $\phi 300$ mm 的液氮杜瓦内,换热器材料选用 $\phi 10$ mm \times 1 mm 紫铜管,其结构形式为紫铜管绕成 $\phi 280$ mm 的盘管,工作压力 0.6 MPa,许用压力 0.9 MPa。

换热器 II 的作用是把 80 K ~ 90 K 氦气冷却至 15 K ~ 20 K。它是利用从样品中流出的 4.5 K ~ 5 K 的超临界氦为冷却剂,逆流冷却由换热器 I 流出的氦气。它采用套管加盘管结构形式;内管用 $\phi 6$ mm \times 1 mm 紫铜管,外管用 $\phi 12$ mm \times 1 mm 不锈钢管;被冷却气体及冷却剂分别从内管及内外管之间反向流动。

换热器 III 的作用是把从换热器 I 流出的氦气由液氮浸泡换热冷却至试验所需要的超临界状态。换热器材料是 $\phi 6$ mm \times 1 mm 的紫铜管,它的结构形式与换热器 I 相同。换热器放置在 $\phi 400$ mm 的液氮杜瓦内。

换热器 I 与换热器 I 之间的冷氦气传输管是一根专门设计的杜瓦管,它的内外管分别为 $\phi 10$ mm \times 1 mm 和 $\phi 25$ mm \times 1 mm 的不锈钢管,套管之间为真空多层绝热;其水平段长 3 m,其中波纹管长 0.9 m。

到目前为止,国内还没有研制出可以直接用于超临界氦流量测量的设备,国外也没有成品供应。因此,超临界氦流量测量只好间接测量其相应室温气体流量,为此订作了一个玻璃转子流量计,量程 (700 ~ 7 000) L/h。

用于超临界氦温度测量的传感器是碳电阻温度计。

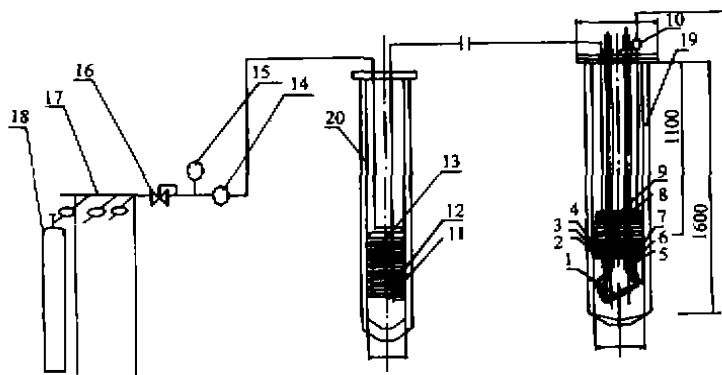


图 1 模拟超临界氦系统及试验样品

1. 样品; 2. 温度计导管; 3. 测温室; 4. SHe 进口; 5. 绝热层; 6. 电流接头; 7. SHe 出口; 8. 电流引线; 9. 换热器;
10. 流量控制阀; 11. 温度计; 12. 纯化器; 13. 换热器; 14. 流量计; 15. 压力表; 16. 减压阀; 17. 汇流排;
18. 氦气钢瓶; 19. 液氮杜瓦; 20. 液氮杜瓦。

3 换热器传热计算

3.1 换热器 I

换热器 I 的换热是通过圆管的传热,见图 2。圆管内侧为迫流换热,外侧是沸腾换热,其换热系数分别为 α_i 和 α_o ,紫铜管的导热系数为 λ ,则换热器宏观传热系数为

$$k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_i} \frac{d_i}{d_o} + \frac{d_i}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o} \right)$$

对于管内换热系数计算有：

$$\alpha_i = Nu\lambda_{He}/d_H Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$Re = \rho v d_H / \mu$$

$$Pr = c_p \mu / \lambda_{He}$$

式中 d_H , λ_{He} , μ , c_p 分别表示水力直径, 氦的导热系数, 氦的动力粘度, 氦的定压比热。其值分别为：

$$d_H = 8 \text{ mm}$$

$$\lambda_{He} = 2.4 \times 10^{-3} t^{0.751} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{[1]}$$

$$\mu = 5.02 \times 10^{-7} t^{0.647} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$$

$$c_p = 5.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

圆管外侧是液氮浸泡换热, 其换热系数 α_o 取决于换热器表面稳定的膜态沸腾的换热系数, 它的大小与换热器直径有关, 见图 3 所示^[2]。图中阴影区为大直径的加热器。此计算取值为 $\alpha_o = 80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

纯铜的导热系数随温度变化较大, 但在此计算中圆管的导热热阻远小于其它两项热阻 (小于 1%)。因此, 计算时可以忽略这一项。

由以上可得：

$$k = \left(\frac{1}{82.48 t^{0.1798}} + 1.25 \times 10^{-2} \right)^{-1}$$

换热器的传热方程如下：

$$mc_p dt = pk(t - 80) dx$$

其中 m , p 分别表示氦质量流量和圆管截面平均周长, 其设计值分别为 0.5 g/s 和 28.3 mm。根据以上情况, 换热器 I 的计算长度为

$$L = 103.5 \int_{80.5}^{300} \left(\frac{1}{82.48 t^{0.1798}} + 1.25 \times 10^{-2} \right) dt / t - 80 \approx 11.5 \text{ m}$$

3.2 换热器 I

换热器 I 是用样品回流的超临界氦逆流冷却, 其形式如图 4。

传热方程如下：

$$m\Delta h = Fk\Delta T_m$$

式中 m , Δh , F , k , ΔT_m 分别表示质量流量, 氦进出换热器焓值变化, 换热面积, 换热器宏观传热系数, 平均温差。为计算方便有一下假设：

- a. 换热器不与环境换热。
- b. 冷却剂进口温度 4.5 K, 压力 0.6 MPa。
- c. 被冷却流体进口温度 90 K, 压力 0.6 MPa。

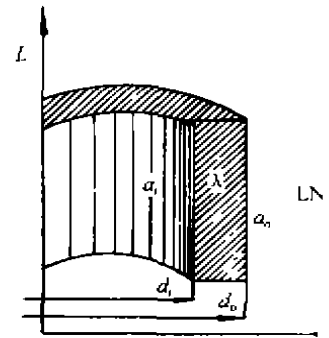


图 2 通过圆管的传热

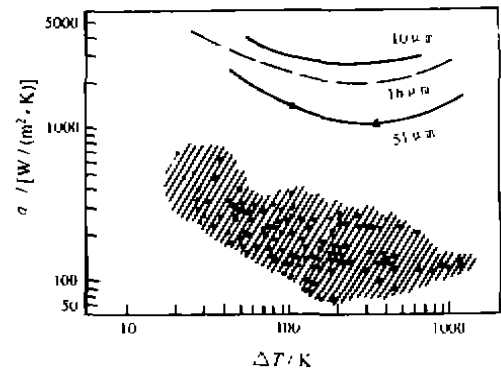


图 3 加热器直径对液氮膜态沸腾的影响

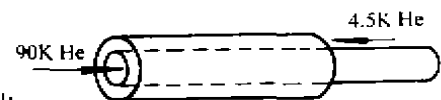


图 4 逆流冷却换热

d. 被冷却流体出口温度 15 K, 压力 0.6 MPa。

则 $\Delta h = 370 \text{ kJ/kg}$, 冷却剂出口温度 72 K。 $\Delta T_m^{[3]}$ 的计算如下:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln(\Delta t_{\max}/\Delta t_{\min})} = 13.9 \text{ K}$$

其中 Δt_{\max} , Δt_{\min} 分别表示换热器进口端温差和出口端温差最大值和最小值, $\Delta t_{\max} = 18 \text{ K}$, $\Delta t_{\min} = 10.5 \text{ K}$ 。

换热器宏观传热系数计算与换热器 I 计算相似, 其值为

$$k = 1 / \left[\frac{1}{\alpha_i} \frac{d_i}{d_o} + \frac{d_i}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o} \right] = 165 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

式中 α_i , α_o , λ 分别表示铜管内侧、外侧换热系数以及铜管导热系数; 其值分别为 $328 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, $233 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 忽略导热项。

由以上计算得换热器的长度为

$$L = m\Delta h / \pi k d \Delta T_m = 4.3 \text{ m}$$

3.3 换热器 II

换热器 II 是液氮浸泡传热, 换热器内为迫流换热, 管外是氮沸腾换热。图 5 给出氮膜态沸腾换热系数, 图中阴影区为大直径加热器。换热器 II 的传热计算过程与换热器 I 相同。计算时假设被冷却流体进口温度 20 K, 出口温度 4.5 K, 液氮温度 4.2 K, 则可算出换热器长度为 7.5 m。

4 测试结果

模拟超临界氮迫流冷却系统已进行低温下性能测试, 结果表明, 各部件性能良好。0.6 MPa 压力下没有发现泄漏, 在 0.6 MPa, 0.15 g/s 流量下超临界氮在换热器出口温度 4.5 K, 达到设计要求, 可以为未来的三级子缆及接头试验提供满足要求的迫流超临界氮。在 1999 年 7 月份进行的超导子缆接头试验中, 此系统为样品提供了 0.1 g/s, 0.3 MPa, 4.5 K 的迫流超临界氮。

参 考 文 献

- 1 Maehata K, Ishibashi K, Wakuta Y. Design chart of gas-cooled current leads made of copper of different RRR values. Cryogenics, 1994, 34: 935
- 2 弗罗斯特 W. 低温传热学. 北京: 科学出版社, 1982: 204~205
- 3 扬世铭. 传热学. 北京: 人民教育出版社, 1980: 311

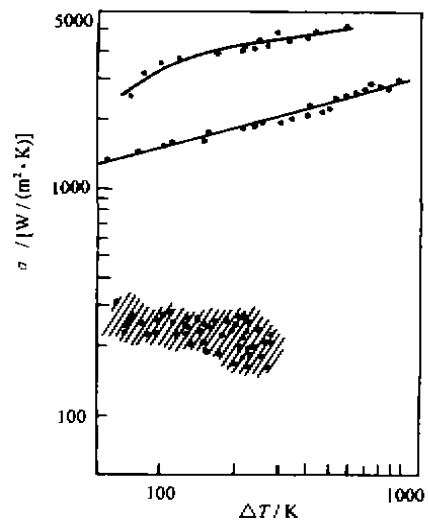


图 5 加热器直径对氮膜态沸腾传热影响

SIMULATIVE SUPERCRITICAL HELIUM FORCED FLOW COOLING SYSTEM

Wu Yu Gao Bingjun

(Institute of Plasma Physics Academia Sinica, Hefei 230031)

ABSTRACT The simulative supercritical helium system designed for testing of CICC (cable-in-conduit conductor) sub-cable and joint is composed of high pressure He gas tank, pressure regulator, mass flow controller, liquid nitrogen precooler, counter flow heat exchanger, liquid helium bath cooling heat exchanger, etc. The system testing has been finished. This system can provide 0—0.15 g/s, 0.6 MPa, 4.5 K supercritical helium for sub-cable and joint test.

KEYWORD supercritical helium; heat exchanger; low temperature; heat transfer

《低温工程》杂志 1998 年的即年指标 及其在全国各类科技期刊中的位置

据中国科技信息研究所 1999 年 10 月公布的统计数据表明, 继续入选为该所 1998 年 1286 种中国科技论文统计源刊的《低温工程》杂志, 在当年发表的 67 篇论文中, 被当年 1286 种统计源刊共引用了 7 次。因此, 其即年指标为 0.104 ($=7/67$)。在 1998 年的统计源刊中名列第 76 位, 而在机械、仪表类学科的 79 种这类期刊中名列第 3 位。

即年指标是指 1998 年本刊的论文被当年各统计源刊的引用次数与本刊当年论文篇数的比值。它反映了本刊 1998 年的被引证程度和反应速率。此值越高, 说明本刊论文被引用的速度越快, 因为那些令人先睹为快的刊物, 显然是在一定程度上反映着本刊的质量。

(范文田)