

文章编号:0253-4339(2026)02-0020-06
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20241113003

稀释制冷机蒸馏室出口超流氦爬膜抑制结构的性能评估

李志恒^{1,2} 程维军^{1,2} 时文华³ 王亚男¹ 张鹏⁴ 戴巍¹

(1 中国科学院低温工程学重点实验室 中国科学院理化技术研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049;
3 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 苏州 215123; 4 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 超流氦(⁴He)由于其量子特性,在极低温下会产生超常热导效应、喷泉效应和爬膜效应等特殊现象。稀释制冷机以³He作为循环工质,³He在混合室穿过相界面产生制冷效果,在蒸馏室蒸发后由室温泵组抽出。蒸馏室内部的超流氦会在壁上形成液膜并向高温处流动,其超常的热导率会使蒸馏室漏热较大,并且超流氦液膜在蒸发后会影响循环过程中³He的纯度,进而影响稀释制冷的制冷量。“刀口”和“小孔”结构是限制超流氦爬膜的主要方式。通过计算分析了循环工质³He的纯度对稀释制冷机制冷量的影响以及“小孔”的大小对系统³He循环流量的限制,通过实验测试了在0.95 K时分别设置“小孔”和“刀口+小孔”时超流氦爬膜的质量流量,使用“刀口+小孔”比单独使用“小孔”超流氦爬膜抑制效果提升约35.6%。

关键词 稀释制冷机;超流氦爬膜;刀口;小孔

中图分类号:TB661;TB61⁺1;TB651

文献标识码:A

Performance Evaluation of Suppression Structure for Superfluid Helium Film Flow at the Exit of Dilution Refrigerator Still Chamber

Li Zhiheng^{1,2} Cheng Weijun^{1,2} Shi Wenhua³ Wang Yanan¹ Zhang Peng⁴ Dai Wei¹

(1. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-Bionics Chinese Academy of Sciences, Suzhou, 215123, China; 4. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Superfluid helium (⁴He) exhibits special phenomena such as anomalous thermal conduction, fountain, and crawling film effects at sub-Kelvin temperatures owing to its quantum properties. Dilution refrigerators utilize ³He as the working fluid for circulation. ³He produces cooling effects as it passes through the phase interface in the mixing chamber. It is then pumped out by a room-temperature pump after evaporation in the still chamber. The superfluid helium inside the still chamber forms a liquid film on the wall and flows toward higher temperatures. This results in significant heat leakage owing to its anomalous thermal conductivity. The superfluid helium liquid film also affects the purity of ³He during the circulation process, thereby influencing the cooling capacity of the dilution refrigerator. The “knife-edge” and “small orifice” structures are the primary means for suppressing superfluid helium films. This study analyzed the impact of the purity of the working fluid ³He on the cooling capacity of the dilution refrigerator and the limitation placed on the system’s ³He circulation flow rate by the size of the “small orifice”. Experimental tests were conducted to measure the mass flow rate of the superfluid helium crawling film at 0.95 K with two types of suppression structures: “small orifice” and “knife-edge with small orifice”. The use of “knife-edge with small orifice” resulted in a 35.6% improvement in the suppression effect of the superfluid helium crawling film compared with the use of “small orifice” alone.

Keywords dilution refrigerator; superfluid helium film flow; knife-edge; small orifice

⁴He在低温下会发生由常流态到超流态的转变,又称为“λ相变”,在饱和压力下,超流转变温度为2.176 8 K^[1]。超流氦黏度几乎为0,具有超常热导效

应、喷泉效应和爬膜效应等特殊现象。由于液体分子和固体分子之间的范德华力,会在固体壁面上吸附一层液膜。与一般液体相比,超流氦液膜的厚度

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2203400),国家自然科学基金(52176027)资助项目。(The project was supported by the National Key Basic Research and Development Program of China (No. 2021YFC2203400) and National Natural Science Foundation of China (No. 52176027).)

收稿日期:2024-11-13;修回日期:2024-12-11;录用日期:2024-12-12

要大很多, A. Bijl 等^[2]认为这与超流氦较高的零点能有关。超流氦的低黏度使得液膜进一步爬行^[3],并趋于向高温处流动。超流氦的爬膜效应影响⁴He 吸附制冷机的制冷能力和最低温持续时间、超流液氦杜瓦的储存时间以及稀释制冷机循环工质³He 的纯度。

稀释制冷机是获得极低温(<1 K)温区的主要制冷方式之一,冷量大,可以连续制冷^[4]。在量子计算领域的广泛应用,促进了稀释制冷机的研究和发展^[5-11]。稀释制冷机利用³He-⁴He 混合物在极低温下特殊的性质产生制冷效果,循环工质为³He。在极低温下,³He-⁴He 混合物会发生相分离,由于重力作用,密度较小的³He 浓相在上层,³He 稀相在下层^[11]。稀释制冷机的稀释单元主要包括混合室和蒸馏室以及二者之间的换热器,如图 1 所示。当混合室浓相中的³He 原子穿过相界面进入稀相时会吸热,产生制冷效果。随后³He 进入蒸馏室,通过加热使蒸馏室温度保持在 0.7 K 附近,由于³He 的饱和蒸气压明显高于⁴He,从蒸馏室蒸发出的气体几乎为纯³He。气态的³He 进入室温泵组,加压后再次经过预冷后进入稀释单元。但蒸馏室内部的⁴He 处于超流状态,会发生爬膜效应,超流⁴He 会从蒸馏室爬升至温度较高的区域,其超常的热导率会使得蒸馏室漏热较大。超流氦液膜在高温处蒸发后随³He 一起进入循环,会降低循环工质³He 的纯度,实验证明如果不限制超流氦爬膜,循环流量中⁴He 占比达到 10%~20%^[12]。³He 纯度的降低,系统能够获得的制冷量下降,因此在实际系统中蒸馏室上方需要设置超流氦爬膜的抑制结构。

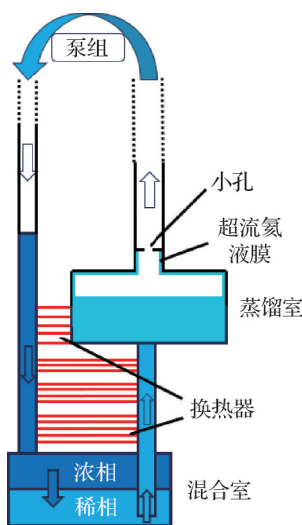


图 1 稀释制冷机稀释单元

Fig.1 Dilution unit of the dilution refrigerator

1991 年, P. J. Nacher 等^[13]通过实验验证了碱金属铯表面不会被超流氦润湿,因此可以中断超流氦爬膜,但还未有在实际低温系统中应用的案例。

2017 年, Y. Ezoe 等^[14]在太空运行的 X 射线光谱仪的液氦杜瓦系统中设计“双刀口+1.5 mm 小孔”的超流氦限制结构,将超流氦爬膜的质量流量限制在 2 μg/s 以内。Y. Oda 等^[15]针对稀释制冷机出口位置设置了加热器,通过蒸干“超流氦液膜”的方法中断液膜的爬行。目前用于稀释制冷机蒸馏室出口限制超流氦液膜爬升的方法主要有“小孔”和“刀口+小孔”2 种结构^[16]。本文计算分析了循环工质³He 的纯度对稀释制冷机制冷量的影响以及“小孔”的大小对系统³He 循环流量的限制,通过实验测试了在 0.95 K 时分别设置“小孔”和“刀口+小孔”2 种抑制结构时超流氦爬膜的质量流量。

1 超流氦液膜动力学

1.1 超流氦爬膜的质量流量

超流氦液膜在稳定流动过程中存在液膜化学势与⁴He 蒸气化学势的平衡,液膜化学势与⁴He 蒸气化学势分别用式(1)和式(2)表示^[17]。液膜的化学势包含范德瓦尔斯势、动能项和表面张力项。

$$\mu_{\text{film}}(T) = -\frac{\Gamma}{d^3} + \frac{1}{2}mv_s^2 - \frac{m\sigma(T)}{\rho r_s} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{vap}}(p, T) = -k_B T \ln \left[\frac{p_{\text{svp}}(T)}{p} \right] \quad (2)$$

式中: Γ 为范德瓦尔斯常数; d 为超流氦液膜的厚度, m ; m 为 1 个⁴He 原子的质量, kg; v_s 为超流体的流速, m/s; σ 为表面张力, N/m; r_s 为液膜的曲率半径, m; k_B 是玻耳兹曼常数; p 和 $p_{\text{svp}}(T)$ 分别为蒸气压力和温度 T 对应的饱和蒸气压, Pa。

根据 P. J. Shirron 等^[17]的描述,在化学势梯度作用下超流氦液膜会迅速达到临界速度,因此超流氦爬膜的质量流量 \dot{m}_{film} 可以表示为:

$$\dot{m}_{\text{film}} = \rho_s C v_c d \quad (3)$$

式中: ρ_s 为超流氦的密度, kg/m³; C 为流道的周长, m; v_c 为超流氦的临界速度, m/s。

1.2 “小孔”结构抑制机理

实验证明超流氦液膜的流动未受到限制时,超流氦液膜的质量流量与流道周长成正比,即超流氦流动临界速度与液膜厚度的乘积为一定值 τ , A. Bijl 等^[2]认为该值与 $\hbar/2m$ 相近。结合式(3),不同直径的管道周长不同,可以支持的超流氦液膜的质量流量不同。因此,可以通过减小流道的周长限制超流氦液膜的质量流量。

图 2 所示为“小孔”结构抑制超流氦爬膜示意图,流道最左侧连接超流氦液池,假设流道的直径为 D ,流道中间设置小孔的孔径为 D_0 。根据式(3), $v_c d$ 为一

定值,小孔处的质量流量与左侧流道的质量流量之比等于流道的周长之比,即 D_0/D 。

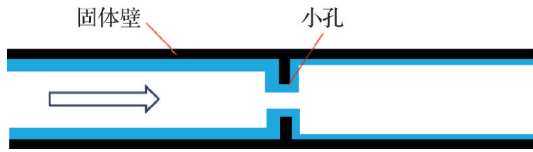


图 2 “小孔”结构抑制超流氦爬膜示意图

Fig.2 "Small orifice" structure suppressing superfluid helium film flow

1.3 “刀口”结构抑制机理

稳定流动时超流氦液膜与 ^4He 蒸气的化学势相等,即 $\mu_{\text{vap}} = \mu_{\text{film}}$,根据式(1)和式(2)计算可得超流氦液膜厚度的表达式(4),计算过程中忽略液膜化学势的动能项^[17]。图 3 所示刀口可以使液膜在“刀口”处呈现负的曲率半径,并且尖锐的“刀口”边缘可以提供绝对值很小的曲率半径。根据式(4),“刀口”结构可以减小超流氦液膜的厚度,进而限制超流氦爬膜的质量流量。K. Ishikawa 等^[18]认为“刀口”的数量越多,对超流氦爬膜的限制效果越好。

$$d = \left[\frac{\Gamma}{k_B T \ln \left(\frac{p_{\text{svp}}(T)}{p} \right) - \frac{m\sigma}{\rho r_s}} \right]^{1/3} \quad (4)$$

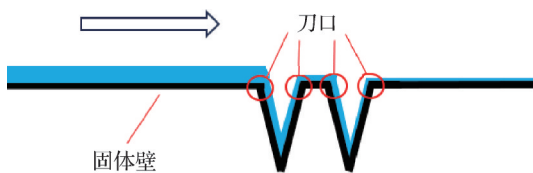


图 3 “刀口”结构抑制超流氦爬膜示意图

Fig.3 "Knife-edge" structure suppressing superfluid helium film flow

2 稀释制冷机的制冷量与循环流量

2.1 “小孔”孔径对 ^3He 循环流量的影响

由式(3)可知,“小孔”直径越小对超流氦爬膜的抑制效果越好,但“小孔”孔径过小会使蒸馏室出口阻力过大,限制循环工质 ^3He 的流量。因此在选择“小孔”的孔径时,应综合考虑其对超流氦液膜的限制效果以及对 ^3He 循环流量的影响。当稀释制冷机稳定运行时,蒸馏室温度稳定在 0.7 K,蒸馏室的典型压力约为 12 Pa。通过计算此时克努森数 Kn 更接近 0.01,因此 ^3He 气体接近为连续介质。“小孔”在管路中的作用类似于喷管,可以支持的最大质量流量用式(5)表示^[19]。通过“小孔”向高温处流动的超流氦液膜最终会被蒸发为 ^4He 气体,然后随 ^3He 气体一

起流动,二者的摩尔流量用式(6)表示。

根据式(5)和式(6)分别计算不同孔径时 ^4He 流量和最大 ^3He 流量,如图 4 所示。当 $D_0=3\text{ mm}$ 时,最大 ^3He 流量约为 $470\ \mu\text{mol/s}$,对应理想情况下稀释制冷机冷量为 $380\ \mu\text{W}@100\ \text{mK}$ 。因此,对于较大制冷量的稀释制冷机,蒸馏室出口处的“小孔”孔径应大于 3 mm。孔径越大可以支持更高的制冷量,但超流氦爬膜的流量也会增加,由图 4 可知,随孔径的逐渐增加,循环流量中 ^4He 的最小摩尔分数逐渐降低。但在实际循环中, ^3He 的流量并不会达到最大流量, ^4He 的摩尔分数会对循环 ^3He 的纯度造成影响,需通过增加“刀口”结构进一步限制超流氦爬膜并减小漏热。但对于“刀口”的制作尺寸难以精确把握,并且“刀口”位置的缺陷可能会影响曲率半径,其限制效果难以进行理论计算,一般需要通过实验测试。

$$\dot{m}_3 = \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{(1/2)(\gamma + 1)}{\gamma - 1}} \pi \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 p_s \left(\frac{M_3}{RT_s} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\dot{n}_3 = \dot{m}_3 / M_3, \dot{n}_4 = \dot{m}_{\text{film}} / M_4 \quad (6)$$

式中: γ 为 ^3He 气体的绝热指数; p_s 为蒸馏室的压力,Pa; M_3 为 ^3He 的摩尔质量,kg/mol; R 为通用气体常数; T_s 为蒸馏室的温度,K; \dot{n}_3 和 \dot{n}_4 分别为 ^3He 和 ^4He 的摩尔流量,mol/s; \dot{m}_3 为 ^3He 的质量流量,kg/s。

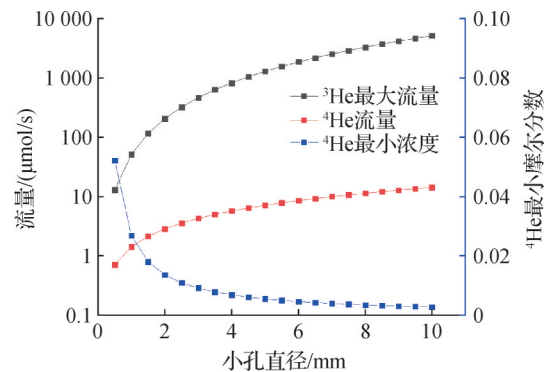


图 4 不同“小孔”孔径下 ^4He 流量和最大 ^3He 流量

Fig.4 ^4He flow rate and maximum ^3He flow rate under different "orifice" diameters

2.2 循环工质 ^3He 的纯度对稀释制冷机制冷量的影响

稀释制冷机循环工质 ^3He 的流量决定了系统的制冷量, ^3He 气体从蒸馏室蒸发后,通过室温泵组的泵送再次进入循环,室温泵组主要为分子泵和前级涡旋泵。当循环流量 \dot{n} 中 ^3He 的摩尔分数为 x ,可以通过式(7)计算获得稀释制冷机的制冷量^[20]。循环工质中的 ^4He 液化后会结合一部分 ^3He 形成混合物,该部分混合物中的 ^3He 占循环流量的比例用 $x_1(1 - x)/(1 - x_1)$ 表示,剩余部分 ^3He 的占比为 $(x - x_1)/(1 - x_1)$ 。

x_1), x_1 表示进入混合室的混合物中 ^3He 的摩尔分数。当 $x=1$ 时,即循环工质为纯 ^3He ,制冷量由式(8)表示。

$$Q_m = \dot{n} \left\{ xH_1[T_m] - \left[\frac{(x - x_1)H_{30}[T_i]}{1 - x_1} + \frac{x_1(1 - x)H_1[T_i]}{1 - x_1} \right] \right\} \quad (7)$$

$$Q_m = \dot{n}(H_1[T_m] - H_{30}[T_i]) \quad (8)$$

式中: Q_m 为稀释制冷机的制冷量,W; \dot{n} 为循环摩尔流量,mol/s; x 为循环流量中 ^3He 的占比; T_m 为混合室的温度,K; T_i 为经过进入混合室的液体温度,K; x_1 为温度为 T_i 时对应混合物的 ^3He 的摩尔分数; H_1 和 H_{30} 分别为混合物中 ^3He 的摩尔焓值和纯 ^3He 的摩尔焓值,分别为 $H_1[T] = 95T^2 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}^2)$, $H_{30}[T] = 11T^2 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}^2)$ 。

假设稀释制冷机中的换热器为理想换热器,经过换热后的温度 T_i 与混合室温度 T_m 相等,此时通过式(7)计算可得混合室漏热为0时的理想制冷量,计算结果如图5和图6所示。图5所示为循环流量分别为 $300 \mu\text{mol/s}$ 和 $500 \mu\text{mol/s}$ 不同 ^3He 纯度对 100 mK 制冷量的影响, ^3He 纯度每降低1%, 100 mK 制冷量下降1.07%,该比例与循环流量的大小无关。图6所示为循环流量为 $500 \mu\text{mol/s}$ 时不同混合室温度制冷量与 ^3He 纯度的关系,结果表明混合室温度越高时制冷量受 ^3He 纯度的影响越大。

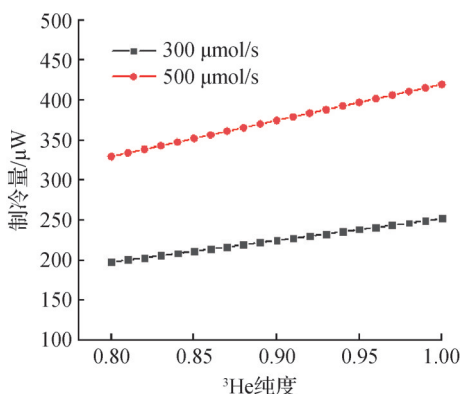


图5 不同流量下 ^3He 纯度对制冷量的影响

Fig.5 Effect of ^3He purity on cooling capacity at different flow rates

3 超流氦爬膜抑制测试实验

3.1 实验装置

实验装置由GM型脉管制冷机和 ^4He 吸附制冷机进行预冷,其主体如图7所示。 ^4He 吸附制冷机的吸附床填充活性炭,实现对制冷机内 ^4He 气体的吸附,冷头内 ^4He 减压蒸发制冷,最终 ^4He 冷头的温度小于

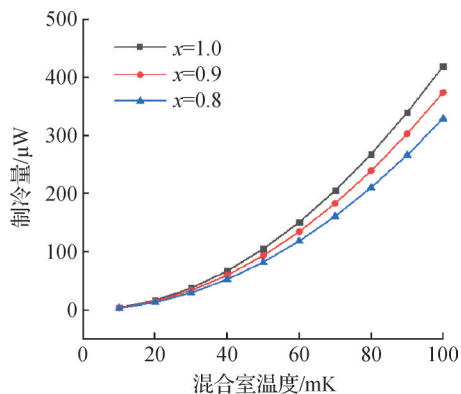


图6 ^3He 纯度对不同混合室温度制冷量的影响

Fig.6 Effect of ^3He purity on cooling capacity at different mixing chamber temperatures

1 K。通过铜盘将 ^4He 冷头与右侧测试部分连接,测试部分主要包括 ^4He 腔室、测试腔室及相关管路。 ^4He 腔室储存液化后的 ^4He ;测试腔室为一段铜管,配置一个加热器,测试腔室两端皆为不锈钢管。在图中①②③④位置放置温度计,用于监测温度变化和判断超流氦爬升的位置,温度分别用 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 表示。

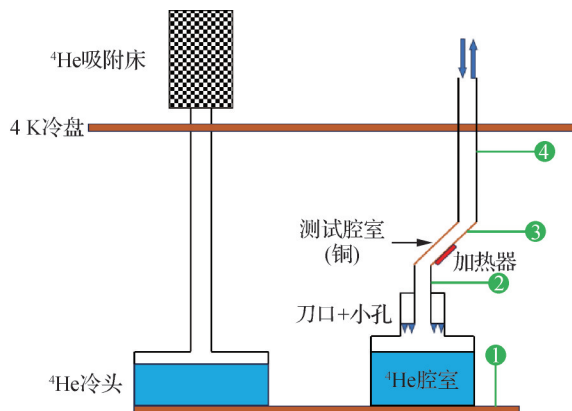


图7 超流氦爬膜测试实验装置

Fig.7 Superfluid helium film flow testing experimental device

实验使用的“刀口”结构由硅晶片蚀刻而成,通过环氧树脂2850将硅晶片固定在 ^4He 腔室的顶部,如图8(a)所示。“刀口”结构如图8(b)所示,中间为4 mm小孔,四周为蚀刻成的“刀口”,每侧有20层。图8中(c)和(d)为通过扫描电子显微镜拍摄的“刀口”结构正面和横截面的局部放大图像,相邻两层“刀口”的间距为 $150 \mu\text{m}$,蚀刻后凹槽的深度为 $100 \mu\text{m}$,凹槽两边夹角为 70° 。

实验过程中首先测试获得“刀口+小孔”抑制结构时超流氦爬膜的质量流量,为了验证“刀口”对超流氦爬膜的抑制效果,使用环氧树脂2850涂覆在“刀口”上,破坏“刀口”结构,测试得到单独使用“小孔”

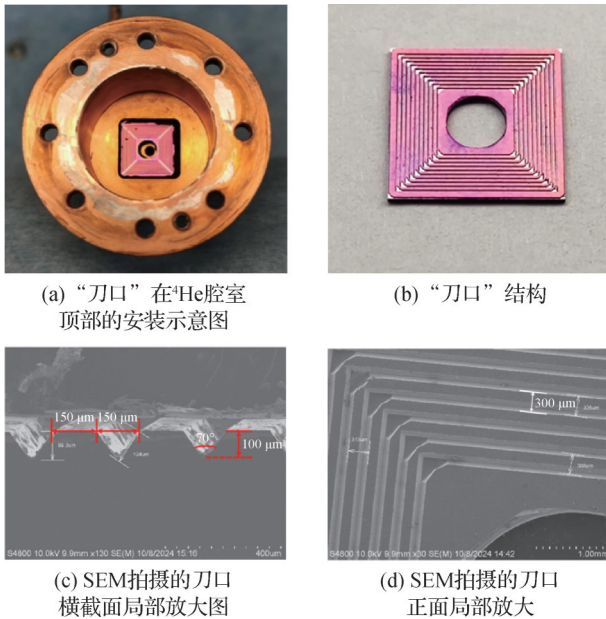


图 8 “刀口”结构示意图

Fig.8 Structure of the "knife edge"

时超流氦爬膜的质量流量。

3.2 基本测试原理

实验装置如图 9 所示,通过充气口向 ^4He 腔室内充气,使 ^4He 液化后液位处在腔室中间位置。启动 ^4He 吸附制冷机后,测温点①的温度会逐渐下降,当降至 2 K 附近, ^4He 发生超流转变,进入超流状态,最终温度测点①处温度稳定在 0.95 K。达到超流温度后,超流氦液膜会从腔室逐渐向上爬升,由于超流氦的超常热导效应,实验过程中会观察到温度测点②③④位置的温度发生突降,因此根据温度的变化可以判断超流氦液膜爬升的位置。

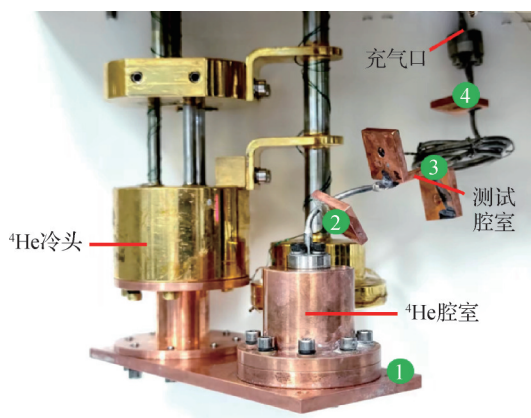


图 9 超流氦爬膜抑制实验装置

Fig.9 Superfluid helium film flow suppression experimental device

当③处温度 T_3 发生突降后,证明超流氦液膜已经存在于测试腔室,开始逐渐增加加热器的加热量。

当加热量较小时,测试腔室内部的超流氦液膜会发生少量蒸发,但 T_3 不会有明显变化;当加热量增至大于超流氦的汽化潜热与质量流量的乘积时,超流氦会被蒸干, T_3 会突然增高,如图 8 所示,此时加热量为临界加热量 Q_c 。 Q_c 与超流氦的汽化潜热满足式 (10),其中 L 为超流氦的汽化潜热 (J/kg)。根据实验测试得到的临界加热量 Q_c 可以计算获得超流氦爬膜的质量流量。

$$Q_c = \dot{m}_{\text{film}} L \quad (9)$$

3.3 测试结果及误差分析

超流氦爬膜抑制实验测试结果如图 10 所示,在 0.95 K 时,单独使用“小孔”作为抑制结构, $Q_c = 451 \mu\text{W}$ 超流氦爬膜的量为 $22.78 \mu\text{g/s}$;使用“刀口+小孔”的抑制结构, $Q_c = 290 \mu\text{W}$ 超流氦爬膜的量为 $14.65 \mu\text{g/s}$,多次实验结果重复性在 5% 以内。实验结果表明,使用“刀口+小孔”相比单独使用“小孔”超流氦爬膜抑制效果提升 35.6%。

测试结果的误差主要来源于加热量的误差,实验中通过对一固定约 $1 \text{ k}\Omega$ 的电阻施加电压获得加热量,辐射漏热和导热漏热均会对加热量的计算造成误差,辐射漏热主要为 4 K 防辐射屏的漏热,导热漏热主要为 4 K 冷盘通过不锈钢管的漏热。此外,在接近临界加热量 Q_c 时,电压的增量(每次 0.005 V)也会造成测量误差。具体误差计算结果如表 1 所示,总误差小于 3%。

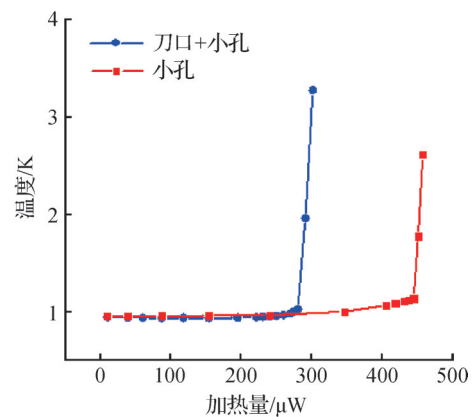


图 10 测试腔室温度随加热量增加的变化

Fig.10 Variation of the test chamber temperature with increasing heat input

表 1 加热量的计算误差

Tab.1 Calculation errors of heating quantity

误差来源	辐射漏热	导热漏热	加热器电压增量
误差量/ μW	1×10^{-4}	3.1	6 (小孔) 5 (小孔+刀口)

4 结论

针对稀释制冷机蒸馏室出口超流氦爬膜抑制结构,本文通过计算分析了循环工质 ^3He 的纯度对稀释制冷机制冷量的影响以及“小孔”的大小对系统 ^3He 循环流量的限制,并通过实验测试单独使用“小孔”和使用“小孔+刀口”时的超流氦液膜的质量流量。结果表明,当“小孔”的孔径为 3 mm 时,最大 ^3He 流量约为 470 $\mu\text{mol/s}$,对应理想情况下稀释制冷机制冷量为 380 $\mu\text{W}@100\text{ mK}$ 。对于较大制冷量的稀释制冷机,“小孔”的孔径应大于 3 mm。但较大的孔径使超流氦爬膜的质量流量增加,增加蒸馏室的漏热,降低循环工质 ^3He 的纯度。系统循环流量不变的情况下, ^3He 的纯度每降低 1%,系统在 100 mK 时的制冷量减少 1.07%。因此需增加“刀口”结构,在大孔径时更好地限制超流氦爬膜。实验结果表明 20 层“刀口”和 4 mm“小孔”相比于单独使用 4 mm“小孔”超流氦爬膜的流量降低了 35.6%。

参考文献

- [1] VENTURA G, RISEGARI L. The art of cryogenics low-temperature experimental techniques [M]. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [2] BIJL A, DE BOER J, MICHELS A. Properties of liquid helium II[J]. Physica, 1941, 8(7): 655–675.
- [3] 张鹏,王如竹. 超流氦传热[M]. 北京:科学出版社, 2009. (ZHANG Peng, WANG Ruzhu. Superfluid helium heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [4] ZU Hongye, CHENG Weijun, WANG Yanan, et al. Experimental analysis of condensation-pump dilution refrigerators [J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72 (8): 080701.
- [5] GUAN Xiang, FAN Jie, BIAN YONG bo, et al. An efficient numerical method for modeling silver powder heat exchanger in dilution refrigerator [J]. Cryogenics, 2024, 141: 103891.
- [6] ZHENG Maowen, LI Jianguo, GUO Haowen, et al. Experimental study on a dry dilution refrigerator driven by a high-power linear compressor [J]. Cryogenics, 2024, 138: 103802.
- [7] CHENG Weijun, ZU Hongye, LI Zhiheng, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a condensation-driven dilution refrigerator [J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(23): 235901.
- [8] ZU Hongye, CHENG Weijun, WANG Yanan, et al. Numerical investigation of a condensation-driven dilution refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 151: 228–240.
- [9] UHLIG K. Dry dilution refrigerator with pulse tube shutoff option[J]. Cryogenics, 2023, 130: 103649.
- [10] JI Zhongqing, FAN Jie, DONG Jing, et al. Development of a cryogen-free dilution refrigerator[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(12): 120703.
- [11] ZU H, DAI W, DE WAELE A T A M. Development of dilution refrigerators — a review [J]. Cryogenics, 2022, 121: 103390.
- [12] WHEATLEY J C, VILCHES O E, ABEL W R. Principles and methods of dilution refrigeration[J]. Physics Physique Fizika, 1968, 4(1): 1–64.
- [13] NACHER P J, DUPONT-ROC J. Experimental evidence for nonwetting with superfluid helium[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(21): 2966–2969.
- [14] EZOE Y, DIPIRRO M, FUJIMOTO R, et al. Porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the soft X-ray spectrometer onboard Hitomi[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4(1): 1.
- [15] ODA Y, FUJII G, ONO T, et al. Practical design of heat exchangers for dilution refrigerators: part 2 [J]. Cryogenics, 1983, 23(3): 139–147.
- [16] POBELL F. Matter and methods at low temperatures [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [17] SHIRRON P J, DIPIRRO M J. Suppression of superfluid film flow in the XRS helium dewar [M]//Advances in Cryogenic Engineering. Boston, MA: Springer US, 1998: 949–956.
- [18] ISHIKAWA K, EZOE Y, YAMAGUCHI H, et al. Porous plug and superfluid helium film flow suppressor for the soft X-ray spectrometer onboard Astro-H [J]. Cryogenics, 2010, 50(9): 507–511.
- [19] MAY A J, COPPI G, HAYNES V, et al. A highly effective superfluid film breaker for high heat-lift 1 K sorption coolers[J]. Cryogenics, 2019, 102: 45–49.
- [20] PRADHAN J, DAS N K, CHAKRABORTY A. Thermodynamical process simulation of dilution refrigerator [J]. Cryogenics, 2013, 57: 158–165.

通信作者简介

王亚男,女,助理研究员,中国科学院理化技术研究所,13683679250, E-mail: wangyanan@mail.ipc.ac.cn。研究方向:极低温,稀释制冷。

About the corresponding author

Wang Yanan, female, research associate, Technical Institute of Physics and Chemistry Chinese Academy of Sciences, 86–13683679250, E-mail: wangyanan@mail.ipc.ac.cn. Research fields: sub-Kelvin temperature, dilution refrigeration.