

## 稀释制冷技术\*

郑茂文<sup>1)2)</sup> 郭浩文<sup>1)3)</sup> 卫铃佼<sup>1)2)†</sup> 潘子杰<sup>1)‡</sup> 邹佳润<sup>1)3)</sup>  
李瑞鑫<sup>1)2)</sup> 赵密广<sup>1)2)</sup> 陈厚磊<sup>1)2)</sup> 梁惊涛<sup>1)2)3)</sup>

1) (中国科学院理化技术研究所, 中国科学院空间功热转换技术重点实验室, 北京 100190)

2) (低温科学与技术重点实验室, 北京 100190)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2024年8月29日收到; 2024年9月14日收到修改稿)

稀释制冷机作为一种可以获取 10 mK 以下极低温度的制冷技术, 广泛应用于量子计算、凝聚态物理等领域, 已经成为极低温区的主流技术. 目前国际上干式稀释制冷机的研究和应用已经较为成熟, 但是对其他类型的稀释制冷机研究较少, 研究工作还不够全面系统. 本综述围绕稀释制冷技术的研究现状, 系统介绍了其根本机理和制冷原理, 梳理了稀释制冷机的多种实现形式, 讨论了各种形式的优缺点和研究进展. 基于地面应用的典型稀释制冷机, 结合实际情况, 系统总结并分析了影响其制冷性能的内在、外在因素, 为稀释制冷技术研究提供技术参考.

**关键词:** 极低温, 稀释制冷, 量子计算, Kapitza 热阻

**PACS:** 07.20.Mc, 07.05.Fb, 07.57.-c

**DOI:** 10.7498/aps.73.20241211

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241211

## 1 引言

量子计算、深空探测、凝聚态物理等前沿领域研究的一个必要前提就是极低温环境. 特别是量子计算领域, 首先要解决的技术问题就是获得和保持 100 mK 以下的极低温环境. 目前能达到百毫开温区的制冷技术主要是  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀释制冷技术和绝热去磁制冷技术<sup>[1]</sup>. 稀释制冷机则因其无磁场干扰、连续制冷、性能可靠稳定等优点成为量子科技目前唯一可用的极低温技术, 应用于凝聚态物理、天体物理、超导电子学和化学生物学研究等领域<sup>[2-4]</sup>, 并随着空间天文学的发展逐渐应用到空间领域.

1951年, London<sup>[5]</sup>最早提出利用  $^3\text{He}$  在  $^4\text{He}$  中的溶解过程能够获得低温. 1965年 Ouboter 和

Taconis<sup>[6]</sup>首次利用  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀释制冷获得 220 mK 的温度以来, 国外针对稀释制冷机开展了大量的研究和应用工作. 目前商用稀释制冷机已经能实现 10 mK 以下的最低温度, 在 100 mK 能提供单台最大 1 mW 的制冷量. 国际上主要参与的研究单位和企业有 Bluefors(芬兰), LeidenCryogenics(荷兰), CryoConcept(法国), IBM、Fermi Lab、Janis、Form Factor(美国), Ulvac Cryogenics(日本), Zero Point Cryogenics(加拿大)等. 表 1 所示为主流的商业制冷机型号及其主要指标. 2024年 Bluefors 推出最新的 KIDE 系列产品, 通过 3 组 XLD1000 单元获得 3 mW@100 mK 冷量.

我国紧随稀释制冷兴起的国际趋势, 在 20 世纪 70—90 年代先后在中国科学院物理研究所和中国科学院低温技术实验中心(理化技术研究所前

\* 国家自然科学基金(批准号: 52406002)和国家重点实验室基金(批准号: CRYO20230202)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weilingjiao@mail.ipc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: panzijie@mail.ipc.ac.cn

表 1 国外主流商用稀释制冷机产品

Table 1. The foreign mainstream commercial dilution refrigerator products.

公司	稀释制冷机型号	最低温度/mK	制冷功率
Bluefors	BF-LD250	10	250 $\mu$ W@100 mK, 10 $\mu$ W@20 mK
	BF-XLD400	10	400 $\mu$ W@100 mK, 15 $\mu$ W@20 mK
	BF-XLD1000	10	1000 $\mu$ W@100 mK, 30 $\mu$ W@20 mK
	KIDE	10	3 mW@100 mK(3个模块)
Oxford	Proteox MX	10	450 $\mu$ W@100 mK, 12 $\mu$ W@20 mK
	Proteox LX	7	850 $\mu$ W@100 mK, 25 $\mu$ W@20 mK
	Proteox 5 mK	5	850 $\mu$ W@100 mK, 25 $\mu$ W@20 mK
Janis	JDry-500	10	400 $\mu$ W@100 mK
	JDry-750	9	400 $\mu$ W@100 mK, 14 $\mu$ W@20 mK
Cryoconcept	HEXA-DRY L	10	450 $\mu$ W@100 mK

表 2 国内报道的经典稀释制冷机研究进展

Table 2. Research progress of classical dilution refrigerators reported in China.

单位/企业	目前最低温度/mK	制冷功率
中国科学院物理研究所	<7.6	>450 $\mu$ W@100 mK
中国科学院理化技术研究所 <sup>[7]</sup>	~15	>400 $\mu$ W@100 mK
中国电子科技集团公司第十六研究所	7.9	>450 $\mu$ W@100 mK
安徽大学/合肥知冷低温科技有限公司	8.5	550 $\mu$ W@100 mK
中船鹏力超低温	12	>450 $\mu$ W@100 mK
本源量子	<10	>450 $\mu$ W@100 mK
北京飞斯科科技有限公司	<10	>300 $\mu$ W@100 mK
集焯科学仪器有限公司	6.8	>400 $\mu$ W@100 mK

身之一)开展了稀释制冷研究. 1979年研制出首款DR100-10型稀释制冷机,最低温度达到33—44 mK之间,制冷量为24  $\mu$ W@100 mK. 20世纪90年代低温中心研制的稀释单元曾少量提供给美国Janis公司. 可惜由于种种原因,此后国内稀释制冷研究完全中断. 直到约2022年,国内稀释制冷机(简称DR)供应完全由国外垄断. 随着量子计算的迅速发展,国外针对我国量子计算用稀释制冷机逐步进行了限制和封锁,2024年5月9日,美国将涉及中国量子计算及其稀释制冷机的22家研究机构和公司列入实体清单,封锁禁运进一步加剧. 近年国内多个研究单位和企业开始研制国产稀释制冷机. 自2022年以来,陆续有数家单位和企业取得了突破. 表2给出了国内相关单位在典型稀释制冷机上取得的性能指标(截至2024年2月),其中中国科学院物理研究所、理化技术研究所、安徽大学/合肥知冷低温科技有限公司、中船重工鹏力超低温技术有限公司、北京飞斯科科技有限公司都在研制1 mW@100 mK机型,理化技术研究所(笔者团队)等还在研制空间稀释以及用于大规模量子计

算的超大冷量稀释制冷机.

虽然国内多个单位在样机研制上取得了令人鼓舞的成果,但相较于商业化应用以及未来大型量子计算场合应用还有一定的距离. 多数研制单位的主要关注点是对标国外主流产品在短时间内尽快突破样机性能指标,关于稀释制冷技术的基础性、系统性研究工作开展得较少,关于稀释制冷技术的综合性文献更为缺乏. 本文将系统介绍稀释制冷过程及实现连续制冷的机理,根据不同的循环方式将稀释制冷机分为4类并分别介绍其工作原理,最后以地面应用的典型稀释制冷循环为例介绍影响制冷性能(极低的温度、较高的制冷量)的主要物理因素.

## 2 稀释制冷原理

### 2.1 氦同位素 $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ 的量子特性及有限溶解度

稀释制冷机是基于 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合液的特性,利用纯 $^3\text{He}$ 溶液向稀 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合液的稀释溶解过程,产生制冷效应. 这里涉及氦的两种同位素 $^3\text{He}$ 和

$^4\text{He}$  的量子特性.  $^3\text{He}$  核自旋为半整数, 是费米子, 纯  $^3\text{He}$  液体可以被视为正常的费米液体, 服从费米-狄拉克统计; 而  $^4\text{He}$  核自旋为整数, 是玻色子, 可用玻色-爱因斯坦统计进行处理,  $^4\text{He}$  液体低于 2.17 K, 具有超流性<sup>[8-11]</sup>.

在 0.5 K 以下,  $^4\text{He}$  液体基本处于量子力学基态, 热运动几乎完全消失, 熵和比热比液体  $^3\text{He}$  小得多. 因此在  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀溶液中, 液体  $^4\text{He}$  相当于“有质量的真空”, 而其中的  $^3\text{He}$  原子可以当作“理想费米气体”来处理. 由于真正的  $^3\text{He}$  原子 (称为经典态) 既与  $^3\text{He}$  原子相互作用, 也与其他  $^4\text{He}$  原子相互作用, 此时根据 LP (Landau-Pomeranchuk) 费米液体理论的计算方法<sup>[12]</sup>, 在计算稀溶液时,  $^3\text{He}$  的质量用一个“有效质量”  $m_3^*$  (准粒子) 来代替, 混合液就可以被看作是只有  $^3\text{He}$  准粒子的费米液体 (准粒子只与准粒子作用, 真正的  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  原子的相互影响被纳入  $m_3^*$  中), 符合费米-狄拉克统计的性质. 从文献<sup>[13]</sup>可发现, 在零磁场中,  $^3\text{He}$  在  $^4\text{He}$  溶液中的比热与具有相同数密度、体积和准粒子质量  $m_3^*$  的费米气体的比热接近, 这也验证了有效质量  $m_3^*$  的合理性. 准粒子的有效质量  $m_3^*$  大约为  $m_3^* = (2.272 \pm 0.008)m_3$ <sup>[11,12]</sup>. 此时准粒子的能量和  $^3\text{He}$  原子之间的能量关系可表示为

$$\varepsilon = \varepsilon_{03} + p^2/2m_3^*, \quad (1)$$

(1) 式表明, 准粒子的能量为  $^3\text{He}$  原子本身的能量与动能之和, 即原本运动的  $^3\text{He}$  原子推开  $^4\text{He}$  原子, 将动能转化为势能, 从而形成稀溶液的准粒子, 产生一部分“额外质量”. 这样, 一种具有复杂相互作用的稀溶液就大大简化, 成为只有准粒子相互作用的费米液体. 准粒子的压力即为渗透压. 根据 (1) 式可以计算得到简并态稀溶液的热力学函数, 如内能、熵和比热, 这和经典态的性质有所不同. 这是理解  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀溶液的状态和性质及稀释制冷过程的基础.

由于  $^3\text{He}$  原子与超流  $^4\text{He}$  液体的结合能比  $^3\text{He}$  原子更强 (对比零压潜热数据可知<sup>[12]</sup>), 因此会跨过相界面向超流氦中溶解. 但由于费米子的泡利不相容原理, 稀溶液中只允许两个  $^3\text{He}$  原子占据相同的过渡能级, 这导致随着  $^3\text{He}$  的溶解, 结合能降低, 同时  $^3\text{He}$  费米子的加入也使得稀溶液需要考虑费米能的影响. 因此, 在零压零温下,  $^3\text{He}$  费米子并不能无限向超流氦中溶解. 为了更好地理解结合能、费米能及其平衡关系, 我们来进行稀溶液化学势的推导.

首先, 假设一个溶解平衡的状态, 此时  $^3\text{He}$  在纯  $^3\text{He}$  液体和  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液中的化学势是相等的, 即

$$\mu_{3C}(T, x_C) = \mu_{3D}(T, x_D), \quad (2)$$

当  $T = 0$  时,  $^3\text{He}$  的潜热  $L_{3C}(0) = L_3(0)$ ;  $L_3(0)/N_0$  为将一个  $^3\text{He}$  原子从浓相移至真空中所需的能量, 即  $L_3(0)/N_0 = -\mu_3(0)/N_0$ , 表示为一个  $^3\text{He}$  原子在液态  $^3\text{He}$  中的结合能, 其中  $N_0$  为阿伏伽德罗常数. 在稀相中,  $-\mu_{3D}(0)/N_0$  表示在  $T = 0$  及  $x_D = 0$  时一个  $^3\text{He}$  原子在液态  $^4\text{He}$  中的结合能. 其中  $x_C, x_D$  表示  $^3\text{He}$  分别在浓相、稀相中的摩尔浓度,  $\mu_{3C}, \mu_{3D}$  表示  $^3\text{He}$  分别在浓相、稀相中的化学势.

由于结合能与稀溶液中  $^3\text{He}$  准粒子的相互作用有关, 在溶解不平衡的状态下, (2) 式中计算  $\mu_{3D}$  时, 需要同时考虑由  $^3\text{He}$  浓度变化引起的结合能的变化 (关于  $x_D$  的函数), 以及稀溶液中  $^3\text{He}$  费米子带来的费米能  $k_B T_F(x_D)$  的变化, 即无相互作用的费米子组成的系统中加入一个粒子后可能引起的基态能量的最小增量<sup>[8-11]</sup>.

因此, 在同时考虑结合能和费米能的一个动态溶解平衡情况下, 根据化学势守恒原则可以得到:

$$\mu_{3D}(0, x_D)/N_0 = -\varepsilon_{3D}(0, x_D) + k_B T_F(x_D), \quad (3)$$

其中  $\varepsilon_{3D}(0, x_D)$  表示在  $T = 0$  及  $x = x_D$  时, 一个  $^3\text{He}$  原子于最低过渡能态在稀相溶解时的结合能. 即纯  $^3\text{He}$  结合能等于  $^3\text{He}$  基态时与  $^4\text{He}$  的结合能与稀相中因  $^3\text{He}$  加入产生的费米能增量之差, 如图 1 所示.

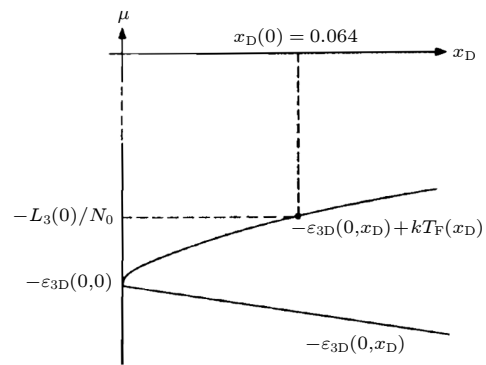


图 1 在绝对零度时  $^3\text{He}$  在  $^4\text{He}$  中的化学势平衡关系<sup>[11,12,21]</sup>  
Fig. 1. Chemical potential equilibrium relationship of  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$  at absolute zero<sup>[11,12,21]</sup>.

(3) 式给出了稀溶液在零压情况下的能量守恒表达式. 其中  $\varepsilon_{3D}$  对  $x_D$  的依赖关系必须由实验数据或理论来决定.  $k_B T_F(x_D)$  和  $x_D$  之间的关系可以在

$T = 0$  时从所有能量小于  $k_B T_F(x_D)$  的状态都被完全占据的要求中获得<sup>[11,12]</sup>:

$$k_B T_F(x_D) = \frac{p_F^2}{2m_3^*} = \frac{h_p^2}{8m_3^*} \left[ \frac{3Nx_D}{v} \right]^{2/3}, \quad (4)$$

即  $k_B T_F(x_D) \propto x_D^{2/3}$ . 其中  $v$  为单个氦原子的体积 (相当于以氦原子间距  $l$  为边长的正方体,  $v = l^3$ ),  $N$  为费米子数量,  $k_B$  表示玻尔兹曼常数,  $h_p$  为约化普朗克常数,  $h_p = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

综上所述, 可以想象准绝对零度下  $^3\text{He}$  向  $^4\text{He}$  中溶解过程如下.

1)  $^4\text{He}$  溶液中没有  $^3\text{He}$  原子,  $-L_3(0)/N_0 > -\epsilon_{3D}(0, x_D)$ ,  $^3\text{He}$  原子更容易向溶液中溶解.

2) 当  $^3\text{He}$  原子向稀相溶解后, 费米能被加入, 在稀相还未饱和时, 依然有  $-L_3(0)/N_0 > -\epsilon_{3D}(0, x_D) + kT_F(x_D)$ , 即一个  $^3\text{He}$  原子在稀相溶解时的势依然小于在纯  $^3\text{He}$  中的势.

3) 随着  $^3\text{He}$  原子不断向稀相中溶解,  $k_B T_F(x_D)$  随着  $x_D$  的增大而不断增大.

4) 当  $x_D$  增至 0.064 时,  $-L_3(0)/N_0 = -\epsilon_{3D}(0, x_D) + kT_F(x_D)$ . 此时  $^3\text{He}$  已无法再向稀相中溶解, 稀释混合溶液中  $^3\text{He}$  浓度达到最大值.

图 1 所示为  $^3\text{He}$  原子向稀相中溶解直至饱和的势能变化过程, 虚线对应的  $x_D$  即为温度为 0 K 时,  $^3\text{He}$  在液态  $^4\text{He}$  中的有限溶解度 6.4%.

上述 0 K 时仍然存在有限溶解度的概念, 对于理解稀释制冷的机理极为重要. 其他意味着即使在 0 K, 只要设法将  $^3\text{He}$  源源不断地从混合溶液中提取掉, 那么从浓相到稀相的  $^3\text{He}$  迁移就会持续发生以保持稀相浓度平衡, 从而获得连续的稀释过程. 这是稀释制冷机工作的根本机理, 也是稀释制冷理论上可以趋近绝对零度的依据.

## 2.2 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合溶液相图与相界面

### 2.2.1 混合溶液特性与相图

如上所述, 即使在 0 K 也存在有限溶解度. 那么有限溶解度存在的温度上限是什么? 研究表明, 从 0—0.87 K 该现象都存在, 高于这个温度, 这两种同位素就可以实现任意浓度的互溶. 1960 年, Walker 和 Fairbank<sup>[14]</sup> 在一次核磁共振实验中首次观察到了 0.3—0.6 K 之间这个相界面的存在; 1967 年, Graf 等<sup>[15]</sup> 将其拓展到了三相点附近; 1965 年后, Edwards 等<sup>[16,17]</sup> 则通过比热的计算确

认了零温零压下依然存在一个有限溶解度 6.4%, 由于 0 K 时玻色子的比热和熵为 0, 若浓度为 0 则比热为 0. 下文将通过汇聚上述研究成果的相图来考察  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液在不同温度和浓度下的特性.

在饱和蒸气压下  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液相图如图 2 所示, 其中  $x$  表示  $^3\text{He}$  的摩尔浓度:

$$x = x_3 = \frac{n_3}{n_3 + n_4}. \quad (5)$$

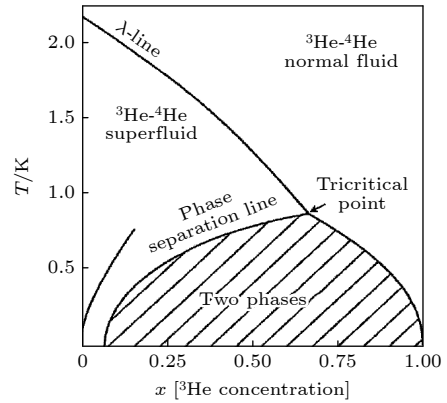


图 2  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液相图<sup>[8-12]</sup>

Fig. 2. The phase diagram of  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  mixture<sup>[8-12]</sup>.

因此,  $^4\text{He}$  的浓度  $x_4 = 1 - x_3 = n_4/(n_3 + n_4)$ . 图 2 中上方为  $\lambda$  线, 随着  $^3\text{He}$  的溶入, 纯  $^4\text{He}$  液变为混合液, 其超流转变温度从 2.17 K 随着  $^3\text{He}$  浓度的增大而单调降低. 以温度约为 0.87 K、 $^3\text{He}$  浓度为 67.5% 为起点, 随着温度降低,  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液开始分为两相. 这个点称为  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液的“三相点”(或三临界点), 三相点下的曲线称为相分离曲线, 相分离曲线中的阴影区域称为相分离区 (两相区). 图中  $\lambda$  线与相分离线相连, 当  $^3\text{He}$  浓度大于 6.4%, 混合液温度下降到 0.87 K 以下, 分相就会在  $\lambda$  线以下的区域产生. 相分离线则是对应温度下混合液的最大溶解度, 高于此浓度,  $^3\text{He}$  便会析出, 产生分相现象.

相分离线左上方的一段曲线为  $^3\text{He}$  溶质的费米简并转变曲线, 即费米简并温度与  $^3\text{He}$  摩尔分数之间的关系. 简并粒子即遵从微观量子统计规律的微观粒子, 玻色子与费米子均属于简并粒子, 但简并程度因温度、相互作用力等程度的不同而不同. 当温度降至费米简并温度以下, 混合溶液开始从经典态向简并态转变, 随着温度不断降低,  $^3\text{He}$  摩尔分数不断降低, 分子相互作用减小, 从弱简并过渡到强简并. 当温度低于费米简并温度的 1/3 时,

过渡到完全简并, 接近完全简并的费米液体, 无分子间相互作用, 费米能为理想值, 平衡态理想.

在相分离区以上, 溶液是超流态还是正常态依赖于在  $\lambda$  线的左边或右边. 三相点下方两条曲线中, 左边一支给出稀相中  $^3\text{He}$  的浓度, 右边一支给出浓相  $^3\text{He}$  的浓度. 稀释制冷机中, 发生相分离的部分通常在 0.2 K 以下, 由图 2 可看出, 在这个温度范围, 浓相成分几乎是纯的  $^3\text{He}$  (实际上是 0.997%), 其中仍然有少量  $^4\text{He}$  存在,  $^4\text{He}$  的含量为 [9-11,18]

$$x_{4C} \equiv (1 - x_{3C}) = 0.85T^{1.5} \exp(-0.56/T). \quad (6)$$

但 1987 年 Masaki 等 [18] 精确测量了相分离线,  $^4\text{He}$  浓度的测试结果比理论值高. 稀相主要是超流的  $^4\text{He}$ , 溶有少量的  $^3\text{He}$ .  $^3\text{He}$  的浓度变化很小, 在 0.1 K 时为 7%, 一直到绝对零度, 稀相中还溶有一定数量的  $^3\text{He}$  原子, 约为 6.4%. 稀相溶液中  $^3\text{He}$  浓度可表示为

$$x_{3D} = 0.0648(1 + 8.4T^2 + 9.4T^3). \quad (7)$$

从图 2 可见, 随着温度趋近于绝对零度, 相分离曲线近乎与  $x$  轴垂直. 如前所述, 这是稀释制冷机理论上可以达到 1 mK 以下甚至更低的理论依据, 但在实际过程中, 实现 1 mK 以下温度还有许多技术难点.

### 2.2.2 同位素相界面

由于有限溶解度的存在, 在极低温下  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  混合溶液会分为两相, 如图 3 所示. 在重力场中, 由于密度差异, 上层是浓  $^3\text{He}$  的溶液 (几乎是纯  $^3\text{He}$ ), 称为浓相; 下层是稀  $^3\text{He}$  的溶液, 称为稀相. 两者之间的界面, 被称为相界面.



图 3 浓相、稀相分离示意图

Fig. 3. Schematic diagram of separation of concentrated phase and diluted phase.

持续稳定的浓稀相界面是稀释制冷过程发生的另一个必要条件. 幸运的是, 在地面有重力的帮助. 而要在太空固定相界面, 则必须另辟蹊径.

### 2.3 焓差效应与连续制冷的实现

上文讨论了稀释过程发生的条件, 下文将讨论

稀释过程伴随的能量效应, 以及如何使之连续工作. Wheatley 等 [19-23] 对混合液的热物性及稀释制冷的原理与方法进行了非常多的研究, Radebaugh 和 Siegwarth [24,25] 对稀释制冷进行了详细的热力学计算, 本文参考了其中的部分数据和方法.

准绝对零度下,  $^4\text{He}$  比热趋近于 0, 但由于  $^3\text{He}$  的费米简并特性, 根据泡利不相容原理, 一个基态只允许一个粒子存在, 使其比热依然与温度呈正相关. 这导致在 0.87 K 以下, 浓相和稀相的焓值有所不同. 如图 4 所示, 在同一温度下, 稀释溶液的摩尔焓大于浓缩溶液的摩尔焓. 同时稀释溶液的摩尔焓大于浓缩溶液的摩尔焓, 因此当温度保持一定时,  $^3\text{He}$  原子通过相分界面从浓相进入稀相的过程必然是一个吸热过程, 对外界产生制冷效应. 如果系统是绝热的, 则表现为系统本身温度的下降. 这个焓差效应就是稀释制冷机获得制冷效应的物理基础.

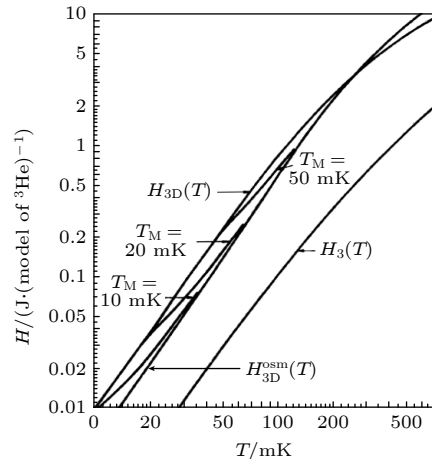


图 4 浓相与稀相的焓值图 [11]

Fig. 4. The enthalpy diagram of the concentrated phase and diluted phase [11].

在 0.87 K 以下, 由于每一个温度的稀释溶液都对应一个固定的  $^3\text{He}$  摩尔分数, 必须在该摩尔分数才能达到溶液的相平衡. 因此, 只要把大量的  $^3\text{He}$  原子从稀相源源不断地取走, 为了保持该温度下的相平衡,  $^3\text{He}$  原子就会从浓相连续不断地溶解于稀相, 这样就可以获得连续地实现稀释过程. 有限溶解度导致的分相效应及饱和浓度与温度的对应关系是稀释制冷机连续工作的物理基础.

简言之, 焓差效应和分相效应是稀释制冷机连续制冷的两大物理基础.

为了更好地理解稀释过程、计算稀释溶解产生的制冷量, 必须计算浓相及稀相对应的焓值, 即纯

$^3\text{He}$  ( $x_4 = 0$ ) 及  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀释混合液 ( $x_3 = 0.064$ ) 的焓值. 当温度低于 50 mK 时, 浓相和饱和稀相的比热分别为  $c_3 = 24T$ ,  $c_{3D} = 108T$  或  $c_3 = 25T$ ,  $c_{3D} = 107T$  [11]. 浓相的焓值  $H_C(T) = \int_0^T c_C dt$ . 在浓相及稀相中,  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  的化学势是不变的 (将在后文中证明), 那么有

$$\begin{aligned} H_D - H_C &= T(S_D - S_C) \\ &= T \left( \int_0^T \frac{c_{3D}}{T} dt - \int_0^T \frac{c_3}{T} dt \right). \end{aligned} \quad (8)$$

$H_C(0) = 0$ , 浓相和饱和稀相的比热取值不同, 也会使得浓相和稀相的焓略有不同, 在计算制冷量时就会有细微差别. 本文取  $c_3 = 25T$ ,  $c_{3D} = 107T$ , 得到浓相和饱和稀相的焓值分别为  $H_C(T) = 12.5T^2$  和  $H_D(T) = 94.5T^2$ .

稀释制冷机的循环工质一般是  $^3\text{He}$ , 假设稀释制冷机已经运行到了稳定工况, 忽略黏性热, 循环工质为纯  $^3\text{He}$ , 混合室处于稳定最低温度  $T_{mc}$ , 蒸发器处于稳定温度  $T_s$ , 进入混合室的浓相温度为  $T_C$ , 无外部加热时, 混合室的稀释过程所产生的冷量即为其漏热量  $\dot{Q}_{mc}$ , 那么根据热力学第一定律, 热负荷与浓相的焓变之和等于在最低温度  $T_{mc}$  下饱和稀相与浓相之间的焓差:

$$\dot{Q}_{mc} + \dot{n}_3 [H_C(T_C) - H_C(T_{mc})] = \dot{n}_3 [H_D(T_{mc}) - H_C(T_{mc})]. \quad (9)$$

推导即得到:

$$\dot{Q}_{mc} = \dot{n}_3 (94.5T_{mc}^2 - 12.5T_C^2). \quad (10)$$

在一个不可能达到的理想情况下, 进入混合室的浓相温度  $T_C$  无限趋近甚至等于混合室最低温度  $T_{mc}$ , 此时制冷机制冷量达到一个最大值  $\dot{Q}_{mc} = 82n_3T_{mc}^2$  (100 mK 以下适用).

上述分析是基于以  $^3\text{He}$  为循环工质的稀释制冷机, 即将  $^3\text{He}$  通入“静止”的  $^4\text{He}$  中进行制冷, 其制冷量取决于通入  $^3\text{He}$  的量.

而对于特殊的情况, 例如以  $^4\text{He}$  为循环工质的稀释制冷机以及空间  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  分离循环的情况, 其制冷过程的推导则有所不同. 此类循环中  $^3\text{He}$  的量通常是过量的, 所有的  $^4\text{He}$  都会进入稀相中; 而  $^3\text{He}$  则大部分停留在浓相中, 只有部分  $^3\text{He}$  参与了稀释制冷过程, 因此制冷量的计算以  $^4\text{He}$  的循环速率为准. 由于  $^3\text{He}$  在极低温下饱和稀相中的摩尔分数约为 0.064, 即相当于要想获得相同的制冷

量,  $^4\text{He}$  的循环速率必须为原来  $^3\text{He}$  循环速率的  $1/0.064$  倍, 即相同流量下  $^4\text{He}$  循环稀释制冷机的制冷量只有原来的 0.064 倍, 那么对于  $^4\text{He}$  循环或者空间  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  分离循环的稀释制冷机的最大制冷量为 [4]

$$\dot{Q}_{mc} = 5.6\dot{n}_4 T_{mc}^2. \quad (11)$$

### 3 稀释制冷机实现形式

上文讨论了稀释制冷机的原理, 主要涉及稀释制冷机温度最低的冷头部分, 简称稀释单元. 除此之外, 为了保证最核心的稀释制冷过程, 针对不同的应用场合, 还需要采用不同的多级预冷方式获得 300—1 K 之间多个预冷温度. 提取出来的工质需要被加压送回稀释单元, 实现工质循环利用. 完整的稀释制冷机包括稀释单元、预冷系统、循环系统、测量系统等. 因其各主要系统技术路线不同, 稀释制冷具有多种实现形式.

根据工质循环和预冷方式的差异, 稀释制冷机有多种分类方式. 例如根据预冷是使用制冷机还是液氮, 可分为干式和湿式; 根据  $^3\text{He}$  提取和回流的方式分为常温循环式和冷循环式; 根据循环的工质种类分为经典及冷循环型 ( $^3\text{He}$  循环)、Leiden 型 (循环)、空间型 ( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  双循环); 根据是否依赖重力工作分为地面稀释制冷机和空间稀释制冷机; 根据是否循环利用工质分为开式和闭式稀释制冷机. 本文以循环工质种类为主、循环和预冷方式为辅的分类方式来介绍几种主要的稀释制冷机研究应用情况.

#### 3.1 经典稀释制冷机

经典稀释制冷机即地面应用的、以  $^3\text{He}$  为循环工质的稀释制冷机, 这种稀释制冷机是应用最普遍的, 也是温度最低、冷量最大的类型. 经典稀释制冷的基本原理如图 5 所示, 箭头方向代表工质 (通常是  $^3\text{He}$ ) 的循环方向. 从循环系统出来的  $^3\text{He}$  气体首先在一二级预冷装置中被冷却, 流阻前为 1 K 液池或焦耳-汤姆森 (J-T) 换热器, 工质在此处冷凝为液体. 流阻是为获得足够的凝聚压力和防止气体进入热交换器而设置的. 流过流阻的液体依次经过蒸发器换热器、逆流热交换器到达混合室, 在混合室中稀释后沿相反方向穿过稳定的超流  $^4\text{He}$

液柱进入蒸发器. 混合室是稀释制冷机的冷头和最低温度处. 蒸发器的温度通常被控制在 0.7 K 附近, 此时混合液的  $^3\text{He}$  分蒸气压远大于  $^4\text{He}$  的分蒸气压, 所以从蒸发器中抽出的气体主要为  $^3\text{He}$ .  $^3\text{He}$  从混合室迁移到蒸发器是依靠  $^3\text{He}$  在  $^4\text{He}$  中的渗透压差完成的. 由于极低温下 Kapitza 热阻的存在, 在 1 K 以下、特别是 250 mK 以下固液界面间

热阻急剧增大, 制约了换热器的性能, 因此逆流换热器毫无疑问是典型稀释制冷机的核心部件. 逆流换热器主要包含套管式换热器和纳米烧结银粉换热器两种类型, 可串联使用. 在 50 mK 以上温区, 套管换热器即可满足换热要求. 在 50 mK 以下温区, Kapitza 热阻急剧增大, 须使用纳米银粉结构来获取巨大的换热面积.

经典稀释制冷机根据预冷形式的不同分为干式和湿式稀释制冷机, 如图 6 所示.

### 3.1.1 湿式稀释制冷机

湿式稀释制冷机 (wet dilution refrigerator, WDR) 是最先发展的一种稀释制冷机, 属于经典中的经典. 通常采用液氮作为一级预冷、液氦作为二级预冷、1 K 超流氦池作为三级预冷 ( $^3\text{He}$  液化器). 极低的环境漏热及大量制冷剂使得这种湿式制冷机运行时间加长且温度更低、冷量更大. 1968 年, Neganov 利用可连续工作的稀释制冷机获得 5.5 mK 的低温; 1970 年, Peshkov<sup>[28]</sup> 获得了 3 mK 的温度. 1979 年, Lounasmaa<sup>[8]</sup> 报道了一台稀释制冷机, 其最低温度能达到 2 mK. 1990 年,

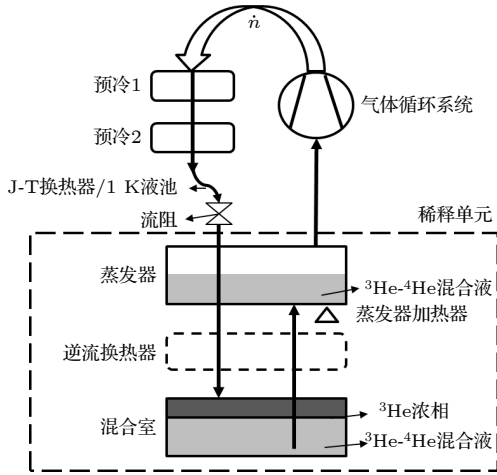


图 5 稀释制冷循环流程

Fig. 5. The cycle of dilution refrigerator.

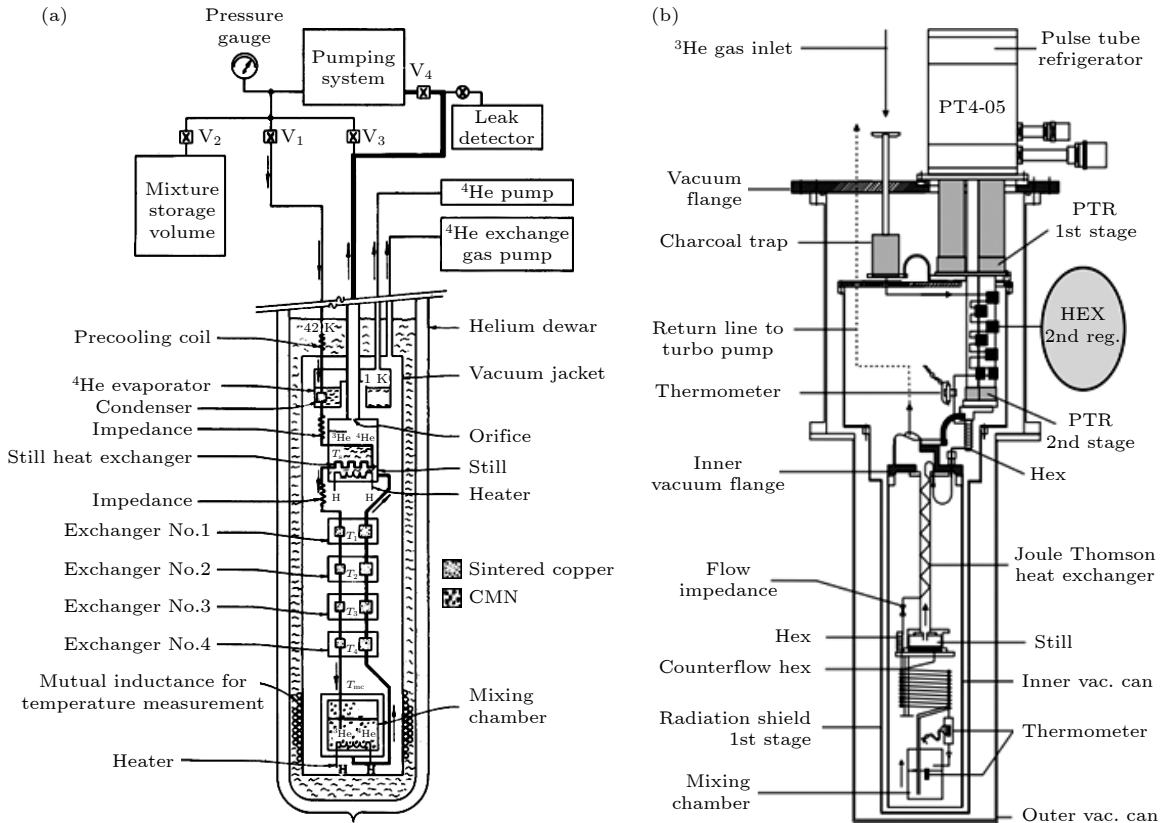


图 6 稀释制冷机结构图 (a) 湿式<sup>[29]</sup>; (b) 干式<sup>[36]</sup>

Fig. 6. The structure of DR: (a) The wet<sup>[29]</sup>; (b) dry DR<sup>[36]</sup>.

Bunkov 等<sup>[29]</sup>参考该湿式制冷机,主要改进了其中的分立式换热器,详细设计了一款最低温度降到 2 mK 的稀释制冷机. 1987 年, Vermeulen 和 Frossati<sup>[30]</sup>将其用于极化液体  $^3\text{He}$  的研究以及核冷,最低温度达到约 1.9 mK. 1979 年,中国科学院物理研究所五室(低温中心前身之一)冉启泽等<sup>[31]</sup>采用湿式方案研制稀释制冷机获得了低至 33 mK 的最低温度.

### 3.1.2 干式稀释制冷机

为了克服湿式稀释制冷需要添加液氮液氦的不便,干式稀释(dry dilution refrigerator, DDR),又称 J-T 型稀释制冷机,从 20 世纪 90 年代起得到快速发展. DDR 通常采用 G-M 制冷机或振动较小的 G-M 型脉冲管制冷机等机械制冷机作为一级、二级预冷,采用 J-T 换热器配合一个较大的流阻作为  $^3\text{He}$  液化器. 随着机械制冷机的成熟,DDR 以其便捷性、实用性、无需添加制冷剂成为主流,但机械制冷机的振动也成为 DDR 的核心问题之一. 1993 年起,德国科学家 Uhlig 等<sup>[32-36]</sup>采用 Gifford-McMahon 制冷机代替液氮、液氦, J-T 换热器代替 1 K 液池进行了大量研究,成功获得了 5 mK 以下温度. 此后,法国、荷兰、芬兰、日本等科学家将 DDR 广泛应用于物理研究领域<sup>[37-44]</sup>. 2021 年开始,中国科学家也逐步突破干式稀释制冷机关键技术,并达到了国际主流水平的制冷性能.

干式稀释制冷机中,流阻的作用很关键.流阻的设计必须保证流阻前的压力大于对应温度下的饱和蒸气压,从而实现工质的液化.

典型稀释制冷机制冷稳定连续,混合室可达到极低的温度,流量、制冷量均利于放大,结构可放大,用户空间足够,是目前最主流的稀释制冷机形式.

## 3.2 冷循环(冷凝泵/吸附泵)稀释制冷机

经典型稀释制冷机的工质循环均需要送至室温,在室温下加压后再通过预冷回到稀释单元.其缺点是因为气体在常温下密度小,需要庞大的抽气和压缩系统.由于气体在低温下密度更高,如果在低温下实现循环,效率更高,系统更紧凑,而且简化了预冷系统.由此发展了一种冷循环稀释制冷机.冷循环型稀释制冷机(cold-cycle dilution refrigerator, CDR)即  $^3\text{He}$  工质无需经过外部气体循环系统,直接在恒温器内部低温部分进行冷循环,如

图 7 所示.此时,低温部分的冷凝泵/吸附泵代替了外部循环系统的作用.

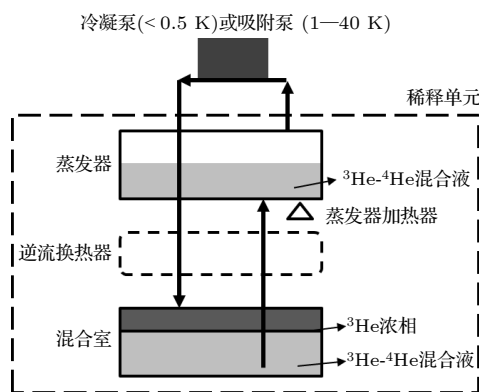


图 7 冷循环稀释制冷机示意图  
Fig. 7. The schematic diagram of CDR.

CDR 根据低温泵的不同主要有吸附泵型<sup>[45,46]</sup>和冷凝泵型<sup>[47,48]</sup>两种类型.吸附泵型稀释制冷机通过对吸附床冷却提供低压环境来吸附蒸馏室的  $^3\text{He}$  气体,对其加热至 40 K 来解吸气体以实现  $^3\text{He}$  循环.双吸附泵结构<sup>[48]</sup>的制冷温度可达 8 mK,能在 110 mK 提供 60  $\mu\text{W}$  的冷量.这种形式的 CDR 循环不连续.

冷凝泵型稀释制冷机直接利用低于蒸馏室温度的冷凝器对蒸发的  $^3\text{He}$  气体进行液化,循环连续,且结构更为简单.冷凝泵型于 1972 年提出,20 世纪 90 年代后国际上此类研究逐渐增多,主要研究单位包括卡迪夫大学、法国原子能和替代能源委员会、曼彻斯特大学等.目前国际上冷循环型稀释制冷机最低可达 12.1 mK<sup>[49]</sup>,由乌克兰低温物理与工程研究所于 1992 年达到.图 8 给出了美国 NASA 的 Ames 实验室研制的冷凝泵型稀释制冷机模型图.

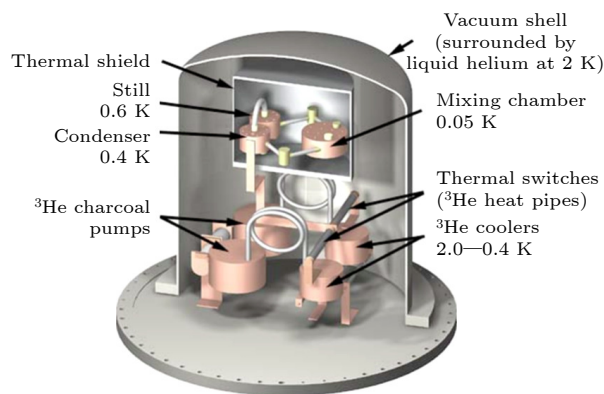


图 8 冷凝泵型稀释制冷机模型图(NASA Ames 实验室)  
Fig. 8. Model diagram of condensate pump dilution refrigerator (NASA Ames).

2023年,中国科学院理化技术所报道了其自研的冷凝泵型稀释制冷机,采用 $^3\text{He}$ 吸附制冷机为冷凝泵提供冷却,最新结果可实现50 mK以下最低温度<sup>[50]</sup>.

这种冷循环稀释制冷机减少了循环泵等大部分设备,减小了振动,重量体积和成本都大大减小,同时避免了J-T换热器、蒸发器换热器及流阻等一系列复杂结构,减小了设计和工艺难度,大大减小了降温时间,稳定性更高.但同时因为其流量过小,使得其只适用于小流量需求的环境,同时稀释单元的 $^3\text{He}$ 流量及整机的性能直接受冷凝器(压缩机/低温泵)处压力和温度的影响.

### 3.3 Leiden型( $^4\text{He}$ 循环)稀释制冷机

1976年,著名的低温实验室科学家 Pennings等<sup>[51-53]</sup>提出一种以 $^4\text{He}$ 为工质的稀释制冷循环,即Leiden型稀释制冷机(Leiden dilution refrigerator, LDR),获得低至18.5 mK的温度,同时进行了热力学描述,分析了此种循环中混合液与能量平衡、换热器间的关系,并讨论了结果.这种所谓Leiden稀释制冷机,其特点是采用超漏作为关键部件来实现 $^4\text{He}$ 循环,避免了Kapitza热阻的影响.超漏相当于一种半透膜,只允许超流 $^4\text{He}$ 分子通过而不允许 $^3\text{He}$ 通过.

1987年, Satoh等<sup>[54]</sup>对Leiden型稀释制冷机进行详细的研究,其原理如图9所示,超流体 $^4\text{He}$ 通过超漏进入混合室.该设备具有一个逆流管(counter-flow tube, CFT)热交换器(通常称为重力对流换热器),其中相分离后下降的冷混合物与上升的热浓缩混合物通过彼此直接接触交换热量,避免了极低温下Kapitza热阻的影响.经过反复实验,该研究发现了一个LDR的重要特性:当 $^4\text{He}$ 循环速率超过一定的临界值时,机器的冷却特性突然改变,该速率称为临界循环速率(对其机理还不了解,但该速率可能与膜流动的不稳定性有关).在高于该临界值的循环速率区域中,已达到3.4 mK的最低温度.理论上这种换热器应该是近乎理想的热交换,但最低温度却高于 $^3\text{He}$ 循环稀释制冷机的最低纪录,该研究认为上部分支中的热交换差且复杂,存在在该区域中下降的混合物以薄膜形式在CFT壁上流动的可能性,其根本原因还有待研究.

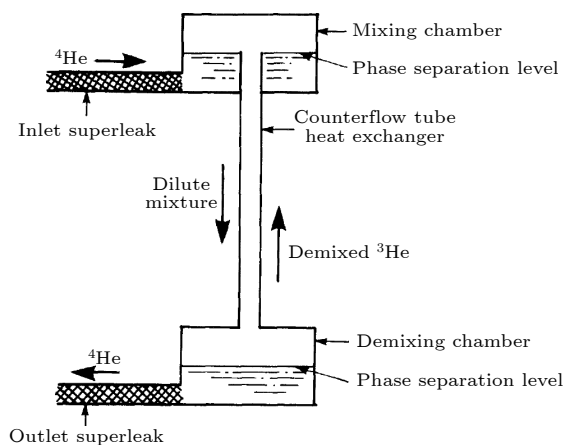


图9 Leiden型( $^4\text{He}$ 循环)稀释制冷机原理图<sup>[51]</sup>

Fig. 9. Schematic diagram of Leiden type ( $^4\text{He}$  cycle) dilution refrigerator<sup>[51]</sup>.

### 3.4 空间( $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ 双循环)稀释制冷机

空间稀释制冷机与地面显著不同,主要原因在于微重力环境下,液体的驱动、流动、固定问题.根据工质是否循环利用,空间稀释制冷机又分为空间开式、闭式稀释制冷机.如前所述,相界面固定是稀释制冷的必要条件,在地面依靠重力实现,在空间微重力环境下,必须寻找其他物理量替代重力.自20世纪90年代以来,人们在尝试了电场力、磁力、毛细力等之后,确定了用毛细力替代重力的主流方式.这种界面固定方式要求两种同位素工质都流动起来,因此成为一种 $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ 双循环稀释制冷机.

#### 3.4.1 空间开式稀释制冷机

1990年, Duband等<sup>[55]</sup>发现毛细管的毛细力可以替代重力的作用,并且成功将此作用应用到液 $^3\text{He}$ 的微重力实验中;1999年, Roach等<sup>[56]</sup>又将此结果成功应用到稀释混合液中,这使得重力不再是稀释制冷机在空间应用的障碍,由此,研究人员们开始了稀释制冷机在空间上的研究.20世纪90年代, Benoit等<sup>[57,58]</sup>提出了应用在空间的开式稀释制冷机(open-cycle dilution refrigerator, OCDR)的一些构想,并进行了相关实验研究.

直到2009年,第1例也是迄今为止唯一一例稀释制冷机成功应用到Planck任务中(法国)<sup>[59,60]</sup>,其原理如图10所示,工质制冷后被直接喷射到太空.该卫星通过低至50 K的无源辐射器(V形槽)进行冷却,使用吸附压缩机进行氢气J-T膨胀将仪器冷却至20 K,使用机械压缩机进行氦气J-T制冷可为HFI提供4 K冷却.最后,利用一个

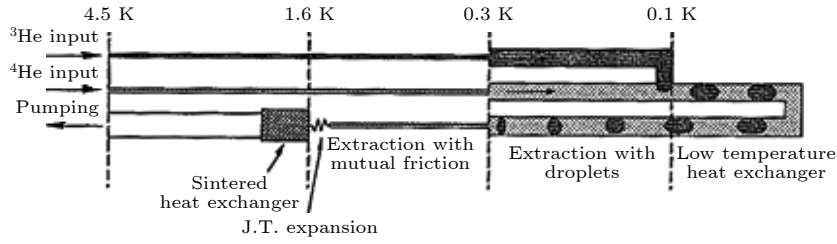


图 10 空间开式稀释制冷机原理图<sup>[61]</sup>

Fig. 10. The schematic diagram of OCDR<sup>[61]</sup>.

开式稀释制冷单元即可获得低于 100 mK 的温度, 制冷量为 100 nW@100 mK.

2019 年以来, 笔者团队开展了空间稀释制冷机研究, 并研制了空间开式稀释制冷机样机, 目前可获得 160 mK 以下的温度.

开式稀释制冷机 OCDR 在空间中的运用仍然有不少问题需要解决. 第 1 点, OCDR 的工质不可循环, 在完成冷却工作后会将会混合物喷射到太空中. 因此 OCDR 的使用寿命必然会受所携带的 <sup>3</sup>He 和 <sup>4</sup>He 总量的限制, Planck 卫星 OCDR 在轨工作时间仅为 30 个月. 第 2 点, 虽然该系统非常简单, 不包含任何活动部件, 但是依旧可能有毛细管泄漏或阻塞问题, 导致稀释制冷机性能下降甚至停止运转. 这需要通过使用清洁气体和冷阱, 保证系统可以长时间运行而不会阻塞.

### 3.4.2 空间闭式稀释制冷机

在 Planck 飞行任务中, 开式循环稀释制冷机 OCDR 已经成功应用. 鉴于工作寿命极大程度上受氦的储备量的限制, OCDR 已经无法满足用于天体物理学的 X 射线和远红外空间探测卫星 (ATHENA, SPICA) 的设计要求, 即在 5 年的生命周期内, 提供约 0.5—1 μW@50—100 mK 的低温冷却功率, 最好能达到 1 μW@50 mK. 因此未来的太空飞行需要大大提高冷却能力和使用寿命.

为了解决 OCDR 的问题, 法国研究人员目前正在研究一种闭式稀释制冷机<sup>[61-65]</sup>, 目标是为 ATHENA、太空和天体物理学的空间红外望远镜 (SPICA)、国际射线天文台 (IXO) 等任务的极低温探测器制冷提供可行的解决方案.

空间闭式稀释制冷机 (closed-cycle dilution refrigerator, CCDR) 相对于开式显著的区别是利用 <sup>3</sup>He 压缩机以及 <sup>4</sup>He 超漏和喷泉泵增加了 <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 分离循环系统. 其巨大优势是能够实现工质的循环使用, 大大提高了空间稀释制冷机的寿命和性能,

这使得 CCDR 非常适合在空间应用.

2010 年, Martin 等<sup>[61]</sup>设计了一种闭式稀释制冷机, 如图 11 所示. CCDR 在蒸发器以下和 OCDR 没有太大区别, 但是 OCDR 的工质从蒸发器出来后就被直接喷射到太空, 而 CCDR 则利用超漏来将 <sup>4</sup>He 分离, 利用 <sup>3</sup>He 压缩机来将 <sup>3</sup>He 抽出以循环利用, 从而实现了混合液的分离循环. 超漏是接近理想状态的半透膜, 只允许 <sup>4</sup>He 原子自由通过, 能阻止 <sup>3</sup>He 原子流动. <sup>3</sup>He 与 <sup>4</sup>He 分离后分别在 1.35 mW@1.7 K 的预冷处被冷却, 然后经过毛细管换热器进入混合室中. 该设计在实验中获得了 1 μW@60 mK 的冷量.

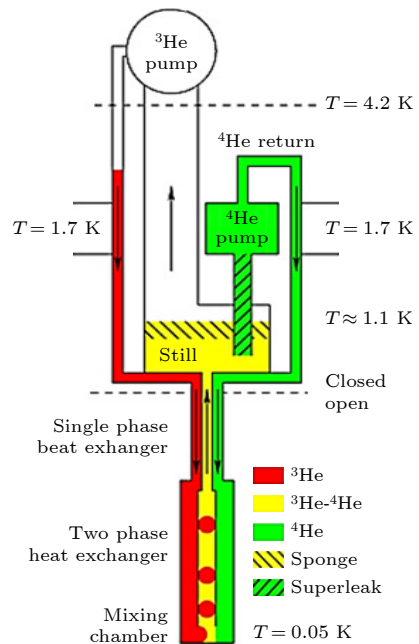


图 11 空间闭式稀释制冷机<sup>[61]</sup>

Fig. 11. The schematic diagram of CCDR<sup>[61]</sup>.

2012 年, Chaudhry 和 Vermeulen<sup>[63]</sup>开发了根据负荷温度计算稀释制冷机的冷却能力的模型, 还在 Martin 等<sup>[61]</sup>研究的基础上, 对毛细管的布置及黏性热等方面进行了相关研究, 并在实验中获得

了  $1 \mu\text{W}@45 \text{ mK}$  的冷量<sup>[64]</sup>.

这种空间闭式稀释制冷机中,  $^3\text{He}$  工质的压缩循环成为一大问题, 需要  $^3\text{He}$  循环器/压缩机来维持一定的吸气压力<sup>[65]</sup>. 2018 年, Nagata 等<sup>[66,67]</sup> 介绍了一种空间  $^3\text{He}$  循环器/压缩机, 其采用三级压缩机来循环, 描述了影响循环器性能的因素, 并通过数值分析与实验结果对比, 但该循环器的入口压力仍不能满足空间需求.

空间闭式稀释制冷机的另外一个问题是蒸发器的气液界面控制的问题, 即在零重力情况下如何实现蒸发器中的气液分离. Chandra 和 Nisith<sup>[68]</sup> 在 2017 年提出了一种带液面多孔塞的超流氦爬膜抑制器, 其中多孔塞可以在一定程度上实现零重力情况下的气液分离. 多孔塞是利用热机械效应即使在零重力下也能将氦气与超流体氦分离的传统装置, 由多孔材料制成, 例如烧结氧化铝、不锈钢等. 孔的大小通常在几微米的数量级, 当塞子的上游侧与基于超流体的气体混合物连接时, 由于吸收的潜热, 超流体流经孔至下游侧, 并立即蒸发, 从而将局部温度降低至数十毫开. 超流体趋于向更高的温度移动, 因此液态氦被缩回到孔中, 氦蒸气从液态中分离出来.

#### 4 实现稀释制冷机的关键因素

稀释制冷的基本原理已较清晰, 但要获得  $100 \text{ mK}$  下数百微瓦甚至毫瓦级的制冷功率 (单个稀释单元), 以及低于  $10 \text{ mK}$  的无负荷温度却并非易事, 其在技术上受到诸多物理因素的制约, 主要有 Kapitza 热阻、 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  气液分离与爬膜、渗透压与扩散阻力等, 下文将分别予以阐述.

##### 4.1 Kapitza 热阻与换热器

常温下, 物质间的传热主要考虑介质内部的热传导热阻, 但是在极低温下, 特别是  $100 \text{ mK}$  以下, 由于 Kapitza 热阻的存在, 主要考虑界面间的热阻<sup>[26]</sup>. 图 12 简单示意了两种情况的温度分布, 图 12(a) 表示常温下的换热温度示意图, 图 12(b) 表示极低温下的温度分布示意图. 从图 12 可以看出, 对于常规的传热来说, 跨物质界面的温度是连续变化的, 而对于极低温传热来说, 在界面上有一个温差, 这个温差所代表的热阻就是 Kapitza 热阻, 它由诺奖获得者 Kapitza 发现.

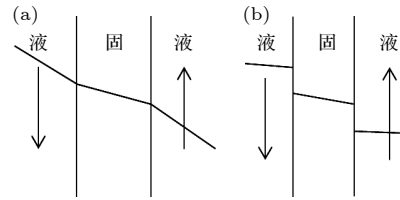


图 12 常温及极低温下的温度梯度 (a) 常温下的换热器; (b) 极低温下的换热器

Fig. 12. Temperature gradient at normal temperature and extremely low temperature: (a) Normal temperature; (b) extremely low temperature.

固体与液体之间或者固体与其他固体之间接触面上, 随着温度下降到很低, 热传导急剧恶化, 产生 Kapitza 热阻. Kapitza 边界热阻定义为<sup>[69]</sup>

$$R_K = \Delta T/Q, R_K \propto T^{-3}, \quad (12)$$

其中  $\Delta T$  指液体与壁之间的温差,  $Q$  表示热流量, 那么热导率为  $1/R_K$  称为 Kapitza 热导.

在稀释制冷机的稀释单元中, Kapitza 热阻存在于逆流换热器及混合室中. 逆流换热器中进入的浓相及返回的稀相与换热器壁面之间, 特别是经过稀释过程的稀相混合液是温度最低的部分, 其与混合室及逆流换热器壁面之间皆存在较大的 Kapitza 热阻. 由于 Kapitza 热阻与温度之间的关系, 通常采用等效 Kapitza 热阻  $R_{KM} = R_K T^3$  来表示具体数值, 图 13 所示为不同物质之间的大致值.

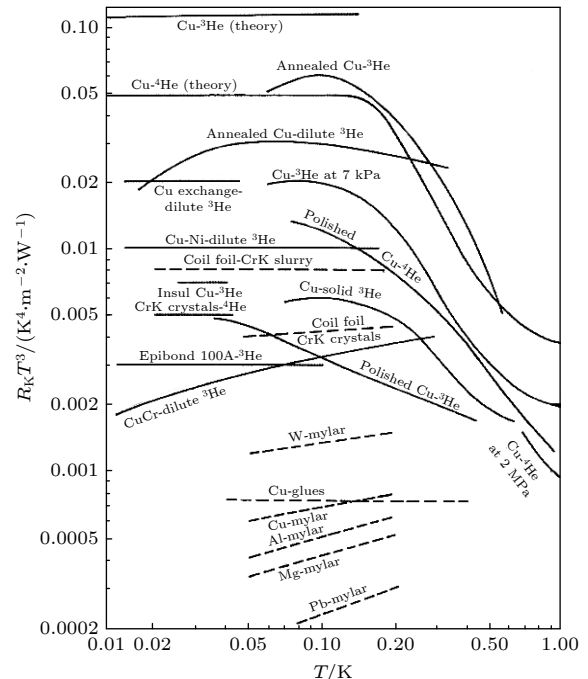


图 13 不同材料的 Kapitza 热阻值<sup>[19]</sup>

Fig. 13. Kapitza thermal resistance of different materials<sup>[19]</sup>.

稀释制冷机能达到的最低温度很大程度上由进入混合室的浓相温度决定, 而进入混合室的浓相温度则由逆流换热器的换热能力决定. 随着逆流换热器进入的浓相不断接近混合室, 其温度越低, Kapitza 热阻越大, 并在 10 mK 以下呈指数增长, 在更低的温度下通常采取很大的换热面积来克服巨大的 Kapitza 热阻. 在这样的条件下, 套管式换热器无法满足要求, 因为对于套管式换热器, 过大的换热面积意味着过大的黏性热等, 得不偿失. 烧结粉式换热器则可以很好地解决这个问题, 如图 14 所示.

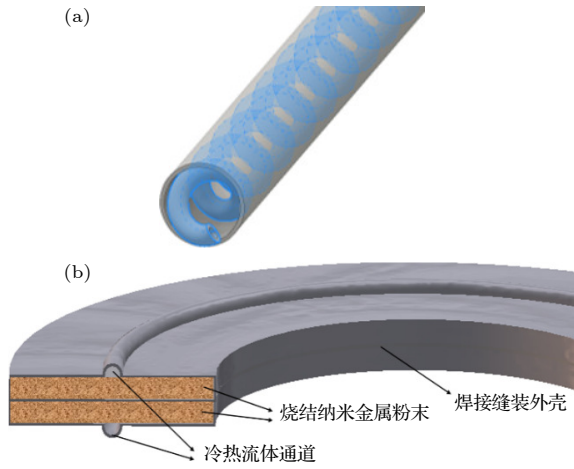


图 14 换热器结构示意图 (a) 螺旋套管换热器; (b) 纳米烧结银粉换热器

Fig. 14. Schematic of the heat-exchanger: (a) Tube-in-tube; (b) sintered nano silver powder.

纳米银粉换热器 (阶梯式换热器) 是利用一定尺寸的银粉或铜粉经过特定的工艺烧结到一起, 组成有巨大换热面积的换热器, 同时具有很小的体积. 通常, 银粉烧结的比表面在  $1.5 \text{ m}^2/\text{g}$  以上, 本实验室研制的银粉换热器比表面积可达到  $2.5 \text{ m}^2/\text{g}$ .

对于换热器的设计计算, 根据 Kapitza 热阻的表达式, 根据图 15 所建立的换热器模型示意图, 可以列出浓相、稀相两侧的能量方程:

$$s_D \frac{d}{dz} \left( kd \frac{dT_D}{dz} \right) + \mu V_D^2 \frac{dz_D}{dz} + \frac{dA}{dz} (T_C^4 - T_D^4) \alpha = \dot{n} C_D \frac{dT_D}{dz}, \quad (13)$$

$$s_C \frac{d}{dz} \left( kc \frac{dT_C}{dz} \right) + \mu V_C^2 \frac{dz_C}{dz} + \frac{dA}{dz} (T_C^4 - T_D^4) \alpha = \dot{n} C_C \frac{dT_C}{dz}, \quad (14)$$

其中  $s$  表示截面积,  $k$  表示导热系数,  $\mu$  表示黏度,  $V$  表示体积流量,  $A$  表示换热面积,  $C$  表示比热, 下标 C, D 分别表示浓相、稀相,  $\alpha$  表示 Kapitza 热导, 推导为  $\alpha = 1/(4R_{\text{KM}})$ . 对此式进行离散求解, 即可得到换热器的温度分布情况. (13) 式、(14) 式经过一定的推导可以求解得出一个换热器出口浓相温度的近似表达式:

$$T_C^2(0) = 50R_{\text{KM}} \dot{n} \frac{1}{A}. \quad (15)$$

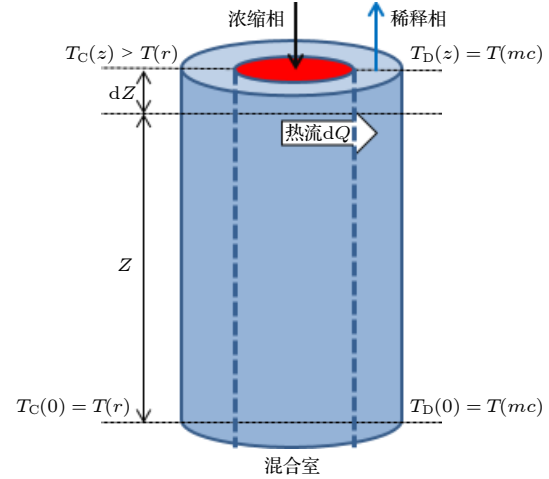


图 15 极低温逆流换热器计算模型图<sup>[70]</sup>

Fig. 15. Calculation model diagram of extremely low temperature counter-flow heat exchanger<sup>[70]</sup>.

根据 (15) 式可以求解某流量和换热器长度下的浓相出口温度理论值, 例如, 对于 CuNi 合金 (Cu-70%, Ni-30%) 套管换热器, 理论上最低温度与流量、换热面积关系为  $T_{\text{mc}} = \sqrt{0.13 \dot{n}/A}$ . 此式表明, 更低的温度要求更大的换热面积以及较低的流量.

将 (15) 式与制冷表达式 (10) 式耦合可以得到:

$$T_{\text{mc}}^2 = 6.25R_{\text{KM}} \frac{\dot{n}}{A} + 0.01 \frac{\dot{Q}}{\dot{n}}, \quad (16)$$

$$\dot{Q} = -\frac{625R_{\text{KM}}}{A} \dot{n}^2 + 96T_{\text{mc}}^2 \dot{n}. \quad (17)$$

(16) 式、(17) 式分别表明稀释制冷机最低温度、制冷功率与换热器参数和流量之间的关系, 对于特定的制冷机设计而言, 由 (16) 式可以得到产生最低温度时的流量为  $\dot{n} = \sqrt{\dot{Q}A/6250R_{\text{KM}}}$ , 面积无限大时, 最低温度约为 5 mK. 由 (17) 式可得到制冷功率最大化时的流量为  $\dot{n} = 0.0768T_{\text{mc}}^2A/R_{\text{KM}}$ . 这对获取更大的制冷功率、提升制冷效率而言具有一定的意义.

## 4.2 蒸发器<sup>3</sup>He 蒸气压及超流氦爬膜

稀释制冷过程的循环工质主要是<sup>3</sup>He, 如何将<sup>3</sup>He 从蒸发器 (认为<sup>3</sup>He 单独蒸发分离则成为蒸馏器) 中有效分离出来是实现整机稳定循环的关键.<sup>3</sup>He 的蒸发分离主要是利用<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 混合溶液在极低温下两个组分分蒸气压的不同. 由于<sup>3</sup>He 的分蒸气压远大于<sup>4</sup>He 分蒸气压, 只需要将蒸发器蒸发压力稳定控制在一个接近对应于蒸发器温度的<sup>3</sup>He 分饱和蒸气压而远高于相应温度<sup>4</sup>He 分饱和蒸气压的压力, 即可尽量保证<sup>3</sup>He 蒸发, 而<sup>4</sup>He 几乎不蒸发. 纯的<sup>3</sup>He 和<sup>4</sup>He 的饱和蒸气压与温度相关,  $P_v^0 = f(T)$ , 而对于二元混合液而言, 其饱和蒸气压还与组分的含量有关.

蒸发器内<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 混合液压力为<sup>3</sup>He 压力及<sup>4</sup>He 压力之和, 即

$$P = P_3 + P_4. \quad (18)$$

对于某一<sup>3</sup>He 摩尔分数  $x_3$ , <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 混合液内<sup>3</sup>He 及<sup>4</sup>He 分压力分别为<sup>[71]</sup>

$$P_3 = aP_3^0 x_3, \quad P_4 = P_4^0(1 - x_3), \quad (19)$$

式中,  $P_3^0$  和  $P_4^0$  表示纯的同位素的饱和蒸气压,  $a = 4.75(1/T - 0.17)$ ,  $P_4^0 = 0.292\text{Pa}$ ,  $P_3^0 = 179.876\text{Pa}$ .  $x_3$  表示<sup>3</sup>He 摩尔分数,  $a$  为关于  $T$  变量.

表 3 所示为不同蒸发器温度对应的循环所需蒸发器<sup>3</sup>He 摩尔分数及混合液中<sup>3</sup>He 及<sup>4</sup>He 蒸气压计算值. 为了保证蒸发器中<sup>3</sup>He 蒸发同时<sup>4</sup>He 不蒸发, 只需要控制蒸发器中的压力在<sup>3</sup>He 及<sup>4</sup>He 分蒸气压  $P_3$  及  $P_4$  之间即可. 但实际蒸发的气体中总是会混有一部分<sup>4</sup>He, 需要将温度和压力控制在一个更合适的值, 以在减少蒸发<sup>4</sup>He 同时更好地蒸发出<sup>3</sup>He, 工程上通常将蒸发器温度控制在 0.7 K, 蒸发器压力控制在 5 Pa 以下. 为了增大<sup>3</sup>He 循环速率、提高制冷功率, 气体循环系统中的循环分子泵和前级泵也需要提供足够的抽速, 一套高氦通量的

循环泵组也是抽取<sup>3</sup>He 的关键.

蒸发器中的液体<sup>4</sup>He 处于超流状态, 超流氦会在蒸发器的内壁中向上往高温区爬行并蒸发, 使得循环气体中的无效气体成分(<sup>4</sup>He) 增多. 因此, 蒸发器的出口位置应设置抑制超流氦爬膜的结构以减少<sup>4</sup>He 的蒸发. 通常, 超流氦爬膜抑制结构采用小孔或刀口结构. 小孔结构能够减小超流氦爬膜的周长从而减小爬膜量, 尖锐的刀口能够减小超流氦爬膜的厚度.

根据超流氦的热机械效应, 超流氦倾向于从较低温度处向较高温度处爬行, 还可以在内部设置加热管路以抑制超流氦继续爬行, 如图 16 所示.

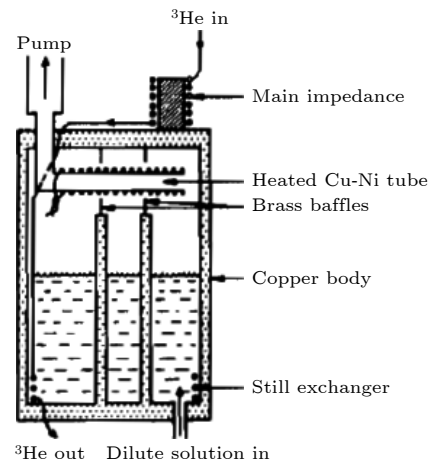


图 16 一种采用加热线抑制超流氦爬膜的蒸发器结构<sup>[11]</sup>

Fig. 16. The still structure using heating wires to restrain superfluid helium from climbing the film<sup>[11]</sup>.

## 4.3 渗透压与<sup>3</sup>He 渗透扩散阻力

渗透压是作用于溶质原子的内在压力, 基于超流体的二流体模型, 稀相混合溶液中的溶质原子有<sup>3</sup>He 原子及超流<sup>4</sup>He 中的正常态<sup>4</sup>He 原子, 其渗透压分别为<sup>3</sup>He 在溶液中的渗透压和<sup>4</sup>He 喷泉压.

经典稀释制冷机中, <sup>3</sup>He 在混合室经过稀释制冷过程后, 经过换热器稀相管路内混合溶液, 向温

表 3 蒸发器温度对应的<sup>3</sup>He 及<sup>4</sup>He 蒸气压

Table 3. <sup>3</sup>He and <sup>4</sup>He vapor pressures corresponding to evaporator temperature.

蒸发器温度/K	$P_{30}/\text{Pa}$	$P_{40}/\text{Pa}$	$x_3/\%$	$a$	$P_3/\text{Pa}$	$P_4/\text{Pa}$	$(P_3+P_4)/\text{Pa}$	$[P_3/(P_3+P_4)]/\%$
0.9	695	5.542	0.78	4.47	24.23	5.499	29.73	81.51
0.8	378	1.526	0.88	5.13	17.06	1.513	18.58	91.86
0.7	180	0.30375	1	5.98	10.76	0.301	11.06	97.28
0.6	70.6	0.037485	1.2	7.11	6.02	0.037	6.06	99.39
0.5	20.5	0.002178	1.4	8.69	2.49	0.0021	2.50	99.91
0.4	3.59	0.001	1.8	11.07	0.72	0.0010	0.72	99.86

度较高的蒸发器中渗透从而蒸发逸出, 实现分离和循环. 这个迁移的驱动力即为渗透压差, 即理论上  $^3\text{He}$  是从渗透压高的地方向渗透压低的地方渗透, 如图 17 所示.

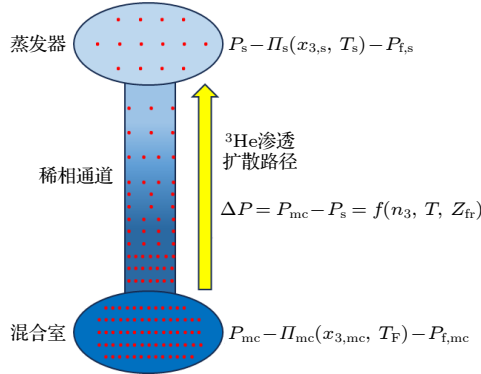


图 17 稀释单元稀相管路内的渗透压平衡关系图

Fig. 17. Osmotic pressure balance diagram in dilute phase pipeline of dilution unit.

混合溶液中  $^4\text{He}$  的化学势经过热力学一般关系推导可以得到 [11]:

$$\mu_{4D} \Big|_{0,0,0}^{P_B, T_B, x_{DB}} = \int_0^{P_B} V_4 dP - \int_0^{T_B} S_4 dT - \int_0^{x_{DB}} \frac{x_D}{1-x_D} \left( \frac{\partial \mu_{3D}}{\partial x_D} \right)_{T,P} dx_D, \quad (20)$$

其中右侧 3 项分别表示溶液压力、喷泉压、 $^3\text{He}$  渗透压:

$$\int_0^{P_B} V_4 dP = V_4 P_D, \quad (21)$$

$$\int_0^{T_B} S_4 dT = V_4 P_f, \quad (22)$$

$$\int_0^{x_{DB}} \frac{x_D}{1-x_D} \left( \frac{\partial \mu_{3D}}{\partial x_D} \right)_{T,P} dx_D = V_4 \Pi. \quad (23)$$

由于稳定运行状态下, 混合室中的混合溶液处于费米简并态, 而蒸发器中的混合溶液处于经典态, 根据两种状态下的温度关系, 可以得到两种状态下的渗透压表达式分别为 [11]

$$\Pi_s = \frac{R}{V} x_{3s} T_s, \quad (\text{经典}) \quad (24)$$

$$\Pi_{\text{Fermi}} = \frac{2N x_m k_B T_F(x_m)}{5V}. \quad (\text{简并}) \quad (25)$$

图 18 所示为不同的温度和浓度下的渗透压具体值. 理想平衡情况下, 二者渗透压相等, 可以得到对于  $T = 0.01 \text{ K}$ 、 $^3\text{He}$  摩尔分数为 0.064 的混合

室状态, 与温度为  $0.7 \text{ K}$  的蒸发器渗透压平衡时, 得到蒸发器的摩尔分数接近 0.01, 通过此计算还可以延伸得到各蒸发器状态下 (经典状态) 的渗透压平衡浓度.

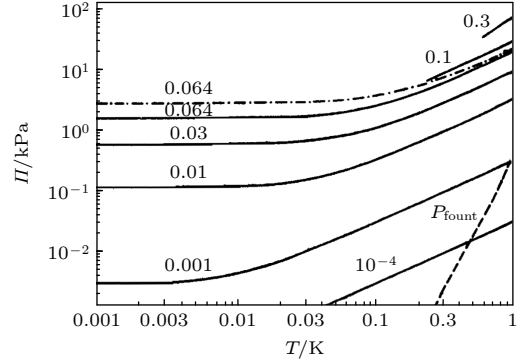


图 18 文献 [11,27,72] 中给出的渗透压数值

Fig. 18. Osmotic pressure values given in Ref. [11,27,72].

但在实际情况下, 混合室与蒸发器之间始终存在一个阻力, 使得混合室内  $^3\text{He}$  溶质的渗透压低于蒸发器. 将 (21) 式—(23) 式代入  $^4\text{He}$  的 N-S 方程:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + F + \nu \nabla^2 v. \quad (26)$$

无黏超流下可以得到:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla (P_D - P_f - \Pi + \rho g z). \quad (27)$$

忽略重力项和喷泉压,  $P_D = 0$  时,  $\mu_4(T, x_d) = \mu_4^0(T) - V_4^0 \Pi(T, x_d)$ . 那么在稳态情况下  $^4\text{He}$  化学势不变时有:

$$(P_D - \Pi)_{mc} = (P_D - \Pi)_s. \quad (28)$$

即在维持化学势不变的趋势下, 混合室与蒸发器间的渗透压差为

$$\Delta \Pi = \Delta P_D, \quad (29)$$

其中, 压降的流动阻力的关系可以表示为 [50]

$$\frac{dP}{dZ(L)} = -\eta \dot{v}_D. \quad (30)$$

说明实际情况下  $^3\text{He}$  渗透扩散要克服管路阻力, 才能维持从混合室向蒸发器中进行有效渗透, 这个阻力使得蒸发器内  $^3\text{He}$  溶质的渗透压偏低, 相同温度下摩尔分数偏低, 从而影响整机循环. 因此, 在实际设计中, 应尽可能避免过大的稀相管路阻力, 一般稀相管路内的压降应比对应的渗透压低 1 个数量级. 但也不能追求过低的阻力, 否则稀相管路尺寸过大, 造成气体用量过多.

#### 4.4 其他因素

除以上机理性的影响因素外,还有许多非机理性的因素会影响稀释制冷机的性能,例如气体用量、测量干扰、振动等.

$^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  气体的用量应保证在稀释制冷机运行的温度范围内,浓相、稀相界面始终位于混合室内部,蒸发器气相、液相界面始终位于蒸发器内部.这需要对稀释制冷机的整机结构尺寸进行计算,通常相界面和气液界面都设计在中部位置.在用气量合适的情况下,随着稀释制冷过程的发生,稀释单元的最低温度会从蒸发器逐步过渡到套管换热器、银粉换热器,最终达到混合室.最终,若浓相/稀相界面的位置位于混合室中,套管换热器、银粉换热器的出口温度和混合室的温度梯度呈逐步下降,即最低温度出现在混合室内;反之则温度梯度异常.若相界面的位置位于混合室前(即浓相管内部),则最低温度会出现在换热器中,稀释制冷速度缓慢,需要增大  $^3\text{He}$  用量;若  $^3\text{He}$  过量,会使得混合室内相界面紊乱(可能同时出现在混合室底部或稀相管内部),可能导致稀释制冷温度过高,此时需要在蒸发器中将部分  $^3\text{He}$  回收.

极低温下的电学测量问题也会产生较大影响.测量电流过大会使得测量温度偏高.由于极低温下,温度计的测量电流是 nA 甚至 pA 量级,测量环境中的电磁干扰、振动干扰等也会对测量结果产生严重的影响.为减少测量干扰,实验设备应尽可能接地,引线应尽可能固定牢靠,真空罩内部应保持较低的电磁干扰.在引线低温和常温侧设置滤波器,能有效减少高频信号干扰.

稀释制冷实验中对力学干扰也非常敏感.来自机械制冷机、真空泵组等的震动都会直接造成稀释单元内部液体的震颤,动能直接转化为热能造成一定的温升,同时还会造成温度计和测量引线的震动从而引起较大的测量干扰.要实现 10 mK 乃至更低的温度,稀释制冷机恒温器与外界、前级制冷机之间应做好解耦或抗振隔离,使得混合室附近的震动维持在  $1\ \mu\text{m}$  以下.

限于篇幅,对于非机理性的影响因素,本文不展开讨论,有兴趣的读者可以参阅极低温实验技术方面的文献.

## 5 总结与展望

本文介绍了稀释制冷技术的制冷根本机理和

工作原理,总结了经典稀释制冷机、冷循环稀释制冷机、 $^4\text{He}$  循环稀释制冷机及空间稀释制冷机的实现形式和研究进展,讨论了其各自的应用场合和优缺点.基于经典稀释制冷机,分析了实现典型性能(例如单组稀释单元最低温度低于 10 mK、制冷功率大于  $400\ \mu\text{W}@100\ \text{mK}$ )的关键影响因素,为稀释制冷技术的研究提供参考.

在全球量子计算行业热情高涨、量子比特数大幅增大,但稀释制冷技术发展却进入瓶颈期的大背景下,经典稀释制冷机的大功率化将成为地面应用的发展趋势,新一代大功率稀释制冷机的研发迫在眉睫.由于我国稀释制冷技术研究自 20 世纪 90 年代中断失传后,长期几乎为一片空白,近年才开始有所研究和突破,大功率稀释制冷机的需求也为我国在该领域发展提供了一次新的机遇.

然而,稀释制冷机的大功率化还存在许多难点.目前实现  $0.5\ \text{mW}@100\ \text{mK}$  以内的制冷性能只需要单组稀释单元即可实现,要实现 5 mW 以上甚至更高的制冷功率,则需要很多组稀释单元的阵列,使得制冷机非常庞大、成本高昂、能耗大.如果能将单组稀释单元的性能大幅提高,将有效减少稀释单元阵列数量、减少体积和成本.但单组稀释单元性能的提高,就必须突破克服渗透阻力、超大面积换热等关键问题,以突破现有技术瓶颈.目前国际上大功率稀释单元研发也处于起步阶段,我们没有现成的技术路径可供参照,只能靠自主创新实现技术突破.为此,我国必须大力加强对于稀释制冷机理的研究,才能真正掌握这门尖端技术.这正是本文的初衷所在.

## 参考文献

- [1] Zheng M W, Wei L J, Quan J, Lin P, Liang J T, Zhao M G. 2020 *Low Temp. Phys.* **41** 211 (in Chinese) [郑茂文, 卫铃佼, 全加, 林鹏, 梁惊涛, 赵密广 2020 低温物理学报 **41** 211]
- [2] Uhlir K 2015 *Cryogenics* **66** 6
- [3] Scholz P A, Kraft-Bermuth S, Andrianov V 2016 *J. Low Temp. Phys.* **184** 576
- [4] Zheng M W, Quan J, Wang N L, Li C Z, Zhao M G, Wei L J, Liang J T 2019 *J. Low Temp. Phys.* **19** 1
- [5] London H 1951 *Proceeding of International Conference on Low Temperature Physics* (Oxford: Oxford University Press) p157
- [6] Das P, Ouboter R D B, Taconis K W 1965 *9th International Conference on Low Temperature Physics* (London: Olenum Press) 1965 p1253
- [7] Zheng M W, Li J G, Guo H W, Wei L J, Pan Z J, Li Rui X, Chen H L, Liang J T 2024 *Cryogenics* **138** 103802
- [8] Loumasmaa O V 1979 *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **12** 668
- [9] Zhao Z Y, Wang C 2020 *Cryogenic Engineering and*

- Technologies* (New York: CRC Press) p317
- [10] Guglielmo V, Lara R 2008 *The Art of Cryogenics* (British: British Library) p143
- [11] Lounasmaa O V 1974 *Experimental Principles and Methods Below 1K* (New York: Academic Press INC)
- [12] Edwards D O, Pettersen M S 1992 *J. Low Temp. Phys.* **87** 3
- [13] Wilks J 1967 *The Properties of Liquid and Solid Helium* (Oxford: Clarendon Press)
- [14] Walker E J, Fairbank H A 1960 *Phys. Rev. Lett.* **5** 139
- [15] Graf E H, Lee D M, Reppy J D 1965 *Phys. Rev. Lett.* **19** 417
- [16] Edwards D O, Daunt J G 1961 *Phys. Rev.* **124** 640
- [17] van Leeuwen J M J, Cohen E G D 1961 *Physica* **27** 1157
- [18] Masaki N, Yoshiko F, Toshinobu S 1987 *Jpn. J. Appl. Phys.* **26** 69
- [19] White G K 1968 *Experimental Techniques in Low Temperature Physics* (Oxford: Clarendon Press)
- [20] Wheatley J C, Rapp R E, Johnson R T 1971 *J. Low Temp. Phys.* **4** 1
- [21] Abel W R, Wheatley J C 1968 *Phys. Rev. Lett.* **21** 1231
- [22] Wheatley J C, Vilches O E, Abel W R 1968 *Phys.* **4** 1
- [23] Mota A C, Platzcek R P, Rapp R E, Wheatley J C 1969 *Phys. Rev.* **177** 266
- [24] Radebaugh R, Siegwarth J D 1971 *Phys. Rev. Lett.* **27** 796
- [25] Radebaugh R, Siegwarth J D 1971 *Cryogenics* **11** 368
- [26] Peterson R E, Anderson A C 1973 *J. Low Temp. Phys.* **11** 639
- [27] Kuerten J G M, Castelijn C A M, de Waele A T A M, Gijnsman H M 1985 *Cryogenics* **25** 419
- [28] Peshkov V P 1970 *Cryogenics* **10** 3
- [29] Bunkov Y M, Guénault A M, Hayward D J, Jackson D A, Kennedy C J, Nichols T R, Miller I E, Pickett G R, Ward M G 1991 *J. Low Temp. Phys.* **83** 257
- [30] Vermeulen G A, Frossati G 1987 *Cryogenics* **27** 139
- [31] Ran Q Z, Qian Y J, Zhu Y J 1979 *Low Temp. Phys.* **1** 18 (in Chinese) [冉启泽, 钱永嘉, 朱元贞 1979 低温物理 **1** 18]
- [32] Uhlig K, Hehn W 1993 *Cryogenics* **33** 1028
- [33] Uhlig K, Hehn W 1994 *Cryogenics* **3** 587
- [34] Uhlig K, Hehn W 1997 *Cryogenics* **37** 279
- [35] Koike Y, Morii Y, Igarashi T, Kubota M, Hiresaki Y, Tanida K 1999 *Cryogenics* **39** 579
- [36] Uhlig K 2004 *Cryogenics* **44** 53
- [37] Uhlig K 2008 *Cryogenics* **48** 138
- [38] Sakon T, Nojiril H, Koyama K 2003 *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** 140
- [39] Herrmann R, Ofitserov A V, Khlyustikov I N 2005 *Instrum. Exp. Tech.* **48** 5
- [40] Shvarts V, Zhao Z, Bobb L, Jirmanus M 2009 *J. Phys. Conf. Ser.* **150** 1
- [41] Uhlig K 2009 *International Cryocooler Conference 15*, Long Beach, California, June 9–12, 2009 p15497
- [42] Umeno T, Maehata K, Ishibashi K 2010 *Cryogenics* **50** 314
- [43] Singh V, Mathimalar S, Dokania N, et al. 2013 *Pramana J. Phys.* **81** 719
- [44] Hata T, Matsumoto T, Obara K 2014 *J. Low Temp. Phys.* **175** 471
- [45] Mikheev V A, Maidanov V A, Mikhin N P 1984 *Cryogenics* **24** 190
- [46] Mohandas P, Cowan B P, Saunders J 1994 *Physica B* **194** 55
- [47] Prouvé T, Luchier N, Duband L 2008 *Cryocoolers 15* California, US, June 9–12, 2008 p497
- [48] Teleberg G, Chase S T, Piccirillo L 2006 *SPIE Conf. Ser.* **6275** 62750D
- [49] Sivokon V E, Dotsenko V V, Pogorelov L A, Sobolev V I 1992 *Cryogenics* **32** 207
- [50] Zu H Y, Cheng W J, Wang Y N, Wang X T, Li K, Dai W 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 080701 (in Chinese) [祖红叶, 程维军, 王亚南, 王晓涛, 李柯, 戴巍 2023 物理学报 **72** 080701]
- [51] Pennings N H, de Bruyn Ouboter R, Taconis K W 1976 *Physica* **84B** 249
- [52] Pennings N H, Taconis K W, de Bruyn Ouboter R 1976 *Physica* **81B** 101
- [53] Pennings N H, Taconis K W, de Bruyn Ouboter R 1976 *Physica* **84B** 102
- [54] Satoh N K, Satoh T, Ohtsuka T, Fukuzawa N, Satoh N 1987 *J. Low Temp. Phys.* **67** 195
- [55] Duband L, Hui L, Lange A 1990 *Cryogenics* **30** 263
- [56] Roach P R, Helvensteijn Ben P M 1999 *Cryogenics* **39** 1015
- [57] Benoit A, Pujol S 1994 *Cryogenics* **34** 421
- [58] Sirbi A, Pouilloux B, Benoit A, Lamarre J M 1999 *Cryogenics* **39** 665
- [59] Sentis L, Delmas J, Camus P, et al. 2005 *Cryocoolers 13* New York, US 2005 pp533–542
- [60] Triqueneaux S, Sentis L, Camus P, Benoit A, Guyot G 2006 *Cryogenics* **46** 288
- [61] Martin F, Vermeulen G, Camus P, Benoit A 2010 *Cryogenics* **50** 623
- [62] Roach P R, Helvensteijn B P M 1999 *10th International Cryocooler Conference* MONTEREY, CA, May 26–28, 1999 pp647–653
- [63] Chaudhry G, Vermeulen G 2012 *J. Low Temp. Phys.* **169** 90
- [64] Chaudhry G, Volpe A, Camus P, Triqueneaux S, Vermeulen G 2012 *Cryogenics* **52** 471
- [65] Camus P, Vermeulen G, Volpe A, Triqueneaux S, Benoit A, Butterworth J, D'Escrivan S, Tirolien T 2014 *J. Low Temp. Phys.* **176** 1069
- [66] Nagata A, Sugita H, Shinozaki K, Sato Y 2018 *Cryocoolers 20* Burlington, VT, June 18–21, 2018 pp357–367
- [67] Keisuke S, Kenichiro S, Yoichi S, Hiroyuki S, Kazuhisa M, Takao N, Shoji T, Katsuhiko N, Gerard V, Philippe C, Sebastien T, Sylvain M, Stephane D 2016 *Trans. JSASS Aerospace Tech.* **14** 27
- [68] Chandra M B, Nisith Kr D 2017 *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **171** 012143
- [69] Harris J P 1979 *J. Low Temp. Phys.* **37** 1
- [70] Zheng M W 2022 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Science/ Technical Institute of Physics and Chemistry) (in Chinese) [郑茂文 2022 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学/理化技术研究所)]
- [71] Betts D S (translated by Jin D, Ran Q Z, Cao L Z) 1995 *Ultra Low Temperature Technologies* (Hefei: Press of University of Science and Technology of China) (in Chinese) [Betts D S 著 (金铎, 冉启泽, 曹烈兆 译) 1995 极低温 (mK) 技术概论 (北京: 中国科学技术大学出版社)]
- [72] Chaudhry G 2009 *Ph. D. Dissertation* (Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology)

## INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

**Dilution refrigeration technology\***Zheng Mao-Wen<sup>1)2)</sup> Guo Hao-Wen<sup>1)3)</sup> Wei Ling-Jiao<sup>1)2)†</sup> Pan Zi-Jie<sup>1)‡</sup>Zou Jia-Run<sup>1)3)</sup> Li Rui-Xin<sup>1)2)</sup> Zhao Mi-Guang<sup>1)2)</sup>Chen Hou-Lei<sup>1)2)</sup> Liang Jing-Tao<sup>1)2)3)</sup>

1) (*Key Laboratory of Technology on Space Energy Conversion, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Beijing 100190, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 29 August 2024; revised manuscript received 14 September 2024 )

**Abstract**

Dilution refrigerator, as a refrigeration technology that can obtain extremely low temperatures below 10 mK, is widely used in fields such as quantum computing, and condensed matter physics. The development of the most widely used typical dry dilution refrigerators has been relatively mature, while there is little research on other types of dilution refrigerators, and there is a lack of comprehensive and systematic research on dilution refrigeration technology.

This paper focuses on the current status of dilution refrigeration technology research, introduces its basic principles, and points out that the fundamental reason for continuous refrigeration is the limited solubility of <sup>3</sup>He in <sup>4</sup>He and the difference in enthalpy between the concentrated phase and the dilute phase. This paper summarizes the realization forms and research progress of typical dilution refrigerators, <sup>4</sup>He cycle dilution refrigerators, cold cycle dilution refrigerators, and space dilution refrigerators, and discusses their respective application occasions and advantages and disadvantages. From the Kapitza thermal resistance, osmotic pressure, and resistance, this paper analyzes the key influencing factors and design calculation methods for realizing dilution refrigerators below 10 mK, which provides reference for studying dilution refrigeration technology.

**Keywords:** ultra low temperature, dilution refrigeration, quantum computing, Kapitza resistance

**PACS:** 07.20.Mc, 07.05.Fb, 07.57.-c

**DOI:** [10.7498/aps.73.20241211](https://doi.org/10.7498/aps.73.20241211)

**CSTR:** [32037.14.aps.73.20241211](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20241211)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52406002) and the Research Program of Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, China (Grant No. CRYO20230202).

† Corresponding author. E-mail: [weilingjiao@mail.ipc.ac.cn](mailto:weilingjiao@mail.ipc.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [panzijie@mail.ipc.ac.cn](mailto:panzijie@mail.ipc.ac.cn)



## 稀释制冷技术

郑茂文 郭浩文 卫铃佼 潘子杰 邹佳润 李瑞鑫 赵密广 陈厚磊 梁惊涛

### Dilution refrigeration technology

Zheng Mao-Wen Guo Hao-Wen Wei Ling-Jiao Pan Zi-Jie Zou Jia-Run Li Rui-Xin Zhao Mi-Guang  
Chen Hou-Lei Liang Jing-Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 230701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241211

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 冷凝泵型稀释制冷机实验研究

Experimental analysis of condensation-pump dilution refrigerators

物理学报. 2023, 72(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222257>

#### 用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机

Ultra-low temperature adiabatic demagnetization refrigerator for sub-Kelvin region

物理学报. 2021, 70(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202237>

#### 稀释制冷机及其中的热交换问题

Dilution refrigerator and its heat transfer problems

物理学报. 2021, 70(23): 230202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211760>

#### 硅和锗量子计算材料研究进展

Research progress of silicon and germanium quantum computing materials

物理学报. 2021, 70(21): 217802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211492>

#### 量子存储式量子计算机与无噪声光子回波

“Quantum memory” quantum computers and noiseless photon echoes

物理学报. 2022, 71(7): 070305 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212245>

#### 硅基半导体量子计算研究进展

New progress of silicon-based semiconductor quantum computation

物理学报. 2022, 71(23): 230301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221900>