

文章编号:1000-582X(2002)08-0147-04

液体⁴He 的低温特性及其前沿应用*

林德华,毋志民,佟存柱,张杰

(重庆大学数理学院应用科学与技术系,重庆 400044)

摘要:分析了⁴He的相图和液体⁴He的λ相变,讨论了在不同的温度和压强下相变的类型,指出了液体⁴He被称为量子液体的基本原因,介绍了He I的基本特性,如粘滞系数、热导率,对声波的吸收系数,以及凝聚气体模型。阐述了He II的反常特性,其中最重要的是超流动性,另外,还介绍了与液体⁴He相关的几种前沿应用,如超导电性,激光冷却原子和量子霍尔效应等。

关键词:液体⁴He;相变;低温特性;应用

中图分类号:O512.1

文献标识码:A

以液氦为基础的低温物理学作为物理学中的重要分支始于本世纪初,在该领域中,一方面开展基础研究,如超导、超流、介观物理等;另一方面促进低温技术的发展,如稀释致冷、绝热去磁致冷、激光冷却等。

1 液体⁴He 的低温特性

1.1 ⁴He 的相图和液体⁴He 的λ相变

1908年,荷兰物理学家卡末林·昂内斯首先液化⁴He得到了液态⁴He。⁴He的临界点 $T_c = 5.20\text{ K}$, $P_c = 0.28\text{ MPa}$,在一个标准大气压(0.101 325 MPa)下的沸点为 4.215 K。⁴He的相图如图1所示^[1]。在常压下,液体⁴He即使处于绝对零度也不会变成固体,这是由于量子力学不确定性原理得出的固氦零点能较大的缘故^[1]。因此,液体⁴He又称为量子液体。为了使液体⁴He固化,只有采用加压的方法,让原子间距离缩

小。在一般的物质中,凝固点是由范德瓦尔斯力和热运动之间的平衡来决定。对于⁴He,由于它是单原子分子,而且原子序数仅为2,它的分子要比其它任何元素组成的分子都小,范德瓦尔斯力也比其它物质都要弱,因此量子力学的零点能量,对于力平衡来说不再可以忽略。由实验结果,在饱和蒸气压下,当液体⁴He的温

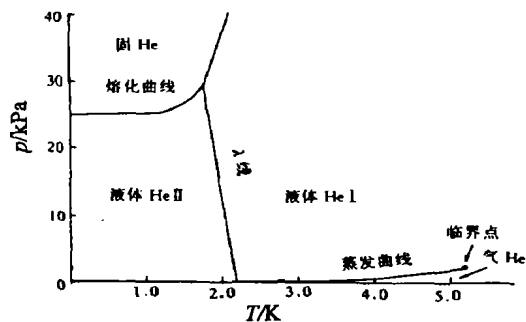


图1 ⁴He相图

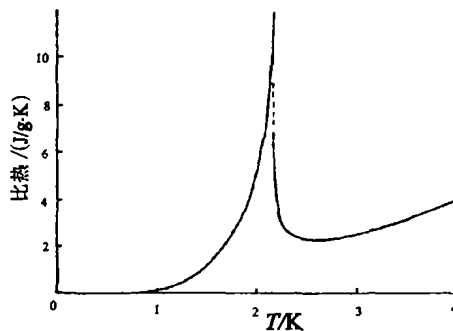


图2 在饱和蒸汽压下液体⁴He的比热

度降到 2.17 K 左右时,它的密度和介电常数,都出现明显的极大值,这表明在此温度发生了某种相变。为了确定相变的类型和性质,开色姆曾测量了相变潜热,排除了一级相变的可能性,对于比热的测量可见图2^[1]。在 $T = 2.17\text{ K}$ 附近出现比热跳跃,几乎可以肯定在液体⁴He中发生的是二级相变,由于曲线的形状像希腊字母“λ”,所以也称λ相变。另一个表征二级相变的量是膨胀系数,它在相变点也存在跳跃:在相变点以

* 收稿日期:2002-04-10

作者简介:林德华(1945-),男,江苏人,重庆大学副教授。主要从事低温和超导的研究。

上,膨胀系数是正的,在相变点以下,膨胀系数是负的,但当 $T < 1.2 \text{ K}$ 时,膨胀系数又变为正值,不过绝对值很小。通常我们把相变点温度称为 T_λ ,图 1 显示,当 $T > T_\lambda$ 时,把液体 ^4He 称为液体 He I;当 $T < T_\lambda$ 时称为液体 He II。进一步,由 X 射线衍射实验、中子衍射实验等表明,这种 λ 相变并没有引起结构上的变化。

1.2 He I 的特性

He I 的动力学性质与正常经典液体的性质无多大差别,若应用凝聚气体模型来进行描述,与 He I 的实验测量值符合得比较好。

He I 的粘滞系数 η 在饱和蒸气压下是一个常数,与温度无关。在常密度下测量的粘滞系数与温度的关系,除 λ 点附近变化较大外,低密度时 η 随温度的下降而减小;高密度时, η 随温度的下降而增加,与液体氩的实验结果类似。

液体 He I 的热导率 K 比较小,它的实验测量值与气体 ^4He 的热导率相比,除了绝对值稍大些外,随温度的变化关系与气体 ^4He 是非常相似的。

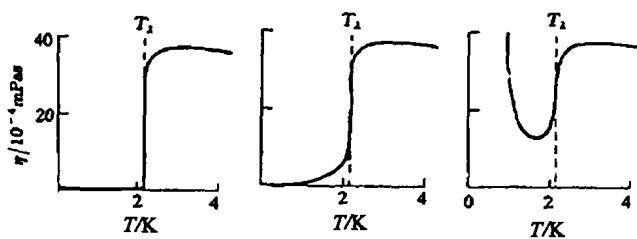
由气体动力学理论给出的热导率 K ,粘滞系数 η 和定容比热 C_v 的关系, $k/\eta\omega = 2.5$ 对液体 He I 基本上也是成立的。

而液体 He I 对声波的吸收系数也能用经典气体中声吸收的 Stokes - Kirchoff 公式来描述。总之,液体 He I 除了零点能必须加以考虑外,均类似于经典粒子的凝聚气体。

1.3 He II 的特性

λ 线以下的液体 He II 具有很多反常的性质。测量液体的粘滞系数通常有 3 种等价的方法,即泊肃叶方法、扭转圆盘法和同心圆筒法。对常规液体而言,其中也包括液体 He I,用以上 3 种方法测出的 η 值应该是相同的,但是对液体 He II 却得到 3 种不同的结果,见图 3^[1]。用泊肃叶法测量液体 He II 的 η 值要比 He I 小 10^{11} 倍,实际上是等于零的。因此液体 He II 称为超流液体,或称它具有超流动性,与液体 He II 的超流动性相关的现象称为“氦膜爬行”。

液体 He II 中的热导率 K 非常高,当温度降到 λ 点以下时,原来沸腾着的液体 ^4He 会突然变得很平静,这是由于 He II 的高热导率使底部吸收的热量迅速传至表面,以表面蒸发代替沸腾的缘故。液体 He II 的热导率要比银或铜高几千倍,而且与样品的形状和温差大小都有关系,因此变得十分复杂。



a. 泊肃叶法 b. 扭转圆盘法 c. 同心圆筒法

图 3 液体 ^4He 的粘滞系数

如果在 2 个容器 A 和 B 中间,用一根很细的毛细管连接,并且在毛细管中插入一根不锈钢丝,这对常规液体而言根本无法通过,见图 4^[1]。开始实验时, A、B 2 个容器都装满液体 He II,液面高度以及所处温度都相等。现在容器 A 上加一个净压强 ΔP , He II 可以通过毛细管流至容器 B,而且 A 的温度高于 B 的温度,产生温差 ΔT ,此称机械-热效应。反之,若在容器 B 中加一热量使其温度升高 ΔT ,则容器 A 中的液体会流至容器 B 中,形成一个压强差 ΔP ,此称热-机械效应,有时也称“喷泉效应”。

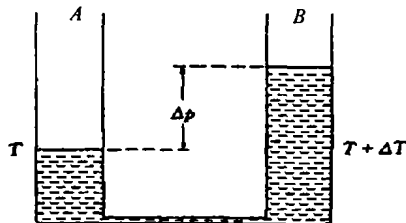


图 4 热-机械效应示意图

另外,液体 He II 的比热测量结果可见图 5^[1]。其中当 $T < 0.6 \text{ K}$ 时,比热正比于 T^3 ;当 $0.6 \text{ K} < T < 1.4 \text{ K}$ 时,比热正比于 $T^{6.2}$ 。

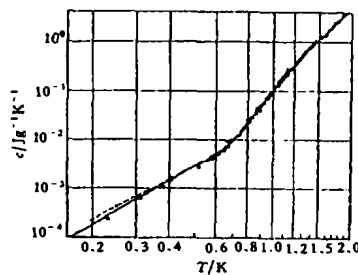


图 5 He II 的比热

2 几种典型的前沿应用

2.1 超导电性的发现与研究

液体⁴He 的获得,对于昂内斯 1911 年首次发现汞的超导电性是极为重要的。因为只有通过液化氦而获得更低的温度,才有可能研究各种物质在这新的低温区的性质,也才有可能发现超导电性。由于昂内斯创造了在液氦温度下进行实验研究的可能性,并开辟了对于物理学有着重大意义的低温超导领域,他荣获了 1913 年度的诺贝尔物理学奖^[2]。直到 1985 年,尽管发现了许多种超导材料,但临界温度 T_c 最高也只有 23 K 左右,因此这些超导材料的研究和应用通常都必须在液氦环境中进行。现在大家习惯所称的低温超导体,就是指液氦温区工作的超导体。甚至临界温度 T_c 高于 77 K 的高温超导体,在实际应用中有时也需要液氦作为工作环境。

2.2 激光冷却与捕陷原子技术

由于氦的液化提供的低温环境,往往是进军绝对零度(虽不可达到,但可逐步逼近)的基础,有许多致冷技术就是在这个进军过程中发明出来的。操纵、控制孤立的原子一直是物理学家追求的目标之一,由于原子永不停息地热运动,要想操纵、控制原子,首先必须使原子“冷”下来,也就是要尽可能把它的速度降低到极低点,这样才有可能将原子在一定时间内控制在某个空间小区域中进行研究和应用。激光冷却和捕陷原子技术就是一种实现上述目标的方法,采用这种技术,将大大提高高分辨光谱研究的精度和观测的灵敏度,从而有力地推动原子、分子物理学的发展。采用这项技术还将开辟新的原子、分子物理和光物理的研究领域,如原子光学、德布罗意光学;另外,采用激光冷却和捕陷技术形成的所谓“超冷原子”(可达 20 nK)具有许多新特点,例如经碰撞可以形成分子、出现量子阈值行为、影响碰撞动力学等,另一方面是当原子的温度足够低、原子气体的浓度足够高时可形成玻色-爱因斯坦凝聚,也就是大量原子处于相同的最低量子态。1995 年利用激光冷却和捕陷技术首次观察到了玻色-爱因斯坦凝聚^[3]。

在现实的应用方面,其中前景最好的是原子频标的应用,可望将目前原子钟的精度提高 2 个数量级。另外,借助光陷技术可制成能控制住 20 nm ~ 10 μ m 尺度的微粒的“光镊”,并用以控制住 DNA 分子进行长时

间研究。

2.3 量子霍尔效应

1980 年,克利青博士等发现了一个惊人的现象^[4],在强磁场(18 T)和低温(1.5 K)条件下,在“二维电子气”系统中,观察到了垂直于电场和磁场方向的电导呈现出一系列几乎是理想的平台,即常数值,而平行电导为零。实验发现这些平台是 $e^2/h = 1/25\ 812.8\ \Omega$ 以为单位量子化的,这一结果的精度至少达到 10^{-8} 量级,从而改进了这一基本常数的测量精度,并导致新的便携式电阻标准的诞生,这就是量子霍尔效应。为此,克利青荣获了 1985 年度的诺贝尔物理学奖。1982 年,美国贝尔实验室的华裔科学家崔琦等人在更低磁场和温度(如 20 T, 0.1 K)下意外地发现了一种新的量子霍尔效应^[5,6]。观测到霍尔电导以 e^2/h 的 $1/3$ 、 $2/5$ 和 $2/7$ 等为单位的量子化现象,通常称为分数量子霍尔效应。这种分数量子霍尔效应,涉及到物质的一种全新的未曾预料到的有序状态,在这种状态中,一种新型的具有分数电子电荷的元激发起了主要的作用。为此,崔琦等人荣获了 1998 年度的诺贝尔物理学奖。

3 结束语

液氦是低温物理学中具有标志性的低温液体,因此,对液体⁴He 的低温特性及其相关应用的了解是非常必要的。

参考文献:

- [1] 曹烈兆. 低温物理学[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1999.
- [2] 林德华. 超导物理基础与应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1992.
- [3] M. H. ANDERSON, J. R. ENSHER, M. R. MATTHEWS, et al. Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor[J]. *Science*, 1995, 269: 198.
- [4] VON KLITZING K. Nobel Lecture. *Rev[J]. Mod. Phys*, 1986, 58: 519.
- [5] D. C. TSUI, H. L. STORMER, A. C. GOSSARD. Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme quantum limit[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 48(22): 1 559.
- [6] H. L. STORWER, A. CHANG, D. C. TSUI, et al. Fractional quantization of the Hall Effect[J]. *Physical Review Letters*, 1983, 50(24): 1 953.

Properties at Low Temperatures and Related Advanced Applications of Liquid ^4He

LIN De-hua, WU Zhi-min, DONG Cun-zhu, ZHANG Jie

(Department of Applied Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This article analyzes the phase diagram of ^4He and λ phase transition of liquid ^4He . Discusses the sorts of the phase transition with various temperature and pressure. Indicates the fundamental cause about liquid ^4He named after quantum liquid. Introduces basic properties of He I, such as viscosity coefficient, thermal conductivity, absorption coefficient of sound, and studies with condensed gas model, then to elaborate on the abnormal properties of He II, Superfluidity is the most important in all. In addition, introduces also some related advanced applications, for example, superconductivity, atoms cooled by laser, quantum Hall Effect, etc.

Key words: liquid ^4He ; phase transition; properties at low temperature; application

(责任编辑 成孝义)

(上接第 146 页)

Exploration of Feasibility of Applying on Ground-Source Heat Pump in Western Region of China

WANG Yong, SANG Chun-lin, ZHANG Yi-zhuo, ZHU Zi-wei

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The brief introduction to properly applying HVAC to the sustainable west development of China is made in this article. The advantage of GSHP, a branch of HVAC, is also presented briefly here. The emphasis is put on the fact that this system is a green one which sustainable and practicable characters. At the same time, the comparison between the key technique of GSHP and the geological condition that the system should adjust to is made, which reveals the key point of applying GSHP. According to environment condition, three types of areas are divided in the western regions of China. The feasibility of applying GSHP in each area is explained respectively and the related scheme of applying the system is also summed up.

key words: ground-source heat pump; west; feasibility

(责任编辑 李胜春)