

///

高水平大学重点学科建设教材·物理学科

G AODENG WULI
SHIYAN JINGXUAN

高等物理实验精选

吴柏枚 刘洪图 谢建平 王声波 李银妹 编著

3

中国科学技术大学出版社

高水平大学重点学科规划建设教材·物理学科

高等物理实验精选

吴柏枚 刘洪图 谢建平 王声波 李银妹 编著

中国科学技术大学出版社
合肥

内 容 简 介

本书是在中国科学技术大学物理系高等物理实验课程基础上,精选了凝聚态物理和光电子技术领域新开设的五个综合性的高等物理实验。这些实验在强调物理学基础实验的基础上融汇了教员的科技成果,引入新技术,浓缩提炼成教学实验,是将科技成果引入物理实验的探索与实践。本书共分五章:低温下材料的物理性质与测试技术;薄膜材料制备与性能测试;光学相干性;激光技术及强激光与物质相互作用;光的力学效应及皮牛顿力的测量。各章节中,除了介绍编排的实验外,在很大程度上加强了对该领域的实验技术及其有关原理的论述,旨在解决学生不仅知其然,而且知其所以然的问题,从而加强学生知识创新意识和科技创新能力的训练。

本书供物理学、光电子技术及其他有关学科高年级学生和研究生作为教材使用,也可供从事相关领域教学和研究工作的教师和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等物理实验精选/吴柏枚等编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2005.8
高水平大学重点学科建设教材·物理学科
ISBN 7-312-01775-4

I. 高… II. 吴… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015386 号

书 名:高等物理实验精选

著作责任者:吴柏枚

责任编辑:张善金

标准书号:ISBN 7-312-01775-4/O·303

出 版 者:中国科学技术大学出版社

地 址:合肥市金寨路 96 号中国科学技术大学东校区 邮编:230026

网 址:<http://www.press.ustc.edu.cn>

电 话:发行部 0551-3602905 邮购部 3607380 编辑部 3602910

电子信箱:press@ustc.edu.cn

印 刷 者:合肥现代印务有限公司

发 行 者:中国科学技术大学出版社

经 销 者:全国新华书店

开 本:787mm×960mm 1/16 印张:14.25 字数:320 千

版 次:2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:18.00 元

序

基坚本固方可枝繁叶茂。高校的首要任务是教学，高水平的教学必须把研究和教育结合起来。长期工作于中国科学技术大学教学和科研第一线的教授们，积累了丰富的教学经验和体会，在教学改革中，探索将科技成果引入物理实验，《高等物理实验精选》正是他们多年心血的结晶。

本书精选的实验是源于科研项目的原创性实验，一方面保持了物理本科教学的基础性，另一方面也注重科研成果和高新技术的融合。本书鲜明的特点在于对专业基础知识的讲解简明透彻，对高新技术先进性的展示不求全面但力求深入。这些实验摆脱了传统的实验教学模式，从内容、时间以及方式上很大幅度地增加了灵活性和机动性，旨在本科教学中提升科技创新能力。本书不是单一的实验指导书，而是通过实验论述原理与方法的基础教材，解决学生不仅知其然，而且知其所以然的问题。从整体内容设计上看，本书是一



本较为优秀的基础物理教材，值得推荐给高年级学生和研究生以及讲授或学习物理实验的教师和学生。希望有更多、更好的有助于提高学生知识创新能力的优秀教材问世，以推动我国高等教育事业向着更加繁荣的方向发展。

杨国桢

2005年6月28日

杨国桢教授为中国科学院院士，长期担任中国科学院物理研究所所长，现兼任中国科学技术大学理学院院长。——编者注



前 言

20 世纪是迄今为止人类科学发现最为丰富的世纪，特别是自上世纪 80 年代以来，信息革命的浪潮席卷全球，知识创新日新月异，高新技术不断涌现，极大地推动着人类文明和社会进步。作为现代自然科学基础之物理学的发展无疑起着先导和开创的作用，因而成为现代最具活力的带头学科。

中国科学技术大学物理系在教学改革中，加强高等物理实验课程建设，探索将科技成果引入物理实验。这就是将科研实验室的最新研究成果经过精炼，核心抽取，内容升华，实验简化，最终转化为教学实验。这些实验在教学内容上注重基本物理基础知识的讲解与高新技术先进性的融合，突出对科学实验原理的分析、提炼。在教学方法上更大程度地放手让学生独立地、系统地完成一个物理研究的全过程实践，可以成功，也可能失败。但必须是成功有道，失败在理。也就是说，要求学生在实验过程中不仅要解决知其然，而且要解决知其所以然的问题。从而提高学生的知识创新意识和科技创新能力。实验自 1999 年和 2000 年筹备并完成以来，已为高年级本科生和研究生开课。教学实践证明，融汇科技成果和高新技术的教学实验激发了学生的兴趣和思考。多适应性的综合实验技能训练，有益于学生在知识、能力和素质上的全面提高。本书精选了凝聚态物理和光电子技术领域新开设的五个综合性高等物理实验，将原有的教学内容从深度和广度上进一步提高与扩展，并汇编成本教材。

本书共分五章。分别由长期工作在教学、科研第一线，有丰富经验的教授编写，他们也是各个具体实验的构思者、设计者和负责人。在编写过程中，力求内容简明，重点加深，突出原理分析，不列详细实验，使之别具特色。我们认为，要掌握一门实验技术，重要的是要理解产生这门实验技术特点的原因。在各章节中，除了介绍编排的实验内容外，还在很大程度上加强了对该领域的实验技术及其有关原理的论述，并适当增添一些与学科前沿有关的应用。因此，本书不是传统意义上的实验指导书，而是通过实验论述原理与方法的基础教材。

本书各章内容具有相对的独立性，在总纂时除了在总体结构上力求全书统一之外，还保留了各章作者的撰写特点。各章的编者为：第一章吴柏枚；第二章刘洪图；第三章谢建

平；第四章王声波；第五章李银妹。中国科学院院士杨国桢教授在百忙中挤出时间审阅了本书的全部内容，并欣然为本书作序，对本书的出版给予了较高的评价和热情的支持；中国科学技术大学理学院、教务处和研究生院为本书的编写和出版提供了必要的条件和帮助，在此一并谨致深谢！

我们第一次编写这样直接源自科研成果的实验教程，在内容编写和文字表达方面，缺点和疏漏在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2005年5月8日

目 次

序	(I)
前 言	(III)
第一章 低温下材料的物理性质与测试技术	(1)
1.0 引言	(1)
1.1 低温基础技术	(2)
1.1.1 低温液体的性质和使用	(2)
1.1.2 低温液体的贮存和输送	(5)
1.1.3 小型制冷机	(7)
1.2 低温恒温器	(11)
1.2.1 高真空绝热恒温器	(11)
1.2.2 减压降温恒温器	(12)
1.2.3 漏热恒温器	(13)
1.2.4 连续流恒温器	(14)
1.2.5 制冷机冷却的低温恒温器	(14)
1.2.6 PPMS 简介	(15)
1.3 材料低温物性的实验研究与测试技术	(16)
1.3.1 材料的电特性与直流测量	(17)
1.3.2 材料的磁特性与交流测量	(18)
1.3.3 低温温度控制与自动化	(20)
1.3.4 测量过程自动化	(21)
1.4 材料的低温物性与测试技术实验内容和安排	(23)
1.4.1 实验目的与要求	(23)



1.4.2 本实验提供的技术条件·····	(24)
1.4.3 实验安排·····	(24)
1.4.4 实验内容·····	(25)
附录·····	(26)
参考文献·····	(29)
第二章 薄膜制备和性能测试·····	(30)
2.0 引言·····	(30)
2.1 真空科学和技术·····	(31)
2.1.1 气体分子运动论的基本公式·····	(31)
2.1.2 气体输运和泵抽速·····	(34)
2.1.3 真空泵·····	(37)
2.1.4 真空系统·····	(43)
2.2 真空蒸发镀膜的物理基础·····	(45)
2.2.1 蒸发速率·····	(45)
2.2.2 合金蒸发·····	(46)
2.2.3 多元化合物(氧化物)的蒸发·····	(48)
2.2.4 薄膜的厚度均匀性和纯度·····	(49)
2.3 溅射工艺·····	(51)
2.3.1 等离子体的物理基础·····	(52)
2.3.2 溅射物理·····	(55)
2.3.3 直流(DC)溅射·····	(57)
2.3.4 射频(RF)溅射·····	(60)
2.4 ITO薄膜及其制备·····	(62)
2.4.1 ITO膜的基本性质·····	(62)
2.4.2 蒸发法制备ITO膜·····	(65)
2.4.3 溅射法制备ITO膜·····	(68)
2.5 薄膜的电学和光学特性及其测量·····	(71)
2.5.1 ITO薄膜的电学特性及其测量·····	(71)

2.5.2 ITO 薄膜的光学特性及其测量	(78)
2.6 实验安排	(90)
2.6.1 制样及其薄膜性能测试条件	(90)
2.6.2 实验步骤	(91)
参考文献	(93)
第三章 光学相干性实验	(96)
3.0 引言	(96)
3.1 光学相干性	(97)
3.1.1 单色和非单色光的干涉条纹	(97)
3.1.2 扩展光源对干涉条纹的影响	(104)
3.1.3 干涉条纹清晰程度的描述	(107)
3.1.4 互相干函数	(110)
3.2 光学相干性实验原理和方法	(118)
3.2.1 光学相干性实验原理	(118)
3.2.2 光学相干性实验方法	(119)
3.3 光学相干性系列实验	(128)
3.3.1 全息双频光栅参数测量	(128)
3.3.2 空间相干性实验	(130)
3.3.3 时间相干性实验	(132)
3.3.4 透镜像差的测量	(134)
3.3.5 光栅自成像效应	(136)
参考文献	(139)
第四章 激光技术及强激光与物质相互作用实验	(140)
4.0 引言	(140)
4.1 高功率激光的获得	(141)
4.1.1 固体(Nd:YAG)激光振荡原理	(141)
4.1.2 固体激光调 Q 原理	(146)

4.1.3 固体(Nd:YAG)激光放大(行波放大)原理	(156)
4.2 强激光与物质相互作用基本过程	(158)
4.2.1 高功率激光与非线性晶体(KTP)相互作用的倍频原理与技术	(158)
4.2.2 强激光与金属相互作用的热效应和冲击力学效应	(162)
4.3 激光技术及强激光与物质相互作用实验内容	(164)
4.3.1 总体实验光路的构成	(164)
4.3.2 激光实验光路的调整方法	(165)
4.3.3 激光参数的测试方法及仪器	(167)
4.3.4 实验内容	(168)
参考文献	(175)
第五章 光的力学效应系列实验	(177)
5.0 引言	(177)
5.1 光的线性动量及其力学效应	(179)
5.1.1 光的动量	(179)
5.1.2 梯度力与散射力	(180)
5.1.3 光学陷阱	(183)
5.1.4 光镊—单光束梯度力光阱	(185)
5.2 光的自旋角动量及其力学效应	(188)
5.2.1 光的角动量与光致旋转	(188)
5.2.2 自旋角动量的传递与扭力矩	(189)
5.2.3 影响光致旋转效应的因素	(192)
5.3 光镊微操作系统与技术	(195)
5.3.1 光镊微操作系统基本构造	(195)
5.3.2 光镊的横向操控与纵向操控	(197)
5.3.3 显微动态过程的观测和记录	(197)
5.3.4 微粒的微小位移的测量	(199)
5.3.5 光阱力的测量	(200)
5.3.6 光阱刚度的标定	(201)



目 次

5.3.7 光镊中光致旋转实验的基本设备·····	(202)
5.4 光的力学效应系列实验·····	(204)
5.4.1 光的线性动量的力学效应·····	(204)
5.4.2 光的自旋角动量产生的力学效应·····	(209)
5.5 展望光镊技术的应用前景·····	(213)
参考文献·····	(214)

第一章 低温下材料的物理性质与测试技术

1.0 引 言

自 1908 年荷兰科学家昂纳斯将最后一个“永久气体”氦气液化,成功地获得 4.2K (即 -269°C)的低温以来,低温物理、超导电技术及其他低温技术的研究和应用发展很快。稀释制冷机、绝热去磁等技术的发展,开辟了 mK 温区的新研究领域,一些以前在较高温度下观察不到的物理现象陆续被人们所发现。当外界温度极低,物质热运动能量大大降低,被热运动所掩盖的物质内部相互作用所决定的固有性质便凸现出来,给人们带来了一些意想不到的效应,使得对物质状态和性质随温度变化的研究变得非常有趣。在物理学、化学、材料科学、空间技术及其他性质上有密切联系的领域中,低温已成为研究物质性质的极端条件之一。低温的最基本效应是减小热运动引起的无序,揭示物质的本征性质,从而引导人们更好地理解自然界中以多种不同方式形成的凝聚态物质的性质和现象,以及只有在低温环境下才能出现的新现象,包括新相的产生,新有序态的形成等等。所以,低温物理是物理学中一个十分重要的研究领域。

材料的各项物理性能参数(密度、弹性、电阻、热容、热传导,热膨胀、热电势、磁性、相变点等等)是研究材料内部结构和变化过程的重要线索,也是使用材料的依据。温度在材料性质研究中是决定性的变量之一。研究材料在低温下的物理性质首先要对材料在低温下的各项物理性能参数做大量的实验与测试。因而要学习低温实验的原理与方法,了解低温实验的特点,建立准确可靠的低温实验装置和选择合适的实验方法。

本章前面两节讲述进行低温实验的基础技术,包括低温液体的使用,小型制冷机的运行以及实用低温恒温器等,这些是低温物理实验所必须具备的最基本的知识。后两节围绕本综合实验所设计的内容,介绍材料在低温下的物理性质以及测试技术的原理和方法,它包括材料在低温下的电性质、磁性质和常用的测试技术,以及计算机控温、实时数据采集与处理在物性测试中的应用等。本章设计的综合性实验是在液氮和小型制冷机两种低温环境下进行,配有两套代表性的低温恒温器,设计了最基本的直流测量和交流测量。在加强基础同时,选择与当前凝聚态物理研究方向相关的几类代表性系列试样进行实验,使读者熟悉和掌握材料

的物理性能参数随温度变化的基本概念和低温下测试技术的基本知识点。本实验涉及的基础知识面广，实用性强，突出了低温下实验工作的特殊性。希望读者从这一章中既可以获得一个低温物理实验工作者所必备的专业知识，又可以顺利地完成本实验。当然，低温物理的研究面广，相应的测试方法也很多，因篇幅有限，有兴趣的读者可以有针对性地查阅相关专著和文献。

1.1 低温基础技术

1971 年，国际制冷学会对 0°C 以下温区进行划分，建议温度高于 120K 为冷冻温区， 120K 与 0.3K 之间的温区为低温温区，低于 0.3K 为超低温温区。在低温温区的物理实验中，常用沸点比室温低得多的低温液体作冷源。将试样或实验装置浸泡在低温液体中，借低温液体的蒸发得以冷却。除了低温液体作冷源外，近年来，在高温超导和低温物性研究中，小型制冷机越来越多地被使用，特别适合于缺乏低温液体或野外工作的场合。

1.1.1 低温液体的性质和使用

在低温物理实验中，常用的低温液体和它们的物理性质列于表 1.1。

表 1.1 常用低温液体和物理性质

物理量名称和单位		氧	氮	氖	正常氢	仲氢	氦 4	氦 3
摩尔质量 (g)		31.9988	28.0134	20.179	2.01594	2.01594	4.00260	3.01603
三相点	温度 (K)	54.361	63.146	24.559	13.951	13.8044		
	压强 (Pa)	150.0	12530.0	43379	7205	7042		
正常沸点	温度 (K)	90.188	77.344	27.102	20.3905	20.2734	4.2221	3.1971
	液体密度 (kg/m^3)	1142	808.6	1207	70.96	70.786	125	59.3
	蒸汽密度 (kg/m^3)	4.4756	4.614	9.499	1.331	1.338	16.89	
	汽化潜热 (kJ/kg)	212.3	198.64	87.03	445.6	445.5	20.413	8.6
临界点	温度 (K)	154.576	126.200	44.45	33.19	32.976	5.197	3.317
	压强 (MPa)	5.043	3.4000	2.73	1.315	1.2928	0.22746	0.1146
	密度 (kg/m^3)	436.2	314.03	483.0	30.12	31.43	69.58	41.45
0°C 1atm 气体密度 ^① (kg/m^3)		1.429	1.2508	0.8999	0.08988	0.08988	0.1785	0.134
0°C 1atm 气体与等质量液体的体积比		799.2	646.5	1341	789.9	787.6	700.3	443
显热 (kJ/kg)		194	234	282	3510	4010	1543	

① atm 为标准大气压，属于非法计量单位， $1\text{atm}=101\,325\text{Pa}$ 。

因为氮气和氦气为惰性气体,使用安全,所以实验室中最常用的低温液体是液氮和液氦。液氧和液氢主要用作火箭的液体燃料。

浸泡在低温液体中的实验试样或装置靠低温液体的蒸发而被冷却。低温液体汽化时要吸收一定的热量,即为汽化潜热。因此,低温液体的汽化潜热越小,冷却实验装置并使其保持在低温所消耗的低温液体就越多。如果用低温蒸汽冷却,则是靠低温蒸汽在升温过程中吸收热量,此为显热。对于等压过程,其值等于升温时气体焓值的增加,所以显热是标志低温冷蒸汽的冷却能力。

一、液氮

液氮的正常沸点是 77.344K,能通过工业规模的生产(空气液化分馏)比较经济地获得。液氮无色无味、不燃不炸,贮藏和使用都很方便、安全,并且有较高的冷却能力,在低温实验中得到广泛的应用。液氮的沸点和凝固点之间的温差约为 15K,由于比较狭窄,因此当使用机械泵减压时极容易变成固体,其固体是一种无色透明的结晶。

液氮主要用做 63K~300K 的冷源。将试样直接浸泡在低温液体中,试样温度降到 77K。如果将浸泡有试样的液氮容器封闭起来,用真空泵降低容器内氮蒸汽的压强,液氮温度可降到 63K。还可以设计制作以液氮作冷源的专门装置(低温恒温器),使试样获得 63K~300K 的中间温度。当试样直接浸泡在盛有低温液体的敞口容器中,平衡时的温度大约是 77K。如果实验要求较精确的温度值,则平衡后必须考虑到环境大气压强、浸泡深度以及空气中氧的不断凝入等因素造成的修正。

两物体(温度分别为 T_H 和 T_L)之间的辐射传热通量

$$\Phi = \sigma A F (T_H^4 - T_L^4) \quad (1.1.1)$$

式中, F 为两物体表面之间的净发射率, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数, A 为表面积。 Φ 与 $(T_H^4 - T_L^4)$ 成正比。当 $T_H \gg T_L$ 时, $T_H^4 - T_L^4 \approx T_H^4$ 。由 (1.1.1) 式,辐射传热很强地依赖于热物体的温度 T_H 。在低温工作中,常把盛有液氢或液氮的杜瓦放在液氮容器中使这些低温液体的环境温度从室温降到 77K,则仅由辐射漏热造成的低温液体损失量将减少 230 倍。

液氮的汽化潜热很小(见表 1.1),制取困难,价格昂贵。实验前要先用液氮将装置预冷到 77K 附近,以节省液氮。因为将固体材料从室温冷却到低温液体正常沸点所需的冷量为材料在这两个温度下的焓值差。例如,1kg 铜在从 300K 冷却到 4.2K 的过程中,300K 与 4.2K 的焓值差为 79.6kJ/kg,而 77K 到 4.2K 的焓值差为 6.02kJ/kg,两者之比 $6.02/79.6=7.6\%$ 。这就是说,液氮完成了整个冷却任务的 92.4%,所以液氮实验用液氮预冷可大大节省液氮的消耗。这个结论具有普遍意义,因为一般物质的比热容在 77K 时都已减

到很小，再继续冷却就比较容易了。

液氮还应用于氮液化器的预冷、纯化器的冷却以及真空技术中的冷阱等。

二、液氮

自然界的氮由质量数为 4 和 3 的两种稳定同位素组成，可写成 ^4He 和 ^3He 。大气中相对丰度为 $1:1.3\times 10^{-6}$ 。通常所说的氮如不特别注明，均指 ^4He 。

液氮与普通液体有着极不相同的特性，这是由反映微观粒子运动规律的量子效应所引起的。因此常把液氮称为量子液体。其量子效应的两个突出表现是零点能效应和 λ 相变。由于零点能效应，液氮在常压下降温不固化。氮的密度低，汽化潜热小，光折射率以及介电常数与气体相近，而氮气的显热却是很大的，因此在液氮实验中不但要用液氮预冷或液氮保护，而且要充分利用冷氮气的显热来冷却试样或者装置，以节省液氮消耗，使低温实验维持较长的时间。

图 1.1 为 ^4He 的相图。常压下液氮减压降温不固化，而是在 $T_\lambda=2.176\text{K}$ 处液氮突然变得平静，不再沸腾。液氮相（He I 相）变成了另一个新的液相（He II 相）。液氮在 T_λ 处发生的相变称为 λ 相变， T_λ 称为 λ 点，He II 相为超流相。

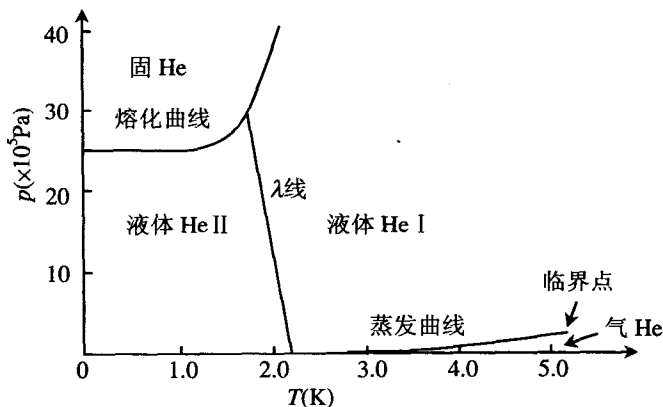


图 1.1 ^4He 相图

必须指出，低温液体的正确使用是使低温实验得以顺利进行的先决条件。在液氮使用中要特别注意如下几点：

(1) 液氮的沸点低、汽化潜热小，生产成本低，要用优良的绝热容器保存。汽化后的氮气一般都回收。

(2) 氮原子小，可渗透玻璃。因此玻璃液氮杜瓦的真空夹层为“活真空”，在液氮

实验后要将进入夹层的氦气“冲洗”干净。

(3) He II 的超流性使它可以无阻地通过小达 $1\mu\text{m}$ 的微孔, 引起所谓“超漏”。所以用于 λ 点温度以下的实验装置要非常仔细地设计、加工和检漏。如: 尽量避免焊接, 采用整体车制等。

(4) He II 液面以上的器壁表面都有一层液氦膜, 以一定的速度沿固体表面爬行, 引起质量转移。爬行膜会增大液氦的蒸发率, 使 λ 点以下的减压降温难以进行。

1.1.2 低温液体的贮存和输送

1892 年, 英国科学家詹姆斯·杜瓦 (James Dewar) 发明了存放低温液体的双层壁真空绝热容器。至今, 几乎所有贮存低温液体容器的设计都是以杜瓦的发明为基础, 因此常称这些容器为杜瓦容器。

按制作材料, 杜瓦容器可分为玻璃杜瓦和金属杜瓦。玻璃杜瓦简单便宜, 且直观, 但易损坏。在室温下氦气能渗透入真空夹层使绝热性能下降。金属杜瓦牢固耐用, 可以根据不同需要制作成不同形状, 但制作较困难, 价格较贵。从使用角度看, 杜瓦容器又可分为实验用杜瓦和贮存用杜瓦。贮存用的杜瓦容器又称贮槽, 其容积较大, 液体的蒸发率低。

图 1.2 给出了一个实验室比较通用的长直圆筒形金属杜瓦瓶。内筒用薄壁无缝不锈钢管制作。夹层采用多层绝热, 即在真空夹层中由铝箔和含碳玻璃纤维纸隔层包扎。铝箔上端用铜丝捆扎在与不锈钢内筒焊接的一层层的铜环上。于是, 由侧壁和底板投射到铝箔上的辐射热可传到杜瓦上部并由杜瓦内壁的冷蒸汽流带走。低温实验装置 (低温恒温器) 一般吊在杜

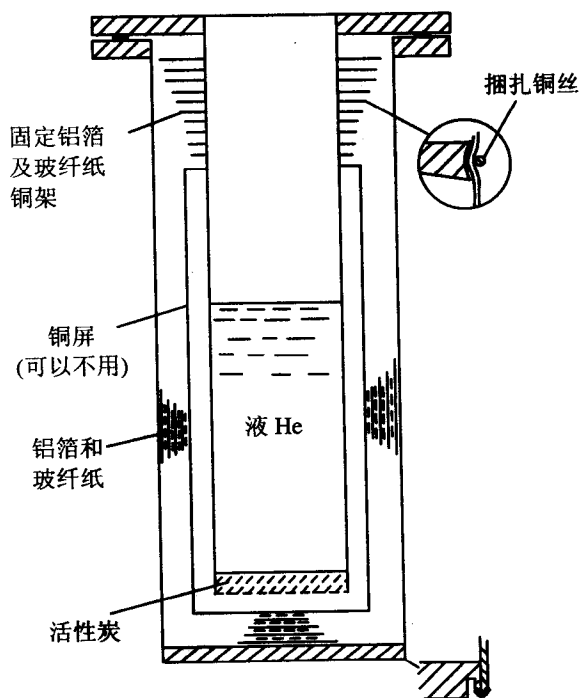


图 1.2 多层绝热的实验用金属杜瓦