



低温技术与设备丛书

# 超导应用 低温技术

王惠龄 汪京荣 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

低温技术与设备丛书

# 超导应用低温技术

王惠龄 汪京荣 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书立足于编著者科学研究实践与创新,力求突出跨学科和实用性的两个特色,促进低温工程与超导物理、材料科学及超导应用等多学科的交叉与渗透,寻求技术综合性的结合点。

全书共10章。第1章是低温工程学基础,从工程热力学与传热学的角度,针对超导应用低温技术阐明理论分析基础与依据。第2章阐述超导电性基本概念及基本参数的实验方法。第3章从超导应用的角度,全面、系统而深入地论述低温超导材料(LTS)和高温超导材料(HTS)的研究与发展。第4章立足于著者研究的基础,提出固-固接触三维界面热阻新思路,对超导应用低温技术研究的热点,阐述直接冷却应用技术基础研究。第5章为低温温度的测量原理、方法、应用及标准。第6章为真空技术基础及应用。第7章为低温流量的测量原理与方法。第8章为超导应用的低温杜瓦装置、制冷机及低温绝热技术。第9章为二元电流引线和超导磁体冷却技术。第10章以编著者从事高温超导磁储能低温系统装置技术的研发为切入点,概述低温强磁场在大科学工程中的应用。在书中及书末编录了超导应用低温技术中常用的技术数据,以供查阅。

本书可供从事超导应用、低温技术、超导材料、能源科学与国防工程等科技工作者和大专院校有关专业的师生作为有益的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

超导应用低温技术/王惠龄,汪京荣编著. —北京:国防工业出版社,2008.1

(低温技术与设备丛书)

ISBN 978-7-118-05382-1

I. 超... II. ①王...②汪... III. 超导-应用-低温工程  
IV. TB6

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第153817号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 22¼ 字数 546 千字

2008年1月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 41.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 《低温技术与设备》丛书编委会

主 编 陈国邦 王如竹 华泽钊

委 员 (按姓氏笔画排序)

王如竹 王惠龄 华泽钊 陈国邦

吴裕远 罗二仓 张 鹏

当今低温工程的应用领域包含了航空航天、高能物理、电子技术、机械系统、空间模拟、红外遥感、生物医学、食品加工、材料回收、过程工业等各个方面。可以说,低温技术已经渗透到了国民经济的许多领域。

低温技术的发展可以追溯到1877年,是Cailletet和Pictet液化了氧气。1879年Linde创立了Linde公司,使得空气的液化和分离变成了产业,并在许多工业领域以及基础研究中获得了应用。

在此之前,一般工业气体的液化可以通过蒸气压缩式制冷来实现,而对于那些临界温度低于273K的气体,则在室温下不可能用蒸气压缩的方法使之冷凝。后来的研究发现,这些“永久性气体”需要采用具有预冷的气体绝热膨胀制冷,或者绝热放气制冷,或者气体多级节流等方法来实现液化。可见低温气体的液化制冷方法与普通制冷流体不同,但是低温流体与普通制冷工质之间并没有严格的分界线。根据第13届国际制冷大会(1971)的建议,将沸点低于120K左右的流体定义为低温流体。当然,获得低温需要消耗更多的功,要获得纯质的低温气体或液体(氮、氧、氢、氦等)需要专门的气体液化和分离技术,并涉及低温绝热问题。总之,低温的获得、保持和应用构成了低温系统的三个要素。

我国低温技术的发展已有50多年历史,它与我国的国防工业、航天技术、冶金工业及能源工业关系密切,发挥了重要作用。改革开放后,由于电子工业、化学工业等现代工业的需求,我国气体工业得到了飞速发展。最近几年则由于天然气资源的开发和利用,液化天然气工业得到了新的发展机遇。

国民经济和国防技术的需求,以及从事低温技术研究和应用的技术人员的明显增长,迫切需要相应的低温技术参考书籍,作为学校教材的补充或满足深入研究的向导。《低温技术与设备》丛书正是在这个背景下应运而生的,它包括了《低温流体热物理性质》、《氮-4和氮-3及其应用》、《热声制冷技术原理及应用》、《低温工业气体制取技术及应用》、《超导应用低温技术》、《低温传热与设备》等。可以看出,这些新书既是一般的低温原理与技术教材的深化,又是对现有低温图书的补缺。

应国防工业出版社之约,我们组织了这套丛书,并分别审查了有关书稿。书稿作者都是工作在低温技术与设备领域的研究人员,不乏资深教授和卓有成绩的

青年学者,例如,西安交通大学的吴裕远教授长期从事气体液化和分离的研究和教学工作,对国内外低温气体行业的发展有深刻的把握;上海交通大学的张鹏教授从事低温液氮研究近10年,对氮-3和氮-4的重要性和规律性有较深刻的认识;中国科学院理化技术研究所的罗二仓研究员执着研究热声制冷多年,近年来在热声发动机及其与脉管制冷机结合制冷方面取得了一系列显著成绩;华中科技大学的王惠龄教授长期从事低温超导的相关理论基础及其实验技术工作,曾经在此领域发表了系列研究论文;浙江大学陈国邦教授长期从事低温制冷研究,在此过程中积累了低温流体热物理性质的大量数据,并形成了具有自己特色的低温流体热物理性质处理方法,使得大多数的低温流体热物理性质有案可查。在与低温流体相关的两本书中,浙江大学的黄永华博士等在数据整理以及模型化、图形化和数据化方面做了深入的工作,这些工作使得数据不再单调枯燥,并使查找、使用低温数据变得容易。

相信《低温技术与设备》丛书将为我国低温技术研究和设计人员提供不少方便,也会给我国低温领域的研究生和教师提供很多有价值的参考。诚然这些书不可能提供低温领域的所有信息,但是它们却为低温领域的广大读者提供了方便的工具。

《低温技术与设备》丛书编委会

2005年6月

## 前 言

低温技术是超导应用的前提和基础。超导应用展现了从强磁场应用到生命科学弱电信号检测领域的重大科学意义。涉及未来新能源开发、大科学工程等重大应用,具有跨越高新技术和多学科的前沿领域的吸引力。

本书在著者科学研究和工作实践经验的基础上,为超导应用低温技术崇尚创新,立足于提出自己的思路与观点。在全书的体系上力求突出跨学科和实用性的两个特色。在内容上,促进低温工程与超导物理、材料科学及超导应用等多学科的交差与渗透,寻求技术综合性的结合点。在结构上,立意从实用出发,具有简明的实际意义,为低温技术、超导应用、超导材料不同领域的科学工作者提供学科渗透交叉结合的平台,其目的是进一步适应超导应用的发展。

全书除绪论外共 10 章。第 1 章是低温工程学基础,从工程热力学与传热学的角度,针对超导应用低温技术阐明理论分析基础与依据。第 2 章阐述超导电性基础概念及超导材料基本特性参数的实验方法。第 3 章从超导应用的角度,全面、系统而深入地论述低温超导材料(LTS)和高温超导材料(HTS)的研究与发展。第 4 章立足于著者研究的基础,提出固-固接触三维界面热阻新思路,对超导应用低温技术研究的热点,阐述直接冷却应用技术基础研究。第 5 章为低温温度的测量原理、方法、应用及标准。第 6 章为真空技术基础及应用。第 7 章为低温流量的测量原理与方法。第 8 章为超导应用的低温杜瓦装置、制冷机及低温绝热技术。第 9 章为二元电流引线优化设计和超导磁体冷却技术与实验。第 10 章以著者从事高温超导磁储能低温系统装置技术的研发为切入点,概述低温强磁场在大科学工程中的应用。在书末附录中,编录了在相应章节中未包括的其它超导应用低温技术中有关的数据,以供方便查阅。

本书根据王惠龄提出的编写体系和大纲编著。由著名的资深超导材料学家西北有色金属研究院汪京荣教授撰写第 3 章超导材料,参加本章撰写的还有滕鑫康教授、刘向宏博士。由王晨峰撰写第 6 章真空技术基础及应用,并负责全书的图幅及电子版本工作。其余各章均由王惠龄编著并统稿。其中包括饶荣水博士等对界面热阻及直接冷却做了深入而有创意的研究。

感谢德国 Bayreuth 大学低温物理学家 G. Eska 教授在合作科学研究中给予的积极支持和热忱帮助。感谢国家自然科学基金(51076013 等)和 863 高科技计划项目(2002AA306331-4)及教育部博士点专项基金(20040487039)的资助与支持。

本书内容涉及面广,受时间和水平的限制,错误与不当之处,祈请批评指正。

王惠龄

于华中科技大学喻园

2007 年 7 月

# 目 录

绪论	1
0.1 超导应用的低温技术	1
0.2 低温实验技术与低温装置	2
0.2.1 低温液体与实验装置	2
0.2.2 低温测量与低温安全性	3
0.3 超导材料的进展	3
0.4 制冷机直接冷却	4
0.5 超导应用低温技术的发展方向	4
第1章 低温工程学基础	6
1.1 热力学基本概念	6
1.1.1 状态参数	6
1.1.2 平衡态	6
1.1.3 理想气体状态方程	6
1.1.4 热力过程	7
1.2 低温工质	8
1.2.1 概述	8
1.2.2 氮 $N_2$	8
1.2.3 氦 He	9
1.2.4 氖 Ne	9
1.3 热力学第一定律	10
1.3.1 能量守恒及转换定律	10
1.3.2 热功当量	11
1.3.3 状态参数焓	11
1.3.4 焦耳—汤姆逊效应	12
1.4 热力学第二定律	12
1.4.1 热力学第二定律的表述	12
1.4.2 卡诺循环	13
1.4.3 逆向卡诺循环——理想制冷循环	14
1.4.4 状态参数熵	14
1.4.5 焓分析法	16
1.5 超导热力学	16
1.5.1 吉布斯自由能	16



1.5.2	二级相变	18
1.6	固体导热	18
1.6.1	傅里叶定律	18
1.6.2	具有超导转变的导热	20
1.7	热辐射	21
1.7.1	热辐射概念	21
1.7.2	四次方定律	22
1.7.3	密封空间内的辐射换热	24
1.7.4	辐射屏原理	25
1.8	流体与固体的热交换	26
1.8.1	对流换热	26
1.8.2	对流换热的数学描述	26
1.8.3	对流换热的单值性条件	29
1.8.4	边界层概念	30
1.8.5	沸腾换热	32
1.8.6	卡皮查热阻	33
<b>第2章</b>	<b>超导电性</b>	<b>34</b>
2.1	零电阻与超导转变温度	34
2.2	迈斯纳效应	34
2.3	临界电流和临界磁场	35
2.4	二流体唯象模型	35
2.5	BCS 超导微观理论	36
2.6	约瑟夫森效应	37
2.7	磁通钉扎与磁通跳跃	38
2.7.1	钉扎力与钉扎中心	38
2.7.2	磁通跳跃	38
2.8	超导体的交流损耗	40
2.9	超导材料基本特性的测量	42
2.9.1	超导转变温度 $T_c$ 的测量	42
2.9.2	临界电流 $I_c$ 的测量	45
2.9.3	临界磁场 $H_{c2}$ 的测量	45
2.9.4	交流损耗的测量	46
<b>第3章</b>	<b>超导材料</b>	<b>49</b>
3.1	超导体的种类	50
3.1.1	金属元素超导体	50
3.1.2	合金超导体	50
3.1.3	化合物超导体	50
3.1.4	高温超导体	57

3.2	实用低温超导材料 .....	60
3.2.1	实用 NbTi 合金 .....	61
3.2.2	实用 A-15 材料 .....	65
3.3	实用高温超导材料 .....	72
3.3.1	RE123 氧化物超导材料和制备 .....	72
3.3.2	铋系氧化物超导材料和制备 .....	74
3.3.3	铊系氧化物超导材料和制备 .....	77
3.3.4	第二代(2G)高温超导线材 .....	78
3.3.5	二硼化镁超导材料 .....	82
3.4	超导应用对材料的要求 .....	84
<b>第4章</b>	<b>低温接触界面热阻与直接冷却 .....</b>	<b>89</b>
4.1	低温固体接触界面热阻 .....	89
4.1.1	三维界面热阻新概念 .....	89
4.1.2	低温界面热阻实验研究 .....	90
4.1.3	固体界面热阻预测模型 .....	99
4.1.4	低温界面层传热计算 .....	101
4.2	界面热传输特性的激光光热法研究 .....	105
4.2.1	非稳态法测量固体热导率 .....	105
4.2.2	激光光热法研究接触界面热阻 .....	114
4.3	超导直接冷却技术 .....	122
4.3.1	直接冷却技术的发展 .....	122
4.3.2	高温超导磁体直接冷却特性实验 .....	125
4.4	高温超导带材热导率 .....	130
4.4.1	具有金属包敷的高温超导带材 .....	130
4.4.2	高温超导 Bi-2223 带材的热导率 .....	131
4.5	高导热高电绝缘氮化铝材料 .....	136
4.5.1	概述 .....	136
4.5.2	氮化铝陶瓷的结构 .....	137
4.5.3	氮化铝的导热机理 .....	137
4.5.4	氮化铝的低温热导率 .....	138
4.5.5	影响氮化铝热导性能的主要因素 .....	140
<b>第5章</b>	<b>低温温度测量 .....</b>	<b>144</b>
5.1	低温测量概述 .....	144
5.1.1	测量技术的概念 .....	144
5.1.2	基本物理量单位与热力参量的检定 .....	144
5.2	低温温度测量 .....	145
5.3	测温的热力学原理 .....	147
5.4	热电偶测温技术 .....	148

00	5.4.1	热电偶的工作原理	148
10	5.4.2	热电偶的制作	151
20	5.4.3	参考点温度的处理	151
27	5.4.4	热电偶测温误差的来源	153
27	5.5	低温热电偶与常用热电偶特性	153
47	5.5.1	镍铬—金铁合金热电偶	153
77	5.5.2	镍铬—铜铁合金热电偶	157
80	5.5.3	铜—铜镍合金(康铜)热电偶	161
88	5.5.4	其它相关热电偶	166
18	5.6	热电阻测温原理	167
22	5.6.1	铂电阻温度计	167
28	5.6.2	低温铱铁电阻温度计	172
28	5.6.3	碳电阻温度计特性	172
00	5.6.4	锗电阻温度计	174
20	5.7	半导体二极管温度计及热敏电阻	175
100	5.7.1	P-N 结二极管	175
201	5.7.2	热敏电阻	176
201	5.8	温度的电测方法	177
411	5.8.1	热电偶电势的测量	177
521	5.8.2	电位差计的选择和正确使用	178
551	5.8.3	热电偶的连接线路	180
551	5.8.4	热电阻的测量	181
021	5.9	气体温度计与蒸气压测温	183
021	5.9.1	气体温度计	183
121	5.9.2	用蒸气压测温	183
22	5.10	超流氦及 1K 以下温度测量	185
22	5.11	磁场对温度计特性的影响	186
721	5.11.1	磁场对热电偶的影响	186
721	5.11.2	磁场对电阻温度计的影响	188
31	5.12	温度计安装方法	188
041	5.12.1	温度计的安装	188
441	5.12.2	引线传热与热沉	190
441	5.12.3	温度计的焦耳热	190
44	5.13	国际温标——温度的量值传递	191
441	5.13.1	热力学温标	191
241	5.13.2	1990 年国际温标(ITS-90)	191
341	5.13.3	( IPTS-68 ) 国际实用温标	193
841	5.13.4	0.5K ~ 30K 国际暂行温标(EPT-76)	194

5.14	低温温度的量值传递与检定	195
5.14.1	低温温度的量值传递	195
5.14.2	低温温度计的检定	195
<b>第6章</b>	<b>真空的获得与测量</b>	<b>198</b>
6.1	基本概念	198
6.2	真空中的气流	198
6.2.1	气体分子的平均自由程	199
6.2.2	低压气体中的输运状态	200
6.3	真空系统的流导	201
6.3.1	黏滞流时孔的流导	201
6.3.2	黏滞流时管道的流导	202
6.3.3	分子流时管道的流导	204
6.4	低温吸附	206
6.4.1	吸附的基本概念	206
6.4.2	吸附等温线	207
6.5	真空的获得	209
6.5.1	真空获得的方法	209
6.5.2	旋片式机械真空泵	209
6.5.3	扩散泵的原理和结构	212
6.5.4	真空泵油	212
6.5.5	真空系统表面的处理	214
6.6	真空的测量	215
6.6.1	低真空测量	216
6.6.2	高真空测量	216
6.6.3	真空测量规管安装原则	217
6.6.4	其它类型真空测量仪表	218
6.6.5	液氮减压降温中的压力测量	219
6.7	真空检漏技术	219
6.7.1	放气和漏气的区别及判别	219
6.7.2	常用检漏方法	220
6.8	低温泵	222
6.8.1	低温泵的工作机理	222
6.8.2	低温泵的类型和性能	223
6.8.3	斯特林循环制冷机	224
<b>第7章</b>	<b>低温流量的测量原理与方法</b>	<b>226</b>
7.1	流量测量方法概述	226
7.2	管内的流动状态与速度分布	226
7.3	动压测量管的工作原理	227

7.4	热线法测量流速的原理	228
7.5	标准节流装置	230
7.5.1	节流压差法的原理	230
7.5.2	标准节流装置	232
7.5.3	节流装置的设计计算	234
7.6	转子流量计与湿式气体流量计	237
7.6.1	转子流量计原理	238
7.6.2	湿式气体流量计	239
7.7	进口流量管的工作原理	239
7.8	小流速测量及气体流量计的校验	241
7.8.1	小流速测量	241
7.8.2	小流速的校验	242
7.8.3	气体流量计的校验	243
7.9	低温流体的流量测量	245
7.9.1	概述	245
7.9.2	涡街流量传感器原理	245
7.9.3	涡轮流量变送器	246
<b>第8章</b>	<b>低温装置与 G-M 制冷机</b>	<b>248</b>
8.1	低温流体的应用	248
8.1.1	液氮的应用	249
8.1.2	氮-4 和氮-3	249
8.1.3	液氦的应用	252
8.1.4	液氢	253
8.2	低温装置	253
8.2.1	储存杜瓦	253
8.2.2	实验杜瓦	254
8.2.3	直接冷却低温装置	256
8.2.4	热力分析计算	257
8.2.5	优化设计	259
8.2.6	制造调试	261
8.2.7	液氮输液管及输液	261
8.2.8	低温热开关	263
8.3	低温液面的测量方法	264
8.3.1	超导法测量氮液面	264
8.3.2	电阻法测量液面	265
8.3.3	电容式低温液面计	266
8.3.4	差压法低温液面测量原理	267
8.4	G-M 制冷机技术	267

8.4.1	G-M 制冷循环原理	268
8.4.2	G-M 制冷机结构	269
8.4.3	实际制冷量、耗功、制冷系数和效率	273
8.4.4	G-M 制冷机特性	274
8.4.5	制冷机的选用与匹配	275
8.5	绝热技术	276
8.5.1	堆积绝热	276
8.5.2	高真空绝热	277
8.5.3	真空—粉末绝热	277
8.5.4	高真空多层绝热	277
8.6	低温焊接与低温密封结构	278
8.6.1	硬焊料	278
8.6.2	软焊料	279
8.6.3	低熔点焊料	279
8.6.4	低温装置密封结构	279
<b>第9章</b>	<b>二元电流引线与超导磁体冷却技术</b>	<b>281</b>
9.1	概述	281
9.2	二元电流引线	281
9.2.1	二元电流引线热力学分析	281
9.2.2	电流引线热稳定性分析	284
9.3	二元电流引线优化设计	285
9.3.1	制冷机功耗的优化	285
9.3.2	热载流点温度的优化	287
9.3.3	优化结果分析	288
9.4	电流引线的电绝缘导热结构	290
9.5	超导磁体稳定化	291
9.5.1	超导 Stekly 判据	292
9.5.2	绝热稳定化判据	293
9.5.3	动态稳定判据	294
9.5.4	超导磁体的退化和锻炼	295
9.6	直接冷却超导磁体热力学分析	296
9.6.1	直接冷却工作方式	296
9.6.2	界面热阻对直接冷却的影响	298
9.6.3	熵产率分析	300
9.6.4	磁体有效热导率	302
9.7	直接冷却超导磁体的动态实验	306
9.7.1	恒流源电流加载实验	306
9.7.2	动态模拟加载电流实验	307

9.8	超导磁体设计	308
9.8.1	超导材料的选用	308
9.8.2	超导线电流密度的选择	309
9.8.3	磁体磁场计算	309
9.8.4	磁体结构	310
9.8.5	超导磁体低温绝缘	311
9.8.6	超导磁体的失超保护	312
9.8.7	超导磁体的励磁	314
9.9	超导磁体的交流损耗	316
9.10	超导磁体冷却方式的比较	316
<b>第10章</b>	<b>超导技术的应用</b>	<b>318</b>
10.1	超导磁储能	318
10.2	核聚变装置	323
10.3	磁流体发电装置	325
10.4	高能加速器	327
10.5	超导核磁共振成像装置	329
10.6	核磁共振谱仪(NMR)	331
10.7	超导的弱电应用	332
10.7.1	超导量子干涉器(SQUID)	332
10.7.2	超导量子干涉器的应用	334
<b>附录</b>	<b>常用基本物理常数与压力单位换算</b>	<b>336</b>
附表1	常用基本物理常数推荐值	336
附表2	纯金属的物理性质	336
附表3	常用金属材料的电阻率	337
附表4	常用材料的比热容	338
附表5	各种材料的出气率 $Q_g/A(\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s})$	339
附表6	压力单位的换算	339
<b>参考文献</b>		<b>340</b>

绪	论
---	---

自 1911 年荷兰科学家昂纳斯 (H. K. Onnes) 发现汞的超导现象后, 超导研究取得了很大的进展, 其中 1962 年超导体约瑟夫森 (B. Josephson) 效应的发现, 开拓了超导量子干涉器 (SQUID) 在弱电方面的应用。20 世纪 80 年代, 超导工频线材的研究, 使低温超导出现了转机。虽然所发现的低温超导材料的临界温度最高只有 23.2K, 主要在液氦温区工作, 但在医学上使用的核磁共振成像仪 (MRI) 已达到广泛应用的水平。1986 年瑞士苏黎世实验室贝德诺兹 (J. G. Bednorz) 和缪勒 (K. A. Müller) 发现 LaBaCuO 的超导体 (超导临界温度  $T_c = 30K$ ), 为高温超导研究揭开了新的一页。随后美国、中国、日本等国科学家的努力, 高温超导材料的  $T_c$  已达 90K 以上。高温超导材料经过不断的研究发展, 目前已出现了一些接近实际应用和达到工程使用水平的材料。

由于超导材料的进步, 不论是低温超导还是高温超导, 将进入逐步发展应用技术的新阶段。预计在 21 世纪前期, 超导技术有望在电力系统中突破强电的应用。

低温技术为超导应用提供最基本的运行条件, 是超导应用系统整体的一个重要而不可分割的部分。不能把低温与超导技术的关系看成只是前者为后者提供杜瓦、制冷机的关系。低温技术直接关系到超导设备的效率和安全可靠性, 是超导技术能否实际应用于医学、工业、电力系统和大型科学工程等的关键之一。因此对低温技术, 包括低温热力学、低温传热学、低温材料特性等与超导应用结合的重大基础科学问题, 以及研究制冷机直接冷却技术, 实现超导应用系统与低温设备一体化的关键技术, 提出了新的要求和研究课题。

## 0.1 超导应用的低温技术

低温工程学 (Cryogenics) 也就是低温技术, 是研究低温下的物理现象及其应用的学科。这门学科的起源可以把昂纳斯 1908 年在荷兰来登 (Leiden) 大学实验室首次液化世界上最难也是最后一种气体氦 (He) 作为标志, 不过当时还未出现 “Cryogenics” 这一名词; 也有观点认为低温工程学始于 1950 年, 这是柯林斯 (Collins) 1947 年发明了氦液化器, 实现了氦气的大量液化后, 同时由于 20 世纪 50 年代美国宇航开发和 60 年代超导磁体的研制, 推动了低温工程学的飞跃发展, 才出现了 “Cryogenics” 一词。

低温工程学具体对超导应用来说, 就是超导装置的高效冷却与维持超导应用系统的稳定性、低温装置对常温的绝热应用, 以及对低温下热输运性问题的数理分析和实验研究, 因此它的研究方法具有热物理学科的基础性和技术综合性。随着现代超导强磁场等大型科学工程应用、空间技术、光电信息等高新技术进步, 低温技术与许多新兴工程学科发展日益密切, 具有交叉边缘学科的特点, 同时也保持着一门不断发展的独立学科的特性。从现在低温工程学发展来看, 制冷与低温可以分成 4 个温区, 如表 0-1 所示。



表 0-1 制冷与低温温区的划分

名称	温度范围/K	应用领域
制冷	室温 ~ 120	空调、冷藏等
低温	120 ~ 4.2	气体分离、超导、激光、信息、空间技术、 低温生物与医学、低温物理与低温技术
超低温	4.2 ~ 0.1	
极低温	0.1 ~ 0	基础研究

国际上集中发表低温工程研究成果具有权威性的定期论文集有: Advance in Cryogenics Engineering(低温工程进展);具有权威性的国际学术刊物为 Cryogenics(低温工程学);主要国际会议有 International Conference on Low Temperature Physics(国际低温物理大会), International Congress of Refrigeration(国际制冷工程大会),及 International Cryogenic Engineering Conference(国际低温工程会议)。国内较集中刊登和反映低温工程研究的有《低温物理学报》,《低温工程》和《低温与超导》等核心刊物。

## 0.2 低温实验技术与低温装置

低温实验技术是在首先弄清原理和概念的基础上,为实现预期目标的方法与实施。经验性和技巧性是它的特征。

### 0.2.1 低温液体与实验装置

超导磁体等部件装置用低温液体浸泡和液体蒸发的低温气体冷却。主要的低温冷却介质是液氮( $N_2$ )和液氦(He)。液氦的气化潜热很小,而液氦又比液氮贵得多,所以进行液氦实验时,一般都是用液氮从室温预冷到 77K。如果只考虑液氦潜热,1kg 铜从 300K 冷却到 4.2K 需要 30L 的液氦。如果先用液氮预冷,则从 77K 冷却到 4.2K 只需要 2 升的液氦,可见用液氮预冷节省了 90% 以上的液氦。同时液氦气化所生成的冷氦气的显热是很大的,如果把显热再运用起来,则液氦的消耗将会更低。这些对低温超导应用具有实际意义。

我国在 20 世纪 80 年代以前,液氮比较贵,而液氦比液氮更贵得多。但随着工业应用进步和市场机制发展,如进口液氮等,目前在较大量使用的情况下,液氮、液氦不论在价格和供应方便程度上,缩短了和国外的距离。低温液体价格的下降,将有利于低温超导技术应用的新发展。

储存低温液体介质的低温容器,称为低温恒温器,俗称“杜瓦”。它是 1892 年由英国科学家杜瓦(J. Dewar)发明的用玻璃双层壁真空夹层的绝热容器,用以存放低温液体。玻璃杜瓦制作方便,价格便宜,而且玻璃是透明的,便于观察杜瓦瓶内状况和液面的高度。但由于金属杜瓦不锈钢结构坚固,可以制成复杂和大型的低温装置,特别适用于工程应用,所以现在主要使用金属杜瓦。金属杜瓦主要采用真空多层绝热技术,用铝箔加低导热系数的薄膜材料缠绕在储槽内壁上。它的绝热性能可以比一般传统的绝热形式优良数十倍。微球绝热是一种较先进的绝热技术,是用  $15\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$  的中空玻璃球,外表面镀铝,与金属多层绝热相比,微球绝热填充简单,而在绝热性能上各有优势。

一般的超导装置低温系统由低温装置、真空机组、储存低温液体的杜瓦、超导磁体等组成。超导磁体置于金属杜瓦中,用低温液体浸泡和蒸发气体冷却。随着高温超导材料的进步和低温