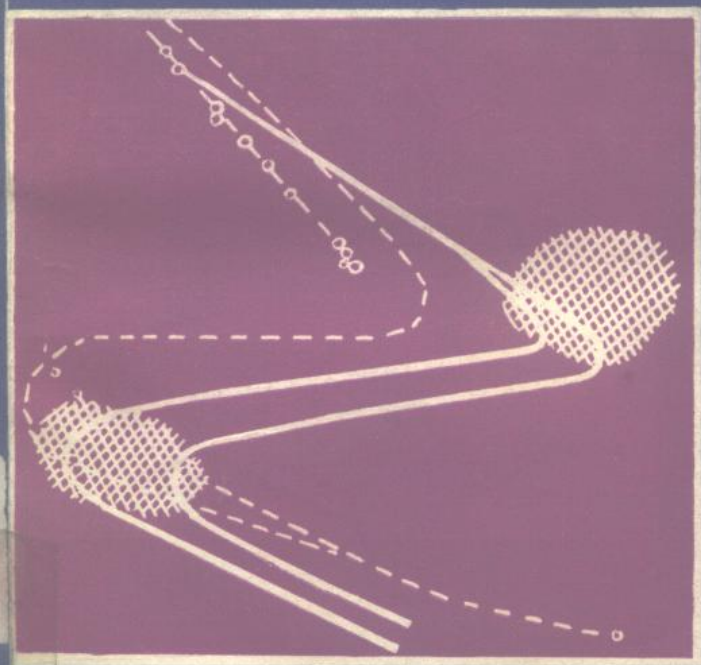


低温传热学

〔美〕 W. 弗罗斯特 编



科学出版社

低温传热学

〔美〕W. 弗罗斯特 编

陈叔平 陈玉生 译

马 驰 校

科学出版社

1982

内 容 简 介

从绝对零度到室温这个范围内各种低温介质的传热具有一系列独特的性质。随着航空、宇航技术以及低温工程的发展,低温传热学成为现代热工学中一门发展十分迅速的新兴学科。本书是国外系统阐述该学科的第一本专门著作。书中叙述了低温下各种传热机理的基础和特性,引用了大量低温传热和超低温传热的实验数据,论述了各种各样的测算方法,对广泛的研究结果作了分析和综合。

本书可供在航空、宇航、低温动力、制冷工程等部门从事设计和研究的科技人员使用。对于需要创造低温和超低温条件的科研人员和工程设计人员也有重要参考价值。

Walter Frost ed.

HEAT TRANSFER AT LOW TEMPERATURES

Plenum Press, 1975

低 温 传 热 学

〔美〕W. 弗罗斯特 编

陈叔平 陈玉生 译

马 驰 校

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1982年7月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1982年7月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:0001—4,400 字数:299,000

统一书号:15031·405

本社书号:2585·15—10

定价: 2.05 元

序

本书的目的是：对低温传热特有的各种问题作一全面深入的介绍，以引起人们的重视。这并不是说经典的传热理论在低温下不能应用，而只是说常温求解方法中所作的许多近似在此种状态下是不正确的。例如，有些物性在低温下有显著的变化，因而不能象通常那样把它们认作常数。流体在低温下容易变成两相或更多相的混合物，它们的理论解析与单相流体的不同。这些问题以及其它一些在低温下比在正常条件下更经常发生的问题，都在本书中作了讨论。

虽然顾名思义，本书讲的是传热，但书中也有一章讲了两相流体流动，内容十分详尽，还有一章的一部分讨论了热力学临界状态下流体的流动问题。特别注意在低温下特有的那些流动现象。不用说，分析流体流动是分析强迫对流传热的必要前提，因而在本书正文中增添这些章节是理所当然的。

本书主要是为工程设计人员编写的，但是也探讨了研究人员感兴趣的许多课题。对大学师生来说，本书是一本有用的参考书，也可以作为传热学中有关专题课程的教科书。

编写本书的想法是蒂默豪斯（Timmerhaus）博士提出来的，他是《国际深冷专题丛书》的主编。蒂默豪斯博士清楚地认识到，迫切需要一本深冷条件下传热的专题著作。他认为可以把田纳西大学宇航研究所的简明教程作为蓝本，加以充实而写成这样一本书。他为本书的出版作了很大努力，编者对他的帮助和共同编写时传授的经验表示深切感谢。

为了编写本书，所有作者都积极提供作为本书蓝本的简

明教程的讲稿,并为最后定稿认真准备和压缩素材,编者对大家的通力合作非常感激。还要谢谢贝蒂·斯普雷(Betty Spray),她把许多修改好的章节手稿用打字机打成清样,这需要她加班工作。

最后,编者向戈瑟特(Goethert)博士表示感谢,他提出的举办象宇航讲座这类培训讲座的想法提供了机会,使得田纳西大学宇航研究所的专业人员能与许多博学的专家进行密切的协作,而正是这些专家编写了本书各章。

沃尔特·弗罗斯特

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 编排	5
1.3 参考文献	5

第一篇 热传导和对流传热

第二章 热传导	6
2.1 引言	6
2.2 稳态热传导	7
2.2.1 固体的热导率	8
2.2.2 一维热传导	8
2.2.3 通过组合结构的热传导	11
2.2.4 二维和三维热传导	13
2.2.5 具有可变热导率的热传导	17
2.2.6 各向异性固体内的热传导	19
2.3 非稳态热传导	20
2.4 热传导的应用问题	24
2.4.1 热绝缘系统	25
2.4.2 热渗漏	38
2.4.3 降温损失	42
2.5 小结	46
2.6 符号	46
2.7 参考文献	48
第三章 向低温流体的对流传热	53

3.1	引言	53
3.2	近临界态流体物性	56
3.2.1	临界点的热力学	56
3.2.2	P - ρ - T 数据——状态方程	58
3.2.3	热传输性质	59
3.2.4	量子态	62
3.2.5	赝物性	64
3.3	近临界区域的传热	65
3.3.1	近临界区域的特性	65
3.3.2	自由对流和自然对流系统中的传热	69
3.3.3	强迫对流系统中的传热	71
3.3.4	常见的几何构形对近临界态传热的影响	79
3.3.5	自由对流(层流)的理论研究	84
3.3.6	强迫对流的理论研究	86
3.4	符号	91
3.5	参考文献	93

第二篇 两相现象

第四章	两相流动的术语和物理描述	98
4.1	引言	98
4.2	沸腾类型	98
4.3	沸腾工况	101
4.4	强迫对流沸腾	104
4.4.1	欠热沸腾	104
4.4.2	饱和沸腾	107
4.5	两相流动的特征	110
4.5.1	水平管内的流型	110
4.5.2	垂直管内的流型	113
4.6	定义	115
4.7	符号	116

4.8 参考文献	117
第五章 池内泡核沸腾	119
5.1 引言	119
5.2 起泡	120
5.3 强迫对流时的起始沸腾	125
5.4 沸腾传热可能存在的几种机理	129
5.5 汽泡参量	132
5.6 影响池内沸腾实验数据的因素	138
5.6.1 压力的影响	139
5.6.2 表面条件的影响	140
5.6.3 溶解气体的影响	141
5.6.4 滞后现象	143
5.6.5 加热表面的尺寸和方位	144
5.6.6 搅拌	145
5.6.7 欠热度	146
5.6.8 不湿润表面	146
5.6.9 重力场	146
5.7 沸腾实验数据的综合	148
5.8 池内沸腾传热实验数据的关系式	150
5.9 符号	157
5.10 参考文献	158
第六章 临界热流密度	162
6.1 引言	162
6.2 自然对流沸腾工况下的临界热流密度	163
6.2.1 无限容积内的自然对流	163
6.2.2 有限容积内的自然对流	192
6.2.3 小结	192
6.3 强迫对流沸腾工况下的临界热流密度	193
6.4 符号	196
6.5 参考文献	197

第七章	膜态沸腾	200
7.1	引言	200
7.2	深冷剂膜态沸腾的实验数据	201
7.2.1	氢的实验数据	201
7.2.2	氦 I 的实验数据	203
7.2.3	氮的实验数据	205
7.2.4	其它深冷剂膜态沸腾的实验数据	208
7.3	膜态沸腾传热的计算公式	211
7.4	关系式与实验数据的比较	216
7.5	符号	218
7.6	参考文献	219
第八章	膜态沸腾最低热流密度	223
8.1	引言	223
8.2	池内沸腾	223
8.3	强迫对流沸腾	225
8.4	符号	226
8.5	参考文献	227
第九章	深冷表面上的汽-液冷凝	228
9.1	引言	228
9.2	基础研究	229
9.3	实验结果	233
9.4	符号	237
9.5	参考文献	237
第十章	汽-固冷凝	239
10.1	结霜	239
10.2	冷凝时的质量守恒和能量守恒	242
10.2.1	质量平衡	242
10.2.2	能量平衡	246
10.3	深冷沉积物的物性	251
10.3.1	潜热	251

10.3.2	比热容	252
10.3.3	热导率	253
10.3.4	俘获系数	253
10.3.5	密度	253
10.4	符号	254
10.5	参考文献	254
第十一章 深冷剂液-汽混合物的压降和可压缩流		256
11.1	引言	256
11.2	压降	256
11.2.1	稳态两相流方程	257
11.2.2	环状流模型	259
11.2.3	均匀流模型	263
11.2.4	深冷剂的压降实验数据	264
11.3	压力波的传播	269
11.3.1	泡状流	270
11.3.2	分层流、环状流和雾状流	271
11.3.3	块状流	271
11.4	临界流	274
11.4.1	进口为两相混合物或饱和汽的情况	275
11.4.2	进口为饱和液体或欠热液体的情况	281
11.5	小结	288
11.6	符号	288
11.7	参考文献	289
第十二章 两相流的强迫对流传热		292
12.1	引言	292
12.2	部分泡核沸腾(欠热泡核沸腾)	293
12.3	充展泡核沸腾	295
12.4	过渡沸腾	298
12.5	稳定膜态沸腾	298
12.6	向两相氮的强迫对流传热	306

12.7	结论性意见	307
12.8	符号	309
12.9	参考文献	310
第十三章 沸腾和两相排放时的瞬态工况		312
13.1	引言	312
13.2	瞬态沸腾	312
13.3	外加波动	314
13.4	骤冷实验	318
13.5	两相流中和排放时的瞬态工况	322
13.5.1	单相排放	324
13.5.2	两相排放	325
13.6	小结	337
13.7	符号	338
13.8	参考文献	339

第三篇 辐射和液 II 热传输

第十四章 表面的辐射特性		343
14.1	引言	343
14.2	固化层厚度的影响	345
14.3	波长的影响	348
14.4	固相结构特性的影响	352
14.5	理论推导	354
14.6	应用	357
14.7	参考文献	359
第十五章 液氮 II 内的热传输		360
15.1	引言	360
15.2	液氮 II 的特性	360
15.2.1	卡皮查热导	364
15.2.2	当 $\Delta T \sim T$ 时的卡皮查热导	369
15.3	临界热流密度	373

第一章 绪 论

弗罗斯特¹⁾

1.1 引 言

《国际深冷专题丛书》编入这一卷的目的，是想丰富在工作中需要解决低温下传热和流体流动问题的热力工程设计人员的知识。书中各章都是由本领域各方面的专家们在统一布局下写成的，因而可以预期，这本专题著作既有连贯性，又有中心主题。田纳西大学宇航研究所曾举办过一次简明讲座，本书许多章节最初就是这个讲座的讲稿。

这里用的“低温”这个术语并不确切。在本书中，“低温”是指这样的温度范围：从平常与普通液态致冷剂相关联的温度（室温 298 K 左右）到与液氮相关联的温度 4K。斯科特 (Scott)^[1] 列举了标准沸点在该温度范围内的三十六种流体，把它们列为深冷流体类。另一些作者^[2-4] 把深冷流体规定为标准沸点低于 123 K 的那些流体。其中有代表性的是所谓永久气体，如氦、氢、氖、氮、氧和空气。

某些深冷液体的部分物性列于表 1-1。参考文献 [1—6] 中有更完整的物性数据。

在输送和贮存很低温度的深冷剂时，在热工设计中会产生许多问题，这些问题与所有三个经典的传热机理都有牵涉。

1) 弗罗斯特，田纳西大学宇航研究所，田纳西州，塔拉霍马。

表 1-1 一些常用深冷剂的热力学性质¹⁷⁾

(压力 = 1 atm)

深冷 物质	沸点 K	液体密度 kg/m ³	汽化潜热		1m ³ 液体在标准 温度和压力下的 气体体积 (m ³)
			kJ/kg	MJ/m ³ 液体	
氧	91	1143	213	243	862
氮	78	808	199	161	696
氩	87	1403	163	228	846
甲烷	112	425	509	216	637
氟	85	1512	172	260	959
氢	21	70.5	448	31.6	844
氦	4	125	20.4	2.57	754

第二章讲热传导的机理，特别注意这样一些效应：它们虽然在室温下通常可以忽略，但在深冷温度下却十分重要。这方面有代表性的是分析变热导率的传导问题，因为许多物质的物性在低温下随温度的变化都十分强烈。低温下形成的深冷沉积物常常具有各向异性的热导率，这也要求其热传导分析与平常设计实践中的有所不同。

此外，在深冷剂贮存罐或管道与周围环境之间总是存在着巨大的温差。因此，为了减少热渗漏，设计结构支架和管道都要采用特殊的热绝缘和方法，这些都要求详细分析热传导。还有，在大型深冷系统迅速降温时发生的瞬态热传导问题也比以往更为重要了。

第三章研究对流传热。就遵守力学定律和热力学定律这一特性来说，深冷流体的性状大体上都象“经典”流体一样（一个重要的例外是氦 II，它将在第十五章中讨论），因此根据因次分析对普通液体和气体求得的大量对流解析公式、比例模化定律和实验关系式，也可用于深冷剂。但是，深冷系统常常在接近热力学临界的状态下运行，而在该处流体物性随温度

和压力的变化都十分强烈。因此在普通传热教科书中给出的对流能量方程的常物性解不能随便乱用。第三章研究了处于近临界状态下的流体的传热，并介绍了用于低温下单相强迫对流和自然对流的计算公式。

当把深冷流体贮存在容器中和通过管道输送时，很容易发生沸腾和两相流。一般来说，液相变为气相会使贮存或输送的液体造成损失，因此不希望它发生。相反，在另外一些应用中，例如冷却超导的电子元件和磁铁时，或者冷却深冷宇航模拟装置内的深冷抽气板时，因为相变会吸收潜能，所以又希望它发生。由此可见，需要有判断何时发生两相流和计算两相流传热率的方法。

在输送系统中，由于免不了有热渗漏，因此很容易发生两相混合的流体流动。对于两相流来说，象压降、推进剂的容许损失、可容许的流率、对降温的要求、稀释效应和许多其它这类参量的计算都要复杂得多。随着蒸汽和液体在管道内分布情况的不同，两相流可能存在好几种流型。由于这些流型造成了湍流和层流的不同组合，而这两种流动遵守不同的物理定律，因此为了工程计算，对它们需要有不同的方程。此外，蒸汽和液体的质量份额会沿管道长度发生变化，因此流型也要随之改变，在降温期间，它们还随时间发生变化。各种两相流在第四章中讨论，而压降、压力波的传播、临界流以及进口效应等的计算方法在第十一章中叙述。第十三章讲述在降温、高压喷放和热固体骤冷时发生的一些瞬态两相流问题。在两相流动过程中，常常发生流量振荡和流动不稳定性，它们的机理也归在这一章中讨论。

在贮存容器和其它深冷设备中，只要壁面温度稍微超过饱和温度，在它上面就会开始沸腾。沸腾一开始，向贮存流体的传热就更加强烈，从而使流体更快蒸干。在流体池内的各

种沸腾现象以及在这些情况下传热率和沸腾起始的测算方法,都在第四章到第八章中讨论。

在强迫对流条件下的输送管道内,也会发生沸腾。在这种情况下,传热机理还是受管道内该时或该地存在的两相流型的影响。池内沸腾即自然对流条件下的沸腾与强迫流动条件下的沸腾有明显的差别,后者是第十二章要讲的内容。

在深冷系统中,与沸腾相反的相变是冷凝。通常遇到的是汽-液或汽-固冷凝过程。前一过程在热交换器中经常发生,其中高温蒸汽在管子表面上冷凝,放出汽化潜热,用来加热管子另一侧的流体。深冷剂很少作这种用途;但是,在液化系统或致冷装置的热交换器中,在宇航部门或炼油厂的贮气罐中,都很容易发生汽-液冷凝。与汽-液冷凝相关的传热机理在第九章中论述。

汽-固冷凝过程在深冷抽真空系统中很容易发生,在该系统中,机械抽吸后残留的气体在被深冷剂冷却的表面上冻结。这样形成的固体称为深冷沉积物。在设计深冷抽气板和决定供应冷却剂的致冷装置规模时,传热考虑是很重要的。在深冷剂的输送管道和贮存容器的外表面也会发生此类冷凝,它们将影响从这些部件的热渗漏。第十章讨论了汽-固冷凝现象。

最后,本书第 III 部分探讨了低温下辐射传热的机理(第十四章)和氦 II 内的传热(第十五章)。

低温下的辐射传热与传统理论^[8,9]的差别只是在于表面性质发生了变化。当在系统的固体表面上形成冷凝物(深冷沉积物)即霜时,表面的发射率、反射率和吸收率都改变了。有人曾经观测到,在很低温度下覆盖一层薄的电介质会使发射率提高^[9]。因此,由于表面性质的这些变化,系统内的辐射能量交换也可能变化。这方面的资料可在第十四章中找到。

氦 II 内的传热是特别引起人们兴趣的一个现象,它受到

氦 II 特有的超级性能的强烈影响。为了利用超导、无摩擦流等等带来的好处，迫切需要研究这种流体内的能量传输和动量传输。第十五章详细描述了氦 II 中的传热过程。

1.2 编 排

本书每一章都有单独的参考文献目录和符号表。虽然总的来说，所用的符号是统一的，但是由于各个作者的爱好不同，也存在小的差别。

参考文献用数目字编号，每一章都从 1 开始。方程、表和图的编号之前都有章数。

1.3 参 考 文 献

- [1] R. B. Scott, *Cryogenic Engineering*, D. Van Nostrand Co., New York (1959).
- [2] R. F. Barron, *Cryogenic Systems*, McGraw-Hill Book Co., New York, (1966).
- [3] M. McClintock, *Cryogenics*, Reinhold Publishing Co., New York (1964).
- [4] R. W. Vance, ed., *Applied Cryogenic Engineering*, John Wiley and Sons, New York (1963).
- [5] V. J. Johnson, "A Compendium of the Properties of Materials at Low Temperature (Phase I), Part 1, Properties of Fluids," PB171 616, Air Research and Development Command, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio (1960).
- [6] K. D. Timmerhaus, "A Correlation of Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids", Iecture notes for short course at University of Tennessee Space Institute, Tullahoma, Tennessee (1969).
- [7] J. A. Clark, in *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, Academic Press, New York (1968).
- [8] E. M. Sparrow and R. D. Cess, *Radiation Heat Transfer*, Brooks/Cole Publishing Co., California (1970).
- [9] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Co., New York (1972).

第一篇 热传导和对流传热

第二章 热 传 导

蒂默豪斯¹⁾

2.1 引 言

如前所述,深冷流体的使用给传热学带来若干独特的问题。在大气环境中操作和输送处于低温下的这类流体,要求革新和研制特殊的热绝缘方法和设计技巧。结果,研制成功一些新的热绝缘结构,它们由许多层高反射率的薄辐射热屏以及把它们彼此隔开的薄隔片(热绝缘体)组成。这类热绝缘称做多层热绝缘或超热绝缘。在高真空($2/3 \times 10^{-4}$ — $4/3 \times 10^{-4}$ Pa)下,它们对于减少向低温系统的热渗漏是非常有效的。例如,有一种多层热绝缘具有多达 50 层的辐射热屏,每层厚度为 $6.4 \mu\text{m}$,材料为涂铝聚酯,这种多层热绝缘在这一压力范围下的表观热导率只是周围空气的热导率的 $1/2000^{[1]}$ 。除了使热损失减到最小的新型热绝缘之外,还特别注意与深冷容器支撑结构方案有关的热传导效应。

在低温下,许多物质的物性随温度有很大的变化。因此,在热传导过程的分析和计算中必须考虑变物性的影响。对于热导率和比热容这两个物性尤其需要这样做。

虽然这里介绍的多数内容也可以应用于非深冷情况,但

1) 蒂默豪斯,科罗拉多大学,科罗拉多州,博尔德。