



数据加载失败，请稍后重试！

低温容器

——设计、制造与使用

徐烈 方荣生 马庆芳 鲁雪生 编著



机械工业出版社

低温容器是获得、保持低温及低温应用技术中不可缺少的设备。本书较完整而系统地介绍了低温容器的设计、制造、使用问题，提供了丰富的资料。书中叙述了低温液体的基本性质并给出了有关数据。介绍了各类低温容器的典型结构以及结构设计和绝热设计，包括强度与刚度计算，封头设计，开孔补强，各式容器设计，焊接结构和密封结构设计，绝热计算，还介绍了制造工艺要点和使用及安全技术等。本书内容丰富，实用性强，说明准确，简明扼要，全部采用法定单位制。

本书可供低温容器设计、制造和使用的人员使用，也可从事低温工程、低温物理、石油化工、宇航和低温医学等专业的技术人员及高等院校师生参考。

低 温 容 器

——设计、制造与使用

徐烈 方荣生 马庆芳 鲁雪生 编著

责任编辑 蒋有彩

封面设计 刘代

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄甲一四号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 14 字数 367 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 0,001—2 870·定价：4.35 元

统一书号：15033·6400

前 言

由于科学技术的不断发展,使低温技术的应用领域也不断地开拓。低温容器是一种获得和保持低温、开展低温技术应用与研究中不可少的设备。合理地设计、制造和使用低温容器(包括低温恒温器等),涉及到低温科学、绝热技术、真空技术、材料科学与机械制造等方面的有关知识。另外,低温容器的结构虽没有精密机械复杂,但其制造工艺要求甚高,往往由于工艺方面的原因,造成产品的质量相差悬殊。为此,国内从事低温研究、应用、设计与制造单位及有关人员,都希望有一本较为详细且系统地介绍低温容器的结构、设计、制造与使用以及低温工质的性质等内容的书籍。我们在广泛收集资料的基础上,结合多年工作的经验,编写了这本书。

该书由徐烈、方荣生、马庆芳、鲁雪生编著。徐烈是主编,在他主持下按下列分工执笔:第一章、第二章(方荣生),第三章、第五章、第六章(徐烈),第四章(马庆芳),第七章(鲁雪生)。在该书写作过程中,得到上海交通大学制冷工程教研室夏安世教授、西安交通大学张祉祐教授、航天工业部第一研究院胡金昌主任工程师的多方指导,并分别审定各章、节的文稿,提出了宝贵的意见,上海交通大学尉迟斌教授、孙光三副教授也提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

在收集资料和编写的过程中,得到国内许多工厂、研究所与高等院校及有关人员的大力支持,在此,也表示深切的谢意。

由于时间有限,更限于编写人员的水平,错误和缺点在所难免,恳切地欢迎读者多提宝贵意见。

编著者

1984年10月

目 录

序

前言

第一章 结论	1
第一节 低温技术的应用概况	1
第二节 低温液体贮运的意义	3
参考文献	5
第二章 低温液体的性质	6
第一节 引言	6
第二节 液态空气	7
第三节 液氮	8
第四节 液氧	9
第五节 液氟	9
第六节 液氢	10
第七节 液氦	13
第八节 液化天然气	15
参考文献	44
第三章 低温容器的典型结构	46
第一节 液氧、液氮和液氩容器	47
一、小型容器	47
二、固定式贮槽	48
三、运输式贮槽	54
第二节 液氢、液氦容器	57
一、具有液氮保护屏的液氢、液氦容器	57
二、气体屏及传导屏容器	59
三、固定式及运输式贮槽	62
四、带制冷机的液氢、液氦容器	65
五、轻型贮槽	67
第三节 液化天然气的贮运设备	69
一、液化天然气的贮存设备	69
二、液化天然气的运输设备	71

第四节 特殊容器	76
一、液氟容器	76
二、非金属低温容器	77
三、大口径生物容器	79
四、高压的低温容器	86
第五节 低温恒温器	87
一、恒温器的结构设计应注意的问题	87
二、超导实验用恒温器	88
三、测量材料机械性能的低温恒温器	89
四、具有光学窗的低温恒温器	90
五、极低温实验用低温恒温器	92
六、精确测定试样热量的低温恒温器	94
第六节 低温液体输送管道及设备	95
一、管道输送方法	95
二、低温液体输送管道	96
三、低温液体泵	104
四、阀门	106
第七节 液化气体的汽化设备	119
参考文献	124
第四章 低温容器的绝热结构与计算	129
第一节 各种绝热型式的特点	130
一、堆积绝热	131
二、高真空绝热	132
三、真空-粉末(或纤维)绝热	133
四、高真空多层绝热	134
第二节 绝热材料	136
一、低温绝热材料的基本要求	136
二、低温绝热材料的种类	137
三、常用绝热材料的性能	137
四、真空多层(包括多屏)绝热材料	141
第三节 低温容器的热流分析及计算	143
一、残余气体分子的传热量	143
二、绝热空间及管口的辐射传热量	145

三、辐射角系数计算	149
四、通过绝热体的综合漏热量	153
五、机械构件的漏热	154
六、颈管传热的简要分析	157
第四节 低温容器预冷量和加热量的计算	162
一、预冷	162
二、加热	166
三、材料的比热	166
第五节 汽冷屏的设计	168
一、高真空绝热汽冷屏	168
二、真空粉末绝热汽冷屏	169
三、多层绝热汽冷屏	170
四、高真空-多层绝热汽冷屏	171
五、带有支撑物的汽冷屏	173
六、多屏绝热	175
第六节 绝热结构中的热桥设计	178
一、热桥	178
二、减少热桥导热的措施	179
三、热桥的导热计算	180
参考文献	184
第五章 低温容器的设计	187
第一节 低温容器的设计要点	187
一、总体结构	187
二、容积与形状	187
三、绝热形式	188
四、结构材料	189
五、机械构件	189
六、气体回收	194
七、附件	194
第二节 低温容器设计要素的选择	195
一、设计压力	195
二、壁厚附加量	195
三、许用应力	196

四、焊缝系数	197
五、开孔削弱系数	197
六、容器的热处理	198
七、压力试验	198
第三节 低温容器的几何参数	200
一、容积计算	200
二、容积参数	202
三、标准封头	202
第四节 内压圆筒与球壳的计算	220
一、圆筒的计算	220
二、球壳的计算	220
第五节 外压圆筒与球壳的计算	221
一、外压圆筒的计算	221
二、外压球壳计算	224
三、外压圆筒和球壳的图解法	225
四、外压圆筒加强圈的设计	231
第六节 封头设计	234
一、凸形封头设计	234
二、内压锥形封头	238
三、平盖	243
第七节 开孔及开孔补强设计	248
一、允许不补强的最大孔径	249
二、允许开孔的范围	249
三、封头的开孔补强	250
四、内压圆筒开孔加强	252
五、外压容器开孔补强	252
六、开孔补强计算	252
七、并联开孔的补强	254
八、补强方法	254
九、补强焊缝强度验算	254
第八节 法兰及管道设计	256
一、螺栓计算	256
二、内压法兰计算	259

三、外压法兰计算	270
四、管道壁厚计算	270
第九节 卧式容器的设计	271
一、鞍座	272
二、圈座	282
三、支承式支座	283
第十节 立式容器的设计	283
一、筒体计算	283
二、裙座计算	292
三、基础环设计	294
四、裙座与筒体的搭接焊缝验算	297
第十一节 焊接结构的设计	297
一、焊接结构设计的一般原则	297
二、常用的氩弧焊接头型式	298
三、常用的钎焊接头型式	302
四、电子束焊的接头型式	304
五、压力容器的接管与壳体的连接焊缝形式	305
第十二节 低温下的密封结构	306
一、低温静密封	306
二、低温动密封	311
三、密封窗口	314
四、引线密封	315
附表	318
参考文献	334
第六章 低温容器的制造工艺简介	336
第一节 工艺流程	336
第二节 低温容器的焊接	337
一、焊接件的表面处理	338
二、常见的几种焊接规范	347
第三节 低温容器的粘接工艺	350
一、颈管与壳体的粘接结构	350
二、粘接剂的品种与特性	350
三、涂胶方法	351

四、粘接工艺示例(手工法)	352
第四节 绝热结构的施工	353
一、多层绝热材料的选择与处理	353
二、吸气剂的装入	354
三、多层绝热体的包扎	357
四、传导屏的装配	358
五、其它绝热结构施工时的注意事项	360
第五节 抽空工艺	361
一、抽空工艺流程	361
二、检漏	361
三、抽空系统的计算与机组的选择	370
四、加热抽空	378
五、封结	380
六、二氧化碳或氮气的充气置换、加热抽空工艺简介	397
参考文献	400
第七章 低温容器的使用技术	402
第一节 预冷	402
一、预冷过程	402
二、预冷方式	402
三、预冷时间与需要的耗液量	403
第二节 充液	404
一、充液的准备工作	404
二、输液管的结构	404
三、液氮的充填	406
四、液氮的充填	410
第三节 贮存	414
一、贮存容器的选择	414
二、气体的再液化	415
三、高纯气体的贮存	415
四、液氢中的正-仲转换	415
五、液氮热振荡的防止	416
六、低温液体“突沸”现象的消除	416
第四节 液面测量	417

一、压差式液面计	417
二、浮力液面计	418
三、气柱振动液面计	418
四、电阻液面计	419
五、电容液面计	419
六、超导液面计	420
第五节 蒸发率的测定	420
一、测量方法及设备	421
二、蒸发率的计算	422
三、影响蒸发率测定的因素	423
第六节 安全技术	431
一、低温工作中的安全问题	431
二、低温流体对人体的冻伤或灼伤	431
三、窒息	432
四、有害气体对人体的毒害	433
五、燃烧与爆炸	433
六、应急措施	436
参考文献	436

第一章 绪 论

第一节 低温技术的应用概况

低温技术是研究120K以下低温的获得及应用的技术科学。它主要包括低温的获得、低温的保持（低温绝热）、气体的液化和分离、低温液体的贮运以及低温测试与实验技术等几个基本方面，而每个方面又包括一系列的基础理论及应用技术问题。

低温技术是十九世纪末才兴起的。随着科学技术的发展和工农业生产的需要，已得到了迅速的发展和广泛的应用，并展现出美妙的前景。目前，低温技术对于巩固国防（火箭技术、空间技术、现代武器等）和国计民生（如工农业生产、低温贮存和冷冻医疗等）有着密切的关系。此外，低温技术对于能源开发、低温物理、物质结构、天体演变、生命起源等基础理论的研究都是一种必不可少的有力工具。

低温技术还与其它科学技术之间相互关联、相互渗透、相互促进，形成了不少边缘科学，如低温电子学、低温生物学、低温医学等。因此，低温技术的发展将会有力地促进其它科学技术的发展。

低温技术的主要应用领域列于表1-1中。

下面重点介绍低温在机械工业和其它方面的应用。

1. 冷装配：利用材料热胀冷缩的原理，在机械工业中某些“热套”工艺可改为“冷套”。由于冷套不需要高温，因此金属表面不会产生氧化皮，使精度提高。而且“冷套”一般不需要再进行切削加工，简化了加工工序。

2. 冷处理：金属材料在低温下一般都要发生相变，由奥氏体变成马氏体，使材料发脆，也使材料硬度增高。利用这些特性进行材料和工具的处理。如用于制造低温容器和设备的不锈钢，

表1-1 低温技术的主要应用领域^(2、3、4、5、6、7)

序号	领 域	应 用 事 例
1	能源	低温输电(低温流体冷却常规导线)、超导电缆输电、磁流体发电(MHD)、超导贮能、超导发电机与电动机、受控热核反应、液化天然气燃料、液氢燃料等
2	资源开发	超导磁选矿、资源勘探、资源开发与利用、氢飞船等
3	空间技术与宇宙开发	火箭推进剂、磁辐射屏蔽、氢-氧燃料电池、宇航员及生命呼吸气、空间环境模拟、高速火箭发射、风洞试验、卫星热控制等
4	真空技术	超高真空、薄膜技术(真空镀膜)等
5	电讯及电子计算机	卫星通讯(参量放大)、超导高速电子计算机等
6	计量及检测技术	超导高灵敏度检测器(如SQUID)、红外探测器、标准计测器、激光器等
7	冶金	纯氧炼钢、金属冷处理、金属冶炼的保护气体等
8	机械	超导磁体、超导磁浮高速轴承、超导直线加速器、冷装配、低温破碎、低温粉碎等
9	化工	高能燃料(液氢、液氧)、重氢(氘)的提取、稀有气体和高纯气体的提取、氮资源保护与利用
10	交通运输	高速磁悬浮列车、低温液化气体的水上、铁路、公路及航空运输、船舶磁力推进
11	食品	水产品(鱼、虾等)、畜产品(肉类、禽蛋品等)、水果、蔬菜的快速冷却、贮存和运输
12	畜牧业	良种牲畜的精液低温贮存(人工受精)
13	医疗卫生及生物学	低温手术、器官、皮肤、血液、精液、细胞的保存、心磁计、 π 介子照射治疗以及低温生物学研究等
14	环境保护	污水处理、重金属污染的磁分离、低温脱硫、低温冷冻干燥等
15	原子能利用	He^3 的提取、反应堆材料低温辐射试验、低温吸附与液化精馏法回收裂变气等
16	基础理论研究	高能物理加速器及氢泡室、超导与超流理论研究、等离子体物理与凝聚态物理、超低温的获得、自由基化学反应机理
17	其它	海洋开发、土木工程(冻土)、防灾、LNG冷量利用等

希望具有稳定的奥氏体结构。为了防止在低温下向马氏体转变，往往采用低温处理。又如对一些刀具进行冷处理后，其强度和硬度都会提高，使用寿命可增长30~50%^[6]。

3. 冷破碎：利用各种材料在低温下都会发脆的特性，可以为冶金工厂粉碎废钢铁。目前用液氮浸泡废钢块再破碎是一种成功的工艺。另外，在回收废电缆、塑料时，用传统的方法既费工又费力，采用液氮浸泡以后，能很快破碎分离，既经济又方便。低温粉碎或破碎技术还应用于医药生产中，如血成份的分离等。

4. 低温真空泵：随着科学技术的发展，对真空度提出了更高的要求，而且希望获得清洁的高真空或超高真空。采用常规的扩散泵、钛泵都会对真空环境带来污染。如果采用低温真空泵，便可以得到没有污染的清洁真空、提高超导器件、电子元件的质量。还能获得 $10^0 \sim 10^{13}$ Pa的超高真空。

5. 低温试验：许多设备与仪表要在低温下工作(如航空或航天设备)、为确保产品正常运行和定型生产、都要进行低温试验。

6. 冷施工：在挖掘矿井、隧道、修建堤坝和码头时，遇到含水的流砂、往往给施工带来困难，可用液态空气造成冻土围墙，可以防止水分的渗入、增加护壁强度，保障工程安全进行。

7. 煤矿的灭火降温：煤矿有时由于瓦斯爆炸，坑道内温度很高，用水冷却速度太慢，目前正在试用液氮喷淋的方法来加快降温速度。

低温技术在能源、医疗、卫生、食品、空间技术、超导技术和基础研究等方面的应用更加广泛，在此不再赘述。

第二节 低温液体贮运的意义

上面介绍的低温技术在各种领域中的应用，归纳起来有三种方式：

第一种方式是使某些混合气体通过低温下的液化与分离得到一定的产品。如分离空气可以获得氧、氮及几种稀有气体；分离焦炉气可提取生产合成氨的原料气——氮、氢混合气；分离油田

及石油裂解气可获得乙烯、丙烯等多种化工原料；从天然气、合成氨尾气及核裂变物质中可提取氦气及其它稀有气体等。

第二种方式是生产液化气体，如液化天然气、液氧、液氮、液氢、液氦等。

第三种方式是通过低温液体的汽化或低温制冷机来制造低温环境，以满足空间技术、超导技术、低温医学、红外技术等需要。

所有低温的产生，低温的应用与研究，都离不开低温液体的贮运。因此低温液体的贮运是低温工程中一项最基本的工作，也是低温技术中近30年来发展最快的一项技术。

另外，由于低温液体的沸点低，汽化潜热小，获得低温液化气体需要付出较大代价，因此，低温液体的有效贮存与运输具有重要的经济价值。获得各种液化气体的功耗见表1-2。

表1-2 常用气体的性质及液化实际功耗⁽¹⁾

种 类	沸 点 (K)	汽 化 潜 热		液 化 实 际 功 耗	
		(kcal/L)	(kcal/kg)	(kW·h/L)	(kW·h/kg)
空气	78.8	44.5	51	1.1~1.3	1.25~1.5
氧气O ₂	90.17	58.1	51.03	1.3~1.6	1.2~1.4
氮气N ₂	77.35	38.6	47.6	1.0~1.2	1.2~1.5
氖气Ne	27.09	24.8	20.6	1.0~2.8	1.0~2.5
氢气H ₂	20.38	7.38	105.4	1.0~3.0	15~45
氦气He	4.215	0.618	4.95	2.5~5.0	18.5~30
甲烷CH ₄	111.7	51.86	121.75	0.32~0.50	0.75~1.2

在低温技术的应用中，往往存在下面所述情况：（1）集中生产，然后分配到各用户，例如氧、氮、氩、液化天然气和液化石油气及液氮的集中生产与分配；（2）短期生产的产品供较长时间的使用，例如许多实验单位和医疗单位自备液氮机生产液氮的情况；（3）较长时间的生产，供短期大量集中使用，如大型低温试验或进行火箭发射时，均是采用这种方法提供液氮、液氧、液氢或液氦。

为了适应以上的情况，必须进行低温液体的有效贮运。就是

对于使用气体的部门,如果采用液体运输,也是比较经济的。例如一台3650L的液氧槽所贮存的液氧,其总重量不超过1250kg,若气体贮运,需500只钢瓶,总重量达38500kg^[8]。又如一只175L的带汽化器的液氧贮槽,装在一辆小车上,携带方便,可代替20只氧气钢瓶供焊接使用。此外,为了进行低温下的物性试验,以及在工农业生产中为了保存某些物品、也需要对低温液体进行长期贮存。总之,差不多所有使用低温的场合,都离不开低温液体的贮存,也就是说离不开贮存低温液体的设备,这些设备统称为低温容器。

参 考 文 献

- [1] 徐烈,《低温技术》,上海交通大学,1982年
- [2] 林理和,《低温技术的发展》,《低温工程》,1980, №3.
- [3] В.Г.Фастовский, Ю.В.Перовский, А.Е.Ровиский, Криотенная, Техника, ЭНЕРГИЯ, 1974.
- [4] Cryogenics, Vol,17, №7, 1977.
- [5] 张祉祐、石秉三主编,《制冷及低温技术》(上册),机械工业出版社,1981年。
- [6] 韩鸿兴,《低温技术的应用》,《制冷技术》,上海制冷学会,1981.1.
- [7] 徐烈,《低温与超导》,《热物理工程》,浙江大学,1979年第1期,
- [8] 张祉祐、石秉三主编,《制冷及低温技术》(中册),机械工业出版社,1981年。

第二章 低温液体的性质

第一节 引言

低温是指120K以下的温度区域。在这个温区内的气体，其标准蒸发温度（沸点）和三相点温度（或熔点）均较低，因此，较难液化。在常温下，压力不高时，它们的比容较大，均可近似视作理想气体。在一定的压力下，当温度降低低于其临界温度时，都会变成液态乃至固态。表2-1列出了十种主要低温工质的热物理性质。

表2-1 主要低温工质的热物理性质^①

工 质		氮 N ₂	氧 O ₂	氩 Ar	氖 Ne	氢 H ₂
热物理性质						
分子量M		28.02	32.0	39.94	20.183	2.016
气体常数R(kJ/kg·K)		0.2968	0.2599	0.2085	0.4117	4.1243
标准状态密度ρ(kg/m ³)		1.252	1.430	1.785	0.9004	0.0899
临界点	温度T _{cr} (K)	126.25	154.77	150.86	44.40	32.98
	压力P _{cr} (kPa)	33.96	50.87	48.98	26.6	12.91
	密度ρ _{cr} (kg/m ³)	304	423	535.6	483.0	31.45
三相点	温度T _{tr} (K)	63.15	54.35	83.78	25.54	13.81
	压力P _{tr} (kPa)	12.53	0.15	68.76	43.40	7.04
	密度ρ _{tr} (kg/m ³)	947	1370	1624	1442	86.64
标准状态	比热c _p (kJ/kg·K)	1.041	0.916	0.522	1.035	14.3
	导热系数λ(W/m·K)	0.024	0.024	0.016	0.044	0.159
	动力粘度μ×10 ⁶ (Pa·s)	16.58	19.19	21.01	29.7	8.42
标准沸点t _s (K)		77.35	90.18	87.29	27.09	20.27
绝热指数k		1.40	1.40	1.68	1.68	1.407
汽化潜热r(kJ/kg)		197.6	212.3	159.6	86.1	445.9
表面张力σ×10 ³ (N/m)		8.87	13.5	12.54	4.85	1.93