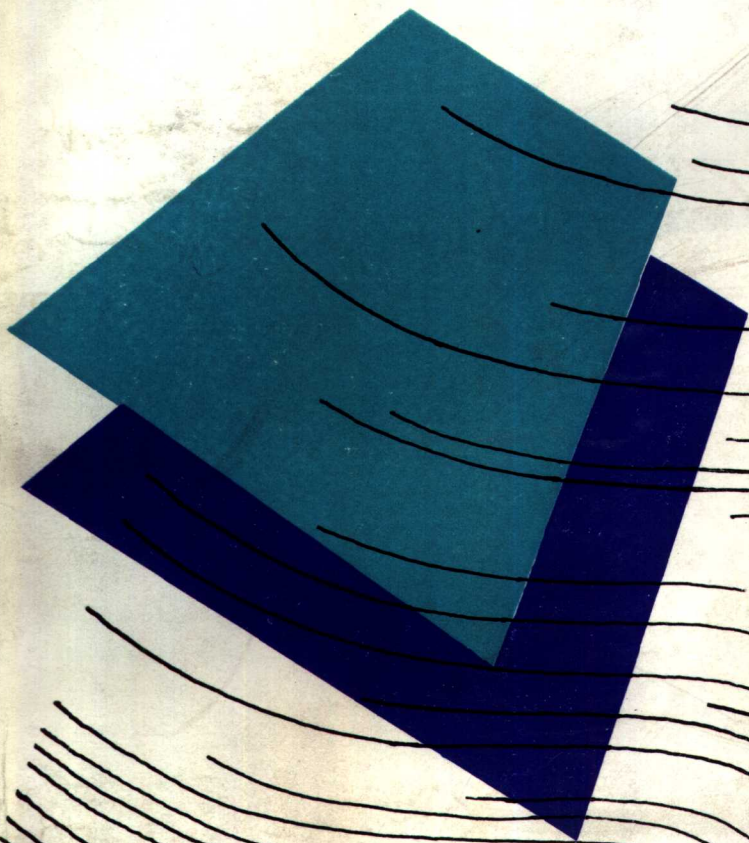


〔日〕高田秋一 著

吸收式制冷机



机械工业出版社

吸收式制冷机

〔日〕高田秋一 著

耿惠彬 戴永庆 郑玉清 译



机械工业出版社

前 言

本人虽才浅力薄，但曾从日本“冷冻空调技术”杂志第15卷第169号起，分30篇对大型吸收式制冷机作了介绍。从那时起，已过去了相当的岁月。当时每年制造的台数很少，两效吸收式制冷机、直燃式冷温水机、利用太阳能和废热的吸收式制冷机等，尚处于研究过程中。当年是以单效为主体，热力系数低，蒸气消耗率也不易突破 $9\text{ kg}/(\text{USRt}\cdot\text{h})^\ominus$ 。但现在已是两效吸收式制冷机为主体，热力系数飞跃上升，蒸气消耗率正降到 $4.5\sim 5.2\text{ kg}/(\text{USRt}\cdot\text{h})$ 。

这一期间的进步和发展极大，制造台数年年增加，从事该型制冷机的设计、制造、操作、维修、销售的技术人员显著增加，并且以吸收式制冷机作为毕业论文的学生人数也在增加。公司每年要接纳许多新人从事制冷机方面的工作。大家都感到资料缺乏。日本冷冻协会的出版委员会注意到此点，计划要出版发行这方面的资料，并督促本人以连载的资料为基础，修订补充成单行本。我甚感力薄，但此类制冷机的资料在不断积累，机型的改进和淘汰也很激烈，本书必须全面改写，因此在时间上有所推迟。开始从《冷冻空调技术》杂志第31卷第360号起分17篇刊登，主要介绍最近的吸收式制冷机。在这期间，许多同事提出了宝贵的意见和指教。借此机会表示衷心的感谢。本书是在吸取上述意见和指教的基础上，对连载进行了补充修订，并烦请荏原制作所冷热机械部堺田科长审阅和校正而成。

本书共分为十六章，详细内容请参见目录。本书适合短期大学和专科程度的人阅读，并使他们易于理解。书中特别列入了吸收循环、吸收制冷机的设计和精馏等章节，以加深理解。书末附有习题，可用于检查理解程度。

本书可作为有关冷冻工程的学生、吸收式制冷机的设计者、空调装置设计人员，以及从事保养、运转和维修的技术人员的参考书。为了便于保养、运转和维修技术人员速成学习吸收式制冷机，可以选学第1、2、6、7、8、12及以后各章。第12章以后各章的学习次序可以打乱，以便充分达到预定的目的。

在本书编写过程中，参考了大量的专著、论文报告和样本，均列于各章末的参考文献中。在此，向有关作者和提供资料的各公司表示深切的谢意。在写作期间，得到荏原制作所冷热机械部有关人员，特别是上田和齐藤部长、堺田和吉川课长，井上和奥田主任以及中研四十宫主任研究员和小川室长的大力支持，在此深表谢意。

笔者才疏学浅，所得经验又不全面，恐有考虑错误和判断不当之处，尚希及时发现并提出意见，本人将感到不胜荣幸。

作 者

1985年9月

[⊖] USRt 为美冷吨，是制冷量单位， $1\text{ USRt} = 3024\text{ kcal/h}$ 。——译者注

目 录

译序	
前言	
绪论	1
第一章 制冷与吸收循环的概念	3
一、制冷机的工作原理	3
二、蒸汽压缩式制冷机的设计计算	5
三、吸收制冷循环	6
四、 $\log p - \frac{1}{T}$ 图	11
五、迪林图	13
六、迪林图上的工作循环	13
七、理想吸收制冷循环的热力系数	14
参考文献	15
第二章 冷剂和吸收剂	
一、概论	16
二、冷剂应具有的性质	17
三、吸收剂应具有的性质	18
四、LiBr水溶液的性质	18
五、醇和盐的性质	26
六、氨和水的性质	28
七、氟利昂冷剂和几种吸收剂的性质	31
参考文献	36
第三章 吸收制冷循环 I (水和溴化锂)	37
一、概论	37
二、单效吸收制冷循环	37
三、提高单效吸收制冷循环热力系数的方法	46
四、热泵	48
五、第二种多级吸收式热泵	52
六、两效吸收式制冷机	53
参考文献	56
第四章 单效吸收式制冷机	57
一、概论	57
二、结构	57
三、实际吸收循环	69
四、与汽轮机驱动的制冷机联合运行	71
五、总能系统、发动机驱动的热泵与吸收式制冷机	75
参考文献	79
第五章 吸收式制冷机的设计 I (水和溴化锂)	80
一、概论	80
二、传热	81
三、传热系数	82
四、在蒸发器和冷凝器中冷剂侧的放热系数 α_R	85
五、发生器中的放热系数	88
六、吸收器中的传热和传质	91
七、溶液热交换器中的传热系数	93
八、吸收式制冷机各部件所需的热面积	94
参考文献	103
第六章 两效吸收式制冷机	104
一、概论	104
二、构造	104
三、其它两效吸收制冷循环	109
四、两效吸收式制冷机的热平衡	115
五、两台单效吸收式制冷机组合成两效化的通水方法	118
六、两效和单效吸收式制冷机的组合	119
七、低温热源的利用	122
参考文献	123
第七章 直燃式冷温水机	124
一、概论	124
二、制冷采暖专用机	125
三、同时制冷和供热水机	129
四、同时制冷和采暖机	130
五、小型机	134
六、燃烧	136
七、燃烧装置	140
八、 SO_2 和 NO_2 的防止	142

九、第一发生器	146	二、蒸发器	234
十、余热回收	148	三、冷凝器	235
参考文献	150	四、溶液热交换器与其它热交换器	238
第八章 利用太阳热和废热的吸		五、发生器	243
收式制冷机	151	六、精馏器	245
一、概论	151	七、吸收器	249
二、低温废水的利用	152	八、抽气装置	254
三、吸收循环的改进	156	九、溶液泵	256
四、两级吸收式制冷机	158	十、氨水吸收式制冷机的控制	258
五、利用废气的吸收式制冷机	162	参考文献	259
六、太阳热吸收式制冷机	165	第十三章 特性和联合运行	260
参考文献	173	一、概论	260
第九章 吸收循环Ⅱ(氨和水)	174	二、冷媒水出口温度和制冷量	260
一、概论	174	三、冷却水出口温度和制冷量	264
二、 $h-\xi$ 图的构成	175	四、冷却水量和制冷量	265
三、 $h-\xi$ 图中溶液和蒸气状态的表		五、蒸气压力和制冷量	265
示方法	176	六、污垢系数和制冷量	267
四、单级氨吸收式制冷机的循环和		七、不凝性气体的影响	268
基本计算	178	八、溶液循环量和制冷量	268
五、实际循环	184	九、蒸气消耗率	268
参考文献	189	十、氨吸收式制冷机的性能	269
第十章 精馏	190	十一、吸收式制冷机的联合运行	272
一、概论	190	十二、制冷机的台数控制	276
二、发生器和分凝器	190	参考文献	279
三、精馏	191	第十四章 自动调节与自动运转	280
四、精馏的热计算	193	一、概论	280
五、计算例题	201	二、制冷量自动调节	280
参考文献	206	三、安全装置	289
第十一章 吸收式制冷机的设计		四、燃烧安全控制	293
Ⅱ(氨和水)	207	五、自动运转	298
一、概论	207	六、系统控制	302
二、冷凝器	208	参考文献	306
三、蒸发器	209	第十五章 选型与设备	308
四、过冷器	211	一、概论	308
五、溶液热交换器	212	二、选型	308
六、发生器	214	三、蒸气配管和凝水配管	312
七、吸收器	223	四、高温水和载热剂配管	316
八、精馏器	229	五、城市燃气配管	319
参考文献	232	六、油配管	321
附表 实用载热剂的C值	233	七、烟囱与通风	324
第十二章 低温吸收式制冷机	234	八、烟囱施工时的注意事项	330
一、概论	234	九、废热水、废气供给配管	331
		十、冷媒水、盐水和冷却水配管	332

参考文献	332	十、启动、停机及停机期间的注意	
第十六章 保养与管理	333	事项	354
一、概论	333	十一、低负荷运行时的注意事项	356
二、年度管理计划表和运行日志	333	十二、性能下降与相应的对策	360
三、气密性的保持	336	十三、安全装置动作时的处理方法	362
四、制冷剂的管理	341	十四、结晶与溶晶	364
五、溶液的管理	342	十五、故障及其排除方法	365
六、载冷剂的管理	345	参考文献	368
七、冷却水的管理	346	习题	369
八、运行管理与定期检查	348	附录 本书常用单位与法定单位	
九、燃烧管理	351	换算表	382

绪 论

1810年，苏格兰的约翰·莱斯里（John Leslie）制造了间歇型吸收式制冷机，这是最早的吸收式制冷机。1860年，法国的费尔第南德·卡尔（Ferdinand Carré）发明了连续型吸收式制冷机，该机取得了美国专利。这是一种以氨为冷剂、以水为吸收剂的氨吸收式制冷机，这种机型后来在欧洲得到了进一步的改进，并应用于低温制冷。其中联邦德国的博尔西希（Borsig）公司制造的低温吸收式制冷机最负盛名。该公司开发并制造了更低温度（蒸发温度 $-50\sim-60^{\circ}\text{C}$ ）的两级吸收式制冷机。

但是一般说来，在二十世纪初，吸收式制冷机并不引人注目。从1915年起到1940年为止，由于电动氨制冷机的显著进步，除了家用燃气冰箱，以及在特殊条件下利用废热和废气的氨吸收式制冷机以外，吸收式制冷机差不多被人们所忘却。

在1930年左右，美国阿克拉公司（Arkla）制造了5~20冷吨[⊖]的组装型吸收式制冷机。到第二次世界大战结束，美国开利亚公司（Carrier）研制了大型空调用吸收式冷水机组，并于1945年，制造成第一台以水为冷剂、以溴化锂水溶液为吸收剂的吸收式制冷机。当时美国陆续发现贮量丰富的天然气矿区，天然气管网遍布全美。天然气公司为了扩大燃气供应量，支持了吸收式制冷机的推销。吸收式制冷机的高潮乘时而起。但是，随后天然气矿区的新发现受到阻碍，天然气的开采量减小，转而压缩常规的天然气需要量。直到最近，吸收式制冷机的制造台数还在继续下降。

根据日本制冷学会编的“日本冷冻史年表”，在1870年，利用松平春岳公的氨吸收式制冷机，开始生产了人造冰。后来庆应义塾的学生在大学东校（现东京大学）的宇都宫三郎教授指导下，在该制冷机上生产了冰。据称，福泽谕吉先生为了避免采用高温热量，而在该机上应用了低品位热。随后开始由国外输入氨吸收式制冷机，但为数极微。日本第一台本国生产的氨吸收式制冷机，由意大利利波依拉公司设计并由三菱重工生产，装于信越石油化学工业直江津工厂，蒸发温度为 -45°C ，制冷量为 $1.86\times 10^6\text{kcal/h}$ 。1966年在原公司单独设计制造了这种制冷机，其蒸发温度为 -25°C ，制冷量为20USRt（美冷吨）。以后川崎味精工厂采用了一台蒸发温度为 -5°C 、制冷量为440USRt的这种制冷机。

在具有废热和废气的工厂中，考虑到能量费用的昂贵，以氨吸收式制冷机作为低温制冷机有其优越性。但是与电动机或汽轮机驱动的蒸汽压缩制冷机相比，它具有外形尺寸大、价格高以及采用氨作为冷剂等缺点。可以推测，这些就是使用者不欢迎这种制冷机的理由。

日本的第一台溴化锂吸收式制冷机，是由当时的机车制造厂生产的。组装型空调机组、吸收式冷水机组，于1959年相继问世。其中组装型空调机组，受到电动组装型空调机组的排挤，很快销声匿迹。但吸收式冷水机组却因两效化、降低燃料耗量、提高了

⊖ 冷吨为制冷量单位，1美冷吨 = 3024kcal/h。——译者注

济性, 从1968年以来, 夏季耗电受到限制的年代里, 生产年年上升。

以蒸气为热源的两效吸收式制冷机, 在1961年由机车制造厂研制成功, 1962年则相继由荏原制作所制成。现在这种机型是吸收式制冷机的主要机型。当时研制的机组耗气率为 $6 \text{ kg/USRt} \cdot \text{h}$ 现已降至 $4.3 \sim 5.2 \text{ kg/USRt} \cdot \text{h}$ 。美国斯塔哈恩 (Stathan) 公司也于1961年研制这种制冷机, 现在特冷 (Trane)、约克 (York) 公司也生产这种机型。

直燃式冷温水机不用蒸气热源, 而用煤油、燃气的燃烧热直接加热吸收溶液, 它和上述的燃气冰箱、组装型吸收式空调机的机型, 几乎完全相同。这种机器的特点是不仅能供应冷媒水作降温用, 而且也可供给热水作采暖用, 其能量通常在 $3 \sim 10 \text{ USRt}$ 范围内。日本由矢崎总业公司生产, 美国由阿克拉公司制造, 均为单效型。1967年, 机车制造厂开发了通过切换两效循环来获取冷水或热水的原理, 并于次年 (1968年) 迅速制造出实用机器, 投入运转。当时正值十分重视解决公害问题。作为防止城市大气污染的对策, 限制使用重油采暖锅炉。以燃气或煤油作为燃料的直燃式冷温水机, 很少散发出作为公害源的氧化硫 SO_x 和氧化氮 NO_x , 操作人员不必具备锅炉技师资格, 可以缓和夏季供电紧张情况, 因此不仅在城市, 而且在其近郊得到了广泛的应用。1977年, 荏原制作所制成可节能 $20 \sim 30\%$ 的节能型吸收式制冷机, 其余各公司也相继制造同样程度的节能型机。现在, 这种机型已占吸收式制冷机生产台数的一半以上。

利用太阳能和废热的吸收式制冷机, 由于第一次石油危机而提到了研制日程, 以第二次石油危机作为转折点而广泛制造, 现在已有许多台在运转。采用废气的机型, 和直燃冷温水机相同。当燃气温度达 400°C 时, 采用两效型; 温度较低时, 则采用单效型。利用太阳能和废热水的机型, 由于热源温度低而加大了发生器的尺寸, 通常都是单效型。表 1 为目前所用的吸收式制冷机的种类。

表 1 吸收式制冷机的种类

项目 制冷机的名称	冷剂与吸收剂的种类	循环	主要用途	能量 (USRt)	热源种类	备注
单效吸收式制冷机	水和溴化锂	一效	空调用	50~2000	蒸气、高温水	有低压蒸气 (2 kgf/cm^2 以下) 的场合用作冷水机组
两效吸收式制冷机	水和溴化锂	两效	空调用	75~1500	蒸气	有中压蒸气 (8 kgf/cm^2 左右) 的场合用作冷水机组
直燃式冷温水机	水和溴化锂	一效	空调用	50~100	城市燃气、重油、煤油	中小建筑物用, 供给冷温水
直燃式两效冷温水机	水和溴化锂	两效	空调用	20~2000	城市燃气、重油、煤油	根据防止城市公害的对策使用燃烧燃气方式, 供给冷温水
小型冷温水机	水和溴化锂	一效	家庭空调用	3~10	城市燃气、煤油	家庭用集中采暖, 供给冷温水
低温吸收式制冷机	氨和水	一效	工业用	大能量	蒸气等	日本用得极少
煤气冰箱	氨和水	一效	家庭用		城市燃气	最近被电冰箱排挤
氨小型吸收式制冷机	氨和水	一效	家庭空调用	3~12	城市燃气	美国正在采用, 日本还未应用, 风冷式冷水机组

第一章 制冷与吸收循环的概念

一、制冷机的工作原理

制冷机可与排水泵装置相比拟。集中在下水道中的污水，由地下室的排水泵排往室外的排水沟，以免地下室被水淹没。从外部渗入冷藏库内的热，由制冷机排往库外，使库内保持低温。排水沟与下水道之间的水位差，相当于库内外的温度差；排水量则相当于由库内往外排出的热量。集中污水用的下水道，相当于吸取热量的蒸发器。极易挥发的液体（冷剂）进入蒸发器内蒸发，使蒸发器表面保持低温，并从周围环境吸取热量。冷剂呈蒸气状，将热量带入与泵相当的压缩机中，压缩后的蒸气，经排出口排往与排水沟相当的冷凝器中，然后热量排往大气（图1-1）。

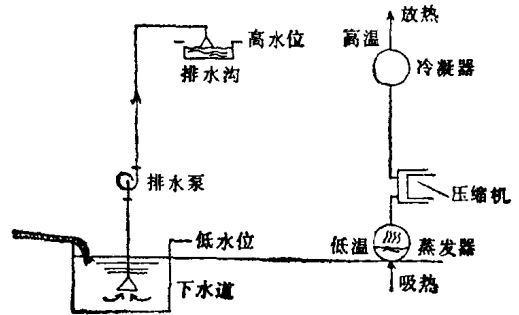


图1-1 制冷机与排水泵

最简单的制取低温的方法，是将液化气体放在相应的容器中，使其在大气压下蒸发。若蒸发时的沸点低于环境温度，则容器就从周围环境吸取热量，使周围环境温度降到和该流体的沸点相接近。所吸取的热量和沸腾蒸气一起散发到大气中。假设所蒸发的是氨液体，则可得到接近于其沸点（ -33.3°C ）的低温。但是将昂贵的氨蒸气白白放掉，太不经济，而且还会造成公害。

在一定压力和温度下（冷凝温度下），蒸气可凝结成液体。随压力的升高，冷凝温度也升高（表1-1）。在蒸气压缩式制冷机中，利用这一性质，可将原来蒸发的氨气，经吸入口吸入压缩机中，压缩到能在大气中冷凝的压力，然后由压缩机出口排往冷凝器。冷剂蒸气在冷凝器中，向大气放热而被冷凝。这样，由低温热源吸入的热量，散入大气而氨则被液化。表1-1列出了氨的压力和饱和温度的关系。液化的氨回到蒸发器中，再度从低温热源吸取热量，重新蒸发成为蒸气。不断重复这一循环，就可将低温热源的热量送往高温热源。

图1-2所示为上述循环的示意图。图上表明氨在反复经历蒸发、压缩、冷凝、膨胀、蒸发等过程。全部经历上述过程一次，就完成一个循环，多次重复上述过程，将热量由低温热源送往高温热源的介质称为冷剂。氨就是冷剂的一种。

上述的状态变化，可以表示在冷剂的状态线图上。冷剂线图有许多种，一般采用莫里尔图。将状态变化表示在这种线图上比较直观，也比较容易理解制冷原理及其计算。图1-3是莫里尔图上的各种曲线。莫里尔图的横坐标表示焓 h ，纵坐标表示绝对压力 p 。图中画有等温（ $t = \text{常数}$ ）、等容（ $v = \text{常数}$ ）、等熵（ $s = \text{常数}$ ）和等干度（ $x = \text{常数}$ ）等曲线。

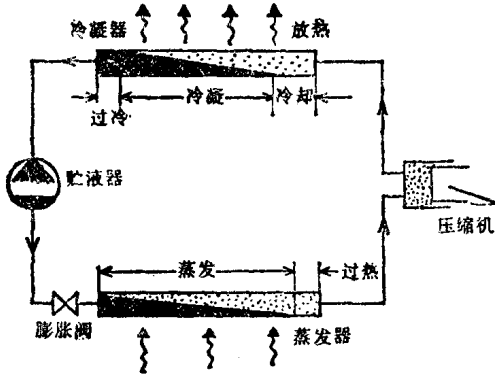


图1-2 制冷循环

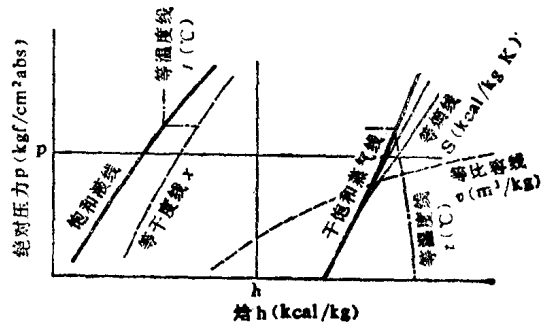


图1-3 莫里尔图

表1-1 空调使用的冷剂和NH₃的饱和压力

温 度 (°C)	饱和压力 (kgf/cm ² abs)			
	水①	R 12	R 22	NH ₃
0	4.58	3.1494	5.0774	4.379
2	5.29	3.3615	5.4167	4.716
4	6.10	3.5843	5.7715	5.073
6	7.10	3.8179	6.1442	5.450
8	8.04	4.0627	6.5346	5.849
10	9.20	4.3191	6.9434	6.271
12	10.5	4.5873	7.3710	6.715
14	12.0	4.8678	7.8179	7.183
16	13.6	5.1608	8.2843	7.677
18	15.5	5.4667	8.7721	8.196
20	17.5	5.7859	9.2804	8.741
22	19.8	6.1186	9.8102	9.314
24	22.4	6.4653	10.362	9.915
26	25.2	6.8263	10.937	10.544
28	28.3	7.2019	11.535	11.204
30	31.8	7.5925	12.156	11.895
32	35.7	7.9985	12.802	12.617
34	39.9	8.4202	13.473	13.374
36	44.6	8.8581	14.170	14.165
38	49.7	9.3124	14.893	14.990
40	55.3	9.7836	15.643	15.850
42	61.5	10.272	16.420	16.747
44	68.3	10.778	17.225	17.682
46	75.7	11.302	18.059	18.658
48	83.7	11.845	18.922	19.673
50	92.5	12.406	19.815	20.727

① 水的饱和压力单位是 mmHg。——原注

图 1-4 为莫里尔图上蒸汽压缩式制冷机的制冷循环。图中 5 → 1 为蒸发过程（等压变化）；1 → 2 为压缩过程（等熵变化）；2 → 4 为冷却过程（2 → 3）和冷凝过程（3 → 4）。二者都是等压变化；4 → 5 为膨胀过程（等焓变化）。

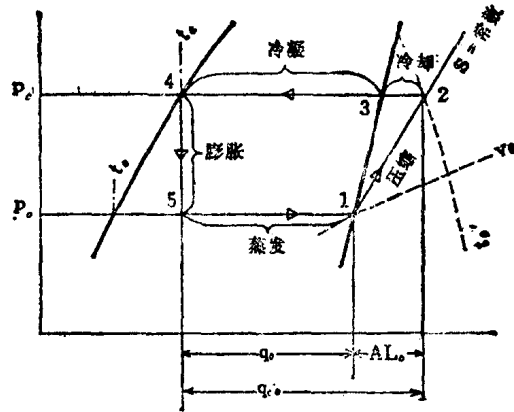


图1-4 莫里尔图上的制冷循环

二、蒸汽压缩式制冷机的设计计算

假设图 1-4 莫里尔图上各点 i 处的冷剂的焓为 h_i ，则

(1) 单位质量制冷量 q_0 : 在制冷循环内, 循环的 1 kg 冷剂由低温热源吸取的热量 (kcal)

$$q_0 = h_1 - h_5 \quad (\text{kcal/kg}) \quad (1-1)$$

(2) 压缩机的理论功 AL_0 : 将 1 kg 冷剂由蒸发器克服压差送入冷凝器, 所需要功 (L) 的热当量 kcal。 A 为功热当量, 等于 1/427 (kcal/kg·m)。

$$AL_0 = h_2 - h_1 \quad (\text{kcal/kg} \cdot \text{m}) \quad (1-2)$$

(3) 理论放热量 q_{00} : 1kg 冷剂在冷凝器中放入大气(风冷)或冷却水(水冷)的热量 (kcal)。

$$q_{00} = h_2 - h_4 = h_2 - h_1 + h_1 - h_5 = AL_0 + q_0 \quad (1-3)$$

(4) 理论制冷系数 ε_0 : 由蒸发器吸取的热量和压缩机的理论功 L_0 之比。

$$\varepsilon_0 = \frac{q_0}{AL_0} = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (1-4)$$

如压缩机的功以 kW·h 表示: 则 1kW·h 的制冷量等于 $860\varepsilon_0$ (kcal)。860 为 1kW 的电热器使用 1h, 所得热量的千卡数。

(5) 理论冷剂循环量 G_0 : 为了从低温热源吸入热量 Q_0 (kcal/h), 需要循环的冷剂量 (kg/h)。 Q_0 为制冷量。

$$G_0 = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_0}{h_1 - h_5} \quad (\text{kg/h}) \quad (1-5)$$

(6) 压缩机理论排气量 V_0 : 为了实现制冷量 Q_0 , 由压缩机从蒸发器吸取的气体体积 (m³/h)。设图 1-4 的点 1 的比容为 v_0 (m³/kg), 则 V_0 可由下式求得

$$V_0 = v_0 G_0 = \frac{v_0 Q_0}{h_1 - h_5} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (1-6)$$

(7) 循环效率 $\eta_{c,s}$: 对在一一定的蒸发温度和冷凝温度间工作的制冷循环, 制冷系数的最大值等于逆卡诺循环效率, 其值由下式计算:

$$\varepsilon_{car} = \frac{T_0}{T_c - T_0} \quad (1-7)$$

式中 T_0 、 T_c ——分别为与蒸发和冷凝压力相当的冷剂的饱和温度的绝对温度值。

ε_0 和 ε_{car} 的比等于循环效率 η_{cy} ：

$$\eta_{cy} = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{car}} \quad (1-8)$$

η_{cy} 可用于判断冷剂和制冷循环的好坏。

(8) 压缩机理论功率 P_0 ：在图 1-4 的制冷循环中，为得到制冷量 Q_0 所必需的压缩机理论功率。

$$P_0 = \frac{G_0(h_2 - h_1)}{860} = \frac{Q_0(h_2 - h_1)}{860(h_1 - h_5)} = \frac{Q_0}{860\varepsilon_0} \quad (\text{kW}) \quad (1-9)$$

(9) 冷凝器理论放热量 Q_{c0} ：图 1-4 的制冷循环中，为得到制冷循环量 Q_0 而由冷凝器放出的理论热量 (kcal/h)：

$$Q_{c0} = G_0 q_{c0} = \frac{Q_0(h_2 - h_4)}{(h_1 - h_5)} = Q_0 + 860P_0 \quad (1-10)$$

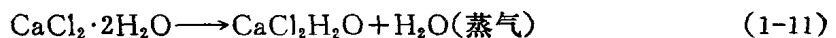
三、吸收制冷循环

吸收式制冷机中，吸收器和发生器的作用，相当于前一节所述的蒸气压缩式制冷机中压缩机的作用。蒸发器中蒸发的冷剂蒸气，与吸收器中高浓度的吸收溶液接触而吸收。吸收了冷剂蒸气的低浓度溶液，由溶液泵送往发生器，对该溶液加热浓缩而产生的冷剂蒸气送往冷凝器。也就是说在吸收器中吸收冷剂蒸气，而在发生器中将冷剂蒸气送往冷凝器。

因此，在吸收式制冷机中，除冷剂外，吸收溶液也起了重要作用。溶液在吸收器中吸收冷剂蒸气，再送往发生器中浓缩成高浓度溶液，然后回到吸收器中，再吸收来自蒸发器的冷剂蒸气。这种冷剂蒸气的吸收、升压（溶液泵）、加热浓缩（冷剂蒸气的分离）、减压（阀等的节流）、冷剂蒸气的吸收等过程，组成图1-5所示的吸收循环。在反复变化过程中，吸收来自蒸发器的冷剂蒸气、而后送往发生器 \ominus 的液体，称为吸收剂。

1. 间歇型吸收式制冷机

将 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 之类的含水化合物，在一定压力下升温，则发生下列变化：



此时放出水分。如果降低温度，则发生下列变化：



此时，所放出的水分又被吸收成为 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。如果利用这种性质，将蒸发那部分水分加以吸收，就能进行制冷。如果吸足水分，全部变为 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，吸收作用（制冷作用）即宣告停止。再将 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 加热放出水分，吸收能力又得到恢复。交替进行上述过程，可以实现间歇制冷。这种吸收式制冷机就称为间歇型吸收式制冷机。

图 1-6 为间歇型吸收式制冷机的原理示意图，它由玻璃容器 1、2 和与容器连接的

\ominus 原文为冷凝器，有误。——译者注

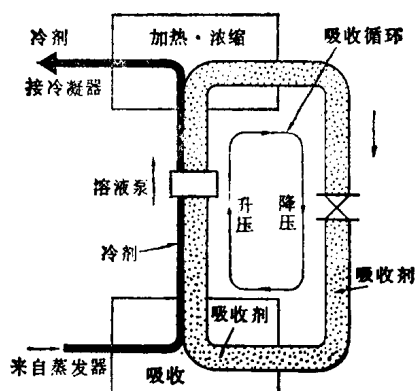


图1-5 吸收循环(↑□, 代表溶液泵)

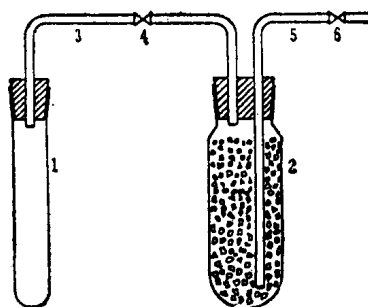


图1-6 间歇型吸收式制冷机

细管3、抽气管5等组成。容器2中封入 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。容器1在吸收过程中作蒸发器用，在再加热过程中起冷凝器作用。容器2则在吸收过程中起吸收器作用，在再加热过程中起发生器作用。

图1-7是 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的蒸气压力曲线。图中左边还画了水蒸气的压力曲线。 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 是在容器内的空气完全抽出后，封入容器2中的。由图1-7可知，如加热到 70°C 以上，则将按式(1-11)变化。

$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 上的压力，高于与室温 20°C 相当的水蒸气饱和压力，水蒸气流入容器1中，因冷却而凝结成液体。

如果将容器1中的温度保持在 40°C ，则容器2必须加热到 100°C 以上才能发生上述变化。在式(1-11)的变化完全结束以后再加热，那是毫无意义的。蒸馏出的水蒸气凝结成液体后，贮存在容器1中。

纯 CaCl_2 的分子量为111， $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的分子量为147，因此从147克的盐中，可以蒸馏出的水分为

$$147 - 129 = 18(\text{g})$$

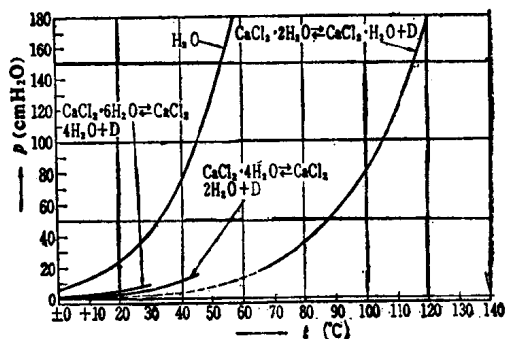
蒸发潜热约为 0.6kcal/g ，因此在一个循环中，所吸取的热量为 $18 \times 0.6 = 10.8\text{kcal}$ 。当然，为了实现这一制冷作用，必须对容器2进行冷却，使其中的压力低于容器1中水的蒸发压力。

例如，若将容器2冷却到 50°C 以下，容器1中就会结冰。若将容器2保持为 20°C ，则容器1中的温度为 -18°C 。将容器1中的水由 40°C 冷却到 0°C ，应放出的热量为 $0.018 \times 40 = 0.72\text{kcal}$ 。因此容器1中贮存的水要消耗掉

$$0.72 / 0.6 = 1.2(\text{g})$$

用于制冷的水量和单位质量的制冷量如下：

$$\text{用于制冷的水量} = 18 - 1.2 = 16.8(\text{g})$$

图1-7 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的蒸气压力曲线⁽¹⁾

$$\text{单位质量制冷量} = 600 \times 16.8 \div 18 = 560 (\text{kcal/kg})$$

为蒸馏水分而必须对容器 2 加热, 所需的热量约为 18kcal。因此制冷系数 ϵ_0 由下式求得:

$$\epsilon_0 = \frac{16.8 \times 0.6}{18} = 0.56$$

但实际上在对容器 2 加热时, 热损失很大, 图 1-6 的装置所需的加热量, 为制冷量的 4~6 倍。尽管实际的制冷系数是如此之低, 但由于结构极其简单, 因此家庭和研究所的小型冰箱多数采用这种型式。为了避免维持高真空的困难, 上述的水可用氨代替, 而 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 则用 $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$ 来代替。

2. 溴化锂吸收式制冷机

目前日本生产的吸收式制冷机, 差不多都以水为冷剂, 以溴化锂为吸收剂。图 1-8 说明这种方式的吸收制冷作用。图 1-8a 中, 一个封闭容器装溴化锂溶液, 另一个容器装水。装溴化锂水溶液的那个容器称为吸收器, 装水的容器称为蒸发器。将两容器用管子联通, 并抽出容器中的空气, 吸收器中的溴化锂水溶液, 开始吸收容器中的水分, 蒸发器中的水分蒸发、水因蒸发吸热而被冷却。

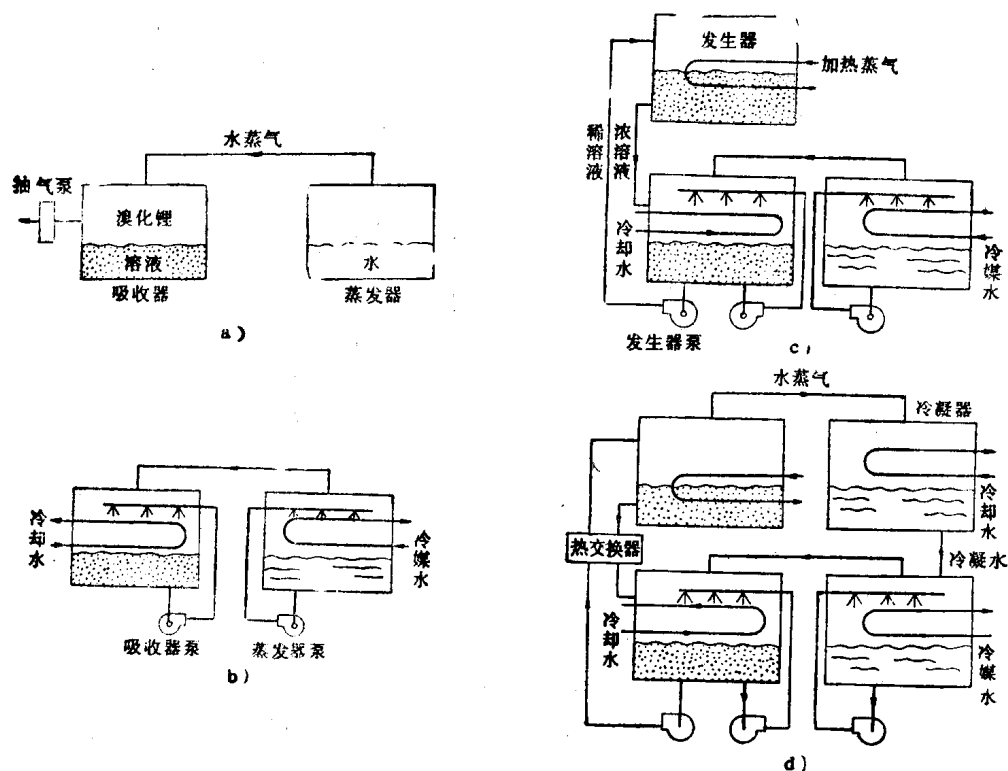


图1-8 吸收制冷循环

a) 吸收 b) 除去吸收热 c) 稀溶液浓缩 d) 冷凝

在这种情况下, 容器中的真空度越高, 水的温度降得越低。在降到绝对压力为 6.5 mmHg 时, 水温仅为 5°C (参照表 1-1 所示)。因此参照图 1-8b, 在蒸发器中设置盘管, 并用泵将水喷淋在盘管上, 此时盘管中的水可冷却到 8°C。

冷剂蒸气被溴化锂水溶液吸收, 由于吸收热 (大致等于潜热) 的关系, 溶液温度上

升。溶液温度越低或浓度越高，吸收能力就越大。为避免溶液温度上升，吸收器中装有冷却盘管，喷淋在管子上的溶液，由管内的冷却水冷却，保持在 40°C 左右。

溶液吸收水分后，浓度逐渐下降，吸收能力减弱。为了避免吸收能力减弱而保持一定的浓度，应设置图1-8c所示的发生器。溶液泵将稀溶液送入发生器中，利用蒸气等热源，将稀溶液加热到 90°C 左右，即可将吸收器中所吸收的水分蒸发出来，然后浓溶液就可再回到吸收器中，继续起吸收作用。

为了冷凝从发生器溶液中产生的水蒸气，设有图1-8d所示的冷凝器。水蒸气被冷凝器中冷却盘管的冷却水所冷凝，凝水再回到蒸发器中。冷凝温度在 40°C 上下（冷凝压力为 56mmHg ）。此外，为了提高热效率，在发生器和吸收器之间的溶液回路上，设置溶液热交换器。即把来自发生器的高温浓溶液的热量，传给由吸收器送往发生器的低温稀溶液，从而可减少发生器中的蒸气加热量和吸收器的冷却水量。冷却水一般串联通过吸收器和冷凝器。

3. 氨水吸收式制冷机

这种制冷机以氨为冷剂，并以水为吸收剂。这种制冷方法的缺点是：冷剂和吸收剂的沸点非常接近，因此从发生器中蒸馏出来的氨蒸气中，混有许多水蒸气。为了克服这个缺点，必须设置精馏装置。如果不提高氨蒸气的浓度，热力系数就要降低。

图1-9至图1-13，表示了这种制冷机的吸收制冷过程。图1-9表示最简单的制冷法，这时冰箱中只装有蒸发管。液氨从蒸发管上部流入，然后用风机不断地将空气压送在该液体之上，此时氨蒸发，冰箱得到冷却。蒸发的氨蒸气由空气流不断地带到外部，蒸发过程得以连续进行。这种装置中，氨的沸点决定了蒸发温度，不可能得到其他温度。另外蒸发的氨不能回收，经济性差，还造成公害。

在图1-9的基础上加以改进，可得到图1-10。蒸发器处在一个封闭的回路中。还加装了吸收器。作为吸收剂的水从 b 处注入，管路中的弯管 e 处可形成水膜，蒸发的氨蒸气碰到这一水膜，就被水所吸收，而成为氨水溶液。吸收是一个放热过程，氨蒸气温度升高。因此，管 d 中的蒸气温度（大致等于蒸发温度），低于管 e 中的蒸气温度，由于密度差而形成自然流动，所以不必安装风机。虽然这种装置中，所有的冷剂都可回收，但并不实用，因为吸收器下部汇集的氨水溶液，必须不断地从装置中抽出。

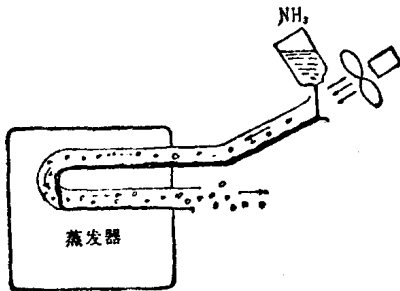


图1-9 大气压下冷剂的蒸发

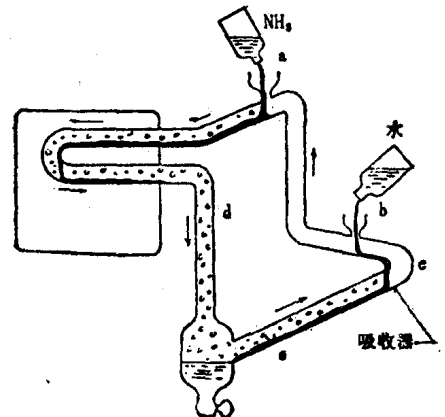


图1-10 蒸发和吸收

实际的吸收式制冷机还要做些改进，如图1-11所示。氨水溶液在重力作用下流入发生器，得到加热，氨从溶液中蒸馏出来。发生器如同虹吸式咖啡壶一样。在发生器中液体和氨蒸气如图所示交替升入分离器中。分离出来的氨蒸气，进入冷凝器中凝结成液体。分离掉氨后的水，在重力作用下由分离器流入吸收器。在吸收器中，水进一步吸收来自蒸发器的氨蒸气。冷凝器的出口和分离器的出口必须加装液封。图1-11所示的装置，装有气泡泵，只能用于小能量的装置中，用以提升大量的液体是不适合的。

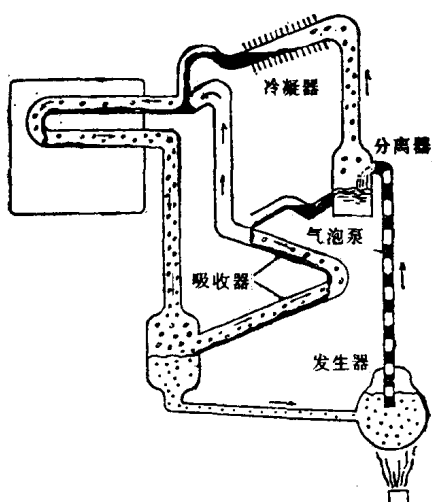


图1-11 小型吸收式制冷机模型图

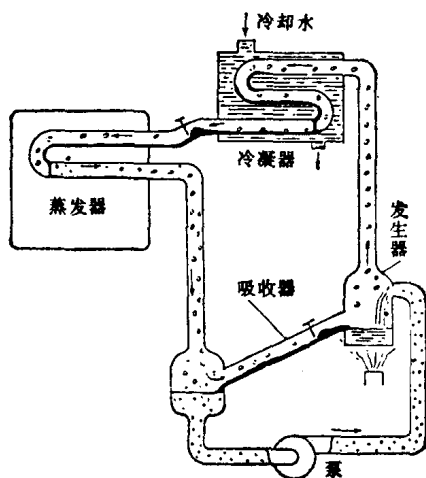


图1-12 最简单的大型吸收式制冷机模型图

在实践中，往往用氢气作为运载剂，用以在蒸发器和吸收器盘管之间传送冷剂。为了使制冷装置进行正常工作，氨的蒸发压力加上氢气压力，必须等于发生器和冷凝器部分的压力。这样氢气就封在蒸气吸收回路中。蒸发器吸收器和冷凝器发生器之间的压力差很小，因而可以省去泵等机械运动部件。

图1-12所示为适用于大能量的氨吸收式制冷机的循环。在这种循环中，蒸发吸收回路中已不再存在氢气，而只有低压的氨蒸气。因此在冷凝器和蒸发器间以及发生器和吸收器间，必须各装一只膨胀阀（或节流阀）。另外还必须如图所示设置溶液泵，以便将溶液由吸收器送往发生器。本图中采用水冷凝器（图1-11为风冷冷凝器），采用这种方式，大能量装置的性能可以进一步改善。

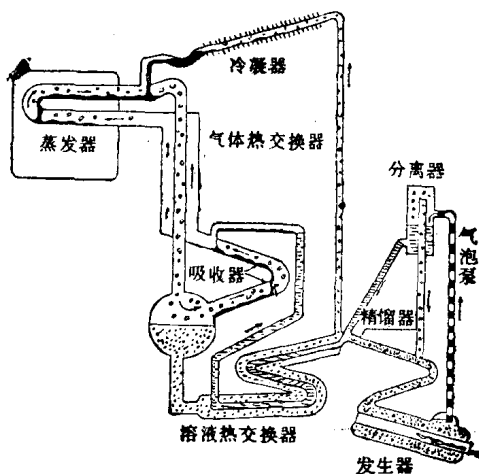


图1-13 家用吸收式冰箱

图1-13是在图1-11的基础上修正而成。它是一种家用冰箱的制冷机。其基本改进是设置了气体热交换器、液体热交换器和精馏器。因此可以大大提高制冷系数。液体热交换器用以加热进入发生器的氨水溶液，冷却流往吸收器的氨水溶液。气体热交换器用以冷

却进入蒸发器的氢，加热进入吸收器的氨蒸气。由分离器排出的氨蒸气中还含有水蒸气。如果有水分，水蒸气就要在精馏器中，接触来自溶液热交换器的氨浓度较高的氨水溶液，从而得到冷凝。因此，进入冷凝器的残余的蒸气，是氨浓度较高的蒸气。此时可防止大量水分进入蒸发器，并提高了制冷系数。

四、 $\log p - \frac{1}{T}$ 图

如果不采用图 1-7 所示的曲线，并以绝对温度的倒数作为横坐标，以压力的对数作为纵坐标，在这一坐标系中，画出的吸收剂的温度和压力的关系大致成直线关系。这种线图就称为 $\log p - \frac{1}{T}$ 图。图 1-14 为 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的 $\log p - \frac{1}{T}$ 图。其中虚线部分是外推的结果，与图 1-7 的外推结果相比较，精度还是高的。

借助于图 1-14，可以求得蒸馏出水蒸气和吸收水蒸气时，必需的加热量和散热量。根据克劳修斯-克拉佩龙定律，上述热量 q 可由下式求得：

$$q = AT(v'' - v') \frac{dp}{dT} \quad (\text{kcal/kg}) \quad (1-13)$$

式中 A ——功热当量 $1/427$ ($\text{kcal/kg} \cdot \text{m}$)；

T ——绝对温度 (K)；

v'' ——蒸气的比容 (m^3/kg)；

v' ——吸收剂的比容 (m^3/kg)；

p ——蒸气压 (kgf/m^2)。

与 v' 相比较， v'' 要大得多，因而 v' 可忽略不计。另外，如果压力极低，则由图 1-14 可知，从 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 蒸馏出来的蒸气是过热蒸气，有关理想气体的定律适用，此时下列的关系式成立：

$$pv'' = \frac{R^*}{\mu} T$$

式中 R^* ——普适常数， $R^* = 848 \text{kg}/\text{kmol} \cdot \text{K}$ ；

μ ——分子量。

由上式求得 v'' 代入式 (1-13)，则得

$$q = \left(\frac{AR^*}{\mu} \right) \left(\frac{T^2}{P} \right) \left(\frac{dp}{dT} \right) = - \frac{AR^*}{\mu} \frac{d \log_e p}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \quad (\text{kcal/kg 蒸气}) \quad (1-14)$$

$$q = - n \frac{AR^*}{n^* \mu^*} \frac{d \log_e p}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \quad (\text{kcal/kg 盐}) \quad (1-15)$$

上式中 n 为蒸馏出的摩尔数； μ^* 和 n^* 为变化前盐的分子量和摩尔数。由于

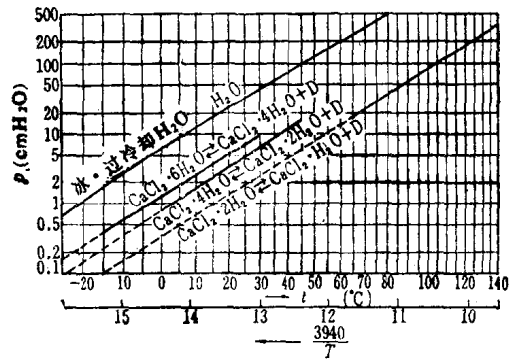


图 1-14 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的 $\log p - \frac{1}{T}$ 图⁽²⁾