

制 冷 换 热 器

上 册

上海机械学院动力系资料室

上海机械学院

毛 主 席 语 录

读书是学习，使用也是学习，而且是更重要的学习。

学制要缩短。课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

要自学，靠自己学。

把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上。

最聪明、最有才能的，是最有实践经验的战士。

前 言

本教材共分七章：第一章制冷机中的换热设备，第二章流动与阻力，第三章传热基础，第四章对流放热的实验研究，第五章各种对流放热现象的分析研究和实验公式，第六章换热设备的热力计算，第七章具有质交换时换热设备的热力计算，分上下册装订，第一、二、三章为上册，其余归下册。

教材 包括流体力学和传热学的基础知识，以及制冷换热设备的结构和设计，在目前，它们都是作为独立一门课程开设的。遵照毛主席关于“学制要缩短。课程设置要精简。”的教导，今把它们合并为一门课程，力求理论联系专业实际，内容删繁就简，着重讲述分析问题的方法。但由于是初次尝试，并限于编者的思想觉悟和业务水平，因此不一定能达到预期的效果。教材中出现的缺点和错误之处，望同志们给予批评指正，以利日后修改。

编 者

一九七三年十二月

目 录

上册

第一章 制冷机中的换热设备

§ 1—1 换热设备在制冷机中的重要地位	1
§ 1—2 换热设备的分类	1
§ 1—3 换热设备的构造	2

第二章 流动与阻力

§ 2—1 制冷剂—流体	39
§ 2—2 流体运动的力学性质	40
§ 2—3 管道流动的基本概念	70
§ 2—4 管道流动的基本方程	79
§ 2—5 流体运动的两种状态	89
§ 2—6 流动边界层	106
§ 2—7 流动阻力分析	113
§ 2—8 沿程摩擦阻力计算	121
§ 2—9 局部阻力计算	135
§ 2—10 管道流动时的阻力计算	143
§ 2—11 横向和纵向流过管簇时的阻力	156
§ 2—12 蛇形盘管内流动时的阻力	167
§ 2—13 壳管式换热器管际空间内流动时的阻力 ...	170
§ 2—14 双相流动时的阻力	176

第三章 传热基础

§ 3—1 换热的基本方式	185
§ 3—2 导热的基本概念及傅利叶定律	186
§ 3—3 气体、液体和固体的导热系数	187
§ 3—4 通过平壁与圆筒壁的导热	193
§ 3—5 通过肋壁的导热	203
§ 3—6 对流换热过程	216
§ 3—7 热辐射的性质及其基本定律	218
§ 3—8 物体间的辐射换热计算	221
§ 3—9 通过平壁和圆筒壁的传热	225
§ 3—10 冷管道绝热计算	235
§ 3—11 通过肋管的传热计算	240

上册附录:

几种局部阻力系数 ζ 值	249
--------------------------	-----

第一章 制冷机中的换热设备

§1-1 换热设备在制冷机中的重要地位

在压缩式制冷机中除压缩机、膨胀阀外，冷凝器、蒸发器、过冷器等都属于热交换器。在氨压缩式制冷机中换热设备的重量约占总重量的90%左右，因此要减轻压缩式制冷装置的重量和体积，就必须进一步提高制冷换热设备的传热效率。我国制冷工业的工人阶级在毛主席“自力更生、艰苦奋斗”的号召下，不断改进试制换热器的新结构，如螺旋板式换热器，板翅式换热器应用于制冷工业中已取得了可喜的成绩。

在吸收式制冷机中，换热器更处于十分重要的地位。因为发生器、吸收器、蒸发器和冷凝器全都是换热器，其中任一个换热器的传热效率降低都直接影响到吸收式制冷机制冷量的降低。对冷量为250万大卡/小时的溴化锂吸收式制冷机进行的试验结果表明当系统中漏入不凝性气体30克时由于影响到传热系数降低等，使制冷机的制冷量约降低100万大卡/小时。

由此可见，换热设备的好坏将直接影响到制冷机的工作，改进换热设备的设计与制造工艺是当前制冷工业中重要的任务之一。

§1-2 换热设备的分类

换热设备的分类方法很多，按换热表面的型式来分，可分表面式与混合式。表面式换热器是冷热流体通过金属间壁面进行换热，如套管式、壳管式、螺旋板式等等。混合式是冷热流体互相混合而进行换热，如蒸汽喷射式制冷机中的大气式冷凝器就是混合式换热器。另外也可以按冷热流体的状态变化来分，可分有集态变化的换热器与无集态变化的换热器。如冷凝器、蒸发器属于有集态变化的换热器，而液体过冷器，溶液热交换器等又属于无集态变化的换热器。

最后，根据换热器的用途来分，则可分为冷凝器、蒸发器、空气

冷却器、过冷器、中间冷却器、溶液热交换器等。以下我们就按换热器用途来分类，分别说明各种换热器的构造，换热器的构造很多，叙述中主要讲典型的，并以上海几个制冷机厂的产品为主。

§1-3 换热设备的构造

(一) 冷凝器：制冷机的冷凝器是用来使高压的制冷剂蒸汽凝结为液体的一种换热器。在冷凝器中制冷剂蒸汽将热放给冷却介质（如水或空气）后凝结为液体。

冷凝器一般可分为以下三类：

流动式冷凝器——在流动式冷凝器中用水带走热量，如壳管式（立式与卧式）冷凝器、套管式与螺旋板式冷凝器。

喷淋与蒸发式冷凝器——在这类冷凝器中同时利用水及水在空气中蒸发而吸收热量。在喷淋式冷凝器中同时利用水被加热和部份蒸发而吸收热量。在蒸发式冷凝器中则基本上由于水在空气中蒸发而吸收热量。

空气冷却式冷凝器——用强制流动的空气来吸收制冷剂蒸汽凝结时放出的热量。

以下分别叙述各种冷凝器的构造及其特点。

(1) 立式壳管式冷凝器

立式壳管式冷凝器的构造见图 1-1a。在冷凝器上部有一配水箱。为了使水均匀地流入管子内，在每根管子内装有一只配水器（见图 1-1b），每只配水器上有一斜形楔槽，水沿着斜槽向管内射出，射出的水沿着管子内壁向下流动。冷凝器安装在水泥砌的水池上，从管子内流下的水流入水池后排出。氨蒸汽经冷凝器上部的管子进入管束空间，冷凝后的氨液沿管子外表面流下经出液管流出。

这种冷凝器一般安装在室外。上海第一冷冻机厂生产的 LN 型立式氨冷凝器最大的壳体直径为 1.4 米，高度为 4.2 米，传热管为 $\varnothing 51 \times 3$ 毫米的钢管。传热面积为 25—250 米²，氨与水温差为 5℃ 时的热流量 q 约 4000 大卡/米² 小时，这种冷凝器的优点是：

(一) 水沿管子表面自由流下，较易于清洗水垢。

(二) 结构紧凑。

(三) 清洗水垢时，不必停机。

它的缺点是：

(一) 不能得到过冷的制冷剂液体。

(二) 耗水量较大。

(三) 较为笨重，搬运不便。

对立式壳管式进行的试验表明，对传热系数影响最大的是冷却水量。当水量增加时传热系数增加。

在一般情况下这种冷凝器的传热系数 K 约为 $650-750$ 大卡/米²·小时℃。

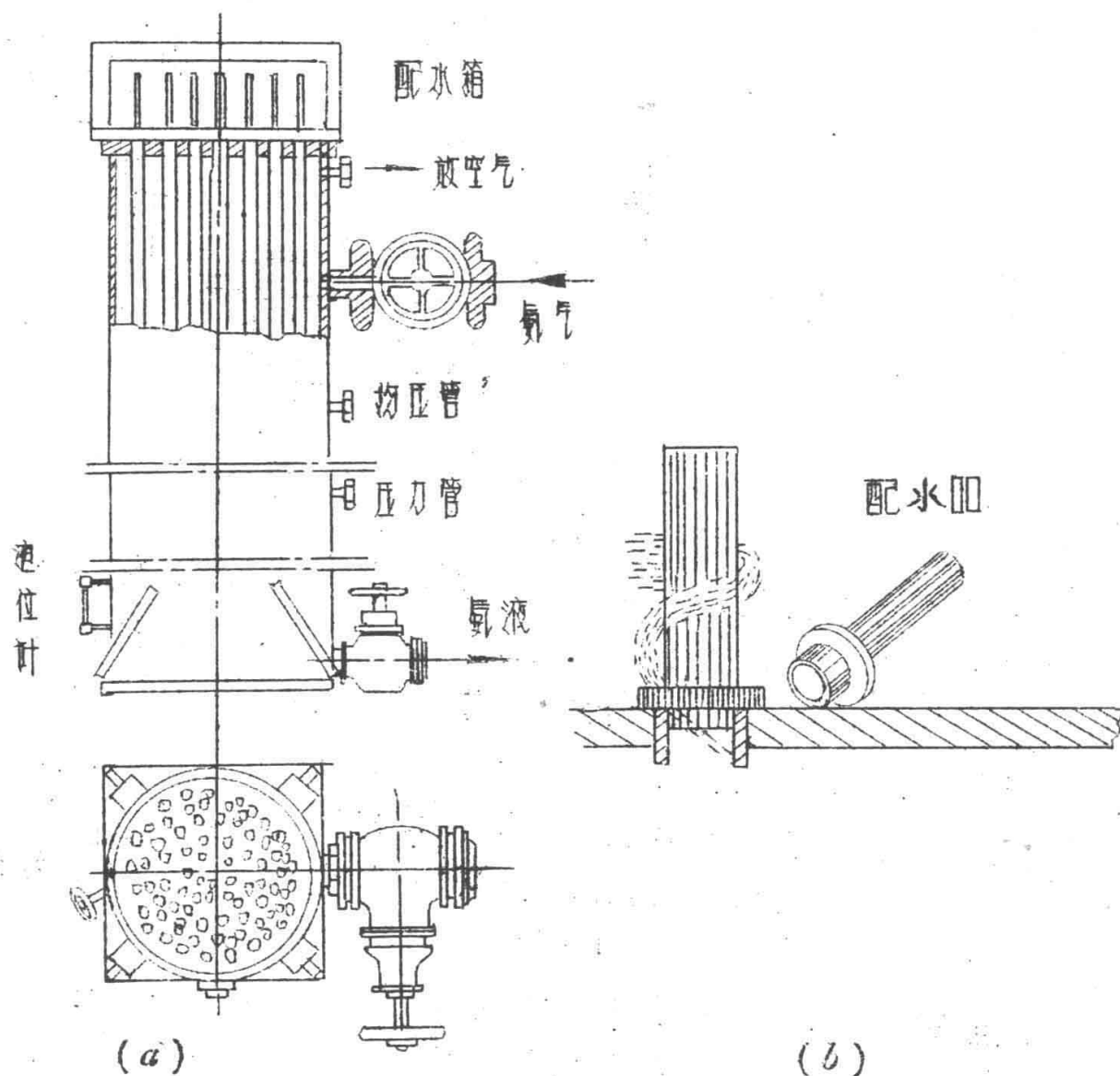


图 1-1 立式壳管式冷凝器

(2) 卧式壳管式冷凝器

卧式壳管式冷凝器的构造见图 1—2 所示。它的外壳上也装有进汽、出液、放空气，放油及安全阀等接头，压缩机排出的制冷剂蒸汽由壳上面的进汽管进入，冷凝后的制冷剂液体由壳下的液管流出。冷却水从端盖下部的进水管进入，因端盖内铸有分水筋，使冷却水在管束内来回流动多次，水在管内流动一次通常称为一个流程，冷却水最后由端盖上部的出水管流出。冷凝器所以制成多流程，是为了缩小水流断面提高水速，增强换热效果。

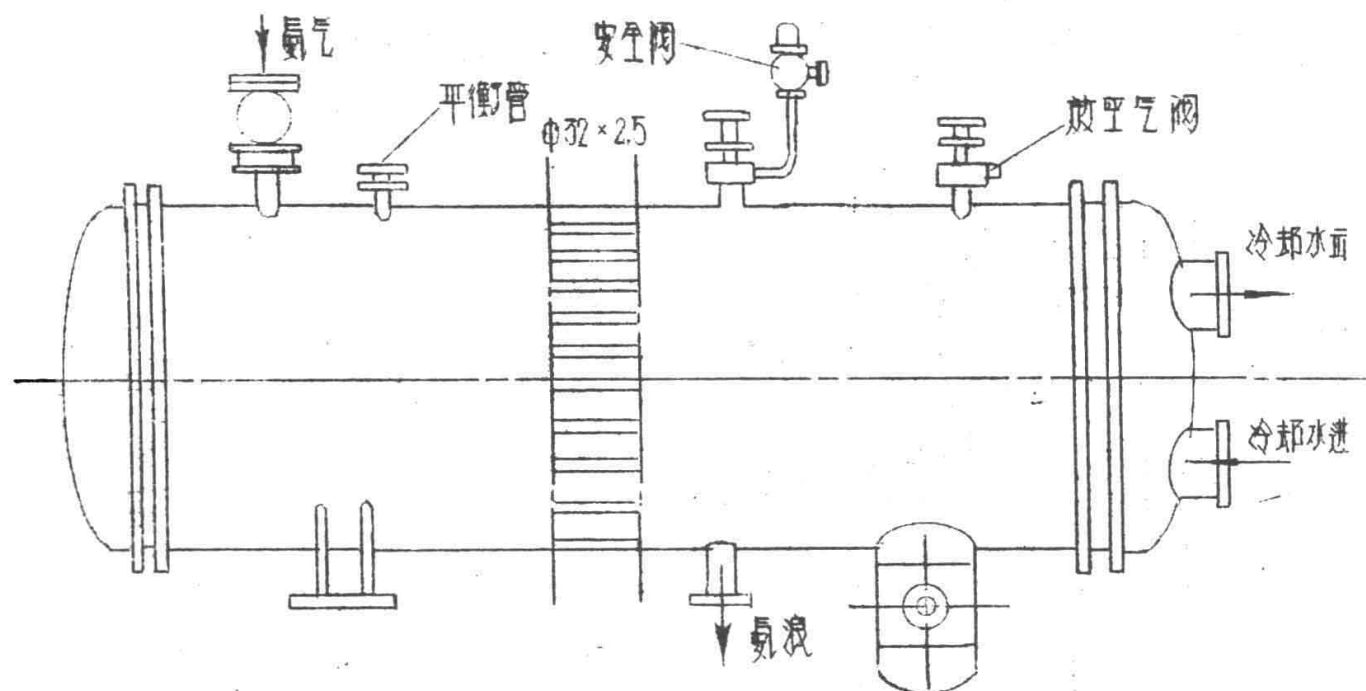


图 1—2 卧式壳管式冷凝器

上海第一冷冻机厂生产的 WN 型氨卧式壳管式冷凝器传热面积由 25 米² 至 180 米²，在冷凝器内，水通过 8 个流程，最大壳体直径为 0.9 米，传热管采用 $\Phi 32 \times 2.5$ 的 10[#] 钢管。传热系数约在 700—900 大卡/米² 小时℃范围内。

对于中小型氟里昂制冷机通常都用卧式冷凝器。上海冷气机厂生产 LN 型卧式冷凝器的传热面积由 7.2 米²—50 米²。传热管为 $\Phi 25 \times 2.5$ 的钢管，配在 2F10—8F10 的机组上。

在上海冷气机厂的部份产品中传热管曾用 $\Phi 18 \times 2.5$ 的紫铜管，为了提高氟里昂侧的传热，将紫铜管滚轧成低螺纹管（见图 1—3）。

增加冷凝面积。这种低螺纹管对于内表面的传热系数可达 $3500 - 4500$ 大卡/米²小时℃，因而大大缩小了冷凝器的体积。

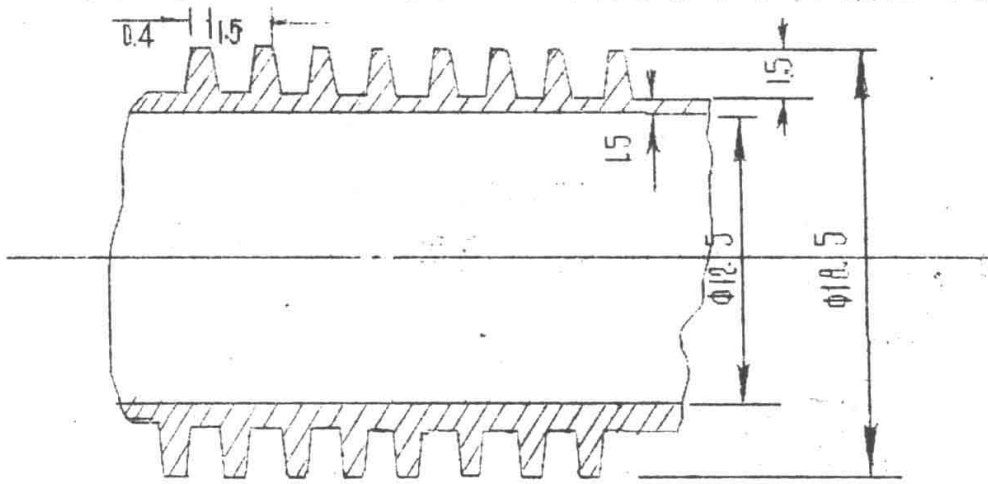


图 1-3 低螺纹管

卧式壳管式冷凝器的优点是传热系数高，冷却水的消耗量少，但由于清洗水垢不方便，要求冷却水的水质较好。

(3) 套管式冷凝器

在小型的空调冷冻机组里为了进一步缩小机组的体积，将冷凝器制成套管式。图 1-4 所示为上海冷气机厂 L-10 冷风机中所配用的外肋套管式冷凝器，冷凝器制成盘管形，3FW5B 压缩机放在冷凝器中间。

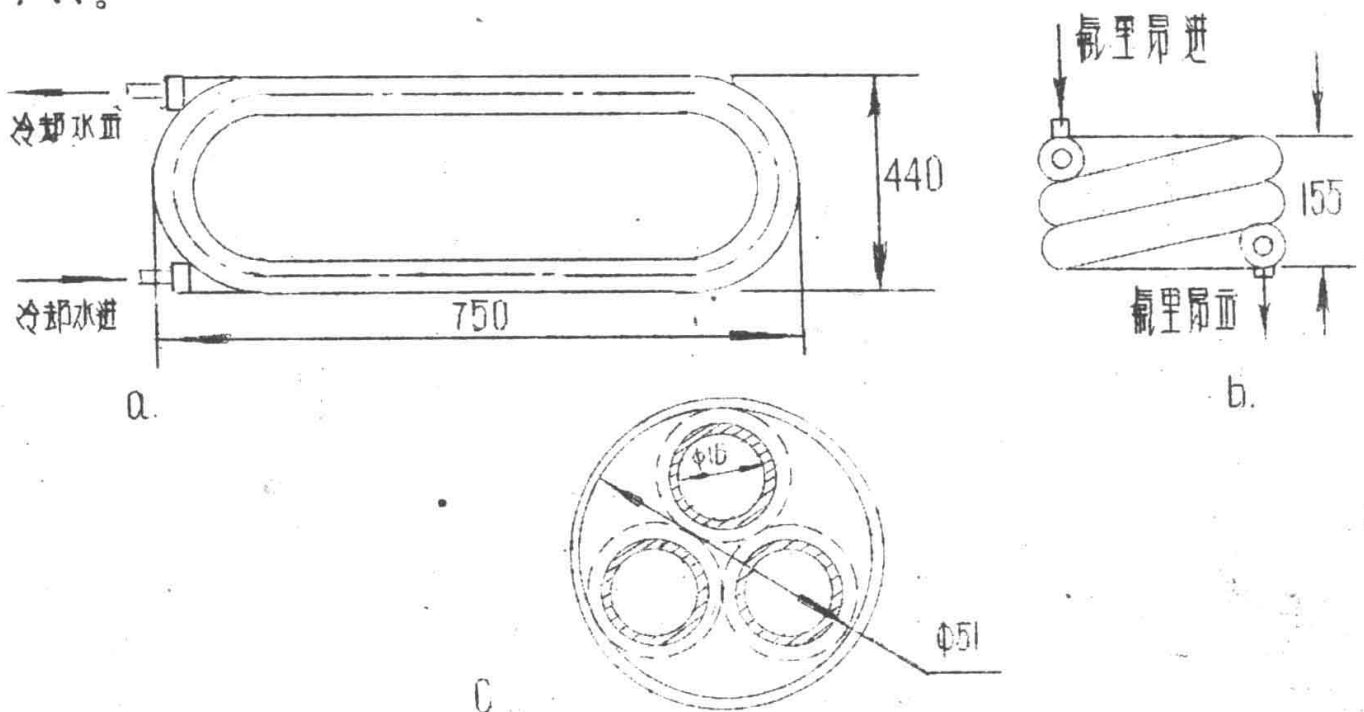


图 1-4 套管式冷凝器

冷凝器由 $\phi 51 \times 3.5$ 的无缝钢管制成，内有三根 $\phi 16 \times 1$ 的外肋紫铜管。水在管内流动，氟里昂蒸汽在肋管外表面上凝结。水在管内流速可达1—2米/秒。在温差 $5-6^{\circ}\text{C}$ 范围内时冷凝器的热流量 q 约在4000—5000大卡/米²·小时。

(4) 淋水式冷凝器

到目前为止，淋水式冷凝器一般都采用水平盘管的型式，其缺点是占地面积大，淋水不均匀，传热性能较差，一般传热系数 K 只在200—250大卡/米²·小时 $^{\circ}\text{C}$ 左右，单位面积热负荷 q_F 也只在1000—1200大卡/米²·小时左右。

在产品改革的群众运动中，上海第一冷冻机厂试制成功一种新型的螺旋管淋水式冷凝器，目前已投入使用，在图1—5中所示的是该

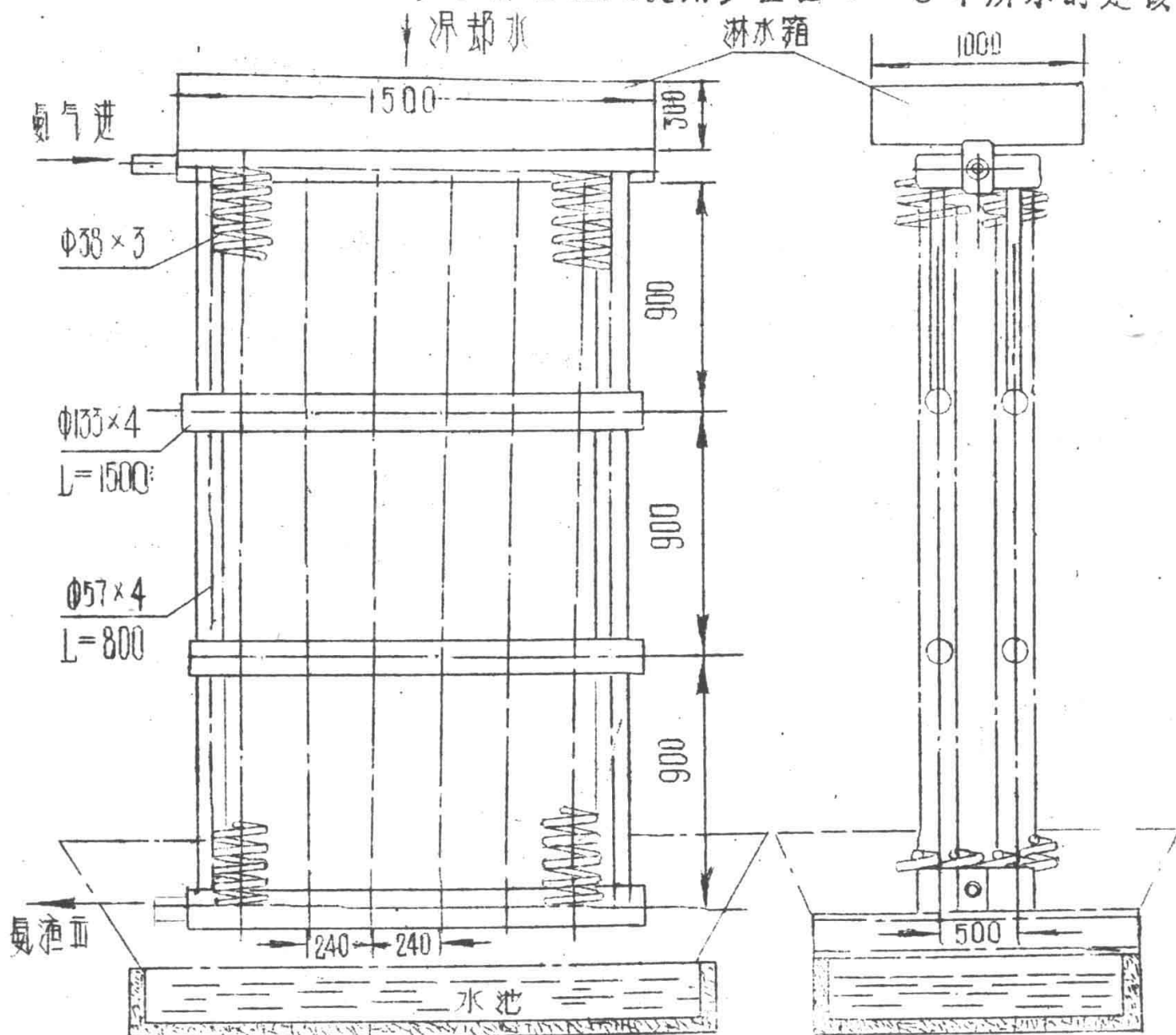


图 1—5 螺旋管淋水式冷凝器

厂试制的第一台 72米^2 的螺旋管淋水式冷凝器的外形图。该器在管内冷凝，冷却水在管外淋洒而下同时利用水和空气进行冷却；螺旋管分三层，可以把凝液及时地从中间导出，而且螺旋管有 6° 的倾斜角，便于凝液排除，管内为螺旋流、紊动大、增强传热；管外冷却水除从上向下淋洒外，还随螺旋管作旋转运动，因而淋水均匀；螺旋管比较紧凑，可缩小占地面积，也便于清洗。根据运行实测数据，在表面有 $0.3 \sim 0.4$ 毫米的污垢，管内已有油膜的情况下，其传热系数还可达 $K = 500 \sim 600$ 大卡/米²·小时 $^\circ\text{C}$ ，单位面积热负荷可达 $q_F = 2500 \sim 3000$ 大卡/米²·小时。因此，与水平盘管淋水式冷凝器相比，传热性能有很大改善；与同样传热面积的立式壳管式冷凝器相比，根据试验，冷却水可减少约 50%，在气候严寒季节甚至可停水而只以空气进行冷却，材料消耗可减少约 40%，制造工时可减少约 30%；而唯一不及它的是占地面积还较大，约大 46%。根据目前在上海、南京、合肥、福州、广州等地使用情况良好，深受用户欢迎，目前该制造厂正大力试制，加强试验研究准备推广使用范围。

(5) 蒸发式冷凝器

图 1—6 所示为上海第一冷冻机厂生产的 ZLG2.5 型蒸发式冷凝器的结构简图。冷凝器由 $\phi 32 \times 3$ 无缝钢管制成，传热面积 62.5米^2 配用 2 台轴流风机。传热量约 120000 大卡/小时。

冷却水用水泵从水池内吸出后经喷嘴喷淋在冷凝器表面上，冷却水的喷淋量只需保证整个管子表面都附有很薄的一层水膜就行。冷却水消耗量不大。

外界空气由两只 4 叶的轴流风机吸入，经冷凝器后排出，由于蒸发式冷凝器主要靠水蒸发时吸热，因此需要的风量也不大。在蒸发式冷凝器内水泵与风机的能量消耗为制冷压缩机能量消耗的 7~8%。

蒸发式冷凝器的优点是：

(1) 由于强制通风，加速了冷却水的蒸发，因而冷凝器表面的换热强度大，相应地可缩小冷凝器的体积和占地面积。

(2) 补充水消耗量较小，可适用于水源缺少的地区。

其缺点是：

- (1) 在运行维护上较立式冷凝器或卧式冷凝器麻烦，由于排管间距较小，中间几排难以清洗，故在冷凝管外应镀锌。
- (2) 喷嘴堵塞时，不易发觉，而且不易清洗。
- (3) 冷却水在系统内循环，因此水温较高。

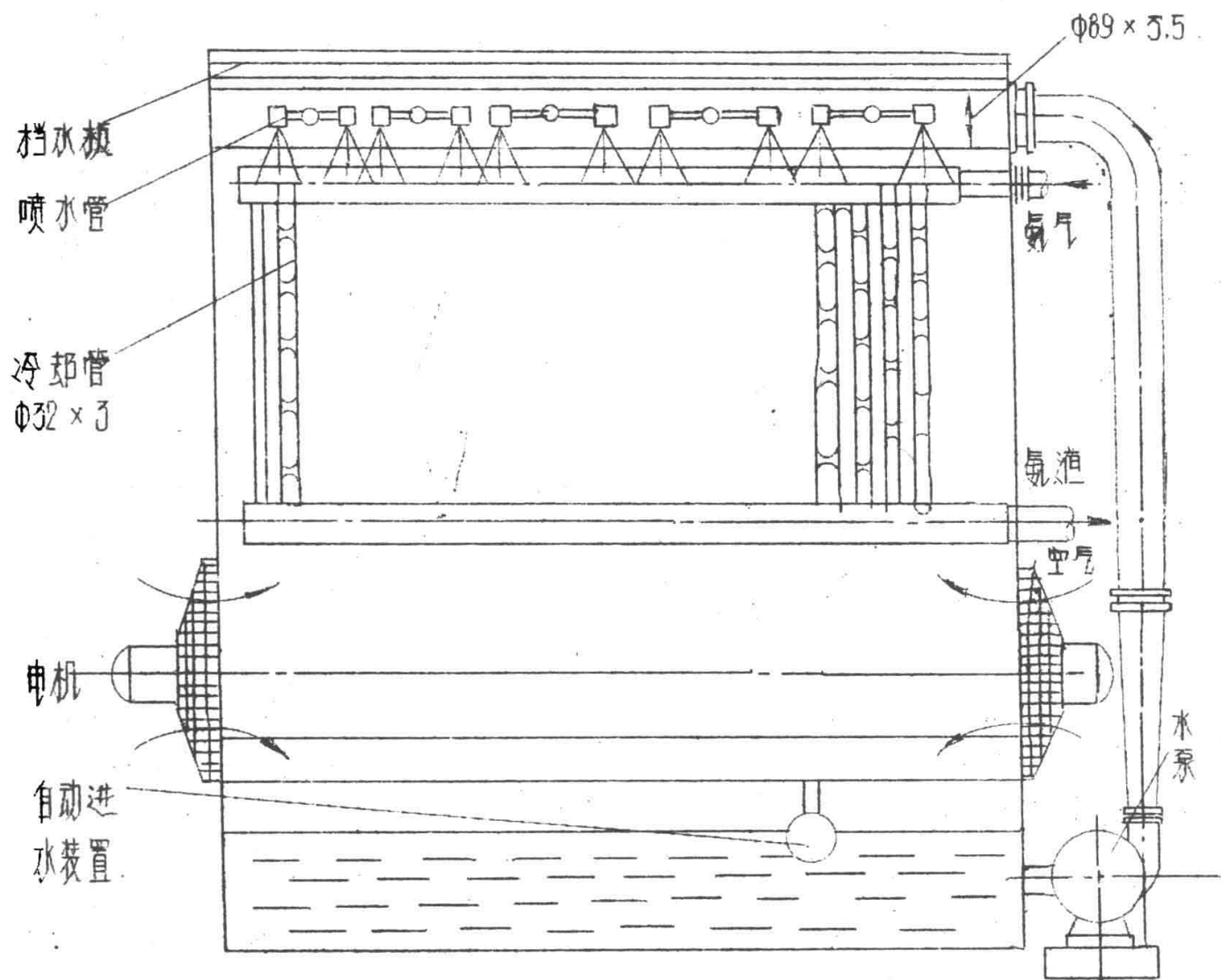


图 1—6 蒸发式冷凝器 ($F=62.5\text{米}^2$)

(6) 空气冷却式冷凝器

中小型的氟里昂制冷机常采用空气冷却的冷凝器。另外在移动式的制冷装置如冷藏车箱或冷藏汽车中也常用空气冷却式冷凝器。

在空气冷却式冷凝器中管内为氟里昂蒸汽的凝结而管外对空气进行放热。这两种情况的放热系数相差很悬殊。因而通常都在管外加上肋片以增强传热效果。

图 1—7 所示为上海制冷设备厂生产的 XR—F—13M² 风冷式冷凝

4. 冷凝器用 $\phi 10 \times 1$ 的紫铜管制成，前后共5排，每排18根共90根管。管外套肋片，肋片用 $\delta = 0.15$ 毫米紫铜皮制成，肋片间的间距为4毫米。每6根管套成一组，管子排成顺排（见图1—8所示）。

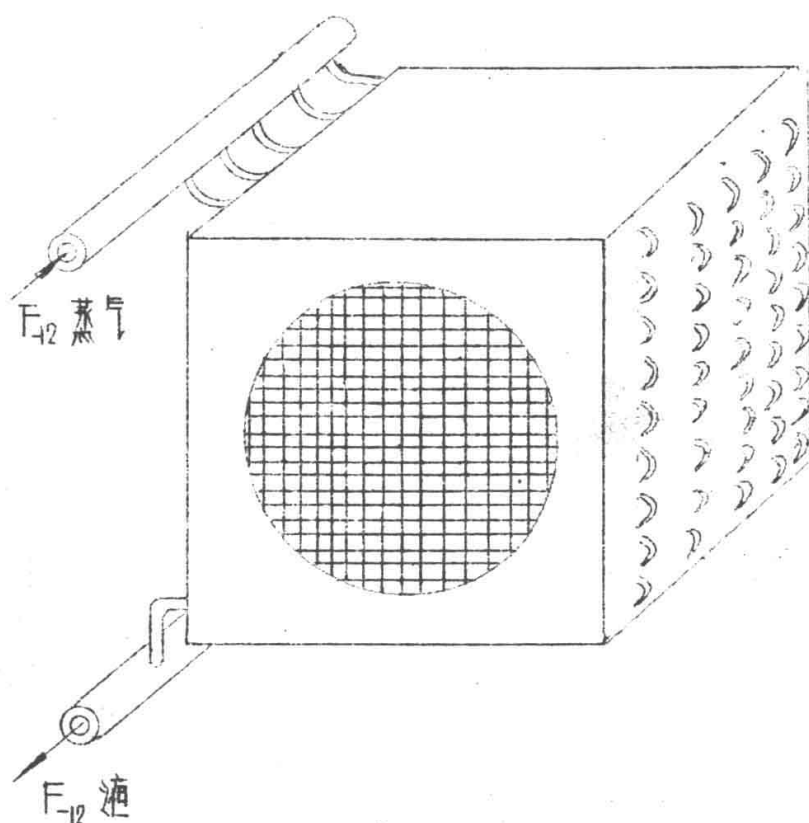


图 1—7 空气冷却式冷凝器

高压氟里昂蒸汽进入上部连通管后分五路进入冷凝器，在冷凝器内凝结后的冷凝液体进入下部连通管排入贮液筒。

空气冷却式冷凝器在传热温差 $\Delta t = 8 \sim 12^\circ\text{C}$ 的情况下，热负荷约在 $200 \sim 250$ 大卡/米²·小时，传热系数约在 $20 \sim 25$ 大卡/米²·小时 $^\circ\text{C}$ 范围内。上述几种冷凝器的特性及其使用场合列在表1—1中。

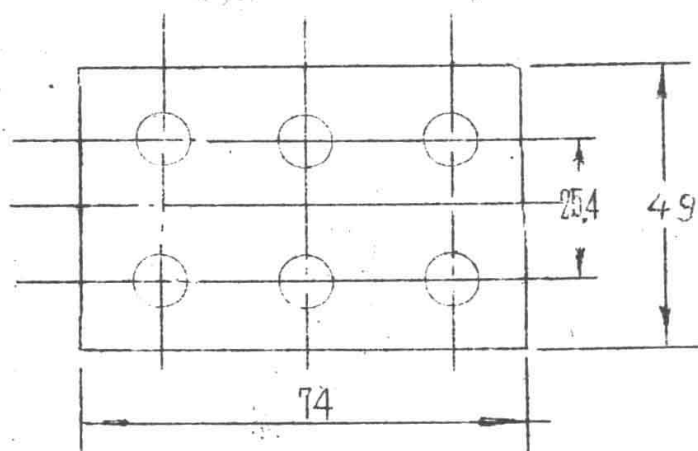


图 1—8 分组式肋片

各种冷凝器的特性及其适用场所

表 1-1

	立式壳管式 冷凝器	卧式壳管式 冷凝器	套管式 冷凝器	淋水式 冷凝器	蒸发式 冷凝器	空气冷却式 冷凝器
配用的 制冷机	大型氨制冷 机	氨、氟甲烷、 氟里昂等小 型制冷机	氨、氟甲烷、 氟里昂等小 型制冷机	氨制冷机	氨、氟甲烷、 氟里昂制冷机	氨、氟甲烷、 氟里昂制冷机
适宜安装 的地方	水量充分，水 质较好的地 方	安装地方小， 水量不太充 分，水质较 好的地方	占地小，水 量不太充 分，水质较 好的地方	水质差，水 量又不太充 分的地方	冷却水不足 的地方	没有冷却水或安 装冷却水管困难 的地方
优点	可安装于室外， 冷却管除垢性能 好，传热价廉。	安装占地小， 水量消耗少， 传热系数高。	耗水量少，体 制剂冷却，耐 有高压。	易于清洗，由 于管用水的耗 水量少。	利用水的蒸发吸 热，耗水量仅为 普通冷却器的 1.5~3.0%	不用冷却水，不 必安装水管和提 水设备
缺点	水量消耗大， 制冷剂液体冷 却没有过冷	冷却水管易 腐蚀，不 除水垢	构造复杂，不 易发现冷却管 的腐蚀，除垢 困难。	安装地方大， 构造复杂，价 钱贵	需要风机，传 热效果不如水 冷的好。	空气的冷却效果 差，冷凝温度高， 冷凝器体积大。
传热系数 K 大卡/米 ² ·时·°C	在50mm水管内 水量为1.3升 /分 K=750	(水速1米/秒) 900	(水速1.5米 /秒) 900	(淋水量25 升/米 ²) 600	光管时 300	约20

(二) 蒸发器

制冷机的蒸发器基本上可以分为两类：(1)用来冷却中间液体制冷剂（盐水、水、酒精等），如双头螺旋管式冷水箱与卧式壳管式蒸发器；(2)用来冷却空气的蒸发器。

在冷却液体制冷剂的蒸发器中常用的盐有氯化钠和氯化钙，也有用这两种盐的混合物。

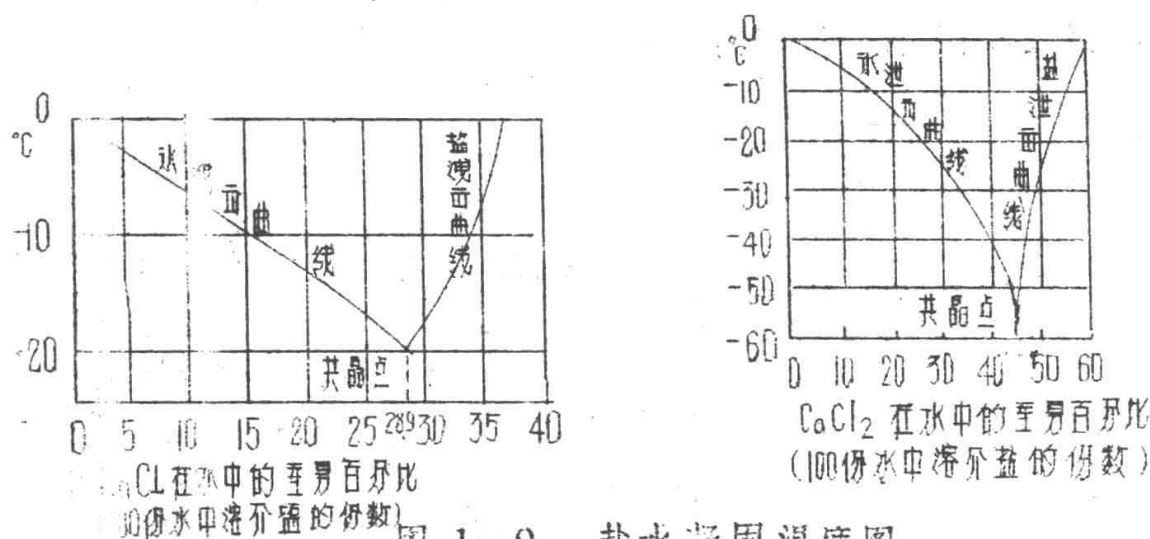


图 1-9 盐水凝固温度图

图 1-9 中表示出氯化钠 NaCl 与氯化钙 CaCl₂ 盐水溶液的性质。图中曲线的左半部指出溶液浓度增加时凝固温度降低，当溶液浓度增加至某一浓度时，溶液的凝固温度到达最低点，浓度再增加时溶液的凝固温度提高。溶液凝固的最低温度称之为共晶点。左边曲线上表示冰析出线而右边曲线表示盐析出线。例如，溶液中 NaCl 的重量百分比为 15% 则被冷却到 -10°C 时溶液中冰开始析出，使盐水的浓度不断增加。当盐水到达共晶点时，整个盐水凝固成一体。同样的情况是当盐水中 NaCl 的浓度大于共晶点浓度时，被冷却至一定温度后盐开始析出，进一步被冷却时盐水的浓度不断减小，至共晶点为止。

氯化钠溶液的共晶点温度是 -21.2°C，浓度是 23.1%。（重量百分比 23.9%。）而氯化钙溶液的共晶点温度是 -55°C，浓度是 29.9%（重量百分比 42.5%）。由常用图表中表 16、表 17、表 18 即可根据盐水的最低温度来决定盐水的浓度。从经济的观点来考虑，盐水的浓度应在冰析出曲线以上范围来选择。

图 1-10 所示为盐水冷却的系统图，盐水泵将蒸发器中的盐水抽

出后送入盐水盘管内，盐水在管内吸取冷藏室内的热量后回入蒸发器。

根据盐水在蒸发器内的流动情况，可分为开式与闭式两种。在开式蒸发器中盐水泵将盐水压送入盐水盘管后回流至蒸发器，盐水在蒸发器内流速很低，为了增强传热通常需用搅拌器。而闭式蒸发器则盐水在压力下（从管内）流过蒸发器，盐水流速较高，这种闭式蒸发器由于盐水与空气不接触，因而对管子的腐蚀也较少。

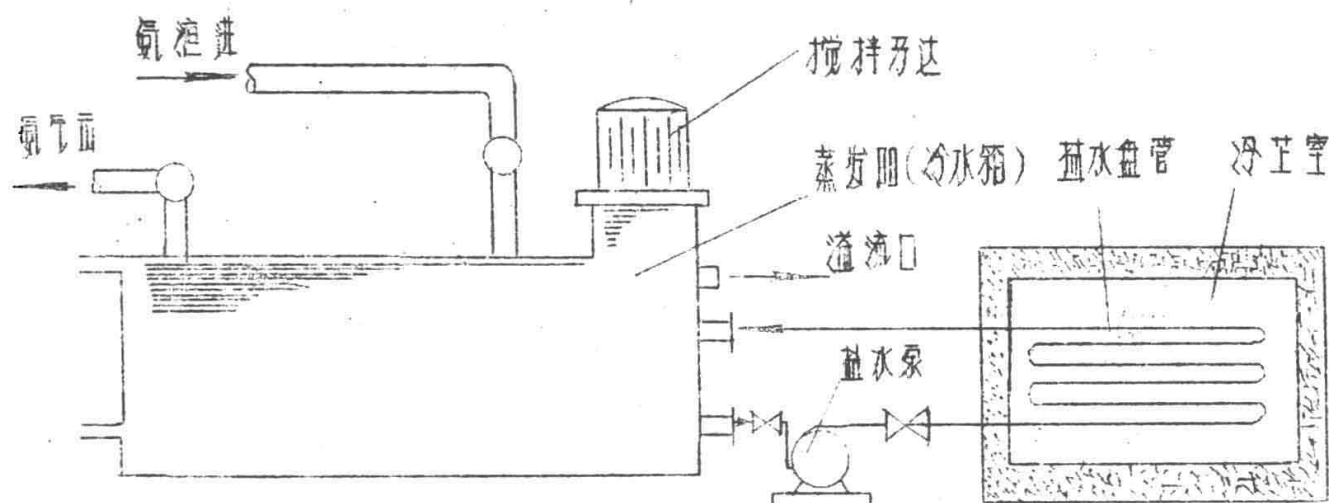


图 1-10 盐水冷却系统

根据制冷剂在蒸发器内的流动特点来分有满液式蒸发器与干式蒸发器两种。图 1-11 所示为满液式蒸发器与干式蒸发器的系统图。

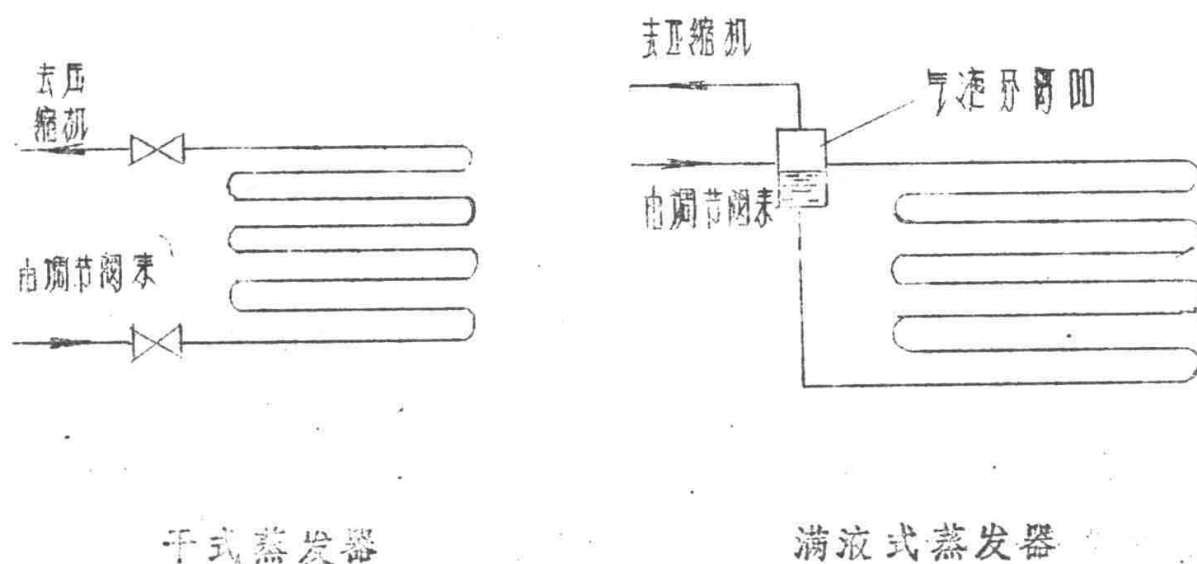


图 1-11