

蒸汽喷射制冷设计手册

燃料化学工业部化学工业设计院 編
第十设计院

中国建筑工业出版社

蒸汽喷射制冷设计手册

燃料化学工业部化学工业设计院

第十设计院

編

本手册共分十四章，分别叙述了蒸汽喷射制冷的基本原理、工艺设备设计、站房设计、管道计算、冷冻水冷却水系统设计、流量控制仪表和安装运行等有关内容。同时，对蒸汽喷射制冷技术所涉及的某些热工学概念和计算理论，也作了适当的介绍。附录部分列入了单位换算、空气和水的物理特性等常用资料 and 图表。

本手册可供设计、生产部门从事蒸汽喷射制冷工艺设备设计、站房设计、设备安装和运行管理人员使用；工艺设备部分对于抽真空的蒸汽喷射器设计也可作为参考。

蒸汽喷射制冷设计手册

燃料化学工业部化学工业设计院编
第十设计院

中国建筑工业出版社出版（北京西外大街19号）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京印刷六厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：18 插页：2 字数：482千字

1972年12月第一版

1972年12月第一次印刷

印数：1—9,115册

定价：1.80元

书号：15040·3018

毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

要把一个落后的农业的中国改变成为一个先进的工业化的中国，我们面前的工作是很艰苦的，我们的经验是很不够的。因此，必须善于学习。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

前 言

十多年来，特别是无产阶级文化大革命以来，在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国广大工人群众和技术人员，遵照毛主席“自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想”的教导，抵制和批判了刘少奇一类骗子所推行的反革命修正主义路线，自己动手设计，自己加工设备，蒸汽喷射制冷技术，在全国各地得到了日益广泛的应用。实践证明，这种制冷方式设备简单，容易制造，便于工厂自力更生，土法上马；设备的一次投资小，可以利用企业的“废”热、“废”汽，便于发展综合利用。由于制冷工质为水，使用安全，操作简便。因此，蒸汽喷射制冷得到了许多部门，特别是纺织、化工、冶金等部门的欢迎。

为了适应发展蒸汽喷射制冷的需要，我们在初步总结经验的基础上，编写了这本手册。手册编写中，着重考虑了当前许多单位自己加工和安装设备的需要，介绍了工艺设备设计、站房设计和安装运行维护等有关内容。同时，对蒸汽喷射制冷技术所涉及的某些热工学概念和计算理论，也作了适当的阐述。但是，由于我们政治业务水平不高，经验不足，手册内容的安排和写法一定还存在不少错误和缺陷，恳切地希望得到广大读者的批评和指正。

毛主席说：“我们必须学会全面地看问题，不但要看到事物的正面，也要看到它的反面。”蒸汽喷射制冷虽然有前面谈到的一些优点，也有它不足的一面。这就是效率比较低，汽和水的耗量比较大，只有在冷冻水温度较高，如 5°C 以上时，才比较经济。马克思主义认为，自由是对必然的认识和对客观世界的改造。只要我们高举毛泽东思想伟大红旗，在生产实践中深入探索制冷技术的内部规律，不断降低汽和水的消耗指标，提高设备的生产效率，进一步研究应用低压“废”汽（即 1.5 公斤/平方厘米以上的蒸汽），可以肯定，蒸汽喷射制冷技术在我国社会主义建设的高潮中，必将开放出更加鲜艳的花朵，结出更加丰硕的果实。

目 录

第一章 概論	1
一、蒸汽喷射制冷机的工作原理	1
二、蒸汽喷射制冷发展簡况	3
三、蒸汽喷射制冷机的使用范围	15
第二章 水蒸汽的热工特性	18
一、基本概念	18
二、热力学第一定律、内能、功和焓的概念	21
三、热力学第二定律、熵的概念	23
四、水蒸汽的热力过程	25
五、水蒸汽的性能图表	29
第三章 蒸汽喷射器的工作原理	63
一、蒸汽喷射器中蒸汽的热工过程	63
二、蒸汽喷射器中蒸汽的热工过程計算	66
三、蒸汽喷射器的几何尺寸	70
四、主喷射器理論計算实例	77
第四章 喷射器	82
一、基本資料	82
二、主喷射器	86
三、輔助喷射器	108
四、水喷射器	120
五、喷射器理论计算	123
第五章 蒸发器	128
一、蒸发器的结构型式	128
二、蒸发器的结构尺寸計算	130

VII

第六章 蒸发式冷凝器	135
一、设计数据的选择	135
二、传热计算	138
三、空气通过冷凝器的压力降	152
四、蒸汽在管内的压力降	157
五、风机选择	159
第七章 混合式冷凝器	174
一、冷凝器的结构型式	174
二、冷却水的消耗量	175
三、冷凝器的结构尺寸计算	178
四、冷却水的加热	185
五、多效混合式冷凝器	189
六、辅助冷凝器	194
第八章 计算实例	196
一、设计任务和原始资料	196
二、制冷流程	196
三、蒸发器	199
四、主喷射器	212
五、光面管蒸发式冷凝器	215
六、混合式冷凝器	225
七、第一辅助喷射器	229
八、第二辅助喷射器	232
九、辅助冷凝器	234
第九章 蒸汽喷射制冷机的选择	238
一、设计条件和基本资料	238
二、蒸汽喷射制冷机的特征	238
三、蒸汽喷射制冷机的型式选择	241
四、蒸汽喷射制冷机的台数选择	247
第十章 设备安装布置和管道计算	249
一、设备的布置安装方式	249

二、站房和设备布置	250
三、供排水管道的计算与安装方法	262
四、真空排气管道的安装与管径计算	273
五、蒸汽管道	278
第十一章 冷冻水系统	282
一、冷冻水系统的选择	282
二、设备选用计算	285
三、管道和设备的保温层	288
四、冷冻水管道的敷设	292
第十二章 冷却水系统	294
一、冷却水的水温和水质	294
二、冷却水的水质处理	296
三、冷却水系统设计	302
第十三章 测量和自动调节仪表	331
一、测量仪表	331
二、自动调节仪表	336
第十四章 安装要求和操作管理	361
一、安装要求和注意事项	361
二、操作方法	363
三、经济运行	365
四、维护检修	372
附录	374
一、单位换算	374
1. 长度换算	374
2. 面积换算	374
3. 容积换算	375
4. 压力换算	375
5. 流量换算	375
6. 能量(功)换算	376
7. 功率换算	376

8. 导热系数换算	376
9. 传热系数换算	377
10. 冷量换算	377
11. 速度换算	377
12. 温度换算	378
13. 水的硬度换算	378
14. 粘度换算	379
15. 绝对粘度	379
16. 运动粘度	379
17. 密度(重度)	379
二、常用无因次数群	380
三、面积、体积计算公式	381
四、常用数据表	386
1. 常用对数表	386
2. 三角函数表	389
3. 弓形几何尺寸表	393
五、空气和水的物理特性	394
1. 干空气在压力为760毫米汞柱时的参数	394
2. 空气的重量、体积、水蒸汽压力和含湿量	396
3. 在 $0 \sim 1^{\circ}\text{C}$ 温度范围内空气和各种气体的平均热容量 C_p	398
4. 水的物理参数	399
5. 每米 ³ 水在各种温度下的重量	400
六、汽、水、电参考价格	401
1. 全国各地热电厂或电厂供热价格	401
2. 全国各地工业用电电价	402
七、常用保温材料性能、产地及价格	403
八、常用管材规格	404
1. 水煤气输送钢管(冶标)	404
2. 直缝卷焊钢管	404

第一章 概 論

利用蒸汽喷射器抽取真空，在工业生产中应用极为广泛。首先可以用来制取 $+2\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的工业用低温水，在一定条件下比其他制冷方法经济合理。此外，还可以代替真空泵，进行真空蒸馏，真空脱臭，真空蒸发，真空结晶，真空干燥以及真空炼钢等。

解放以来，国内利用蒸汽喷射器制取工艺生产或空气调节用低温水的制冷设备日渐增多，而且在化工、石油、冶金、纺织和轻工等生产部门，利用蒸汽喷射器制冷和抽真空的技术都取得了许多经验。随着我国工业生产的飞跃发展，采用蒸汽喷射器制冷和抽真空的技术，将会得到更加广泛的应用。实践证明，综合利用，大有可为。特别是冶金、化工和石油等工业生产中产生大量的“废”热和“废”汽，设法利用这些“废”热作为蒸汽喷射器的能源，应该说是一件很有意义的工作。

一、蒸汽喷射制冷机的工作原理

蒸汽喷射制冷机取得制冷效果，主要是在低压（真空）下，借一部分水的绝热蒸发，使剩下的那一部分水失热而被冷却。

水在不同的大气压力下，有不同的沸点，而在沸点温度时，水变成同温度的蒸汽，就需要吸收大量的汽化热。大家都知道，在标准大气压力为760毫米汞柱的地方烧开水，水要加热到 100°C ，才开始沸腾，即把水烧开。但在海拔几千米高的青藏高原上烧开水，由于气压低，水不到 100°C 就开了。例如周围大气压力为525毫米汞柱时，只要将水加热到 90°C 就开始沸腾。如果水周围的大气压力低到6.5毫米汞柱时，水温只要达到 5°C 就开始沸腾了。在沸腾温度时，一部分水从周围吸收汽化热，变成水蒸汽。1公斤 100°C 的水汽化成同温度的蒸汽，需要从周围获得539千卡的汽化热。

这样只要创造一个压力很低的真空容器，将温度高于器内沸腾温度的水，送入真空容器，水便开始沸腾。如真空容器外界无热量供给，这时水的汽化需要的汽化热，只能从未汽化的水中夺取热量，从而使未汽化的水失去热量，温度降低，达到制冷的目的。

目前在容器中形成真空的方法很多，例如采用机械真空泵，可以形成较高的真空度。但水在低压下蒸发时，水蒸汽的比容很大，使用机械真空泵抽真空制冷，真空泵就会非常庞大。如果采用蒸汽喷射器抽真空，它不但可以形成很高的

真空度，而且抽气能力也很大。因此，利用蒸汽喷射器抽真空制冷，就比机械真空泵经济合理。

蒸汽喷射器形成低压（真空）的原理，主要是利用一定压力的蒸汽通过一个喇叭形的喷嘴（一般叫拉伐尔喷嘴），体积迅速膨胀。一般在喷嘴出口处的蒸汽体积，较进入喷嘴前的体积大几百倍。由于蒸汽体积的膨胀，在喷嘴出口处产生速度高于1000米/秒以上的蒸汽流，也就是说蒸汽的压力能转变成速度能（一般叫动能），这时在喷嘴出口处就形成低压（真空）状态。由于高速气流的引射作用，使与蒸汽喷射器连接的容器内，形成接近喷嘴出口处的低压（真空）。

例如，利用蒸汽喷射器与蒸发器连接抽真空，保持器内绝对压力为6.5毫米汞柱，水在这个压力下相应的沸腾温度便是 $+5^{\circ}\text{C}$ 。如将温度为 $+8^{\circ}\text{C}$ 的水送入蒸发器，由于水温高于6.5毫米汞柱压力下相应的沸腾温度，因此，发生一部分水的迅速蒸发。而蒸发器为一个绝热设备（即外部无热量传入），水实现汽化所需要的汽化热，只有从未汽化的水中夺取，也就是使未汽化的水降低自身温度来供给汽化热。从而使送入 $+8^{\circ}\text{C}$ 的水，温度降低至 $+5^{\circ}\text{C}$ ，以满足制冷的需要。

根据上述制冷原理，蒸汽喷射制冷的主要流程如图1-1所示。

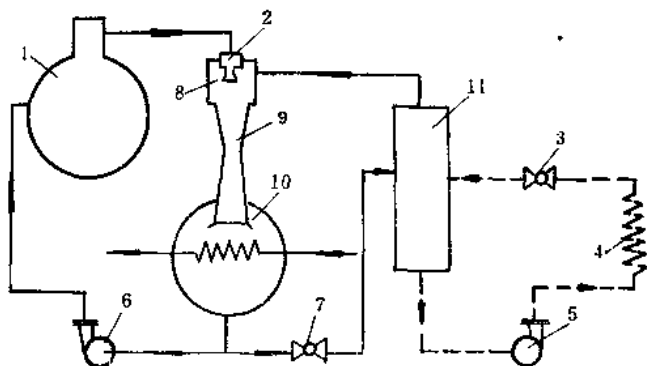


图 1-1 蒸汽喷射制冷机主要流程简图

1—锅炉；2—喷嘴；3—调节阀；4—冷用户；5—冷冻水泵；6—冷凝水泵；7—调节阀；8—吸入室；9—扩压器；10—冷凝器；11—蒸发器

由锅炉送来压力为 P 的工作蒸汽，通过喷嘴绝热膨胀，使工作蒸汽压力降低到稍低于蒸发压力，然后同蒸发器中抽出的空气-蒸汽混合，通过扩压器，使压力上升到冷凝压力，混合蒸汽在冷凝器中被冷却水冷凝。冷凝水部分经过调节阀，减压后流入蒸发器补充蒸发的水量，绝大部分冷凝水通过冷凝水泵，再送回锅炉内加热，制取工作蒸汽。

当然，要求整套蒸汽喷射制冷机連續制冷，仅有上述主要流程的设备是不行的。在主喷射器中經扩压器压缩以后的混合蒸汽，压力仍然很低，它只能被送入主冷凝器，絕大部分混合蒸汽在主冷凝器中被冷却水冷凝，而未被冷凝的少部分混合蒸汽和漏入系统中的不凝結气体，不能直接排入大气，必須通过第一輔助喷射器与第一輔助冷凝器，和第二輔助喷射器与第二輔助冷凝器的工作，連續压缩，提高压力后，排入大气。因此，第一、二輔助喷射器的主要作用是排除系统中的不凝結气体，維持蒸汽喷射制冷系统的真空度，以达到連續制冷的目的。实际制冷机的流程，詳见图1-3、图1-7、图1-10。

二、蒸汽喷射制冷发展简况

早在1901年以前，蒸汽喷射制冷就研究成功了。但是由于早期的喷射器設計和泵的基本性能以及操作条件等方面的限制，在当时沒有获得广泛的使用。到1920年以后，由于蒸汽喷射器的效率和部件設計都有很大的改进，这种制冷机在工业生产中得到了广泛的应用。通过长期的生产实践，不但使蒸汽喷射器的效率有所提高，在一些工业比較发达的国家，低压蒸汽也可以用来作为蒸汽喷射制冷机的能源，压力低至0.3表压的蒸汽都可以应用。这就說明工业生产中的低能“废”热也能用于制冷。

目前世界上应用蒸汽喷射制冷的国家很多，表1-1介绍的为美、苏等国蒸汽喷射制冷机的蒸汽消耗指标。

尽管蒸汽喷射制冷具有很多优点，如可靠性高，维护費用低，只用水作为冷冻剂，高低压蒸汽均可采用，但是蒸汽和冷却水消耗量都比較大。因此，在某些情况下仍不如透平制冷机或溴化鋰制冷机运转費用低。显然，要想扩大蒸汽喷射制冷的使用范围，降低蒸汽耗量和冷却水用量是很重要的一环。

降低喷射器的压缩比，是提高喷射器效率的有效措施。为此，可行的办法或者是提高蒸发温度，或者是降低冷凝温度。在蒸发温度一定的情况下，降低冷凝温度，喷射器的蒸汽耗量就可以大大减少。50年代后期，蒸发式冷凝器应用到蒸汽喷射制冷系統代替水冷凝器成功后，就使蒸汽耗量大約降低1/4，冷却水耗量大約降低2/3。目前，这种蒸发式冷凝器已在美、日等国的工业生产中广泛应用。

解放前我国根本沒有自己的制冷工业，更沒有蒸汽喷射制冷机。自1953年以来，在各工业部門，如化工、紡織、輕工、石油和冶金、机械等部門，都相繼制造了一些为自己生产使用的蒸汽喷射制冷机。特别是1958年以来，在社会主义建設总路线的光輝照耀下，各工业部門都开始自己設計、自己制造了一些大中型的蒸汽喷射制冷机。經過广大工人和技术人員的不断实践、总结和改进，这些制冷机的性能和电、汽、水的消耗指标日益先进。

表 1-2 所列, 就是根据目前国内经过较长时期生产运转的蒸汽喷射制冷机的使用情况, 初步总结的蒸汽和冷却水的消耗指标。

国外蒸汽喷射制冷机蒸汽消耗指标

表 1-1

冷冻温度 (°C)	工作蒸汽压力 (公斤/厘米 ²) (绝对压力)	工作蒸汽耗量 (公斤/1000千卡)					备 注
		冷 凝 温 度					
		32.2	35	37	37.8	40.6	
4.5	7	3.50	4.12	—	4.89	5.80	美国
7.2	7	2.87	3.37	—	3.94	4.67	美国
10.0	7	2.42	2.83	—	3.29	3.82	美国
12.8	7	2.08	2.43	—	2.83	3.29	美国
5	7	—	—	3.91	—	—	日本
15	5	—	—	2.41	—	—	日本
5	5	—	—	5.50	—	—	西德
15	5	—	—	3.00	—	—	西德
5	5	—	2.90	—	—	—	西德

冷冻温度 (°C)	工作蒸汽压力 (公斤/厘米 ²) (绝对压力)	工作蒸汽耗量 (公斤/1000千卡)					备 注
		进 水 温 度 °C		出 水 温 度 °C			
		22	24	28	30	36.5	
4	8	—	6.0	—	—	—	苏联
8	7	2.78	—	—	—	—	苏联
9	6.5~8	—	—	—	7.5~8.9	—	苏联
12	1.0	—	—	6~7	—	—	苏联
15	9.0	—	—	—	—	6.16	苏联

国内蒸汽喷射制冷机的蒸汽和冷却水消耗指标

表 1-2

冷冻本温 (°C)	蒸汽压力 (公斤/厘米 ²)	冷凝温度 (°C)	蒸汽消耗量 (公斤/1000千卡)	冷却水用量 (米 ³ /1000千卡)	备 注
3.3	3.4	33	3.5	0.50	混合冷凝器
4.3	3.6	32	3.76	0.45	混合冷凝器
4.6	3.5	33	3.20	0.40	混合冷凝器
5	4.0	35	3.78	0.44	混合冷凝器
8	7	38	5.20	—	表面冷凝器
12	5	36	3.00	—	蒸发冷凝器
12.2	7	33.3	3.30	0.90	表面冷凝器
10~12	10	—	4.35	0.47	混合冷凝器
16	7	33	2.85	0.75	表面冷凝器

从表 1-2 中可以看出，目前蒸汽喷射制冷机在采用表面式和混合式冷凝器的情况下，蒸汽和冷却水的消耗量还是比较高。在史无前例的无产阶级文化大革命的巨大推动下，1967 年我国第一套利用蒸发式冷凝器的蒸汽喷射制冷机试验成功。我国南方一些冷却水温度较高的地区，结合生产的需要，自力更生，也研制成功了采用蒸发式冷凝器的蒸汽喷射制冷机，为我国冷却水水温较高的广大南方地区和水源缺乏的西北地区，在工业生产中采用蒸汽喷射制冷机创造了有利的条件。

蒸汽喷射制冷机的发展，在我国只有十多年的历史，而且在这段时期中还受到刘少奇一类骗子反革命修正主义路线的干扰和破坏，使蒸汽喷射制冷技术的发展受到抑制，生产应用也不够普遍。但是，在毛主席无产阶级革命路线指引下，特别是无产阶级文化大革命以来，广大工人和技术人员狠批了刘少奇一类骗子推行的反革命修正主义路线，蒸汽喷射制冷技术得到了很大的发展。

必须看到，我们在蒸汽喷射制冷设计、制造和运行等方面的实践，时间还不多，经验还不足，有很多客观规律还没有深刻的认识。我们一定要遵照毛主席关于“通过实践而发现真理，又通过实践而证实真理和发展真理”的教导，自力更生，艰苦奋斗，为蒸汽喷射制冷技术的发展做出新的贡献。

为了使大家对我国蒸汽喷射制冷机的实际发展有一个比较具体的了解。并在实际工作中有所借鉴，下面就目前国内已有正式产品的几种不同型式的蒸汽喷射制冷机的主要性能，进行概括的介绍。

蒸汽喷射制冷机的设备型式，就蒸发器说，有卧式单效蒸发器和立式单效与多效蒸发器。冷凝器有表面式冷凝器、混合式冷凝器和蒸发式冷凝器。这些不同型式的蒸发器和冷凝器，国内大都已经采用。

(一) 立式三效蒸发器和立式三效冷凝器组成的蒸汽喷射制冷机

上海第一冷冻机厂生产的 ZP-40/5 型三效立式蒸汽喷射制冷机为这种型式。其技术规格：

当蒸发温度为 +5°C 时，额定制冷量	400000 千卡/小时
蒸发器冷冻水循环量	18 米 ³ /小时
蒸发器冷冻水进水温度	28°C
蒸发器冷冻水出水温度	5°C
主冷凝器冷却水用量	160 米 ³ /小时
主冷凝器冷却水最高进水温度	28°C

主冷凝器冷却水出水温度	34°C
工作蒸汽压力(表压)	7 公斤/厘米 ²
主喷射器蒸汽消耗量(干饱和蒸汽)	1400 公斤/小时
辅助喷射器蒸汽耗量(干饱和蒸汽)	140 公斤/小时
设备外形尺寸(长×宽×高)	4350×2700×6711 毫米
设备总重量(不包括水泵)	5200 公斤

三效立式蒸汽喷射制冷机，由于冷冻水在蒸发器的进出口温差为23°C，冷冻水的循环量很小，只有18米³/小时，因此，主要适于各工业部门，当工艺生产需要冷冻水温差较大时使用。一般不适于空气调节制冷，空调冷冻水的进出口温差，一般均低于7°C。在制冷机产冷量为400000千卡/小时时，冷冻水的循环量大约需要57米³/小时。所以空调制冷如需要这种制冷机时，蒸发器中每效间洒水板的孔径需加大或增加孔的数目，否则不能满足空调的生产要求。

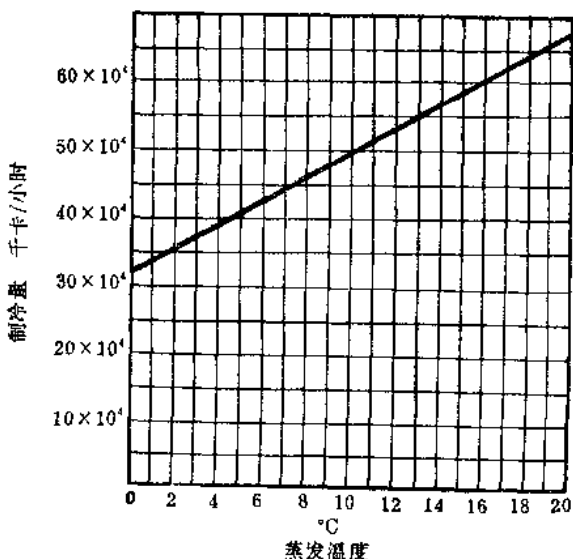


图 1-2 ZP-40/5 型蒸汽喷射制冷机的性能曲线

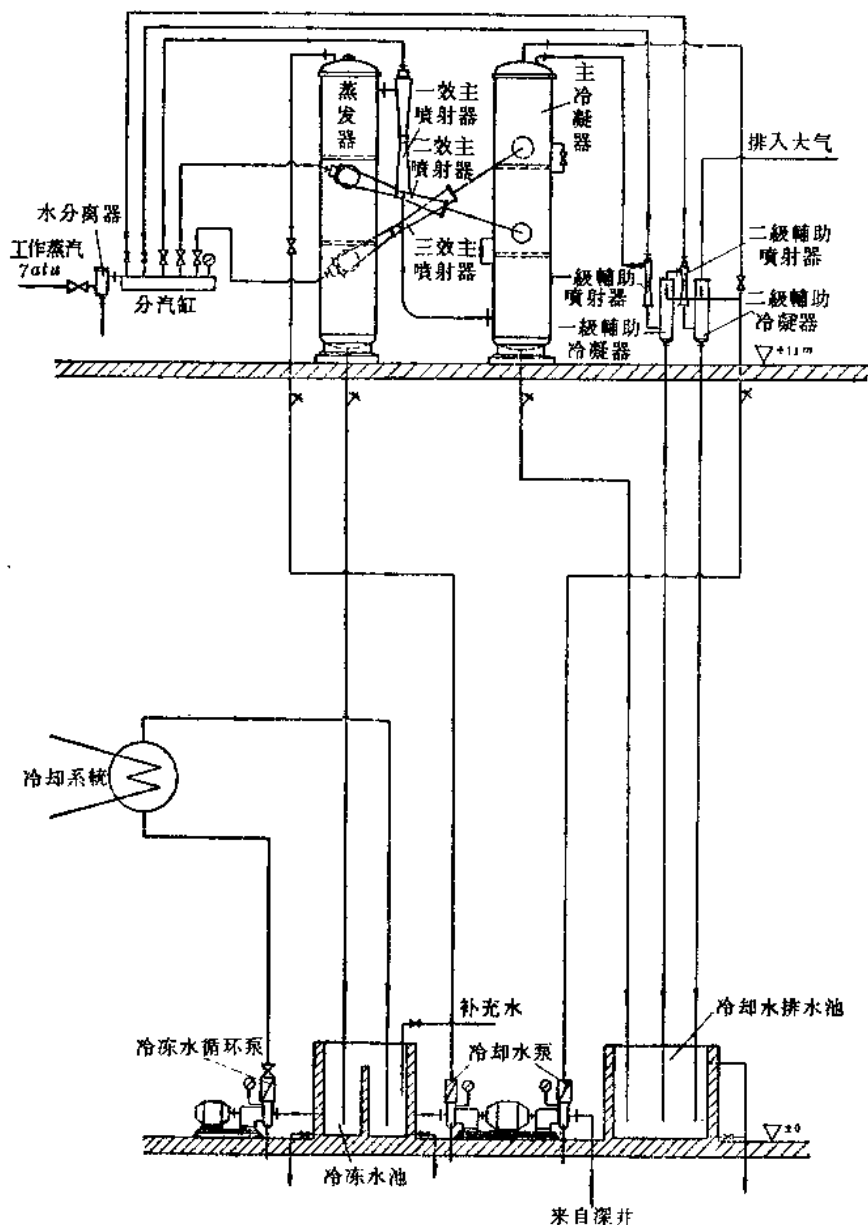


图 1-3 ZP-40/5 型蒸汽喷射制冷机流程图

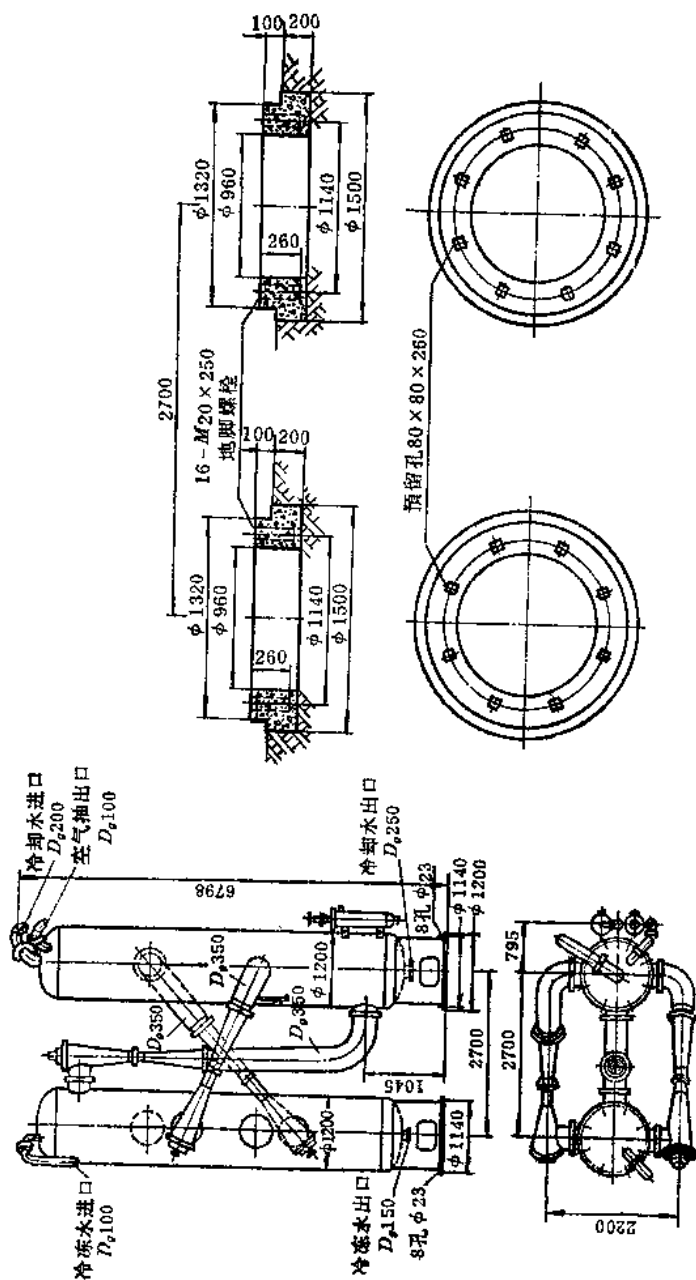


图 1-4 ZF-40/5型蒸汽喷射制冷机外形尺寸图

图 1-5 ZF-40/5 型蒸汽喷射制冷机基础图