

发电厂汽轮机专业试用教材

汽轮机辅助设备 及热力系统



西安电力学校

目 录

绪 论	(1)
第一章 凝汽设备	(3)
第一节 凝汽设备的任务和组成	(3)
第二节 凝汽器的结构	(5)
第三节 凝汽器的热力计算	(14)
第四节 凝汽器的热力特性	(21)
第五节 凝汽器的最有利真空	(42)
第六节 典型凝汽器的结构分析	(43)
第七节 凝汽器的附属设备	(48)
第二章 发电厂的热力系统	(66)
第一节 锅炉给水的回热加热及其设备	(67)
第二节 发电厂工质的损失和补充	(90)
第三节 汽轮机组的热力系统	(112)
第四节 典型汽轮机组的热力系统	(120)
第五节 发电厂的全厂热力系统	(130)
第六节 原则性热力系统计算	(146)
第三章 发电厂的热力管道	(159)
第一节 管道规范	(159)
第二节 管道附件	(164)
第三节 管道的膨胀、补偿、支持和保温	(183)
第四节 管道计算	(189)
第五节 管道的运行维护	(193)
第四章 水 泵	(195)
第一节 一般概念	(195)
第二节 离心泵的工作原理和构造	(197)
第三节 离心泵中流体的运动及速度三角形	(205)
第四节 离心泵的基本方程式及其修正	(206)
第五节 离心泵的实际扬程、效率、功率的计算公式	(207)
第六节 离心泵的相似原理	(210)
第七节 比转速	(213)
第八节 离心泵的主要工作特性曲线	(215)

第九节	管路特性曲线	(216)
第十节	离心泵的汽蚀现象与最大吸水高度的确定	(218)
第十一节	离心泵的工作点与调节	(221)
第十二节	离心泵的串、并联	(222)
第十三节	离心泵的运行	(225)
第十四节	发电厂应用的循环水泵、凝结水泵和给水泵	(229)
第五章	汽轮发电机的冷却设备	(265)
第一节	基本概念	(265)
第二节	汽轮发电机的空气冷却设备	(265)
第三节	发电机的氢冷却设备	(267)
第四节	汽轮发电机的双水内冷却	(277)
附 录	流体力学	(279)
第一节	流体的基本物理性质	(279)
第二节	流体静力学	(282)
第三节	流体动力学的基本概念及常用名词	(287)
第四节	稳定流动的连续性方程式	(290)
第五节	稳定流动流体的能量方程式及其应用	(292)
第六节	稳定流动流体的动量定理及动量矩定理	(299)
第七节	流体运动的阻力	(302)
第八节	阻力系数的确定	(305)
第九节	管道的水力计算	(315)
第十节	管道中的水锤	(321)
	复习思考题	(324)
	习 题	(324)

绪 论

伟大领袖毛主席教导我们：“世界上的事情是复杂的，是由各方面的因素决定的。看问题要从各方面去看，不能只从单方面看。”火力发电厂的生产正也是如此。虽然锅炉、汽轮机和发电机等是主要设备，但是单单依靠它们是无法完成发电任务的。发电厂的汽轮机必须有各种各样的辅助设备和将这些设备连接成各种循环的热力系统，才能安全、可靠地完成发电任务。

发电厂中由于汽轮机辅助设备和热力系统的设计、安装、运行管理和检修维护工作不当，造成严重的资金浪费、设备损坏，发电中断和人身伤亡的事故所占的比例是相当大的。

此外，汽轮机辅助设备和热力系统在某些方面还是提高发电厂整个循环热效率的关键。在一些条件下主机、主炉虽然没有太大的问题而辅助设备及热力系统上运行的不合理所造成的损失，却远远超过主要设备提高效率后所得的收益。在通常的情况下，主要设备的改进涉及的问题较多，往往是不容易实现的，但若在辅助设备及热力系统方面下功夫，动手改进却是大有潜力的。

近年来随着高压高温大功率汽轮机组的不断出现，辅助设备和热力系统方面需要解决的技术问题也相继增多。因此，国内、外汽轮机制造业、科研、设计和运行单位都投入了巨大的精力，从事研究，改善各种辅助设备的性能；简化和合理地布置热力系统；减少设备投资和提高它们的可靠性、经济性等等。现在很多方面已取得显著的成果。

我国自史无前例的无产阶级文化大革命以来，工人阶级、领导干部和科技人员不断地批判了刘少奇、林彪等推行的“洋奴哲学”“爬行主义”，发扬了独立自主，自力更生的精神，在毛主席革命路线的指引下，汽轮机制造业又掀起一次新的跃进。1969年上海汽轮机厂成功的制出了高压高温中间再热式12万5千瓩的汽轮机组；后来上海和哈尔滨汽轮机厂又先后造出了30万瓩、20万瓩的汽轮机组；而且目前又在设计和准备制造超高压60万的汽轮机。随着这些大型汽轮机的制成，在辅机制造能力和水平上也都有了显著的提高，例如大型凝汽设备，供给高压大型直流锅炉给水的高压水泵等等不但制造出来，而且在很多关键性问题也得到了较好的解决。这些成就的取得无疑是：无产阶级文化大革命的胜利。是伟大的毛泽东思想的胜利。

目前我国的社会主义建设事业正在一日千里的向前发展，伟大的领袖毛主席和中国共产党为我们开辟了无限美好前程，祖国的电力工业正在出现更加宏伟的发展局面，摆在我们面前的任务是十分艰巨、十分光荣的。我们必须坚决遵循毛主席的教导：“中国人民有志气、有能力，一定要在不远的将来赶上和超过世界先进水平”。我们要树立坚定的信心，勇于克服困难，熟练的掌握这方面技术知识，为祖国的电力工业贡献自己的一切力量。

本课程是中等技术学校汽轮机专业的主要课程之一。它主要是学习汽轮机各种辅助设备的作用、工作原理、性能；及其有关理论计算知识；了解各种热力系统的作用，布置方式及热力计算基础。为进一步学习和掌握汽轮机组的全面运行，检修和试验工作奠定基础。

学习这门课程必须贯彻理论与实践相结合的原则，应与学工劳动，现场教学生产实习密切结合起来，注意把学到的基本理论、基本概念应用到实际中去，要重视培养我们独立工作、独立分析问题和解决问题的能力。

西安电力学校汽轮机教研组

一九七五.九.二十八

第一章 凝汽设备

在研究热工理论中我们得知，提高蒸汽动力装置循环热效率的主要方法之一是：提高汽轮机的进汽参数和合理的降低汽轮机的终参数。在蒸汽初参数相同的情况下，若降低终参数，蒸汽在汽轮机中的有用功则必然增加，同时还由于终压、终温的降低，排汽传给冷源的热量相对减少，结果使循环的热效率得到较大的提高。在工程实用上，降低蒸汽终参数的最有效方法是使汽轮机的排汽进行凝结。所以除了专门用途的背压式汽轮机以外，一般汽轮机都设有凝汽设备。

第一节 凝汽设备的任务和组成

凝汽设备主要的任务是使排汽受到冷却水冷却后凝结成水，从而达到以下两个目的：

(1) 在排汽口造成真空，使蒸汽在汽轮机中膨胀到最低压力，增加蒸汽在汽轮机中的可用热焓降，提高循环热效率；

(2) 将排汽凝结成水，重新送入锅炉去蒸发，因为凝结水是品质最纯净的蒸馏水，最适于锅炉给水的要求。

凝汽设备对循环热效率的影响可由 η_z 与背压 P_2 之间的关系（如图1-1）中看出。在蒸汽初参数为35绝对大气压、温度为435°C的情况下，背压由1绝对大气压降低到0.1绝对大气压时，使热效率从27.7%升高到35.5%。背压继续降低时，热效率 η_z 还将增长得更快些，由此可知，使用这种方法对提高蒸汽动力循环的热效率非常有效的。应该指出汽轮机排汽压力并不是在任何情况下不断下降都是有利的。因为汽轮机排汽是靠冷却水冷凝后形成真空的。为了达到凝汽器高度真空，势必要大量的冷却水，这样不但运行费用加大，而且随之的设备投资费用也自然增加，所以在考虑确定凝汽器排汽压力时，需要进行一系列的热力计算和技术经济的比较来确定其最有利的数值。

目前我国发电厂的汽轮机背压通常在0.03~0.07绝对压力之间。列车电站的汽轮机按0.1绝对压力设计。船用汽轮机的背压在0.06~0.1绝对压力，

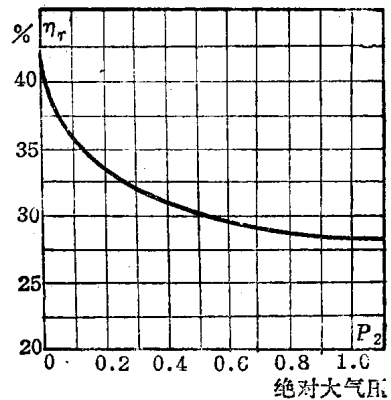


图 1-1 热效率 η_z 与汽轮机背压 P_2 的关系（初压力 $P_0 = 35$ 绝对大气压， $t_0 = 435^\circ\text{C}$ 。）

凝汽设备是凝汽器、抽气器及其辅助设备的总称。本书仅讲述现代火力发电厂中应用的具有表面式凝汽器的凝汽设备。

表面式凝汽器中装有许多铜管，铜管的管壁将汽轮机的排汽和冷却水隔开。冷却水在铜管内流过，吸收管外蒸汽的热量，使汽轮机的排汽凝结成水。凝汽器铜管外的蒸汽空间称为汽侧，铜管内的水空间称为水侧。由于蒸汽和冷却水不直接接触，因此凝结水的水质非常纯净。最适合送回锅炉作给水使用。

汽轮机排汽被冷凝时由于其比容急剧缩小，压力骤然降低而形成了真空。蒸汽凝结成水时其比容变化如下：

在压力为 1 绝对大气压时，蒸汽凝结成水其比容要缩小 1725 倍；在压力为 0.04 绝对大气压时蒸汽凝结成水其比容要缩小 35460 倍。

表面式凝汽器的构造简况如图 1—2 所示。蒸汽由汽轮机排汽缸排入凝汽器内。管板 4 固定在外壳 1 上，管板上装有铜管 5，铜管两端开口，和水室 15、16、17 相通。水室上装有外盖 2、3，冷却水由进口 11 进入，在水室中分别流入各铜管中。冷却水在铜管中吸收管外排汽热量后由出口 12 排出。排汽在管外凝结成水后滴向下面的热水井 7 中，由凝结水泵排出。

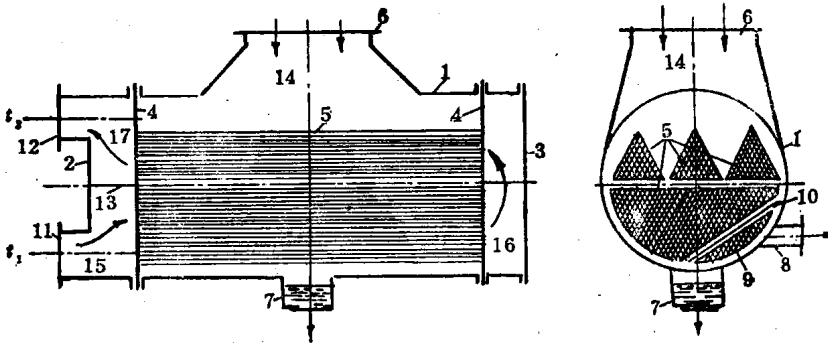


图 1-2 表面式凝汽器简图

- | | | |
|-------------|-----------|--------------|
| 1—凝汽器外壳； | 2—前水室的端盖； | 3—后水室的端盖； |
| 4—管板； | 5—铜管； | 6—排汽进口； |
| 7—热水井； | 8—抽空气口； | 9—空气冷却区； |
| 10—空气冷却区挡板； | 11—冷却水进口； | 12—冷却水出口； |
| 13—水室中的隔板； | 14—蒸汽空间； | 15、16、17—水室。 |

蒸汽凝结时的不凝结气体由抽气器经抽空气口 8 抽出。

具有表面式凝汽器的凝汽系统如图 1-3。

其中循环水泵是供给凝汽器的冷却水用的；凝结水泵的用途是排出凝汽器中的蒸汽凝结水，将其送入射汽式抽气器的冷却器及加热器中去加热；抽气器分为两级，它是利用蒸气喷射原理抽出凝汽器中的空气，以维持凝汽器的真空。抽气器的冷却器中，是用凝汽器的主凝结水来冷却蒸汽的，其蒸汽凝结水（即疏水）在第一级中用 U 型管排入凝汽器里，而第二级则排入疏水箱。

一般凝汽式汽轮机是禁止在排汽压力较高的情况下运行，以防止汽轮机排气缸和凝汽器的温度过高，受热变形。所以在汽轮机排汽口和凝汽器之间装有自动排气门，以便在汽轮机发生事故排汽压力升高时，自动开启向空排汽。

此外，在一些设备完善的系统中，还设有凝结水位的自动调整器及低真空保护等装置。

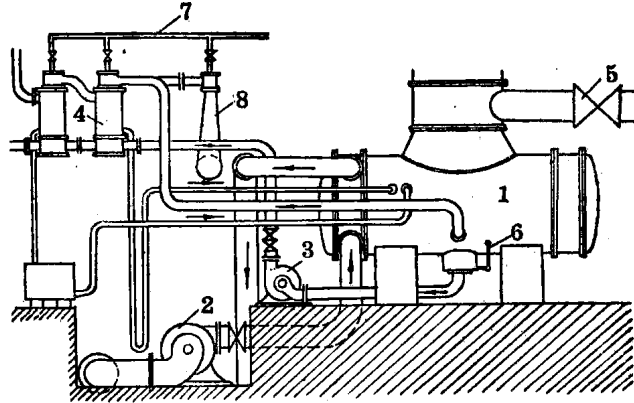


图 1-3 凝汽设备的装置系统图

- | | | | |
|----------|---------|---------|----------|
| 1—凝汽器； | 2—循环水泵； | 3—凝结水泵； | 4—射汽抽气器； |
| 5—自动排气门； | 6—水位计； | 7—新蒸汽管； | 8—起动抽气器。 |

第二节 凝汽器的结构

凝汽器的作用十分重要。从制造和使用方面都对凝汽器的结构提出一些要求，将其主要方面分述如下：

(1) 有较高的传热系数和合理的管束布置

使传热效率高主要是通过合理的管束布置来达到。设置各种穿通和不穿通的蒸汽通道，使蒸汽均匀分布到管束各部位，并合理地引导含有空气的饱和蒸汽直接通向空气冷却区，避免与刚入管束的蒸汽相混合，使其中空气附于铜管表面，影响传热。

(2) 凝汽器本体和真空系统的管道要有高度严密性

防止空气漏入，影响传热和使凝结水中溶氧量增加。还要严防冷却水漏入汽侧破坏凝结水品质。

(3) 汽阻及过冷却度低

蒸汽空气混合物在凝汽器的管束间，由排汽口流向抽空气口时，其绝对压力要降低，这一压力降低是因凝汽器中的流动阻力所引起的，一般称为汽阻。汽阻的存在使凝汽器喉部压力升高，并使凝结水的过冷却度（即排汽温度和凝结水温度之差）和含氧量增大。因此要求汽阻尽可能小。汽阻的数值与凝汽器的参数、结构和运行工况有关，如凝汽器的几何尺寸、管子的排列方式，抽气口的位置，排汽量和冷却水温度等均可影响汽阻的大小。对于大型机组来

说，一般汽阻为2—3毫米水银柱。

在凝汽器中为了减少汽阻可在管束中采用开设深入的足够宽的蒸汽通道以增加蒸汽进汽截面，蒸汽空气混合物走的路程要短，管束中的汽速要小等办法。

大型机组的凝结水过冷却度规定为 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 水阻要小

凝汽器的水阻是指冷却水流过凝汽器管束所受到的阻力，它由冷却水流过进出水室遇到的阻力，冷却水进出铜管时的阻力及冷却水在凝汽器铜管中的流动阻力等三部份组成。它的大小对循环水泵的选择、管道布置都有影响。一般应通过技术经济比较来合理确定。大多数双道制凝汽器的水阻在5米水柱以下，单道制凝汽器的水阻为4米水柱；

(5) 凝结水的含氧量要小

凝结水含氧量的加多将会引起管道腐蚀，并使凝结水含有氧化铁离子，这些离子沉积到锅炉传热管上时会引起爆管，一般高压机组要求凝结水的含氧量应小于0.03毫克/升。近来国产大型机组的凝汽器中都设有真空除氧装置；

(6) 便于清洗冷却管，大型机组一定要考虑机械清洗或化学清洗装置；

(7) 便于运输和安装。

随着机组容量的不断加大，凝汽器的尺寸、重量都不断加大，所以不可能制成整个的。必须考虑实行分散组合的办法，以便于运输和起吊。

表面式凝汽器是由外壳、水室、管板、铜管、与汽轮机排汽口连接处的补偿装置和支架等部件组成的。

一、外壳：

新式凝汽器的外壳都采用钢板焊接的结构。凝汽器工作时要承受外部大气压力与内部高度真空之间的压力差，及大量的冷却水重量，所以凝汽器的外壳必须有足够的强度。一般凝汽器外壳钢板的厚度为10—15毫米。为了增加其强度，在其内面靠近喉部的地方装有纵向及横向支撑，在其外部焊有用槽钢作的加强肋条。外壳内壁应涂防腐漆，以保护钢板不受锈蚀。

二、水室：水室也是用钢板焊成的。水室的内部结构，因冷却水的流程不同而有差异。单道制凝汽器中水流只有一个流程，所以凝汽器两端水室没有水平隔板，如图1-4.a。双道制凝汽器的水室为了保证水流往返两个流程所以在凝汽器进水侧水室中有水平隔板，如图1-4.b。

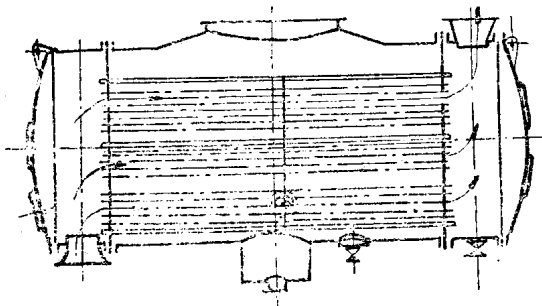


图1-4.a 单道制凝汽器

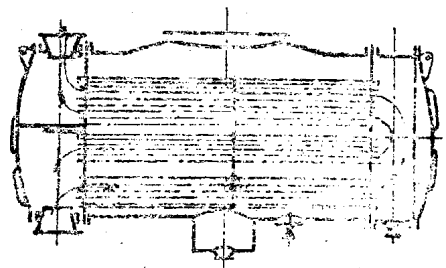


图1-4b 双道制凝汽器

为了凝汽器清洗方便，近代大、中型凝汽器均制成对分式的。即在凝汽器水室中设有一垂直隔板，把凝汽器的水侧分成两个独立的部分，当凝汽器铜管脏时，汽轮机减去适当负荷的情况下，可轮换进行清洗，如图 1-5。

水室中横隔板的构造如图 1-6 所示。横隔板的一端焊在管板上，另一端的边缘上、上均焊有扁钢，在两扁钢之间塞入长方形橡皮，保证水室间封闭严密。横隔板上焊有螺栓与端盖紧固。

水室外盖有端盖，端盖用铰链固定在水室上，以便于检修。端盖上应有人孔，便于检查水室内的清洁状况。水室、外盖的接合面法兰盘间必须垫有橡皮垫，并用螺栓固紧。

水室的结构形状应尽量避免引起水在进入铜管时产生涡流，因为这种涡流会引起铜管进水端的冲击腐蚀。水室的结构形状如图 1-7 所示。图 a 容易发生涡流，图 b 较为合理。

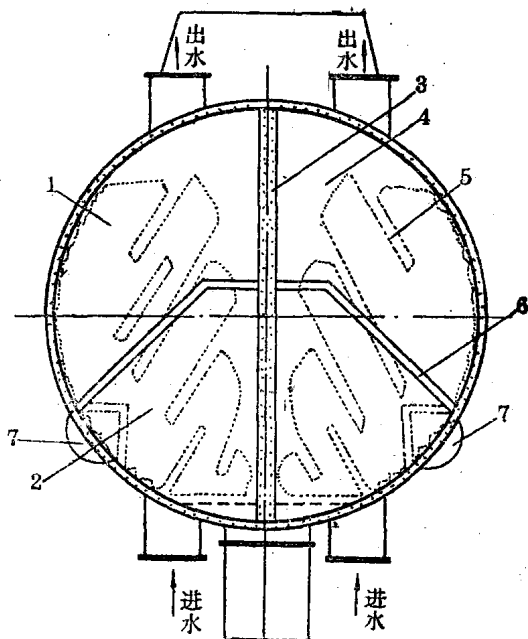


图 1-5 对分式凝汽器

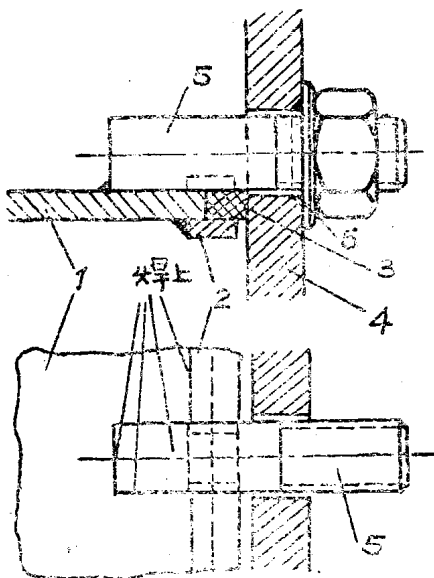


图 1-6 凝汽器水室中横隔板的构造

- 1—横隔板；
- 2—扁钢；
- 3—长方形橡皮；
- 4—水室的端盖；
- 5—支撑螺栓。

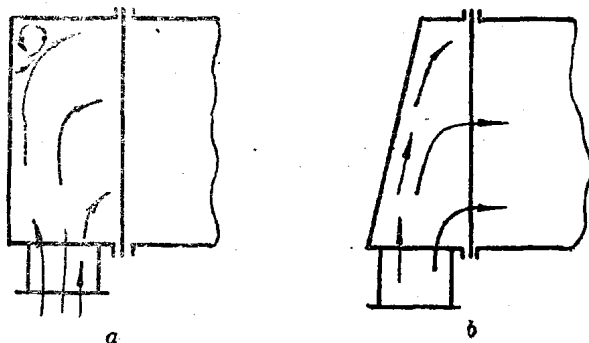


图 1-7 水室的结构

三、管板和隔板：管板装在水室中，它的作用是固定铜管，并将凝汽器的汽侧与水侧分开。管板的材料随冷却水的性质而不同：若冷却水用海水的，则管板用黄铜（其成份为铜60%，锌40%）及含锡黄铜（HS_n-70-1号）制成，若冷却水为淡水的则管板用钢板制成。管板厚度一般为20—35毫米。管板不能太薄，以免其强度和刚度不够，发生破裂和变形。此外管板太薄还会使管子胀装的强度不够和严密性差。在凝汽器工作时管板上因承受冷却水压力与蒸汽空间的压力差而使它向蒸汽侧弯曲，在凝汽器汽侧做水压试验时，由于水压作用而使管板向水室侧弯曲。为了防止上述管板在弯曲时引起变形和管子固定处的松动、漏水，所以在两块管板之间用支撑螺丝连接起来。图1-8所示是管板与凝汽器外壳装接的方法。利用一些带有凸肩的特殊螺丝把管板压紧在凝汽器外壳的法兰盘上。为了严密，在其接缝处装有帆布涂有红丹粉的垫料，或者涂上白铅油60%、红丹粉40%和热亚麻仁油混合所作成的涂料。必要时在接合面处再加装两三层波纹形的绵纱绳如图1-9所示。水室法兰1也是用一些带凸肩的螺丝上紧到管板上。这个接缝中垫有橡皮。由于螺丝上有凸肩，因而在拆卸水室时，不必拆开管板。

在法兰接合面上的螺丝除了上述带凸肩的螺丝外，还有普通螺丝，它们的装置方法是：每隔两三个普通螺丝，装一个带凸肩的螺丝。

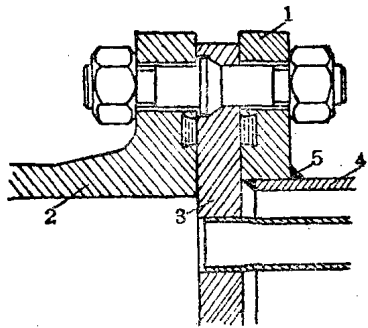


图1-8 管板装固到凝汽器外壳上的方法

- 1—水室法兰；
- 2—水室端盖；
- 3—管板；
- 4—凝汽器外壳；
- 5—焊口。

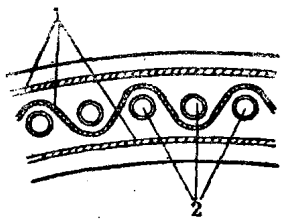


图1-9 棉纱绳在凝汽器外壳的法兰上的安放图

- 1—绵纱绳；
- 2—螺栓孔。

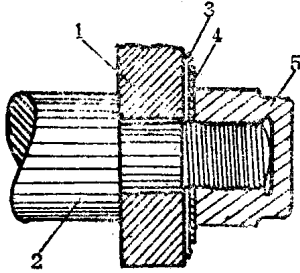
图1-10所示为管板间支撑螺杆装置结构。支撑螺杆两端用螺母与管板固定，保证两个管板不使其弯曲。螺母水侧装着螺母盖罩。这个盖罩下还装有橡皮垫是防止水沿着螺纹渗入蒸汽空间的。

隔板是装在两管板之间用以支持铜管并用以减少铜管在运行中的振动，以避免铜管材料的弹性疲劳和疲劳腐蚀。隔板一般用铜板制成，隔板之间距离为1米左右，其厚度通常在10—30毫米范围内。隔板上钻孔应与管板上钻孔相对应，其划线的基轴平常向上移动少许，因此凝汽器中装置的铜管其中心线呈微弯的形状，如图1-11所示。中间管板数目多时，管孔移动不能超过5—7毫米，位移太大会造成铜管的装卸困难。如用凝汽器铜管中心线对管板的坡度来标

志其弯曲度，其数值通常为 0.02—0.01 范围之内。

将凝汽器铜管装成弯曲的目的是使管子能固定在隔板上，减少振动，同时因铜管预先弯曲在铜管热膨胀时，也可减少作用在铜管上的热应力。此外在凝汽器放水时，便于将水流净。

为了便于装卸铜管，隔板上的管孔应做得比管径略大 0.3—0.5 毫米，它的边缘扩大。中间隔板在凝汽器外壳上的固定方法如图 1-12 所示。



1—管板，
2—支撑螺丝杆， 3—橡皮垫，
4—垫片， 5—螺母。

图 1-10 支撑螺丝

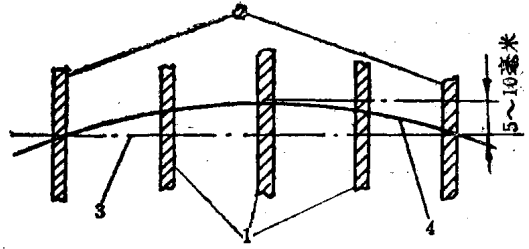


图 1-11 隔板的装置位置示意图

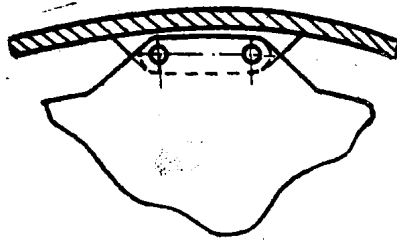


图 1-12 隔板在凝汽器外壳中的固定方法

四、铜管：凝汽器的铜管均是无缝的管子。它的材料性能十分重要。一般的要求是：有足够的机械强度，传热性能良好，耐腐蚀性强等。

凝汽器铜管在运行时，往往由于冷却水品质不良（有腐蚀性）、电化学作用、冷却水对铜管入口处的冲蚀作用，铜管的振动及铜管安装时造成的应力集中等原因而受到严重地破坏。在发电厂中，由于铜管材料性能不佳或对冷却水的处理监督不够严格，而造成只运行几个月或一、二年就要大批、甚至全部换掉铜管的事例是不少的。为此我们必须重视凝汽器铜管的腐蚀问题。

运行实践证明：不论是以海水或者淡水来工作的凝汽器黄铜管，其主要的腐蚀原因是“脱锌”和第一流程进口端的“冲蚀作用”。

“脱锌”是电化学作用的结果，它是因为铜和锌在水中的溶解度不同，电位不同，产生电解作用，管材中的锌被水溶解后带走，铜虽然也被溶解但其绝大部分又重新镀回管子表面上去。这样失去锌的铜管，就成了脆而多孔的状态，引起管子漏水并大大的降低其机械强度。这种“脱锌”现象在金属组织上有缺陷时，冷却水呈微酸及微碱性时，水流速度过慢

时；铜管所受的温度过高（大于60~70°C）时；表面有渗透性附着物（水垢）时；以及水中有铵和含硫时都会发生。

水以较高速度在管子中流动时，在管子进口端要引起“冲蚀现象”。用海水做冷却水的凝汽器中“冲蚀现象”在水速高于1.5米/秒时发生，而用淡水做冷却水的凝汽器中，则在水速约在2.5—3米/秒时发生。

水以高速进入管子时会引起剧烈的涡流，由于这个涡流存在，破坏了平时水和金属作用下所形成的“保护层”，从而使个别管段就发生了水和金属管子的直接接触，结果使这部分管子受到进一步腐蚀。

目前我们防止铜管的腐蚀的主要措施是：设法分析发现和消除造成铜管腐蚀的因素；严格处理冷却水并经常注意监督冷却水质；根据水质合理的选择铜管材料。

表1—1为国产凝汽器铜管的材料，供读者参阅。

国产凝汽器铜管材料

表 1-1

名称	牌 号	主 要 成 份(%)						含有杂质总和(%)	主 要 性 能
		Cu (铜)	Pb (铅)	Mn (锰)	Sn (锡)	Al (铝)	Zn (锌)		
普通黄铜	H68	67.0~70.0					余量	0.5	含锌量愈多，强度愈高塑性愈差，愈脆。 含锌40%以下适于制造用于淡水工作的凝汽器铜管，这种铜管耐腐蚀差，容易脱锌
铝黄铜	HA177-2	76.0~79.0				1.75 } 2.50	余量	0.3	加入铝可以提高机械强度和耐腐蚀性，但塑性降低，适合于用海水工作的凝汽器
锡黄铜 (海军黄铜)	HSn70-1	69.0~71.0			1.0 } 1.5		余量		加入锡可提高抗腐蚀性适合于用海水工作的凝汽器

用淡水工作的凝汽器，原来多采用H68黄铜管（铜和锌的合金）近年来，发现H68黄铜管腐蚀较为严重，故改用海军黄铜管，所谓海军黄铜管就是在上述铜锌合金中加入1%的锡，这种铜管比H68黄铜管具有较高的抗腐性，但因加锡后制造复杂，价格较高。

黄铜管中加少量的砷(AS)（约0.08~0.5%）能防止“脱锌”和减少腐蚀，故近年来有使用含砷的黄铜管。

用海水工作的凝汽器铜管，由于海水的腐蚀性强，所以必须用抗腐蚀强的材料。目前较为常用的是铝黄铜管。国外有一种“尔不落”铜管就基本上是这种材料，但是加入0.25%的硅，在海水中耐腐蚀性强。还有一种铝黄铜管中加0.2~1%的镍，具有耐污染海水腐蚀的性能是沿海工业区发电厂较好铜管材料。

铝青铜管有良好的耐腐蚀性及较高的机械强度，对淡水海水混合使用时最为适用。

锡铝青铜(AP青铜)对污染严重的河水，特别是混有硫化物的水，最为适宜。

在凝汽器的空气冷却区里，由于不凝结气体集结并浓缩，特别是锅炉给水处理时使用氨及联胺来调正给水 PH 值时，当汽轮机排汽在凝汽器中凝结时，最后在空气冷却区氨的浓度很高（高达 10000P.P.M），同时由于此处的氧量也很高，其氨和氧联合作用使铜管受到强烈的腐蚀。特别是在空气冷却区里中间隔板支持铜管的地方腐蚀更为严重。因而此处使用的管子必须采用特殊材料制成。

目前根据试验得知：空气冷却区使用钛管较为成功。钛管对海水、淡水都有较高的耐腐蚀性能，对氨及耐砂粒溃蚀也比较好，高温下强度大，但传热系数比铝青铜低。使用钛管时应注意以下问题：（1）钛管壁薄，故在与管板胀接时要特别注意；（2）要严格防振；（3）与钛管配套的管板，要考虑防腐措施。

一般铜管的内径为 17—25 毫米，管壁厚度为 1 毫米。在凝汽器最上一排与汽轮机排汽最早接触的铜管，由于受到较严重的冲蚀作用，故在有的国产凝汽器中，使用管壁厚度为 2 毫米的管子。

铜管在管板上的安装是很重要的。铜管在管板上安装必须保证有足够的严密性，尤其在铜管热膨胀时，绝对不允许破坏这种严密性。此外还要考虑到铜管安装和更换方便。

我国制造的凝汽器中，普遍采用胀管法固定其铜管。这种安装法是：先将铜管两端打磨光，退火处理后用胀管器将管口内径胀大，使管子产生塑性变形，由此管子与管板的连接面形成一定的弹性应力，保证连接处有一定的强度和严密性。在胀管时应保证一定的“扩管度”：

$$\text{扩管度 } \rho = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{d_0} \times 100\% = 1 \sim 1.5\%$$

式中： d_0 ——管板上的孔径，毫米；
 Δ_1 ——胀管后管子内径的增加，毫米；
 Δ_2 ——胀管前管板上孔径和管子外径之差，毫米。

管板上孔径一般较管子外径大 0.2~0.3 毫米，胀管长度为管板厚度的 80~90%，不能超过管板厚度，否则在管板内侧产生“凸肩”，使换管困难；另外，还会造成应力集中，降低管子寿命。

近代大容量的机组对凝结水质量的要求更高了，在这种情况下，要保证冷却水绝对不漏入凝汽器的蒸汽空间，破坏凝结水的品质。所以各国都在研究，在凝汽器铜管管口处涂上一层密封涂料。我国 30 万千瓦汽轮机的凝汽器上，应用了我们研究出的一种涂料，这种涂料可以不加压、加热在室温下进行涂复，试验的情况看，完全可以满足耐水，密封和粘合强度高的要求。这种涂料和涂法是：（1）环氧聚酰胺和环氧沥青喷涂；（2）环氧富锌和改性环氧喷镀，（3）多硫橡胶刷镀等等。

铜管采用胀管固定方法在运行中是较严密的，不容易漏水。但是这种固定方法也有缺点，这就是必须采用适当的方法来补偿铜管的热膨胀，因为如若不能保证管子合理地热膨胀，就会在运行中造成胀口的松动，引起漏水。其使用的方法有：

（1）应用管板与外壳弹性连接的方法，如图 1—14 所示。这种

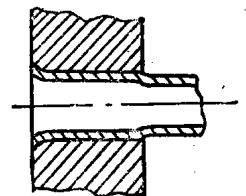


图 1-13 胀管法固定凝汽器铜管

方法是在铜管热膨胀时，一端的管板和管子一起对外壳发生纵向的位移。

(2) 管子按装时略带弯曲，其热膨胀后变更管子的弯曲程度来补偿。管子弯曲的形式必须保证在放水时，水能自由的流出，如图1-15所示。

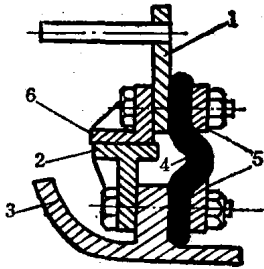


图1-14 可动的管板

1—管板；2—支架；3—外壳；
4—橡皮；5—紧固螺栓

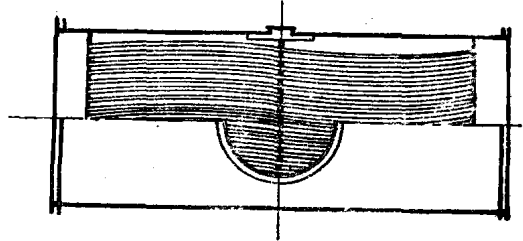


图1-15 凝汽器中管子的最初弯曲

五、凝汽器喉部与汽轮机排汽室的连接：

凝汽器喉部与汽轮机排汽室的连接必须保证汽轮机排汽室受热时能自由膨胀，否则将引起汽缸的剧烈变形和破裂。其连接方法如下：

1. 凝汽器固定装在基础上，用望远镜式填料补偿器把凝汽器喉部与汽轮机排汽室连接起来，如图1-16所示。补偿器中加好盘根并使用水封（用凝结水密封）以防止空气漏入凝汽器里。使用这种连接方法可保证自由膨胀，还能有良好的严密性。运行时必须随时注意其水封不能断水。

2. 凝汽器固定装在基础上，用伸缩节把汽轮机排汽口和凝汽器喉部连接起来，如图1-17所示。当汽轮机热膨胀时，伸缩节发生变形从而得以补偿。这种连接方法由于法兰盘太多增加了漏汽的可能性。

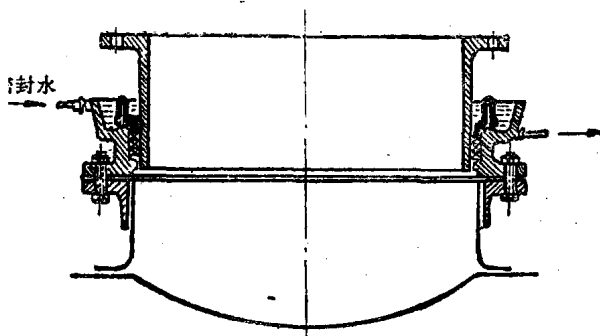


图1-16 望远镜式补偿器

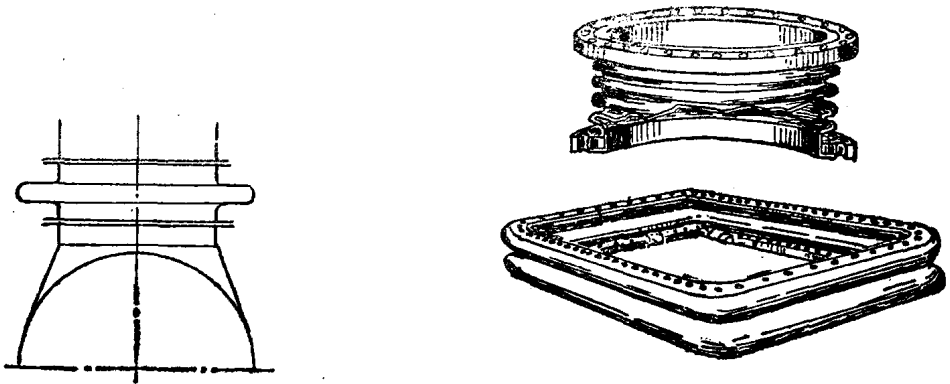


图1-17 波形补偿器

3. 凝汽器喉部与汽轮机排汽室直接焊在一起，凝汽器装在弹簧支架上，如图1-18所示。

这种连接方法的主要优点是法兰盘少，漏气的可能性较小。凝汽器支持弹簧的刚度要能承受凝汽器不带水时重量及热膨胀力；而冷却水的重量是由汽轮机的低压缸传到基础上。弹簧的压缩高度是用特殊的垫圈3来保证，垫圈的厚度个别地根据每个弹簧的试验数据来定。调整螺栓2的作用是压紧弹簧，以便把垫圈垫到弹簧下面去。

图1-19所示为新式凝汽器的弹簧支座。其中调整垫圈用调整压板1代替，调整压板的

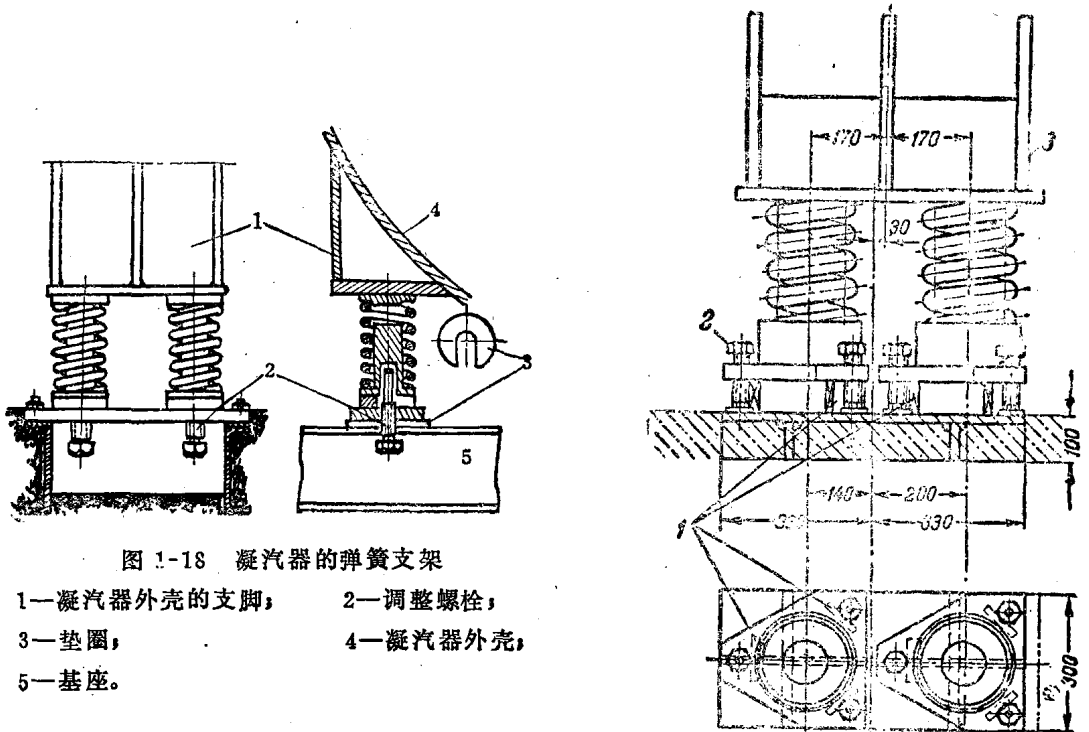


图 1-18 凝汽器的弹簧支架

- 1—凝汽器外壳的支脚；
- 2—调整螺栓；
- 3—垫圈；
- 4—凝汽器外壳；
- 5—基座。

图 1-19 新式凝汽器的支持弹簧座

- 1—调整压板；
- 2—调整螺栓；
- 3—外壳支脚。

高度要在每个弹簧安装时再确定。装在弹簧上的凝汽器可用均匀转动各螺栓 2 的方法接向汽轮机的乏汽管，把它焊接后装上压板 1 并放松螺栓。

第三节 凝汽器的热力计算

一、凝汽器的热平衡公式：

汽轮机排汽在凝汽器中冷凝时所放出的热量，通过铜管被冷却水所吸收。因此，可写为：

$$D_K(i_2 - \bar{t}_K) = WC(t_2 - t_1) \quad (1-1)$$

蒸汽冷凝时
放出的热量 冷却水通过铜
管吸收的热量

- 式中： D_K ——进入凝汽器的排汽量，公斤/时；
 i_2 ——进入凝汽器的排汽焓，大卡/公斤；
 \bar{t}_K ——凝结水的焓，其数值近似等于凝结水的温度；
 W ——经过凝汽器的冷却水量，公斤/时；
 C ——冷却水的比热，其数值可认为是 1；
 t_1 ——冷却水进入凝汽器时的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；
 t_2 ——冷却水离开凝汽器时的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；
 Δt ——冷却水离开及进入凝汽器时的温度差， $^{\circ}\text{C}$ 。

公式 (5-1) 还可写成以下形式：

$$W = \frac{D_K(i_2 - \bar{t}_K)}{t_2 - t_1} = \frac{D_K(i_2 - \bar{t}_K)}{\Delta t} \quad (1-2)$$

$$\frac{i_2 - \bar{t}_K}{t_2 - t_1} = \frac{W}{D} = m \quad (1-3)$$

式中 m 称为冷却倍率，即冷凝一公斤汽轮机排汽所需要的冷却水量。对于双道制凝汽器循环供水系统时一般 $m = 50-80$ 之间，对于直流供水时 $m = 90-120$ 。

二、蒸汽和冷却水经过铜管壁的传热公式

由于汽轮机排汽放出的热量全部通过管壁传给冷却水，所以汽轮机排汽冷凝时放出的热量应等于通过管壁传导走的热量。即：

$$D_K(i_2 - \bar{t}_K) = K \cdot F \cdot \Delta t_{pj} \quad (1-4)$$

式中的

- K ——从蒸汽到冷却水的传热系数，大卡/米²·时· $^{\circ}\text{C}$ ；
 F ——凝汽器铜管在汽侧的冷却面积，米²；
 Δt_{pj} ——蒸汽和水的平均对数温度差。

$$\Delta t_{pj} = \frac{t_2 - t_1}{2.303 \log \frac{t_n - t_1}{t_n - t_2}} \quad (1-5)$$

粗略计算时也可用平均数学温度差：