

海 军 舰 艇 机 电 教 材

舰 用 锅 炉

(二)

一 九 七 七 年 四 月

毛主席语录

全党都要注重战争,学习军事,准备打仗。

读书是学习,使用也是学习,而且是更重要的学习。从战争学习战争——这是我们的主要方法。

练兵方法,应开展官教兵、兵教官、兵教兵的群众练兵运动。

为了反对帝国主义的侵略,我们一定要建立强大的海军。

通 知

根据总参谋部关于组织力量编写专业教材的通知精神，我们委托海军工程学院编写《舰用锅炉（二）》，现印发部队试行。各部队在使用中应不断总结经验，提出意见，上报海司军训部，以便补充修改。

海军司令部

一九七七年四月

目 录

第一篇 舰用锅炉装置概论	1
第一章 舰用锅炉装置的组成和舰用锅炉的基本结构	2
第一节 舰用锅炉装置的组成	2
第二节 舰用锅炉的基本结构	3
第二章 舰用锅炉的基本工作原理	7
〔附〕 锅水的加热蒸发和蒸汽的过热	8
第二篇 舰用蒸汽锅炉结构	12
第一章 锅炉本体结构	14
第一节 锅炉炉膛	14
第二节 锅炉各筒、蒸发管束、不受热下降管及锅内设备	14
第三节 蒸汽过热器	23
第四节 经济器	26
第五节 锅炉外壳	28
第六节 锅炉固定	30
第七节 锅炉烟道和烟囱	34
第八节 锅炉的防焰板和挡烟板	34
第九节 锅炉绝热	35
第二章 油燃烧器	39
第一节 喷油器	39
第二节 调风器及伺服器	46
第三章 锅炉附件	50
第一节 主过热蒸汽阀	50
第二节 给水阀	53
第三节 安全阀	54
第四节 上排污阀	60
第五节 水位表	60
第四章 辅助锅炉	65
附录 主锅炉主要元件金属材料表	66
第三篇 锅炉装置的主要系统	67
第一章 蒸汽系统	68
第一节 主过热蒸汽系统	68
第二节 辅过热蒸汽系统	71
第三节 饱和蒸汽系统	71
第四节 废汽系统	94
附表一 蒸汽系统主要材料表	104
附表二 蒸汽系统绝热层厚度及材料表	105

附表三	常用垫片材料表	105
第二章	凝水给水系统	107
第一节	凝水给水系统的功用和组成	107
第二节	汽轮给水泵组	109
第三节	锅炉给水系统的自动调节	141
第四节	除氧器装置	162
第五节	凝水系统的自动调节	168
第六节	凝水给水系统的管理	178
第三章	锅炉燃烧系统	181
第一节	燃油系统	181
第二节	锅炉通风系统	212
第三节	主蒸汽压力的调节	235
第四节	燃烧调节系统(综合)	251
第四章	调节器的调试	259
第一节	蒸汽管道压力调节系统的调试	260
第二节	锅炉燃烧调节系统的调试	268
第三节	锅炉给水调节系统的调试	286
第四节	凝水水位调节系统的调试	295
第五节	调节器的日常保养和检修方法	299
附一	辅锅炉调节系统	301
附二	主动力装置各调节器的性能数据	303
附三	辅锅炉装置各调节器的性能数据	310
第四篇	舰用锅炉装置的管理	315
第一章	正常情况下的锅炉管理	315
第一节	锅炉点火前的准备工作	315
第二节	锅炉点火升汽工作	317
第三节	锅炉工作中的管理	320
第四节	锅炉正常停火工作	327
第二章	特殊情况下的锅炉管理	329
第一节	锅炉紧急点火升汽	329
第二节	锅炉紧急停火	330
第三节	锅炉超负荷工作时的管理	330
第四节	大风浪航行时锅炉的管理	330
第五节	待命留汽时的锅炉管理	331
第六节	机炉舱内大量漏汽时的管理措施	331
第七节	锅炉常见故障及其排除方法	332
第三章	锅炉保养和清洁方法	336
第一节	锅炉的保养	336
第二节	锅炉的清洁	339
第五篇	舰用锅炉原理	346
第一章	重油的燃烧	346
第一节	舰用锅炉重油的概述	346

第二节	重油的燃烧过程	349
第三节	锅炉通风的概念	353
第四节	锅炉燃烧的管理	355
第二章	锅炉传热	358
第一节	锅炉热平衡	358
第二节	炉内辐射传热	364
第三节	对流蒸发管束的传热	365
第四节	受热面最大热负荷	373
第五节	蒸汽过热器的传热特点及管理	375
第六节	经济器的传热特点及管理	379
第七节	锅炉管理中一些参数改变对锅炉热性能的影响	383
第三章	锅内过程	389
第一节	自然水循环	390
第二节	锅炉内部水处理	401
第三节	汽水分离	412
第六篇	舰用锅炉的检修	415
第一章	锅炉损伤及其鉴定	415
第一节	筒身的损伤及其鉴定	415
第二节	管子的损伤及其鉴定	417
第二章	管子的修理	420
第一节	管口重扩、堵管及管子焊补	420
第二节	换管	421
第三章	锅炉检修后的试验	430
第一节	通球试验	430
第二节	水压试验	430
第三节	气密试验	431
第四节	蒸汽试验	433

第一篇 舰用锅炉装置概论

舰用动力装置是军舰的重要组成部分。其主要的任务是保证军舰在战斗、航行、锚泊和系岸等工况下所需要的各种动力能源(如电能和热能)。因此,它决定着军舰的航速性、机动性和续航力等重要战术技术性能。

以水蒸汽作为工质的动力装置称为蒸汽动力装置,简称汽力装置。装置中蒸汽锅炉把燃料的化学能转变成热能、使水变成具有一定压力和温度的蒸汽,它通过主汽轮机把蒸汽的热能转变成机械功带动轴系和螺旋桨回转做功,推动军舰运动。为此、主锅炉、主汽轮机组、各种动力系统、轴系和螺旋桨等总称为主动力装置。此外,还有不少辅助性的和日常生活用的机械设备和系统,如辅助锅炉装置、发电装置、辅凝汽装置、造水装置、制冷装置等一般称作辅助动力装置。

下面我们通过汽力装置的汽水循环图来了解汽力装置的主要组成部分以及装置的基本工作过程。汽水循环图示于图(1-0-1)中。

主锅炉产生的过热蒸汽经主过热蒸汽阀,再经调整阀进入主汽轮机,作功后产生机械能转动螺旋桨做功。一部份过热蒸汽经辅过热蒸汽阀沿辅汽导管进入汽轮风机、汽轮给水泵机组和汽轮发电机组。

主锅炉产生的饱和蒸汽自锅炉上锅筒引出沿饱和蒸汽导管进入汽轮燃油泵,汽轮循环水泵、汽轮滑油泵、射汽抽气器、汽轮消防泵及各种加热器。

主汽轮机工作后的废汽直接进入主冷凝器并冷凝成水。辅机的废汽分成两类:汽轮发电机组和汽轮循环水泵的废汽排入主冷凝器冷凝成水。而汽轮给水泵机组、汽轮鼓风机、汽轮燃油泵、汽轮滑油泵等的废汽排入废汽总管,并保持废汽压力为二个绝对气压以供除氧器和蒸发装置(即造水装置,图中未表示出)所需。如有剩余时,通过卸载阀排入冷凝器。如不足时则用新饱和蒸汽补充。

在主冷凝器中用汽轮循环水泵打入舷外海水来冷却废汽使之冷凝成水。

主冷凝器中的凝水由汽轮给水泵机组中的凝水泵抽出,然后经射汽抽气器加热(即冷却射汽抽气器中的废汽)并送入除氧器,利用废汽加热以除氧,由给水泵机组的增压泵增压后再由给水泵送入锅炉,再次变成蒸汽。

由上可知,整个装置构成一个汽和水的循环:由水变成汽推动汽轮机工作,而经汽轮机工作后的废汽再凝结成水,重新利用。这样,就可以在军舰上不需要装载大量淡水的情况下,保证汽力装置能不间断地工作。

由于汽轮机转速很高,必须经过齿轮减速器减速后才能带动螺旋桨。主汽轮机和齿轮减速器、主冷凝器合在一起总称主汽轮机组。每个主汽轮机组带动一个螺旋桨。本舰汽力装置包括两个汽轮机组。每个汽轮机组由两台主锅炉供给蒸汽。

第一章 舰用锅炉装置的组成和舰用锅炉的基本结构

毛主席说“全局性的东西，不能脱离局部而独立，全局是由它的一切局部构成的”。

舰用锅炉装置是舰用汽力装置重要组成部分之一。它的功用，就是利用燃料燃烧所产生的热量加热水，使水变成一定压力和温度的蒸汽，以供给主辅汽轮机及日常生活用汽（如暖气、造水、伙房用汽等）。

保证军舰战斗和航行所需蒸汽是由主锅炉供给，蒸汽参数比较高。辅助锅炉蒸汽参数比较低，供给日常生活用汽并可用来启动部分辅机。

第一节 舰用锅炉装置的组成

舰用锅炉装置是由锅炉及保证其正常工作的辅机和系统所组成。见图(1-0-1)。

一、给水系统

锅炉给水系统的功用是保证及时供给足够的锅水送入锅炉中去。

从除氧器出来的经加热和除氧的水由增压泵加压后，再由给水泵提高压力（大于锅炉工作压力），经过锅炉双脉冲水位调节器进入经济器。当双脉冲水位调节器出现故障时，打开旁通阀，给水直接进入经济器，此时锅炉水位用人工调节。无旁通阀管路的给水系统则直接手工操纵双脉冲水位调节器进水阀进行给水。

给水泵及增压泵是采用离心泵，而带动它们的原机是汽轮机。

二、燃油系统

燃油系统是保证重油在规定的压力和温度下经过喷油器送入炉膛内燃烧。

重油从油柜中抽出，经燃油泵加压后到冷过滤器，然后至重油加热器利用饱和蒸汽将重油加热到 80℃—90℃左右，再经热过滤器到燃烧操纵台的燃油分配箱，分配到各个喷油器。锅炉冷态点火时使用轻柴油，为此尚有电动点火泵。

每两台主锅炉有三台燃油泵均是用螺杆泵。泵的原机一台是汽轮机，其余两台是电动机。汽轮原机还需装有减速器。电动点火泵是齿轮泵。

三、通风系统

通风系统主要是由通风机和尺寸的空气导管组成。其功用是输送足够数量和一定压力的空气进入锅炉炉膛，保证重油燃烧完全，同时克服空气和烟气通道中阻力并及时排走烟气。空气从上甲板外的空气吸入口（带有铁丝滤网）及机炉舱内空气吸入口吸入，由通风机加压后经空气导管送入锅炉前墙夹层内，一部分通过侧墙夹层至后墙夹层，然后经各调风器送入炉膛。

通风机是离心式，其原机也是汽轮机。此外为保证锅炉冷态点火尚备有电动风机，由单独空气管道送入锅炉。此电动风机在使用汽轮通风机时即转为供各更位通风用。

四、蒸汽系统

它是用来将锅炉产生的过热蒸汽和饱和蒸汽分别送至主汽轮机，辅汽轮机及其它需要蒸汽的设备中去。它由管路及阀门组成。

废汽系统是用来导出各汽轮机的废汽，一部份用到锅水的加热除氧上，多余的排到主冷凝器或辅冷凝器中去冷凝。有一部分废汽直接排至主冷凝器中去。

五、自动调节设备

为了较准确地保持汽力装置中各工质的参数为规定值以保证装置的机动性和经济性；为了减少或避免由于人员操纵上差错而产生故障以提高装置的可靠性；以及为了改善舰员的工作条件，节省人力，在现代舰用汽力装置上采用了液压式的自动调节设备。

在主锅炉装置中采用了上锅筒双脉冲水位调节器、给水压差调节器、燃油温度调节器、燃烧操纵台（包括燃油压力调节器、空气压力调节器、主蒸汽压力调节器）。在整个汽力装置范围内还有饱和蒸汽压力调节器、废汽总管压力调节器、除氧器压力调节器、除氧器水位调节器、主冷凝器水位调节器等。

第二节 舰用锅炉的基本结构

图(1-1-1)是带有经济器、蒸汽过热器的单烟道两端燃烧自然水循环四筒立式舰用典型水管锅炉的外形图。图(1-1-2a)及(1-1-2b)是它的结构线图。

本锅炉是由锅炉本体(上锅筒、下锅筒及水管)、经济器、蒸汽过热器、护板、底座等部件所组成。

一、锅炉本体[见图(1-1-1)、(1-1-2a)]

锅炉本体是由上锅筒、下锅筒、汽水集箱和许多管子组成的密闭的水部和汽部空间。

上锅筒和下锅筒之间由第一管束(由两列管子组成)、第二管束(由五列管子组成)、水冷壁及不受热下降管(两列管子)相连通。上锅筒和汽水集箱水部之间由第三管束(十七列管子)及六根不受热下降管相连通。这就组成了密闭的水部空间和汽部空间(即上锅筒一半以上的空间)。

第一管束、水冷壁及锅炉前后墙围成的空间叫做炉膛。炉膛两端各装有十个油燃烧器(喷油器和调风器组成)。燃油在炉膛中燃烧是锅炉热量的来源。

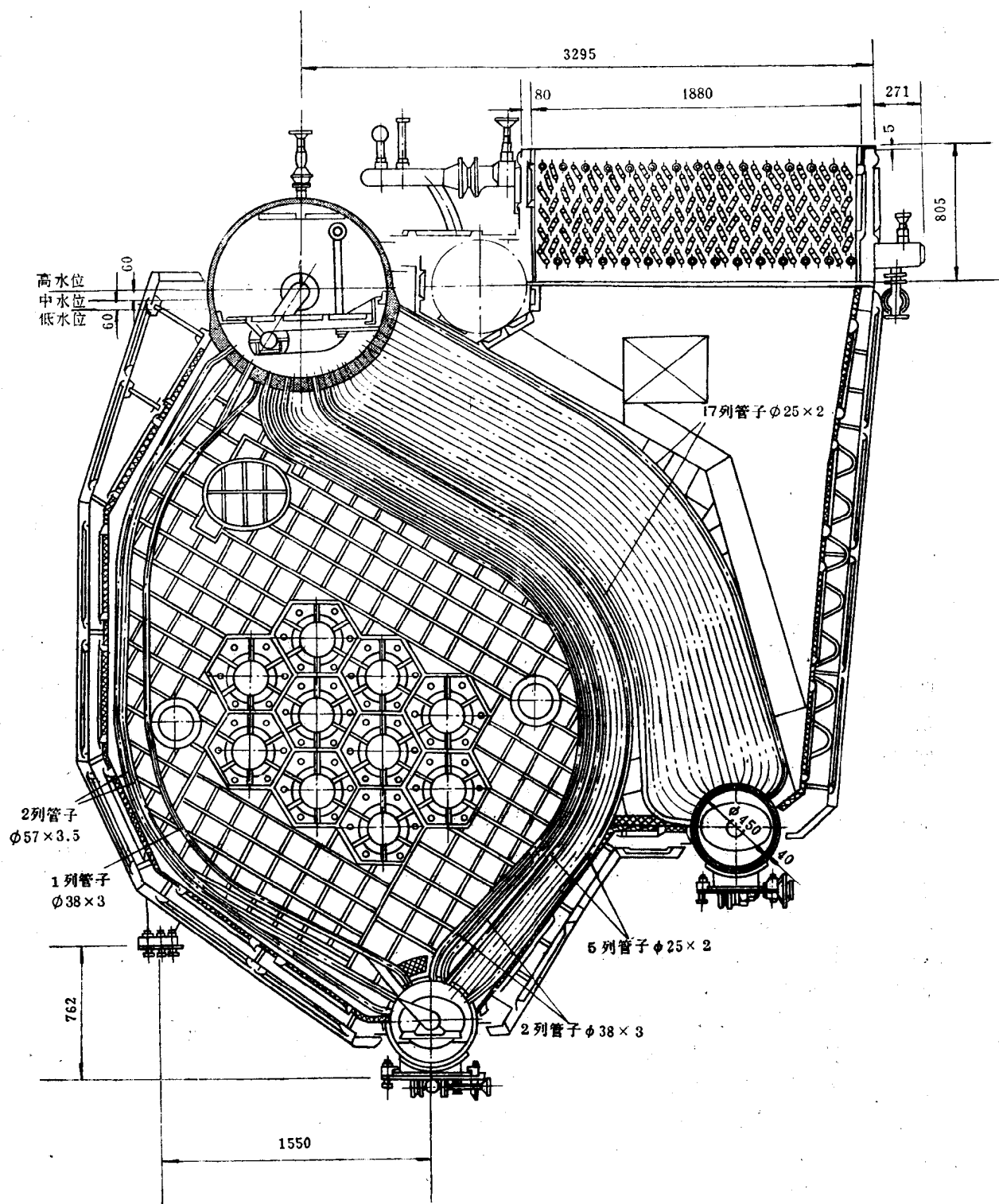
第一管束、第二管束和第三管束以及水冷壁均吸收燃油燃烧产生的热量使管中的水变成蒸汽，蒸汽上升并穿过水面在上锅筒的汽部空间内积聚。这些吸热的管子中充满着汽水混合物从下锅筒及汽水集箱向上锅筒方向流动。而水冷壁后面的两列下降管及六根回水管是不受热的，水是从上锅筒向下锅筒及汽水集箱水部方向流动。这样、由于上升管和下降管内流量的重率不同构成了锅炉的自然水循环。第一、二、三管束称为蒸发管束。

上升管和下降管加上连通它们的上锅筒和下锅筒组成一个循环回路，叫做循环圈。本锅炉有两个循环圈。第一循环圈由水冷壁后面两列不受热下降管、正对炉膛的水冷壁上升管、还有对流蒸发第一管束和第二管束的上升管，以及把它们联通的上锅筒和下锅筒所组成。第二循环圈的下降管是六根粗的回水管，上升管是第三管束，通过上锅筒和汽水集箱后半部水部空间将它们联通。这两个循环圈是独立的，相互无关的。

二、蒸汽过热器[见图(1-1-2b)]

它是由蒸汽过热器上集箱、汽水集箱汽部空间及十八列管子组成的密闭空间。在上集箱及汽水集箱汽部空间中均装有隔板，把十八列管子分隔为五组。由上锅筒来的湿饱和蒸汽送

A-A剖视



图(1-1-2a) 主锅炉结构线图

Technical drawing of a large industrial vessel, likely a reactor or separator, showing a top-down view with dimensions and internal structure.

Key dimensions and features:

- Overall width: 1020
- Overall height: 1044
- Internal width (bottom): 740
- Internal height (bottom): 322
- Top circular access: $\phi 1000$
- Top circular access: $\phi 450$
- Bottom circular access: $\phi 450$
- Bottom circular access: $\phi 450$
- Internal structure: 18列管子 $\phi 25 \times 2$ (18 rows of tubes $\phi 25 \times 2$)
- Top circular access: 75
- Top circular access: 30
- Top circular access: 40

— 5 —

入蒸汽过热器集箱以后，蒸汽自上向下，又自下而上经五组管子，将蒸汽加热五次（也称五流程），达到规定的过热温度，经汽水集箱汽部空间上的主辅过热蒸汽阀分别送至主辅过热蒸汽导管中，然后引至主辅机使用。

三、经济器

它由两个集箱及焊在集箱上的十四组蛇形管组成的密闭空间，其中充满了水。从烟气流程来看它位于所有管束的后面，吸收排出烟气的热量来加热水。由给水泵来的给水首先进入经济器加热后再经导管从上锅筒后封头送入上锅筒中去。

四、锅炉护板[见图(1-1-1)、图(1-1-2a)、图(1-1-2b)]

锅炉所有管束(包括经济器)和炉膛均为锅炉护板所包围，护板是双层的。每层均由骨架和绝热板组成。助燃的空气经过双层护板的夹层再进入炉膛。因此双层护板具有良好的绝热性能，防止热量散失。炉膛前后墙上均装有耐火砖。在经济器上端与锅炉护板相连的是烟道，再向上就是锅炉的烟囱。

五、锅炉底座

锅炉几乎全部重量由六个底座承受。下锅筒及汽水集箱下各有两个底座，水冷壁外壳下部也有两个底座。六个底座中的一个(位于下锅筒的前端)是固定的，另外五个是活动的，即可随锅炉受热膨胀沿纵向和横向自由移动。上锅筒上部有耳环与舰体相连。

六、锅炉附件[见图(1-1-1)]

保证锅炉正常工作，锅炉上装有许多附件，主要的有安全阀，水位表、主过热蒸汽阀，上下排污阀、给水阀，空气阀等。

第二章 舰用锅炉的基本工作原理

为了将重油的化学能转化为蒸汽的热能，在锅炉中同时进行着重油的燃烧、赤热的火炬和高温烟气同工质(水和汽)间的热量交换、水的自然循环和汽化、蒸汽的过热以及空气和烟气的流动等过程。本章将阐述这些工作过程简单的基本概念。

燃油泵加压后的重油经喷油器喷散成细小的雾状颗粒进入炉膛后，在高温下蒸发为油气。与此同时，通风机加压后的空气通过调风器进入炉膛，空气和油气混合形成可燃的混合汽，实际上重油雾化颗粒喷出后立即与调风器送入的空气混合。混合气温度提高到一定数值后，油气中可燃成份与空气中的氧气发生剧烈化学反应出现火焰而燃烧起来。这就是重油燃烧的基本过程。

重油在炉膛中燃烧产生的光和热就开始向炉膛周围(包括管壁和耐火砖)传递热量。然后高温烟气由炉膛排向蒸发管束、蒸汽过热器管束及经济器管束，把烟气的热量传给蒸发管束和经济器管束中的水及蒸汽过热器中的蒸汽，而烟气本身温度降低，最后通过烟囱排入大气。

由于传热的特点不同，基本上可分为炉膛辐射传热和管束的对流传热两种形式。

重油在炉膛中燃烧时，形成高温的燃烧发光火焰及高温烟气中的三原子气体是炉膛内的热源。这一热源是以多种传热方式向炉膛周围(管壁及耐火砖)进行传热，但主要是辐射传热。所谓辐射传热就是高温热源向它直接照射的周围物体(温度低于热源)散发和传递热量。例如我们接近热的蒸汽管时，感到“烤”得厉害，如果我们和蒸汽管之间用一纸板隔开，就没有这种感觉了。我们觉得“烤”得厉害就是我们吸收了蒸汽管的辐射热的缘故。

炉膛内周围是由水管和耐火砖墙组成。耐火砖墙吸收到辐射热后温度升高(其表面温度在全负荷时可达 1100°C 左右)，它一方面向水管放热，一方面又通过耐火砖墙外侧的护板向机炉舱散热(这一散热量很小)。因此，水管既吸收炉膛内热源的辐射热，也吸收耐火砖放出的辐射热。水管吸热后通过金属管壁向管内的水和汽水混合物传热。

炉膛内热源(火炬及高温烟气)以辐射方式把热量传给水管及耐火砖后，降低了烟气温度，进入对流蒸发管束，这时的烟气温度仍然是相当高的。全负荷时可达到 1600°C 左右。

对流蒸发管束就是吸收高温烟气对流传递的热量不断蒸发出蒸汽的水管管束。所谓对流传热就是高温烟气以一定速度流过管束时把热量传给管子外壁的传热方式。在管子内的水或蒸汽流动时，从管子壁内表面得到的热量通常也是对流传热现象。实际上高温烟气流过管束时仍以多种方式向水管束传热，但主要是对流传热的方式。

烟气以一定流速流过蒸汽过热器管束(全负荷时流入的烟气温度达 1300°C 左右)及经济器管束时(全负荷时流入烟气温度达 750°C 左右)，其传热的主要方式和对流蒸发管束一样也是对流传热。

由锅炉最后的受热面(即经济器)排出的烟气从烟囱排至大气中去。这时烟气仍具有较高的温度(全负荷达 530°C 左右)，它所具有的热量不能再利用是属于锅炉热损失的主要部分。

蒸汽锅炉的锅内工作过程就是其经济器和蒸发管束中的水吸收重油燃烧形成高温烟气的热量，产生一定压力的饱和蒸汽积聚在锅炉上锅筒的汽部空间，然后引至蒸汽过热器中继续

吸收高温烟气的热量使之形成一定温度的过热蒸汽的过程。在此同时，水和汽水混合物以及饱和蒸汽、过热蒸汽分别在经济器、蒸发管束及蒸汽过热器中以一定的速度进行流动。

蒸汽锅炉的正常工作必须设法把重油充分释放出来的热量很好地传给经济器受热面、蒸发管束受热面及蒸汽过热器受热面，即保证对锅炉各受热面的良好地“加热”。但是这是否可以及时地供给汽力装置足够数量和良好质量的蒸汽呢？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，看问题要从各方面看，不能只从单方面看”。锅炉各受热面在受到“加热”的同时，还必须设法保证将传给管子金属壁的热量迅速地带走，即存在着良好“冷却”的问题，否则锅炉就不能可靠地工作。因此，锅炉“加热”和“冷却”的矛盾贯穿于船用锅炉的整个管理中，也可以说船用锅炉的正常工作是“加热”和“冷却”这一对矛盾的统一。

〔附〕 锅水加热蒸发和蒸汽的过热

船用汽力装置所用的工质是水蒸汽，蒸汽锅炉就是产生一定压力和一定温度的水蒸汽的装置。关于水蒸汽的性质这里我们主要是根据实验数据所制成的图表(如水蒸汽表等)来进行研究。

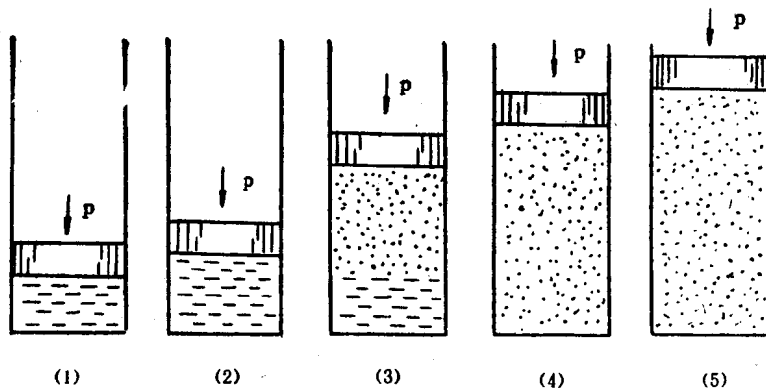
下面首先通过水蒸汽的产生过程来讨论它的性质。

在蒸汽锅炉中产生蒸汽是在定压下进行的。因此，我们来研究定压下的汽化过程。

为了讨论方便，设有一公斤水，装在带有重量不变的活塞的汽缸里，在水被加热汽化时，使汽缸中的压力保持不变。下面我们把汽化过程分成三个阶段来讨论。因此，在讨论中我们必须注意每个阶段的特点及其相互区别。

1. 水的预热阶段〔见图(1-1-3)中(1)、(2)〕

如图(1-1-3)中的(1)、(2)所示，是将水从 0°C 加热到沸腾的阶段。根据实验得知，沸腾温度是随着外部压力大小而定的，如外部压力为1个物理大气压(即物理学上所用的)，则对应的沸腾温度为 100°C 。工程上所用的压力单位是公斤/厘米²，或称工程气压(本教材所用的压力均为工程气压简称气压)，一个工程气压对应的沸腾温度为 99.09°C ，如绝对压力为26公斤/厘米²(即表压力为25公斤/厘米²)则对应的沸腾温度为 225°C 。这说明随着压力的升高，水的沸腾温度也随之提高。



图(1-1-3) 水蒸汽汽化过程

2. 汽化阶段〔见图(1-1-3)中(2)、(3)、(4)〕

如图(1-1-3)中的(2)、(3)、(4)所示。当在定压下继续向沸腾水加热时，水逐渐化成蒸汽，但温度不再升高而保持为沸腾温度。因此，这个阶段既是定压过程又是等温过程。由于在汽化阶段，水不断变成蒸汽，同一压力下每公斤蒸汽容积较水大得多，因此，使活塞上升，活塞上升时所让出的空间，随时被蒸汽所充满而保持蒸汽的密度不变，所以在沸腾过程中产生的蒸汽叫做饱和蒸汽。也就是说，当定温时，若汽缸空间容积增加，但压力并不降低而保持一定，在这种情况下一部分的水转变成蒸汽。相反，当定温时，外界冷却而减小其容积时，其压力并不增加，因为一部分蒸汽被冷凝成水，也就是说在这种状态下蒸汽是完全饱和于它

所处的空间中。而此时的沸腾水叫饱和水。同时沸腾时的温度和压力也相应地叫饱和温度和饱和压力。特别重要的是在同一压力下的饱和水和饱和蒸汽具有同一的温度即饱和温度。

当汽缸中的饱和水全部汽化为蒸汽时，这时的蒸汽我们称为干饱和蒸汽，简称干蒸汽。如图(1-1-3)中(4)所示。

因此，在汽化阶段(2)、(3)、(4)间的任意一个中间状态，汽缸里是饱和水和干蒸汽的混合物，称为湿饱和蒸汽简称湿蒸汽。为了说明湿蒸汽中干蒸汽所占的份量，用干度 X 来表示。即：

$$X = \frac{\text{干蒸汽的重量}}{\text{湿蒸汽的总重量}}$$

在数值上 X 等于在一公斤湿蒸汽内所含干蒸汽的重量。例如湿蒸汽的干度 $X=0.95$ ，这就是说在每公斤湿蒸汽内有 0.95 公斤干蒸汽和 0.05 公斤饱和水。而数值 $(1-X)$ 叫蒸汽的湿度。显然，蒸汽越干燥，它的干度就越大，对于干蒸汽来说，即图(1-1-3)中(4)， $X=1$ ；对于饱和水来说，即图((1-1-3)中(2)， $X=0$ 。

某个压力下一公斤饱和水变成干饱和蒸汽所需要的热量称为汽化热，单位为千卡/公斤，以 r 表示。

用实验方法可以确定各个压力下将一公斤饱和水转化为同样温度的干饱和蒸汽所需要的热量，即各个压力下的汽化热。例如 1 个绝对气压下的汽化热为 539 千卡/公斤。26 绝对气压下为 438.5 千卡/公斤。

在锅炉中锅水的汽化也是经过预热和汽化的过程。锅炉从冷状态下开始点火时，在经济器和上锅筒、下锅筒、汽水集箱及水管中的锅水是处在一个绝对气压(表压力为零)条件下，其温度由机炉舱温度而定。在吸收了燃料燃烧所放出的热量后，水温逐渐增加到 100°C 时，就开始在定压定温下汽化产生蒸汽，充满在上锅筒的汽部空间及蒸汽过热器空间。由于暂时不使用蒸汽或使用的蒸汽量很少时，锅炉内气压上升，锅水和蒸汽的温度也上升，又在新的定压定温下汽化。当上锅筒及过热器内蒸汽积聚更多时，又升压升温，一直达到锅炉规定的工作压力。在锅炉正常工作时，根据用汽量多少，通过燃烧的重油量来控制并保持锅炉中的工作压力。此时锅炉中蒸汽和锅水的温度就是这一工作压力下的饱和温度。

从锅炉上锅筒直接引出加以应用的蒸汽叫做饱和蒸汽，但是它不可避免地要夹带一些水份，因此它是湿饱和蒸汽。船用锅炉湿饱和蒸汽的干度一般保持在 99.5~99% 范围。干度过小即湿度过大对锅炉正常工作是不利的。

3. 饱和蒸汽的过热阶段[见图(1-1-3)中(4)、(5)]

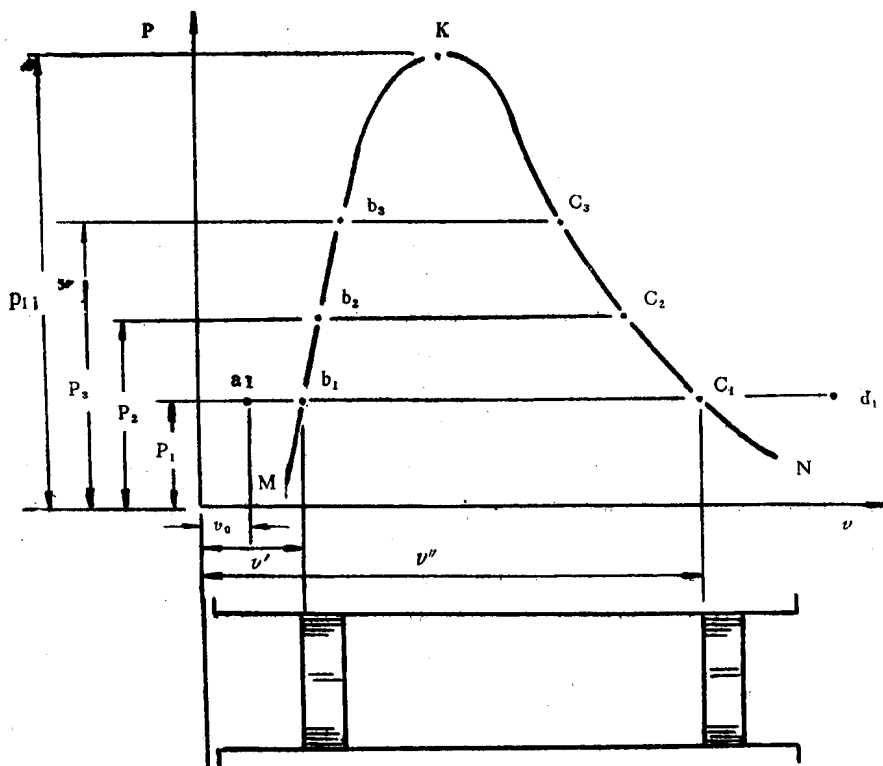
如图(1-1-3)中的(4)、(5)所示。当在定压下再给干蒸汽加热时，它就成为过热蒸汽。此时的温度称为过热蒸汽温度。其温度的高低决定于在定压下对蒸汽加热的多少。

在锅炉中这一阶段是在蒸汽过热器中完成。将锅炉上锅筒中湿饱和蒸汽引到蒸汽过热器，湿饱和蒸汽加热后，在定压下不但可以把湿饱和蒸汽中的水分全部汽化，而且也提高了蒸汽温度。因此过热蒸汽温度是高于饱和温度。例如，本锅炉 26 绝对气压下过热蒸汽温度最高可达 386°C 。而 26 绝对气压下的饱和温度为 225°C 。

为了对水蒸汽性质有进一步了解，将上面所讨论的汽化过程用图线的形式表示在压容图(1-1-4)上。(压容图的横座标为水及水蒸汽的比容，纵座标为水和水蒸汽的压力)。设在已知压力 P_1 及温度 0°C 时水的比容为 v_0 ，水的这个状态在图(1-1-4)上可用点 a_1 表示。因为汽化过程是在定压下进行的，所以这个过程的图线是一条保持纵座标为 $P_1 = \text{常数}$ 的水平线，当水刚被加热到沸腾时，水的比容 v_1 比 v_0 略有膨胀，这时刚开始沸腾的水的状态表示在图线中稍稍位于 a_1 点的右边的 b_1 点。继续加热时水开始汽化一直到水全部变为干蒸汽即状态 C_1 为止，此时干蒸汽的比容 v'' 比饱和水的比容 v' 大得多，因此 C_1 点在 b_1 点右边很远的地方。而处在 b_1 和 C_1 中间的各点都是湿饱和蒸汽。

显然，越靠右，湿饱和蒸汽的干度 X 越大，而在点 C_1 时 $X=1$ ，相反，越靠左，干度 X 越小，而在点 b_1 时， $X=0$ 。由于整个汽化阶段 b_1C_1 中湿蒸汽的压力 P 和温度 t 都不变，所以仅知道 P 和 t 还不能确定湿蒸汽的状态。因此，通常除知道 P (或 t) 外，还要知道蒸汽的干度是多少。

如果向干蒸汽继续加热，则变为过热蒸汽，加入热量越多，过热蒸汽的比容 v 也就越大，而表示过热蒸汽状态的点 d_1 的位置与 C_1 点的距离也越远。同理，过热蒸汽是在等压下加热提高温度的，要确定过热蒸汽



图(1-1-4) 水蒸汽压容图

的状态, 要同时知道压力 P 和过热蒸汽温度 t 。

上面讲的是在压力 P_1 下的定压汽化过程和过热过程。如果在较高的压力 P_2 下, 重复上述的汽化过程和过热过程, 同样可画出另一条位置较高的定压线—— a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 。

上面已讲过, 随着压力的增加, 饱和温度也提高。所以在较高压力 P_2 下, 要使水沸腾, 必须加给它更多的热量, 从而使水膨胀得更多些, 因此饱和水的比容 v_2' 也就要比 v_1' 大一些。这样代表水刚开始沸腾时的状态点 b_2 在定压线 P_2 上的位置应该在 b_1 点的右边一些。同时, 实验证明, 随着压力的增加, 干蒸汽的比容要减小, 即 $v_2'' < v_1''$ 。因此, 在定压线 P_2 上代表干蒸汽状态的 C_2 点将在点 C_1 的左边一些。

如果在更高的压力 P_3 下进行这一过程, 将分别得到代表饱和水和干蒸汽状态的各点 b_3 、 c_3 。

按上面的分析可知, 随着压力的升高, b 点将越来越向右靠, 而 C 点则越来越向左靠, 当增加到某一压力时, b 、 c 二点将汇合为一点 K 。这个点 K 我们叫做临界点。临界点的参数叫做临界参数用 p_{lj} 、 t_{lj} 、 v_{lj} 来表示。

现在我们将图上同名的各点(如 b_1 、 b_2 、 b_3 ……及 C_1 、 C_2 、 C_3 ……)连接起来, 则可得 MK 及 NK 两条线。 MK 线代表在不同压力下刚开始沸腾时饱和水的状态, 简称饱和水线。 NK 线则代表不同压力下的干饱和蒸汽线, 简称干蒸汽线。而饱和水线 MK 和干蒸汽线 NK 合起来我们统称为饱和曲线。可以看出: 饱和曲线把整个图分成为三个区域, 即位于 MK 左边的区域为水的区域; 位于 NK 线右边的区域为过热蒸汽区域; 而位于二线之间的区域为湿蒸汽区域。在临界点 K 上饱和水与饱和蒸汽具有相同的参数值, 这说明在这点上汽和水没有区别了。水的临界温度 $t_{lj} = 374.15^\circ\text{C}$, 临界压力 $p_{lj} = 225.6$ 绝对气压。

从上面对水蒸汽的产生过程分析中知道, 表示水蒸汽的状态性质有下面几个参数: 饱和压力 P_{bh} 、饱和温度 t_{bh} 、汽化热 r 、过热蒸汽温度 t_{gr} 、水蒸汽干度 X 和比容 v 。

此外, 还有一个参数用来表示一公斤蒸汽在某一压力和某一温度下所具有的热能, 我们用“焓”这一概

念, 符号为 i , 单位是千卡/公斤。如果压力不变, 温度越高, 则它所具有的热能也越大, 也就是焓也越大。

由于工程上实际的需要, 根据实验数据编制了水蒸汽表, 这个表对于我们进一步了解水蒸汽性质很有帮助。

水蒸汽表分成两大类: 一类为饱和水和干蒸汽表, 另一类为水和过热蒸汽表。

前一类表又制成两个表: 一个表在左边第一行按温度排列, 即已知温度可以查出此温度下的各个参数。但所列出的都是饱和曲线上的状态参数值以及相应的汽化热 r 。由于饱和水线和干蒸汽线上的干度已经知道分别为 0 和 1, 所以只需给出一个参数 (P 或 t), 即可确定所有其它状态参数值。

如给定饱和温度 $t_{bh}=100^{\circ}\text{C}$, 求饱和水和干蒸汽的 P_{bh} 、 v_l 、 i , 则从按温度排列的表上查得:

$P=1.0332$ 绝对大气压;

$v'=0.0010435$ 米³/公斤;

$i'=100.04$ 千卡/公斤;

$r=538.9$ 千卡/公斤。

$v''=1.673$ 米³/公斤;

$i''=638.9$ 千卡/公斤;

又如给定饱和压力 $P_{bh}=1$ 绝对大气压, 求 t_{bh} 、 v 、 r 值, 则从按压力排列的表上查得:

$t_{bh}=99.09^{\circ}\text{C}$;

$v'=0.0010428$ 米³/公斤;

$i=99.12$ 千卡/公斤;

$r=539.4$ 千卡/公斤。

$v''=1.725$ 米³/公斤;

$i''=638.5$ 千卡/公斤;

又如锅炉工作压力为 26 公斤/厘米²(绝对压力), 蒸汽干度为 99.5%, 则湿饱和蒸汽的焓可按下列步骤确定:

从按压力排列的表查得:

干饱和蒸汽焓 $i''=669.5$ 千卡/公斤;

饱和水焓 $i'=230.8$ 千卡/公斤;

则一公斤干度为 99.5% 的湿饱和蒸汽焓应为 0.995 公斤干饱和蒸汽的焓与 0.005 公斤饱和水的焓之和, 即:

$$i_{sb}=0.995 \times 669.5 + 0.005 \times 230.8 = 666 + 1.1 = 667.1 \text{ 千卡/公斤。}$$

后一类表是水和过热蒸汽表。应当指出, 表中的水是不饱和水, 必须同时已知压力 P 和温度 t 才能从表中查出水或过热蒸汽的比容和焓值。同理若已知过热蒸汽的焓及压力从表中也可查出过热蒸汽温度。这个表用粗黑的阶梯线作为水和过热蒸汽的分界线。必须注意的是表中水的比容 v 的单位是公升/公斤, 如果换算成米³/公斤时, 必须将所查出的值被 1000 来除。而表中过热蒸汽的比容则是米³/公斤。

例如已知锅炉给水压力为 30 公斤/厘米²(绝对压力), 给水温度为 105°C , 则给水的焓可由下列步骤确定。

从水与过热蒸汽表粗黑阶梯线左侧查得:

$P=30$ 公斤/厘米²,

$t=100^{\circ}\text{C}$ 时,

$i=100.5$ 千卡/公斤;

$P=30$ 公斤/厘米²,

$t=120^{\circ}\text{C}$ 时,

$i=120.7$ 千卡/公斤;

当 $P=30$ 公斤/厘米² 时, 温度相差 20°C , 焓值相差: $120.7 - 100.5 = 20.2$ 千卡/公斤。所以, 温度相差 5°C 时, 焓值相差约 5 千卡/公斤。

因此, $P=30$ 公斤/厘米², $t=105^{\circ}\text{C}$ 时,

$$i=100.5+5=105.5 \text{ 千卡/公斤。}$$

又例如已知锅炉工作压力为 65 公斤/厘米²(绝对压力), 过热蒸汽温度为 440°C , 则从水与过热蒸汽表粗黑阶梯线右侧查得:

$P=60$ 公斤/厘米²,

$t=440^{\circ}\text{C}$ 时,

$i=782.2$ 千卡/公斤;

$P=70$ 公斤/厘米²,

$t=440^{\circ}\text{C}$ 时,

$i=778.6$ 千卡/公斤;

当 $t=440^{\circ}\text{C}$, 压力相差 10 公斤/厘米² 时, 焓差 $782.2 - 778.6 = 3.6$ 千卡/公斤。所以, $P=65$ 公斤/厘米², $t=440^{\circ}\text{C}$ 时, 过热蒸汽焓 $i=782.2 - 1.8 = 780.4$ 千卡/公斤。