

高等学校试用教材

# 船舶辅汽轮机装置

(轮机管理专业用)

汪贞静 张葆华 编

人民交通出版社

高等学校试用教材

# 船舶辅汽轮机装置

Chuanbo Fuqilunji Zhuangzhi

(轮机管理专业用)

汪贞静 张葆华 编

人民交通出版社

高等学校试用教材  
**船舶辅汽轮机装置**

(轮机管理专业用)

汪贞静 张葆华 编  
人民交通出版社出版发行  
(北京和平里东街10号)  
各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$  印张: 18.75 字数: 462 千

1989年6月第1版

1989年6月第1版第1次印刷

印数: 0001—1,000册 定价: 3.70 元

# 前 言

为了满足船舶轮机管理人员和机务管理人员学习辅汽轮机装置的要求,同时为了给高等海运院校轮机管理专业师生提供“船舶辅汽轮机装置”课程的教材,我们在长期使用的教材基础上,按照“船舶辅汽轮机装置”课程的教学大纲,编写了这本书。书中内容经过较长时间的检验,基本上能满足轮机管理专业的需要。本书也可供从事汽轮机装置生产的工程技术人员阅读参考。

本书以目前我国船舶上应用的辅汽轮机装置为主,对它的工作原理、结构特点和技术管理作了比较全面的、系统的介绍。本书内容同样适用于船舶主汽轮机装置。

本书根据轮机管理专业的特点,重点阐述轮机管理人员做好“管理、使用、保养、维修”工作所需要的基本理论和基本知识,取材比较丰富,编写体系合理,条理清楚。介绍有关理论部分的内容、设计结构的指导思想和制订使用操作规则的依据时,力求做到深入浅出,从结构上说明“是什么”,从理论上分析“为什么”,并从实际上介绍“怎么做”,以便读者阅读后能科学地做好技术管理工作。至于书中涉及有关设计方面的基本概念,主要是为了便于深入了解结构特点,并有助于看懂各种设计资料和图纸,这也是为了更好地管理使用辅汽轮机装置。

全书共分六章:船舶锅炉,汽轮机原理,船舶辅汽轮机组结构,凝汽设备,船舶辅汽轮机功率调节及自动调节和自动保护系统,船舶汽轮机技术管理。其中第一、二、四、五章由汪贞静执笔编写,第三、六章由张葆华执笔编写。

本书承蒙海军工程学院龚三省教授和人民交通出版社陈民扬编审仔细审阅,并提出了不少宝贵意见,在此表示最真诚的感谢。

由于我们水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评、指正。

编者

志于上海海运学院

1987年9月

# 目 录

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>第一章 船舶锅炉</b>                   | <b>1</b>   |
| §1-1 锅炉的组成和特点                     | 1          |
| §1-2 燃料和燃烧设备                      | 6          |
| §1-3 锅炉的热平衡                       | 28         |
| §1-4 锅炉的传热过程                      | 31         |
| §1-5 锅炉的水循环、水处理和蒸汽净化              | 38         |
| §1-6 船舶辅锅炉和废气锅炉结构                 | 51         |
| §1-7 船舶辅锅炉的自动控制                   | 64         |
| §1-8 船舶锅炉技术管理                     | 71         |
| <b>第二章 汽轮机原理</b>                  | <b>83</b>  |
| §2-1 汽轮机的工作原理和特点                  | 83         |
| §2-2 蒸汽在汽轮机级内的能量转变                | 90         |
| §2-3 汽轮机级的轮周功和轮周效率                | 101        |
| §2-4 汽轮机级的通流部分、内损失、内效率和内功率        | 111        |
| §2-5 二列速度级                        | 122        |
| §2-6 多级汽轮机                        | 132        |
| <b>第三章 船舶辅汽轮机结构</b>               | <b>141</b> |
| §3-1 喷嘴和叶片                        | 141        |
| §3-2 转子                           | 150        |
| §3-3 汽缸和隔板                        | 155        |
| §3-4 汽封和汽封系统                      | 164        |
| §3-5 轴承和润滑系统                      | 171        |
| §3-6 减速齿轮和联轴器                     | 182        |
| §3-7 船舶辅汽轮机总体结构                   | 190        |
| <b>第四章 凝汽设备</b>                   | <b>203</b> |
| §4-1 冷凝器的工作原理                     | 203        |
| §4-2 冷凝器结构                        | 212        |
| §4-3 凝汽设备技术管理                     | 219        |
| <b>第五章 船舶辅汽轮机功率调节、自动调节和自动保护系统</b> | <b>224</b> |
| §5-1 船舶汽轮机的功率调节                   | 224        |
| §5-2 船舶辅汽轮机的自动调节系统                | 231        |
| §5-3 船舶辅汽轮机的自动保护系统                | 252        |
| <b>第六章 船舶汽轮机技术管理</b>              | <b>264</b> |
| §6-1 汽轮机起动                        | 264        |

|      |                            |     |
|------|----------------------------|-----|
| §6-2 | 汽轮机运行时的管理.....             | 274 |
| §6-3 | 汽轮机停机及不工作时的保养.....         | 286 |
| §6-4 | 船舶汽轮机-齿轮机组常见故障的分析和处理 ..... | 288 |



# 第一章 船舶锅炉

蒸汽锅炉（简称锅炉）是船舶汽轮机动力装置的重要组成部分。从工程热力学得知，锅炉是热力循环中的“热源”，它将燃料的化学能转变成蒸汽的热能，使蒸汽具有一定的压力和温度，作为驱动蒸汽发动机（汽轮机或蒸汽机）的工质和供全船使用。

船舶锅炉根据用途，可以分成主锅炉和辅锅炉两种。产生蒸汽供船舶主机和辅机使用的锅炉，称为主锅炉。产生蒸汽专供船舶辅机、蒸汽设备及船员生活使用的锅炉，称为辅锅炉。

在柴油机船舶上，辅锅炉仍是必不可少的。它生产的蒸汽用来加热燃油、货油、滑油、驱动货油泵等辅机，加热洗舱水、暖缸水及供船员生活使用。另外，还在主机排气管道上安装余热锅炉。当船舶航行时，用来回收主机排气余热，将水加热成蒸汽，供蒸汽设备及船员生活使用。这种锅炉也称废气锅炉。采用废气锅炉，既供应了船舶航行时需要的蒸汽，又能提高动力装置的经济性。在船舶停泊和进、出港时，通常都使用辅锅炉。

功率超过一万马力<sup>①</sup>的船舶主柴油机，排气量很大，排气温度一般都在 300℃ 左右，废气锅炉产生的蒸汽随主机发出的功率变化，通常除了满足船舶正常航行需要用汽外，还有很多剩余。因此，在这些船舶上，常常将废气锅炉做成双压式，高压蒸汽用来驱动发电用汽轮机组，低压蒸汽用来满足其它蒸汽设备和生活需要。

## §1-1 锅炉的组成和特点

### 一、锅炉的基本组成部分

锅炉是利用燃料燃烧时发出的热量将水加热，使其蒸发，产生具有一定压力和温度的蒸汽的设备。顾名思义，锅炉由两部分组成。一日炉，其作用是在其中完成燃料燃烧，使燃料的化学能充分释放出来，形成高温烟气；二日锅，其作用是将高温烟气的一部分热量传给水或蒸汽，形成具有一定压力和温度的蒸汽。尽管锅炉的结构型式各异，有的为烟管，有的为水管，但是，就锅的功能来说，它是一种热交换器，通过金属壁面实现热交换。

从结构布置来看，锅炉本体包括：

- (1) 供燃料燃烧，产生高温烟气的炉膛。
- (2) 将高温烟气的热量传给水的蒸发受热面。
- (3) 使蒸汽从水中分离出来的容汽空间，称为汽筒或汽鼓、汽包；还有水筒，联箱。汽筒、水筒和联箱统称为锅筒。

另外，还有使蒸汽加热到过热温度的过热器，加热给水的经济器，加热助燃空气的空气预热器等受热面。由于使用要求不同，在有些辅锅炉中没有布置这些受热面。

为了保证正常工作，提高锅炉效率，任何型式的锅炉除锅炉本体外，还具有以下系统和

① 本书同时采用法定计量单位制和工程单位制。在法定计量单位制中，功率单位采用瓦，符号是 W。在工程单位制中，功率单位采用米制马力，符号在本书中借用德文缩写 PS 表示。1 PS = 735.49875 W = 75 kgf·m/s。

设备:

### 1. 燃油系统

用来向锅炉本体供给在各种工况下工作需要的燃油量,并保证燃油在炉膛内迅速、完全燃烧。燃油系统包括油柜,燃油升压、输送用的燃油泵,过滤器,燃油预热器和燃烧器。

### 2. 通风系统

用来向锅炉本体供给一定压力和流量的空气,保证燃油在炉膛内实现完全燃烧,以保证锅炉的燃烧效率和燃烧强度。同时,使烟气克服烟道中的阻力排向大气。通风系统包括鼓风机或引风机,空气输送管道,烟道和配风机构等。

### 3. 汽水系统

用来保证在不同工况下安全可靠地输送出一定数量的、符合各种规定参数要求的蒸汽,同时向锅炉补充同等数量的、符合规定参数和水质要求的给水。汽水系统包括给水净化井(又称热水井),给水泵,空气旋塞、阀、管路,汽水分离器和减温器等。

### 4. 其它附件

用来保证工质沿一定管道流动的各种阀,如主、辅停汽阀,给水阀等;还有用来监视锅炉运行状况,保证锅炉安全、经济运行及改善轮机管理人员工作条件的一些设备,如每台锅炉上都装有自动调节设备 and 安全阀,排污装置,放泄阀,水位表和压力表等主要附件。

船舶锅炉有许多种结构型式,但它们的工作原理和基本组成部分是相同的。现举一种型式的锅炉来说明。

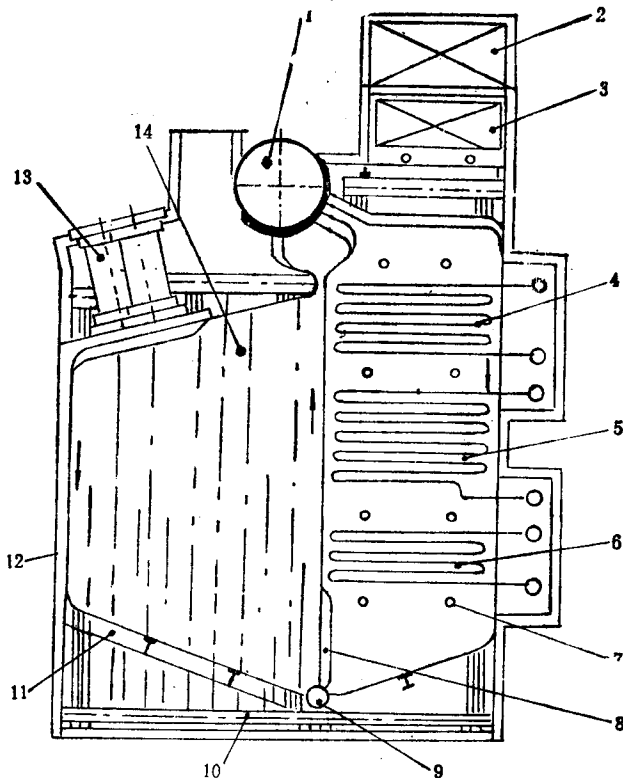


图1-1 船舶锅炉简图

1-汽筒; 2-空气预热器; 3-第一级经济器; 4-第二级经济器; 5-第一级过热器; 6-第二级过热器; 7-吹灰器; 8-垂形管(炉内烟气出口管); 9-水筒; 10-水冷壁联箱; 11-炉底; 12-水冷壁管; 13-燃烧器和配风机构; 14-炉膛

图 1-1 所示是顶燃式船舶锅炉简图。锅炉本体由汽筒 1（又称汽鼓、汽包），水筒 9（又称水鼓、水鼓筒），联箱 10 和若干水管组成。

汽筒是汽水分离后的容汽空间，水筒和联箱则充满锅水（以前习惯上称为炉水，但是称锅水更合理）。汽筒和水筒是用钢板卷制成的圆筒；联箱有圆筒形和方形两种。汽筒、水筒和联箱之间用若干根水管连接，由这些水管围成一个空间，构成炉膛。这些水管就是锅炉的蒸发受热面，分别称为水冷壁管和蒸发管。锅水从管中流过，吸收管壁传递的热量，加热、蒸发并转变成蒸汽。在炉顶装有燃烧器和配风机构 13。也有在炉膛前、后壁上装燃烧器的。

燃油和相应数量的空气经燃烧器和配风机构送入炉膛空间。雾化的燃油和空气强烈混合，一开始由点火器点燃，然后利用火焰本身热量不断加热新送入的燃油和空气混合气，使它们在炉膛中燃烧，形成高温火焰和烟气，同时产生大量热量，加热水冷壁管 12 和蒸发受热面管束。锅水由汽筒沿下降管流至水筒，再沿上升管吸收炉膛内的辐射热和烟气流过管束时放出的对流热，形成汽水混合物，上升回到汽筒中，所以上升管又称蒸发管。在汽筒内，蒸汽经汽水分离装置由汽筒上部离开，流往过热器 5 和 6。过热器布置在蒸发管束中间，通常是一组 U 形钢管或蛇形钢管，其作用是吸收烟气的热量，将由汽筒来的饱和蒸汽加热成过热蒸汽，供汽轮机作为工质。烟气流过水冷壁和过热器后，温度降低，然后经过烟道，再从烟囱排入大气。

为了充分吸收烟气余热，降低排烟温度，通常在锅炉的烟道上装设经济器 3 和 4 及空气预热器 2。经济器一般由肋片式或鳍片式钢管加上联箱组成。给水流过经济器，因其温度比蒸发受热面中饱和水温度低，可以充分吸收烟气余热，然后再进入汽筒。空气预热器一般用一束钢管固定在两端的管板上，烟气从管内流过，排入大气，空气则由管外流过；也有空气从管内流过，烟气从管外流过的空气预热器。空气吸收烟气余热后温度升高，再送入炉膛，可以提高燃烧效率和锅炉热效率。经济器和空气预热器又称为锅炉的辅助受热面或尾部受热面。辅助受热面并非每台锅炉都装设，通常辅锅炉不装设，主锅炉根据不同的要求，装设其中之一或两者都装设。

船舶上的一些蒸汽加热设备及冲洗油舱和生活用的蒸汽，一般采用湿饱和蒸汽。因此，只需从汽筒中直接引出即可。

在某些油船上，还使用各种蒸汽辅机，如货油泵、给水泵和锚机等。这类辅机一般不要求使用过热蒸汽。因此，将一部分过热蒸汽流过减温器，降低温度，成为减温蒸汽，再经过管道输送至上述辅机。减温器一般是安装在汽筒中水面以下的一组蛇形管，过热蒸汽从管内流过，被锅水冷却后，成为减温蒸汽。有时减温器装在两级过热器之间，用来作为调节过热蒸汽温度用。

图 1-2 所示是大、中型油船的排气余热利用系统示意图。从图中可以看出，除供全船用汽的燃油水管辅锅炉外，为了充分利用船舶主柴油机的排气余热，还专门在主机排烟道上装设一台废气锅炉，用来在船舶正常航行时产生驱动汽轮发电机 4 和其它蒸汽辅机用的高压蒸汽及加热货油和生活用的低压蒸汽。这种排气余热利用系统在大功率柴油机船上应用得较多。

## 二、锅炉的型式和特点

锅炉的型式很多，根据不同的标准，有各种不同的分类，现分别扼要介绍如下。

根据结构，锅炉可以分成火管锅炉和水管锅炉两种。

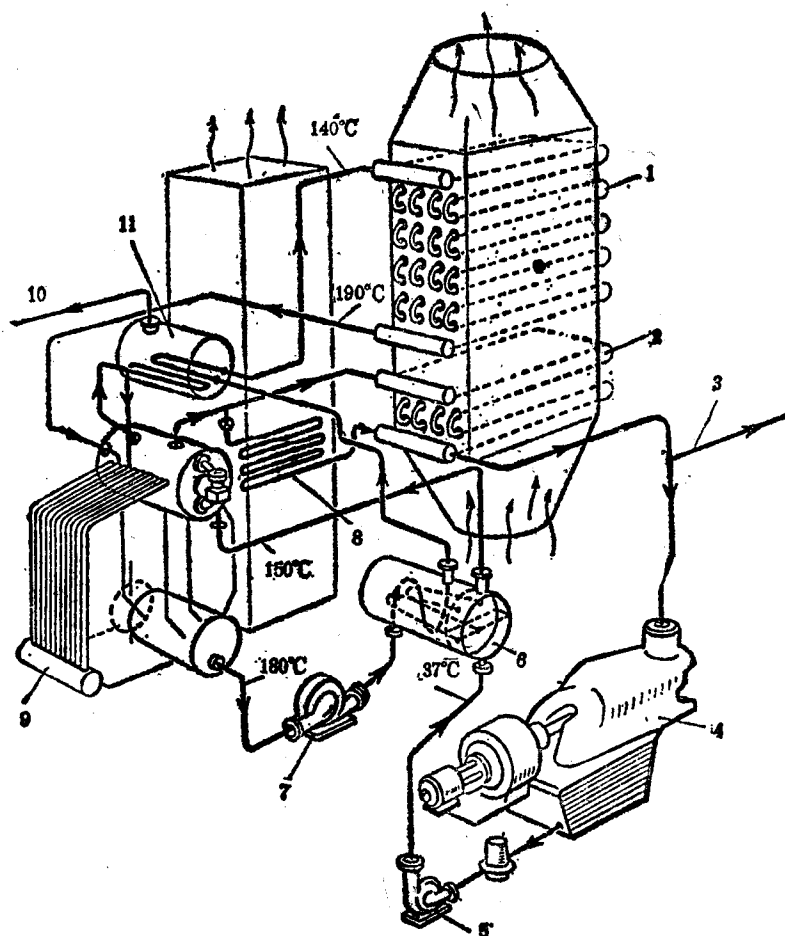


图1-2 大、中型油船余热利用系统示意图

1-废气锅炉蒸发管束, 2-废气锅炉过热器, 3-供汽管道, 4-汽轮发电机, 5-给水泵, 6-给水加热器, 7-循环水泵, 8-燃油水管锅炉过热器, 9-燃油水管锅炉, 10-低压蒸汽供汽管道, 11-低压蒸汽发生器

火管锅炉又称烟管锅炉, 以若干根烟管构成烟气通道, 烟管壁是受热面, 烟管外是锅水。炉膛内燃油燃烧的高温烟气以一定的速度从烟管内流过, 纵向冲刷管壁, 将热量传给管外的锅水, 产生蒸汽。火管锅炉根据烟管的安装位置, 又可分成立式火管锅炉和卧式火管锅炉两种。火管锅炉结构笨重, 效率低, 型式落后, 基本上已被淘汰, 只有一些老式的柴油机船舶上还有用它作为辅锅炉的。

水管锅炉以若干根水管组成受热面, 炉膛内燃油燃烧的高温烟气从水管外流过, 横向冲刷管壁, 受热面既受到热辐射, 又受到对流传热, 将热量传给管内的锅水, 产生蒸汽。由于水管的布置很方便, 可以合理组合, 结构紧凑, 传热效率高, 易于获得较高参数、大流量的蒸汽, 是船舶主锅炉和辅锅炉常用的型式。水管锅炉根据水管的安装位置, 又可分成立式水管锅炉和卧式水管锅炉两种。现在船舶上大多采用立式水管锅炉, 只有在一些老式船舶上还装有卧式水管锅炉, 过去也曾将它称为联箱式水管锅炉。

根据锅炉中锅水循环的原理, 水管锅炉还可以分成自然循环式和强制循环式两种。

在自然循环式水管锅炉中, 依靠吸热少、甚至根本不吸热的下降水管和吸热多、管内形成汽水混合物的上升管这两种管内工质的重度差, 形成工质循环流动。它是一种常用的水管

锅炉，在目前船舶锅炉常用的工作压力下工作非常可靠。

在强制循环水管锅炉中，锅水依靠循环水泵实现循环流动。随着锅炉内压力增高，汽水的重度差减小，自然循环便难以进行。为了保证安全可靠地工作，必须采取强制循环。它的优点是受热面可以随意布置，水管直径也可减小，因此结构比较紧凑。由于目前商船上要求的蒸汽参数不高，所以强制循环水管锅炉只在某些柴油机船上用作辅锅炉和废气锅炉。

根据热量来源，锅炉可以分成燃油锅炉、废气锅炉、废气-燃油锅炉和燃煤锅炉四种。

燃油锅炉是燃烧重油、渣油（统称燃油）等发出热量，加热锅水产生蒸汽的锅炉。与燃煤相比，燃油的发热值高，因此，在其它条件相同的情况下，可以减少燃料舱容积，增加船舶载重量和续航能力。另外，燃油的燃烧效率高，并且便于控制和管理。所以燃油锅炉是目前船舶上普遍采用的一种锅炉。

废气锅炉是利用柴油机或燃气轮机等主机的排气余热加热给水，产生蒸汽的锅炉。这种锅炉内没有燃料的燃烧过程，因此不需要炉膛，也不存在由燃料化学能转变成热能的过程。其工作过程中只发生热量的传递。从传热学的观点来看，废气锅炉只是一种热交换器。

废气-燃油锅炉又称组合式锅炉。它将废气锅炉与燃油锅炉组合成一体，其中一部分受热面吸收主机的排气余热，另一部分受热面吸收燃油燃烧发出的热量，水汽部分互相连通。船舶航行时，利用主机排气工作，当排气余热不足时，可燃烧燃油补充供汽。船舶停港时，则使用燃油锅炉作为辅锅炉运行。

老式船舶上，最早使用过燃煤锅炉。这种锅炉热力强度不高，效率低，结构笨重，再加上燃料贮藏、运输和炉渣清除不便，操作管理劳动强度大，实现机械化和自动化管理还存在不少问题（这些都影响船舶续航能力）。因此，它已被燃油锅炉所取代。但目前有些国家根据本国国情，在某些固定航线的运煤船和矿砂船上又装设了燃煤锅炉。

此外，还有一种原子锅炉。它是利用核燃料（铀、钚等）裂变反应的热量加热锅水，产生蒸汽。由于核燃料的重量容积很小，裂变时又不需要空气，因此原子锅炉特别适用于大功率、高航速、长航程的远洋船舶、特殊船舶及潜水船舶。目前国外民用船舶，如破冰船、海洋考察船、矿砂船，已有数艘装有原子锅炉，但原子锅炉主要还是应用在潜艇上。

根据蒸汽压力，船舶锅炉可以分成超高压、高压、中压和低压四种。

超高压锅炉的蒸汽压力高于 $92\text{kgf/cm}^2$ （ $9.2\text{MPa}$ ），锅炉的蒸汽压力在 $32\sim 92\text{kgf/cm}^2$ （ $3.2\sim 9.2\text{MPa}$ ）范围内，中压锅炉的蒸汽压力在 $16\sim 32\text{kgf/cm}^2$ （ $1.6\sim 3.2\text{MPa}$ ）范围内，低压锅炉的蒸汽压力低于 $16\text{kgf/cm}^2$ （ $1.6\text{MPa}$ ）。

商船上常用辅锅炉的蒸汽压力为 $5\sim 7\text{kgf/cm}^2$ （ $0.5\sim 0.7\text{MPa}$ ），蒸发量为 $0.07\sim 3\text{t/h}$ ，一般不装设过热器、经济器和空气预热器。对于需要向蒸汽辅机提供工作蒸汽的辅锅炉，其蒸汽参数要高一些，蒸汽压力一般为 $13\sim 18\text{kgf/cm}^2$ （ $1.3\sim 1.8\text{MPa}$ ），也有更低的，蒸发量为 $3\sim 20\text{t/h}$ ，通常装设过热器和空气预热器等辅助受热面。废气锅炉的压力和蒸发量与主机功率有关，一般都是低压锅炉，压力低于 $7\text{kgf/cm}^2$ （ $0.7\text{MPa}$ ）。

不论哪种型式，通常对船舶锅炉的要求有下列三方面：

（1）在各种负荷和航行条件下，如在大风浪中，船舶在横倾 $45^\circ$ ，纵倾 $15\sim 20^\circ$ 时，锅炉

① 在法定计量单位制中，压力（压强）单位采用帕（斯卡），符号是Pa， $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。在工程单位制中，压力单位采用千克力/厘米<sup>2</sup>，符号是 $\text{kgf/cm}^2$ ， $1\text{kgf/cm}^2=9.80665\times 10^4\text{Pa}$ 。为了便于计算，本书近似取 $1\text{kgf/cm}^2=10^5\text{Pa}=0.1\text{MPa}$ 。

在法定计量单位制中，力的单位采用牛（顿），符号是N， $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$ 。在工程单位制中，力的单位采用千克力，符号是kgf， $1\text{kgf}=9.80665\text{N}\approx 10\text{N}$ 。

都能可靠地运行。航行中如果锅炉发生故障，将直接影响船舶和船员的安全。所以对锅炉的设计、强度计算、材料选用、加工工艺、装配质量、锅水净化及各种附件的设计、制造、检验等都要按照国家有关标准严格贯彻执行，以确保锅炉工作的可靠性。

(2) 锅炉工作时应具有较高的经济性，即锅炉热效率要高，燃油消耗率要低。这对船舶营运成本具有重要意义。但是，应同时考虑锅炉造价、重量和尺寸等。一般经济性高的锅炉，造价同样也高，所以要作综合经济分析。

(3) 锅炉的布置应便于管理和检修，有利于减轻轮机管理人员的劳动强度。因此，在结构上要简单，并考虑到在船上能以最少的拆卸工作便可进行修理及更换各附件和管子，同时还要实行锅炉运行的自动控制。

## §1-2 燃料和燃烧设备

### 一、燃料的种类和成分

燃料是燃烧时能产生大量热量的物质，是锅炉获得热量的主要来源。燃料通常可以分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。核燃料则是靠核裂变放出大量热量的物质。

目前，远洋船舶上使用的燃料主要是重油和渣油，统称为燃油。重油是石油加工后的混合物，是石油在经过常压蒸馏、减压蒸馏、裂化等各不同加工过程，提炼出汽油、煤油、柴油、润滑油等产品后的残油。它是由裂化重油、减压重油、常压重油等按不同比例调制而成的。渣油是石油炼制过程中排出的残渣，不再处理，直接供给船舶使用。渣油的性能符合船舶锅炉使用要求，发热值高，杂质含量和含硫量少，着火容易，燃烧迅速，并且来源充足，价格低廉，所以广泛应用于船舶锅炉中作为主要燃料。

燃油的成分主要是烃类化合物、氧、氮、硫等和其它杂质。其中包括：

(1) 可燃成分：烃类化合物占96%~97%。其中氢的发热值比碳大3~5倍。燃油中含氢量越多，比重越小，就越容易着火燃烧。燃油中碳和氢的含量之比称为碳氢比，用 $K_{CH}$ 表示。

$$K_{CH} = \frac{C}{H}$$

式中：C——1kg 燃油中碳的重量，kg；

H——1kg 燃油中氢的重量，kg。

碳氢比越小，氢的含量就越多，发热值也越高。燃油的碳氢比为6~9，而烟煤的碳氢比则大于20。

(2) 杂质：氧、氮含量约占1.5%，是燃油中的不可燃成分。其含量越多，燃油的发热值就越低，故称为燃油的内部杂质。它们通常是以与碳、氢结合成有机化合物形式存在。其它还有少量非金属元素，如氯、硅、磷、硒、砷等的化合物及碱金属和碱土金属的盐类，是不可燃的矿物质，又称为灰分。它们在燃油燃烬后，一部分沉积在锅炉受热面上，使传热效率降低；一部分随烟气带入大气，污染环境。燃油的灰分约占0.1%~0.4%。灰分越多，燃油的发热值就越低，并且灰分中的钒、钠盐在高温下会引起锅炉受热面金属的高温腐蚀。

(3) 有害成分：硫化物虽是可燃物，但发热值不高。燃烧后所产生的二氧化硫和三氧化硫气体排出锅炉时，如果烟气温度低于露点，则与烟气中的蒸汽形成亚硫酸和硫酸，引起锅炉尾部受热面的金属腐蚀。烟气中三氧化硫浓度越大，烟气露点就越高，更易形成硫酸，金

属腐蚀就更严重。在含硫量大于1%时，含硫量每增加1%，露点约升高4℃。二氧化硫、三氧化硫和硫化氢气体排入大气还会污染环境，危害人体健康。

含硫量少于0.5%的燃油称为低硫燃油；含硫量为0.6~1.0%的称为中硫燃油；含硫量为1.1~3.5%的称为高硫燃油。高硫燃油在常温下也会挥发出硫化氢。因此，在清洁燃油柜时，要通风良好，保证人身安全。

(4)水分：燃油中水分约占2%。在燃烧时，水分也吸热蒸发，温度升高至排烟温度。这样，反而要消耗汽化所需的热量。它还会和硫的氧化物形成硫酸，腐蚀金属。因此，水分也是燃油中的有害成分。另外，在燃油的装卸、运输过程中，也可能掺进水分。这不仅要增加动力消耗，而且会引起管道腐蚀。当水分不均匀地混合在燃油中时，会造成燃烧时火焰脉动，甚至发生锅炉熄火等事故。

我国的几种燃油成分如表 1-1 所示。

我国的几种燃油成分

表1-1

| 油 种     | C     | H     | O    | N    | S    | A    | W   | 发热值 $Q_D$ (kJ/kg) |
|---------|-------|-------|------|------|------|------|-----|-------------------|
| 大 庆 重 油 | 86.47 | 12.47 | 0.29 | 0.28 | 0.21 | 0.03 | 0.2 | 39 913            |
| 胜 利 重 油 | 85.37 | 11.97 | 0.62 | 0.30 | 0.90 | 0.04 | 0.8 | 41 315            |
| 船 用 渣 油 | 86.02 | 12.46 | 0.45 | 0.42 | 0.32 | 0.03 | 0.3 |                   |
| 船 用 渣 油 | 85.80 | 12.38 | 0.45 | 0.42 | 0.32 | 0.03 | 0.6 | 41 650            |

通常将燃油看成是由碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、灰分(A)和水分(W)七种成分组成，其余成分都不考虑。表 1-1 中所列数值表示各成分的重量百分比含量。这就是燃油送进锅炉去燃烧时的成分。

二、燃油的特性

为了合理选择和使用燃油及正确计算燃油消耗量，保证锅炉安全经济运行，轮机管理人员必须熟悉下列的燃油特性。

1. 比重●

燃油的比重是其密度与277K(4℃)时纯水密度之比值。

燃油比重与温度有关。石油工业中规定，以20℃时的比重作为燃油的标准比重，用符号 $\gamma_4^{20}$ 表示。任意温度下燃油的比重可按下式计算：

$$\gamma_t = \gamma_4^{20} - \alpha(t - 20) \tag{1-1}$$

式中：  $\gamma_t$ —— $t$ ℃时燃油的比重；

$\gamma_4^{20}$ ——293K(20℃)时燃油的比重；

$t$ ——燃油的温度，℃；

$\alpha$ ——温度修正系数，1/℃，其值在 0.0006~0.0005 之间。 $\gamma_4^{20}$ 大时， $\alpha$ 相应偏低，其值可从有关表中查得。

燃油的比重与燃烧特性有密切关系。燃油的比重越大，碳氢比 $\left(\frac{C}{H}\right)$ 就越大，闪点也越高，燃烧时火焰的亮度就越亮，辐射放热比率也越大。但是，燃油比重大时，粘度就大，残

● 比重实际上是相对密度的不正确称法。——编者

留碳量就多,混入水分后分离就更困难。燃油比重小时,碳氢比 $\left(\frac{C}{H}\right)$ 就小,含氢量就多,其单位重量发热值就高。

燃油的比重( $\gamma_{4}^{20}$ )一般在0.88~0.99之间,可用比重计测定。

## 2. 发热值

1kg 燃油燃烧时所放出的热量称为燃油的发热值,单位是 kJ/kg<sup>①</sup>。

燃油的发热值可以分成高发热值和低发热值两种。

当燃油中的氢燃烧后形成的水分及燃油中含有的水分在烟气中是以凝结水状态存在时的发热值,称为高发热值,用  $Q_G$  表示。如果这些水分在烟气中是以蒸汽状态存在时,将不可能放出其汽化潜热。这时的发热值称为低发热值,用  $Q_D$  表示。

1kg 氢燃烧时可形成 9kg 水,1kg 水汽化时吸收的汽化潜热为 2500kJ,燃油的低发热值为:

$$Q_D = Q_G - 25(9H + W) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-2)$$

如果已有燃油的成分分析资料,可用以下经验公式计算低发热值,足能达到实用要求的精确度:

$$Q_D = 339C + 1005H + 109(S - O) - 25W \quad \text{kJ/kg} \quad (1-3)$$

锅炉的排烟温度一般为160~300℃,烟气中的蒸汽不会凝结。所以,通常采用燃油的低发热值,其值在39 775~41 869kJ/kg 范围内,差异不太大。

## 3. 粘度

粘度是液体流动时引起的内摩擦力,是燃油最重要的特性。它表征燃油输送和雾化的难易程度。

通常用动力粘度、运动粘度和相对粘度来表示粘度的大小。

动力粘度表示面积为1cm<sup>2</sup>、相距1cm 的两层燃油,以1cm/s 的相对速度流动时产生的内摩擦力,以符号  $\mu$  表示。在法定计量单位制中,它的单位是 Pa·s (帕·秒);在绝对单位制中,它的单位是 P (泊)。

运动粘度是动力粘度与同温度下燃油密度之比,以符号  $\nu$  表示。在法定计量单位制中,它的单位是 m<sup>2</sup>/s;在绝对单位制中,它的单位是斯(St),1St = 1cm<sup>2</sup>/s = 10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>/s。实际使用时,常用厘斯(cSt),1cSt = 10<sup>-2</sup>St。

动力粘度和运动粘度又称为绝对粘度,它是理论分析和推导中经常使用的粘度,但是直接测量它们比较困难。实际使用中,常采用另一种相对粘度,又称条件粘度。

相对粘度是以燃油的粘度相对于水的粘度的大小程度来表示。各国采用的相对粘度有恩氏粘度、雷氏粘度和赛氏粘度。

恩氏粘度用恩式粘度计测定。它是用温度为  $t^\circ\text{C}$  的200mL 燃油从恩式粘度计小孔流完的时间,与相同体积蒸馏水在20℃时从同一小孔流完的时间之比值来确定。该比值即为燃油在  $t^\circ\text{C}$  时的恩氏粘度,以符号  $^\circ\text{E}$  表示。

雷氏粘度用雷氏粘度计测定。它是用温度为100°F 的50mL 燃油流经雷氏粘度计小孔的时间来确定,以符号 R.I.表示,单位是 s。

① 在法定计量单位制中,热量、能和功的单位采用焦[耳],符号是J,1J = 1N·m,比能单位采用焦[耳]每千克,符号是 J/kg。在工程单位制中,热量单位采用卡,符号是 cal,1cal = 4.1868J,比能单位采用卡 每千克,符号是 cal/kg。

赛氏粘度用赛氏粘度计测定。它是用温度为 100°F 的 60mL 燃油流经赛氏粘度计小孔的时间来确定, 以符号 S.S.F. 表示, 单位是 s。

我国石油产品采用恩氏粘度和运动粘度, 它们可按下式换算:

$$v = 7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} \quad \text{cSt} \quad (1-4)$$

或者可以从 (表1-2) 查出。

燃油粘度单位对照表 表1-2

英国采用雷氏粘度, 美洲采用赛氏粘度。

燃油的粘度随温度升高而降低。但是油温对粘度的影响是变化的: 高温时粘度变化小, 低温时粘度变化较显著。为了使燃油在驳运时有较好的流动性及保证燃烧时达到良好的雾化, 必须将燃油预热, 降低其粘度。预热温度过高, 会使燃油在输油管道中产生分解, 并在聚合后生成油垢和沉淀物; 另外, 预热温度超过闪点时, 会导致闪火爆燃。预热温度过低, 粘度过高, 会造成雾化不良; 燃油油滴受热, 在炉内不易燃烧完全; 燃油滴粘在燃烧室或受热面壁上, 会恶化燃烧和传热; 另外, 送入燃烧器的燃油量也会达不到预定值。

对于不同的燃油, 因其粘度特性不同, 预热温度也不同。

#### 4. 凝固点

凝固点是指燃油冷却到丧失流动性时的温度。

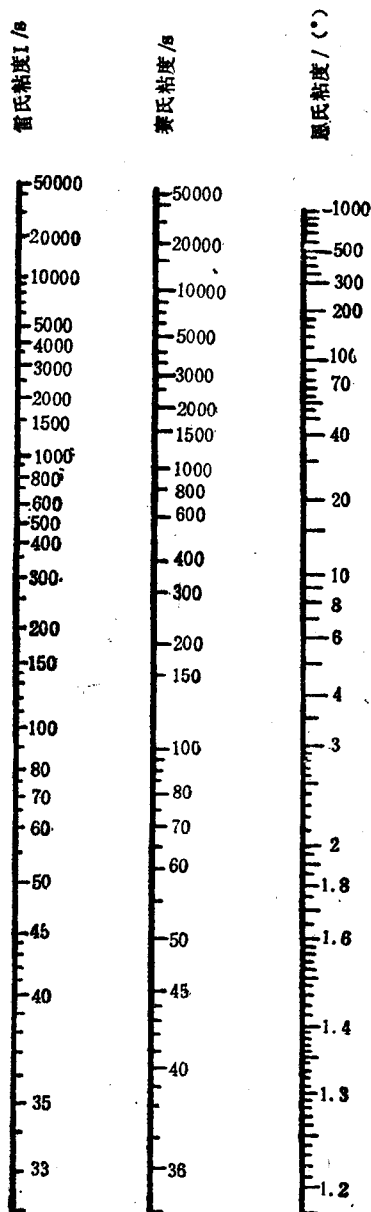
燃油凝固点的高低主要与其中的含蜡量有关。因为石蜡的凝固点较高, 当燃油冷却时, 石蜡先凝固, 这样就阻碍燃油流动。因此, 含蜡量高的燃油, 其凝固点也高。

燃油没有明显的由液体转变为固体的温度, 其凝固点的测定是将燃油放在标准试管内冷却, 并将试管倾斜45°, 经过60秒仍不流动, 这时的温度即为这种燃油的凝固点。燃油的驳运和贮存与凝固点有关。因此, 确定燃油的预热温度必须考虑凝固点。

#### 5. 闪点、燃点和自燃点

闪点是燃油加热时, 其中挥发气体与空气的混合物在接触明火时发生短暂闪光并立即熄灭的最低温度。

燃油加热时, 其中挥发气体与空气的混合物在接触明火时能着火并持续燃烧, 时间不少于 5 秒的最低温度, 称为燃点。一般, 燃点比闪点高 15~20℃。在闭式仪器中测得的闪点,



比在开式仪器中测得的闪点要低15~25℃。

自燃点是燃油缓慢氧化而自行着火燃烧的最低温度。自燃点主要与燃油成分有关，并且随环境条件和压力变化而改变。压力越高，散热条件越差，自燃点就越低。

闪点、燃点和自燃点表征燃油的易燃程度，是判断发生火灾可能性和确定防火等级的一项重要指标，与燃油的安全驳运、贮存、使用密切相关。在闪点以下贮存燃油时，即使接触明火也不会有危险。但是闪点过高对燃烧不利。闪点超过140℃的重油，称为难着火重油。

国产燃油的标准列于表1-3(SYB109-60)。该标准按80℃时的运动粘度，分为20号、60号、100号和200号四个牌号，牌号的数目约等于该燃油在50℃时的恩氏粘度。

我国燃油的质量指标

表1-3

| 质 量 指 标                |     | 20 号 | 60 号 | 100 号 | 200 号   |
|------------------------|-----|------|------|-------|---------|
| 恩氏粘度 °E <sub>80</sub>  | 不大于 | 5.0  | 11.0 | 15.5  | —       |
| 恩氏粘度 °E <sub>100</sub> | 不大于 | —    | —    | —     | 5.5~9.5 |
| 闪点(开口) °C              | 不低于 | 80   | 100  | 120   | 130     |
| 凝固点 °C                 | 不高于 | 15   | 20   | 25    | 36      |
| 灰分, %                  | 不大于 | 0.3  | 0.3  | 0.3   | 0.3     |
| 水分, %                  | 不大于 | 1.0  | 1.5  | 2.0   | 2.0     |
| 含硫量, %                 | 不大于 | 1.0  | 1.5  | 2.0   | 3.0     |
| 机械杂质, %                | 不大于 | 1.5  | 2.0  | 2.5   | 2.5     |

20号燃油用于小型船舶辅锅炉上，60号和100号燃油用于大型油船辅锅炉或船舶主锅炉上。200号燃油大多用于陆用锅炉上。

为了改善燃油性能，各国的石油公司都生产了不同的添加剂，其品种很多。它们的作用有的是降低凝固点，有助于分离水分；有的是促进燃烧和防止腐蚀等。

### 三、燃油的燃烧

燃烧是燃油中的可燃成分与空气中的氧进行化合的过程。燃烧的火焰放出大量热和强烈的光（主要是炽热的碳微粒发光），使燃烧产物温度升高。为了保证燃油持续燃烧，必须具备三个条件：燃油中要有足够的可燃成分；要有足够的氧化剂，即空气中的氧；燃油与空气要混合良好，并具有一定的、高于燃点的温度。

#### 1. 燃油燃烧需要的空气量及燃烧产物的计算

燃油燃烧需要的空气量及燃烧产物的计算是锅炉传热计算，烟道阻力计算和热工试验的主要依据。它们通常用公式计算。但是用图示法表示则更为清晰。燃油燃烧时助燃空气和燃烧产物可以通过图 1-3 来说明。它直观地表示出两者的数量关系。

图 1-3 中应用下列由燃烧的基本化学反应式演化出的公式。

1kg 燃油完全燃烧时理论上需要的氧量  $L_{O_2}$  等于燃油中可燃元素—碳(C)、氢(H)、硫(S)完全燃烧时需要氧量之和，再减去燃油中含氧量，即

$$L_{O_2} = \frac{32}{12} \cdot \frac{C}{100} + \frac{32}{4} \cdot \frac{H}{100} + \frac{32}{32} \cdot \frac{S}{100} - \frac{O}{100}$$

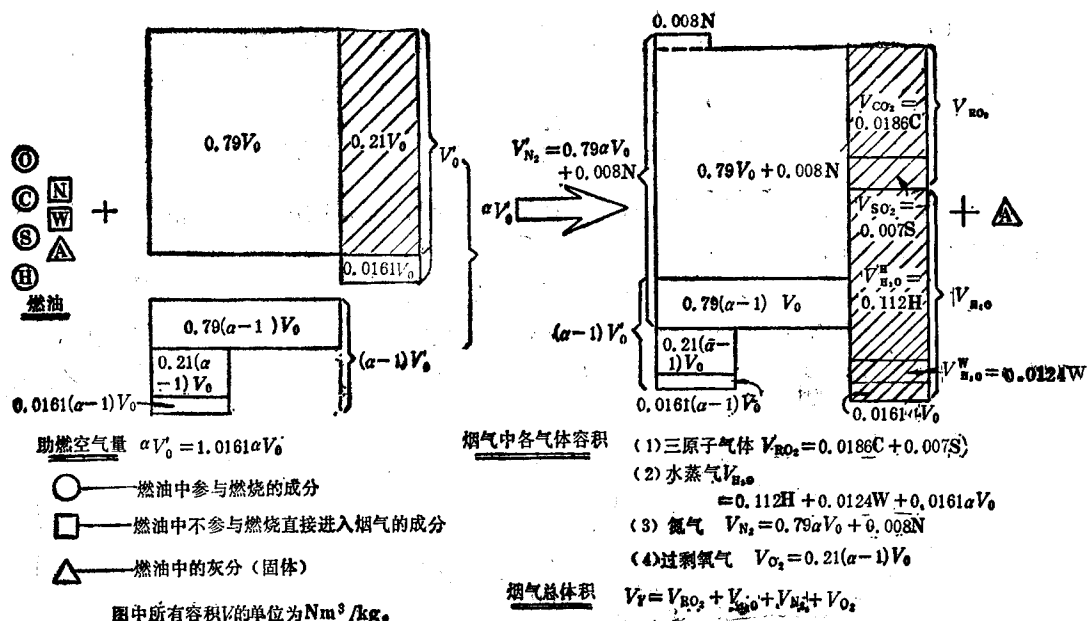


图1-3 助燃空气和燃烧产物的图示法

$$= 2.67 \frac{C}{100} + 8 \frac{H}{100} + \frac{S}{100} - \frac{O}{100} \quad \text{kg/kg}$$

按重量计，干空气中含氧量为23.2%，含氮量为76.8%，因此，1kg 燃油完全燃烧时需要的理论干空气量  $L_0$ （重量）为

$$L_0 = \frac{L_{O_2}}{0.232} = 0.115C + 0.345H + 0.043S - 0.043O \quad \text{kg/kg}$$

标准状态下干空气的密度为  $1.293 \text{ kg/Nm}^3$ ，因此，1kg 燃油完全燃烧时需要的理论干空气量  $V_0$ （体积）为

$$V_0 = \frac{L_0}{1.293} = 0.089C + 0.267H + 0.033S - 0.033O \quad \text{Nm}^3/\text{kg}$$

设1kg 干空气中水分重量百分比为  $d \text{ g/kg}$ （一般  $d$  为  $8 \sim 12 \text{ g/kg}$ ，可取  $d = 10 \text{ g/kg}$ ），则燃尽1kg 燃油时需要的理论湿空气量  $L'_0$  和  $V'_0$  分别为

$$L'_0 = L_0 \left( 1 + \frac{d}{1000} \right) = 1.01L_0 \quad \text{kg/kg}$$

和 
$$V'_0 = V_0 + 1.293V_0 \frac{d}{1000} = 1.0161V_0 \quad \text{Nm}^3/\text{kg}$$

为了保证充分燃烧，实际燃烧过程中消耗的空气量  $L \text{ kg/kg}$  和  $V \text{ Nm}^3/\text{kg}$  比理论湿空气量  $L'_0$  和  $V'_0$  要多。两者之比称为过剩空气系数，用  $\alpha$  表示。

燃油燃烧后的产物主要有：二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、水蒸汽 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、氮 ( $\text{N}_2$ )、还有过剩空气中的氧 ( $\text{O}_2$ )。