

高等学校试用教材

船舶蒸汽锅炉

(轮机管理专业用)

陈心铭 等编



人民交通出版社

高等学校试用教材

船舶蒸汽锅炉

(轮机管理专业用)

陈心铭 等编

人民交通出版社

高等学校试用教材
船舶蒸汽锅炉
(轮机管理专业用)

陈心铭 等编

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 13.75 字数: 330千

1988年6月 第1版

1986年6月 第1版 第2次印刷

印数: 4,701—5,320册 定价: ~~2.60~~元
2.30

前 言

本书是由大连海运学院和上海海运学院蒸汽动力教研室在77届和78届的船舶蒸汽锅炉课程的教学经验基础上，参照81年修订的《轮机管理专业教学计划》对本门课程的要求（64学时）编写的。

本书从国外现代船舶蒸汽动力装置的发展状况出发，着重介绍近代船舶蒸汽锅炉的新型结构及其性能、各种工作过程的基本理论、自动化调节系统与装置以及维护管理的基本知识。另外，对于锅炉金属材料的高温特性、强度验算、锅炉检验等方面的内容也作了概要的论述。在内容的取材方面，除了着重于主锅炉外，还对现代柴油机船上广泛使用的辅助锅炉、废热锅炉及其自动调节装置作了较为详尽的介绍。而且，对于当代船舶锅炉的发展新动向和科学技术新成果也作了简要的反映。

本书由大连海运学院陈心铭主编，参加编写的有上海海运学院沈思介，大连海运学院魏澄邦、王军等。本书由武汉海军工程学院龚三省审校。龚三省还对第六章作了部分改写。大连海运学院满一新对第八章作了审阅。

由于水平所限，书中定会有不少不足之处，希望广大读者批评指正。

内 容 简 介

本书内容包括：锅炉燃料油的特性及其对燃烧的影响；空气量和烟气量的计算；燃料油燃烧的基本原理；船用锅炉的燃烧设备和系统；炉内和受热面的传热过程和简要的计算；水动力过程和自然循环的计算；现代船舶常用锅炉的结构和性能；过热器和尾部受热面的腐蚀、结渣和积灰的形成和防止；锅炉的通风设备和空气动力计算；船用锅炉的燃烧和给水自动调节；金属材料的高温性能和锅炉钢材的选用；锅炉主要受压部件的强度验算和锅炉检验的一般方法；锅炉设备的日常管理和使用维护的基本知识。

本书为水运高等学校轮机管理专业的教材，也可供江海和远洋轮机人员阅读。

目 录

绪论	1
第一节 蒸汽锅炉在船舶动力装置中的作用和地位	1
第二节 锅炉概要	3
第一章 燃料和燃烧产物的计算	8
第一节 燃料油的元素组成及其主要特性	8
第二节 燃料油燃烧产物的计算	13
第二章 燃料油的燃烧和燃烧设备	23
第一节 燃油燃烧的一般情况	23
第二节 燃油的雾化和雾化器	26
第三节 配风器	32
第四节 燃油系统	36
第三章 锅炉装置的热平衡和效率的测定	39
第一节 各项损失的计算	39
第二节 锅炉装置的效率和燃料消耗量的计算	43
第三节 锅炉装置的热平衡试验方法和步骤	45
第四章 船用锅炉的型式和结构	47
第一节 火管锅炉	47
第二节 水管锅炉	49
第三节 辅助锅炉和废气锅炉	67
第五章 蒸汽过热器和尾部受热面	75
第一节 过热器的的工作条件	75
第二节 辐射、对流和半辐射式过热器的温度特性及几种汽温调节方案	80
第三节 过热器的结构和防止高温腐蚀问题	83
第四节 尾部受热面	86
第五节 尾部受热面的结构和运行中的一些问题	88
第六章 锅炉的基本工作过程	97
第一节 锅炉中的热交换	97
第二节 锅炉自然水循环	113
第三节 蒸汽的净化	122
第四节 锅炉的通风	127
第七章 船舶锅炉自动控制	136
第一节 概述	136
第二节 船舶锅炉的自动调节	137
第三节 辅助锅炉的自动控制	153

第八章 锅炉元件的金属材料和强度验算	167
第一节 锅炉钢材在制造和运行中的性能	167
第二节 锅炉主要元件的工作条件	171
第三节 锅炉钢材的牌号、种类和使用范围	173
第四节 船舶水管锅炉的强度验算	176
第五节 船舶火管锅炉强度计算特点	190
第九章 船舶锅炉的运行和维护管理	192
第一节 锅炉运行中的注意要点	192
第二节 锅炉内部和外部的清洗	199
第三节 锅炉的检验	206
第四节 锅炉停用时的保养工作	210
第五节 锅炉的水压试验	211

绪 论

第一节 蒸汽锅炉在船舶动力装置中的作用和地位

水蒸汽是船舶动力装置中的重要能源之一。它的作用是：推动主、辅汽轮机运转，加热燃油、润滑油和工作水，使之达到要求的温度；作为船员生活用的热源等等。锅炉装置的功能是将燃料的化学能转变为热能，并且把水加热成预定参数的水蒸汽。因此，锅炉是船舶动力装置的重要组成部分。

船舶蒸汽锅炉的功用随船舶种类和机型的不同而有所差异。

图 0-1 是一个简单的船舶蒸汽动力装置系统图。在锅炉中，燃料在炉膛中燃烧将其化学能转变为烟气的热能，高温烟气流经锅炉受热面管簇时又将其热能传递给炉水使之成为具有一定温度和压力的蒸汽。蒸汽沿主蒸汽管道送至主汽轮机。在汽轮机中蒸汽不断膨胀作功，推动汽轮机旋转并通过螺旋桨推动船舶航行。从汽轮机中排出的蒸汽进入冷凝器中，在冷凝

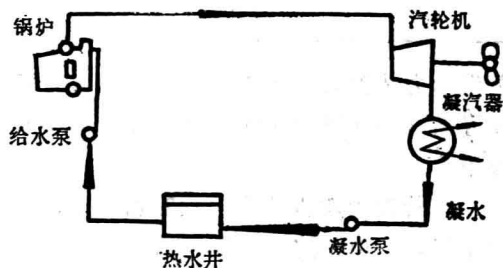


图 0-1 简单船舶蒸汽动力装置系统图

器中被循环水冷却成凝水，并作为锅炉的给水经热水井和给水泵重新送至锅炉又被加热汽化，汽、水就是这样循环的。由于漏泄、排污等会损失一部分淡水，所以要不断地补充干净的淡水。由上述过程可以看出，锅炉的作用是将燃料的化学能转变为蒸汽的热能并以驱动船舶主机为其主要任务。这样的锅炉称为主锅炉。当然，主锅炉也可以提供减温蒸汽来满足各种辅汽轮机、辅机和船员生活方面的需要。一般每条船装设两台主锅炉。

目前，在三万吨以上的远洋船舶中蒸汽动力装置应用很广泛，而在大型或超大型的远洋船舶（载重吨超过17.5万吨以上的船舶）中蒸汽动力装置则占据着优势的地位。据统计，在1976年的各国造船艘数中，蒸汽动力装置仍占11%。

随着船舶蒸汽动力装置的发展，船舶蒸汽锅炉的蒸发量、蒸汽参数和效率都有所提高。表 0-1 介绍了世界各国1970年以后部分新造船舶上的主要锅炉概况。

为了提高蒸汽动力装置的经济性和降低油耗率，锅炉的参数在逐步提高。目前国外船舶蒸汽动力装置普遍使用的压力为 6.0~10 兆帕，温度为 510~535℃。在世界第一次石油危机出现以后，蒸汽参数又进一步提高，蒸汽压力提高到 10~14.5 兆帕，温度为 535~545℃，同时采用再热循环。由于采用上述措施，装置的油耗率降到 123~138 克/千瓦小时。

主锅炉仍采用“D”型自然循环锅炉。强制循环直流锅炉和增压锅炉目前在船舶上使用很少。

在燃烧方法的改进方面，沸腾炉正在船舶上进行应用研究，以便在船舶上寻求选用多种燃料、节约能源和减少污染的途径。

从本世纪三十年代开始，在远洋船舶上液体燃料取代了固体燃料，船舶动力装置也由以

世界各国1970年以后部分新造船舶装置主锅炉概况

表0-1

船舶种类与吨位 (吨)	建造年月 (年月)	锅炉台数 (台)	蒸汽压力·温度 (兆帕×℃)	蒸发量 额定/最大 (吨/台·小时)	给水温度(℃) 锅炉效率(%)
集装箱船 35200	1971.4.	2	6.15×515	113/135	185 90.0
油 船 372200	1974.10.	2	6.18×515	67/110	138 88.5
油 船 225000	1970.4.	1	6.2×515	86/100	235 90.0
液化天然气船 77900	1977.5.	2	6.2×515	69/77	119 90.0(烧油) 85.5(烧气)
油 船 271700	1974.3.	2	6.12×515	59/88	205 90.0
油 船 271200	1975.9.	2	6.2×513	53/83	135 88.2
油 船 400000	1976.8.	2	6.2×515	73/105	210 90.0

蒸汽动力装置为主转变为以内燃机动力装置为主，并且由于内燃机动力装置营运经济性的不断提高（油耗率可望降到103克/千瓦小时），内燃机动力装置在中小型船舶上得到了广泛的应用。

在装设内燃机动力装置的船舶中，由于推动船舶前进的主机是柴油机，因此它不需要装置主锅炉。但是这种船舶也需要大量的蒸汽，比如在使用内燃机动力装置的油轮中，为了加热货油、驱动货油泵和各种辅机、加热洗舱水以及船员生活等方面都需要大量蒸汽，所以都要装设一台或两台蒸发量为20~150吨/小时的锅炉，其压力一般为1.6~2.4兆帕，温度为200℃左右。又如在一一般货船中，为了满足加热燃油、润滑油以及船员的日常生活所需要的蒸汽，在每艘船上也都要装设一台（或两台）小锅炉，其蒸发量在一吨左右，压力在0.8兆帕以下。这种锅炉叫做辅锅炉。表0-2介绍了世界各国1970年以后部分新造船舶上的辅锅炉的概况。

世界各国1970年以后部分新造船舶装置辅锅炉概况

表0-2

船舶种类与吨位 (吨)	建造年月 (年、月)	锅炉台数 (台)	蒸汽压力×温度 (兆帕×℃)	蒸发量 额定/最大 (吨/台·小时)	给水温度(℃) 锅炉效率(%)
油 船 138800	1976.3.	1	1.6×203 (饱和)	—/80	90 76.0
油 船 139395	1975.3.	1	1.65×205 (饱和)	—/60	90 80.0
油 船 170150	1975.4.	1	1.6×203 (饱和)	—/80	90 76.3
油 船 13000	1975.12.	1	1.6×203 (饱和)	—/20	75 78.0
矿砂/油运输船 190000	1976.5.	1	2.15×217 (饱和)	—/100	85 75.0
油 船 177000	1974.6.	1	1.55×215	—/80	50 80.0
油 船 80000	1979.8.	1	1.6×203.5 (饱和)	—/60	60 80.0

目前辅锅炉的型式多为自然循环式双锅筒水管锅炉。为了简化结构以便于维护管理和降低成本,辅锅炉一般都不安装经济器和空气预热器。因为辅锅炉没有象主锅炉那样装有高负荷的过热器,所以对燃烧气体流型的考虑可以不甚严格,而把喷燃器装在锅炉的前面,以便管理。

至于船舶蒸汽锅炉的发展动向,则应指出如下两点:

1. 标准化动向。某些国家已经考虑实行锅炉的标准化问题而采用标准锅炉。因此,其性能、构造的细节都应该是稳定的、锅炉的标准化能提高锅炉的质量和降低成本。至于锅炉附件、计量设备等,也能很快地熟悉。

2. 自动化动向。现在几乎所有的锅炉操作都已采用自动化。由于电子技术,特别是微处理程序技术的最新发展,估计采用这种技术的自动化设备、各种分析设备和安全设备必定会越加普遍。这就要求轮机管理人员应当积极地去掌握并应用它们。

在内燃机动力装置中,柴油机的排烟温度一般都在 250°C 以上,带发电机的柴油机排烟温度甚至高达 350°C 以上,因此在航行时柴油机的排烟中含有大量的热能。为了利用这些余热,在柴油机船的烟囱中装设着锅炉,用柴油机排出的余热把水加热成饱和蒸汽。这样,既满足了船舶对蒸汽的需要,又提高了动力装置的热效率。这样的锅炉叫做废热锅炉。

装设燃蒸联合动力装置(COGAS)的船舶在不久前已经问世。它是一种崭新的双气循环系统。由于它的热效率在理论上可能达到60%,远远超过内燃机动力装置、蒸汽动力装置和燃气轮机动力装置的热效率,因此广泛地吸引了船舶动力工程工作者的兴趣。

图0-2是一个燃蒸联合动力装置的系统图。该装置是由燃气轮机和蒸汽轮机共同来推动一个螺旋桨作功。在燃蒸联合循环中,燃气轮机的排烟温度在 500°C 以上,为了利用燃气循环系统的这部分余热,在其排烟道内装设一台废热锅炉。废热锅炉产生压力为1.1兆帕、温度为 300°C 的蒸汽,利用这部分蒸汽推动上述汽轮机作功,形成联合装置的蒸汽循环系统。汽轮机所提供的功率相当于燃气轮机功率的 $1/5$ 。由于利用了装置的余热,双气循环系统的油耗率可降低为125克/千瓦小时。此外,废热锅炉还向船员生活等方面提供了必要的蒸汽。

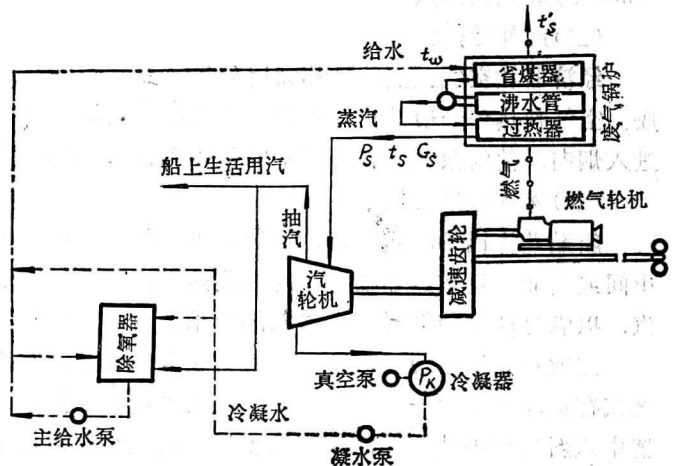


图0-2 燃蒸联合动力装置系统图

综上所述,船舶蒸汽锅炉正在伴随轮机工程的发展而日新月异。在实践和认识不断提高的基础上,在锅炉结构、锅炉的燃烧和锅炉的自动化等方面还会有新的提高。

第二节 锅炉概要

一、锅炉的基本组成和工作原理

现代船用锅炉、因船舶的吨位和用途不同,其结构亦各种各样。图0-3是一台现代船用

D形水管锅炉工作示意图。

为了提高锅炉效率，现代船用锅炉由炉子、过热器、水冷壁、沸水管、经济器、空气预热器、通风装置以及其它附属装置组成。

(一) 锅炉本体

锅炉本体是由汽包、水筒、沸水管、联箱、水冷壁以及炉墙等组成。汽包和水筒是由锅炉钢板卷制而成。联箱是由方形钢筒或圆钢管制成。水冷壁管和沸水管与汽包、水筒和联箱的联结是用扩接或者焊接。炉墙是由耐火材料、绝热材料和密封钢板组成。

炉膛是燃料燃烧后发生热量的场所。在炉膛中燃料燃烧发出的热量，一部分以辐射传热方式传递给受热面管簇（这部分受热面叫做辐射蒸发受热面，包括靠近炉膛的水冷壁和沸水管），使烟气由理论燃烧温度降低到炉膛出口烟气温度，使烟气在炉膛中的焓降相当于烟气在锅炉中总焓降的 $1/2 \sim 1/3$ ；另一部分被高温烟气带给对流蒸发受热面（后几排沸水管）、过热器、经济器和空气预热器。锅炉本体内的水在高压下蒸发汽化。烟气中的余热（约 $150 \sim 350^{\circ}\text{C}$ ）经烟囱排入大气。

(二) 尾部受热面

经济器和空气预热器被称为尾部受热面。经济器是由弯成蛇形的无缝钢管和联箱所组成。空气预热器一般是由薄壁钢管和端板（钢板）所组成。尾部受热面的作用是吸收烟气在进入烟囱以前的余热、预热锅炉的给水和送入炉膛的空气，以提高锅炉的效率。

(三) 蒸汽过热器

船舶蒸汽锅炉的过热器，一般是由平行排列的U形管与联箱组成，它布置在沸水管管簇中间或后面。过热器靠辐射和对流换热方式吸热，将锅炉汽包中产生的饱和蒸汽变成过热蒸汽，以满足动力装置对蒸汽参数的要求。

二次过热器是现代再热循环动力装置的设备，它往往做成蛇形管式对流受热面。当过热蒸汽在原动机中做一定量的功之后，当温度降至接近饱和温度时，再送回到锅炉的二次过热器中重新进行加热，提高蒸汽温度后，再供给原动机使用。使用再热循环可以提高动力装置的热效率。

(四) 燃烧装置

保证燃料良好地进行燃烧的设备称为燃烧装置，它对锅炉的构造有较大的影响。根据燃料种类、锅炉的型式和容量的大小等因素，燃烧装置分为手动燃烧装置和机械燃烧装置两类。对于液体燃料和气体燃料则使用燃烧器，它也是机械燃烧装置的一种。燃烧器是由喷嘴咀和配风器组成的。燃烧的调节也分为手动和自动控制两种。

(五) 锅炉附件

锅炉附件是保证锅炉正常工作所必需的若干阀件和装置的总称。例如，安全阀、水位表、排污阀、给水阀、给水管和给水处理装置等。随着锅炉蒸汽参数的不断提高，锅炉上所必需的附件和附属装置的种类愈加复杂。如果它们之一出了毛病，就会影响锅炉安全可靠的

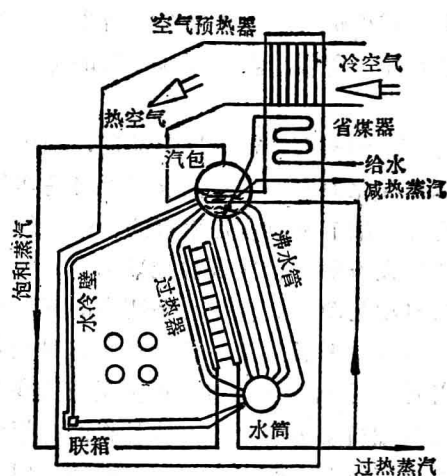


图0-3 船用D型水管锅炉工作示意图

运行，甚至发生危及人身和设备安全的故事。

(六) 烟风系统

燃料燃烧需要大量的空气，这些空气是用“自然通风”和“机械通风”来供应的。由于炉内的烟气比外界冷空气的温度高，所以烟气比空气要轻，因而烟气受到一个向上的浮力。这个浮力将空气吸入炉膛，供燃烧使用。靠高温烟气的浮力将空气吸入炉膛的方法，叫做自然通风。在现代船舶锅炉中，由于燃烧强度和效率都比较高，所以锅炉的结构比较复杂，空气道和烟道的阻力较大，采用自然通风所吸入的空气量不能满足燃烧的需要。因此，要用送风机把空气压入炉内，或者把烟气从烟道中用抽风机抽出排入大气，或两者兼用。用机械送风的方法称为机械通风。

(七) 汽水系统

在汽包约 $1/2$ 下部的空间以及水冷壁管内、沸水管内、联箱和水筒内均充满着炉水。水冷壁和沸水管的前几排，由于吸热较多，炉水便汽化形成较轻的汽水混合物，它们沿着水管上升到汽包，在汽包中进行汽水分离。这部分管子叫做上升管。而汽包中的炉水沿沸水管后几排吸热量少的管子流到水筒（或联箱），以补充由于沿上升管流走的水量，这部分管子叫做下降管。在锅炉工作时，炉水总是沿下降管由汽包流向水筒（或联箱），又沿上升管流向汽包。炉水的这种循环叫做自然水循环，这种锅炉叫做自然循环锅炉。

汽包中被水占据的空间叫做水空间，被蒸汽充满的上半部空间叫做汽空间。汽水交界面叫做蒸发面，蒸发面的面积应当与蒸发量成比例。当蒸发面的面积过小时，单位面积的蒸汽通过量就大，在蒸汽穿出水面时，由于蒸发激烈，因此蒸汽的湿度增加。在汽空间比较大的锅炉中，由于水滴有充分的时间从蒸汽中分离出来，所以能够得到湿度小的蒸汽。但是大容量锅炉中的蒸发面相对于蒸发量而言是比较小的，蒸汽空间也比较小，因此，要想获得湿度小的蒸汽是比较困难的。一般要求蒸汽的湿度应少于 $1 \sim 3\%$ （重量百分比）。为了除掉蒸汽中的水滴，在汽包的汽空间（或汽水空间）要装设专门的汽水分离设备。

二、锅炉的常用特性指标

(一) 锅炉参数

在正常状态下，一台锅炉每小时所能产生的蒸汽量叫做锅炉的蒸发量。蒸发量用符号 D 来表示，单位是吨/时或千克/时。

蒸汽压力是指锅炉向外供出的蒸汽的压力，也叫汽压。汽压用符号 p 来表示，国际制单位是“帕斯卡”，符号为 Pa ；工程制单位是千克力/厘米²，符号是 at 。

$$1 \text{ 帕斯卡} = 1.0197 \times 10^{-5} \text{ 千克力/厘米}^2$$

或
$$1 \text{ 千克力/厘米}^2 = 98066 \text{ 帕斯卡} = 0.098 \text{ 兆帕}$$

蒸汽温度是指锅炉向外供出的蒸汽的温度。蒸汽温度用符号 T 来表示，单位是 K 。当锅炉向外只供应饱和蒸汽时，可不注明蒸汽温度而只注明饱和蒸汽压力。

蒸发量、蒸汽压力和蒸汽温度是锅炉铭牌上或说明书上必须注明的三个基本参数。

(二) 相当蒸发量

表示锅炉的容量有各种方法，其中包括用蒸发量表示和用相当蒸发量表示。用蒸发量表示锅炉容量的情况居多。但是，同样是10吨/时蒸发量的锅炉，由于蒸汽压力和蒸汽温度不同，蒸汽所具有的热能也不同，把这个蒸汽供给原动机时，原动机发出的功率也不同。因此，用蒸发量表示锅炉的容量时，必须同时标明锅炉供出的蒸汽压力和温度。另一方面，如

果考虑到汽压和温度的影响，则应对蒸发量加以修正。用修正后的蒸发量来表示锅炉容量，要比只用蒸发量来表示更为确切，它便于对不同参数和型式的锅炉进行比较。修正后的蒸发量称为相当蒸发量，或基准蒸发量，或蒸发当量，用符号 D_{sd} 来表示，单位是吨/时或千克/时。由蒸发量换算为相当蒸发量的算式如下：

$$D_{sd} = \frac{D(h_q - h_{gs})}{2257} \text{ 吨/时} \tag{0-1}$$

式中： D ——锅炉的蒸发量，吨/时或千克/时；
 h_q ——蒸汽热焓值，千焦/千克；
 h_{gs} ——给水热焓值，千焦/千克；
 2257——压力为 760 毫米水银柱、温度为 100℃（373K）的饱和水变为温度为 100℃（373K）的干饱和蒸汽时需要的热量（即汽化潜热），千焦/千克。

(三) 锅炉效率

在锅炉中，把水变成蒸汽实际上所用去的热量与向炉内所供应的热量（或燃料在炉膛内完全燃烧所放出的热量）之比叫做锅炉效率，用符号 η 来表示。锅炉效率可用下式表示：

$$\eta = \frac{\sum D(h_q - h_{gs})}{BQ_D} \% \tag{0-2}$$

式中： $\sum D$ ——锅炉供应的各种蒸汽的蒸发量，吨/时或千克/时；
 B ——燃料消耗量，吨/时或千克/时；
 Q_D ——燃料的低发热值，千焦/千克（燃料）；
 h_q ——蒸汽的热焓、千焦/千克。如果锅炉向外界分别供给过热蒸汽、饱和蒸汽和减温蒸汽，则应分别计入过热蒸汽的焓 h_{gq} 、饱和蒸汽的焓 h_{bq} 和减热蒸汽的焓 h_{iq} ；
 h_{gs} ——给水的热焓，千焦/千克。

在计算燃料的供入热时，还应该考虑由于加热燃油和使用蒸汽雾化时带入炉内的物理热。

由于燃料在锅炉内存在未完全燃烧和其它热损失，燃料燃烧实际发出热量的有用部分远小于燃料完全燃烧时所发生的全部热量。所以，锅炉的热效率又可以表示为

$$\eta = \frac{BQ_D - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6)}{BQ_D} \% \tag{0-3}$$

式中： B ——锅炉的燃料消耗量，吨/时或千克/时；
 Q_D ——燃料的低发热量，千焦/千克（燃料）；
 Q_2 ——排烟热损失，千焦/时；
 Q_3 ——化学未完全燃烧热损失，千焦/时；
 Q_4 ——机械未完全燃烧热损失，千焦/时；
 Q_5 ——散热损失，千焦/时；
 Q_6 ——灰渣物理热损失，千焦/时。

锅炉效率 η 表0-3

锅炉的种类	η %
苏格兰火管锅炉	60~75
立式火管锅炉	50~70
小型水管锅炉	70~80
大型水管锅炉	80~90

在以后的有关章节中再详细论述各项热损失
 的测量和计算以及影响它们的因素。各种锅炉的效率概略值列于表0-3。

三、锅炉的分类

锅炉设备是一种古老的机械，它出现在蒸汽机发明以前。当蒸汽机在工业中应用之后锅炉设备和锅炉制造业得到了很快的发展。锅炉的构造有各种各样，可谓五花八门，因此，锅炉的分类也有各种方法。

(一)按锅炉的用途分类

锅炉按其用途可分为陆用锅炉和船用锅炉。陆用锅炉是指发电厂的动力锅炉和一般厂矿的工业锅炉以及机车锅炉而言。船用锅炉是指船用主锅炉、辅助锅炉和废气锅炉而言。

(二)按锅炉的汽压分类

锅炉按汽压分为低压锅炉、中压锅炉和高压锅炉。对船用锅炉来说，蒸汽压力在1.6兆帕以下者为低压锅炉；蒸汽压力为1.6~3.2兆帕者为中压锅炉；蒸汽压力为3.2~9.2兆帕者为高压锅炉；9.2兆帕以上者为超高压锅炉。对于陆用锅炉则有另外的分类方法。

(三)按烟气在受热面中的流动途径分类

锅炉按烟气在受热面（管子）中的流动途径分为水管锅炉和火管锅炉。图0-3是一台水管锅炉，它的管子里面是水或者是汽、水混合物，而烟气则从管子外面的管间流过。水管锅炉主要用作大型辅助锅炉和主锅炉。另外，有些锅炉的管子外面是水而在管中流动着高温烟气，因此，被称为火管锅炉（参阅第四章），它主要用作柴油机船舶上的辅锅炉。火管锅炉根据其管子布置的形式分为立式火管锅炉和卧式火管锅炉。

(四)按水循环方法分类

锅炉按水循环方法分为自然循环水管锅炉和强制循环水管锅炉。如图0-3所示，水冷壁和排管中的炉水是靠上升管中的汽水混合物和下降管中的水的比重差产生压头来循环的，这种锅炉称为自然循环水管锅炉。另外，有的锅炉中的炉水循环是靠外界动力（如炉水循环泵或给水泵）进行的，这种锅炉称为强制循环水管锅炉（参阅第四章）。盘香管式废气锅炉就是一种强制循环锅炉，它的全称为强制循环盘香管式废气锅炉。

(五)按炉膛内的压力分类

锅炉按炉膛内的压力分为普通锅炉和增压燃烧锅炉。我们通常所见到的锅炉炉膛内的压力都接近于大气压力或者稍稍有点负压（稍低于大气压力），或者稍稍有点正压（稍高于大气压力），都称为普通锅炉。当锅炉炉膛的压力远远高于大气压力时，锅炉则处于增压状态下燃烧，称为增压燃烧锅炉，或称为增压锅炉。在蒸燃联合循环的动力装置系统中，烟风系统都处于较高的增压状态，因此该系统的锅炉都采用增压锅炉。增压锅炉由于燃烧强度较高和传热效果较好，所以体积较小。但由于它使用的材料较好，所以它的成本比较高。

(六)按锅炉的构造分类

锅炉按其构造分为三锅筒锅炉（如单侧式三锅筒人字形水管锅炉）；双锅筒锅炉（如双锅筒D型水管锅炉）、小组联箱水管锅炉、双压式（二次蒸发式）水管锅炉、卧式苏格兰式火管锅炉和立式考克兰式火管锅炉等等。

本书主要供轮机管理专业使用，所以从运转管理专业出发，以基本原理为主，设计计算从简。考虑到目前远洋船舶的实际情况，则又以燃油自然循环水管锅炉为主。因此要求学员重点掌握锅炉的构造和结构原理；锅炉的燃烧方法、燃烧设备及其管理；锅炉附件的使用和管理；锅炉自动化设备及其使用方法；锅炉的检验和维修等。

第一章 燃料和燃烧产物的计算

作为锅炉的燃料应该满足以下要求：在空气中容易燃烧；来源广泛，便于储存和调驳；在利用其蓄有的热能时，应能经济地、方便地收到效果。

燃料可分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。在船舶动力装置中所使用的燃料有煤和重油。随着石油冶炼工业的发展，燃料油的成本不断降低。从三十年代开始，在远洋船舶上燃料油逐渐取代了煤，现在燃料油几乎成为远洋船舶的唯一燃料了。

所说的燃料油，一般是指重油而言。重油是原油冶炼后剩下的残渣（称为渣油）与某些轻质油分的混合物。由于石油产品在国民经济各部门被广泛地应用，石油储量下降，致使近几年出现了“能源短缺”，因此，锅炉燃料油选用渣油已日益增多。

目前，国内外都在广泛讨论燃料政策，有人建议在远洋船舶上，尤其是某些固定航线的运煤船上要首先考虑以煤或煤-油作为船舶的燃料。另外，在运输船舶锅炉中采用核燃料也已有所尝试。

由于时数所限，本课程只以重油作为燃料加以讨论。

第一节 燃料油的元素组成及其主要特性

一、燃料油的元素组成

虽然燃料油的分子式繁杂，但是从燃烧产物分析的结果来看，可以说燃烧反应的产物就是燃料中可燃成分的元素与空气中的氧分激烈氧化的结果。所以，学习燃料的元素组成对于燃烧产物的计算和管理锅炉都是必要的。

组成燃料油的基本化学元素是碳和氢，两者可占燃料油的96~99%，其中碳的重量可占84~87%，氢占11~14%。所以，燃料油主要是由碳和氢两种元素结合而成的化合物。这些化合物在化学上称为烃。氢是燃料油中的一种有利元素，它比碳更容易燃烧，发热量也比碳大3.5倍，燃烧后生成水。但氢在燃料油中含量较少。

碳是燃料中的主要可燃元素，其发热量也比较大，每千克碳完全燃烧时的发热量为32884千焦/千克。在燃料中碳是以与其它元素化合成碳氢化合物而存在的。但碳是不容易燃烧的，在相同条件下燃烧时，含碳量越高的燃料越难着火燃烧，并且在燃烧过程中容易产生碳黑，造成未完全燃烧损失，污染受热面和自然环境。

碳和氢含量的比值称为碳氢比，用 K_{CH} 表示：

$$K_{CH} = \frac{C}{H} \quad (1-1)$$

燃料油的碳氢比在6~9之间，而无烟煤的碳氢比则往往超过20。碳氢比高的燃料油，比重较大，发热量较低，而且不容易燃烧。

氧、氮、硫是燃料油中的主要组成元素，但其含量较少，通常在1%以下。氧和氮在多数情况下是与碳和氢两种元素结合成化合物。这类化合物的含量可达10~20%，它们是非烃

化合物，常以胶状沥青状存在。所以，含胶状沥青状物质多的油，例如渣油，含氧和氮就多一些。此外，它们是燃料中的不可燃元素，有“内杂质”之称。可见，燃料中含氧和氮是有害而无利的，它们的含量越少越好。

硫在燃烧时的发热量不高，为9131千焦/千克，但是硫在燃烧后生成二氧化硫 SO_2 和三氧化硫 SO_3 ，在有水分存在的条件下又能进一步生成硫酸 H_2SO_4 。二氧化硫和三氧化硫是有毒气体，它们随烟气排入大气后会污染环境。硫酸对金属有腐蚀作用，是尾部受热面受低温腐蚀而损坏的原因。因此，燃料中的含硫量越少越好。

由于硫分对石油的冶炼加工和锅炉的维护管理有很大影响，所以，含硫量是燃料油的重要指标。根据含硫量的多少，石油可分为低硫油、中硫油和高硫油三种。通常把含硫量在0.5%以下的称为低硫油，把含硫量在0.5~2%以下的称为中硫油，含硫量在2%以上的称为高硫油。我国大庆原油属于低硫油，胜利原油属于中硫油，而中东原油则属于高硫油。

此外，燃料油中还含有极少量的其它元素：钒、镍、铁、铝、钙、钠、镁、钴、铜、氯、硅、磷、硒、砷等。它们以化合物的形状存在于燃料中。在燃料油燃烧以后，它们大部分都以氧化物的形式形成灰分。有些金属氧化物，例如钒的氧化物、钠的氧化物等在形成灰分以后，会造成受热面金属的腐蚀（称为高温腐蚀）。

综上所述，用锅炉实际使用的燃料油进行分析时，常用碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）、灰（A）、水（W）七种元素表示燃料的元素组成。此时每种元素的重量百分比称为应用基成分（也有把它称为工作基或工作质的），用符号“y”表示在组成元素成分符号的右上角。例如：

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + A^y + W^y = 100\% \quad (1-2)$$

用应用基表示燃料油的元素组成，在船舶锅炉各种技术资料中使用广泛。

石油中的水分是在形成、开采、运输和储存过程中掺杂进来的有害杂质。因此，它是石油中的不稳定成分。由于燃料油和水的比重相差不大，所以，水在油中一般呈细小的悬浮物状态存在，或者呈片状、块状存在。但当油静止时间较长时，水也会因比重较大而沉降在油柜底部。在燃烧时，燃油经喷油咀喷入炉膛的过程中，如有大团水存在，则会造成燃烧中断而使锅炉熄火。燃料油中含水分过高，也会引起管道或设备的腐蚀，增加锅炉排烟热损失，降低锅炉的热效率。但是应当指出，当燃料油中含水量不大并且水在油中以乳化状态存在时，有可能提高燃烧效率，因此国内外都在进行关于“油掺水”节能方面的研究工作。

由于燃料油中的水分是不稳定成分，为了在不同种类燃料油之间对比其组成成分，常将燃料油中的水分排除之后进行分析。此时燃料油的元素组成为碳、氢、氧、氮、硫和灰分。这种元素组成称为干燥基成分，这时每种元素成分用“g”在元素符号的右上角注示。所以，当用干燥基成分表示燃料油各成分的重量百分比时，则有

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g + A^g = 100\% \quad (1-3)$$

当已知应用基成分时，可以换算为干燥基成分，其换算关系如下（以灰分为例）：

$$A^g = A^y \times \frac{100}{100 - W^y} \% \quad (1-4)$$

其它成分的换算也和公式（1-4）类同。

灰分也是在石油的形成、开采、运输和储存过程中溶解和掺杂进来的。它们大部分是溶解在石油的金属盐类矿物质中。这些物质大部分是在原油冶炼以后残留在重油中的。在燃料油中虽然灰分的含量很少，但对锅炉运行的害处却是很大的。燃油锅炉受热面的积灰是很有

害的，并且很难吹除掉。它是降低锅炉传热效率的主要原因。在过热器上积灰，有时还会引起受热面的高温腐蚀。

为了研究和对比燃料的成分，有时需要将水分和灰分都去掉，用燃料的可燃基成分表示燃料各组成元素的重量百分比。此时，在元素符号的右上角用“r”注示。例如

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100\% \tag{1-5}$$

对于同一油田产的石油，可燃基成分比较稳定。可燃基成分与应用基成分之间也可以换算，以碳为例，其换算关系如下：

$$C^r = C^y \frac{100}{100 - (A^y + W^y)} \% \tag{1-6}$$

其它成分的换算关系也类同。

在燃料油中还会自然地掺杂进某些机械杂质，它们不溶解于油，而是以沉淀状态和悬浮物状态混杂在油中。这些机械杂质会使设备磨损、喷油咀堵塞，从而使锅炉运行受到严重的影响。因此，在燃油系统中都设有过滤器，用以将这些机械杂质除掉。

二、燃料油的主要特性

石油是溶解了一些气体和固体的液态物质，是由数千种不同类型的化合物所组成的。各种化合物都有各自的特性，这些特性对于燃油的管理和锅炉的运行具有显著的影响，尤其是它的中性胶质和沥青质的特性影响很大，因为在石油冶炼过程中它们大多仍保留在重油和渣油之中。考虑到燃油的管理和锅炉的运行，必须确定一些燃油的性能指标，以便用来评价燃油的质量，并作为选择、使用和计算燃油的依据。

(一) 比重

单位体积内物质的重量称为该物质的重度其单位是牛/米³。而比重则是油的重度与277K(4℃)时纯水的重度之比。277°K(4℃)时纯水的重度为9.8×10³牛/米³。比重没有单位。

油的比重随温度而变化，在石油工业中规定，以20℃时的比重作为油的标准比重，用符号γ₄²⁰表示。任意温度下油的比重可用下式求得：

$$\gamma_4^t = \gamma_4^{20} - \alpha(t - 20) \tag{1-7}$$

式中：γ₄^t ——任意温度(t℃)时油的比重；
γ₄²⁰ ——293K(20℃)时油的比重；
t ——所求比重时的摄氏温度，℃；
α ——温度修正系数，1/℃，其值见表1-1。

油的温度修正系数α值 表1-1

20℃时油的比重 γ ₄ ²⁰	油的温度修正系数 α 1/℃	20℃时油的比重 γ ₄ ²⁰	油的温度修正系数 α 1/℃
0.9300~0.9399	0.000594	0.9800~0.9899	0.000528
0.9400~0.9499	0.000581	0.9900~0.9999	0.000515
0.9500~0.9599	0.000567	1.000~1.0099	0.000502
0.9600~0.9699	0.000554	1.0100~1.0199	0.000489
0.9700~0.9799	0.000541	1.0200~1.0299	0.000476