

绪 论

锅炉和压力容器在国民经济中占有重要的地位。

锅炉是一种能量转换设备，在锅炉中通过燃料燃烧，将燃料的化学能转变为热能，再通过传热将热能传给工质——水，并使水变成蒸汽或较高温度的水。简言之，锅炉是生产蒸汽或加热水的设备。生产蒸汽的锅炉叫蒸汽锅炉；加热水使其升温但不汽化的锅炉叫热水锅炉。

压力容器泛指承受流体压力的密闭容器。安装和使用地点固定、工艺条件和操作人员也比较固定的容器为固定式容器；用以盛装并运输气体或液体介质的容器为移动式容器。

锅炉是特殊的压力容器——受火焰加热的压力容器系统。

一、锅炉压力容器安全的重要性

（一）锅炉压力容器在工业生产及日常生活中应用十分广泛

锅炉广泛应用于电力、机械、化工、轻工、纺织、交通运输等部门及日常生活中。作为火力发电系统三大主机之一的锅炉，通常称做电站锅炉，其产汽量大、蒸汽参数高，一台锅炉即有多个承压部件，结构庞大复杂，总台数较少；其他工业企业及供暖使用的锅炉统称工业锅炉，其单台产汽量或供热量较小，参数较低，但数量巨大。我国矿石燃料产量的半数以上，都被锅炉消耗，转化为电能或热能。

压力容器广泛应用于石油化工、轻工、纺织、冶金、机械、航空航天、交通、采矿、医药等行业部门及日常生活中。如与压气机配套的储气罐，贮运永久气体或液化气体的气瓶、槽车、储罐，提供介质反应密闭空间的聚合釜、合成塔，加热或冷却介质的蒸煮锅、冷却器，用以分离不同介质的分离器、过滤器等，都是常见的压力容器种群。在化学工业和石化工业中，几乎每一个工艺过程都离不开压力容器，而且是生产中的主要设备。而液化石油气钢瓶等压力容器，则已进入千家万户，与人们的日常生活密切相关。

可以说，在工业生产的各个部门和社会生活的许多场所，都离不开锅炉和压力容器。

（二）锅炉压力容器的工作条件恶劣，容易发生事故

1.承受压力及温度。锅炉的汽水系统由密闭的容器和管道组成，在工作中承受介质压力和火焰加热，有时承受的压力和温度会达到很高的水平。压力容器承受大小不同的压力载荷和其他载荷，有些容器还在高温或深冷条件下运行。锅炉、压力容器内的压力可能因操作失误或反应异常而迅速升高，从而导致承压部件超压破裂。

2.接触腐蚀性介质。压力容器的工作介质常常具有较强的腐蚀性，会导致氧腐蚀、硫腐蚀、硫化氢腐蚀以及各种浓度的酸、碱、盐腐蚀等。锅炉金属表面一侧要接触烟气、灰尘，另一侧要接触水或蒸汽，常会造成腐蚀或磨损。

3.局部应力比较复杂。锅炉压力容器通常都有开孔接管或其他形状的不连续结构，在这些局部区域内存在着较高的应力，在不利的使用环境或载荷条件下，会导致承压部件破裂。

4.连续运转不易检验。锅炉压力容器大多是钢制焊接结构，在焊缝部位常隐含漏检缺陷或标准允许缺陷。在使用中，锅炉及很多压力容器必须连续运行，不便停用检查，常因缺

陷扩展而导致破裂。

在上述因素共同影响下，即使设计、制造质量符合标准的锅炉和压力容器，也常发生各种事故，更不要说带有设计制造缺陷的设备了。

锅炉、压力容器的事故率，通常以万台设备每年发生的事故次数表示，即：事故数/(万台·年)。

(三) 锅炉压力容器事故后果严重，其爆炸是灾难性的

锅炉、压力容器承压部件的断裂破坏，具有巨大的破坏力，不仅损坏设备本身，而且损坏周围的设备和建筑，并常常造成人身伤亡，后果极其严重。造成伤害的因素主要有：

1. 冲击波破坏设备、建筑或直接伤人。锅炉、压力容器内的介质一般是具有较高压力的气体、液化气体或高温液体。承压部件一旦破裂，介质即泄压膨胀或瞬时汽化，瞬间释放出很大的能量。其中，85%的能量用以产生冲击波，向周围快速传播，破坏设备、建筑并危害人身安全。如果压源压力达 0.1MPa 就可以使距压源 1m 以内的人员死亡。

2. 碎片伤人或击穿设备、建筑。锅炉或压力容器破裂时，有些壳体可能会断裂成碎片并高速飞出，击穿、撞坏相遇的设备或建筑，有时直接伤人。

3. 容器内介质外溢，引起中毒、燃烧、二次爆炸，产生连锁反应。如果容器内的介质是毒性的，介质外溢会造成大面积毒害区域，不仅伤害域内人员，而且破坏生态环境；如果容器内介质是高温气、液介质，介质泄放会造成严重烫伤；如果容器内介质为可燃的气体或液化气体，当容器破裂时，可燃介质溢出与空气混合，将会产生二次爆炸并酿成火灾。

锅炉压力容器爆炸，常造成大面积的、立体性的破坏和群体伤害，对事发单位和社会造成严重危害。美国曾有一次锅炉爆炸死亡千余人的记录；国内外锅炉压力容器爆炸事故伤害的实例不胜枚举。

综上所述，锅炉、压力容器应用广泛，工作条件恶劣，容易损坏并发生事故，事故后果严重，因而对锅炉、压力容器的安全不能等闲视之。国家主席江泽民最近针对锅炉爆炸事故指出：人命关天的事，一定要慎之又慎，确保万无一失。我国同世界上其他国家一样，把锅炉压力容器作为一种特殊设备，由专门机构对其安全进行检查、监督。

二、避免锅炉压力容器事故的途径

从 19 世纪 70 年代开始，一些工业国家连续发生多起锅炉压力容器爆炸事故，典型的如美国 1905 年发生的某鞋厂火管锅炉爆炸事故，死亡 58 人，受伤 117 人。锅炉压力容器的安全问题逐渐引起人们的重视，许多国家先后成立了各种研究机构，从事锅炉压力容器安全的科学研究并制定有关技术规范；不少国家设置专门机构对锅炉压力容器进行安全监督。多年行之有效的实践证明，避免锅炉压力容器事故的基本途径是：

1. 用法规指导锅炉压力容器的设计、制造、安装、使用、检验、修理、改造等环节。美国机械工程师学会 (ASME) 制定的锅炉压力容器建造规范，是用于控制锅炉压力容器设计、制造、检验的安全规范。美国尚有锅炉压力容器检查管理局的检查规范，对锅炉压力容器的安装、修理、改造、运行、检验等也作了详细规定，用以保证锅炉压力容器的安全运行。其中 ASME 规范诞生于 20 世纪初期，经过 80 多年的发展与完善，目前已成为世界上公认的权威规范。其他工业国家如英国、德国、法国、日本等，都制定有法令性的锅炉压力容器技术规范。

我国在 1960 年颁布了第一个锅炉安全法规——蒸汽锅炉安全规程。1979 年以后陆续颁布了多个锅炉压力容器技术标准和法规。1982 年国务院颁布《锅炉压力容器安全监察暂行条例》 以此为依据 以后又陆续制定或修订了蒸汽锅炉、热水锅炉、压力容器、气瓶等安全技术监察规程。国家和有关部门颁布了各种锅炉压力容器设计制造标准。如 GB 150《钢制压力容器》、GB 9222《水管锅炉受压元件强度计算》、GB/T 16508《锅壳锅炉受压元件强度计算》等。实践证明 严格依据有关法规、标准进行锅炉压力容器的设计、制造、安装、使用、检验、修理、改造等 即可有效地避免锅炉压力容器事故。

2. 实行官方或第三方监督。美国于 1919 年成立国家锅炉压力容器检查管理局, 统一贯彻实施有关锅炉压力容器的安全标准和管理办法。英、法、德等国在 19 世纪就开始建立锅炉检验和保安机构, 现在英国的技术检查联合机构 (AOTC) 已拥有数千名锅炉压力容器检验人员。德国的锅炉压力容器监督和检验权力机构是技术检验协会 (TÜV) 负责监督有关锅炉压力容器技术规范的执行情况, 而规范的制定则由压力容器委员会负责。法国压力容器安全监督权力机构是内政部矿业司; 日本的锅炉压力容器安全监督工作由政府的劳动省负责。

我国于 1956 年在劳动部设立锅炉安全检查总局, 1963 年扩充为锅炉压力容器安全监察局。各省、市、自治区也都设置了锅炉压力容器安全监察机构和检验单位。近年来我国实行对锅炉、压力容器的设计和制造的许可审批制度。实践证明, 这对防止锅炉压力容器的粗制滥造, 保证这一类承压设备的质量起到很大的作用。已形成规模和体系的国家锅炉压力容器检验研究中心和各省、市的检验研究所, 推进和完善了我国锅炉压力容器的检验工作。

三、学科特点及研究方法

锅炉压力容器安全技术是一门以设备安全为中心的系统安全技术。锅炉压力容器事故, 特别是锅炉压力容器爆炸, 是承压贮能设备破裂瞬时释放能量的结果。保证设备在承压贮能过程中不破裂, 就从根本上解决了锅炉压力容器的安全问题。

锅炉压力容器破裂爆炸, 不外乎两个方面的原因: 一是工作条件严重恶化, 远远超出设计工作条件, 比如严重超压或超温; 二是设备本身隐含或产生缺陷, 使设备承受不了正常的设计工作条件。

相应地, 避免破裂爆炸的对策是: (1) 选用的材料及设备应满足正常工作条件的要求; (2) 避免工作条件恶化; (3) 防止和消除设备缺陷。同时做到这几点并不是一件容易的事, 这既涉及锅炉、压力容器设备本身的安全性能, 又涉及相关的附件、辅机、人员和环境; 需要掌握锅炉压力容器的基本结构和工作原理, 也需要了解确保安全的一系列知识, 涉及数学、材料力学、流体力学、热力学、金属学及热处理、化学、管理学等多个学科 具有较强的综合性和实践性。只要有意识地综合应用各个学科的有关知识, 循序渐进, 逐步累积, 坚持理论与实践相结合, 就不难掌握基本的锅炉压力容器安全技术。

续表

额定蒸发量/t·h ⁻¹	额定出口蒸汽压力(表压)/MPa										
	0.4	0.7	1.0	1.25		1.6		2.5			
	额定出口蒸汽温度/℃										
	饱和	饱和	饱和	饱和	250	350	饱和	350	饱和	350	400
2		△	△	△			△				
4		△	△	△			△		△		
6			△	△	△	△	△	△	△		
8			△	△	△	△	△	△	△		
10			△	△	△	△	△	△	△	△	△
15				△	△	△	△	△	△	△	△
20				△		△	△	△	△	△	△
35				△			△	△	△	△	△
65										△	△

(二) 锅炉的分类

可以从不同角度出发对锅炉进行分类。

1. 按用途不同,可以分为电站锅炉、工业锅炉、机车船舶锅炉、生活锅炉等。

2. 按容量的大小,可以分为大型锅炉、中型锅炉和小型锅炉。习惯上,把蒸发量大于100t/h的锅炉称作大型锅炉;把蒸发量为20~100t/h的锅炉称为中型锅炉;把蒸发量小于20t/h的锅炉称为小型锅炉。

3. 按蒸汽压力的大小,可以分为低压锅炉($p \leq 2.5\text{MPa}$)、中压锅炉($2.5\text{MPa} < p \leq 5.9\text{MPa}$)、高压锅炉($p = 9.8\text{MPa}$)、超高压锅炉($p = 13.7\text{MPa}$)、亚临界锅炉($p = 16.7\text{MPa}$)和超临界锅炉($p > 22\text{MPa}$ 即高于临界压力)。

4. 按燃料和能源种类不同,可以分为燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉、原子能锅炉、废热(余热)锅炉等。

5. 按锅炉结构形式不同,可以分为锅壳锅炉(火管锅炉)、水管锅炉和水管火管锅炉。

6. 按燃料在锅炉中的燃烧方式不同,可以分为层燃炉、沸腾炉、室燃炉。

7. 按工质在蒸发系统的流动方式不同,可以分为自然循环锅炉、强制循环锅炉、直流锅炉等。

电站锅炉一般是压力较高(中压以上)、容量较大(中型以上)、采用室燃方式的水管锅炉,又可以分为许多种。

工业锅炉一般压力较低($p \leq 2.5\text{MPa}$)容量较小($D \leq 65\text{t/h}$)大都采用层燃结构形式和燃烧设备种类繁多,主要用于工业生产用汽及采暖供热之中。工业锅炉的分类见表1-2。

表 1-2 工业锅炉类型

分类方法	锅 炉 类 型	
按锅炉结构形式	锅 壳	立式横水管、立式弯水管、立式直水管、立式横火管、卧式内燃回火管等
	水 管	单锅筒纵置式、单锅筒横置式、双锅筒纵置式、双锅筒横置式、纵横锅筒式、强制循环式等
	水 火 管	卧式快装
按燃烧设备	固定炉排、活动手摇炉排、链条炉排、抛煤机、振动炉排、下饲式炉排、往复推饲炉排、沸腾炉、室燃炉等	
按燃料种类	无烟煤、贫煤、烟煤、劣质烟煤、褐煤、油、气、甘蔗渣、稻壳、煤矸石、特种燃料、余热(废热)等	
按出厂形式	快装、组装、散装	
按供热工质	蒸汽、热水及其他工质	

二、压力容器分类

压力容器包括所有承受气液介质压力的密闭容器。目前我国纳入安全监察范围的压力容器则是同时具备下列三个条件的容器：

第一 最高工作压力 $p_w \geq 0.1\text{MPa}$ 表压 (不含液柱静压力)；

第二，内直径（非圆形截面指断面最大尺寸） $D_i \geq 0.15\text{m}$ 且容积 $V \geq 0.025\text{m}^3$ ；

第三，介质为气体，液化气体或最高工作温度高于或等于标准沸点（标准大气压对应的饱和温度）的液体。

压力容器的形式很多，根据不同的要求，分类方法有很多种。按容器的壁厚分为薄壁容器和厚壁容器；按承压方式分为内压容器和外压容器；按工作壁温分为高温容器，常温容器和低温容器；按壳体的几何形状分为球形容器、圆筒形容器、圆锥形容器和轮胎形容器等；按制造方法分为焊接容器、锻造容器、铸造容器和铆接容器；按制造材料分为钢制容器、铸铁容器、有色金属容器和非金属容器。

从安全管理和技术监督的角度，一般把压力容器分为两大类，即固定式容器和移动式容器。

（一）固定式容器

固定式容器有固定的安装和使用地点，工艺条件和使用操作人员也比较固定。固定式容器还可以按其工作压力和用途进行分类。

1. 按压力分类。压力是压力容器最主要的一个工作参数。从安全角度讲，压力越高，发生爆炸事故的危害越大。为了便于对压力容器进行分级管理和技术监督，我国《压力容器安全技术监察规程》将压力容器分为四个压力级别，即：

低压容器 $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$

中压容器 $1.6\text{MPa} \leq p < 10\text{MPa}$

高压容器 $10\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$

超高压容器 $p \geq 100\text{MPa}$

其中， p 为容器的设计压力。

2. 按用途分类。根据容器在生产工艺过程中所起的作用，可以归纳为四大类，即反应器、贮存容器、换热容器和分离容器。

(1) 反应容器：主要作用是和工作介质提供一个进行化学反应的密闭空间。如反应器、聚合釜、合成塔等。许多反应容器内工作介质发生化学反应的过程，往往又是放热或吸热过程，为了保持一定的反应温度，常装设一些加热或冷却、搅拌等附属装置。

(2) 贮存容器：主要用来贮备工作介质，以保持介质压力的稳定，保证生产的持续进行。介质在容器内一般不发生化学变化或物理变化。常用的压缩气体或液化气体贮罐、压力缓冲器等都属于这类容器。贮装容器的结构比较简单，一般仅由壳体、接管及外部一些必要的附件构成。大型的容器多采用球形，小型的容器则常为卧式圆筒形。

(3) 换热容器：主要作用是使工作介质在容器内进行热交换，以达到生产工艺过程中所需要的将介质加热或冷却的目的。如消毒器、水洗塔、冷却塔、板式换热器、夹套容器等。

(4) 分离容器：主要作用是让介质通入容器，利用降低流速、改变流动方向或用其他物料吸收等方式来分离气体中的混合物，从而净化气体或提取、回收杂质中的有用物料。在分离容器中，主要介质不发生化学反应。如分离器、吸收塔、洗涤器、过滤器等。

在实际生产过程中，有些容器往往具有多种用途，应按工艺过程中的主要作用来划分其种类。

(二) 移动式容器

移动式容器是一种贮运容器，它的主要用途是装运永久气体、液化气体和溶解气体。这类容器没有固定的使用地点，一般也没有专职的操作人员，使用环境经常变迁，管理比较复杂，也比较容易发生事故。移动式容器按其容积大小和结构形状分为气瓶、气桶和槽车三种。

(三) 压力容器的安全综合分类

为了在设计制造中对安全要求不同的压力容器有区别地进行技术管理和监督检查，我国《压力容器安全技术监察规程》根据容器压力的高低、介质的危害程度以及在使用中的重要性，将压力容器分为以下三类：

1. 三类容器。符合下列情况之一者为三类容器：

(1) 高压容器；

(2) 中压容器（毒性程度为极度和高度危害介质）；

(3) 中压贮存容器（易燃或毒性程度为中度危害介质，且设计压力与容积之积 $pV \geq 10\text{MPa}\cdot\text{m}^3$ ）；

(4) 中压反应容器（易燃或毒性程度为中度危害介质，且 $pV \geq 0.5\text{MPa}\cdot\text{m}^3$ ）；

(5) 低压容器（毒性程度为极度和高度危害介质，且 $pV \geq 0.2\text{MPa}\cdot\text{m}^3$ ）；

(6) 高压、中压管壳式余热锅炉；

(7) 中压搪玻璃压力容器；

(8) 使用强度级别较高（抗拉强度规定值下限 $\geq 540\text{MPa}$ ）的材料制造的压力容器；

(9) 移动式压力容器，包括铁路罐车（介质为液化气体、低温液体）、罐式汽车（液化气体、低温液体或永久气体运输车）和罐式集装箱（介质为液化气体、低温液体）等；

(10) 球形贮罐（容积 $V \geq 50\text{m}^3$ ）；

(11) 低温液体贮存容器（ $V \geq 5\text{m}^3$ ）。

2. 二类容器。符合下列情况之一且不在第 1 款之内者为二类容器：

(1) 中压容器；

- (2) 低压容器（毒性程度为极度和高度危害介质）；
- (3) 低压反应容器和低压贮存容器（易燃介质或毒性程度为中度危害介质）；
- (4) 低压管壳式余热锅炉；
- (5) 低压搪玻璃压力容器。

3. 一类容器。低压容器且不在第 1、第 2 款之内者。

压力容器中化学介质毒性程度和易燃介质的划分可参照有关规定，或依据下述原则：

最高容许浓度 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 为极度危害 I 级）；

最高容许浓度 $0.1 \sim < 1.0\text{mg}/\text{m}^3$ 为高度危害 II 级）；

最高容许浓度 $1.0 \sim < 10\text{mg}/\text{m}^3$ 为中度危害 III 级）；

最高容许浓度 $\geq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 为轻度危害毒性介质 IV 级）。

而介质与空气的混合物爆炸下限 $< 10\%$ 或爆炸上限与下限之差 $> 20\%$ 者为易燃介质。

第二节 受压元件及压力容器结构

锅炉压力容器中按几何形状划分的基本承压单元称为受压元件。一个封闭的承压结构往往包括多个受压元件。例如，一个圆筒形容器，可以分为圆筒体和封头两大受压元件，圆筒上的接管、人孔及人孔盖则又是另外的受压元件。

压力容器的结构一般比较简单，其主要部件是一个能承受压力的壳体及其他必要的连接件和密封件。压力容器的本体结构形式较多，最常用的是球形和圆筒形壳体。

锅炉的结构形式很多，其系统比较复杂，但主要承压部件如锅筒、集箱、受热面管子、锅壳及炉胆等，大都是直径不同的圆筒形壳体。

综上所述，锅炉和压力容器的主要受压元件就是球壳、圆筒壳和与其相配的各种形式的封头。

一、球壳

球形容器的本体是一个球壳，一般都是焊接结构。球形容器的直径一般都比较小，难以整体或半整体压制成形，所以它大多是由许多块按一定的尺寸预先压制成形的球面板组焊而成。这些球面板的形状不完全相同，但板厚一般都相同。只有一些特大型、用以贮存液化气体的球形贮罐，球体下部的壳板才比上部的壳板要稍微厚一些。

从壳体受力的情况来看，最适宜的形状是球形。因为在内压力作用下，球形壳体的应力是圆筒形壳体的 $1/2$ ，如果容器的直径、制造材料和工作压力相同，则球形容器所需要的壁厚也仅为圆筒形的 $1/2$ 。从壳体的表面积来看，球形壳体的表面积要比容积相同的圆筒形壳体小 $10\% \sim 30\%$ （视圆筒形壳体高度与直径之比而定）。表面积小，所使用的板材也少，再加上需要的壁厚较薄，因而制造同样容积的容器，球形容器要比圆筒形容器节省板材约 $30\% \sim 40\%$ 。但是球形容器制造比较困难，工时成本较高，而且作为反应或传热、传质用容器，既不便于在内部安装工艺附件装置，也不便于内部相互作用的介质的流动，因此球形容器仅用作贮存容器。

球壳表面积小，除节省钢材外，当需要与周围环境隔热时，还可以节省隔热材料或减少热的散失。所以球形容器最适宜作液化气体贮罐。目前大型液化气体贮罐多采用球形。此

外，有些用蒸汽直接加热的容器，为了减少热损失，有时也采用球体，如造纸工业中用于蒸煮纸浆的蒸球等。

半球壳或球缺可用作圆筒壳的封头。

二、圆筒壳

圆筒形容器是使用得最为普遍的一种压力容器。圆筒形容器比球形容器易于制造，便于在内部装设工艺附件及内部工作介质的流动，因此它广泛用作反应、换热和分离容器。圆筒形容器由一个圆筒体和两端的封头（端盖）组成。

（一）薄壁圆筒壳

中、低压容器的筒体为薄壁（其外径与内径之比不大于 1.2）圆筒壳。薄壁圆筒壳除了直径较小者可以采用无缝钢管外，一般都是焊接结构，即用钢板卷成圆筒后焊接而成。直径小的圆筒体只有一条纵焊缝；直径大的可以有两条甚至多条纵焊缝。同样，长度小的圆筒体只有两条环焊缝，长度大的则有多条。圆筒体有一个连续的轴对称曲面，承压后应力分布比较均匀。由于圆筒体的周向（环向）应力是轴向应力的两倍，所以制造圆筒时一般都使纵焊缝减至最少。

容器的筒体直径以公称直径 D_g 表示。用无缝钢管制作的圆筒体，其公称直径是指它的外径；对于焊接的圆筒体，公称直径是指它的内径。我国圆筒形薄壁容器的公称直径已形成标准系列。

夹套容器的筒体由两个大小不同的内外圆筒组成，外圆筒与一般承受内压的容器一样，内圆筒则是一个承受外压的壳体。在压力容器的压力界限范围内，虽然没有单纯承受外压的压力容器，但有承受外压的部件，如受外压的筒体、封头等。

（二）厚壁圆筒壳

高压容器一般都不是贮存容器，除少数是球体外，绝大部分是圆筒形容器。因为工作压力高，所以壳壁较厚，同样是由圆筒体和封头构成。厚壁圆筒的结构可分为单层筒体、多层板筒体和绕带式筒体等三种形状。

1. 单层筒体。单层厚壁筒体主要有三种结构形式，即整体锻造式、锻焊式和厚板焊接式。

(1) 整体锻造式厚壁筒体是全锻制结构，没有焊缝。它是用大型钢锭在中间冲孔后套入一根芯轴，在水压机上锻压成形，再经切削加工制成的。这种结构，金属消耗量特别大，其制造还需要一整套大型设备，所以目前已很少采用。

(2) 锻焊式厚壁筒体是在整体锻造式的基础上发展起来的。它由多个锻制的筒节组装焊接而成，只有环焊缝而没有纵焊缝。它常用于直径较大的高压容器（直径可达 5~6m）。

(3) 厚板焊接式厚壁筒体是用大型卷板机将厚钢板热卷成圆筒，或用大型水压机将厚钢板压制圆筒瓣，然后用电渣焊焊接纵缝制成圆筒节，再由若干段筒节焊制而成。这种结构的金属耗量小，生产效率较高。

对于单层厚壁筒体来说，由于壳壁是单层的，当筒体金属存在裂纹等缺陷且缺陷附近的局部应力达到一定程度时，裂纹将沿着壳壁扩展，最后导致整个壳体的破坏。同样的材料，厚板不如薄板的抗脆性好，综合性能也差一些。当壳体承受内压时，壳壁上所产生的应力沿壁厚方向的分布是不均匀的，壁厚越厚，内外壁上的应力差别也越大。单层筒体无法改变这种应力分布不均匀的状况

2. 多层板筒体。多层板筒体的壳壁由数层或数十层紧密结合的金属板构成。由于是多层结构，可以通过制造工艺在各层板间产生预应力，使壳壁上的应力沿壁厚分布比较均匀，壳体材料可以得到较充分的利用。如果容器的介质具有腐蚀性，可采用耐腐蚀的合金钢做内筒，而用碳钢或其他低合金钢做层板，以节约贵重金属。当壳壁材料中存在裂纹等严重缺陷时，缺陷一般不易扩散到其他各层，同时各层均是薄板，具有较好的抗脆断性能。多层板筒体按其制造工艺的不同可以分为多层包扎焊接式、多层绕板式、多层卷焊式和多层热套式等形式。

多层包扎焊接式筒体是由若干段筒节和端部法兰组焊而成。筒节由一个卷焊成的内筒（一般厚 15~25mm）再在外面包扎焊上多层薄钢板（厚约 6~12mm）构成。每层层板一般先卷压成两块半圆形，然后一层一层包扎进行纵缝焊接，层板间的纵缝相互错开，使其分布在圆筒的各个方位。

多层绕板式厚壁筒体也是由若干段筒节组焊而成。筒节由内筒、绕板层和外筒三部分组成。内筒是用稍厚的钢板卷焊而成的；绕板层是用 3~5mm 厚的带状钢板在内筒外面连续卷绕的多层非同心圆螺旋状层板。在绕板的始端和末端都焊上一段较长的楔形板，使其厚度逐渐变化。绕板时用压力辊对内筒及绕板层施加压力，使层板紧贴在筒壁上。外筒是两块半圆柱壳体，用机械方法紧包在绕板层外面，然后焊接纵缝。由于带状钢板宽度有限，这种筒节长度一般不超过 2.2m，所以筒体环焊缝较多。绕板式厚壁筒体的优点是纵缝较少，生产效率高。

多层热套式厚壁筒体是由几个用中等厚度（一般为 20~50mm）的钢板卷焊成的圆筒体，经加热套合制成筒节，再由若干段筒节和端部法兰（也可采用多层热套结构）组焊而成。由于筒节中的每一层圆筒与其外面一层之间都是过盈配合，因而在层间产生预应力，可以改善筒体在承受内压时应力分布不均匀的状况，近年已大量应用于高压容器的筒体上。我国自行设计制造的年产 15 万吨和 30 万吨合成氨厂的合成塔，就采用这种多层热套式厚壁筒体结构。这种结构制造工艺简单，制造周期较短，制造成本也较低。但由于使用中厚钢板，其抗裂性能要比薄板稍差一些。

3. 绕带筒体。绕带筒体的壳体是由一个用钢板卷焊成的内筒和在其外面缠绕的多层钢带构成。它具有与多层板筒体相同的一些优点，而且可以直接缠绕成较长的整个筒体，不需要由多段筒节组焊，因而可以避免多层板筒体所具有的深而窄的环焊缝。但其制造工艺较复杂，生产效率低，制造周期长，因而采用较少。

三、封头

在中、低压压力容器中，与筒体焊接连接而不可拆的端部结构称为封头，与筒体以法兰等连接的可拆端部结构称为端盖。通常所说的封头则包含了封头和端盖两种连接形式在内。压力容器的封头或端盖，按其形状可以分为三类，即凸形封头、锥形封头和平板封头。其中：平板封头在压力容器中除用做人孔及手孔的盖板以外，其他很少采用；凸形封头是压力容器中广泛采用的封头结构形式；锥形封头则只用于某些特殊用途的容器。

（一）凸形封头

凸形封头有半球形封头、碟形封头、椭球形封头和无折边球形封头等四种，其形状如图 1-1 所示。

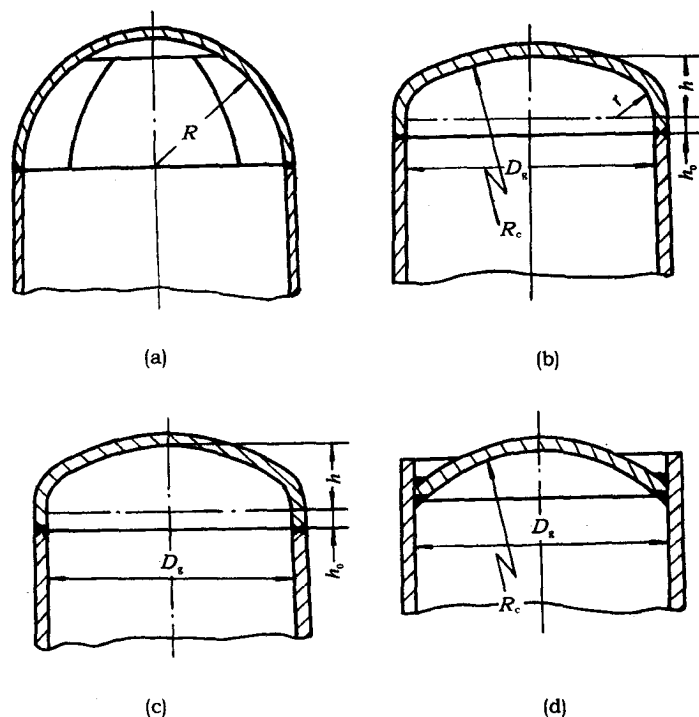


图 1-1 凸形封头
(a) 半球形封头 (b) 碟形封头 (c) 椭球形封头 (d) 无折边球形封头

半球形封头是一个空心半球体，由于它的深度大，整体压制成形较为困难，所以直径较大的半球形封头一般都是由几块大小相同的梯形球面板和顶部中心的一块圆形球面板（球冠）粗焊而成，如图 1-1(a)所示。中心圆形球面板的作用是把梯形球面板之间的焊缝隔开一定距离。半球形封头加工制造比较困难，只有压力较高、直径较大或有其他特殊需要的贮罐才采用半球形封头。

碟形封头又称带折边的球形封头[见图 1-1(b)]，由几何形状不同的三个部分组成：中央是半径为 R_c 的球面，与筒体连接部分是高度为 h_0 的圆筒体（直边），球面体与圆筒体由曲率半径为 r 的过渡圆弧（折边）所连接。碟形封头在旧式容器中采用较多，现已被椭球形封头所取代。

椭球形封头是中低压容器中使用得最为普遍的封头结构形式，它一般由半椭球体和圆筒体两部分组成，见图 1-1(c)。半椭球体的纵剖面中线是半个椭圆，它的曲率半径是连续变化的。椭球形封头的深度取决于椭圆长短轴之比（即封头直径 D_g 与封头深度的两倍 $2h$ 之比）。椭圆长短轴之比越大，封头深度越小。标准椭球封头的长短轴之比（ $D_g/2h$ ）为 2，即封头深度（不包括直边部分）为其直径的 $1/4$ 。

无折边球形封头是一块深度很小的球面壳体（球缺），如图 1-1(d)所示。这种封头结构简单，制造容易，成本也较低。但是由于它与筒体连接处结构不连续，存在很高的局部应力，一般只用于直径较小、压力很低的低压容器上。

(二) 锥形封头

锥形封头有两种结构形式。一种是无折边的锥形封头，如图 1-2 所示。由于锥体与圆筒体直接连接，结构形状突然不连续，在连接处附近产生较大的局部应力，因此只有一些直径较小、压力较低的容器有时采用半锥角 $\alpha \leq 30^\circ$ 的无折边锥形封头，且多采用局部加强结构。局部加强结构形式较多，可以在封头与筒体连接处附近焊加强圈，也可以在筒体与封头的连接处局部加大壁厚。另一种为带折边的锥形封头，由圆锥体、过渡圆弧和圆筒体三部分组成（见图 1-3）。标准带折边锥形封头的半锥角 α 有 30° 和 45° 两种，过渡圆弧曲率半径 r 与直径 D_g 之比值规定为 0.15。

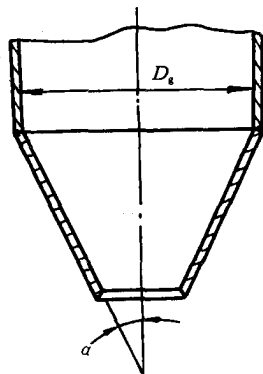


图 1-2 无折边锥形封头

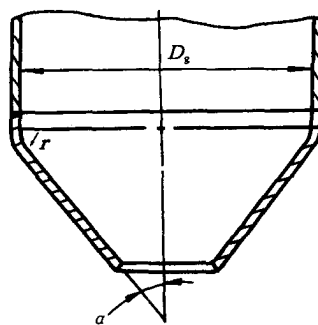


图 1-3 带折边锥形封头

(三) 平封头

平板结构简单，制造方便，但受力状况最差。中低压容器用平板作人孔和手孔盖板；高压容器，除整体锻造式直接在筒体端部锻造出凸形封头以及采用冲压成形的半球形封头外，多采用平封头和平端盖（见图 1-4）。

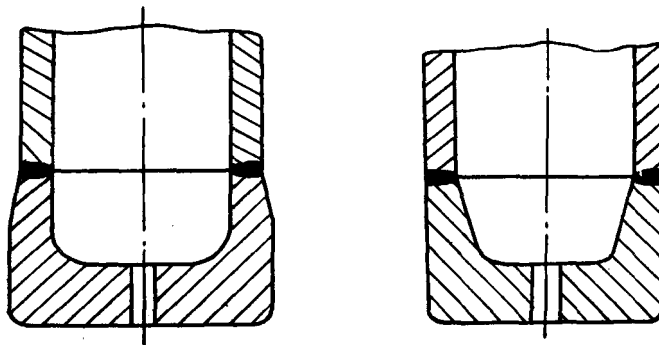


图 1-4 高压容器的平形封头

第三节 锅壳锅炉结构

锅壳锅炉的基本结构是双层夹套结构，其本体是双层夹套容器。其外筒叫锅壳，内筒叫炉胆（火筒），内、外筒之间的环形空间装水，而内筒内部是燃烧室。当水汽介质有压力时，锅

壳承受内压，而炉胆承受外压。

锅壳锅炉有立式和卧式两种。

一、立式锅壳锅炉

立式锅壳锅炉的圆筒形锅壳和其内的炉胆是立置的。这种锅炉结构紧凑，整装出厂，运输安装方便，占地面积小，便于使用管理。其蒸发量一般在 1t/h 以下，蒸汽压力一般在 1.25MPa 以下。燃烧室容积小，周围被水浸泡，水冷程度大，排烟温度高，热效率低，约为 $60\% \sim 70\%$ 。

为了改善燃烧，提高效率，减少对环境的污染，近年来燃煤炉普遍采用了双层炉排燃烧装置，或采用燃油燃气炉。

立式锅壳锅炉下部锅壳与炉胆相连接的部位，即盛水夹套的底部，叫下脚圈。该部位受力情况比较复杂，容易沉积水渣，严重时会影响炉胆下部的正常传热；外部接近地面，易受腐蚀。因而下脚圈是立式锅壳锅炉结构的一个薄弱环节。

下脚圈的结构主要有 U 形 [见图 1-5(a)] 和 S 形 [见图 1-5(b)] 两种。

目前常见的立式锅壳锅炉是立式直水管锅炉和立式弯水管锅炉。

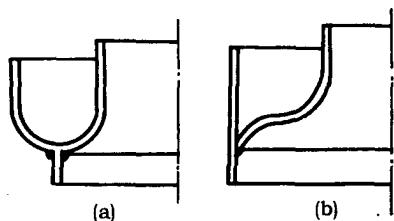


图 1-5 立式锅壳锅炉的下脚圈
(a) U 形 (b) S 形

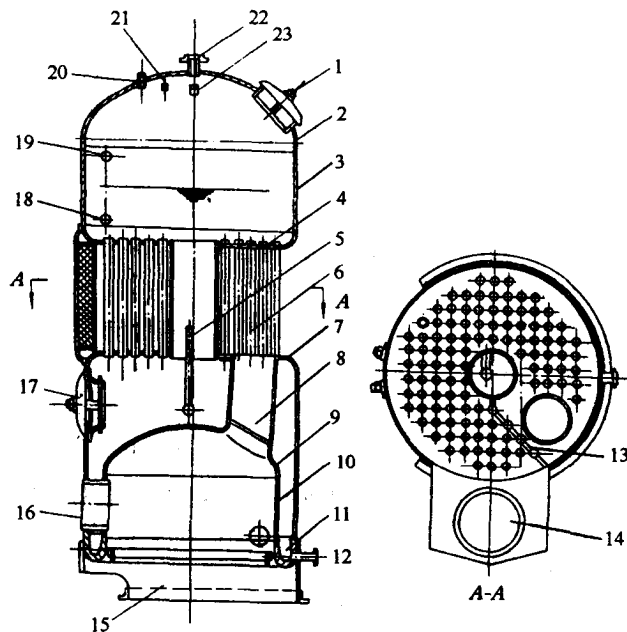


图 1-6 立式直水管锅炉

- 1—人孔；2—封头；3—上锅壳；4—上管板；5—上水管；6—直水管；7—下锅壳；
- 8—喉管；9—炉胆顶；10—炉胆；11—U 形下脚圈；12—排污管；13—烟气隔板；
- 14—烟囱；15—底座；16—炉门；17—人孔；18—水位表通水口；19—水位表通汽口；
- 20—安全阀接口；21—压力表接口；22—主汽阀座；23—副汽阀座

(一) 立式直水管锅炉

立式直水管锅炉由锅壳、炉胆、上下管板、直水管等主要部件组成，如图 1-6 所示。

锅壳分上下两部分，中间以直水管相连通。上锅壳顶部有凸形封头，下锅壳下部以 U 形下脚圈和炉胆连在一起。

炉胆是一个短圆筒壳，顶部为凸形炉胆顶。

上下锅壳的相对端部是两块平管板，直水管连接于平管板上。直水管中心部位是一根直径粗大的下降管，它与周围的直水管构成循环回路，即工质在粗大中心管内下降流动，在周围直水管内上升流动。

烟气由炉胆经喉管进入直水管区。直水管区设有折烟墙，烟气只能绕中部下降管沿圆周方向横向冲刷直水管，最后经烟囱排出。

这种锅炉水循环安全可靠，热效率较高，清垢方便；但在直水管区容易积灰，而且直水管刚性较大，胀缩受限制，易造成胀口渗漏。

(二) 立式弯水管锅炉

立式弯水管锅炉的结构如图 1-7 所示。它由锅壳、炉胆、弯水管等主要部件组成。

锅壳为圆筒壳，顶部焊接有凸形封头，下部通过 U 形下脚圈与炉胆相连。

炉胆是一个较小的圆筒壳，顶部焊接有凸形炉胆顶。

弯水管分两组，分别沿圆周布置在炉胆内部及锅壳外部。炉胆内部的弯水管，上部连接在炉胆顶上，下部连接在炉胆上。锅壳外面的弯水管，上下两端都连接在锅壳上，周围被环形烟道所包围。

炉排在炉胆下部，高温烟气传热给炉胆壁及内部弯水管后，经喉管进入锅壳之外的环形烟道，分两路各经半圆路径，横向冲刷外部弯水管，然后汇合流入烟囱。

这种锅炉具有结构简单紧凑、易于制造、受热面多、传热情况较好、水循环可靠、整个锅炉的弹性较好、热应力较小等优点。但炉胆内弯水管的布置缩小了燃烧室容积，增加了水冷程度，使燃烧条件恶化，所以这种锅炉只能烧优质燃料。炉胆内弯水管的水平段易于沉渣结垢，在水质差时，可能造成弯水管堵塞损坏的事故。

二、卧式锅壳锅炉

卧式锅壳锅炉，其锅壳是卧置的，具有结构紧凑、操作方便、水位气压较稳定、对水质要求较低等优点，其出力比立式锅壳锅炉大，蒸发量一般不超过 4t/h。

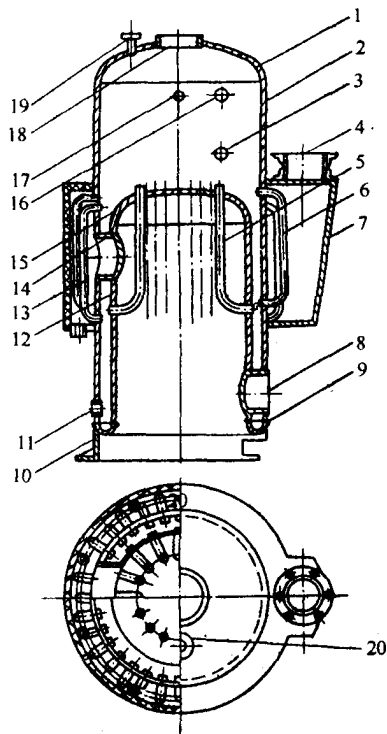


图 1-7 立式弯水管锅炉

- 1—封头；2—锅壳；3—水位表水接管接头；
4—烟囱；5—水冷壁管；6—弯水管；7—烟箱；
8—炉门；9—下脚支承圈；10—底座；11—手孔；
12—炉胆；13—烟道；14—喉管；15—炉胆顶；
16—水位表汽接管接头；17—压力表接口；
18—人孔；19—安全阀接口；20—主汽阀接口

蒸汽压力不超过 1.25MPa。

卧式内燃回火管锅炉是目前常见的一种结构形式。这种锅炉主要由锅壳、炉胆、前后管板、烟火管等主要部件组成。炉胆有两种：一种和锅壳等长，炉胆后部没有烟管；另一种长度短于锅壳，炉胆后部有短烟管。两种炉胆的两个侧面，都设有与锅壳等长的烟管组。前后管板连接在锅壳两端。图 1-8 所示为炉胆与锅壳等长度的卧式内燃回火管锅炉。

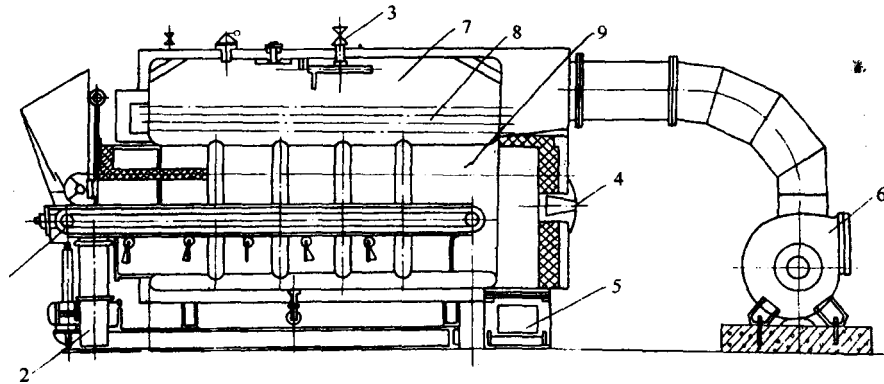


图 1-8 卧式内燃链条炉排锅炉

1—链条炉排 2—送风机；3—主汽阀 4—检查门；5—出渣小车 6—引风机；7—锅壳 8—烟管；9—炉胆

炉胆带有膨胀补偿结构；两管板与锅壳之间，都连有加强拉撑，拉撑装于管板上部无管区。

炉排平置于炉胆前部，目前普遍采用链条炉排。烟气行程为三回程，即由炉胆（及短烟管）至后烟箱，折入两侧烟管返回到前部烟箱，再入两组上部烟管至锅壳后部排入烟囱。

这种锅炉结构紧凑，整体出厂，运输安装方便；热效率比老式火筒锅炉要高；钢材消耗量大大下降。其缺点是结构刚性较大，锅壳、炉胆和烟管之间因热膨胀不同而产生热应力，有时造成烟管端部胀口泄漏；烟管外结水垢时不易清除；烟管及烟箱中易积灰。目前小型燃油、燃气锅炉常常采用此种形式。

三、锅壳锅炉的结构特点

与其他种类的锅炉相比，锅壳锅炉在结构上具有以下特点：

第一，“锅”和“炉”都包在一个壳体——锅壳中。

第二，炉膛矮小，水冷程度大（整个金属炉膛浸泡在水中），燃烧条件差，必须烧优质燃料。

第三，受热面少，蒸发量低，常装水管或烟火管以增加受热面。

第四，壳体直径较大，开孔多，形状不规则，内部受热部分与不受热部分连接在一起，温度不一致，热胀冷缩程度不同，对安全工作不利。

第五，系统比较简单，一般没有砌砖炉墙及尾部受热面，便于运输安装、运行管理及检查维修。对水质要求也比较低。

第四节 小型水管锅炉结构

一、水管锅炉的结构特点及主要部件

(一) 水管锅炉的结构特点

水管锅炉的结构具有以下一些特点：

第一，炉膛置于筒体之外，“炉”不受“锅”的限制，体积可大可小，可以满足燃烧及增加蒸发量的要求。

第二，以容纳水汽的管子置于炉膛、烟道中作受热面，锅筒一般不直接受热，传热性能及安全性能都显著改善。

第三，水的预热、汽化及蒸汽过热在不同的受热面中完成，这些受热面分别叫做省煤器、水冷壁与对流管束、过热器。

第四，水汽系统、燃烧系统及辅助系统比较复杂，但单个承压部件的结构比较简单。

第五，由于水的预热、汽化及蒸汽过热都是在管内完成的，管子结垢难于清除，因而对水质要求较高，对运行、操作、管理水平也要求较高。

(二) 水管锅炉的主要部件

水管锅炉的结构形式和系统布置多种多样，但各种水管锅炉所包含的主要部件大体相同，即水汽系统主要包括锅筒、集箱、水冷壁、对流管束、省煤器、过热器等部件，燃烧系统主要包括燃烧装置、炉膛和烟道、空气预热器等部分。此外，容量稍大一些的水管锅炉，在炉膛和烟道旁边设有钢制构架，用于支承和吊挂水汽系统各部件及燃烧设备，布置楼梯平台。

这里只介绍水汽系统的主要部件及空气预热器。

1. 锅筒。它是水管锅炉的心脏，是锅炉中最重要的一个部件。目前的水管锅炉多是双锅筒或单锅筒的。双锅筒锅炉的锅筒分上、下两个，上锅筒也叫汽包或汽鼓，里边容纳汽水混合物；下锅筒也叫水包，里面全部容纳水。单锅筒锅炉的锅筒一般布置在锅炉上部，相当于双锅筒锅炉的汽包。锅筒及其内部设备一般不直接受热。

(1) 锅筒（上锅筒）的功用。水管锅炉的受热面都是水管，水管中容纳的水汽量有限。锅筒则是水汽系统中容积最大的部件，它可以容纳一定的水量，使锅炉维持一定的水位，减少锅炉水位和汽压的波动。锅筒上连接着很多作为蒸发受热面的管子，构成循环回路，水在这些管子中一边循环流动，一边受热汽化，锅筒则是循环流动的起始点和结束点。由蒸发受热面流回锅筒的汽水混合物，在锅筒中进行汽水分离，蒸汽进入导汽管流至过热器或用汽设备，水则继续进入蒸发受热面系统进行循环流动，所以锅筒有进行汽水分离的功能，是水和蒸汽的明确分界点。

(2) 锅筒的结构。现代水管锅炉的锅筒一般是卷焊结构，由钢板卷制焊接的圆筒体，两端焊上冲压成型的凸形封头。锅筒直径小的有数百毫米，大的可达 2m 左右；锅筒长度短者几米、十几米，长者可达 30m。筒体上有很多开孔以连接各种管子。锅筒内部装有配水装置、汽水分离装置、加药装置和排污装置等。锅炉的主要安全附件——安全阀、压力表、水位表等，也都装在锅筒外面。

2. 水冷壁。在水管锅炉的炉膛内，贴墙布置的立置单排并列管，叫水冷壁。水冷壁布置

在炉膛四周，把火焰与炉墙分开。由于水冷壁管子内的水汽不断流动，吸收火焰的大量辐射热，从而冷却了炉墙，使炉墙的温度不致太高。现代水管锅炉的水冷壁，冷却炉墙的作用是次要的，作为蒸发受热面使水吸收辐射热而汽化的作用是主要的，因而也叫辐射蒸发受热面。水冷壁的形状因炉膛形状而异，假设把炉膛四周的炉墙拆除，则水冷壁就是由钢管组成的包围火焰的笼子。水冷壁管子上端有的直接连接到锅筒上，有的通过集箱连接到锅筒上；水冷壁管子下端连接到下集箱上。下集箱与锅筒间连接有下降管以构成循环回路，使水在水冷壁系统内不断循环流动，即水由上部锅筒经下降管下降流动，到下集箱后分别进入各水冷壁管上升流动，在上升流动中吸热而产生蒸汽，并回流到上部锅筒。

根据相邻的单排并列水冷壁管间的关系，可把水冷壁分成光管水冷壁与鳍片管水冷壁（膜式壁）两种。光管水冷壁相邻的管子间有一定间隙，互不接触，部分火焰可以通过管间间隙，辐射到炉墙上；鳍片管水冷壁相邻的管间用鳍片连接在一起，使水冷壁管形成一个连续的金属壁面，完全隔绝了火焰与炉墙的接触，提高了炉膛的密封性能。小型锅炉的鳍片是在相邻两根水冷壁管间焊上一块扁钢条形成的。

3 对流管束。它是布置在炉膛出口之外对流烟道中的管群。从炉膛流出的高温烟气经过烟道时，在管束外横向冲刷管束，主要以对流换热的方式将热量传给管束，使管束内的水不断汽化，因而对流管束是对流蒸发受热面。

与单排贴墙布置的水冷壁不同，对流管束是以密集管束的形式布置在烟道空间里，管束两端分别焊接或胀接到上下锅筒上，水在管束内受热不同的管子中循环流动。

对流管束是低压水管锅炉的主要受热面之一。随着蒸汽压力的提高，水汽化时吸收的汽化潜热减少，生产同样蒸汽需要的蒸发受热面减少，则可以少要或不要对流管束，仅用水冷壁即可满足生产蒸汽的需要，因而中压以上锅炉没有对流管束。

4. 省煤器。它是利用尾部烟道中烟气的余热来预热锅炉给水的装置。

进入锅炉尾部烟道的烟气，温度常高达 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ ，将其白白排入大气是很大的浪费。尾部烟道布置省煤器，可使给水经过省煤器吸收一部分烟气余热，从而降低排烟温度，提高锅炉效率。通常加装省煤器可提高效率 $5\%\sim 10\%$ 。

常用的省煤器有铸铁式省煤器和钢管式省煤器两种。

(1) 铸铁式省煤器。它由带肋片的铸铁直管连接弯头组成，如图 1-9 所示。肋片有圆形和方形两种，起强化传热的作用。用铸铁材料做成的省煤器可耐腐蚀、耐磨损，而腐蚀、磨损是低压水管锅炉省煤器经常遇到的问题。但铸铁性脆，不能承受较大的振动或冲击，而省煤器中的水如果吸热过多产生蒸汽出现汽水两相状态就极有可能产生水击使省煤器

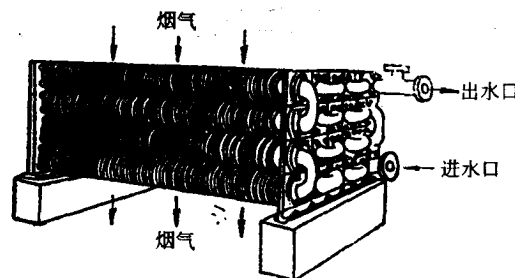


图 1-9 铸铁式省煤器