
锅炉强度计算标准

应用手册

李之光 编著

中国标准出版社

78.12
4039

锅炉强度计算标准 应用手册

李之光 编著

中国标准出版社

内 容 提 要

本书以理论分析、科学实验与生产实践为基础,对我国锅炉强度计算标准 GB/T 16508—1996 和 GB 9222—88 进行了逐条分析,给出了标准制定的依据和原则,并对执行标准中会遇到的各类问题作了明确的解释,同时提出了相应的解决方案。书中附有应用标准解决实际问题的实例,给出各种数据表等以利于读者直接应用。为便于深入理解上述内容,于本书的前部分概括地阐述了与锅炉强度直接有关的基本原理与基础知识。

本书可供锅炉结构设计与锅炉安全技术监察人员使用,也可作为高等院校的参考书籍。本书对解决处理锅炉强度问题会起借鉴作用,对标准制修订工作也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉强度计算标准应用手册/李之光编著.-北京:中国标准出版社,1998.12
ISBN 7-5066-1749-8

I. 锅… II. 李… III. 锅炉-强度-计算-国家标准-解释-中国 IV. TK222-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 24836 号

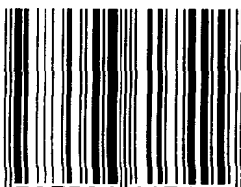
版权专用 不得翻印

中国标准出版社出版(北京复兴门外三里河北街16号) 邮政编码:100045 电 话:68522112
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 25 字数 591 千字 1999 年 3 月第一版 1999 年 3 月第一次印刷

印数 1—4 000 定价 70.00 元

ISBN 7-5066-1749-8



9 787506 617499 >

鍋炸強度止分

方宗

敬題

前 言

在锅炉设计、安装、检修、运行、改装等过程中,会大量触及锅炉受压元件的强度问题。由于锅炉受压元件的强度问题可能引发锅炉汽水爆炸并导致人身伤亡,设备毁坏,热能、电能中断等重大事故,所以,锅炉受压元件强度问题历来受到各国技术安全监察机构的高度重视。

锅炉受压元件强度计算标准是为确保锅炉安全运行而制定的,因此,具有强制性,即锅炉受压元件的强度必须要满足国家技术监督局发布的锅壳锅炉、水管锅炉受压元件现行强度计算标准的规定。

锅壳锅炉受压元件强度计算标准与水管锅炉受压元件强度计算标准分别由上海工业锅炉研究所与上海发电设备成套设计研究所组织对锅炉强度有丰富理论知识与实践经验的专家们起草制定与修订的。在制定与修订标准时纳入了国内长期累积的各方面经验与大量最新发展的科研成果,还汲取了国外有关先进标准的有益规定。制定与修订过程中,均曾对各种问题反复探讨并向工厂、科研单位、高等院校、锅炉技术安全监察机构等部门不断地广泛征询意见。正式发布的标准经过了多次修改草稿与送审稿,并经机械部主管标准部门审查,上报国家技术监督局批准实施的。

应用标准的人员应对标准制定背景、修改原因、计算公式的来源、结构规定的依据、应用时的注意事项、国内外同类标准的差异等有一定的了解。如此,当应用标准或对标准条文产生疑问或有争议时,可朔根查源,才能真正做到正确理解标准、准确应用标准,认真执行标准。

本书编著者长期从事锅炉强度的教学与科研工作,一直参与主编我国锅壳锅炉与水管锅炉受压元件强度标准工作,并参加了这两个标准的全部修订工作。本书中,将制定与修订标准中所遇到的主要问题全部予以纳入,还对标准进行了逐条分析,此外给出有关技术问题的出处(参考文献)以供读者进一步查考。希望标准应用者今后在应用标准时,不仅知其然,而且知其所以然。

本书中部分内容以“附注”形式给出。基本上它们是笔者多年来应用强度标准、强度分析方法参与处理解决过的锅炉设计、制造、运行中所出现的一些实际问题。借此用以协助读者开阔思路,并了解许多实际强度问题是如何处理解决的,其中某些问题也是标准急待修订的。许多实际问题不是仅借助标准条文或仅靠理论分析,单凭实践经验即可直接解决,而是需由各方人员共同讨论,审慎进行。由于与强度有关的一些问题,常涉及到安全事故,故处理问题时,应有主管技术安全的人员参加。

为便于读者可直接了解标准所列出基本公式的来源,本书给出了简易推导过程,较繁琐的推导内容也指明了出处,这样,可知基本公式的准确程度与裕度大小等。

为保持标准的严肃性,本书仅对标准正文中个别明显错误作了校订,而对标准中即使不尽合理的内容也未予改动,但在标准条文的解析中加以明确指出,并提出下次修订时的相应改进建议。希望本书对今后的标准修订工作也可提供參考。

由于编著者的理论水平与实践经验有限,编著时间也较短促,加之对问题的解释难免会有一定个人见解,因此希望读者对不妥之处加以明示,对错误之处予以指正。

编著者

1998年8月

序 言

了解锅炉受压元件强度计算标准的特点,对应用标准、理解标准和解决生产中出现的实际强度问题是至关重要的。这里将该特点作为序言部分写在全书最前部,希望读者在应用本书作计算、校核或处理问题时,先阅读此部分。

锅炉受压元件强度计算标准(简称为“强度标准”)具有以下一些特点:

1 强度标准由简易计算公式与结构上的规定两部分组成

为使广大锅炉工作者均能应用标准,它只能给出最简易的计算公式,载荷只计介质压力,并用安全系数计入未考虑周全的其他各种影响强度的不利因素。此外,必须辅以一些结构上的限定,不致于使不利因素超出简易计算方法所控制的限度,因此,强度标准所给出的结构规定与计算公式同样重要。在标准中不可能阐述有关结构规定的依据,但它们均可从有关专著^[3~6]与本书中查明。

2 理论基础与实践经验对强度标准都颇为重要

强度标准不仅是建立在理论分析基础之上,而且包含有在基础理论指导下的科学实验成果与累积经验的总结。尽管强度标准中某些规定、个别计算方法至今尚无严密理论基础,但它们已沿用了几十年,实践证实它们是安全可靠的,可以依赖的。可见,实践经验对标准而言也颇为重要。

3 强度标准必须适时修订,否则对生产改进与发展不利

随着科学技术的发展进步与实践经验的不断积累与更新,标准必须及时修订,勿使陈旧的内容或规定对生产发展有所束缚。美国 ASME 规范^[39,40]为世界公认的更新内容最及时的先进规范。该规范组织者定期在公开出版刊物上解答问题、解释条文、公布拟修改的内容并征询意见;经过一定时间后,提出增补、修改内容作为标准附录加以公布试用,再经过一定时间后即演变为标准正文;修

订的间隔时间约为3~4年。我国锅炉强度标准在这方面做得不够也不及时。

4 强度标准是大量研究成果的结晶,是集锅炉全行业实践经验之大成

强度标准不可能是某个人、某个生产单位或监察部门等的研究成果与实践经验总结,是需要由专门机构组织锅炉全行业进行标准制定与修订工作。须有专门机构、专职人员负责积累国内资料,了解国外同类标准的发展动态与信息;并在标准专门机构的领导下,组织具有坚实的锅炉强度理论基础与实践经验丰富的专家们,参与标准制定与修订的具体工作,同时对标准的条文与问题进行咨询或解释。上述各项工作十分必要,但国内目前实际情况与上述要求差距较大。

5 强度标准涉及的学科很广泛

因为是锅炉元件的强度标准,所以涉及锅炉各方面的知识,例如锅炉结构、锅炉运行条件、锅炉参数、锅炉热负荷等等。标准中金属材料的一般力学性能、高温力学性能、运行后性能的变化以及工艺性能等均与金属学有关;公式的推导、应力分析等与力学有关;元件的壁温及其分布规律涉及传热学;壁厚减薄值、焊缝热影响区的大小等涉及工艺学;元件破裂后果、爆炸能量等均与热力学有关;强度验证性试验则涉及仪表与测量学等。因此,制定与修订强度标准的成员应由多方面专业人员组成,而主要技术负责人应该知识面较为宽广。

6 强度标准具有强制性,但经过认真研讨与审查批准后也可作一定改动

强度标准与锅炉的安全密切相关——涉及设备毁坏、人身伤亡、重大经济损失等问题,因此,它具有一定强制性与法律效应。为此,负责锅炉安全技术的机构有责任监督强度标准在各生产部门的贯彻执行情况。

生产中,有时会发现标准的某些规定不尽合理,特别是当标准长期未加修订时,更会出现此种情况。此时,应与标准编制成员共同研究处理方法,若作改动务必审慎,且应经标准管理机构审核,再报主管锅炉安全技术的部门审查批准。标准中不合理的内容可

以改动,但安全大事必须严格谨慎对待。

7 强度标准属于锅炉建造规范的一部分,强度标准应满足锅炉法规的各项规定

强度标准属于锅炉建造规范中的一个重要组成部分。锅炉建造规范一般包括材料、设计(指强度设计)、工艺、检验等内容,如我国的固定式锅炉建造规范^[24]、美国 ASME 规范^[39,40]、英国 BS 标准^[46]等。以上均属规范(有时也称标准),但它们均不是法规。蒸汽与热水锅炉安全技术监察规程^[22,23]则是法规。规范的规定应满足法规的各项规定要求,不应有抵触,不应低于法规的规定。

8 强度标准应与国际标准接轨

为满足改革开放、国际贸易发展的需求,强度标准与国际标准接轨日益重要。尽管各国强度标准形成与发展的历史背景不同,标准的差异也较明显,但统一的趋势不断发展。锅炉强度的国际标准已经形成,我国标准修订应尽可能与其统一。

作者简介

姓 名 李之光

主要著作

锅炉钢材及锅炉受压元件强度计算

锅炉受压元件强度

锅炉材料及强度与焊接

锅炉受压元件强度分析与设计

锅炉安全基础

锅炉强度

模型实验研究基础

相似与模化

常压热水锅炉及其供暖系统

通信地址 北京市复兴路 83 号院北京之光锅炉研究所

邮 编 100039

电 话 010-68276346

60262774

目 录

前言	5
序言	7
第一章 锅炉受压元件强度概论	1
1 锅炉结构与受压元件名称	1
2 锅炉受压元件强度的特点	11
3 锅炉钢材的强度特性与塑性特性	14
4 锅炉钢材的高温长期强度特性与持久塑性	18
5 锅炉受压元件的低周疲劳	23
6 锅炉受压元件的热应力	26
7 锅炉受压元件的残余应力	31
8 锅炉受压元件的应力松弛	35
9 锅炉受压元件的安全系数与许用应力	37
10 锅炉受压元件的计算壁温	39
11 锅炉受压元件的应力分类与控制原则	44
12 国内外锅炉受压元件强度计算标准	50
13 锅炉受压元件强度问题的解决方法	54
14 锅炉受压元件损坏原因的判别	58
第二章 锅壳锅炉受压元件强度 计算标准与解析	66
1 主题内容与适用范围	68
2 引用标准	70
3 材料、许用应力和计算压力	70
4 承受内压力的圆筒形元件	77
5 承受外压力的圆筒形炉胆、冲天管、烟管和其他元件	96
6 凸形封头、炉胆顶、半球形炉胆和凸形管板	112

7 有拉撑(加固)的平板和管板	126
8 拉撑件和加固件	139
9 矩形集箱	150
10 集箱端盖、内置孔盖	155
11 下脚圈	163
12 孔和孔的加强	168
附录 A 铸铁锅炉受压元件(补充件)	186
附录 B 例题(参考件)	189

第三章 水管锅炉受压元件强度 计算标准与解析

0 主题内容与适用范围	231
1 材料和许用应力	231
2 锅筒筒体的计算	240
3 圆筒形集箱筒体的计算	256
4 管子和锅炉范围内的管道的计算	263
5 凸形封头的计算	268
6 平端盖、平堵头及盖板的计算	276
7 孔的加强计算	282
8 异形元件的计算	290
9 决定元件最高允许计算压力的验证试验	300
附录 A 非常用锅炉钢材在不同计算壁温下的基本许用应力 $[\sigma]$ (补充件)	306
附录 B 开孔减弱断面的抗弯断面系数 W 的近似计算方法(参考件)	308
附录 C 例题(参考件)	310

附 表

1. 单位换算	344
2. 不同压力下水的饱和温度	345
3. 锅炉钢材的化学成分与机械性能	346
4. 锅炉钢材的物理性能	355
5. 锅炉钢材的尺寸规格	355
参考文献	370
专用名词英中对照	375
索引	379

锅炉受压元件强度概论

本章介绍与锅炉受压元件强度计算标准直接有关的一些基础问题,了解这些问题会加深对强度计算标准的全面理解;在以后章节解析标准条文时,会经常涉及本章所述内容。

1 锅炉结构与受压元件名称

本书所述内容涉及大量锅炉术语与名称,本节作概括介绍。

从18世纪产业革命以来,锅炉的发展已经历了两百多年历史。锅炉由简单到复杂,由小容量到大容量,由低参数到高参数,至今已形成大量种类。

根据用途的不同,锅炉分为以下四类:

- 电站锅炉——热力发电机组中的一项主要设备,一般为高参数(≥ 3.8 MPa)、大容量(≥ 60 t/h)蒸汽锅炉;
- 工业锅炉——为工业生产与建筑物采暖提供蒸汽或热水的锅炉,一般为中低参数(< 3.8 MPa)、中小容量(< 60 t/h)蒸汽锅炉或压力为 $0.4\sim 1.6$ MPa,出水温度为 $95\sim 130$ °C的不同容量热水锅炉;
- 生活锅炉——压力与温度都很低的、容量也很小的蒸煮、饮水、取暖用的锅炉。

以上三类锅炉都属于“固定式锅炉”。

■ 舰船、机车锅炉——军舰、民船、机车用的锅炉。这种锅炉属于“移动式锅炉”。

我国电站锅炉总容量接近上述全部锅炉总容量的三分之一,而工业锅炉接近三分之二。这两种锅炉总容量之和占全部锅炉总容量的95%以上。生活锅炉、舰船锅炉的总容量相对很少,至于机车锅炉已渐近消失。

根据结构的不同,锅炉分为以下两大类:

- 锅壳锅炉——将主要受热面(传热面)置于锅壳内的锅炉,一般为低参数(≤ 2.5 MPa)、小容量(≤ 40 t/h)蒸汽锅炉或压力为 $0.4\sim 1.6$ MPa,出水温度为 $95\sim 130$ °C的小容量(≤ 29 MW)热水锅炉;
- 水管锅炉——将所有受热面(传热面)都置于炉膛及烟道内的锅炉,这种结构锅炉的参数与容量不受限制,有各种参数与容量的水管锅炉。

前述电站锅炉、舰船主锅炉一般都是水管锅炉。前述工业锅炉总容量中约60%为锅壳锅炉,约40%为水管锅炉;由于锅壳锅炉单台平均容量较小——不足4 t/h或2.8 MW,而水管锅炉单台平均容量明显大于此值,则工业锅炉总台数的80%以上为锅壳锅炉。前述生活锅炉、舰船辅锅炉、机车锅炉一般为锅壳锅炉。

由以上统计数据可见,本书介绍的《锅壳锅炉受压元件强度计算》^{〔1〕}与《水管锅炉受压元件强度计算》^{〔2〕}两个固定式锅炉强度计算标准涉及到我国绝大部分锅炉的强度问题。

1.1 锅壳锅炉

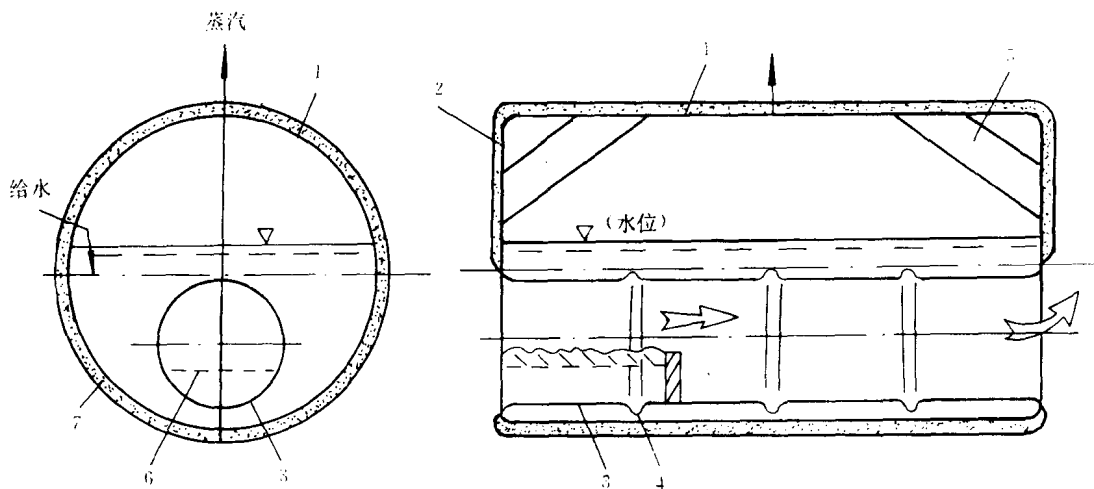
凡将主要受热面(传热面)置于锅壳内的锅炉,统称为“锅壳锅炉”。

锅壳锅炉的炉型很多,下面介绍几种有代表性的炉型,它们能将所有种类受压元件都包括在内。

1.1.1 卧式内燃锅壳锅炉

锅炉“受压元件”指承受介质压力作用并产生应力与变形(宏观不明显)的元件。“介质”指锅炉内部被加热的水、蒸汽等物质。

图 1-1 所示卧式内燃锅壳锅炉的受压元件主要由圆筒形锅壳 1、平板形封头 2、圆筒形炉胆 3 组成。炉胆沿轴线方向每隔一定距离设置膨胀环 4 用以吸收炉胆受热产生的轴向膨胀量。炉胆除膨胀环以外的大部分为平直的,故这种炉胆称为“平直炉胆”。为防止平板形封头在介质压力作用下产生较大变形与应力,用拉撑件(角撑板)5 将封头与锅壳连接起来。膨胀环与拉撑件也是受压元件。



1—锅壳, 2—封头; 3—炉胆; 4—膨胀环; 5—角撑板; 6—炉篦; 7—绝热层

图 1-1 康尼许锅炉

燃料在炉篦(固定炉排)6 上燃烧,所产生的火焰或炽热烟气将锅炉内部的水加热并产生蒸汽,故这种锅炉属于“蒸汽锅炉”;如仅将水加热并引出,则为“热水锅炉”,见图 1-2。

锅壳外部设置绝热层 7,用以防止散热减少热损失、降低锅壳内外壁温差以减小热应力(温度应力)、降低表面温度有利于改进工作条件。

由于这种锅炉的燃烧在锅壳内部的炉胆中进行,故称为“内燃锅炉”,如燃烧是在锅壳之外专门设置的炉膛里进行,则称为“外燃锅炉”,见图 1-4。

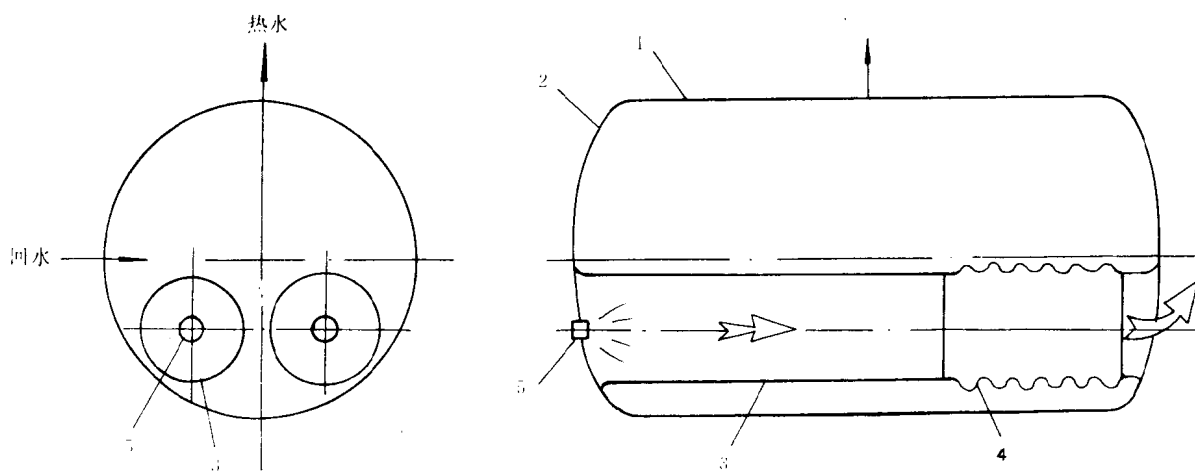
这种仅有一个炉胆的卧式内燃锅壳锅炉,也称为“康尼许锅炉”(Conish boiler)。

图 1-2 所示卧式内燃锅壳锅炉有两个炉胆,也称为“兰开夏锅炉”(Lancashire boiler)。如

果封头为凸形的,则称为“凸形封头”,如图 1-2 中 2 所示。凸形封头受力较好,故不需设置拉撑件。如果炉胆中的一部分作成波纹形状,如图 1-2 中 4 所示,由于能有效吸收炉胆轴向热膨胀量,故炉胆平直部分 3 不需再设膨胀环。波纹形状的炉胆称为“波形炉胆”。图 1-2 所示炉胆为“平直与波形组合炉胆”。

如果燃烧液体或气体燃料,则在炉胆前设有燃烧器,如图 1-2 中 5 所示。

图 1-1 与图 1-2 所示锅炉,由于“受热面”(传热面)较小,故锅炉容量(蒸发量或供热量)不大、热效率不高(排烟温度较高,热损失较大)。

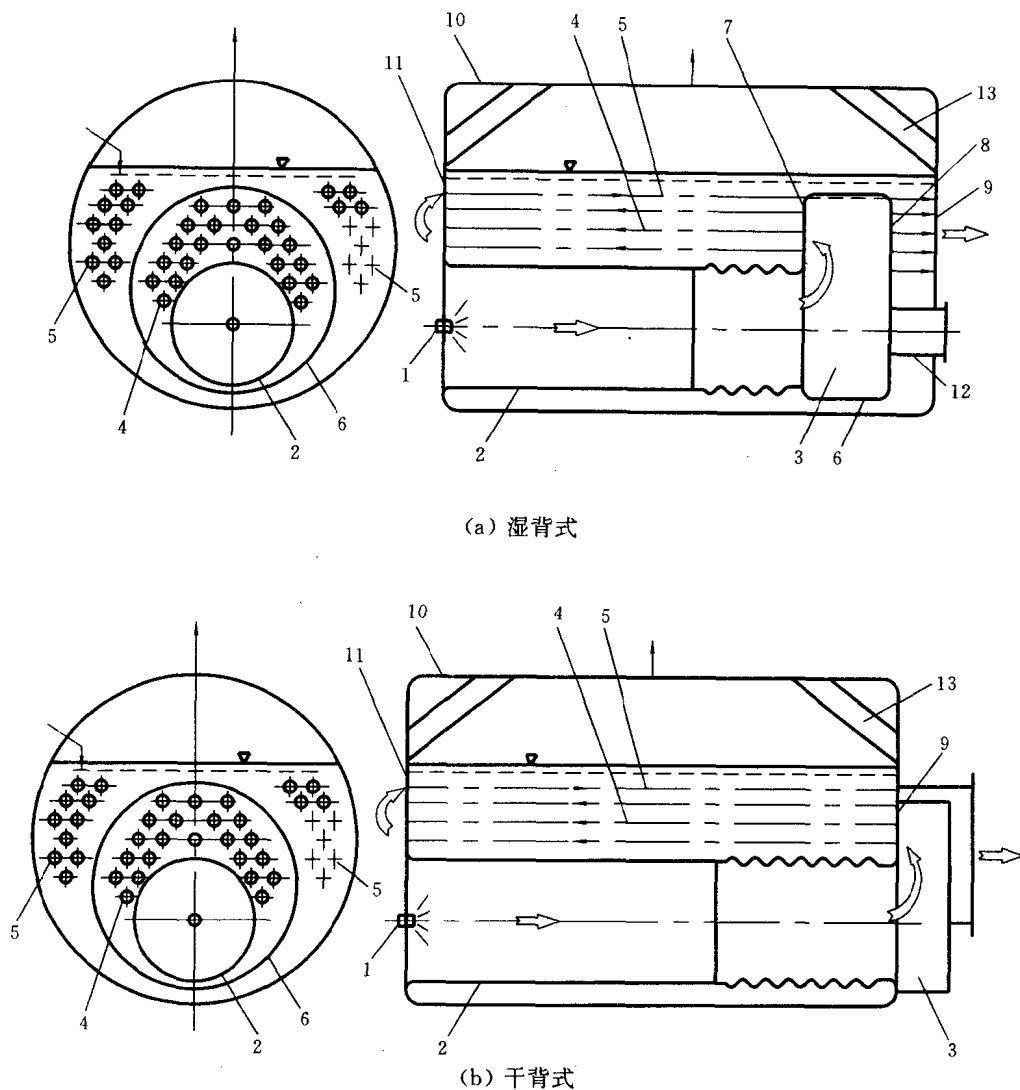


1—锅壳;2—封头;3—平直炉胆;4—波形炉胆;5—燃烧器

图 1-2 兰开夏锅炉

如果除主要进行辐射换热的炉胆受热面(称“辐射受热面”)之外,再增加大量可进行对流换热的烟管(火管)受热面(称“对流受热面”),则可明显增大锅炉容量及提高锅炉效率(降低排烟温度),于是逐渐演变成图 1-3 所示的卧式内燃多回程火管锅壳锅炉。

图 1-3(a)为湿背式三回程火管锅炉,图 1-3(b)为干背式三回程火管锅炉。炉胆为一个回程,烟管为两个回程,故称为“三回程”。图 1-3(a)的回燃室后部有水冷却,故称为“湿背式”,而图 1-3(b)的回燃室后部为耐火与隔热材料制成的密封板,无水冷却,故称为“干背式”。这种锅炉一般都燃用液体或气体燃料,图中 1 为燃烧器。燃烧产生的炽热烟气由炉胆 2 进入回燃室 3,在此,烟气转弯向前进入第一回程烟管 4。烟气由第一回程烟管流出后,转向进入第二回程烟管 5,最后排出锅炉。回燃室由壳板 6、管板 7 与拉撑平板 8 组成。此拉撑平板与锅壳后管板 9 用拉撑件(拉杆)相连(图中未标示),以免这两个平板形元件在介质压力作用下产生较大变形及应力。图中 10 为锅壳,11 为前管板,12 为检测孔圈,13 为角撑板。通过检测孔圈可检查与观测内部,另外它对相连的两个平板形元件起拉撑作用。以上编号 2~13 所示元件都是受压元件。(参见书后彩色插页。)



1—燃烧器；2—炉胆；3—回燃室；4—第一回程烟管；5—第二回程烟管；6—回燃室筒壳；
7—回燃室管板；8—拉撑平板；9—后管板；10—锅壳；11—前管板；
12—检测孔圈；13—角撑板

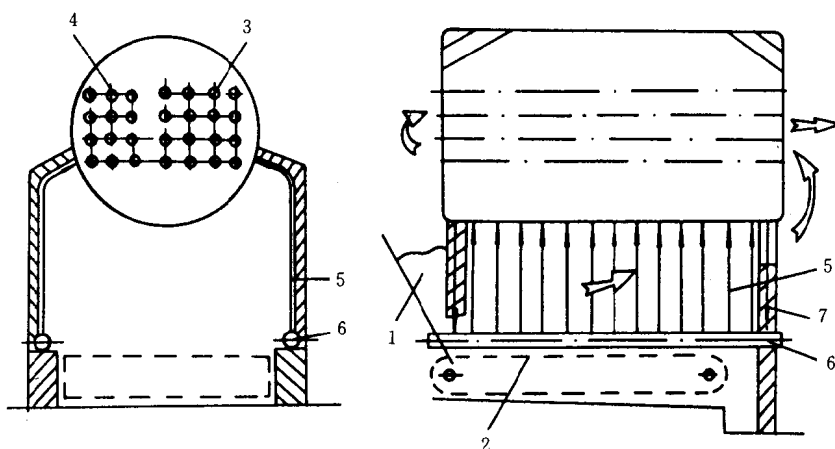
图 1-3 三回程火管锅炉

1.1.2 卧式外燃水火管锅壳锅炉

为适应燃烧中低等级固体燃料，将内燃“炉胆”改为外燃“炉膛”，可大为增加燃烧空间；将炉墙内壁面敷设由大量水冷管构成的“水冷壁”，可进一步增加受热面，也可保护炉墙，于是在我国出现图 1-4 所示的卧式外燃水火管锅壳锅炉。（参见书后彩色插页的 DZL 型锅炉。）

燃料由煤斗 1 进入炉排 2（图示为移动式链条炉排）燃烧，所产生的炽热烟气进入第一与第二回程烟管受热面 3、4，最后排出锅炉。

水冷壁由水冷管（上升管）5、集箱 6、下降管 7 组成，它们都是受压元件。



1—煤斗；2—炉排；3—第一回程烟管；4—第二回程烟管；

5—上升管；6—集箱；7—下降管

图 1-4 水火管锅壳锅炉

1.1.3 立式内燃锅壳锅炉

为减少占地面积,出现“立式内燃锅炉”。

图 1-5 所示为以烟管 1 为主要受热面的立式内燃锅炉,通常称为“考克兰锅炉”(Cochran boiler)。

炉箠 2 之上为半球形炉胆顶 3,它的凸面承受介质压力作用并直接接触火焰,工作条件与前述卧式圆筒形炉胆相仿,都在严苛的条件下工作。烟管 1 的两端为前管板 4 与后管板 5。前管板 4 的上端用弓形板 6 与上部锅壳 7 相连。由于此弓形板的弓背高度较大,为减小应力,用拉撑件(角撑板)8 将它与锅壳 7 连为一体。半球形炉胆(顶)3 与下部锅壳 9 用环形下脚圈 10 相连。上部锅壳 7 之上为凸形封头 11。

除炉箠 2 之外,以上所有编号元件都是受压元件。

图 1-6 所示为以大横水管 1 为主要受热面的立式内燃锅炉,通常称为“大横水管立式锅炉”。

大横水管与水平之间略有角度以利于介质的流动。大横水管两端连接在立式圆筒形炉胆 2 上。此炉胆与立式锅壳 3 用环形下脚圈 4 相连。立式炉胆之上为凸面受压的凸形炉胆顶 5。立式锅壳之上为凸形封头 6。炉胆顶与凸形封头用冲天管 7 相连。冲天管与炉胆都承受外压力作用。

以上所有编号元件都是受压元件。

1.1.4 方箱式内燃锅壳锅炉

图 1-7 所示为容量与压力都较小的“方箱式内燃锅壳锅炉”。

由于外壳与受火的内壳大都为平板结构,故用大量拉杆 1 与烟管 2、3 将它们拉撑住,以防变形与应力过大。炉膛顶板 4 由于其上部设有大量烟管,难以用拉杆与外壳顶部的曲面板 5 相连,故常用加固横梁 6 防止变形与应力过大。外壳与火室内壳下部相连底板 7 一般也是平板结构,由于宽度不大,压力也较小,故不设拉撑件。8 为添加燃料的炉门圈。

以上所有标号元件都为受压元件。