

工业蒸汽锅炉 安全技术

刘清方 编著

中国劳动出版社

工业蒸汽锅炉安全技术

刘清方 编著

中国劳动出版社

(京)新登字114号

内 容 提 要

本书是为适应工业蒸汽锅炉安全监察、安全管理和安全教育需要而编写的。书中首先从安全工作的角度出发,简要地介绍了工业蒸汽锅炉的基本原理,基本结构及基本计算,然后以主要篇幅介绍工业蒸汽锅炉安全技术,包括锅炉工作条件及钢材、锅炉应力分析及强度计算,锅炉制造质量控制、锅炉安全附件、安全运行管理、水质处理、锅炉缺陷及检验等安全技术知识。

本书可供锅炉安全监察人员,安全管理人员及其他有关技术人员参阅。

工业蒸汽锅炉安全技术

刘清方 编著

责任编辑 张建英

中国劳动出版社出版

(北京市惠新东街1号)

北京怀柔东茶坞印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

787×1092毫米 32开本 20.375印张 458千字

1993年7月北京第1版 1993年7月北京第1次印刷

印数: 6000册

ISBN 7-5045-1135-8/TK·029 定价: 10.80元

编 者 的 话

工业蒸汽锅炉是在生产和生活中广泛使用而又具有爆炸危险的特殊设备，锅炉安全在国内外都受到社会的普遍关注。

要保证锅炉安全，需要对锅炉的设计、制造、安装、运行、维护、改造等各个环节进行严格的安全控制，是一个理论与实际相结合的系统安全工程问题。因而，使有关人员特别是安全工程技术人员了解其中基本的知识就显得十分必要而又十分不易。

本书是为适应锅炉安全技术工作的需要而编写的。编写中力求理论联系实际，论述力求深入浅出，取材也力求简明和新颖。书中附有较多图表，可供解决实际问题时选用。

本书书稿曾经清华大学热能工程系冯俊凯教授、杨小昭副教授审阅，承他们指教，编者对书中有关内容作了修改。在本书编写过程中，一直受到劳动部李毅高级工程师的关怀和支持，在此对上述同志一并致谢。

由于编者水平有限，错误在所难免，欢迎批评指正。

1992年4月

目 录

第一章 概述	1
第一节 锅炉及其工作条件	1
第二节 锅炉的规格和种类	5
第三节 锅炉受压过程	7
第四节 锅炉中蒸汽产生过程	10
第二章 工业锅炉结构	12
第一节 锅炉结构型式的发展	12
第二节 工业锅炉参数系列和产品型号编制方法	15
第三节 锅壳式锅炉	19
第四节 小型水管锅炉	24
第五节 卧式水火管锅炉	39
第三章 燃料、燃烧及燃烧设备	43
第一节 锅炉燃料及其燃烧	43
第二节 燃烧计算	55
第三节 燃烧设备	66
第四章 锅炉热平衡	98
第一节 热平衡方程式	98
第二节 锅炉输入热量和有效利用热量	99
第三节 锅炉的各项热损失	102
第四节 锅炉设计计算时的热平衡预算	106
第五节 锅炉的热平衡试验	109
第五章 锅炉中的传热及热力计算	111

第一节	炉膛传热基本概念	112
第二节	炉膛传热计算中有关数值的确定	119
第三节	炉膛传热计算的步骤	127
第四节	对流受热面传热的基本概念	129
第五节	对流传热中主要数值的计算	133
第六节	传热与安全	149
第六章	锅炉水循环和汽水分离	150
第一节	锅炉水循环	150
第二节	汽水分离	165
第七章	锅炉通风	174
第一节	通风的种类	174
第二节	通风阻力计算	178
第三节	通风设备选择	192
第八章	锅炉工作条件与锅炉钢材	195
第一节	锅炉钢材工作条件	195
第二节	锅炉钢材在使用温度下的强度性能	197
第三节	长期高温时的钢材组织变化	210
第四节	钢材的脆性与脆化	214
第五节	锅炉钢材的腐蚀	222
第六节	锅炉钢材	230
第九章	锅炉主要受压元件的应力分析	241
第一节	回转壳体在内压作用下的应力	241
第二节	承受内压圆平板的应力	252
第三节	圆筒壳的边界效应	266
第四节	厚壁圆筒在内压作用下的应力	278
第五节	锅炉元件中的热应力	285
第六节	应力分类	301

第十章 锅炉受压元件的强度计算	307
第一节 一般规定	307
第二节 水管锅炉承受内压圆筒形元件的强度计算	320
第三节 水管锅炉凸形封头的强度计算	340
第四节 水管锅炉平端盖、平堵头及盖板的强度计算	345
第五节 开孔补强	350
第六节 锅壳式锅炉受压元件强度计算	367
第七节 锅炉受压元件的疲劳问题	379
第十一章 锅炉设计安全性的一些问题	387
第一节 锅炉受压元件及蒸发系统安全性	387
第二节 强制流动受热面的一些安全问题	398
第十二章 锅炉制造质量控制	408
第一节 锅炉焊接一般知识	408
第二节 焊接接头的组织和性能	421
第三节 焊接应力	427
第四节 预热和焊后热处理	434
第五节 焊接缺陷	437
第六节 焊接接头质量检验	447
第七节 锅炉制造中的其他质量控制	462
第十三章 锅炉安全附件及阀门管道	478
第一节 安全阀	478
第二节 压力表	485
第三节 水位表	488
第四节 排污装置	493
第五节 保护装置	493

第六节	锅炉常用阀门和管道	502
第十四章	锅炉安全运行与管理	512
第一节	锅炉启动与停炉	512
第二节	锅炉正常运行中的监督调节	523
第三节	锅炉事故	533
第四节	锅炉停炉保养	552
第十五章	锅炉水质处理的基本知识	555
第一节	水中杂质及其对锅炉的危害	555
第二节	水质指标及水质标准	564
第三节	溶液中的一些平衡现象	570
第四节	锅外水处理	576
第五节	锅内水处理	593
第六节	给水除氧和除气	599
第七节	除垢	604
第十六章	锅炉受压元件在运行中的缺陷和破坏	609
第一节	运行中损害元件的主要因素	610
第二节	运行中锅炉受压元件的常见缺陷	612
第三节	锅炉检验	617
第四节	锅炉元件的破坏形式	626
第五节	锅炉事故调查分析	637
附录 I	饱和水蒸汽表	
	参考书目	

第一章 概 述

第一节 锅炉及其工作条件

锅炉是生产蒸汽的机械设备。我们通常所说的锅炉，是指把燃料的化学能转变为热能，再利用热能产生蒸汽的设备。顾名思义，锅炉包括“锅”和“炉”两部分。

现代工业上使用的锅炉，种类很多，结构复杂。它已不是简单地具备“锅”和“炉”，而是具备复杂的锅内系统和炉内系统。锅内系统是使水受热变成水蒸汽的管道和容器，通常也叫汽水系统。炉内系统是进行燃烧和热交换的场所，通常也叫燃烧系统或风煤烟系统。锅炉就是汽水系统和燃烧系统的统一体。

汽水系统通常由给水设备、省煤器、锅筒、对流管束、水冷壁、过热器等组成。

燃烧系统通常由送风机、引风机、烟风管道、给煤装置、空气预热器、燃烧装置、除尘器、烟囱等组成。

图1-1是一台小型锅炉系统简图。

燃料由皮带运煤机11送入煤仓12，再送至位于炉膛(燃烧室)下部的链条炉排2上，一边随链条运动一边燃烧。燃烧需要的空气由送风机9首先送入空气预热器5，预热升温的空气再被送入炉排下部的风室并穿过炉排进入炉膛参加燃烧。燃烧产物在炉膛、烟道中一边运动一边向汽水系统传递

热量，自身的温度不断降低，最后经除尘器6、引风机7排入烟囱8。

经过处理合格的水由给水泵10送入省煤器4，省煤器布置在烟道后部，烟气在外部冲刷省煤器而水在省煤器内部流动，因而发生烟气与水的换热使烟气降温及水升温。升温后的水经连接管道送入锅筒1。锅筒是锅炉最重要的部件，进入锅筒的水再分成两路循环流动：一路经下降管进入水冷壁，另一路进入对流管束，分别吸热形成汽水混合物再流回锅筒。汽水混合物在锅筒中经过分离，分离出的水与新由省煤器加入的水混合，继续进入水冷壁和对流管束循环流动，

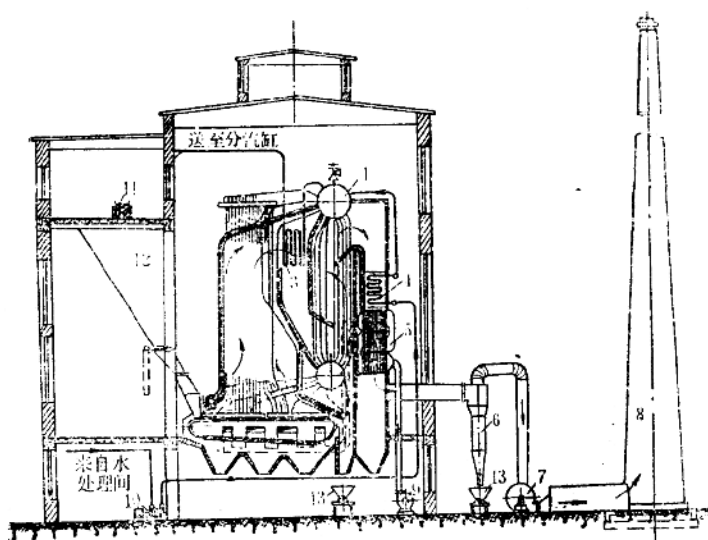


图1-1 小型锅炉系统简图

- 1-锅筒；2-链条炉排；3-蒸汽过热器；4-省煤器；5-空气预热器；6-除尘器；7-引风机；8-烟囱；9-送风机；10-给水泵；11-皮带运煤机；12-煤仓；13-灰车

分离出的饱和蒸汽则进入蒸汽过热器3，吸热升温至额定温度成为过热蒸汽，然后送入供汽的分汽缸。

为了保证锅炉安全经济地运行，锅炉上还有各种安全附件和测量仪表，如：水位表、安全阀、压力表、测温装置、排污装置等。

通常我们讲到锅炉，只是指上述两个系统的主要部分，即锅炉本体和燃烧设备。锅炉本体是指自省煤器进口集箱到过热器出口集箱的汽水系统，燃烧设备是指炉膛和燃烧器。

锅炉本体和燃烧设备合称锅炉设备。

锅炉广泛地应用于电力、机械、化工、轻工、纺织、造纸等工业部门、交通运输部门和日常生活中。由于各种工业企业的生产性质和规模不同，所用蒸汽的数量和参数不同，所需要的锅炉在容量、结构、性能上也各不相同。

电力工业是发展工农业生产的先行工业，火力发电则是目前世界上所采用的各种发电方式中的主要方式。据统计，现在全世界火力发电占总发电量的75%以上。锅炉则是火力发电厂的三大主机之一。发电场所用的锅炉(电站锅炉)一般是容量较大、蒸汽参数高、机械化自动化程度高、经济性和可靠性要求较高的锅炉，其结构常常比较复杂和完善。

其他工业企业所需要的锅炉一般称作工业锅炉，其容量相对地小一些，蒸汽参数较低，结构比较简单，但是需要的数量很大，在国民经济中也占据相当重要的地位。

从安全角度出发，锅炉属于“直接接触火焰的压力容器”，其工作条件是非常恶劣的。

锅炉的汽水系统由密闭的容器和管道组成，其中把汽水与烟气隔开的金属壁面，叫受热面。受热面是汽水系统的主要部分，它的主要作用是把烟气的热量传给汽水。省煤器、

水冷壁、对流管束、过热器等都是受热面。空气预热器则是把低温烟气的热量传给空气的辅助受热面。锅壳式锅炉的炉胆、烟管也都是受热面。受热面承受汽水的压力，其温度高于汽水的温度。汽水系统中不直接受热的容器和管道，也都承受着汽水的温度和压力。整个汽水系统中的容器和管道都承受一定温度和压力，有爆炸或爆破的危险性。

无论电站锅炉或是工业锅炉，一旦投入运行，就要维持连续运转，不能任意停炉。如果发生事故被迫停炉，就会造成很大的损失。电站锅炉发生事故停炉，就要少发电或造成局部停电，影响生产；供暖锅炉在严冬季节停炉，就要严重影响人民的生活。

锅炉内外表面要接触烟火、灰尘、水汽，有腐蚀、磨损、油污、阻塞的可能，使得锅炉设备比其他机械设备更易损坏。如前所述，一台锅炉是一个复杂的系统。除了包括很多部件外，还有很多辅机、附件。锅炉的运转需要整个系统的协调动作。其中任何环节发生故障，都要影响锅炉的安全运行。

锅炉受压元件的损坏，特别是锅筒的爆炸，不仅仅是把设备本身毁掉，而且损坏周围的设备建筑，甚至造成人身严重伤亡。例如：1981年2月北京市某单位一台容量仅为0.4t/h的锅炉因超压（工作压力0.5MPa）爆炸，将锅炉房及相邻的洗澡间、食堂等约150m²的建筑物全部摧毁，2吨重的锅炉上部飞出约500m，死6人，伤多人，整个单位多日停产，损失之大是很难精确计算的。

因此，我国同世界上其他许多国家一样，把锅炉作为一种特殊的设备，由各级专门机构对其安全进行监督。锅炉的设计、制造、安装、运行、检验、修理、改造等都必须依据

国家有关部门颁发的规程、标准进行。

研究锅炉涉及到广泛的工程技术领域，其中包括：材料力学、金属学、热力学、传热学、流体力学、机械原理、金属工艺学等等，需要了解和综合利用多方面的知识。对安全技术工作者来说，我们研究锅炉、主要是从安全角度着眼的。当然，为了掌握锅炉安全知识，必须首先了解一些锅炉的基本原理，基本结构和运行管理的一些基本知识，了解的重点是工业蒸汽锅炉。

第二节 锅炉的规格和种类

一、锅炉规格的表示方法

锅炉是生产蒸汽的设备，锅炉的规格通常以锅炉所提供蒸汽的数量和参数表示。

锅炉在每小时所产生蒸汽的数量，称为锅炉的蒸发量，也可以称作锅炉的“出力”或“容量”，单位是 t/h (吨/时)。通常所说的蒸发量是指锅炉的“额定蒸发量”，即锅炉在规定的蒸汽参数和给水温度下，连续运行时所必须保证的最大蒸发量，锅炉铭牌上的蒸发量就是额定蒸发量。

从热力学中已经知道，表征水和蒸汽热力性质的参数很多，相互之间有内在的联系，知道了其中两个，就可以求出其余几个。通常用以表示锅炉规格的蒸汽参数是蒸汽的压力和温度。

锅炉中把水加热成蒸汽的过程，近似于一个定压加热过程，知道了给水的温度和锅炉参数(蒸汽的压力和温度)，按定压加热过程可以方便地求得蒸汽在锅炉中获得的热量，了解蒸汽做功或供热的本领。

压力目前采用的单位是MPa, 与工程上过去常用的kgf/cm²比较, $1\text{MPa}=10.1972\text{kgf/cm}^2$ 。通常用以表示锅炉参数的压力是表压力, 即绝对压力与大气压力的差值。

温度的单位是℃。

我国锅炉的容量(蒸发量)和参数已经系列化, 并已纳入国家标准, 我们将在第二章介绍。

二、锅炉的种类

锅炉的种类非常多, 分类的方法也各式各样。

按用途可以分为: 电站锅炉, 工业锅炉, 机车锅炉和船舶锅炉等。

按容量可以分为: 大型锅炉、中型锅炉、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20t/h至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。

按蒸汽压力可以分为低压锅炉〔压力 $\leq 1.57\text{MPa}$ (16kgf/cm^2)〕, 中压锅炉〔压力为 2.45MPa (25kgf/cm^2)和 3.82MPa (39kgf/cm^2)〕, 高压锅炉〔压力为 9.81MPa (100kgf/cm^2)〕, 超高压锅炉〔压力为 13.73MPa (140kgf/cm^2)〕, 亚临界锅炉〔压力为 16.67MPa (170kgf/cm^2)〕和超临界锅炉〔压力超过 21.97MPa (224kgf/cm^2)〕, 即高于临界压力〕。

按燃料种类和能源来源可以分为燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉、原子能锅炉、废热(余热)锅炉。

按结构可以分为锅壳式锅炉(火管锅炉), 水管锅炉和水管锅炉(卧式快装锅炉)。

按燃料燃烧方式可以分为层燃炉、沸腾炉、室燃炉。

按工质流动方式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。

工业锅炉一般容量较小(65t/h以下),压力较低(2.45 MPa及以下),大都采用层燃,结构型式和燃烧设备种类繁多,主要用于工业生产用汽及采暖、生活等方面。

工业锅炉的分类见表1-1。

表1-1 工业锅炉类型

分 类 方 法	锅 炉 类 型	
按锅炉结构型式	锅壳式	立式横水管、立式弯水管、立式直水管、立式回火管、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、纵贯锅筒式、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、倒转炉排抛煤机、摆动炉排、下饲式炉排、往复式炉排、沸腾炉、半沸腾炉、室燃炉、旋风炉等	
按 燃 料 种 类	无烟煤、贫煤、烟煤、劣质烟煤、褐煤、油、气、木柴、甘蔗渣、稻壳、煤矸石、特种燃料、余热等	
按 出 厂 型 式	快装、组装、散装	
按 供 热 工 质	蒸汽、热水及其他工质	

第三节 锅炉受压过程

常见锅炉受压不是机械加压,而是由锅炉中的燃烧传热过程造成的,或者说,锅炉中的内压力是因热力过程产生的。

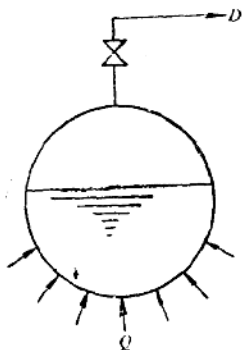


图1-2 锅炉升压过程示意

锅炉受压过程与日常生活中使用的压力锅相似，见图1-2。

生火前，通常在锅中加约半锅水，水上部的锅内空间充满着湿空气，其压力等于大气压力。生火加热到一定程度，水即开始沸腾变成蒸汽，由于水面上的压力是大气压力，水开始沸腾的温度接近 100°C 。

如果水面以上是敞开的，锅内产生的蒸汽全部跑到大气中去，则锅内即维持大气压力，不会升压。

如果水面之上的锅内空间完全是封闭的，锅内产生的蒸汽全部聚积起来，由于水变成蒸汽时体积大大增加，而锅内容纳气体的空间有限，锅内水面上的汽压将急剧升高，由于压力的升高，相应的水的饱和温度也提高，水中贮存的热量不断增加，水在更高的温度水平下汽化。如果燃烧和传热过程在继续，这个压力升高的过程也随之继续下去，直至压力超过锅体承载能力，酿成破坏事故。

实际上的锅炉生火升压过程介于上述两种情况之间：

锅内存汽空间接有排气管，排气管上有控制阀门。生火升压时，将阀门开到适当开度，使锅内产生的蒸汽只排掉一部分，或者说使锅内产生的蒸汽量大于排出的蒸汽量，则锅内上部的压力即逐步上升，直至所要求的蒸汽压力。此时调整排汽阀门的开度，维持锅内产生的蒸汽量等于排出的蒸汽量，锅内压力即大体维持不变，锅炉即进入正常的运行状

态，即定压加热过程。

从能量平衡的观点看，锅炉从升压到正常运行是一个能量不平衡过渡到能量平衡的过程：

如果 Q = 单位时间内锅内蒸发系统从炉内系统吸收的总热量；

D = 单位时间内排出锅内的蒸汽量；

i'' = 排出蒸汽的焓；

i' = 给水的焓；

则锅炉升压时有：

$$Q > D(i'' - i') \quad (1-1)$$

锅炉正常运行时有：

$$Q = D(i'' - i') \quad (1-2)$$

故锅炉升压过程是锅炉贮积热能的过程。

锅炉正常运行是一个能量动态平衡的过程。锅内水汽吸收的热量等于排放蒸汽带走的热量，如果这个动平衡被破坏，例如燃烧增强或减弱，传热变化，负荷（用户耗汽量）变化，都会引起锅炉压力的变化。

在系统地学习锅炉的各种基本概念之前，想深入分析锅炉压力的变化是困难的。但上述定性的分析已足以给我们引出有益的结论：

1. 一般锅炉承受的内压是自生压，是由锅炉中的燃烧、传热引起的。燃烧和传热，是导致锅炉受压的根源。

2. 一般锅炉承受的内压是可变压，导致压力变动的因素很多，主要有燃烧、传热、负荷变化等。

因而，对一般锅炉来说，问题不在于能否产生内压，而在于能否承受和承受多大内压。任意一台锅炉都有产生内压的可能，但不是任意一台锅炉都有承压的能力。近年来，由