



直流锅炉

西安交通大学《直流锅炉》编写组

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是适应国内直流锅炉迅速发展的需要专门组织编写的。全书共分八章，着重介绍现代直流锅炉（包括亚临界压力低倍率循环锅炉和超临界压力复合循环锅炉）的基本型式、构造和发展，直流锅炉的水动力特性、蒸发受热面的放热过程和热化学问题；详细阐述直流锅炉的启动、停用、参数调节和运行操作等内容；简要介绍了研究直流锅炉所必须的热工学、水动力学和传热学基础知识。全书有插图300余幅，内容通俗实用。适于火力发电厂锅炉工人阅读，也可供锅炉专业技术人员和大、中专院校师生参考。

直 流 锅 炉

西安交通大学《直流锅炉》编写组

*

水利电力出版社出版

（北京德胜门外六铺炕）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

1977年10月北京第一版

1977年10月北京第一次印刷

印数 00001—13410 册 每册 1.85 元

书号 15143·3253

前 言

建国二十多年来，在毛主席革命路线的指引下，我国电力工业得到了蓬勃发展。尤其是无产阶级文化大革命以来，我国电力工业和锅炉制造工业的广大工人、干部和技术人员，遵照毛主席“独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国”和“打破洋框框，走自己工业发展道路”的指示，自行设计、制造和投入运行了一批超高参数、大容量火力发电机组，1000吨/时亚临界压力直流锅炉也已投入运行，使我国的电力工业达到了一个新的水平。可以预见，随着火电机组蒸汽参数的不断提高，亚临界压力和超临界压力具有独特优越性的直流锅炉和复合循环锅炉将在我国得到很大的发展。

为了适应国内直流锅炉迅速发展的需要，我们锅炉教研室的有关教师组成了编写组，编写了这本《直流锅炉》，主要供发电厂的锅炉工人阅读，也可供锅炉专业技术人员和大专院校师生参考。

本书共分八章，着重介绍现代直流锅炉（包括亚临界压力低倍率循环锅炉和超临界压力复合循环锅炉）的基本型式、构造和发展，直流锅炉的水动力特性、蒸发受热面的放热过程和热化学问题；详细阐述直流锅炉的启动、停用、参数调节和运行操作等内容。为了便于工人同志学习本书，在本书的第一章中简要介绍了研究直流锅炉所必须的热工学、水动力学和传热学基础知识。根据直流锅炉运行工作的需要，我们挑选了一些资料做为附录，供读者查阅和参考。

本书在取材和图例方面尽量以国内的设备和实践经验为主，也适当引用了国外的典型设备和试验研究成果。根据我国发电厂的广大锅炉工人对自然循环汽包锅炉的运行有丰富的实践经验，本书在叙述时常借助于与自然循环汽包锅炉的比较，来加深对直流锅炉的认识。在编写时力求做到由浅入深，由表及里，循序渐进，通俗实用。

广大工人的生产实践是发展科学理论的源泉。在本书编写之前及编写过程中，编者先后参加了配5万千瓦机组直流锅炉的燃煤试验、配12.5万千瓦和30万千瓦机组直流锅炉的培训和试运行等现场工作。在三大革命运动中得到了工人师傅的热情支持和帮助，使我们的阶级斗争、路线斗争觉悟和生产实践知识都有了一定提高。在与工人师傅共同工作的过程中，了解了他们的希望和要求，加强了编写这本书的信心。在编写时，我们主观上尽力想把工人师傅丰富的实践经验较系统地整理和归纳起来，并尽可能地适应他们的需要。然而由于我们的政治和业务水平有限，不一定能达到预期的效果，甚至还存在不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

本书在编写过程中得到了秦岭发电厂、望亭发电厂、杨树浦发电厂、姚孟发电厂、上海锅炉厂、西安热工研究所和哈尔滨锅炉厂等单位广大工人和技术人员的指导和帮助；秦岭发电厂、西安热工研究所和东方锅炉厂还分别组织了三结合审稿小组或专门小组对书稿进行了认真仔细的审阅，并把他们在工作实践中积累的宝贵经验和资料提供给我们。对于以上各单位同志的热情帮助和认真审稿，表示衷心的感谢。

西安交通大学《直流锅炉》编写组

1976年10月

目 录

前 言

第一章 锅炉的热工及水动力学基础	1
第一节 火机组的热力工作过程.....	1
第二节 水蒸汽的发生过程.....	3
一、加热；二、蒸发；三、过热	
第三节 水蒸汽的主要状态参数.....	5
一、压力；二、温度；三、比容；四、焓	
第四节 锅炉管内水动力学基础.....	11
一、流量连续方程；二、不可压缩流体流动时的能量守恒方程；三、管内流动的阻力；	
四、节流孔板测量流量的原理	
第五节 管内汽水双相流动的水动力学基础.....	20
一、汽水混合物流动结构；二、汽水双相流动时的流动参数；三、汽水双相流动时的阻力	
第六节 蒸汽流动时的状态变化.....	32
一、比热和内能；二、工质在稳定流动时的通用能量方程；三、通用能量方程在锅炉蒸汽发生过程中的应用；四、节流过程	
第七节 锅炉传热学基础.....	36
一、导热；二、对流换热；三、热辐射；四、锅炉受热面的传热	
第二章 直流锅炉的工作原理和基本型式	42
第一节 自然循环汽包锅炉的工作原理.....	42
第二节 直流锅炉的工作原理.....	45
第三节 直流锅炉与自然循环汽包锅炉的比较.....	47
一、直流锅炉的主要优点；二、直流锅炉的主要缺点	
第四节 直流锅炉的基本型式.....	49
一、直流锅炉的水冷壁型式；二、对流过渡区和汽水分离器；三、现代直流锅炉的型式	
第三章 直流锅炉的构造	57
第一节 锅炉蒸汽参数对受热面布置的影响.....	57
第二节 SG-400-140型直流锅炉.....	59
一、整体构造；二、锅炉的汽水系统；三、辐射受热面的布置；四、辐射受热面的支持结构	
第三节 SG-935-170型直流锅炉.....	66
一、整体构造；二、锅炉的汽水系统；三、炉膛辐射受热面的布置；四、膜式水冷壁；五、炉膛辐射受热面的构造	
第四节 过热器和再热器.....	76
一、结构和系统；二、汽温变化特性；三、过热蒸汽温度的调节；四、再热蒸汽温度的调节	
第五节 省煤器和空气预热器.....	91
一、省煤器；二、空气预热器	
第六节 低倍率循环锅炉.....	98
一、低倍率循环锅炉的工作特点；二、低倍率循环锅炉的构造特点；三、再循环泵	

第七节 超临界压力复合循环锅炉	107
一、超临界压力锅炉的简况；二、超临界压力复合循环锅炉的工作特点；	
三、超临界压力复合循环锅炉的构造	
第八节 其他型式直流锅炉	118
一、螺旋式水冷壁直流锅炉；二、FW型直流锅炉；三、苏联的直流锅炉	
第四章 直流锅炉的水动力学	129
第一节 锅炉受热面的管壁温度工况	129
一、锅炉受热面管壁金属温度；二、热力不均匀对锅炉管壁温度的影响；	
三、膜式水冷壁的管壁金属温度工况	
第二节 直流锅炉的水动力不稳定性	136
一、什么叫水动力特性；二、水平布置蒸发受热面中的水动力特性；	
三、垂直管屏蒸发受热面中的水动力特性	
第三节 直流锅炉蒸发受热面中流体的脉动	155
第四节 直流锅炉蒸发受热面中的热偏差	164
一、什么叫热偏差；二、联箱压力分布特性引起的水力不均匀；三、水阻力对热偏差的影响；	
四、重位压头对热偏差的影响；五、热偏差的减轻和防止	
第五节 低倍率循环锅炉的水动力特点	176
第五章 直流锅炉蒸发受热面内的放热过程	179
第一节 核态沸腾和膜态沸腾	179
一、水沸腾时气泡的形成过程；二、核态沸腾和膜态沸腾；三、管内受迫流动时沸腾放热的恶化；	
四、第一类传热危机和第二类传热危机	
第二节 亚临界压力垂直沸腾管中的传热恶化	186
一、全周均匀加热光管的传热恶化；二、单侧加热光管的传热恶化；三、鳍片管的传热恶化；	
四、直流锅炉沸腾管的传热恶化	
第三节 亚临界压力水平沸腾管中的传热恶化	194
一、水平沸腾管中工质的流动结构；二、水平沸腾管的管壁温度工况	
第四节 超临界压力下的传热恶化	198
第五节 直流锅炉管壁温度工况的计算	201
一、锅炉管加热区段的放热系数；二、沸腾管中核态沸腾区的放热系数；三、沸腾管内传热恶化位置的确定；	
四、沸腾管内传热恶化区的放热系数和管壁温度；五、微过热区的放热系数；六、过热区段的放热系数；	
七、水平及微倾斜管的上、下管壁温差；八、超临界压力下相变区的放热系数	
第六节 沸腾管传热恶化的推迟与防止	209
一、采用内螺纹管对推迟传热恶化的效果；二、采用扰流子的效果	
第六章 直流锅炉的热化学问题	214
第一节 直流锅炉中盐分的溶解与沉淀	215
第二节 直流锅炉的盐分沉淀区域与锅内腐蚀	220
一、盐分沉淀区域；二、锅内腐蚀	
第三节 直流锅炉的给水标准	227
一、给水中的总含盐量(或电导率)、硬度、含钠量；二、给水中的SiO ₂ 含量；三、给水中的含铜(Cu)量；	
四、给水中的含铁(Fe)量；五、给水中的溶解氧O ₂ ；六、给水的pH值	
第四节 直流锅炉的定期清洗和首次启动前的化学清洗	232
一、定期清洗；二、首次启动前的化学清洗；三、启动时的水质控制	

第七章 直流锅炉的启动和停用	237
第一节 蒸汽管路的吹扫	237
第二节 直流锅炉的启动旁路系统	239
一、启动旁路系统的作用；二、直流锅炉的启动旁路系统	
第三节 启动过程中的膨胀现象及启动参数的选择	254
一、膨胀现象；二、影响膨胀的各个因素；三、启动参数的选择	
第四节 单元机组的成套启动	260
一、单元机组(直流锅炉-汽轮机)中滑参数启动的应用；二、滑参数启动；三、滑压启动程序	
第五节 直流锅炉的停用和停炉保护	268
一、直流锅炉的停用；二、直流锅炉的停炉保护	
第八章 直流锅炉的参数调节和运行	270
第一节 直流锅炉的蓄热能力	271
第二节 直流锅炉的动态特性	276
一、热工对象的动态特性；二、功率扰动；三、给水量扰动；四、燃料扰动；五、给水和燃料的复合扰动；六、烟气再循环挡板开度扰动	
第三节 直流锅炉蒸汽参数调节的原理	286
一、主调节信号的选择；二、蒸汽参数的调节原理；三、直流锅炉蒸汽参数的手动控制	
第四节 锅炉自动调节的基本知识	291
一、自动调节系统的组成；二、自动调节系统的过渡过程；三、比例调节器的调节规律；四、其他调节器的调节规律；五、各种常用调节器的比较	
第五节 直流锅炉的自动调节	301
一、中间再热单元机组的负荷适应性；二、单元机组的功率自动调节系统；三、直流锅炉的自动调节系统；四、SG-1000-170型直流锅炉的自动调节系统	
第六节 低倍率循环锅炉的调节特点	312
一、低倍率循环锅炉的动态特性；二、低倍率循环锅炉的给水调节系统；三、低倍率循环锅炉的水位调节系统	
第七节 单元机组的滑压运行	318
一、为什么要采用滑压运行；二、滑压运行对直流锅炉的影响；三、滑压调节	
附 录	
附录一 本书常用符号及单位说明	327
附录二 单位制的换算和常用计量单位	330
附录三 水和水蒸汽的焓、比容及物性	334
附录四 管内流动的局部阻力系数	355
附录五 锅炉钢材	361

第一章 锅炉的热工及水动力学基础

电力是工农业的主要原动力。国民经济的发展要求电力工业领先于其他工业，即起先行的作用。目前，世界上除少数国家以水力发电为主外，大多数国家都以火力发电为主。火力发电厂以有机燃料（煤、石油或天然气等）作为能源。

蒸汽锅炉是火力发电厂的三大主机之一。水是火力发电厂中转换能量的主要工作介质（简称工质）。在本章中简要介绍用有机燃料作为能源的火力发电厂的能量转换过程，水和蒸汽的热力性质，锅炉管内介质的水动力学基础知识，以及锅炉中传热过程的基础知识。

第一节 火电机组的热力工作过程

本节以配SG-400-140型直流锅炉的机组为例，介绍火力发电厂的热力工作过程。

这套机组是我国自行设计、制造和安装的大型火电机组，采用了超高压中间再热式直流锅炉与双水内冷汽轮发电机相配合的单元制系统（也称单元机组），功率为十二万五千千瓦，简称125机组。

125机组每小时能发出十二万五千度电。度就是功率（千瓦）与时间（小时）的乘积。一千瓦就是1000瓦，瓦是电压（伏特）与电流（安培）的乘积，它是指单位时间内所作的功，叫做功率。125机组每小时要向外输出十二万五千度电。这么大的发电量对工农业生产起着很大的作用。电能是无法储存的。因此，确保机组的安全可靠运行是我们运行人员的重要职责。

火力发电厂是把燃料的化学能转变为电能的工厂，它的能量转换过程如图 1-1 所示。

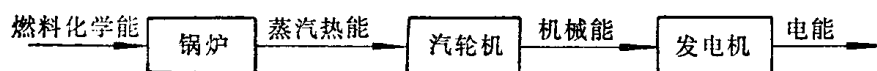


图 1-1 燃料化学能转换为电能的过程

燃料送入锅炉中燃烧，把化学能转化为热能，并为锅炉中水所吸收，成为蒸汽的热能。蒸汽送入汽轮机，冲动汽轮机转子，把热能转化为机械能。汽轮机带动发电机，把机械能转化为电能。这就是火电机组的能量转换过程。

但是要实现这个转换，除了锅炉、汽轮机和发电机三大主机外，还需要一系列辅助机械和设备，组成电厂的热力循环系统。图1-2是125机组的热力系统示意图。

它的工作过程是这样的，燃料（油或煤）在锅炉炉膛中燃烧，生成很高温度的烟气，烟气带着热量从锅炉的水管外面穿过，把大部分热量传给了管内的水，使之变成蒸汽，继

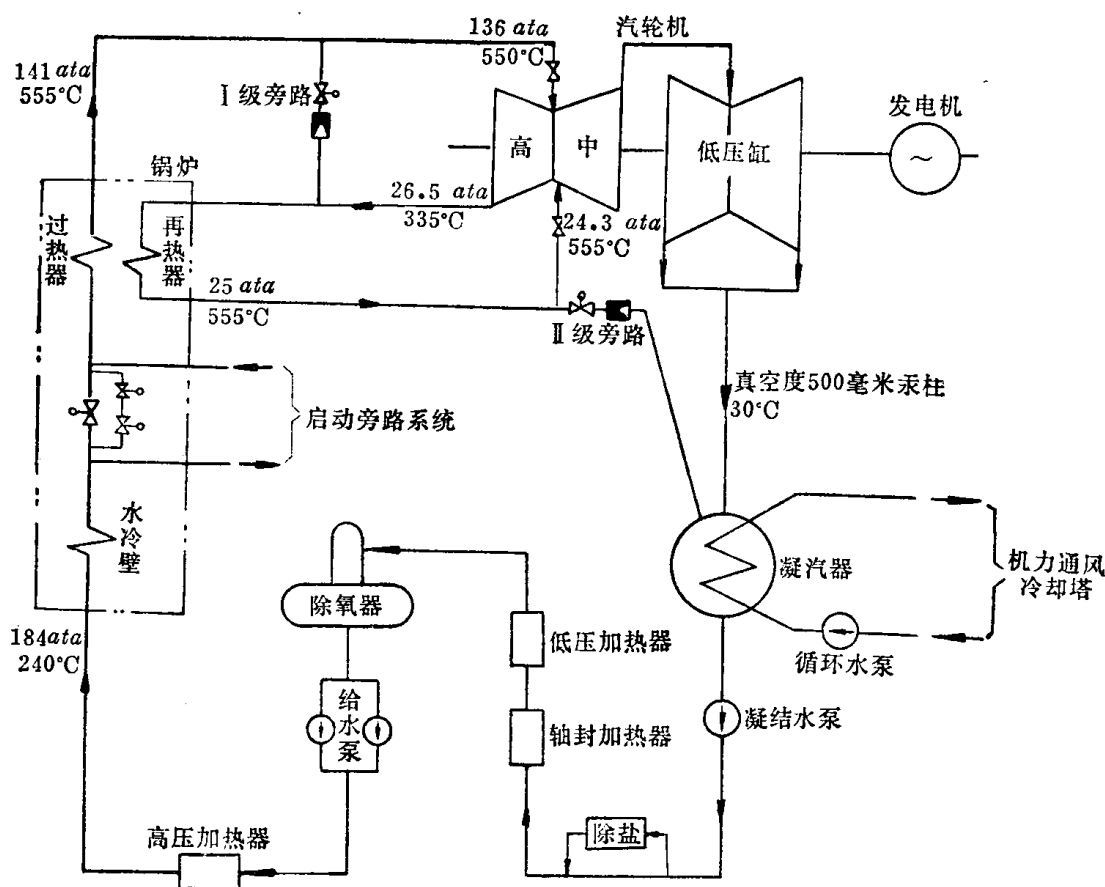


图 1-2 125机组的热力系统示意图

而又过热成为过热蒸汽。机组要满发十二万五千千瓦，每小时就需要锅炉生产出400吨141绝对大气压、555℃的蒸汽送入汽轮机。为此，125机组所配直流锅炉的容量是400吨/时。

锅炉出来的过热蒸汽具有很高的压力和温度（141绝对大气压、555℃），通过主蒸汽管道后，蒸汽的参数降为136绝对大气压、550℃送进汽轮机中去。在汽轮机内有喷嘴，蒸汽流过喷嘴时压力和温度都下降，流动速度就增加，即具有了很大的冲击力量。高速蒸汽流冲击到汽轮机转子的叶片上，就使汽轮机转动。蒸汽在汽轮机里一级一级地把热能变成机械能，它本身的压力和温度就降低下来，在离开汽轮机时压力比大气压力还要低（真空度为500毫米汞柱），温度也祇有30℃左右了，然后排入汽轮机下面的凝汽器中去。

由上可见，蒸汽在汽轮机内的工作过程是一个膨胀做功的过程。为了提高发电厂热效率及降低排汽湿度（水分），采用了中间再热（详述于第三章第一节）。汽轮机分高、中、低压缸；蒸汽进入高压缸，从第1级做功至第9级，这时蒸汽压力从136绝对大气压降到26.5绝对大气压、蒸汽温度已从550℃降至335℃。把第9级抽出来的蒸汽送回到锅炉的再热器里再加热，再度提高到555℃；通过再热蒸汽管道后，蒸汽参数为550℃、24.3绝对大气压送入汽轮机中压缸，从第10级做功至低压缸最末一级。最末一级出来的蒸汽即为真空度500毫米汞柱、30℃左右的排汽，并排入凝汽器。

在凝汽器内，蒸汽遇到其中密布的铜管，被铜管里的冷却循环水吸收掉大部分热量，

蒸汽就凝结成水。冷却用的循环水是用循环水泵从机力通风塔的底部水池抽出，送进凝汽器的铜管内。它吸收了排汽中的热量后，再回到机力通风塔内冷却到需要的温度。机力通风冷却塔的工作原理是依赖水和空气的强行接触而引起热量的转换。循环水由塔两侧6.05米标高处分两路进入塔内，经过喷头在四层溅水碟上溅成水花，再经纸蜂窝淋水装置冷却后流入下部的水池。在塔上方的风筒内装有风扇，作强行通风冷却，因而在夏季空气温度高时，循环水基本上是由于水的蒸发而得到冷却，冬季则由冷空气与循环水的对流接触而冷却。这种冷却设备工作较稳定，占地面积小。

从凝汽器中凝结的水，用凝结水泵抽出来，经过除盐装置、低压加热器（由汽轮机的抽汽来加热）和除氧器，使凝结水得到除盐、加热和除氧。由除氧器出来的水，用给水泵抽出，送到高压加热器（由汽轮机的抽汽来加热）进一步提高水温到 240°C ，然后送往锅炉。

将整个工作过程归纳起来，水和蒸汽在锅炉中吸收燃料放出的热能，在汽轮机中将热能变成机械能，蒸汽在汽轮机中膨胀做功之后在凝汽器中凝结成水，在加热器中加热后再送回到锅炉，形成一个循环的汽水系统，这就是125机组的热力循环系统。

在整个循环中，可以看到工作着的物质是水和水蒸汽。在锅炉中将水变成水蒸汽；在汽轮机中又将水蒸汽膨胀成低压蒸汽；在凝汽器中又将低压排汽凝结成水，水又用泵送入锅炉，如此周而复始地进行着。通常将此工作着的物质（水和水蒸汽）简称为工质。

火力发电厂为何都采用水作为工质呢？这是因为要使整个工作循环具有较高的热效率，就要求工质具有较高的饱和温度和压力（饱和温度的概念在下一节中谈到），资源分布广泛和容易获得，价格低廉；并且要求工质热稳定性高，在高温下不会分解，也不会引起爆炸及有毒等危险。综合这些要求，水就成为目前火力发电厂最广泛采用的工质了。

水和水蒸汽有着本身所固有的一些特性。在电厂生产过程中，由水加热成为过热蒸汽的过程是在锅炉内完成的，因而在了解锅炉的各种特性之前，必须对水及水蒸汽的性质有所认识。

第二节 水蒸汽的发生过程

由水变成水蒸汽的过程叫汽化。汽化现象可分为蒸发和沸腾两种。锅炉炉膛里的燃料燃烧后，放出来的热量传给受热面里的水，水的温度逐渐升高，首先在水的表面进行汽化，这叫做蒸发。当水的温度升高到一定数值时，水的内部也开始汽化，这称为沸腾。此时的温度叫沸腾温度，简称沸点。由实验知道，在一定压力下，在到达沸点以后继续加热使水全部变成蒸汽的沸腾过程中，水的温度仍然保持着不变。并且蒸发出来的蒸汽的温度也永远等于水的温度。即此时水和蒸汽的温度都是不变的，所以又称沸腾温度为饱和温度 $t_{\text{饱}}$ 。沸腾的水俗称开水，工程上又叫饱和水。水的沸腾温度与水面上的压力有关，如果压力变了，则沸点也就变了，汽化过程中所需要的热量也就不同了。所以下面讨论的蒸汽形成过程都是在一定压力下进行的。

在密闭的锅炉里，由水加热到过热蒸汽，它的形成过程大致可分为三个阶段，即加热、蒸发和过热。

一、加 热

开始时，进入锅炉的给水被加热后温度升高，但还未达到沸腾，没有沸腾的水称为不饱和水。当加热到某一温度时（由压力而定），水开始沸腾（烧开）成饱和水。相应的温度为饱和温度。

由不饱和水加热到饱和水的过程在锅炉的加热受热面内进行。在直流锅炉中称此受热面为加热区段，通常包括对流省煤器和炉膛水冷壁进口部分的一段受热面（也称辐射省煤器）。

二、蒸 发

继续加热，饱和水逐渐（部分）变成饱和蒸汽，在此汽化过程中，工质的温度不变，仍为饱和温度。但由于饱和水是逐渐地变成饱和蒸汽的，所以此时受热面内是水和蒸汽共存的汽水混合物。有水混在一起的这种蒸汽叫做湿饱和蒸汽（简称湿蒸汽）。

每公斤湿蒸汽中干蒸汽的含量以重量百分数来表示，称为干度（或重量含汽率）。其符号用“ x ”代表。例如，SG-400-140型直流锅炉水冷壁下部辐射区的出口干度 x 为0.575（57.5%）。由上述 x 的定义可知，下辐射区出口的每公斤湿蒸汽中含有575克干蒸汽和425克水分。用公式表示则可写成：

$$x = \frac{575}{1000} = 0.575 \text{ (或 } 57.5\%)$$

式中以1公斤等于1000克代入。

继续加热，水分被不断蒸发，直到最后一滴水都被汽化成蒸汽，此时受热面中的水已全部变成蒸汽了，这样的蒸汽称为干饱和蒸汽。其温度仍为饱和温度，因为加进去的热量只不过用来将水汽化为蒸汽，即只用来改变工质的状态而已。

由饱和水加热到干饱和蒸汽的沸腾过程（锅炉行业的习惯称呼也叫作蒸发过程）在锅炉的蒸发受热面中进行。直流锅炉中称此受热面为蒸发区段。

三、过 热

再继续加热，工质温度又开始上升。在同一压力下，温度高于饱和温度的蒸汽叫过热蒸汽。过热蒸汽温度与饱和温度之差值称为过热度。过热度愈高，则表示储存的热能愈多，对外作功的能力愈强。

由饱和蒸汽加热到任意温度的过热蒸汽的过程在锅炉的过热受热面（即过热器）中进行，在直流锅炉中也称过热的区段。

蒸汽发生过程中的温度变化可如图1-3所示。OA线表示水被加热到沸点前的温度上升，AB线表示沸腾时温度不变，BC线表示过热蒸汽温度的上升。其对应的工质状态是：OA点之间为不饱和水；A点为饱和水，B点为干饱和蒸汽，AB点之间为湿蒸汽；BC点之

间为过热蒸汽。

由上述蒸汽形成过程的分析可知，在锅炉里由水变成过热蒸汽经历了加热、蒸发、过热三个阶段。随着加热的进行，工质状态的变化是由不饱和水→饱和水→湿蒸汽→干饱和蒸汽→过热蒸汽等几个不同的状态。工质的不同状态可以用状态参数来描写，因此下一节讨论水蒸汽的状态参数。

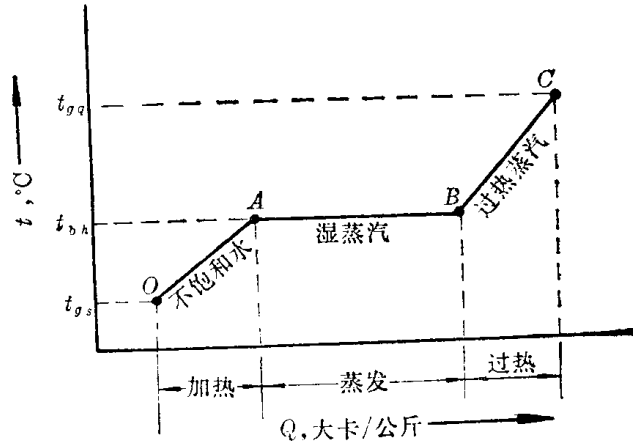


图 1-3 蒸汽发生过程中温度与吸热量的关系
 t_{gs} —给水温度； t_{bh} —饱和温度； t_{gq} —过热蒸汽温度

第三节 水蒸汽的主要状态参数

用来表示水蒸汽热力状态变化的物理量，如压力、温度、比容、焓等叫做水蒸汽的状态参数。它们的数值标志着热力状态的具体特征。

压力、温度和比容（即每单位重量工质所占有的体积）是三个可以直接测量出来的热力状态参数，并且都有着较易理解的物理意义，所以把它们称为基本状态参数。在锅炉技术中还有一个常用的水蒸汽热力状态参数，叫做“焓”。以下分别解释这些状态参数的物理意义。

一、压 力

水蒸汽和其他气体一样，当它盛在一个密闭容器内的时候，总是占据整个容器内部而不留任何间隙。并且对容器壁有一个冲击的力量，这是由于水蒸汽的大量分子在作紊乱运动时对容器内壁频繁撞击的结果。把容器内壁每单位面积上受到的力叫做蒸汽的压力。压力愈高，则表明蒸汽分子撞击容器的作用力愈大，也就是蒸汽的压力能愈大。

压力用每单位面积上的作用力来度量。以符号 p 表示。如果1平方厘米面积上受到的作用力是1公斤，就称它为1个工程大气压。所以1个工程大气压=1公斤/厘米²（工程大气压也称为技术大气压）。

大气中的空气压力，叫大气压力，它随气候及离海平面的高低而变化。由于锅炉的蒸汽压力较高，通常可将四周环境中的大气压力近似地作为1公斤/厘米²。

在锅炉设备上测量蒸汽压力，一般使用弹簧式压力表。当蒸汽的压力等于周围大气压时，压力表上的指针始终指在零位。只有当蒸汽压力超过了大气压力时，表上指针才开始动作。所以表上所指示的压力数值是超过大气压力的部分。蒸汽本身的压力则是压力表上指示的压力值再加上大气压力。这叫做蒸汽的绝对压力（ ata ），而在压力表上的指示值为表压力（ at ）。用公式表示则为：

$$\left. \begin{aligned} \text{绝对压力} &= \text{表压力} + \text{大气压力} \\ &= \text{表压力} + 1 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

有些场合用工程大气压或公斤/厘米²作单位嫌之过大，如锅炉的送风机和引风机的压头，一般采用毫米汞柱或毫米水柱作为度量单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 735.6 \text{ 毫米汞柱} \\ &= 10^4 \text{ 毫米水柱} \end{aligned}$$

对于压力很低的场合，环境大气压力就不能近似地取作 1 公斤/厘米²。此时绝对压力应等于表压力加当地大气压力。

在物理学中用物理大气压作为压力的单位，它相当于760毫米汞柱的压力。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大气压} &= 760 \text{ 毫米汞柱} \\ &= 1.033 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 1.033 \text{ 工程大气压} \end{aligned}$$

二、温 度

水蒸汽的温度是分子热运动的强弱程度。水蒸汽的温度越高，表示蒸汽分子的动能越大。温度的表示方法有摄氏温度和绝对温度两种。摄氏温度以符号“°C”表示度。它取在标准气压下（1.033公斤/厘米²即760毫米汞柱），以纯水的结冰温度为零度，纯水的沸腾温度为100度。将此0度与100度之间的距离分成100等分，这每1等分代表摄氏一度（1°C）。

在气体热力学及工程上的一些计算中，常常使用绝对温度。因为在-273°C时，气体分子才停止热运动。因此就取-273°C为绝对零度，这种方法表示的温度叫绝对温度。并用符号“K”表示度。

若用T表示绝对温度，t表示摄氏温度，则其换算公式为

$$\left. \begin{aligned} T &= 273 + t, \text{K} \\ t &= T - 273, \text{°C} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

对应的图如图1-4。

水的饱和温度（沸点）与水面上的压力有关。对应某一压力就有一相应确定的饱和温度；压力愈高，饱和温度愈高。例如家用水壶里的水，其水面上受到的压力是1个大气压，它的饱和温度近似等于100°C。即1个大气压下的水加热到约100°C，便能使水烧开。在密闭的锅炉里就不同了，如锅炉压力为40绝对大气压，则对应的饱和温度为249.18°C；100绝对大气压时，饱和温度为309.53°C，比1个大气压时要高得多。这种规律是由水蒸汽本身的性质所决定的。

图1-5，示出了饱和温度与蒸汽压力的关系曲线。由实验测得的饱和温度与压力的关系，可在水蒸汽饱和状态参数表中查得，见本书附录三。

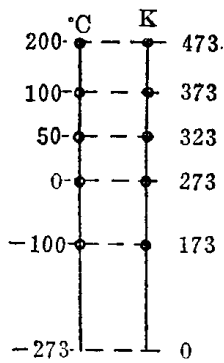


图 1-4 绝对温度与摄氏温度的对照

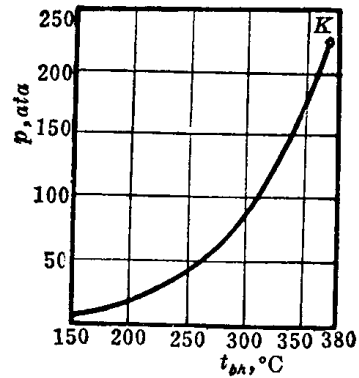


图 1-5 水蒸汽的饱和温度随压力变化的曲线
K—临界点(225.56公斤/厘米², 374.15°C)

三、比 容

1 公斤水或蒸汽所具有的体积叫做比容，它的单位是米³/公斤，用符号“ v ”表示。1 公斤的水加热变成 1 公斤的饱和蒸汽后，体积要胀大很多倍，体积胀大的倍数与压力有关。例如：在压力为 1 公斤/厘米²时，膨胀 1654 倍；40 公斤/厘米²时，膨胀 40.63 倍；100 公斤/厘米²时膨胀 12.78 倍（从附录三水蒸汽饱和状态参数表的比容一项中可查得）。这是因为蒸汽的物理性质与水的物理性质不同，水是不可压缩的而蒸汽是可压缩的。所以压力愈高，体积膨胀的倍数愈小，即蒸汽比容愈小。反之压力愈低，膨胀的倍数愈大，即蒸汽比容愈大。通常用符号 v' 和 v'' 分别表示饱和状态下水和蒸汽的比容。

每 1 米³蒸汽所具有的重量叫做重度（也有叫作比重的），所以重度是比容的倒数，用符号“ γ ”表示。显然 $\gamma = \frac{1}{v}$ 公斤/米³。因此压力愈高，蒸汽重度愈大；反之，压力愈低，蒸汽重度愈小。

四、焓

热量的单位是大卡。1 公斤水温度升高 1 °C 所需要的热量称为 1 大卡。水吸收热量之后温度就升高，到达沸腾温度以后再继续吸收热量就汽化成蒸汽。如果从温度 0 °C 作为计算基准点，使水蒸汽达到规定的热力状态参数（压力、温度和干度等）时总共吸收的热量叫做热焓，简称焓。焓的单位是大卡/公斤，用符号“ i ”表示（关于焓的严格的定义，见本章第六节）。

1. 沸水热焓（饱和水焓） i'

将 0 °C 的水加热，使它达到饱和温度（沸点）所需要吸收的热量称为沸水热焓或饱和水焓，用符号“ i' ”表示。沸水热焓随着压力的提高而增加。这是因为压力高，对应的饱和温度也高。因此在较高的压力下，必须加入较多的热量，才能使水升到较高的温度而成为饱和水。各种不同压力下沸水热焓的数值可从附录三水蒸汽饱和状态参数表 i' 项中查得。

2. 汽化潜热 r

水到达饱和温度后，虽继续加热吸收热量，但温度不再增高，始终保持着饱和温度不变，所吸收的热量只是用来把水的分子与分子之间的距离拉开，以便使水变成蒸汽。这部分热量是水汽化的需要。因此把1公斤的饱和水在一定压力下，完全变成相同温度的饱和蒸汽所需要加入的热量称为水的汽化潜热，用符号“ r ”表示。它的单位是大卡/公斤。水的汽化潜热可用实验测定。在不同压力下，水的汽化潜热也不同。压力愈高，水的汽化潜热愈小。这是由于高压蒸汽分子彼此间的距离较近，因此用于将分子间的距离加大所需要的热量也就较小，即需要的汽化潜热较小。各种不同压力下的汽化潜热可从饱和状态参数表 r 项中查得。如1个绝对大气压时，汽化潜热为539.6大卡/公斤；40绝对大气压时，为410.5大卡/公斤；100绝对大气压时为318.0大卡/公斤。

3. 饱和蒸汽热焓 i''

1公斤水从0℃的水全部都变为干饱和蒸汽所需吸收的热量称为干饱和蒸汽热焓，单位也是大卡/公斤，它的数值等于沸水热焓与汽化潜热的和，即：

$$i'' = i' + r, \text{ 大卡/公斤} \quad (1-3)$$

在不同压力下，饱和蒸汽热焓可从水蒸汽饱和状态参数表的 i'' 项中查得。

4. 过热蒸汽热焓 i_g''

在上节中已讲过，在一定压力下把干饱和蒸汽继续加热，就变成过热蒸汽。这一部分热量叫做过热热。因此，过热蒸汽的热焓就等于饱和水热焓、汽化潜热以及过热热之和，或等于干饱和蒸汽热焓与过热热之和。单位也是大卡/公斤。过热蒸汽热焓不仅与压力有关，并且与温度有关。不同压力、温度下的过热蒸汽热焓列于本书附录三的水和过热蒸汽表中。

水蒸汽的性质在热力工程上应用很广泛，但各蒸汽参数之间的关系极为复杂，因此都是根据实验研究和分析方法得到的结果列成表和绘成图以供热工计算应用。给定了蒸汽的两个参数，就可利用水蒸汽表查得其余的一切参数。

饱和蒸汽和过热蒸汽的物理性质有着很大的差别，最主要的是饱和蒸汽的压力和温度不是彼此独立的状态参数，而过热蒸汽的压力和温度是两个独立的状态参数。因此水蒸汽表一般分“饱和状态参数表”和“过热蒸汽表”两种（参见本书附录三）。

对于饱和水和饱和蒸汽，只要知道了压力或温度，即可由饱和蒸汽表中查得它们的热焓 i' 、 i'' ，比容 v' 、 v'' 及汽化潜热 r 等数值。

对于水和过热蒸汽，则需同时已知压力和温度，才能由水及过热蒸汽表中查得它们的热焓 i ，比容 v 的数值。

对于湿饱和蒸汽（即汽水混合物），在已知压力或温度后，尚须知道干度 x ，才能用饱和蒸汽表及简单的计算求得它的热焓、比容等值。计算方法如下：

湿饱和蒸汽的比容 v_x 为，

$$v_x = v''x + v'(1-x) = v' + (v'' - v')x, \text{ 米}^3/\text{公斤} \quad (1-4)$$

湿饱和蒸汽的热焓 i_x 为，

$$i_x = i' + rx, \text{ 大卡/公斤} \quad (1-5)$$

上两式中 v' 、 v'' ——分别为饱和水及干饱和蒸汽的比容，可从水蒸汽饱和状态参数表中查得；

x ——湿饱和蒸汽的干度；

i' ——沸水热焓，可从饱和状态参数表中查得；

r ——汽化潜热，可从饱和状态参数表中查得。

从附录三饱和状态参数表中抽出一些数值，列成如下表 1-1，可以从中得出一些便于记忆的重要规律。

表 1-1 饱和蒸汽性质表

压力, p 公斤/厘米 ² (ata)	饱和温度, t_{bh} (°C)	汽化潜热, r (大卡/公斤)	汽水重度差, $\gamma' - \gamma''$ (公斤/米 ³)
40	249.18	410.5	780.8
100	309.53	318.0	637.8
140	335.10	259.9	540.4
170	350.67	211.5	457.3
200	364.07	151.1	341.9
225.56	374.15	0	0

从表1-1中可见，随着锅炉中压力的提高，饱和温度 t_{bh} 相应增加，汽化潜热 r 却随之减少，饱和水与饱和蒸汽的重度差 $(\gamma' - \gamma'')$ 也随之减小。在压力为225.56公斤/厘米²时，汽化潜热 r 等于零，重度差 $(\gamma' - \gamma'')$ 也等于零。可见在此压力下，水加热到温度为374.15°C时被全部汽化，再加热时即见蒸汽过热，而不再有温度不变的阶段，或者说此点的饱和水与饱和蒸汽已不再有区别。此点叫做水的临界点，相应的各项参数叫水的临界参数，具体数值为，

临界压力 $p_{ij} = 225.56$ 公斤/厘米²

临界温度 $t_{ij} = 374.15$ °C

临界比容 $v_{ij} = 0.00317$ 米³/公斤

临界热焓 $i_{ij} = 503.3$ 大卡/公斤

高于临界压力以上的区域，叫超临界压力区域。在此区域中：汽和水两相就没有明显的界限了，亦即由水加热到过热蒸汽的过程中不再存在汽水混合物的两相共存状态，而是始终只存在或是水或是蒸汽的单相工质了。水蒸汽的上述这些特性对锅炉的热工及水动力工作特性有很大影响，这些将在以后有关章节中深入讨论。

水蒸汽的热力状态也可用图线来表示。用蒸汽状态图来研究其状态变化过程，有时比水蒸汽表直观、方便。对于锅炉中蒸汽发生过程，较有用的是焓-压图和温-焓图。

图1-6所示为水蒸汽的热焓与压力关系曲线。图中曲线AK为饱和水线，BK为饱和蒸汽线，K点即为临界压力点。AK线以下为水区，BK线以上为过热蒸汽区，AKBA包围的区域为湿蒸汽区。压力提高时，饱和水焓 i' 也增加，而饱和蒸汽焓 i'' 则先略增加；在36大气压后，随压力的提高而减小。汽化潜热 $(i'' - i')$ 随着压力的提高而减小，到临界点

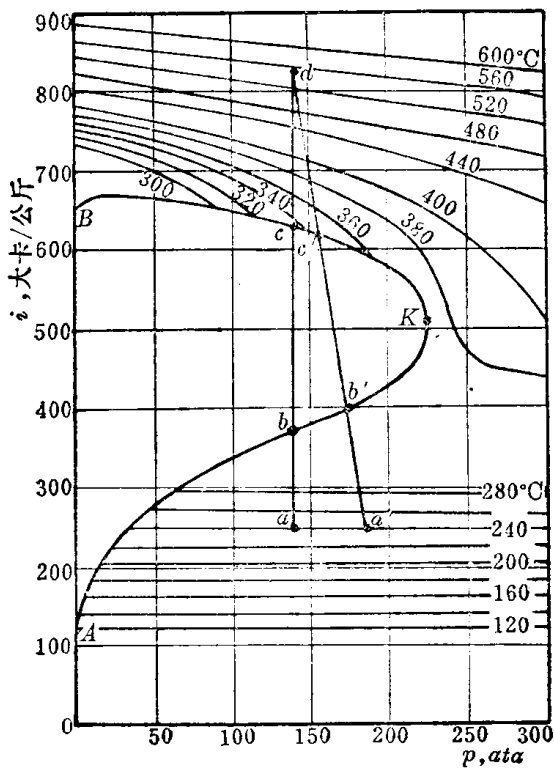


图 1-6 锅炉工质的热焓与压力的关系曲线

中继续被加热成 555°C 的过热蒸汽，即 d 点，相应的过热吸热为 Q_{gr} （等于 $i_d'' - i_c''$ ）。这样在 141 绝对大气压下，将 1 公斤 240°C 的水加热到 555°C 的过热蒸汽，总共吸热为 $Q_j + Q_{zf} + Q_{gr}$ ，最后获得热焓为 829.06 大卡/公斤的过热蒸汽。但在实际上，工质在锅炉中流动时，因为有阻力损失而有压降，因此省煤器进口工质压力不是 141 ata，而是 184 ata。在锅炉中工质的工作过程不是 $a - b - c - d$ ，而是 $a' - b' - c' - d$ 。

图 1-7 所示为水蒸汽的温度-热焓曲线图。图中 $AKBA$ 范围内为湿蒸汽区域， AK 为饱和水线， BK 为饱和蒸汽线。由于压力对水的状态影响甚微，饱和水线上各点亦可相应表征同温度下各不同压力时水的状态。湿蒸汽区域内画有等干度 x 线和等压（水平）线。 BK 线的右边为过热蒸汽区域，该区中斜线为等压线。如在等压下加热时，过热蒸汽状态是沿这些线上升的。

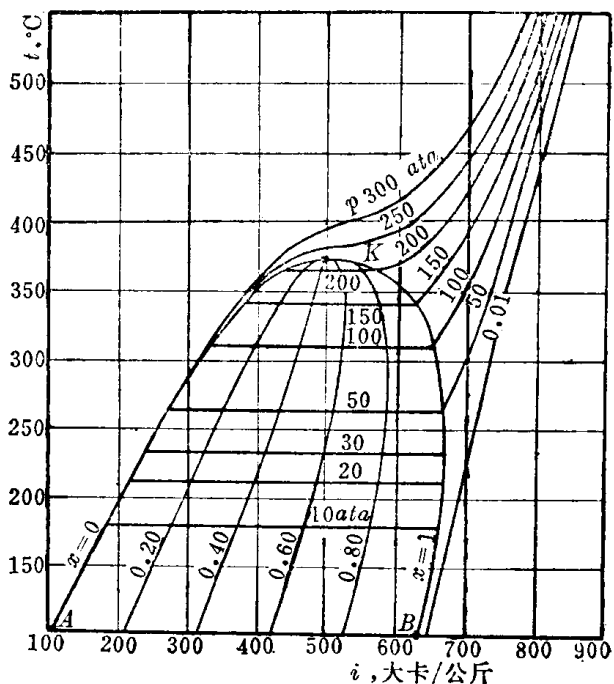


图 1-7 水蒸汽的温-焓图

K 时，汽化潜热等于零。临界压力点 K 的右面即为超临界压力区域了。为便于讨论水蒸汽在锅炉中的状态变化，图中还画有温度从 300°C 到 600°C 的过热蒸汽的焓-压线；在水区中还画有温度从 120°C 到 280°C 水的热力状态曲线。现以 SG-400-140 型直流锅炉为例，说明这台锅炉中水蒸汽热力状态变化在图 1-6 中的表现。锅炉的蒸汽参数为 141 ata、555°C，给水温度为 240°C，则由水加热到过热蒸汽经过了如下过程。如将工质在锅炉中的加热过程近似地视为等压过程、即压力是不变化的，则图中 a 点为工质进锅炉省煤器时的状态，即给水温度 t_{gs} 为 240°C。在省煤器和水冷壁的加热区段水吸收热量 Q_j （等于 $i' - i_{gs}$ ， i_{gs} 为给水热焓），被加热到 b 点成饱和水；然后，饱和水在蒸发区段吸收热量 Q_{zf} （等于汽化潜热 r ），被蒸发成干饱和蒸汽，即 c 点。最后干饱和蒸汽在过热区段

图1-8所示为SG-935-170型直流锅炉中水和蒸汽的状态变化过程，锅炉的过热蒸汽压力为170公斤/厘米²(表压力)，过热蒸汽温度为570℃，再热蒸汽进出口参数为压力35/33公斤/厘米²(表压力)、温度337/570℃，锅炉给水温度为260℃。图中粗线*a*→*l*表示一次汽变化过程，粗线*m*表示二次汽变化过程。

第四节 锅炉管内 水动力学基础

从锅炉受热面管子外燃料的燃烧、烟气的流动以及高温烟气对受热面管壁的传热过程来看，直流锅炉和汽包锅炉没有什么区别；但从受热面管子内工质的流动以及传热过程来看，它们之间特别是沸腾管内的流动特性有很大的差别。为了以后较深入讨论直流锅炉的水动力特性，有必要先介绍一些关于管内水动力学的基本知识。本节中先介绍单相工质（水或蒸汽）的水动力学基础，但一些基本定律如流量连续、能量守恒等定律原则上对双相（汽水混合物）流动亦是适用的，只是具体的数学上的表达式有些不同。关于双相流动的一些特点将在第五节中阐明。

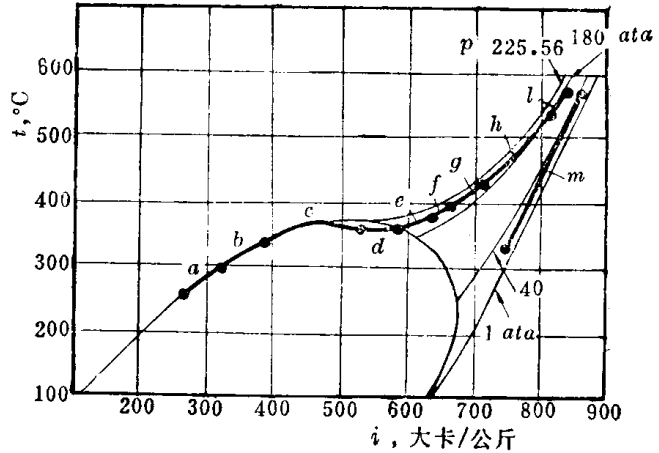


图 1-8 直流锅炉中工质状态变化曲线

a—省煤器；*b*—双面水冷壁；*c*、*d*、*e*—水冷壁（一次垂直上升，二次中间混合）；*f*—炉顶及对流烟道包覆管；*g*—低温对流过热器；*h*—屏式过热器；*l*—高温对流过热器；*m*—再热器

一、流量连续方程

流体（水或蒸汽）流过圆管，如果在图1-9中所示的圆管截面1-1处的平均流速为 w_1 ，截面面积为 f_1 ，该处流体的重度为 γ_1 ，则流体流过该截面的流量为，

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= w_1 f_1, & \text{米}^3/\text{秒} \\ G_1 &= \gamma_1 w_1 f_1, & \text{公斤}/\text{秒} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 w_1 的单位为米/秒， f_1 的单位为米²， γ_1 的单位为公斤/米³。 V_1 称为流体的体积流量，用米³/秒作单位（也有用升/秒作单位的，1米³=1000升）。 G_1 称为流体的重量流量，单位为公斤/秒。（本书中采用的力学单位制为工程单位制，因此 γ 和 G 的单位应分别为公斤力/米³和公斤力/秒，由于目前一些工程书籍上往往习惯把“公斤力”标为“公斤”，本书也从俗，详见本书附录一）。

同上所述，图1-9所示圆管截面2-2处的流量为，

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= w_2 f_2, & \text{米}^3/\text{秒} \\ G_2 &= \gamma_2 w_2 f_2, & \text{公斤}/\text{秒} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 w_2 、 f_2 、 γ_2 分别为该截面处的流体平均速度，截面面积和流体重度。

如流体的流动是稳定的，即各处的流体速度不随时间而变，则根据质量守恒定律，流