



工业锅炉设备

Copyright © 2013 DGUT. Permission required for reproduction or display.

任课教师：张彦佐

Email: zhangyz@dgut.edu.cn

化学工程与能源技术学院
School of Chemical and Engineering and Energy Technology
东莞理工学院
DongGuan University of Technology



2015年6月



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

- 10.1 工业锅炉的启动与停运
- 10.2 锅炉设备的控制任务
- 10.3 锅炉运行调整的任务
- 10.4 汽包锅炉的运行特性
- 10.5 汽压的调整
- 10.6 汽温的调整
- 10.7 燃烧的调整



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

10.1 工业锅炉的启动与停运

10.2 锅炉设备的控制任务

10.3 锅炉运行调整的任务

10.4 汽包锅炉的运行特性

10.5 汽压的调整

10.6 汽温的调整

10.7 燃烧的调整



工业锅炉的启动与停运

- 锅炉由静止状态变成运行状态的过程称为**锅炉启动过程**。
- **停炉**是启动的反过程，即锅炉由运行状态转变为静止状态的过程。



锅炉启动与停运特点

- 锅炉由停止状态转变为运行状态的过程称为**锅炉启动**。包括汽包锅炉的上水或直流锅炉建立启动流量，炉膛吹扫和点火，升温升压直到蒸汽参数达到额定值的过程。
- 锅炉启动的**实质**就是投入燃料对锅炉进行加热，使工质建立循环，产生蒸汽并使其参数不断升高。在启动过程中，锅炉受热面金属的温度不断升高。



- 由运行状态转变为停止状态的过程称为**锅炉停运**。包括减少燃料及蒸发量，投油助燃，炉膛熄火和降压冷却过程。
- 锅炉停运的**实质**就是停投燃料对锅炉进行冷却，蒸汽的流量不断下降，蒸汽参数也相应变化。在停运过程中，锅炉受热面金属的温度是不断下降的。



➤ 锅炉的启动与停运过程是不稳定的变化过程，存在着各种矛盾。

如：减少热应力与提高锅炉加热、冷却速度的矛盾等。

➤ 启动停运技术管理与运行操作就是要正确地处理各种矛盾，遵循安全、经济的原则，实现最完善的启动与停运。

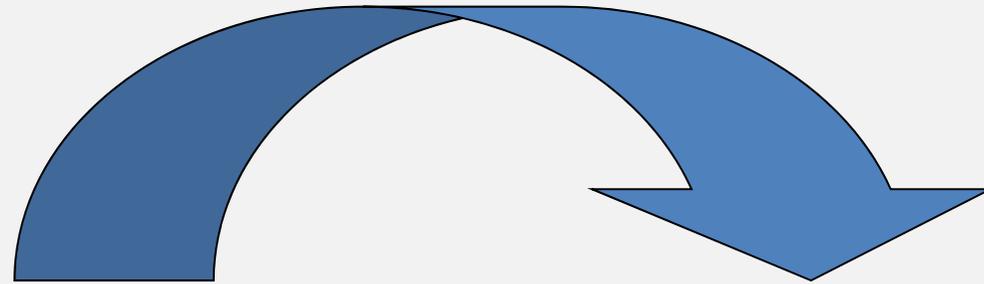


现代大型锅炉启动与停运的质量目标大致有以下几项：

- 缩短启动与停运过程的时间，以适应机组承担的负荷性质的要求；
- 燃烧稳定，燃烧热损失少，避免燃烧事故；
- 蒸汽流量与蒸汽参数要满足汽轮机冲转、升速、并网和带负荷的要求；
- 锅炉各级受热面金属的工作温度不超过其材料的许用温度；
- 汽包等厚壁部件温升均匀，减少寿命损耗；
- 炉水品质与给水品质合格，防止锅内腐蚀和盐分对阀门管道与汽轮机叶片的侵蚀；
- 工质和热量排放少，并最大可能地回收工质和热量；
- 技术指令和运行操作正确无误。



锅炉的启动与停运方式



- **热态启动**----锅炉还保持有一定表压，温度高于环境值情况下的启动。
- **冷态启动**----锅炉在没有表压，其温度和环境温度相近情况下的启动。



锅炉启动方式

冷态启动和热态启动

- 冷态启动是指锅炉启动开始时没有压力，锅炉温度与环境相接近条件下的启动。（新建锅炉、检修后的锅炉和长期备用后的锅炉）；
- 锅炉较短时间内停用，内部保持一定压力和温度状态下的启动称为热态启动。
- 热态启动又可以进一步划分为温态启动、热态启动和极热态启动三种。



表10-1 锅炉的启动分类

状态	停炉时间	汽包工作状态
冷态	48小时以上	压力 $P < 0.5\text{MPa}$; 炉水温度 $t < 150^\circ\text{C}$
温态	48小时以内	压力 $P > 0.5\text{MPa}$; 炉水温度 $t > 150^\circ\text{C}$
热态	8小时以内	压力 $P > 2\text{MPa}$; 炉水温度 $t > 211^\circ\text{C}$
极热态	2小时以内	压力 $P > 4\text{MPa}$; 炉水温度 $t > 211^\circ\text{C}$



恒压启动和滑参数启动

- **恒压启动**（又称顺序启动）常用于母管制系统，在恒压启动时，先启动锅炉，待锅炉参数达到或接近额定值时，再启动汽轮机。单元制锅炉机组均采用滑参数启动。
- **滑参数启动**（机炉联合启动）就是在启动锅炉的同时，启动汽轮机，汽轮机在蒸汽参数逐渐升高的情况下完成暖管、冲转、暖机、升速和带负荷，因此称为滑参数启动。同时，由于汽轮机冲转和带负荷是在蒸汽参数较低的情况下进行的，又称为低参数启动。



电站自然循环锅炉的冷态启动过程

- **点火准备**工作完成之后，开始**点火**；
- 随后蒸发受热面内的介质被加热到沸腾过程，而过热器和再热器暂时仍处于干烧状态
- **沸腾**一开始，蒸发受热面内产生蒸汽，导致系统内的压力上升，但关闭着的高压旁路和汽轮机的主汽门阻止了蒸汽的输出，过热器和再热器仍未被冷却，积存在冷的区域内的蒸汽要发生冷凝。
- 当锅炉出口达到规定的压力界限时，**高压旁路阀开启**，过热器开始得到冷却，然后蒸汽再流向再热器。
- 在蒸汽再流入再热器之前，分出一部分蒸汽**送到高压加热器或除氧器**去，只有达到低压旁路压力界限之后，才可调节再热器的蒸汽流量。
- 继续提高燃烧器的功率，蒸汽的流量和蒸汽温度逐步上升，直至可以**冲转汽轮机并带满负荷**。



锅炉停运方式

热备用停运和非热备用停运

- 热备用停运是指停止向汽轮机供热和锅炉熄火后，关闭锅炉主蒸汽阀和烟气侧的各个门孔，进入热备用状态。
- 非热备用停运包括冷备用停运和检修停运。冷备用停运的最终状态是彻底冷却后放尽炉水，进行保养；检修停运则是冷却后放尽炉水，进行检修。



➤ 正常停运和故障停运

正常停运（检修、备用）

故障停运（事故停运）

➤ 额定参数停运和滑参数停运

额定参数停运（又称高参数停运），是指在机组停运过程中汽轮机前蒸汽的**压力和温度**不变或基本不变的停运。如果机组是短期停运，进入热备用状态，可用额定参数停运，因为锅炉熄火时蒸汽的温度和压力很高，有利于下一次启动。

滑参数停运（机炉联合停运）是在整个停运过程中，锅炉负荷及蒸汽参数的降低按照汽轮机要求进行，待汽轮机负荷快减完时，蒸汽参数已经很低，锅炉即可停止燃烧，进入冷却阶段。



锅炉的停用保护

当锅炉停止运行后，进入冷备用或检修状态，如保护不当会发生金属腐蚀（水中溶解氧或漏入空气造成的氧化腐蚀），称为**锅炉停用腐蚀**。锅炉停用期间为防止锅内金属腐蚀而采取的措施称为**停用保护**。

保护方法应当简便、有效和经济，并能适应运行的需要，使锅炉在较短时间内就可投入运行。



加热冲压法

1~10天短期备用锅炉可采用加热充压法进行保护。其方法是在锅炉停炉后降压至0.3MPa，关闭排气门和疏水门，锅炉压力在0.3MPa以上，压力不足时应点火升压或炉底蒸汽辅助加热。在加热充压备用期间，每天取样炉水和蒸汽进行化验，要求含氧量 $\leq 15 \mu\text{g}/\text{kg}$ ；每周化验炉水含铁量一次，要求炉水含铁量 $\leq 30 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。水质不合格时可用加热放水法除氧，或通过炉底放水除铁。



热炉放水烘干法

- 冷备用停炉时间较长或检修停炉可采用热炉放水烘干法。
- 采用热炉放水烘干法长期备用时应 在汽包、联箱内放置吸水硅胶布袋，吸取锅内潮气，每月检查一次。



抽真空干燥法

- 抽真空干燥法是与热炉放水烘干法配合进行的一种方法。它在锅炉停炉后，先按热炉放水烘干法要求进行操作，紧接着再在汽水系统辅以抽真空操作，以降低锅炉存在的汽化温度，使潮气迅速抽至系统外，进一步提高了烘干效果。抽真空干燥法的负压由抽气器抽空气形成，负压一般大于**50kPa**。



氨及联氨浸泡法

- 联氨 (N_2H_4) 是较强的还原剂，联氨与水中的氧或氧化物作用后，生成无腐蚀性的化合物，从而达到防腐的目的。加氨的作用是调节水的pH值，使水保持一定的碱性，同时应在未冲水的部位充进氮气，并保持一定的气压，以防止空气漏入。
- 氨及联氨浸泡法是将锅炉内存水放尽，开启空气门，其余阀门全关；用给水系统将氨及联氨标准溶液灌满锅炉内，标准溶液由加药泵把氨及连氨注入给水系统，其联氨浓度为 **100 ~ 150mg/kg**，并用氨调整给水的 **pH=10.2**；每隔三天取样化验炉水溶液，当浓度低于标准值时应补充加药。使用氨及联氨浸泡法时应注意与仪表等铜质元件隔离。



冲氮法

- 当锅炉内部充满氮气并保持适当压力时，空气便不能漏入，可以防止氧气与金属接触，从而避免腐蚀，该方法在冬季也比较适用。
- 汽轮机停止后，锅炉烘干，开启汽包充氮，锅炉放水，开主蒸汽管充氮门，进行充氮定期检测氮气纯度，当氮气纯度下降时，应进行排气，并开大充氮门，直至氮气化验合格为止。



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

10.1 工业锅炉的启动与停运

10.2 锅炉设备的控制任务

10.3 锅炉运行调整的任务

10.4 汽包锅炉的运行特性

10.5 汽压的调整

10.6 汽温的调整

10.7 燃烧的调整



锅炉机组的组成部件

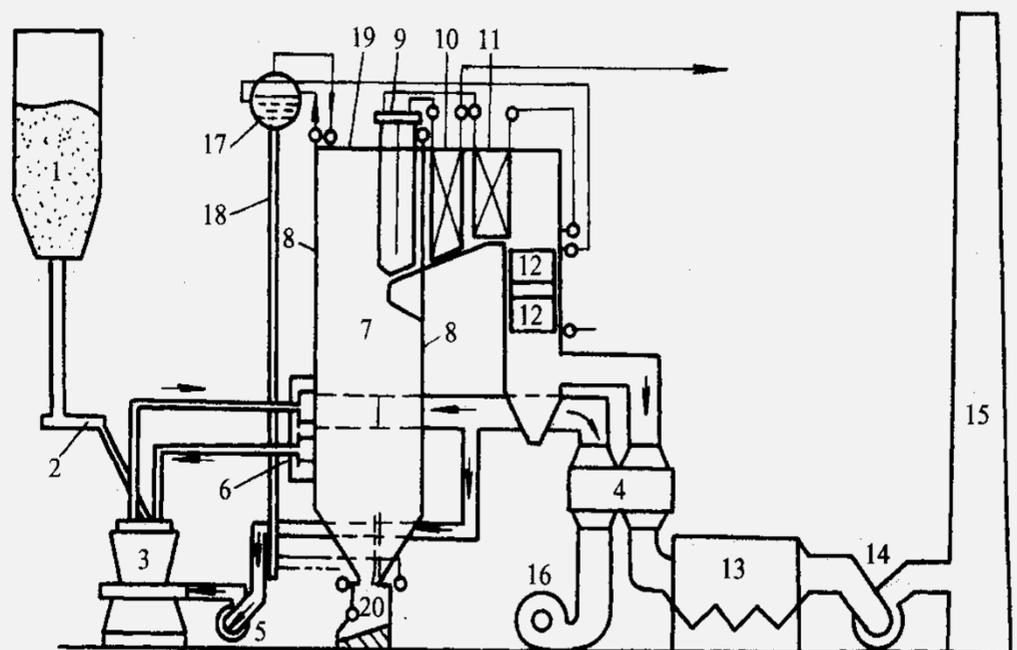


图 1-1 锅炉机组的工作过程示意

- 1—煤斗；2—给煤机；3—磨煤机；4—空气预热器；5—排粉风机；6—燃烧器；7—炉膛；8—水冷壁；
 9—屏式过热器；10—高温过热器；11—低温过热器；12—省煤器；13—除尘器；14—引风机；
 15—烟囱；16—送风机；17—锅筒；18—下降管；19—顶棚过热器；20—排渣室

锅炉机组的组成部件分为两部分，即**本体设备和辅机设备**



锅炉设备的主要工艺流程

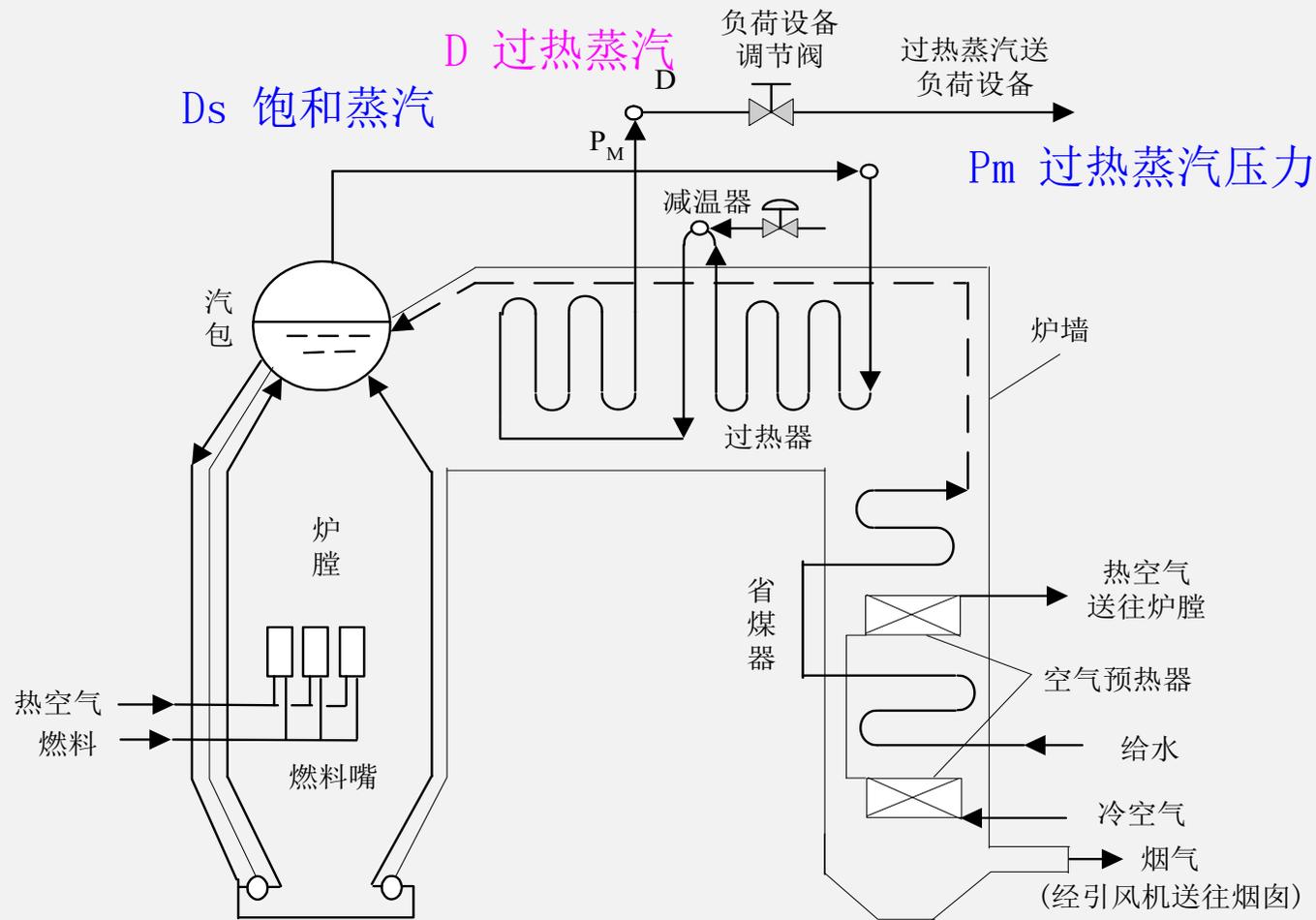
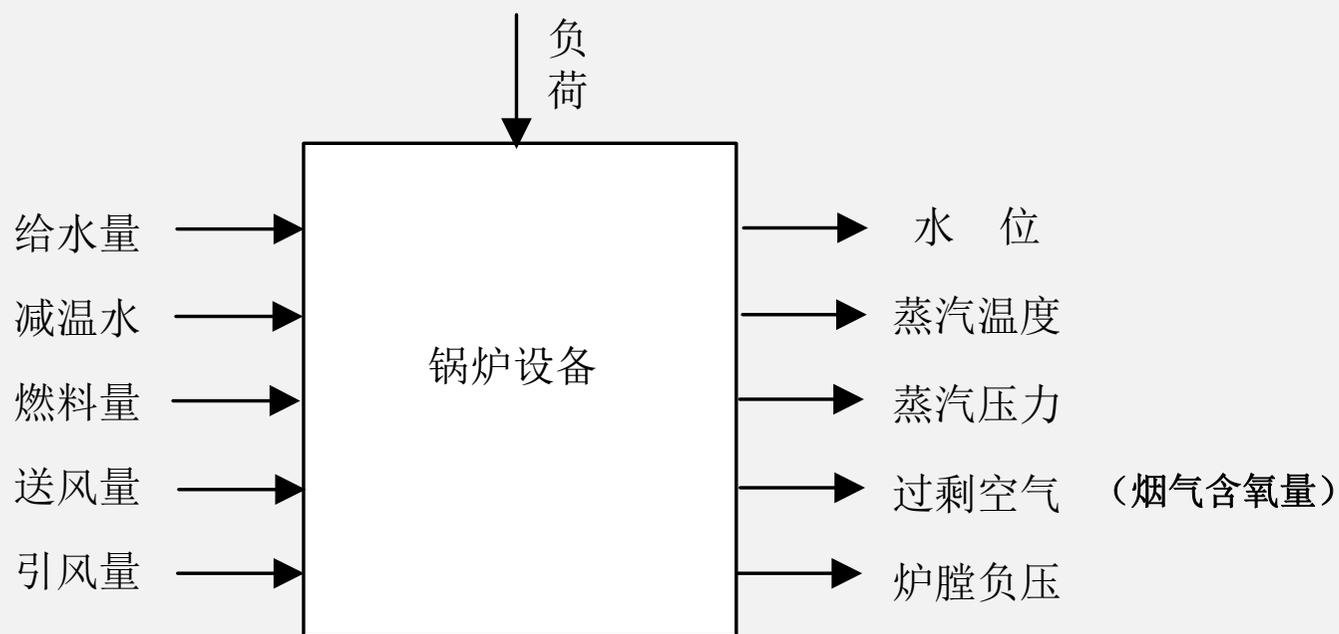


图10-2 锅炉设备主要工艺流程图



锅炉设备的控制

控制任务：根据生产负荷的需要，供应一定压力或温度的蒸汽，同时要使锅炉在安全、经济的条件下运行。



可见，锅炉设备是一个多输入、多输出且相互关联的控制对象。



锅炉设备的控制任务是根据生产负荷的需要，供应一定压力或温度的蒸汽，同时要使锅炉在安全、经济的条件下运行。按照这些控制要求，锅炉设备设计的主要的控制系统为：

①锅炉汽包水位控制

被控变量是汽包水位，操纵变量是给水流量。它主要是保持汽包内部的物料平衡，使给水量适应锅炉的蒸汽量，维持汽包中水位在工艺允许的范围内。这是保证锅炉、汽轮机安全运行的必要条件，是锅炉正常运行的重要指标。



②锅炉燃烧系统的控制

有3个**被控变量**：蒸汽压力(或负荷)、烟气成分(经济燃烧指标)和炉膛负压。可选用的**操纵变量**也有3个：燃料量、送风量和引风量。

组成的燃烧系统的控制方案要满足以下作用：

- 燃烧所产生的热量，适应蒸汽负荷的需要；
- 使燃料与空气量之间保持一定的比值，保证燃烧的经济性和锅炉的安全运行；
- 使引风量与送风量相适应，保持炉膛负压在一定范围内。



③过热蒸汽系统的控制

被控变量为过热蒸汽温度，操纵变量为减温器的喷水量。使过热器出口温度保持在允许范围内，并保证管壁温度不超出工艺允许的温度。

④锅炉水处理过程的控制

这部分主要使锅炉给水的性能指标达到工艺要求，一般采用离子交换树脂对水进行软化处理。通常应用程序控制，确保水处理和树脂再生正常交替运行。

表10-2汇总了锅炉设备主要控制系统。



表10-2： 锅炉设备的主要控制系统

控制系统	被控变量	操作变量	控制目的
锅炉汽包水位 控制系统	锅炉汽包水位	给水流量	锅炉内生产的蒸汽 和给水的物料平衡
锅炉燃烧 控制系统	蒸汽压力 烟气成（含氧量） 炉膛负压	燃料流量 送风流量 引风流量	蒸汽负荷的平衡 燃烧的完全和经济性 锅炉运行的安全性
过热蒸汽 控制系统	过热蒸汽温度	喷水流量	过热蒸汽的温度和安全性



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

- 10.1 工业锅炉的启动与停运
- 10.2 锅炉设备的控制任务
- 10.3 锅炉运行调整的任务**
- 10.4 汽包锅炉的运行特性
- 10.5 汽压的调整
- 10.6 汽温的调整
- 10.7 燃烧的调整



锅炉机组运行概述

锅炉运行特点及任务

采用单元机组的运行方式：调节任务在锅炉，汽轮机侧重于监视，而电气则主要是与外界电力系统的联系和维护厂用电的正常。

锅炉运行调整的任务

锅炉运行调整的任务就是要根据用户（汽轮机）的要求，保质（压力、温度和蒸汽品质）、保量（蒸发量）并适时地供给汽轮机所需要的过热蒸汽，同时锅炉机组本身还必须做到安全与经济。



➤ 系统中的机组分为三大类：

一是担负**基本负荷**的机组，其锅炉长期在经济负荷和满负荷之间运行，干扰少，效率高，运行稳定，其经济性、安全性指标都有较高的要求。

二是担负**中间负荷**的机组，锅炉符合承担变负荷的特点，如能快速启停，工况调节灵敏稳定，负荷变化率大，负荷控制范围与允许范围宽等。

三是担负**尖峰负荷**的机组，其锅炉要求在非常短的时间内启动，具有高度的灵活性。



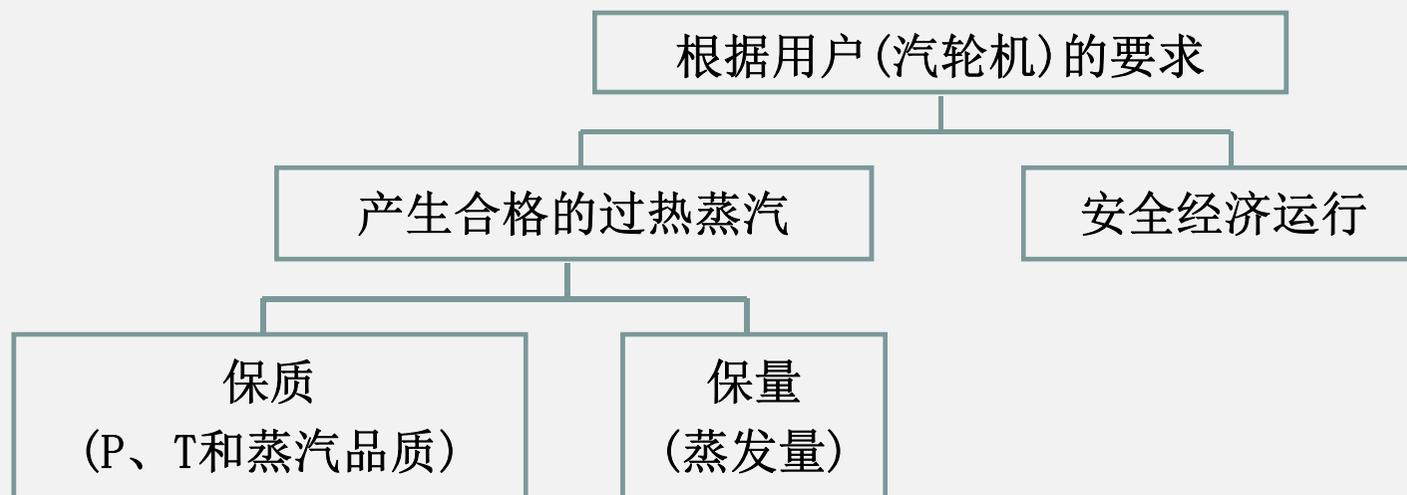
- 负荷控制范围指机组在自动控制系统的作用下能适应负荷变化的范围，在这个负荷范围内不需人工参与调节。
- 在负荷控制范围内，蒸汽参数在稳定工况时稳定在额定值的允许偏差范围内，在负荷变化过程中有良好的蒸汽参数变化特性，调节过程中的蒸汽参数偏离额定值在允许范围内，并能快速完成调节任务。
- 总之，锅炉机组在运行时总是处于不断变化调整中，运行人员要随时监视其运行情况，能及时地、正确地进行调整操作。



运行调整的任务



锅炉运行调整的任务





运行调整的任务

锅炉运行调整的主要内容

- 使锅炉的蒸发量适应外界负荷的需要；
- 均衡给水并维持汽包的正常水位；
- 保持锅炉汽压和汽温在正常的范围内；
- 保持炉水和蒸汽品质合格；
- 维持经济燃烧，尽量减少热损失，提高锅炉机组的热效率。



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

- 10.1 工业锅炉的启动与停运
- 10.2 锅炉设备的控制任务
- 10.3 锅炉运行调整的任务
- 10.4 汽包锅炉的运行特性**
- 10.5 汽压的调整
- 10.6 汽温的调整
- 10.7 燃烧的调整



汽包水位的控制与调整

- 当汽包水位**过高**时，由于汽包蒸汽容积和空间高度减小，蒸汽携带锅水将增加，因而蒸汽品质恶化，容易造成过热器积盐垢，引起管子过热损坏；同时盐垢使热阻增大，引起传热恶化，过热汽温降低。汽包严重满水时，除引起汽温急剧下降外，还会造成蒸汽管道和汽轮机内的水冲击，甚至打坏汽轮机叶片。
- 汽包水位**过低**，则可能破坏水循环，使水冷壁管的安全受到威胁。如果出现严重缺水而又处理不当，则可能造成水冷壁爆管。
- 自然循环锅炉的汽包水位，一般定在汽包中心线下**50~150mm**范围内，容许变动范围为**± 50mm**。



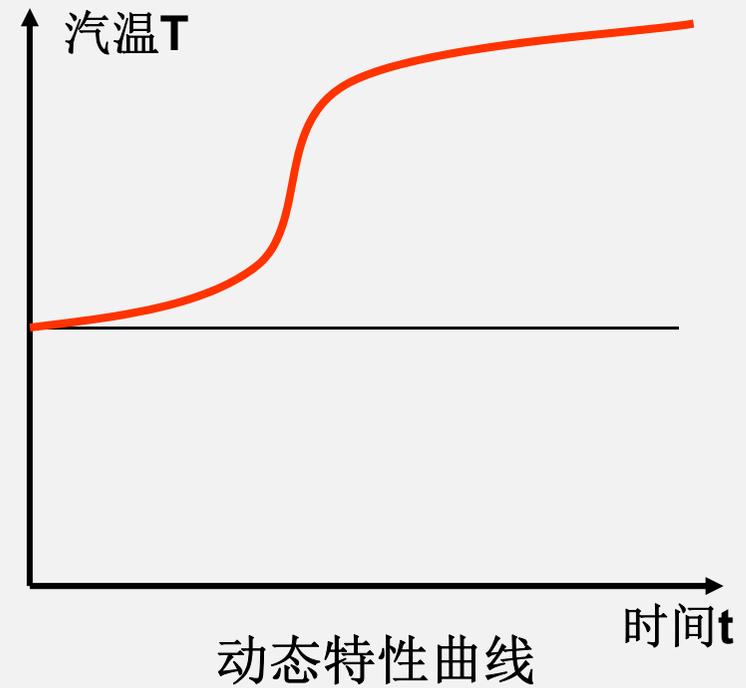
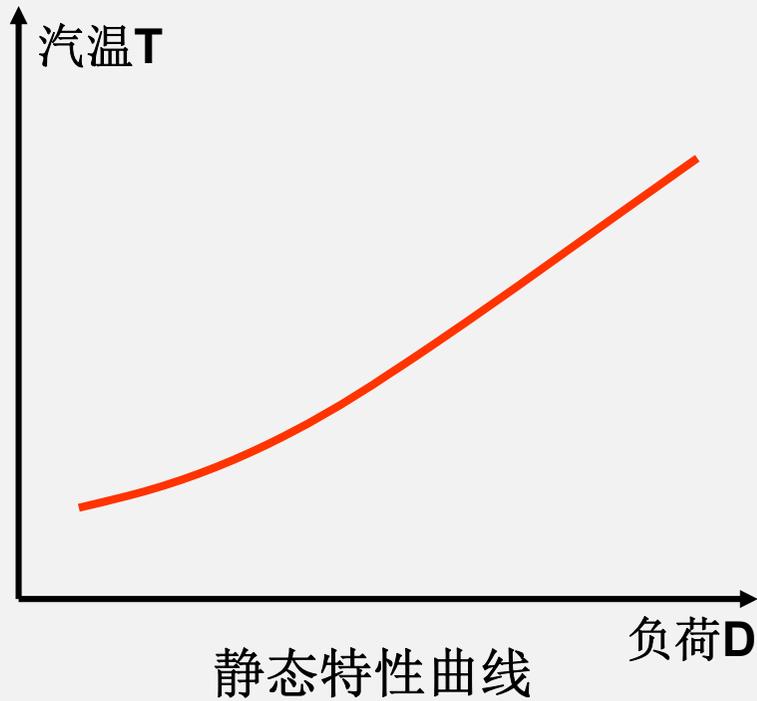
汽包锅炉的运行特性

- 运行特性的概念
- 静态特性分析
- 动态特性分析



运行特性的概念

- 运行工况：锅炉运行条件的集合称为工况。（通过一系列工况参数来反映）
- 稳定工况：锅炉运行中工况参数一直保持不变的工况。
- 变工况：锅炉运行中一个或几个参数偏离设计值时的工况。
- 最佳运行工况：锅炉效率达到最高值时的稳定工况。
- 静态特性：当锅炉从一个工况变化到另一个工况时，相应参数之间的变化关系。
- 动态特性：锅炉从一个工况变化到另一个工况时各个参数随时间的变化关系。



注意： 静态过程重在描述变化的结果
动态特性重在描述变化的过程

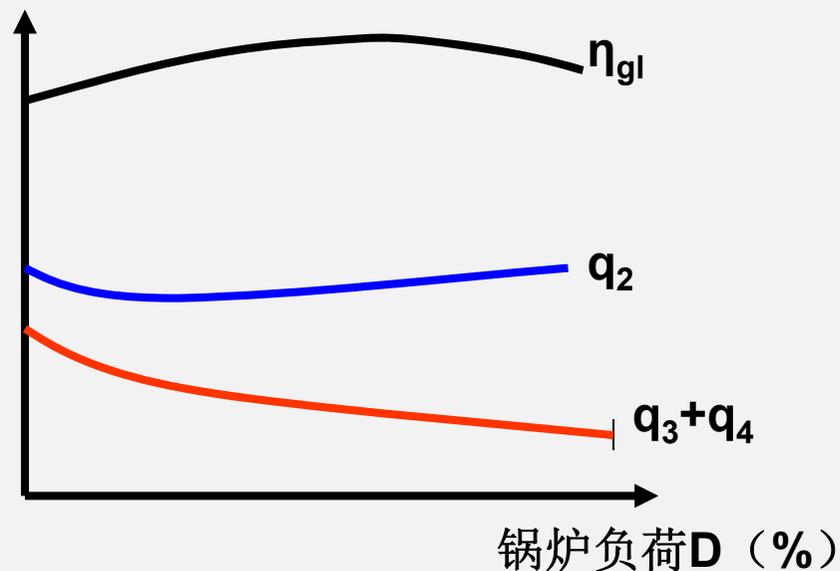


锅炉的静态特性分析

- 锅炉负荷的变动
- 给水温度的变动
- 过量空气系数的变动
- 煤质的变动



对锅炉效率的影响



说明:

- ◎ 随着负荷的增加，炉膛内温度水平升高，燃烧效率提高，
(q_3+q_4) 减小；
- ◎ 当燃料量增加时，排烟温度稍有增加，即 q_2 增大；

所以：存在一个锅炉效率最高的负荷，称为“经济负荷”



对燃料消耗量的影响

$$B = \frac{D(h_{gr}'' - h_{gs})}{\eta_{gl} Q_r}$$

说明：

- ◎ 在经济负荷以下时，燃料增加比 B_2/B_1 略小于负荷增加比 D_2/D_1 ；
 - ◎ 在经济负荷以上时，燃料增加比 B_2/B_1 略大于负荷增加比 D_2/D_1 ；
- 所以： B_2/B_1 随 D_2/D_1 变化不大，可粗略认为B随D呈正比增减。



对锅炉传热的影响

◎ 对辐射传热的影响

随锅炉负荷的增加，炉内温度升高，炉内总的辐射传热量增加，但是对于1kg燃料来讲，单位负荷的辐射传热量却减少了；

◎ 对对流传热的影响

随锅炉负荷的增加，炉膛出口温度的升高使对流受热面的传热温差增大，同时燃料量的增加使烟气流量增大、烟气流速增加、对流受热面的传热系数也增大，所以锅炉总的对流传热增大，而单位负荷的对流传热量也增大。



给水温度的变动

➤ 对锅炉蒸发量的影响

给水温度降低，锅炉蒸发量减小

➤ 对燃料消耗量的影响

给水温度降低，燃料消耗量增大

➤ 对炉膛出口烟温和排烟温度的影响

给水温度降低，炉膛出口烟温升高，排烟温度降低

➤ 对单元机组经济性的影响

给水温度降低， q_2 的减小不能抵消**B**增加的损失和凝汽器

➤ 冷源损失的增加



过量空气系数的变动

✿ 送风量改变（即炉膛出口过量空气系数改变）

◎ 炉膛出口过量空气系数对烟温和传热的影响

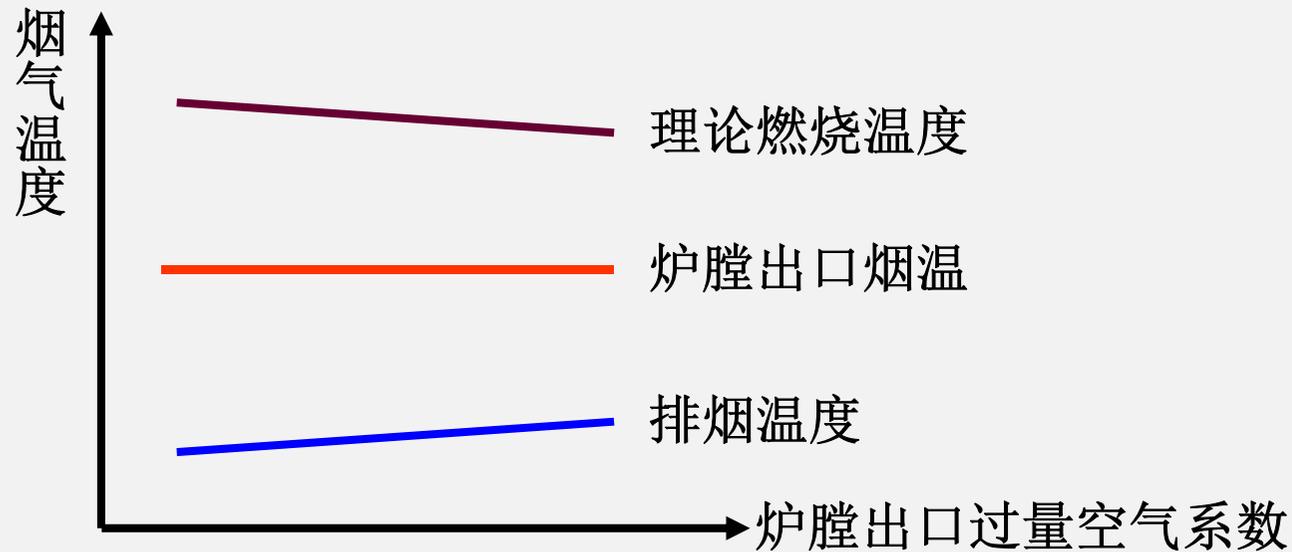
◎ 炉膛出口过量空气系数对锅炉效率的影响

✿ 漏风量改变（与漏风点位置有关）

◎ 燃烧器和炉膛下部漏风，理论燃烧温度降低，炉内传热减少，如果漏风过大，可能危及燃料的着火和稳定燃烧，并降低炉膛出口烟气温度。

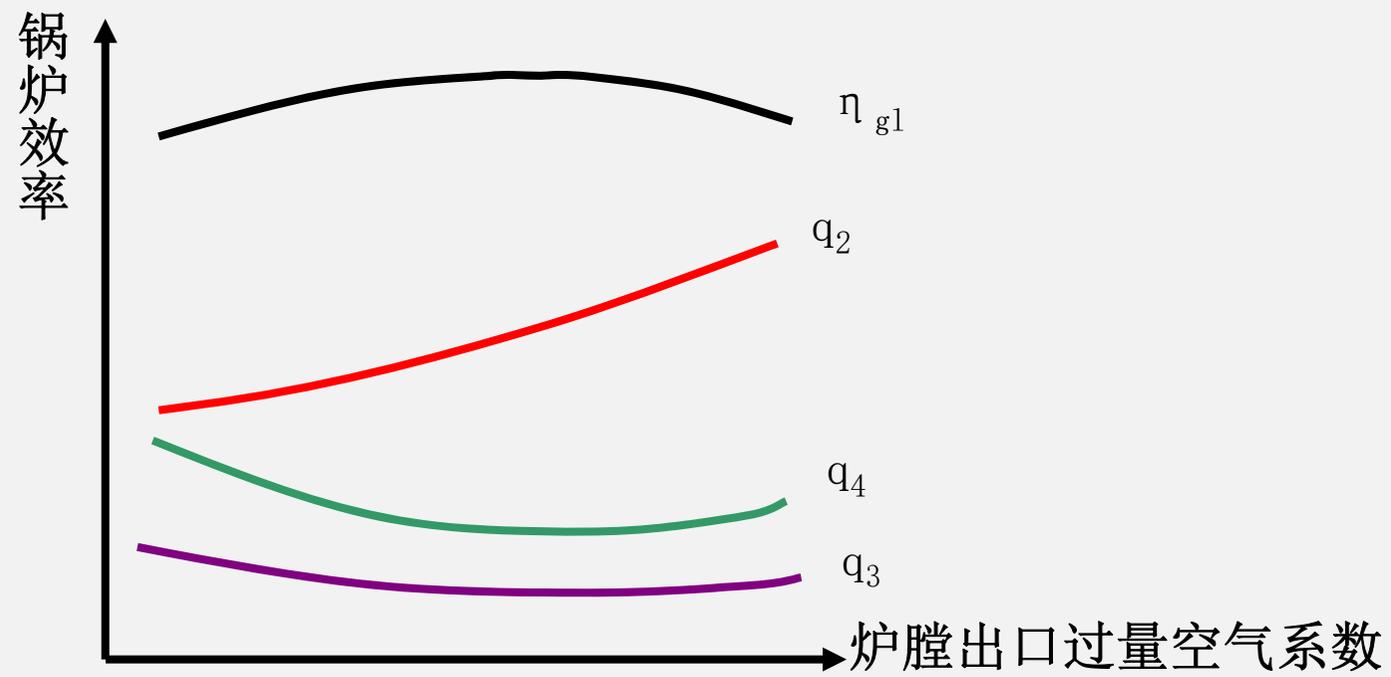
◎ 炉膛上部漏风，对燃料着火与燃烧及炉内辐射传热影响较小，但对炉膛出口烟温降低作用较大。

◎ 对流烟道的漏风，将降低漏风点及以后烟道的烟温，受热面吸热减少，锅炉效率降低。



说明:

- ◎ 当过量空气系数增加时，风量的增大使理论燃烧温度有所降低（即炉膛火焰中心的最高温度水平）；
- ◎ 火焰的黑度下降，火焰中心上移，使炉内的辐射传热有所减弱，故炉膛出口烟温变化不大；
- ◎ 烟气流量增大，对流传热系数增加，使烟道的对流传热增强，排烟温度有所升高。





煤质的变动

✿ 发热量的变动

当燃用低发热量煤时，燃料消耗量增大，烟气量增多，对流传热增强，汽温升高；燃烧器区域温度水平下降，燃烧损失增大

✿ 灰分的变动

灰分增大时，保持蒸发量不变，则必须增加燃料的消耗量； q_4 损失可能增大，锅炉热效率会稍有降低；会加剧对流受热面的磨损，并容易造成积灰甚至堵灰。

✿ 水分的变动

水分增加时，低位发热值显著降低；着火热增加；未完全燃烧损失增加；排烟损失的增大。



锅炉的动态特性分析

动态特性是热工对象从一个平衡态到另一个平衡态的过渡特性。对锅炉来说，是指锅炉在受到扰动时，各个参数随时间的变化规律。对运行人员掌握锅炉变工况下的调节规律、分析处理异常工况很有意义。

- 汽压的动态特性
- 水位的动态特性



汽包水位的动态特性分析

- 被控变量：汽包水位，用 $H(s)$ 表示
- 控制变量：汽包给水量，用 $G(s)$ 表示
- 主要干扰：
蒸汽负荷（蒸汽流量），用 $D(s)$ 表示
- 通道对象：
非自衡、非最小相位和非线性等特性



①控制通道的特性

即汽包水位在给水流量 w 作用下的动态特性。

表面上汽包对象是单容量无自衡的对象，水位阶跃响应曲线将如图3中的 H_1 线。

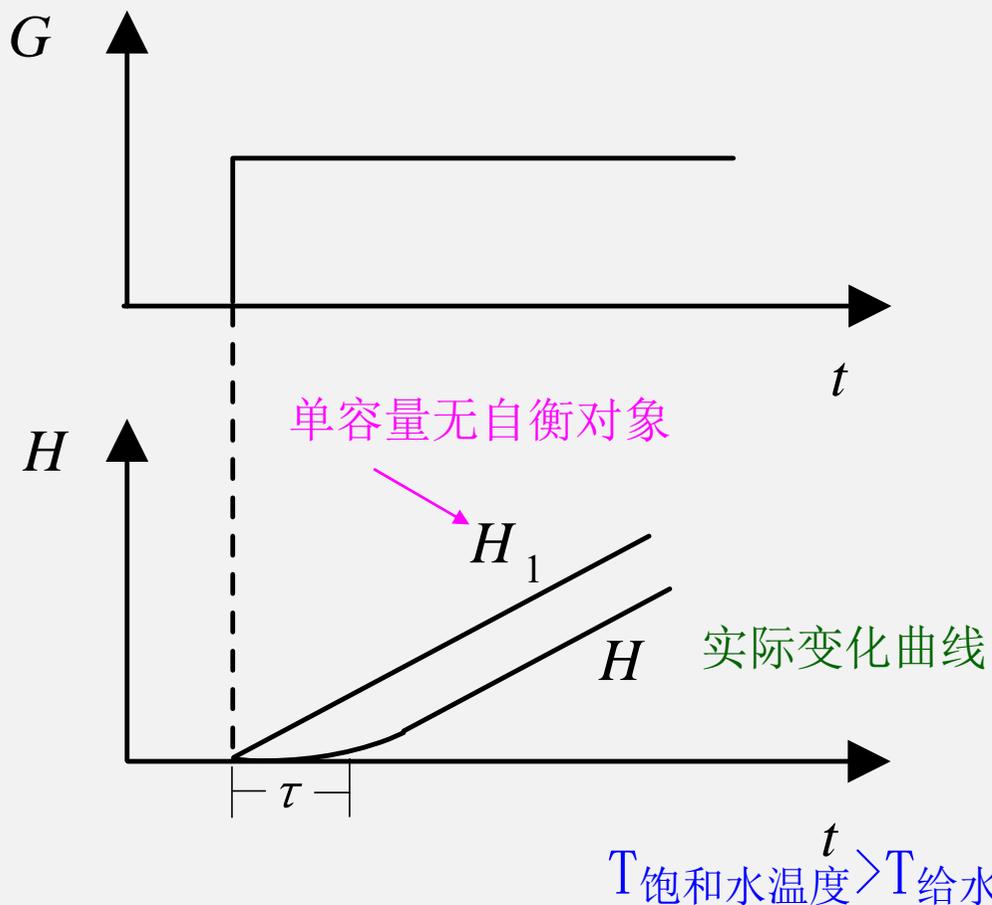


图3 给水流量作用下水位变化阶跃响应曲线



实际上，给水温度要比汽包内饱和水的温度低，所以给水流量增加后，需从原有饱和水中吸取部分热量，那么汽包中的温度会降低，将使汽包水位下的**小气泡**体积减少，甚至破裂。新加入的水用于填补小气泡破裂造成的空间这基本上抵消了给水量的增加。**只有当水位下小气泡容积的变化过程逐渐平衡时，这时水位才会因汽包中储水量的增加而上升。**最后当水位下小气泡下容积不再变化时，水位变化就完全反映了因储水量的增加而直线上升。

所以在给水量作阶跃变化后，汽包水位不马上增加，而呈现一段起始惯性段。



用传递函数来描述时，它近似于一个积分环节和纯滞后环节的串联，可表示为：

$$\frac{H(s)}{G(s)} = \frac{K_0}{s} e^{-\tau s} \quad (1)$$

其中： K_0 —飞升速度，即给水流量变化单位流量时水位的变化速度，(mm/s)/(t/h)中；

τ —纯滞后时间。

给水温度越低，纯滞后时间 τ 越大。通常 τ 在5~100s之间。如采用省煤器，则由于省煤器本身的延迟，将使 τ 增加到100~200s之间。



② 干扰通道的动态特性

即汽包水位在蒸汽流量扰动下的动态特性。

当蒸汽流量 D 突然增加，在燃料量不变的情况下，如果单纯考虑锅炉的物料平衡关系的话，由于这时蒸汽量 D 大于给水量 W ，水位变化应如图4中的曲线 H_1 。

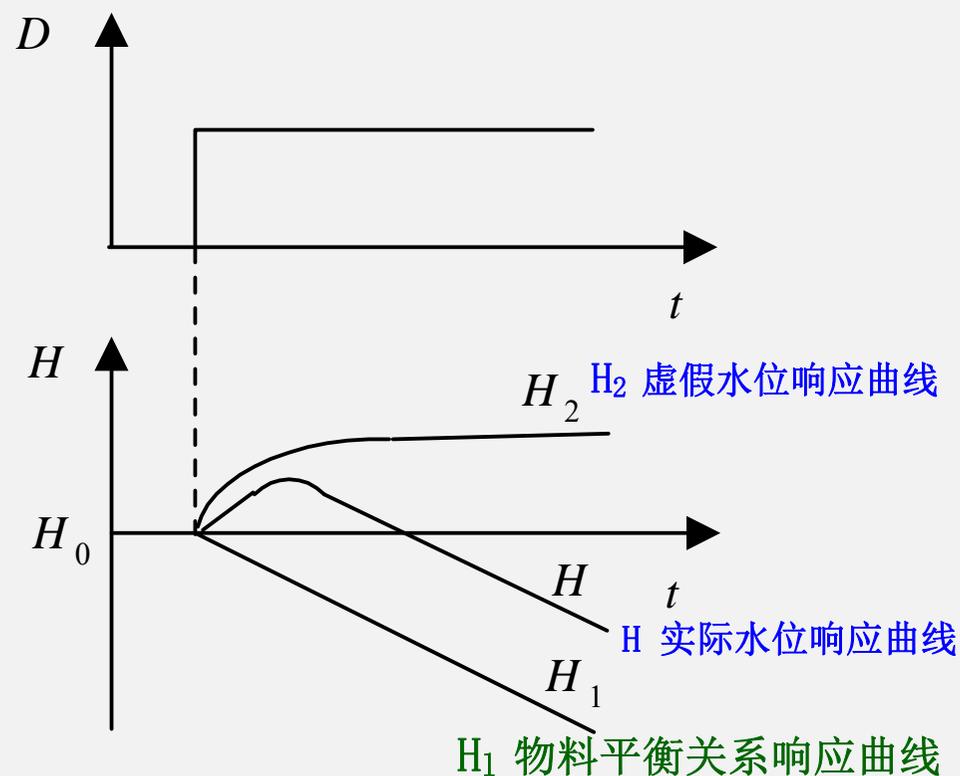


图4蒸汽流量扰动作用下水位变化阶跃响应曲线



但**实际情况**并非如此，由于蒸汽用量突然增加，瞬间必导致汽包压力的下降。压力下降会是汽包内水沸腾突然加剧，产生闪蒸，水中小气泡迅速增加，因小气泡容积增加，而使水位变化的曲线如图4中的 H_2 。

而实际显示的水位响应曲线 H 为 H_1 与 H_2 的叠加，即：

$$H = H_1 + H_2 \text{ 。}$$



从图中可以看出，当蒸汽量加大时，虽然锅炉的给水量小于蒸发量，但在一开始，水位不仅不下降反而迅速上升，然后再下降；反之，蒸汽流量突然减少时，则水位先下降，然后上升。这种现象称之为“**虚假水位**”。



蒸汽流量扰动时动态特性可用传递函数表示为：

$$\frac{H(s)}{D(s)} = \frac{H_1(s)}{D(s)} + \frac{H_2(s)}{D(s)} = -\frac{K_f}{s} + \frac{K_2}{T_2s + 1} \quad (2)$$

式中 K_f —飞升速度，即在蒸汽流量变化单位流量时水位的变化速度， $(\text{mm/s})/(\text{t/h})$ ；

K_2 —响应曲线 H_2 的放大系数；

T_2 —响应曲线 H_2 的时间常数。

虚假水位的变化大小与锅炉的工作压力和蒸发量等有关。对于一般100~300t/h的中高压锅炉，当负荷变化10%时，虚假水位可达30~40mm。虚假水位现象属于反向特性，在控制方案设计时必须引起注意。



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

- 10.1 工业锅炉的启动与停运
- 10.2 锅炉设备的控制任务
- 10.3 锅炉运行调整的任务
- 10.4 汽包锅炉的运行特性
- 10.5 汽压的调整**
- 10.6 汽温的调整
- 10.7 燃烧的调整



汽压的调整

- 控制汽压的意义
- 影响汽压变化的主要因素
- 影响汽压变化速度的因素
- 汽压的调节



控制汽压的意义

✿ 汽压降低

减少蒸汽在汽轮机中膨胀做功的焓降，使汽耗增大；汽轮机的轴向推力增加容易发生推力瓦烧坏等事故；汽压过低甚至会使汽轮机被迫减负荷运行，影响正常发电。

✿ 汽压过高

机械应力过大，将危及机、炉和蒸汽管道的安全运行；安全门动作会造成大量的排汽损失，而且由于磨损和污物沉积在阀座上，也容易产生关闭不严，造成经常性的泄漏损失，严重时还需停炉检修；安全门的动作会引起汽包水位发生较大的波动，并影响送往汽轮机的蒸汽品质，若调节不当或误操作，也容易引起满水或缺水事故。

✿ 汽压变化对汽温的影响

汽压升高时，过热蒸汽温度也要升高。（燃料量没改变时蒸发量将减少）



控制汽压的意义

✿ 汽压变化速度对锅炉的影响

- ✦ 汽压的突然变化，例如外界负荷突然增加使汽压突然降低、使蒸汽品质恶化且过热汽温降低。
- ✦ 汽压的急剧变化，还可能影响锅炉水循环的安全性。
- ✦ 汽压经常反复地变化，使锅炉承压受热面金属经常处于交变压力的作用下，可能导致受热面发生疲劳损坏。



影响汽压变化的主要因素

汽压变化的实质: 锅炉产汽量与汽轮机需汽量之间的物质平衡

$$D_j = D_q$$

外扰: 即外界负荷 D_j 的变化 (汽轮机调速汽门开度的变化)

D_j 增加时, P 降低

内扰: 即锅炉内部工况的变化 (燃烧工况和受热面的热交换)

燃烧增强时, 产汽量 D_q 增多, 汽压 P 升高

水冷壁污染, 产汽量 D_q 减少, 汽压 P 降低

外扰和内扰得判据: 蒸汽压力 P 和蒸汽流量 D 的变化方向

变化方向相反 — 外扰
变化方向相同 — 内扰



影响汽压变化速度的因素

✿ 负荷变化速度

负荷变化速度是影响汽压变化速度最主要、最大的因素。
外界负荷变化速度越快，引起锅炉汽压变化速度也越快。

✿ 锅炉的蓄热能力

锅炉的蓄热能力是指当外界负荷变化而燃烧率不变时，锅炉能够放出或吸收热量的大小。

锅炉的蓄热能力越大，汽压变化的速度越慢。

✿ 燃烧设备的惯性

燃烧设备的惯性是指从燃料量开始变化到炉内建立起新的热负荷平衡所需要的时间。

燃烧设备的惯性大，当负荷变化时，汽压变化的速度就快。

燃烧设备的惯性与调节系统的灵敏度、燃料的种类和制粉系统的形式有关。



汽压的调节

汽压的调节是以改变锅炉蒸发量作为基本的调节手段，只有当锅炉蒸发量超出允许值或其他特殊情况发生时，采用增减汽轮机负荷的方法来调节汽压。对于汽包锅炉，锅炉蒸发量的改变可以通过对燃烧工况的调节来实现。



汽压的控制与调节

对汽压的控制与调整，就是运行人员如何正确地调整锅炉燃烧工况和给水，控制其蒸发量，使之适应外界负荷需要的问题。

- 当负荷增加使汽压下降时，必须强化燃烧工况，即增加燃料供给量和风量。当然此时还必须相应地增加给水量和改变减温水量。
- 当负荷减少使汽压升高时，则必须减弱燃烧。此时应先减少燃料供给量，然后再减少送风量。
- 增加燃料供给量和风量的操作顺序，一般情况下最好是先增加风量，然后紧接着再增加给粉量。
- 增加风量时，应先开大引风机入口挡板，然后再开大送风机的入口挡板。



汽压调节的原则

- ✿ 机组变压运行时，应按变压运行时的汽压—负荷曲线进行调节；
- ✿ 当外界负荷变化引起主汽压力变化时，通过增减燃烧工况的方法进行调节。
- ✿ 若由于锅炉燃烧原因引起的主汽压力波动，应立即查明原因，稳定锅炉燃烧；
- ✿ 主汽压力超压后，应及时降低燃料量；当汽压继续升高达到PCV（定压控制通气模式）整定值时，PCV打开泄压，若继续升高，则安全门打开泄压。当发生安全门拒动，压力仍继续上升至定值时，应立即手动MFT（Main Fuel Trip，锅炉主燃料跳闸）停炉，严防锅炉超压。



第十章 锅炉的运行调整及自动控制

- 10.1 工业锅炉的启动与停运
- 10.2 锅炉设备的控制任务
- 10.3 锅炉运行调整的任务
- 10.4 汽包锅炉的运行特性
- 10.5 汽压的调整
- 10.6 汽温的调整**
- 10.7 燃烧的调整



汽温的调整

- 控制汽温的意义
- 影响汽温变化的主要因素
- 汽温的调节



控制汽温的意义

✿ 汽温升高

可能会引起过热器和再热器管壁及汽轮机汽缸、转子、汽门等金属的工作温度 超过其允许温度，金属的热强度、热稳定性都将下降；（过热器在超温 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 下长期工作，会使寿命缩短一半以上）

✿ 汽温下降

将得不到设计的热效率，热损失增大。再热汽温下降，还会增加汽轮机末级叶片蒸汽湿度。（过热器出口汽温每降低 10°C ，循环热效率下降 0.5% 。）

✿ 汽温过大的波动

还会加速部件的疲劳损伤，甚至使汽轮机发生剧烈的振动。



控制汽温的意义

✿ 对汽温变化的要求

- ✦ 允许波动的范围是 $+5^{\circ}\text{C}$ 到 -10°C
- ✦ 每次允许偏差值下的运行持续时间不得大于2min, 24小时内的累计值不得大于10min
- ✦ 汽温允许变化速度不得大于 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$



影响汽温变化的主要因素

- ✿ 锅炉负荷
- ✿ 过量空气系数
- ✿ 给水温度
- ✿ 燃料性质（水分、灰分和发热量）
- ✿ 受热面污染情况（结渣和积灰）
- ✿ 火焰中心位置的高度（燃烧器的布置、燃烧器的投运方式、煤质和煤粉粗细和炉底漏风）



汽温的调节

- 汽温的调节的原则
- 过热汽温的自动调节系统

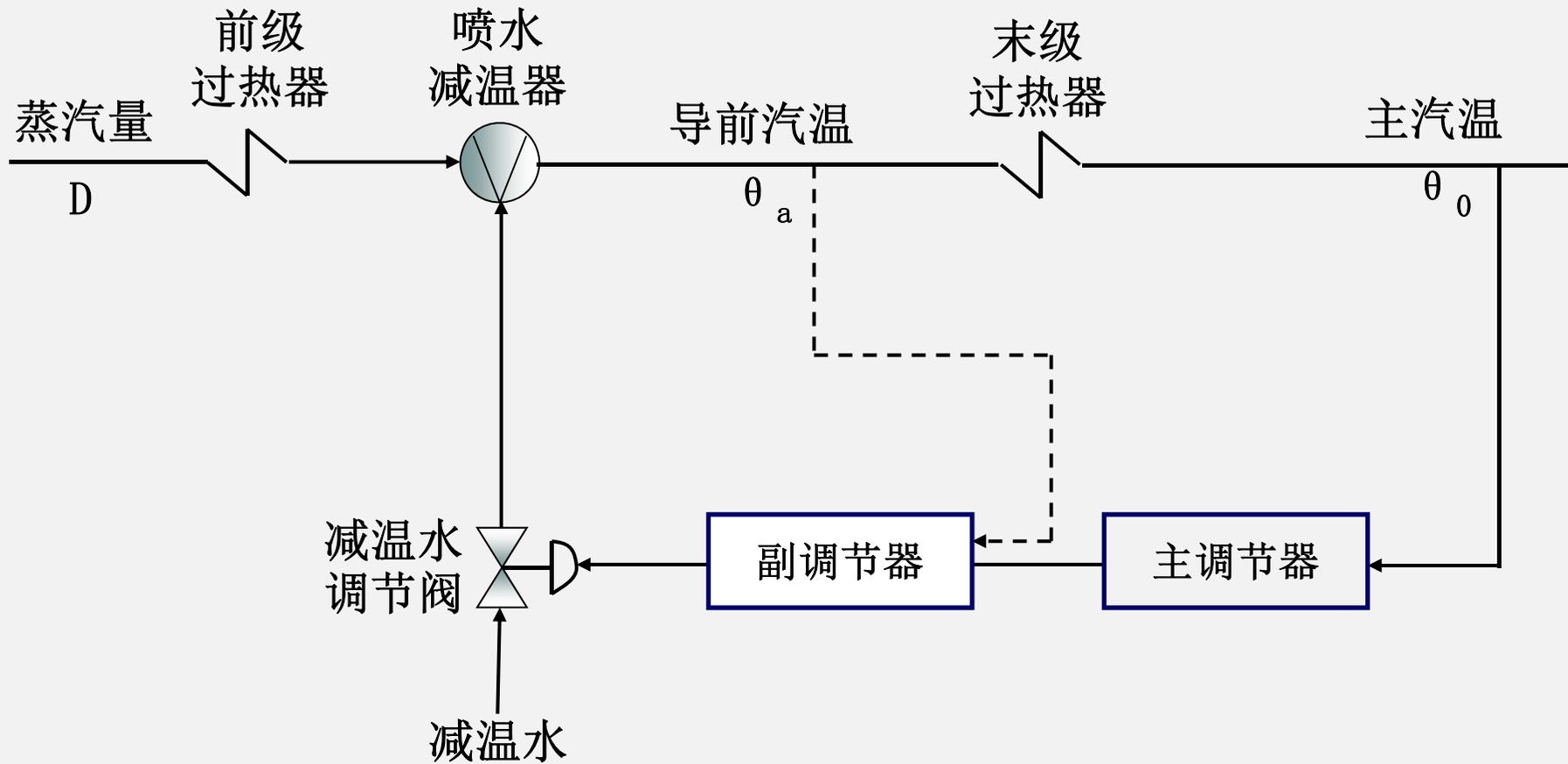


汽温调节的原则

- ◎ 汽包锅炉过热蒸汽温度的调节采用喷水减温器。可设置了两级喷水减温器，分隔屏前一级（粗调），末级过热器前一级（细调）。
- ◎ 汽包锅炉再热蒸汽温度的调节采用摆动燃烧器喷口、烟气再循环或分隔烟道挡板。可采用摆动燃烧器喷口作为主调，也兼有事故喷水减温器。



过热汽温的自动调节系统





第十章 锅炉的运行调整及自动控制

- 10.1 工业锅炉的启动与停运
- 10.2 锅炉设备的控制任务
- 10.3 锅炉运行调整的任务
- 10.4 汽包锅炉的运行特性
- 10.5 汽压的调整
- 10.6 汽温的调整
- 10.7 燃烧的调整**



燃烧的调整

- 燃烧调整的任务
- 燃烧调整的原则
- 燃烧调整的具体内容



燃烧调整的任务

保证锅炉的汽温、汽压和蒸发量稳定正常

燃烧稳定、火焰分布均匀、配风合理、避免结焦

维持一定的炉膛负压

减少不完全燃烧损失，使锅炉保持经济运行

保持炉内良好的燃烧工况



燃烧调整的任务

炉内火焰明亮而稳定

火焰中心应在炉膛中部

火焰均匀充满整个炉膛，但不触及周围水冷壁

火焰中没有明显星点

烟囱中烟气为浅灰色



燃烧调整的原则

- 负荷变动时的燃烧调整
- 煤质变动时的燃烧调整



负荷变动时的燃烧调整

✿ 锅炉负荷较高时

✦ 特点

- 着火和混合的条件较好，燃烧稳定
- 燃烧器和受热面易结焦，局部超温问题

✦ 原则

- ①注意将火焰中心调整到炉膛的中心，防止火焰偏斜和局部热负荷过高；
- ②适当增大一次风速，以增加着火点距离喷口的距离。



负荷变动时的燃烧调整

❁ 锅炉负荷较低时

✦ 特点

投入的燃烧器数量少、燃烧较弱、炉温水平偏低，所以燃烧稳定性差、经济性也差。

✦ 原则

- ①适当增大过量空气系数、降低一次风率和风速，以稳定燃烧；
- ②煤粉应减小细度，同时尽量保持下排燃烧器的投运，以降低火焰中心，减少不完全燃烧损失；
- ③可适当降低炉膛的负压，以减少炉膛漏风，提高燃烧的稳定性 and 经济性。



煤质变动时的燃烧调整

✿ 对于低挥发分的煤

✦ 特点

着火的稳定性较差，经济性也有所降低

✦ 原则

①适当降低一次风速和风率，以增大一次风中的煤粉浓度，减少着火热，使着火提前；

②适当提高二次风速，以增大气流的穿透能力，使炉内切圆直径变大，有利于强化着火和加强扰动；

③降低煤粉细度、增大过量空气系数，以降低不完全燃烧损失。



煤质变动时的燃烧调整

✿ 对于高挥发分的煤

✦ 特点

着火和燃烧不是问题，此时要注意燃烧的安全性，避免炉内结渣和金属超温。

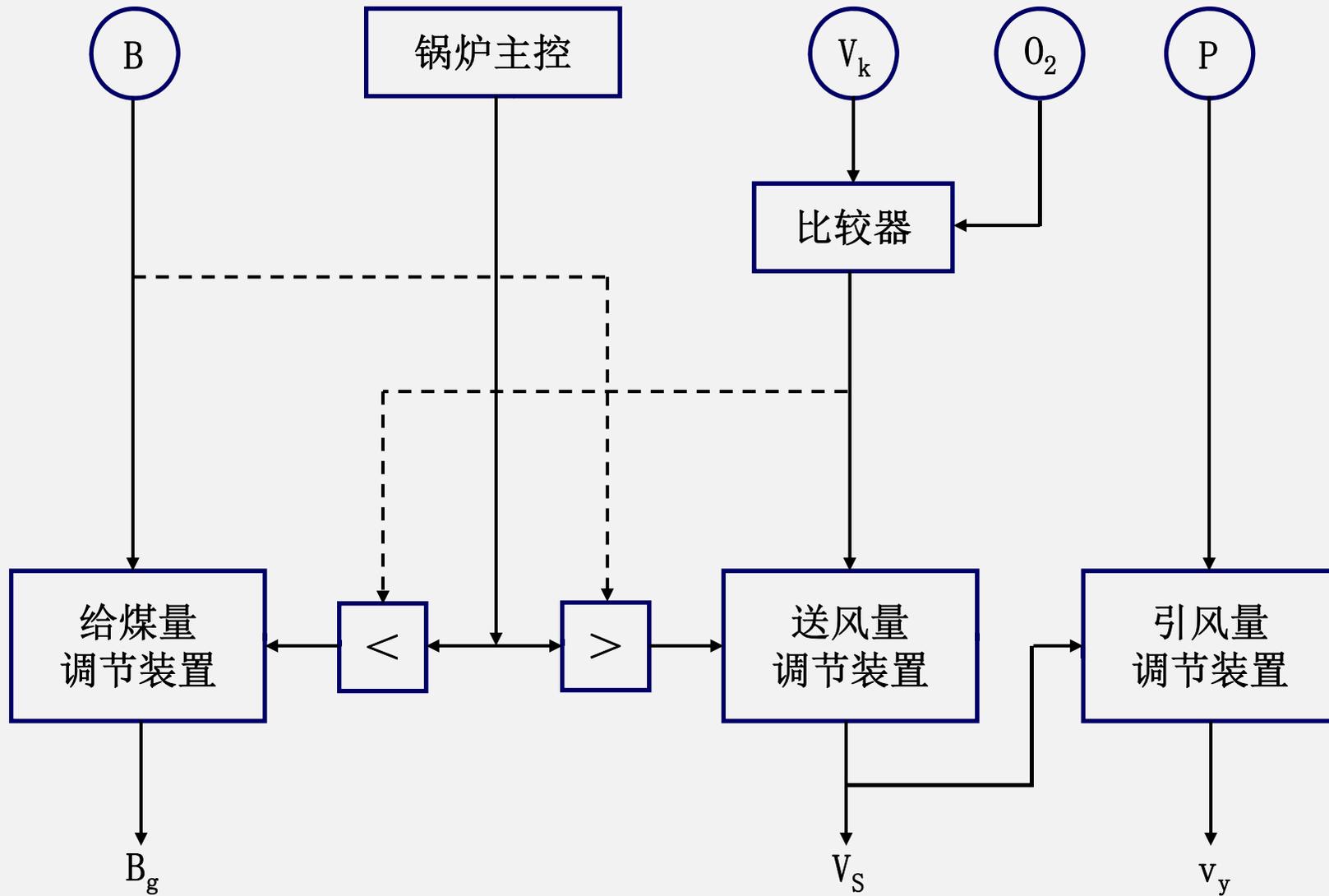
✦ 原则

适当减少二次风量，多投入一些燃烧器运行，以分散热负荷，防止局部超温。



燃烧调整的具体内容

- 单元机组燃烧自动调整原理图
- 燃料量的调整
- 送风量的调整
- 引风量的调整
- 配风方式的调整





燃料量的调整

✿ 锅炉负荷小幅度变动时

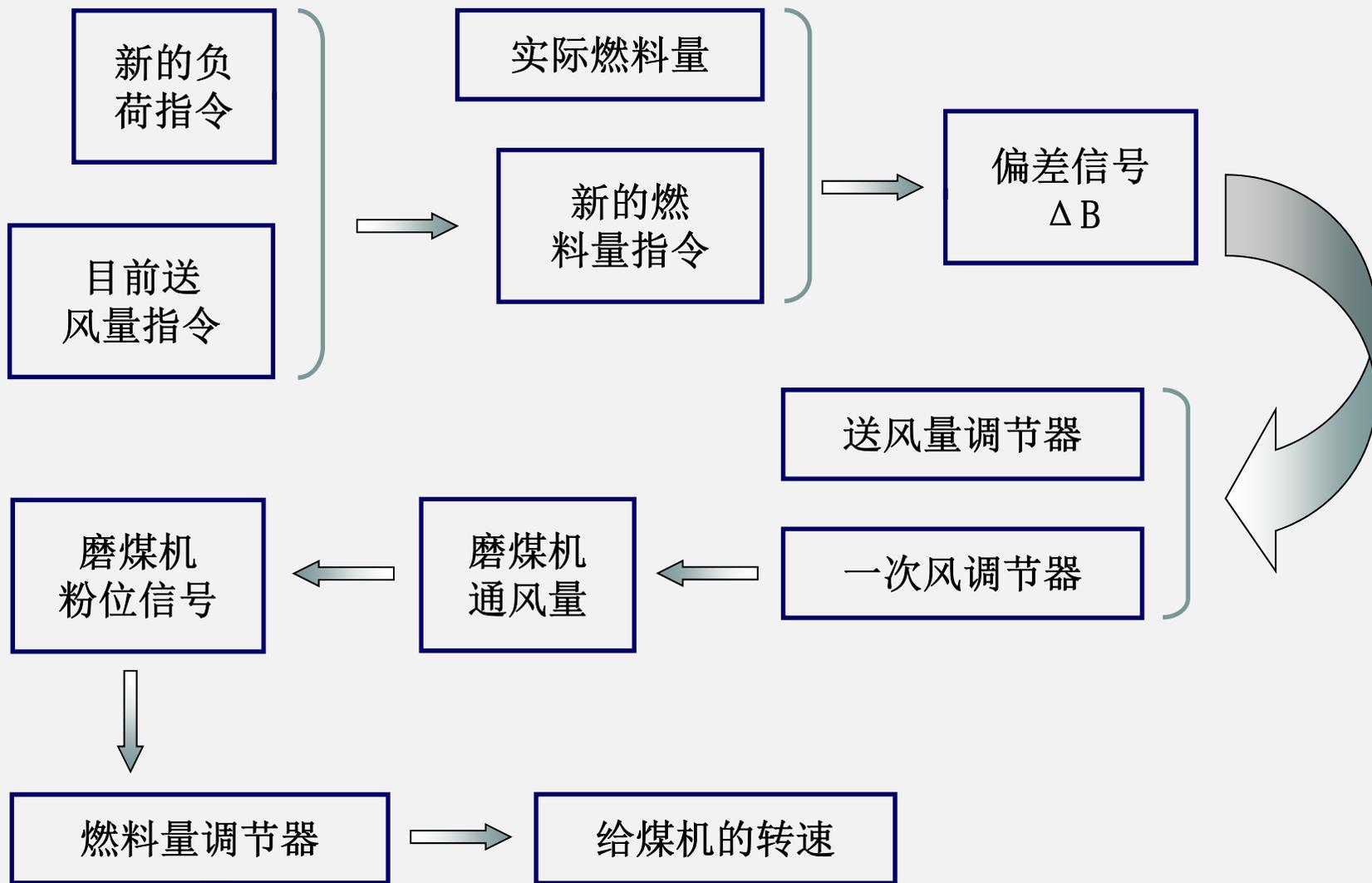
✦ 调节原则

通过调节运行着的制粉系统的出力来进行。

✦ 调节过程

✦ 特点

- ①无论是增负荷还是减负荷，都保持了一次风中较充分的风量，避免了工况变动导致炉内燃烧的恶化；
- ②增负荷时先加风、减负荷时先减煤，有利于保持炉内的富氧状态，减少不完全燃烧损失；
- ③直接调节磨煤机的出粉量，提高了制粉系统对锅炉负荷的响应速度。





燃料量的调整

✿ 锅炉负荷大幅度变动时

✦ 调节原则

通过启、停一套制粉系统来进行调节。

✦ 最低允许出力

取决于制粉的经济性和燃烧的稳定性。

当负荷低于一定程度时，应停掉一套制粉系统，将它的出力分摊给其余运行着的系统。

✦ 最大允许出力

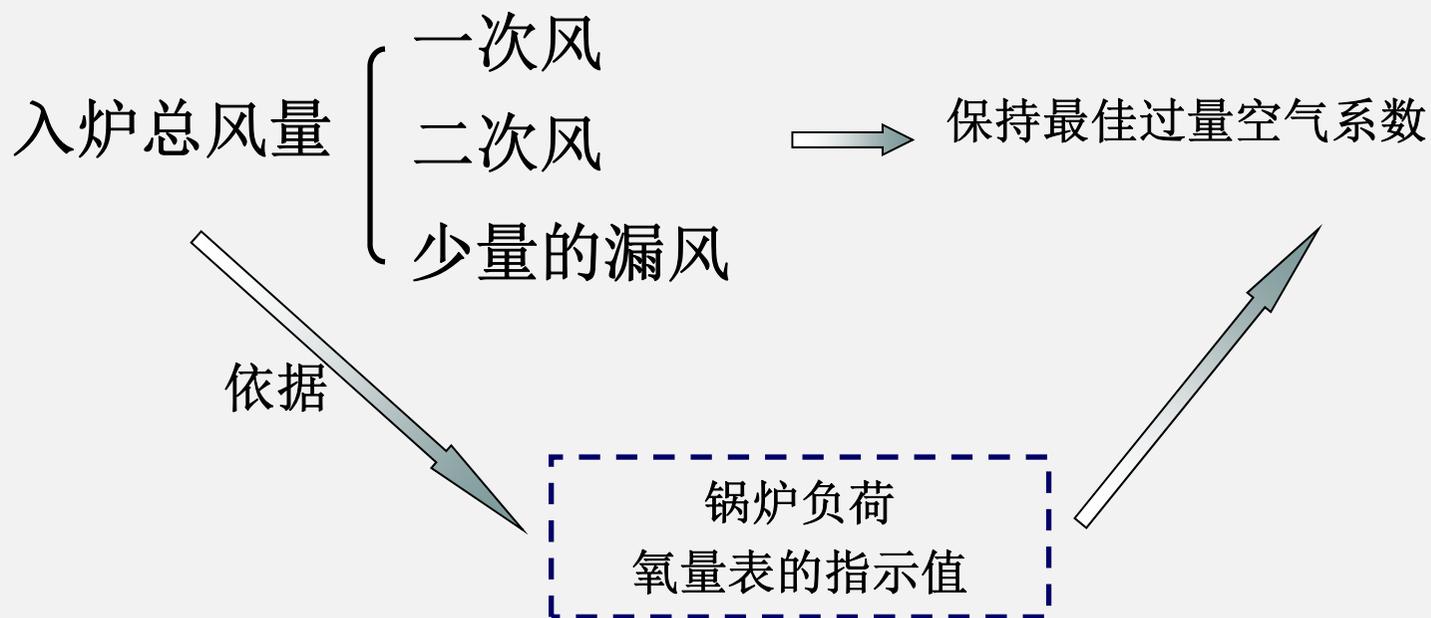
取决其碾磨能力以及所要求的煤粉细度。

当负荷升高到一定程度时，应重新启动一套制粉系统，以分散各磨煤机的出力，同时分散炉内热负荷。



送风量的调整

✿ 总风量调节的依据

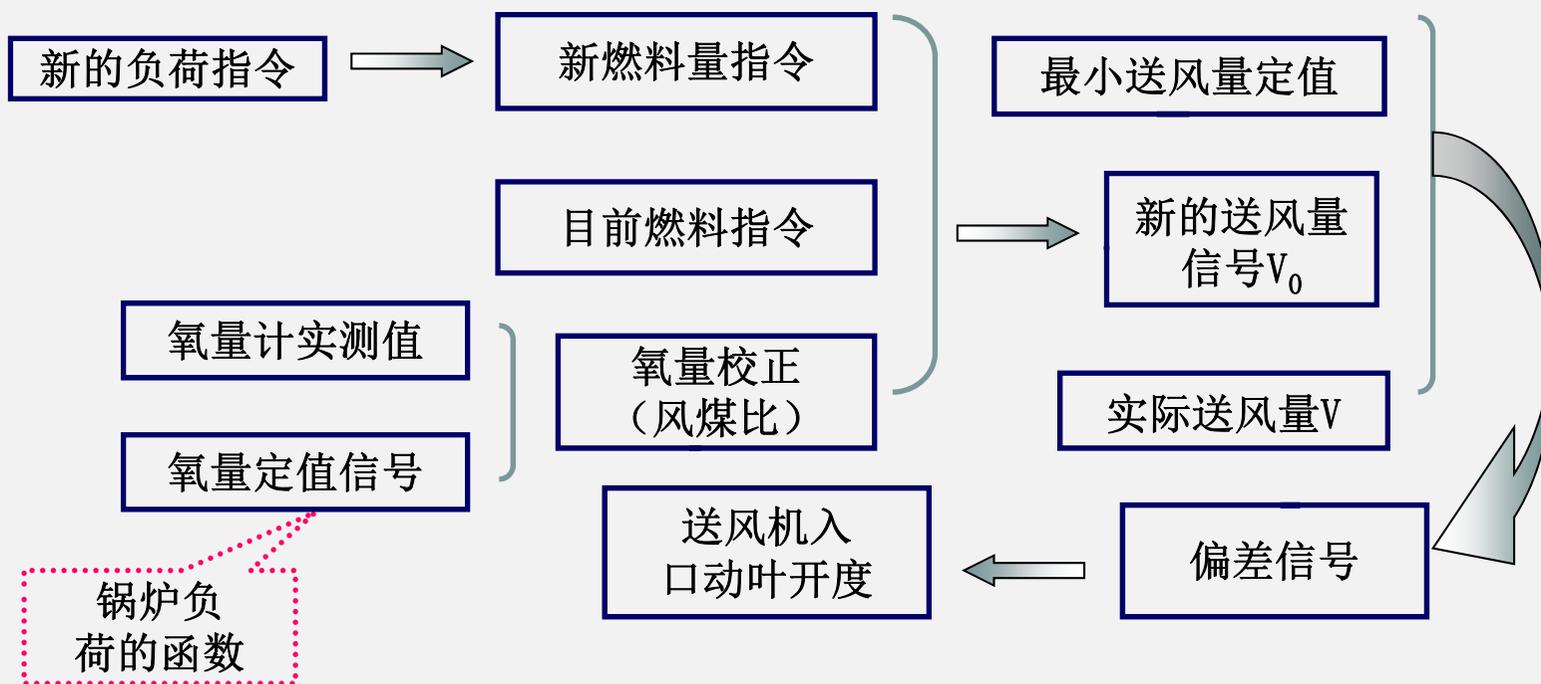




送风量的调整

✿ 总风量调节的方法

入炉总风量 $\left\{ \begin{array}{l} \text{一次风} \longrightarrow \text{按照一定的风煤比来控制} \\ \text{二次风} \longrightarrow \text{送风机的送风量} \end{array} \right.$





引风量的调整

✿ 炉膛负压的监督

- ✦ 正常运行时炉膛负压一般维持在规定的范围内，当周围有人工作或者吹灰时，应适当增大炉膛负压。
- ✦ 如果炉膛负压过大，将会增大炉膛和烟道的漏风。
 - 若冷风从炉膛底部漏入，会影响着火稳定性并抬高火焰中心，尤其是低负荷运行时极易造成锅炉灭火。
 - 若冷风从炉膛上部或氧量测点前的烟道漏入，会使炉膛的主燃烧区相对缺氧，燃烧损失增大，同时汽温降低。
- ✦ 反之，炉膛负压偏正，炉内的高温烟火就要外冒，这不但会影响环境、烧毁设备，还会威胁人身安全。

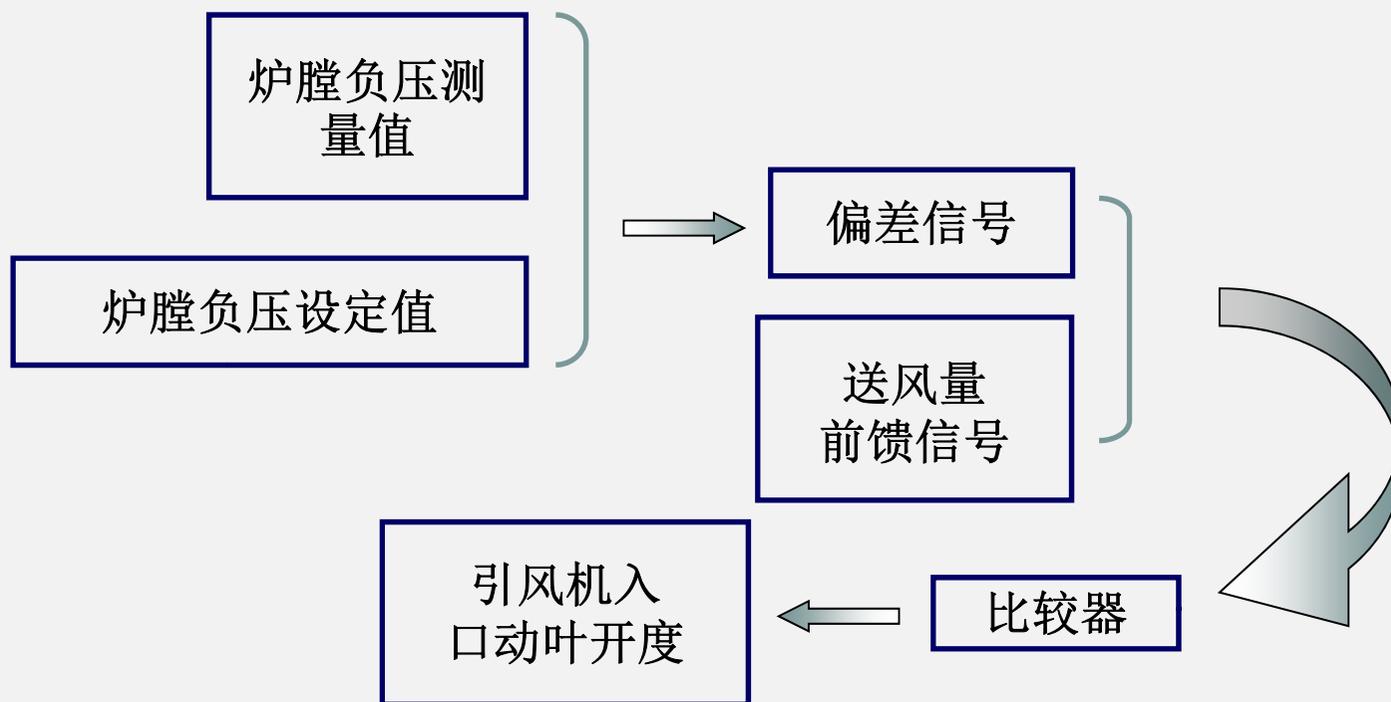
炉膛负压一般通过炉膛负压表进行监测



引风量的调整

✿ 引风量的调节

送风量改变 \longrightarrow 炉膛负压变化 $\xrightarrow{\text{依据}}$ 调节引风量





配风方式的调整

- 几个基本概念
- 配风方式调整的一般原则
- 辅助风的调整
- 燃料风的调整
- 燃烬风的调整



几个基本概念

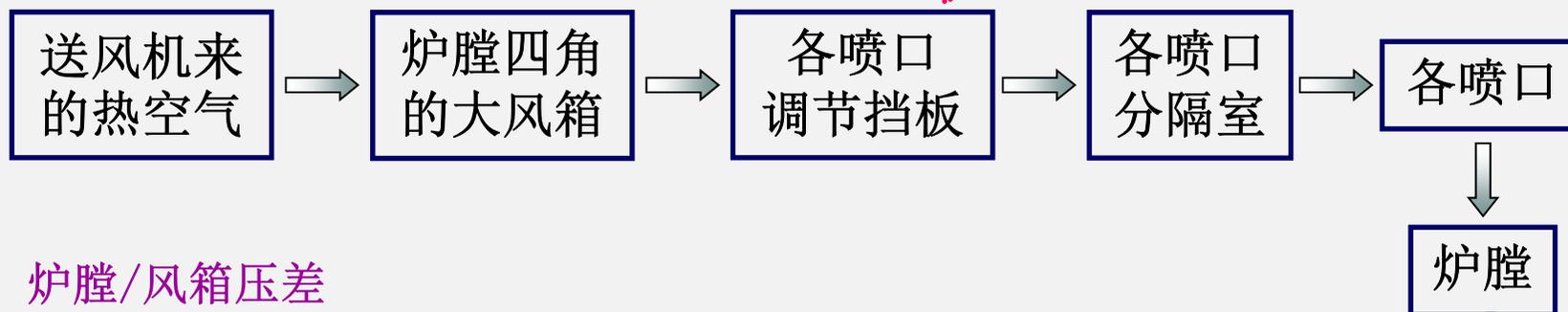
◆ 配风

当总风量一定时，一次风与二次风的比例以及不同二次风喷口之间的风量分配。

◆ 配风方式

与燃烧器的种类和布置都有密切的关系。

◆ 配风方式的调整



◆ 炉膛/风箱压差

分隔室入口处压力与炉膛的压力之差

— 调整各层辅助风量和风速的重要依据



配风方式调整的一般原则

- ◇ 为保证炉膛四角的射流动量和流速的均衡，同层四角的四个调节挡板应维持同步控制；
- ◇ 待负荷小于35%锅炉最大连续蒸发量（BMCR）时，从上到下将不投煤粉喷咀的上下层辅助风门至20%；
- ◇ 燃料风挡板按磨煤机负荷比例控制，当该层停止送粉时，立即将该层燃料风挡板关至20%；
- ◇ 当锅炉锅炉主燃料跳闸MFT时，将各层辅助风挡板和燃料风挡板全开；



辅助风的调整

◇ 辅助风的作用

- ✦ 上层辅助风能压住火焰，不使其过分上飘，是控制火焰位置和煤粉燃尽的主要风源；
- ✦ 中部辅助风则为煤粉旺盛燃烧提供主要的空气量；
- ✦ 下部辅助风可防止煤粉离析，托住火焰不致下冲冷灰斗而增大 q_4 损失。

◇ 辅助风调整的任务

调整二次风箱和炉膛之间的压差，从而保持进入炉膛的二次风有合适的流速，以便入炉后对煤粉气流造成很好的扰动和混合，使燃烧工况良好。



辅助风的调整

◇ 辅助风调整的原则

- ✦ 对于低挥发分煤，应适当增大辅助风量，使切圆直径增大，以稳定燃烧；
- ✦ 低负荷运行时，为了防止停用的燃烧器喷口被烧坏，必须投入一定量的冷却风，冷却风占据了一部分二次风，所以此时辅助风率将降低；

◇ 煤辅助风调整的方法

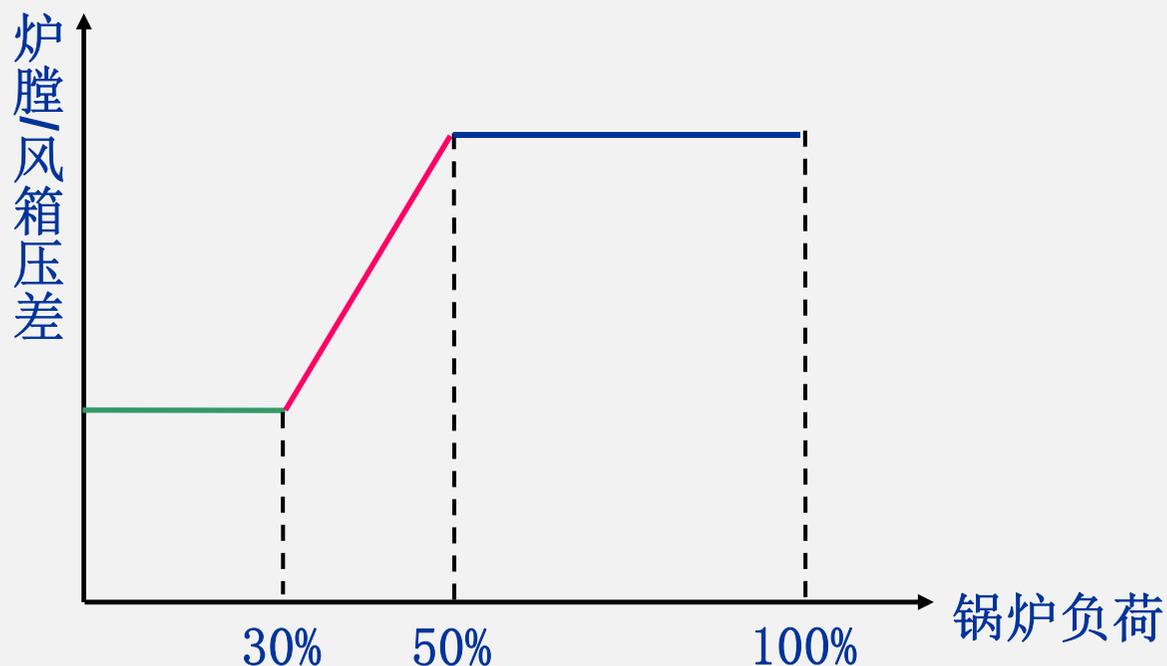
按所设定的炉膛/风箱压差值调节各煤辅助风的风门开度

◇ 油辅助风调整的方法

- ✦ 油枪投入运行后，该油枪的油辅助风挡板会根据燃油压力来调节辅助风挡板开度；
- ✦ 油枪停用时，则与煤辅助风的调节一样。



炉膛/风箱压差的设定值是锅炉负荷的函数



锅炉正常运行时，根据炉膛/风箱压差来控制辅助风挡板开度，使其满足与负荷的关系曲线。当负荷降低到一定程度时，由于只有少数喷口在继续工作，这时将停运喷口附近的辅助风调节挡板关小，而运行着的燃烧器周围的辅助风挡板将自动增大，以维持设定的炉膛/风箱压差。



燃料风的调整

◇ 煤质变化时

- + 对于挥发分较大的煤，周界风的挡板可以稍开大些
- 有利于推迟着火，防止喷口过热和结渣；
由于挥发分高而着火快，可以及时补氧。

◇ 负荷变化时

- + 周界风门的开度与燃料量按比例变化

◇ 喷口停用时

- + 周界风保持在最小开度上以冷却喷口



燃烬风的调整

◇ 采用燃烬风的目的

相当于采用了分段燃烧，遏制 NO_x 和 SO_3 的生成量。

◇ 燃烬风调整的原则

- ✦ 燃烬风挡板开度应随负荷的降低而逐步关小；
(低负荷时， NO_x 生成量少，供风不足影响燃烧稳定性)
- ✦ 燃用较差煤种时，过燃风的风率也应减小；
- ✦ 燃用低灰熔点易结焦煤时，燃烬风量影响是双重的，应通过燃烧调整确定较合宜的燃烬风门开度。
- ✦ 燃烬风必要时也可作为调节过热汽温、再热汽温的一种辅助手段。(适当增加燃烬风可使燃烧推迟，火焰中心位置提高)



燃烬风的调整

◇ 燃烬风调整的方法

✦ 独立手动调节

根据调试结果，确定一个适合的燃烬风调门开度，手动调节其开度，运行中不再改变开度，而运行中的燃烬风量只随着大风箱的压差而自然改变。这种调节方式的特点是燃烬风的开度与锅炉负荷无关。

✦ 负荷调节

将燃烬风的挡板开度设为锅炉负荷的函数，运行中则根据负荷自动调节其风门挡板开度。



The End