

直流锅炉的运行特性

一、静态特性

(一)、汽温静态特性

稳定工况下，以给水为基准的过热蒸汽总焓升可按下式计算

$$h''_{gr} - h_{gs} = \frac{\eta B Q_r (1 - r_{zr})}{G}$$

式中 Q_r ——锅炉输入热量，kJ/kg;

η ——锅炉效率;

h_{gs} 、 h''_{gr} ——给水焓、过热器出口焓，kJ/kg;

r_{zr} ——再热器相对吸热量， $r_{zr} = Q_{zrr} / (\eta Q_r)$

Q_{zrr} ——再热器吸热量，kJ/kg。

1. 煤水比B/G

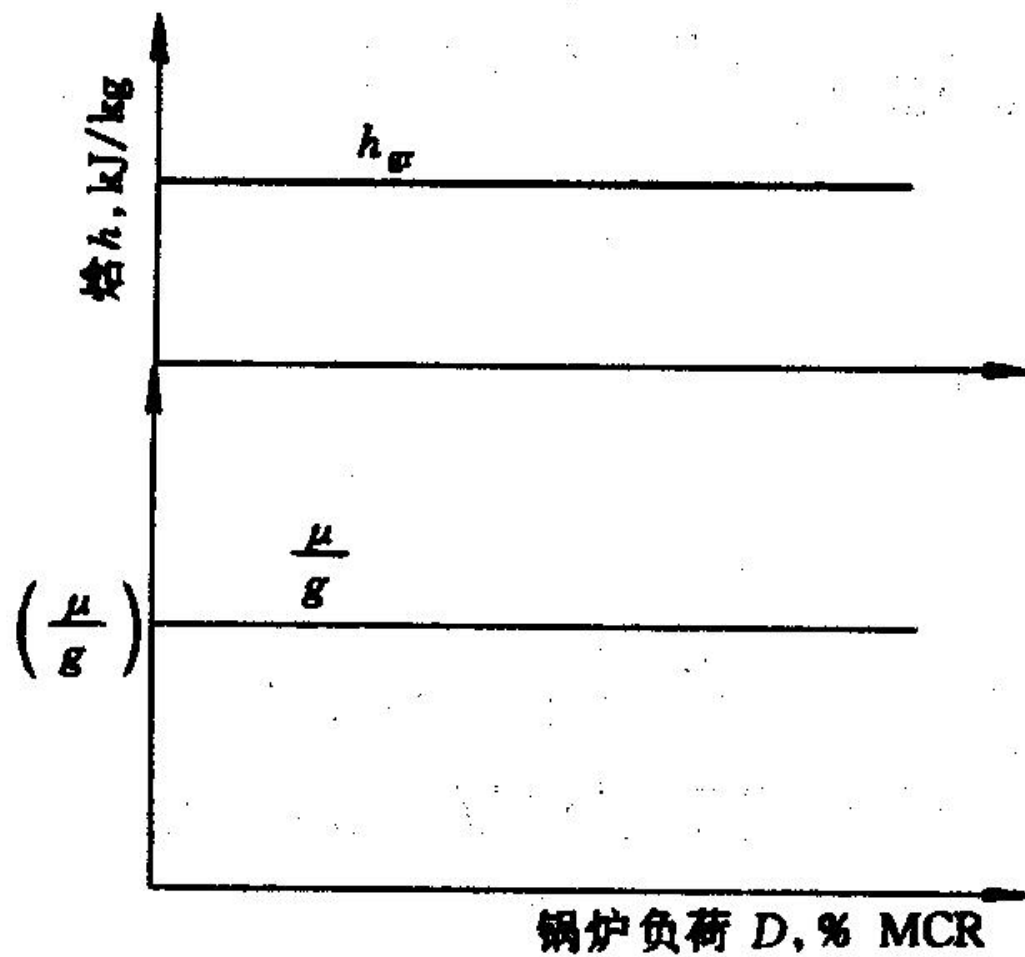
保持式中 h_{gs} 、 η 、 Q_r 和 r_{zr} 不变，则当锅炉给水量从 G_0 变化到 G_1 ，对应的燃料量变化到 B_1 时，过热器出口焓值的变化量可写为

$$\Delta h_{gr}'' = h_{gr,1}'' - h_{gr,0}'' = (h_{gr}'' - h_{gs}) \left(1 - \frac{m_0}{m_1}\right)$$

式中 $h_{gr,0}''$ 、 $h_{gr,1}''$ —— 工况变动前、后的过热器出口焓，kJ/kg;

m_0 、 m_1 —— 工况变动前、后的煤水比，

对于亚临界锅炉, $h_{gr}'' - h_{gs} \approx 2160 \text{kJ/kg}$ 。若保持给水流量不变, 燃料量增加**10%** ($m_1 = 1.1m_0$), 则过热蒸汽出口焓将增加**216kJ/kg**, 相应的温升约为**100°C**; 如果热负荷不变, 而工质流量减少**10%** ($m_1 = 1.11m_0$), 则过热蒸汽焓增为**247kJ/kg**, 相应的温升约**110°C**。



$$\mu = B'/B, \quad g = G'/G$$

2. 给水温度

当给水温度降低时，若保持煤水比不变，则由上式可知，过热器出口焓（汽温）将随之降低。只有调大煤水比，使之与增大了的过热蒸汽总焓升相对应，才能保持汽温稳定。

3. 过量空气系数

炉内过量空气系数主要是通过再热器相对吸热量的变化而影响过热汽温的。当炉内送风量增大时，对流式再热器的吸热量因烟气流量的增大而增加，而辐射式再热器的吸热量则基本不变，因此再热器总吸热量及相对吸热量增大，在煤水比未变动的情况下，根据上式过热器出口汽温将降低。运行中也需要改变设定的煤水比。

4. 锅炉效率

当锅炉效率降低时，过热汽温将下降。运行中炉膛结焦、过热器结焦、风量偏大，都会使排烟损失增大，效率降低；燃烧不完全也是锅炉效率下降的一个因素。上述情况出现时均会使煤水比发生变化。

5.变压运行

变压运行时的主蒸汽压力是锅炉负荷函数。当负荷降低时主蒸汽压力下降，与之相应的工质理论热量（从给水加热至额定出口汽温所必须吸收的热量）增大，如煤水比不变，则汽温将下降。如保持汽温，则煤水比按比例增加。

再热汽温

稳定工况下，再热器出口焓值 h''_{zr} (kJ/kg)按下式计算

$$h''_{zr} - h'_{zr} = \frac{\eta B Q_r r_{zr}}{dG}$$

式中 h'_{zr} ——再热器进口焓值，kJ/kg;
d ——再热汽流量份额。

保持式中 h'_{zr} 、 η 、 Qr 和 r_{zr} 不变，则当锅炉给水量 G_0 从变化到 G_1 ，对应的燃料量变化到 B_1 时，再热器出口焓值的变化量可写为

$$\Delta h_{zr}'' = h_{zr,1}'' - h_{zr,0}'' = (h_{zr}'' - h_{zr})_0 (1 - \frac{m_0}{m_1})$$

在任何负荷下，当燃料量与给水量成比例变化是时（ $m_1=m_0$ ）即可保证再热汽温为额定值。这个结论与主汽温调节的要求是一致的。

煤发热量、过量空气系数、受热面结焦、定压运行、滑压运行方式等对再热汽温影响的分析与过热汽温相仿。随着煤热值降低、过量空气的增加，在煤水比不变时再热汽温升高；滑压运行比定压运行更易于稳定再热汽温。

（二）、汽压静态特性

1. 燃料量扰动

燃料量增加 ΔB ，汽轮机调速汽门开度不变：

- (1) 给水流量随燃料量增加，保持煤水比不变（ $m_0 = m_1$ ），由于锅炉产汽量增大，汽压上升。
- (2) 给水流量保持不变，煤水比增大（ $m_1 > m_0$ ），为维持汽温必须增加减温水量，同样由于蒸汽流量增大，汽压上升。
- (3) 给水流量和减温水量都不变，则汽温升高，蒸汽容积增大，汽压也有所上升。这是由于在汽轮机调门开度不变的情况下，蒸汽流速增大使流动阻力增大所致。但如果汽温的升高在允许的较小值，则汽压无明显变化。

2. 给水流量扰动

给水流量增加 ΔG ，汽轮机调速汽门开度不变：

- (1) 燃料量随给水流量增加，保持煤水比不变（ $m_0 = m_1$ ），由于蒸汽流量增大，汽压上升。
- (2) 燃料量不变，减小减温水量保持汽温，则汽压不变。
- (3) 燃料量和减温水量都不变，如汽温下降在许可范围内，则蒸汽流量的增大使汽压上升。

3. 汽轮机调门扰动

若汽轮机调门开大 Δk ，而燃料量和给水流量均不变，由于工况稳定后，汽轮机排汽量仍等于给水流量，并未变化。根据汽轮机调门的压力—流量特性可知，汽压降低。

(三) 水冷壁流量—负荷特性

直流锅炉变负荷运行时，质量流速相应变化，若为滑压运行，则汽压也随之升降，对蒸发管的水动力特性将产生影响。

1. 流量偏差特性

(1) 负荷降低的影响。水冷壁的总压差按下式计算

$$\Delta p_z = \Delta p_{zw} + \Delta p_{lz}$$

$$\Delta p_{zw} = \rho h g$$

$$\Delta p_{lz} = R \rho w^2 / 2$$

式中 Δp_{zw} ——重位压差，Pa；

Δp_{lz} ——流动阻力，Pa。

对于一次上升垂直管屏，额定负荷下重位压差上 Δp_{zw} 与流动阻力上 ΔP_{lz} 相差不多。在低负荷下，总压差中以重位压差上 Δp_{zw} 为主，水冷壁系统在低负荷下是自然循环特性。高负荷时，总压差中以流阻上 ΔP_{lz} 为主，水冷壁系统是强迫流动特性。

对于水平管圈，由于管屏高度与管屏长度相比很小，所以重位压差 Δp_{zw} 所占比例不大，它显示强迫流动的流动特性。且随着负荷的降低，强迫流动特性增强，即在低负荷下，同样的吸热不均，会引起更大的流量偏差。

对于由水平管圈和垂直管屏联合组成的水冷壁系统，由于垂直管屏入口已为含汽率较高的汽水混合物，故垂直管屏 Δp_{zw} 相对很小，总压差中以流阻 ΔP_{lz} 为主，所以垂直管屏呈现较强的强迫流动特性。与水平管圈一样，当负荷降低时，强迫流动特性增强。

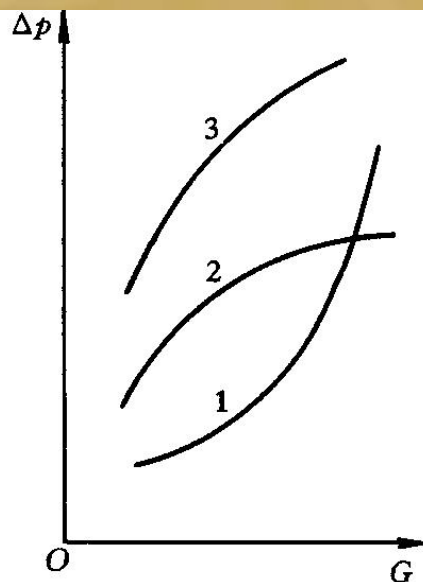


图 2-21 一次上升垂直管屏水动力特性曲线

1—流动压降 Δp_L ; 2—重位压头 Δp_{zw} ;

3—总压降 Δp ($\Delta p_L + \Delta p_{zw}$)

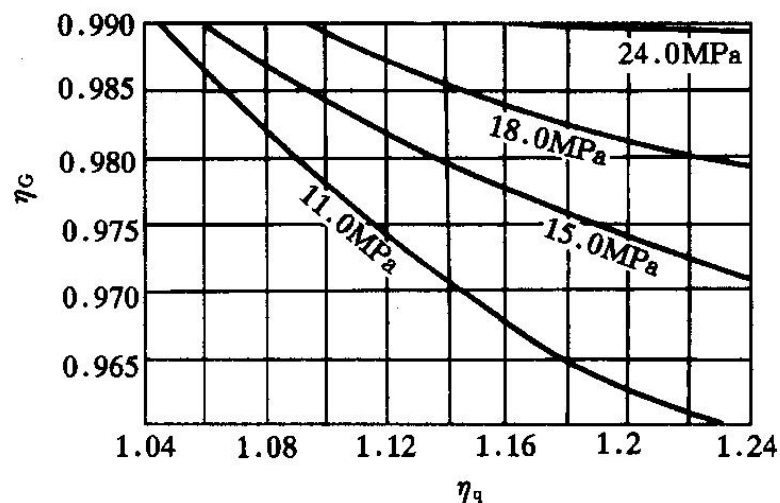


图 2-22 工作压力对流量不均系数的影响

($\Delta h = 215 \text{ kJ/kg}$; $h'' = h_{bh}$)

工质流量增加时，重位压头也随之增大，这是由于含汽率减小的缘故。因此，高负荷时的水动力稳定性都是较好的。

(2) 压力降低的影响

直流锅炉采用滑压运行，低负荷时压力相应降低。压力降低时汽水密度差加大，平均管的密度减小，在同样的质量流量下， Δp_{zw} 减小、 Δp_z 增大，即原来显示强迫流动特性的管屏将更加增加其强迫特性，因而降低水冷壁的工作安全性。

2. 水动力稳定性

产生水动力多值性的根本原因是水冷壁进口的给水有欠焓。当给水欠焓超过某一定值之后，就会发生水动力的不稳定。

水平管圈式水冷壁，可按下式判断是否出现水动力多值性

$$\Delta h \leq \frac{7.46r}{a(\frac{\rho'}{\rho''} - 1)}$$

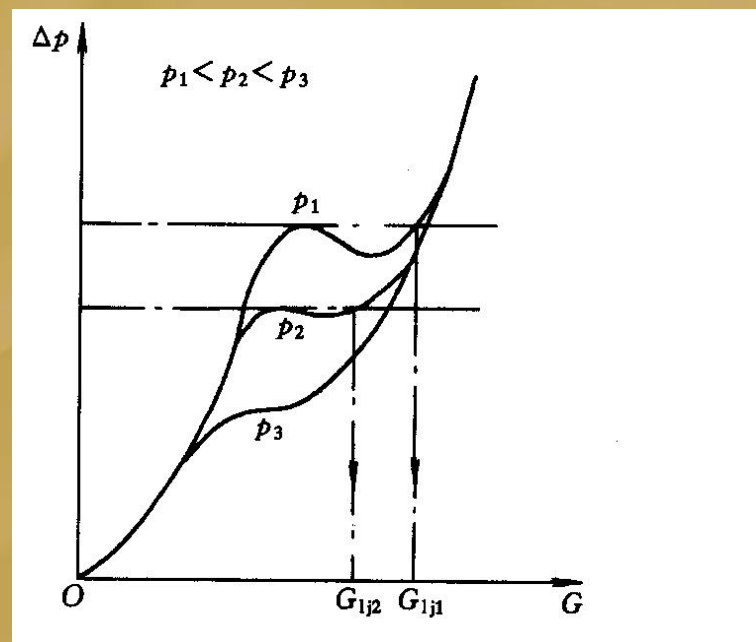
工作压力 (MPa)	8.0	12.0	16.0	20.0	24.0
r / (ρ'/ρ''-1)	21.1	33.4	48.5	71.1	-

随着压力的降低，汽化潜热 r 和密度比 ρ' / ρ'' 均增大，但后者增大得更快，使式中的 $r / (\rho' / \rho'' - 1)$ 项降低。也就是说，随着压力的降低，满足上式将变得越来越困难或者说裕度更低。

因此，水平管圈的直流锅炉低压力运行时，更应注意水动力稳定性的问题。

对于垂直管圈，重位压头不能忽略，水动力特性可认为是水平管圈的特性叠加一个重位压头而形成的。因此，垂直管圈的水冷壁一般没有水动力不稳定的问题。但压力很低时，重位压头迅速减小，仍有可能使水动力的稳定性变差。

低负荷下，水冷壁的进水温度降低，欠焓增大，容易出现水动力多值性。因此运行中应限制欠焓 Δh 小于 420 kJ / kg ，负荷低于一定值时，则必须限制水冷壁质量流速的进一步降低，保持你在高于安全流量 G_{lj} 以上。由图可知，压力越低，不发生水动力多值性的安全边界流量 G_{lj} 就越高。



二、动态特性

(一) 动态过程锅内工质贮存量变化

1 物理现象

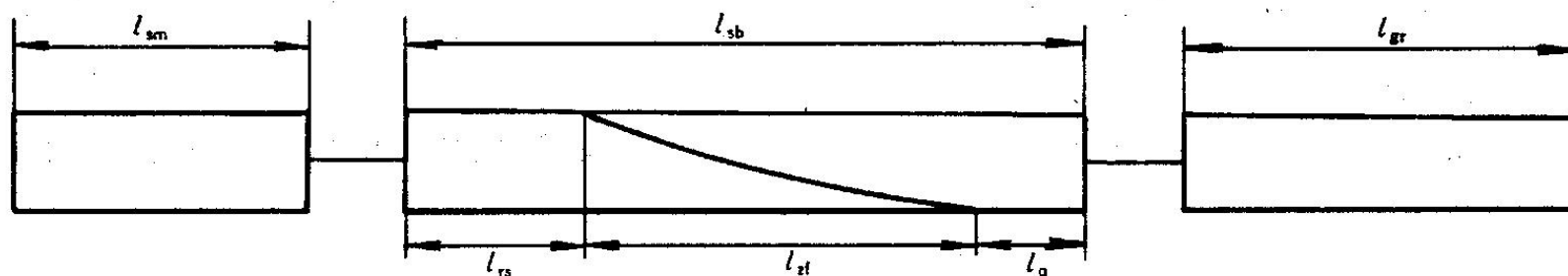


图 6-2 直流锅炉受热管段

l_{sm} —省煤器受热管段长度，m； l_{sb} —水冷壁受热管段长度，m； l_{rs} —热水段长度，m；

l_{zf} —蒸发段长度，m； l_q —蒸汽微过热段长度，m； l_{gr} —过热器受热管段长度，m

附加蒸发量：由于锅内贮存水量的变化而使蒸汽质量流量增加或减小的部分。

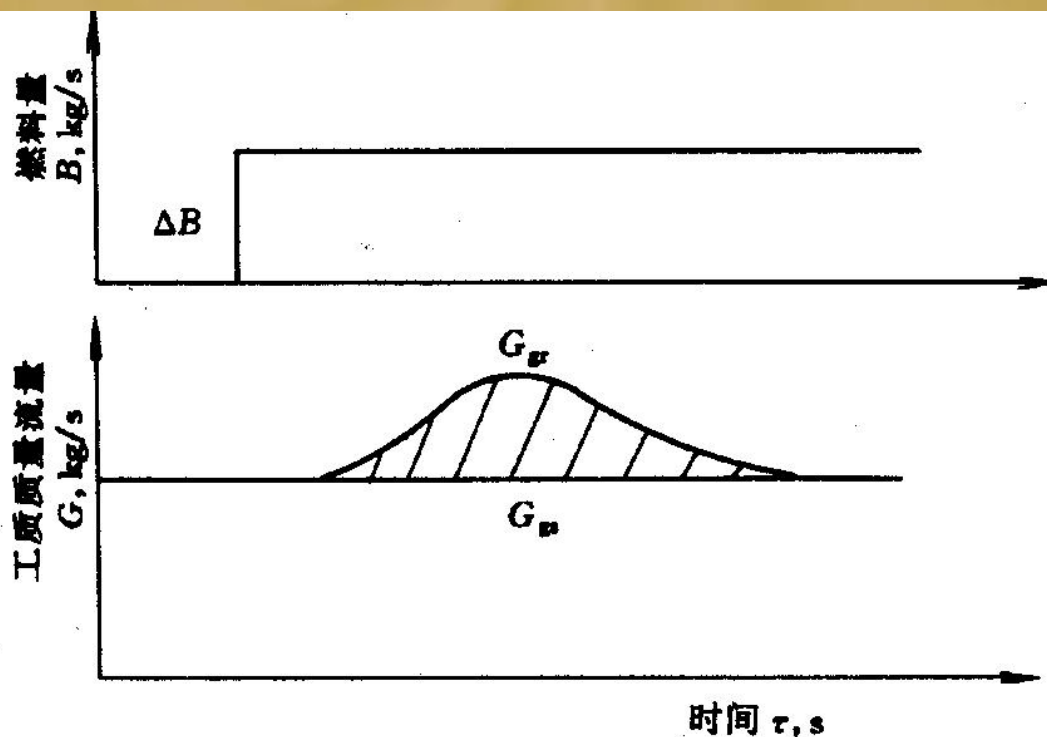
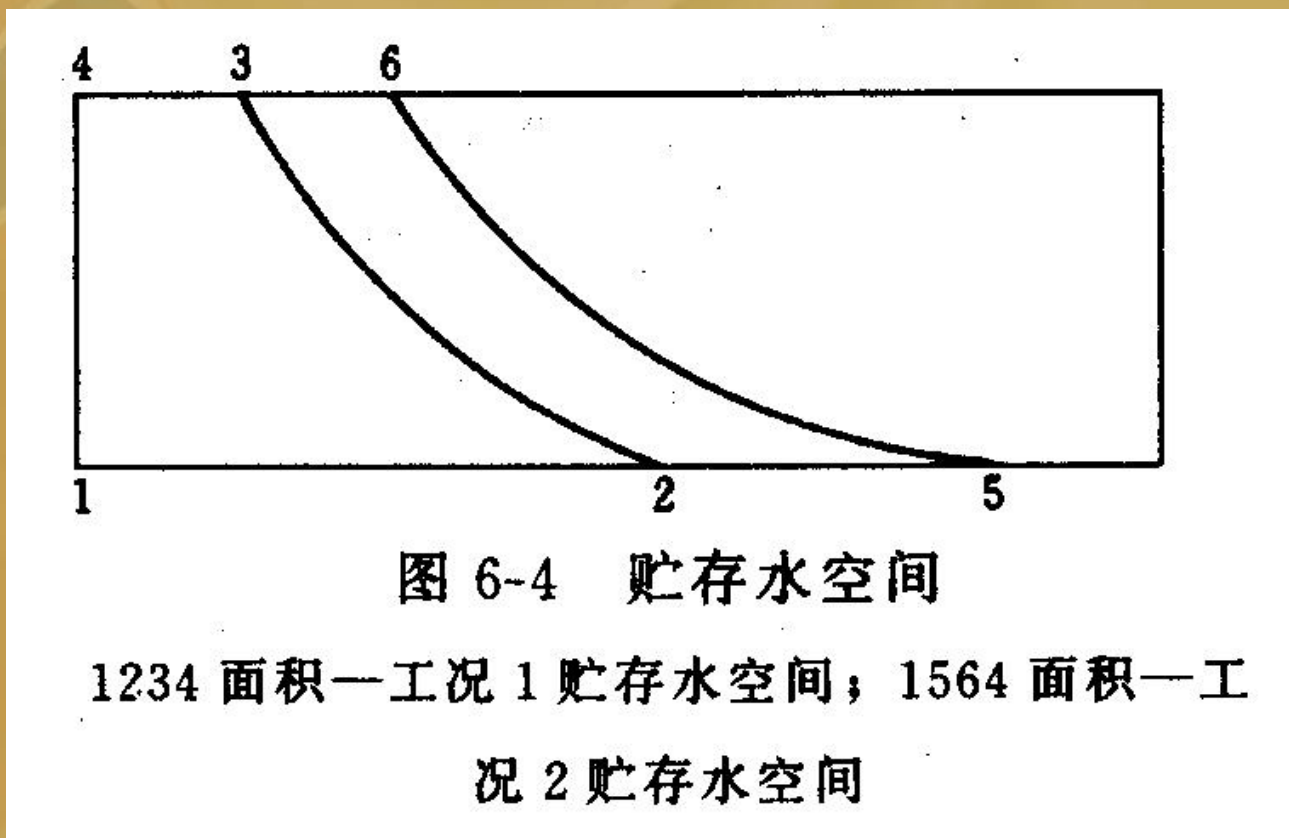


图 6-3 直流锅炉附加蒸发量

ΔB —燃料量扰动量, kg/s ; G_{gs} —给水质量流量, kg/s ; G_{gr} —过热蒸汽质量流量, kg/s

2 分析

两工况间水冷壁管段贮水空间变化 $\Delta V_s = V_{s2} - V_{s1}$



稳定工况下受热管段长度和热负荷

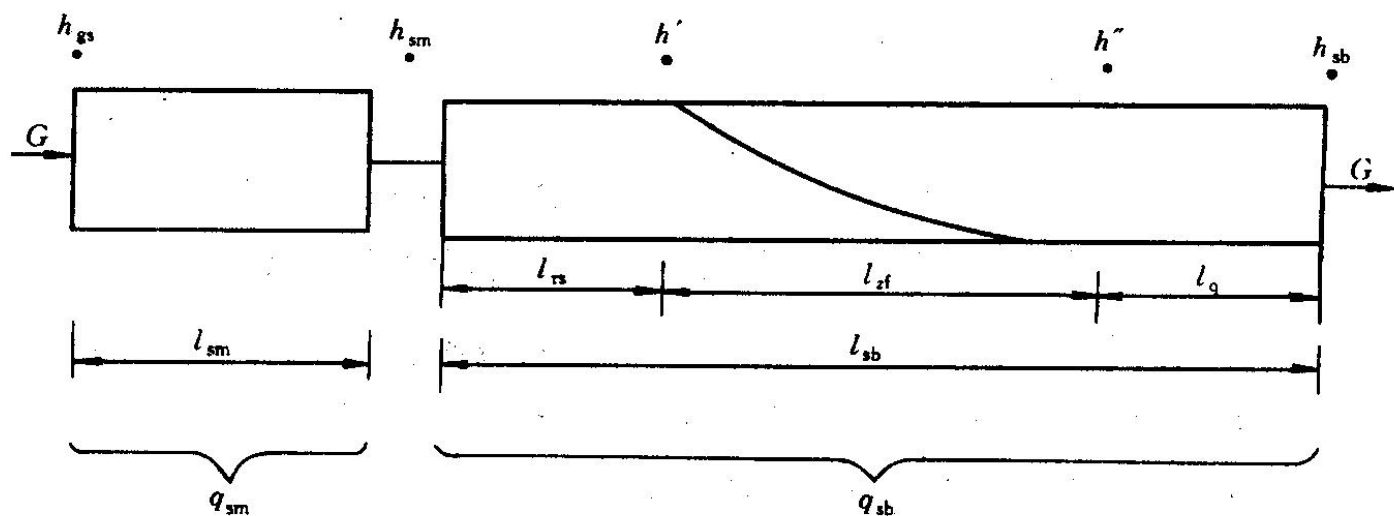
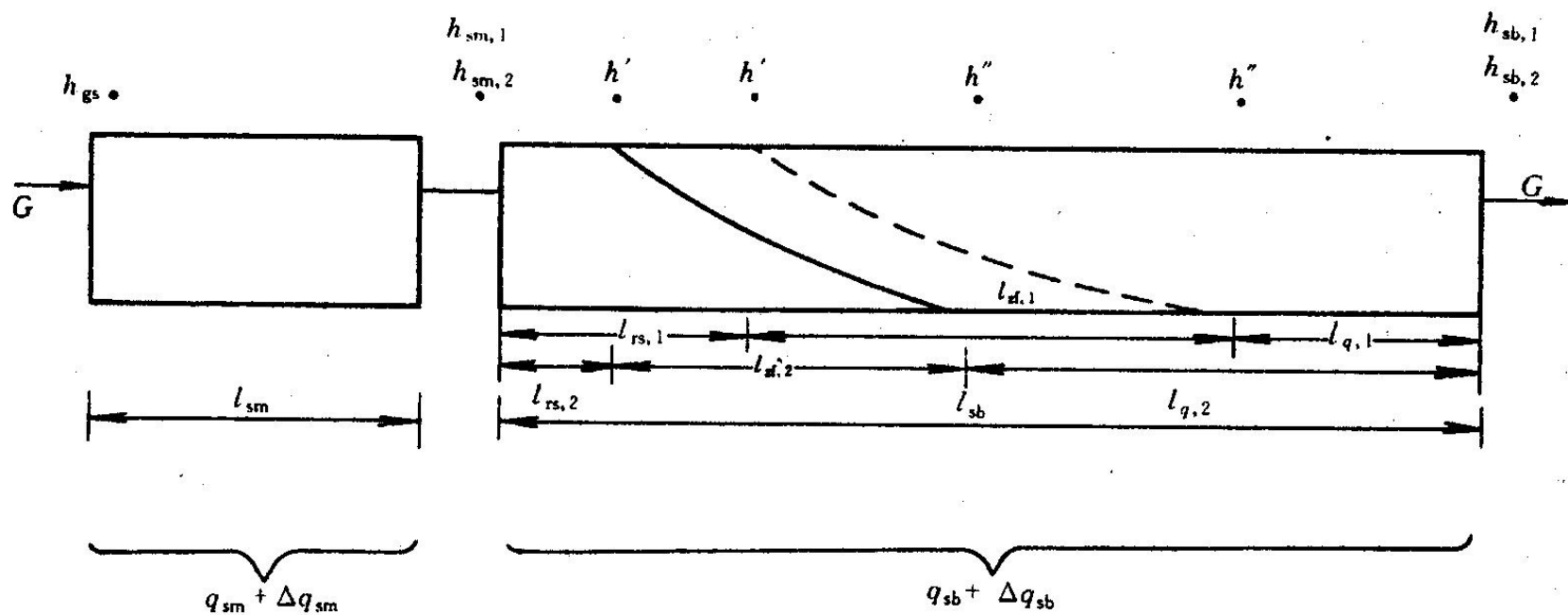


图 6-5 省煤器和水冷壁受热管段长度、热负荷和工质焓

G —工质质量流量, kg/s ; h_{gs} —给水焓, kJ/kg ; h_{sm} —省煤器出口水焓, kJ/kg ; h' —饱和水焓, kJ/kg ; h'' —饱和汽焓, kJ/kg ; h_{sb} —水冷壁出口工质焓, kJ/kg ; l_{sm} —省煤器受热管段长度, m ; l_{sb} —水冷壁受热管段长度, m ; l_{rs} —热水段长度, m ; l_{zf} —蒸发段长度, m ; l_q —蒸汽微过热段长度, m ; q_{sm} —省煤器热负荷, $\text{kJ/m} \cdot \text{s}$; q_{sb} —水冷壁热负荷, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{s})$

燃料量扰动贮水空间变化



给水流量扰动贮水空间变化

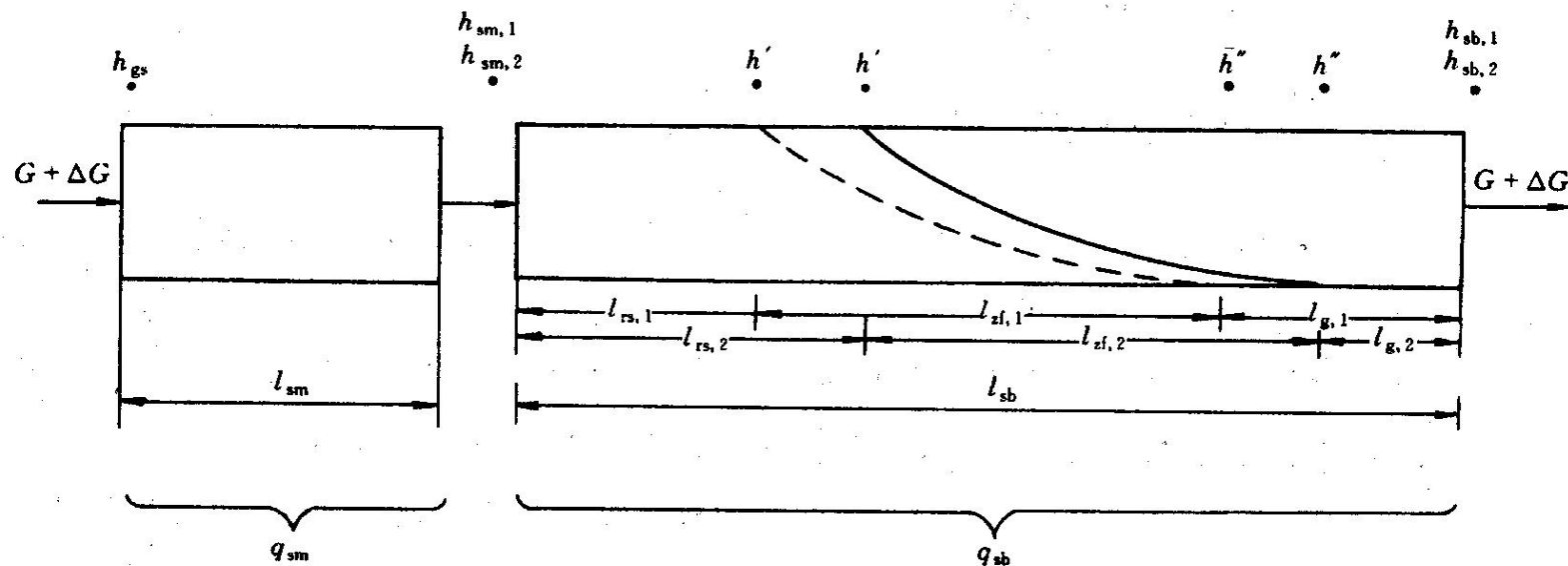


图 6-7 给水流量扰动 ΔG 贮水空间变化图中符号与图 6-6 同

锅内工质贮水量变化

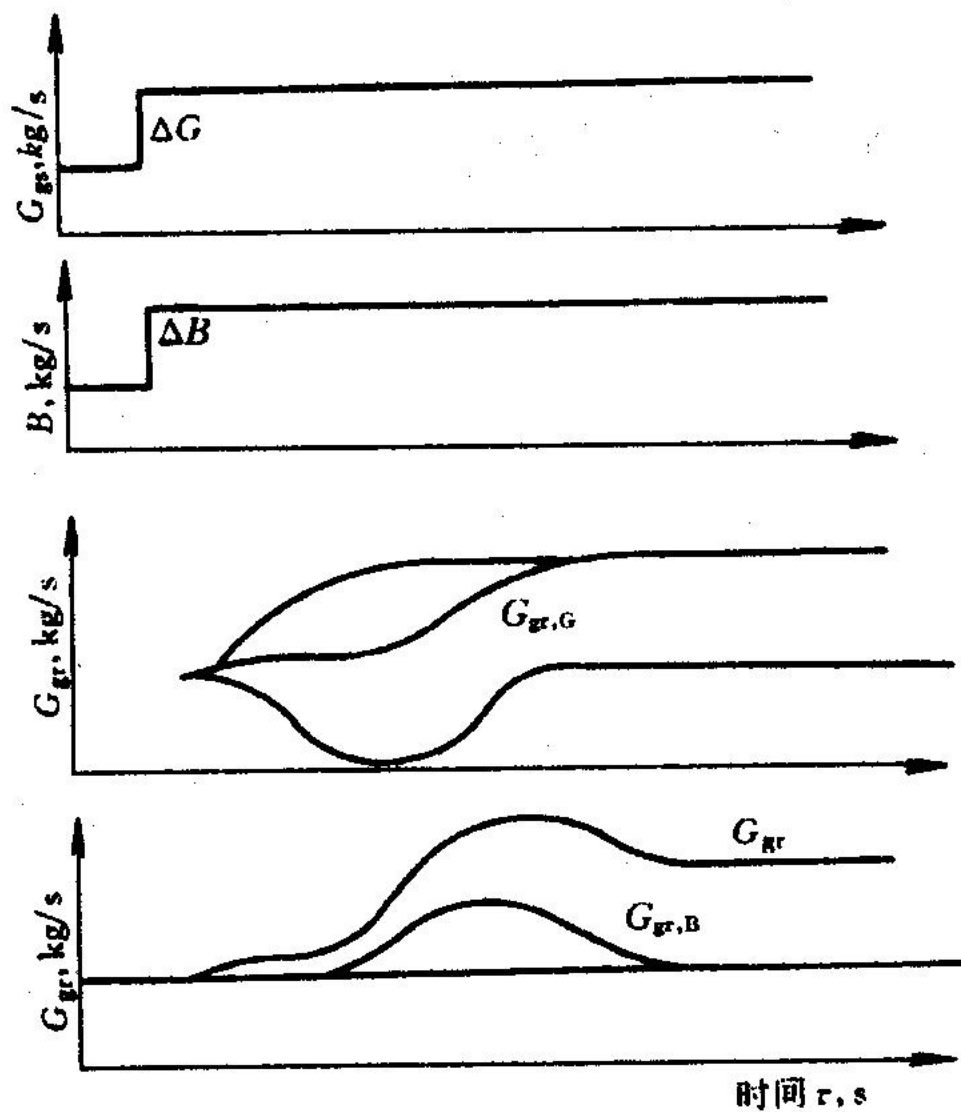


图 6-8 ΔB 与 ΔG 比例增加蒸汽流量动态过程

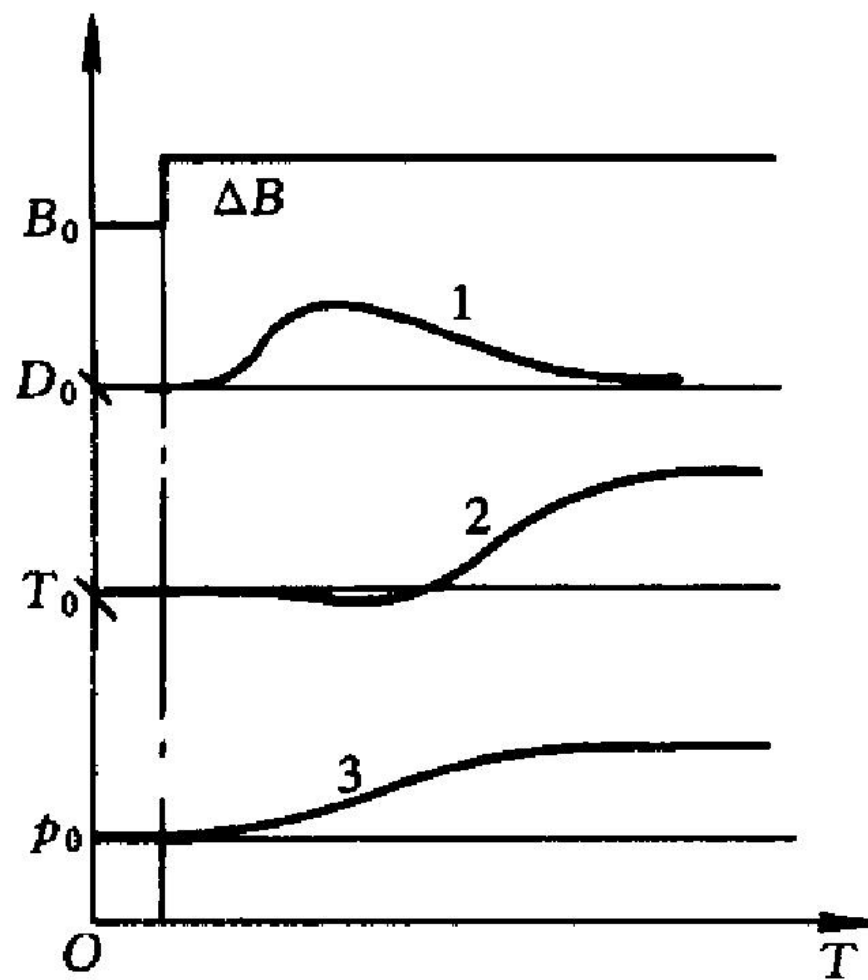
ΔB —燃料量扰动, kg/s ; ΔG —给水质量流量扰动。

1. 燃料量扰动

- ◆ 在其他条件不变的情况下，燃料量 B 增加。蒸发量在短暂延迟后先上升，后下降，最后稳定下来与给水量保持平衡。

其原因是，在变化之初，由于热负荷立即变化，热水段逐步缩短；蒸发段将蒸发出更多的饱和蒸汽，使过热蒸汽流量 D 增大，其长度也逐步缩短，当蒸发段和热水段的长度减少到使过热蒸汽流量 D 重新与给水量相等时，即不再变化。

- ◆ 燃料量增加，过热段加长，过热汽温升高。但在过渡过程的初始阶段，由于蒸发量与燃烧放热量近乎按比例变化，再加以管壁金属贮热所起的延缓作用，所以过热汽温要经过一定时滞后才逐渐变化。如果燃料量增加的速度和幅度都很急剧，有可能使锅炉瞬间排出大量蒸汽。在这种情况下，汽温将首先下降，然后再逐渐上升。
- ◆ 蒸汽压力在短暂延迟后逐渐上升，最后稳定在较高的水平。最初的上升是由于蒸发量的增大，随后保持较高的数值是由于汽温的升高（汽轮机调速阀开度未变）。



(a)

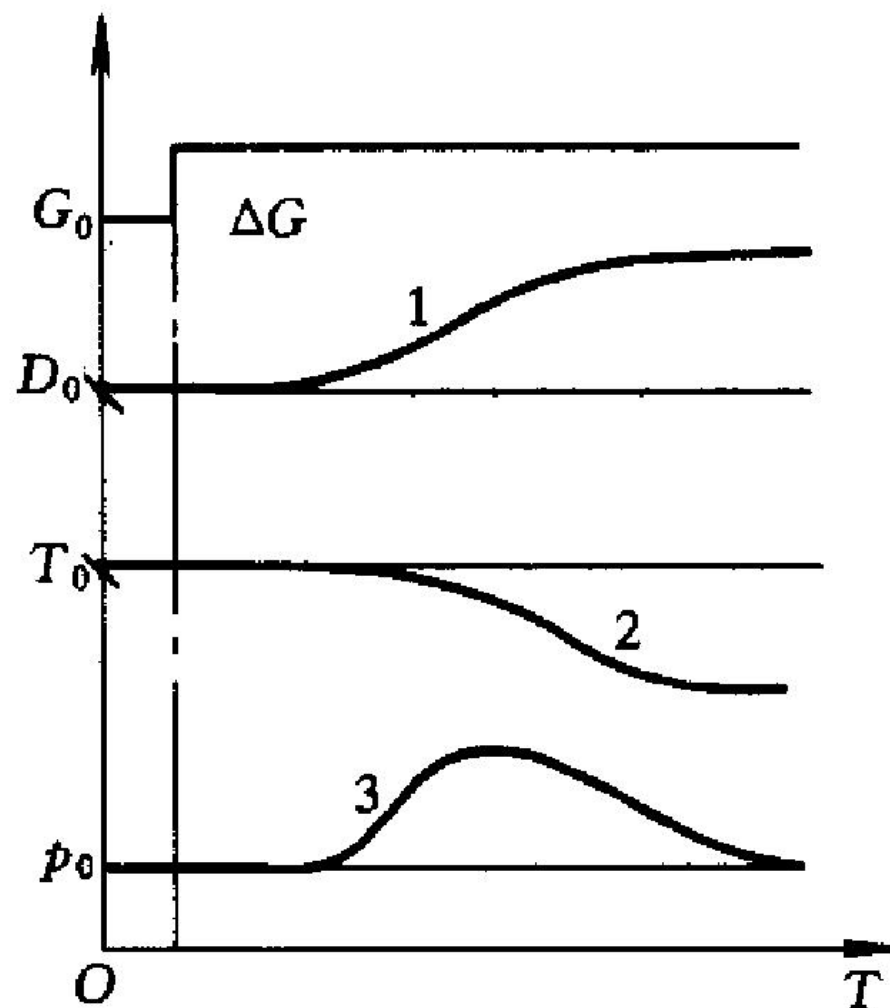
2. 给水量扰动

在其他条件不变的情况下，给水量增加，热水段延长。蒸汽流量逐渐增大到扰动后的给水流量。过渡过程中，由于蒸汽流量小于给水流量，所以工质贮存量不断增加。

随着蒸汽流量的逐渐增大和过热段的减小，出口过热汽温渐渐降低。但在汽温降低时金属放出贮热，对汽温变化有一定的减缓作用。

汽压则随着蒸汽流量的增大而逐渐升高。值得一提的是，虽然蒸汽流量增加，但由于燃料量并未增加，故稳定后工质的总吸热量并未变化，只是单位工质吸热量减小（出口汽温降低）而已。

当给水量扰动时，蒸发量、汽温和汽压的变化都存在时滞。这是因为自扰动开始，给水自入口流动到原热水段末端时需要一定的时间，因而蒸发量产生时滞。蒸发量时滞又引起汽压和汽温的时滞。



(b)

3. 功率扰动

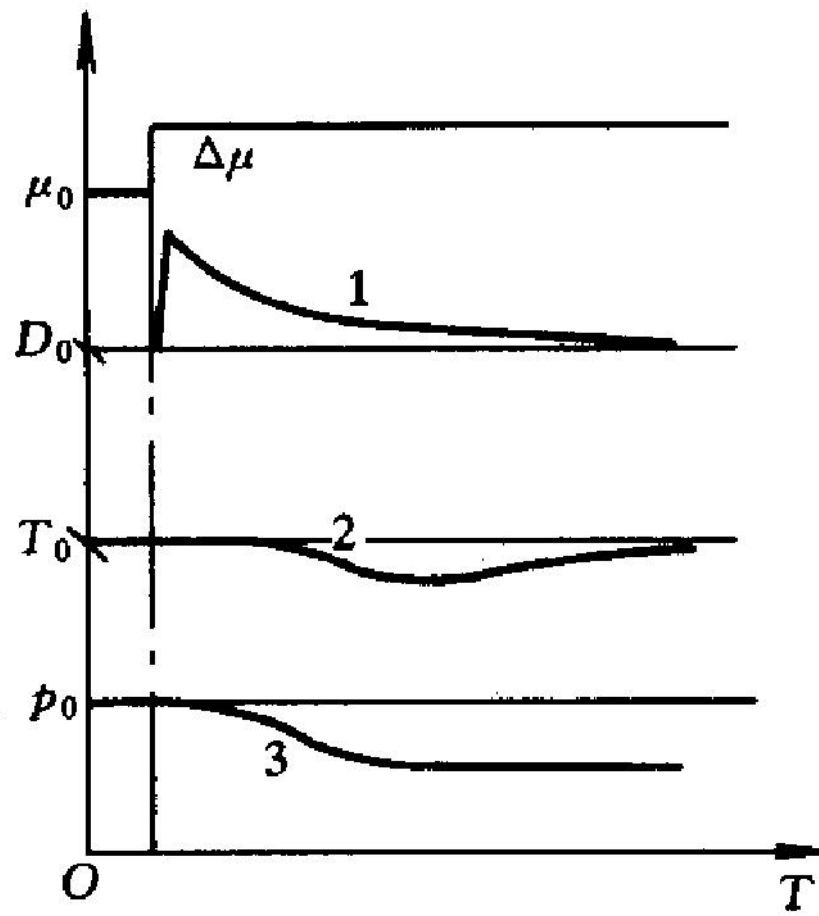
功率扰动是指调速汽门动作取用部分蒸汽，增加汽轮机功率，而燃料量、给水量不变化的情况。

若调速汽门突然开大，蒸汽流量立即增加，汽压下降。汽压没有像蒸汽流量那样急剧变化。

在给水压力和给水门开度不变的条件下，由于汽压降低，给水流量实际上是自动增加的。这样，平衡后的给水流量和蒸汽流量有所增加。在燃料量不变的情况下，这意味着单位工质吸热量必定减小，或者说出口汽温（焓）必定减小。

在超临界区运行时，动态特性与亚临界锅炉相似，但变化过程较为和缓。燃料量 B 增加时，锅炉热水、过热段的边界发生移动，尽管没有蒸发段，但热水、过热段的比体积差异也会使工质贮存量在动态过程中有所减小。因此出口蒸汽量稍大于入口给水量直至稳态下建立新的平衡。

由于上述特点，超临界机组在燃料量、给水量和功率扰动时的动态特性，受蒸汽量波动的影响较小，如燃料量扰动时，抑制过热汽温变化的因素主要是金属贮热，而较少受蒸汽量影响，因而过热汽温变化得就快一些；而汽压的波动则基本上产生于汽温的变化，变得较为和缓。



(c)

锅炉压力对动态特性的影响

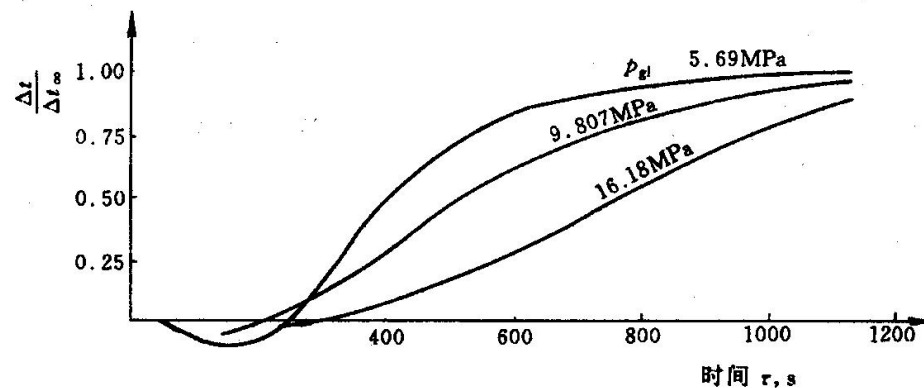


图 6-13 燃料量扰动 $\Delta B > 0$, 不同锅炉压力下主蒸汽温度动态特性
 $\Delta t - \Delta B > 0$ 扰动后主蒸汽温度增值动态过程, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\infty} - \Delta B$ 扰动后 ∞ 时间主蒸汽温度增值动态过程, $^{\circ}\text{C}$; p_{g1} —锅炉压力, MPa

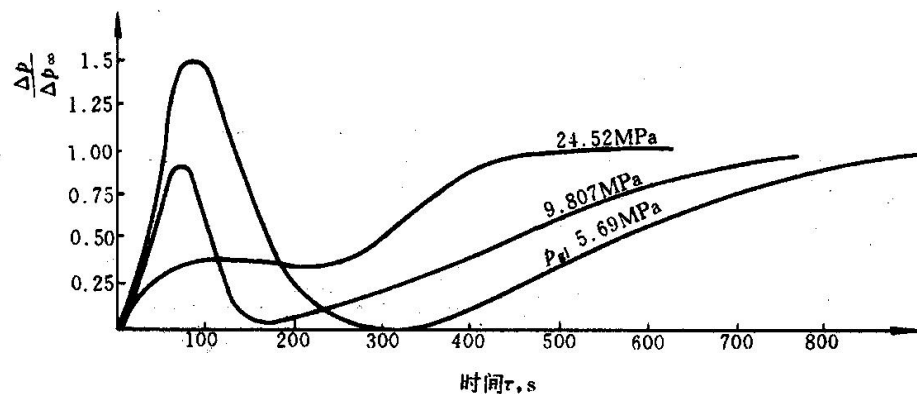


图 6-14 燃料量扰动 $\Delta B > 0$, 不同锅炉压力下主蒸汽压力动态特性
 $\Delta p - \Delta B > 0$ 扰动后主蒸汽压力增值动态过程, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta p_{\infty} - \Delta B$ 扰动后 ∞ 时间主蒸汽压力增值动态过程, $^{\circ}\text{C}$; p_{g1} —锅炉压力, MPa

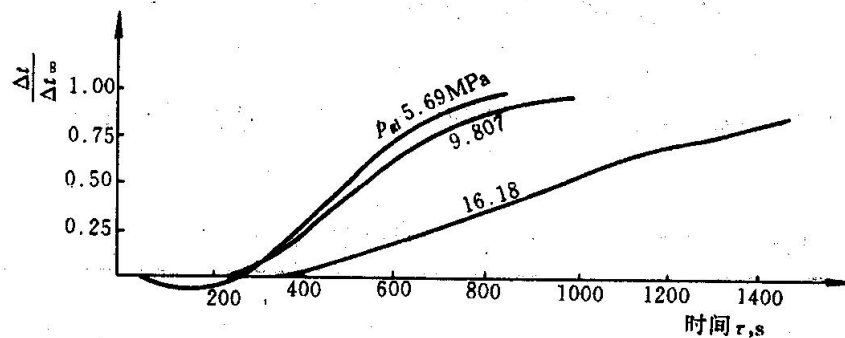


图 6-16 给水质量流量扰动 $\Delta G > 0$, 不同锅炉压力下
主蒸汽温度增值动态过程

Δt —扰动 $\Delta G > 0$ 后主蒸汽温度增值动态过程, $^{\circ}\text{C}$; Δt_{∞} —扰动 $\Delta G > 0$ 后 ∞ 时间主蒸汽温度增值, $^{\circ}\text{C}$; p_{gl} —锅炉压力, MPa

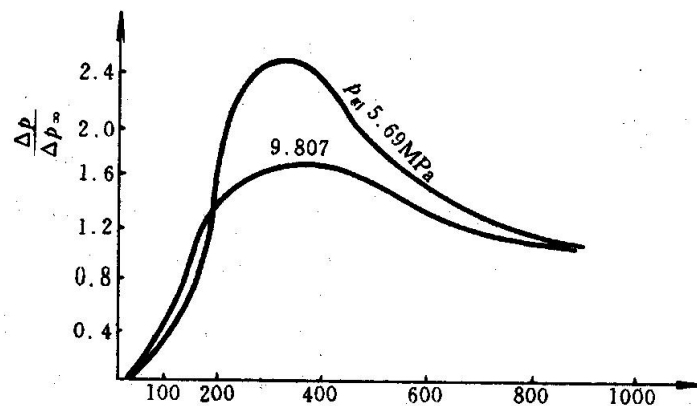


图 6-17 给水质量流量扰动 $\Delta G > 0$, 不同压
力下主蒸汽压力动态特性

Δp —扰动 $\Delta G > 0$ 后主蒸汽压力增值动态过程, MPa; Δp_{∞} —扰动 $\Delta G > 0$ 后 ∞ 时间主蒸汽压力增值, MPa; p_{gl} —锅炉压力, MPa