



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



2014年4月



第六章 工业锅炉的水动力工况及蒸汽净化装置

6.1 工业锅炉的水动力工况

- 6.1.1 锅炉水循环
- 6.1.2 自然循环回路
- 6.1.3 自然循环锅炉的水循环故障

6.2 工业锅炉蒸汽净化装置

- 6.2.1 蒸气污染及蒸汽品质
- 6.2.2 蒸气净化装置

任务：了解工业锅炉的水动力工况；熟悉工业锅炉的蒸汽净化装置



第六章 工业锅炉的水动力工况及蒸汽净化装置

6.1 工业锅炉的水动力工况

- 6.1.1 锅炉水循环
- 6.1.2 自然循环回路
- 6.1.3 自然循环锅炉的水循环故障

6.2 工业锅炉蒸汽净化装置

- 6.2.1 蒸气污染及蒸汽品质
- 6.2.2 蒸气净化装置



§ 6-1 工业锅炉的水动力工况

锅炉的工作过程：炉内过程和锅内过程。

本章研究和分析工业锅炉的**锅内过程**。

- 如果由于某种原因致使工质和金属内表面间的放热系数降低，金属壁温升高，当金属壁温度超过金属的允许最高工作温度时，金属材料就会因超温而破坏，致使锅炉发生爆管或爆炸事故。
- 上升管内流动的工质，吸收高温烟气的热量，水被加热、蒸发，形成汽水混合物，密度减小；下降管不受热或受热较弱，工质的密度较大。



锅内水循环

工业锅炉的水动力系统一般包括**加热系统**（从过冷水到饱和水）、**蒸发系统**（从饱和水到饱和蒸汽）、**过热系统**（从饱和蒸汽到过热蒸汽）。

加热系统和**过热系统**内流过的工质，一般是单相流体（水或蒸汽），而**蒸发系统**中流过的工质为汽、水两相流体。

蒸发系统按工质流动的方式可分为：**自然循环**和**强制循环**。

➤ 依靠上升管和下降管内工质密度差作为水循环动力的蒸发系统，称为**自然循环**。自然循环的蒸发系统由锅筒、下降管、下集箱、上升管、上集箱及汽水引出管等部件组成。

➤ 蒸发系统中工质的流动是依靠水泵的扬程使工质在受热面内流动，这种蒸发系统称为**强制循环**。



自然循环回路

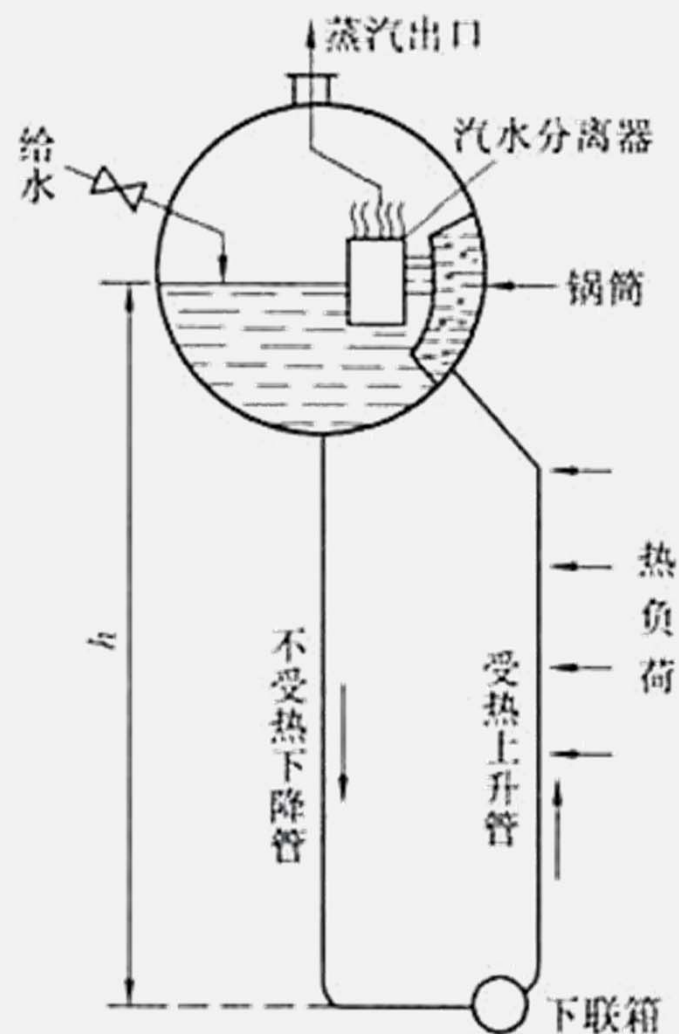
1. 典型的自然循环回路

(1) 自然循环回路的基本组成

在自然循环锅炉的蒸发系统中，一根下降管（或几根几何结构基本相同的下降管）与一组结构特性相同的并行的上升管组及锅筒，上下集箱、汽水引出管等形成一个封闭的汽水系统，称为回路。

自然循环回路的布置

- 简单回路：一根下降管与一组上升管组成的封闭的汽水系统。
- 复杂回路：一根下降管与几组上升管成的封闭的汽水系统。





(2) 循环倍率 $K=G/D$

- 循环流量：在锅炉的自然循环回路中，管内工质的质量流量。
- 循环倍率：循环流量与蒸发量之比值， $K=G/D$ 。

循环倍率= f （循环回路的阻力、流动压头、锅炉额定工作压力、负荷的变化等）

自然循环蒸汽锅炉的循环倍率 K 等于循环流量与产汽量之比值。

工作压力比较低，循环倍率 $K \geq 20$ ，在正常水动力工况下，上升管不致过热，水中的溶解盐也不会沉积在管内壁，不会发生爆管事故。

自然循环热水锅炉的循环倍率 K 等于锅炉各循环回路中的循环水质量流量之和与锅炉进水量之比值，其循环倍率可以大于1，也可以等于或小于1。

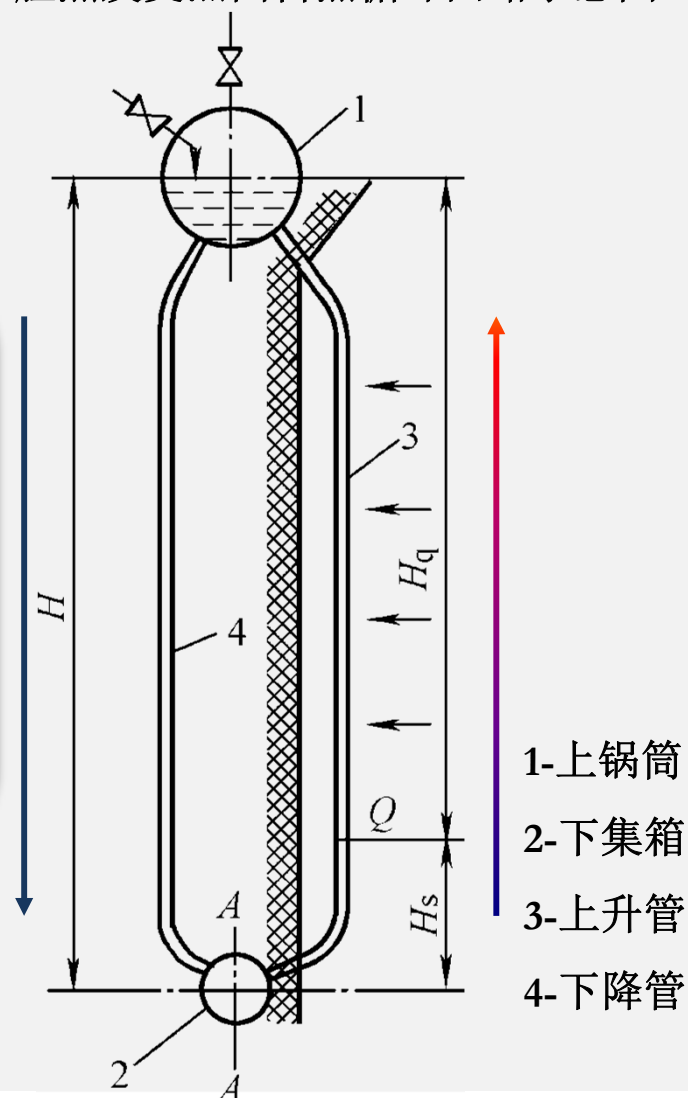
对于强制循环热水锅炉，循环倍率 $K=1$ 。



炉膛蒸发受热面自然循环回路示意图

(3) 自然循环回路的基本方程式

在正常水动力工况下，受热面中的工质处于稳定流动状态，循环回路中任何截面上的工质所受的力均处于平衡状态，即作用于截面两侧的力大小相等，方向相反，且通过各截面的质量流量相等。





在下集箱处取A-A截面，作用在该截面两侧的力应相等，即：

$$P_g + \rho'g(H_q + H_s) - \Delta P_{xj} = P_g + \rho'gH_s + \rho_h g H_q + \Delta P_{ss}$$

P_g — 锅筒水位面处的压力

ρ' — 下降管中的水的密度，一般取锅筒压力下饱和水的密度

ρ_h — 上升管含气段中汽水混合物的平均密度

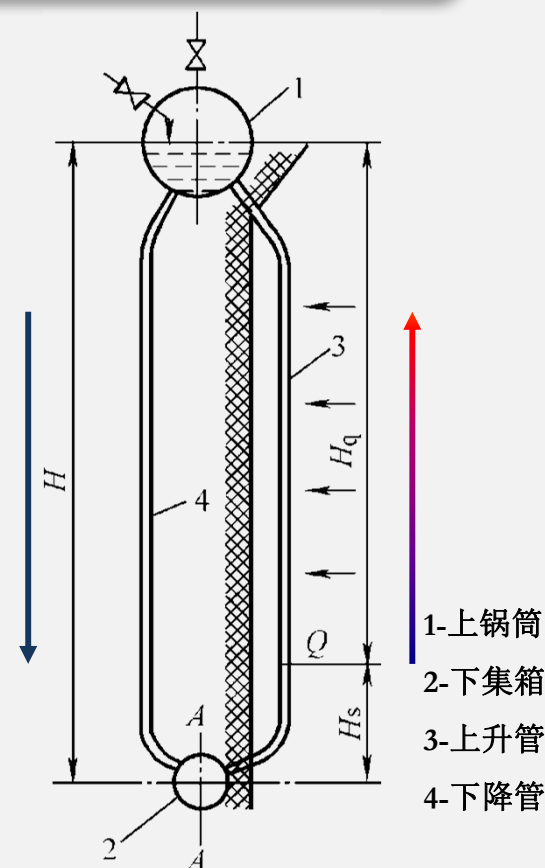
g — 重力加速度

ΔP_{xj} — 下降管阻力

ΔP_{ss} — 上升管阻力

H_s — Q点前的高度为上升管的加热水段高度；

H_q — Q点后的高度为上升管的含汽段高度。





运动压力：运动压力用来克服下降管与上升管的阻力

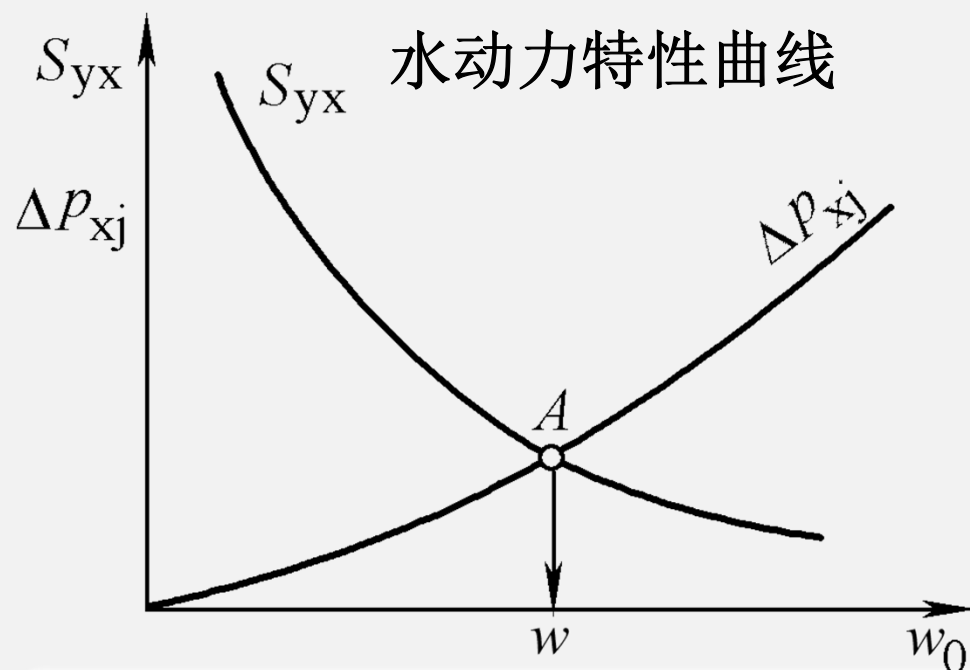
$$S_{yd} = H_q(\rho' - \rho_h)g = \Delta P_{xj} + \Delta P_{ss}$$

上升管、下降管压差：

$$Y_{xj} = \rho'g(H_q + H_s) - \Delta P_{xj}$$
$$Y_{ss} = \rho'gH_s + \rho_hgH_q + \Delta P_{ss}$$

有效压力：有效压力用来克服下降管的阻力

$$S_{yx} = S_{yd} - \Delta P_{ss} = \Delta P_{xj}$$

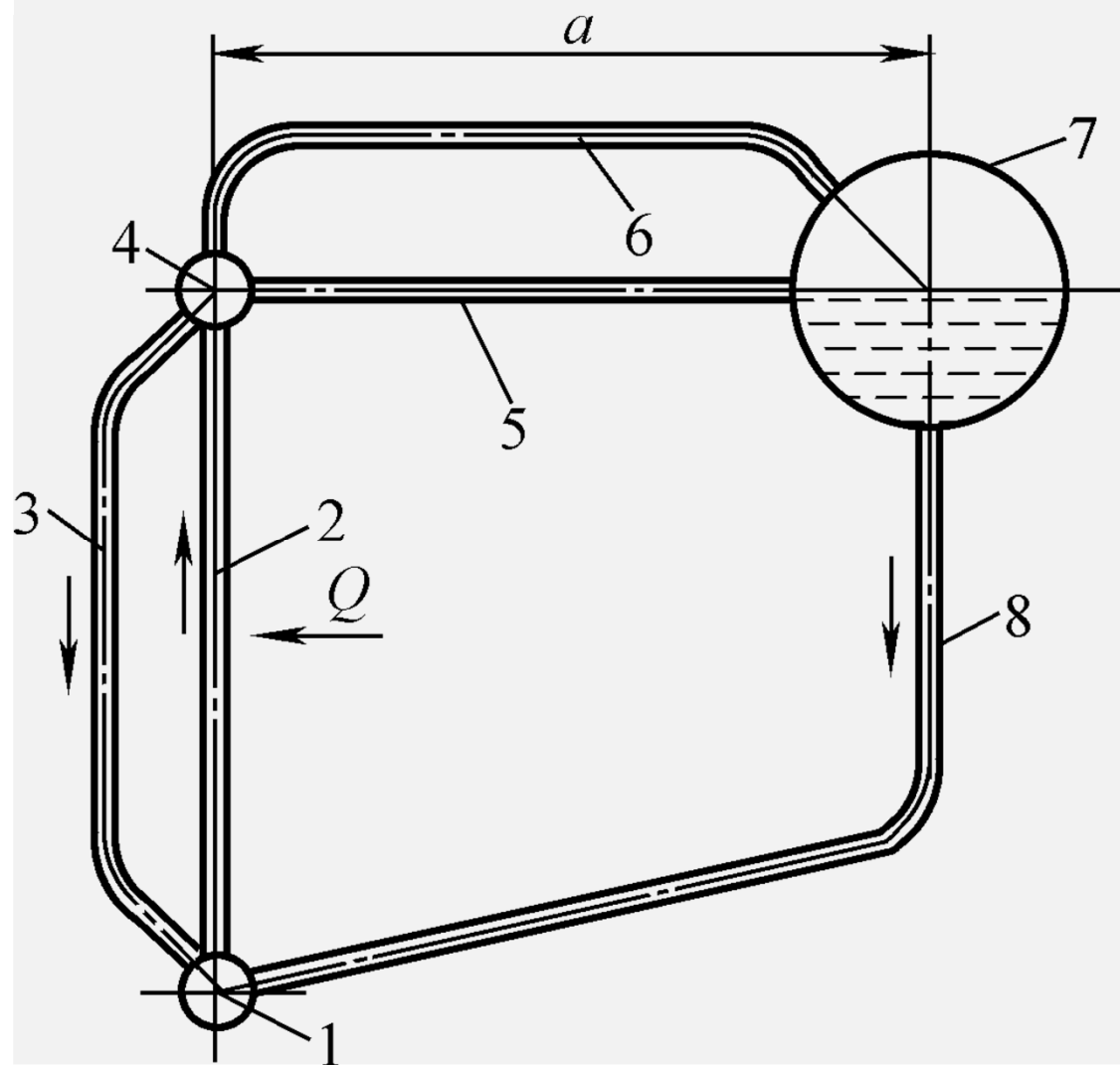


循环流速 $\uparrow \Rightarrow S_{yx} \downarrow$

- 利用在工作点 $Y_{xj}=Y_{ss}$ 原理来计算水循环的方法称为**压差法**；利用在工作点 $S_{yx}=\Delta P_{xj}$ 的原理来计算水循环的方法称为**有效压头法**。
- 图6-4所示为自然循环回路的水动力特性曲线。
- 两曲线的交点A为水循环回路的工作点，该点所对应的流速，即为水循环的回路实际流速。



2. 角管式蒸汽锅炉自然循环回路简图



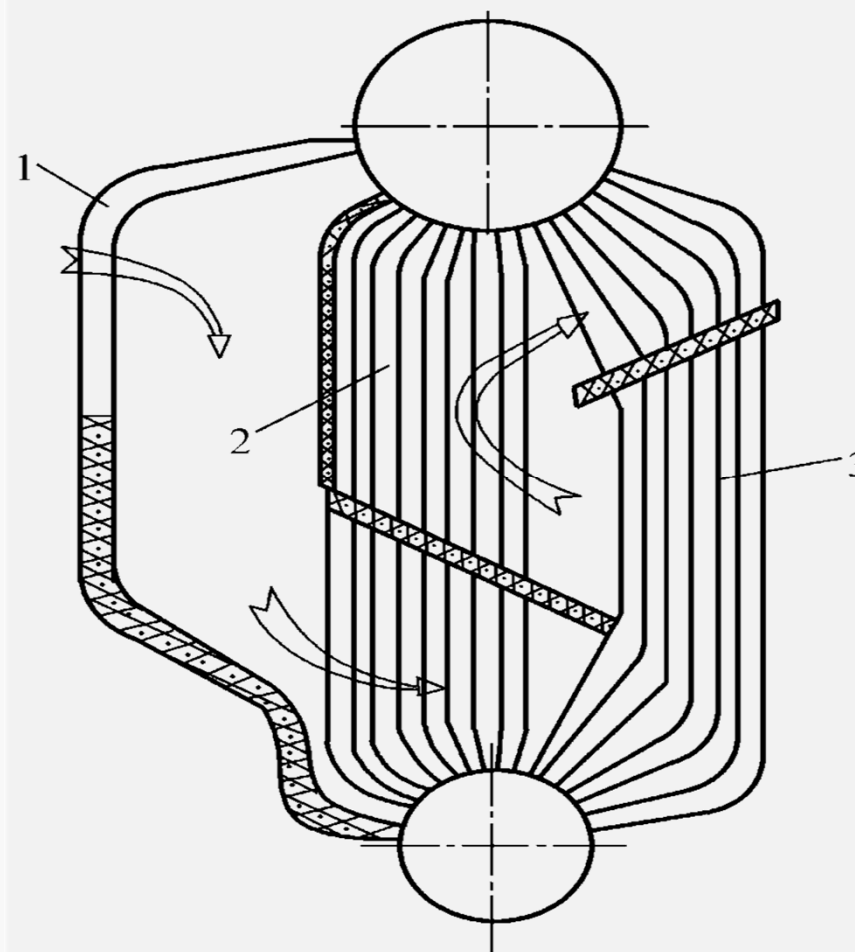
角管式锅炉水循环回路在常规蒸汽锅炉水循环回路的基础上有所改进，它使回路内的水循环更加可靠。

- 1—下集箱
- 2—上升管
- 3、8—下降管
- 4—上集箱
- 5—汽水混合物引出管
- 6—蒸汽引出管
- 7—锅筒



3. 锅炉管束的水循环

- 上、下锅筒与锅炉管束组成对流蒸发受热面循环回路，如图所示。
- 根据烟气流动方向，将锅炉管束分成三部分：第一管束，因处于炉膛出口，烟气温度很高，受热最强，管内工质平均密度最小；第二管束次之；第三管束受热最弱。但这不是绝对的，即使在同一管束中吸热强度本身也存在着差异，再加上锅炉运行工况不断变化，水动力工况当然也跟着变化。



锅炉管束水循环简图

1—第一管束 2—第二管束 3—第三管束



自然循环锅炉的水循环故障

1. 水循环的停滞和倒流

水循环的停滞

概念：当在同一循环回路中，各上升管受热不均匀时，在受热弱的上升管中，汽水混合物的密度必然大于受热强的上升管中汽水混合物的密度。因此，受热弱的上升管中所产生的运动压头就比较小，甚至不能维持最低的循环流速，而处于停止不动的状态，这种现象称为**循环停滞**。

危害：处于停滞状态的上升管内的蒸汽不能及时被带走，管壁冷却情况严重恶化。如果产生循环停滞的上升管直接接于锅筒的蒸汽空间，水将停留在上升管的某一部位，水面以上全是蒸汽，此现象称为“**自由水面**”。在自由水面以上的管段中仅有蒸汽缓慢流动，冷却情况很差，引起管壁温度急剧升高而烧坏。

对策：把上升管或上集箱的汽水引出管从锅筒水位面以下引入锅筒，避免形成自由水面。



水循环的倒流

概念：当上升管受热严重不均匀时，受热最弱的上升管中运动压头过小，受热最强的上升管中汽水混合物的流速过大，而产生抽吸作用，致使受热最弱的上升管中的汽水混合物朝着与正常循环方向相反的方向流动，这种现象称为**循环倒流**。

危害：发生循环倒流时，如果汽水混合物沿着整个管子截面均匀地向下流动，不会发生事故；但当气泡上升速度与水的下流速度相等时，便发生气泡停滞和积聚，形成“**汽塞**”。这时发生汽塞的管段会因得不到工质很好的冷却而过热烧坏。



产生停滞和倒流的根本原因：

同一循环回路中并列工作的各上升管的受热不均匀。

造成受热不均匀主要因素：

- 一是锅炉本体设计制造所引起的；
- 二是由于锅炉运行不良引起的，如炉膛火焰中心偏移或火焰分布不均匀，受热面挂渣积灰等。

措施：

- 增加水循环的运动压头（适当提高水冷壁管的高度及两锅筒之间的中心距离）。
- 减小循环回路的阻力，保持必要的循环流速（设置直径较大的下降管；上升管均匀布置在集箱上，并应尽量减少水冷壁管的弯头；设置直径较大的汽水引出管）。
- 避免结渣和积灰；避免漏风直接吹向水冷壁；及时进行燃烧调整，使炉膛火焰分布均匀；一次排污量不宜过大，排污时间不宜过长等。



2. 汽水分层

概念： 在水平或倾斜度很小的上升管中，汽水混合物的流速很低时，便可能发生管子上部是汽，下部是水的流动现象。

危害：

- 汽水分层的管段受热时，管壁上、下温度不相等，会产生温差应力，使管子遭到破坏；
- 汽水分界面由于水面波动而产生交变应力，使管子产生纵向裂纹而破坏；
- 由于水滴不断溅到上半部管壁上，当水分蒸发后其中的盐分在管壁上形成水垢，使上半部管壁的冷却效果恶化，容易过热烧坏。

措施： 汽水混合物的上升管或汽水引出管与水平线之间的倾角不宜小于 15° 。



3. 下降管带汽

危害：使下降管内工质密度减小，从而使循环回路的运动压头降低，对水循环非常不利。

原因：

- 下降管入口阻力较大，产生较大的压降，使下降管入口处水压降低而发生汽化，造成下降管带汽；
- 下降管管口离锅筒水位面太近，上方水面形成旋涡斗而将蒸汽吸入下降管。
- 下降管受热过强、上升管出口与下降管入口距离太近而又无良好的隔离装置等情况，都会引起下降管带汽。

措施：下降管尽量设置在锅筒底部，以保证管口上方有足够的水位高度。



第六章 工业锅炉的水动力工况及蒸汽净化装置

6.1 工业锅炉的水动力工况

- 6.1.1 锅炉水循环
- 6.1.2 自然循环回路
- 6.1.3 自然循环锅炉的水循环故障

6.2 工业锅炉蒸汽净化装置

- 6.2.1 蒸气污染及蒸汽品质
- 6.2.2 蒸气净化装置



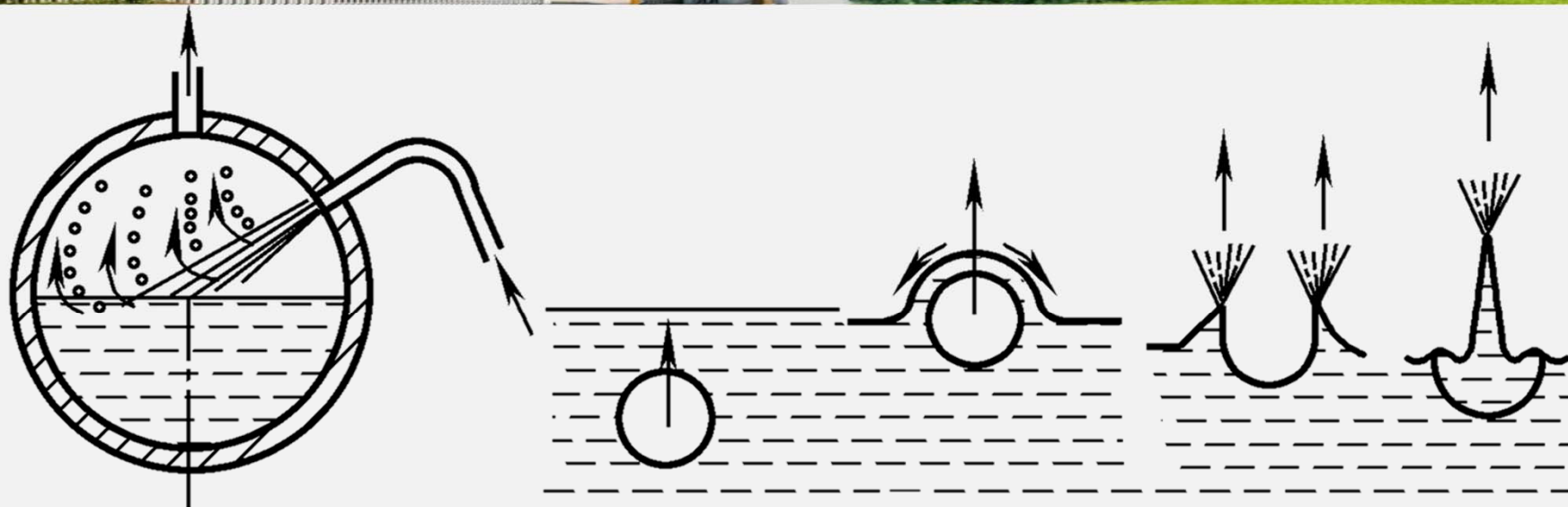
蒸汽污染及蒸汽品质

1. 蒸汽带水的原因

蒸汽污染是指蒸汽中带有的盐分或杂质导致蒸汽品质恶化。

蒸汽带盐的方式有2种：

- 蒸汽携带含有盐分的锅水水滴，称为机械性携带；
- 直接携带溶解于蒸汽中的盐分，称为溶解性携带，因为各种盐分在蒸汽中具有不同的溶解能力，蒸汽的溶解盐分存在着选择性，因此又称为选择性携带。饱和蒸汽的机械性携带与溶解性携带之和即为携带的总盐分。



a) 由于汽水混合物撞击水面而形成水滴

b) 由于汽泡在水面破裂而形成水滴

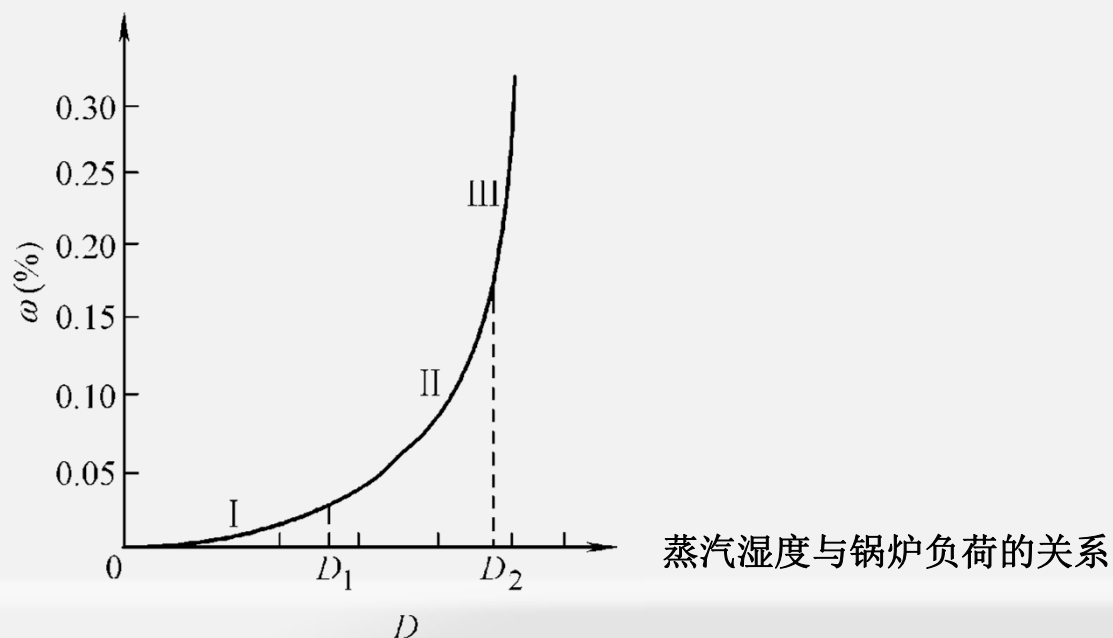
从蒸发受热面进入锅筒的汽水混合物有两条途径：

另一途径是汽水混合物从锅筒水位面以下进入锅筒，依靠自身的动能，不断向上推进，穿越水位面层时破裂，从而引起锅水飞溅，形成水滴，进入锅筒蒸汽空间，大直径水滴落回液相水，较小直径的水滴被蒸汽带走。直径较大的水滴靠自重返回液面，直径较小的水滴则被蒸汽带走，造成蒸汽带水；



2. 蒸汽机械性携带的影响因素

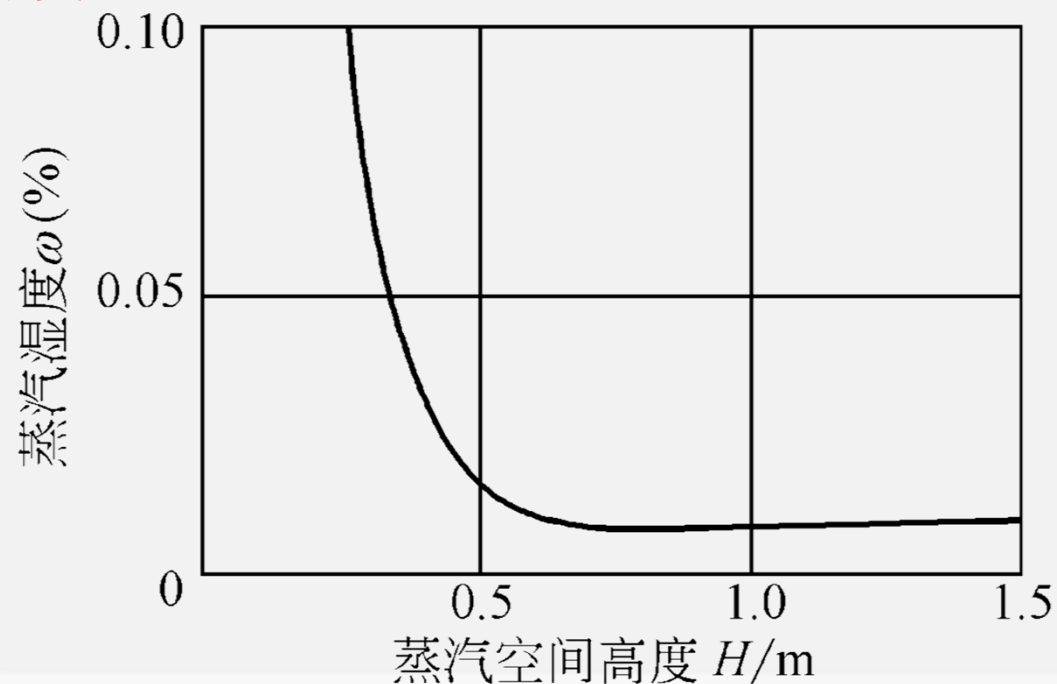
(1) 锅炉负荷



- 在蒸汽压力、锅筒结构尺寸和锅水含盐量一定的条件下，锅炉负荷增加，蒸发面负荷增加，汽水混合物穿出水面或撞击水面造成的锅水飞溅量增多，蒸汽空间汽速也增大，重力分离效果减弱，蒸汽带水量随之增加；又由于锅筒水空间气泡的增多、水位膨胀，使得实际空间高度降低而不利于汽水重力分离。因此，随着锅炉负荷增加，蒸汽湿度增大。



(2) 蒸汽空间高度



- 蒸汽空间高度较小时，汽水重力分离效果很差，大量飞溅的锅水将被蒸汽带走，因此蒸汽湿度大；随着高度增加，蒸汽湿度明显减小。但是到一定高度之后变化不明显。



(3) 锅水含盐量

- 锅水含盐量增加，锅水粘度及表面张力也随着增大，小气泡不易形成大气泡，且上升速度慢，使锅水中积存的汽泡量增加，锅筒水位膨胀及自由水面上泡沫层增厚，导致蒸汽空间的高度减小，不利于重力分离，因此蒸汽湿度增大。含盐量到一定数值，蒸汽湿度急剧增加，此时为临界含盐量。
- 工业锅炉采用连续排污和定期排污的方法来保持锅水含盐量在合格的范围内。



3. 蒸汽品质

合格的蒸汽:

- 出力应达到额定蒸发量;
- 要求的蒸汽参数 (压力和温度);
- 符合标准规定的蒸汽品质。

蒸汽品质: 指蒸汽所含杂质的多少, 也即蒸汽的洁净度;

- (1) 气体杂质: O_2 , N_2 , CO_2 ;
- (2) 非气体杂质: 蒸汽中的盐分。

蒸汽带水的危害:

- (1) 恶化过热器传热;
- (2) 增大阻力、阀门失灵;
- (3) 汽轮机叶片流线改变。



提高工业锅炉蒸汽品质的措施：

➤ 提高给水品质

在排污量不变时，提高给水品质，则降低了锅水的盐含量，蒸汽品质相应提高。

➤ 改进锅筒内部装置

选用适当的汽水分离装置，以提高汽水分离效率，减少蒸汽的机械性携带；

采用蒸汽清洗方法，选择适当的蒸汽清洗装置，降低蒸汽的溶解性携带。

➤ 加强锅水排污

采用定期排污和连续排污，以降低锅水含盐量，保持合格的锅水品质，从而提高蒸汽品质。



蒸汽净化装置

1. 汽水分离装置

(1) 汽水分离的基本原理

1) 重力分离原理 利用蒸汽和水的密度不同，从而使汽、水在锅筒汽空间依靠重力进行自然分离。

2) 惯性力分离原理 利用汽水两相流体改变方向时，蒸汽和水滴的惯性力不同，从而使汽、水分离。

3) 离心力分离原理 利用汽水两相流体旋转运动时，产生的离心力不同，从而使汽、水分离。

4) 水膜分离原理 利用汽水两相流体中水和蒸汽粘度不同，水粘度大，易附着于金属壁面形成水膜，并依靠本身的重力向下流入水空间，从而使汽、水分离。



(2) 汽水分离装置的设计要求

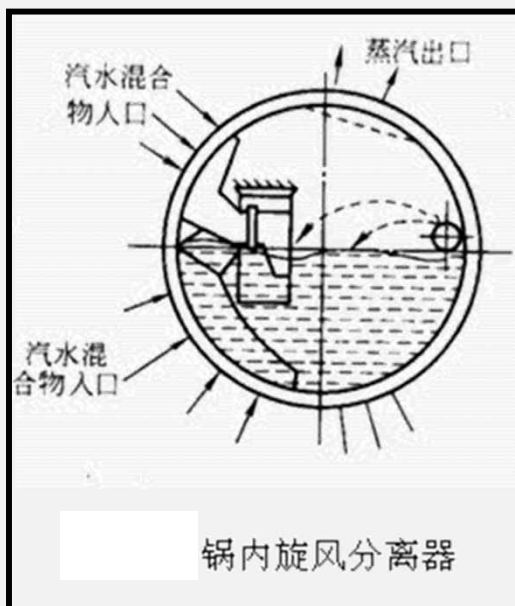
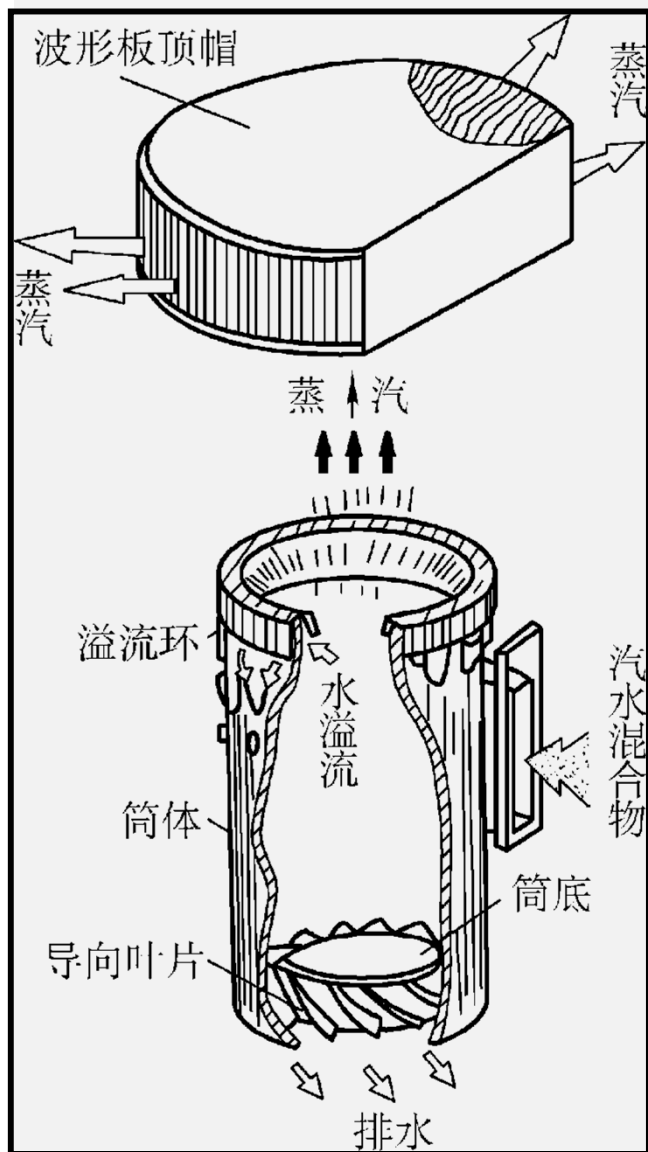
(3) 粗分离装置

(1) 旋风分离器 (2) 挡板 (3) 水下孔板

(1) 旋风分离器

➤结构形式：由筒体、波形板顶帽、开式溢流环、圆形底板和导向叶片等组成。

➤分离原理：离心力分离、重力分离和水膜分离。





(2) 汽水分离装置的设计要求

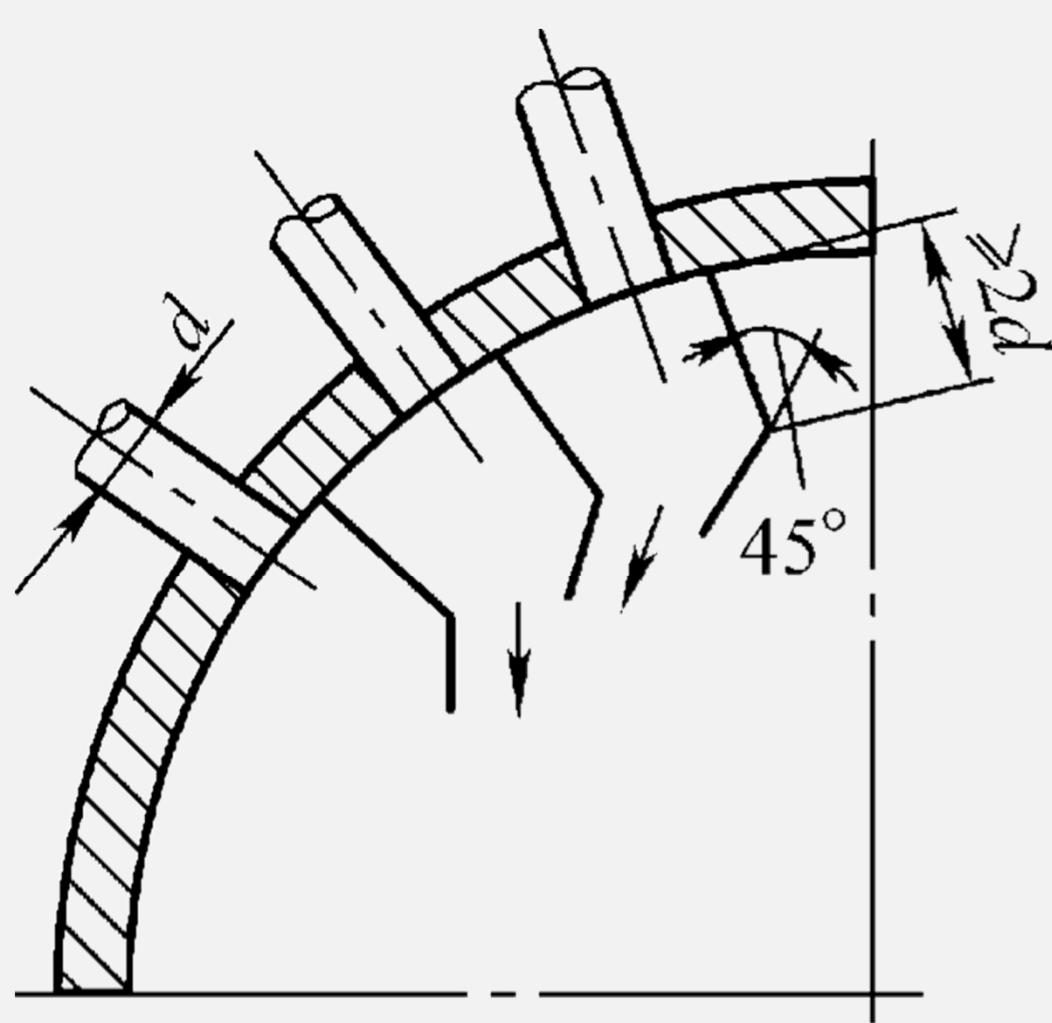
(3) 粗分离装置

(1) 旋风分离器 (2) 挡板 (3) 水下孔板

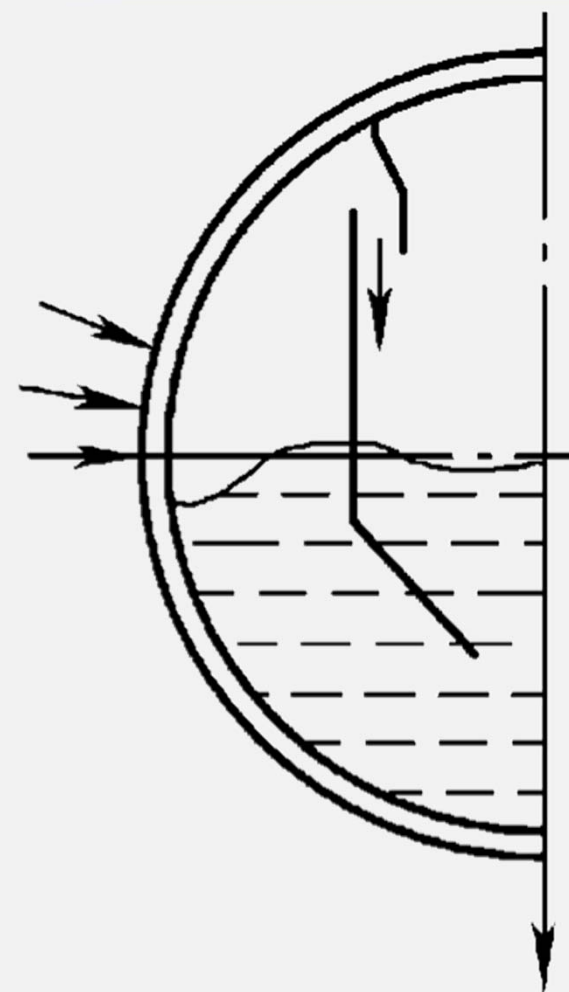
(2) 挡板

➤ 挡板用于汽水混合物从汽空间引入锅筒时，其作用是消除汽水混合物进水的动能，并借助工质转弯的惯性力，对汽水进行分离。有进口挡板和缝隙挡板两种基本形式。

➤ 分离原理：消除动能，利用惯性力。



a) 进口挡板



b) 缝隙挡板



(2) 汽水分离装置的设计要求

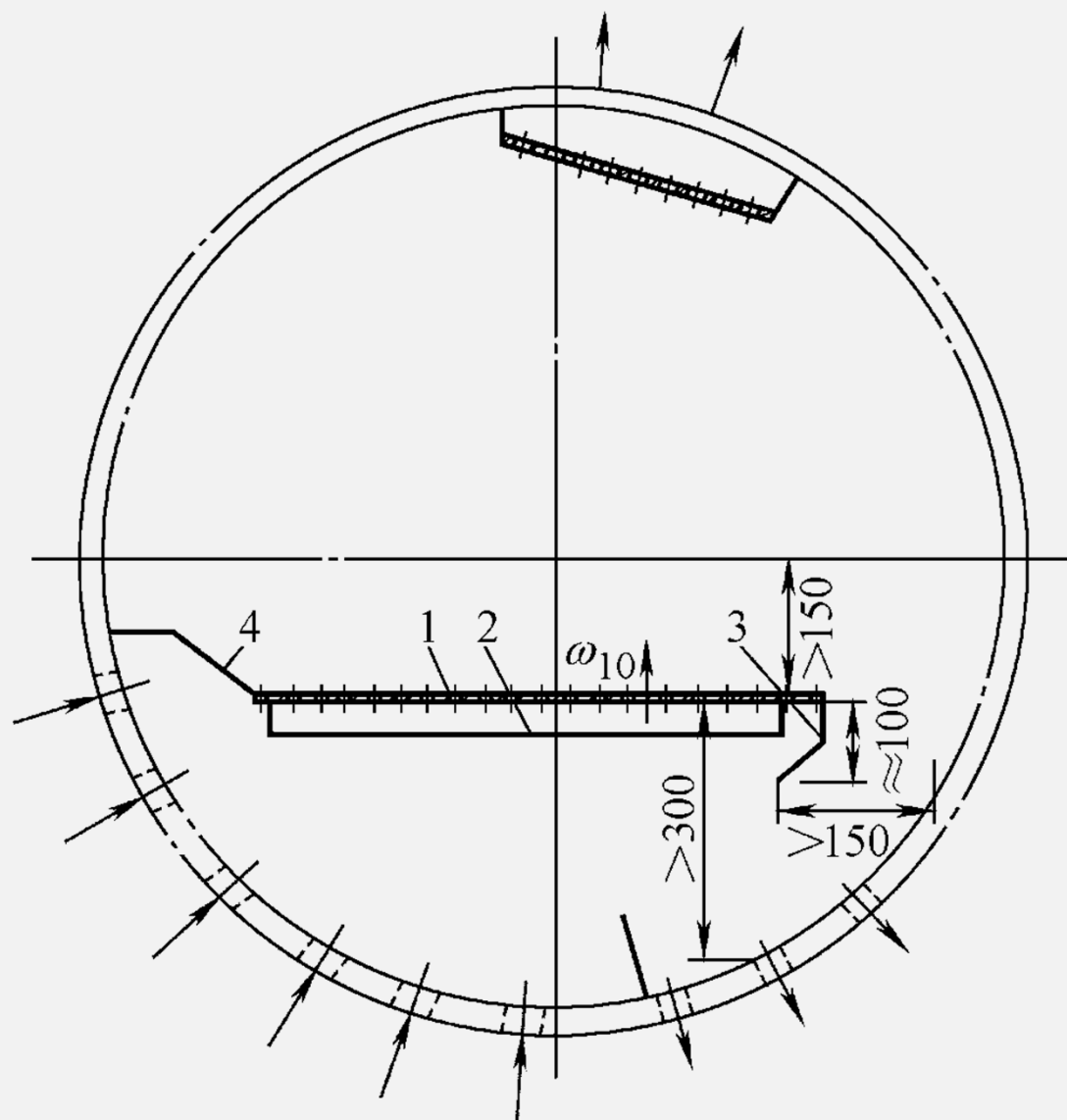
(3) 粗分离装置

(1) 旋风分离器 (2) 挡板 (3) 水下孔板

(3) 水下孔板

➤ 水下孔板是布置在锅筒水空间中的平孔板。

➤ 分离原理：节流、均流、消除动能，防止冲击水面，减少汽水混合物穿过水面时形成的细小水滴；均匀蒸发面负荷。



- 1-水下孔板
- 2-加固筋
- 3-侧封板
- 4-导管



(4) 细分离（或称二次分离）装置

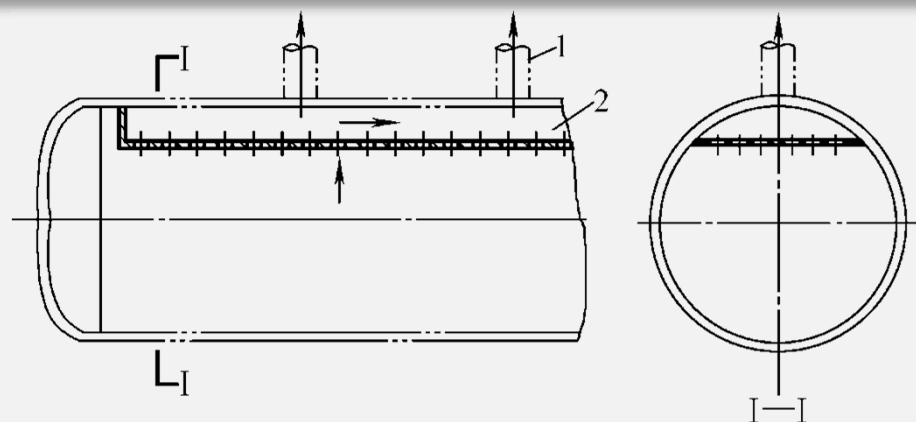
(1) 均汽孔板 (2) 集汽管 (3) 百叶窗分离器/波形板分离器

(4) 钢丝网分离器 (5) 蜗壳式分离器

(1) 均汽孔板

➤ 装在锅筒顶部的多孔板。

➤ 分离原理：节流，均匀负荷，降低蒸汽上升速度，重力分离；阻挡细小水滴。



1-饱和蒸汽引出管 2-均汽孔板



(4) 细分离（或称二次分离）装置

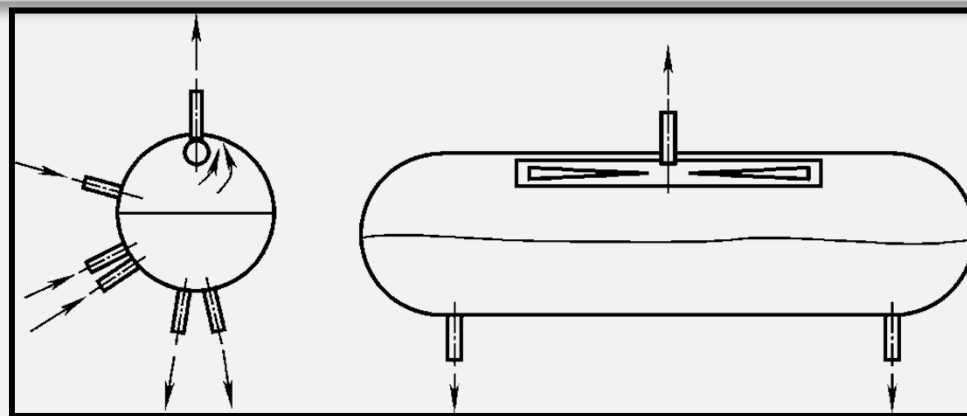
(1) 均汽孔板 (2) 集气管 (3) 百叶窗分离器/波形板分离器

(4) 钢丝网分离器 (5) 蜗壳式分离器

(2) 集气管

➤在工业锅炉中，为了均匀蒸汽空间负荷，防止蒸汽带水，常采用集气管。

➤集气管形式：缝隙式和多孔式。



集气管



(4) 细分离（或称二次分离）装置

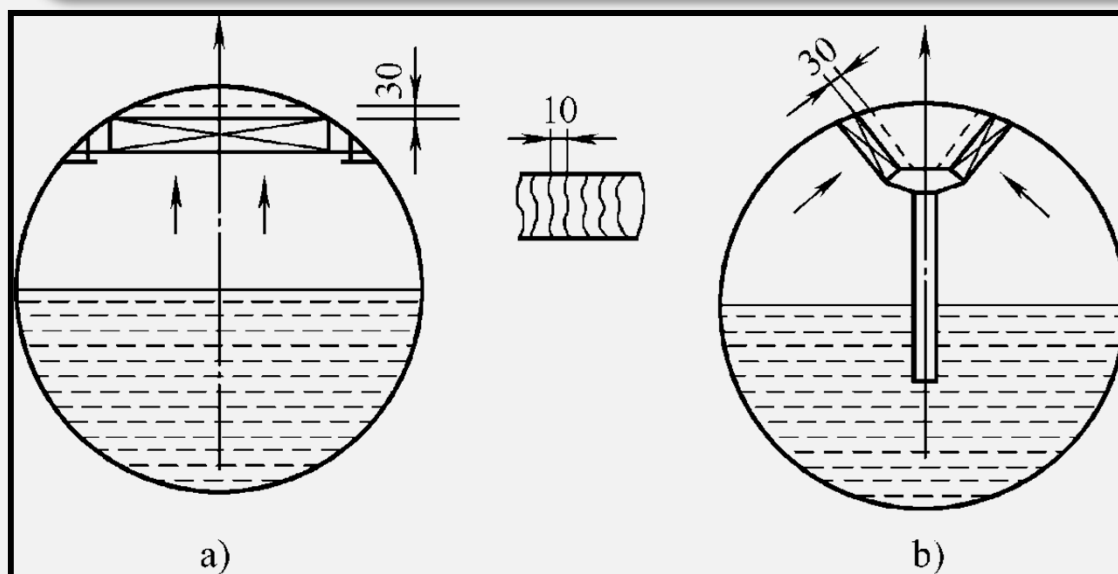
(1) 均汽孔板 (2) 集汽管 (3) 百叶窗分离器/波形板分离器

(4) 钢丝网分离器 (5) 蜗壳式分离器

(3) 百叶窗

➤ 结构形式 由许多块波形板相间排列组成，水平布置在锅筒顶部。

➤ 分离原理 惯性力，水膜，重力。



a) 水平式百叶窗分离器

b) 竖立式百叶窗分离器



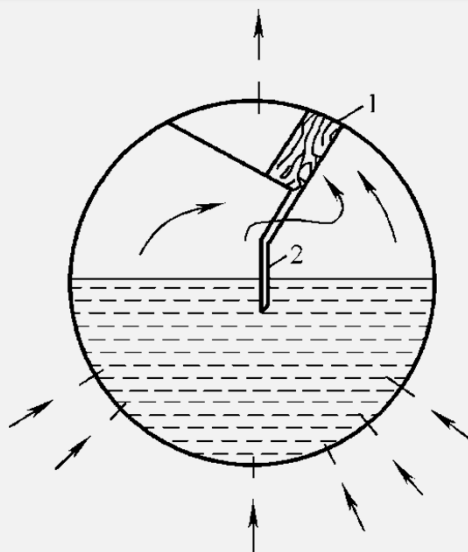
(4) 细分离（或称二次分离）装置

(1) 均汽孔板 (2) 集汽管 (3) 百叶窗分离器/波形板分离器

(4) 钢丝网分离器 (5) 蜗壳式分离器

(4) 钢丝网分离器

➤ 由两片拉网钢板内夹数层钢丝网组合而成，工艺简单，流动阻力小，应用广泛。



1-钢丝网组件

2-排水管



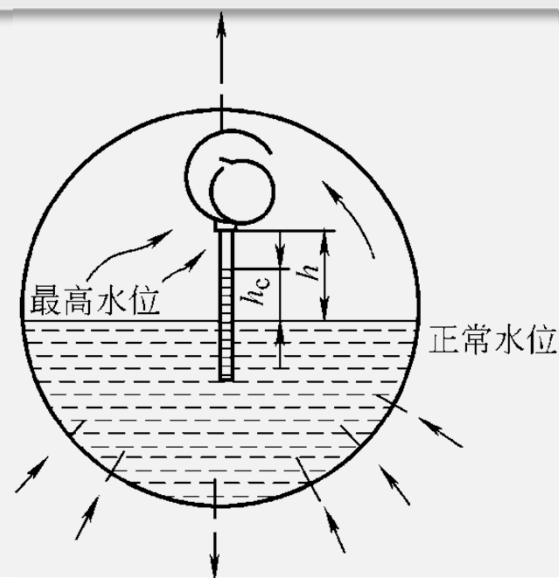
(4) 细分离（或称二次分离）装置

(1) 均汽孔板 (2) 集汽管 (3) 百叶窗分离器/波形板分离器

(4) 钢丝网分离器 (5) 蜗壳式分离器

(5) 蜗壳式分离器

➤由缝隙式集汽管及其外加的蜗壳组成，在离心力的作用将汽水分离。

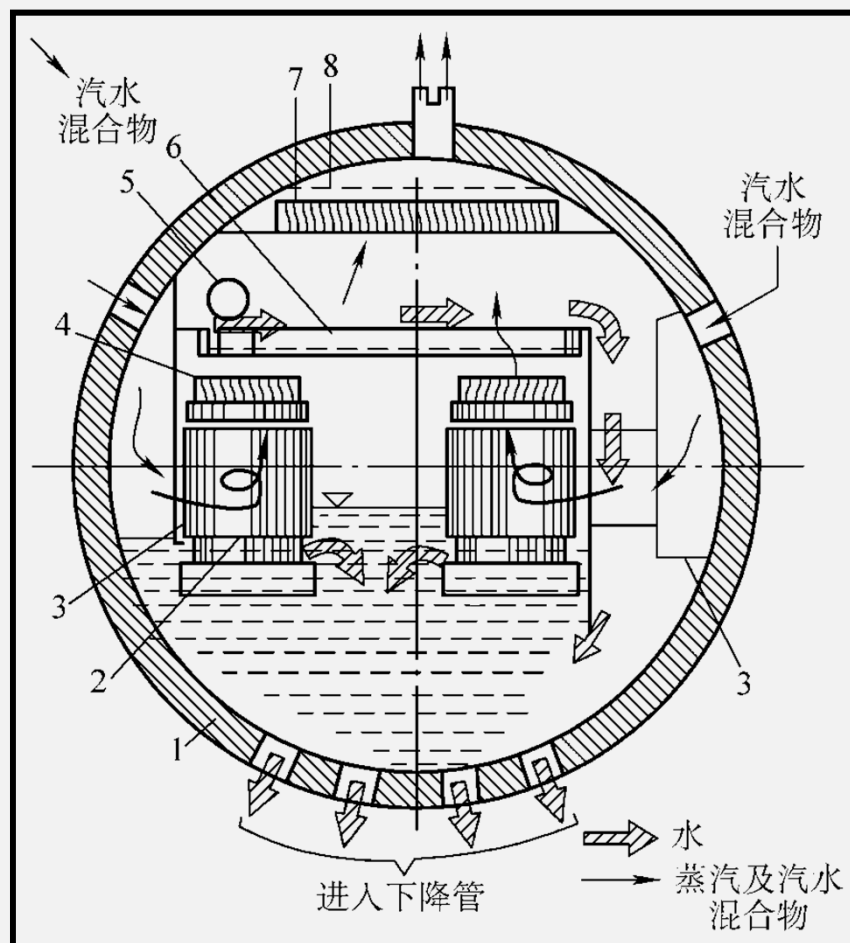


h - 锅筒最高水位到蜗壳式分离器下缘的垂直距离

h_c - 排水管中水位与锅炉水位的高度差



(5) 粗、细分离组合式汽水分离装置



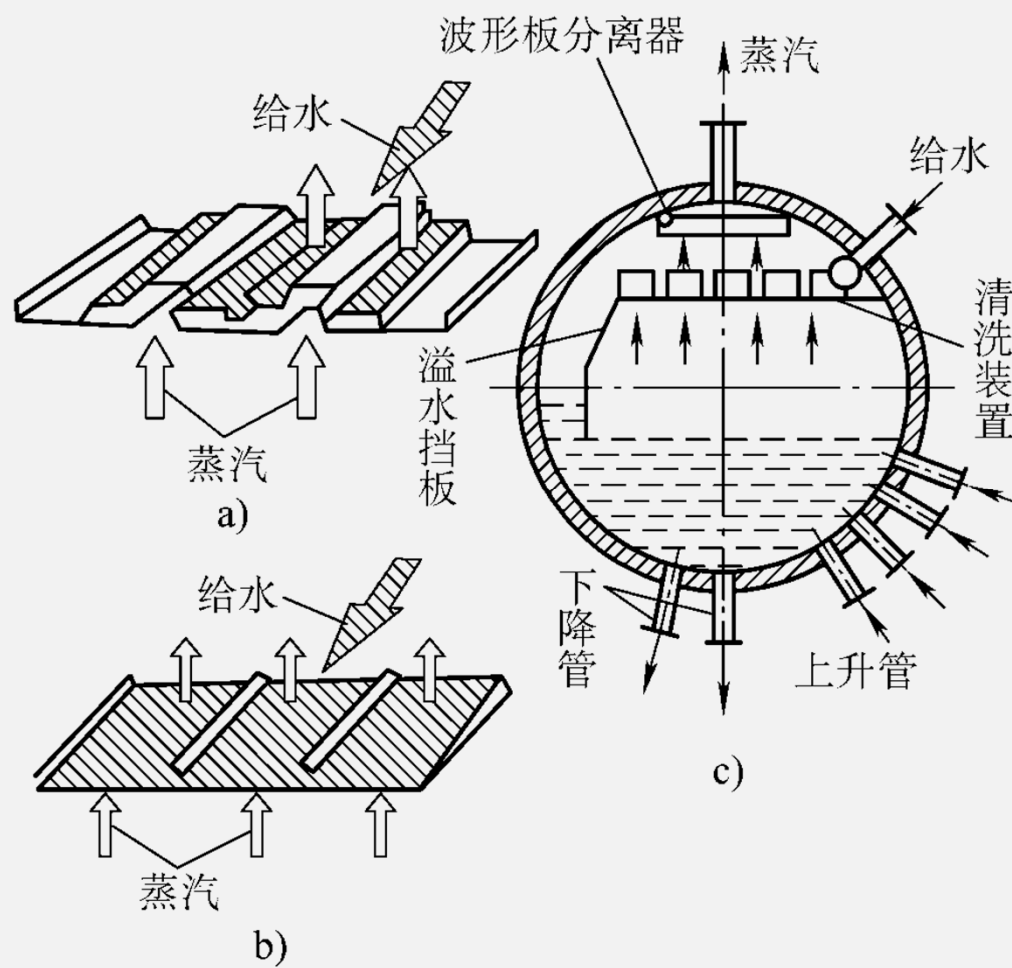
1-锅筒 2-旋风分离器 3-锅筒内汽水混合联想 4、7-百叶窗分离器
5-给水管 6-蒸汽清洗装置 8-匀汽孔板



3. 蒸汽清洗装置

蒸汽清洗的原理是将刚从锅水分离出来的含盐饱和蒸汽与给水混合，由于给水中的盐分浓度低，蒸汽中较高浓度的盐分会自动向给水中进行扩散，从而降低蒸汽的含盐浓度，使其达到合格标准。

对蒸汽品质有特殊要求的工业锅炉，常用穿层式清洗装置清除饱和蒸汽的溶盐，穿层式清洗装置分为钟罩式和平孔板式两种。



a) 钟罩式

b) 孔板式

c) 清洗原理

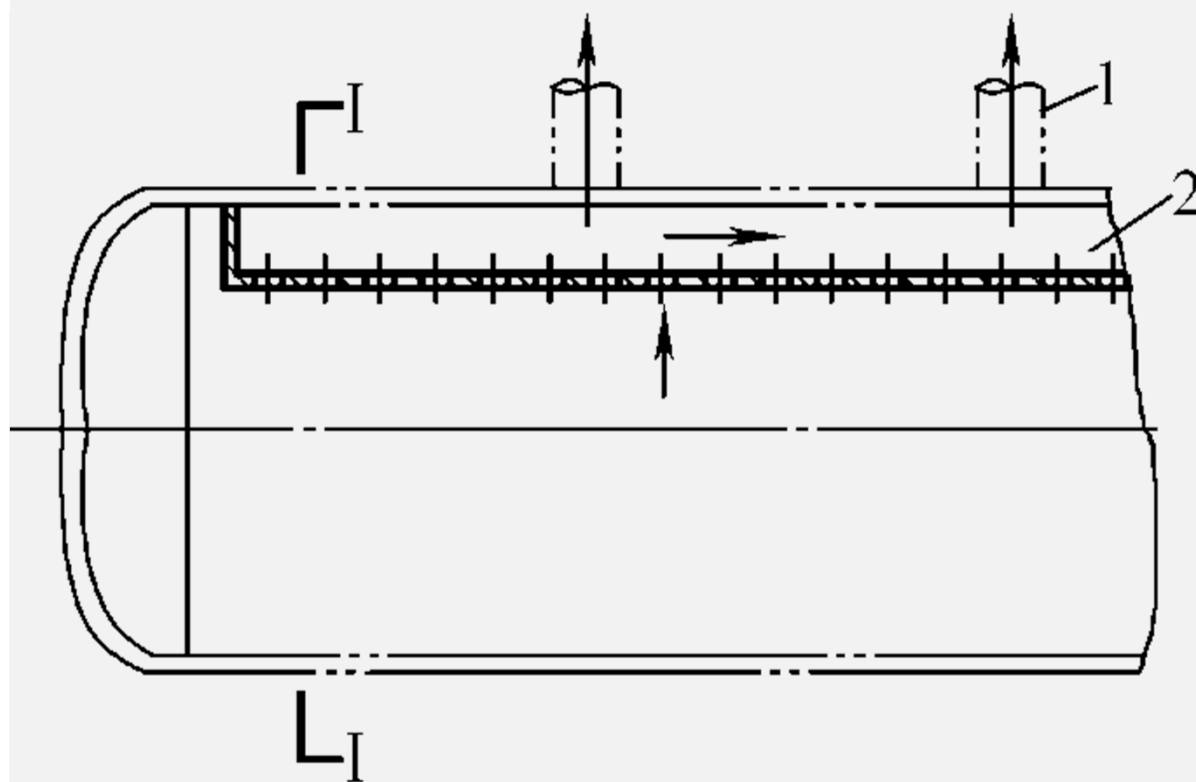


作业:

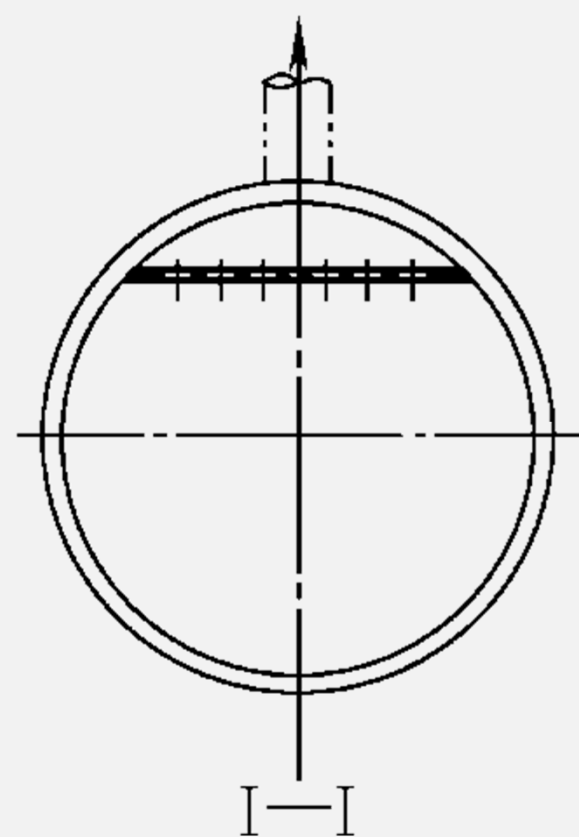
1. 自然循环回路的流动压头是怎么产生的？流动压头与有效压头有何区别？
2. 自然循环蒸汽锅炉的水循环会出现哪些常见故障？
3. 自然循环蒸气锅炉中水循环发生故障时，为什么一般是受热弱的上升管而不是受热强的上升管容易烧坏或过热？
4. 试述工业锅炉蒸汽净化的原理？



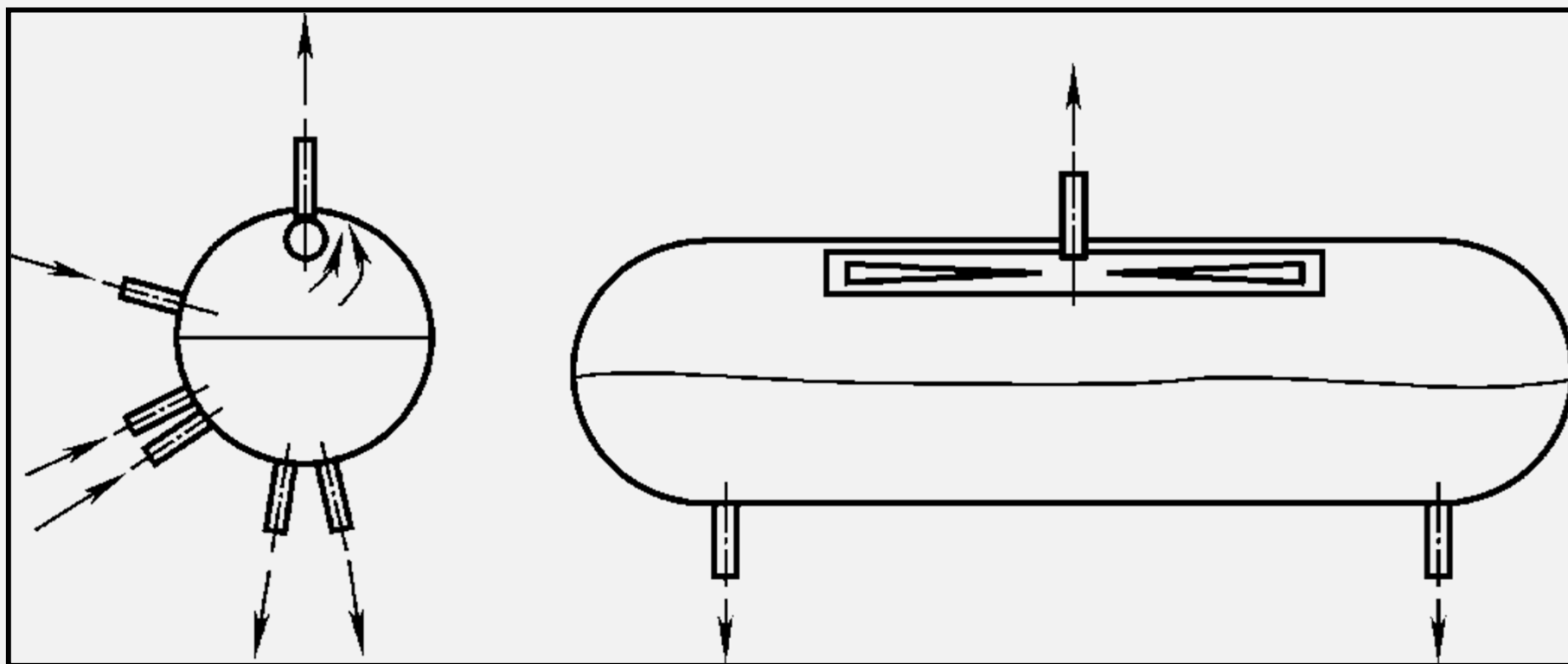
The End



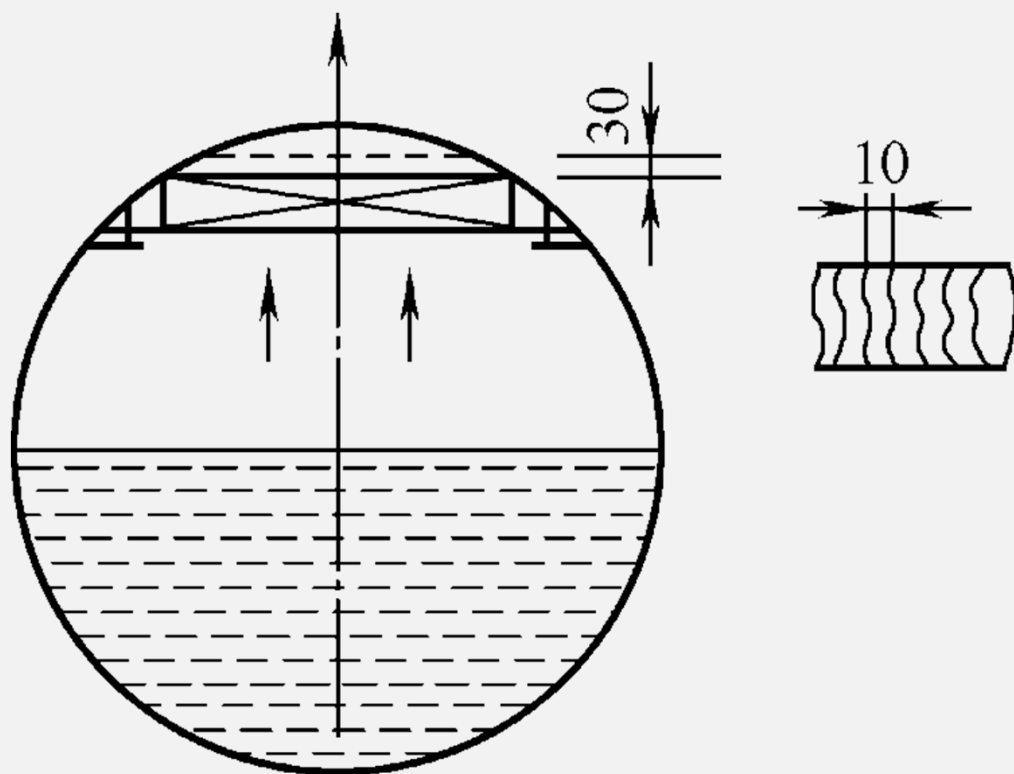
1-饱和蒸汽引出管



2-匀汽孔板

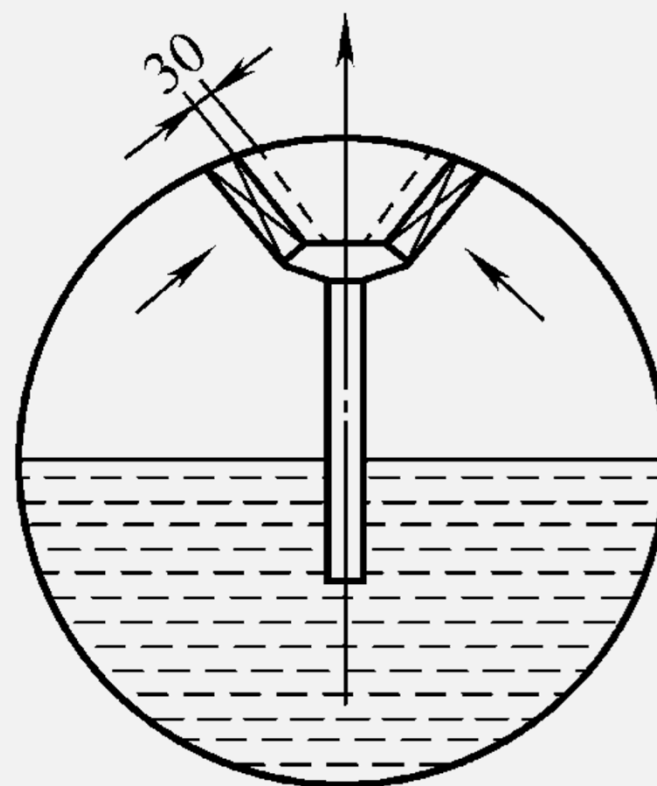


集气管



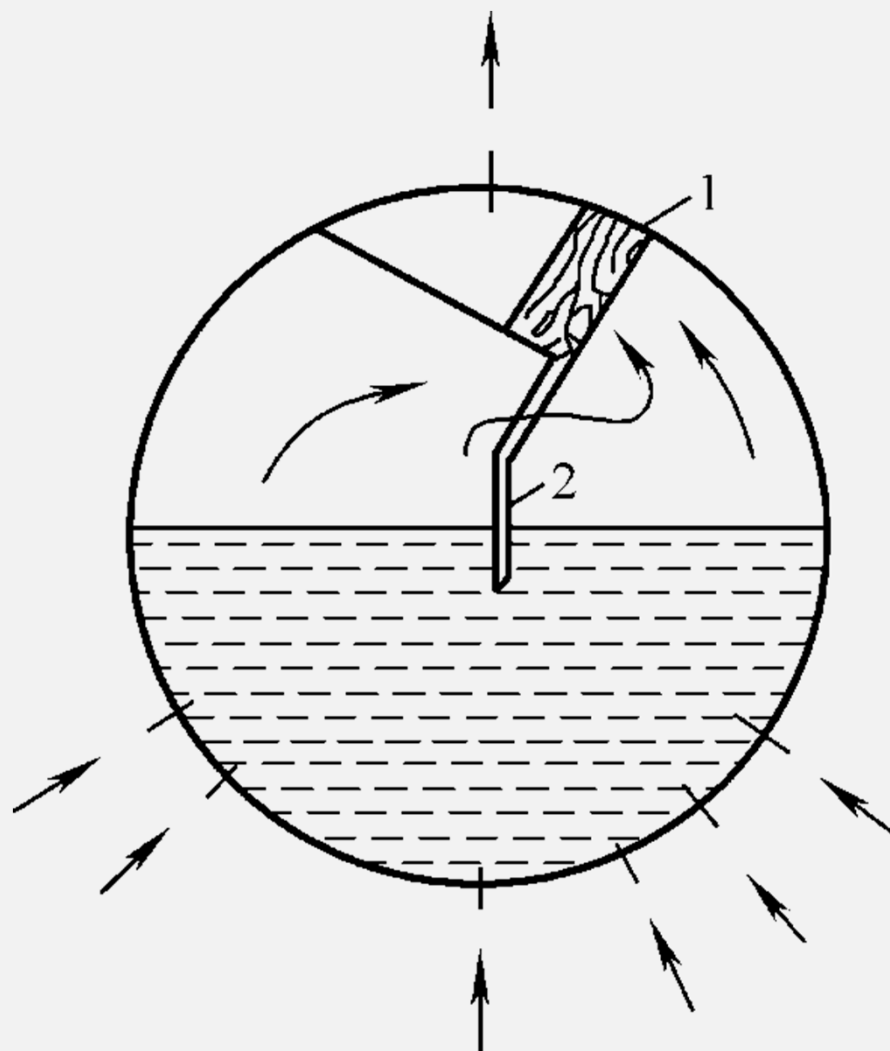
a)

a) 水平式百叶窗分离器

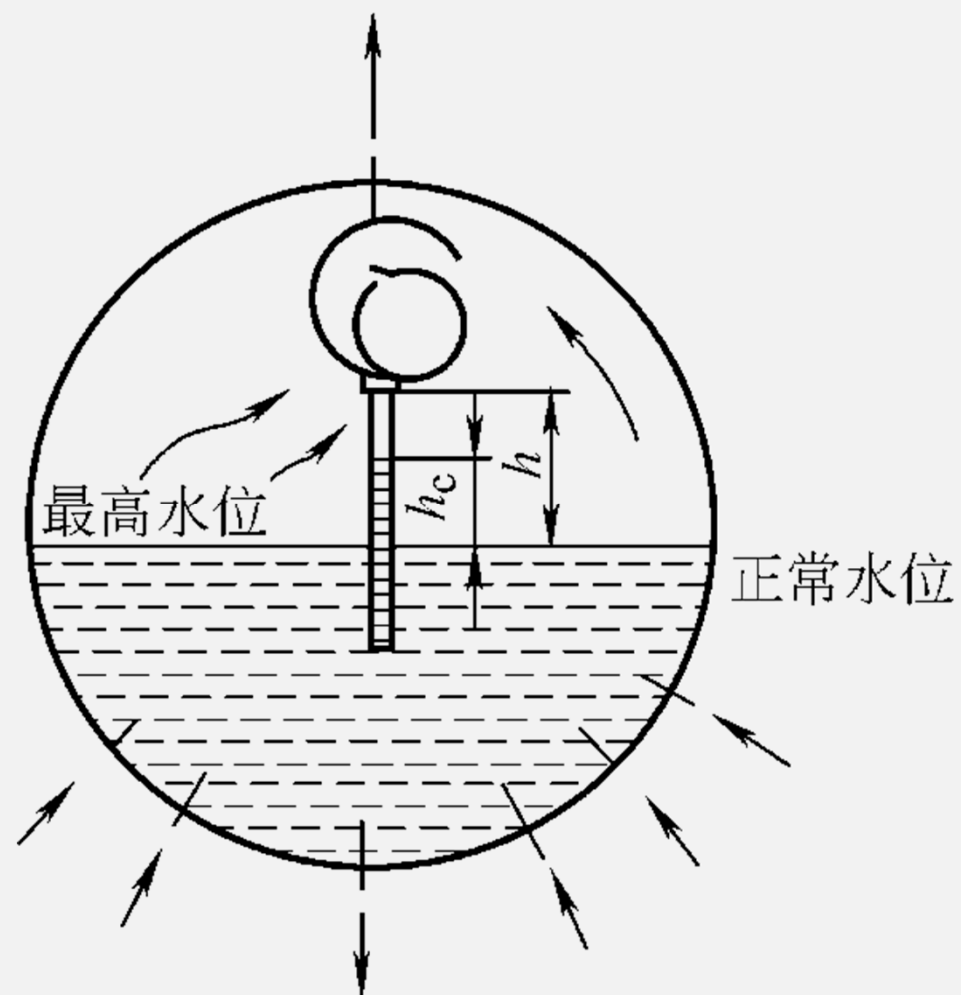


b)

b) 竖立式百叶窗分离器



1-钢丝网组件 2-排水管



h - 锅筒最高水位到蜗壳式分离器下缘的垂直距离
 h_c - 排水管中水位与锅炉水位的高度差