

# 锅炉原理实验指导书

## 实验一 工业锅炉工作原理实验

### 一、实验目的

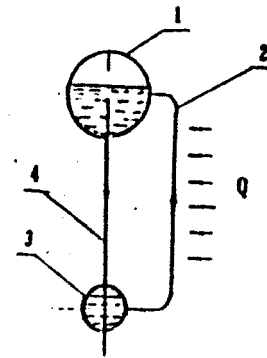
1. 通过演示实验，使学生深化掌握锅炉自然水循环的基本原理；
2. 观察在自然循环条件下平行并列管中汽液两相的流动状态；
3. 了解自然水循环中的常见故障—停滞与倒流现象。

### 二、实验内容

锅炉工作的可靠性在很大程度上取决于水循环工况，对于在高温下工作的对流管束和水冷壁，为了避免管壁温度迅速升高，必须由流动的水来冷却，从而防止金属管壁的损坏破裂。自然水循环是目前小型锅炉中普遍采用的水循环方式。

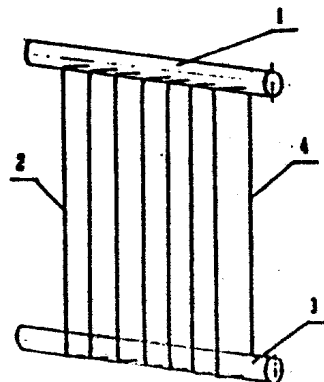
自然循环锅炉中的循环动力，是靠上升管与下降管之间液柱重力差来维持的，其简单回路如图 1 所示，它由上锅筒（汽包）、下集箱、上升管和下降管组成。上升管由于受热，工质随温度升高而密度变小；或在一定的受热强度及时间下，上升管会产生部分蒸汽，形成汽水混合物，从而使上升管工质密度大为降低。这样，不受热的下降管工质密度与上升管工质密度存在一个差值，依靠这个密度差产生的压差，使上升管的工质向上流动，而下降管的工质向下流动来进行补足，这便形成了循环回路。只要上升管的受热足以产生密度差，循环会不止。

循环回路是否正常，将影响到锅炉的安全运行。如果是单循环回路（只有一根上升管和一根下降管），



1-上锅筒 2-上升管 3-下集箱 4-下降管

图 1 单循环回路



1-锅筒 2-上升管 3-下集箱 4-下降管

图 2 列管复合循环回路

由上升至锅筒的工质将由下降管完全得到补充，使上升管得到足够的冷却，因而循环是正常的。但锅炉的水冷壁并非由简单的回路各自独立而组成，而是由若干上升管并列组成受热管组，享有共同的锅筒、下降管、下集箱。如图 2 所示。这样组成的自然循环比单循环具有更大的复杂性，各平行管之间的循环相互影响，在各管受热不均匀的情况下，一些管子将出现停滞、倒流现象。

循环停滞是指在受热弱的上升管中，其有效压头不足以克服下降管的阻力，使汽水混合物处于停滞状态，或流动得很慢，此时只有汽泡缓慢上升，在管子弯头等部位容易产生汽泡的积累使管壁得不到足够的水膜来冷却，从而导致高温破坏。

循环倒流是指原来工质向上流动的上升管，变成了工质自上而下流动的下落管。产生倒流的原因亦是在受热弱的管子中，其有效压头不能克服下降管阻力所致。如倒流速度足够大，也就是水量较多，则有足够的水来冷却管壁，管子仍能可靠地工作。如倒流速度很小，则蒸汽泡受浮力作用可能处于停滞状态，容易在弯头等处积累，使管壁受不到水的冷却而过热损坏。这二种特殊故障都是锅炉运行中应该避免的。本实验主要是使学生对此二种循环故障有深刻的了解。

这套装置是采用玻璃作换热器的壳体，管路中有透明观察窗，因此，实验过程能让同学们清晰地观察到制冷工质的蒸发、冷凝过程及流后产生的“闪发”气体面形成的二相流，使之了解蒸汽压缩式制冷循环工质状态的变化及循环全过程的基本特征。

通过本实验，让学生加深对制冷（热泵）循环工作过程的理解，熟悉制冷（热泵）循环系统工作原理。并进一步掌握制冷（热泵）循环系统的操作、调节方法，并能进行制冷（热泵）循环系统粗略的热力计算。

### 三、仪器设备

工业锅炉实验台，共 2 台。

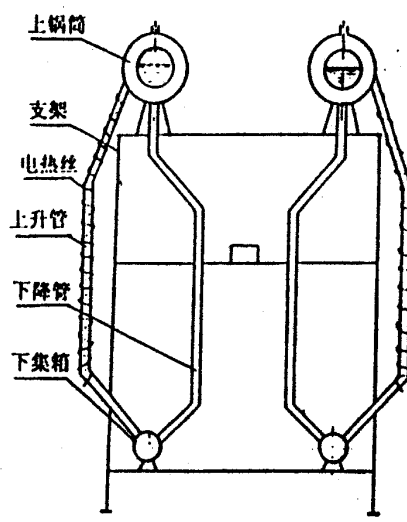


图 3 实验装置结构示意图

## 四、所需耗材

胶管、加热电阻丝等。

## 五、实验原理、方法和手段

工业锅炉演示模型，亦即锅炉自然水循环实验装置的结构示意图如图 3 所示。装置由左右对称的两组自然水循环系统组成，每组系统各由 7 根玻璃制上升管、3 根玻璃制下降管、

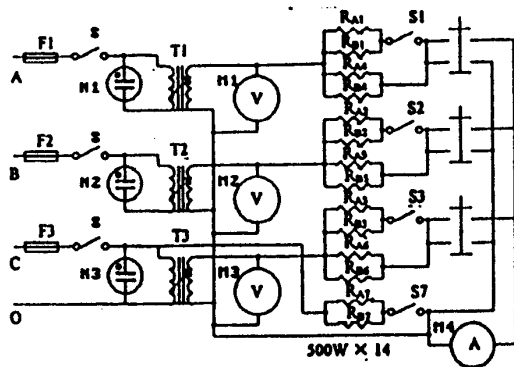


图 5 电路图

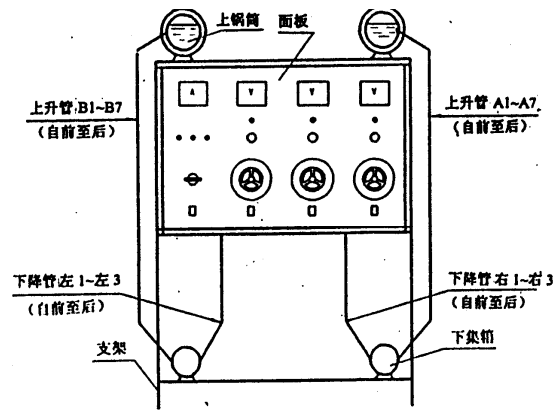


图 4 实验装置整体结构图

1 个上锅筒和 1 个下集箱所组成。两组系统都安装在同一个支架上，每根上升管都缠有额定功率为 500W 的加热电热丝。实验装置的整体结构及上升管和下降管的安排布置如图 4 所示，上升管加热电热丝的电路图如图 5 所示（电路中电热丝的编号与上升管的编号相对应）。各上升管的加热可以通过相应的调压器来调节输入电压，也可以利用加热开关来接通或断开电源（参看图 4 和图 5），由此可以调节各上升管的加热程度（或停止加热），从而可以演示出上升管和下降管中正常的自然水循环水汽流态、柱状和弹状气泡的出现，也可以演示自然水循环中常见的故障——停滞和倒流。

演示时，也可以通过电流检测按钮，观察和测定加热电路中的电流大小，从而可以计算出加热电功率。

由于实验装置的电气系统为左右对称共用，使用时调整任何操作部分，将对两个水循环系统同时作用，因而可以在模型两侧的相应对称玻璃管中同时看到基本相同的现象。

实验装置的操作面板如图 6 所示。操作面板上的仪表、开关和调压器等的符号，以及它们的电路联接可参看图 5 的电路图，以便理解其具体功能和作用，有助于操作和演示。操作面板上：

T1 (1, 4), T2 (2, 5), T3 (3, 6) 一分别是上升 A1、B1 和 A4、B4；上升管 A2、B2 和 A5、

B5；上升管 A3、B3 和 A6、B6 的加热调压器。

S1、S2、S3、S7—分别是上升管 A1 和 B1，A2 和 B2，A3 和 B3，A7 和 B7 的加热开关。

## 六、实验步骤

1. 使用前，检查上锅筒中的水位，如水位不够，应适量添加。

2. 先将各调压器调至零位，检查电路和仪表无异常情况，将各加热开关 S1、S2、S3 和 S7 置于接通位置。

3. 接通三相电源，打开总电源开关。

4. 将三个调压器逐步调至 220V 左右，加热约半小时左右，直到系统进入沸腾状态。此时可以从上升管和下降管中观察到正常的自然水循环状态，所有的上升管中的水

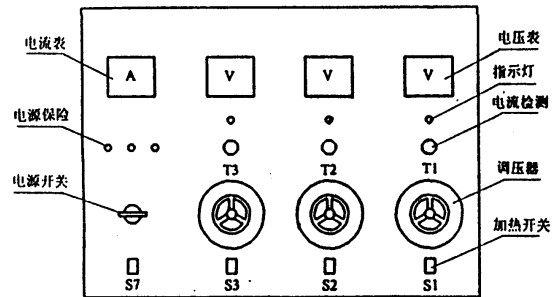


图 6 操作面板图

向上流动，而下降管中的水则向下流动。在沸腾剧烈时，可以看到管中产生柱状和弹状汽泡的水、汽流动状态。

5. 为了能够在水循环系统中演示常见的故障——停滞和倒现象，在上述试验工况下，可采用三种方案来模拟一些上升平行管的受热不均匀情况，从而可能在受热弱的上升管中产生并观察到上述故障现象。

三种可行的方案如下，可择其可行者来试验：

1) 选定任何一调压器加热电路，联通二根上升管的加热开关，再下调这个调压器电压至 30V 左右，将会有两侧相应的 4 根上升管相同地降温，从而可能导致在这些受热弱的上升管中出现故障。

2) 选定任一调压器加热电路，断开二根上升管的加热开关，再下调这个调压器电压至 30V 左右，会有二根上升管相同地降温，另二根上升管断电停止加热，也可能在这些受热弱的上升管中导致故障的出现。

3) 选定任一调压器加热电路，断开其两根上升管的加热开关，但不下调这个调压器的电压，就会只有相应的二根上升管断电不加热，也有可能在这二根受热弱的上升管中出现故障。

6. 实验结束后，将所有调压器调至零位，并断开总电源。

## **七、实验注意事项**

1. 检查上锅筒中的水位，如水位不够，应适量添加；
2. 实验过程中禁止触摸电阻丝和高温壁面。

## **八、预习与思考题**

1. 锅炉自然水循环的基本原理是什么？
2. 停滞与倒流现象的发生有何条件？

## **九、实验报告要求**

实验报告应包括：

1. 简述实验原理与过程；
2. 各种数据并加以整理，分析数据是否准确和误差产生原因；
3. 通过实验的收获体会及对实验改进意见。

## 实验二 直流锅炉工作原理实验

### 一、实验目的

1. 观察直流锅炉的工作情况，加深对直流锅炉的感性认识；
2. 测试直流锅炉的水动力特性，了解直流锅炉的水动力不稳定性。

### 二、实验内容

本实验台为垂直布置的直流锅炉模型。水从水箱被水泵抽出，经转子流量计后进入下部的加热管组，再相继流经中部的蒸发管组织和上部的过热管组，最后进入冷却器。实验台采用电阻丝加热，上、中、下三组电阻丝分别绕在过热管组、蒸发管组和加热管组上，由控制开关（加热上）和调压变压器（加热中和加热下）来控制各管组的加热热负荷。

### 三、仪器设备

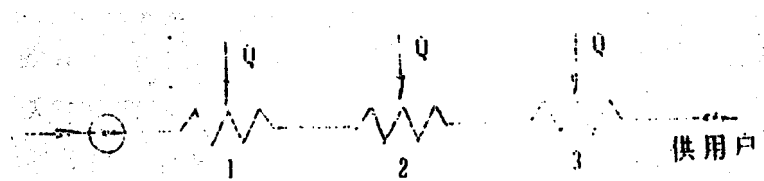
直流锅炉实验台，共 2 台。

### 四、所需耗材

胶管、加热电阻丝等。

### 五、实验原理、方法和手段

直流锅炉蒸发受热面中工质的流动不是象自然循环锅炉那样的依靠密度差来推动，而是在泵的压头作用下来完成。图 1 为直流锅炉的工作原理示意图。给水在给水泵的作用下顺序一次通过加热、蒸发和过热等各个受热面，即随着水沿锅炉的汽水通道流过时，水被加热、蒸过热，直至被加热到所要求的温度。



1—加热区；2—蒸发区；3—过热区

图1 直流锅炉工作原理示意图

直流锅炉原则上可以在任何压力下工作，但压力越高，水动力特性越稳定，压力越低，水动力特性越不稳定。即使在超临界参数下的直流锅炉，在启动时，也有升压过程，由于压力由低到高，在这过程中水动力特性也是不稳定的。

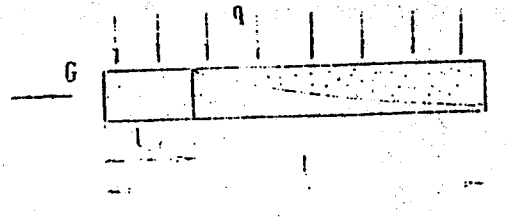


图2 水平布置蒸发管筒图

所谓水动力特性，是指在一定的热负荷下，直流锅炉受热面中工质流量  $G$  与压降  $\Delta P$  之间的关系。图 2 为简化了的水平布置直流锅炉蒸发受热面，当有流量流过时，在管图进口之间存在一定的压力降  $\Delta P$ ，这个压力降由三项组成，即

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{ed} \quad (1)$$

式中：

$\Delta P$ —管圈进出口压差，[Pa]；

$\Delta P_1$ —重位压差，[Pa]；

$\Delta P_2$ —加速压降，[Pa]；

$\Delta P_{ed}$ —流动阻力，[Pa]

对于水平管或螺旋上升式管屏来说，管长相对于高度要大得多，也就是说， $\Delta P_{1d}$  比  $\Delta P_1$  大得多，因此， $\Delta P_1$  可以忽略不计。根据计算，加速压降  $\Delta P_2$  的值只占总压力降的 3.5%，所以，也可以略去。这样，式 (1) 就可简化为：

$$\Delta P = \Delta P_{1d} = \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_{jb} \right) \frac{G^2}{2} v \quad (2)$$

式中：

$\lambda$ ——摩擦阻力系数；

$d$ ——管圈管子的内径，[m]；

$l$ ——管圈的长度，[m]；

$\xi_{jb}$ ——局部阻力系数；

$G$ ——通过管圈的工质流量，[Kg/s]；

$v$ ——工质的平均比容，[m<sup>3</sup>/Kg]；

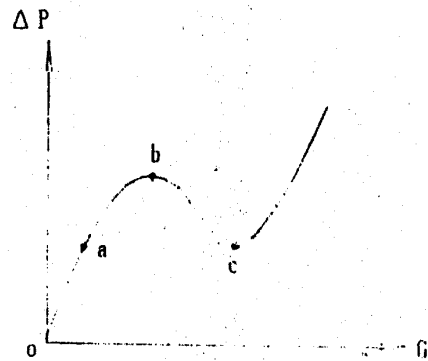


图3 水平蒸发管水动力特性曲线

对于结构一定的管图而言，式 (2) 式， $\left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_{jb} \right)$  作为常数，用  $KS_2$  表示，则有

$$\Delta P = K_{s2} \frac{G^2}{2} \quad (3)$$

从式(3)中可看出,  $\Delta P$  与  $G$  之间的关系是二次曲线, 对应于一个压差只存在一个流量, 这就是直流锅炉水动力特性的单值性。这种特性只存在于管圈中是单相和流体的时候。当管中存在水和蒸汽双相流体时, 则水动力特性为三次曲线, 对应于一个压差值就有可能有三个不同流量存在, 这就是水动力特性的多值性, 也就是常说的直流锅炉水动力特性的不稳定性。经理论推导, 两管端的压差与流量的关系为:

$$\Delta P = AG^3 - BG^2 + CG \quad (4)$$

$$A = \frac{\lambda(v'' - v')\Delta i_s^2}{4f^2 dqe\gamma}$$

$$B = \frac{\lambda l}{2f^2 d} \left[ \frac{\Delta i_s}{r}(v'' - v') - v' \right]$$

$$C = \frac{\lambda(v'' - v')l^2 qe}{4f^2 dr}$$

式中  $v''$ 、 $v'$  ——蒸汽和水的比容, [m<sup>3</sup>/kg];

$\Delta i_s$  ——进入管圈的水的欠焓, [KJ/kg];

$f$  ——管子的内截面积, [m<sup>2</sup>];

$d$  ——管子的内直径, [m];

$ql$  ——每米管长热负荷, [KW/m];

$r$  ——汽化潜热欠热, [KJ/Kg]。

从式(4)可以看出, 影响蒸发管水动力特性的主要因素就是蒸汽和水的比容的不同。图 3 即为水平蒸发管的水动力特性曲线。

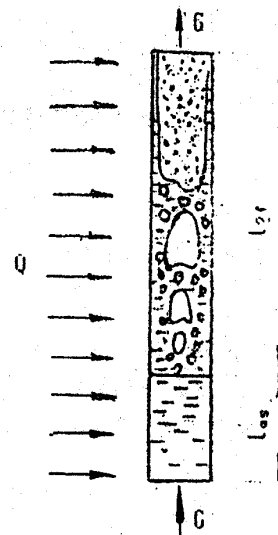


图4 垂直布置蒸发管流动结构简图

对于垂直布置的直流锅炉蒸发管的流动结构如图 4 所示, 影响其水动力特性的因素除流动阻力外, 还有重位压差存在, 重位压差有时可能占主要部分, 故:

$$\Delta P = \Delta P_{1d} + \Delta P_{2w} \quad (5)$$

式中:

$\Delta P$  ——蒸发管两端压差, [Pa];

$\Delta P_{1d}$  ——流动阻力, [Pa];

$\Delta P_{2w}$  ——重位压差, [Pa]。



垂直蒸发管的水动力特性曲线如图 5 所示。图中曲线 1 为流动阻力，曲线 2 为重位压头，曲线 3 为曲线 1 和曲线 2 之合成，这就是一个垂直上升蒸发管的水动力特性曲线。从图 5(a) 可以看出，不计重位压头时的水动力特性是单值的，考虑了重位压降后的水动力特性也是单值的。从图 5(b) 可以看出，不计重位压降的水动力特性是多值的，而考虑了重位压降后的水动力特性不可能消除多值性。总的说来，对于一次垂直上升直流锅炉蒸发管，重位压降对水动力特性的不稳定起到改善的作用。

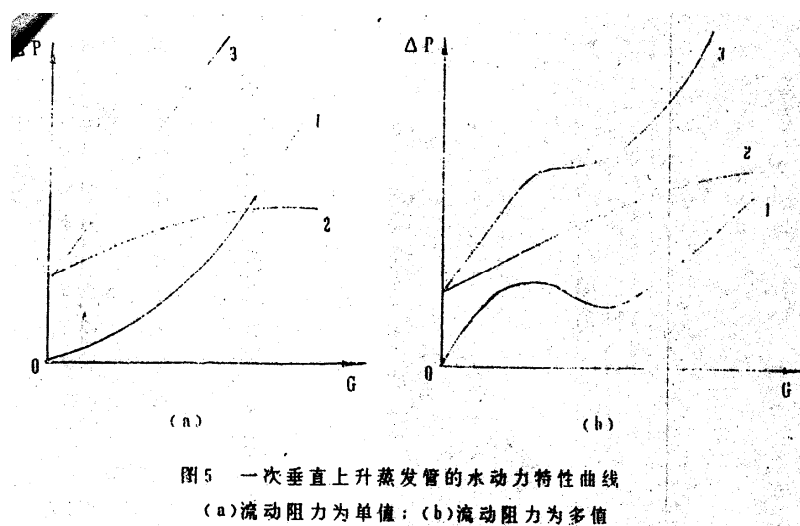


图 5 一次垂直上升蒸发管的水动力特性曲线  
(a)流动阻力为单值；(b)流动阻力为多值

由于本实验台垂直布置直流锅炉只是一组一次垂直上升的蒸发管组，因此，本指导书只简单的将一次垂直上升蒸发管水动力特性的结论给出，其它型式垂直布置的蒸发管的水动力特性这里不予论述。

本实验台是根据实验教学需要设计制造的，由于考虑到便于观察，管组都采用玻璃制成，因此，热负荷不能过高，重量流速也不能过大，也只能在常压下工作。从所周知，常压下的直流锅炉，其水动力特性是极不稳定的，所以，本实验台只可用作垂直上升或上升的原理性演示。

## 六、实验步骤

1. 把水箱的水灌至容积的 70%左右，然后关紧进水阀。
2. 接好冷却器的冷却水回路，冷却水用自来水，下口为进水，上口为出水。凝结水经胶管回入水箱（也可以直接排出，不回水箱）。
3. 把加热（中）、加热（下）的调压器调到零位，并把加热（上）开关关上。
4. 接好电源电路，然后打开总电源开关及水泵开关，调节流量让开关，使流量在 5t/h 左右。

5. 调节加热（中）和加热（下）的输入电压在 120V 左右，加热（上）一般在过热管组中为蒸汽时投入。在过热管组出口全部喷出蒸汽时并稳定一段时间后，测录下测压管指示数据和流量计流量值。如测压管中的压差不稳定，可取其平均值。逐次调节流量，按上述方法进行测试，直到流量大到上管组出口不能全部蒸汽时为止。

6. 在不同热负荷下，重复上述步骤进行测试。

## **七、实验注意事项**

1. 实验开始前应检查水位情况正常；
2. 实验过程中禁止触摸电阻丝和高温壁面。

## **八、预习与思考题**

1. 简述直流锅炉的水动力特性？
2. 超临界参数直流锅炉在什么过程中水动力特性是不稳定的？

## **九、实验报告要求**

实验报告应包括：

1. 简述实验原理与过程；
2. 各种数据并加以整理，分析数据是否准确和误差产生原因；
3. 通过实验的收获体会及对实验改进意见。