

943/100

19943

蒸汽鍋炉发生事故的 原因及其調查方法

A. A. 季托夫 著

劳动杂志社

蒸汽锅炉发生事故的 原因及其調查方法

A. A. 季托夫 著

· 劳动部劳动保护局譯校

蒸汽锅炉发生事故的起因及其调查方法

A. A. 李 托 夫 著

劳动部劳动保护局 译校

劳动部劳动杂志社 出版

(北京安民门外大街) 电话 4, 6321

北京新华印刷厂印刷

(北京前门外北黄寺街)

787×1092 1/32 4 1/2 印张 90,000 字

书号: 40

定价: 0.50 元

1961 年 8 月北京第 1 版、印数: 1—10,000

19943

前 言

苏联鍋炉監察专家 A. A. 季托夫同志，在我国工作一年多的時間中，曾幫助我們解決了很多有关鍋炉安全監察方面的重大技術問題，并且还多次在各地讲学，对于促进鍋炉安全工作，提高干部业务水平，都起了良好的作用。这本书就是作者在历次讲学的内容的基础上，进一步充实整理写成，内容比较详尽地分析了鍋炉发生事故的原因及其調查方法，能够幫助我們从錯綜复杂的現象中找出发生事故的真正原因。因此，这是鍋炉安全工作干部、鍋炉設計和运行人員的一本良好讀物。

劳动部劳动保护局

1961 年 5 月

目 录

第一章 蒸汽鍋炉的水循环	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 上升管内汽水混合物的流动情况	(11)
第三节 多管循环系统的工作情况	(15)
第二章 水循环遭到破坏的原因	(18)
第一节 下降管汽穴	(18)
第二节 下降管内的汽化	(23)
第三节 水循环停滞和逆流	(25)
第四节 水循环速度的降低	(30)
第五节 循环倍率的降低	(31)
第三章 关于加装水冷壁提高鍋炉蒸发量的問題	(40)
第四章 造成鍋炉损坏最常見的几个原因	(63)
第一节 高温对金属的影响	(64)
1. 时效	(65)
2. 热脆化	(68)
3. 蠕变	(72)
4. 金属組織发生不稳定的現象	(81)
結 論	(84)
第二节 介质对金属的化学侵蚀	(85)
1. 氯腐蚀	(86)

2. 碱腐蚀	(87)
3. 过热蒸汽腐蚀	(92)
4. 氢腐蚀	(93)
5. 气体腐蚀	(95)
6. 腐蚀性热疲劳	(96)
第三节 介质对金属的机械作用	(97)
第五章 調查事故的方法	(98)

第一章 蒸汽鍋炉的水循环

第一节 基本概念

炉内水循环的基本任务，是使受烟气加热的管子的管壁温度保持在金属强度所容许的温度范围内。当水循环遭到破坏时，管子的冷却条件就恶化，结果使管壁发生过热和损坏。因此，蒸汽鍋炉的安全运行，在很大程度上，取决于炉内可靠的水循环，但水循环不直接影响鍋炉的经济性。

在任何情况下，受烟气加热的管子的管壁温度，总是介乎放热的烟气温度和吸热的炉水温度之间。为了保证鍋炉蒸发受热面的安全，必须使管壁温度尽可能接近炉水的温度，而不使它接近烟气的温度。如果在水管鍋炉的受热管子内，始终有水或汽水混合物流过的话，那末这一要求就能达到。当管子内出现蒸汽时，就会使冷却条件急剧降低；这时，管壁温度就将接近于烟气温度，管子金属就会发生过热和损坏。

但是根据实践证明，在受热面管子内仅仅不积蒸汽，还不足以保证工作的安全可靠。在蒸汽鍋炉的运行条件下，当水循环不良时，即使在水质良好的情况下，在管壁上也可能局部沉积盐类和水渣。当这种沉积物增加时，由于冷却条件受到影响，管壁的温度也就会升高。这样，只有在不但能保证管壁不断受到炉水或汽水混合物的冷却，而且能够保证管壁上不

致局部沉积盐类或水渣时，蒸汽锅炉内的水循环才能安全可靠。

蒸汽锅炉内的水循环，是由下降管内的水和上升管内的汽水混合物的比重差所引起的。现在我们就拿一个最简单的循环回路来做例子。这个循环回路由上锅筒和下联箱所组成（见图1），使用一根内径为50毫米的下降管，将上锅筒和下联箱连接起来，用一根内径为100毫米的上升管，使下联箱和上锅筒连接起来。上锅筒和下联箱水平中心线之间的距离为10米。

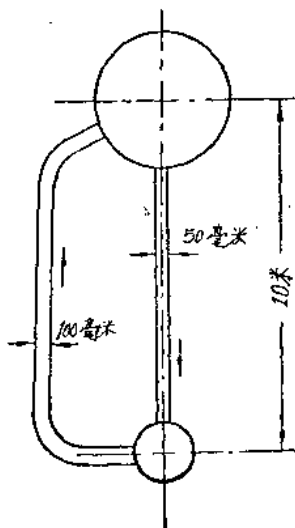


图 1

几根或许多根下降管和上升管，其管子下端连接在共用的联箱上，管子上端直通上锅筒，这样的循环系统，称为锅炉的循环回路。如果我们对内径加为100毫米的上升管进热，则管内就会产生一定数量的蒸汽，形成汽泡。这时，上升管内水柱的重量，就要轻于

下降管内水柱的重量。结果，下降管内的水就会压出上升管内的汽水混合物，这样在循环回路内就形成水的自然循环。

假定上锅筒内的蒸汽压力 $P=10$ 个表大气压，在这一个压力下水的比重 $\gamma_w=883.5$ 公斤/米³，蒸汽的比重 $\gamma_n=5.53$ 公斤/米³（这两个数值可以由表查得）。

下降管内水柱的重量可根据下式来计算，

$$C_{on} = \gamma_v \cdot F_{on} \cdot H_k \quad (1)$$

式中: F_{on} ——下降管截面积(米²);

H_k ——循环回路的高度(米)。

$$F_{on} = 0.785 \cdot d_{on}^2 = 0.785 \times 0.05^2 \approx 0.002 \text{ 米}^2 \text{ 或}$$

$$F_{on} = 20 \text{ 厘米}^2$$

循环回路高度 H_k 为 10 米,

$$\text{则 } C_{on} = 883.5 \times 0.002 \times 10 = 17.67 \text{ 公斤}$$

假定上升管受热时,其形成的汽水混合物中,平均含蒸汽量是 30%,水是 70%,则其重量应为:

$$C_{no.1} = (\gamma_s \cdot 0.7 + \gamma_n \cdot 0.3) \cdot F_{no.1} \cdot H_k \text{ (公斤)} \quad (2)$$

在本公式中上升管的截面积

$$F_{no.1} = 0.785 \cdot d^2 = 0.785 \times 0.1^2 \approx 0.008 \text{ 米}^2$$

$$\text{或 } F_{no.1} = 80 \text{ 厘米}^2.$$

代入上式则得:

$$C_{no.1} = (883.5 \times 0.7 + 5.53 \times 0.3) \times 0.008 \times 10 \approx 49.6 \text{ 公斤}$$

在下降管下部每一平方厘米的截面上附加的水柱压力为: $\frac{17.67}{20} = 0.88 \text{ 公斤/厘米}^2$ 。

同样,在上升管下部每一平方厘米的截面上附加的汽水柱压力为: $\frac{49.6}{80} = 0.62 \text{ 公斤/厘米}^2$

因此,加上上锅筒内的蒸汽压力,在下降管下部截面上的全部压力,就等于 10.88 个表大气压,而在上升管下部截面上的全部压力就等于 10.62 个表大气压。

从以上的计算看出,下降管内的压力大于上升管内的压力,这一压差就引起了循环回路内水和汽水混合物的流动。这一压差称为水循环的流动压头,用符号 $P_{\Delta p}$ 来表示。在上例中,流动压力为:

$$P_{\text{差}} = 10.88 - 10.62 = 0.26 \text{ 公斤/厘米}^2$$

实用中，水循环流动压头的单位不是公斤/厘米²，而是公斤/米²或毫米水柱。在上例中， $P_{\text{差}} = 0.26 \text{ 公斤/厘米}^2$ 相当于 $P_{\text{差}} = 2600 \text{ 公斤/米}^2$ 或 $P_{\text{差}} = 2600 \text{ 毫米水柱}$ 。

为了说明流动压头和压力之间的关系，我们就对这一个循环回路再进行一次类似的计算。假定锅筒内的压力 $P = 100$ 个表大气压。根据这一压力，查表得出水的比重 $\gamma_n = 690.3 \text{ 公斤/米}^3$ ，蒸汽的比重 $\gamma_n = 54.9 \text{ 公斤/米}^3$ 。和上面一样，我们也假定汽水混合物中蒸汽的含量是 30%，水是 70%。在这种条件下，下降管内水柱的重量 $C_{\text{on}} = 690.3 \times 0.002 \times 10 = 13.8 \text{ 公斤}$ 。上升管内汽水混合物柱的重量

$$C_{\text{no. d}} = (690.3 \times 0.7 + 54.9 \times 0.3) \times 0.008 \times 10 \approx 40 \text{ 公斤}$$

在下降管下部每一平方厘米截面上的附加压力为 $\frac{13.8}{20} = 0.69 \text{ 公斤/厘米}^2$ 。

同样，上升管下部的附加压力为 $\frac{40}{80} = 0.5 \text{ 公斤/厘米}^2$

在下降管下部截面上的全部压力就等于： $100 + 0.69 = 100.69 \text{ 公斤/厘米}^2$ ，而在上升管下部截面上的全部压力就等于： $100 + 0.5 = 100.5 \text{ 公斤/厘米}^2$ 。

这样，流动压头就等于：

$$P_{\text{差}} = 100.69 - 100.5 = 0.19 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$\text{或 } P_{\text{差}} = 1900 \text{ 公斤/米}^2$$

从以上的计算可以看出，在其他条件相同的情况下，压力愈高，流动压头愈低，在上例中，当 $P = 10$ 个表大气压时，流动压头 $P_{\text{差}} = 2600 \text{ 公斤/米}^2$ ，而当 $P = 100$ 个表大气压时，流动压头就降低到： $P_{\text{差}} = 1900 \text{ 公斤/米}^2$ 。

流动压头还取决于循环回路的高度，即取决于上锅筒和

下联箱之间的垂直距离。

我們仍以第二种情况（鍋筒內的蒸汽压力为100个表大气压）为例。假定我們將循环迴路的高度提高一倍，由10米增加到20米，那末下降管内水柱的重量不再是13.8公斤，而是27.6公斤，同样，上升管内汽水混合物的重量也将等于80公斤。这时，在下降管下部每一平方厘米截面上的附加压力为： $\frac{27.6}{20}=1.38$ 公斤/厘米²，同样，上升管下部的附加压力为： $\frac{80}{80}=1$ 公斤/厘米²。

在这种情况下，流动压头

$$P_{\text{动}}=101.38-101=0.38 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$\text{或 } P_{\text{动}}=3800 \text{ 公斤/米}^2$$

从上面的例子可以看出，在其他条件相同的情况下，循环迴路的高度增加一倍，流动压头也就增加一倍。

根据上述例子，我們就可以作出这样一个重要的結論：鍋炉的蒸汽压力愈高，鍋炉的循环迴路也应该愈高。鍋炉的蒸汽压力增高了，我們增加循环迴路的高度，就可以补偿因为增高压力而降低的流动压头。

随着压力的不断增加，水的比重就降低，而蒸汽的比重却增加。因此，水和汽水混合物的比重差也不断减少，当鍋炉的蒸汽压力超过180个表大气压时，流动压头已經不能保证稳定的水循环。当压力接近于200个表大气压时，自然循环的鍋炉就让位于直流式鍋炉了。

水循环形成后，全部流动压头都用于克服循环迴路的阻力。循环迴路的阻力分成两类。下降管内水流动的阻力，称为循环迴路的外阻力，上升管内汽水混合物流动的阻力，称为

循环迴路的内阻力。用来克服外阻力，即用来克服下降管阻力的那部分流动压头，称为有效流动压头。剩下的那部分流动压头，称剩余压头，用来克服内阻力，即上升管阻力。这样，水循环的流动压头由两部分组成：

$$P_{\text{动}} = P_{\text{外}} + P_{\text{内}} \quad (3)$$

式中： $P_{\text{内}} = \Delta P_{\text{on}}$ (下降管阻力)

假定流动压头 $P_{\text{动}} = 2000$ 公斤/米²，下降管阻力 $\Delta P_{\text{on}} = 150$ 公斤/米²，则用来克服下降管阻力的有效压力也应等于：
 $P_{\text{有效}} = \Delta P_{\text{on}} = 150$ 公斤/米²。

这时，流动压头将由下列两数组成：

$$2000 = 1850 + 150$$

式中的 1850 公斤/米²，是用来克服上升管阻力。

流动压头也可以通过上升管及下降管的阻力来表示：

$$P_{\text{动}} = \Delta P_{\text{on}} + \Delta P_{\text{up}} \quad (4)$$

从这一关系中可能看出，在其他相同的条件下，当流动压头一定时，下降管阻力愈小，即有效压头愈小，则剩余压头愈大。而剩余压头愈大，则水循环速度愈快，循环迴路的工作就愈稳定。

水循环速度是指水在上升管入口处的速度，用 W_0 米/秒来表示。

在水循环计算标准中，对水循环速度作了如下的规定：

沸水管：

第一管簇：第一、二排管子	$W_0 = 0.6 - 1.7$ 米/秒
第三、四排管子	$W_0 = 0.4 - 1.3$ 米/秒
第五排及以后各排管子	$W_0 = 0.1 - 0.8$ 米/秒

第二、第三管簇

$W_0 = 0.1 - 0.5$ 米/秒

水冷壁:

带有汽水导出管的水冷壁管

$W_0 = 0.2 - 1.0$ 米/秒

直接连接锅筒的上升管

$W_0 = 0.5 - 1.5$ 米/秒

上面提到, 流动压头取决于循环回路的高度以及水和汽水混合物的比重差。这一关系可以用下式来表示:

$$P_{\Delta v} = H_{nap}(\gamma_s - \gamma_{c.n}) \text{ 公斤/米}^2 \quad (5)$$

实际上采用的公式稍有不同:

$$P_{\Delta v} = H_{nap} \psi (\gamma_s - \gamma_n) \quad (6)$$

式中: γ_s ——水在饱和温度时的比重, 公斤/米³

$\gamma_{c.n}$ ——汽水混合物的比重, 公斤/米³

γ_n ——蒸汽在饱和温度时的比重, 公斤/米³。

系数 ψ 指上升管中蒸汽所占的截面积, 以百分数表示。同时假定汽水是分开的, 就是说, 在管子截面内流动的一部分是水, 另一部分是蒸汽。 H_{nap} 指汽水混物流动的那段管子的高度。通常, 在每根受热管子的下部是不产生蒸汽的。甚至当锅炉的水经沸腾式省煤器供给的时候, 由于水经下降管进入下联箱后, 受到了下降管内水柱的附加压力, 因此在进入上升管时水的温度离饱和温度还有一定距离。在这种情况下, 进入上升管的水必须在升到一定高度后, 其温度才能达到饱和点, 并开始蒸发。上升管将水加热到饱和温度的那一段, 叫省煤器段。实际上, 不论对于低压、中压或高压锅炉来说, 省煤器段的水和下降管相应那一段的水, 其比重差很小, 因此省煤器段实际上不产生流动压头。由于上述原因, 在公式(5、6)中不采用上升管的全部高度, 而只采用汽水段的高度。上升管汽水段的高度等于上升管的整个高度减去省煤器段的高度:

$$H_{\text{нар}} = H_{\text{кон}} - H_{\text{ск}}$$

上升管的全部高度是指鍋筒入口与下联箱入口之間的高度。对于接在鍋筒蒸汽空間的管子，只計算中間水位以下的部分。高出中間水位的那段管子，在确定流动压头时不应計算进去，因为在这一段管子内不但不构成流动压头，反而損失一部分流动压头。因此，这一段必須尽可能短（见图 2）。

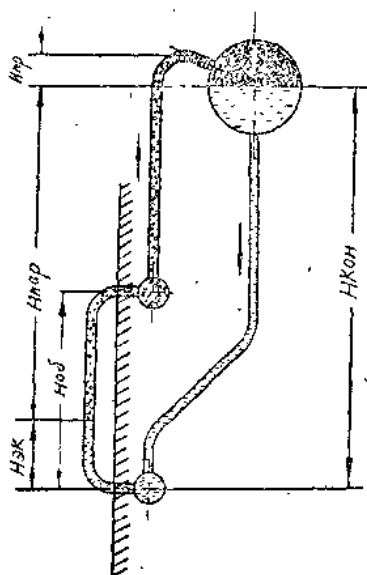


图 2

一个简单的水壁循环迴路

- $H_{\text{кон}}$ 循环迴路的高度
- $H_{\text{нар}}$ 循环迴路汽水段的高度
- $H_{\text{ск}}$ 循环迴路省煤器段的高度
- $H_{\text{об}}$ 循环迴路受热段高度
- $H_{\text{нар}}$ 汽水导出管超出鍋筒平均水位的高度

管子的汽水段可能是全部受热的，但經常分成受热的和不受热的两段。上面提到，流动压头是由整个汽水段造成的，但它产生于受热段。由于这一原因，在結構上规定的循环迴路的高度范围内，必須尽可能增加受热段的高度。

省煤器段的高度对稳定水循环方面有很大影响（见图 2）。上面讲过，省煤器段实际上不形成流动压头，因此我們应当設法尽可能降低省煤器段。在这方面，鍋炉給水的温度有着很大的意义。在其他条件

相同的情况下，給水温度愈高，水进入受热管子后就愈快地加热到饱和温度，因而省煤器段的高度也就愈低，特别是循环迴路原来就不高，这时，降低省煤器段在保证稳定的水循环方面就显得更为重要。在这种情况下，如果給水温度很低，则省煤器段的高度在管子受热段高度中就可能占很大的比例。同时，循环迴路的热负荷愈高，则省煤器段的高度自然就愈低。

在研究蒸汽锅炉的水循环方面，另一个重要的概念是循环倍率。循环倍率是指经过循环迴路的水量与其蒸汽产量之间的比值。

$$K = \frac{C_n}{C_p} \quad (7)$$

在自然循环的锅炉中，经过循环迴路的水量比其蒸汽产量要高出许多倍。小容量的低压锅炉，循环倍率一般为： $K=100-200$ ，中压锅炉的循环倍率 $K=20-25$ ，有时高达 60。至于高压锅炉，循环倍率则低得很多， $K=8-10$ 。循环倍率愈低，说明汽水混合物中蒸汽的含量愈多。当循环倍率 $K=1$ 时，则进入循环迴路的全部水都变成蒸汽了。强制循环的直流式锅炉，循环倍率等于 1，在这种锅炉中，水相继通过省煤器受热面、蒸发受热面和过热受热面，受到加热，全部蒸发，并在后部的蛇形管中蒸汽受到过热。

从上面举的数字中可以看出，蒸汽压力升高时，循环倍率就降低。这种现象是由水蒸汽的热力性质所决定的。

经过循环迴路的水量：

$$C_p = 3600 \cdot F_{\Sigma K} W_0 \cdot \gamma_n \text{ 公斤/小时} \quad (8)$$

在该循环迴路上产生的蒸汽量：

$$C_n = 3600 \cdot F_{\kappa} \cdot W_{np} \cdot \gamma_n \text{ 公斤/小时} \quad (9)$$

式中: F_{κ} ——水冷壁上升管的总有效截面积, 米²;

W_0 ——水冷壁的水循环速度, 米/秒;

W_{np} ——水冷壁的蒸汽导出速度, 即假定蒸汽布满整个管子截面时的速度, 米/秒;

γ_0, γ_n ——在一定压力下水和蒸汽的比重, 公斤/米³。

公式前面的数字 3600, 是指一小时内的秒数。因流量以公斤/小时计算。

从上述公式就可以看出, 循环倍率取决于下列因素:

$$K = \frac{C_n}{C_{\pi}} = \frac{W_0 \cdot \gamma_n}{W_{np} \cdot \gamma_n} \quad (10)$$

其他部分相除时约掉了。

压力增加时, 公式 (10) 内水和蒸汽比重之间的比值就将减少:

1) $P=10$ 个表大气压时, $\gamma_0=883.5$ 公斤/米³, $\gamma_n=5.53$

公斤/米³, 两者之比 $\frac{\gamma_0}{\gamma_n} = \frac{883.5}{5.53} \approx 160$ 。

2) $P=110$ 个表大气压时, $\gamma_0=674.1$ 公斤/米³, $\gamma_n=$

62.5 公斤/米³, 两者之比 $\frac{\gamma_0}{\gamma_n} = \frac{674.1}{62.5} \approx 11$ 。

压力升高时, 蒸汽导出速度 W_{np} 开始降低很快, 以后就比较缓慢了。上述情况适用于当水冷壁的热负荷、管子内径和长度保持不变的条件下, 这时循环速度不变, 则循环倍率将随着压力的增加而减少。蒸发量不变, 由于压力升高而使循环倍率下降时, 就使得流过循环回路的水量减少。同时汽水混合物的流速降低, 汽化程度加剧, 就是说, 汽水混合物中

的蒸汽含量增加了，这种情况对受热管子的冷却条件会起很坏的影响。为了使管子得到足够可靠的冷却，循环倍率不得小于3，当循环倍率小于这一数值时，由于汽水混合物里的水蒸发得太多，炉水中的易溶盐类就会发生沉淀，并沉积在水冷壁管的管壁上。此外，因为汽水混合物中水的含量减少了，管壁上就很难保持一层水膜。管壁温度就可能升高到危险的程度。

循环倍率不仅取决于水和蒸汽的比重，而且还取决于循环回路的热负荷。在其他条件相同的情况下，热负荷愈高，循环倍率就愈低。根据这一点应当指出，在热负荷最高的管子内，循环倍率最容易达到最低极限。对于现代的固定式锅炉，循环倍率不容易达到最低极限。只有当锅炉的工作压力非常高时，实际上在压力高于140个表大气压的锅炉内，才比较容易出现这种情况。

第二节 上升管内汽水混合物的流动情况

汽水混合物在垂直管内流动，当蒸汽的含量不多时，蒸汽是以小汽泡的形式分布在水内的，如图3中之(1)所示。当汽水混合物内蒸汽的含量增多时，小汽泡就增多了，并合并成大汽泡，这种汽水混合物的流动形式叫汽泡式，或炮弹式，如图3中之(2)所示。当蒸汽的含量继续增加时，汽泡也增加，上下的汽泡便连接起来，而蒸汽便在管子中心流动，此种形式叫做柱状运动，如图3中之(3)所示。当蒸汽含量再增