

第一章 有关工业锅炉基本概念

第一节 基本知识

一、物体的性质

(一) 物质及其组成

一切物体都是由物质组成的。如锅炉和机床都是由钢制作的，钢就是物质；桌子是由木材制作的，木材也是物质。其他如铁、煤、石灰、玻璃、粮食、酒精、油、水、空气、煤气等也都是物质。物质是由分子组成的。分子是保持物质原有性质的最小微粒，它非常微小，举例来说，1厘米³的气体中就含有 2.7×10^{19} 个气体分子。虽然分子这么微小，它还可以分成更小的微粒，这种更小的微粒称为原子。只是这时的原子已经不再具有物质原有的特性了。

大家知道，世界上的物质多得难以计数，尽管如此，它们却是由107种化学元素构成的。有些物质的分子是由同一种化学元素的原子组成的，我们称为单质。例如氧气是由两个氧原子组成的，它的分子式可用 O_2 来表示；有些物质的分子是由两种或两种以上化学元素的原子组成的，我们称为化合物。例如水分子是由两个氢原子和一个氧原子组成的，它的分子式可用 H_2O 来表示。单质和化合物的共同之处在于，这两类物质都是只用一种分子组成的，如果某一物质内含有两种或两种以上的分子时，我们则称它为混合物。因此，若将混合物细分，直到最后，就成为不同的分子，如煤可分成碳、水和挥发物等的分子。这些分子混合在一起是煤，分开后则碳是碳，水是水，挥发物是挥发物，已不再是煤了。化合物和单质就不一样，一直分到分子还是不失其原来的特性。

(二) 物质的状态及其变化

物质有三种状态，即：固体、液体和气体。

1. 固体 具有一定的形状和体积的物质叫做固体。例如煤、铁、玻璃、石头、木材等。固体在外力的作用下，将会改变其原来的形状，这种现象叫做固体变形。固体变形有三种类型：弹性变形、塑性变形和破裂。

(1) 当作用在固体上的外力去除以后，固体仍能恢复其原来形状的变形叫做弹性变形；

(2) 当外力去除后，固体不能恢复其原来形状的变形叫做塑性变形；

(3) 在外力的作用下，固体的形状完全改变，并且永远不能恢复原状的变形，称破裂。

2. 液体 可以流动，无固定形状，但有一定体积的物质叫做液体。如在常温常压下，水、酒精、油、硫酸、汞等，都属于液体。由于液体分子的排列比较紧密，在极大的外力作用下，它的体积才发生极微小的变化，因此，通常我们把液体看作是**不可压缩的**。如图 1-1 所示，在一个装满液体的密闭容器里，当液体的某一部分受到外力作用时，它能够立即将加于它的力，大小相等地传到容器的其余部分。在图 1-2 的盛有液体的连通器里，如果连通器的两个液面上所受的压力相等，则连通器的两个液面始终保持在同一水平面上。锅炉水位表

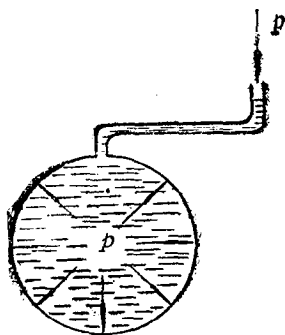


图 1-1 水在密闭容器内压力传递示意

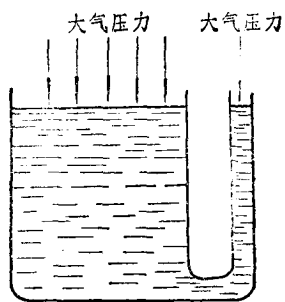


图 1-2 连通器

就是利用水的这一性质来指示炉内水位高低的；锅筒与水位表组成一个连通器，由于水位表内水柱面上的压力与锅炉内液面上的压力相等，所以锅炉内水位如果有变化，就会立即在水位表上显示出来。

3. 气体 可以流动，但无固定的形状和体积的物质叫做气体。如空气、氧气、二氧化碳、水蒸气等。由于气体分子间的距离比较大，分子间的作用力很小，它们在空间做着杂乱无章的无规则运动，因此，气体不论其气量多少，总是可以均匀地充满存放它的容器，并且能被压缩成很小的体积。例如工业用的各种气瓶，就是将气体经压气机压缩后储存在气瓶内的。气体也和其它物质一样，本身具有一定的质量，即使将其压缩成很小的体积，其质量也不改变。例如在温度为 0°C 和 1 标准大气压下， 1米^3 空气为 1.293 公斤（千克），若将这 1米^3 的空气压缩成为 1厘米^3 体积时，其质量并不改变，还是 1.293 公斤。蒸汽也是气体。同样道理，容积相同的蒸汽，高压蒸汽比低压蒸汽重。

固体、液体、气体，这三种物态并不是一成不变的。同一种物质在一定的条件下，能够由一种状态转变为另一种状态，这种变化叫做物态变化。例如，在通常情况下，铁是固体，水是液体，空气是气体。如果将铁加热到一定温度，它就变成液体——铁水，当水加热到一定温度时，它就由液体变为气体——水蒸气，而在空气冷却到一定温度时，就会由气体变为液体，我们称做液态空气。

在物态变化中，我们常要遇到以下几个名词：

- （1）熔解：物质由固态变为液态的现象；
- （2）凝固：物质由液态变为固态的现象；
- （3）气化：物质由液态变为气态的现象；
- （4）液化：物质由气态变为液态的现象；
- （5）升华：物质由固态直接变为气态的现象。例如，樟脑球可直接变为气体。

物质三态之间的相互转化在生产和科学实验中应用非常广泛，工业锅炉生产蒸汽的过程就是液、气两态相互转化的过程。

二、温度

温度是指物体冷热的程度。在日常生活、生产和科学实验中，我们经常要测量各种温度，

比如测量体温、室温、气温以及各种运行设备的温升，等等。为了测量这些温度，必须使用温度计。温度计上表示温度高低的尺度叫做温度标尺（简称温标），常用的温标有如下三种：摄氏温标（米制）、华氏温标（英制）和绝对温标。

1. 摄氏温标 又叫做国际百分度温标，是目前比较通用的一种温度标尺。摄氏温标是把标准大气压下冰水混合物的温度规定为 0 度，把水沸腾时的温度（即沸点）规定为 100 度，在 0 度与 100 度之间平均分成 100 个等分，每一等分就是 1 度。用摄氏温标表示的温度就称为摄氏温度。摄氏温度的单位为“摄氏度”，用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。例如，摄氏温度 80 摄氏度可以写成 80°C 。若温度低于 0°C ，则要在度数前面加一个“-”号。例如摄氏温度零下 15 写成 -15°C 。

2. 华氏温标 是英制温标，为英、美等国过去比较通用的一种温标。华氏温标是把标准大气压下冰水混合物的温度（冰点）规定为 32 度，水沸腾时的温度（沸点）规定为 212 度，在 32 度与 212 度之间平均分为 180 个等分，每一等分就是 1 华氏度。用华氏温标表示的温度称为华氏温度。华氏温度的单位为“华氏度”，用符号 $^{\circ}\text{F}$ 表示。例如华氏温度 86 华氏度可写为 86°F 。

3. 绝对温标 绝对温标也称为热力学绝对温标。它的刻度和摄氏温标相等，只是它把摄氏温标的 -273°C （准确值应为 -273.15°C ）规定为 0 度，把一个大气压下水凝固的温度（冰点）规定为 273 度，把沸水的温度（沸点）规定为 373 度。用绝对温标表示的温度称为绝对温度（也叫热力学温度）。绝对温度的单位叫做“开尔文”，简称开，用符号 K 表示。例如绝对温度 280 开尔文可写为 280K 。

摄氏温度与华氏温度之间的换算关系如下

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} t^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-1)$$

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (t^{\circ}\text{F} - 32) \quad (1-2)$$

例 摄氏温度 18 摄氏度等于多少华氏温度？

$$\begin{aligned} \text{解} \quad t^{\circ}\text{F} &= \frac{9}{5} t^{\circ}\text{C} + 32 \\ &= \frac{9}{5} \times 18 + 32 \\ &= 64.4^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

摄氏温度与绝对温度之间的换算关系如下

$$t^{\circ}\text{C} = T\text{K} - 273 \quad (1-3)$$

$$T\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273 \quad (1-4)$$

例 绝对温度 406K，等于多少摄氏温度？

$$\begin{aligned} \text{解} \quad t^{\circ}\text{C} &= T\text{K} - 273 \\ &= 406 - 273 \\ &= 133^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

三、压 力

过去我们把物体表面受到的垂直作用力称为压力，而把单位面积上所受到的垂直作用力

称为压强，但锅炉上或一般工程技术上习惯于将压强称为压力。根据国家标准，压力和压强都是相同的意义，即都是指单位面积上受到的垂直作用力。本书采用的名称是压力。如图 1-3 所示，在一个长 5 厘米、宽 4 厘米的面积上垂直作用着均匀分布的力 80 公斤力（千克力）那末此面积上受到的压力为：

$$p = \frac{80}{5 \times 4} = 4 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

$P = 80 \text{ 公斤力}$

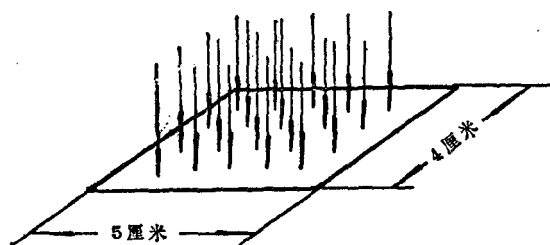


图 1-3 压力

在锅炉的铭牌上，我们可以看到“工作压力 13 公斤力/厘米²”一类的字样，它表示锅炉运行时，其炉内的蒸汽压力为 13 公斤力/厘米²，也就是说，锅炉每平方米受热面积上允许承受的力为 13 公斤力。

（一）大气压力

地球表面被一层很厚的气体包裹着，这层气体称为大气。

由于气体受地心的吸引产生了重力，所以包围在地球外面的大气层对地球表面便产生了压力。这个压力是由大气产生的，就叫做大气压力（用 p 大气表示），又称大气压。大气层越厚，大气的压力就越大；相反地，大气层越薄，大气的压力就越小。所以高山上的大气压比海平面上的小。

由此可知，大气压力不是恒定不变的。为使计算及论证有个科学的统一基点，需要有一个标准大气压力作为衡量标准。

由实验测得，海平面上的大气压为 1.033 公斤力/厘米²，或为 760 毫米汞柱。这个大气压我们称为标准大气压。

工程上，为了计算方便，常用 1 公斤力/厘米² 作为压力的单位，并把这个单位叫做工程大气压或者工业大气压，也简称为大气压。

工程大气压与标准大气压之间的关系如下：

因为 $1 \text{ 标准大气压} \approx 1.033 \text{ 公斤力/厘米}^2$
 $\approx 760 \text{ 毫米汞柱}$

$1 \text{ 工程大气压} \approx 1 \text{ 公斤力/厘米}^2$

所以 $1 \text{ 工程大气压} = \frac{1}{1.033} = 0.968 \text{ 标准大气压}$
 $\approx 760 \times 0.968 = 735.6 \text{ 毫米汞柱}$

$1 \text{ 标准大气压} = \frac{1.033}{1} = 1.033 \text{ 工程大气压}$

压力的单位除了用公斤力/厘米²外，还有用公斤力/米²的。公斤力/米²表示每平方米面积上受到多少公斤力的力。它与公斤力/厘米²之间的换算关系是

$1 \text{ 公斤力/厘米}^2 \approx 10^4 \text{ 公斤力/米}^2$

$1 \text{ 公斤力/米}^2 \approx 0.0001 \text{ 公斤力/厘米}^2$

1 升水的质量为 1 公斤，产生的重力为 1 公斤力。

$1 \text{ 升} = 1,000 \text{ 厘米}^3 \approx 1,000,000 \text{ 毫米}^3$

若用体积进行计算时，1 公斤力/米²又可写作

$$1 \text{ 公斤力/米}^2 \approx 1 \text{ 升/米}^2 = 1000000/1000000 \approx 1 \text{ 毫米(高)}$$

以上是以水柱计算的，因此 1 毫米高也是指水柱的高度。所以

$$1 \text{ 公斤力/米}^2 \approx 1 \text{ 毫米水柱}$$

(二) 绝对压力、表压力与负压力

容器内介质（此处为液体和气体）的压力高于大气压时，介质处于正压状态；如低于大气压力，则介质处于负压状态。

容器内介质的实际压力称为绝对压力，用符号 $p_{\text{绝}}$ 来表示。通常用压力表或 U 形管压力表测量得到的压力称为表压力，用 p 表示。

当容器内介质的压力等于大气压力时，压力表的指针指在零位，如图 1-4(a) 所示，或 U 形管压力表内的液面高度相等，如图 1-5(a) 所示。

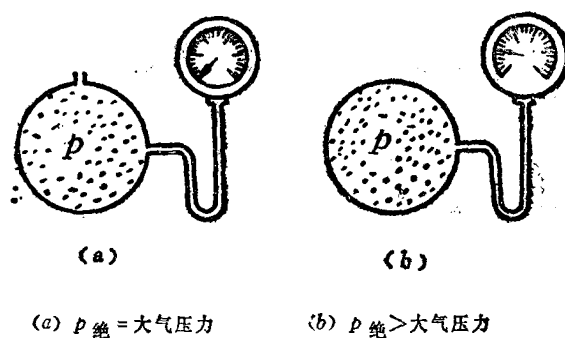


图 1-4 压力表读数

当容器内介质的压力大于大气压力时，压力表的指针才开始转动，如图 1-4(b) 所示。U 形管压力表的液面被容器内介质压力压向通大气的一端，形成液柱差 H ，如图 1-5(b) 所示。此时液柱差 H 的压力值就是容器内压力超出大气压力的部分，即表压力。

当容器内介质的压力低于外界大气压力时，则 U 形管压力表内的液面被大气压力压向与

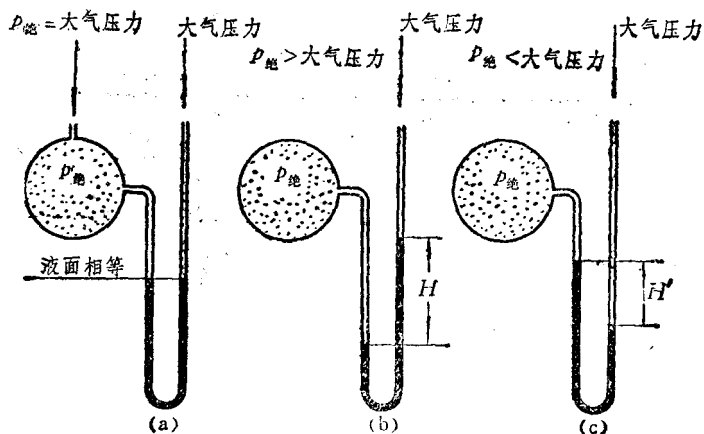


图 1-5 U 形管压力表测压

容器相连的一端，形成液柱差 H' 如图 1-5(c) 所示。此液柱差 (H') 的压力值，即为介质的压力比大气压力低的部分，称为负压力或真空。例如，炉膛压力为 -4 毫米水柱，就是说炉膛的压力比大气压力低 4 毫米水柱，即炉膛有 4 毫米水柱的负压力，这样可以保证火焰和烟气不向外喷。

由此可知，绝对压力、表压力及大气压力三者之间的关系如下

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大气}} \quad (1-5)$$

由公式可知，只有表压力为负数时，绝对压力 $p_{\text{绝}}$ 才有可能小于大气压力 $p_{\text{大气}}$ 。而出现负压力 $p_{\text{负}}$ ，此时：

$$p_{\text{负}} = p_{\text{大气}} - p_{\text{绝}} \quad (1-6)$$

式中 $p_{\text{大气}}$ 为当地的大气压力。

平时，我们所说的锅炉压力或介质压力，都是指表压力而言。但蒸汽表里所列的数值却是指的绝对压力，这一点应注意不要弄错。

例 锅筒压力表读数为 18 公斤力 / 厘米²，当地气压计读数为 743 毫米汞柱，求锅筒内蒸汽的绝对压力。

解 $p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大气}}$

$$\begin{aligned} &= 18 + \frac{743}{735.6} \\ &= 19.01 \text{ 公斤力 / 厘米}^2 \end{aligned}$$

到此为止，说了许多压力和压力单位。为避免混淆，再总结一下：

(1) 大气压是当地的实际大气压力，它的值是随高度、温度等条件而变化。实用上规定 760 毫米汞柱的大气压为标准大气压。工程上为方便起见，规定 1 公斤力 / 厘米² 为压力的单位，称为“工程大气压”，或者“工业大气压”；

(2) 压力的单位有公斤力 / 厘米²、水柱和汞柱三种。一般都采用公斤力 / 厘米² 为单位，但遇到压力较低的测量时，若再用公斤力 / 厘米² 表示，则将是小数点以后几位的数值，很不方便，这时就用若干毫米水柱来表示。至于汞柱，锅炉上基本不用，只有在仪表方面有时还用一下；

(3) 绝对压力、表压力和负压力都不是衡量单位，而是压力的不同形式。表压力的大小是随当地大气压而变的，蒸汽表用的是绝对压力。若要了解蒸汽的有关参数时，须在压力表读数值（表压力）上再加上当地大气压的数值，这就成了绝对压力，然后根据绝对压力去查蒸汽表。负压力表示低于当地大气压的压力，一般都用毫米水柱为单位。如负压力为 3 毫米水柱，表示压力低于当地大气压 3 毫米水柱。

工业大气压一般简称气压（或压力），平时说到气压就是指工业大气压，若说的是绝对大气压，则在气压之前一定写上“绝对”二字。负压力简称负压，表压力简称表压。这些都是工人中间的习惯叫法。

四、比容与密度

(一) 比容

单位质量的物质所占有的容积称为比容，用符号 v 表示。其单位为米³ / 公斤。例如某气

压和气温下空气的比容为 0.775 米³ / 公斤，就是指质量为 1 公斤的空气需占有容积为 0.775 米³ 的空间。若质量为 *m* 的某物质占有容积 *V* 时，则其比容 *v* 为

$$v = \frac{V}{m}$$

(1—7)

气体的比容大小与气体的压力和气体的温度有关，它们之间的相互变化关系为：
假定气体的温度不变，则压力越高，比容越小；压力越小，比容越大，即压力与比容成反比。
假定气体的压力不变，则温度越高，比容越大；温度越低，比容越小，即温度与比容成正比。

假定气体的比容不变，则压力越高，温度越高；压力越低，温度越低，即压力与温度成正比。

由于气体的比容与气体的压力及温度都有关系，所以锅炉运行时产生的蒸汽，其比容就与蒸汽的压力及温度有关。同样道理，锅炉燃料燃烧后排出的烟气的温度要比空气温度高得多，所以比容也大得多，因此锅炉引风机的容量要比鼓风机的（鼓的是冷空气）大得多。又如锅炉内蒸汽表压力为 11 公斤力 / 厘米²，蒸汽温度为 187℃ 时，蒸汽的比容为 0.1663 米³ / 公斤，如果蒸汽压力不变，仍为 11 公斤力 / 厘米²，蒸汽温度提高到 240℃，则蒸汽的比容就变为 0.1919 米³ / 公斤。从上例可以看出，在蒸汽压力不变的情况下，蒸汽的温度升高，则蒸汽的比容也增大。所以，有过热器的锅炉，在同样压力下，过热蒸汽的比容就比饱和蒸汽的比容大。

(二) 密度
单位容积内所含物质的质量称为密度，用符号 *ρ* 表示，其单位为公斤 / 米³。例如标准状况（即温度为 0℃，压力为 1 标准大气压）下空气的密度为 1.29 公斤 / 米³，就是指容积为 1 米³ 的空气质量是 1.29 公斤。若质量为 *m* 的某物质占有容积 *V* 时，则其密度 *ρ* 为

常用物质或材料的密度（20℃）

表 1-1

名 称	密 度 (克/厘米 ³)	名 称	密 度 (克/厘米 ³)	名 称	密 度 (克/厘米 ³)
碳 钢	7.85	锌	7.14	桦 木	0.65
铸 铁	7.2~7.7	汞	13.6	杨 木	0.35~0.5
铝	2.7	玻 璃	2.2~2.5	软 木	0.24
紫 铜	8.94	硬聚氯乙烯	1.38~1.60	花 岗 石	2.8
黄 铜	8.5~8.6	有 机 玻 璃	1.18~1.19	砂 子	1.5~2
铅	11.34	玻 璃 钢	1.7~1.9	生石灰(块)	0.9
镍	8.8	石 棉	2.6	水泥(堆放)	1.4~1.5
锡	7.2~7.75	石棉橡胶板	1.2~1.5	砖	1.5~1.8
银	10.5	黑 硬 橡 皮	1.15~1.2	耐 火 砖	1.7~2.7
金	19.3	石 蜡	0.9	煤 油	0.85
铂	21.37	石 墨	2.3~2.7	机 油	0.9~0.91
镁	1.74	皮 革	0.4~1.2	汽 油	0.76

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-8)$$

由公式 (1-7)、(1-8) 可以看出，比容 v 和密度 ρ 互为倒数，即

$$v \rho = 1 \quad (1-9)$$

常用物质的密度见表 1-1。

第二节 热 力 知 识

一、热 量

热量是物体吸收或放出热的数量。

一切物体由冷变热时，需要吸收热量；由热变冷时，则要放出热量。例如水吸收热量后才能使水温提高，而采暖时，热水又将其热量放出。

热量的 SI 单位为焦耳，简称焦。过去热量单位还常用卡。

1 卡——1 克纯水温度升高 1℃所需要的热量。

1 焦耳——在 1 牛顿的力作用下，物体沿力的方向移动 1 米距离所做的功。

卡与焦耳的换算关系式为

$$1 \text{ 卡} = 4.1868 \text{ 焦耳}$$

由于热量单位卡和焦耳太小，所以工程上常用千卡（也称大卡）和千焦耳（简称千焦）作为热量单位。

$$1 \text{ 千卡} = 1000 \text{ 卡} = 4.1868 \text{ 千焦}$$

$$1 \text{ 千焦} = 1000 \text{ 焦耳} = 1000 \text{ 牛顿米}$$

1 公斤纯水温度升高 1℃所需要的热量为 1 千卡。

例 求 5 公斤水温度从 20℃升高到 80℃时，需要吸收多少热量？

解 因为 1 公斤水温度升高 1℃所需吸收的热量为 1 千卡，所以若要将 5 公斤的水温度升高 60℃（80℃ - 20℃），则需吸收热量

$$1 \times 5 \times 60 = 300 \text{ 千卡}$$

换算成焦耳为

$$4.1868 \times 300 = 1256.04 \text{ 千焦}$$

热量与温度二者之间虽有一定的联系，但却是两个不同的物理量。例如在不发生物态变化的情况下，物体吸收热量时，温度就升高；放出热量时，温度就下降。热量是表示物体温度变化时吸收或放出的热的数量，而温度则表示物体的冷热程度。平时我们说进入锅炉的给水温度是多少度，但是没有人说进入锅炉的给水是多少大卡的，只有在设计、试验和测定等计算中才用到热量。所以热量和温度二者之间虽有联系，却不能混为一谈。

综上所述，当物体受热之后会发生下列变化：

(1) 温度升高；

(2) 体积膨胀 (在定压下) ;

(3) 物体的状态改变。

同样地, 当物体受冷后会发生降温、体积缩小及状态变化。

二、比 热 容

单位质量的物质, 温度升高 1°C 吸收的热量称为该物质的比热容, 用符号 c 表示。如果质量的单位用公斤, 热量单位用千卡, 比热容的单位就是千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$, 这是我们常用的比热容单位。例如, 钢的比热容为 0.117 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 其含意就是 1 公斤质量的钢温度升高 1°C 需要吸收 0.117 千卡热量。实验证明, 1 公斤质量的钢温度降低 1°C 也将放出 0.117 千卡热量。

每种物质都有自己的比热容。在表 1-2 中, 我们列出了几种常用物质的比热容。物质中除了液态氨的比热容为 1.047 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 以外, 要算水的比热容最大, 为 1 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 。所以通常我们用水作循环液, 以便吸收或散发较多的热量。

几种常用物质的比热容 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$

表 1-2

物质名称	比 热 容	物质名称	比 热 容	物质名称	比 热 容	物质名称	比 热 容
钢	0.117	铜	0.093	水	1	玻 璃	0.2
铁	0.11	铅	0.031	酒 精	0.58		
铸 铁	0.115	银	0.055	冰	0.51		
铝	0.21	铂	0.032	水 银	0.033		

我们只要知道了某种物质的比热容, 就可以算出它在加热或冷却时所吸收或放出的热量。例如把 10 公斤钢从 20°C 加热到 780°C 时所需吸收的热量可按下式计算:

钢的比热容为 0.117 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

10 公斤钢温度升高 780°C 需吸收的热量为 0.117 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C} \times 10$ 公斤 $\times 780^{\circ}\text{C} = 912.6$ 千卡

此计算公式写成一般的数学式, 即为

$$Q = mc(t_2 - t_1) \quad (1-10)$$

式中 Q ——物质在温度升高时吸收的热量, 千卡;

m ——物质的质量, 公斤;

c ——物质的比热容, 千卡 / 公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$;

t_2 ——物质加热后的温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_1 ——物质加热前的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

三、热 胀 冷 缩

物体受热后就会膨胀, 受冷后便会收缩, 这种现象称为物体的热胀冷缩。

在日常生活和工作中, 我们到处都能遇到物体热胀冷缩的现象。例如, 夏天架在两个铁

塔之间的高压电缆，由于气温高而发生膨胀，电缆就伸长和下坠；到了冬天，气温下降，便又收缩和绷紧。

锅炉的各个受热部位，如锅筒、炉管、炉胆、炉墙等，在升温过程中，也都要发生膨胀。所以，在设计锅炉时就应预先为它们留有一定的膨胀余地，避免因热胀受阻而发生锅炉变形、泄漏或损坏。例如：水管锅炉的管子做成弯形的，兰开夏锅炉的炉胆做成波浪形的，等等，都是为了使锅炉受热或冷却时有个伸缩的余地。此外，水管锅炉在安装锅筒及砌炉墙耐火砖衬时，也都留有伸缩的余地。

物体受热膨胀有线膨胀和体膨胀二种：

1. 线膨胀 固体物质受热后，沿着长度方向发生的伸长变化，叫做固体的线膨胀。例如铁路上的钢轨、架空的高压电缆线、输送蒸汽或其它介质的管道等在长度上的冷热伸缩。固体物质受热后，温度升高 1°C ，其长度的增加值与该物质升温前长度之比叫做这种物质的线膨胀系数。例如钢的线膨胀系数为 0.0000114 （即 11.4×10^{-6} ），也就是说，不论它的长度单位是英尺还是米，是长是短，温度每升高 1°C ，钢的长度始终比升温前的长度增加 0.0000114 倍。不同的物质，它的线膨胀系数也不相同。各种常用物质的线膨胀系数可见表 1-3。

物质受热后长度的伸长可按下式计算

$$L_2 = L_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-11)$$

式中 L_2 ——物质在 t_2 时的长度，米；

L_1 ——物质在 t_1 时的长度，米；

α ——该物质的线膨胀系数；

t_2 ——物质受热后的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_1 ——物质受热前的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

例 工人在气温为 16°C 时，安装了一根长 18 米的蒸汽管道。如果用它来输送温度为 179°C 的蒸汽，其长度将比安装时伸长了多少？

解 已知 $L_1 = 18$ 米， $t_1 = 16^{\circ}\text{C}$ ， $t_2 = 179^{\circ}\text{C}$ ，

由表 1-3 可查得钢的线膨胀系数为 $\alpha = 0.000012$

将各数代入公式 (1-13)

$$\begin{aligned} L_2 &= L_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \\ &= 18 \times [1 + 0.000012 \times (179 - 16)] \\ &= 18.035 \text{ 米；} \\ \Delta L &= L_2 - L_1 \\ &= 18.035 - 18 \\ &= 0.035 \text{ 米} \end{aligned}$$

蒸汽管道比安装时伸长了 0.035 米。

2. 体膨胀 物质受热后，其体积的膨胀叫做物质的体膨胀。固体物质受热后，沿其长度、高度和宽度方向都要发生线膨胀，三个线膨胀量的乘积就是该物质的体膨胀。对于液体和气体来说，它们只有体膨胀。物质受热后，温度升高 1°C ，其体积的增加值与该物质升温前的体积之比叫做该物质的体膨胀系数。不同的物质，它的体膨胀系数也不相同。

常用物质的线膨胀系数

表 1-3

物 质 名 称		线 膨 胀 系 数 α ($1/^\circ\text{C}$)	物 质 名 称		线 膨 胀 系 数 α ($1/^\circ\text{C}$)
碳	钢	0.000012	红	砖	0.000042
铸	铁	0.0000117	耐	火 砖	0.0000052
紫	铜	0.000017	砧	(0~100 $^\circ\text{C}$)	0.000014
黄	铜	0.000019	水	(20 $^\circ\text{C}$)	0.00021

四、热 的 传 播

两种温度不同的物质，在相互接近或接触时，便会发生热量的传播，由温度高的物质将热量传播给温度低的物质，这种热量的传播叫做传热。

传热是一个非常复杂的过程，它与许多因素有关。传热方法通常有传导、对流和辐射三种形式。实际上在热量传播过程中，这三种形式是同时存在的。例如锅炉内的炉水和蒸汽就是同时通过这三种传热形式来取得热量的。在炉膛内，燃料燃烧产生的高温烟气，主要是以辐射的方式将热量传播给炉膛内的受热面，此外炉膛内也有烟气流动，所以有一部分热量是通过对流的方式来传播的，凡是受热面所吸收的热量又都是通过传导的方式从受热面的外表面传给受热面的内表面，最后热量又从受热面的内表面传播给对流循环着的炉水或蒸汽。

(一) 传导

在同一物质中（或两种温度不同的物质接触时），热量从高温部分传播至低温部分，叫做传导。例如锅炉拨火用的火钩，刚开始拨火时，手拿的一端是冷的，时间一长就感到烫手，这是因为火钩的另一端被火加热后温度升高，造成火钩两端的温度一高一低，于是热量就由温度高的一端传播给温度较低的、人手拿着的一端。又如将一块烧红的钢板放在地上，几分钟后再将钢板移开，就会发现刚才放热钢板的地面很烫。这些都是传导传热。

不同的物质传导热量的能力也不相同。例如钢传导热量的能力就比木材要大。我们把传导热量性能良好的物质称为良热导体，如银、铜、铝、铁等；而把传导热量性能差的物质称为不良热导体，如空气、石棉、矿渣棉等。平时，我们常用导热性能差的材料来做锅炉和蒸汽管道的保温材料。

物质传导热量的能力叫做热传导率或热传导系数。它的含意是：当表面面积为1米²、壁厚为1米、壁两侧的温度相差1 $^\circ\text{C}$ 时，在1小时内所传导的热量数值。热传导系数可用符号 λ 表示，它的单位是千卡/米·时· $^\circ\text{C}$ 。表1-4是常用固体物质的热传导系数。

从表1-4中可以看出，物质的热传导系数越小，其导热性能就越差。如水垢的热传导系数比钢小25~80倍，烟灰的热传导系数比钢小500~800倍，因此，锅炉受热面的内外壁上若结有水垢或积有烟灰，它的传热效果便会降低，也就意味着降低锅炉的出力和增加燃料的消耗。此外，如锅炉受热面内壁结有水垢，锅炉受热面所吸收的热量就不能很快地传给炉水，这样极易造成受热面金属过热变形、鼓包、甚至被烧坏。所以锅炉在运行中除应加强水质管理外，还要定期检查锅炉受热面，并清除其水垢和烟灰，以便保证锅炉的安全经济运行。

固体物质的热传导系数率

表 1-4

材 料 名 称	热 传 导 系 数 λ (千卡/米·时·°C)	材 料 名 称	热 传 导 系 数 λ (千卡/米·时·°C)
碳钢、铸钢	40~50	玻 璃	0.6~0.9
黄 铜	70~100	石 膏	0.4~0.6
银	350~360	木 材	0.1~0.15
铝	180~200	石 棉	0.13~0.18
合 金 钢	15~30	软木、毛毡	0.04~0.08
粘 土	0.05~0.1	煤	0.1~0.2
砖	0.4~0.6	锅炉水垢	0.5~2.0
耐 火 砖	0.9~1.2	烟 灰	0.05~0.1

(二) 对流

依靠流体(气体或液体)流动来传播热量的方式叫做对流。由于流体被加热部分的体积膨胀,相应地其密度减小,便逐渐向流体上部上升,而温度低的流体密度大,就下降填补它的空间位置,下降的流体加热后又上升,这样循环地流动,便把高温物质的热量传播给低温物质。例如锅炉炉水循环流动加热,冬天室内采暖时的空气循环流动加热,都属于对流传热。所以,对流传热只能发生在可以产生流动的气体 and 液体里,而固体是不能产生对流传热的。

对流传热时,若放热的物质与吸热的物质之间的温差越大,则流体循环流动的速度也越快,传播的热量也就越多;反之,若二者的温度差别越小,则流体循环流动的速度也越慢,传播的热量也就越少。

(三) 辐射

高温的物质以电磁波直接向四周发射来传播热量的方式叫做辐射。物质无论其温度高低,都在向四周辐射散播热量,同时也不断地吸收从其它物质辐射来的热量。如果物质向四周辐射出去的热量高于其所吸收到的辐射热量时,那末物质的热量就会减少,温度也就降低;反之,物质的温度就会升高。例如,太阳照在身上时我们之所以会感到热,这是因为太阳以辐射的形式传播给我们的热量比我们传播出去的热量多。

物质以辐射形式传播热量的能力与其绝对温度的四次方成正比。物质温度越高,以辐射形式传播出来的热量也就越多。此外,物质吸收辐射传播来的热量的多少与其表面光洁度和表面颜色有关。物质表面越粗糙,颜色越黑,其反射辐射热的能力就越小,因而它吸收的热量也就越多。例如夏天,人们爱穿浅色或白色的衬衣,就是为了让衣服能更多地反射掉从太阳照射来的热量,使人体不致因吸收热量过多而感到太热。

锅炉运行时,燃料燃烧产生的大量高温烟气,以辐射的形式向炉膛四壁传播热量,如果在炉膛四周增加辐射受热面积,那末锅炉蒸发量也将随之增加。

第三节 水和水蒸气的性质

一、水的性质

纯水是无色、无味、无嗅、透明的液体。它是由两个氢原子 (H) 和一个氧原子 (O) 化合而成的。氢与氧的质量比为 1 : 8 , 其分子式为 H_2O 。水是良好的溶剂, 它能溶解许多种物质。水在自然界中有三种形态, 即: 固态——冰和雪; 液态——水; 气态——蒸汽。

对于一般物质来说, 随着温度的升高, 其密度逐渐减小, 体积逐渐增大; 随着温度的下降, 其密度逐渐增大, 体积逐渐减小。而水则不同, 在 $4^{\circ}C$ 时水的密度最大, 体积最小, 当低于 $4^{\circ}C$ 或高于 $4^{\circ}C$ 时, 其密度逐渐减小, 体积逐渐增大。因此, 冰总是浮在水面上的。这是水的一个非常突出的特点。所以在冬季, 不运行的锅炉要注意防冻, 避免炉水结成冰后体积增大, 而将设备撑坏。

水的另一个特点是比热较大。使单位质量的水和其它物质的温度同样都升高 $1^{\circ}C$ 时, 水所需要的热量比其它物质的都多。由于水具有这一特性, 而且它又容易取得, 所以常被用来作为吸热和放热 (如冷却和采暖) 的介质。

水具有液体的各种特性。前面我们曾经谈到: 当连通器的各部分水面上的压力相等时, 这些水面就都保持在同一高度上。根据这一原理, 我们可以用水位表测量出锅筒内的水位高低, 如图 1-6 所示。水在密闭容器中, 当水的一部分受到外界压力作用时, 它便以相等大小的力向水的各个方向传递, 以致凡接触到水的任何一点, 都受到相等的压力。锅炉水压试验便是利用这一原理来检查各受压部件的强度和严密性的。

水被加热和吸收热量以后, 温度就逐渐升高, 当水加热到一定温度时, 便开始沸腾, 水沸腾时的温度叫做沸点, 也叫饱和温度。沸点状态下的水称为饱和水, 它所含的热量称为饱和水的含热量, 也称做显热。水的沸点随着压力的升高或降低而相应地升高或降低。在标准大气压下, 水的沸点为 $100^{\circ}C$, 而在 10 个绝对大气压下, 水的沸点即为 $179.04^{\circ}C$ 。当绝对压力为 0.6 个大气压时, 水的沸点即为 $85.45^{\circ}C$ 。所以水在低压下比在高压下沸腾得快, 不过水中所含的热量较少。在高原地区,

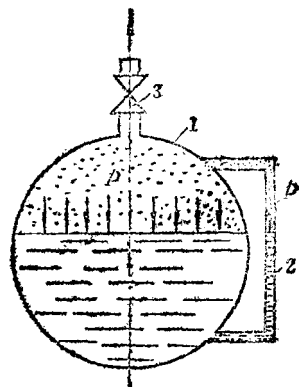


图 1-6 锅炉水位指示

1—锅筒; 2—水位表; 3—蒸汽出口阀门

因为当地气压较低, 所以水总是

水的饱和温度与压力的关系

表 1-5

绝对压力 p (公斤力/厘米 ²)	0.6	0.8	1	2	3	4	5	10	20
t_b ($^{\circ}C$)	85.45	92.99	99.09	119.62	132.88	142.92	151.11	179.04	211.38

不到 100℃ 就沸腾了。水的饱和温度和压力的关系见表 1-5。从表 1-5 可以看出，与饱和温度相对应的压力是一个定值，这个对应的压力就叫饱和压力。水在加热到沸点前，其比容因受热虽有增加，但增加量很微小，几乎显不出来。

二、水蒸气的性质

（一）汽化与汽化潜热

当水被加热到沸腾时，在水的表面和内部便产生大量的汽泡，汽泡升至水面时就破裂开来放出水汽，水就这样逐渐地变成了水蒸气。水由液态变为汽态——水蒸气的过程叫做汽化。

水沸腾后，虽然对它继续加热，但水的温度却不再升高，始终保持在沸点温度，如果停止加热，水也就立即停止沸腾。可见水沸腾后所吸收的热量不是用来升高水的温度，而是用来使水汽化成蒸汽的。现在让我们在大气压力下作一个烧开水的实验（图 1-7）。当把水加热到沸腾时，从两支温度表上可以看出，沸水汽化所生成的蒸汽温度与沸水温度相同，始终保持在饱和温度，这种蒸汽叫做饱和蒸汽，这种水叫做饱和水。

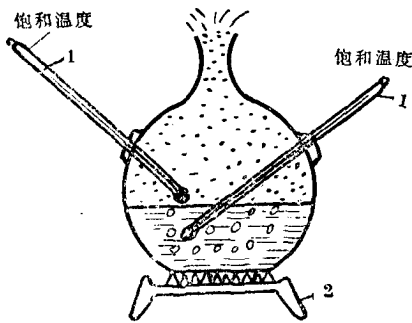


图 1-7 烧开水实验
1—温度计； 2—电炉

1 公斤饱和水完全汽化为饱和蒸汽时所需要的热量，叫做汽化潜热，简称汽化热。用符号 r 表示，单位为千卡/公斤。

在不同的压力下，饱和水汽化为饱和蒸汽所需的汽化潜热也不相同，汽化潜热的数值是随压力的升高而降低的。例如：在绝对压力为 1 公斤力/厘米² 时， $r = 539.6$ 千卡/公斤；在绝对压力为 10 公斤力/厘米² 时， $r = 482.1$ 千卡/公斤；当绝对压力为 0.6 公斤力/厘米² 时， $r = 548.0$ 千卡/公斤。表 1-6 为不同压力下水的汽化潜热。

不同压力下水的汽化潜热 表 1-6

绝对压力 p (公斤力/厘米 ²)	0.6	0.8	1	2	3	4	5	10	225.56
汽化潜热 r (千卡/公斤)	548.0	543.3	539.6	526.4	517.3	510.2	504.2	482.1	0

饱和水汽化为饱和蒸汽时，比容将大大地增加。如在 10 个绝对大气压时，饱和水的比容为 $v' = 0.0011262$ 米³/公斤，而饱和蒸汽的比容 $v'' = 0.1980$ 米³/公斤，较饱和水的比容增大了将近 176 倍。

（二）饱和蒸汽

饱和蒸汽有干饱和蒸汽和湿饱和蒸汽两种状态。

1. 干饱和蒸汽 不含水分的饱和蒸汽叫干饱和蒸汽。它是指饱和水全部被汽化，而蒸汽温度仍等于该压力下的饱和温度时的状态。

2. 湿饱和蒸汽 含有水分的饱和蒸汽叫湿饱和蒸汽。它是指饱和水汽化过程中带有饱和水，处于汽与水共存的状态。

1 公斤湿饱和蒸汽中，含有干饱和蒸汽的质量百分数称为干度，以符号 x 表示。它说明湿饱和蒸汽的干燥程度， x 值越大，则蒸汽越干燥。对干饱和蒸汽说来， $x=1$ 。若干度 $x=0.9$ ，则表示 1 公斤湿饱和蒸汽中含干饱和蒸汽百分之九十，含饱和水百分之十。

(三) 过热蒸汽

若在等压下继续加热干饱和蒸汽，蒸汽温度便会逐渐升高，比容也将更为增大，这种温度高于饱和温度的蒸汽叫做过热蒸汽。由干饱和蒸汽变为过热蒸汽的过程叫过热阶段。这一阶段所吸收的热量称为过热热量。过热蒸汽超过饱和温度的程度称为过热度。

过热蒸汽因有较大的热量和较低的热传导率，所以不象饱和蒸汽那样易于凝结，在汽温下降至饱和温度以前绝不会凝结成水。另外，过热蒸汽比饱和蒸汽具有更大的做功能力，因此，常被用作汽轮机、蒸汽机等设备的动力。

锅炉运行时，将水加热变成蒸汽的过程是在压力不变的情况下进行的，我们可通过图 1-8 的实验来说明水加热后变成蒸汽的各个过程。把 1 公斤水放在装有活塞的容器中，然后在活塞的上面加一个重物，使活塞承受固定的压力 p ，如图 1-8(a) 所示。当容器内的水被加热到饱和温度（沸点）时，水的比容也随之增大，此状态下的水称为饱和水，如图 1-8(b) 所示。继续加热时，饱和水就开始汽化产生蒸汽，这时，水和汽的温度保持不变，仍为饱和温度，而且，由于水汽化成为蒸汽，其比容增大了许多。由于饱和水和饱和蒸汽都同时存在于容器之中，此时的饱和蒸汽称为湿饱和蒸汽，如图 1-8(c) 所示。再继续加热，直至容器内最后一滴饱和水也变为蒸汽时，这种不含水分的蒸汽称为干饱和蒸汽，如图 1-8(d) 所示。若

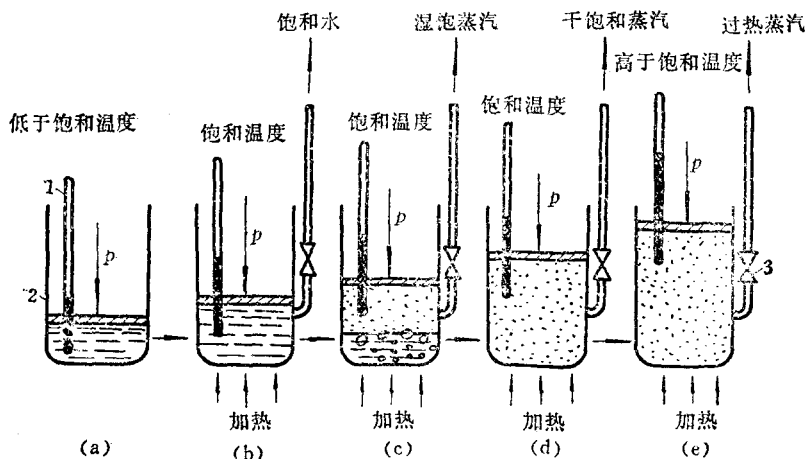


图 1-8 定压状态下水加热汽化的过程

1—温度表； 2—加热容器； 3—阀门

将容器中的干饱和蒸汽再继续加热，则干饱和蒸汽的温度便开始升高，比容也继续增大，此时的干饱和蒸汽叫做过热蒸汽，如图 1-8(e) 所示。

锅炉运行时，不同压力下的饱和水和饱和蒸汽的比容、含热量及汽化潜热可查表 1-7 饱和水和饱和蒸汽性质表。

饱和水和饱和蒸汽性质表

表 1-7

绝对压力 p (公斤力/ 厘米 ²)	饱和温度 t_s (°C)	饱和水比容 v' (米 ³ /公斤)	饱和蒸汽比容 v'' (米 ³ /公斤)	饱和水含热量 i' (千卡/公斤)	饱和蒸汽含热量 i'' (千卡/公斤)	汽化潜热 r (千卡/公斤)
0.010	6.698	0.0010001	131.60	6.73	600.2	593.5
0.10	45.45	0.0010101	14.95	45.45	617.0	571.6
0.20	59.67	0.0010169	7.789	59.65	623.1	563.4
0.30	68.68	0.0010220	5.324	68.66	626.8	558.1
0.40	75.42	0.0010261	4.066	75.41	629.5	554.1
0.50	80.86	0.0010296	3.239	80.86	631.6	550.7
0.60	85.45	0.0010327	2.782	85.47	633.5	548.0
0.70	89.45	0.0010355	2.403	89.49	635.1	545.6
0.80	92.99	0.0010381	2.125	93.05	636.4	543.3
0.90	96.18	0.0010405	1.903	96.26	637.6	541.3
1.0	99.09	0.0010428	1.725	99.19	638.8	539.6
1.1	101.76	0.0010448	1.578	101.87	639.8	537.9
1.2	104.25	0.0010468	1.455	104.38	640.7	536.3
1.3	106.56	0.0010487	1.350	106.72	641.6	534.9
1.4	108.74	0.0010505	1.259	108.92	642.4	533.4
1.5	110.79	0.0010522	1.1810	110.99	643.1	532.1
1.6	112.73	0.0010538	1.1110	112.95	643.8	530.8
1.7	114.57	0.0010554	1.0530	114.81	644.4	529.7
1.8	116.33	0.0010570	0.9954	116.60	645.0	528.5
1.9	118.01	0.0010585	0.9432	118.30	645.6	527.4
2.0	119.62	0.0010600	0.9013	119.94	646.3	526.4
2.1	121.16	0.0010614	0.8616	121.50	646.8	525.3
2.2	122.65	0.0010627	0.8248	123.00	647.3	524.3
2.3	124.08	0.0010640	0.7912	124.50	647.8	523.3
2.4	125.46	0.0010653	0.7603	125.90	648.3	522.4

续表

绝对压力 p (公斤力/ 厘米 ²)	饱和温度 t_b (°C)	饱和水比容 v' (米 ³ /公斤)	饱和蒸汽比容 v'' (米 ³ /公斤)	饱和水含热量 i' (千卡/公斤)	饱和蒸汽含热量 i'' (千卡/公斤)	汽化潜热 r (千卡/公斤)
2.5	126.79	0.0010666	0.7318	127.20	648.7	521.5
2.6	128.08	0.0010678	0.7055	128.5	649.2	520.7
2.7	129.34	0.0010691	0.6808	129.8	649.6	519.8
2.8	130.55	0.0010703	0.6581	131.1	650.0	518.9
2.9	131.73	0.0010714	0.6368	132.3	650.3	518.0
3.0	132.88	0.0010726	0.6169	133.4	650.7	517.3
3.1	134.00	0.0010737	0.5982	134.6	651.1	516.5
3.2	135.08	0.0010748	0.5807	135.7	651.4	515.7
3.3	136.14	0.0010758	0.5645	136.8	651.8	515.0
3.4	137.18	0.0010769	0.5486	137.8	652.1	514.3
3.5	138.19	0.0010779	0.5338	138.9	652.4	513.5
3.6	139.18	0.0010789	0.5199	139.9	652.8	512.9
3.7	140.15	0.0010800	0.5066	140.9	653.0	512.1
3.8	141.09	0.0010809	0.4942	141.8	653.3	511.5
3.9	142.06	0.0010819	0.4822	142.8	653.6	510.8
4.0	142.92	0.0010829	0.4709	143.7	653.9	510.2
4.1	143.81	0.0010839	0.4601	144.6	654.1	509.5
4.2	144.68	0.0010848	0.4498	145.5	654.4	508.9
4.3	145.54	0.0010857	0.4399	146.4	654.7	508.3
4.4	146.38	0.0010866	0.4305	147.3	654.9	507.6
4.5	147.20	0.0010875	0.4215	148.1	655.2	507.1
4.6	148.01	0.0010884	0.4129	149.0	655.4	506.5
4.7	148.81	0.0010893	0.4045	149.8	655.6	505.8
4.8	149.59	0.0010902	0.3966	150.6	655.9	505.3
4.9	150.36	0.0010910	0.3890	151.4	656.1	504.7