

1. 蒸汽基础知识

蒸汽本身为无色透明气体，日常生活中在烧开水或是蒸煮饭食时发生的白色雾气一般称之为蒸汽或是水蒸气。事实上正确的说它们应该是‘细微的水颗粒’。

蒸汽虽然就在我们身边产生但是很难说它渗透到我们日常生活中来，对于蒸汽特性进行理解则需要我们掌握一部分专门知识。在学习掌握蒸汽疏水阀及其他蒸汽使用装置相关知识之前，我们需要从掌握蒸汽的基础知识开始。

据说在历史上蒸汽最早作为地下抽水的动力源来使用，并在此基础上发展为蒸汽机在 18 世纪的产业革命中发挥了巨大作用推动了历史划时代的发展。自此以后蒸汽船，织布机，调速机，蒸汽机车等通过蒸汽来运作的机器不断的被开发及使用。蒸汽作为不可缺少的动力能源为世界的产业发展做出了巨大的贡献。在此以后动力能源逐渐被汽油，电力等能源所代替。但是与此同时蒸汽则在供热系统作为热能搬运工被广泛的使用，特别是在石油精制，化学，食品等生产过程，灭菌，暖气及蒸汽涡轮机的动力驱动中蒸汽依然发挥着它的作用，贡献于各类产业链中。

蒸汽能够作为热能搬运工或是驱动动力被持续使用的一个重要原因是其本身来源于水。地球上存在着丰富的水资源，并且经济效益可观。最重要的是其本身所具有的物理特性及化学特性很容易被掌握和利用。

本章首先将蒸汽的特性及其相关基本用语进行简明阐述。

1.1 蒸汽相关用语

蒸汽相关的理科学中，（下简称蒸汽理科学）饱和蒸汽表的使用是不可缺少的。首先在此有关饱和蒸汽表所使用的专业术语及其相关的基础用语进行解说。

● 压力 (Pressure)

单位面积上作用的力称之为压力。

压力的国际单位 (SI) 为帕斯卡 (Pa)， 1 m^2 面积上作用力为 1 牛顿时的作用压力定义为 1Pa { $1\text{ Pa} = (1\text{ N}/\text{m}^2)$ }。帕斯卡的单位值相对较小，在蒸汽理科学上通常使用 1MPa 或是 1kPa。（本资料中以 MPa 作为压力单位表示）。以前通常被使用的压力单位 kgf/cm^2 与 MPa 的换算方式为 $1\text{ MPa} = 10.197(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 。

压力通常有两种称呼分别为「绝对压力」和「表压」。以绝对真空为基准 0 (0MPa) 时所测量的压力为绝对压力 (Absolute pressure)。表压则是使用压力表所测量的压力，即以大气压为基准 0 (0MPa) 时所测得的压力为表压 (Gauge pressure)。表压与绝对压力的关系如下。

$$(\text{表压}) = (\text{绝对压力}) - (\text{大气压力})$$

大气压力在使用表压表示时为 0MPa，使用绝对压力表示时为 0.10133MPa。即在绝对压力与表压之间存在 0.1MPa 的差。为明确表示区分在使用时通常在绝对压力单位后标注‘a’，而在表压单位后标注‘g’。

比容积 (Specific volume)、比重量 (Specific weight)

1kg 的蒸汽所占有的容积称之为比容积 (或比体积) 单位表示为 m^3/kg , 比容积的值基本上由压力及温度所决定。压力及温度的变化带来比容积的变化。在变化的程度上与液体状态的水相比, 蒸汽的变化程度将庞大的多。

比重量 (又称密度) 为比容积的倒数, 单位为 kg/m^3 。

● 饱和温度 (Saturated temperature)

对水进行加热会使水的温度逐渐上升, 达到一定温度时水的温度则不再上升。持续加热会使水逐渐的生成为同温度的蒸汽直至全部的水都生成为蒸汽。此时的温度称为饱和温度。饱和温度与压力存在一定的关系, 压力越高饱和温度点越高, 反之压力越低饱和温度点越低。

● 比热焓 (Specific enthalpy)

比热焓是指蒸汽或是水单位质量 (1kg) 中所含的热能, 经常使用于热力学。在蒸汽理科学中以下热量表示用语常被使用并记载于饱和蒸汽表中。

① 水的比热焓 (h')

1kg 的水由 0°C 开始上升至所在温度所需要的热量称之为水的比热焓, 又称为显热。

0°C 时水的比热焓为零可以直观的进行理解并掌握。大气压的情况下水在 100°C 时开始沸腾, 1kg 的水由 0°C 上升至 100°C 时所需要的热量为 419kJ (千焦) 以水的比热为 $4.19\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ 来计算。

② 蒸发比热焓 (r)

将沸腾的 1kg 水完全生成为蒸汽时所需要的热量称之为蒸发比热焓。在水与蒸汽共存的状态下温度不发生变化, 所有的热能均被由水转化至蒸汽的过程中被使用。亦称为蒸发热或是气化热。

③ 饱和蒸汽的比热焓 (h'')

指其饱和蒸汽所含的全部热量。如同下记计算式其为水的比热焓与蒸发比热焓的和来表示。

$$h'' = r + h'$$

● 显热 (Sensible heat)

致使物质的温度发生变化的热量称之为显热。显热被吸收会使物质温度变化反之显热被释放就会导致物质温度下降。在蒸汽理科学中通常指水 (液体) 所含有的热量。即在热量转换过程中物质的状态不发生变化而温度发生变化时此时所使用的热量称之为显热。

● 潜热 (Latent heat)

致使物质的状态发生变化的热量称之为潜热。在潜热的热量转换过程中不存在温度的变化。通常也被称之为融解热, 蒸发热 (汽化热), 液化热, 凝固热等。蒸汽理科学中常称为蒸发比热焓。即在热量转换过程中物质的温度不发生变化而状态发生变化时此时所使用的热量称之为显热。

● 比热 (Specific heat)

即使用同样的热量进行加热也会因物质的不同导致其温度上升方法不同。致使某一 1kg 物质的温度上升 1°C 所需要的必要热量称之为改物质的比热。单位为 $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ 。在比热而言, 当物质的体

积保持一定的情况下称之为「定积比热」和当所在压力保持一定的情况下称之为「定压比热」的两种定义。一般两者存在差异的问题仅限物质为气体的情况下。也就是说在液体的状态下水的比热正如前述「①水的比热焓」一样为 $4.19\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ 。

1.2 水的相态

大多数的物质以固相，液相，气相的三种相态的物理特性存在。并且在各相态下分别称之为固体，液体，气体。水的情况下则以冰，水，蒸汽来称呼。对应相态为固体，液体，气体。预知蒸汽的特性需要理解物质的分子构造基础，在此基础上将冰，水，蒸汽各自结构进行对照则更易理解及掌握。

分子是含有所有该物质化学特性的最小单位。水的分子结构是由 2 个氢元素与 1 个氧元素结合而成的化合物。化学分子式用 H_2O 表示。地球上之所以有着丰富的水资源，主要是因为氢元素与氧元素在宇宙中所占的存在比率最大。碳素也是类似存在的元素之一，分子的活性由其物理状态（相态）来决定。

1.2.1 冰（固相）

冰的分子因其相互接近并相互贴紧而结合，规律化散布成格子状。各分子的活动（振动）仅限于结合部很小的范围内。随着持续加热，分子的振动加强终于致使一部分分子之间的结合力受到破坏。开始由固体逐渐变为液体发生融解现象。此时融解开始时的温度称之为熔点。

大气压的条件下冰的熔点为 0°C ，压力越高熔点越高。因受热格子状排列的水分子被破坏开始融解时的温度持续保持冰的温度，所有热量均被融解过程所使用。此时的热量称之为**融解热**。由液体转化为固体的相变也是存在的，放出同样的热量（等同于融解热）即会凝固，此时的热量称之为**凝固热**。

大多数的物质在由固体转为液体的相变时密度会变小，即相对固体的分子间距而言液体的分子间的距离有增大。但是 H_2O 的情况除外，溶解后密度会增加。冰浮于水即为此原因。

1.2.2 水（液相）

液相的状态下分子自由的进行活动偶尔会发生分子之间的碰撞。但是相互接近的力量依然存在，分子间的间距依然保持很短的距离。持续的进行加热分子活动更加活性化直至达到该物质的沸点。

1.2.3 蒸汽（气相）

随着水的温度不断上升，一部分水分子获取足够的活动能量，开始瞬间由水的表面向上方飞出或是向水面下方移动。继续进行加热则使分子的活动更加活跃，脱离液体的水分子越来越多。在液体中形成蒸汽的气泡并上升活动，突破液体表面向外散布。

蒸汽分子间的间距远远比水分子之间的间距要大得多，其密度自然要比水的密度小很多。液体表面以上的空间马上会被蒸汽分子所充满。

此时与返回液体内的分子相比脱离液面的分子要多得多，水不断的在被蒸发。至此温度则达到沸点或是饱和温度。

压力在保持一定的情况下，即使继续进行加热至水完全变为蒸汽为止温度不再发生变化。所有的热量均被由水成为蒸汽的过程所使用。此时的热量称之为**蒸发热**或是**汽化热**。沸腾的水（饱和水）和饱

和蒸汽的温度虽然相同，但是单位质量中各自所含的热量是截然不同的，蒸汽所含有的热量要远远大于饱和水所含的热量。同样蒸发的过程也是可以逆转的，蒸汽与温度低的面进行接触时，所持有的热量会向外放出本身进行凝缩。该凝缩热量与蒸发热量相同称之为**液化热**。蒸汽因凝缩而成为水，此时的水称之为冷凝水(Condensate)。

1.3 蒸汽的特性

1.3.1 水的状态图

图 1.1 为「1.2 水的相态」中陈述的内容进行表示的结果。该图是水在大气压情况下热量变化的内容。X 轴（横轴）为通过加热（比热焓增加的过程）而导致相态变化的内容。y 轴为温度显示。（图中左半部分不在蒸汽理科学范围之中，在此不在赘述。）

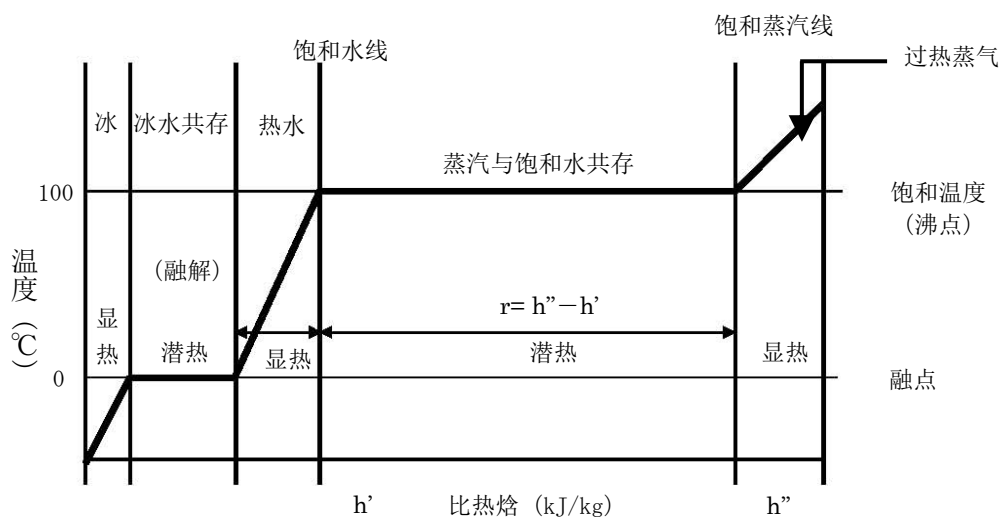


图 1.1 大气压下水的状态变化

温度由 0℃开始通过加热上升至 100℃（沸点）时的显热（饱和水的比热焓 h' ），饱和水完全成为蒸汽时所含的全热量（饱和蒸汽的比热焓 h'' ）及水完全成为蒸汽所需的潜热（蒸发比热焓 $r=h''-h'$ ）之间的热量变化均在图中表示。饱和水逐渐成为蒸汽途中的汽水共存状态称之为**湿饱和蒸汽**。水分完全成为蒸汽时称之为**干饱和蒸汽**，干饱和蒸汽通过继续加热温度上升超过饱和温度时称之为**过热蒸汽**，过热蒸汽的温度与饱和蒸汽之间的温度差称之为**过热度**。

在以后论述中无特别说明的情况下水的比热焓以‘显热’，蒸发比热焓以‘潜热’及蒸汽保有全热量以‘全热量’来表示。

1.3.2 蒸汽的能量

如前文所述蒸汽在被使用于加热等过程中会释放其含有的潜热而相态发生变化成为冷凝水，此时冷凝水的温度与蒸汽的温度相同。蒸汽正是利用此特性作为有效的热能源被广泛的使用于必须要进行此加热处理的制程，灭菌等生产过程。蒸汽作为热能搬运工最大的利点为其能含有大量的潜热能及其是取之不尽用之不竭的物质。

蒸汽所含的潜热能的多少可以通过饱和蒸汽表来进行确认。表 1.2 是由饱和蒸汽表抽出的一部分数据，例如在大气压的情况下（表压 0.0MPa）时记载内容如下所示（小数点个位以下四舍五入）。

$$\begin{aligned} \text{饱和水的显热 } h' &= 419 \text{ kJ/kg} \\ \text{蒸汽的全热量 } h'' &= 2,676 \text{ kJ/kg} \\ \text{潜热 } r = h'' - h' &= 2,257 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

由此可以知道，

$$\begin{aligned} (\text{潜热在全热量中所占有的比例}) &= 2,257 / 2,676 = 0.8434 \approx 84\% \\ (\text{蒸汽含有潜热与显热之间的倍数}) &= 2,257 / 419 = 5.3866 \approx 5.39 \end{aligned}$$

如上所示潜热占全部热量中的 84%，同时是显热的 5.39 倍。

表 1.1 是常见的各类物质（水，氨，甲醇及乙醇）的热性比较表，从中可以得知相对而言蒸汽的蒸发潜热之大。

表 1.1 大气压下各类物质的热性比较表

| 物质 | 熔点(℃) | 沸点(℃) | 融解热(kJ/kg) | 蒸发热(kJ/kg) |
|----|--------|-------|------------|------------|
| 水 | 0 | 100 | 333.5 | 2,257 |
| 氨 | -77.8 | -33.4 | 338 | 1,371 |
| 甲醇 | -97.7 | 64.7 | 99.2 | 1,190 |
| 乙醇 | -114.1 | 78.6 | 109 | 855 |

压力的上升使之要达到饱和点则需要更多的热量，此时相态不发生变化温度上升。换言之之显热与饱和温度都发生了增加。此关系如图 1.2 所示的饱和蒸汽曲线图。此曲线为水与饱和蒸汽共存状态，曲线下部分为未达到饱和点的水，曲线上方则为过热蒸汽。

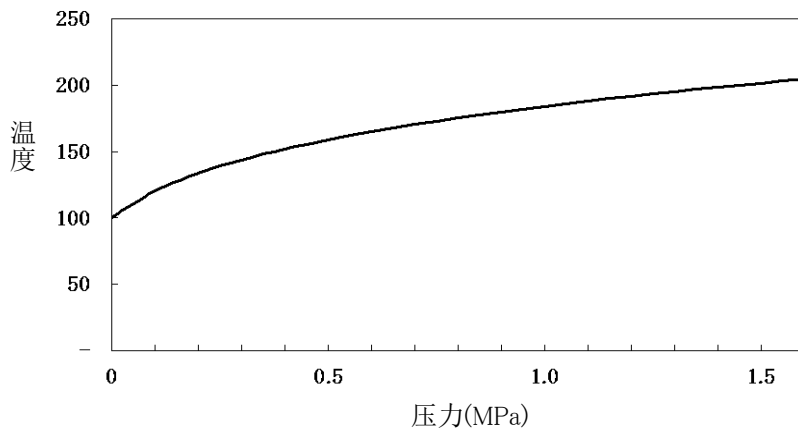


图 1.2 饱和蒸汽曲线

那么，蒸汽与饱和水的热量在压力上升时又会出现什么样的变化呢？图 1.3 为其关系变化图，从中可以得知：

- ①饱和水的显热伴随着压力的增加亦呈增加趋势（如上所述）。
- ②蒸汽的潜热伴随着压力的上升而呈减少趋势。
- ③蒸汽的全热量（上述①的显热与②的潜热之和）面对压力的变化，在低压领域时会有少量的增加基本保持一定。但是在压力在超过 3.2MPa 时会呈减少趋势，达到临界点时潜热则变为零。

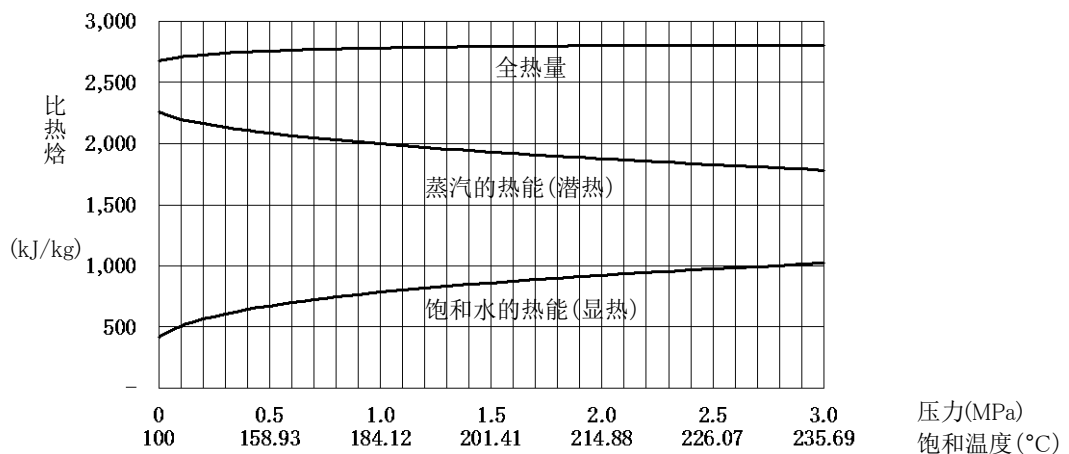


图 1.3 蒸汽及饱和水所含热量与压力的关系

在此需要注意的是伴随着压力的上升蒸发所必要的潜热有所减少的现象。也就意味着压力越高的蒸汽可以利用的潜热越少。例如表 1.2 的饱和蒸汽表中压力在 0.5MPa 和 1.0MPa 时各自的潜热 r 分别为 2,085kJ/kg 和 1,998kJ/kg，相比之下 1.0MPa 时所含的潜热要小。比大气压情况下（0.1MPa 时 2,257kJ/kg）要更小。

接下来再看一下蒸汽的比容积和压力之间的关系。通过图 1.4 可以明显发现比容积在低压领域变化的范围大，在高压情况下则变化的范围小。说明比容积与压力呈反比状态变化。虽然压力越高单位质量（1kg）所含的潜热越少但是其体积也减小，结果上来看单位体积（1m³）内所含的潜热有所增加。在实际使用中提高蒸汽的压力即可使用较小口径得管道进行大量的输送。这也是在设计蒸汽管道输送系统中必须要考虑到的要点之一。

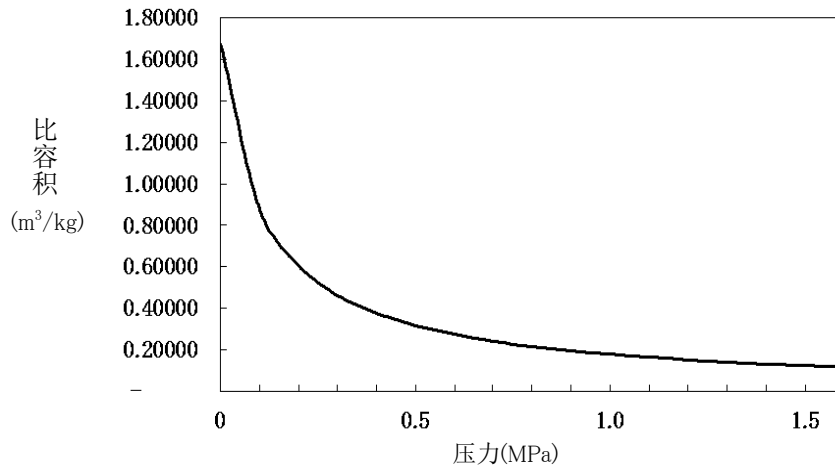


图 1.4 蒸汽压力与比容积的关系

表 1.2 饱和蒸汽表（表压基准）

| 表压 (MPa) | 饱和温度 (°C) | 比容积 (m ³ /kg) | | 比重量 (kg/m ³) | 蒸发热 (kJ/kg) | | |
|-------------|--------------|--------------------------|---------|-----------------------------|-------------|--------|----------|
| | | 饱和水 | 饱和蒸汽 | | 显热 | 全热量 | 潜热 |
| | | v' | v'' | | h' | h'' | r=h''-h' |
| 0.0 | 100.00 | 0.0010437 | 1.67300 | 0.5977 | 419.06 | 2676.0 | 2256.9 |
| 0.1 | 120.44 | 0.0010610 | 0.87999 | 1.1364 | 505.58 | 2706.6 | 2201.0 |
| 0.5 | 158.93 | 0.0011096 | 0.31482 | 3.1764 | 670.79 | 2755.6 | 2084.7 |
| 1.0 | 184.12 | 0.0011331 | 0.17718 | 5.6440 | 781.36 | 2779.7 | 1998.3 |

1.3.3 干度

蒸汽由锅炉生成后被运往各个使用地点。在生成蒸汽时完全不含水分是不可能的，必不可免的会有水分含在蒸汽内部。但是对蒸汽使用者而言希望能够得到完全不含有水分的蒸汽以利生产使用。含有水分的多少使用蒸汽干度（Dryness fraction）来表示。蒸汽的干度越高其蒸汽的质量（Quality）也就越高。

蒸汽干度 (χ) 是干燥蒸汽对蒸汽重量所占有的比率表示。例如蒸汽内部含有 5% 的水分时其蒸汽干度为 0.95。同时 $(1 - \chi)$ 的量称之为蒸汽湿度。锅炉出口处的蒸汽干度约为 0.95~0.98。湿饱和蒸汽所含有的热量 (比热焓 h) 如图 1.1 的记号所示亦通过以下计算式来表示。

$$h = (1 - \chi)h' + \chi h'' = h' + \chi r$$

1.3.4 闪蒸蒸汽

闪蒸蒸汽 (Flash steam) 一般是指冷凝水回收罐上部或是蒸汽疏水阀出口处大气开放排凝管处出现的再蒸发蒸汽现象。为什么没有进行加热而又出现蒸汽呢? 是因为在一定压力环境下存在的冷凝水到达较该压力低的环境时, 冷凝水本身的温度要高于低压环境的饱和温度点。冷凝水无法以水的状态而存在所含有的热量瞬时释放而气化产生蒸汽, 这种状况在冷凝水由高压环境过渡到低压环境时必然发生的现象。反之在较冷凝水的温度高的饱和温度环境下, 则不会发生再蒸发现象。

例如当冷凝水在通过蒸汽疏水阀时, 入口侧的高温冷凝水以水的状态存在, 因出口侧所处环境的环境的压力要比入口侧的压力低, 冷凝水在被排出时基本上都会出现闪蒸蒸汽现象。

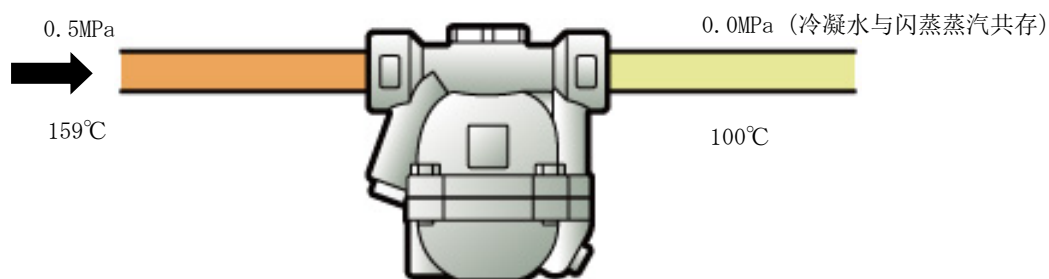


图 1.5 闪蒸蒸汽的生成

如图 1.5 为蒸汽疏水阀入口侧的蒸汽压力为 0.5MPa, 其饱和温度为 159°C 的 1kg 冷凝水由蒸汽疏水阀出口侧的排凝管排向大气 (0.0MPa) 时的状态。

参照表 1.2 在压力为 0.5MPa 时 1kg 饱和温度的冷凝水所含有的热量为 671kJ。遵照热力学第一法则 (能量守恒定律) 流体的全热量在蒸汽疏水阀入口侧与蒸汽疏水阀出口侧相同的定律, (此时蒸汽疏水阀的放热及流路抵抗能力所导致的热损失不计的情况下) 流向蒸汽疏水阀出口侧的 1kg 的冷凝水也应该含有 671kJ 的热量。但是在压力为 0.0MPa 的环境下冷凝水所能够含有的热量仅为 419kJ, 即会有 $671 - 419 = 252$ kJ 的热量差出现。这一部分的热量使冷凝水沸腾生成再蒸发蒸汽也称之为闪蒸蒸汽。

总而言之在蒸汽疏水阀高压侧以液体状态存在的 1kg 冷凝水在低压侧以液体和一部分蒸汽的状态存在。

所生成的闪蒸蒸汽量通过以下计算式来进行计算。

$$\begin{aligned} \text{闪蒸蒸汽} &= \frac{(\text{入口侧压力时的潜热量 } h') - (\text{出口侧压力时的潜热量 } h')}{(\text{出口侧压力时的全热量 } r)} \\ &= \frac{(671\text{kJ/kg} - 419\text{kJ/kg})}{2,257\text{kJ/kg}} = 0.11 \end{aligned}$$

通过计算得知 1kg 的冷凝水其闪蒸蒸汽量为 0.11kg。

闪蒸蒸汽的生成比率源自于其所在最终压力时含有的全热量与原压力时所含有的全热量之间存在的余剩热量的所占比例。

重要之处是闪蒸蒸汽并不单是发生于蒸汽系统内或是蒸汽疏水阀出口的现象，而是应该积极的利用此物理特性来实施有效活用。一部分的冷凝水闪蒸后的蒸汽可以在低压环境得到再利用是有效活用方法之一。在「1.3.3 干度」中已有陈述蒸汽所含有的水分越少蒸汽质量越高，通过让含在蒸汽中的水分进行再蒸发可以有效抑制换热装置的换热效率下降现象。具有闪蒸蒸汽代表性的利用装置为蒸汽闪蒸罐。

1.3.5 其它特性

蒸汽作为热能搬运工被广泛使用的理由除既述的因其可保有巨大潜热能量及其在地球上拥有丰富的存在量以外，其他的优良特性如下所示。

- 对人体无害。
- 无腐蚀性并无引火的可能性，化学性质稳定。
- 较其他热源媒体相比可以进行均匀的加热。
- 通过改变使用压力可以控制其饱和温度，可以应对要求的加热温度进行调解及供给。
- 蒸汽与冷凝水之间的比体积存在很大的差，蒸汽凝缩时后续蒸汽可马上补充供给。

在蒸汽使用时所存在的问题点如以下所述。

- 在锅炉制造蒸汽及蒸汽在被使用的过程中必不可免的会存在空气等非溶解性气体的混入，并因此所带来的传热效率低下的可能性。
- 生成蒸汽所使用的水中或多或少的会融入其他不纯物质，并存在因此不纯物质造成酸化腐蚀现象可能性。此类物质在生成过程中无法完全被去除亦是问题点之一。
- 还有对蒸汽疏水阀而言因水的凝固点为 0℃，需要根据所在地域情况实施防冻对策。

1.4 蒸汽与冷凝水的气液两相流

在本章的最后，对蒸汽输送管内的蒸汽与冷凝水的流动状态进行简单的论述。在同一流路内气相与液相两种流体同时存在的流动状态称之为气液两相流。例如在蒸汽输送时蒸汽管道内中存在蒸汽与冷凝水两种相态的现象即属于气液两相流的一种。

在蒸汽与冷凝水的气液两相流状态下，通常会被认为密度大的冷凝水于管道底部流动而速度较快密度较小的蒸汽在冷凝水上面流动。但是实际上会因蒸汽与冷凝水的流动速度的不同出现流动位置上的不同。有关此详细流动状态的变化内容及说明请参照「気液二相流技術ハンドブック（日本機械学会編）/气液两相流技术手册（日本机械学会编制）」。

据「气液两相流技术手册（日本机械学会编制）」中记述，蒸汽输送管内的蒸汽流速一般设计为20m/s~40m/s。在此蒸汽速度下如图 1.6 所示，以环状流动状态或是环状喷雾流动状态来流动。并不是常认为的蒸汽在上部流动而冷凝水在下部，而是冷凝水环绕管道内壁随同蒸汽一起流动。

一般为有效排除蒸汽管道内存在的冷凝水，通常在管道的底部连接排凝管进行排出，但是在上述情况下完全将存在于管道内部的冷凝水排出是很困难的。因此可以判断蒸汽在抵达使用装置时内部已含有一定量的冷凝水，所以 MIYAWAKI 通常建议在蒸汽使用装置前设置气水分离器来有效分离蒸汽与冷凝水。

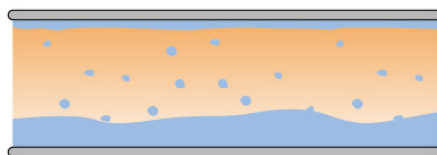


図 1.6 復水の環状流