

章节 15.1

基本的减温原理

过热

过热蒸汽是指温度高于饱和温度的蒸汽。例如，表压为3 bar g的饱和蒸汽温度为143.762°C，如果对其继续加热并维持压力不变，它将变为过热蒸汽。这额外增加的热量使蒸汽：

- 温度高于饱和温度；
- 比饱和蒸汽具有更多的热量；
- 比饱和蒸汽具有更大的比容。

它们的关系在很多教材中有详细的说明。

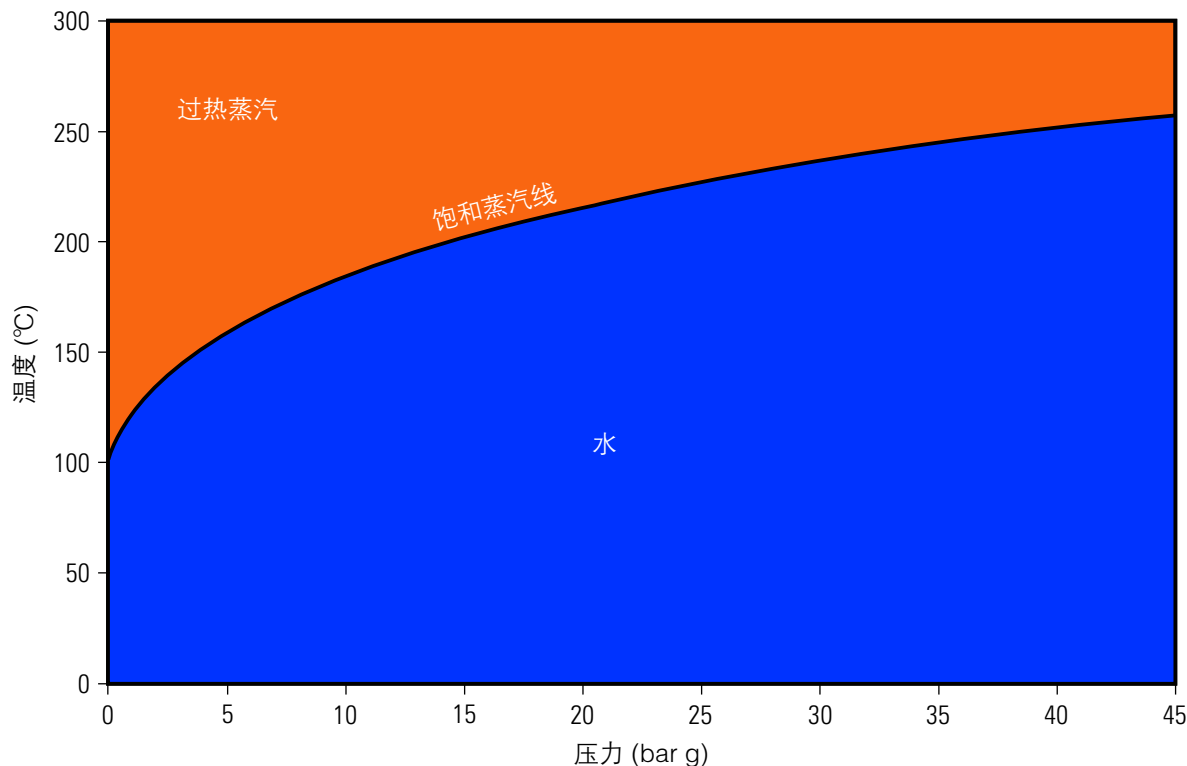


图15.1.1 饱和蒸汽曲线

过热蒸汽主要用于电厂以驱动汽轮机。根据朗肯循环的原理，用过热蒸汽驱动汽轮机的热效率要远高于用饱和蒸汽。

过热蒸汽的优点：

- 湿蒸汽在汽轮机内会形成水滴，导致汽轮机叶轮冲蚀，同时增加了摩擦阻力。
- 可以使用更高的管道流速（最高至100m/s），这样可以减小蒸汽管网的尺寸（假如压力降没有超出允许的范围）。
- 对于连续运行的工厂，过热蒸汽意味着管道中没有冷凝水的形成，因此只需要在系统启动时进行疏水。

使用过热蒸汽的缺点：

- 虽然过热蒸汽包含了更多的热量，这种热量以三种形式存在：水的焓、蒸发焓（潜热）、过热焓，但大部分热量是蒸发焓，过热部分的热量仅占很小一部分。

例如，在10 bar a压力下温度为300°C的过热蒸汽，

水的焓为 = 763 kJ/kg；

蒸发焓为 = 2015 kJ/kg；

过热焓为 = 274 kJ/kg。

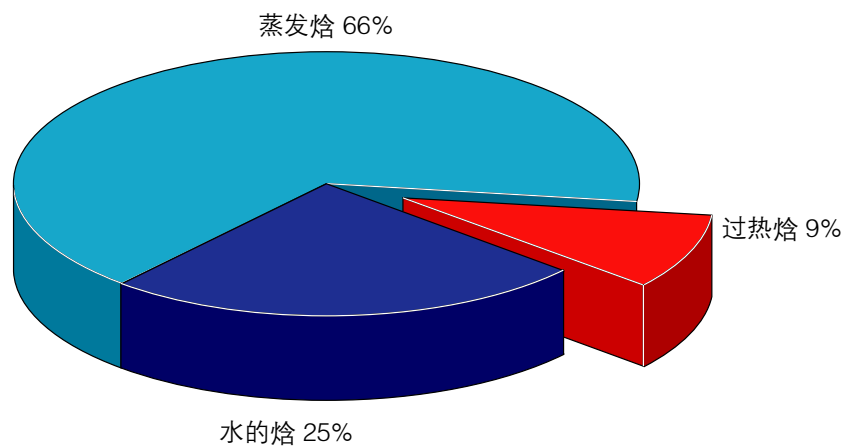


图15.1.2 过热蒸汽的焓

□ 当使用过热蒸汽作为传热介质时，其传热系数是变化的、比较低且难于精确量化。这样很难进行换热器的精确选型和控制。同时与使用饱和蒸汽的设备相比其换热器更大、更昂贵。

过热蒸汽一旦冷却到饱和蒸汽，其传热系数将会大幅提高，并且蒸汽冷凝成水的过程中温度保持恒定不变，这样有助于换热设备的正确选型和控制。

由于使用饱和蒸汽的换热系数高，与过热蒸汽相比其换热设备会减小、便宜。

- 某些过程(例如蒸馏罐)当使用过热蒸汽时效率会降低；
- 高温的过热蒸汽意味着所使用的换热设备等级更高，因此更昂贵；
- 过热蒸汽的高温可能会损坏敏感的设备。

以上缺点表明过热蒸汽通常不适用于一般的制程应用。尽管如此，在有些地方产生过热蒸汽用于发电，然后在热力循环的某一点对过热蒸汽进行减温，以用于制程应用。

有些场合有大量的废热可以作为燃料用于锅炉。如果废热足够多，可以产生过热蒸汽用于发电，如造纸和制糖工业。

在工厂中如果有过热蒸汽提供给制程使用，在输送蒸汽过程中必须特别注意以确保达到远处的使用点时蒸汽仍保持干燥。

蒸汽减温的基本方式

减温过程是指将过热蒸汽的温度降到饱和状态，或者降低蒸汽的过热度。大多数减温器设计为使蒸汽温度接近于饱和温度（典型的最小值为高于饱和温度3℃）。如果希望减温器的排放温度超过饱和温度的3℃以上也是可能的，并且经常用到。

有两种最基本的减温器形式：

- 非接触式 - 冷却蒸汽的介质不和被冷却的蒸汽直接接触。温度较低的液体、气体均可以作为冷却介质，比如空气。这种类型的减温器如壳管式换热器。过热蒸汽进入换热器的一侧，冷却介质进入换热器的另一侧。当过热蒸汽通过换热器，热量从过热蒸汽传递给冷却介质。

通过调节过热蒸汽的进口流量或冷却介质的流量对过热蒸汽的出口温度进行控制。而通常调节过热蒸汽的进口流量的可操作性差，因此大多数系统调节冷却介质的流量。

- 直接接触式 - 用来冷却过热蒸汽的介质直接和过热蒸汽接触。通常冷却介质和过热气体为同一种物质，但处于液态。对于蒸汽减温器通常使用水。典型的直接接触式减温装置如图15.1.3所示。

减温器工作时，将一定量的水通过减温器的混合装置加入到过热蒸汽中，当水进入减温器，它吸收过热蒸汽的热量而蒸发，这样过热蒸汽的温度随之降低。加入的水的流量控制通过测量减温器下游的蒸汽温度来完成。减温蒸汽的温度通常设定为高于饱和温度3℃。在这种布置中，减温器的蒸汽进口压力应该保持恒定。

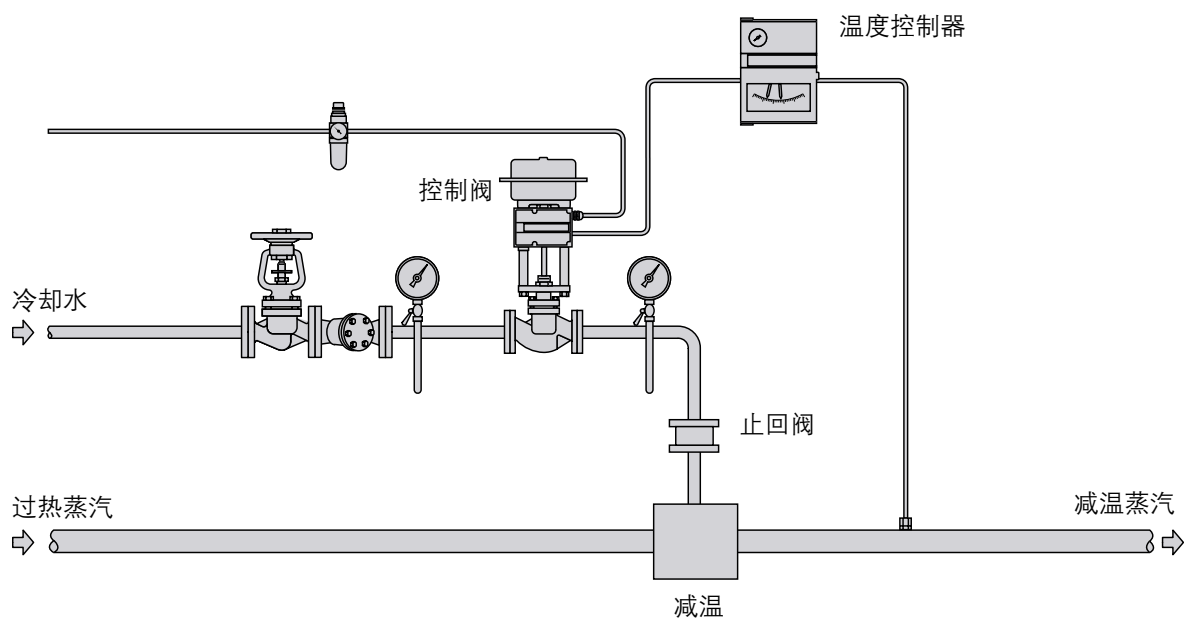


图15.1.3 典型的直接接触式减温站

减温的计算

加入的水量应足够多以使蒸汽冷却到希望达到的温度，水量不够则蒸汽冷却得不充分，如果水量太多，则产生湿蒸汽，需要使用汽水分离器加以分离。

根据能量守恒原理，使用公式15.1.1可以方便地算出需要的冷却液量：

流进制程的焓 = 流出制程的焓

$$m_{cw}h_{cw} + m_s h_s = m_s h_d + m_{cw} h_d$$
$$m_s h_s - m_s h_d = m_{cw} h_d - m_{cw} h_{cw}$$
$$m_s (h_s - h_d) = m_{cw} (h_d - h_{cw})$$
$$m_{cw} = \frac{m_s (h_s - h_d)}{(h_d - h_{cw})}$$

$$m_{cw} = \frac{m_s (h_s - h_d)}{(h_d - h_{cw})}$$

公式15.1.1

式中：

- m_{cw} = 冷却水的质量流量 (kg/h)
- m_s = 过热蒸汽的质量流量 (kg/h)
- h_s = 过热状态的焓 (kJ/kg)
- h_d = 减温后状态的焓 (kJ/kg)
- h_{cw} = 冷却水在进口状态下的焓 (kJ/kg)

实例 15.1.1

根据下表参数确定需要的冷却水流量：

蒸汽供给	压力	10 bar a
	温度	300°C
	流量	10000 kg/h
冷却水供给	压力	15 bar a
	温度	150°C
所需的蒸汽状态	压力	10 bar a
	温度	饱和温度 + 5°C

方法:

可以从蒸汽表直接或采用插值的方法得到必要的信息；表15.1.1和表15.1.2为摘自蒸汽表的相关信息。另外可以使用斯派莎克网页在线得到相关数据。

表15.1.1摘自蒸汽表 – 饱和水和蒸汽

P	Ts	vg	uf	ug	hf	hfg	hg	sf	sfg	sg
bar a	°C	m³/kg	kJ/kg		kJ/kg		kJ/(kg · K)			
9	175.4	0.2149	742	2581	743	2031	2774	2.094	4.529	6.623
10	179.9	0.1944	762	2584	763	2015	2778	2.138	4.448	6.586
11	184.1	0.1774	780	2586	781	2000	2781	2.179	4.375	6.554
12	188.0	0.1632	797	2588	798	1986	2784	2.216	4.307	6.523

表15.1.2摘自过热蒸汽表 T

		200		250		300		350		400		450		500		600	
bar a		°C															
9 (175)	v _g 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	0.3674	0.3937	0.4458							
	u _g 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	3041	3126	3298							
	h _g 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	3372	3480	3699							
	s _g 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	7.667	7.811	8.077							
10 (180)	v _g 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	0.3303	0.3540	0.4010							
	u _g 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	3040	3124	3297							
	h _g 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	3370	3476	3698							
	s _g 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	7.617	7.761	8.028							
15 (198)	v _g 1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	0.2191	0.2351	0.2667							
	u _g 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	3035	3120	3294							
	h _g 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	3364	3473	3694							
	s _g 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268	7.423	7.569	7.838							
满足公式15.1.1所需的信息为：																	
m _s = 过热蒸汽的质量流率 = 10000 kg/h																	

满足公式15.1.1所需的信息为:

$m_s =$ 过热蒸汽的质量流量 = 10000 kg/h

$h_s =$ 过热状态的焓 (10 bar a 压力, 300°C 温度, 从蒸汽表可得) = 3052 kJ/kg

$h_{cw} =$ 冷却液的焓值 = $4.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 150^\circ\text{C} = 630 \text{ kJ/kg}$

确定减温后状态的焓值 h_d :

从蒸汽表可知, 在10 bar a 压力下饱和温度(T_s) 为180°C, 因此减温后的状态的温度为:

$$T_s + 5^\circ\text{C} = 185^\circ\text{C}$$

在10 bar a 饱和温度的焓值和10 bar a 200°C 温度状态下的焓值进行内插计算:

在10 bar a, 饱和温度 T_s 状态下的焓值为 = 2778 kJ/kg

10 bar a, 200°C 温度过热蒸汽状态下的焓值为 = 2829 kJ/kg

内插计算可以得到 10 bar a 185°C 状态下的焓值:

$$\begin{aligned}
 h_d &= 2778 + (2829 \text{ kJ/kg} - 2778 \text{ kJ/kg}) \times \frac{185^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}}{200^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}} \\
 h_d &= 2778 + \frac{51 \times 5}{20} \\
 \text{因此: } h_d &= 2791 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

最后使用公式15.1.1:

$$m_{cw} = \frac{m_s(h_s - h_d)}{(h_d - h_{cw})} \quad \text{公式15.1.1}$$

$$\begin{aligned} m_{cw} &= \frac{10000 \times (3052 - 2791)}{(2791 - 630)} \\ &= 1208 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

注意减温后蒸汽的流率为:

$$10000 + 1208 \text{ kg/h} = 11208 \text{ kg/h}$$

假如需要减温后蒸汽的流率为10000kg/h, 使用简单的比例算法可以得到需要初始的过热蒸汽的流率为:

$$\begin{aligned} \frac{10000}{11208} &= \frac{m_s}{10000} \\ m_s &= 8923 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

Questions

1. Which of the following are properties of superheated steam?
 - a| The specific enthalpy of superheated steam is greater than that of saturated steam ☐
 - b| It has a greater specific volume than saturated steam ☐
 - c| It is at a higher temperature than saturated steam ☐
 - d| All of the above ☐
2. What is the main disadvantage of using superheated steam in heat exchanger applications?
 - a| The superheated steam contains less heat than saturated steam ☐
 - b| The coefficient of heat transfer is lower than that of saturated steam ☐
 - c| Superheated steam has a high dryness fraction, typically unity ☐
 - d| Superheated steam has a low Rankine efficiency ☐
3. Using steam tables (Table 15.1.1 and Table 15.1.2) determine the additional amount of energy contained in superheated steam at 9 bar a, with 74.6°C of superheat, compared with saturated steam at the same pressure.
 - a| 1% ☐
 - b| 6% ☐
 - c| 11% ☐
 - d| 24% ☐
4. What is the primary function of a desuperheater?
 - a| To reduce the pressure of the steam ☐
 - b| To increase the specific volume of the steam ☐
 - c| To condense the steam into water so that it can be disposed of ☐
 - d| To reduce the temperature of the steam ☐
5. Determine, by interpolating from steam tables, the enthalpy of desuperheated steam at 9 bar a, 8°C above saturation temperature ($T_s + 8^\circ\text{C}$).
 - a| 2 795 kJ/kg ☐
 - b| 2 806 kJ/kg ☐
 - c| 2 810 kJ/kg ☐
 - d| 2 815 kJ/kg ☐
6. A boiler in a power station produces 108 kg/s of superheated steam. Given that the steam downstream of the turbine is at 110 bar a and has a temperature of 500°C, how much cooling water (at 200°C) would be required to desuperheat the steam by 150°C?
 - a| 5 kg/s ☐
 - b| 15 kg/s ☐
 - c| 25 kg/s ☐
 - d| 30 kg/s ☐

Answers

1: d, 2: b, 3: b, 4: d, 5: a, 6: c

