

# 气液相变在盥洗室天花板滴漏分析中的应用

刘传先<sup>1</sup>, 李宇赤<sup>2</sup>

(1. 上海第二工业大学 理学院, 上海 201209; 2. 西双版纳职业技术学院, 云南 景洪 666100)

**摘要:** 通过对盥洗室天花板“不明原因”滴漏现象探究, 从气相向液相转变的宏观过程、微观机制, 形成液滴的临界半径与蒸气压及环境温度的关系, 得出天花板滴漏的真正原因是装在浴室天花板上排气风机与排气管没有直接联通. 进而指导人们在装修浴室时, 在天花板上方正确装配引气除湿装置.

**关键词:** 滴漏; 气液相变; 浴室

**中图分类号:** O552.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)05-0078-05

## Applying the Principle of the Vapor Phase Transformed into Liquid Phase to Analyze the Phenomenon that the Washroom Ceiling Drips

LIU Chuan-xian<sup>1</sup>, LI Yu-chi<sup>2</sup>

(1. Science College, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China ;

2. Xishuangbanna Vocational and Technical Institute, Jinghong, Yunnan 666100, China)

**Abstract:** Through studying the ceiling dripping phenomenon of the washroom, the macroscopical course and micro mechanism that the vapor phase transforms into the liquid phase are put forward, and the relation among critical radius and vapor pressure and environment temperature which forms the drops is analyzed. The real reason is found out, i. e. the air blower and blast pipe installed on the washroom ceiling are not linked correctly. Some guidance is given for people to correctly fit up exhaust equipment and dehumidification equipment in washrooms.

**Key words:** drip and leak; change from the vapor phase to the liquid phase; bathroom

### 0 引言

近年来,随着人们的生活水平不断提高,居住条件在不断改善,民用建筑业得到很大发展,人们对居住环境提出了较高的要求.人们购置新房后,一般都要进行装修,房屋装饰业也突飞猛进地发展.入住经过装饰的房间心情非常快乐,但也有少数住户遇到烦心之事,他们反映搬进新房子一段时间后,自家的盥洗室内的天花板向下滴水,起先认为是楼上卫生间漏水造成的,与楼上住户交涉无果,打开自家卫生间的天花板,发现顶部楼板表面无渗漏痕迹,对盥洗室天花板上方深入探查,发现浴室天花板上安装的排风机的排气口与通向室外的排气管没有直接连通.进一步分析,人们在沐浴时,产生大量水蒸气被风机抽吸到天花板顶部空间聚集,当顶部空间蒸气压大于室外大气压时蒸气从管道自然流出,大量水蒸气在天花板上方停留,在较低气温下,大量饱和水蒸气便凝结成液滴在天花板聚集,使天花板缝隙发生滴漏现象.在冬季滴漏现象更为严重;沐浴时排风机工作时间越长,滴漏现象也越严重.针对上述现象,下面应用热学中气液两相变化知识,从液滴形成的宏观过程及微观机制,具体分析了盥洗室上方天花板漏水的真正原因,指出装修施工中的不足,提出浴室风机的正确安装方法和盥洗室装修要求.

### 1 液滴形成的宏观过程

物质由气相转变成液相的过程中,温度和压强是使物体相变的两个因素<sup>[1]</sup>.蒸气凝结成液体可以有

收稿日期:2005-05-16.

第一作者简介:刘传先(1951.1~),男,副教授.主要研究方向:热传导. E-mail: cxliu@sf.sspu.cn

两种方法:一是降低蒸气的温度;二是增大蒸气的压强,另外,蒸气中存在尘埃,杂质颗粒或带电粒子等小颗粒,他们起着凝结中心的作用,称凝结核<sup>[2]</sup>.当温度一旦降低到临界温度以下,便发生液化.

沐浴时,浴室内充满水蒸气、“白色气体”(蒸气凝结成的细小水珠)的混合物,特别是冬季“白色气体”较多.当这些水蒸气和“白色气体”被抽气机强行抽吸到天花板上方的空间,上方空气温度较低,进入的水蒸气因温度降低,对应的饱和蒸气压也不断减少,使一部分未饱和的蒸气在新的温度下转变成饱和蒸气,使原来的饱和蒸气开始液化成小液滴,使“白色气体”中的小液滴聚合成较大的液滴并附着在天花板上面及墙壁上.在冬季,由于外界气温较其它季节低,同样沐浴产生的水滴就较多,因而冬季就较易发生天花板滴漏现象.沐浴时排风机工作时间越长,抽到上方空间的混合气体就越多.由于是从小口径管自然流向室外,使天花板上方蒸气压强较大并能保持较长时间,所以液化量加大,产生的水滴增加,使滴漏现象加剧.另外,如图1所示,1 m<sup>3</sup>空气中饱和蒸气量与温度有关,温度越高,水蒸气含量越多;降低的温度越多,液化产生的水滴量就越多.特别是在冬季,环境温度较低,即水蒸气降低的温度多,同样条件下水蒸气的凝结量增大.如果液滴能很好地浸润壁面,则建材将长期受潮而霉变,影响房屋寿命,如果不能很好的浸润,则会在表面形成一个个小水滴.液滴因蒸气的不断凝结以及液滴间的相互聚合而生长,成为更大的液滴,竖直壁面上液滴大到一定尺寸就会因重力作用沿壁面滚落,并扫清沿途所有的液滴,沉积在天花板上方,并向天花板的较低处流动,最终在天花板较低缝隙处出现漏水现象.

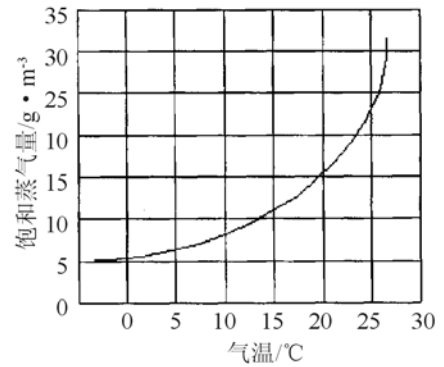


图1 1m<sup>3</sup>空气中饱和蒸气量与温度的关系  
Fig.1 Relationship between saturated steam quantity and temperature for 1m<sup>3</sup> air

## 2 液滴形成的微观机制

### 2.1 液滴形成的临界半径 $r_c$

液滴形成是一个气液二相平衡问题,当蒸气凝结成液滴时,液滴与气相的分界面实际上是一个曲面.设具有曲面的液体为 $\alpha$ 相,外面的气相为 $\beta$ 相,两相的分界面为 $\gamma$ 相,系统达到热平衡的条件是三相温度相等<sup>[2~3]</sup>,即

$$T^\alpha = T^\beta = T^\gamma \tag{1}$$

根据热力学基本关系,有

$$dU^\alpha = -p^\alpha dV^\alpha + \mu^\alpha dn^\alpha \tag{2}$$

$$dU^\beta = -p^\beta dV^\beta + \mu^\beta dn^\beta \tag{3}$$

$$dU^\gamma = \sigma dA - p^\gamma dV^\gamma + \mu^\gamma dn^\gamma \tag{4}$$

由于 $\gamma$ 相为一理想的几何面,于是 $n^\gamma = 0$ 和 $V^\gamma = 0$ .则有 $dn^\gamma = 0, dV^\gamma = 0$ .

所以(4)式变为

$$dU^\gamma = \sigma dA \tag{5}$$

其中 $\sigma$ 为表面张力系数, $dA$ 为微元面积, $U$ 为系统的自由能, $\mu$ 为化学势, $dn^\alpha, dn^\beta, dV^\alpha, dV^\beta, dA$ 分别表示在温度和总体积不变的条件下,系统发生一微小变动而引起的 $\alpha, \beta$ 相摩尔数、体积及表面相面积的微元变化.

整个系统的自由能  $dU = dU^\alpha + dU^\beta + dU^\gamma$  (6)

对于孤立系统  $V^\alpha + V^\beta = V = \text{常量}$  (7)

$$n^\alpha + n^\beta = n = \text{常量} \tag{8}$$

所以  $dV^\alpha + dV^\beta = 0$  (9)

$$dn^\alpha + dn^\beta = 0 \tag{10}$$

于是

$$dU = -p^\alpha dV^\alpha + \mu^\alpha dn^\alpha + p^\beta dV^\beta - \mu^\beta dn^\beta + \sigma dA = -(p^\alpha - p^\beta) dV^\alpha + \sigma dA + (\mu^\alpha - \mu^\beta) dn^\alpha \tag{11}$$

设液滴是球形的,则体积  $V^\alpha = \frac{4}{3}\pi r^3$ ; 表面积:  $A = 4\pi r^2$ .

$$dA = 8\pi r dr = \frac{2}{r} dV^\alpha$$

则(11)式可化简为  $dU = -(p^\alpha - p^\beta) dV^\alpha + \frac{2\sigma}{r} dV^\alpha + (\mu^\alpha - \mu^\beta) d n^\alpha$

当系统达到热平衡且总体积不变时,平衡态的自由能最小,即  $dU = 0$ . 所以

$$p^\alpha - p^\beta - \frac{2\sigma}{r} = 0 \quad \mu^\alpha - \mu^\beta = 0$$

即

$$p^\alpha = p^\beta + \frac{2\sigma}{r} \quad (12)$$

$$\mu^\alpha = \mu^\beta \quad (13)$$

(12)式为力学平衡条件,从这个条件可以看出,  $p^\alpha > p^\beta$ ,这是由于张力使液滴产生收缩趋势<sup>[4]</sup>. 液滴的压强  $p^\alpha$  大于蒸气的压强  $p^\beta$ .

(13)式表明相平衡时,气液两相的化学势相等.

假设到达天花板上方的蒸气的温度不变,我们来研究此时气液两相平衡时饱和蒸气压与形成液滴的关系.

当气液的液面是平面时,两相的压力为  $p$ ,相平衡条件为

$$\mu^\alpha(P, T) = \mu^\beta(P, T)$$

而实际的液面为曲面时,依(13)式气液两相平衡时,蒸气的压力为  $p'$ ,而液滴的压力为  $p' + \frac{2\sigma}{r}$ ,相平衡条件为

$$\mu^\alpha(p' + \frac{2\sigma}{r}, T) = \mu^\beta(p', T)$$

将液滴的化学势  $\mu^\alpha$  按压力在  $P$  点展成幂级数

$$\mu^\alpha(p' + \frac{2\sigma}{r}, T) = \mu^\alpha(P, T) + \frac{\partial \mu^\alpha}{\partial p}(p' - p + \frac{2\sigma}{r}) + \frac{\partial^2 \mu^\alpha}{\partial p^2}(p' - p + \frac{2\sigma}{r})^2 + \dots \quad (15)$$

由于液体的体积随压力改变很小,上式中  $\frac{\partial \mu^\alpha}{\partial p} = V^\alpha$ ; 即  $\frac{\partial^2 \mu^\alpha}{\partial p^2} = \frac{\partial V^\alpha}{\partial p}$  很小.

略去(15)式中二阶以上导数,只保留线性项

$$\mu^\alpha(p' + \frac{2\sigma}{r}, T) = \mu^\alpha(P, T) + V^\alpha(p' - p + \frac{2\sigma}{r}) \quad (16)$$

对于蒸气,由于其体积随压力变化很大,把  $\mu^\beta$  按压力展开幂级数只保留线性项是不行的. 在低压高温条件下通常把蒸气看作理想气体,1 mol 理想气体的内能与熵为

$$u = \int c_v dT + u_0$$

$$s = \int c_v \frac{dT}{T} + R \ln v + s_0$$

求理想气体的吉布斯函数  $\mu^\beta$ ,也叫化学势<sup>[5]</sup>.

1 mol 理想气体

$$\mu^\beta = -h - TS = \int c_p dT + h_0 + T(\int c_p \frac{dT}{T} - R \ln p + s'_0) = -T \int \frac{dT}{T^2} \int c_p dT + RT \ln p + h_0 - Ts'_0$$

令  $\varphi = \frac{h_0}{RT} - \int \frac{dT}{RT^2} \int c_p dT - \frac{s'_0}{R}$ <sup>[3]</sup>,代入上式得  $\mu^\beta = RT(\varphi + \ln p)$ ,  $\varphi$  是  $T$  的函数,即曲面

$$\mu^\beta(P', T) = RT[j(t) + \ln p']^{[3]} \quad (17)$$

平液面

$$\mu^\beta(P', T) = RT[j(T) + \ln p] \quad (18)$$

由上两式相减得

$$\mu^\beta(P', T) = \mu^\beta(P, T) + RT \ln \frac{p'}{p} \quad (19)$$

所以

$$RT \ln \frac{p'}{p} = V^\alpha (p' - p + \frac{2\sigma}{r})$$

$p' - p$  与  $\frac{2\sigma}{r}$  比较很小,可以忽略.

所以

$$\ln \frac{p'}{p} = \frac{2V^\alpha \sigma}{RT r}$$

此式表明,在某一温度下,对应一定的蒸气压有一合适的液滴半径恰好气液二项能够平衡,液滴能稳定存在.称这个半径为临界半径,用  $r_c$  表示,于是有

$$r_c = \frac{2\sigma V^\alpha}{RT \ln \frac{p'}{p}} \quad (20)$$

由此可知,水滴平衡蒸气压  $p'$  愈高,水滴平衡半径愈小.

当浴室的蒸气不断被抽到天花板上层空间,在  $T, V$  一定时,水蒸气的压强  $p'$  增大,导致形成液滴的临界半径减小,这时,汽液两相不平衡,有相变发生,且  $r > r_c$ . 从(16)与(19)式比较得到

$$\mu^\beta(P', T) > \mu^\alpha(P', T + \frac{2\sigma}{r})$$

所以气相向液相转变,蒸气形成液滴的条件具备,且液滴继续凝结增大.沐浴时,若长时间使用与排气管分离的排风机,天花板上方的蒸气压就能较长时间维持大于室外大气压的较大状态,于是大量蒸气液化并在天花板上方凝结成了许多小水滴.

## 2.2 凝结量的多少

蒸气凝结成水滴,凝结量的大小与哪些参量有关?

按气体分子运动论,气体分子在任意断面的某一方向,在单位面积和单位时间内运动分子数为

$$N = \frac{p}{(2\pi m_0 k_B T)^{\frac{1}{2}}}$$

$m_0$  为气体分子的质量,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/k}$  为玻耳兹曼常数.

则凝结量在该方向单位面积的液滴量为

$$m = m_0 N = \frac{m_0 p}{(2\pi m_0 k_B T)^{\frac{1}{2}}}$$

如果气液两相在  $T_s, p_s$  条件下处于平衡状态,那么从气相飞向液相的液膜,并凝结了的分子数与从液相向气相蒸发的分子数应正好相等.但实际上并非所有与液膜表面碰撞的分子都凝结,而只是其中的一部分凝结下来,另一部分  $\sigma_c$  反弹回气相,所以凝结量为:

$$m_F = \sigma_c m = \frac{\sigma_c m_0 p_s}{(2\pi m_0 k_B T_s)^{\frac{1}{2}}}$$

其中  $\sigma_c$  为凝结系数.

设  $M_0 = N_A m_0$ ,  $R_0 = N_A k_B$  ( $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $M_0$  为摩尔质量,  $R_0 = 8.314 \text{J} \cdot \text{mol} \cdot \text{k}$  为气体常数).

所以

$$m_F = \sigma_c \left( \frac{M_0}{2\pi R_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{p_s}{T_s^{\frac{1}{2}}} \quad [3]$$

如果不存在不凝性气体,在较高精度测量下,测出 $\sigma_c = 1$ 而水蒸气是可凝性气体,把 $\sigma_c = 1$ 代入上式,凝结量就为:

$$m_F = \left( \frac{M_0}{2\pi R_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{p_s}{T_s^{\frac{1}{2}}}$$

当 $T$ 一定时,凝结量 $m_F$ 与 $p_s$ 及 $\sqrt{M_0}$ 成正比, $p_s$ 越大,凝结量越大,由于沐浴时间长(居家人口多),浴室排气机抽气越快,并不停地抽到天花板上方,由于靠自然压差让水蒸气从小口径排气管流出较慢,致使天花板上方的水蒸气的压强不断增大,导致天花板上方水蒸气凝结量不断增大.水滴聚集到一定程度,天花板漏水现象就发生了.所以,居家人口多,沐浴时常开排气机,且沐浴时间较长.而排气机与排气管分离,天花板上方聚集大量蒸汽不断液化凝结.液滴在天花板上不断聚集,达一定程度漏水现象就发生了.

### 3 结论

通过上述分析,浴室的水蒸气转变成液滴与水蒸气自身的压力、与周围环境的温度有关.当蒸气压强 $p$ 增大,导致形成的液滴临界半径减小,蒸气容易转变成液滴.同时, $p$ 越大,水蒸气的凝结量就越大.当周围环境温度较低时,水蒸气容易形成小液滴.温差越大,凝结量也越大.特别是冬季,沐浴产生水蒸气温度与天花板上方空气温度相差较大,相同条件下凝结量会增大,浴室上方天花板滴漏现象更明显.所以在对浴室进行装璜时需注意以下几个问题.

1) 房屋的潮湿使霉菌滋生,壁虱繁殖,可诱发人类诸多过敏性疾病,房屋的潮湿导致内部建材腐朽、生锈,降低建筑物的使用寿命.若天花板漏水,不知详情的居民总认为是楼上的卫生间漏水,此事处理不当,会造成楼层上下住房间矛盾.

2) 装有天花板的浴室,浴室与天花板上方要隔开,避免大量水蒸气进入天花板上方.更不能向天花板上方排放浴室内产生的水蒸气,让其从与外界相联的小孔自然排出.这样会造成上方潮湿甚至使天花板漏水.

3) 凡装有天花板的浴室,在天花板上装排气机时,一定要将与室外相连的排气管直接装在排风机出口上,将浴室内空气排出室外,避免发生天花板渗漏.

#### 参考文献:

- [1] 章云台. 物理[M]. 山东:山东科学技术出版社,1980. 310~313.
- [2] 徐树山,王秀珍. 热力学及统计物理学[M]. 北京:北京师范大学出版社,1987. 131~136.
- [3] 田荫棠. 热物理学[M]. 西北工业大学出版社,1991. 136~140,80~82.
- [4] [美]SEARS F W. 大学物理[M]. 郭泰运译. 北京:人民教育出版,1982. 369.
- [5] 黄素逸,魏保太. 气液两相流动与传热[M]. 北京:华中理工大学出版社,1989. 139~140.