# 86．如何认识物态变化与相变潜热？

常见的同种物质的固、液、气三种状态间的变化，称为物态变化，它属于相变中的一类，即一级相变。一级相变有两个特点：①伴随着体积的变化；②要吸收或放出一定的热量（相变潜热）。根据热力学第一定律，物体吸收的相变潜热，等于对外所做的功与其内能增量之和。

固、液、气物质三种聚集态间的变化，是人类日常生活中接触最多的自然现象之一，特别是 H2O 的物态变化，更是与人类生活关系密切，因此它也是初中物理重点讲述的内容。一般用图 1 示意性地概括物质的状态变化。这里的固态，指的是结晶态，非晶体并不包括在内。

气态

固态

液态

升华

（吸热）

汽化

（吸热）

凝华

（放热）

液化

（放热）

凝固（放热）

熔化（吸热）

图 1 物态变化概述

初中物理虽然用了较大篇幅讲述关于物态变化的问题，但由于学生知识水平所限，不可能把所有问题都讲清楚，下面这几个问题需要特别说明。

## 一、过冷液体

熔化与凝固虽然是相反的过程，但并不是完全可逆的变化过程。

如图 2 所示是晶体吸热熔化过程中温度随时间变化的图像，其中 AB 段是固态，吸收热量，温度升高，BC 段是一段水平线，它对应的温度是该物质的熔点，这一过程中它从外界吸收热量但温度保持不变，直到全部熔化完毕。CD 段是液态，这一过程中因吸收热量而温度上升。

A

*O*

图 2 晶体熔化过程温度变化曲线

B

C

D

温度

熔点

时间

但该物质液态放热凝固的过程并不一定是它的逆过程，这是因为液态物质凝固过程常常需要有晶核。如图 3 所示是能结晶的液态物质开始放热最后凝固成固态过程中温度随时间变化的图像，其中 AB 段是液态，放出热量，温度下降，B 点对应的温度是它的熔点，也是凝固点。如果液体内存在少量晶核，到达它的凝固点后再继续放热，就会以晶核为中心开始结晶，那么它的温度随时间变化图像就是图中虚线所示的那段水平线 BC，即放热结晶过程温度保持不变，直到全部结晶以后再放热，温度继续下降。但如果该液体是化学纯的能结晶的液态物质，则它的温度随时间变化的图像是沿着实线画出的曲线 BDE 的，开始阶段温度将下降到凝固点以下而不结晶，这时的液体称为过冷液体，过冷液体并不是不能结晶，只是不容易结晶，当温度下降到一定程度，由于分子运动的不均匀性（涨落现象），某些分子会相互接近而自发地形成小的晶核，如果过冷液体受到小的扰动，就会大大增加自发形成晶核的可能性。有了晶核以后，液体将很快结晶，并且温度回升到它的凝固点，即从图中的 D点很快回到 E 点，而后经过 EC 一小段而完成结晶。CF 段则已经成为晶体，再放热温度会继续下降。

A

*O*

图 3 物质结晶过程温度变化曲线

B

C

D

温度

凝固点

时间

E

F

## 二、饱和气与过饱和气

### （1）饱和气

如图 4（a）所示，一支针管中有一小部分液体，封闭下端的入口，把活塞向上移动，如图 4（b）所示，液体要从液面蒸发，因此上面的空间中有它的蒸汽，经过一段时间达到动态平衡，上方空间中的蒸气压不再变化，称为饱和蒸气压，这时的气体称为饱和气。此时再上、下移动活塞，改变液面上方空间的体积，仍在达到动态平衡后（下同），里面的饱和气压强保持不变。如果保持上面空间的体积不变而改变温度，则饱和气压强将会发生改变，例如温度上升，将有更多的液体分子蒸发，从而饱和气压强增大；反之，如果温度下降，将有气体分子回到液体中，从而饱和气压强减小。

图 4 液面上方的饱和气

活塞

液体

液体

饱和气

（a）

（b）

### （2）饱和气压与沸点的关系

饱和气压随温度的升高而增大，当饱和气压增大到等于液面气体压强时，此时的温度为该液体的沸点，液体内部的小气泡不断长大，开始上升，并在上升过程继续长大，升至液面后破裂，大量蒸气进入大气中，这就是液体的沸腾。

对于液面暴露在大气中的液体而言，饱和气压等于大气压时的温度即为沸点，水在一个大气压时的沸点是 100 ℃，就是在温度为 100 ℃ 时，水的饱和气压等于 1 atm。在高原地区，由于大气压降低，水的沸点也降低，常会发生水虽已沸腾，却煮不熟饭的现象。

### （3）过饱和气

如果一个封闭的容器内充满一定的水的未饱和蒸气（没有液态的水），保持其体积不变，降低温度，未饱和气最终会变成饱和气，如果温度继续降低，并且容器中没有任何杂质，那么内部的水蒸气就会变成过饱和气。这是因为水蒸气要液化成水滴，需要有凝结核，在没有凝结核的情况下，虽然温度降低了，但仍不能液化成水，这就是过饱和气，这种情况在温度很低并且洁净的高空是常常出现的，这是因为含有丰富水蒸气的气体被带到高空，温度降至很低，原来未饱和的水蒸气早已达到饱和，但因为缺少凝结核而不能凝结成水滴或直接凝华成为冰粒，就成了过饱和气，这时的天空看起来格外透亮。如果此时有一架飞机飞过，飞机排出的尾气中含有大量灰尘等颗粒，它们都可以作为水蒸气的凝结核，从而水蒸气以它们为核心凝结成水滴或冰粒，地面上的人看到的则是一条白色的带状线条，线条显示的是飞机飞行的轨迹。

人工降雨根据的原理也是如此，当天空中出现过饱和水蒸气但缺少凝结核时，往天穹发射带有催雨剂的炮弹，炮弹内的催雨剂其实就是微小的颗粒，它们随着炮弹的爆炸而散布到大气中，过饱和的水蒸气就以它们为凝结核液化成水滴或凝华成冰粒、雪花。如果大气中没有过饱和的水蒸气，人工降雨是不能实现的。

## 三、相变潜热与热力学第一定律

物态变化过程中，即使温度保持不变，也需要吸收或放出热量，称为相变潜热。具体地说，单位质量的固态物质变为同温度的液态物质的过程中吸收的热量称为熔化热，单位质量的液态物质变为同温度的气态物质时吸收的热量称为汽化热，单位质量的固态物质变为同温度的气态物质时吸收的热量称为升华热，而相反的过程则需要放出相等的热量，这些在相变过程吸收或放出的热量，由于没有使温度发生变化，因此称为相变潜热。

根据热力学第一定律，某热力学系统吸收的热量 *Q*，与外界对它做的功 *W* 之和，等于它内能的增量 Δ*U*，即 *Q* + *W* = Δ*U*。

将上式变形，得吸收的热量 *Q*，等于它对外界做的功（− *W*）与内能的增量 Δ*U* 之和，即 *Q* = −*W* + Δ*U*。

熔化过程是物质从固态变到液态的过程，它要吸收热量（熔化热），多数物质从固态变到液态，体积是增大的，即在变化过程中，对外界做功，*W* 为负值，因此内能的增量 Δ*U* 小于它吸收的熔化热。但冰在熔化成水的过程中，体积是缩小的，即外界对它做功，*W* 为正值，因此内能的增量 Δ*U* 大于它吸收的熔化热。

一般物质从固态变化到液态，体积变化并不大，因此相变过程中由于体积变化所做的功 *W* 相比相变潜热 *Q* 来说，数值很小，在不要求特别精确的情况下，可以认为吸收的相变潜热近似等于它增加的内能。

冰是比较特殊的物质，它在熔化过程中体积变小，并且体积大约减小为原来的 1/9，相变过程中由于体积变化做功的数值还是比较大的，以下我们进行粗略的估算：

1 kg 冰的体积 *V*冰 = = m3 = 1.11×10−3 m3；

1 kg 水的体积 *V*水 = = m3 = 10−3 m3。

0 ℃ 时冰的熔化热 *Q* = 3.24×105 J/kg，即每千克 0 ℃ 的冰熔化成 0 ℃ 的水，吸热 3.24×105 J。

这一过程中外界对它做功 *W* = *p*·Δ*V* = 1.01×105×（1.11 − 1）×10−3 J = 11 J。

不难看出 *W* ≪ *Q*（二者相差 104 数量级），因此可以近似地认为 Δ*U* = *Q*。

汽化过程与此有所不同，在液态物质（或固态物质）变为气态物质的过程中，体积变化很大，因此所做的功与吸收的相变潜热相比较，一般不可以忽略，仍以水为例：1 kg 温度为 0 ℃ 的水的体积 *V*水 = 1.0×10−3 m3，全部汽化成为 0 ℃ 的水蒸气，在一个大气压的情况下，体积变为 *V*汽 = 1.24 m3，这一过程中，对外做功 *W* = *p*·Δ*V* = 1.01×105×1.24 J = 1.25×105 J。吸收的汽化热 *Q* = 2.5×106 J。二者相比较，*W* 约为 *Q* 的 1/20，虽然 *Q* 的值仍大于 *W*，但 *W* 与 *Q* 相比已经不是完全可以忽略的了。

物质在发生相变过程中，吸收了相变潜热，它的内能是增加的，但由于温度保持不变，分子平均动能没有增加，增加的只能是分子势能。对于 H2O 这种物质来说，从固态变为液态，分子势能增加主要是由氢键解体造成的，而从液态变为气态的过程，分子势能增加则主要是由分子间距离增大造成的。