

冰刀下的物理

张怀华



溜冰是一种古老的体育运动,起源于约 2000 年前北欧斯堪的纳维亚半岛的冰冻河川或湖泊。当地人把动物骨骼磨平,用皮带把其中较小的绑在脚上滑行,较大的则做成雪橇用于滑雪。现在流行的溜冰鞋是美国花式溜冰名家海恩斯于 1870 年发明的。这种不锈钢冰刀使溜冰者更能随心所欲地展现越来越复杂的花式溜冰技巧,溜冰俱乐部也如雨后春笋般出现在世界各地。

冰是一种与众不同的固体,在冰面上可以自由、快速地滑行。而穿着溜冰鞋在钢板、木板、玻璃、水泥地面等固体表面上滑行时,随着一阵刺耳的噪音,必然是狼狈不堪地摔倒在地。这是为什么呢?物理教科书中指出:冰的光滑性源自水的特性,冰块在受到挤压时熔点会降低。冰刀在冰上滑行时,冰面受到的压强很大;按照热力学原理,冰的熔点随压强的增大而降低,冰刀下冰的熔点将低于环境温度,高压

下的冰从周围环境中吸收热量而熔化,使冰刀和冰面间形成薄薄的水层,从而起到润滑作用,大大减少了冰刀与冰面间的摩擦系数,使运动员可以在冰面上轻松地高速滑行;冰刀滑过后,它又再次冻结。

事实真是这样吗?下面就来计算一下冰刀对冰面的压强所引起的熔点变化。已知标准大气压强为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、冰的密度为 $0.917 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、水的密度为 $1.000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、摩尔质量为 0.01802 kg/mol 、冰的熔化热为 $6.008 \times 10^3 \text{ J/mol}$ 、标准状况下的熔点为 273.15 K ;设滑冰运动员质量 $m = 60 \text{ kg}$ 、冰刀宽度 $d = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、冰刀与冰面的有效接触长度 $l = 0.1 \text{ m}$ 。可知两只冰刀与冰面接触面积的和为 $S = 2ld$,冰刀对冰面的压强为 $p = F/S = mg/2ld$,代入数据可得 $p = 1.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。由克拉伯龙方程,

中静止液体相似,物体在加速液体中受到的“浮力”
 $F'_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} V_{\text{排}} a$ 。

竖直方向上的受力分析 图 1 中的两小球处于杆的上方还是下方,取决于其自身的密度。竖直方向上有 $F_{\text{浮}} + mg + T \sin \theta = 0$, θ 表示球与小车达到相对静止时绳子与杆的夹角。对乒乓球有 $(4/3) \pi R^3 \rho_{\text{水}} g - (4/3) \pi R^3 \rho_{\text{球}} g = T_1 \sin \theta_1$ 。由于 $\rho_{\text{球}} < \rho_{\text{水}}$,则 $T_1 \sin \theta_1 > 0$,此球必在杆的上方,绳子的竖直方向分力向下。对铅球作同样分析,由于铅球密度 $\rho_{\text{球}} > \rho_{\text{水}}$,则此球必在杆的下方,绳子的竖直方向分力向上。

水平方向上的受力分析 绳子拉力在水平方向上的分力等于水平液体的“浮力”和惯性力的合力,所以水平方向上有 $F'_{\text{浮}} + ma + T \cos \theta = 0$ 。对乒乓球有 $(4/3) \pi R^3 \rho_{\text{水}} a + T_1 \cos \theta_1 = (4/3) \pi R^3 \rho_{\text{球}} a$ 。由于 $\rho_{\text{球}} < \rho_{\text{水}}$,则 $T_1 \cos \theta_1 < 0$,即绳子拉力在水平方向上的分力向右,至此可判断:当乒乓球相对小车静止时,正是处在图 1 所示的位置。同理可以正确理解铅球的情况,铅球在水平方向上应是三力平衡,而不是最初认为的二力平衡。

讨论

通过上述定性、定量分析可得以下结论(参考图 1):首先,小球所受的力有向下的重力、向后的惯性力、细绳的拉力、向上的浮力、向前的“浮力”。另外,与液体密度不同的小球在此实验条件下只有上述两种可能的运动状态:要么如图 1 中的乒乓球,要么如铅球。通过上述计算还可得出,当小球相对小车静止时,两种情况下绳子与杆的夹角相等 ($\theta_1 = \theta_2$, $\tan \theta_1 = \tan \theta_2 = g/a$),即夹角完全由重力加速度 g 和运动加速度 a 决定,与小球无关。那么,到底小球会处于哪种运动状态呢?这完全由小球密度与液体密度的关系决定。当小球密度小于液体密度时,其运动如图 1 中的 m_1 ;当小球密度大于液体密度时,其运动如图 1 中的 m_2 。同样,若小车内不是水而是空气,两小球换成氢气球和一般气球,也会发生与上述实验完全相同的现象。

至此就比较清楚了——本文最初提出的所谓“异常”现象,其实并非异常,而是引力场加速系统中的一种普遍现象。

(湖北省十堰市郧阳医学院数理教研室 442000)

可知冰与水固液两相的平衡方程为

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta_{\text{fus}}H_m}{T(V_{m,l} - V_{m,s})}$$

(其中 $\Delta_{\text{fus}}H_m$ 为冰的摩尔熔解焓、 $V_{m,l}$ 为水的摩尔体积、 $V_{m,s}$ 是冰的摩尔体积), 分离变量得

$$\frac{1}{\Delta_{\text{fus}}H_m} dp = \frac{1}{T(V_{m,l} - V_{m,s})} dT,$$

两边同时积分可得

$$\int_{p_0}^p \frac{1}{\Delta_{\text{fus}}H_m} dp = \int_{T_0}^T \frac{1}{T(V_{m,l} - V_{m,s})} dT,$$

化简可得

$$T = T_0 e^{\frac{(p-p_0)(V_{m,l} - V_{m,s})}{\Delta_{\text{fus}}H_m}},$$

代入数据得 $T = 272.05\text{K} = -1.10^\circ\text{C}$ 。此时, 冰的熔点为 -1.10°C 。而《中华人民共和国国家标准滑冰场所开放条件与技术要求》指出, 冰面温度不高于 -4°C 。可见, 正常情况下, 冰刀下的冰不可能因为熔点的降低而融化。显然, 物理教科书上的这种流行解释与事实不符!

既然冰不是在高压下因熔点降低而吸热熔化成水, 那么是什么原因导致冰面非常光滑呢? 其实早在 1850 年, 英国物理学家法拉第就针对这一问题提出了自己的看法: 在环境温度远低于冰的熔点时, 冰的表面就可能存在一个液态层。但是当时的技术无法证实这一观点。上世纪初开始的冰表面性质研究由于技术落后, 实验中的大部分仪器灵敏度较低, 探测不到微观的液态层厚度, 尤其是不能完全消除表面杂质的污染, 因此一直没有实质性进展。

1980 年, 新西兰物理学家毕哥莱赫利用椭偏仪测量表明: 在冰的熔点以下, 冰表面的确存在一层液体膜, 其厚度随温度的升高而增加, 并依赖于晶体的取向; -20°C 时冰棱柱面上的水膜厚度已达 10nm 。

1996 年, 美国劳伦斯伯克利实验室的化学家萨姆和物理学家胡佛利用电子束轰击冰的表面, 同时使用仪器记录了从冰表面弹回的电子的运动方向和速度。出乎意料的是, 电子撞击冰面后弹回的轨道变化不定, 沿多个方向散乱反弹开来。从实验结果看, 冰表面之所以光滑, 原因只可能有一个, 就是冰面最上层并没有真正结晶, 而是有一层薄薄的液体膜。他们还发现, 当温度降到 -22°C 以下时, 冰面的光滑性开始迅速下降。

1998 年, 德国汉堡 HASY 同步辐射实验室的一个小组在冰的表面用灵敏的 X 射线衍射, X 射线的

掠射角约为 0.1° , 取氧的消光方向, 在冰表面获得了表面附近纯氢布拉格反射, 发现在表面熔化之前, 冰棱柱面近表面的氢键网就失去长程有序, 加热到 -13°C 时, 表面熔化便开始了。实验表明, -13°C 以上的冰表面确实失去晶体结构而形成一液体膜, 越接近真正的熔点, 液体膜的厚度越大。

2002 年, 美国劳伦斯伯克利实验室的物理学家沙莫隆利用原子显微镜扫描冰的表面, 再次证明冰表面确有一层极薄的液体膜。

随着固体表面科学研究的逐步深入, 冰表面液体膜的成因已经可以初步解释。这是一种叫做表面熔化的现象, 该现象不仅限于冰, 几乎所有固体都有这种现象。液体膜厚度与固体熔点和环境温度的差的立方根成反比, 即 $d \propto 1/\sqrt[3]{(T_0 - T)/T_0}$, 式中 T_0 为固体的熔点、 T 为固体所处的环境温度、 d 为固体表面液体膜的厚度, 液体膜的厚度 d 可通过电子、中子、X 光、氦原子等绕射法测量。

由于常见固体的熔点都非常高, 常温下常见固体表面液体膜的厚度几乎为零, 不存在表面熔化现象。唯独冰的熔点和常温差距较小, 表面液体层也较厚: 0°C 时的液体膜厚度高达 40nm , -20°C 时厚 10nm 。但 -35°C 时, 液体膜厚度仅有 0.5nm 。因此在气温太低的环境中溜冰时, 由于液体膜太薄, 摩擦力大增; 在极低温度下, 具有润滑功能的液体膜则几乎消失, 冰表面的光滑特性也不复存在!

原来, 即便环境温度在 0°C 以下, 冰表面依然存在一层很薄的液体膜, 填充于冰刀和冰面之间, 使其间的摩擦系数变得非常小, 溜冰运动员就能在冰面上轻松、自由地高速滑行。

(河南省焦作市第十一中学 454000)

