

从理想气体压强到大气压强的教学讨论*

柳福提 张声遥 卢清

(宜宾学院理学部物理学院 四川 宜宾 644000)

(收稿日期:2020-08-05)

摘要:从理想气体模型出发,讨论压强产生的物理实质,推广到大气层中的空气,考虑其因重力影响使粒子数密度按势能分布,导致大气压强随高度发生变化.这一分析讨论过程能帮助学生建立清晰的物理认知,有效地培养学生的科学思维、分析解决实际问题的能力.

关键词:理想气体 压强 大气压强 空气柱 重力

在初中物理教学中,要求知道大气压强及其与人类生活的关系^[1]，“大气压强”这节内容一般是安排在压强、液体压强的内容之后,从非常直观的固体压强的经验出发,提出压强概念,接着讨论液体压强、气体压强^[2],后续还有大气压强随高度的变化、沸点与压强的关系等相关问题,这样安排有其知识逻辑结构的好处,但学生往往也容易采用类比固体与液体压强产生的机理来理解大气压强产生的原因,从而导致一些错误的认识,再加上有些习题或教科书直接采用宏观等效的处理办法,让学生认为大气压强就是由大气分子受到重力作用而产生的.在教学过程中发现,学过大学物理后对大气压强产生的物理机制并不清楚也不是个别现象.如果没有重力的作用,是不是就没有大气压强呢?根据分子动理论观点,即使没有重力作用,气体分子的热运动依然会使分子频繁地碰撞而产生压强.那大气压强的实质究竟是什么呢?它为什么会随高度发生变化呢?针对这一问题,本文从理想气体压强到大气压强进行分析讨论,对学生建立物理认知、培养科学思维、分析实际问题具有重要意义.

1 理想气体压强

1.1 理想气体模型

从分子动理论的观点看,如果分子本身的线度与分子之间的平均距离相比,可以忽略不计;只有两个分子在比较接近时才有相互作用,即认为除碰撞

的瞬间外,分子之间以及分子与容器器壁之间无相互作用;当气体被贮存在容器中时,其分子在运动过程中高度的变化并不很大,分子受的重力也可忽略;分子之间以及分子与容器器壁之间的碰撞是完全弹性的,即气体分子的动能不因碰撞而损失.我们把满足以上条件的气体称为理想气体模型^[3].

1.2 压强公式

1678年,胡克从理想气体模型出发,提出了分子与容器器壁碰撞从而产生压强的想法,1738年,伯努利推导出了理想气体的压强公式,从而阐明了理想气体压强的实质^[4].容器中气体施于器壁的压强,是大量气体分子对器壁不断碰撞的结果.装有理想气体的容器,如果整个系统处在平衡态下,则分子均匀分布,容器内、器壁上各处的压强相等.从宏观上来看,根据理想气体的物态方程 $pV = \nu RT = \frac{N}{N_A}RT = N \frac{R}{N_A}T = NkT$,可得理想气体的强为^[5]

$$p = nkT \quad (1)$$

其中 $n = \frac{N}{V}$,表示单位体积内的气体分子数, $k = \frac{R}{N_A}$ 为玻尔兹曼常量, T 为系统的热力学温度.

下面从微观上来推导理想气体的压强,从而可以理解压强产生的物理实质.取空间直角坐标系 $Oxyz$,在垂直于 x 轴的器壁上任意取一小块面积 dA ,如图1所示,假设单位体积内的分子数为 n ,则 dt 时间内有 $\sum n_i v_{ix} dt dA$ 个分子向右运动与器壁碰

* 宜宾学院教学改革项目,项目编号:JGY201827;四川省地方普通本科高校应用型示范课程《热学》课程建设项目资助.

作者简介:柳福提(1978-),男,博士,教授,主要从事物理教学与科研.

撞,每一个分子与器壁发生弹性碰撞,动量改变量为 $2mv_{ix}$,利用冲量定理可求出器壁的压强为

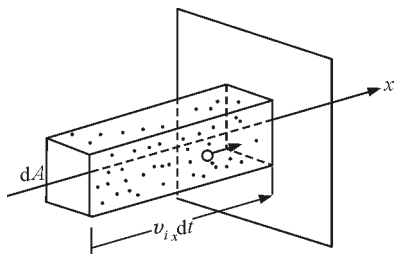


图1 理想气体分子运动示意图

$$p = \frac{dI}{dt dA} = \sum_i n_i m v_{ix}^2 = m \sum_i n_i v_{ix}^2$$

如果令

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_i n_i v_{ix}^2}{\sum_i n_i} = \frac{\sum_i n_i v_{ix}^2}{n}$$

再根据气体分子在平衡态时向各个方向运动的概率相等,即

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3 \overline{v_x^2}$$

就可以计算器壁的压强为

$$p = \frac{1}{3} nm \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon} \quad (2)$$

其中 $\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$ 表示气体分子平均动能的平均值^[3].

比较式(1)与式(2)可得

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT \quad (3)$$

该式表明气体分子的平均平动动能只与温度有关,直接解释了高中物理教材中“温度是物质分子热运动的平均平动动能的标志”的意义^[6],它从微观的角度阐明了温度的实质.从式(2)可以看出,对于处在平衡状态的理想气体的压强,是由单位体积的粒子数及分子运动的剧烈程度两个因素来决定,如果系统粒子数与温度均匀分布,系统内压强也就处处相等.

2 大气压强

地球周围充满大气,假设温度均匀分布,无规则的热运动会使气体分子均匀分布于它们所能达到的空间,而大气分子同时由于受到重力的作用,会使气体分子向地球表面聚集,在这两种作用达到平衡时,气体分子在地球周围的分布就是非均匀的,也会导致大气压强会随着高度发生变化.

2.1 大气分子按高度的分布

根据麦克斯韦速度分布律,当系统在重力场中处于平衡态时,其坐标介于区间 $x \rightarrow x + dx, y \rightarrow y + dy, z \rightarrow z + dz$ 内,同时速度介于 $v_x \rightarrow v_x + dv_x, v_y \rightarrow v_y + dv_y, v_z \rightarrow v_z + dv_z$ 内的分子数为

$$dN = n_0 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\epsilon_k + \epsilon_p}{kT}} dv_x dv_y dv_z dx dy dz \quad (4)$$

式中 n_0 表示在势能 ϵ_p 为零处单位体积内具有各种速度的分子总数,这个结论称为玻尔兹曼分布律.如果取上式对所有可能的速度积分,考虑到麦克斯韦分布函数所应满足的归一化条件

$$\iiint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\epsilon_k}{kT}} dv_x dv_y dv_z = 1$$

则式(4)可写为

$$dN' = n_0 e^{-\frac{\epsilon_p}{kT}} dx dy dz$$

即单位体积内的分子数为

$$n = n_0 e^{-\frac{\epsilon_p}{kT}} = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad (5)$$

即分子按势能的分布律,说明在重力场中,由于分子受重力作用,在地球表面($z=0$)处的分子数密度最大用 n_0 表示,分子数密度 n 随着高度 z 的增加按指数规律减小,当 z 为无穷大时, n 趋近于零,具体变化关系如图2所示.

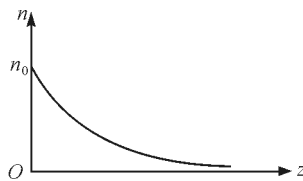


图2 重力场中粒子数密度随高度的变化关系

2.2 大气压强随高度的变化

把式(5)代入式(1)很容易确定大气压强随高度的变化规律,即

$$p = n_0 kT e^{-\frac{mgz}{kT}} = p_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad (6)$$

该式称为等温气压公式, p_0 为高度 $z=0$ 处的压强,随着高度的增加,大气压减小.当 $z \rightarrow \infty$ 时,因为粒子数密度 n 趋于零,所以 $p \rightarrow 0$.利用式(6)可以通过测量温度(假设地球大气等温),测出飞机起飞前、后机舱中的压强,就可以计算出飞机距离地面的高度,在生活生产中有广泛应用.

2.3 大气压强与重力的关系

如图3所示,设底面积为 S 的圆柱,在高度为 z 处取一个高为 dz 的圆柱体积元,由于 dz 很小,近似

认为这个体积内的气体分子均匀分布,粒子数密度用 n 表示,下表面处的压强为 p ,上表面处的压强为 $p + dp$,根据平衡受力分析可得 $pS = nmgSdz + (p + dp)S$,化简为

$$dp = -\rho g dz \quad (7)$$

其中 $\rho = nm$,上式实际上也可以由式(6)两边微分得出,结果一样.

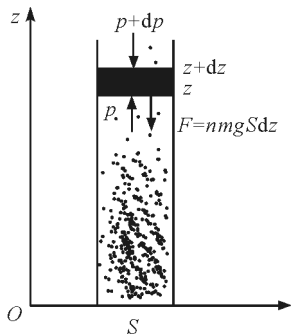


图3 大气层中体积元的受力分析图

设大气层的厚度为 z ,当 $z \rightarrow \infty$,由于粒子数密度 $n \rightarrow 0$,因此 $p \rightarrow 0$,对式(7)两边积分

$$\int_{p_0}^0 dp = \int_0^{\infty} (-\rho g) dz$$

可得 $p_0 = g \int_0^{\infty} \rho dz$,两边乘以圆柱的横截面积 S 可得:

$$p_0 S = g \int_0^{\infty} \rho S dz = g \int_0^{\infty} \rho dV = G, \text{ 所以}$$

$$p_0 = \frac{G}{S} \quad (8)$$

式中的 p_0 就是 $z=0$ 的大气压强, G 为 $z=0$ 处至大气层顶部的气柱的重力大小.所以式(8)表明地球表面处大气压强的大小就等于单位横截面积上整个空气柱的重力,因此就出现“大气压是由于大气层受到重力作用而产生的”这一等效说法,这仅仅表明大气压强与相应空气柱的重力的数值关系.如估算大气层气体的总重量,就可以根据式(8)得 $G = p_0 S = p_0 4\pi R^2$,只要知道地球半径 R 和地表大气压强 p_0 的大小就可近似求出大气层气体的总重量^[7].

从宏观的角度看,大气压强的大小与其单位面积上整个空气柱的重力相等,但不能因此就认为大气压强是由空气重力引起的.如果对于初中阶段不涉及大气压强产生的微观机理,这种等效是一种迫不得已的变通说法,可以让学生感知大气压强的存在,但不利于理解大气压强产生的原因,从而形成正确的物理观念.

3 讨论

在高度变化不是很大的情况下,我们讨论的大气分子由于势能变化很小,认为系统中的分子近似均匀分布,大气可以近似为理想气体;当高度变化比较大,明显导致分子分布不均匀时,我们必须根据粒子按势能分布律考虑粒子数密度随高度变化,从而导致压强变化的情况.弄清楚大气压强的物理实质,就很容易理解大气压的一些相关问题.

问题一:如果将一个开口的容器置于空气中,假设此时大气压为一个标准大气压(101.325 kPa),如果将瓶口密封,这时瓶内空气压强怎么变化^[4]?按照大气压强与空气柱重力的关系,密封之后上面的空气柱重力变小,那瓶内空气压强是否会变小呢?开口时瓶内空气压强的大小可以等效为瓶口以上单位面积上直至大气层顶端空气柱的重力,而当瓶口密封后,考虑容器本身的高度不是很大,分子势能变化可以忽略,可以把容器里面的气体近似看作理想气体,由于粒子数密度、温度与密封前相比较没有发生改变,因此压强不会发生变化,仍为一个标准大气压.

问题二:关于地面附近的大气压强,我们可以说“这个压强是由地面附近那些做无规则运动的空气分子对每平方米地面的碰撞造成的.”也可以说“这个压强与地面上方单位体积内气体分子数有关,又与地面附近的温度有关.”还可以说“这个压强就是地面每平方米面积的上方整个大气柱的压力,它等于该气柱的重力.”^[8]其实第一种说法就是根据压强的定义阐述了大气压强产生的微观物理机制;而第二种说法是把大气的局部看作理想气体,根据压强 $p = nkT$ 的正确表述;第三种说法是大气压强与空气重力关系的表述,在数值上是相等的,因此很容易看出3种说法都是正确的.

4 小结

本文分析了理想气体压强和大气压强的关系,清楚地知道大气压强跟理想气体压强一样,都是由于气体分子无规则的热运动发生碰撞而产生的($p = \frac{1}{3}nm\overline{v^2}$),而大气压强随高度的增加而减小是气体分子受到重力作用粒子分布不均匀的原因造成的

新课标下黔西南地区高中物理演示实验教学现状调查及分析

刘梓祿 王笑君

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2020-08-03)

摘要:在新课改改革的宏观背景下,结合黔西南州少数民族地区高中物理实验教学的实际,对黔西南州少数民族地区高中物理实验教学现状进行调查,发现存在忽视学生实际操作、学生自主对实验现象的归纳与总结能力不足以及实验器材短缺等问题。

关键词:高中物理 演示实验 黔西南州

随着高中教学改革的不断深化,新课标对高中物理演示实验教学提出了较高的要求,教师要积极利用各种器材,积极创新实验方式,尽可能多地开发出可视性强、证据性强、能引起学生浓厚兴趣的演示实验^[1,2]。但是由于生源素质受地域差异、文化差异和教育资源分布差异等因素的影响,少数民族地区学校物理演示实验的教学现状存在着诸多问题^[3~7]。笔者在贵州省黔西南州某高中支教期间发现,在演示实验课堂上学生学习存在着许多不足之处,本文通过对贵州省黔西南州某高中物理演示实验现状的调查及分析,发现存在的问题,并对此提出相应的对策。

1 物理演示实验教学现状调查分析

笔者选取了贵州省黔西南州某高中部分学生针对高中物理演示实验教学现状进行了问卷调查,以

($p = nkT$, $n = n_0 e^{-\frac{mgs}{kT}}$),且推导了某处大气压强的大小在数值上等于该处单位面积上整个气柱的重力($p = \frac{G}{S}$)。在分析过程中我们为了抓住问题的主要因素,忽略了温度的变化,实际上随着高度的增加温度也要发生变化,那是由于空气的传热性导致的,所以这个模型也是个理想模型,只能求出大气压的近似值,但对物理机制的把握、科学思维的培养具有重要意义。

参考文献

- 1 中华人民共和国教育部. 义务教育物理课程标准(2011年版)[M]. 北京:北京师范大学出版社,2012. 17
- 2 课程教材研究所. 义务教育教科书物理(八年级下册)

此分析得出贵州省黔西南州少数民族地区高中物理演示实验真实的情况,进而结合现状提出一些有针对性的改进建议 and 对策,使演示实验教学在少数民族地区高中物理教学中更好地发挥其作用。本次问卷共发放190份,回收187份,其中有效184份,有效率98.4%。问卷共19题,分别从学生对演示实验的态度(3题)、引导学生自主探索(5题)、学生在课堂上的表现(5题)、学校实验器材的使用(3题)和教师自制演示教具(3题)等方面进行调查。

1.1 学生对演示实验的态度

如图1所示,在参与调查的学生中,有94.5%的学生认为教师在课堂上演示物理实验重要,同时有72.7%的学生喜欢物理演示实验,并认为演示实验能激起自己的学习兴趣。不难看出,对在课堂上物理演示实验的重要性,绝大部分的学生都是认同的,

[M]. 北京:人民教育出版社,2012. 29 ~ 39

- 3 李椿,章立源,钱尚武. 热学(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社,2015. 37
- 4 刘蔚然. 有关大气压强的几个问题的讨论[J]. 物理教师, 2005,26(5):27 ~ 28
- 5 胡雪杨,史旭光,赵立博,等. 利用理想气体状态方程测量大气压强[J]. 物理教学,2018,40(3):37 ~ 38
- 6 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心. 普通高中课程标准实验教科书物理·必修3-3[M]. 北京:人民教育出版社,2010. 28 ~ 29
- 7 张军. 大气压强与大气的重力有关吗[J]. 中学物理教学参考,2013,42(6):28 ~ 29
- 8 周敏. 大气压强的两种解释的等效性的探讨[J]. 中学物理教学参考,2012,41(12):39 ~ 40