

# “压缩波”与 IYPT 赛题“真空火箭筒”

崔卫国

(南京市金陵中学 江苏 南京 210005)

(收稿日期:2017-08-17)

**摘要:**2017年的 IYPT 赛题“真空火箭筒”是高中学生可以充分参与的探究实验,其取材容易,装置简单,实验现象很明显,但实验的精确测量和相关理论的建立却颇费周折,最终在理论上引入“压缩波”模型后该赛题的理论探究有了成功突破.

**关键词:**真空火箭筒 类比 压缩波

“真空火箭筒”是一个什么装置呢?现展示一下 2017 年 IYPT 赛题第 17 题.

Vacuum Bazooka: A “vacuum bazooka” can be built with a simple plastic pipe, a light projectile, and a vacuum cleaner. Build such a device and maximise the muzzle velocity.

(译文)真空火箭筒:用塑料管、吸尘器以及一个发射物,就能制作一个“火箭筒”了.请制作一个这样的火箭筒,并使得出射速度最大化.

实验装置的构建如图 1 所示.

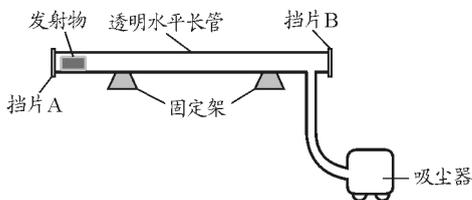


图 1 真空火箭筒装置示意图

**实验现象:**在透明的水平长管左端放入直径略小于管内直径的发射物,用挡片 A 封住长管左端,挡片 B 封住长管右端,启动吸尘器.稳定吸气一段时间后,突然撤去挡片 A,发射物在管内加速,至长管右端以很高速度撞击挡片 B 后射出.

发射物在管内被加速的最大速度跟哪些因素有关呢?

我们可以初步推测:发射物的质量  $m$  越小,出射速度  $u$  越大;发射物的横截面积  $S'$  越接近管内直径  $S$ ,出射速度  $u$  越大;发射物加速距离  $x$  越大,出射速度  $u$  越大;吸尘器的功率越大,出射速度  $u$  越大;

等等.根据军用炮弹形状的联想,发射物外形的不同应该对出射速度  $u$  有影响.

经过多次理论建模的尝试,我们放弃了用静态气体状态方程介入研究的想法,考虑到发射物前方的管内气体受到发射物的冲击,此时“压缩波”产生的压强变化对发射物的速度大小会有显著影响,能否合理地将“压缩波”知识纳入到“真空火箭筒”的理论模型中呢?

## 1 类比:管内发射物相当于隧道中的列车

图 1 中的发射物在水平管中的运动行为让我们联想到列车进入隧道的情景.

《压缩波惯性作用对其波形演变的影响》一文给出了这样的介绍.当高速列车进入隧道时,隧道入口附近的气体因受列车强烈的挤压,产生压缩波并以声速沿隧道传播.当压缩波在隧道内传播时,由于隧道长度远大于隧道水力直径(水力学专有名词.

例如直径为  $d$  的圆管,当充满液流时,面积  $A = \frac{\pi d^2}{4}$ ,

$x = \pi d$ ,故水力半径  $R = \frac{A}{x} = \frac{d}{4}$ ).压缩波在隧道内的传播可用一维可压缩非定常流动模型,建立其守恒方程后可以解得一维简单正向压缩波的压力增量和其诱导的速度关系式为

$$dp = \rho_0 c_0 du \quad (1)$$

其中,  $p$  为发射物前方气体对它的压强,  $u$  为发射物的运动速度,  $\rho_0$  为初始压缩波的空气密度,  $c_0$  为声音

在初始压缩波中的速度.

## 2 发射物的运动规律

待吸尘器稳定吸气一段时间后突然撤去挡片A,对发射物受到的各物理量做如下界定:水平管的横截面积为 $S$ (测量值为 $6.30\text{ cm}^2$ ),发射物的横截面积设为 $S'$ ;由于发射物与水平管之间有较小的空隙,撤去挡片A后发射物的左侧空气压强可以视为大气压强且恒定为 $p_0$ ;发射物右侧气体在稳定抽气状态下初始压强设为 $p'$ ,任意时刻压强可以表示为 $p$ ;又因摩擦力相对气体压力差的影响较小,此处忽略了摩擦对发射物速度的影响.

现对式(1)积分,并结合初始条件 $u=0$ 时 $p=p'$ ,有

$$p = p' + \rho_0 c_0 u \quad (2)$$

对发射物应用牛顿第二定律

$$(p_0 - p) S' = \frac{mdu}{dt}$$

即

$$(p_0 - p' - \rho_0 c_0 u) S' = \frac{mu du}{dx} \quad (3)$$

则发射物向前运动的距离 $x$ 与获得的速度 $u$ 满足

$$p_0 - p' - \rho_0 c_0 u -$$

$$(p_0 - p') \ln(p_0 - p' - \rho_0 c_0 u) + C = \frac{\rho_0^2 c_0^2 S' x}{m}$$

取 $x=0$ 时 $u=0$ ,有

$$x = \frac{m(p_0 - p')}{\rho_0^2 c_0^2 S'} \ln \frac{p_0 - p'}{p_0 - p' - \rho_0 c_0 u} - \frac{mu}{\rho_0 c_0 S'} \quad (4)$$

温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\rho_0 = 1.18\text{ kg/m}^3$ , $c_0 = 346\text{ m/s}$ , $p_0 = 100\text{ kPa}$ ,吸尘器此时能使得发射物右侧有稳定的压强 $p' = 79\text{ kPa}$ ,发射物的截面积

$$S' = 5.50\text{ cm}^2$$

代入式(4)并化简后得到

$$x = 221.5m \ln \frac{21\ 000}{21\ 000 - 415.2u} - \frac{mu}{0.2284} \quad (5)$$

根据式(5),发射物获得的速度 $u$ 与位移 $x$ 关系图像如图2所示.可以看出,加速距离 $x$ 越大,速度 $u$ 越大,最终发射物的速度会逼近一个最大值.图2中

粗实线和细实线分别反映了质量不同的发射物在管中发射的速度 $u$ 随加速距离 $x$ 的关系,可知质量越小的物体在同等加速距离下获得的速度越大.

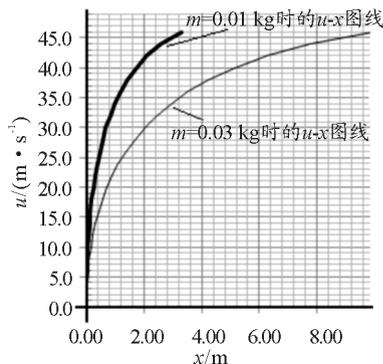


图2 发射物获得的速度 $u$ 与位移 $x$ 关系图像

## 3 实验与理论的对比

若发射物的质量保持 $m=0.01\text{ kg}$ 不变,式(5)变为

$$x = 2.215 \ln \frac{21\ 000}{21\ 000 - 415.2u} - \frac{u}{22.84} \quad (6)$$

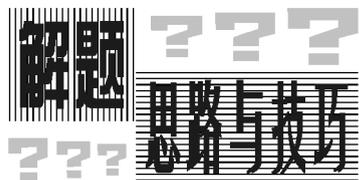
利用图1装置进行实验,发射物的质量保持 $m=0.01\text{ kg}$ 不变,加速距离 $x$ 和获得的速度 $u$ 的测量值如表1所示.

表1  $m=0.01\text{ kg}$ 时 $x$ 与 $u$ 的测量值

序数	1	2	3	4	5	6
$x/\text{m}$	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0	15.72	20.04	25.17	27.00	29.95
序数	7	8	9	10	11	
$x/\text{m}$	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	
$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	31.16	32.63	33.70	35.91	37.65	

注:本表数据由南京市金陵中学丁洋老师提供.

在实际实验的测量中,由于管的长度不能做得足够长,发射物被加速的最大距离 $x=2.00\text{ m}$ ,对应最大速度的测量值为 $37.65\text{ m/s}$ .根据式(6),此理论值的最大速度为 $41.50\text{ m/s}$ ,该实际的测量值已经比较接近理论值了.测量数据对应的实验线和理论线如图3所示,可以发现实验线与理论线贴近,但实验线总是在理论线的下方.这说明上面建立的理论模型具有较高的合理性,但两根线没有重合说明理论中还有些物理量未曾考虑全面.



## 类比分析 把握规律

——谈 2017 年高考全国卷 III 第 25 题

邵鹏飞 王 锋

(阜阳市第三中学 安徽 阜阳 236000)

(收稿日期:2017-08-24)

**摘要:**板块模型是高考的一种重要考点,以两个高考题为案例总结出这类问题的解题规律,然后在应用到 2017 年全国卷 III 的压轴题中,希望帮助学生形成科学有效的解题习惯.

**关键词:**板块模型 临界 假设法  $v-t$  图像

近几年的高考物理卷中,无论是各省市的自主命题还是全国卷的题目,板块模型都是重要的考点,在 2017 年高考全国卷 III 中就再次以压轴题的形式出现.这类题目涉及受力分析、运动学(含相对运动)、对象选择、过程分析、临界问题、假设法、图像处理,学生处理起来难度不小.现在,我们通过 2014 年高考江苏卷第 8 题和 2013 年高考全国卷 II 第 25 题来寻找这类题目的解题规律并在 2017 年高考全国卷 III 的第 25 题上加以应用.

### 1 分析案例 总结规律

**案例 1**(2014 年高考江苏卷第 8 题):如图 1 所示,  $A$  和  $B$  两物块的质量分别为  $2m$  和  $m$ , 静止叠放在水平地面上.  $A, B$  间的动摩擦因数为  $\mu$ ,  $B$  与地面间的动摩擦因数为  $\frac{\mu}{2}$ . 最大静摩擦力等于滑动摩擦力,重力加速度为  $g$ . 现对  $A$  施加一水平拉力  $F$ , 则( )

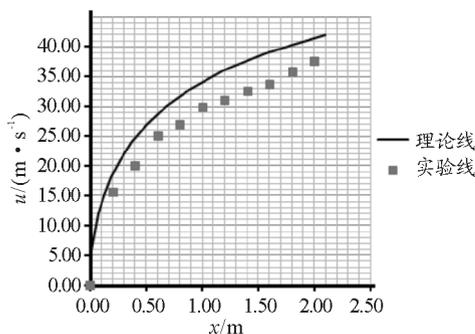


图 3 测量数据对应的理论线与实验线

不能完全恒定为  $p_0$ , 可能受到稀疏波的影响; 水平管对发射物的摩擦力的影响; 发射物与管之间的微小空气间隙对运动的影响; 发射物前方的空气因压缩做功消耗物体动能的影响; 发射物速度增大到一定程度后吸尘器吸气快慢对气体压强的影响; 甚至发射物的外形不同对速度的大小也有不同的影响等等. 尽管发射物前后的气压差是影响它运动速度大小的最主要因素, 但这些未考虑的因素也是造成图 3 中实验线与理论线有一定差距的原因所在.

总之, 在精确实验数据面前, 借助类比列车进入隧道的现象将压缩波引入真空火箭筒的理论建模, 是可行的, 是合理的.

### 参考文献

- 1 王宏林, 雷波, 毕海权. 压缩波惯性作用对其波形演变的影响. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 118 ~ 123

### 4 可能影响最大速度的其他因素

根据上面的简化模型, 影响发射物速度大小的因素有发射物的质量  $m$ , 在管中加速的距离  $x$ , 外界大气压强  $p_0$ , 因抽气功率影响的发射物前方的气体压强  $p$ .

尚未考虑的因素可能还有: 发射物后方的气体