

基于双氧水催化分解的微型化学火箭设计与动力分析

惠上宸¹ 惠心妍²

1. 四川省成都市第七中学(林荫校区), 中国·四川 成都 610041

2. 四川省成都市第七中学初中学校(天环校区), 中国·四川 成都 610041

【摘要】本文提出一种利用双氧水(H_2O_2)催化分解反应驱动的微型化学火箭教学装置。通过构建由废弃塑料瓶、 MnO_2 、催化剂与缓冲气垫组成的模块化系统,实现化学反应推进力的可视化观测。基于理想气体状态方程计算理论推力与加速度,结合瓶塞摩擦阻力修正后获得实际加速度 $56m/s^2$,且经过实验有效验证了化学能与机械能转换规律。本装置兼具低成本、安全性高与教学适配性强等特点,为中学化学-物理跨学科实践提供创新案例。

【关键词】双氧水催化; 化学能; 教学实验设计; 气体动力学

1 引言

化学推进剂的发展历史可以追溯到火药时代,随着技术的进步,现代火箭推进剂已经发展到液氢和液氧等高效、无污染的燃料,这些燃料不仅提供了强大的推力,还减少了环境污染。传统的实验装置使用酒精和白糖自制火箭燃料是一项极具风险性的活动。火箭燃料需要特定的化学组成和精确的制作工艺,以确保其安全性和有效性。在没有专业知识和专业设备的情况下,尝试自制火箭燃料可能会导致严重的安全事故。双氧水催化分解反应是一个绿色化学过程,双氧水催化分解反应的产物主要是水和氧气,不会产生有害的副产品具有反应条件温和、操作简单可控和无二次污染等优点。

2 现有火箭实验模型现状

实验正悄然融入小初高的教学中,通过实验,学生不仅能够亲身体验化学、物理原理的实际应用,还能在动手操作的过程中锻炼分析问题和解决问题的能力。^[1]现有简易火箭模型,其动力系统主要为以下四类:

(1) 水火箭(气压推进),在塑料瓶中注入1/3水后给瓶体充气,至高压后释放推理导致火箭升空。(2) 固体燃料模型火箭,将熔化的糖燃料(65%硝酸钾 + 35%蔗糖,需熔融混合)倒入纸管,冷却后钻孔插入引线,黏土封堵底部作为喷嘴,安装尾翼通过燃烧固体燃料产生高温气体喷射推进。此实验涉及明火和高温,需在开阔场地并遵守当地法规。(3) 电子点火静电火箭,利用静电力或电热膨胀推动轻质箭体,箔卷成圆锥形箭体,连接铜丝作为电极,

搭建平行铜丝轨道,通电后产生静电力弹射火箭。(4) 化学反应小火箭(酸碱/气体膨胀),利用化学反应快速产生气体,通过压力喷射推进,主要有小苏打+醋火箭,反应产生 CO_2 气体后压力爆发,推动火箭起飞;实验性应用乙醇/液氧或过氧化氢分解推进(如北航学生团队开发的5N级推力发动机)。

其中以动力系统采用化学反应推力的小火箭简单易操作性受到青睐,但因会产生热膨胀等原因,存在一定的安全隐患。液氧、液氢、液甲烷等低温介质作推进剂的液体火箭发动机被称作低温液体火箭发动机(简称“低温火箭发动机”);低温火箭发动机具有低温、高能、无毒、环保等特点^[2]。其中,氢氧火箭发动机的性能远高于常规液体火箭发动机,比冲最高可达460秒以上,能够显著提高运载器的运载系数^[3],被各航天大国广泛应用于航天运载器的动力系统。

基于以上研究,在低成本、易操作、安全、可靠、环保等方面综合考虑,特设计使用常规塑料瓶、双氧水、高锰酸钾的简易火箭模型结构,通过结构研究、推进剂浓度、体积、安全气压等进行推力计算,得出最安全简易的小火箭模型,更方便进行实验和推广。

3 系统设计与理论模型

3.1 装置所需材料

该实验装置所需材料为: 1. 555L塑料瓶×1, 480ml塑料瓶×4, 降落缓冲气垫×1, 瓶塞×4(或蜡烛、电工胶带、气球自制), 100ml的1mol/L H_2O_2 溶液×4, MnO_2 粉末

0.25g×4, 胶水等。

3.2 装置结构

小火箭模型分为反应室、控制平衡系统、压力释放装置等部分, 其中4×480ml塑料瓶为反应室, 作为火箭模型的推进系统, 通过安全的化学反应产生气体, 提供强大推动; 1.555L塑料瓶为控制系统, 延时催化剂MnO₂, 缓冲气垫作为压力释放装置, 为火箭模型的安全降落提供安全保障, 实验装置结构图如图1所示。

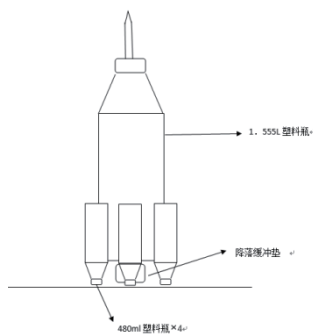


图1 火箭装置结构图

反应室的安全设计。四个反应室的设计, 构成一个小的反应系统, 可以达到更加稳定结构且每个反应室的燃料分散, 每一个其产生的气体均在安全范围, 四个整体的推力可更好的保证其推力。延时反应的设计, 因双氧水和高锰酸钾产生氧气的时间是比较温和的, 一般在3-5分钟内, 在安全瓶塞上用纸保住的高锰酸钾, 更加延迟了两者的反应时间。既保证了安全又起到了很好的反应效果。使用瓶盖的话有可能导致因其他膨胀而导致的瓶体炸裂的风险, 因此可使用瓶塞, 也可根据情况自制瓶塞。

其简易瓶塞设计如下: 先将蜡烛(或横截面略小于瓶口的柱状物)截出一小段, 然后成梯度缠上一圈气球或用电工胶带, 使用电工胶带固定。然后将气球套上制作的瓶口塞子。

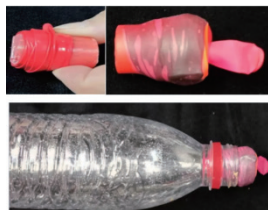


图2 瓶塞结构制作步骤及结构图

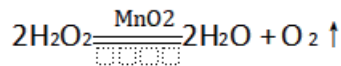
缓冲气垫的安全设计, 缓冲气垫大小可参考瓶口的大小进行制作, 不超过瓶口, 使用胶水与瓶体斜口粘合即可。

在降落时可增加接触面积从而减少装置损坏。

3.3 化学推进动力学模型

双氧水分解反应物质量计算:

$$M(H_2O_2) = n(H_2O_2) \cdot M(H_2O_2) = 1 \text{ mol/L} \times 0.4 \text{ L} \times 34 \text{ g/mol} = 13.6 \text{ g}$$



火箭总重: $0.607 \text{ kg} \times 9.8 \text{ N/kg} \approx 6 \text{ N}$

理想气体推力理论值: 大气压在95KPa, 温度20°C时,
 $V_m \approx 25.65 \text{ L/mol}$

$$n(\text{瓶内空气}) = \frac{4V(\text{空气})}{V_m} = \frac{4 \times 480 \text{ ml}}{25.65 \text{ L/mol}} = 0.06 \text{ mol}$$

生成物中(2 H₂O)与O₂中氧原子个数比为1:1

$$N(\text{瓶内空体}) = N(O_2) + N(\text{瓶内空气}) = 0.2 \text{ mol} + 0.06 \text{ mol} = 0.26 \text{ mol}$$

根据理想气体状态方程 $PV = NRT$, 将 $N=0.065 \text{ mol}$, $V \approx 0.4 \text{ L}$, $T \approx 293$, $R \approx 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{k)}$ 代入计算得:

$$P = \frac{nRT}{V} \approx 395660 \text{ Pa} \approx 396 \text{ KPa}$$

瓶口半径为0.01m,

$$F_{\text{向上}} = PS = 396 \times 10^3 \text{ Pa} \times 4 \times \pi (0.01)^2 \text{ m}^2 \approx 1990 \text{ N}$$

$F = ma$

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{1984 \text{ N}}{0.607 \text{ kg}} \approx 3269 \text{ m/s}^2$$

- 摩擦修正后实际推力:

$$F_{\text{瓶塞}} \approx 10 \text{ N}$$

$$F_{\text{向上}}' \approx 4 \times 10 \text{ N} = 40 \text{ N}$$

$$F_{\text{合}}' = 40 \text{ N} - 6 \text{ N} = 34 \text{ N}$$

$$A' = \frac{f_{\text{合}}'}{m} = \frac{34 \text{ N}}{0.607 \text{ kg}} \approx 56 \text{ m/s}^2$$

故 $a = 56 \text{ m/s}^2$

4 实验方法与结果

4.1 操作流程

1) 按结构图, 组装四个瓶子, 制作四个瓶塞, 一个缓冲垫;

2) 燃料加注: 四个反应瓶中分别装入100ml, 1mol/L浓度的H₂O₂溶液;

3) 催化剂装载: 预置MnO₂粉末瓶塞口纸袋内, 并塞上瓶塞;

4) 放置触发: 快速放于平整安全位置, 马上离开;

5) 实验记录: 静等3-5分钟后记录高度和飞行时间结果。

4.2 操作注意事项

制作瓶塞时需和瓶口保持大小一致, 不容易导致液体泄漏及压力泄漏; 拧紧瓶塞后需快速放置在平整安全位置, 因双氧水遇到高锰酸钾后就会发生反应, 待充分接触会释放大量的其他, 压强增加, 手拿会产生危险。

4.3 性能测试

根据多次实验验证, 基于 H_2O_2 与 MnO_2 反应时间大约为3-5min, 置放于安全位置后等待火箭发射, 飞行高度大致在4-5m, 飞行时间在1-2s, 会出现一定的水平偏移, 整体实验还是非常成功的, 具体验证数据如下表:

表1 小火箭飞行高度记录表

试验次数	飞行高度(m)	滞空时间(s)	水平偏移(m)
1	4.2	1.3	0.8
2	4.7	1.6	1.1
3	4.5	1.5	0.7
4	5.0	1.9	0.5
5	4.8	1.6	0.6

5 讨论与优化

瓶体形变导致容积偏差(实测 $V=0.39 \pm 0.02L$), 环境温度对反应速率影响($\Delta T=5^\circ C$ 引起 $\Delta t=18s$), 各种参数的误差均为导致实验结果不一致。若在中间空瓶中加上一些传感芯片或是控制模块, 且会使小火箭从“简单手工制作”向“智能化、数据驱动”转型, 更进一步使小火箭模型更好的达到实验数据收集及数理分析, 进一步推动了航天科

普的平民化。此实验方案可作为“气体定律验证”、“牛顿第三定律”等知识点的探究实验。

6 伦理声明

实验过程在专业教师监督下完成, 且过程中使用防护眼镜等安全装备。关于环境保护: Mn 会使土壤酸化, 在大气中会催化 SO_2 转为 H_2SO_4 或其它硫酸盐, 甚至导致人吸入中毒。水中的 Mn 会影响水体的色、味及酸性。因此, 在实验中加一个塑料袋用于废弃物收集。

7 结论

本研究成功构建了一种安全可靠的双氧水动力教学火箭系统, 通过理论建模与实验验证揭示了化学推进系统的能量转换规律。基于理想气体状态方程计算理论推力($F=1990N$)与加速度($a=3269m/s^2$), 结合瓶塞摩擦阻力修正后获得实际加速度 $56m/s^2$ 。实验结果表明: 在 H_2O_2 溶液浓度为 $1mol/L$ 、总反应液体积 $400ml$ 条件下, 火箭可实现4-5m垂直飞行高度, 有效验证了化学能与机械能转换规律。本装置兼具低成本($<20元$)、安全性高(压力 $<400kPa$)与教学适配性强等特点, 为中学化学-物理跨学科实践提供创新案例。未来可通过反应室材料优化进一步提升性能。

参考文献:

- [1] 林德墅. 高中物理实验教学中培养学生科学思维的探究. 高考, 2015(13) 12-14.
- [2] 王建国. 过氧化氢分解动力学研究[J]. 化学教育, 2018, 39(9): 62-65.
- [3] 郑大勇, 颜勇, 胡俊. 高性能高可靠氢氧发动机方案探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(6): 10.