

浮空器内氢气阻抑燃安全使用分析

张凡

(中国特种飞行器研究所 湖北 荆门 448035)

摘要: 为解决浮空器囊体所使用的浮升气体资源紧张及价格昂贵等问题, 通过浮空器的使用特点和浮升气体的相关特性, 针对浮空器内囊体填充常用的氢气开展抑燃爆安全使用研究, 分析性质相对稳定的惰性气体与氢气混合气的爆炸极限和浮升效率来判断氢气在浮空器领域安全使用的可行性。结果表明, 氦气与氢气混合气的浮升效率最高, 二氧化碳对氢气的抑爆效果较好, 氦气与氢气、二氧化碳与氢气均处于临界混合比时, 混合气的爆炸极限宽度相近, 但对氢气的爆炸极限的改善情况不同。

关键词: 氦气; 浮空器; 阻抑燃; 安全性; 可行性

0 引言

浮空器属于航空飞行器的一种, 浮空器内部囊体都填充有轻于空气的浮升气体, 依靠浮力升空, 可以说浮升气体是浮空器最关键的因素。氦气目前是国内外浮空器领域使用最多且相对最为安全的浮升气体, 但其资源稀缺, 尤其是国内储量极少, 基本依赖进口且价格昂贵^[1]。

针对浮空器领域浮升气体的补给等需求, 开展低成本浮升气体的安全使用及自主可控技术的研究变得尤为重要。尽管氢气拥有一定的危险性, 但考虑到其拥有氦气无法比拟的价格优势及储量, 若能采取措施对氢气的燃烧规律及爆炸特性进行有效控制, 则氢气作为浮空器填充气体还是具有相当广阔的应用前景, 尤其是对于充气量达到数千甚至上万立方米的商用飞艇和军用大型系留气球来说, 价格及资源优势则更加明显。以氢气作为研究目标, 分析性质相对稳定的惰性气体与氢气的混合气的爆炸极限和浮升效率, 论证浮空器用氢气安全使用的可行性。

1 氢气的爆炸极限

国内外对于氢气的爆炸极限研究主要分为试验测量和理论分析两种。一个是研究氧化剂中不可燃料的最小和最大浓度。另一个是研究混合物达到能够燃烧时的最小和最大燃料浓度。而在过去的许多研究中, 爆炸极限的定义为当燃料混合物无法维持火焰传播时, 对应燃料的最小和最大浓度。

为了确定可燃物的燃烧极限, 目前已采用了不同结构的燃烧室进行试验研究并制定了不同的标准。欧洲

标准 DIN 51649 和 EN 1839 是在高度为 300mm、宽度为 60mm 和 80mm 的较短圆管内测定爆炸极限。美国 ASTM E681 标准主要采用容量为 5L 和 4L 的两种燃烧室, 该标准是迄今为止国内外研究者进行爆炸极限试验参考最多的标准。与 DIN 51649 和 EN 1839 相比, 会显示出较宽的爆炸极限范围, 并且当爆炸极限测试在透明的试验容器中进行时, 试验者可直接通过视觉来进行观察和判断^[2]。

对于燃烧室, 检测温度超过某一阈值是检测火焰传播最方便的方法。另外, 火焰传播的方向也会影响气体混合物的爆炸极限。对于氢气而言, 不同火焰传播方向上的爆炸极限试验结果见表 1。

表 1 不同火焰传播方向上氢气的爆炸极限

燃烧试验容器及规格/mm	爆炸下限	爆炸上限	火焰传播方向
$D=7.5, L=150$	4.15%	75%	火焰向上传播
$D=2.5, L=150$	4.25%	73%	火焰向上传播
$D=7.5, L=150$	6.5%	74.5%	火焰水平传播
$D=2.5, L=150$	7.15%	72.3%	火焰水平传播
$D=5.0, L=150$	9%	74%	火焰向下传播
$D=5.0, L=65$	8.9%	71.2%	火焰向下传播

由表 1 知, 对于氢气的爆炸下限, 火焰向下传播 > 火焰水平传播 > 火焰向上传播; 对于爆炸上限, 火焰向上传播 > 火焰水平传播 > 火焰向下传播。

通常可燃物的爆炸极限是在静止的均匀混合物中测定的。目前已有相关文献表明适当的湍流态的混合物不会明显影响可燃物的爆炸极限, 而高度湍流流态的混合物会明显缩小爆炸极限范围^[3]。对于浮空器而言,

氢气的研究基本是基于静止的均匀混合态,参考国际常用的美国 ASTM E681 标准试验方法。

2 氢气的抑燃机理

氢气的密度为 0.0899kg/m^3 , 为氦气密度 (0.1786kg/m^3) 的 $1/2$ 。由表 1 可知氢气的爆炸极限为 4% (爆炸下限) 和 75% (爆炸上限)。为了保证氢气在浮空器中使用的安全性, 向氢气中掺入某种气体性质相对稳定的惰性气体来改变氢气的燃烧爆炸极限。其原理是当可燃气体中混合着惰性气体时, 混合气体的爆炸上、下限会逐步相互靠近, 即缩小爆炸极限范围。当混合气体的含量增加到某一值时, 混合气体的爆炸上下限值相等。一旦达到或是超过此临界值时, 可燃混合气体将变成安全的不可燃气体。

对于氢气来说, 由于可混合的惰性气体及阻燃剂种类相对较多, 但结合浮空器的实际使用情况, 选择密度相对较小、储量大且常温下性质较稳定的氦气、氮气和二氧化碳作为混合对象。

3 惰性气体对氢气抑燃爆的分析

3.1 氢气与氦气混合气

氢气与氦气的混合气爆炸试验结果见图 1, 当氦气与氢气之比小于 3 时, $\text{He}+\text{H}_2$ 混合物爆炸上限相较于纯氢气的爆炸上限略有增大, 而爆炸下限则随着氦气与氢气之比的增大而线性增大; 当氦气与氢气之比处于 $3 \sim 7.5$ 之间时, $\text{He}+\text{H}_2$ 混合物爆炸上限几乎没有发生变化, 但仍略高于氢气的爆炸上限, 爆炸下限仍随着氦气与氢气之比的增大而增大。当氦气与氢气之比处于 $7.5 \sim 8.7$ 之间时, $\text{He}+\text{H}_2$ 混合物爆炸上限下降迅速, 而爆炸下限上升也较快。

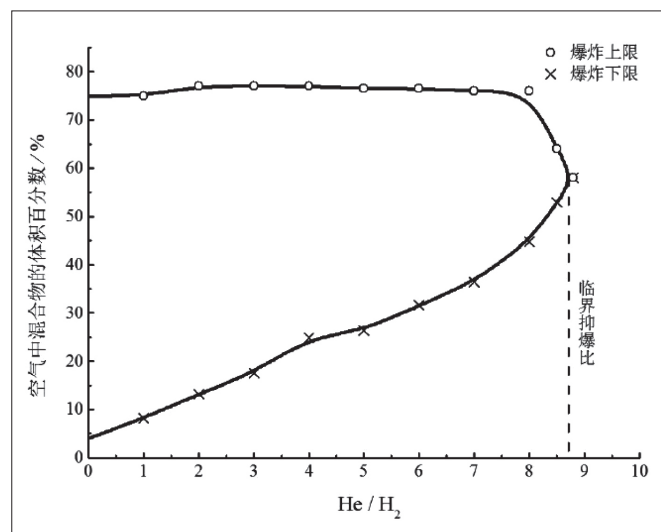


图 1 $\text{He}+\text{H}_2$ 混合气体的爆炸极限

当氦气与氢气之比超过或等于 8.7 时, 爆炸上、下限几乎相等, 即混合气在这种情况下不可能发生爆炸。此外, 当氦气与氢气之比小于 7.5 时, 氦气对氢气的爆炸下限的抑制作用明显, 但对其爆炸上限抑制作用不明显。但一旦氦气与氢气之比高于 7.5 时, 氦气对氢气的爆炸极限 (爆炸上限和爆炸下限) 的抑制作用更加强烈。

3.2 氢气与氮气混合气

氮气与氢气的混合气爆炸试验结果见图 2, N_2+H_2 混合物爆炸上限, 随着 N_2+H_2 之比的增大相较于纯氢气的爆炸上限略有增大; 而爆炸下限则随着氮气与氢气之比的增大而呈线性增大。当氮气与氢气之比等于或超过 16.4 时, 爆炸上、下限几乎相等, 即混合气在这种情况下不可能发生爆炸。随着氮气与氢气的混合比的增加, 氮气对氢气的爆炸下限的抑制作用明显, 但对其爆炸上限的抑制作用很不明显。

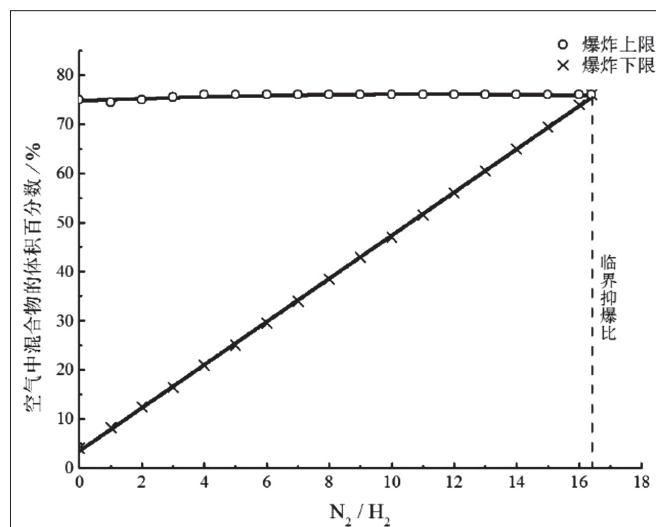


图 2 $\text{N}_2 + \text{H}_2$ 混合气体的爆炸极限

3.3 氢气与二氧化碳混合气

二氧化碳与氢气的混合气爆炸试验结果见图 3, 当加入二氧化碳时, $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ 混合气体爆炸下限逐渐增大, 同时其爆炸上限逐渐减小。当二氧化碳与氢气之比小于 3 时, CO_2+H_2 混合物爆炸上限相较于氢气的爆炸上限降低, 且下降幅度明显; 而爆炸下限则随着二氧化碳与氢气之比的增大而线性增大; 当氦气与氢气之比处于 $3 \sim 10.2$ 之间时, CO_2+H_2 混合物爆炸上限一直减小, 但下降幅度没之前大, 爆炸下限一直在上升, 速率略高于上一阶段上升的速度。

3.4 惰性气体对氢气抑燃爆的对比分析

由图 4 不难看出, 三种惰性气体与氢气的混合气中, 二氧化碳对氢气的抑爆效果最好。在一定体积的氢气中加入相同体积的不同惰性气体时, 各种惰性气体对氢

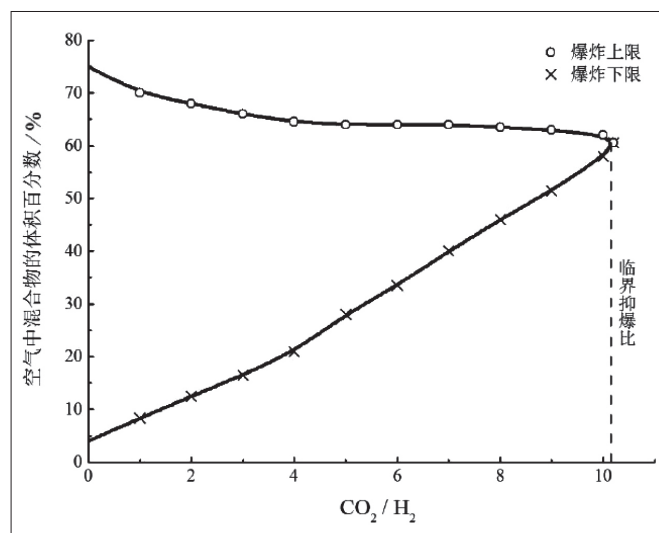
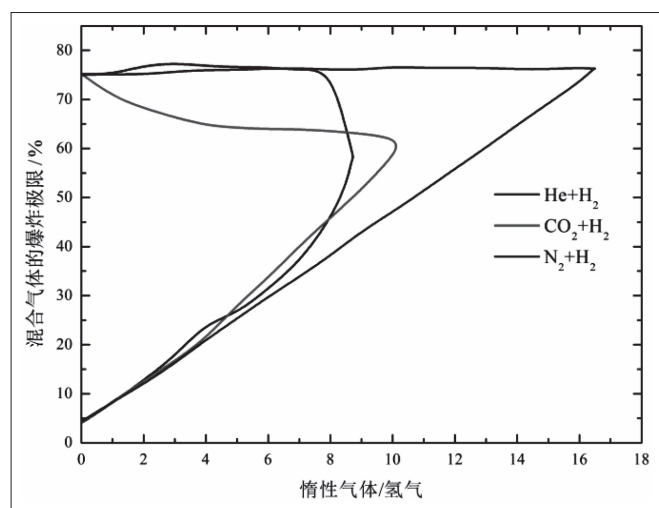
图3 CO_2+H_2 混合气体的爆炸极限

图4 三种惰性气体与氢气混合气的爆炸极限

气浓度的稀释作用相同,而具有更大比热容的惰性气体可以吸收更多氢气被点燃后释放的热量,从而减少了周围未燃氢气所能得到的热量,导致其更难达到着火点,也就是说该惰性气体的冷却作用更强,所以通常来说比热容更大的惰性气体对氢气的抑爆效果更好。

相比于氮气,二氧化碳不仅可以直接参与基元反应 $\text{OH}+\text{CO}=\text{H}+\text{CO}_2$,还可以作为第三体参与 $\text{H}+\text{OH}+\text{M}=\text{H}_2\text{O}+\text{M}$ 等反应,以此消耗自由基生成稳态的中间产物导致链式反应终止,进而导致二氧化碳对氢气爆炸极限的抑制效果明显高于氮气。二氧化碳还可以更有效地使 HO_2 粒子失活,从而阻止 HO_2 基团分解成为 OH 和 O 等活化中心。而氮气的比热容小于氢气,但其对氢气的抑爆效果却好于氮气。这主要是因为氮气的导热系数远大于氢气,且与氢气的导热系数非常接近,在氮气与氢气的比值较大的时候,氢气在可燃混合物中的比例往往已经很小,少量氢气被点

燃后的燃烧热在高浓度氢气中会迅速地向四周、壁面扩散,使周围未燃的氢气很难达到着火点,这也就使得氢气与氮气的混合物更快地到达临界抑爆比。

此外,由于氢气密度小于氮气密度,所以,不管两者的混合比为多少,其浮升效率均会增加;而氮气和二氧化碳的密度均大于氢气密度,其浮升效率会因为氮气或二氧化碳的加入而减小。结合浮空器的实际使用情况,考虑混合气的浮升效率损失不超过 30%,计算出氮气与氢气混合气的临界混合比为 0.2721,二氧化碳与氢气混合气的临界混合比为 0.5334。由图 4 可知,当混合气的混合比处于临界混合比时,由于氮气或二氧化碳的加入,氢气爆炸下限有所改善,但爆炸上限仅二氧化碳加入时有所下降。当氮气与氢气、二氧化碳与氢气均处于临界混合比时,三种惰性气体与氢气的混合气的爆炸极限见表 2。

表2 惰性气体与氢气混合气的爆炸极限

混合气体	混合气爆炸下限	混合气爆炸上限	爆炸极限宽度
$\text{He}+\text{H}_2$	4.6% ↑	75.1%	70.5% ↓
N_2+H_2	5.2% ↑	75.1%	69.9% ↓
CO_2+H_2	4.7% ↑	73.8% ↓	69.1% ↓

4 结语

通过三种惰性气体与氢气在不同组分比下对氢气爆炸极限的抑制情况和相对于同体积氮气的浮升效率的研究发现:

(1) 在三种惰性气体中,二氧化碳对氢气的抑燃爆效果最好;

(2) 相同气体混合比下,氮气的浮升效率最高,氮气次之,二氧化碳最低;

(3) 当氮气与氢气、二氧化碳与氢气均处于临界混合比时,三种惰性气体分别与氢气混合后的爆炸极限宽度相近。

参考文献:

- [1] 古彪. 世界特种飞行器及应用 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2016: 5-8.
- [2] 沈晓波, 章雪凝, 刘海峰. 高压氢气泄漏相关安全问题研究与进展 [J]. 化工学报, 2021, 72 (03): 1217-1229.
- [3] 邓坚. 大型干式安全壳严重事故条件下氢气控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

作者简介: 张凡 (1990.06-), 男, 汉族, 湖北荆门人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 航空特种设备。