

H₂/O₂爆燃波在冷源真空筒内的传播

兰晓华, 胡春明, 郑 洲, 刘显坤

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要:若反应堆冷中子源真空筒热交换器中 H₂ 冷却剂泄漏与空气混合时, H₂ 与 O₂ 发生爆炸, 其冲击波将对真空筒完整性构成威胁。采用全尺寸模拟件进行实验, 研究爆燃波对真空筒的冲击程度。比较在不同当量比和初压 H₂/O₂ 混合物, 在模拟件内点火引发爆燃, 采用压力、火焰测量和数据采集系统, 测量各测点的火焰及压力时间曲线。结果表明, 低初压和化学当量比两种工况产生的冲击波和火焰均可通过真空筒点火端经狭缝进入到另一端, 并形成强爆燃。对富油(即 H₂ 过剩)工况, 管道只产生低速燃烧, 无冲击波特征。

关键词:冷中子源; 爆燃; 冲击波; 真空筒

中图分类号: TL99; O381

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)12-1522-05

H₂/O₂ Deflagration Propagating in Vacuum Containment of Cold Neutron Source

LAN Xiao-hua, HU Chun-ming, ZHENG Zhou, LIU Xian-kun

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: If liquid H₂ inside the heat exchanger leaks to the vacuum containment of the cold neutron source, the shock wave from explosion of H₂/O₂ mixture may threaten the vacuum containment in a reactor. In order to know how the shock wave goes, a full-scaled experimental mockup device was made. H₂/O₂ mixture was filled into the mockup with different equivalent ratios and initial pressure. A spark igniter was located at the end of the mockup. The transient pressure and flame sensors and data acquisition system were used to record the pressure and flame histories at definite positions. The result shows that the deflagration can occur inside the vacuum containment for both low initial pressure and equivalent ratios cases. The shock wave and the flame will travel to another side of the vacuum containment by the way of the slot for both cases. What's more, there only occurs low speed burning without shock wave if excess H₂ is in the mixture.

Key words: cold neutron source; deflagrate; shock wave; vacuum containment

利用冷中子进行中子活化分析或中子散射 实验对物质进行鉴别及结构判断是一项重要的

材料分析技术,在国外已有近 30 年的发展^[1-4]。反应堆冷中子源(简称冷源,CNS)是将反应堆内的热中子进一步慢化为能量在 0.21~5 meV 之间的冷中子的一套系统,主要包括中子慢化剂氢循环系统以及用于冷却氢的氦制冷系统。

氢是一种很好的中子慢化剂,但它易燃易爆的化学特性决定了在使用时首先要确保设备的安全性。冷源氢回路主体部分安装在位于重水箱支撑管内真空筒中。真空筒一方面确保低温条件下氢回路与环境之间绝热,另一方面起到隔离氢回路与反应堆堆芯的作用^[5]。为保证氢回路自身的安全以及在可能发生事故时不会威胁到堆芯的安全,就必须保证真空筒有足够的安全性。本文集中在对现象的认识上,首先获得冲击波和火焰传播方面的宏观数据,包括速度以及超压值的测量。

真空筒的内部结构较为复杂,其尺寸大小及构造由制冷系统的设计要求决定,可采用全尺寸冷源真空筒模拟件内气体爆燃实验来预测真空筒内氢爆过程对真空筒产生的冲击波压力^[6]。实验采用 H₂/O₂ 的混合气体进行测试,考察 H₂ 在纯 O₂ 环境下发生爆燃时对真空筒产生的影响,得到的结果与采用 H₂/空气混合气

体进行实验的结果有所区别,而对真空筒安全性的分析却更趋于保守。实验采用 H₂/O₂ 混合气体在不同参数配比时真空筒内发生爆燃过程中对火焰光信号及压力变化进行测量和分析,其结果将为真空筒的结构及尺寸设计提供依据。

1 实验装置及方法

真空筒内部构造复杂,为使问题简化而不失其本质特性,实验模拟件仅保留了对实验研究有重要影响的主要结构和尺寸,去掉了内层气体循环管线部分的精细结构。实验管道(即内层管线外壁与真空筒内壁之间的空间)在尺寸上与实际的真空筒保持一致。真空筒原件为高强度铝镁合金,而实验中采用了 45# 钢材料。用两根等截面钢管代替原真空筒内的热虹吸回路,分别与慢化剂室和真空筒端面法兰连接。慢化剂室主体部分为圆柱,两端盖与侧面采用平滑弧形过渡。安装完成后,慢化剂室外壁和真空筒内壁间存在 2.5 mm 狭缝。图 1 为标示出点火点和传感器位置的实验模拟件示意图,包括压力传感器 PCB1~PCB4(对应测点为 T1~T4)、火焰传感器(PD1~PD4)及点火位置(A)。

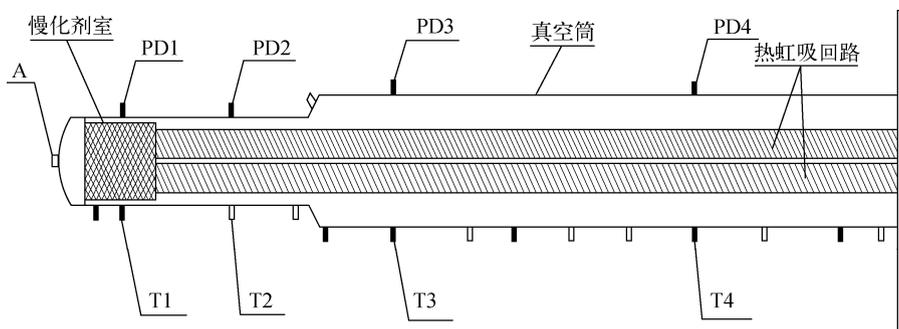


图 1 标示出点火点和传感器位置的模拟件示意图

Fig. 1 Scheme of mockup including igniters and sensors

图 2 为实验系统示意图。实验系统包括: 1) 点火系统,采用高压火花放电点火; 2) 充配气系统,由气体预混罐、配气柱、真空泵、水银真空压力计组成; 3) 压力测量和数据采集系统; 4) 火焰测量系统,由 PCB 压电传感器、火焰传感器、电荷放大器和 PCI220612 数据采集卡组成,记录各测点压力信号。T1~T4 为压力测

试点,PD1~PD4 为火焰光信号测试点,与 T1~T4 在同一截面上。A 为点火位置,点火能量为 27 kV,压力和火焰测点与 A 点轴向距离分别为 170、525、904、2 124 mm。

将 H₂ 和 O₂ 按比例充入预混罐,其当量比和初压列于表 1。实验时,将图 1 模拟件中的内构件与真空筒内壁形成的实验管道抽真空至

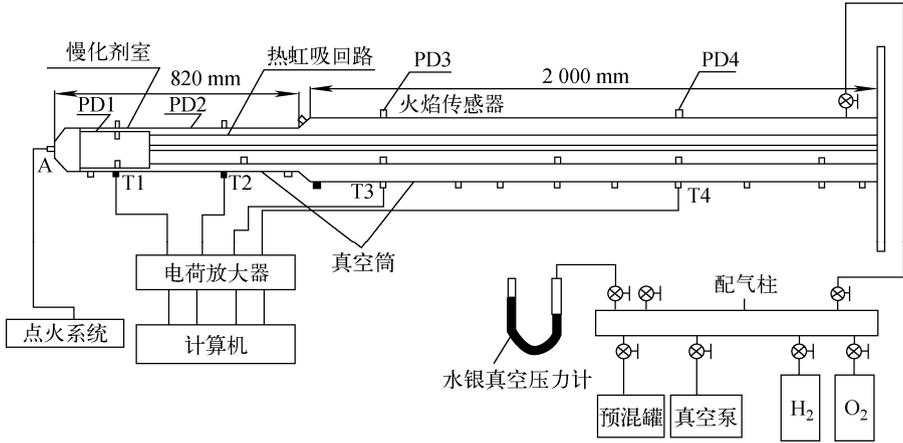


图2 实验系统示意图

Fig. 2 Scheme of experimental mockup system

1×10^{-4} Pa, 再充入一定初压的预混气体。在 A 点点火后, 火焰在实验管道内传播, 利用压力传感器和火焰传感器测量, 数据采集系统记录获得压力变化值的时间曲线和火焰光信号变化值的时间曲线。采样频率设置为 1 MHz (对爆燃, 不能设置太高)、采样长度为 50 ms、负延时为 10 ms。采用指定点的压力信号触发。应合理设置电平, 以避免误触发数据采集系统。

表 1 实验工况
Table 1 Experimental case

实验工况	初压/MPa	当量比
1	0.101	1
2	0.066 7	1
3	0.101	1.59

2 结果与讨论

2.1 初压对 H₂/O₂ 爆燃传播的影响

分析对比工况 1 及工况 2。

图 3 示出了工况 1 及工况 2 的火焰光信号时间曲线对比(两工况时间基准值不相同, 图中以工况 1 的点火时间点为 0 开始标注, 工况 2 则进行了平移, 相同测点处火焰光信号曲线的起跳先后不表明管道内火焰面到达先后, 而同一工况不同测点处的起跳先后表明火焰面到达先后)。

由图 3 可知, 在 PD1、PD2 两测点处, 由于初压较低, 工况 2 的化学反应速率明显低于工况 1, 表现为火焰自发辐射光信号强度低。工

况 1 的火焰面能够顺利通过狭缝, 而工况 2 在狭缝处出现了火焰熄灭, 但随后出现重点火。在 PD3、PD4 两测点处, 仅从火焰光信号时间曲线难以辨明两工况燃烧状况。

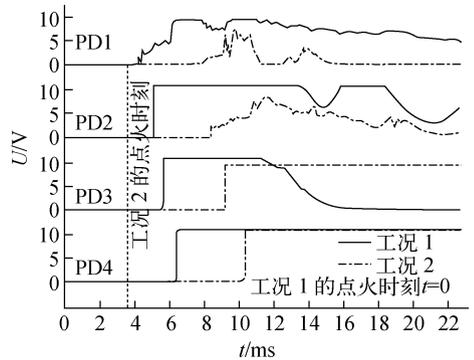


图3 工况 1 和工况 2 火焰光信号时间曲线

Fig. 3 Flame light signal-time curves of case 1 and 2

图 4 示出了工况 1 下真空筒内壁各压力传感器(PCB1~PCB4)对应的压力时间曲线(点火时间从 0 点开始, 纵坐标压力非实测值, 仅压力变化值有意义, 下同)。各压力时间曲线均体现了明显的冲击波(不连续峰在介质中的传播, 此峰导致介质的压力、温度等物理性质发生跳跃式的改变)特征。图中第 1 道冲击波起跳顺序为: PCB1→PCB2→PCB3→PCB4, 第 2 道冲击波起跳顺序为 PCB4→PCB3→PCB2→PCB1。本实验采用 H₂/O₂ 预混气体, 与 H₂/空气预混气相比, 其化学反应速率提高, 相同条件下对应的化学反应放热速率也提高, 因此, 对冲击

击波激励作用增大^[7]。PCB1 至 PCB3 各压力曲线均出现较明显的平台,这表明,冲击波和化学反应区是分离的,冲击波形状近似为平面型冲击波,否则,具有稀疏效应的火焰面会导致压力随时间下降,且不会出现平台。PCB1 曲线出现两次明显的压力起跳,表明 H_2/O_2 爆燃冲击波可通过狭缝接触到右端面法兰板并反射。PCB4 的压力和火焰位置几乎重合,火焰的稀疏作用导致压力很快下降,未出现压力平台,该点两道冲击波时间间隔约 0.6 ms。假设两道冲击波可视为平面波,当冲击波在真空筒右端面法兰反射后,形成的第 2 道冲击波在燃烧后的产物气体中继续向左传播,从而导致爆燃产物压力升高。对比可看出,在 4 个监测点中,PCB2 处的压力增加值最大,约为 2 350 kPa。

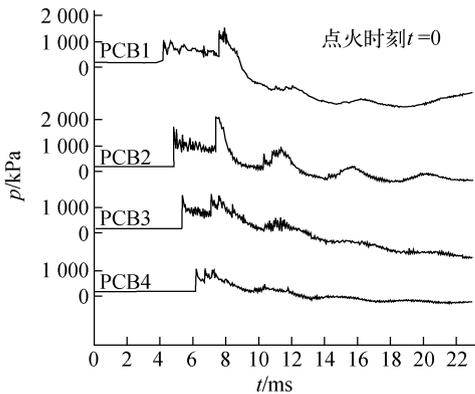


图 4 工况 1 压力时间曲线

Fig. 4 Pressure-time curves of case 1

工况 2 对应的压力时间曲线示于图 5。在初始阶段,PCB1 曲线上有两道连续的冲击波,这是由于在慢化剂室和管道顶部空间,低速率燃烧形成的冲击波多次反射所引起的。PCB2、PCB3、PCB4 压力曲线出现了两道反射冲击波,但 PCB3 反射冲击波因曲线振荡严重而显得不是很清晰,PCB2 点两道反射冲击波引起的超压值还较高。PCB1 压力曲线表明该反射冲击波进入管道狭缝段几乎被耗散,因从压力曲线已基本看不出冲击波特征。图上显示的压力时间曲线低幅高频振荡较为严重,尤其是 PCB1、PCB2、PCB3 测点。原因可能是传播速度较低的火焰热效应引起的。与图 4(工况 1)对比,图 5(工况 2)各曲线超压值要比图 4 的对应值小,

最大超压值仍在 PCB2 出现,约为 2 000 kPa。由于工况 2 气体混合物的初压值比工况 1 低,各组元浓度也相对低,从而爆燃和化学反应速率就越低,对应的能量释放速率和受其激励的冲击波超压值也就越低。

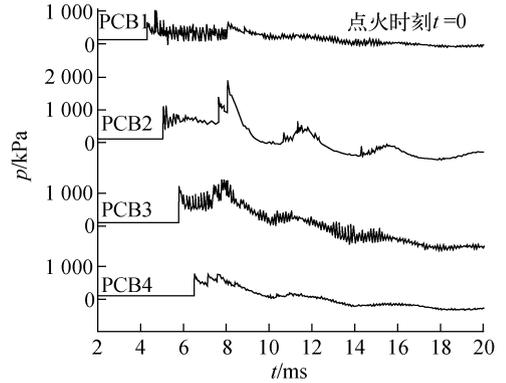


图 5 工况 2 压力时间曲线

Fig. 5 Pressure-time curves of case 2

2.2 当量比对 H_2/O_2 爆燃传播现象的影响

工况 3 对应的当量比为 1.59,相当于富油(即 H_2 相对 O_2 的化学摩尔比过剩)预混气体情况。图 6 为管道内壁各测点压力时间曲线。图 6 表明,点火后,与工况 1 不同,各测点压力时间曲线未显示明显的冲击波特征,也未出现明显的反射冲击波。预混气富油,氧化剂不足造成燃烧区的化学反应速率下降。PCB1 曲线无明显的压力起跳点,即未出现冲击波,但此测点压力值发生变化,表明管道最左端空间的燃烧产物通过了狭窄部分,并点燃慢化剂室下游的

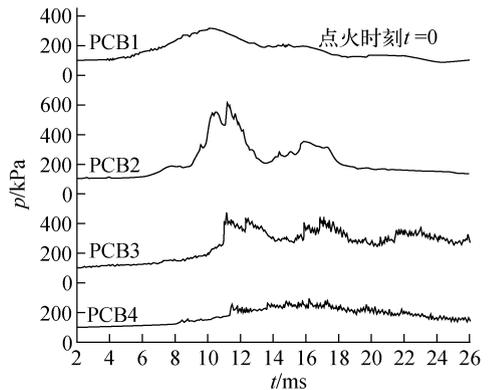


图 6 工况 3 压力时间曲线

Fig. 6 Pressure-time curves of case 3

预混气。PCB3 测点处压力值突然上升,表明此处发生了“局部爆炸”。自 PCB2 到 PCB4,燃烧导致的压力上升是逐渐下降的,测定的最大超压值仅为 500 kPa,远小于前两种工况。

3 结论

低初压和化学计量比(化学反应摩尔比)两种工况产生的冲击波和火焰均可通过实验管道较窄段并到达右端空间较宽处,高温燃气可实现重点火,并形成强爆燃。压力时间曲线产生明显的第 1 道冲击波和从右端面反射回的第 2 道冲击波。该条件下,狭窄的管道空间对冲击波和火焰均无约束作用。由于几何壁面的因素,管道狭窄段的火焰燃烧速率较低,但右端空间较宽处火焰燃烧速率明显增大。对富油工况,管道只能产生低速燃烧,无冲击波产生。

本文条件下,真空筒内壁的最大冲击波超压值为 2 350 kPa,下一步再根据此超压值进行数值模拟,即可计算得出真空筒各主应力及 von Mises 等效应力值,从而可提供比 H₂/空气更为保守的有效真空筒材料选择设计方案。

参考文献:

- [1] 丁大钊,赵志祥. 中子物理学[M]. 北京:原子能出版社,2001:700-713.
- [2] PAUL R L. Nondestructive measurement of hydrogen and other elements by cold neutron prompt gamma-ray activation analysis[J]. American Laboratory, 2002, 2: 15-20.
- [3] 张兰芝,倪邦发,田伟之,等. 瞬发 γ 射线中子活化分析的现状与发展[J]. 原子能科学技术, 2005,39(3):282-288.

ZHANG Lanzhi, NI Bangfa, TIAN Weizhi, et al. Status and development of prompt γ -ray neutron activation analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(3): 282-288(in Chinese).

- [4] 胡春明,代君龙,沈文德,等. 一个拟建的反应堆冷中子源[J]. 核技术,2005,28(3):209-212.
HU Chunming, DAI Junlong, SHEN Wende, et al. Cold neutron source to be established at a research reactor[J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(3): 209-212(in Chinese).
- [5] 胡春明,唐风平,郑洲,等. 冷中子源中氢系统的纵深防御设计[J]. 核技术,2008,31(2):157-160.
HU Chunming, TANG Fengping, ZHENG Zhou, et al. Hydrogen safety in cold neutron source in a reactor [J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(2): 157-160(in Chinese).
- [6] 王昌建,郭长铭,徐胜利,等. 气相爆轰波在 T 形分叉管中传播现象的实验研究[J]. 力学学报, 2004,36(1):16-23.
WANG Changjian, GUO Changming, XU Shengli, et al. Experimental investigation on gaseous detonation propagation through a T-shape bifurcated tube[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(1): 16-23(in Chinese).
- [7] 梁化彬,胡春明,徐胜利,等. 爆燃波在含内构件管道中传播现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007,27(6):487-492.
LIANG Huabin, HU Chunming, XU Shengli, et al. Experimental studies on H₂/air deflagration propagating in a tube containing inner components[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(6): 487-492(in Chinese).