

一座核电站空气管路爆炸的原因

郭预权 C.W. 考夫曼(美)*

(南京理工大学机械学院 南京 210014)

(* 密歇根大学 航天工程系)

摘要 介绍了对美国一座核电站的控制系统空气管路爆炸事故的原因分析和实验研究。认为爆炸起源于系统内部由激波引起的油膜爆轰所产生的瞬态高压。文中还介绍了有关的基本原理, 实验设备和方法, 给出了主要的实验结果, 找到了产生这种油膜爆轰的条件和保障安全生产的技术措施。这项工作为爆轰研究提供了一种理想的设备和方法。所获得的结果在爆轰机理研究和爆炸安全研究方面具有一定的意义和应用价值。

关键词 爆轰 核电站 爆炸安全

1 引言

美国中西部一座核电站的控制系统空气管路发生了一次爆炸事故, 造成现场人员伤害和设备损坏, 影响了核电站的正常运行。事故经过如下: 值班人员发现一个由气动控制的供水截止阀工作失灵, 在开启信号下不能打开。象过去曾采用的方法一样, 由控制室再次给出开启信号, 反复开启一个控制该截止阀工作的电磁阀, 企图用多次气动冲击的方法迫使其打开, 结果, 发生了管路爆炸。这种操作方法在过去使用时未发生过爆炸情况。但经现场人员回忆, 有时曾听到在空气管路中产生过较大的类似金属敲击声。

对事故现场进行了调查, 并对由于爆炸而损坏的部件和碎片做了各项检验。排除了一般可能引起爆炸的原因, 例如, 在管路内外由于摩擦或电器短路而形成的火源, 其它火种, 来自压缩机的超过正常值的高压, 管路元件有气孔或砂眼等内在缺陷, 外部机械损伤等。在这种情况下, 设想这次爆炸可能是由在管路内部发生了一次油膜爆轰所引起的。根据爆轰理论在一定的条件下, 激波有可能引起油膜爆轰。在核电站控制系统的空气管路中, 为了润滑供水截止阀, 装有一个润滑器, 向管路内喷入微量润滑油。油雾可能沉积在管壁上形成油膜。当阀门工作不正常时, 在反复开启电磁阀情况下, 有可能会出现初始激波。激波引起的油膜爆轰使管路内部压力急剧上升。系统中虽然装有安全阀, 但未起到安全卸载作用, 造成了管路爆炸。

为了证实这一假设, 并且找出确保该核电站安全运行的条件, 在密歇根大学气体动力学实验室内进行了一系列实验研究工作。在一根爆轰管内充入不同压力的空气, 并在管壁涂不同数量的润滑油。人工制造各种条件, 包括与发生爆炸时相似的条件和今后可能会遇到的情况, 试验能否产生爆轰。

研究的结果不仅找到了事故的原因, 也为其它类似的核动力设备提供了安全生产条

件。这些结果在爆轰机理和爆炸安全研究方面也具有广泛的意义和参考价值。所用的设备和实验方法为进行爆轰研究提供了一种经济而有效的手段。

2 原 理

在空气管道内壁沉积有可燃性油膜时,如果有激波从中通过,在激波后面的油膜会被掀起,形成油雾并与空气混合。激波越强,形成的油雾越多。同时,由于激波产生的温度阶跃,使混合气温度升高,为化学反应提供了合适的条件。化学反应又对激波补充能量,使其加强。在合适的条件下,最终可能在管内产生激烈的化学反应,即油膜爆轰。

对产生这种油膜爆轰的影响因素有:可燃性油料的物理、化学性质,燃料空气的当量比,介质的温度、压力,初始激波强度,以及管道的几何尺寸等。

前人的研究已经证明了这种油膜爆轰产生的机理,但能否用它解释核电站的空气管路爆炸事故尚需通过实验加以证明。同时,也只有通过定量的实验,才能找出产生这种爆轰的具体条件和防止爆炸的安全措施。

3 实验设备

图 1 是实验设备方框图。爆轰管总长 3.658m,矩形横截面,每边长 19mm。在爆轰管的一端装有一个驱动器,另外一端连接真空箱,中间是试验段。三者间用适当厚度的塑料膜片隔开。在驱动器内充入按一定比例配制的混合气,成份是氢、氧和氮。该混合气需经

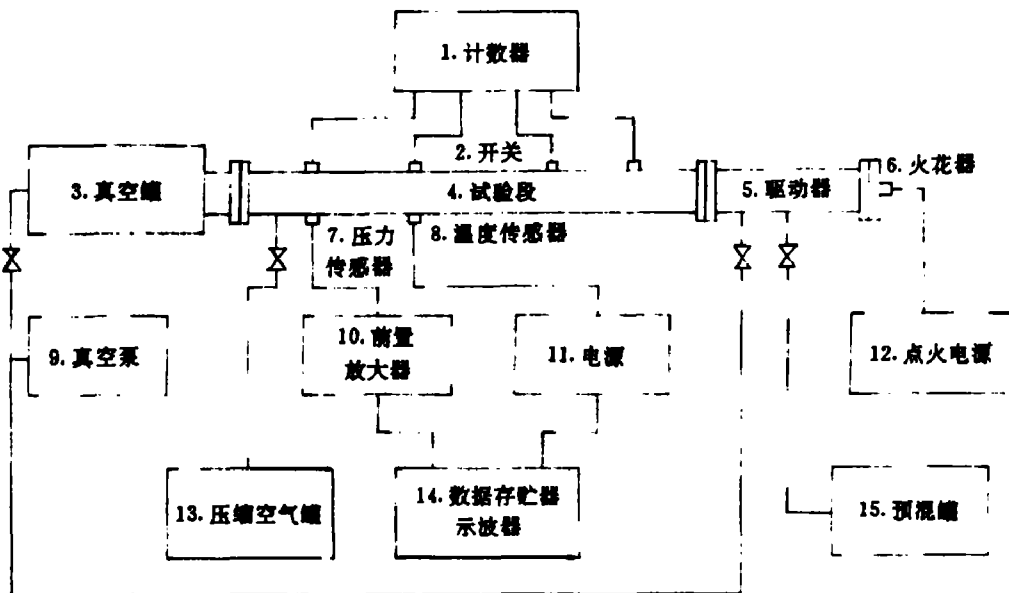


图 1 实验设备框图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1. Counters; 2. Switches; 3. Vacuum tank; 4. Test section; 5. Driver; 6. Spark plug;
7. Pressure transducer; 8. Temperature transducer; 9. Vacuum pump; 10. Pressure transducer
power supply; 11. Temperature transducer power supply; 12. Spark power supply; 13. Com-
pressed air tank; 14. Programmable digitizer and oscilloscope; 15. Premixed tank

预混平衡。充入数量用充气压力控制。充气前,驱动器内需抽成真空。当用电火花点燃时,混合气发生化学反应,产生高温和高压气体,冲破膜片形成初始激波,并在试验段内向真空箱方向传播。试验前,用专门设计的工具向试验段内壁涂覆一定数量的润滑油,这种润滑油与核电站系统中使用的牌号相同。然后,向试验段内充入所需压力的空气。根据各有关参数,可以计算出实际加入的润滑油量和空气量,并算出燃料和空气的当量比。在试验段上装有测量温度和压力的传感器,也装有四个用于测量激波传播速度的压力开关。在试验段外面包有电阻加热带,用以控制试验段内部的初始温度。一组精确到微秒的记时器用于测量激波通过每两个压力开关所需之时间,从而计算出激波速度。其它参数用7D21程序数据记录器记录。压力和温度变化曲线可用7603示波器给出,亦可通过接口送给计算机。真空箱的主要作用是消除噪音。

4 试验条件

为了获得与核电站爆炸事故现场相似的工作条件,并且考虑到今后可能会遇到的各种情况,在安排试验时,选取了较宽的工况范围。这样可以使试验结果有更广泛的应用价值。所选试验条件如下:

试验段初始温度 T_i :	24, 38, 49 °C
试验段初始压力 p_i :	0.1, 0.5, 0.8, 1.3, 1.5 MPa
驱动气体初始压力 p_d :	0.2, 0.3, 0.5 MPa
驱动气体组分:	$2H_2 + O_2 + H_2$
燃料空气当量比 ϕ :	0, 1, 3, 5, 10, 16
油膜涂覆情况:	单面, 四面
涂覆油料牌号:	Mobile D. T. E. 797

5 试验结果和讨论

按照上述试验条件进行了数百次试验,取得了预期的结果。现选择一部分有代表性的数据列入表1。其中的 M 代表激波马赫数, M_1 是靠近驱动器位置的两个压力开关之间测出的平均值, M_2 是中间两个压力开关间的平均值, M_3 是靠近真空箱一端的数值。 p_b 是测出的峰值压力。上述各组数据都是在驱动气体初始压力为 0.5 MPa 条件下获得的,试验段内四壁涂油。

图2给出了一组典型的试验段内压力变化曲线。它们是在保持各种初始条件相同,只改变燃料空气当量比的情况下获得的。

图3所示为在不同的燃料空气当量比情况下,激波马赫数随试验段中传播的距离而变化的曲线。试验条件是四面涂油, $T_i = 38^\circ\text{C}$, $p_i = 1.5\text{MPa}$, $p_d = 0.45\text{MPa}$ 。

图4给出一组试验段内压力随燃料空气当量比的关系曲线,图中数据取自两种试验条件下所获得的一些试验结果的平均值,一种是单面涂油,另一种是四面涂油。其它条件与图3的试验条件相同。

从以上数据和曲线可以看出,激波在涂有可燃性油料的空气管道中传播时,一般情况

表1 典型试验结果

Table 1 Typical experimental results

序号 No.	p_0/MPa	T_0/C	燃料空气 当量比 ϕ	激波马赫数			p_0/MPa	备注
				M_1	M_2	M_3		
97*	1.5	38	0	1.45	1.38	1.30	3.25	
90*	1.5	38	1.0	1.49	1.38	1.33	3.74	
93*	1.5	38	2.8	1.45	1.36	1.49	4.62	
81*	1.5	38	2.9	1.37	1.51	1.61	>6.72	爆轰
78*	1.5	38	5.1	1.45	1.36	1.31	3.35	
170*	0.45	38	2.6	2.04	1.94	2.36	>11.13	爆轰
172*	0.45	38	2.7	2.01	1.91	2.84	>11.19	爆轰
178*	0.45	24	2.6	2.02	1.90	1.83	2.70	

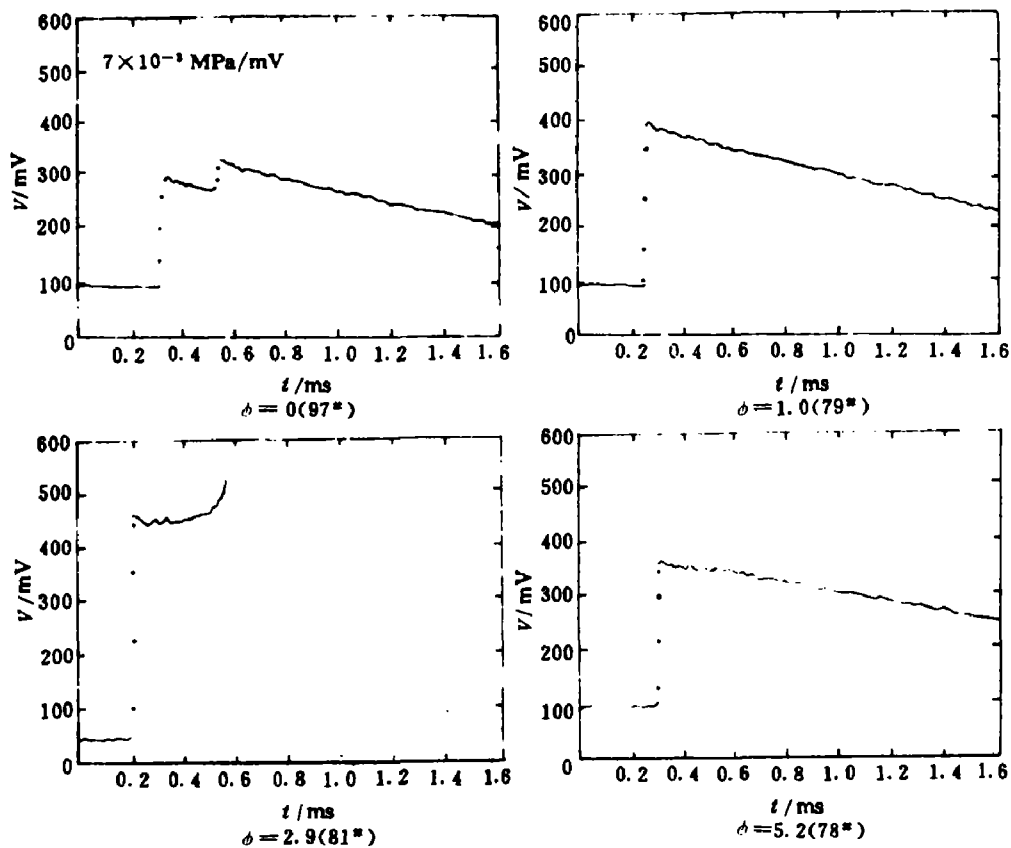


图2 典型压力记录曲线

Fig. 2 Typical oscilloscope records of pressure

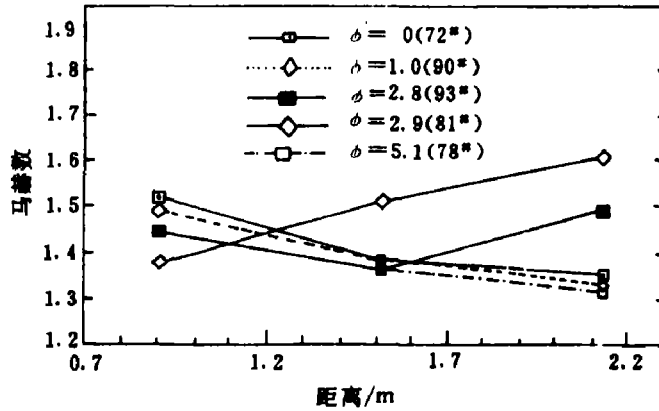


图 3 激波马赫数随距离的变化

Fig. 3 Mach number of shock wave vs distance

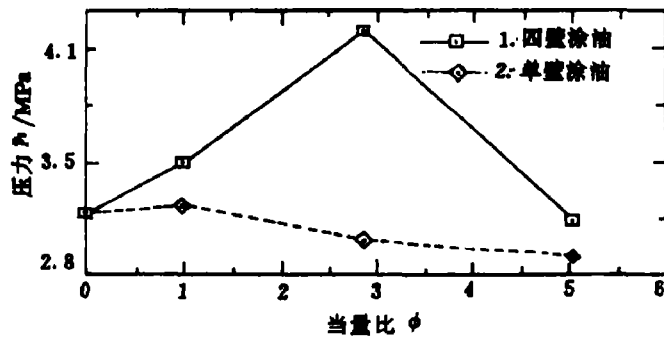


图 4 压力相对于燃料空气当量比的关系

Fig. 4 Pressure vs equivalence ratio

1. Four sides oil; 2. One side oil

下它是逐渐衰减的,可以从激波传播速度逐渐降低得到证明。但是,在合适的条件下,被激波掀起的油雾与空气所形成的可燃混合气中的氧化反应加剧,向激波补充的能量多于损失的能量,使激波逐渐加强,传播速度加快。这一进程导致发生更激烈的化学反应。如果管道足够长,最终可能形成油膜爆轰,如图 2 中的试验 81[#]。

设法保持与试验 81[#] 相同的条件,重复进行试验发现,并非每一次都能产生爆轰。例如,试验 93[#] 的情况,虽然在后期激波已经开始加速,但由于加速过程开始较迟,受管长所限,未能达到爆轰状态。这一试验结果可以对核电站曾出现的实际情况作出解释,即过去多次进行过同样的操作,但未曾发生过爆炸事故,有时只听到过异常大的噪声。

不同的试验初始条件对能否产生爆轰有很大的影响。燃料空气当量比是一个重要影响因素。过浓或过稀的情况都没有发生过爆轰,在 $\phi=2.6\sim 2.9$ 时,是最危险的状态。另外一个影响因素是试验段内气体的初始压力。试验 170[#] 和试验 172[#] 是保持与试验 81[#] 相同的其它条件,只把试验段内初始压力降低到 0.45MPa,都发生了爆轰。在这种情况下,比初

始压力高时发生爆轰的几率明显增加。初始温度也对能否产生爆轰有影响,当保持上述易于发生爆轰的条件不变,而把初始温度降低到 24℃时,多次试验均未出现爆轰现象,如试验 178[#],其中的激波是逐渐衰减的。

在发生爆轰的时候,管内的压力急剧升高,由于仪器系统测量上限所限,未测得最高峰值,但从能读出的数值看,均已超过了在事故中发生爆炸的器件的破坏压力值 6.5MPa。因此,使该器件被炸碎。压力的突然升高是在数微秒时间内发生的,在管路系统中虽然装有安全阀,但它的动作元件有较大的惯性,来不及在这么短的时间内完成释放压力的动作,未能起到超压保护作用。同样道理,现场操作人员也不可能从普通压力表指针上读到这一压力变化数值。

在发生爆轰以后,对试验段内壁上积沉的爆轰产物进行了例行检查和光谱分析,并与核电站爆炸现场保存的碎片上的物质进行比较,得知两者的物理性质和化学成份都是相同的。进一步证明了这两个事件在性质上是相似的。

6 结论和建议

在核电站控制系统空气管路中加入的可燃性润滑油逐年沉积在管壁上,形成油膜。到一定的时候,燃油与空气的当量比可以达到适于产生爆轰的数值。如果有激波通过,则可能发生油膜爆轰。阀门工作失常时,可以形成初始激波。

从上述试验所得到的结果,可以得出结论:该核电站发生的爆炸事故,就是由于这种油膜爆轰引起的。如果不采取改进措施,今后还会发生同类事故。通过试验还得知,含油管道的长度,燃料空气当量比,初始温度和压力等,都对能否发生油膜爆轰有重要影响。

为了防止发生类似的爆炸事故,对这一类核电站提出以下几点建议:

1. 保持控制系统管道温度低于 24℃。
2. 适时清理管道内壁的积油,使燃料空气当量比低于 1.0。
3. 重新布置管路系统,使管路润滑器尽可能靠近被润滑的阀门,中间的连接管道长度应小于 1.2m。
4. 当控制阀门工作失常时,例如,出现较常见的“卡死”现象时,禁止采用反复施加动作信号、用气动冲击使其恢复工作的方法。

本实验研究是为寻找一次具体的爆炸事故的原因而进行的,所提出的一些安全生产建议也有针对性。但是,所得结论及建议实际上具有普遍意义。所采用的实验设备是一种成功的设计,它为当今油膜爆轰理论研究和工业安全研究提供了经济而有效的实验条件。

参 考 文 献

- 1 Bradley J N. Flame and Combustion Phenomena. London: Chapman and Hall Ltd, 1972.
- 2 Rao C S R, Sichel M, Nicholls J A. Combustion Science and Technology 1971, 14, 209~220

CAUSE OF THE AIR LINE EXPLOSION AT A NUCLEAR PLANT

Guo Yuquan, C. W. Kauffman*

*(College of Mechanical Engineering Nanjing University of Science and Technology, Nanjing
post Code 210014 P. R. China)*

(Department of Aerospace Engineering The University of Michigan, Ann Arbor
MI 48109-2140 U. S. A.)*

ABSTRACT This paper presents an experimental investigation and analyses to the cause of the air line explosion at a nuclear plant. The explosion is due to the high pressure caused by a shock wave. The basic concepts, experimental setup and main results are outlined. An ideal experimental method for studying film detonation is introduced. The results of the study are useful to both the film detonation theory and explosion safety investigation.

KEY WORDS detonation, nuclear plant, explosion safety