

## 液体推进剂爆炸火球热传递参数的 试验测量技术\*

刘 昆 张育林 钟良生 王振国

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘 要** 介绍了液体推进剂爆炸火球的内部温度, 辐射温升和辐射热流密度的试验测量方法, 试验测量的计算机数据采集系统, 并给出了 50kg, 100kg, 300kg 液体推进剂 ( $N_2O_4$ /UDMH) 爆炸火球的热传递参数的部分测量结果。

**关键词** 液体推进剂, 火球, 数据采集, 热传递参数

**分类号** V434.3

## Methods of Measuring the Heat transfer Parameters of Liquid Propellant Explosion Fire Balls

Liu kun Zhang Yulin Zhong Liangsheng Wang Zhenguo

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** This paper presents the methods of measuring interior temperature, radiant temperature and radiant heat flux of liquid propellant explosion fire balls and the computer data acquisition system of their experimental measurement in detail. Some measuring results of the heat transfer parameters of 50kg, 100kg and 300kg liquid propellant ( $N_2O_4$ /UDMH) explosion fire balls are given.

**Key words** liquid propellant, fire ball, data acquisition, heat transfer parameter

液体推进剂火箭或航天器, 若贮箱泄漏而产生爆炸, 其破坏性的冲击波、热传递效应会对发射场的工作人员以及宇航员的生命产生极大的危害。因此, 在靶场工程和航天发射工程中, 对此应十分重视, 并进行尽可能的试验研究和理论研究, 以便采取适宜的防范措施将推进剂爆炸所产生的冲击波, 热传递效应对人体的危害降低到最低限度。

虽然美国从六十年代开始就对液体推进剂的爆炸特性进行了详尽的试验研究, 得到了液体推进剂爆炸火球的一系列试验数据<sup>[1]</sup>。但其试验研究的液体推进剂多为液氢/液氧

\* 1996年3月16日收稿。

和液氧/煤油，对四氧化二氮/偏二甲肼 ( $N_2O_4/UDMH$ ) 的爆炸火球的试验研究很少。

## 1 试验条件

为测量温度和辐射热流的分布情况，试验中按图 1 布置了各测量点。温度和热流采用计算机进行数据采集，此外，还采用高速摄影和录象来记录爆炸火球的形成和成长过程，以判断火球的直径和持续时间。

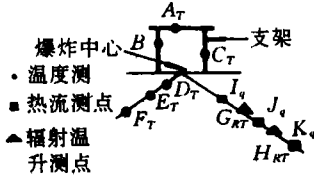


图 1 热流和温度测试点分布示意

## 2 试验测量方法

### 2.1 爆炸火球内部温度的测量

选择裸端钨铼热电偶作为火球内部温度测量的传感元件，它的测量范围大，为  $300 \sim 2000^\circ\text{C}$ ；时间常数小于  $0.4\text{s}$ ，能够满足爆炸火球温度测量的范围和响应时间的要求。试验中，钨铼热电偶的测量端置于火球内部，冷端由补偿导线引出到火球外。为利用钨铼热电偶的温差电热  $E(T, 0) \sim T$  的分度表计算火球的温度，可按下述的方法进行修正。

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0) \quad (1)$$

式中， $T$  为热电偶的测量端（热端）温度 ( $^\circ\text{C}$ )； $T_0$  为热电偶的参考端（冷端）温度 ( $^\circ\text{C}$ )，它等于室温； $E(T, T_0)$  为热电偶的输出温差电势 (mV)， $E(T_0, 0)$  可根据室温  $T_0$  的大小查表而得到。设  $E(T, 0)$  的值落在钨铼热电偶的温差电势分度表中的  $E(T_2, 0)$  和  $E(T_1, 0)$  之间， $T_2 > T_1$ ，则测得的火球温度为：

$$T = \frac{E(T, 0) - E(T_1, 0)}{E(T_2, 0) - E(T_1, 0)} \times (T_2 - T_1) + T_1 \quad (2)$$

### 2.2 火球辐射热流密度的测量

试验中选用的测量元件为圆筒式热流计 (CH-O2 型)，它的时间常数小于  $0.3\text{s}$ ，精度为  $5\%$ 。热流计安装于火球外面一定距离，其端面与火球的法线垂直。热流计的输出电压与作用其端面的辐射热流密度成正比。设由计算机数据采集而得到的热流计的输出电压为  $E_q$  (mV)，则爆炸火球的辐射热流密度为：

$$q = \frac{E_q}{K_q} \quad (3)$$

式中， $q$  为火球的辐射热流密度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )； $K_q$  为热流计的灵敏系数 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{mV}/\text{W}$ )。

### 2.3 火球的辐射温升的测量

选用铂厚膜电阻温度元件作为测量火球的辐射温升的传感元件。主要技术参数为： $0^\circ\text{C}$  时的电阻  $R_0 = 100 \pm 0.2\Omega$ ，电阻温度系数  $\alpha = 0.0039\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ 。试验测量时，铂厚膜电阻温度元件安装在火球外面的一定距离，其铂厚膜电阻平面与火球的法线垂直。当有辐射热流作用于铂厚膜电阻温度元件时，铂厚膜电阻的陶瓷基底吸收辐射热能后，其表面温度升高，从而引起铂厚膜电阻的电阻值发生变化。

图 2 是用铂厚膜电阻温度元件来测量火球辐射温升的电路图。铂厚膜电阻  $R$  和其他三个精密金属膜电阻构成惠斯登电桥。在室温时，电桥各桥臂电阻的阻值均为  $R$ ；电桥达

到平衡,其输出电压为 0。当液体推进剂爆炸形成火球时,铂厚膜电阻温度元件的表面吸收火球的辐射热能后温度上升,设其值为  $\Delta T$ ,铂厚膜电阻的阻值变化为  $\Delta R_t = R_0 \alpha \cdot \Delta T$ ,  $\Delta T$  按下式计算:

$$\Delta T = e_{\Delta T} / K_t \quad (4)$$

$$K_t = \frac{R_0}{4R} \cdot \alpha \cdot U_0 \quad (5)$$

式中,  $e_{\Delta T}$  为电桥的不平衡输出电压(mV),  $U_0$  为供桥电压(mV),  $K_t$  为辐射温升测量电路的灵敏系数(mV/C)。

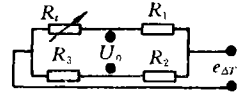


图2 辐射温升测量电路

## 2.4 爆炸火球热传递参数测量的计算机数据采集系统

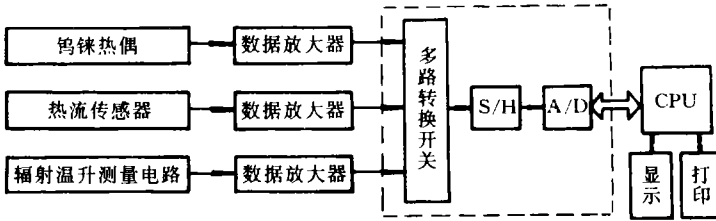


图3 火球热传递参数测量的计算机数据采集系统

图3为火球热传递参数测量的计算机数据采集系统的组成示意图。由于热传递参数测量所用的传感元件的输出均为小电压信号,所以采用数据放大器将各传感元件的输出信号分别放大后,再接入数据采集板,并在计算机的控制下进行数据采集。采集速率为每路每秒采集 100 个点。

## 3 液体推进剂爆炸火球热传递参数的测量结果及其分析

图4~7给出了液体推进剂( $N_2O_4$ /UDMH)爆炸火球热传递参数的部分测量结果曲线。图4表明,在相同的测量位置,推进剂总质量大的火球的内部温度要高一些,火球内部温度随时间的变化曲线没有规律性,这反映了推进剂爆炸过程的随机性。由图5、图6可以看出,火球的辐射热流密度随时间的变化曲线都存在一个峰值点。峰值点出现的瞬间也就是火球升离地面的时刻,此时,火球的直径达到最大,火球的辐射热流密度达到最大值。所以,可利用该峰值点出现的时刻来判别火球的升离时间,所得的结果和由火球的摄影、照相分析得到的结果是基本吻合的,见附表。图5还表明,距火球中心越远,火球的辐射热流密度越小。图7表明,受辐射体温升随时间的变化曲线都存在一个拐点,在该点处的切线斜率,即温升的变化率(它与辐射热流密度成正比)最大,它和图6中曲线的峰值点是相联系的。

附表

	50kg	100kg	300kg
由摄影、照相确定的火球上升时间	1.7s	2.4s	2.6s
火球的辐射热流密度峰值点时间	1.7s	2.2s	2.2s
火球的辐射温升与时间变化曲线的拐点时间	1.2s	1.8s	1.8s

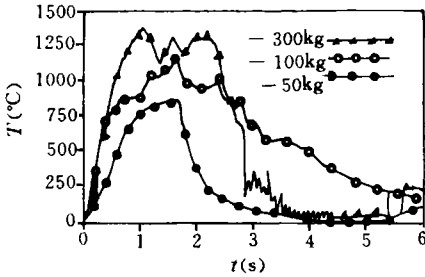


图4 不同质量的推进剂爆炸时,测量点  $B_T$  处的火球温度随时间的变化曲线

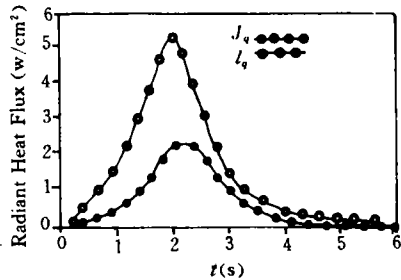


图5 100kg 推进剂爆炸火球时,不同位置的辐射热流密度随时间的变化曲线

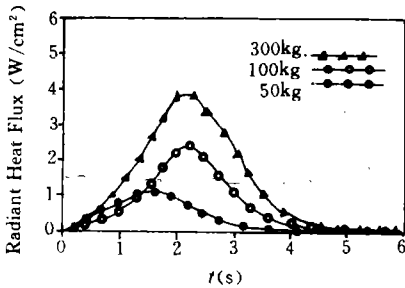


图6 不同质量的推进剂爆炸时,测量点  $J_v$  处的辐射热流密度随时间的变化曲线

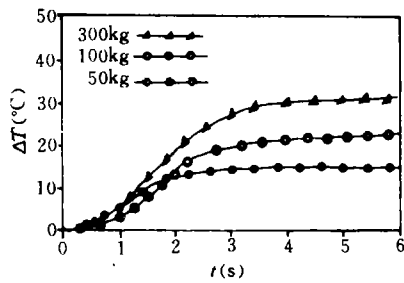


图7 不同质量的推进剂爆炸时,测量点  $G_{RT}$  处的辐射温升随时间的变化曲线

## 4 结束语

液体推进剂爆炸火球特性的试验研究是一个新的研究课题。由于液体推进剂的爆炸试验只能在野外进行,爆炸火球的持续时间又很短,给试验测量带来了一定的难度。本文介绍的试验测量方法,成功地获取了各次试验的热传递参数,测得的结果与理论分析吻合,说明测量方法和测量系统对液体推进剂爆炸火球的热传递参数的试验测量是合理的。

## 参考文献

- 1 Mansfield J A. Heat transfer hazards of liquid rocket propellant explosions. AD857343,1985
- 2 叶大均. 热力机械测试技术. 北京:机械工业出版社,1982

(责任编辑 石少平)