

文章编号: 1006-9941(2010)02-0196-04

## 某温压弹爆轰气体靶场测试技术

胡 岚, 刘红妮, 任春燕, 张 婷

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 以电化学传感器为主要元件的气体在线检测设备, 对温压弹爆轰气体产物进行了靶场实时测试。探讨了关于设备的布置和防护, 得到了温压弹爆轰时气体的浓度-时间变化曲线。建立缺氧窒息效应和毒气窒息效应的概念, 并对温压弹爆轰缺氧窒息效应及毒气窒息效应进行了计算。对比三种装药爆轰气体测试结果表明, 温压装药缺氧窒息效应远大于普通装药, 温压缺氧窒息效应较 CO 的毒气效应更为强烈。

**关键词:** 分析化学; 温压弹; 气体测试; 爆轰

**中图分类号:** TJ55; O65

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.02.016

### 1 引 言

温压弹(WY)是采用富燃料炸药制成的弹药<sup>[1]</sup>, 是在燃料空气炸弹基础上研制出来的<sup>[2]</sup>。和普通弹药相比温压弹药爆轰后会产生更加强烈的温度和压力效应, 同时由于温压药剂的爆轰需要依赖于外界环境中的氧气, 在爆点周围 50~200 m 内形成局部缺氧状态, 因此会给这个范围内的人员和设施造成致命的伤害。

目前认为温压弹药的爆炸分为三步: 一是最初的无氧爆炸反应, 二是爆炸后的无氧燃烧反应, 三是爆炸后的有氧燃烧反应。有氧后燃烧步骤因持续时间最长, 对温压弹药的毁伤效应评估起着关键的作用。温压弹的毁伤效应主要体现在高压冲击波和热杀伤上, 其次是冲击波与建筑物相互作用产生的次生碎片以及有毒气体与烟雾导致的窒息和中毒。国内对于高压冲击波及热效应的评估开展了相关工作<sup>[3-4]</sup>, 对于通过气体实测进行缺氧窒息及毒气效应的定量评价尚未见文献报道。温压弹爆炸时大量夺取周围空气中的氧气, 造成环境缺氧状态, 同时还会生成大量 CO、NO 等有毒气体, 对人员造成缺氧窒息和毒气的双重伤害。与一般弹药相比, 温压弹药爆轰作用时间长, 缺氧、毒气作用更为明显。因此对温压弹爆轰气体的测试及室

息作用评价显得至关重要。

本工作就某型号温压弹实弹演示过程中的爆轰气体进行了现场实测, 并首次建立了缺氧窒息效应及毒气窒息效应量化计算方法, 对于研究验证温压弹的反应机理以及爆轰毁伤效应进行了有益的探索。

### 2 实 验

#### 2.1 实验仪器

气体分析仪(Testo350pro), 德国 Testo 公司; 温湿度测量仪(Testo635), 德国 Testo 公司; 标准混气装置, 国防科工局火炸药计量一级站、北京金讯公司联合研制。

#### 2.2 标准气体(国家质量监督检验检疫总局证书)

CO, 995.2  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $K=3$ ,  $U=1\%$ , 光明化工研究设计院生产; NO, 99.3  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $K=3$ ,  $U=2\%$ , 光明化工研究设计院生产; O<sub>2</sub>, 99.95%,  $K=3$ ,  $U=1\%$ , 光明化工研究设计院生产。

#### 2.3 仪器参数与试验环境的匹配

Testo350pro 气体分析仪与 Testo635 温湿度测量仪可以对环境的温湿度和 O<sub>2</sub>、CO、NO、NO<sub>2</sub> 气体进行连续测试和记录, 具体性能参数见表 1。由表 1 看出, 仪器能对主要爆轰气体进行测试, 根据理论计算数据, 每个测试单元的量程、精度、分辨率都能够满足要求。

相对于微秒量级的爆轰时间, 仪器的响应时间不能满足同步要求, 这是目前技术发展不能克服的。爆轰气体场会存在湍流、对流等复杂现象, 环境的湿度、温度等条件对结果也有影响, 所以测试点的选择非常重要。假设爆轰气体存在一个相对稳定的时间( $\geq 40$  s),

收稿日期: 2009-06-11; 修回日期: 2009-10-10

基金项目: 国防科技工业局十一五计量项目(No. J092006B307)

作者简介: 胡岚(1968-), 女, 高级工程师, 主要从事火炸药燃烧、爆轰过程气体产物研究。e-mail: hulan204@126.com

表 1 仪器参数

Table 1 Instrument parameters

sensor	O <sub>2</sub>	CO	NO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	T/°C	humidity/%RH
range/%	0-25	0-40	0-3000( $\times 10^{-4}$ )	0-100	0-500( $\times 10^{-4}$ )	-200-1370	0-100
resolution	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7}$	0.1	0.1
accuracy	$\pm 0.8\%$ off. v.	$\pm 10\%$ measured value	$\pm 5\%$ measured value	$\pm 5\%$ measured value	$\pm 5\%$ measured value	$\pm 0.3\%$ (-60-60)	$\pm 5\%$ measured value
response time/s	30	40	30	10	40		

可以通过高速摄影选择火球边缘,认为是后燃烧主要区域,相应位置作为采样点。比对试验每次记录环境数据并固定同一测试点完成测试,于爆轰前开启仪器连续测试记录一个较长时间段(约 1 h)数据,得到现场气体的真实浓度时间曲线。

#### 2.4 气体分析仪的标定<sup>[5]</sup>

CO、NO 标定直接选用有证标气。O<sub>2</sub> 的标定选取一级标准气体 O<sub>2</sub> (99.95%) 通过标准混气装置,用高纯 N<sub>2</sub> 做稀释气,配置浓度为 24.82% 的 O<sub>2</sub> 标气。然后在温度 (25 ± 2) °C 和湿度 (60 ± 5)%、气体流速 (1.2 L · min<sup>-1</sup>) 稳定的情况下对气体分析仪进行标定,连续记录实测数据 5 min,计算相对标准偏差 RSD ≤ 0.25% 时认为标定合格。

#### 2.5 仪器布置与防护

为了实时记录气体浓度变化、实现在线检测,需要确定合适的气体采集点。根据高速摄影仪对以往同类型弹药测试现场录像分析可知:爆轰火球半径约 11 m,是后燃烧反应区域边缘。兼顾仪器安全及测试客观,确定将仪器置于距离起爆点 11 m 处。将仪器置于距起爆点 11 m 处一个 500 mm × 500 mm × 1000 mm 坑中,为了降低温压弹爆轰冲击波引起的地震波对仪器的损坏,在坑底及四壁设置空气隔离层、软体缓冲层作为保护。放置仪器,将传感器通过相连的干净橡胶伸出地面 2 ~ 3 cm,并在管口设置防尘过滤布,防止灰尘进入。最后在坑顶覆盖 20 mm 钢板进行防护。

#### 2.6 测试方法

爆炸前在距离爆心 11 m 处测定环境中 CO、O<sub>2</sub>、NO 浓度以及当前温湿度值。设置仪器数据采集时间间隔 1 s,持续测试 30 min。起爆前开启仪器,自动记录数据,爆轰后关机,得到实时测试结果。图 1 为温压弹爆轰过程中气体浓度时间曲线。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 实验结果

在某陆军学院靶场,试验环境温度为 33.7 °C,试

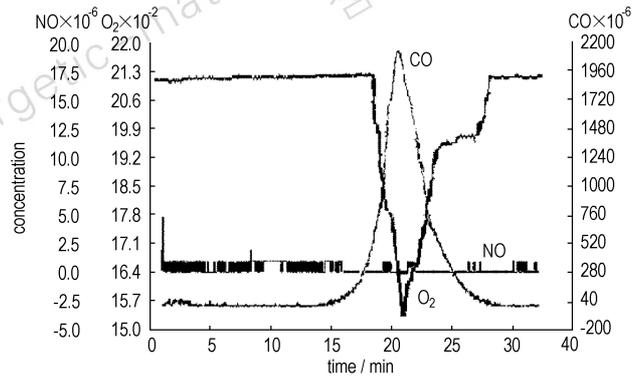


图 1 温压弹爆轰过程中气体采集图

Fig. 1 The gas collection map of thermo-baric warhead detonation

验环境湿度为 27.0% RH,温压弹装药量为 70 kg 的条件下进行试验。

温压炸药爆轰后,气体现场测试结果显示,CO、O<sub>2</sub> 浓度变化明显(图 1)。自采集 15 s 开始,CO 浓度急剧升高,21.3 s 处 CO 浓度达最大值,  $[CO]_{\max} = 2104 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ,随着反应进行及气体扩散,30 s 后 CO 浓度最终回到平衡态。自 17 s 开始 O<sub>2</sub> 浓度开始减小,22.8 s 处 O<sub>2</sub> 浓度达最小值,  $[O_2]_{\min} = 15.3\%$ ,随着反应进行完全及新鲜空气的补充,O<sub>2</sub> 浓度最终达到正常浓度。另外也可看出,CO 比 O<sub>2</sub> 浓度较早开始变化,且 CO 峰最大值出现在 O<sub>2</sub> 负峰最小值出现之前 1.5 s,CO 峰最大值持续时间为 2 s,O<sub>2</sub> 负峰最小值持续时间为 4 s。NO 浓度变化不明显,只有细微变化。

#### 3.2 缺氧窒息效应和毒气窒息效应概念的建立

温压弹在爆炸时,大量夺取外界环境中的氧气,造成缺氧环境,并释放有毒气体,对人员造成极大损伤。为了研究温压弹爆炸过程中引起周围环境缺氧的程度以及产生毒气的的能力,引入缺氧窒息效应和毒气窒息效应的概念。

##### 3.2.1 缺氧窒息效应

###### 3.2.1.1 缺氧标志值的确定

根据氧离曲线(oxygen dissociation curve)(见图 2<sup>[6]</sup>)

可以看出,人体 Hb 氧饱和度(%)与空气中  $O_2$  压力是正比非线性关系。 $p_{O_2}$  只有在  $0 \sim 60 \times 0.133$  kPa 段曲线较陡,近似认为两者呈正比线性关系,空气中氧浓度的改变对机体血氧饱和度影响很大,造成人员窒息伤害。所以,曲线拐点(图 2 中是  $60 \times 0.133$  kPa)的选择非常重要。在拐点以上的氧浓度变化对机体几乎不存在伤害,而拐点以下的氧浓度变化才会造成人员伤害,是需要考察的缺氧窒息效应产生的浓度区间。

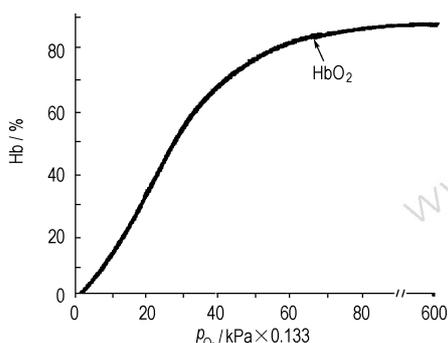


图 2 氧离曲线

Fig. 2 The oxygen dissociation curve

氧气在空气中的正常浓度是 20.9%。根据文献[7]报道,人员于不同氧气浓度下会有不同的机体反应,20%为人员耐受的氧气最小允许浓度。我们选择空气中氧浓度值 20.0%为缺氧效应的标志值,也即曲线的拐点;爆轰时,当测试到的环境氧气浓度含量低于标志值时,认为爆轰存在缺氧窒息效应,反之则认为氧浓度的改变不对人员造成缺氧窒息伤害。

### 3.2.1.2 缺氧窒息效应的概念

为了研究温压弹爆轰时因大量消耗空气中的氧而引起的周围环境缺氧对人员造成的伤害程度,引入爆轰缺氧窒息效应的概念。

缺氧浓度  $Q(t)$  (%): 将标志值 20.0%与低于标志值的某时间点的氧浓度之差定义为缺氧浓度。

缺氧窒息效应: 空气中氧浓度低于标志值所持续的时间( $t_1 \sim t_2$ )与缺氧浓度的积分定义为“缺氧窒息效应”,用公式表示为:

$$\text{缺氧窒息效应} = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \quad (1)$$

式中, $Q(t)$ 为某时间点的缺氧浓度,%;  $dt$ 为缺氧浓度测试点相应的时间,s。

在实验气体采集图谱上,这一乘积就等于氧浓度-时间曲线的积分面积。从图 2 中可以直观看出,氧浓度积分面积越大,缺氧窒息效应越强烈。

### 3.2.2 毒气窒息效应

文献[8]显示,CO 与人体内血红蛋白结合能力是  $O_2$  与血红蛋白结合能力的 40 倍,可造成一氧化碳中毒。而 NO 会引起高铁血红蛋白血症。CO 和 NO 都是毒性和麻醉性气体。为了研究温压弹爆轰时释放的毒气对人员造成伤害程度,引入毒气窒息效应的概念。选择空白试验时环境空气中少量毒气的浓度为毒气窒息效应的基准值。爆轰时,当环境中毒气浓度超过基准值时认为存在毒气窒息效应,反之亦然。将高于基准值的时间段内毒气浓度与毒气持续时间的积分定义为“爆轰毒气窒息效应”。这一乘积就是毒气浓度-时间曲线的积分面积。从图 2 中可看出,毒气浓度积分面积越大,毒气窒息效应也越强烈。毒气窒息效应用公式表示为:

$$\text{毒气窒息效应} = \int_{t_1}^{t_2} D(t) dt \quad (2)$$

式中, $D(t)$ 为某时间点的 CO、NO 高于基准值的浓度之和,%;  $dt$ 为毒气浓度测试点相应的时间,s。 $1\% \cdot s = 10000 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot s$

### 3.3 缺氧窒息效应计算

对温压弹多发试验的测试数据统计,缺氧段氧浓度最低值为 15.32%,缺氧持续时间最长为 1049 s。由式(1)对温压试验数据计算得出缺氧窒息效应为  $1887.2\% \cdot s$ 。

### 3.4 毒气窒息效应计算

温压弹靶场实测结果中 NO 的浓度值偏低,不计入毒气窒息效应的计算。CO 基准值为  $14 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ,多发试验统计显示,CO 最高浓度为  $2162.0 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ,CO 毒气持续时间最长为 1398 s,由式(2)对温压试验数据计算得出毒气窒息效应为  $77.0\% \cdot s$ 。

### 3.5 与其它装药平行测试结果的对比

在相同靶场试验条件下,按照相同装填体积的原则,对装填 TNT(主要含能成分为 TNT)和梯黑铝(THL,主要含能成分为 RDX/TNT/Al)弹药的缺氧窒息效应和毒气效应进行了平行测试。按照式(1)、式(2)对测试数据进行计算,并与温压弹测试结果相除得到比值,用以表征温压弹气体效应的强弱,结果见表 2。

由表 2 可以看出,在相同装填体积下,温压缺氧窒息效应远远大于其他两种装药,是 TNT 的 5.51 倍,是 THL 的 1258 倍。毒气效应由于数据不完善未做比较。图 3 为不同弹药爆轰后环境中氧气测试图。通过试验过程的气体采集图对比也可以明显看出,温压弹的氧浓度-时间曲线积分面积远大于另外两种装药。

表 2 三种装药爆轰气体测定结果对比

Table 2 Detonation gases determination results of three kinds of charges

names	WY	TNT	THL	ratio	
anoxia asphyxia effect / % · s	1887.2	342.5	1.5	5.51 (with TNT)	1258 (with THL)
miasma effect / % · s	77.0	-	-	-	-

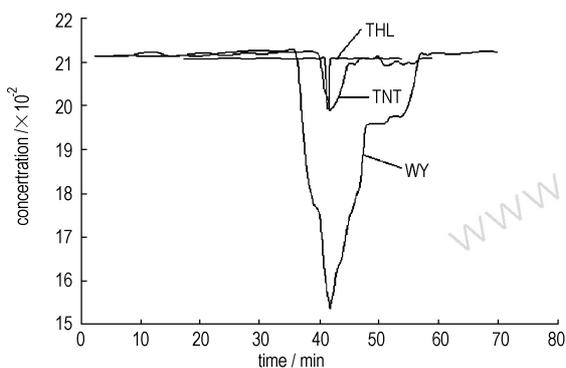


图 3 不同装药氧气测试曲线

Fig. 3 The oxygen curves of different warheads detonation

## 4 结论

(1) 温压弹爆轰气体靶场测试方法简单可行,防护及采样点选择安全合理。气体实时测试浓度时间曲线客观反映了爆轰过程主要产物气体的组成和变化规律。

(2) 温压弹缺氧窒息效应及毒气窒息效应的定量计算结果显示温压弹缺氧窒息效应较 CO 毒气窒息效应更为强烈,强于同等装药量其他弹药。结果符合理论预期,计算方法能够应用于温压弹毁伤效应的评估。

(3) 试验数据真实反映了在当时环境条件下弹药的缺氧窒息效应和毒气效应,进一步开展弹药与实验

环境的匹配性、试验条件的标准化研究,将满足不同测试场地、不同环境条件下结果的定量比对。

## 参考文献:

- [1] 李林. 温压弹的原理与实践. 现代军事, 2005(1): 55-57.  
LI Lin. The principle and practice of thermo-baric warhead[J]. *Conmilit*, 2005(1): 55-57.
- [2] 赵永涛,白春华,张奇. 温压弹爆炸超压场实验研究[J]. 爆破, 2004(4): 15-17.  
ZHAO Yong-tao, BAI Chun-hua, ZHANG Qi. Experimental studies on the explosion overpressure of the thermo-baric warhead[J]. *Blasting*, 2004(4): 15-17.
- [3] 杨东来,惠君明,雷贯华,等. 燃料空气炸药武器对人员毁伤的研究[J]. 含能材料, 2002, 10(3): 117-120.  
YANG Dong-lai, HUI Jun-ming, LEI Guan-hua, et al. Research on the damage effect of the fuel-air explosive on man[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(3): 117-120.
- [4] 范鹏贤,宋锋良. 温压武器的原理及其发展现状[J]. 科技咨询, 2006, 27: 36.  
FAN Peng-xian, SONG Feng-liang. The principle and development status of thermo-baric weapon[J]. *Science & Technology Information*, 2006, 27: 36.
- [5] 胡岚,张皋,王静娜,等. 火药燃烧气体产物检测方法研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 527-530.  
HU Lan, ZHANG Gao, WANG Jing-na, et al. Determination methods for the gas-fired of propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 527-530.
- [6] 曹稳根. 氧离曲线特征及其影响因素作用的分析[J]. 生物学通报, 2000(12): 11-13.  
CAO Wen-gen. Analysis the characteristics and influencing factor of oxygen dissociation curve[J]. *Bulletin of Biology*, 2000(12): 11-13.
- [7] 吴翠香. 炸药爆炸的有毒气体对人体的危害[J]. 矿业快报, 2003, 410(8): 42-43.  
WU Cui-xiang. The damage of explosive harmful gas to human [J]. *Express Information of Mining Industry*, 2003, 410(8): 42-43.
- [8] 陈智群,潘清,胡岚,等. 用 IR 测定发射药燃气研究[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 36-38.  
CHEN Zhi-qun, PAN Qing, HU Lan, et al. Determination of combustion gases of gun propellant by IR[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 36-38.

## Target Determination Technology on Detonation Gaseous Products of a Thermo-baric Warhead

HU Lan, LIU Hong-ni, REN Chun-yan, ZHANG Ting

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A suit of on-line test equipment based on electrochemical sensor was used to determine detonation gaseous products of a thermo-baric warhead. The arrangement and protection of the equipment was investigated, and the concentration-time curves of gaseous products in thermo-baric warhead detonation were obtained. The anoxia asphyxia effect and the miasma asphyxia effect were proposed and calculated. Detonation gases determination results of three kinds of charges show that the anoxia asphyxia and miasma asphyxia effects of thermo-baric warhead are stronger than that of normal charge, and the anoxia asphyxia is more obvious than CO miasma asphyxia effect.

**Key words:** analytical chemistry; thermo-baric warhead; gas analysis; detonation

**CLC number:** TJ55; O65

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.02.016