doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.06.004

爆容弹体内部爆炸气体产物 *p-V-T* 关系的试验研究*

李鸿宾 金朋刚 杨 建 任松涛
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了解爆炸气体状态方程对高能非理想炸药爆容计算结果的影响,利用 20 L 密封弹体开展典型含铝炸药起爆试验。采用阵列式铂热电阻测试了炸药爆炸产物的温度分布。选择范德华方程和理想气体状态方程做对比分析,精确测量了不同温度条件下弹体内部的气压,定量分析了爆炸气体产物的组成,计算得到范德华压力修正系数和体积修正系数分别为 1.5×10^{-5} 和 2.1×10^{-4}。试验验证了理想气体状态方程描述爆轰产物的适用性。结果表明:相对于实际测量的压力和容积,压力修正项和体积修正项属于可以忽略的量;典型含铝炸药爆炸的气体产物可以使用 $p=kT$ 的简单线性关系进行描述;试验条件下,典型非理想炸药爆炸产物的状态基本符合理想状态假设。

[关键词] 应用化学;爆容;内爆炸;状态方程
[分类号] TQ560.7;TJ41

Experimental Study on *p-V-T* Relationship of Explosive Gas Products inside the Small Explosion Chamber

LI Hongbin, JIN Penggang, YANG Jian, REN Songtao
Xi'an Institute of Modern Chemistry (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to understand the influence of the state equation of explosive gas on the calculation results of the explosive volume of high-energy non-ideal explosives, typical aluminized explosive detonation tests were carried out using a 20 L sealed projectile. The temperature distribution of explosive products was tested using an array of platinum resistors. Van der Waals equation and ideal gas state equation were compared and analyzed. The gas pressures inside the projectile under different temperature conditions was accurately measured. Quantitative analysis was conducted on the composition of detonation gas products. The Van der Waals pressure correction coefficient and volume correction coefficient were calculated to be 1.5×10^{-5} and 2.1×10^{-4}, respectively. The experiment verified the applicability of the ideal gas state equation to describe detonation products. The results indicate that compared to the actual measured pressure and volume, the pressure correction term and volume correction term are negligible quantities. The typical explosive gas products of aluminized explosives can be described using a simple linear relationship of $p=kT$. The state of typical non-ideal explosive products under experimental conditions basically conforms to the assumption of ideal state.

[KEYWORDS] applied chemistry; volume of detonation product; detonation; equation of state

0 引言

爆容是炸药“五爆”参数之一,一定程度上决定了炸药的做功效率,是炸药性能表征的关键参数[1]。炸药爆容的获取方法主要分为试验测试和理论计算两大类。

基于理想气体状态方程,学者们研究了军用炸药爆容测试的温度-压力法,并于 1997 年建立了炸药爆容测试国家军用标准[2]。2021 年,针对非理想炸药爆容测试的需求,提出修订该试验方法,着重提升非理想炸药爆容测试结果的准确性。黄达权[3]提供了一种工业炸药气体产物爆容(干)的试验方法,并给出了 8#工业电雷管、TNT 以及 2#岩石炸药的爆容。

理论计算方法主要包括爆炸产物的状态方程、

* 收稿日期:2024-06-02
第一作者:李鸿宾(1988—),博士,副研究员,主要从事炸药性能评估方面的研究。E-mail: lihongbin6868@163.com

经验公式和热力学爆炸理论等[4]。赵明生等[5]为研究炸药-岩石的匹配效果,采用经验公式计算了不同配方炸药的爆容。徐文源[6]用相应的组分贡献量按用量系数相加,给出了一种计算工业炸药爆容的原理和方法;但该方法难以考虑炸药反应完全性对爆容的影响。王中友等[7]建立了产物自由膨胀模型和等体积放热模型,基于自编热化学程序和多种经验方法,研究了常用单质炸药在爆热弹中产物组分的演化规律。然而,这种计算方法用于计算非理想炸药和新概念炸药的爆容时难度较大。还有基于最大放热理论的热力学经验计算方法,也是工程上较为常用的方法之一[8-9]。

现阶段,通过试验获得炸药爆容仍然是最为可靠的方法。爆容测试的基本原理是将样品在真空密闭容器中引爆,用传感器测量容器内部气体的压力和温度,利用气体状态方程计算密闭容器内部爆炸的气体产物在标准状态下的体积。目前,已经能够准确地测量爆炸气体产物的压力和温度,炸药爆容测试结果的准确性很大程度上依赖于气体状态方程的选择。

爆炸产物中可能存在固体碳、氧化铝和少量液态水等非气态组分,这些组分会对气体产物的状态产生一定的影响。通常,将温度大于 500 K 或者气压不高于 1.01×10^5 Pa 时的气体当作理想气体。当气压超过 15.0 MPa 时,使用理想气体状态方程描述气体会产生较大误差。研究表明,非理想炸药在常规爆容弹体内部爆炸之后,气体产物的压力约为 0.3 ~ 1.0 MPa,加热之后的温度大约为 200 ℃。因此,实际的爆炸气体产物不属于常见的理想气体状态,此情况下能否继续使用理想气体状态方程计算炸药的爆容,成为爆容测试方法修订需要回答的核心问题之一。

本文中,选择典型含铝炸药作为试验样品,测试了爆容弹体内部的温度 T 和气体产物的压力 p,并试验分析了样品爆炸后的气体组分,从而研究爆炸气体产物压力 p、体积 V 与温度 T 之间的关系。

1　试验

1.1　试验原理

采用保压法对爆容弹在常温和高温下的密封性能做了测试。利用气相色谱仪对爆炸气体产物的组成做定量分析,根据范德华方程计算了范德华常数。进一步开展了 165、175、185、195、205 ℃等间隔升温试验。

炸药样品在爆容弹体内部起爆;加热炉和电控系统对爆容弹实施精准加热;一定时间后,将爆炸气体产物通过铜管引出,利用三通接口安装的温度、压力传感器记录弹体内部的温度和压力。通过改变弹体温度,获得一组温度、压力数据,据此拟合爆炸气体产物的状态方程。

1.2　试验器材

爆容弹:钢制爆炸容器,是爆容试验装置的核心,容积约 20 L;能够重复承受 200 g TNT 当量的爆炸。爆容弹体的最大应变 ε_{max} 满足:

$$\varepsilon_{max}\leqslant\frac{[\sigma]}{E}=\frac{327\times10^6}{200\times10^9}=1.635\times10^{-3}。\quad(1)$$

式中:$[\sigma]$ 是爆容弹体的许用应力;E 是爆容弹体的弹性模量。

爆容弹体通过了爆炸加载考核试验,爆炸当量分别为 100、150、200 g TNT。

温度、压力记录系统:由安装在容器气体引出管上的传感器和无纸记录仪组成。

CYG1163 型中、高温压力变送器:量程 0 ~ 10 MPa,24 V DC 供电,电流输出 4 ~ 20 mA,工作温度 55 ~ 200 ℃,精度级别 C 级(0.25% FS)。

Pt100 铂热电阻:ϕ3.0 mm,M16 × 1.5 型卡套螺纹,长 100 mm,引线 4 m。

LU-C1000 型无纸记录仪:单色液晶显示,输入类型包含热电偶、热电阻,电流输出 4 ~ 20 mA 或 0 ~ 10 mA,24 V DC 供电,R-RS232 通讯,U 盘存储。

6890 型气相色谱仪:美国安捷伦公司。

1.3　试验样品

选取 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基含铝炸药 DHL-1 作为典型非理想炸药爆容试验样品。使用 10 g 带 8# 雷管孔的 JH-14 起爆药柱端面起爆。DHL-1 炸药组分的质量分数见表 1。

表 1　DHL-1 炸药组分配比

Tab. 1　Components of DHL-1

%

w(DNAN)	w(RDX)	w(AP)	w(Al)	w(钝感剂)
15	32	20	30	3

2　结果与讨论

2.1　保压试验结果

装配爆容弹和炸药样品,内部充入 1.0 MPa 空气,采用压力传感器测试起爆后的压力,无纸记录仪记录压力的变化,保压时间为 5 h。常温保压测试结果如图 1 所示,经过 5 h,爆容弹体内部气压降低

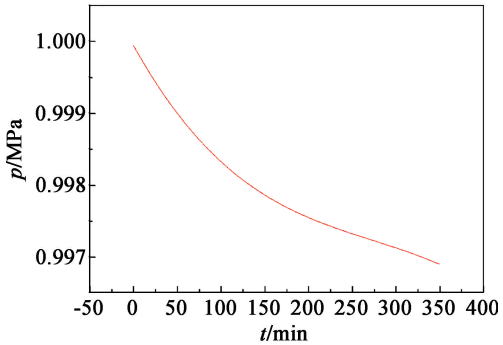


图 1　常温保压试验压力变化

Fig. 1　Pressure changes in pressure holding test at room temperature

0.003 MPa,压力下降率为 0.3%。

为考察爆容弹经过长时间加热时的密封性,进一步开展高温保压试验。在容器内部充入0.5 MPa的空气,当容器壁面温度达到 230 ℃时,对容器进行保温 2 h。采用压力传感器和无纸记录仪对容器内部的压力进行测试和记录。如图 2 所示,爆容弹内部压力下降了 0.01 MPa,压力下降率为 2.0%。

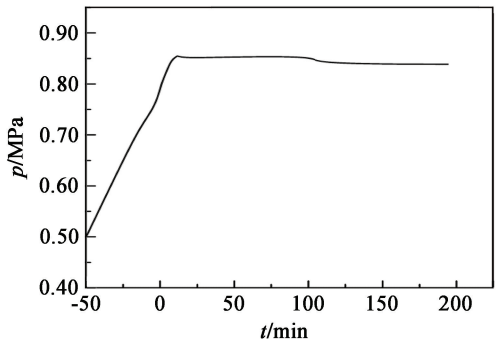


图 2　高温保压试验压力变化

Fig. 2　Pressure changes in pressure holding test at high temperature

2.2　爆炸产物的组成

为了解 DHL-1 炸药爆炸后的气体产物的组成,在压力测试接口处以连接气袋的方式收集气体,采用气相色谱仪对气体产物的组成做定量分析。结果如表 2 所示。可见,N_2、CO、CO_2 是爆炸产物中 3 种主要的气体组分,占据了 90% 以上的体积。

表 2　DHL-1 炸药爆炸气体产物组成的定量分析

Tab. 2　Quantitative analysis of the composition of explosive gas products of DHL-1

序号	体积分数/%					
	N_2	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2O
1#	50.40	4.00	10.60	34.66	0.33	0.01
2#	58.40	1.20	10.30	30.06	0.03	0.01
3#	51.40	3.58	10.10	34.60	0.31	0.01

1873 年,范德华从理想气体与真实气体的差别出发,用硬球模型来处理真实气体,提出了用压力修正项 a/V^2、体积修正项 b 来修正压力与体积的想法。真实气体状态方程为

$$(p+\frac{n^2a}{V^2})(V-nb)=nRT。\tag{2}$$

式中:p 为压力;V 为气体体积;a、b 为范德华常数;n 为气体的物质的量;R 为摩尔气体常数。

当 $p\to 0$、$V\to\infty$ 时,式(1)就退化成理想气体状态方程 $pV=nRT$。

根据范德华方程,可以用 $n^2a/(pV^2)$ 和 nb/V 来显示压力修正项和体积修正项对整体计算的影响。以最为严格的情况进行计算,即 a、b 都以可能存在的组分中取值最大的 CO_2 代入计算,其中:

$$a=365.8\times10^{-3}\ \text{Pa}\cdot\text{m}^6/\text{mol}^2;$$

$$b=42.9\times10^{-6}\ \text{m}^3/\text{mol}。$$

本文中,可能涉及的某些气体的范德华常数如表 3 所示。

表 3　典型爆炸气体组分的范德华常数

Tab. 3　Van der Waals constants of typical explosion gas components

气体	$a/(10^{-3}\ \text{Pa}\cdot\text{m}^6\cdot\text{mol}^{-2})$	$b/(10^{-6}\ \text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1})$
H_2O	553.7	30.5
CO	147.2	39.5
CO_2	365.8	42.9
SO_2	686.5	56.8
N_2	137.0	38.7
H_2	24.5	26.5
CH_4	230.3	43.1

目前,军用混合炸药在 20 L 爆容弹体中爆炸后被加热到 175 ℃,测到的最高压力为 0.67 MPa(高能非理想炸药爆容标准物质的压力为0.61 MPa),取 $p=0.6$ MPa 代入计算,结果如下:

$$\frac{n^2a}{pV^2}=\frac{0.1^2\times365.8\times10^{-3}}{0.6\times10^6\times(20\times10^{-3})^2}=1.5\times10^{-5};$$

$$\frac{nb}{V}=\frac{0.1\times42.9\times10^{-6}}{20\times10^{-3}}=2.1\times10^{-4}。$$

可见,本研究条件下,相对于实际测到的压力和容积,压力修正项和体积修正项属于可以忽略的量。

2.3　真实气体状态方程的影响验证试验

为了验证计算结果,开展了验证试验。取 1 发非理想炸药爆容标准物质,使用 10 g 传爆药起爆。然后,将爆容弹加热至 155 ℃并保持恒温,利用压力传感器和温度传感器同时测量数据。然后,以 10 ℃

为间隔开始一组加热试验,分别加热至 165、175、185、195、205 ℃,并保持恒温,利用压力传感器和温度传感器同时测量数据。试验结果如表 4 所示。

表 4　爆炸气体产物压力-温度试验结果

Tab. 4　Pressure-temperature test results of explosion gas products

加热炉温度/℃	压力/MPa	温度/℃
155	0.582	155.3
165	0.593	164.6
175	0.611	175.2
185	0.621	185.2
195	0.637	194.7
205	0.652	204.6

将试验结果以压力为横坐标、温度为纵坐标做线性拟合可知,本试验条件下压力和温度呈现出较好的线性关系。

试验结果表明,本研究条件下,非理想炸药爆容标准物质爆炸气体产物可以使用 $p = kT$ 的简单线性关系进行描述。结合理论计算的结果可以认为,本研究条件下,非理想炸药爆容标准物质爆炸气体产物符合理想气体的状态方程 $pV = nRT$。

3　结论

1)非理想炸药在 20 L 密闭容器中爆炸,能产生大约 0.6 MPa 的气压。该状态下,爆炸气体产物不能直接使用理想气体状态方程描述,需要进一步研究确定适当的状态方程。

2)本研究条件下,相对于实际测量的压力和容积,压力修正项和体积修正项属于可忽略的量。

3)通过等间隔升温试验验证了爆炸产物气体压力和温度的关系。结果表明,非理想炸药爆容标准物质爆炸气体产物可以使用 $p = kT$ 的简单线性关系进行描述,进一步证明了本试验条件下采用理想气体状态方程描述爆炸产物状态是可行的。

参 考 文 献

[1]　汪飞. 炸药爆轰性能五因素综合评估技术及关键指标研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
WANG F. Evaluation method of explosive detonation performance by five detonation parameters and study on crucial index [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.

[2]　中国兵器工业总公司. 炸药试验方法:GJB 772A—1997 [S]. 1997.
NORINCO (G). Explosive test method: GJB 722A—1997 [S]. 1997.

[3]　黄达权. 测定工业炸药气体产物爆容(干)的实验方法研究[J]. 爆破器材, 1984(5):29-33.

[4]　吴雄. VLW 爆轰产物状态方程的发展及应用[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1):1-7.
WU X. Development and application of VLW equation of state for detonation products [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(1):1-7.

[5]　赵明生, 黄胜松, 周建敏, 等. 混装乳化炸药配方对炸药-岩石匹配效果影响研究[J]. 爆破, 2021, 38(4):124-128, 179.
ZHAO M S, HUANG S S, ZHOU J M, et al. Study on influence of formula of mixed emulsion explosive on matching effect of explosive and rock [J]. Blasting, 2021, 38(4):124-128, 179.

[6]　徐文源. 组分加和法计算工业炸药的爆热和爆容[J]. 爆破器材, 1996, 25(3):1-5.
XU W Y. Calculation of heat of explosion and specific volume of industrial explosive by component accumulation method [J]. Explosive Materials, 1996, 25(3):1-5.

[7]　王中友, 李星翰, 甘云丹, 等. 爆热弹中产物组分演化的计算研究[J]. 火炸药学报, 2022, 45(2):229-242.
WANG Z Y, LI X H, GAN Y D, et al. Study on thermodyamic evolution of detonation products in the detonation bomb test [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(2):229-242.

[8]　徐飞扬, 李洪伟, 夏曼曼, 等. 重铵油炸药热化学参数的计算与分析[J]. 爆破器材, 2017, 46(6):48-52.
XU F Y, LI H W, XIA M M, et al. Calcuation and analysis on thermochemical parameters of HANFO explosive [J]. Explosive Materials, 2017, 46(6):48-52.

[9]　张廷理. CHNOF 炸药的爆热与爆容的估算[J]. 火炸药, 1985(1):15-17.