

文章编号:1006-9941(2005)01-0055-03

弹道特征参数计算及密闭燃烧压力实验

任鹏, 祝明水, 蒋小华

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了确定输出条件下燃气做功元件装药参数, 用 VLW 状态方程计算了点火药和主装药的火药力、余容, 结合诺贝尔-阿贝尔方程, 对不同输出特性做功元件的装药参数进行了设计, 容积为 1 cm^3 的做功原件压力输出试验结果表明: 点火药(B/KNO₃)为 0.2 g、主装药(RDX)为 0.0995 g 时, 做功元件输出最大压力平均值为 179 MPa, 与设计值 192 MPa 接近; 点火药(B/KNO₃)为 0.2 g、主装药(RDX)为 0.199 g 时, 做功元件输出最大压力平均值为 348 MPa, 与设计值 384 MPa 接近。

关键词: 爆炸力学; VLW 状态方程; 数值模拟; RDX; B/KNO₃

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

燃气做功元件在航天等领域(下称做功元件)应用较广, 如爆炸螺栓、电爆管等。不同的使用功能, 要求不同的输出特性。针对不同的输出特性, 需要设计相应的装药参数。过去, 对做功元件装药参数的设计通常通过大量试验来确定, 周期长、费用高。而本研究采用的 VLW 状态方程及程序^[1,2], 以维里(VIRIAL)理论为基础建立的 VLW 高温高压气体状态方程(VLW EOS), 在高能炸药、民用工业炸药以及初始密度 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上的高能量密度炸药的爆轰参数计算中取得了与试验吻合的结果^[3~6]。

本文根据 VLW 状态方程计算了硼/硝酸钾点火药和 RDX 炸药的火药力、余容, 结合诺贝尔-阿贝尔方程, 对不同输出特性的做功元件的装药参数进行了计算, 确定了相应的装药参数。并对做功元件进行了输出压力试验。结果表明, 做功元件输出压力预估值和实验值吻合。

2 实验

实验装置结构见图 1, 其中装药直径为 6.4 mm, 燃烧容积为 1.0 cm^3 。实验时, 点火头的桥丝通电发热, 点火药被加热达到一定的温度后开始燃烧。当点火药燃烧形成一定的压力和温度时, RDX 炸药被点燃, 形成两相燃烧, 燃烧产生的气体产物膨胀对外做功。

收稿日期:2004-09-03; 修回日期:2004-11-10

作者简介:任鹏(1966-), 男, 工程师, 主要从事计算机及数值模拟计算研究。

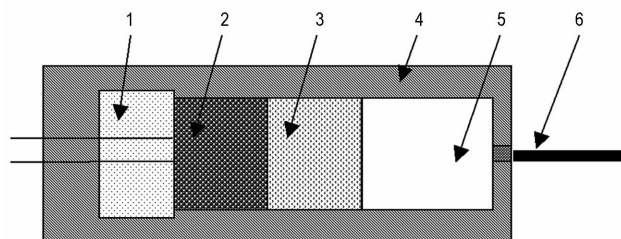


图1 做功元件示意图

1—点火头, 2—B/KNO₃ 点火药, 3—RDX, 4—密闭容器,
5—空腔, 6—传感器

Fig. 1 The diagram of combustion pot

1—initiator, 2—B/KNO₃, 3—RDX, 4—close bomb,

5—cavity, 6—pressure sensor

3 数值模拟

通过 VLW 状态方程及计算程序计算燃烧产物的平衡组成和燃烧性能参数, 可以进一步对做功元件装药参数进行设计。

VLW 状态方程^[2]((1)式), 对于高能炸药, n 通常取 4~5, 炸药或火药燃烧的压力较低, n 取 3~5 的计算结果基本相同, 本文计算中 $n=3$ 。

$$\frac{pV}{RT} = 1 + B^* \left(\frac{b_0}{V}\right) + \frac{B^*}{(T^*)^{\frac{1}{4}}} \sum_{n=3}^m \frac{\left(\frac{b_0}{V}\right)^{n-1}}{(n-2)^n} \quad (1)$$

式中, p 为压力; V 为比容; R 为普适气体常数; T 为气体产物温度; B^* 为第一无量纲维里系数; T^* 为无量纲温度; b_0 为气体余容; n 为分子作用势项数。

任何系统在达到平衡时, 亥姆霍兹自由能 F 最小, 即 $F_{T,V} = \min$ 。

根据最小自由能原理, 假设一组产物的组成, 通过

反复迭代,最后可以得到一组产物使得系统的自由能最小。组成求出后,就可以采用(2)式和(3)式^[2]求出火药力(f)和余容(α)。

$$f = \sum_{i=1}^m n_i RT \quad (2)$$

式中, T 为气体产物温度; n_i 为燃烧产物中第*i*种气体组分的摩尔数。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m n_i b_i}{1000} \quad (3)$$

式中: α 为某炸药或火药燃烧产物的余容值, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$; b_i 为燃烧产物中第*i*种气体组分的范德华常数。

4 实验结果及数值模拟分析

用VLW状态方程及程序计算了点火药B/KNO₃和主装药RDX的火药力、余容,结果见表1。由表1可见,B/KNO₃的火药力较RDX约低一个量级,因此该燃烧系列的做功元件输出压力主要是由主装药RDX决定的。

表1 燃烧性能参数计算值

Table 1 The calculated combustion co-volume and impetus

explosive	$f/\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	$\alpha/\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	p/MPa
B/KNO ₃	2.145×10^2	4.476×10^{-1}	$77.2(\rho=0.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$
RDX	1.293×10^3	1.126	$113.7(\rho=0.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$

对于特定的做功元件(已知燃烧容积、输出压力),在进行装药参数设计时,首先利用VLW状态方程方法计算出主装药和点火药的火药力和余容等燃烧性能参数,选定点火药(B/KNO₃)量,根据诺贝尔-阿贝尔方程(4)式可推导出主装药药量计算公式(5)。根据(5)式计算了不同输出压力做功元件的主装药量,结果见表2。

$$\frac{p_m}{\Delta} = f + \alpha_i p_m \quad (4)$$

$$\omega_{i2} = \frac{p_m V_0 - \omega_{i1} (f_{i1} + p_m \alpha_{i1})}{f_{i2} + p_m \alpha_{i2}} \quad (5)$$

式中: Δ 为装填密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; α_i 为某炸药或火药燃烧产物的余容值(由密闭爆发器实验或热力学计算获得), $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$; p_m 为设计输出压力,MPa; V_0 为燃烧室总容积, cm^3 ; ω_{i2} 、 ω_{i1} 分别为主装药和点火药的装药质量,g; f_{i2} 、 f_{i1} 分别为主装药和点火药的火药力, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$; α_{i2} 、 α_{i1} 分别为主装药和点火药的余容, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

表2 装药参数设计值

Table 2 The design results of combustion charges

design request			calculation results
p/MPa	burning volumm/ cm^3	(B/KNO ₃)/g	RDX/g
384 ± 30	1	0.2	0.199
19 ± 30	1	0.2	0.0995

表3 燃烧最大压力的设计值和实测值的比较

Table 3 The comparison between predicted and tested maximum pressures of combustion

No.	experimental condition			$p_{\text{cal.}}/\text{MPa}$	$p_{\text{test}}/\text{MPa}$
	burning volumm (B/KNO ₃)	V_0/cm^3	RDX/g		
1-1	1	0.2	0.0995	192	191.5
1-2	1	0.2	0.0995	192	175.3
1-3	1	0.2	0.0995	192	170.6
2-1	1	0.2	0.199	384	350.6
2-2	1	0.2	0.199	384	349.4
2-3	1	0.2	0.199	384	344.2

做功元件最大输出压力的设计值与实验值对比见表3,在1 cm³燃烧容积中,点火药(B/KNO₃)为0.2 g,主装药(RDX)为0.0995 g,最大输出压力设计值为192 MPa,实验平均值为179 MPa;点火药(B/KNO₃)为0.2 g,主装药(RDX)为0.199 g,最大输出压力设计值为384 MPa,实验平均值为348 MPa,计算结果与实验结果相对偏差最大为11%。

5 结束语

利用VLW状态方程方法计算了B/KNO₃点火药及主装药RDX的火药力、余容,结合诺贝尔-阿贝尔方程,根据燃烧容积和压力输出要求,计算了做功元件主装药药量。实验结果表明,最大压力输出预估值与实测值接近,表明采用VLW状态方程方法指导做功元件装药量设计是可行的。VLW状态方程方法可以在很短的时间内对多种火炸药的装填密度等进行大量的数值筛选,获得满足压力输出性能的装药量。并且VLW状态方程方法不受做功元件形状、容积等的限制,可以拓展到其他燃烧装药的选择上。

致谢: 试验得到中物院化工材料研究所朱和平、刘川明等大力支持,在此特表谢意。

参考文献:

[1] 吴雄,龙新平,何碧. VLW状态方程的回顾与展望[J]. 高压物理学报,1999,13(1): 55-58.

WU Xiong, LONG Xin-ping, HE Bi. Review and look forward to the

- progress of VLW equation of state[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, 13(1): 55-58.
- [2] WU Xiong. Detonation Parameters of New Powerful Explosives Compounds Predicted with A Revised VLW EOS[A]. Proc. 9th Symposium(Int.) on Detonation[C], 1989. 190-197.
- [3] LONG Xin-ping, WU Xiong. Detonation Parameters of High Energy Density Explosives Predicted with A New Revised VLW EOS[A]. EUROPYRC[C], 1995. 221-229.
- [4] 吴雄. 含能材料能量评价准则的讨论[J]. 含能材料, 1993, 1(1): 21-26.
- WU Xiong. A study on the energy criteria of energetic materials[J]. *Hanneng Cailiao*, 1993, 1(1): 21-26.
- [5] 吴雄. VLW 状态方程在民用炸药计算中的应用[A]. 中国民爆学术会议论文集[C], 1991. 3-7.
- WU Xiong. The Application of VLW EOS in Calculating the Detonation Performance of Domestic Explosives[A]. Proceedings of Symposium on Blasting[C], 1991. 3-7.
- [6] 张双计. 工业炸药爆轰性能的计算[J]. 爆破器材, 1997, 26(2): 6-8.
- ZHANG Shuang-ji. Calculation the Detonation Performance of Industrial Explosives [J]. *Magazine of Blasting Equipment*, 1997, 26(2): 6-8.

Ballistic Parameters Calculation and Closed Combustion Pressure Experiments

REN Peng, ZHU Ming-shui, JIANG Xiao-hua

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To determine the charge parameters of combustion pots in various conditions, VLW EOS method is used to calculate co-volume and impetus of ignition charges and explosive charges. The calculated results together with Nobel-Abel EOS, are used to predict charge parameters of combustion pots for attaining some maximum pressure output. Experiments with 1 cm³ combustion pot indicate that the average maximum pressure output of combustion pots with 0.2 g B/KNO₃ (ignition charge) and 0.0995 g RDX (combustion charge) is 179 MPa, and that of combustion pots with 0.2 g B/KNO₃ and 0.199 g RDX is 348 MPa, respectively close to 192 MPa and 384 MPa which are design values by VLW EOS method.

Key words: explosion mechanics; VLW EOS; numerical simulation; RDX; B/KNO₃

读者·作者·编者

“中国力学学会学术大会 2005”——爆炸力学学术分会征文

中国力学学会将于 2005 年 8 月 26~28 日在北京举办“中国力学学会学术大会 2005(CCTM2005)”。大会将设 12 个分会场和多个 minisymposium, 爆炸力学学术分会由北京理工大学负责。

一、学术交流内容

1. 含能材料起爆机理与爆轰理论;
2. 高速与超高速碰撞问题;
3. 动态载荷作用下材料的损伤、破坏和失效研究;
4. 材料与结构的动态响应行为;
5. 爆炸成型与加工;
6. 爆炸冲击效应与应用;
7. 爆炸与冲击动力学数值模拟理论与方法;
8. 爆炸与冲击动力学实验技术与方法。

二、稿件要求

论文必须是未公开发表的, 语言为中文; 提交 1 页以内 A4 纸的摘要(电子稿), 具体格式参见《力学学报》; 截稿日期为 2005 年 4 月 1 日, 2005 年 5 月 1 日前发录用通知; 录用论文(摘要)将由大会汇集成册, 正式出版。

负责人: 黄风雷教授、张庆明教授

联系人: 陈利、刘彦

通讯地址: 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 100081

电话: 010-68914087 转 11, 010-68914284 **传真:** 010-68461702

e-mail: lichenme@bit.edu.cn; liuyan@bit.edu.cn