

文章编号: 1006-9941(2001)01-0018-04

# CHNO 炸药爆热的影响因素

苗勤书, 徐更光, 王廷增

(北京理工大学机电工程学院, 北京, 100081)

**摘要:** 通过实验数据分析了影响炸药爆热的主要因素。指出装药密度与外壳的材料、厚度是影响炸药爆热测试值的主要外在因素, 本质则是由于产物达到‘冻结’温度时压力的不同对产物化学平衡移动的影响所致。指出炸药的爆热是炸药本身的化学性质, 与使用条件(装药密度、外壳等)有关。

**关键词:** 炸药; 爆热; 爆轰产物

**中图分类号:** O159; TQ564

**文献标识码:** A

## 1 引言

炸药的爆热是影响炸药做功能力的主要参数, 然而炸药爆热的测试结果与多种因素有关, 如对于CHNO炸药, 组分的氧平衡、装药密度、装药外壳的材料和壁厚甚至药柱的起爆方式和形状都对爆热测量值有影响。所以研究炸药爆热的影响因素有利于正确认识以及利用爆热文献数据。本研究探讨了装药密度、装药外壳、氧平衡等因素对炸药的爆热实测值的影响, 试图从爆轰机理上作出解释。

## 2 外壳对爆炸产物的影响

### 2.1 实验结果

根据盖斯定律, 对于某特定装药, 炸药爆热值决定于终态产物的种类和物质的量。为了分析装药外壳对爆热的影响, 表1列出了在带壳及无壳状态下几种炸药的爆轰产物组成, 表2列出了外壳对炸药爆热值的影响。由表1可见, 三种炸药在无外壳情况下气态产物的量都要比有外壳时的大, 例如1 mol TNT无外壳爆炸时气体产物为9.848 mol; 有外壳时气体产物为6.891 mol, 比无外壳时减少约30%。1 mol HMX无外壳爆炸时气体产物为12.131 2 mol, 有外壳时气体产物为10.582 mol, 比无外壳减少约12.8%。而1 mol

PETN无外壳爆炸时气体产物为11.052 2 mol, 有外壳时气体产物为11.02 mol, 与无外壳时基本相当, 其差值在测量误差范围之内。

由此可见, 有外壳时, 气体产物的量较小, 放热量较大; 无外壳时, 产物的量较大, 而放热量减小; 并且炸药的负氧程度越小, 外壳的影响越小。由表2可见, 较厚、密度大的、具有一定延展性的外壳(如金)可使炸药放出的爆热较高。

表1 某些炸药爆轰产物组成的实测值<sup>[1]</sup>

Table 1 Test results of detonation products

炸药	of some explosives						mol
	PETN	PETN	HMX	HMX	TNT	TNT	
实验条件	带壳	无壳	带壳	无壳	带壳	无壳	
密度/g · cm <sup>-3</sup>	1.74	1.74	1.80	1.80	1.53	1.53	
CO <sub>2</sub>	3.39	3.50	1.92	1.44	1.25	0.063	
CO	1.64	1.59	1.06	2.65	1.98	5.89	
CH <sub>4</sub>	0.003	>0.0002	0.039	0.0006	0.099	0.009	
C(s)	无	无	0.97	无	3.65	1.01	
H <sub>2</sub> O(g) <sup>1)</sup>	3.5	3.45	3.18	2.5	1.6	0.17	
H <sub>2</sub>	0.45	0.51	0.3	1.53	0.46	2.31	
N <sub>2</sub>	2.00	2.00	3.68	4.01	1.32	1.36	
NH <sub>3</sub>	0.037	<0.002	0.395	无	0.162	0.022	
HCN	无	无	0.008	0.0006	0.02	0.024	

注: 1) 水在爆轰过程中为气态, 对爆压有贡献, 故计入气态产物。

收稿日期: 2000-09-05; 修回日期: 2000-10-30

作者简介: 苗勤书(1973-), 男, 北京理工大学98级博士研究生, 研究方向为水下兵器用炸药。

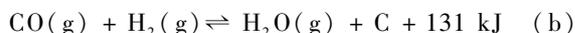
表 2 外壳对炸药爆热的影响<sup>[2,3]</sup>

Table 2 Influence of the charge confinement on detonation heat

炸药	密度 /g · cm <sup>-3</sup>	外壳材料	外壳厚度 /mm	实测爆热 /MJ · kg <sup>-1</sup>
TNT		无		2.810
TNT		玻璃	2.0	4.019
TNT	1.59	黄铜	2.0	4.299
TNT		黄铜	4.0	4.370
TNT		黄铜	5.0	4.383
TNT	1.53	金	12.7	4.576
RDX	1.78	玻璃	2	5.334
RDX		黄铜	4	5.964
6#	1.59	无外壳		6.449
6#	1.59	陶瓷	6	6.516

## 2.2 理论分析

外壳对炸药爆热的影响可用爆轰产物的化学平衡移动,并结合 Ornellas<sup>[2]</sup>等关于产物组分的‘冻结’温度区间来解释。如果在产物的平衡反应过程中存在如下化学反应:



则在温度降低到‘冻结’温度区间(对绝大多数炸药此区间为 1 500 ~ 1 800 K)以前,压力增大使平衡向气态产物体积减小、放出热量的方向(向右)移动;压力减小则使平衡向气态产物体积增大、吸收热量的方向移动。由盖斯定律可知,对一确定的炸药,爆热值决定于爆轰产物的种类和数量。外壳不参加反应,但外壳影响炸药爆炸化学反应的外部条件——温度和压力。由爆轰波的流管理论和散心爆轰波理论<sup>[4]</sup>可知,在爆轰反应区中除了有化学反应释放能量之外,还存在着由于反应区中产物膨胀而产生的能量耗散过程。通常测定爆热时所用的药柱尺寸有限,当爆轰波沿着直径为有限尺寸的药柱传播时,由于侧向稀疏波对反应区的影响而存在能量的耗散。因此,化学反应区中所释放出的能量只有一部分可用来支持爆轰波的传播,引起波阵面上的压力下降。实际上,由于炸药在使用过程中大多达不到其理想直径,因而爆轰波反应区能量的损耗是始终存在的。但外壳的存在抑制了侧向稀疏波的影响,从而减少了反应区的能量损失,使更多能量用于爆轰反应,有利于爆轰的增长与传播,从而提高了爆

速和爆压;爆轰波与较厚重外壳的反射也对爆轰产物压力的增大有贡献,增加了爆轰产物向外膨胀的阻力,延长了爆轰产物高压状态的时间<sup>[5]</sup>。同时由于对外壳做功,由热力学第一定律,产物内能迅速减少,产物温度迅速降低,使得产物平衡组份被‘冻结’在高压态,产物总体积较小,放热量相对较大;相反,无外壳真空测试条件下产物压力下降相对较快而温度下降相对较慢,产物平衡组份被‘冻结’在较低压状态,产物体积较大,放热量较小。前面的实验数据也验证了此规律。陈权<sup>[6]</sup>等人利用此规律成功地提高了爆炸合成金刚石的得率。

值得注意的是,上述三个主要化学平衡方程式的存在是外壳和密度影响爆热的前提条件。由于产物中 NH<sub>3</sub> 的量少,所以前两个方程式的存在是关键。前两个方程式的存在决定于中间产物中 CO 的含量。对于 CHNO 炸药,CO 的生成量主要取决于炸药的氧平衡。通常负氧程度大的,生成 CO 的量也多,方程式(a)、(b)所示的反应越大量存在,炸药的爆热则越易受压力和温度变化的影响。否则密度和外壳的变化将不能影响炸药的爆热。试验数据也反映出外壳和密度对富氧炸药和零氧平衡、微弱负氧平衡的炸药爆热影响甚小。从表 1 可以看出,负氧程度从大到小依次为 TNT, HMX 和 PETN,但产物体积变化大小的顺序则相反。表 2、表 3 也反映了同样的规律性。

表 3 密度对炸药爆热的影响<sup>[1,3]</sup>

Table 3 Influence of the charge density on detonation heat

炸药	密度/g · cm <sup>-3</sup>	氧平衡/%	爆热值/MJ · kg <sup>-1</sup>
TNT	1.50	-74	4.230
TNT	0.85	-74	3.391
Tetryl	1.69	-47.4	4.872
Tetryl	0.98	-47.4	4.032
RDX	1.50	-21.6	5.401
RDX	0.95	-21.6	5.317
HMX	1.80	-21.6	5.462
HMX	1.30	-21.6	5.082
PETN	1.70	-10	5.670
PETN	0.90	-10	5.460
6#	1.46	+16.5	6.675
6#	1.79	+16.5	6.695

氧平衡和爆压是影响炸药爆炸化学反应平衡移动的主要因素,也是影响炸药爆热的最主要因素。外壳则是通过影响产物温度的下降速率影响爆热。

### 3 密度对炸药爆热的影响

从表3可以看出,密度对负氧平衡的炸药有明显影响,同种炸药密度较大时,测量爆热也较大,但随着负氧量的减小,密度对炸药爆热的影响也减小。对于正氧平衡炸药,密度对炸药的爆热几乎没有影响。爆热的经验计算可给出炸药爆热对装药密度的比值与炸药负氧程度系数间的关系式,能同时反映装药密度和氧平衡对炸药爆热的影响。同样,密度对爆热的影响也可由爆压对化学平衡移动的影响以及产物平衡组份的‘冻结’温度解释。

由爆轰理论可知,炸药的爆压为:

$$p_{Cl} = \rho_0 D^2 / (1 + \gamma) \quad (1)$$

式中, $D$ 为炸药爆速, $\gamma$ 为绝热指数, $\gamma$ 随装药密度 $\rho_0$ 的增大而增大。但 $\gamma$ 的增大速率相对小得多。这可从BKW程序的计算结果及大量的实验数据得到<sup>[7]</sup>。炸药的爆压随密度的增加而增大已为大量的实验所证实(对含铝炸药仅限一定的密度范围)。由BKW程序计算可知,在密度较高时,达到‘冻结’温度时产物的压力也较大,对负氧平衡炸药,爆压的增大使得化学平衡向气态产物总体积减小、放热量增大的方向移动,从而爆热增大。

### 4 爆热的经验算法

对于CHNO类炸药,爆热的经验算法有多种<sup>[8]</sup>,但这些计算方法并未明确指出适用的条件。由炸药爆热影响因素的分析可知,对于某一炸药的爆热数据,如不指明其装药密度和测试条件,则可以认为是无意义的。笔者推荐文献<sup>[9]</sup>所提出的经验算法,用该法计算出的爆热值与GJB772A-97规定测试条件下的爆热值近似。对于爆热受密度影响的炸药,目前一般认为爆热与密度成线性关系。结合文献<sup>[3,8,9]</sup>,通过大量炸药爆热数据的分析,发现绝大多数 $C_a H_b N_c O_d$ 炸药的爆热随密度变化为:

$$\varphi = 2186.77x - 22.43 \quad (r = 0.9993) \quad (2)$$

式中, $\varphi$ 为同种炸药在标准测试条件下爆热对密度的比值, $J \cdot cm^3 \cdot g^{-2}$ ;  $x$ 为负氧程度系数,其定义为缺氧原子数与所需总氧原子数的比值,可按 $x = (4a + b - 2d) / (4a + b)$ 计算,其中需氧原子数按C全部生成 $CO_2$ 计,H全部生成 $H_2O$ 计。

炸药的爆热与密度的关系式为:

$$Q_{V\rho} = Q_{Vmax} + \varphi(\rho - \rho_{max}) \quad (3)$$

式中, $Q_{V\rho}$ 为炸药在密度为 $\rho$ 时的爆热, $J \cdot g^{-1}$ ;  $\rho_{max}$ 为炸药的理论密度, $g \cdot cm^{-3}$ ;  $Q_{Vmax}$ 为炸药在理论密度下的爆热, $J \cdot g^{-1}$ 。由于(2)式源于文献<sup>[3,8,9]</sup>,故上述方法计算的爆热值与文献<sup>[3,9]</sup>几乎具有相同的精度。此方法可同时反映出密度和氧平衡对炸药爆热的影响,但对含铝炸药的适用性尚需进一步研究。

### 5 结论与建议

炸药的装药密度和外壳会影响爆热测试值,负氧程度越大,所受影响越大。高装药密度和强约束会导致负氧平衡炸药爆热测试值的提高。产物的化学平衡移动和达到冻结温度时平衡产物组份的冻结是造成爆热变化的内在原因。炸药爆热与具体的装药密度和使用条件相关,爆热的测试数据应同时指明测试条件和相应装药密度。

#### 参考文献:

- [1] 张锦云. 冲击波与爆轰学基础[M]. 北京理工大学教材,1993.
- [2] Ornellas D L. The heat and products of detonation of HMX,TNT,NM and FEFO[J]. J. Phys. Chem.,1968,72(7): 2390-2394.
- [3] 郑孟菊,俞统昌,张银亮. 炸药的性能与测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990. 220~229.
- [4] 孙锦山,朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,1995. 172-182.
- [5] 孙锦山,朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,1995. 291.
- [6] 陈权,马峰,陈鹏万,等. 保护介质对爆轰固相产物生成的影响[J]. 高压物理学报,1998,12(2): 129-133.
- [7] Mader C L. Numerical Modeling of Explosives and Propellants[M]. CRC Press, New York, USA, 1998.
- [8] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1995. 67-100.
- [9] 俞统昌,伊孟超. 混合炸药爆热的经验估算[J]. 火炸药,1984(2): 50-55.

## On the Factors Influencing on the Detonation Heat of CHNO Explosives

MIAO Qin-shu, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng

(*Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China*)

**Abstract:** The main factors influencing on detonation heat of explosives are researched in this paper through analysis of the test data. It has been indicated that charge density, material and thickness of the charge shell are the main exterior factors, while the essence is the influence on the transfer of the chemical equilibrium resulting from the pressure of products at the 'freeze out' temperature. It has also been pointed out that the detonation heat is the mutual coupling result of the chemical property and the application conditions (charge density, shell, etc).

**Key words:** explosive; detonation heat; detonation product