

文章编号: 1001-1455(2014)04-0421-06

DOI: 10.11883/1001-1455(2014)04-0421-06

混合炸药爆速预报的新方法^{*}

韩 早,王伯良
(南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了提高混合炸药爆速尤其是含铝混合炸药爆速的计算精度,基于体积加权法思路构造一种新的混合炸药爆速计算公式,对近 50 种常见的混合炸药配方进行了计算,并与实验值进行对比,结果很好吻合,最大误差低于 3%,平均误差低于 1%,与 BKW 和 Urizar 常用方法相比,计算精度有显著提高。

关键词: 爆炸力学;爆速计算;体积加权法;混合炸药;含铝炸药

中图分类号: O381 **国标学科代码:** 1303510 **文献标志码:** A

爆速是炸药最重要的性能指标之一,混合炸药尤其含铝混合炸药爆速的精确计算,对新型炸药配方设计及应用具有十分重要的意义。常用的炸药爆速预报方法主要分为两大类:一类为基于状态方程方法计算的,例如 BKW(Becker-Kistiakosky-Wilson)^[1]、RUBY^[2]、TIGER^[3]、CHEQ^[4]、CHEETAH^[5]、JCS(Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler)、KHT(Kihara-Hikita-Tanaka)等;另一类以经验方法计算,例如根据 RUBY 代码计算结果归纳的 Kamlet 公式、基于体积加权法得到的 Urizar 公式、氮当量公式、 $\omega\Gamma$ 方法等^[6]。这些计算公式中,较简单的是 Urizar 经验算法,但此方法在计算某些非理想炸药时,计算值与实验值偏差过大。

本文中,为了提高计算精度,在上述基础上提出一种新的炸药爆速计算公式,对近 50 种常见混合炸药进行验算,并制作 6 种高含铝炸药进行实验验证。

1 计算方法描述

1.1 炸药的特征斜率

根据大量爆速数据,部分单质炸药和一部分的混合炸药,在一定密度范围内爆速与密度之间存在着很好的线性关系:

$$D=a+K\rho_0 \tag{1}$$

式中: D 为爆速,km/s, a 、 K 为与炸药有关的常数, ρ_0 为装药密度,k/cm³。部分炸药的常数见表 1^[6]。

表 1 炸药的爆速和爆速方程
Table 1 Equation of detonation velocity

炸药	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{\text{TMD}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_{\text{max}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	a	K
RDX	0.44~1.80	1.816	8.910	2.395	3.589
TNT	1.00~1.65	1.654	7.020	2.256	2.880
HMX	1.00~1.90	1.900	9.080	1.987	3.733
RDX 60/TNT 40	1.02~1.72	1.742	8.066	2.713	3.073
OCTOL	1.21~1.81	1.835	8.516	2.525	3.265

从表 1 可见,此类炸药的爆速跟装药密度之间成正线性关系,密度越接近理论密度,获得的爆速越接近理论爆速。将式(1)中的 K 定义为炸药的特征斜率,并对公式进行变换,将原爆速与 a 、 K 及密度的关系变为与最高爆速 D_{max} 、特征斜率 K 及理论密度之间的关系:

^{*} 收稿日期: 2012-11-29; 修回日期: 2013-03-11
作者简介: 韩 早(1983—),男,博士研究生。

$$D = D_{\max} - K(\rho_{\text{TMD}} - \rho_0)$$

(2)

式中： $D_{\max}$ 为混合炸药最大爆速， ρ_{TMD} 为理论密度， K 为特征斜率。

1.2 Urizar 方法

20 世纪 40 年代后期，有基于体积的加和法，预估混合炸药的爆速的^[7]。根据此法，如果炸药不存在空隙，爆速为：

$$\begin{cases} \epsilon_i = \frac{V_i}{\sum V_i} \\ D_{\max} = \sum \epsilon_i D_i \end{cases}$$

(3)

式中： ϵ_i 为配方 i 组分的体积分数， D_i 为配方 i 的特征爆速， V_i 为配方 i 组分的体积。部分的炸药与添加物的特征爆速见表 2^[7]。

表 2 Urizar 公式中使用的部分特征爆速

Table 2 Characteristic detonation velocities of Urizar formula

材料	$D_i / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho_{\text{TMD}} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
RDX	8.800	1.81
TNT	6.970	1.65
HMX	9.150	1.9
Ethane	5.520	1.20
Teflon	5.330	2.15
Viton A	5.390	1.82
Al	6.850	2.70
AP	6.250	1.95
Air	1.500	—

当混合炸药装药密度与理论密度不同的时候，爆速计算公式变为：

$$D = 0.25D_{\max} + 0.75D_{\max} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{TMD}}}$$

(4)

混合炸药的空隙率为：

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{\text{TMD}}}$$

(5)

将式(5)代入式(4)，得：

$$D = D_{\max} - 0.75D_{\max} \eta$$

(6)

1.3 新型混合炸药爆速公式

从式(6)可以看出，混合炸药爆速 D 与最大爆速 $D_{\max}$ 和空隙率 η 有关，密度与爆速之间呈线性关系。如果混合炸药的组分固定，Urizar 公式的精度由 D_i 与 ρ_{TMD} 所控制。所以，可通过实验数据对式中的 D_i 与 ρ_{TMD} 重新拟合，以提高其计算精度。黄亨建^[8]提出，将普通铝粉的爆速设为 5.545 km/s，替代原先的 6.850 km/s，可以很好地提高含铝炸药爆速计算精度。

在许多非理想的军用混合炸药爆速计算中，发现 Urizar 公式有以下两个主要缺点：首先，非理想军用混合炸药密度与爆速之间线性关系并不是很强，例如低密度情况下精度不高；其次，含铝的非理想炸药在实际的爆轰测试中，计算值往往比实验值偏高。这是由于，非理想炸药中铝粉在 CJ 面时并未完全反应，在动力学上起到了稀释浓度的作用，并且消耗一定的能量，使炸药的整体爆速（和爆压）降低，而 Urizar 经验方法仅将铝粉看作单一的惰性添加物。

针对以上的问题，经过大量的计算与分析，结合炸药的特征斜率与混合炸药体积加权法，在原先混合炸药爆速计算公式中，增加一个特征斜率参数提高计算的精度。提出如下的混合炸药爆速计算新公式，同时修改了部分炸药的特征爆速，使该方法能显著提高在计算含铝炸药以及低密度炸药爆速方面的

精度：

$$\begin{cases} D_{\max} = \sum \epsilon_i D_i \\ K = (1 - \eta) \sum K_i \epsilon_i + K_{\min} \eta \\ D = D_{\max} - K \rho_{\text{TMD}} \eta \end{cases} \quad (7)$$

式中： ϵ_i 为*i*组分的体积分数， D_i 为*i*组分的特征爆速， K_i 为*i*组分的特征斜率， $K_{\min}$ 为*i*组分之内最小的特征爆速， η 为空隙率。部分材料的特征爆速与特征斜率见表 3。

表 3 部分物质的特征爆速与特征斜率
Table 3 Characteristic slope of some materials

炸药	$D_{\max}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	K	$\rho_{\max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
TNT	7.020	2.880	1.654
RDX	8.800	3.744	1.816
HMX	9.182	4.506	1.905
PETN	8.300	3.460	1.770
Al(Ⅰ)	5.545	3.500	2.700
Al(Ⅱ)	6.850	5.000	2.700
WAX	6.800	4.523	1.090
Viton A	5.390	2.188	1.820
Graphite	5.400	0.930	2.250

2 新方法计算应用

根据新的爆速计算方法编制计算程序，分别对普通军用混合炸药、含铝非理想混合炸药、低密度混合炸药进行计算，结果见表 4~6。

D_{exp} 为文献中实测爆速数据， D_{BKW} 为 BKW 方法计算结果， D_{Urizar} 为 Urizar 方法计算结果， D_{new} 为新方法结果。

表 4 采用新方法计算的普通混合炸药爆速计算结果
Table 4 Comparison of detonation velocity calculated by the new method with other method

No.	炸药	$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D_{\text{exp}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{\text{BKW}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\epsilon_{\text{BKW}}/\%$	$D_{\text{new}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\epsilon_{\text{new}}/\%$
1	Comp B(RDX 64/TNT 36)	1.713	8.03	8.08	0.62	8.04	0.12
2	Comp B(RDX 60/TNT 40)	1.700	7.80	—	—	7.71	−1.15
3	Octol (HMX 76.3/TNT 23.7)	1.809	8.47	8.55	0.94	8.50	0.35
4	Octol (HMX 72.4/TNT 27.6)	1.810	8.48	—	—	8.47	−0.12
5	CYCLOTOL (RDX 77/TNT 23)	1.743	8.25	8.31 ¹⁾ 7.91 ²⁾	0.73 −4.12	8.31	0.73
6	HBX-O(RDX 48.9 /TNT 46.1/WAX 5)	1.620	—	7.60 ¹⁾ 7.33 ²⁾	—	7.65	—
7	Pentolite (PETN 50/TNT 50)	1.650	7.46	7.74 ¹⁾ 7.47 ²⁾	3.75 0.13	7.47	0.13
8	EDC-24(HMX 95/WAX 5)	1.776	8.71	8.63	−0.92	8.70	−0.11
$\bar{\epsilon}$					1.54		0.39

1)RDX 爆速；2)TNT 爆速。

表 5 采用新方法计算的含铝非理想炸药爆速计算结果

Table 5 Comparison of detonation velocity calculated by the new method with other method

No.	炸药	$\rho_0 /$	$D_{\text{exp}} /$	$D_{\text{BKW}} /$	$\epsilon_{\text{BKW}} / \%$	$D_{\text{Urizar}} /$	$\epsilon_{\text{Urizar}} / \%$	$D_{\text{new}} /$	$\epsilon_{\text{new}} / \%$
		$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$		$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$		$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	
9	RDX 90/Al 10	1.68	8.03 ^[9]	8.08 ^[9]	0.62	7.96	−0.87	7.97	−0.75
10	RDX 80/Al 20	1.73	7.77 ^[9]	7.81 ^[9]	0.51	7.81	0.51	7.74	−0.39
11	RDX 70/Al 30	1.76	7.58 ^[9]	7.49 ^[9]	−1.19	7.56	−0.26	7.40	−2.37
12	RDX 60/Al 40	1.84	7.20 ^[9]	6.93 ^[9]	−3.75	7.45	3.47	7.22	0.88
13	RDX 50/Al 50	1.89	6.81 ^[9]	5.78 ^[9]	−15.12	7.23	6.17	6.87	0.88
14	TNT 89.4/Al 10.6	1.72	7.05 ^[9]	7.02 ^[9]	−0.43	6.96	−1.28	7.06	0.14
15	TNT 78.3/Al 21.7	1.80	7.05 ^[9]	6.59 ^[9]	−6.52	6.95	−1.42	7.04	−0.14
16	TNT 67.8/Al 32.2	1.89	7.05 ^[9]	6.36 ^[9]	−9.79	6.95	−1.42	7.08	0.43
17	TNT 80/Al 20	1.72	6.70 ^[9]	—	—	6.75	0.75	6.65	−0.75
18	HBX-1	1.72	7.22	7.27	0.69	7.39	2.35	7.35	1.80
19	HBX-1	1.71	7.31 ^[9]	7.38 ^[9]	0.96	7.35	0.55	7.31	0
20	HBX-3	1.84	7.12 ^[9]	6.91 ^[9]	−2.95	7.24	1.69	6.99	−1.83
21	HBX-3	1.81	6.91	6.85	−0.87	7.15	3.47	6.88	−0.43
22	Alex20	1.801	7.53	7.49	−0.53	7.68	1.99	7.56	0.4
23	Alex32	1.88	7.30	7.06	−3.29	7.53	3.15	7.34	0.55
24	DESTEX	1.68	6.65	6.44	−3.17	6.69	0.60	6.65	0
25	RDX 42.1/TNT 42.1 /WAX 0.8/Al 15	1.757	7.49 ^[6]	—	—	7.53	0.53	7.46	−0.40
26	RDX 42.1/TNT 42.1 /WAX 0.8/Al 15	1.759	7.51 ^[6]	—	—	7.53	0.27	7.47	−0.53
27	Tropex	1.81	7.49	—	—	7.60	1.47	7.51	0.27
28	RDX 41/TNT 41 /Al 18	1.81	7.53	—	—	7.59	0.80	7.50	−0.40
29	H6	1.71	7.19	7.23	0.56	7.35	2.23	7.26	0.97
30	RDX 76/Al 20 /WAX 4	1.77	8.08 ^[6]	—	—	7.93	−1.86	7.96	−1.49
31	Al-X(HMX 51 /氟橡胶 9/Al 40)	2.00	7.05 ^[6]	—	—	7.59	7.66	7.04	−0.14
32	HMX 85/氟橡胶 15	1.86	8.46 ^[6]	—	—	8.44	−0.24	8.44	−0.24
$\bar{\epsilon}$					3.10		1.75		0.663

表 6 采用新方法计算的低密度混合炸药爆速计算结果

Table 6 Comparison of detonation velocity calculated by the new method with other method

No.	炸药	$\rho_0 /$	$D_{\text{exp}} /$	$D_{\text{Urizar}} /$	$\epsilon_{\text{Urizar}} / \%$	$D_{\text{new}} /$	$\epsilon_{\text{new}} / \%$
		$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$		$(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	
33	RDX 45/TNT 30/Al 25	1.15	4.60 ^[6]	5.47	18.91	4.58	−0.43
34	RDX 60/TNT 40	1.00	5.65 ^[6]	5.45	−3.54	5.61	−0.71
35	TNT	1.44	6.35 ^[6]	6.30	−0.79	6.42	1.10
36	TNT 85/Al 15(270 μ)	1.44	6.07 ^[6]	6.03	−0.66	6.03	−0.66
37	TNT 85/Al 15(0.2 μ)	1.44	5.75 ^[6]	6.03	4.87	5.90	2.61
38	TNT 85/Al 15(270 μ)	1.69	6.76 ^[6]	6.99	3.40	6.72	−0.59
39	TNT 85/Al 15(0.2 μ)	1.69	6.84 ^[6]	6.99	2.19	6.85	0.15
$\bar{\epsilon}$					4.80		0.94

新计算方法对普通军用混合炸药的爆速预估最大误差在 1% 以内,平均误差小于 0.5%,优于 BKW 方法,Urizar 方法的计算结果与新方法差别不大,未在表中列出;对非理想含铝炸药计算的绝对误差控制在 3% 以内,平均误差小于 1%,明显优于 BKW 和 Urizar 方法;对部分低密度混合炸药计算误差控制在 3% 以内,平均误差小于 1%,优于 Urizar 方法。

3 新公式验证

为了进一步验证各类公式的精度,制作了 5 组 RDX 基含铝混合炸药,其中 $w(\text{Al})=0.2\sim0.6$, $w(\text{RDX})=0.34\sim0.74$, $w(\text{添加剂})=0.06$ 。按照 GJB 772A-1997《炸药试验方法》中爆速测试方法进行测试,测试与预报结果见表 7。

表 7 含铝炸药实验验证计算结果
Table 7 Comparison of detonation velocity calculated by the new method with other method

No.	炸药	$\rho_0 /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D_{\text{exp}} /$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_{\text{Urizar}} /$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\epsilon_{\text{Urizar}} / \%$	$D_{\text{new}} /$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\epsilon_{\text{new}} / \%$
40	RDX 74/Al 20/添加剂 6	1.68	7.57	7.41	-2.11	7.51	-0.79
41	RDX 64/Al 30/添加剂 6	1.74	7.28	7.27	-0.14	7.27	-0.14
42	RDX 54/Al 40/添加剂 6	1.80	6.89	7.12	3.34	7.01	1.74
43	RDX 44/Al 50/添加剂 6	1.86	6.88	6.92	0.58	6.69	-2.76
44	RDX 34/Al 60/添加剂 6	1.94	6.58	6.77	2.89	6.43	-2.28
$\bar{\epsilon}$					1.76		1.33

新方法在计算高含铝量炸药以及高添加剂配方时,最大误差不超过 3%,平均误差为 1.33%,优于现有的 Urizar 方法。

4 结 论

- (1)通过对现有 Urizar 的分析总结,综合建立了一套新的基于特征斜率的新计算方法;
- (2)对现有的几十种普通、高含铝及低密度的军用混合炸药进行计算,计算值与实验值良好吻合,精度较高;同时制作 6 个含铝配方对该公式进行验证,计算结果均优于现有的 Urizar 公式;
- (3)混合炸药计算公式不仅可以计算普通的军用混合炸药的爆速,而且适用于非理想度较高的含铝炸药,精度完全符合工程使用需要;该公式在传统体积加和公式的基础上进行了扩展,使用方法简单,易于推广。

参考文献:

[1] Mader C L. Numerical modeling of explosives and propellants[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008:31-63.
[2] Levine H B, Sharples R E. Operator's manual for RUBY[R]. Livermore CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1962.
[3] Cowperthwaite M, Zwisler W H. TIGER computer program documentation[R]. Stanford Research Institute, 1973.
[4] Nichols A L, Ree F H. CHEQ 2.0 user's manual[R]. Livermore CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1990.
[5] Fried L E. CHEETAH 1.0 user's manual[R]. University of California, 1994.
[6] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995:234-237.
[7] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL explosives handbook[R]. Livermore CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985:8-10.
[8] 黄亨建,黄辉,李尚斌. 含铝炸药爆速计算中特征爆速的选取[J]. 含能材料,2004,12(增刊 2):444-447.
Huang Heng-jian, Huang Hui, Li Shang-bin. Selection of characteristic detonation velocity calculation of detona-

tion velocity of aluminized explosives[J]. *Energetic Materials*, 2004,12(suppl 2):444-447.

[9] Keshavarz M H. New method for predicting detonation velocities of aluminized explosives[J]. *Combustion and Flame*, 2005,142(3):303-307.

A new method for predicting detonation velocity of composite explosive*

Han Zao, Wang Bo-liang

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to predict detonation velocity of composite explosive accurately (esp. aluminium-containing explosive), a new equation of predicting detonation velocity of composite explosive was derived in the weighted-volume method. With the new equation, prediction of detonation velocity was carried out for more than 50 kinds of composite explosive. The predictions show a good agreement with the experiment data. The maximum error of prediction was less than 3%. The average error of prediction was less than 1%. Compared with that of commonly used methods such as BKW and Urizar, the prediction accuracy of the new equation was significantly improved.

Key words: mechanics of explosion; prediction of detonation velocity; weighted-volume method; composite explosive; aluminium-containing explosive

* Received 29 November 2012; Revised 11 March 2013
Corresponding author: Wang Bo-liang, boliangwang@163.com

(责任编辑 丁 峰)

本刊关于稿件、版权等声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中,作者需注意如下问题:

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果,无抄袭,无一稿多投,未在国内外公开发表过。
2. 稿件无政治错误,不涉及保密和拟申请专利的内容,已经过作者单位保密审查。
3. 作者署名和排序无异议,单位署名和排序无争议,且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中,如有作者或单位署名变更,需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。
4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时,编辑部将在 4 个月内反馈处理结果。若超过 4 个月未答复的,作者有权另行处理稿件,但需事先通知编辑部。
5. 对录用的稿件,在尊重稿件内容的基础上,编辑部有权作必要的修改和删减,按规定进行标准化和规范化。
6. 稿件录用后,稿件的所有出版版权归编辑部。
7. 稿件发表后,编辑部赠送样刊,并一次性付给作者稿酬及版权转让费。