文章编号：1000-5773(2008)03-0329-04

未反应炸药冲击绝热线的近似计算*

傅 华，李金河，谭多望，李 涛

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：综合考虑了炸药作为一类多组分和疏松材料的特点，在已知炸药各组分冲击绝热参数的条件下，利用叠加原理和疏松材料冲击绝热线的计算方法，对未反应炸药的冲击绝热线进行了计算。计算结果与实验数据符合较好。

关键词：未反应炸药；叠加原理；疏松材料；冲击绝热线

中图分类号：O347 **文献标识码**：A

1 引 言

武器战斗部中应用广泛的炸药，如塑料粘结炸药(Plastic Bonded Explosives, PBXS)，是以炸药晶体为主体炸药，以一种或几种高聚物做粘结剂，加入添加剂，经不同的工艺制备而成，在制备过程中由于粘结剂的包履不全或裂纹的产生，炸药内部含有大量的孔穴，因此大多数炸药是一类多组分的疏松材料。

炸药的冲击绝热线是炸药性能的基本参数，它对于研究炸药的冲击引爆和确定化学反应速率函数，以及进行爆轰数值模拟是不可缺少的，对理解爆轰反应区的结构具有重要意义。在一定条件下其形式可为线性关系式

$$u_s = c_0 + \lambda u_p \tag{1}$$

式中：u_s 为炸药中冲击波速度；u_p 为炸药中冲击波波阵面后的粒子速度；c_0 和 λ 为炸药冲击绝热线关系式的待定系数。

本工作综合考虑了炸药作为一类多组分和疏松材料的特点，利用叠加原理和疏松材料冲击绝热线的计算方法，对未反应炸药的冲击绝热线进行了计算。

2 叠加原理

未反应炸药作为一类多组分非均匀介质，组分材料的性能直接影响炸药的冲击绝热线。一般认为混合物的物态方程服从叠加原理[1]：在冲击压缩下，混合物内各组分之间的初始压力差，在压力扰动的快速传播中(以声速)很快达到压力平衡状态，使各组分最终处于同一压力下。由两种或两种以上组分组成，并且在压缩过程中不发生化学反应的材料，如岩石、各种塑料粘结固体、钨铜合金、未反应炸药等，均属于此类材料。

在多组分混合物的情况下，叠加原理的基本表达式为

$$v(p) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i v_i(p) \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1 \tag{3}$$

式中：α_i 为第 i 种组分的质量分数，v_i 为第 i 种组分的比容，$v_i(p)$ 为第 i 种组分的冲击绝热线关系式。

* **收稿日期**：2007-09-26；**修回日期**：2007-11-28

作者简介：傅 华(1979—)，男，助理研究员，主要从事爆轰理论及其应用研究. E-mail：fmyfuhua@163.com

由(2)式、(3)式可知,已知各组分材料的冲击绝热参数,即可获得混合物的冲击绝热线。

根据冲击波的质量、动量守恒关系有

$$u_s - u_0 = v_0 \sqrt{(p - p_0)/(v_0 - v)} \tag{4}$$

$$u_p - u_0 = (v_0 - v) \sqrt{(p - p_0)/(v_0 - v)} \tag{5}$$

式中:v_0、p_0、u_0 分别是混合物内冲击波阵面前方的初始比容、压力、粒子速度,通常忽略常压影响,$p_0 \approx 0$,且 $u_0 = 0$,p、v 分别是混合物冲击波阵面后方的压力、比容。

由(4)式可以直接写出各组分的冲击波速度关系式

$$v_{i0}^2 \frac{p}{u_{si}^2} = v_{i0} - v_i \tag{6}$$

由叠加原理改写为

$$p \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i v_{i0}^2}{u_{si}^2} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i (v_{i0} - v_i) = v_0 - v \tag{7}$$

最后得到混合物的冲击波速度 u_s 的关系式

$$\frac{v_0^2}{u_s^2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i v_{i0}^2}{u_{si}^2} \tag{8}$$

式中:u_{si}、v_{i0} 分别是第 i 种组分的冲击波速度、比容。

同理,可由(5)式获得混合物的粒子速度 u_p 的关系式

$$u_p^2 = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i u_{pi}^2 \tag{9}$$

式中:u_{pi} 是第 i 种组分的粒子速度。

3 疏松材料冲击绝热线的计算

已知炸药各组分的冲击绝热参数,通过(8)式、(9)式可初步预估未反应炸药的冲击绝热线,但由于炸药在压制或浇铸过程中孔洞和微裂纹的存在,炸药是典型的疏松材料,炸药内部的孔穴对冲击绝热线关系的影响不可忽略。

20 世纪 90 年代初,S. S. Batsanov 等人提出了计算疏松材料冲击绝热线的方法[2-3],假定疏松材料中的孔穴为空气,在单位质量疏松材料中,密实材料占有的体积为 v_0,而孔穴的体积为 v_v。则单位质量疏松材料的总体积(比容)为 $v_{00} = v_0 + v_v$。其次,假定冲击压缩疏松材料时的总内能可以表达为密实材料的冲击压缩能和孔穴塌缩能之和。若冲击压缩时孔穴中的空气(初始体积为 v_v)被绝热压缩,达到极限压缩度 h(终态体积为 v_v/h),利用多方体积的压缩特性有

$$h = (k + 1)/(k - 1) \tag{10}$$

式中:k 为空气的多方指数(对空气 $k = 1.4$)。由此得到孔穴塌缩需要做功的关系式

$$p_H (v_v - v_v/h) = 2 p_H v_v/(k + 1) \tag{11}$$

式中:p_H 为冲击波压力。把疏松材料看作密实材料与空气的混合物,疏松材料的总动能应等于两者动能之和。利用冲击波压缩总功均匀分配于内能和动能的特点,单位质量疏松材料的总能量等于

$$u^2 = u_p^2 + 2 p_H v_v/(k + 1) \tag{12}$$

式中:u 和 u_p 分别为疏松材料和密实材料的粒子速度。等号左方表示冲击波压缩疏松材料时所做的总功,包括内能和动能两部分,等于动能的两倍;右方第一项表示密实材料被压缩时冲击波做的总功,等于密实材料动能的两倍。第二项为孔穴被压缩时冲击波做的功。由疏松度的定义得

$$m = v_{00}/v_0 \tag{13}$$

于是(12)式简化为

$$u^2 = u_p^2 + 2 p_H v_0 (m - 1)/(k + 1) \tag{14}$$

上式给出了疏松材料的粒子速度 u 随着疏松度 m 的变化关系。已知密实材料的粒子速度 u_p,由密实材料的冲击绝热线获得 p_H 后,即可由(14)式计算疏松材料的粒子速度 u。

4　未反应炸药 Hugoniot 关系的计算

炸药作为一类多组分的疏松材料,在冲击压力作用下各组分的压力很快达到平衡,粒子速度也趋于相同[4]。即混合物与各组分粒子速度的关系为

$$u_{\mathrm{p}} = u_{\mathrm{p}i} \tag{15}$$

由(1)式、(8)式、(9)式、(13)式和(14)式,最终未反应炸药的粒子速度 u 和冲击波速度 u_{s} 有

$$\begin{aligned} u^2 &= u_{\mathrm{p}}^2 + 5u_{\mathrm{s}}u_{\mathrm{p}}(\rho_0/\rho_{00} - 1)/6 \\ u_{\mathrm{s}} &= p_{\mathrm{H}}/\rho_{00}u \end{aligned} \tag{16}$$

式中:$p_{\mathrm{H}} = \rho_0 u_{\mathrm{s}} u_{\mathrm{p}}$,$\rho_0$ 是把炸药看作密实材料的密度,即最大理论密度,ρ_{00} 是炸药的实测密度。已知各组分的冲击绝热参数,采用(16)式可计算未反应炸药的冲击绝热线。

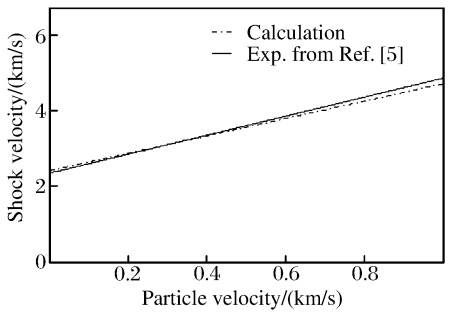
5　计算结果对比

采用(16)式,分别对混合炸药 PBX9011($w_{\mathrm{HMX}} = 90\%$,$w_{\mathrm{Estane}} = 10\%$)、94TATB/6 Estane($w_{\mathrm{TATB}} = 94\%$,$w_{\mathrm{Estane}} = 6\%$)、CompB-3($w_{\mathrm{RDX}} = 60\%$,$w_{\mathrm{TNT}} = 40\%$)的冲击绝热线关系进行了计算。炸药各组分的冲击绝热参数[6]见表 1,计算结果如图 1～图 3 所示。

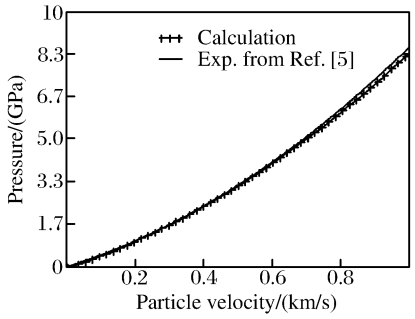
表 1　炸药组分冲击绝热参数

Table 1　Hugoniot parameter of components

No.	Component	$\rho_{00}/(\mathrm{g/cm^3})$	Hugoniot
1	HMX	1.903	$u_{\mathrm{s}} = 0.274 + 2.60u_{\mathrm{p}}$
2	TATB	1.876	$u_{\mathrm{s}} = 0.179 + 2.71u_{\mathrm{p}}$
3	RDX	1.799	$u_{\mathrm{s}} = 0.278 + 1.90u_{\mathrm{p}}$
4	TNT	1.614	$u_{\mathrm{s}} = 0.239 + 2.50u_{\mathrm{p}}$
5	Estane	1.186	$u_{\mathrm{s}} = 0.232 + 1.70u_{\mathrm{p}}$



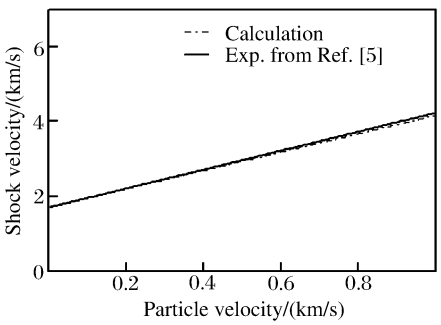
(a) Shock velocity versus particle velocity



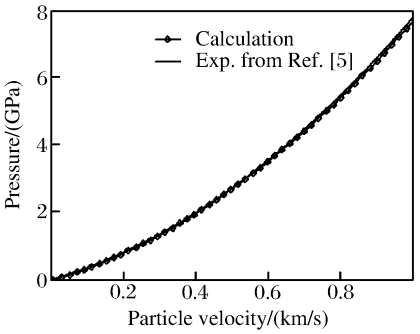
(b) Shock pressure versus particle velocity

图 1　PBX 9011 炸药冲击绝热关系

Fig. 1　PBX 9011 Hugoniot plots



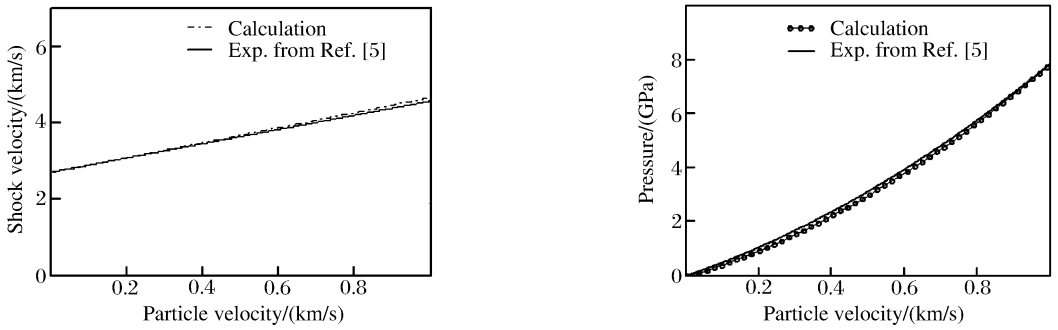
(a) Shock velocity versus particle velocity



(b) Shock pressure versus particle velocity

图 2　94 TATB/6 Estane 炸药冲击绝热关系

Fig. 2　94 TATB/6 Estane Hugoniot plots



(a) Shock velocity versus particle velocity (b) Shock pressure versus particle velocity

图 3 Comp B-3 炸药冲击绝热关系

Fig. 3 Comp B-3 Hugoniot plots

对 3 种典型炸药的计算结果与文献实验数据[5]进行了比较,仅 PBX 9011 炸药的计算结果与实验数据有较小差异,其它两种炸药的计算结果与实验数据均符合较好。说明应用本文所述方法,可对不同组分、不同配比的未反应炸药的冲击绝热线进行近似计算。由于文献[5]未给出冲击绝热关系的实验范围,在使用本文方法计算时,冲击强度不应超过炸药的反应阈值。

6 结 论

综合考虑了炸药作为多组分和疏松材料的特点,在已知炸药各组分冲击绝热参数的情况下,利用叠加原理和计算疏松材料冲击绝热线的方法,对未反应炸药的冲击绝热线进行了计算,计算结果与实验数据具有较好的一致性,说明(16)式可用于未反应炸药冲击压缩相关参数的预估。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State(2nd ed) [M]. Beijing:Science Press,1999:197-198. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第 2 版) [M]. 北京:科学出版社,1999:197-198.

[2] Batsanov S S. Effects of Explosions on Materials [M]. New York:Springer-Verlag,1994.

[3] Tang H. Introduction to Experimental Shock Wave Physics [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2007:33-34. (in Chinese)
谭 华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京:国防工业出版社,2007:33-34.

[4] Milne A M,Bourne N K. The Unreacted Hugoniots of Three Plastic Bonded Explosives [A]//Shock Compression of Condensed Matter [C]. Maryland:American Institute of Physics(AIP),2005:175-178.

[5] Gibbs T R,Popolto A. LASL Explosive Property Data [Z]. California:University California Press,1980.

[6] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. California:University of California Press,1980.

Calculation of the Hugoniot of Unreacted Explosives

FU Hua,LI Jin-He,TAN Duo-Wang,LI Tao

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

Abstract: With considering unreacted explosives as composite and porous materials media,the shock Hugoniot of several typical explosives are calculated by using plus principle and calculation method of the Hugoniot of porous materials. The calculation results are in good agreement with the experimental data.

Key words: unreacted explosives;plus principle;porous materials;shock Hugoniot