文章编号:1000-5773(2010)03-0181-06

固液混合装药热传导特性对其安全性影响的计算研究*

段 云[1,2],张 奇[1],向 聪[1],庞 磊[1],李 伟[1],何 宁[1]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.北京矿冶研究总院,北京 100044)

摘要:固液混合装药物理参数是影响装药安全性的主要因素之一,利用混合炸药计算物理参数的方法,计算了几种典型配比装药的物理参数,根据能量守恒方程对不同物理参数的装药进行数值模拟。计算得到:在温度载荷相同的条件下,不同的物理参数对其温度响应有较大的差别,说明分析固液混合装药安全性时,应考虑装药不同比例对其安全性的影响,才能真实反应热点能量演化过程,为分析固液混合装药的安全性提供一定的理论依据。

关键词:固液混合装药;物理参数;装药安全性;数值计算;燃料空气炸药
中图分类号:O389;TQ564.4 **文献标识码**:A

1 引 言

固液混合装药是 FAE(燃料空气炸药)武器一次引爆的主要装填燃料,其组分一般由金属颗粒、液态燃料和粘结剂等组成[1]。由于爆炸时具有高温高压等特点,已被广泛用于导弹、反坦克弹和火箭弹等武器弹药中。然而,随着武器向三高(高初速、高过载、高装填密度)方向的发展,固液混合装药在发射过程中多次发生早爆、早炸等安全性事故,严重地阻碍了高性能武器的发展。因此,研究固液混合装药的发射安全性对 FAE 武器向三高方向的发展具有重要意义。

导致炸药装药发生早炸的因素有很多,而孔隙压缩形成热点是众多因素中最主要的因素,许多学者[2-3]对其进行了研究,内容基本是基于热传导的能量守恒方程,不同的只是假设条件和边界条件的设定。而能量守恒方程中最重要的就是装药物理参数的确定,在单质炸药中可以假设为常量,对于固液混合装药,随着组分比例的不同,其计算结果相差较大,关于这方面的研究,到目前还很少看到文献报道。只有文献[4]指出,装药的材料和物理参数对于装药形成热点具有强烈的影响。所以,笔者认为:如果物理参数选取不当,计算结果可能无任何参考价值。本研究选取不同物理参数对其形成热点进行计算,计算发现,正确选取物理参数是分析热点演化机理的关键因素,只有选取合理的物理参数,计算结果才能真实反映热点的演化过程,从而为研究 FAE 装药的安全性提供理论指导。

2 物理参数的计算

影响炸药安全性的物理参数主要有比热容、热导率和密度,对于单质炸药的物理参数可以利用微热量热法和差示扫描量热法进行测定[5],文献[6]中已给出部分炸药的物理参数。而对于由固液混合燃料

* **收稿日期**:2009-06-09;**修回日期**:2009-09-14
基金项目:国家自然科学基金(10772029);北京理工大学资助项目(20070242003)
作者简介:段 云(1978—),男,博士,主要从事安全理论与技术、战斗部技术研究. E-mail:yduan_nmg@yahoo.com.cn
通讯作者:张 奇(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事爆炸力学及其应用研究. E-mail:qzhang@bit.edu.cn

组成的混合炸药，物理参数不仅取决于固、液比例，而且随存储时间发生变化，一般测试结果很难反映实际装药的真实物理特性。为此，本研究采用计算混合炸药的加合法则对其进行计算。混合炸药的比热容、热导率如(1)式、(2)式[7]。取文献[8]中的一种固液混合燃料进行计算，设固液混合炸药的配方组成为 NM/Al=a/b(质量比)，取 3 种组分比例为：60/40、50/50、64/36，表 1 是各种炸药的物理参数以及根据(1)式、(2)式计算得到的参数。

$$c=\sum m_i c_i/\sum m_i=\sum \omega_i c_i \tag{1}$$

式中：c 为混合炸药的比热容，J/(g·K)；c_i 为混合炸药中 i 组分的比热容，J/(g·K)；m_i 为混合炸药中 i 组分的质量。

$$\lambda=\sum m_i\lambda_i/\sum m_i=\sum \omega_i\lambda_i \tag{2}$$

式中：ω_i 为混合炸药中 i 组分的质量分数；λ 为混合炸药的导热系数，W/(m·K)；λ_i 为混合炸药中 i 组分的导热系数，W/(m·K)。

表 1 含能材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of energetic materials

Component	Specific heat/[J/(g·K)]	Thermal conductivity/[W/(m·K)]	Density/(g/cm^3)
NM	1.71	0.18	1.125
Al	0.987	210	2.69
TNT	1.17	0.213	1.57
FAE(60/40)	1.42	84.11	1.47
FAE(50/50)	1.35	105.09	1.47
FAE(64/36)	1.45	79.92	1.47

3 物理模型

战斗部在发射过程中，由于发射载荷的作用，在装药内部产生应力波的传播，由于应力作用使孔隙压缩温度升高，孔隙温度升高提高了附近装药的温度，导致孔隙附近炸药温度升高还有装药的剪切流动摩擦生热和装药化学反应热的贡献。要完全描述这些外部作用对孔隙附近炸药的作用比较复杂，但其本质是一样的，都是装药对温度载荷的响应过程。为此，本研究选择孔隙与装药为研究对象，孔隙压缩生热和摩擦生热假设为边界温度载荷，观测装药的温度响应过程，图 1 是孔隙模型图。根据能量守恒定律，得到孔隙附近装药热传导的控制微分方程如下[9]

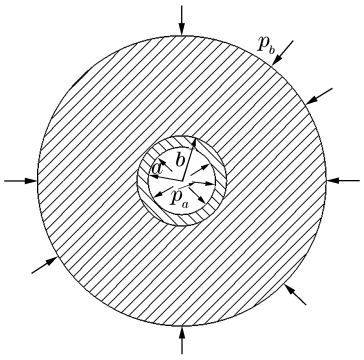


图 1 孔隙模型图

Fig. 1 Pore model

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{xx}\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{yy}\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{zz}\frac{\partial T}{\partial z})+\dot{q}=\rho c\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial T}{\partial t}+V_x\frac{\partial T}{\partial x}+V_y\frac{\partial T}{\partial y}+V_z\frac{\partial T}{\partial z}$$

式中：V_x、V_y、V_z 为介质热传导速率。c 是装药的定压比热容，J/(g·K)；ρ 是装药密度，g/cm^3；T 是温度，λ 是装药的热导率，W/(m·K)。本研究主要研究不同物理参数对固液混合装药的传热行为，假设固液混合装药各项同性，即各个方向的热导率相等，所以 $\lambda_{xx}=\lambda_{yy}=\lambda_{zz}$；固液混合装药内部没有内热源，即 $\dot{q}=0$。选取孔隙半径为 2、4、6 mm 3 种情况对其进行计算。

4　热点温度载荷

含能材料在外界载荷作用下发生早炸等安全性事故的危险因素有许多,但研究者一致认为孔隙是最主要的危险源,其机理是孔隙压缩温度升高导致爆炸。本研究为了分析装药形成热点的过程,采用如图 2 所示的温度载荷为边界条件。

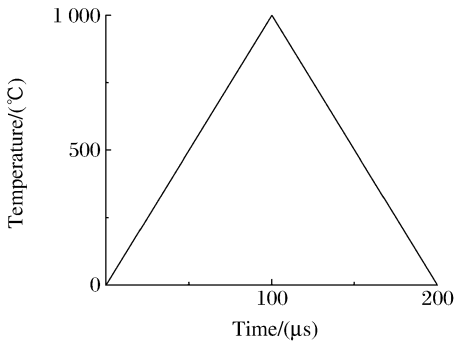


图 2　温度载荷

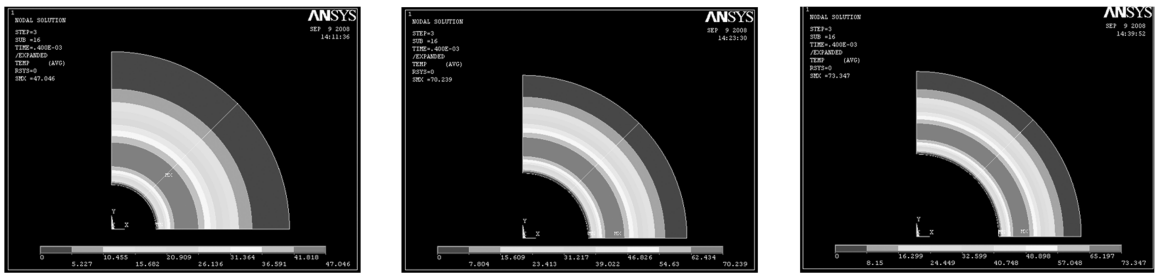
Fig. 2　Temperature load

5　计算结果及讨论

利用 ANSYS 软件的热处理单元,选取孔隙模型的四分之一进行数值计算,其计算结果如下。

5.1　孔隙大小对温度传导的影响

选择孔隙半径为 2、4、6 mm 3 种情况进行计算分析,固液混合的比例为 50 ∶ 50,计算结果如图 3 所示,计算得到:在 2 mm 孔隙中,最高温度距孔隙外径距离为 1.345 6 mm;4 mm 孔隙中,最高温度距孔隙外半径距离为 1.615 2 mm;6 mm 孔隙中,最高温度距孔隙外半径距离为 1.641 6 mm。从上述可以看出,在同样温度载荷下,孔隙半径对热传导影响趋势是,孔隙越大,其热传导的距离越远,这样对形成热点具有相反的作用,也就是说明孔隙越大越不利于能量的聚集。表 2 是不同孔隙半径、以及不同装药的计算结果。



Pore radius:2 mm　　Pore radius:4 mm　　Pore radius:6 mm

图 3　同种装药不同孔隙大小的计算结果

Fig. 3　The calculated results of different pore radii with same explosive charge

表 2　不同组分、不同孔隙半径的计算结果

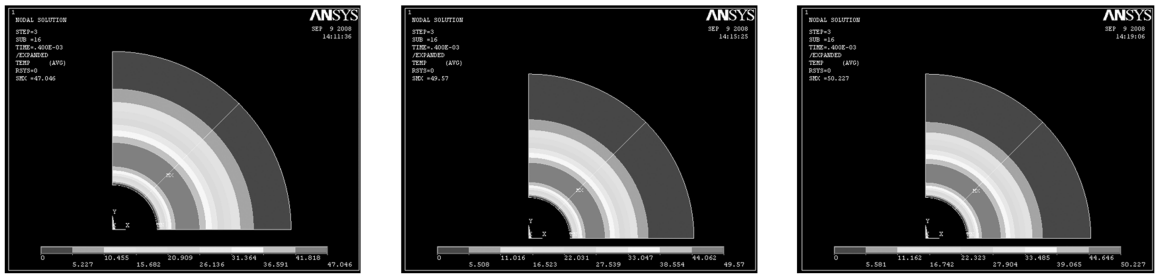
Table 2　The calculated results of different components and pore radii

Pore radius /(mm)	Calculated results/(mm)					
	NM	Al	TNT	FAE(60/40)	FAE(50/50)	FAE(64/36)
2	0.008 3	0.206 7	0.008 3	1.219 5	1.345 6	1.179 5
4	0.008 3	0.067 6	0.008 3	1.345 6	1.615 2	1.371 1
6	0.008 3	0.067 6	0.008 3	1.432 7	1.641 6	1.371 1

5.2　组分不同对温度传导的影响

FAE 固液混合装药中,装药物理特性随燃料配比的变化而变化,为了观测组分比例不同对热传导的影响,我们计算了 3 种不同组分比例的情况。图 4 是孔隙半径为 2 mm、3 种不同组分配比的装药计算结果。计算得到:50/50 中最高温度距孔隙的距离为 1.345 6 mm,60/40 中最高温度距孔隙的距离为

1.219 5 mm;64/36 中最高温度距孔隙的距离为 1.179 5 mm。即随着组分中液态燃料的增加,在同样的温度载荷下,温度传播的距离短。说明固液混合装药中,铝粉含量越大,其装药的传导能量越大,这样不利于热点的形成,从安全角度考虑将是有利的。



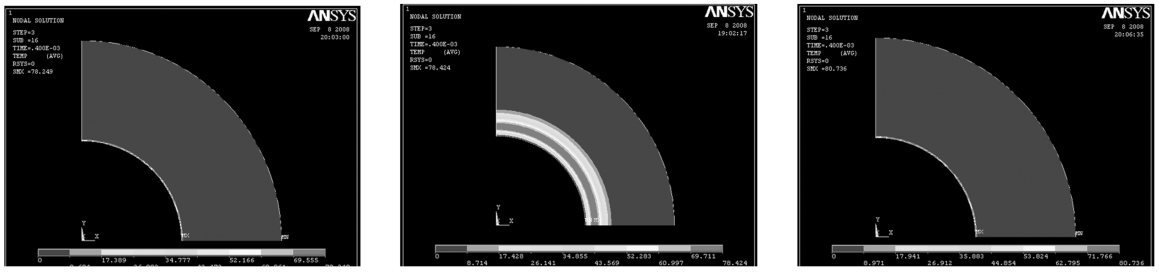
50/50 60/40 64/36

图 4 孔隙大小相同、组分不同的计算结果

Fig. 4 The calculated results of same pore radius with different explosive charges

5.3 固液混合装药与其它炸药的对比分析

各种装药对不同形式的初始冲能具有一定的选择性,同一种炸药激起爆炸所需要某种形式的能量也不是一个严格固定的值。因此,评定装药的安全性时,常用的方法是在同种条件下与某种安全性较好的炸药进行对比实验,如果所需要的外界能量大于安全炸药所需要的能量时,认为该种装药在这种条件下是安全的。为此,我们计算了 TNT 装药、FAE、铝粉 3 种情况,图 5 是计算结果图,可以看出,TNT 炸药中最高温度距孔隙的距离为 0.008 3 mm,FAE 液体燃料最高温度距孔隙的距离为 0.008 3 mm,金属 Al 最高温度距孔隙的距离为 0.206 7 mm。计算发现,FAE 液体燃料和 TNT 炸药温度响应相一致,而 Al 中温度响应距离最大,从传热角度说明,对于这种 TNT 和 FAE 中的液体燃料一旦形成热点,热点很难传播出去,从安全性考虑,这将是主要的危险源。



NM Al TNT

图 5 不同装药的计算结果

Fig. 5 The calculated results of different explosive charges

6 结 论

固液混合装药的物理参数随组分的变化而变化,本研究利用加合法则计算了 3 种组分配比的物理参数,使用 ANSYS 程序进行了相应的计算,得到以下几点看法:

(1) 孔隙大小是装药发生早炸等安全性事故的主要危险源,而装药的物理参数对孔隙形成热点具有直接关系,同种装药其物理参数不同计算的结果差别很大。因此,在用能量守恒方程分析装药的安全性等问题时,要对装药的物理参数进行测量或精确计算,这样计算的结果才能反映装药热点形成的真实情况。

(2) 固液混合装药物理参数取决于装药的组分比例,计算发现,随着装药中固体组分的增加,在同样温度载荷下其传播的距离较大,也就是说不利于能量的聚集,这样不利于热点的形成,对装药的安全

性是有利的。

(3) 同一种固液混合装药,随着孔隙半径的增加,其热传导距离也在增加,这说明在同样温度载荷下,小尺寸的孔隙更有利于热点的形成。

(4) 本研究是从热传导角度进行分析,而孔隙形成热点是一个力学、化学、热学共同耦合作用的过程,对其形成热点的过程还有待于进一步研究。

References:

[1] Zhang Q, Bai C H, Liu Q M, et al. Analysis of Mixed Solid and Liquid Fuel State and Character [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(3): 287-290. (in Chinese)
张　奇,白春华,刘庆明,等. 固、液混合燃料状态及特性研究 [J]. 燃烧科学与技术,2001,7(3):287-290.

[2] Zhang Q, Ji Y H, Bai C H, et al. Adiabatic Compression of Pores in Mixed Fuel Medium during Launching [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(3): 237-244. (in Chinese)
张　奇,纪艳华,白春华,等. 发射过程中混合燃料介质内孔隙的绝热压缩 [J]. 高压物理学报,2004,18(3):237-244.

[3] Wei K Z, Zhang Q. Numerical Simulation on Transformation Characteristic of Global Hole in Charge with Loading Rate [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(6): 570-580. (in Chinese)
魏可臻,张　奇. 装药内球形孔隙随加载率变形特性的数值模拟 [J]. 含能材料,2007,15(6):570-580.

[4] Xia X G, Lin Q W, Zhang G R, et al. Microscopic Simulation Study on the Hot Spot of IHE [J]. Detonation and Shock Wave, 1995, 3: 10-17. (in Chinese)
夏先贵,林其文,章冠人,等. IHE 热点细观模拟研究 [J]. 爆轰波与冲击波,1995,3:10-17.

[5] Chu S J. Thermal Analysis of Explosives [M]. Beijing: Science Press, 1994: 64-188. (in Chinese)
楚士晋. 炸药热分析 [M]. 北京:科学出版社,1994:64-188.

[6] Dong H S, Zhou F F. High Power Explosives and Its Physical Properties [M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京:科学出版社,1989.

[7] Sun Y B, Hui J M, Cao X M. Military Composite Explosive [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995: 76. (in Chinese)
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,1995:76.

[8] Gui D Y, Feng S S, Liu J P. The Optimization Selection of Liquid Fuels for High Power FAE [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, (3): 14-25. (in Chinese)
贵大勇,冯顺山,刘吉平. 高威力 FAE 液态燃料的优化选择 [J]. 火炸药学报,2002,(3):14-25.

[9] Zhang G Z, Hu R X, Chen J G. ANSYS10.0 Finite Element Analysis Example Direction Tutorial on Thermodynamic [M]. Beijing: Machinery Industry Publisher, 2007: 11-15. (in Chinese)
张国智,胡仁喜,陈继刚. ANSYS10.0 热力学有限元分析实例指导教程 [M]. 北京:机械工业出版社,2007:11-15.

A Calculation Study on the Effect of the Heat Conduction on the Safety of the Solid-Liquid Mixed Charge

DUAN Yun[1,2], ZHANG Qi[1], XIANG Cong[1],
PANG Lei[1], LI Wei[1], HE Ning[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: The physical parameter of the solid-liquid mixed charge is one of the main factors of the

charge safety. Several typical ratios of composite charges were calculated by applying the calculation method of composite explosive physical parameter, and the different physical parameters of charge were numerically simulated based on the energy conservation equation. According to calculations, the temperature response with the different physical parameters has obvious differences at the same temperature load. Further analysis showed that the influence of different parameters of solid-liquid mixed charge on safety should be considered enough in order to truly explain the process of hot spot energy evolution, which provided theoretical basis for anglicizing solid-liquid mixed charge safety.

Key words: solid-liquid mixed charge; physical properties; charge safety; numerical calculation; fuel air explosive

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在6 000～8 000字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用网站(www.gywlxb.cn)的作者投稿系统进行投稿。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在20字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括4个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在200～400个字之间，英文摘要不少于120个实词。为便于Ei Compendex以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群 、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被Ei Compendex光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在3个月内刊出。

通信地址：四川绵阳919信箱110分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

网　　站：www.gywlxb.cn　　电子邮件：gaoya@caep.ac.cn (征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042　　传　　真：(0816)2485139

《高压物理学报》编辑部