

文章编号: 1006-9941(2013)01-0030-05

B 炸药落锤撞击点火的数值模拟

袁俊明, 刘玉存, 曹文军

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 采用热力学耦合方法, 选择有限元软件 ANSYS/LS_DYNA 中带热效应的弹性-粘塑性材料模型, 考虑炸药自身的反应放热, 以生热速率模拟炸药发生的化学放热反应, 研究了混合炸药在落锤撞击下的点火特性和热点形成规律。以 Comp. B 炸药为算例, 建立了撞击感度的有限元模型。结果表明, 该数值模拟法模拟炸药瞬态放热和炸药内部产生的急剧升温是可行的。随着上击柱速度的增大, Comp. B 炸药内部的高温热点越易形成。当上击柱速度为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时热点温度增大, 0.7 ms 时形成接近或超过临界温度的热点并发生点火反应。计算结果为判断炸药撞击点火提供了理论依据。

关键词: 爆炸力学; 混合炸药; 撞击感度; 点火; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.007

1 引言

多年来, 国内外采用 12 型、12B 型、卡斯特落锤仪等装置测定炸药固体颗粒的撞击感度, 通过颜色变化、气味、冒烟、声响等综合判断试样是否发生点火, 并且采用爆炸概率或特性落高等形式评价炸药的撞击感度。目前, 一些国外学者^[1]从分子动力学角度利用 ReaxFF (reactive force field) 反应力场研究了 RDX 和 HMX 在高速 ($8.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) 冲击下的撞击响应特性, 并比较了不同晶形炸药的撞击感度大小, 数值模拟结果与实际相符, 开辟了一条新的炸药撞击响应研究途径; 国内学者周培毅等^[2]对炸药装药在后座冲击载荷下的动态响应进行了数值计算, 但只考虑了底隙中留存的空气在后座冲击下绝热压缩致高温和炸药塑性变形能引起的温升, 而没有考虑炸药本身的分解反应放热; 李凯等^[3]基于 Johnson-Cook 本构模型, 对点火前的 Comp. B 炸药大落锤 (400 kg) 冲击实验进行了数值模拟, 研究了 Comp. B 炸药在惯性冲击下的力学响应特性, 而对冲击下的炸药点火特性未考虑。撞击感度测试装置中落锤的惯性冲击不同于一般的冲击载

荷, 其强度较低 ($< 1 \text{ GPa}$), 持续时间较长 (约几毫秒), 炸药在标准撞击感度仪的落锤自由落体撞击下产生热力学耦合作用且考虑炸药本身分解放热反应的点火数值模拟研究至今还未见报道。

为此, 本研究基于热力学耦合模型, 利用大型有限元分析软件 ANSYS/LS_DYNA 对典型混合炸药 Comp. B 炸药的撞击感度实验进行了数值模拟, 探讨 Comp. B 炸药在落锤撞击响应下考虑炸药本身放热反应的宏观热力学耦合模型的点火可行性, 其计算结果可为判断炸药撞击点火提供理论依据。

2 炸药撞击感度实验仪器

炸药撞击响应过程是非线性的且远离平衡态的热力学过程。在撞击作用下, 炸药晶体间或晶体与撞击仪器间的相对运动非常复杂。这种运动会在炸药晶体间形成一定的高应力, 出现与塑性材料受压相似的塑性变形, 炸药晶体间则形成强烈的摩擦、挤压、剪切, 导致强烈的局部生热, 出现温度相当高的热点或者热点群源^[4]。此外在这种高应力作用下, 炸药的反应速率即其反应能力就起着重要作用。图 1 是标准撞击仪器结构图。上下击柱、导向套及底座都是钢质材料, 击柱尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 导向套尺寸外径 $\Phi 40 \text{ mm}$, 内径 $\Phi 10 \text{ mm}$, 高 16 mm , 底座尺寸外径 $\Phi 50 \text{ mm}$, 内径 $\Phi 40 \text{ mm}$, 高 25 mm 。炸药置于上下击柱及导向套中间。实验中, 落锤从一定高度自由落体后撞击上击柱, 上击柱以一定速度冲击炸药, 炸药在相对密闭空间

收稿日期: 2012-02-15; 修回日期: 2012-04-03

基金项目: 火炸药国防专项

作者简介: 袁俊明 (1979 -), 男, 副教授, 主要从事含能材料冲击起爆研究。e-mail: yjmnuc@163.com

通讯联系人: 刘玉存 (1961 -), 男, 教授, 主要从事含能材料制备及性能研究。e-mail: lyc2ct@sina.com

受挤压、塑性变形、摩擦及剪切等发生爆炸现象。

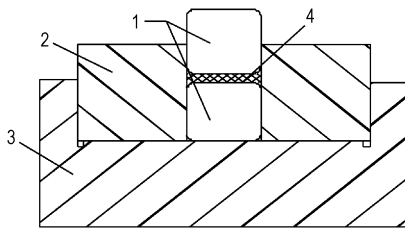


图1 标准撞击仪器结构图

1—上、下击柱, 2—导向套, 3—底座, 4—炸药

Fig.1 Schematic diagram of impact apparatus

1—impact plunger, 2—guide sleeve, 3—base, 4—explosive

3 炸药撞击点火的计算模型及边界条件

3.1 有限元模型的建立

对撞击敏感度仪及药片进行三维实体建模并采用三维热分析单元 solid164 对该模型进行网格划分。为了减少计算量,根据撞击敏感度实验所用击柱、导向套、底座等器材进行简化建模,分别对击柱及导向套的实际尺寸减小,同时也不影响计算结果。因此,有限元模型的上击柱高 4 mm,下击柱高 1 mm,50 mg 药柱高约 2 mm,钢导向套壁厚 1 mm,高 4 mm。因为下击柱可以通过设置节点组约束固定不动,所以底座可以省略不用建模。由于整个模型对称,故建立四分之一有限元模型,如图 2~图 6 所示。

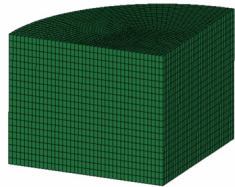


图2 上击柱

Fig.2 Up impact plunger

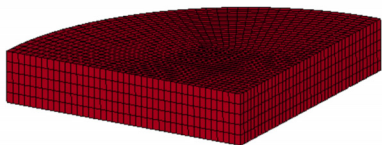


图3 下击柱

Fig.3 Down impact plunger

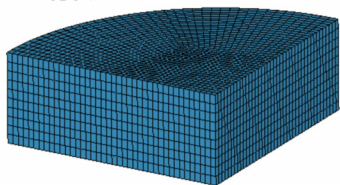


图4 炸药片

Fig.4 Explosive piece

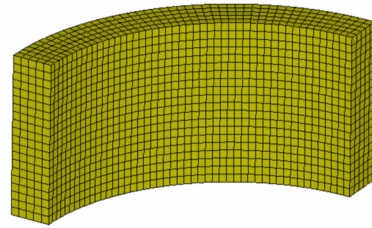


图5 导向套

Fig.5 Guide sleeve

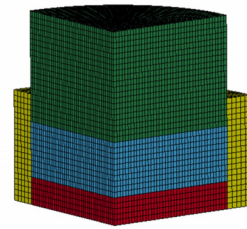


图6 有限元模型组合图

Fig.6 Integral sketch of finite element model

对炸药片的撞击过程进行瞬态生热和热力耦合作用分析时,启用关键字 CONTROL_SOLUTION,其中 SOLN 的参数取值 2,即可进行热力耦合分析。另外,对有限元模型及计算方法进行了一定的简化处理。

(1) 放置在击柱与导向套之间的测试药量大约为 30~50 mg,测试前轻轻挤压旋转上击柱使散状炸药颗粒较均匀地分布在击柱与导向套之间,认为形成了一定厚度的均匀炸药薄片。

(2) 由于药片在撞击作用下发生放热反应极快(约几毫秒),则药片和击柱、导向套的热传导效果忽略不计。

(3) 药片无辐射散热,撞击过程中产生的热量全部用于药片升温。

(4) 药片导热过程仅与时间有关,不考虑温升等因素导致的材料导热系数变化的影响。

(5) 落锤撞击实验传感器测到的撞击时间数量级是 10^{-3} s^[5],因此认为炸药片产生热点并发生爆炸的时间在 1 ms 以内。

3.2 边界条件

根据击柱和药片撞击接触的情况,除考虑了药片在外界作用力挤压、剪切等产生的塑性变形能外,药片本身发生爆炸释放热量的过程采用在药片单元上加载生热率载荷,生热速率采用 LOAD_HEAT_GENERATION_SET 关键字加载,模拟炸药发生剧烈的化学反应。药片内部热量的传导通过定义热传导系数完成加载。

整个撞击仪器及药片的初始温度为 20 °C,用关键字 INITIAL_TEMPERATURE_SET 设置。用关键字

BOUNDARY_TEMPERATURE_SET 设置热边界条件温度, 上下击柱、导向套及底座的热边界条件温度为 20 °C。

3.3 材料模型及参数

击柱和导向套的材料均为钢质, 材料模型采用 MAT_ELASTIC, 其材料参数见表 1。

炸药片材料采用关键字为 MAT_ELASTIC_VISCOPLASTIC_THERMAL 控制的带热效应的弹性-粘塑性材料模型。

本文以 Comp. B 炸药 (TNT/RDX/WAX, 59.5/39.5/1^[6]) 为例, 其力学性能见表 2。

$T=20\text{ °C}$ 时, 从文献[7]中 Comp. B 的应力-应变曲线上采取各个关键点得到表 3。

由于 TNT 的比热 $C_{p1} = 1370\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, RDX 的比热 $C_{p2} = 1130\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, 则 Comp. B 炸药的比热为 $C_p = 1274\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。Comp. B 炸药的热物性参数见表 4。

当上下击柱、导向套与药片接触时, 必须考虑热接触的问题才能计算。对于三维热接触, 使用 CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE_THERMAL_TITLE 关键字进行定义。但是在进行热力耦合分析时对模型进行了简化处理, 不考虑击柱、导向套和药片之间的热传导, 故该热接触关键字的热传导系数设置非常小, 认为近似不会热传导。

表 1 钢材材料参数

Table 1 Parameters of steel

| materials | density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | elastic modulus/GPa | specific heat capacity/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ | thermal conductivity/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | Poisson ratio |
|-----------|--|---------------------|--|--|---------------|
| steel | 7.83 | 210 | 460 | 46 | 0.30 |

表 2 Comp. B 炸药在高应变率下的力学参数^[5]

Table 2 Mechanical parameters of Comp. B explosive subjected to high strain rate

| strain rate/ s^{-1} | temperature/°C | density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | elastic modulus/GPa | yield stress/MPa | Poisson ratio |
|------------------------------|----------------|--|---------------------|------------------|---------------|
| 3 | 24 | 1.68 | 4.10 | 60.0 | 0.38 |

表 3 Comp. B 炸药应力-应变值^[7]

Table 3 Stress-strain values of Comp. B explosive^[7]

| strain | stress/Pa | strain | stress/Pa |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.000E-03 | 0.100E+07 | 2.500E-03 | 1.100E+07 |
| 0.500E-03 | 0.300E+07 | 3.000E-03 | 1.400E+07 |
| 1.000E-03 | 0.500E+07 | 3.500E-03 | 1.600E+07 |
| 1.500E-03 | 0.700E+07 | 4.000E-03 | 1.900E+07 |
| 2.000E-03 | 0.900E+07 | 4.500E-03 | 2.100E+07 |

表 4 Comp. B 炸药的热物性参数

Table 4 Thermal parameters of Comp. B explosive

| thermal parameters | specific heat capacity/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ | thermal conductivity/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | thermal expansion coefficient | heat generation rate/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ |
|--------------------|--|--|-------------------------------|--|
| Comp. B | 1274 | 0.24 | 5.46E-05 | 1.18E+12 |

4 计算结果及分析

当落锤撞击速度不同时, 药柱材料升温速率及拐点温度呈现规律性变化, 下面就不同速度下炸药片温度上升及热点分布情况进行模拟计算。

图 7 和 8 分别是药片在一定速度撞击下的热点和应力分布图。图 7 中热点单元 1, 2, 3 分别对应着图 8 的高应力单元 1, 2, 3, 说明在外界机械作用撞击下, 由于挤压、剪切等作用导致药片局部产生高应力, 从而在

相应高应力区域出现热点。数值模拟结果与炸药撞击感度作用过程的理论分析、实验观测结果一致,说明应用热力耦合模型的计算方法具有可行性,计算结果具有一定可信度。

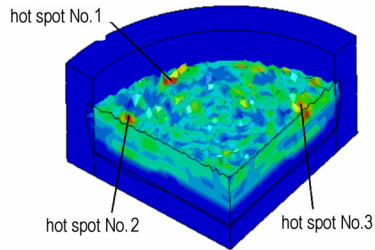


图 7 炸药片热点分布图

Fig. 7 Hot-spot distribution of explosive piece

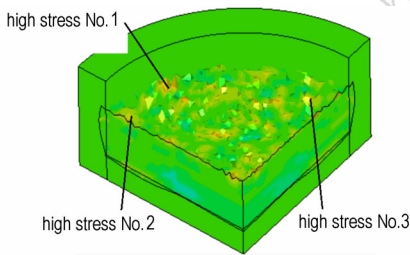


图 8 药片应力分布图

Fig. 8 Stress distribution of explosive piece

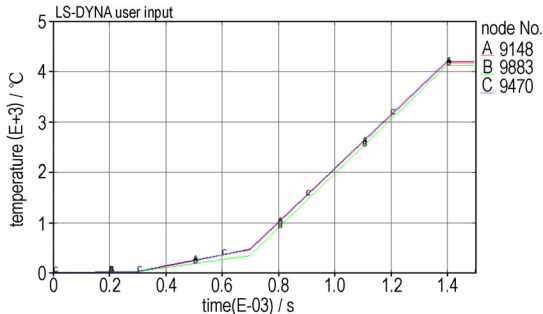


图 9 节点温度上升及拐点图

Fig. 9 Rising temperature curves and inflection point of nodes

当落锤撞击上击柱时,如果上击柱产生的速度为 $v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,则药柱的拐点温度为 $476.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。炸药单元大约在 0.7 ms 时刻出现温度拐点(图 9),由初始的逐渐缓慢升温过程突然转变为急剧升温。一般认为,炸药热点形成后的温度范围在 $300 \sim 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。根据文献[5]可知,假定临界爆炸延滞期按 10^{-5} s 计算,则可得到 Comp. B 炸药的临界热点温度为 $417 \text{ }^{\circ}\text{C}$,因此可以认为 0.7 ms 时炸药内部开始形成热点并发生点火反应。

图 10 是在落锤撞击下导致击柱产生不同速度时 Comp. B 炸药片的温度拐点变化曲线。

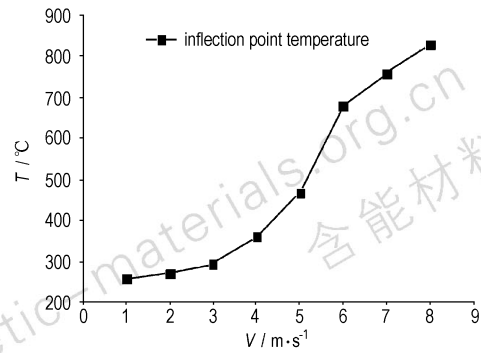


图 10 温度拐点变化曲线

Fig. 10 Temperature inflection point change curve

由图 10 可知,随着上击柱速度的增加,炸药片的温度拐点逐渐增大,低速阶段增加缓慢,当速度 $v=4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,炸药内部热点温度约为 $417 \text{ }^{\circ}\text{C}$,处于临界点火状态;当速度 $v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时拐点温度急剧增大,由此说明上击柱速度大于 $v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,炸药内部的热点容易形成并发生点火的概率大大增加。此外,根据文献[8]可知,Comp. B 炸药撞击感度的特性落高为 109 cm (采用 LANL12 型 B 仪器, 2.5 kg 落锤)。假设落锤的全部势能转化为动能,则由击柱速度可计算落锤的高度,当击柱速度分别为 4.5 、 4.6 、 4.7 、 4.8 、 4.9 和 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,对应的落锤高度各自为 103 、 108 、 113 、 117 和 127 cm 。因此,当击柱速度 $v=4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,Comp. B 炸药撞击感度数值模拟计算结果与实际特性落高吻合良好。

5 结论

利用大型有限元软件 ANSYS/LS_DYNA 中带热效应的弹性-粘塑性材料模型,采用热力耦合计算方法,考虑炸药自身的化学放热反应,以生热速率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) 来衡量,用 LOAD_HEAT_GENERATION_SET 关键字加载,模拟炸药发生剧烈的化学放热反应。数值模拟过程表明,该方法对模拟炸药瞬态放热并在内部产生急剧升温的效果非常显著,具有可行性。同时,考察了不同击柱速度下炸药内部热点的形成过程及变化规律。计算结果显示,随着击柱速度的增大,炸药内部的高温热点越容易形成。当击柱 $v=4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时数值模拟计算的 Comp. B 炸药特性落高与文献值吻合良好,并在击柱速度 $v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时热点温度急剧增大,发生爆炸的概率大大增加,其中,算例 Comp. B 炸药在 0.7 ms 时炸药内部开始形成接近或超过临界温度的热点并发生点火反应。此外,随着击柱速度的增大,

炸药内部的整体温度也急剧增大,更有利于炸药的热点形成并易发生爆炸。

炸药落锤撞击点火数值模拟研究为探讨炸药在外界机械作用下的内部热点形成规律以及宏观点火特性提供了一种新思路和解决方法,并且该计算结果为判断炸药撞击是否点火提供了理论依据。

参考文献:

- [1] ZHANG Lu-zheng, Sergey V Zybin, Adri C T Van Duin, et al. Modeling high rate impact sensitivity of perfect RDX and HMX crystals by ReaxFF reactive dynamics[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2010, 28(Suppl 1): 92-127.
- [2] 周培毅, 徐更光, 王廷增. 炸药装药在后座冲击条件下的点火模型研究[J]. *火炸药学报*, 2000(1): 1-5.
ZHOU Pei-yi, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng. Ignition models of explosive charge subjected to setback impact[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2000(1): 1-5.
- [3] 李凯, 朱建生, 钱志博, 等. 基于 J-C 本构模型的 Comp. B 炸药落锤冲击数值模拟[J]. *力学与实践*, 2011, 33(1): 21-23.
LI Kai, ZHU Jian-sheng, QIAN Zhi-bo, et al. Numerical simulation of drop weight impact tests for Comp. B using Johnson-Cook constitutive model[J]. *Mechanics in Engineering*, 2011, 33(1): 21-23.
- [4] 金韶华, 松全才. 炸药理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011: 317-325.
- [5] 赵省向, 张亦安. 几种熔铸炸药的热点临界参数和撞击敏感度[J]. *含能材料*, 2003, 11(3): 127-129.
ZHAO Sheng-xiang, ZHANG Yi-an. The critical initiation parameters of hot-spots and impact sensitivity of melt-cast explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 127-129.
- [6] 韩小平, 张元冲, 沈亚鹏. Comp. B 复合炸药动态力学性能和塑性流动本构关系的研究[J]. *力学学报*, 1996, 28(3): 319-326.
HAN Xiao-ping, ZHANG Yuan-chong, SHEN Ya-peng. A study of dynamic mechanical response and constitutive model of energetic materials[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1996, 28(3): 319-326.
- [7] 韩小平, 张元冲, 沈亚鹏. Comp. B 复合炸药动态压缩力学性能和本构关系的研究[J]. *实验力学*, 1996, 11(3): 303-310.
HAN Xiao-ping, ZHANG Yuan-chong, SHEN Ya-peng. Dynamic behavior and constitutive model of Comp. B explosive[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, 11(3): 303-310.
- [8] 孙国祥. 混合炸药及其发展[M]. 西安: 中国兵器集团第二零四研究所, 2008: 18-19.

Numerical Simulation of Drop Weight Impact Ignition on Composite Explosive

YUAN Jun-ming, LIU Yu-cun, CAO wen-jun

(Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The ignition characteristics and the law of hot-spot formation on composite explosive subjected to drop weight impact were investigated by using the coupled thermo-mechanical method, selecting the thermo-elastic-plastic material model from nonlinear dynamics finite element software ANSYS/LS_DYNA, and simulating chemical exothermic reaction of explosive in the heat generation rate and considering the exothermic reaction of composite explosive itself. The finite element model used to simulate impact sensitivities was built by taking comp. B explosives as a calculation example. The results show that the numerical simulation method is feasible to simulate the transient heat release and the fast rise of temperature in composite explosive. The high temperature hot-spot in comp. B explosive is easily formed with the increment of up impact plunger velocity. When the velocity of up impact plunger is $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the hot-spot temperature enhances, and at 0.7 ms the hot-spots close to or above the critical temperature are formed, and ignition reaction occurs. The calculated results provide the theoretical foundations to judge the explosive impact ignition.

Key words: explosion mechanics; composite explosive; impact sensitivity; ignition; numerical simulation

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.007