文章编号：1000-5773(2013)04-0575-07

战斗部装药冲击损伤及热点形成的数值分析*

成丽蓉[1,2]，施惠基[1]，陈 荣[3]

(1. 清华大学航天航空学院，北京 100084；
2. 第二炮兵装备研究院，北京 100085；
3. 国防科技大学理学院技术物理研究所，湖南长沙 410073)

摘要：针对战斗部装药侵彻安定性这一难点问题，通过研究战斗部侵彻过程中内部装药损伤破坏与热点形成的关系，建立了耦合宏观力学变形与微裂纹损伤演化的粘弹性炸药本构关系以及裂纹摩擦生热细观模型。利用建立的数理模型，分析了在侵彻环境下装药内部热点的生成机理，比较不同侵彻环境对热点生成的影响。该战斗部装药侵彻安定性数值模拟方法，可用于战斗部装药的设计及评估。

关键词：侵彻；安定性；热点；数值模拟
中图分类号：O346.5 **文献标识码**：A

1 引 言

近年来，国内外对于装药安定性机理(即炸药的冲击损伤及起爆特性)方面，开展了大量的研究[1-2]。在炸药冲击损伤的实验模拟与观测、损伤对炸药爆燃及爆轰的影响、冲击条件下炸药材料的损伤破坏及冲击起爆的数值模拟等方面，进行了积极探索，例如：美国 Lawrence Livermore 实验室采用大规模的并行计算，对考虑细观结构的宏观炸药试样的冲击响应进行了数值模拟。但是目前这些研究还远不够深入，并且主要集中在细观及微观方面，与实际工程研制相结合的理论研究比较少。

随着国内外高速侵彻类战斗部(如钻地战斗部)的飞速发展，对战斗部装药在侵彻过程中的安定性要求也越来越高。本研究针对侵彻环境下战斗部装药的损伤破坏模式与热点形成的关系，分析炸药中微缺陷(主要是微裂纹)在侵彻条件下的损伤演化，耦合炸药宏观力学变形与微裂纹损伤发展，根据微裂纹损伤扩展模型和裂纹摩擦热点细观模型，研究在侵彻环境下热点生成的可能性，建立一种用于分析战斗部装药侵彻安定性的数值模拟方法。

2 炸药冲击损伤本构关系

美国 Los Alamos 国家实验室的 Dienes[3] 对炸药内部孔隙塌缩、绝热剪切、裂纹摩擦等“热点”形成机制所产生的热量进行了量级分析，结果表明，在低幅、长脉冲压缩加载下，对产生潜在热源有最大贡献的是剪切裂纹表面上的摩擦力；随后，Howe 等人[4] 在实验中观察到了这样的裂纹。基于这种“热点”形成机制，Dienes 建立并逐步完善了统计裂纹力学模型(SCRAM)。该模型基于微裂纹扩展演化过程，是研究含能材料损伤的细观模型，除了可以模拟复杂的力学响应外，还可以通过闭合裂纹剪切作用下的摩擦生热效应，对含能材料在低速撞击下的感度进行模拟。然而，SCRAM 模型比较复杂，其中一些参数很难通过实验确定，因而在应用上受到很大限制，但是 SCRAM 模型中关于损伤演化、扩展以及生热机

* **收稿日期**：2011-11-23；**修回日期**：2011-12-20
基金项目：北京理工大学开放实验室基金(KFJJ11-9Y)
作者简介：成丽蓉(1976－)，女，博士研究生，主要从事高速侵彻及爆炸数值模拟研究. E-mail：2223049089@qq.com

制和燃烧机制的分析，对于含能材料的点火、燃烧研究产生了深远影响，具有重要的参考和借鉴价值。Addessio 等人[5]基于 SCRAM 模型，假定初始状态的微裂纹是各向同性分布，建立了各向同性统计裂纹模型(Iso-SCRAM)。Haberman 等人[6]在 SCRAM 和 Iso-SCRAM 模型基础上，建立了粘弹性统计裂纹模型(Visco-SCRAM)，适用于含能材料在碰撞、冲击等近似各向同性应力状态下的动态损伤问题。Visco-SCRAM 模型假定初始状态的微裂纹分布是各向同性的，在微裂纹体基础上耦合了广义粘弹性体，用微裂纹体描述其损伤演化情况，包含了微裂纹的张开、剪切、生长和聚合等，并考虑了闭合裂纹剪切作用下摩擦生热产生的热点，因此也可用于含能材料的非冲击点火过程模拟。目前，Visco-SCRAM 模型在国外已经嵌入到商业程序中，可对平板撞击实验、剪冲实验、机械耦合烤燃实验等进行数值模拟，尤其对剪切带的模拟显示出良好的效果。

尽管有研究表明，在侵彻过程中战斗部装药与金属壳体可能发生分离而相互滑移，从而可能产生热点，但考虑到战斗部装药与金属壳体间一般存在一定厚度的绝热层和包覆层，各层间有效粘结，因此为降低研究的复杂性，认为装药与金属壳体的相互滑移发生在绝热层，不会产生热点，即忽略战斗部装药与金属壳体滑移生热的影响，主要考虑战斗部装药在侵彻环境下由于损伤而导致的热点。

本研究基于 Dienes 理论，炸药冲击损伤本构关系参考 Visco-SCRAM 模型[7]。Visco-SCRAM 损伤本构模型假定材料体元的应变率为广义粘弹性体和微裂纹体元的应变率之和，即

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^{\mathrm{ve}} + \dot{e}_{ij}^{\mathrm{c}} \tag{1}$$

式中：$\dot{e}_{ij}$ 为材料体元的偏应变率，$\dot{e}_{ij}^{\mathrm{ve}}$ 为广义粘弹性体元的偏应变率，$\dot{e}_{ij}^{\mathrm{c}}$ 为微裂纹体元由于微裂纹界面间的相对运动而引起的附加偏应变率。

模型中每个 Maxwell 体的偏应力率 $\dot{S}_{ij}^{n}$ 可以表示为

$$\dot{S}_{ij}^{n} = 2G_n\dot{e}_{ij} - \frac{S_{ij}^{n}}{\tau_n} - \frac{G_n}{G}\left[3\left(\frac{c}{a}\right)^2\frac{\dot{c}}{a}S_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3\dot{S}_{ij}\right] \tag{2}$$

材料总偏应力率 $\dot{S}_{ij}$ 可表示为

$$\dot{S}_{ij} = \frac{2G\dot{e}_{ij} - \sum_{n=1}^{n}\frac{S_{ij}^{n}}{\tau_n} - 3\left(\frac{c}{a}\right)^2\frac{\dot{c}}{a}S_{ij}}{1+\left(\frac{c}{a}\right)^3} \tag{3}$$

式中：G 为 Maxwell 体的剪切模量；$\tau=\eta/G$，η 为 Maxwell 体的粘性系数；c 为裂纹半径；$\dot{c}$ 为微裂纹尺寸的演化扩展速度；a 为初始缺陷尺寸。

微裂纹尺寸的演化扩展速度 $\dot{c}$ 的经验公式为

$$\dot{c} = \begin{cases} \dot{c}_{\max}(K/K_1)^m & K < K_0\sqrt{1+(2/m)} \\ \dot{c}_{\max}[1-(K_0/K)^2] & K \geqslant K_0\sqrt{1+(2/m)} \end{cases} \tag{4}$$

$$K_1 = K_0\sqrt{1+\frac{2}{m}}\left(1+\frac{m}{2}\right)^{1/m} \tag{5}$$

式中：K_0 为微裂纹体元中基体材料的断裂韧性，$\dot{c}_{\max}$ 为微裂纹扩展的最大速度，m 为微裂纹扩展的速度系数。

3 裂纹摩擦热点模型

在冲击载荷作用下，炸药内部的初始细观裂纹发生扩展，形成尺寸较大的宏观裂纹。一般而言，宏观裂纹的上、下表面不平整，并且裂纹间夹杂着固体颗粒，在受到垂直于裂纹面的正压力作用时，裂纹处于闭合状态，在受到平行于裂纹面的剪切应力作用时，裂纹面发生相对滑移和摩擦，因而可能产生热点。

摩擦生热是外力在克服摩擦阻力过程中产生的耗散性热能，摩擦生热率与摩擦阻力密切相关。两个物体界面间的摩擦力 F_{f} 可表示为界面间法向压力 N 与摩擦系数 μ 之积。假设摩擦功全部转换为热能，则滑动摩擦生热率 W_{f} 为

$$W_{\mathrm{f}} = F_{\mathrm{f}} v = \mu N v \tag{6}$$

式中:v 为滑移速度。

研究裂纹摩擦及热点形成问题时,应先根据裂纹扩展方式,分析裂纹面滑移。假设裂纹面在法向力 σ_0 的作用下,上、下表面闭合。当受到切向剪应力 τ_0 作用时,如果剪应力 τ_0 大于裂纹面的摩擦阻力,则上、下表面将发生相对滑移,产生位移 d,单位时间位移 d 的变化即为滑移速度 v。可见,位移量 d 不但与外力 σ_0、τ_0 有关,还与裂纹的形状、大小以及裂纹基体材料的力学性能有关。

假设裂纹为三维币状,受垂直于裂纹面的法向应力和平行于裂纹面的切向应力作用。在裂纹闭合情况下,当切向剪应力超过摩擦阻力时,裂纹面产生滑移,形成摩擦,由摩擦力和滑移速度可计算出滑动摩擦生热率。裂纹面平均摩擦功率的表达式为[6]

$$\dot{\bar{W}}_{\mathrm{f}} = \frac{1}{A}\int_A | d | F_{\mathrm{f}} \mathrm{d}A = \frac{32(1-\nu^2)F_{\mathrm{f}}}{3\pi E} | (\tau_0 - F_{\mathrm{f}})\dot{c} + c(\dot{\tau}_0 - \dot{F}_{\mathrm{f}}) | \quad (\tau_0 > F_{\mathrm{f}}) \tag{7}$$

式中:A 为裂纹面积,d 为裂纹面位移,$\dot{c}$、$\dot{\tau}_0$、$\dot{F}_{\mathrm{f}}$ 分别为 c、τ_0、F_{f} 对时间 t 的导数,ν 为泊松比,E 为弹性模量。当 $\tau_0 \leqslant F_{\mathrm{f}}$ 时,$\dot{\bar{W}}_{\mathrm{f}} = 0$。根据(7)式可知,裂纹扩展($\dot{c} \neq 0$)、剪应力变化($\dot{\tau}_0 \neq 0$)或摩擦力变化($\dot{F}_f \neq 0$)都会引起摩擦力做功。

根据得到的裂纹面平均摩擦功率,按照半无限大空间传热的解析解[8],并考虑到热源同时向上、下两部分供热,可求出裂纹界面的温升 ΔT_{c},即

$$\Delta T_{\mathrm{c}} = \Delta T_{\mathrm{t}} - \Delta T_0 = \dot{\bar{W}}_{\mathrm{f}} \sqrt{\frac{t}{\pi \rho k c_V}} \tag{8}$$

式中:ΔT_{t} 为温升,ΔT_0 为炸药在侵彻过程中由于粘性加热和损伤做功而导致的温升,t 为时间,ρ 为密度,k 为材料参数,c_V 为定容比热容。

4　战斗部装药在不同侵彻条件下的损伤及热点生成机理分析

根据炸药冲击损伤本构理论、裂纹扩展准则、裂纹细观摩擦生热模型、裂纹温升模型,在 LS-DYNA 程序中进行了二次开发,编制了自定义本构程序,进行同种战斗部在侵彻不同靶标过程中的热点计算,分析炸药冲击损伤及热点生成过程。

战斗部头部采用卵形,长度为 1.300 m,最大直径为 400 mm,壳体材料选用高强度钢,数值计算模型选用弹塑性本构关系,主要材料参数见表 1。炸药采用 LS-DYNA 中的自定义本构,材料参数选用文献[7]中 PBX9501 炸药参数,具体见表 2,其中 G_1、G_2、G_3、G_4、G_5 为剪切模量,τ_1、τ_2、τ_3、τ_4、τ_5 为衰减常数,c_0 为初始裂纹半径,a 为初始缺陷尺寸。混凝土靶板材料选用 LS-DYNA 中的 MAT16,主要材料参数见表 3。

表 1　钢壳体的主要材料参数

Table 1　Main material parameters of the steel shell

Density/(g/cm^3)	Yield stress/(GPa)	Failure strain
7.800	1.500	0.8

表 2　装药材料参数

Table 2　Main material parameters of charge

Density/(g/cm^3)	G_1/(MPa)	G_2/(MPa)	G_3/(MPa)	G_4/(MPa)	G_5/(MPa)	a/(mm)	c_0/(μm)
1.800	944	174	521	909	688	1	30
K_0/(MPa·m$^{1/2}$)	τ_1/(μs)	τ_2/(μs)	τ_3/(μs)	τ_4/(μs)	τ_5/(μs)	m	$\dot{c}_{\max}$/(m/s)
0.5	0	0.007 32	0.073 2	0.732	2	10	300

表 3 混凝土材料参数

Table 3 Main material parameters of concrete

Density/(g/cm^3)	Compressive strength/(MPa)	Tensile strength/(MPa)	Failure strain
2.400	40	6	0.4

4.1 侵彻 1 m 厚钢筋混凝土靶

靶板为钢筋混凝土材料，厚度 1 m，强度 40 MPa，战斗部垂直侵彻靶标，如图 1 所示。数值计算了在战斗部初始速度为 300、400、500 及 600 m/s 条件下炸药的应力场、应变场、平均裂纹分布及温度分布。裂纹分布主要集中在装药中部且靠近头部区域(战斗部初速度为 500 m/s 时炸药的裂纹分布见图 2)，最高温度场主要集中在装药头部区域(战斗部初速度为 600 m/s 时炸药的温度场见图 3)。分析认为，由于在侵彻过程中，战斗部头部区域的装药受力最大，导致内部裂纹最容易发生扩展，扩展的裂纹由于滑移产生了温升，使得战斗部头部区域温升最高。

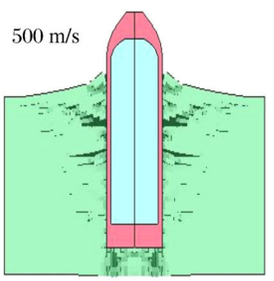


图 1 侵彻过程图

Fig. 1 Penetration diagrams

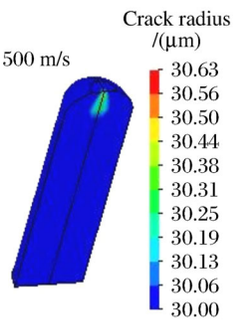


图 2 装药裂纹分布图

Fig. 2 Crack distribution of charge

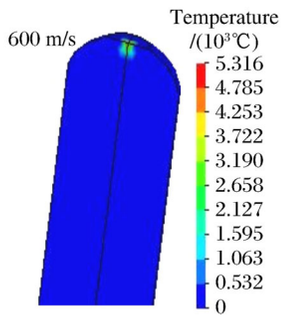


图 3 装药温度场

Fig. 3 Temperature distribution of charge

表 4 列出了初始速度为 300、400、500、600 m/s 时侵彻 1 m 厚钢筋混凝土靶的数值模拟结果，其中：c_{max}为最大裂纹尺寸，$\Delta T_{c,max}$为裂纹摩擦最大温升，$\Delta T_{0,max}$为炸药粘性加热最大温升，$\Delta T_{t,max}$为装药最大温升。对比不同初始速度条件下的计算结果，可以看出：当战斗部初速度小于 500 m/s 时，装药的最高温升均小于 100 ℃(战斗部初速度为 500 m/s 时，装药头部某单元的温升见图 4)，而炸药熔点一般高于 200 ℃，所以侵彻过程中装药安定性不存在问题；当战斗部初速度为 600 m/s 时，由于装药受力增大，导致装药头部的力学性能弱化，裂纹尺寸的演化扩展速度增大，炸药粘性加热和裂纹摩擦温升均急剧升高，使炸药的最高温度超过 500 ℃，装药在侵彻过程中存在风险。

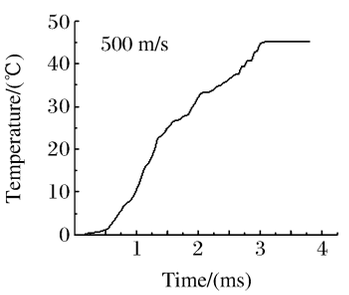


图 4 装药头部单元温升曲线

Fig. 4 Temperature curve at the top of charge

表 4 侵彻 1 m 厚钢筋混凝土靶的数值模拟结果

Table 4 Simulation results of the warhead penetrating into a 1 m thick reinforced concrete target

Initial velocity/(m/s)	c_{max}/(μm)	$\Delta T_{c,max}$/(℃)	$\Delta T_{0,max}$/(℃)	$\Delta T_{t,max}$/(℃)
300	30.45	66.0	3.8	68.8
400	30.45	40.6	6.0	44.2
500	30.63	54.0	5.2	58.0
600	168.00	＞500	58.8	＞500

4.2　侵彻 4 层间隔钢筋混凝土薄靶

靶标为 4 层间隔的钢筋混凝土靶,首层厚 30 cm,其余各层厚度均为 20 cm,混凝土强度为 40 MPa,战斗部垂直侵彻靶标,如图 5 所示。数值计算了在初始速度为 400、500、600 m/s 条件下炸药的应力场、应变场、平均裂纹分布及温度分布。装药中的裂纹分布主要集中在装药头部区域(战斗部初速度为 600 m/s 时炸药的裂纹分布见图 6),裂纹摩擦升温主要集中在靠近金属壳体区域,炸药粘性加热主要分布在炸药头部,由于裂纹摩擦生热产生的温升高于粘性加热,因此总温度场分布主要集中在靠近金属壳体的区域(战斗部初速度为 600 m/s 时的装药总温度场见图 7)。

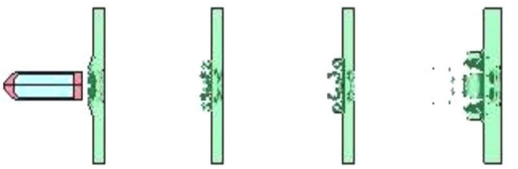


图 5　侵彻过程图(4 层间隔靶)

Fig. 5　Penetration diagrams (four-layer target)

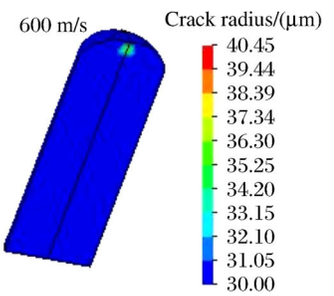


图 6　装药裂纹分布(4 层间隔靶)

Fig. 6　Crack distribution of charge (four-layer target)

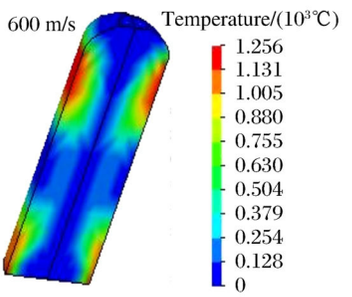


图 7　装药总温度场(4 层间隔靶)

Fig. 7　Temperature distribution of charge (four-layer target)

根据初速度为 600 m/s 条件下战斗部侵彻多层靶的数值计算结果可知,战斗部头部裂纹尺寸扩展最大,该部位的裂纹尺寸随时间变化的关系见图 8,可见裂纹尺寸的增长发生在战斗部撞击靶板过程中。按照战斗部温升的分布情况,得到战斗部尾段且靠近金属壳体部位的装药单元的裂纹摩擦功率随时间的变化关系(见图 9)。从图 9 可以看出,虽然该处的裂纹扩展速率很小,但根据裂纹摩擦温升模型(见(7)式),装药内部微裂纹处的剪应力变化($\dot{\tau}_0$)及摩擦力变化($\dot{F}_f$)不为零,因此伴随战斗部多次撞击,装药内部微裂纹处的摩擦功率持续振荡,在长时间作用下导致产生较高的温升。

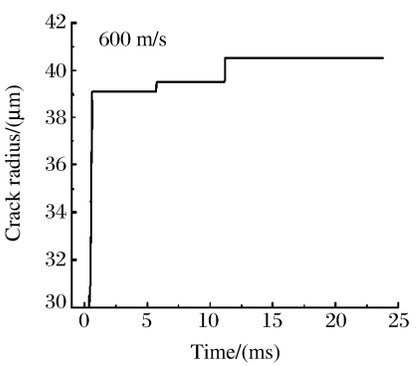


图 8　头部装药裂纹尺寸变化曲线

Fig. 8　Crack radius curve at the top of charge

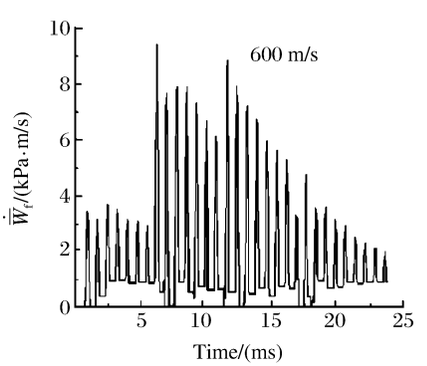


图 9　尾段装药裂纹摩擦功率变化曲线

Fig. 9　Friction power curve at the end of charge

对比分析初速度为 500 m/s 时战斗部侵彻 1 m 厚钢筋混凝土靶和 4 层间隔钢筋混凝土薄靶结果,可以看出:侵彻 1 m 厚靶时,战斗部的最大刚体过载为 $10^4 g$(见图 10);侵彻 4 层间隔钢筋混凝土薄靶时,最大侵彻刚体过载为 $5\,500g$(见图 11)。虽然战斗部侵彻 4 层间隔钢筋混凝土薄靶时的受力状况及

裂纹扩展情况均小于 1 m 厚钢筋混凝土靶，但由于侵彻环境不同，导致炸药内部细观摩擦生热结果不同：侵彻 4 层薄靶时，虽然战斗部的整体受力环境小，但战斗部装药长时间处于压缩及拉伸的交变作用，同样会导致热点产生。根据表 5 中的计算结果可以看出，在初速度为 500 和 600 m/s 条件下装药可能存在风险，当初速度为 500 m/s 时热点产生区域中某单元的温升见图 12。

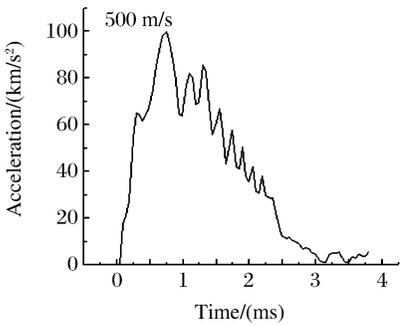


图 10 战斗部侵彻刚体过载(1 m 厚靶)

Fig. 10 Acceleration curve of the penetrator (1 m thick target)

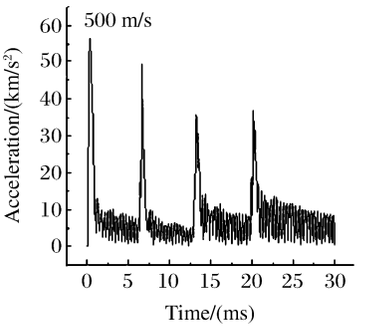


图 11 战斗部侵彻刚体过载(4 层间隔靶)

Fig. 11 Acceleration curve of the penetrator (four-layer target)

表 5 侵彻 4 层钢筋混凝土靶的数值模拟结果

Table 5 Simulation results of the warhead penetrating into a four-layer reinforced concrete target

Initial velocity/(m/s)	c_{max}/(μm)	$\Delta T_{c,max}$/(℃)	$\Delta T_{0,max}$/(℃)	$\Delta T_{t,max}$/(℃)
400	30.04	43	2.93	45
500	30.05	390	2.70	391
600	40.50	1 254	3.64	1 256

高金霞等人[9]对同种战斗部侵彻单层强度靶及多层薄靶进行了实验研究，结果表明，战斗部侵彻单层强度靶时装药安定，而侵彻多层薄靶时发生爆燃。在装药力学环境适应性方面，本研究得到的数值模拟结果与高金霞等人[9]的实验结果一致，解释了战斗部侵彻多层薄靶时虽受力小但却发生爆燃的原因。因此，本数值模型可以用于分析侵彻过程中力学环境对装药安定性的影响。

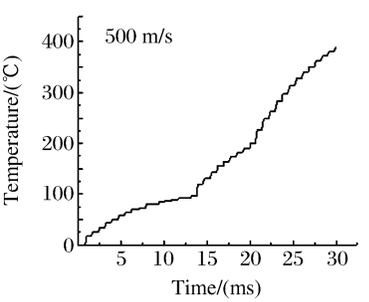


图 12 装药前部某单元的温升曲线(4 层间隔靶)

Fig. 12 Temperature curve at the top of charge (four-layer target)

5 结 论

从战斗部侵彻过程中的装药宏观力场出发，通过耦合装药微裂纹细观损伤演化及微裂纹滑移摩擦生热计算，得到了装药在侵彻过程中的温度场变化，分析热点生成的可行性。由于研究工作主要针对战斗部装药的侵彻力学环境所导致的热点，因此没有考虑装药配方和装药工艺对侵彻安全性的影响。利用建立的数值模型，分析同一战斗部分别侵彻单层强度靶及多层间隔薄靶时的装药安定性情况，所得结论与实验结果一致，证明该数值模型可以用于侵彻过程中力学环境对装药安定性的影响分析。研究表明：战斗部侵彻 1 m 厚钢筋混凝土靶时，热点生成部位主要集中在装药头部位置；而侵彻 4 层间隔薄靶时，热点生成部位主要集中在装药与壳体接触的圆柱段部分。该结论可为战斗部装药设计提供参考。

References:

[1] Vandersall K S,Chidester S K,Forbes J W,et al. Experimental and modeling studies of crush,puncture,and perforation scenarios in the Steven impact test [C]//Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego,USA,2002.

[2] Wortley S,Jones A,Cartwright M,et al. Low speed impact of pristine and aged solid high explosive [C]//Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego,USA,2002.

[3] Dienes J K. Frictional hot-spots and propellant sensitivity [J]. Mater Res Soc Symp Proc,1984,24:373-381.

[4] Howe P M,Gibbons G Jr,Webber P E. An experimental investigation of the role of shear in initiation of detonation by impact [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Detonation,1985:294-306.

[5] Addessio F L,Johnson J N. A constitutive model for the dynamic response of brittle materials [J]. J Appl Phys,1990,67(7):3275-3286.

[6] Haberman K S,Bennett J G,Asay B W,et al. Modeling,simulation and experimental verification of constitutive models for energetic materials [J]. AIP Conf Proc,1997,429:273-276.

[7] Chen G N,Zhang W H. Numerical analysis on deformation of SRM and hot spot formation in grain under mechanical impact [J]. Journal of Solid Rocket Technology,2006,29(2):98-102. (in Chinese)
陈广南,张为华. 固体火箭发动机撞击变形及装药内部热点形成数值分析 [J]. 固体火箭技术,2006,29(2):98-102.

[8] Xi T G. Thermophysical Properties of Inorganic Materials [M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Publishers,1981:186-190. (in Chinese)
奚同庚. 无机材料热物性学 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1981:186-190.

[9] Gao J X,Zhao W G,Zheng T. Study on the anti-overloading technique for penetrating warhead charge [J]. Initiators & Pyrotechnics,2008(4):4-7. (in Chinese)
高金霞,赵卫刚,郑　腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究 [J]. 火工品,2008(4):4-7.

Numerical Simulation on the Damage and Hot-Spot Formation in Warhead Charge under Shock

CHENG Li-Rong[1,2],SHI Hui-Ji[1],CHEN Rong[3]

(1. *School of Aerospace,AML,Department of Engineering Mechanics,*
Tsinghua University,Beijing 100084,*China*;
2. *The Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery,Beijing* 100085,*China*;
3. *Institute of Technical Physics,College of Science,*
National University of Defense Technology,Changsha 410073,*China*)

Abstract: In order to solve the difficult problem about the security of warhead in the penetration process,the relationship between damage and hot-spot formation in the charge has been researched. Based on crack friction under mechanical impact,a thermo-viscoelasticity constitutive model for explosive materials coupling the crack damage and hot spot formation is presented to analyze the formation of hot spot in warhead charge during penetration. The influence factors of hot-spot formation under different penetration conditions are discussed and compared. The numerical simulation method provided can be used to design and evaluate the security of loaded projectiles under impact.

Key words: penetration; security; hot spot; numerical simulation