

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0038-06

基于点火增长模型的颗粒炸药低速撞击特性研究

丁良政¹, 张邹邹², 卜雄洙¹, 曹一涵¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京, 210094; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为了探究颗粒炸药在低速撞击作用下的微观受力过程和主要点火机制, 在分析三项式点火增长模型的基础上, 利用 AUTODYN 软件对落锤低速撞击颗粒炸药试验进行数值模拟, 分析落锤下落高度的变化对颗粒炸药的温升和热点形成的影响, 建立基于塑性功转化热能原理的温升公式。数值模拟仿真结果表明: 应力应变峰值通常出现在颗粒的交界处, 使颗粒与颗粒的接触面处存在较大的塑性功, 在短时间内塑性功能够转化出更多的热能; ALPHA 云图表明多数情况下颗粒交界处出现高温热点并汇合, 导致炸药发生反应。

关键词: 颗粒炸药; 点火增长模型; 塑性功; 热点; 数值模拟

中图分类号: TQ564 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.009

Research on Low Velocity Impact Characteristics of Particle Explosives Based on Ignition Growth Model

DING Liang-zheng¹, ZHANG Zhou-zhou², BU Xiong-zhu¹, CAO Yi-han¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to explore the micro-mechanical process and main ignition mechanism of particle explosive under low-speed impact, based on the analysis of trinomial ignition growth model, the test of particle explosive under low-speed impact with drop hammer was simulated by AUTODYN software, and the influence of the change of drop hammer height on the temperature rise and hot spot formation of particle explosive was analyzed, meanwhile, the temperature rise formula was established based on the thermal energy principle of plastic work conversion. The results of numerical simulation show that the peak stress-strain values usually occur at the particle boundary, which results in a large plastic work at the particle-particle contact surface, and the plastic work can convert more heat energy in a short time. ALPHA cloud diagram show that high temperature hot spots appear and converge at the particle boundary in most cases, high temperature near hot spots causes explosives to react.

Key words: Particle explosives; Ignition growth model; Plastic work; Hot spots; Numerical simulation

在火炸药研究过程中, 落锤试验常被用来进行炸药的感度测试, 受现阶段技术限制, 在试验过程中无法直接观测低速撞击作用下炸药点火和微观受力变形过程, 而数值模拟可以计算颗粒炸药不同接触界面的相互作用, 是直观分析颗粒炸药在低速撞击作用下点火过程的有效方法, 并且可以有效降低落锤试验的成本和风险。傅华^[1]采用维离散元模拟了带孔洞的

HMX 晶体在冲击作用下的热点形成过程, 发现在较低冲击作用下孔洞边缘发生剪切变形, 粘塑性功形成热点; 在较高冲击作用下空洞坍塌形成热点。尚海林^[2]研究发现撞击速度越高, 颗粒炸药点火几率越大; 撞击速度越低, 颗粒炸药越容易发生喷射。吴艳青^[3]等通过落锤试验研究发现颗粒排列越松散则塑性扩展时间越短, 容易形成多个点火位置使燃烧的机会更

收稿日期: 2021-11-04

作者简介: 丁良政 (1996-), 男, 硕士研究生, 从事动态测试与力学仿真、智能测控技术与系统研究。

作者简介: 卜雄洙 (1964-), 男, 教授, 从事动态测试与力学仿真、智能测控技术与系统研究。

基金项目: 西安近代化学研究所对外开放合作基金资助 (SYJJ200312)。

大, 过度松散则会造成剧烈燃烧现象较难出现。赵莹^[4]对含能颗粒进行了低速落锤撞击试验并进行数值模拟分析, 结果显示颗粒受力变化与试验中受力变形过程一致, 温升受塑性功和摩擦的影响, 颗粒炸药热点位置主要为颗粒接触面处。蒋城露^[5]等通过建立三维离散元模型模拟了 HMX 颗粒在低速撞击下的燃烧反应过程, 发现 HMX 颗粒在低速撞击下先是塑性功放热, 然后摩擦等能量耗散放热, 温度升高导致颗粒开始点火燃烧。

本研究利用 AUTODYN 建立二维计算模型, 将 Lee-Tarver 三项式点火增长模型应用到仿真颗粒炸药低速撞击响应过程。结合颗粒炸药在低速撞击下的力学分析和体现炸药反应度的 ALPHA 云图, 直观显示颗粒撞击过程中热点的形成过程。通过计算颗粒的温升变化, 研究落锤不同下落高度对颗粒炸药的点火影响, 为颗粒炸药的微观受力过程研究和点火机制研究提供较好的参考依据。

1 理论与模型

1.1 Lee-Tarver 点火增长状态方程参数分析

Lee-Tarver 三项式点火增长模型以多“热点”点火假设与圆筒实验获得的径向膨胀速度、位移等膨胀试验数据为基础, 描述了炸药反应过程中的物理和化学过程, 是目前应用比较广泛的反应速率模型^[6-7]。孙文旭^[8]用 Lee-Tarver 三项式点火增长模型描述了在落锤撞击作用下 PBX-1 炸药的化学反应过程, 验证了该模型用于低压长脉冲作用下炸药点火特性分析的可行性。Lee-Tarver 三项式点火增长模型主要包括反应物的状态方程和反应速率方程, 本文用 JWL 状态方程描述炸药反应物, 表达式如下:

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega c T}{V} \quad (1)$$

式(1)中: p 为炸药反应产生的压力; V 为相对体积; c 为反应物比热容; T 为平均温度; A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 和 ω 都是与炸药相关的材料常数。

炸药的化学反应过程采用三项式反应速率方程

描述:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = I \cdot (1-\lambda)^b \cdot (\eta_s - 1 - a)^x + G_1 \cdot (1-\lambda)^c \cdot \lambda^d \cdot p^y + G_2 \cdot (1-\lambda)^e \cdot \lambda^g \cdot p^z \quad (2)$$

式(2)中: 第1项为点火项, 表示炸药在冲击压缩过程中局部产生“热点”的过程, 以及描述热点区域的后续点火过程; 第2项为增长项, 描述的是局部“热点”燃烧, 既没有发生反应的炸药发生分解的过程; 第3项为完成项, 描述所有的“热点”汇合, 使反应在短时间内快速完成。其中, λ 为反应炸药和未反应炸药总量的比值; η_s 为反应物的相对密度, $\eta_s = \rho_s / \rho_0$, ρ_s 为当前密度, ρ_0 为初始密度; p 为局部压力, Mbar; t 为时间, μs 。

式(2)中共有12个可以调节的参数: I , a , b , x , G_1 , c , d , y , G_2 , e , g , z 。点火项中 I 和 x 决定了“热点”数量, a 是临界压缩度, 既足够强的冲击波作用于炸药使得炸药压缩度大于等于 a 时, 炸药发生点火。增长项和完成项中 G_1 和 G_2 为表面积和体积之比, c 、 e 、 d 、 g 的数值决定热点成长的形状, 当燃烧项阶数 $b=c=2/3$, 则热点以球形燃烧。 G_1 和 d 控制着点火后的早期反应与增长, G_2 和 z 则确定高压反应率; y 、 z 控制反应增长速率。需要设定点火项和增长项中 λ 的最大值以及快速反应项中 λ 的最小值, 使式(2)中每项都在恰当的时候开始和截止。当 $\lambda \geq \lambda_{igmax}$ 时, 点火速率为0; 当 $\lambda \geq \lambda_{G1max}$ 时, 增长速率为0; 当 $\lambda \leq \lambda_{G2min}$ 时, 完成项的反应速率为0。

1.2 有限元计算模型建立

1.2.1 撞击装置

撞击装置示意图如图1(a)所示。上下击柱、击柱套和基座由钢制成, 击柱尺寸为 $\Phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$, 柱套外径为40mm, 内径为10mm, 高为16mm, 基座外径为50mm, 内径为40mm, 高为25mm。落锤质量为5kg, 假定其半径为40mm, 通过计算得到落锤的高度为127mm。为节约计算成本对模型进行简化, 在下击柱和击柱套底部以及击柱套侧面添加固定约束条件, 省略了基座。由于模型结构和撞击载荷具有对称性, 故采用二分之一有限元模型, 如图1(b)所示。

1.2.2 炸药颗粒微观分布

为减少计算量，建立二维模型，假设所有颗粒的几何形状为直径 $500\mu\text{m}$ 的球形颗粒，以此作为初始计算模型。为研究落锤撞击下颗粒与颗粒之间以及颗粒与击柱之间的相互作用，本文颗粒模型排布呈两层交错均匀排布^[2-3, 9]，如图 2 所示。

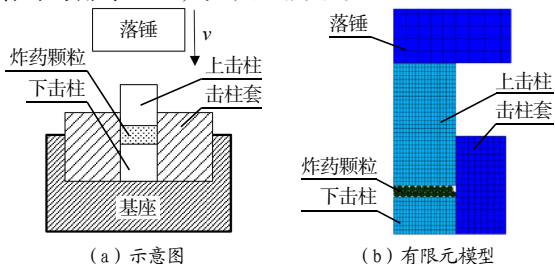


图 1 撞击装置示意图及有限元模型

Fig. 1 Schematic diagram and finite element model of the impact device

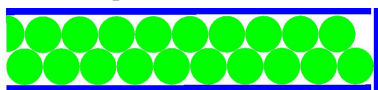


图 2 计算模型中颗粒微观排布示意图

Fig. 2 Micro layout of particles in the calculation model

1.2.3 材料模型及参数

在 AUTODYN 材料库里选用材料 steel-1006 赋予给落锤、击柱、柱套，采用 Shock 状态方程和 Johnson Cook 材料模型描述，主要参数见表 1~2。炸药试样为 HMX 颗粒炸药，采用 Lee-Tarver 三项式点火增长模型描述，参数见表 3。HMX 炸药和钢的力学性能参数见表 4。

表 1 Shock 状态方程参数
Tab.1 Parameters of shock state equation

Grüneisen 系数	$C_1/(\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	S_1	T_f/K	剪切模量 /Mbar	屈服应力 /Mbar
2.17	0.4569	1.49	300	0.8	0.0035

表 2 Johnson Cook 模型参数
Tab.2 Parameters of Johnson Cook model

硬化常数/Mbar	硬化指数	应变率常数
0.00275	0.36	1

表 3 HMX 炸药反应速率方程参数

Tab.3 Parameters of HMX explosive reaction rate equation

参数	数值	参数	数值
$l/\mu\text{s}$	7.43×10^{11}	d	0.333
b	0.667	y	1.5
a	0.05	G_2	400
x	20	e	0.333
G_1	3.1	g	1
c	0.667	z	2

表 4 HMX 和 steel 的材料参数^[10]

Tab.4 Material parameters of HMX and steel

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	比热 /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	屈服应力 /GPa
HMX	1903	24	0.2	1500	0.26
STEEL	7830	210	0.3	460	0.35

1.3 低速撞击作用下颗粒炸药塑性功引起的温升

在低速撞击作用下，目前公认的点火机理是外界力刺激作用下在炸药内部形成能量局域化，产生局部高温区域，从而生成热点，当热点温度到达点火温度后发生点火反应。郭洪福^[11]通过颗粒炸药在落锤撞击下碎片分布试验，得出颗粒炸药在落锤撞击下的热点形成的主要原因是摩擦和塑性功；颗粒间的接触点的应力集中能导致局部产生较大的塑性变形，塑性功导致较高的温升，引起颗粒点火^[12]。

已知 HMX 颗粒在应力作用下会产生塑性变形和弹性变形，但是弹性变形不做功所以只考虑塑性功。由于 AUTODYN 软件没有直接计算炸药温升的功能，需要根据仿真得出的塑性功建立计算温升的公式。以单个颗粒为单位体积，假设塑性功 W_s 全部转化为热能 Q ，热量积累引起的温度变化 ΔT 为：

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} = \frac{W_s}{c \cdot m} \quad (3)$$

式 (3) 中： c 为颗粒的比热容， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； m 为颗粒质量， kg 。

根据公式 (3) 计算得到在不同下落高度 (h) 的落锤撞击下颗粒炸药的温升 (ΔT) 结果，将此结果和采用双线性同性硬化材料模型^[10]计算得到的温升结果进行比较，如图 3 所示。由图 3 可知，本文计算出的颗粒温升结果和文献^[10]的温升结果近似。

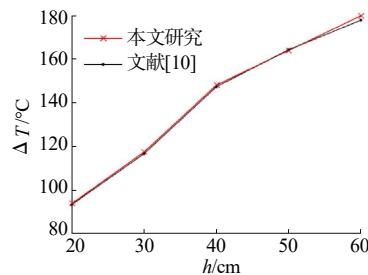


图 3 颗粒温升对比折线图

Fig. 3 Line chart of particle temperature rise comparison

2 模拟结果与分析

2.1 HMX 反应速率方程参数修正结果

结合颗粒撞击试验过程及临界撞击能，对 HMX 的低速撞击过程进行数值模拟，近似标定 HMX 点火增长模型的反应速率方程参数。利用预设的点火增长模型参数仿真计算临界撞击能，直到计算得到的临界

撞击能与试验结果基本吻合。炸药临界撞击能^[13]计算公式为:

$$E=10 \cdot m \cdot h \tag{4}$$

式(4)中: E 为炸药临界撞击能, J ; m 为落锤质量, kg ; h 为落锤高度, cm 。

刘华宁^[14]通过比较可修正参数对反应速率的影响曲线,发现炸药的感度随着压力指数 y 值的增大而降低,反之则升高。点火项的临界压缩度 a 的变化对炸药的反应速率影响较小,当临界压缩度 a 增大反应速率降低。已知 HMX 的临界落高是 15.8cm,将临界撞击能预设 7.742J。LX-10 炸药的成分主要为 HMX,因此在 AUTODYN 材料库中选取 LX10J1,在此基础上进行参数修正。具体修正流程如图 4 所示。

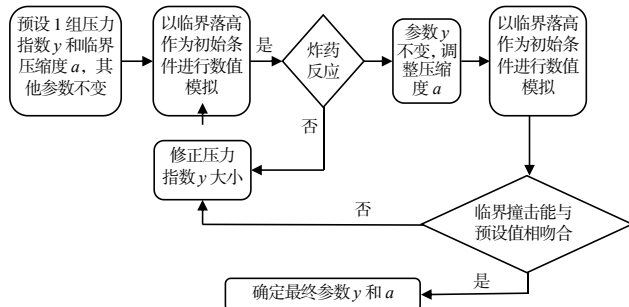


图 4 参数修正流程

Fig.4 Parameter correction process

在三项式中 λ 为炸药的反应度, $0 \leq \lambda \leq 1$, 当 $\lambda=0$ 时表示炸药未发生任何反应; 当 $\lambda=1$ 时, 表示炸药已经完全反应, λ 值在 AUTODYN 软件中被定义为 ALPHA。落锤撞击试验传感器测到的撞击时间数量级为 $10^{-3}s$ ^[15], 因此可以通过炸药在 $1\ 000\ \mu s$ 内的 ALPHA 值来确定炸药是否发生反应。以临界落高为初始条件, 数值仿真模拟得出 ALPHA 值随着不同的临界压缩度 a 和压力指数 y 的变化, 如图 5 所示。

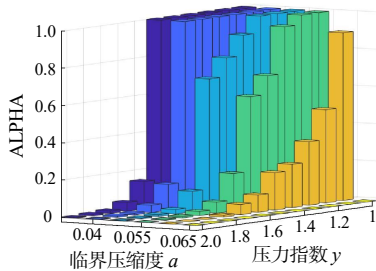


图 5 ALPHA 随临界压缩度 a 和压力指数 y 变化柱状图

Fig.5 Histogram of the change of ALPHA with critical compressibility a and pressure index y

由图 5 可知, 当压力指数 $y=1.5$ 、临界压缩度 $a=0.04$ 时炸药完全反应, $\lambda=1$ 。压力指数 $y=1.5$ 、临界压缩度 $a=0.05$ 时 $\lambda < 1$, 此参数下炸药未完全反应。初步拟定临界压缩度 $a=0.05$ 、压力指数 $y=1.5$, 其他反应速率方程参数保持不变, 最后设定的反应速率方程参数见表 3。利用表 3 参数进行撞击感度仿真, 计算得到 HMX 颗粒炸药发生反应时的临界撞击能为 7.84 J, 与文献[13]的结果基本吻合。

2.2 颗粒炸药的受力分析

为了研究落锤的下落高度对 HMX 颗粒微观受力影响, 针对落高为 20cm、30cm、40cm、50cm、60cm 的情况, 对直径 $500\ \mu m$ 的 HMX 颗粒进行撞击仿真计算。落高为 40cm 时, 颗粒炸药在落锤撞击作用下不同时刻的塑性应变、应力分布和压力分布云图如图 6 所示。

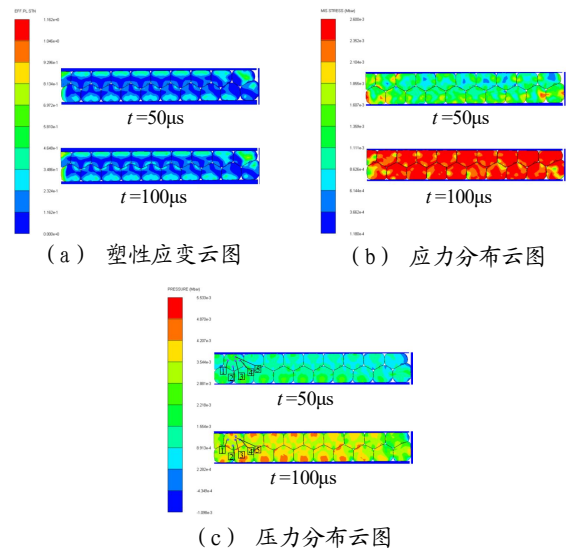


图 6 颗粒受力分布云图

Fig.6 Cloud diagram of force distribution of particles

在落锤撞击过程中, 撞击载荷是不均匀的, 所以在作用过程中会出现分布在不同位置的塑性功较大的点。由图 6 (a) 可见, 在击柱撞击作用下, 击柱与颗粒的接触面和颗粒中心出现较大的局部塑性应变。由图 6 (b) 可见, 在颗粒与击柱接触面以及在颗粒与颗粒的接触面上先出现应力峰值, 随着时间增加使得颗粒整体应力变大, 所以颗粒与颗粒接触面以及颗粒与击柱的接触面是主要产生塑性功的部位。由图 6 (c) 可见, 颗粒在落锤撞击加载下受压, 在 $t=50\ \mu s$ 时, 颗粒与击柱的撞击表面以及颗粒接触面处出现压力峰

值 (2.557×10^{-3} Mbar), 塑性应变值最大为 8.265×10^{-1} , 应力集中处的应力为 2.6×10^{-3} Mbar。随着时间增加, 大部分颗粒的应力值达到屈服应力而造成塑性变形。随着压力不断增大, 塑性应变也增加。 $t=100\mu\text{s}$ 时, 压力峰值为 5.533×10^{-3} Mbar, 并且压力峰值同样出现在击柱与颗粒的接触面及颗粒之间的接触面处。

由图 6 (c) 可见, 在颗粒炸药内部设置了 5 个高斯点, 观察其压力和反应度随时间的变化, 取平均值得到不同落高下颗粒炸药内部压力曲线, 如图 7 所示。落锤下落高度越高, 颗粒炸药内部的平均压力峰值越大且出现时间越早, 具体压力峰值见表 5。

表 5 不同落高下颗粒的压力峰值

Tab.5 The pressure peak of particles at different drop heights

落高/cm	20	30	40	50	60
$p \times 10^{-3}$ /Mbar	1.007	1.192	1.227	1.258	1.300

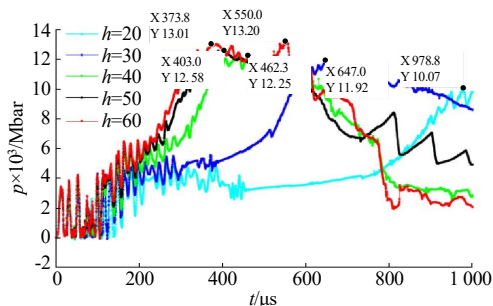


图 7 不同落高下颗粒炸药内部平均压力曲线图

Fig.7 Curves of average internal pressure of granular explosives at different drop heights

2.3 颗粒炸药在低速撞击加载下的点火过程分析

为研究颗粒炸药在低速撞击加载下的热点形成过程, 对其过程进行数值模拟, 得到不同时刻炸药颗粒的 ALPHA 和塑性功分布云图, 如图 8 所示。

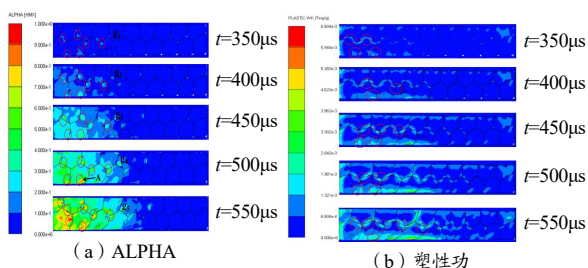


图 8 不同时刻炸药颗粒的 ALPHA 和塑性功的分布云图
Fig.8 Distribution cloud diagram of ALPHA and plastic work of explosive particles at different times

图 8 (a) ALPHA 分布云图展示了颗粒炸药局部热点从初步形成到生长、最后热点相互汇合的过程, 在 $t=350\mu\text{s}$ 时在颗粒与颗粒接触面开始出现多个反应度较低的 g_1 系列点, 反应度在 0.1 左右。随着时间的

推移, 从 g_1 点到 g_5 点可以看出热点在不断向四周扩散连结并且反应程度也在增加。在 $t=500\mu\text{s}$ 时出现了反应度为 1 的“热点” A, 在 A 点附近的炸药反应程度也在增加, 在 $t=550\mu\text{s}$ 时, A 点周围出现了更多反应度为 1 的“热点”。由图 8 (b) 可以看到颗粒交界处的塑性功远大于颗粒内部塑性功。相同时间内颗粒接触面处有更多塑性功转化成热, 使得短时间内交界处附近温度上升形成热点, 所以从图 8 (a) 中可看出不同时刻颗粒与颗粒的接触面的反应度始终高于其他位置的反应度。综上分析可知颗粒交界处较多塑性功转化成热使得交界处产生高温, 出现热点, 并且生成的高温热点随时间扩散连结导致更多的炸药发生反应, 与文献[16]试验结论一致。

图 9 为 5 种落高下颗粒炸药反应度随时间的变化图。由图 9 可知: 落锤下落高度越高, 炸药的反应拐点出现越早, 炸药的反应度由 0 变成 1 所需时间越短。考虑到颗粒的大小对温升结果的影响, 利用温升公式计算直径 d 为 $400\mu\text{m}$ 和 $500\mu\text{m}$ 的 HMX 颗粒在不同落高下的温升值, 结果如图 10 所示。

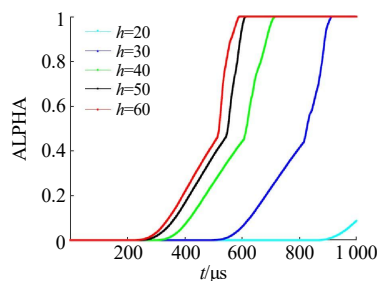


图 9 不同落高下 ALPHA 随时间变化图

Fig.9 ALPHA changes with time under different drop heights

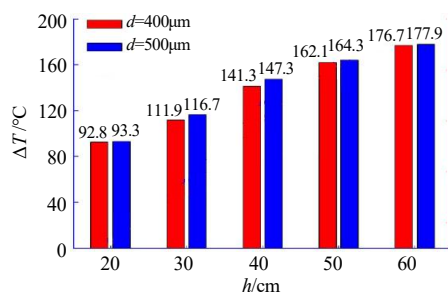


图 10 不同落高下温升变化柱状图

Fig.10 Histogram of temperature rise changes under different drop heights

由图 10 可知: 随着落锤下落高度增加, 炸药颗粒的温升增大。下落高度在 20~40cm 之间颗粒温升变化较大, 在 40~60cm 之间颗粒温升趋势相对减缓。在

相同条件下,直径为400 μm 和500 μm 颗粒的温升变化趋势基本一致,其温升数值也基本近似。但颗粒越大则孔隙率越大,局部塑性功也越大。所以在相同条件下,直径为500 μm 的颗粒温升略高于直径为400 μm 的颗粒,表明颗粒炸药直径越大,越容易发生点火。分析可知,随着下落高度增加,颗粒在短时间内有更高的温升值,更容易形成高温热点而引发点火,数值模拟结果与文献[2,3]相符合。

3 结论

利用三项式点火增长状态方程描述了颗粒炸药在落锤撞击下的点火过程,研究了塑性功生热对颗粒炸药热点形成和点火的贡献,结合反应度ALPHA云图观测了热点位置,以及热点生成、缓慢增长到聚合的过程。数值模拟结果表明:(1)在落锤的低速撞击作用下,塑性功转化为热,能够使得局部温度升高形成热点。结合塑性功分布云图和ALPHA云图分析得出撞击作用下颗粒交界处优先出现高温热点并增长汇合。(2)在相同条件作用下,颗粒炸药直径越大则发生点火的几率越大;随着落锤的下落高度增加,炸药颗粒在相同时间内有更高温升值,更容易发生点火。(3)利用三项式点火增长模型分析颗粒炸药在低速撞击下点火所得结果与文献[2,3,11]结果基本吻合,表明该模型用于颗粒炸药低速撞击点火特性分析是可行的。

参考文献:

- [1] 傅华,赵峰,谭多望,等. 冲击作用下HMX晶体空洞塌缩热点生成机制的细观数值模拟[J]. 高压物理学报, 2011, 25(1): 8-14.
- [2] 尚海林,杨洁,赵锋,等. 低速撞击下HMX颗粒炸药点火燃烧实验研究[J]. 现代应用物理, 2017, 8(02): 69-73,84.
- [3] 吴艳青,黄风雷,艾德友.HMX颗粒炸药低速撞击点火实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 592-599.
- [4] 赵莹. 颗粒炸药撞击力学试验和数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [5] 蒋城露,赵锋,尚海林,等. 运用三维离散元技术模拟落锤撞击下奥克托今颗粒的点火燃烧过程[J]. 原子与分子物理学报, 2020, 37(5): 721-727.
- [6] 濮赞泉. 破片撞击起爆战斗部影响因素及判据研究[D]. 江苏南京: 南京理工大学, 2016.
- [7] 吴立志. 激光驱动金属飞片冲击起爆技术研究[D]. 江苏南京: 南京理工大学, 2010.
- [8] 孙文旭,王万军,罗智恒,等. 低压长脉冲作用下PBX炸药的响应特性[J]. 弹道学报, 2019, 31(1): 75-79,84.
- [9] 吴艳青,鲍小伟,王明扬,等. RDX/HMX颗粒炸药落锤撞击点火-燃烧机理[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(02): 339-346.
- [10] 殷璐. 弹塑性对HMX晶粒撞击点火影响研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [11] 郭洪福,吴艳青. 奥克托今/黑索今颗粒炸药在落锤撞击下碎片分布的实验分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 86-90.
- [12] Menikoff R. Granular explosives and initiation sensitivity [R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1999.
- [13] 吴星亮,王红松,李文海,等. RDX和HMX机械刺激临界反应阈值试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 9-14.
- [14] 刘华宁. 战斗部射流冲击起爆与减敏规律研究[D]. 江苏南京: 南京理工大学, 2015.
- [15] 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 (3): 127-129,109.
- [16] Wu Y-Q, Guo H-F, Huang F-L, et al. Effects of large-sized granules on ignition and burning of powdery explosives under drop-weight impacts[J]. Combustion Science and Technology, 2018(5): 1-9.