

颗粒特征尺寸对爆炸驱动惰性金属颗粒运动的影响

刘 意, 王仲琦, 陈 翰, 白春华

北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 在炸药中添加惰性金属颗粒, 形成一种特殊的非均质炸药。当炸药爆炸后, 惰性颗粒在爆炸产物及爆轰波的驱动下, 颗粒能达到较大的速度, 对一定方向和范围内的目标造成毁伤效应。由于惰性颗粒在空气中存速能力较差, 速度很快衰减, 因此可以有效控制颗粒飞散距离。颗粒在炸药中的位置、颗粒的形状以及颗粒抛撒速度对颗粒运动过程和抛撒范围的研究具有重要作用。基于有限元分析软件 AUTODYN, 建立炸药爆轰驱动单颗粒惰性金属颗粒模型, 对炸药爆轰驱动不同位置惰性金属颗粒以及颗粒不同特征尺寸的最大初速度进行计算, 对计算结果进行了分析, 得到了以上参数对颗粒抛撒初速度的影响及抛撒初速度的宏观规律。计算结果为研究爆轰驱动粒子群机制提供了重要的理论依据。

关键词 特征尺寸; 爆轰; 惰性颗粒; 有限元

中图分类号 TG156

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)22-0048-06

Influence of Characteristic Dimension upon Movement of Explosion-Driven Inert Metal Particles

LIU Yi, WANG Zhongqi, CHEN Han, BAI Chunhua

State Key Laboratory of Explosion Science & Technology;
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The charge made of a mixture of explosive and dense inert metal particles is a kind of special heterogeneous explosive. After explosion, the particles driven by the explosion will reach a high speed, and can destroy the target in a certain direction and range. As the speed of inert metal particles decreases quickly, the flying distance of the particles can effectively be controlled. Reducing the amount of explosives can reduce the power of blast. Therefore, the destruction area can thus be controlled. In order to effectively control the destruction area and distance of the inert particles, we must know more about the movement of the particles in the explosion. The positions and shapes of particles in the

explosive are very important in the dispersal mechanism. With the finite element code AUTODYN, a model of detonation driven single metal particle is established. Numerical simulations and comparative analyses are carried out, to study the movement of particles with different initial positions, radii and shapes. The analytical results provide some information on dense inert metal explosives.

Keywords characteristic dimension; detonation; inert metal particle; finite element method

0 引言

在现代及未来战争中, 大范围、完全摧毁式的毁伤已经不是战争的唯一目标。在有些情况下, 准确命中目标的同时, 有效控制毁伤范围与程度, 保护临近的非打击目标成为作战的目的。在这种作战目的前提下, 大部分常规武器很难完成作战任务。常规炸弹对目标的毁伤主要依靠破片和爆炸冲击波等元素, 其毁伤范围决定于破片的飞散距离和冲击波压力场作用范围。这些毁伤元素不能同时实现所需毁伤范围内高效毁伤和所需毁伤范围内不毁伤的目的。为了达到改进或控制炸药性能等目的, 国内外对于在炸药中添加其他化学物质(如金属等)的课题进行了大量研究。如在炸药中添加金属铝粉。金属铝粉属于活性金属, 化学性质较为活泼, 铝粉颗粒在炸药爆轰中参与氧化反应, 在爆轰反应后期同爆轰产物释放

收稿日期: 2009-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772032); 总装备部预研重点基金项目(9140A05080507BQ0156)

作者简介: 刘意, 博士研究生, 研究方向为爆炸计算力学, 电子信箱: meaning922@bit.edu.cn; 白春华(通信作者), 教授, 研究方向为爆炸安全, 电子信箱: chbai@bit.edu.cn

能量,提高了炸药的爆热。理论上,在炸药中加入大量惰性金属粉末,与相同质量的炸药相比,前者装药中炸药的含量将大大降低。惰性金属指的是不参与爆轰反应(这与通常使用的含铝炸药完全不同)的金属,高密度惰性金属粉末通常包括含钴、镍和钨的合金等。这种新概念装药起爆后,由于炸药含量小,理论上炸药形成的冲击波超压场范围要减小。高密度惰性金属在爆炸作用下被抛撒形成金属粒子流,该金属粒子流在一定距离内具有较大的动能,能形成很好的毁伤元,同时由于颗粒在空气介质中的飞行规律决定了颗粒的速度成指数衰减,这给研究人员提供了控制粒子流毁伤范围的新思路。由于惰性金属不参与爆轰化学反应,爆炸驱动的惰性金属流(钨合金^[1])的高速度和大密度,使其具有很大的毁伤动能,又由于金属颗粒粒径细小,在空气中飞行速度衰减迅速,若改变装药种类和颗粒尺寸,可有效控制颗粒飞散距离^[2]。因此,在炸药中添加高密度惰性金属颗粒将可达到准确命中目标又保护临近非打击目标的目的。由于炸药中添加了惰性金属,炸药的比重将会大大减小,从而还可控制冲击波的毁伤范围。Mader^[3]对含惰性金属的黑索今炸药进行了数值计算,对爆轰波在颗粒缝隙间传播进行了研究和探讨。Al'tschuler等^[4]对含钨颗粒的 HMX 炸药的爆轰现象进行了研究,认为该非理想炸药的爆轰速度由绕过金属颗粒的独立小爆轰波来决定。文献[5]、[6]对爆轰驱动固定燃料的分散以及爆轰驱动金属粒子群的终点效应进行了研究。Zhang等^[7]对含惰性金属的硝铵炸药对金属颗粒的飞散驱动进行了实验分析研究。Frost^[8]同样对含钢颗粒的硝基甲烷炸药的爆轰进行了研究,其研究重点放在了金属颗粒与爆轰波之间的动量传递上。Zhang^[9-10]对液体炸药和 RDX 炸药中混有不同金属颗粒,在不同爆轰压力情况下的爆轰传播问题进行了实验和理论计算分析。研究结果表明,重金属(如钨)和爆轰波之间的动量传递不是很明显,相反铝颗粒和钨颗粒等轻金属的加速现象很明显。以上文献及文献[11]~[13]中对于爆炸驱动惰性金属颗粒的问题,大多将研究重点放在爆轰波在惰性金属颗粒间的传播过程。本文对颗粒在炸药(TNT)中的不同位置、炸药爆轰驱动颗粒的速度进行数值计算,并得到了颗粒特征尺寸对炸药爆轰驱动颗粒速度的影响规律,对深入研究炸药爆轰驱动惰性金属颗粒群的作用机制和实验设计提供参考。

1 炸药爆轰产物流场的数值计算

1.1 模型建立

本文旨在得到炸药爆轰驱动不同位置颗粒的速度规律。为了简化计算,本文所有计算模型均为二维轴对称。为了研究分析惰性金属颗粒运动的背景流场,即爆炸产物在空气中飞散运动,利用 AUTODYN 进行了一次炸药爆炸中无颗粒的数值模拟。这次数值模拟中,炸药的尺寸、边界条件、网格划分都与含惰性颗粒的数值模拟相同。空气和炸药都采用 Euler 网格。炸药选择 TNT,尺寸如图 1 所示。

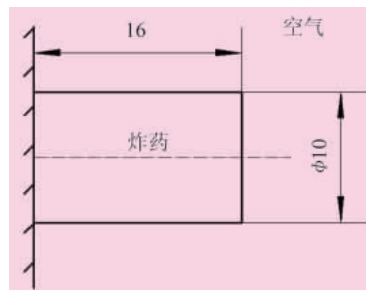


图 1 圆柱装药结构尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Cylinder charge dimensions (unit: mm)

图 1 中,炸药为圆柱形装药,装药的左端为刚性壁面,其他部位为空气。模拟中坐标系采用二维轴对称坐标系, x 轴为对称轴。

1.2 计算结果及分析

图 2 为初始时刻炸药和空气网格划分图。从左端面(图 2 中红线)起爆,左端边界为刚性壁面,也可以理解为炸药放在地面上起爆,或炸药从中心起爆。右边界和上边界为空气的流出边界。

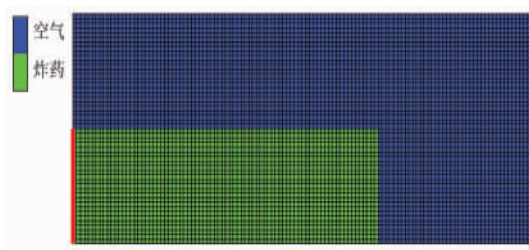


图 2 炸药与空气网格图

Fig. 2 Mesh of explosive and air

图 3 分别为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 和 3 μs 时的压强等高线图(单位:kPa)。

如图 3 所示,在 2.5 μs 前,爆轰波阵面及后面的高压区由左向右传播,由于侧向稀疏波的作用,高压区后面又跟随一个低压区域,就好像是一个近似三角形的高压区域随着爆轰波阵面向右移动。由图 3 可以看出,爆轰波阵面的压强最大可达到 17~18 GPa。

当爆轰波传播到炸药的右端面时,在端面处反射出一个左传的稀疏波,此时炸药爆轰过程结束,使得最高压强区域不能再向右运动,并且压强迅速下降。由于产物内部压强仍高于周围空气的大气压,产物仍向外加速膨胀扩散,直到与周围大气压强相等。

为得到流场中点的各参数随时间变化的曲线,在 x 轴上设置了 20 个数据示踪点,相邻两点间隔 1 mm,标号从左到右为 1~20。图 4 为 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 和 15 号示踪点的 x 方向速度的变化曲线,这 8 个点在初始时刻都是在炸药内部的。

如图 4 所示,各点速度在达到峰值后又迅速下降,除了 15 号点(距离起爆面 14 mm,离装药右端面 2 mm 处)以外,其

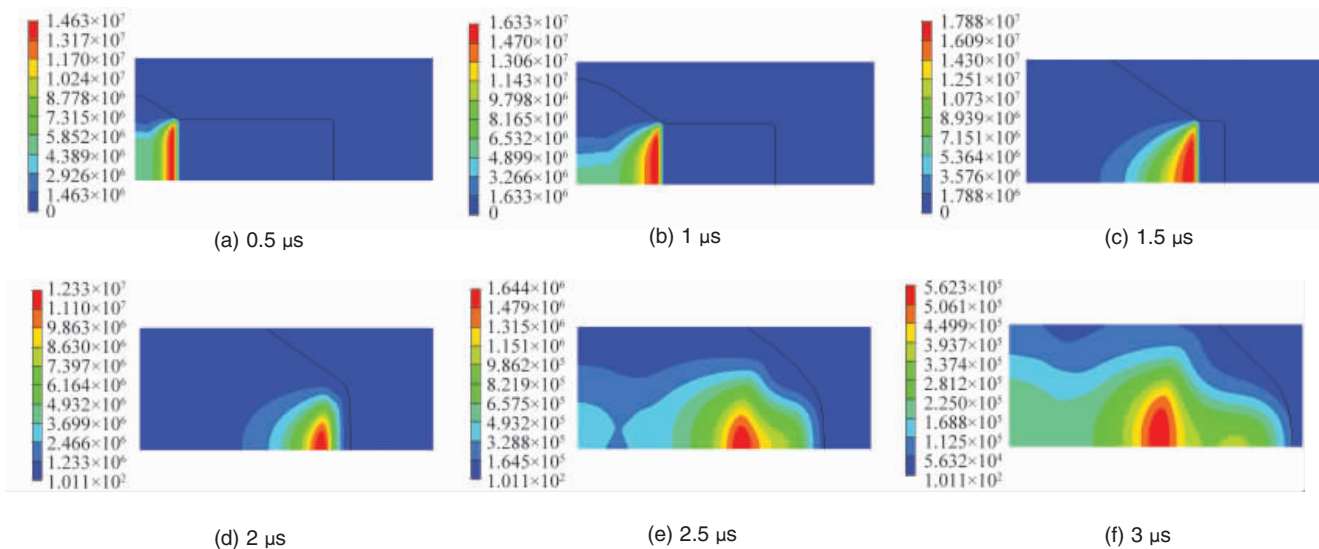


图3 不同时刻的压强等高线图

Fig. 3 Pressure contour at different instants

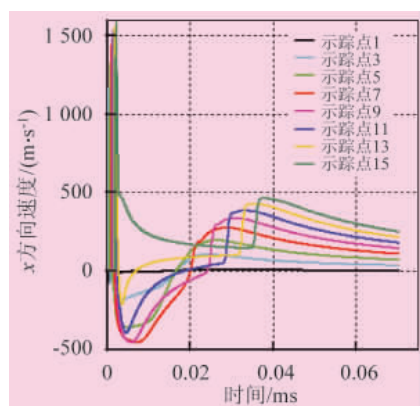


图4 示踪点速度-时间曲线

Fig. 4 Velocity-time curve of gauge points

他点的速度都变成了负值。在7号点(距起爆面6 mm处)和9号点(距起爆面8 mm处)出现了负方向最大速度。

各点的最大和最小速度如表1所示。

表1 示踪点速度值
Table 1 Velocities of gauge points

示踪点	距起爆面距离 /mm	x 方向速度最大值 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	x 方向速度最小 值 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0	262.59	-73.23
3	2	1 158.51	-198.93
5	4	1 318.13	-361.82
7	6	1 433.42	-454.74
9	8	1 478.74	-455.65
11	10	1 526.03	-396.17
13	12	1 552.92	-215.53
15	14	1 583.01	0

从图4和表1可以看出,1号示踪点在 x 方向速度最大值为262.59 m/s,其他示踪点的最大速度值随着距起爆面距离的增加而增加。1号示踪点设置在起爆面上,在起爆瞬间,该点已经位于爆轰波阵面中央,周围存在较小的压强梯度,故 x 方向速度最大值很小。由于爆轰波阵面和高压区的峰值时刻出现在距炸药右端面较近的区域,之前高压区的压强峰值处于增长期,故在炸药内部示踪点的速度峰值是随着距离的增加而增长的。

2 颗粒位置对运动规律的影响

2.1 模型建立

由于侧向稀疏波的影响,流场中各点速度的变化各不相同。本文将对在圆柱装药的轴线上处于不同初始位置的钨金属颗粒进行分析,并得出其最大速度和速度变化规律。

本文采用 Euler-Lagrange 耦合算法,炸药和空气采用 Euler 网格,颗粒采用 Lagrange 网格。研究的颗粒直径在1 mm以下,因此,为了使计算结果较准确,颗粒附近和颗粒运动要经过的流场的网格要小于1 mm。另外,为了节省计算时间,本文的模拟对颗粒的变形不作研究;由于计算的时间步长会受到最小网格的影响,网格越小时间步长越短,因此颗粒网格划分较少。计算模型(含边界条件)如图5所示。

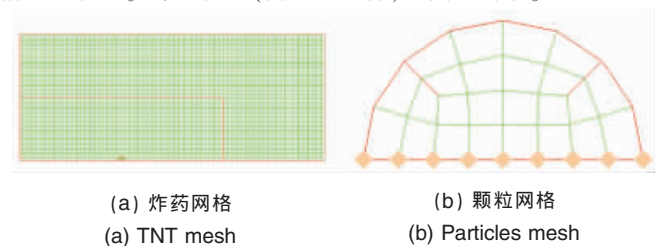


图5 计算模型网格

Fig. 5 Model mesh

2.2 计算结果

本文对直径 0.3 mm 的颗粒在不同初始位置的情况进行了多次计算。3.5 μs 时刻计算网格速度场矢量图和不同初始位置(1.5,8,14,14.5 和 15 mm)计算得出的时间-速度曲线见图 6 和图 7。

由以上结果可以看出,初始位置在 14.5 mm 之前的颗粒都有一个共同特点,就是在前面的数个微秒内,速度会急剧地增加到一个峰值,接着剧烈衰减,最后稳定下来。而在初始位置为 15 mm 颗粒的时间-速度曲线上并没看到明显下降。

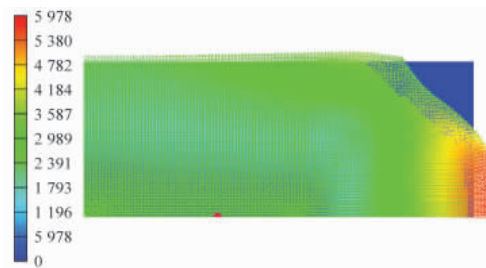


图 6 3.5 μs 时刻计算网格速度场矢量图(单位:m/s)

Fig. 6 Calculation results (unit: m/s)

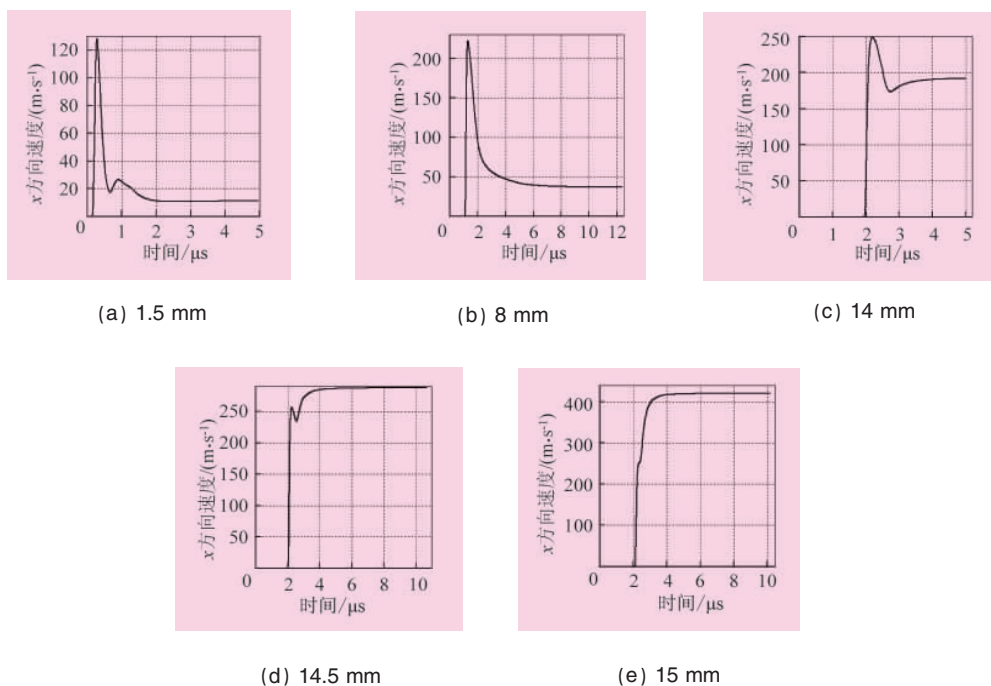


图 7 不同初始位置颗粒的时间-速度曲线

Fig. 7 Velocity-time curve of particles in different positions

2.3 结果分析

在第 1.2 节研究产物飞散过程时,出现一个近似三角形的高压区域随爆轰波向右移动的现象。当这个高压区域的中心(压强最高处)移动到颗粒处之前,颗粒处于正向的压强梯度中,向前加速。但是高压区域移动的速度(几乎相当于爆轰波传播速度,但要慢些)比颗粒的移动速度快,当高压区域中心超过颗粒后,颗粒又处于负的压强梯度中,故出现了急剧的减速。最后当高压区域离得较远后,压强梯度变得很小,颗粒速度的变化很小。由第 2.2 节的结果可以看到,当爆轰波传播到右端面,即炸药爆轰完成后,最高压强区域不再向右移动。此时的高压区域中心并没有移动到原炸药的右端面,而是在距起爆端面 14~15 mm 附近,并且由于右端面反射的稀疏波影响,高压区域中心逐渐向左移动,即在原炸药右端面左 1 mm 左右的区域没有受到负压强梯度的影响,因此初始位置为 15 mm 的颗粒速度没有出现明显的下降。

由图 7 可以看出,随着初始位置向右移,颗粒的最大速

度和之后较稳定的速度在增加。下面就不同初始位置颗粒的速度进行对比分析。图 8 显示了不同初始位置的颗粒时间-速度曲线的差别,颗粒初始位置依次为 1.5,8,14,14.5,15 和 15.7 mm。15.7 mm 处的颗粒与炸药右端面相切。

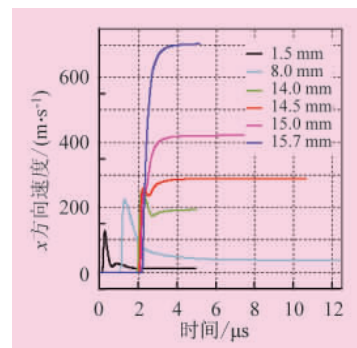


图 8 不同初始位置颗粒的速度曲线对比

Fig. 8 Velocity-time curve of particles in different positions

通过 AUTODYN 后处理导出颗粒速度曲线数据,得出不同初始位置颗粒最大速度和最后的稳定速度,如表 2 所示。

由图 8 和表 2 可以明显看出,随着颗粒初始位置往右移,在本文的计算时间内(十几微秒),颗粒能达到的最大速度和之后的稳定速度都增大了。并且,在 14 mm 以后的变化很大,位置变化不到 1 mm,速度增加了数百米每秒。可见,颗粒所处的初始位置对颗粒的运动速度有很大影响。由此可以预测,如果计算时间增加,爆轰产物继续膨胀,在产物曳力的作用下,颗粒的速度将会继续增加,直到颗粒与产物分离。

表 2 不同初始位置颗粒速度值
Table 2 Velocities of particles in different positions

初始位置/mm	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	稳定速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1.5	127.72	11
8	221.96	37
14	248.57	192
14.5	287.82	287
15	420.61	420
15.7	701.16	701

3 颗粒特征尺寸对运动规律的影响

针对同一初始位置,采用二维轴对称坐标和 Euler-Lagrange 网格,对半径不同的球形颗粒和非球形颗粒的运动规律进行分析。炸药和空气的 Euler 网格划分保持一致,改变颗粒的 Lagrange 网格,主要通过颗粒迎风面积和体积比较。

3.1 颗粒粒径对运动规律的影响

颗粒半径分别取 0.2、0.3、0.4 和 0.5 mm,且颗粒在炸药中初始位置相同,距离起爆点均为 15 mm。图 9 给出了不同半径颗粒的速度-时间曲线。

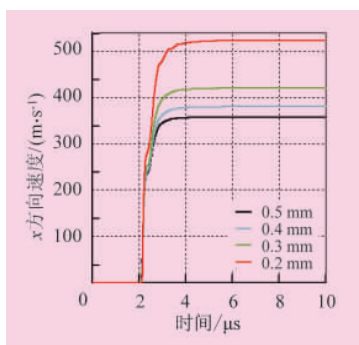


图 9 不同半径颗粒的速度曲线

Fig. 9 Velocity-time curve of particles of different radii

图 9 中各曲线数据如表 3 所示。

当初始位置为 15 mm 时,颗粒半径减小引起的速度变化很大,随着半径的减小,颗粒的速度增量逐渐增大。

3.2 颗粒形状对运动规律的影响

在运用 AUTODYN 建模时,建立的是轴对称的 1/2 模型,

表 3 不同半径颗粒的速度值
Table 3 Velocities of particles of different radius

颗粒半径/mm	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
0.5	357.21
0.4	379.96
0.3	420.61
0.2	523.74

模型对应的实体应为模型绕对称轴的回转体。图 10(a)~(c)所示分别为颗粒轴截面为菱形、圆锥底圆半径和高均为 0.5 mm,以及底圆半径和高分别为 1 和 0.5 mm、0.5 和 2 mm 的圆柱形颗粒的网格图。其中,圆锥形颗粒的迎风面积与半径 0.5 mm 的球形颗粒相等,但体积只有半径 0.5 mm 球形颗粒的一半,两圆柱形颗粒的体积、质量均相等。

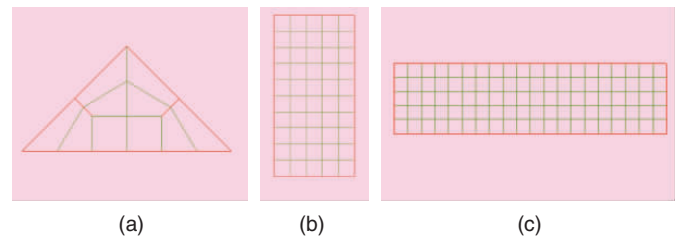


图 10 不同形状颗粒网格图
Fig. 10 Meshes of particles of different shapes

如图 11 所示,圆锥形颗粒与半径 0.5 mm 的球形颗粒(与圆锥颗粒具有相同迎风面积,体积和质量为圆锥颗粒的 2 倍左右)相比,在同一初始位置圆锥形颗粒所获得的速度要比球形颗粒的大。可见,相同迎风面积下,体积(质量)较小的颗粒速度较大。

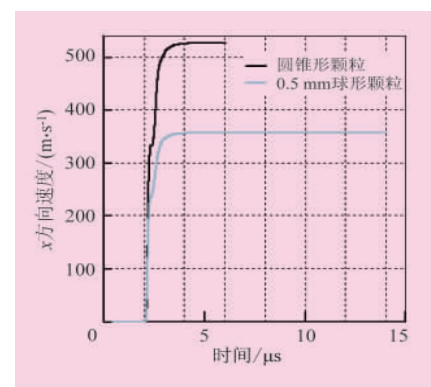


图 11 圆锥颗粒与半径 0.5 mm 球形颗粒的速度曲线对比
Fig. 11 Velocity-time curve of particles of different shapes

相同体积的两个圆柱形颗粒的速度-时间曲线如图 12 所示。圆柱形颗粒 1 的迎风面积为圆柱形颗粒 2 的 4 倍,其最大速度为圆柱形颗粒 2 的两倍多。可见,迎风面积增大,颗粒速度也增大。

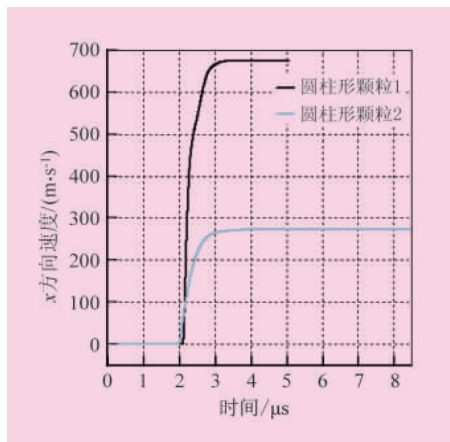


图 12 同体积的圆柱形颗粒的速度曲线对比 (圆柱形颗粒 1 为迎风面积较大的颗粒)

Fig. 12 Velocity-time curve of particles of same volume (particle of bigger frontal areec is presented by cylinder 1)

4 结论

本文通过有限元分析软件 AUTODYN, 对惰性金属颗粒在爆炸产物中的运动进行了数值计算, 得出如下主要结论。

1) 在爆轰的初始阶段, 由于侧向稀疏波的影响, 出现了一个三角形高压区域随爆轰波阵面向右移动, 所经过的区域先后受到相反的压强梯度的影响。因此, 背景流场中不同点的变化各不相同, 由此可预见, 不同初始位置的颗粒的运动也各不相同。

2) 对于相同尺寸的球形颗粒, 在不同的初始位置, 速度变化规律各不相同。在大约 14.5 mm 之前的速度会先急剧增加到一个峰值, 然后急剧下降, 最后会稳定在一个较小的范围内。越靠近炸药右端面, 稳定速度值与速度峰值相差越小, 在靠近右端面的地方, 颗粒的最大速度就是稳定速度。总的来说, 初始位置越远离起爆面, 颗粒速度越大。

3) 在同一初始位置, 不同尺寸的颗粒, 其速度随颗粒半径的减小而增大; 不同形状的颗粒, 其速度随迎风面积增大而增大, 随体积增大而减小。

文中的数值模拟, 由于受到计算步长和计算能力的限制, 计算时间较短, 得出的只是最初加速阶段的速度变化, 之后的运动还有待研究。在二维轴对称坐标系下, 所有物体都是绕轴的回转体, 非轴上颗粒和非回转体颗粒的运动还需要建立三维模型来进行研究。另外, 对于颗粒放置在炸药外部, 爆炸驱动颗粒群运动过程也要进行深入研究。本文的计算结果对惰性金属颗粒抛撒和装药结果设计有一定参考价值, 但其仅为得出一种研究方法而进行讨论, 结论仍需实际实验数据的进一步验证。

参考文献 (References)

[1] Wittenauer J P, 殷劲松. 钨和钨合金[J]. 中国钨业, 1993, (1): 22-25.

Wittenauer J P, Yin Jinsong. *China Tungsten Industry*, 1993(1): 22-25.

[2] 谭多望, 李翔, 温殿英, 等. 球形钨合金破片终点弹道性能实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 425-429.

Tan Duowang, Li Xiang, Wen Dianying, *et al.* *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 425-429.

[3] Mader C L, Kershner J D, Pimbley George H. Three-dimensional modeling of inert metal-loaded explosives [J]. *Journal of Energetic Materials*, 1983, 11(1): 293-324.

[4] Al'tschuler L V, Ryazonov V T, Speranskaya M P. The influence of heavy admixture on the detonation conditions of condensed explosive substances[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical*, 1972, 13(1): 122.

[5] 罗艾民, 张奇, 李建平, 等. 爆炸驱动作用下固体燃料分散过程的计算分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(2): 103-107.

Luo Aimin, Zhang Qi, Li Jianping, *et al.* *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(2): 103-107.

[6] Wang Zhongqi, Liu Yi, Chen Yahong, *et al.* Impact of inert metal particles flow on aluminium plate [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2008, 14(6): 403-408.

[7] Zhang F, Frost D L, Thibault P A, *et al.* Explosive dispersal of solid particles[J]. *Shock Waves*, 2001, 10: 431-443.

[8] Frost D L, Ormthanalai C, Zarei Z. Particle momentum effects from the detonation of heterogeneous explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 113529.

[9] Zhang F, Thibault P A, Link R. Shock interaction with solid particles in condensed matter and related momentum transfer[J]. *Proc R Soc Lond A*, 2003, 459: 705-726.

[10] Zhang F, Thibault P A, Link R, *et al.* Momentum transfer during shock interaction with metal particles in condensed explosives [C]. AIP Conference Proceedings, 2002, 620(1): 934-937.

[11] Ripley R C, Zhang F, Lien F S. Shock interaction of metal particles in condensed explosive detonation [J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2005: 499-502.

[12] Ripley R C, Zhang F, Lien F S. Acceleration and heating of metal particles in condensed explosive detonation [J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2007:409-412.

[13] Kaushik Balakrishnan, Suresh Menon. Simulation of blast wave propagation and particle motion from detonation containing dense inert particles[R]. AIAA 2008-4689, 2008.

(责任编辑 齐志红)

《科技导报》“科技工作者建议”征稿

“科技工作者建议”栏目专门刊登科技工作者近期提出的、与科学技术相关的工作意见和建议。科技建议应着眼于科技研究、发展、应用、政策等领域的实际问题, 要求有明确、具体的内容, 方法上尽量具有可操作性。文字应简洁明了, 非特别重大的建议以 500 字左右为宜, 特别重要的建议不超过 2 200 字。请注明建议人姓名、单位。欢迎国内外科技工作者及各级科协、学会投稿。栏目责任编辑: 王芷; 投稿邮箱: wangzhi@cast.org.cn。