文章编号:1000-5773(2011)06-0481-06

爆炸平面冲击波在金属颗粒介质中的衰减*

陈亚红[1,2],白春华[1],王仲琦[1],李建平[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.中北大学化工与环境学院,山西太原 030051)

摘要:分析了颗粒介质在冲击载荷下的加载、卸载本构关系,应用特征线理论对平面一维爆炸冲击波在颗粒介质中的衰减进行了计算。结果表明:组成颗粒的材料、孔隙率及炸药的爆速决定了初始冲击波峰值的大小。炸药爆速越高,介质孔隙率越大,材料本身的冲击阻抗越大,初始压力越高。炸药长度、材料本身的冲击阻抗及介质的孔隙率决定了冲击波的衰减速度。炸药长度越小,材料本身的冲击阻抗越大,介质的孔隙率越高,冲击波衰减越快。

关键词:爆炸力学;冲击波衰减;金属颗粒介质;特征线法
中图分类号:O347.5 **文献标识码**:A

1 引 言

炸药与颗粒/多孔介质接触爆炸有广泛的应用背景。研究表明,颗粒介质比密实固体吸收更多的冲击波能量[1]。Carroll 和 Holt 提出孔隙塌缩模型来解释颗粒/多孔介质中冲击波衰减[2]。Oh 等[3]、Dijken等[4]通过对强冲击波与多孔介质相互作用进行研究,发表了一系列高压冲击下多孔介质的状态方程,这些方程均基于金属密实状态下的高压冲击方程。通常采用流体近似分析金属中高压冲击波的传播,即在加、卸载过程中忽略材料的强度,p-v(压力-比容)关系按冲击绝热线处理。但金属在高压冲击下的弹性限(HEL,Hugoniot Elastic Limit)会有不同程度的提高,甚至可达数吉帕,忽略材料的强度有时会导致较大的误差。人们进一步提出了流体弹塑性模型[5],其加载和卸载过程均可分为弹性和塑性两个阶段。

炸药接触爆炸是炸药爆轰与应力波传播耦合的过程,具体研究相当复杂。近年来多用数值模拟对炸药接触爆炸进行研究[6-9]。在平面一维情形下,可用特征线法进行分析。本研究将应用流体弹塑性模型描述高压冲击下颗粒/多孔介质的本构关系,应用特征线法对一维条件下炸药与金属颗粒介质的接触爆炸进行研究,分析炸药及介质参数对冲击波衰减的影响规律。

2 一维模型及特征线分析

2.1 物理模型

考虑如图 1(b)下部所示的平面一维情形。长度为 l 的炸药与厚度为 h 的颗粒堆积体相互作用,模型左右两端为真空,$t=0$ 时刻炸药从 $x=0$ 的左端平面起爆。炸药起爆后爆轰波以速度 D 向右传播,波阵面后紧跟一簇简单波。$t=l/D$ 时爆轰波到达炸药与颗粒体系的分界面开始与颗粒体系发生相互作用。可列出一组双曲型偏微分方程,提供介质的加载、卸载本构关系即可使方程组封闭。

* **收稿日期**:2010-10-04;**修回日期**:2010-12-16
基金项目:国家部委预研重点基金项目(9140A05080507)
作者简介:陈亚红(1975—),男,博士研究生,主要从事爆炸安全及防护研究.E-mail:tsyjcyh@163.com
通讯作者:白春华(1959—),男,博士,教授,主要从事武器系统与安全工程研究.E-mail:chbai@bit.edu.cn

2.2 颗粒介质的本构关系

冲击波阵面过后颗粒介质的状态突跃到以初始状态为起点的冲击绝热线上。在等容条件下，通常应用 Güneisen 关系从密实材料的冲击曲线导出颗粒材料的冲击曲线，但在高压下会导致较大的误差。Oh 和 Persson 进行了改进，他们应用如下近似关系将两种冲击曲线联系起来[3]

$$\left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_{\mathrm{P}} \approx -\left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_{\mathrm{S}} \tag{1}$$

式中：e 表示比内能，v 表示比容；下标 P 表示颗粒介质，下标 S 表示密实介质。方程(1)适用于推导中高压(十几吉帕以上)颗粒介质的绝热冲击关系。给定颗粒介质的初始比容以及密实介质在中高压下比容的变化范围，由密实介质的 Hugoniot 方程、冲击波阵面突跃关系及(1)式，对各变量离散化并用差分代替微分，可得到颗粒介质中高压下 Hugoniot 方程的数值解。

冲击压缩过后的颗粒介质密度增大，可接近或超过密实介质在零压下的密度。在卸载过程中弹性段是主要的[5]，塑性段可忽略。卸载本构方程可近似表示为

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}v} = -k_{\Delta} = \mathrm{Const} \tag{2}$$

式中：σ 为正应力(取压应力为正值)，k_{Δ} 为体积弹性模量。颗粒介质高压冲击下的加、卸载本构关系如图 1(a)所示。

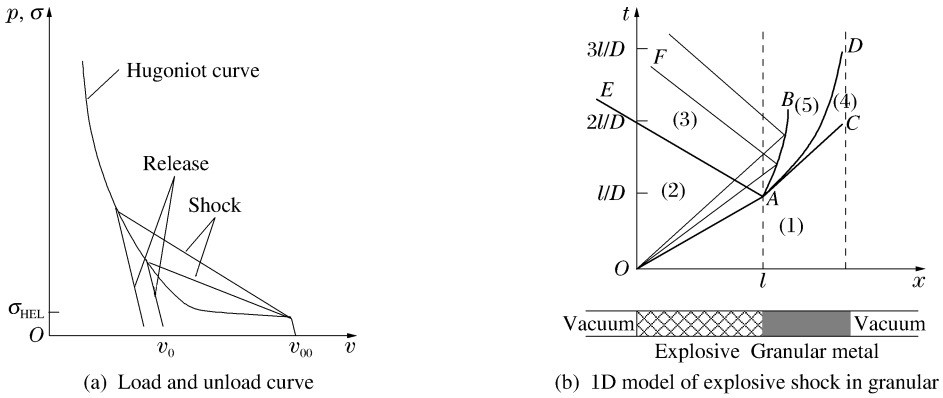


图 1 颗粒介质的冲击加、卸载本构关系及炸药冲击一维模型

Fig. 1 Shock loading and unloading paths, and 1D model of explosive shock in granular material

2.3 特征线法分析

爆轰产物与颗粒介质作用后界面开始运动，同时在介质中传播弹性前驱冲击波和塑性冲击波。据应力波理论，弹性前驱波保持强度不变向前传播，速度为介质声速。塑性冲击波在后续卸载波的追赶作用下不断衰减。前驱弹性波在到达右侧的自由面后发生反射，遇到塑性波后形成迎面卸载。限于篇幅，仅讨论追赶卸载作用下炸药冲击波的衰减。问题的行波图如图 1(b)上部所示。

将爆轰产物视为绝热指数 $k=3$ 的多方气体，(2)区的解为

$$x = (u+c)t, \quad u - c = -D/2 \tag{3}$$

式中：u 表示波后质点速度，c 表示当地声速。(3)区可表示为

$$x = (u+c)t, \quad x = (u-c)t + F_2(u_{\mathrm{b}} - c_{\mathrm{b}}) \tag{4}$$

式中：F_2 为由界面运动所确定的函数，下标 b 表示界面处的值。用下标Ⅰ表示爆轰产物，下标Ⅱ表示颗粒介质，设界面轨迹为 $x=z_{\mathrm{b}}(t)$，由界面上速度、压力连续条件，有

$$\mathrm{d}z_{\mathrm{b}}/\mathrm{d}t = u_{\mathrm{Ib}}(t) = u_{\mathrm{IIb}}(t), p_{\mathrm{Ib}}(t) = p_{\mathrm{IIb}}(t) \tag{5}$$

爆轰产物的压力可表示为当地声速 c 的函数 $p_{\mathrm{b}}=16\rho_{\mathrm{e0}}c_{\mathrm{b}}^{3}/27D$，结合(3)式及(5)式中的第 1 式，有

$$p_{\mathrm{b}} = \frac{16}{27}\frac{\rho_{\mathrm{e}0}}{D}\left(\frac{z_{\mathrm{b}}}{t_{\mathrm{b}}} - \frac{\mathrm{d}z_{\mathrm{b}}}{\mathrm{d}t_{\mathrm{b}}}\right)^3 \tag{6}$$

式中:$\rho_{\mathrm{e}0}$为炸药的密度。

塑性冲击波阵面过后(5)区中的介质受到压缩,继而在追赶卸载波的作用下卸载。沿右行特征线有

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = u_{\mathrm{II}} + c_{\mathrm{II}}, c_{\mathrm{II}}\,\mathrm{d}u_{\mathrm{II}} - v_{\mathrm{II}}\,\mathrm{d}p_{\mathrm{II}} = 0 \tag{7}$$

将界面迹线 AB 与冲击波迹线 AD 联系起来。忽略偏应力的影响,(2)式中的 σ 可替换为 p,由声速定义及(2)式可知,沿同一卸载线材料的声速不变。沿卸载线颗粒介质的弹性模量接近密实介质的弹性模量,因而压缩区颗粒材料的声速可取密实固体的声速,即沿右行特征线 c_{II} 保持定值。

设塑性冲击波迹线为 $x=z_{\mathrm{s}}(t)$,则有

$$U = \mathrm{d}z_{\mathrm{s}}/\mathrm{d}t_{\mathrm{s}} \tag{8}$$

式中:U 为冲击波波速,下标 s 表示冲击波。由卸载本构关系(2)式可知,压缩区内右行特征线为直线,则由右行特征线、界面迹线及冲击波迹线间的几何关系有

$$u_{\mathrm{II}} + c_{\mathrm{II}} = (z_{\mathrm{s}} - z_{\mathrm{b}})/(t_{\mathrm{s}} - t_{\mathrm{b}}) \tag{9}$$

设颗粒介质的 Hugoniot 方程 p-u 及 U-u 形式的数值解可用多项式拟合,分别为

$$p = \sum_{i=0}^{n} a_i u^i,\ U = \sum_{i=0}^{n} b_i u^i \tag{10}$$

式中:a_i、b_i 为拟合系数。联列(5)式~(10)式并结合沿右行特征线 c_{II} 保持定值的条件,用数值方法解初值问题即可得界面迹线、冲击波迹线、冲击波速及波阵面压力变化。

3 爆炸冲击波衰减的影响因素

3.1 炸药长度的影响

炸药为 TNT,密度为 1.57 g/cm^3,颗粒材料为钢,孔隙率为 40%,颗粒层厚度为 3 cm,炸药长度分别取 3、4、5 及 6 cm。计算结果见图 2,表明炸药长度对颗粒介质中冲击波初始峰值压力影响不大,但对冲击波衰减的影响十分明显。炸药长度越大,冲击波峰值压力衰减越慢,冲击波速度的衰减也越慢。

3.2 炸药性质的影响

固定炸药长度为 5 cm,颗粒材料仍为钢,孔隙率为 40%,颗粒层厚度为 3 cm,炸药分别为 TNT、RDX、PENT、B 及 HMX。计算结果如图 3 所示。由图 3 可知,炸药爆速越高,介质中初始冲击波的峰值压力越大。从冲击波迹线看,炸药爆速愈高,冲击波速度衰减愈不明显,说明颗粒介质对低爆速炸药有更好的衰减效果。

3.3 与炸药无约束情况对比

王海福等[10]对多孔铁中的冲击波衰减进行了实验研究,并对实验结果进行了拟合。本研究的计算结果与王海福等人实验结果的比较如图 4 所示。通过比较可知,本研究计算的冲击波衰减较慢,其主要原因是计算采用一维平面模型,而实验装置实际是三维的。在实际的三维情形下由于侧向稀疏波的影响,爆轰产物压力下降较快,因而介质中冲击波衰减也较快。这表明介质中爆炸冲击波的衰减必须考虑炸药与介质间的相互耦合及炸药的约束情况。由于侧向稀疏波的作用,无侧向约束药柱有一个影响冲击衰减的有效长度,该长度与药柱半径有关,约为药柱半径的 2 倍。当药柱长度小于有效长度时,冲击波在介质中的衰减速度与药柱长度相关,药柱长度越小,冲击波随距离衰减越快;若药柱长度大于有效长度,冲击波在介质中的衰减与药柱的长度基本无关。

由图 4 可知,王海福等人[10]计算的初始冲击波的峰值压力较本研究结果低约 7 GPa。这是由于使用了不同的 Hugoniot 方程的原因。从 TNT 与多孔铁的阻抗匹配关系估算,多孔铁中冲击波的初始峰值压力应在 20 GPa 左右,更接近本研究结果。

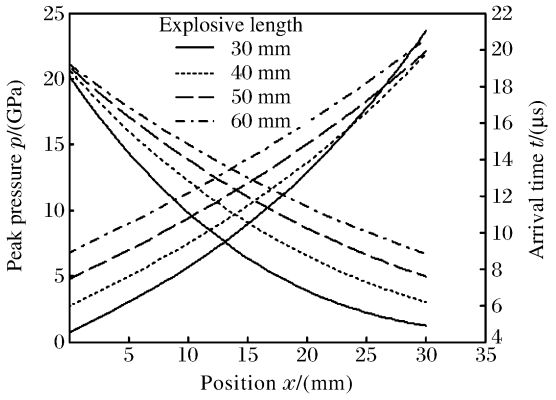


图 2 炸药长度对冲击波衰减的影响

Fig. 2 Effect of explosive length

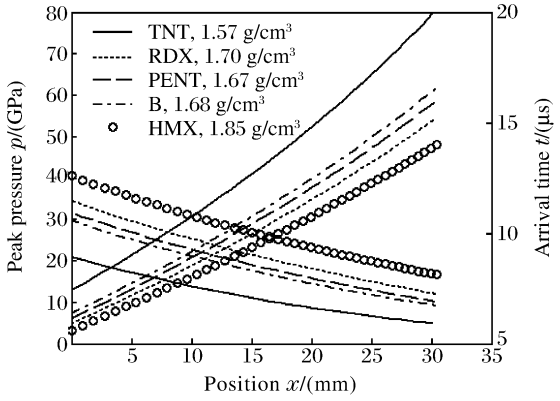


图 3 炸药性质对冲击波衰减的影响

Fig. 3 Effect of explosive type

3.4 孔隙率的影响

孔隙率对介质中冲击波的衰减如图 5 所示。炸药为 TNT，密度为 1.57 g/cm³，药柱长度为 5 cm，颗粒材质为钢，颗粒层厚度为 3 cm，孔隙率分别为 50%、40%及 30%。由图 5 可知，孔隙率越大，初始冲击波峰值越低，冲击波速度随距离的衰减也越快。

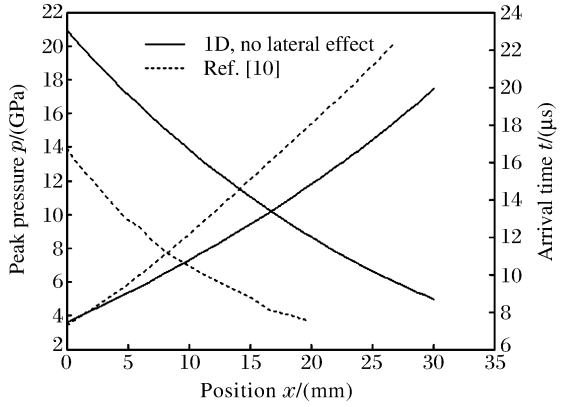


图 4 与炸药无约束情况对比

Fig. 4 Comparison with results of non-constraint explosive

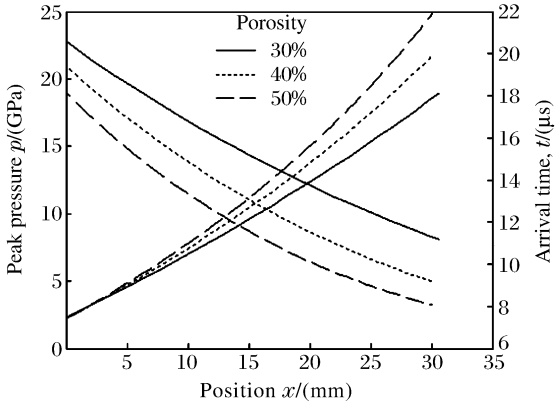


图 5 孔隙率的影响

Fig. 5 Effect of porosity

3.5 颗粒材质的影响

颗粒材质对介质中冲击波的衰减如图 6 所示。炸药为 TNT，密度为 1.57 g/cm³，药柱长度为 5 cm，颗粒层厚度为 3 cm，孔隙率为 40%，颗粒材质分别为钢、铜、钨、2024 铝及 T921 铝。

图 6 中两种铝颗粒介质中冲击波的初压、峰值压力衰减及冲击波迹线都非常接近，钢与铜的情况也比较接近，而钨颗粒中初始峰值压力最大，对冲击波衰减也较其它材料的颗粒快。介质中的爆炸冲击波初始压力与冲击阻抗有关，冲击阻抗越大则初始压力越大。初始压力和孔隙率相同时，密实介质的冲击阻抗越大，对应的颗粒介质的冲击阻抗也越大[11]。所考察金属的冲击阻抗排序为 7 747(钨)>

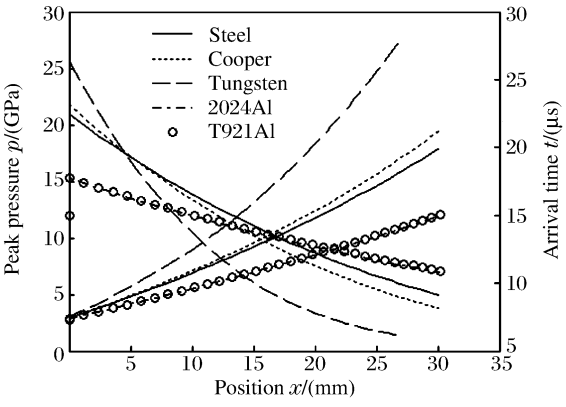


图 6 颗粒材料对衰减的影响

Fig. 6 Effect of granular particles

3 518(铜)>2 802(钢)>1 484(2024 铝)>1 427(T921 铝)(单位:kg/(cm^2 · s))。结合图 6 可知,空隙率相同时,在相同初始冲击压力下,对应的密实材料冲击阻抗越大,颗粒介质中的冲击波衰减越快。

4 结　论

通过特征线法对平面一维爆炸冲击波在颗粒介质中的衰减规律进行了计算分析,对炸药的长度、种类及颗粒介质的材料、孔隙率等的影响进行了讨论,得到以下结论。

(1) 颗粒材质、孔隙率及炸药的爆速共同决定了颗粒介质中初始冲击波峰值的大小。炸药的爆速越高,介质孔隙率越大,材料本身的冲击阻抗越大,则初始压力越高。

(2) 炸药长度、介质密实状态下的冲击阻抗及孔隙率决定了冲击波的衰减速度。炸药长度越小,介质密实状态下的冲击阻抗越大,介质的孔隙率越高,则冲击波衰减越。

(3) 在炸药无侧向约束的情形下,介质中冲击波的衰减更快,炸药长度有一个有效值,大于此长度的无约束炸药接触爆炸在颗粒介质中形成的冲击波的衰减与炸药长度无关。

References:

[1] Meyers M A. Dynamic Behavior of Materials [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994: 140-143.

[2] Carroll M M, Holt A C. Static and Dynamic Pore-Collapse Relations for Ductile Materials [J]. J Appl Phys, 1972, 43: 1626-1636.

[3] Oh K H, Persson P A. Equation of State for Extrapolation of High-Pressure Shock Hugoniot Data [J]. J Appl Phys, 1989, 65(10): 3852-3856.

[4] Dijken D K, DeHosson J T M. Thermodynamic Model of the Compaction of Powder Materials by Shock Waves [J]. J Appl Phys, 1994, 75(1): 203－209.

[5] Wang L L. Foundation of Stress Wave [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 213-223. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 第 2 版. 北京:国防工业出版社, 2005: 213-223.

[6] Meyers M A, Beson D J, Olevsky E A. Shock Consolidation: Microstructurally-Based Analysis and Computational Modeling [J]. Acta Mater, 1999, 47(7): 2089-2108.

[7] Mamalis A G, Vottea I N, Manolakos D E. On the Modeling of the Compaction Mechanism of Shock Compacted Powders [J]. J Mater Process Tech, 2001, 108: 165-178.

[8] WangY G, Hu S S, Wang L L. Shock Attenuation in Aluminum Foams under Explosion Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 516-522. (in Chinese)
王永刚,胡时胜,王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 516-522.

[9] Zohoor M, Mehdipoor A. Explosive Compaction of Tungsten Powder Using a Converging Underwater Shock Wave [J]. J Mater Process Tech, 2009, 209: 4201-4206.

[10] Wang H F, Feng S S. An Experimental Research on Shock Attenuations in Porous Materials [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997, 17(1): 41-44. (in Chinese)
王海福,冯顺山. 多孔材料中冲击波衰减特性的实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(1): 41-44.

[11] Somfai E, Roux J N, Snoeijer J H, et al. Elastic Wave Propagation in Confined Granular Systems [J]. Phys Rev E, 2005, 72(2): 21301.

Planar Explosion Shock Wave Attenuation in Granular Metal

CHEN Ya-Hong[1,2], BAI Chun-Hua[1],
WANG Zhong-Qi[1], LI Jian-Ping[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract: The loading and unloading paths of shock impact on granular metal were analyzed, and the attenuation of planar explosion shock wave in granular metal was investigated using characteristic method. The results showed that the initial peak pressure of the shock wave was determined by the type and property of the metal, porosity and detonation velocity of the explosive. The higher of impact impedance and porosity of metal and higher the detonation velocity were, the higher initial peak pressure was. The attenuation was determined by the length of explosive, impact impedance and porosity of the metal. The higher of impact impedance and porosity of metal and shorter explosive cylinder was, the more quickly the shock wave attenuated.

Key words: mechanics of explosion; attenuation of shock wave; granular metal; characteristic method