

高速钢球对水介质侵彻时 瞬时空腔形成的数值模拟

安波 蒋建伟 蒋浩征

(北京理工大学机电工程系 北京 100081)

摘要 采用二维有限差分非线性动力数值计算程序(Autodyn-2D)对高速钢球侵彻水介质时瞬时空腔的形成及其发展过程进行了数值模拟,获得了钢球侵彻水介质过程中速度衰减的规律、水介质中速度场和压力场的分布等数值模拟结果。数值模拟的结果与实验结果及现象相符。数值模拟结果及其相关分析为从理论上深入分析研究高速投射物对生物的致伤机理提供了重要的依据。

关键词 数值模拟 瞬时空腔 致伤机理

中图法分类号 O 352 I^①

1 引言

瞬时空腔是高速投射物(弹丸、破片等)侵彻生物组织时所发生的一种变化迅速的物理现象,是造成组织器官严重创伤的一个重要原因。瞬时空腔理论是创伤弹道学致伤机理的理论基础^[1]。

自1944年Black等采用高强度脉冲X射线摄影技术首次拍摄生物体内产生的瞬时空腔照片后,各国学者均对瞬时空腔现象进行了深入研究^[2~4]。但由于生物组织复杂,理论研究困难多,目前瞬时空腔的形成及其发展还没有比较成熟的理论^[1~3]。

鉴于生物组织的复杂性,在创伤弹道实验中经常采用水介质来模拟生物组织。因为大多数生物组织含水80%左右,其密度与水相近,而且水具有均匀、透明便于直接观察的特点,因此创伤弹道学中的某些现象是通过以水为介质的模拟来进行研究的^[4]。

虽然国内外学者对钢球侵彻水介质的数值模拟计算均有报道^[5~6],但由于计算历程过于短暂或计算范围和计算方法的限制等原因,未能就创伤弹道学中较为关注的瞬时空腔的形成及介质内压力场和速度场的分布等问题进行深入分析和计算。因此,采用较为先进的计算技术和处理程序对有关问题进行进一步的数值模拟分析仍是必要的^[7]。

2 高速钢球在水介质中的侵彻现象

高速钢球侵彻水介质的过程可分为撞击水面、空腔敞开、空腔闭合和空腔脉动消失4个阶段(整个过程的持续时间为60~70ms)^[1,4,8]。

① 安波:男,1963年8月生,在读博士,副教授。
1997-08-12收到原稿,1998-01-12收到修改稿。

(1)在钢球撞击水面的一个极短暂时间内,形成幅值很高的冲击波,并以球形压力波的形式向四周传播,其持续时间很短。

(2)一旦撞水阶段结束,由于水质点产生的径向扩张而形成圆锥形空腔。空腔的惯性膨胀使其内部压力降低,当内部压力低于环境大气压时,则形成外部空气进入空腔的气流。这时的空腔是与大气相通的,成为空腔敞开阶段。

(3)随着钢球侵彻距离的增加,空腔体积的不断增大和空腔内外压力差的不断降低,空腔腔壁的径向速度逐渐减小。随着空腔开口处气-水界面的水质点出现反向速度并向轴线会聚,空腔开始闭合,当空腔与大气被水层所隔绝后,则形成闭合空腔。

(4)自空腔闭合后,大气就停止向空腔内充气,空腔内压力不再受大气的直接影响。而闭合后的空腔又由于流体静压的作用,其形状趋于球形;随着压力的降低,空腔体积减小而发生收缩;由于空腔是闭合的,空腔内气体压力又会因空腔体积的减小而逐渐增加,当腔内压力大于环境压力时,空腔又发生膨胀,如此反复而形成空腔的脉动;空腔脉动 7~8 次后逐渐溃灭消失。

3 数值模拟计算程序

我们采用二维耦合有限差分非线性动力数值计算程序 *Autodyn-2D*。该程序是由美国世纪动力公司 (Century Dynamics Inc) 所开发的,包括处理固体连续介质的 *Lagrange* 程序、处理流体及大变形固体的 *Euler* 程序以及 *Lagrange* 和 *Euler* 混合计算程序等,具备良好的前后处理程序,广泛应用于非线性动力学问题 (如碰撞、侵彻和爆炸等) 的数值模拟分析^[9]。

4 数值模拟计算模型及参数

钢球垂直侵彻水介质的情况可按轴对称问题进行计算。为同实验条件一致,在水介质表面覆盖有厚度为 5mm 的开孔钢板,钢球通过直径 35mm 的圆孔以 1450m/s 的速度垂直射入水介质 (如图 1)。

首先将连续介质离散化^[10]。在选取离散化方法时考虑到在侵彻过程中钢球本身基本上不变形,而水介质却会发生大畸变变形,因此采用 *Lagrange* 和 *Euler* 混合网格划分法,即钢球选用 *Lagrange* 网格,水介质和开孔钢板选用 *Euler* 网格,对应的计算方法为 *Lagrange-Euler* 混合计算法。

4.1 网格划分

水介质厚 (x 轴方向) 1000mm, 宽 (y 轴方向) 900mm; 开孔钢板厚 5mm, 宽 900mm。在轴线对称的一半区域 (连同空白流动区) 内共分 $300 \times 50 = 15000$ 个四边形 *Euler* 网格,并用变间距网格划分法使靠近弹道轴线部分的网格划分得密集些,边缘部分的网格稀疏些。按 *Euler* 法的多材料处理方法分别充填 *Euler* 网格区域内的各种材料和空白流动区。整个区域共分为 30000

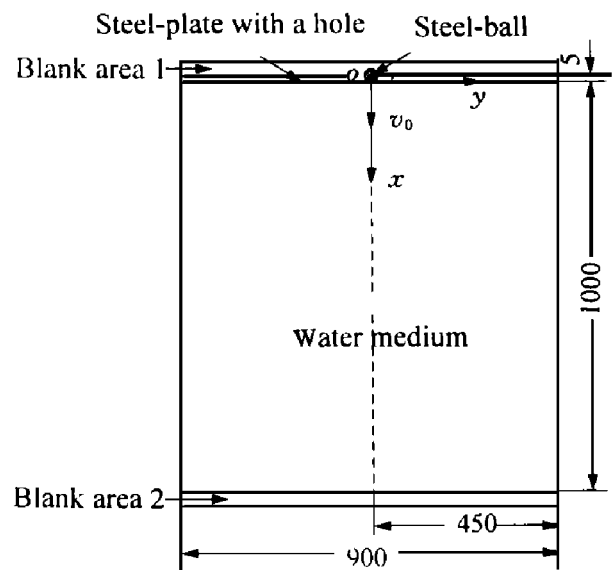


图 1 计算模型

Fig. 1 The calculating model

个网格。

钢球直径 6.35mm, 轴线对称的一半分为 18 个 Lagrange 网格, 另一半镜像自动生成, 共 36 个网格。

4.2 材料参数

钢球材料选取美国 4340 钢 (相当于 45 碳钢), 本构模型采用 Johnson-cook 模型。该模型表示材料的动态屈服应力为应变、应变率和温度的函数^[11]。

由于钢球在侵彻水介质的过程中不会产生明显的塑性变形, 因此可取线性状态方程。水介质本构模型选用无强度无剪切力的流体模型^[12]。状态方程选取冲击方程。开孔钢板的本构模型和状态方程以及材料参数等与钢球相同。

4.3 初始条件

钢球直径 6.35mm, 初始速度 $v_0 = 1450 \text{ m/s}$, 所有材料初始应力和初始比内能均为零。

4.4 边界条件

除水介质表面覆盖有 5mm 厚的开孔钢板外, 其余边界均为自由面, 自由面处应力为零。

5 数值模拟结果

经过 Pentium 586/166 32M 计算机连续 178h 的计算, 得出 4456 μs 内不同时刻钢球侵彻水介质的速度场 (图 2) 及压力场分布图 (图 3)。

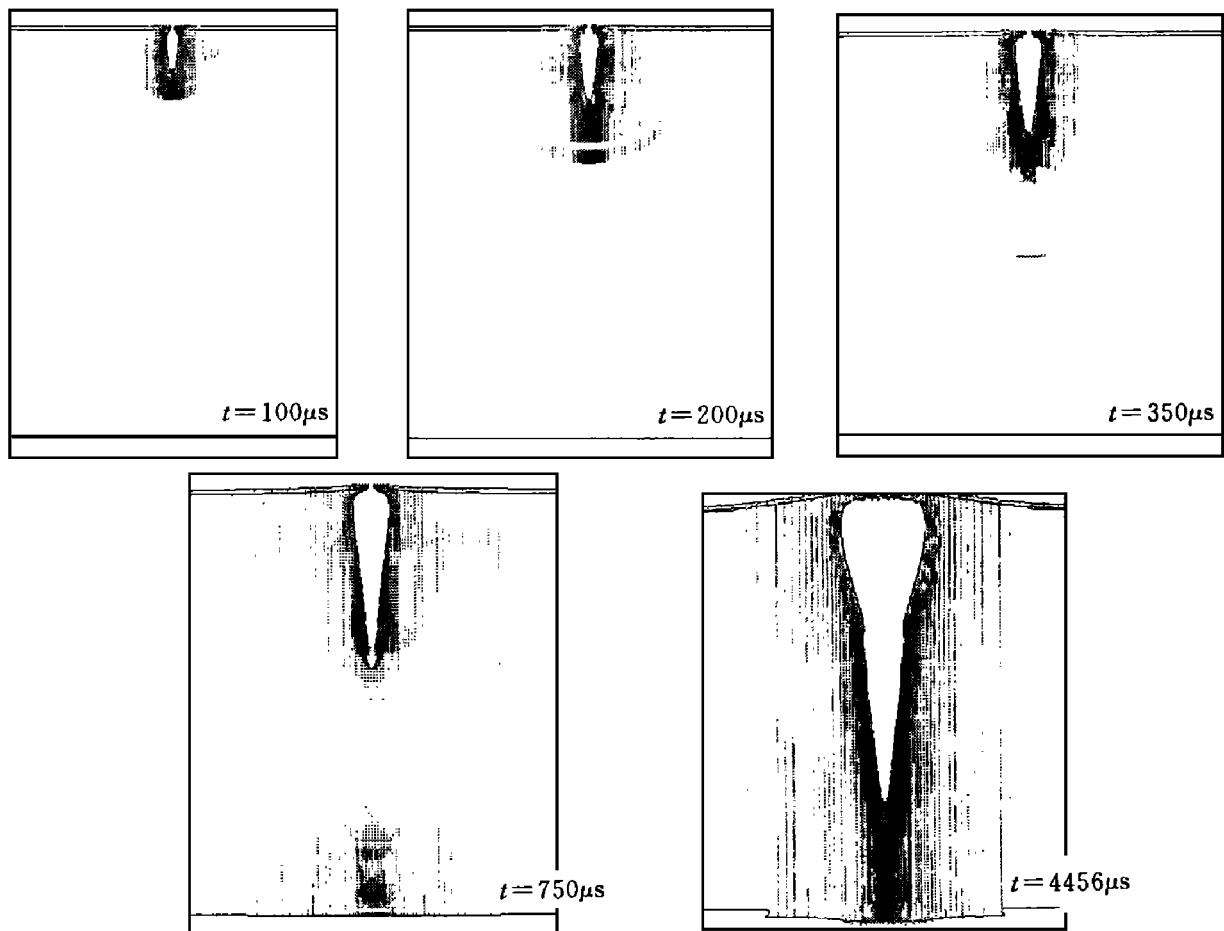


图 2 速度场分布

Fig. 2 The distribution of velocity field

数值模拟结果表明:钢球撞击到水介质时,撞击点附近的水质点获得径向和轴向加速度,产生流动速度场(图 2(a)),并且在球-水界面处出现一个压力幅值很高的压缩区(当 $t = 5.838 \mu s$ 时该压缩区的最大压力值为 883.4 MPa)。压缩区中的压力是以球形波的形式在水介质中传播的。经过约 $150 \mu s$ 球形波形成脱体冲击波,图 2(b)为 $200 \mu s$ 时冲击波在水介质中的传播情况(此时球形冲击波的最大压力为 9 MPa ,见图 3)。虽然球形冲击波压力幅值很高,但持续时间较短。 $150 \mu s$ 后其幅值即由 9 MPa 降至 6 MPa ,衰减了 $1/3$ (如图 2(c))。当球形冲击波到达水介质底面后又会发生一系列的反射和透射作用(如图 2(d))。当 $t = 4456 \mu s$ 时,钢球的侵彻深度接近于最大侵彻深度 (728.8 mm) (如图 2(e))。这时整个水介质区域均产生了流动速度场,受到压力场的影响,并且空腔在开口处由水层的隔绝而发生闭合,形成封闭的瞬时空腔。

数值模拟结果还表明:在侵彻过程中,钢球的速度是随着侵彻深度按指数规律衰减的,而且数值模拟结果同实验结果相符。图 4 是实验数据拟合的经验公式与数值模拟结果的比较。

在进行数值模拟的同时,对直径 6.35 mm (质量 1.03 g) 的钢球以 1400 m/s 的速度侵彻水介质的过程进行了高速摄影。图 5 是钢球侵入水中 $4141.63 \mu s$ 时的瞬时空腔照片,拍摄频率为 8000 s^{-1} 。就其外形轮廓来看,与图 2(e)所示的 $t = 4456 \mu s$ 时瞬时空腔数值模拟轮廓基本一致。



图 3 压力场分布

Fig 3 The pressure contours

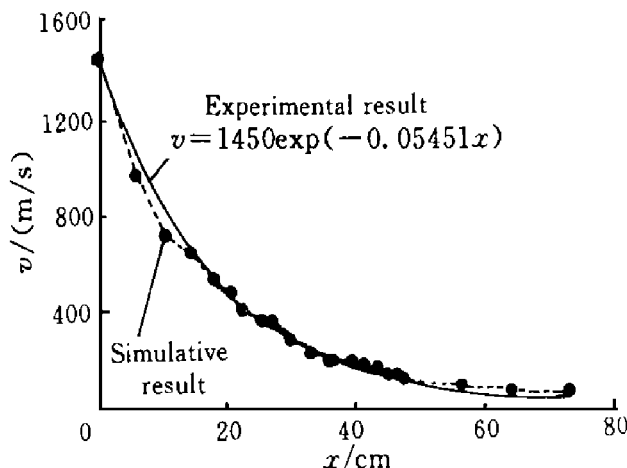


图 4 数值模拟结果与经验公式计算结果的比较

Fig 4 The simulative result compared with that of the experimental



图 5 钢球侵入水中产生的瞬时空腔

Fig 5 The temporary cavity led by stell-ball penetrating in to water

6 讨论与分析

6.1 瞬时空腔的损伤作用

高速投射物侵彻生物机体时, 由于产生了瞬时空腔, 迫使周围组织向外扩张; 当空腔扩张到一定程度后, 又由于组织的弹性而发生收缩。这样, 在极短的时间内使组织受到剧烈的压缩和牵拉变形而发生撕裂性损伤^[1]。

6.2 瞬时空腔的形成

瞬时空腔形成的机理很复杂, 就现有的观点(如投射物的翻滚学说、粘性流动学说和空化学说等), 都还不能很好地解释这一物理现象^[1]。

通过钢球对水介质侵彻过程的数值模拟表明, 钢球对水介质的撞击会使球-水界面的水质点产生加速度, 从而在一定的范围内形成流动速度场。由于球-水界面处水质点的速度矢量是近似地与钢球表面垂直的(如图6), 其轴向分量将使水质点不断地压缩前面的静止水质点, 最终将产生幅值很高的轴向压缩波; 而速度矢量的径向分量则使水质点产生径向流动。由于流动加速度的存在, 因此当水质点脱离钢球表面后仍具有径向流动的能力, 从而形成瞬时空腔。同时, 由于钢球入口处的水质点最先获得流动加速度并首先产生径向流动, 因此其瞬时空腔具有入口直径最大的特点。

从以上的分析可以看出, 由于速度矢量是近似地垂直于侵彻体表面的, 因此径向速度分量的大小是与侵彻体的形状有关的。这可以较好地解释为何不同的侵彻体具有不同形状的瞬时空腔。

6.3 脱体球形冲击波的作用

当钢球的侵彻速度小于水中的声速(约 1500m/s)时, 水介质中的冲击波是以球形波的形式传播的, 并且球形冲击波始终位于钢球的前方(脱体球形冲击波)。在创伤弹道学中对该冲击波的致伤作用还存在有较大的分歧, 主要原因是对该冲击波的数量级及其传播的距离观点不一。有人认为该冲击波的致伤作用是很轻微的, 即使象红血球这样脆弱的细胞也不会受到影响^[13]。根据我们的数值模拟结果, 可以预见, 虽然钢球侵彻生物组织产生的脱体球形冲击波持续时间较短, 但由于其幅值很高(约 10MPa), 对弹道附近的生物组织特别是对密度较大的组织器官(如骨骼等)的致伤程度是值得重视的。

我们仅就钢球侵彻水介质过程中的撞击水面、空腔敞开的空腔闭合阶段进行了数值模拟, 目前还不能对空腔脉动及其消失阶段进行数值模拟。这不仅是因为计算工作量和需要的计算机时非常大, 而且也因为存在着计算方法和计算技术等方面的限制, 所以还有待于进一步研究和完善这方面的工作。

创伤弹道学中有关生物致伤机理的理论研究是非常复杂的, 往往难于直接进行理论上和数学上的描述。随着高性能计算机的普及和计算技术的发展, 数值模拟技术为创伤弹道学的深

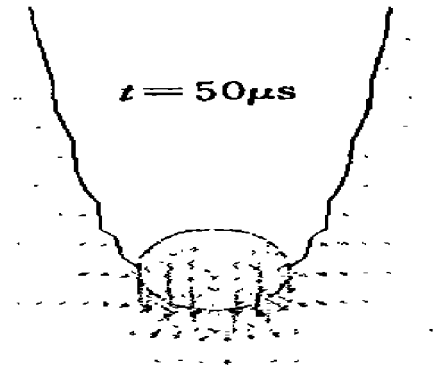


图6 球-水界面速度场的放大图

Fig 6 The enlargement of velocity field at the interface of steel-ball and water

入研究提供了一个重要的方法和手段。

实验部分得到了第三军医大学野战外科研究所六室全体同志的帮助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 刘荫秋,王正国,马玉媛. 创伤弹道学. 北京:人民军医出版社, 1991
- 2 Berlin R, Janzon B, Rybeck B, et al. Local Effects of Assault Rifle Bullets in Live Tissues. *Acta Chir Scand*, 1977, 21(suppl): 477~ 481
- 3 Carrol E P. Temporary Cavity Formation and Tissue Damage. *J Trauma*, 1994, 3(suppl): 16~ 20
- 4 刘荫秋,李曙光,吴炳杰,等. 不同投射物水中弹后空腔的特点. 中国兵工学会论文选编, 1986, 14: 189~ 192
- 5 Janzon B, Persson A, Persson J. Simulation and Visualization of Wound Ballistic Phenomena. *J Trauma (China)*, 1990, 6(suppl): 3~ 8
- 6 王肖钧,赵 新. 高速钢球在水中侵彻过程的数值计算. *爆炸与冲击*, 1992, 12(3): 213~ 218
- 7 Deshapande M. Cavity Flow Predictions Based on the Euler Equations. *J Fluid Eng*, 1994, 43(3): 116~ 121
- 8 沃 JG,斯塔布斯塔德 G W. 水弹道学模拟. 陈九锡,等译. 北京:国防工业出版社, 1979
- 9 午新民. 钨合金球体对有限厚靶板侵彻的理论与实验研究: [博士学位论文] 北京:北京理工大学, 1997, 87~ 103
- 10 恽寿榕,涂候杰,梁德寿,等. 爆炸力学计算方法. 北京:北京理工大学出版社, 1995
- 11 Century Dynamics Inc. Compendium of Papers on Material Modelling. Oakland, California: Century Dynamics Inc, 1992, 18~ 21
- 12 Century Dynamics Inc. Autodyn Users Manual. Oakland, California: Century Dynamics Inc, 1989, 23~ 47
- 13 王德文,刘雪桐. 现代火器伤. [s 1] 中国人民解放军总后勤部卫生部, 1992

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE TEMPORARY-CAVITY FORMING DURING THE HIGH-VELOCITY STEEL-BALL PENETRATING INTO WATER MEDIUM

An Bo, Jiang Jianwei, Jiang Haozheng
 (Department of the Mechatronics Engineering,
 Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

ABSTRACT By using the two dimensional finite-difference non-linear dynamics program Autodyn-2D, we simulate and analyze that the temporary-cavity forms and develops during the high-velocity steel-ball penetrating into water and obtain that the damping rule of steel-ball velocity and distribution of the velocity field and pressure contours in water. The numerical simulation result is in good accord with the experimental result. It provides important basis for the further research and analysis of the wound mechanism that the high velocity projects wound the living tissue and organ in theory.

KEY WORDS numerical simulation, temporary-cavity, wound mechanism