

基于 SPH 算法的钢球高速撞击肥皂数值仿真

史晓宁, 温焱珂, 王亚平

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:运用光滑粒子流体动力学分析方法,对钢球高速侵入肥皂靶标进行了数值仿真分析。建立了钢球与肥皂高速撞击数值计算模型,运用侵蚀接触算法,求解了高速钢球侵入肥皂的动力响应时间历程,获取了钢球侵入肥皂靶标的侵入深度与投射物速度关系图和瞬态 Von-Mises 等效应力云图,分析了高速碰撞过程及碰撞过程中空腔的形成和变化情况,并与实验结果及 Lagrange 数值仿真结果对照,计算结果具有良好精度,表明运用 SPH 方法能够较好地描述高速撞击现象。文中的研究表明,SPH 技术是开展创伤弹道研究的有效手段。

关键词:钢球;肥皂;高速撞击;SPH 算法

中图分类号:TJ201

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)01-0172-03

Numerical Simulation of High-Velocity Steel Sphere Impacting with Soap Based on SPH Algorithm

SHI Xiao-ning, WEN Yao-ke, WANG Ya-ping

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A smoothed particle hydrodynamics algorithm was introduced to simulate the physical process of steel sphere penetrated against soap drone with a high speed. By this way, a numerical simulation model of the steel sphere impacting with soap drone in high-speed was established, dynamic response time history was calculated by the eroding contact algorithm. The penetration-velocity relationship diagram of projectiles and transient Von-Mises equivalent stress-nephogram, the course of the high-speed impacting, the quantitative change of the formation and the change condition of the cavity in the process of the high-speed impacting were analyzed. By comparison with the results of experiment and Lagrange method, the simulation results of this text have well precision. It shows the SPH algorithm can characterize the process of high-speed impacting. The investigation of this message indicates that the SPH method is an effective way to study on wound ballistics research.

Key words: steel sphere; soap; high-speed impacting; SPH algorithm

0 引言

钢球作为典型破片的一种类型,由于密度高、衰减系数小、侵入能力强,成为防空、反辐射、面杀伤战斗部的主要杀伤元素之一,并得到广泛的应用^[1]。肥皂是粘塑性材料,密度与肌肉组织相近,具有保留瞬时空腔完全的特性,便于观察和测量。肥皂现已广泛作为人体软组织模拟物,用于研究瞬时空腔形成机理,阻力、能量传递与致伤之间的定量关系等^[2~5]。肥皂中弹道及空腔的形状,亦可用来描述投射物在靶标内的稳定性。

钢球与肥皂的相互作用现象是瞬态、大变形及强

非线性耦合现象,仿真涉及到的材料是高度非线性材料^[3]。只有采用材料失效和侵蚀接触(Eroding Contact)算法,比较适合用以分析高速弹丸侵入对象过程,可定量研究粘塑性材料的非线性特性^[1,6,7]。SPH 方法没有网格依赖性,减少了因网格畸变而引起的困难,适用于瞬态界面运动、撞击复合效应等问题,较有限元方法相比有其优点。采用粒子方法可以避免高维拉氏网格方法中的网格缠绕和扭曲等问题,因而特别适合于计算有大变形存在的高速碰撞问题^[8~10]。文章中将 SPH 算法与文献[5]中实验结果及 Lagrange 算法计算结果进行对比,判定其计算结果精确性。

1 钢球撞击肥皂靶标的数值计算仿真模型

1.1 光滑粒子流体动力学(SPH)理论

SPH 的基础是插值理论^[2,11]。用一组具有流速的运动质点来表示物质,每一个 SPH 质点代表一个物理性质的插值点,用规则的内插函数计算全部质点可以

收稿日期:2011-06-10;修回日期:2011-09-24

基金项目:国家 973 计划资助项目(6131040302)

作者简介:史晓宁(1987-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为动力学建模与仿真;王亚平,副教授,主要研究领域为复杂机电系统仿真及优化。

得到整个问题解^[3,4]。在 SPH 方法中,质点近似函数定义为:

$$\prod^h f(x) = \int f(y) W(x-y, h) dy \tag{1}$$

W 是核函数。核函数 W 由函数 θ 来定义: $W(x, h) = \frac{1}{h(x)^d} \theta(x)$

其中 d 是空间维数, h 是光滑长度, 随时间和空间变化。 $W(x, h)$ 是尖峰函数, SPH 中最常用的光滑核是三次 B-样条函数 θ 。

$$\theta(u) = Cx \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}u^2 + \frac{3}{4}u^3 & |u| \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-u)^3 & 1 \leq |u| \leq 2 \\ 0 & 2 < |u| \end{cases}$$

C 是归一化常量, 由空间维数确定。即核近似函数如下:

$$\prod^h f(x_i) = \sum_{j=1}^N w_j f(x_j) W(x_i - x_j, h) \tag{2}$$

$w_j = \frac{m_j}{\rho_j}$ 为核质量。粒子质量与流体的散度成比例。

守恒方程如下:

$$\text{动量守恒: } \frac{d v_i^\alpha}{d t}(x_i(t)) = \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial(\sigma^{\alpha \beta})}{\partial x_i}(x_i(t)) \tag{3}$$

α, β 为空间指数。

$$\text{能量守恒: } \frac{d E}{d t} = - \frac{P}{\rho} \nabla v \tag{4}$$

为消除虚假震荡引入人工粘性 \prod_{ij} , $p_i \rightarrow p_i + \prod_{ij}$ 。

$$\prod_{ij} = \frac{1}{\rho_{ij}}(-\alpha \mu_{ij} \bar{c}_{ij} + \beta \mu_{ij}^2) \tag{5}$$

标记号“-”用于表示 i, j 的中值。即 $\bar{X}_{ij} = \frac{1}{2}(X_i + X_j)$ 。 c 为材料声速。

$$\mu_{ij} = \begin{cases} \bar{h}_{ij} \frac{v_{ij} r_{ij}}{r_{ij}^2 + \eta^2} & v_{ij} r_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} r_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

$$v_{ij} = (v_i - v_j), \eta^2 = 0.01 \bar{h}_{ij}^2。$$

时间积分: 使用简单经典的一阶系统进行时间积分, 时间步由下式求出:

$$\delta t = C_{\text{CFL}} \text{Min}(\frac{h_i}{c_i + v_i}) \tag{6}$$

式中 C_{CFL} 为计算常数。

1.2 钢球与肥皂靶标的材料状态模型描述

钢球采用 *MAT_RIGID 刚体模型。

肥皂采用 *EOS_GRUNEISEN 状态方程下的 *MAT_JOHNSON_COOK 弹塑性材料模型, 其流变应力表述为:

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + C \ln \bar{\epsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}) \tag{7}$$

其中 A, B, C, n 和 m 是输入常数; $\bar{\epsilon}^*$ 是有效塑性应变;

$\bar{\epsilon} = \epsilon^p / \epsilon_0$ 为 $\epsilon_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 时的有效塑性应变率;

$T^* = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}$ 为同系温度 (T_{melt} 为熔化温度, T_{room} 为室温)。

$$\text{断裂应变 } \epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \bar{\epsilon}^*][1 + D_5 T^*] \tag{8}$$

其中 $\sigma^* = \frac{P}{\sigma_{\text{eff}}}$, $D = \sum \frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon^f}$; 当破坏参数值达到 1 时, 断裂发生。GRUNEISEN 状态方程可通过两种方法定义压力体积的关系, 从而确定材料是压缩还是扩张。该状态方程定义压缩材料的压力如下:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + \frac{1}{2} (1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2})^2]}{+ (\gamma_0 + a \mu) E} \tag{9}$$

对于膨胀材料的压力

$$P = \rho_0 C^{2\mu} + (\gamma_0 + a \mu) E \tag{10}$$

肥皂的失效应变取为 0.3。

文章中算例材料一致。

1.3 数值计算模型的建立

利用 SPH 节点和 FE 耦合建模。肥皂尺寸为 20cm * 20cm * 30cm, 肥皂中心撞击区域分割为半径为 1.25cm 的圆柱, 采用 SPH 粒子划分, 径向设 16 个粒子, 轴向设 300 个粒子。对于变形较小的外围区域采用 8 节点实体单元 solid164 单元划分。数值计算模型如图 1 所示。

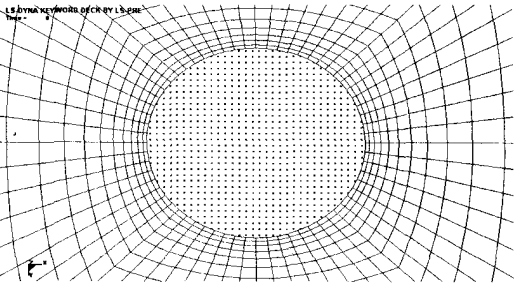


图 1 肥皂靶标 SPH 粒子模型

拉氏算法有限元模型与 SPH 算例画法一致, 中心径向划分 16 段, 轴向划分 300 段, 钢球画法一致。

钢球中心距肥皂表面 10mm, 肥皂前速度与实验一致, 为 700m/s。用材料失效和侵蚀接触 (Eroding

Contact) 进行钢球对肥皂的侵入模拟计算, 接触采用 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 算法^[2]。钢球与弹道肥皂的材料参数见表 1、表 2。

表 1 钢球的材料参数

参数	ρ (g/mm ³)	G (GPa)	E (GPa)
钢材	7.83	77	207

表 2 肥皂的材料参数

参数	ρ (g/mm ³)	E (MPa)	G (MPa)	K (GPa)	ν	A (MPa)	B (MPa)	n	C
肥皂	1.1	21.45	7.11	3.00	0.499	1.64	6.86	1.73	0.0346

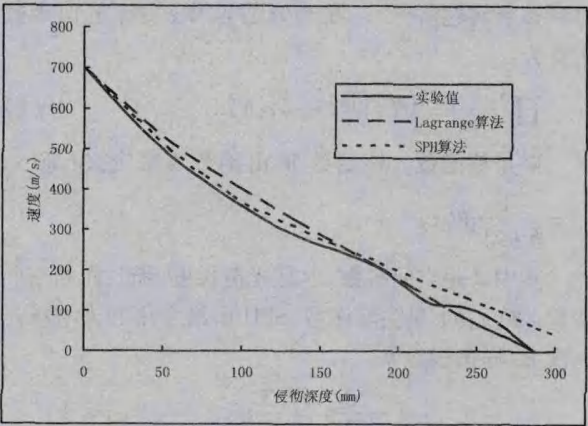


图 2 实验结果与仿真值对照图

2 仿真计算与结果分析

根据建立的数值计算模型进行了仿真计算, 计算结果与 N. Ndompetelo 等发表在“J. Phys. IV France 134 (2006) 385-390”上的实验结果^[5]及拉式算法对比验证, 结果如图 2 所示。

在水平入射侵入的情况下, 弹体主要沿轴向运动, 对钢球的侵入深度与速度采样, 生成侵入深度与速度关系图, 并与文献^[5]实验曲线、拉式算法结果进行对比, 侵入完成后弹丸的位移为 300mm, 速度最大误差不超过 8%。仿真值与实验值曲线较为吻合, 在侵入深度达到 170mm, 速度衰减到 240m/s 前, 其结果比拉式算法结果更精确。

采用 SPH 算法与 Lagrange 算法侵入现象基本一致。钢球在撞击过程中, 肥皂在不同时刻的破坏、变形和等效应力变化情况如图 3、图 4 所示。钢球射入肥皂时, 在撞击压力的作用下, 其入口处立刻出现少量向后喷射的尾部激溅现象, 随后出现圆柱形孔道, 钢球穿出时前面部分肥皂也随之冲出, 形成一个永久伤道。可以看出最大等效应力始终出现在空腔的外轮廓部位, 在最大空腔处应力集中最严重。

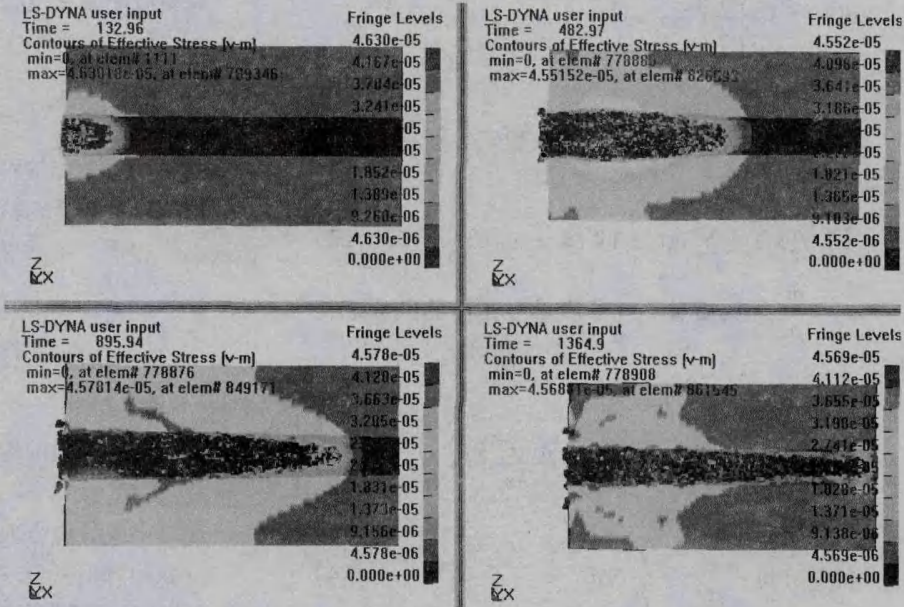


图 3 SPH 算法中钢球在不同时刻 von-mises 等效应力图

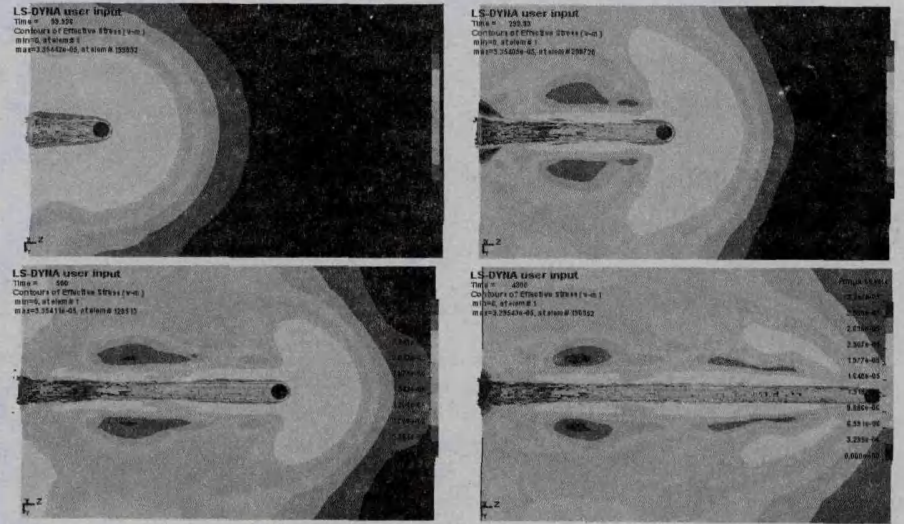


图 4 拉式算法中钢球在不同时刻 von-mises 等效应力图

由于肥皂的塑性性能, 靶标内不会产生瞬时空腔脉动效应, 空腔随时间基本不变, 能够在肥皂中保留下一个与最大瞬时空腔相似的定型空腔。钢球侵入肥皂

(下转第 178 页)

系统访问来确定系统的最新状态。例如:主机通过定时访问子系统,当 3 次访问都失败,即可确认子系统从网络中移除,并更新子系统信息表。

3 结束语

该设计借鉴现有的“通用即插即用”网络的设计思想,并结合现代分布式测控网络的需求与网络的实际情况,设计并实现了基于单片机网络具有“即插即用”功能的系统。

该设计可以将新入网的子系统不需要任何设置,网络运用“发现”机制即可以检测到该系统的接入^[3],并通过主机自动配置与调用,实现了“即插即用”功能,进而加强了网络的灵活性与实用性。同时该系统还可以在不影响网络正常工作的情况下,检测网络中出错或离线的子系统,将其移出网络,并回收所分配的资源。最后由于本系统的“即插即用”功能是通过软件来实现的,这样就增加了网络的灵活性,对系统的硬件结构几乎无需改动即可实现“即插即用”功能,所以适用于现阶段大多数的测控网络。

参考文献:

- [1] 彭佳文,姚志成,彭佳红,等.一种单片机多机通信系统的设计[J].微计算机信息,2008,24(2):130-133.

(上接第 174 页)

靶标过程中,入口处钢球的能量变化率最大,因此最大空腔出现在入口处。并且随着钢球速度的降低,空腔直径减小。

3 结束语

运用 SPH 与 FE 耦合算法,对肥皂材料进行大应变、高应变率的计算可避免侵入区域删除网格或网格重分,保证计算精度和准确性的同时又提高了计算效率。能够较好地模拟肥皂内空腔形成的物理过程,验证了此种方法在高速撞击过程中的可行性。通过实验对照,SPH 数值计算仿真结果与实验结果基本吻合,一定范围内计算效果优于拉氏算法,是一种有效的研究方法,为高速瞬态冲击仿生材料问题的研究提供了途径和思路,在具体工程实践汇总有应用价值,是开展创伤弹道研究的有效手段。

参考文献:

- [1] 米双山,刘东升,张建茂.钢球侵彻靶板的损伤模式研究[J].弹箭与制导学报,2005,26(1):741-746.
- [2] 尚晓江,苏建宇,王化锋. ANSYS /LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M].第 2 版.北京:中国水利水电出版社,

- [2] 王旭东.工业设备运行状态的监测与预测技术[J].河北建筑工程学院学报,2005,23(3):109-110.
- [3] 虞耀君,吴德会.“即插即用”的单片机测控网络研究[J].九江学院学报(自然科学版),2004(4):10-14.
- [4] 洪志敏.“即插即用”技术的讨论[J].计算机应用,2000,27(6):34-36.
- [5] 杨思忠,骆志刚,刘锦德.网络即插即用及相关问题[J].计算机科学,2001,28(4):101-105.
- [6] 霍雪松,胡吉明.一种新型的网上即插即用技术[J].电力系统通信,2001,22(9):44-47.
- [7] 邓文浪,代文波.一种令牌总线式工业测控网的设计与实现[J].微型计算机与应用,2000,19(8):48-50.
- [8] Lian Fengli. Network design consideration for distributed control systems[J]. Control Systems Technology, 2002, 10(2): 297-307.
- [9] Allen T. Connecting with the new universal serial bus[J]. EE: Evaluation Engineering, 1998, 37(7): 12-14.
- [10] Miler B A, Nixon T. Home Networking with Universal Plug and Play[J]. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(12): 104-109.
- [11] 李善寿,方潜生,肖本贤,等.基于单片机的恒温控制器的设计和实现[J].计算机技术与发展,2008,18(12):197-199.
- [12] 林雪梅,彭佳红,姚志成,等.单片机多机通信协议的设计[J].微计算机信息,2006,22(5):24-26.

2008:3-4.

- [3] 刘萌秋,王正国,马玉媛.创伤弹道学[M].北京:人民军医出版社,1991:76-84.
- [4] Dyckmans G, Nsiampa N, Chabotier A. Numerical and Experimental Study of the Impact of Small Caliber Projectiles on Ballistic Soap[J]. Phys. IV, 2008, 110: 627-632.
- [5] Ndompetelo N, Viot P, Dyckmans G, et al. Numerical and experimental study of the impact of small caliber projectiles on ballistic soap[J]. Phys. IV France, 2006, 134: 385-390.
- [6] 谷长春,石明全.基于 ANSYS/LS-DYNA 的高速碰撞过程的数值模拟[J].系统仿真学报,2009,21(15):4621-4624.
- [7] 孙娟,黄小忠,王庭江,等.基于 LS-DYNA 的不同材质靶抗侵彻能力的数值模拟[J].科学技术与工程,2010,10(10):2296-2301.
- [8] 王吉,王肖钧,卞梁.光滑粒子法与有限元的耦合算法及其在冲击动力学中的应用[J].爆炸与冲击,2007,27(6):522-528.
- [9] 徐志宏,汤文辉,罗永. SPH 算法在高速侵彻问题中的应用[J].国防科技大学学报,2005,27(4):41-44.
- [10] 崔伟峰,曾新吾. SPH 算法在超高速碰撞数值模拟中的应用[J].国防科技大学学报,2007,29(2):43-46.
- [11] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,2003.