

超高速碰撞效应的数值模拟*

谈庆明

中国科学院力学研究所, 北京 (邮政编码100080)

提要 本文简要介绍和总结了有关超高速碰撞效应数值模拟研究的现状, 讨论了数值格式和处理以及物理模型两个方面所取得的进展和存在的问题。

关键词 超高速碰撞; 碎片云; 数值模拟; 物理模型

1 一般情况

超高速碰撞效应是战略防御动能武器以及陨石对天体碰撞等研究中的核心问题。因为实验与测试手段受到超高速度的限制, 而且材料在超高速碰撞条件下的行为本身也需探索, 数值模拟便成为一种必要的手段。

当前已经形成和发展了数十种计算爆炸和高速冲击的编码程序, 而超高速碰撞效应的数值模拟常被人们当作检验或考察此类编码程序质量或水平的一种标准。因为超高速碰撞效应汇集了最为典型而丰富多彩的物理现象, 包括冲击波的传播与崩落, 厚靶的成坑, 中厚靶的侵入与冲塞, 薄靶的鼓包、破裂和碎片云的形成与演化, 以及熔化和气化等相变等。在数值技巧方面, 超高速碰撞效应要求程序有能力描写材料的大变形, 判断各种破坏类型与相变的发生, 描写多种材料的运动与多相流等。

早在60年代, 已经出现了一些编码程序。属于 Lagrange 类型的, 有 M.L. Wilkins 编制的 HEMP, 它可以用来计算对厚靶与中厚靶的高速冲击问题。属于 Euler 类型的, 有 W.E. Johnson 编制的 OIL, 后来演变为 SOIL; 有 J.M. Walsh 等编制的 HELP 等, 它们可以用来计算厚靶的开坑和冲击薄靶形成碎片云的过程。上述早期的编码程序曾经帮助人们提高了对超高速碰撞效应的认识, 但在实用过程中也暴露了很多弱点, 促使人们不断改进。20多年来的工作^[1,2]不外乎沿着离散格式及材料行为的数值描述两个方面不断发展。下面将分别展开讨论。

2 离散格式

采用 Lagrange 描写方法, 把计算网格固定在物体上, 有利于跟踪物体的运动, 特别是容易识别物体的界面。M.L. Wilkins 用这种描写方法在计算爆炸或冲击效应的编码程序 HEMP 中最早建立了一套处理两种物体通过滑动界面发生相互作用的子程序。HEMP 编

* 国家自然科学基金资助项目。

码^[8-9]适用于计算厚靶在炸药爆炸或短粗弹以一般弹道速度冲击下的表面成坑问题。如果爆炸压力或冲击速度过高,弹靶界面或自由表面附近的物质将发生极大的畸变,造成数值误差(主要是截断误差)急剧增加,甚至格元质量变成负的,或者因为格元某一边长变得很小而由稳定性要求所决定的时间步长随之变得很小,导致计算过程进展太慢,步数增多而累计误差增大。

解决由大畸变造成计算困难的办法是采用三角形格元以及在计算过程中适时采取重新分区(rezoning)的技术。三角形格元与矩形格元相比,具有更好的抵抗畸变的能力。采用由三角形格元组成的 Lagrange 网格,可以延缓因大畸变而使计算停止推进的时间。当然,对于一般的爆炸或冲击问题,计算推进到某一时刻总会在某些区域形成强烈的畸变,致使计算不能顺利地进行下去。此时需用重新分区的技术。重新分区后新格元中的质量分配遵从质量守恒律,速度分配遵从动量守恒律,而内能分配遵从能量守恒律。可见,新老分区的动能一般不守恒,而由内能的调整来满足总能守恒,无疑这是缺点。究竟按照什么原则来重新分配新格元的状态量,至今还没有找到统一的合理答案。

由 G.R. Johnson 在 1976 年提出的 EPIC 编码程序^[6],实质上也是一种 Lagrange 型程序,在 2 维问题中采用三角形网格,在 3 维问题中采用三角形四面体网格^[7]。虽然称之为有限元程序,但所用算法与常规有限元法中依据变分原理通过求解线性代数方程而使能量泛函达极值的方法十分不同。格元运动的计算直接依据牛顿第二定律。格元在邻元的面力作用下和格心所受体力作用下做加速运动,格元的速度、位置和形状随时间步的推进而不断变化。EPIC 程序中还配备一个专门处理不同材料之间的滑动界面的子程序。当某些区域发生大畸变时,要采用重分区处理。在 EPIC 的 1986 年版本以及 Kimsey & Zukas 的文章^[8]中引进了“侵蚀(erosion)”的概念,当某一格元的等效塑性应变达到某一指定的临界数值时,便认为该元完全破坏,丧失变形抗力,只在结点上保留该元的质量,随后只在体力作用下运动。至于侵蚀的临界应变的取值并不能直接由材料性能实验得到,主要依赖于数值模拟的经验。采取了三角形元,重分区,以及引入侵蚀元以后,用 EPIC 程序可以计算薄靶受超高速碰撞形成碎片云这样一类变形极大的问题。

采用 Euler 描写方法,计算网格固定于几何空间,材料越过格元流进流出,计算格元中质量、动量和能量的变化便能决定物质的变形。采用这种描述方法即使发生了大畸变,也不会引起如 Lagrange 计算中的误差突变和不能使计算推进下去的困难。但是,采用空间坐标网格,难于跟踪物质的变形,也不能识别材料界面的位形。Euler 程序一般采用分裂算法。在体力不起作用的问题中,格元物理量的局部变化取决于通过格元界面的对流、压力作用和应力偏量作用等三部分效应。分裂算法是对格元物理量先后按照三部分效应逐步计算相应的改变量。由于计算对流与应力作用引起的变形是分开进行的,而且此种变形计算并没有跟踪物质,因此必然会带来误差。1982 年 McGlaun^[9]开始在 CSQ 程序中,在计算对流的一步中放弃使用 1 阶精度格式,改用 2 阶精度的 van Leer 的守恒格式^[10],对提高计算精度是有好处的。近几年中,几乎所有的 Euler 型程序均在这方面作了改进。在计算多种材料占据的混合格或者材料未占满的自由面格中材料的对流时,Euler 型程序有一共同的缺点,那就是引进了数值上的扩散,特别是自由面附近的材料向真空发生快速的伪扩散,这给物体位形的识别带来极大误差。McGlaun, Thompson, & Elrick^[11]利用本格元和相邻格元中各种材

料所占的体积分数值, 比较方便而又精细地确定格元中材料界面的大致位置(用斜线段表示), 从而改进了通过格元侧面的输运量的计算, 大大减小了数值扩散。罗忠文和谈庆明^[12]将这类原则运用到SOIL程序^[13]中, 较有效地减小了自由面的数值扩散, 在计算厚靶上留下的坑形以及薄靶冒出的碎片云外形时得到了和实验更接近的结果。

3 材料行为的数值描述

在高速碰撞问题中材料经受大变形、塑性屈服、断裂以至发生熔化和气化等相变。Euler 程序选用空间坐标, 在跟踪物质的变形方面先天存在困难; 而Lagrange程序选用物质坐标, 容易跟踪物质的变形, 但是人们对于大变形和弹塑性本构关系目前尚缺乏完善的描述方法。此外前面已经提到 Lagrange 方法在遇到大畸变时存在着数值困难。所以, 现有的数值程序只能说是建筑在小变形假设的基础上。而要套用小变形的描述方法来真实地描述大变形, 则不仅在物理上而且在数值上还要做大量的研究工作。

当变形超过弹性范围时材料就会发生屈服流动以及随之而来的复杂的加卸载过程。材料中严重的体积变形和剪切畸变又分别引起大的压力和温度变化, 而且两种变形相互耦合, 变形和热力学状态变化也相互耦合。另外, 在金属材料中还存在高应变下、高应变率下以及高压下的增强和硬化以及高温下的软化; 在地质材料中还存在剪胀效应。

变形进一步增大, 导致断裂。动态断裂现象多种多样, 其中有两类断裂比较常见而特征又比较鲜明。一类属于拉伸断裂, 即崩落, 或层裂; 另一类属于剪切断裂, 也称绝热剪切。人们正在集中力量揭示它们的本质及建立其发生条件, 也许弄清楚了这两类现象有助于认识其他类型的断裂现象。此外, 断裂必然形成新的材料界面, 这些界面两侧的材料之间所发生的相互作用也没有能认识清楚。

由于在高速、高压和高温条件下材料性能实验资料的不足, 还未能给大型数值程序提供有关屈服、塑性本构以及断裂和断裂后特性的比较完善的描述, 也未能提供各种材料常数。大多数程序采用简单的经验模型, 其多数不计变形历史, 而只考虑当时的应变、应变率等状态量的影响。例如在EPIC^[14]中, 屈服采用 von Mises 准则, 屈服应力 $\bar{\sigma}$ 取决于应变 ϵ , 应变率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T , 即

$$\bar{\sigma} = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \quad (1)$$

其中包括 6 个材料常数 $A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, T_m$ 。断裂准则有类似的形式。当等效塑性应变达到 ϵ^f 时发生断裂, ϵ^f 取决于相对压力 $p/\bar{\sigma}$, 应变率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T , 即

$$\epsilon^f = \{ D_1 + D_2 \exp[D_3(p/\bar{\sigma})] \} [1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] [1 + D_5(T/T_m)] \quad (2)$$

其中又包括 5 个材料常数 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 。

从70年代起, 人们认识到材料的宏观性质固然是微观结构及其物理的反映, 但在原子层次建立模型过于理想而又间接, 在实际材料中存在孔洞、裂纹等不均匀性, 它们的成核和发展直接决定材料的变形和强度性质。Seaman等^[15]首先提出孔洞和裂纹的成核与生长模型, 简称NAG(Nucleation And Growth)模型, 在细观层次上模拟延性和脆性的断裂。Hageman & Herrmann^[16]随后就把这种模型和HELP结合起来实现动态破坏的数值模拟。

以上这种模型通常把材料单元中孔洞所占体积的百分数 f 定义为损伤度, 并假设 f 正比于孔洞数 N 和孔洞尺寸 S 的立方, 而 N 的增长 (成核) 和 S 的增长 (生长) 服从各自的演化规律; 同时假设材料的强度和刚度随损伤度的增长而下降, 称之为弱化律. 这些演化律和弱化律取半经验的形式, 其中包含若干个宏观状态量及经验常数. 人们把根据假设的模型得到的数值模拟结果同实验观测数据进行对照, 并不断拟合和修正模型及经验常数. 由于材料性质和载荷的多样性, 动态破坏的类型大体分为延性破坏、脆性破坏和剪切破坏. 它们可以分别用孔洞的成核和生长模型 (NAG)、微裂纹的成核和生长模型 (FRAG) 和剪切带的成核和生长模型 (SNAG) 等细观模型来描述. 目前这种细观与宏观结合的方法在认识某些典型材料的延性崩落破坏方面取得了一定进展^[17], 而对脆性断裂和剪切破坏的探讨则刚起步^[18].

在超高速碰撞问题中, 材料的行为已经超出一般的流体弹塑性模型所描述的范围, 击波和强烈畸变造成的高温引起可观的熔化和气化, 使材料出现多相状态, 而且相变效应在厚靶开坑和薄靶碎片云的形成中起重要作用. 对于数值模拟来说, 不仅需要能很好描写相变特征的状态方程, 而且也需要能刻画液相和气相的生成和演化的数值手段. 下一节将叙述近几年在对碎片云的数值模拟方面所取得的认识.

4 碎片云的运动

早在 1947 年, Whipple^[19] 就提出双层间隙结构是防御高速冲击的理想结构, 现在实验已证实这种结构具有高的强重比. 取得优异的防御性能的关键在于首层护壳将弹击碎而形成由弹靶材料组成的碎片云, 后者在双层间隙中膨胀而大大降低了入射于次层主结构上的动量和能量的面密度, 而使次层以上结构免被击穿. 因此碎片云的形成、结构及其变形运动成为研究的核心问题, 其中熔化液滴的雾化以及气相物质的膨胀都与破坏效应直接相关. Swift 等^[20] 曾用膨胀薄球壳的解析模型描述碎片云的运动, 对于一些总体特性给出了定性结果. 但毕竟模型简单, 所获有限. 为了更好说明碎片云对次层的冲击破坏效果, 需要知道碎片云入射次层的质量、动量和能量的分布, 而它们涉及云中物质和物相的结构以及运动学和热力学参数的分布. 采用数值模拟是了解碎片云的最直接的手段.

1986 年在美国 Texas 州的 San Antonio 召开的超高速会议上, 发表了好几篇模拟碎片云的文章. Holian & Burkett^[21] 用 LASOIL Euler 程序对薄铅靶受超高速碰撞 ($v = 6.6 \text{ km/s}$) 后形成的碎片云做了数值计算. 他们采用 3 种不同的状态方程 (SESAME 3200, SESAME 3201, Tillotson 方程) 来考察它们对碎片云中质量分布的影响. 利用 3 种状态方程计算得到的瞬态 3 维结果再算出同一时刻在垂直于中心轴的 X 光光路上的质量积分 $\int \rho dx$ 沿着中心轴的分布, 并和实验中测到的 X 光照片^[22] 作比较. 结果发现 3 种状态方程的计算结果彼此接近, 但和 X 光片上的实测结果却不大一样. 实验结果有两个峰值, 一在前沿, 另一在中间偏后, 然而计算却只有一个峰, 处于中间部位. 而对碎片云的外形来说, 实验和计算结果比较接近, 例如前沿位置随时间的发展与实测相当一致. 究竟计算失真的原因在哪里? K.S. Holian & B.L. Holian^[23] 在隔了 1 年以后发表了一篇文章, 他们采取了提高计算精度的措施, 一是采用了具有 2 阶精度对流格式的 CAVEAT Euler 程序, 二是加密网格. 计算结果表明, 采用不同的状态方程得到了不同的碎片云沿轴向的质量分布. 这说明过去所用

Euler 程序 LASOIL 中计算对流一步的格式属于 1 阶精度, 所产生的数值误差掩盖了因状态方程不同所带来的差别。

Trucano, Asay & Chhabildas^[24] 更深入一步探讨数值计算结果与实验结果之间存在差异的原因。为了把比较建立在更牢靠的基础上, 他们专门考察平板的 1 维超高速碰撞, 用足够精确的测量技术记录了某一界面速度的历史; 计算采用含 2 阶精度对流格式的 CSQ III Euler 程序, 1 维网格分了 1300 区 (一般 2 维网格中每一方向只能分 100—200 区), 以便得到数值上近乎收敛的结果。上述做法尽量排除了 2 维问题中存在的较大的实验误差和数值误差, 并专门考察所选用的状态方程的影响。比较实验和计算结果发现, 对钽-钨相碰的情况, 采用最新的能反映熔化和气化的三相状态方程 ANEOS, 数值计算和实验得到了比较一致的结果, 然而在钽-铅相碰的情况下, 即使同样采用三相状态方程 ANEOS, 其后期结果仍有差异。考虑到铅的气化较钨的气化严重, 差异可能有 3 个原因: ①状态方程中临界点的位置还不够准确; ②没有考虑气化的非平衡效应; ③气、液两相只当作处于均匀混合的状态, 而未考虑二相流的特点计算它们的运动。这里对 2 维计算给出了重要的启示: 采用精度足够的数值格式和物理模型在计算 2 维超高速碰撞问题中是两个同样重要的条件。

为了提高 2 维问题中的计算精度, 有必要增密格点数, 这就要提高硬件水平; 在内点上采用 2 阶格式, 也应该在界面处理中达到相应精度; 此外, 在一个格元里要能确定同一材料中的裂纹和不同材料的界面, 还要能确定两相界面及各相的状态。上述困难不是能在短期内解决的。此外, 相对于计算方法来说, 前后处理却是薄弱而急需补足和改进的环节。

在物理模型方面, 除了描述材料的大变形、断裂以及相变等现象的困难以外, 还有描述固-液-气多相流等方面的困难。

至于说到 3 维问题的计算, 硬件和软件的发展水平以及与其相应的计费价格是严重的限制。计算一个 3 维问题往往需要 CRAY 机的 20—200 个 CPU 小时, 可见, 在目前中国的条件下, 研究重点还是应该放在 2 维问题上。

5 结 语

本文对超高速碰撞效应数值模拟研究的大概情况作了简单介绍和总结, 说明在数值格式和处理以及物理模型两个方面存在很多需要努力解决的问题。上述两方面的推进是相辅相成的, 数值方面的进步会有助于揭示内在的物理实质; 而数值模拟只有采用了正确的物理模型才能预报超高速碰撞中的有趣现象和规律。

参 考 文 献

- 1 Anderson C E Jr. An overview of the theory of hydrocodes. *Int. J. Impact Engng.*, 5, 1—4 (1987): 33—60
- 2 Johnson W E, Anderson C E Jr. History and application of hydrocodes in hypervelocity impact. *ibid*, 5, 1—4 (1987): 423—440
- 3 Wilkins M L. Calculations of elastic-plastic flow. in *Methods of Computational Physics*, Vol. 3 (ed Alder B, Fernback S, Rotenberg M), Academic Press, New York (1964)
- 4 —. Calculation of elastic-plastic flow. UCRL-7322, Rev. 1, LLNL, CA, U.S.A. (1969)
- 5 —. Calculation of elastic-plastic flow. UCRL-7322, Rev. 2, LLNL, CA, U.S.A. (1982)
- 6 Johnson G R. Analysis of elastic-plastic impact involving severe distortions. *J. Appl. Mech.*, 98, 3 (1976): 439—444
- 7 —. High velocity impact calculations in three dimensions. *ibid*, 99, 1 (1977): 95—100

- 8 Kimsey K D, Zukas J A. Contact surface erosion for hypervelocity problems. BRL-MR-3495, Ballistic Res. Lab. (1986)
- 9 McGlaun J M. Improvements in CSQ II: An improved numerical convection algorithm. Sandia Nat. Lab. Rept., SAND82-0051, unpublished
- 10 Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme IV. A new approach to numerical convection. *J. Comp. Phys.*, **23** (1979) : 276—299
- 11 McGlaun J M, Thompson S L, Elrick M G. CTH: A three-dimensional shock wave physics code. *Int. J. Impact Engng.*, **10** (1990) : 351—360
- 12 罗忠文, 谈庆明. Numerical simulation of hypervelocity impact for metal. Proc. of The Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects, 1992, Sichuan University Press, Chengdu, China
- 13 Johnson W E. SOIL notes. Private communication (1988)
- 14 Johnson G R. Status of the EPIC codes. Material characterization and new computing concepts at Honeywell. in Lecture Notes in Engineering, Vol. 3 (ed Brebbia C A, Orszag S A), Springer-Verlag (1982)
- 15 Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational models for ductile and brittle fracture. *J. Appl. Phys.*, **47**, 11 (1976) : 4814—4826
- 16 Hageman L J, Herrmann R G. Incorporation of the NAG-FRAG model for ductile and brittle fracture into HELP. ARBRL-CR-00380, Ballistic Res. Lab. (1978)
- 17 Rajendran A M, Dietsberger M A, Grove D J. A void nucleation and growth based failure model for spallation. *J. Appl. Phys.*, **65** (1989) : 1521—1527
- 18 Curran D R, Seaman L. Computational model for nucleation, growth and coalescence of adiabatic shear bands, in Shock Waves in Condensed Matter (ed Gupta Y M), Plenum, New York (1986) : 315—320
- 19 Whipple F L. Meteorites and space travel. *Astronomical J.*, 1161 (1947) : 131
- 20 Swift H F, Bamford R, Chen R. Designing dual-plate meteoroid shields—A new analysis. JPL Publication 82-39, JPL, Pasadena (1982)
- 21 Holian K S, Burkett M W. Sensitivity of hypervelocity impact simulations to equation of state. *Int. J. Impact Engng.*, **5**, 1—4 (1987) : 333—342
- 22 Pomykal G W. Digitized data for Delco test 4007, lead on lead. Lawrence Livermore Lab. Rept. DDV-86-0010, unpublished
- 23 Holian K S, Holian B L. Hydrodynamic simulation of hypervelocity impacts. *Int. J. Impact Engng.*, **8**, 2 (1989) : 115—132
- 24 Trucano T G, Asay J R, Chhabildas L C. Hydrocode benchmarking of 1-D shock vaporization experiments, in Shock Waves in Condensed Matter (ed Schmidt S C, Holmes N C), North-Holland (1987) : 163—166

NUMERICAL SIMULATIONS OF HYPERVELOCITY IMPACTS

Tan Qing-ming

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

Abstract This paper concisely introduces and summarizes the current status of the research on numerical simulations of hypervelocity impacts, and discusses the progress made and the problems existing both in numerical schemes and physical models.

Keywords *hypervelocity impact; debris cloud; numerical simulation; physical model*