

三维弹塑性流体力学自适应欧拉方法研究

何长江* 刘 军** 梁仙红*

* (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

** (中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

网格自适应 (AMR) 方法的研究起始于20世纪80年代早期, 它在自己感兴趣的区域使用密布的细网格, 其他区域用较粗的网格。在同样网格存储和计算工作量的前提下可有效的提高流场数值计算的分辨率和计算精度。AMR方法分为以下几类: (1) 移动网格, 具有固定的网格点数, 只是网格的位置根据所需的要求进行调整, 从而使得网格几何特性变好或局部网格变密(或变粗), 达到网格优化的目的, 网格的拓扑结构一般不发生变化; (2) 点关联结构, 以网格元作为树结构的单元, 针对每个网格单元进行细分, 这种方法非常灵活, 但是由于需要大量不规则内存访问其代码执行效率不高; (3) 块结构方法, 由逻辑笛卡尔网格和子网格覆盖计算区域, 这些网格可以互相重叠、有任意形状, Quirk(1991) 和 De Zeeuw 和 Powell (1993)提出了一种简化的版本, 它让分级的嵌套网格在每一个坐标方向上对分开来, 让这种分级关系形成一种逻辑上的节点树的结构, 这是一个灵活高效的方法。

弹塑性流体力学的研究尤其是高速碰撞问题的研究在兵器工业和国民经济的许多领域有着广阔的应用前景。对于弹塑性流体力学问题, 数值计算方法可分为 Lagrange 方法、Euler 方法以及两种方法结合。由于 Lagrange 方法是随物质运动而变形网格, 所以 Lagrange 网格自适应细分合并技术难度较大, 且网格在细分时更容易发生网格畸变, 而 Euler 方法不仅能适应大变形问题的计算而且适合采用网格细分和合并的自适应技术。

三维弹塑性流体力学欧拉程序 MEPH3D 是可以用于高速碰撞、侵彻、炸药爆轰等问题的三维欧拉数值模拟应用程序。MEPH3D 程序采用 Euler 方法, 适合计算大变形问题。MEPH3D 程序运用 Youngs 界面处理技术对多介质问题进行界面重构, 较好地解决了多介质问题的计算。但是, 对于实际问题的计算来说, 三维欧拉方法需要的网格数十分庞大, 因而十分有必要把三维欧拉方法和网格自适应技术结合起来。

本文研究了三维多介质弹塑性流体力学欧拉数值方法的网格自适应技术, 解决了计算弹塑性问题时应用网格自适应所遇到的一系列关键问题, 如网格细分和合并规则, 父网格或子网格物理量的填充, 保护网格的选择、填充及存储方案, 插值函数的选择及如何选择时间步长等问题。研制了可计算多介质弹塑性流体力学问题的三维自适应欧拉程序, 给出了侵彻、爆轰等弹塑性问题的数值算例, 验证了方法的有效性。

DSCM 技术对多点同时爆炸聚集效应的实验研究

李旭东* 张光升** 文尚刚** 谭福利** 刘凯欣*

*(北京大学工学院, 北京 100871)

** (中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川绵阳 621900)

多点同时爆炸时, 多个冲击应力波通过相互作用产生的所谓聚集效应将形成高应力集中区, 产生强烈的破坏作用。对这种冲击破坏过程开展相应的实验研究, 搞清聚集区域的非线性效应, 对于防护工程等领域都有重要的作用。

本文通过高速摄影技术记录下水泥砂浆板在 3 点同时爆炸时的破坏过程。实验中采用的水泥砂浆材料由石膏、水泥、沙、水按照质量比 0.1:0.9:3:0.5 混合而成, 所用水泥为国内生产的 325#硅酸盐水泥, 沙为颗粒直径小于 0.65mm 的细沙。材料配比好以后压实成型, 制成 300×200×8mm 的板材, 在自然环境下干燥养护 7 天。为了给后面的 DSCM (数字散斑相关方法) 处理提供高对比度的散斑场, 水泥砂浆板养护好后, 在其表面涂上一层薄薄的白色油漆, 油漆干后在漆面上用黑色油笔打上间隔 10mm, 线宽 1mm 的方格。将 3 发 LD-10A 雷管间隔 40mm 紧贴着水泥砂浆板放置, 其爆炸时产生的射流方向与板面垂直。3 发雷管同时起爆, 采用 GSJ 分幅式高速摄影机, 以 16 μ s/幅的速率记录下整个爆炸破坏过程。

然后通过 DSCM 技术^[1-3]提取了破坏过程中不同时刻的位移场, 并由此得到相应的应变场的信息。通过比较聚集区域与非聚集区域正应变场的分布, 发现聚集区域的应变远大于几个爆炸点分别产生应变的简单线性叠加, 存在明显的非线性效应。

关键词 高速摄影, DSCM, 水泥砂浆, 聚集效应

参考文献

1. 孟利波, 金观昌, 姚学峰等. 数字散斑相关方法及其在碳纤维复合材料压力容器变形测量中的应用. 光学技术, 2006; 32(2): 163~170.
2. Yao X F, Meng L B, Jin G C, et al. Full field deformation measurement of fibre composite pressure vessel using digital speckle correlation method. *Polymer testing*, 2005, 24(2):245~251.
3. Yao X F, Xiong T C, Xu W, et al. Experimental Investigations on Deformation and Fracture Behavior of Glass Sphere Filled Epoxy Functionally Graded Materials. *Appl. Compos. Mater.*, 2006, 13: 407~420.

混凝土侵彻数值计算方法的对比分析

蒋建伟¹⁾ 门建兵 王树有

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

爆炸与冲击问题的数值计算方法目前已具有 Lagrange, Euler, ALE (任意拉格朗日-欧拉)、SPH (无网格光滑粒子流体动力学) 以及 Lagrange/Euler 混合等多种计算方法。特定的研究问题应具有最适合的计算方法。本文就动能侵彻体侵彻混凝土介质问题, 采用 AUTODYN 仿真软件对弹靶采用相同的材料模型, 计算方法分别采用 Lagrange, Euler, SPH 等方法进行了仿真计算, 获得了动能侵彻体的侵彻速度、加速度等变化规律以及混凝土靶损伤破坏结果, 从侵彻深度和破坏形态等方面对比分析各种计算方法的结果与试验结果的吻合程度。

多元气相爆轰合成纳米 TiO₂ 研究²⁾

闫鸿浩³⁾ 李晓杰 欧阳欣 王小红

(大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

本文介绍了利用氢氧混合气体、四氯化钛组成的多元气相系统, 爆轰制备纳米二氧化钛粉体的方法。利用 XRD 衍射分析证明产物为二氧化钛混晶 (金红石相和锐钛矿相), 晶粒尺度为纳米级。通过 XRD、TEM 分析可以得出, 粒子基本为球形, 粒径约为 10 到 20nm。并且阐述了气相爆轰合成纳米二氧化钛粉末的基本原理。

关键词 气相爆轰, 合成, 纳米二氧化钛

刚性弹侵彻动力学中的第三无量纲数⁴⁾

陈小伟^{*,5)} 李小笠^{*} 陈裕泽^{*} 武海军^{**} 黄风雷^{**}

^{*}(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川绵阳 621900)

^{**}(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 10088)

在撞击函数 I 和弹头形状函数 N 两个无量纲数之外, 本文采用侵彻阻力的一般表达式, 计及速度一次项和减速度效应导致的附加虚拟质量项, 利用量纲分析方法, 明确定义控制刚性弹侵彻过程的第三无量纲物理量, 即阻尼函数 ζ 。针对一般凸形弹头的侵彻问题开展分析, 得到一般化的无量纲侵彻深度的计算公式。

关键词 侵彻力学, 刚性弹, 第三无量纲数, 金属, 混凝土

¹⁾E-mail: bitjjw@bit.edu.cn

²⁾国家青年科学基金项目(10602013)、国家自然科学基金(10172025)资助项目

³⁾E-mail: honghaoyan@vip.sina.com

⁴⁾北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金(KFJJ04-3)和国家自然科学基金(10672152)资助项目

⁵⁾E-mail: chenxiaoweintu@yahoo.com

三维贴体坐标系中爆轰波传播计算的 LS 方法

钟 敏 李 平 柏劲松

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

复杂几何形状炸药中爆轰波阵面传播过程的描述是炸药驱动装置设计中的一个重要课题。对于非理想爆轰过程, 在爆轰波阵面曲率较小时, 采用 DSD (detonation shock dynamics) 给出的爆速曲率关系是其传播规律的最简洁描述。LS (Level Set) 方法作为一种描述运动界面的数学方法, 可以方便的计算阵面的曲率, 较为适合于小曲率爆轰波传播的数值模拟。对于具有复杂几何形状的炸药, 在直角坐标系中由于弯曲的炸药边界难以对应到网格点上, 使边界条件的处理比较困难。采用贴体坐标系后, 炸药的边界即计算的网格边界, 可以简化边界条件的处理。

一般采用符号距离函数作为 LS 函数。非理想爆轰波的传播方程可以分解为体现曲率影响的双曲型部分和体现 CJ 爆速作用 Hamilton-Jacobi 偏微分方程部分, 二部分可分开计算, 双曲型方程部分采用中心差分计算。引入坐标变换后, 对于正交的贴体坐标系 Hamilton-Jacobi 偏微分方程部分的计算方法与一般的平面直角坐标系区别不大, 可以采用类似的 Godunov 格式计算, 对于非正交的贴体坐标系, 由于方程中出现了交叉项, 情况变得比较复杂。对于含交叉项的方程, 仍然可以采用 Godunov 格式计算, 根据格式的定义, 无论二维和三维问题, 都可以认为差分的取值范围必为一个有限区域内的分段光滑函数的极值, 而所有可能的极值都可以求得, 计算出符合定义要求的极值即可以完成差分计算。重新初始化的方程的计算有类似的方法。

边界条件采用简化后的角度, 采用 LS 方法和贴体坐标系后, 边界条件的处理变得简单, 利用 LS 函数可以方便的计算爆轰波阵面的法方法, 利用贴体坐标的变换函数可以直接得出炸药边界的法方向, 两者的夹角即为波阵面和炸药边界的角度, 如果计算出的角度符合要求, 调整外面的 ghost 网格上 LS 值, 使满足边界条件。

光滑质点流体动力学方法的稳定性分析

陈建设 徐 绯 黄其青

(西北工业大学航空学院结构工程系, 西安 710072)

光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法在模拟大变形问题时具有巨大的优势, 但是与其它无网格方法相比 SPH 方法计算精度相对较低。本文对光滑粒子流体动力学的稳定性进行了深入研究。分析了不稳定性产生的根源, 包括拉伸不稳定和压缩不稳定, 探讨了保守光滑算法和人为粘性对计算稳定性的影响。结果说明, 人为黏性可以改进压缩不稳定现象, 保守光滑算法对拉伸失稳和压缩失稳都有很好的改善。

关键词 光滑粒子流体动力学 (SPH), 不稳定性, 保守光滑算法

应力波和层裂计算中的光滑粒子法¹⁾

卞 梁²⁾ 王肖钧 肖卫国 劳 俊

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230027)

本文采用光滑粒子法, 数值模拟了平板碰撞下一维弹塑性应变波的传播及其在自由面和固定端的反射。通过引入含损伤的率相关本构方程, 对铝锂合金的层裂实验进行了数值模拟。计算结果表明, 光滑粒子法能很好地模拟应力波的传播和相互作用, 层裂的计算结果与实验结果也比较吻合。因此, 本文的工作对于光滑粒子法的进一步研究和应用有一定的积极作用。

关键词 光滑粒子法, 应力波, 数值模拟, 层裂

多体-离散体动力学分析及其 在建筑爆破拆除中的应用

魏晓林 傅建秋 李战军

(广东宏大爆破工程有限公司, 广州 510055)

建筑结构爆破拆除的倒塌, 将经历初始失稳、倾倒(或下落), 运动(或撞地)解体和塌落堆积等过程。初始失稳可用刚塑体建筑结构的极限分析来判断; 其相应的塑体建筑机构可用变拓扑多体系统动力学来描述; 多体解体生成的离散构件和子结构, 可用离散元模拟; 该解体过程包括从“塑性铰”连接解体为非完全离散体, 乃至完全离散体, 和从多体逐步解体出离散个体与其余多体并存, 乃至全部离散, 为描述此过程本文提出多体离散动力学分析; 由以上各过程组成并统称多体-离散体动力学分析。观测证明, 用其分析、模拟建筑结构的倒塌是可行的, 正确的。本文又提出多体系统动力学方程近似解组, 其与数值解误差在 6% 以内, 可简便地应用在常见爆破拆除倒塌姿态及相关的动力学分析。

关键词 建筑结构, 爆破拆除, 极限分析, 变拓扑多体系统动力学, 离散元, 近似解

¹⁾国家自然科学基金资助项目(10632080)

²⁾E-mail: liangb@mail.ustc.edu.cn

深孔控制卸压爆破在煤层瓦斯抽放率及防突中的应用研究

罗 勇

(广东宏大爆破工程有限公司, 广州 510055)

基于当前各种局部防突措施的特点, 对兼有松动爆破与大直径卸压钻孔爆破两种措施优点的局部防突措施, 即深孔控制卸压爆破进行了理论分析, 并进行了该技术提高低透气性煤层的瓦斯抽放效果的现场试验, 同时检验了该方法对煤与瓦斯突出的影响。试验结果表明: 该法工艺简单、效果明显、经济效益好、安全且适应性强, 是一种易于推广, 有着广阔的应用前景的局部防突措施。

关键词 控制卸压爆破, 瓦斯抽放, 防突措施, 煤与瓦斯突出, 应力波理论

弹体侵彻过载特性研究综述¹⁾

孙桂娟^{*, **, 2)} 何 翔^{**} 刘瑞朝^{**} 张庆明^{*} 黄家蓉^{**} 王 幸^{**} 杨建超^{**}

^{*} (北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

^{**} (洛阳水利工程研究所, 洛阳 471023)

详细介绍了弹体侵彻过载特性的国内外研究现状, 指出了现阶段侵彻过载特性研究存在的问题(弹体的结构响应及弹体斜侵彻的过载)及发展趋势。开展弹体侵彻过载特性研究对于研究弹体的侵彻机理、弹体设计等具有重要的指导意义。国内外在弹体过载特性研究方面已作了一定的工作, 取得了一定的成绩, 但离实际应用还有一定的距离。深入开展弹体侵彻机理及过载特性研究, 进而建立侵彻过载特征参数工程计算方法十分迫切, 不仅具有非常重要的学术价值, 而且具有重大的工程应用价值。

关键词 弹体, 侵彻, 过载

¹⁾国家自然科学基金资助项目 (10672186)

²⁾E-mail: haoyue@bit.edu.cn

数值计算方法中界面处理方法研究¹⁾

吴开腾 牟廉明 曾德强

(内江师范学院四川省高等学校数值仿真重点实验室, 内江师范学院数学系, 四川内江 641112)

随着计算机技术的快速发展和应用, 数值计算再也不能仅仅被看作是理论研究和试验研究的辅助手段了, 它已成为独立于理论与实验的一种基本的科学活动, 数值计算已经成为近代科学技术迅速发展的不可忽视的重要因素. 在多介质流的数值计算中, 对界面的正确处理是十分关键的, 它涉及到了各种理论和技术领域的数值研究和应用. 对于理解和研究许多物理现象具有重大意义, 特别是对于这些物理现象中内部和微观结构与特征的发展过程的数值研究, 具有更加实用的意义.

在数值计算的关键技术中, 对于界面处理方法提出的许多方法中, 有一个共同点都是用在流场中定义函数的方法来确定物质界面的, 而这个函数又是随着计算过程的进行而不断发生着变化的, 这种变化的大小随着流场的变化也在发生着变化, 因而, 要能更准确地描述物质的界面, 关键在于寻求一个函数或方法能准确地描述多介质流中的界面, 特别是随着计算机技术、软件技术的快速发展和应用, 数值计算已从原来的重点是一、二维数值计算转到三维数值计算上来了, 而三维数值计算中的难题较一、二维要大得多, 而又随着可视化技术的不断发展和应用, 也对多介质流的数值计算中的界面处理提出了更高要求. 在确定多介质流的界面中, 引入模糊数学的思想来研究多介质流中的界面处理难题, 并将这些结果用来研究三维数值模拟中的界面处理问题, 得到了很好的模拟效果, 对于实际问题的研究有很好的指导意义和参考价值.

反分析法在泡沫金属材料动态性能实验中的应用

王志华^{* **} 宁建国^{*} 赵隆茂^{**}

^{*} (北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

^{**} (太原理工大学应用力学研究所, 太原 030024)

在实验测试泡沫金属材料的动态性能时, 由于其所具有的特殊性能使得传统的 SHPB 技术的采用遇到较大的困难. 本文为了实验确定泡沫金属材料的初始动力坍塌强度和“平台”应力, 研究其应变率效应, 在现有 SHPB 实验装置的基础上, 利用反分析法中的反卷积技术, 通过计算机模拟给出了该实验装置的传递函数, 修正了由于大直径杆应用引起的横向惯性效应以及弥散效应, 完善了 SHPB 实验的数据处理系统, 为实验研究泡沫材料的动态特性提供了一种有效的方法.

关键词 泡沫金属材料, SHPB, 反分析法, 反卷积

¹⁾国家自然科学基金(10472042), 四川省应用基础研究(05JY029-152)资助项目

模糊界面处理中的综合评价法

陈龙伟^{*, **} 庙延钢^{**} 汪旭光^{**, +}

^{*} (云南财经大学统计与数学学院, 昆明 650221) ^{**} (昆明理工大学国土资源学院, 昆明 650092)

⁺ (北京矿冶研究总院, 北京 100044)

利用差分方法求解控制方程组时, 欧拉(Euler)–拉格朗日(Lagrange)混合方法中需要对物质界面进行描述, 本文提出了一种物质体积比权重的模糊综合评价方法。首先进行输运步的处理, 即欧拉步的计算, 把计算域进行离散差分, 描述物质运动的位置; 其次进行拉格朗日步的计算, 即压力效应步, 考虑压力或应力对物体的作用。在欧拉步中应用模糊综合评价法描述界面。由物体的质量、密度、体积、比内能等物理量通过控制方程计算出界面压力, 根据接触界面压力相等的原理, 反求物质体积比, 即通过综合因素的考虑计算物质体积比的权重系数, 模糊综合评价向量的分量值, 进而求得各网格物质的输运量, 进行输运计算。采用多方气体状态方程 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 描述炸药爆炸过程, Cruneisen's 状态方程描述岩石损伤, 给出了炸药在岩石中爆炸的三维数值计算和模拟, 其结果与实际较为吻合, 说明模糊综合评价方法在欧拉步处理多物质界面是一种简单易行的方法。

障碍物对氢氧预混气体爆轰波传播的影响

王 成¹⁾ 宁建国 马天宝

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

本文采用迎风型 WENO 格式和两阶段化学反应模型, 对预混氢氧混合气体的爆轰波的传播特性进行了二维数值模拟研究, 数值结果较准确地描述了爆轰波真实流场中物理量的变化, 得到了一系列爆轰波在受到障碍物扰动后的传播过程和爆轰波的精细胞格结构等现象。主要结论如下:

1) 过多的障碍物个数会增加爆轰波压力损失, 个数太少又不能形成足够强度的扰动, 本文数值计算结果表明, 障碍物个数达到三个即为最佳。

2) 如果障碍物距离很近, 在激波穿越两个障碍物后, 这两个障碍物间的气体还未能充分燃烧, 导致激波能量不足。如果间距太大, 由于穿越第一个障碍物而加速的激波会在到达下一个障碍物前就由于耗散作用被削弱了。本文数值计算结果显示, 间距大小在爆轰波胞格长度 λ 值左右时, 是爆轰波传递的最理想距离。

3) 如果障碍物孔径太大, 扰动强度不足; 而障碍物孔径太小, 就会阻碍激波传播。本文数值计算结果也证明了这一点。变形问题时具有较大的优势。但当所研究的系统含有多种物质的时候, 便会出现混合网格, 此时混合网格处理方法的优劣就显得至关重要。如何确定混合网格中的物质界面位置, 如何计算混合网格的力学量以及混合网格向周围网格的物质输运量, 一直是 Euler 方法中的难题。

关键词 气相爆轰, WENO 格式, 二阶段化学反应模型, 数值模拟

¹⁾E-mail: wangcheng@bit.edu.cn

Euler 方法中的界面处理算法研究

马天宝¹⁾ 宁建国 王 成

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

对于流体动力学问题的 Euler 数值方法, 由于网格在空间固定, 物质在网格内流动, 因此在处理大变形问题时具有较大的优势。但当所研究的系统中含有多种物质的时候, 便会出现混合网格, 此时混合网格处理方法的优劣就显得至关重要。如何确定混合网格中的物质界面位置, 如何计算混合网格的力学量以及混合网格向周围网格的物质输运量, 一直是 Euler 方法中的难题。

本文结合 Euler 型多物质流体动力学数值方法, 对传统的 Youngs 界面重构算法进行了改进, 改进后的算法中, 周围网格物质的体积份额不但被用来计算混合网格的物质界面位置, 还被用来确定各物质的输运次序。

为了检验文中提出的改进 Youngs 界面算法, 文中给出了二维平面上同心圆在平移流场中的运动算例。数值计算过程中, 着重检验物体形状能否保持完好。计算域大小为 (2×2) , 网格划分为 (200×200) 个, 时间步长为 0.001, 平移速度场: $u_z(z, r) = u_r(z, r) = 1.0$ 。数值模拟结果表明, 同心圆在该平移速度场中, 形状保持得较好, 但采用了改进 Youngs 技术后, 同心圆的体积保持不变, 而原 MMIC-2D 程序的计算结果会出现体积减小的问题。

进一步地, 为了检验本文提出的改进 Youngs 物质界面处理算法在真实物理场中的计算效果, 文中对聚能射流的形成过程进行了数值模拟。采用 Euler 方法模拟固体材料大变形问题, 特别是对于药型罩这种薄壁结构, 若要准确地模拟其在爆轰产物作用下的压垮过程, 对程序中的物质分界面处理算法提出了较高的要求。从计算结果可视化图像中可以看出, 原 MMIC-2D 计算程序得到的结果, 在爆轰产物—药型罩—空气三者交界的区域, 药型罩的变形比较混乱, 而采用改进 Youngs 技术后, 物质界面的分辨率清晰, 由此说明本文提出的改进 Youngs 技术在处理混合网格的物质界面以及各物质的输运次序方面是比较精确、有效的。

关键词 Euler方法, 改进Youngs技术, 聚能射流

基于 Youngs 界面重构技术的不分裂输运算法

宁建国 刘 春 马天宝

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

在 Euler 输运的维数分裂算法中, 只考虑了相邻的上下左右 4 个网格的输运计算, 对于斜对角相邻的 4 个网格没有考虑。本文在原有的 Youngs 界面处理技术的物质输运算法基础上, 由纯物质网格出发, 对两种物质混合网格的不分裂输运算法进行了理论分析, 给出了不同输运方向和输运量的情况下, 往相邻 8 个网格输运的分配方法。编程试验结果表明, 特别是网格划分较粗糙的情况下, 不分裂输运算法的计算结果更加符合实际情况。

关键词 Youngs算法, 不分裂, 混合网格, 数值模拟

¹⁾E-mail: madabal@bit.edu.cn