

碎块对防护门撞击效应的数值分析

张德良

王福海 陈 雷

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (第二炮兵第三研究所, 北京 100080)

摘要 由于防护门结构复杂, 过程复杂, 为了理解其力学效应, 使用数值模拟就成为研究撞击效应的重要手段。文中用流体弹塑性模型数值模拟了高速碎块撞击防护门的效应; 详细描述了碎块撞击防护门复杂物理过程; 分析了碎块参数对撞击效应的影响。

关键词 高速撞击, 碎块, 防护门, 流体弹塑性, 数值模拟

碎块对防护门的撞击效应是属于高速撞击领域中的一个课题。在高速撞击过程中防护门内将形成极强的冲击波, 材料介质经受高温高压和高应变率的复杂物理过程, 并产生弹性、塑性、断裂和相变等效应。在目前条件下无论在实验和理论分析方面, 至今仍未见到碎块对抗护门撞击效应研究的完整的资料和数据, 因此在防护门设计过程中, 对这一效应缺少应有的理论依据。

本文利用流体弹塑性模型数值模拟了碎块对防护门的撞击效应, 对现场实用的钢包混凝土防护门受碎块撞击效应, 进行了数值分析。计算结果表明, 该设计对碎块撞击效应是安全可靠的。

1 数学模型和计算方法

碎块高速撞击防护门是一个典型的流体弹塑性体的非定常运动问题。因此, 我们可采用流体弹塑性模型来计算碎块高速撞击防护门物理效应。

用流体弹塑性模型来计算高速撞击现象, 在欧拉坐标系中忽略粘性、热传导和热辐射效应^[1], 用来描述的基本方程组为

静水压效应 (p h 1) 对流效应 (p h 2) 应力偏量效应 (p h 3)

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho dv = - \int_s (\rho u_i) n_i ds \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_j dv = - \int_s p n_j ds - \int_s (\rho u_i u_j) n_i ds + \int_s S_{ij} n_i ds \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E dv = - \int_s p u_i n_i ds - \int_s (\rho u_i E_i) n_i ds + \int_s S_{ij} u_j n_i ds \quad (3)$$

式中 ρ 是密度; p 是静水压力; u_i 是介质运动速度; E_r 是比内能; S_{ij} 是应力张量; n_i 是外法线方向 方程组把介质运动表示成静水压力效应、对流效应和应力偏量效应三部分 在一定的本构关系和定解条件下求解方程组

高速撞击现象中介质会出现大畸变, 采用欧拉算法是比较合适的 计算中差分格式是用算子分裂思想来建立的具体计算步骤如下: 第一步计算静水压力效应, 第二步计算应力偏量效应, 第三步计算对流效应 计算中同时对空间坐标(轴对称坐标 r, z) 也进行分裂, 即把一个二维问题分裂成二个一维计算步来完成(见图1). 图中(a)为物理效应分裂, (b)为空间维数分裂 为了记录界面运动状态, 计算中采用示踪点方法

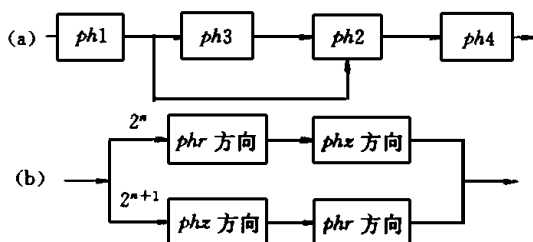


图1 算子分裂思想示意图

2 碎块撞击过程简化分析

钢包混凝土防护门如图2所示^[2].

$R_1 = 2252 \text{ mm}$, $R_2 = 2652 \text{ mm}$. 从图2中可知, 防护门是园拱形的 当碎块以高速撞击防护门时, 只有在防护门中心位置处是受到碎块的垂直撞击, 其他部位将是斜碰撞, 因此只有在防护门中心位置附近遭受到的破坏最为严重 为便于计算和分析, 我们把碎块撞击过程简化为一碎块垂直撞击一平面钢包混凝土防护门 根据实测资料分析, 在计算中我们选取碎块最大尺度为 10 cm .

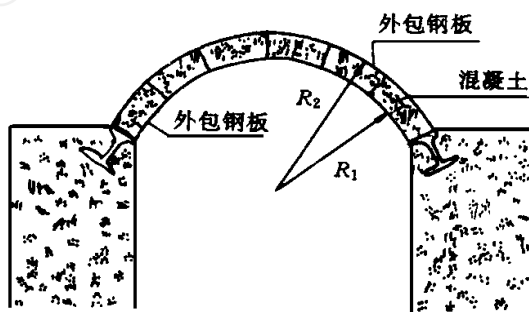


图2 钢包混凝土防护门示意图

考虑到激波后在高速气流卷挟下碎块可能会被加速到更高一些速度, 估计可以达到 $10^2 \sim 10^3 \text{ m/s}$ 数量级, 同时, 我们希望能得到临界的碎块撞击速度, 因此, 在计算中我们取碎块的最大撞击速度为 2 km/s 在这样的撞击速度下检验钢包混凝土防护门的安全可靠性

3 计算结果及验证

在上述参数影响的计算基础上, 我们对现场实用的钢包混凝土防护门的安全可靠性进行了计算 计算条件如下: 碎块假定是园柱状的, 它的高和直径相等 (10 cm), 撞击速为 2 km/s , 钢包混凝土防护门被简化为钢板/混凝土/钢板结构, 尺寸为 $3 \text{ cm}/20 \text{ cm}/3 \text{ cm}$.

计算结果在图3, 图4中. 图3是撞击过程中不同时刻的密度分布. 图4是撞击过程中不同时刻的压力分布. 从图中可以清晰看到, 碎块撞击钢包防护门的撞击过程中弹坑形成过程, 冲击波在钢包混凝土防护门中传播和反射过程.

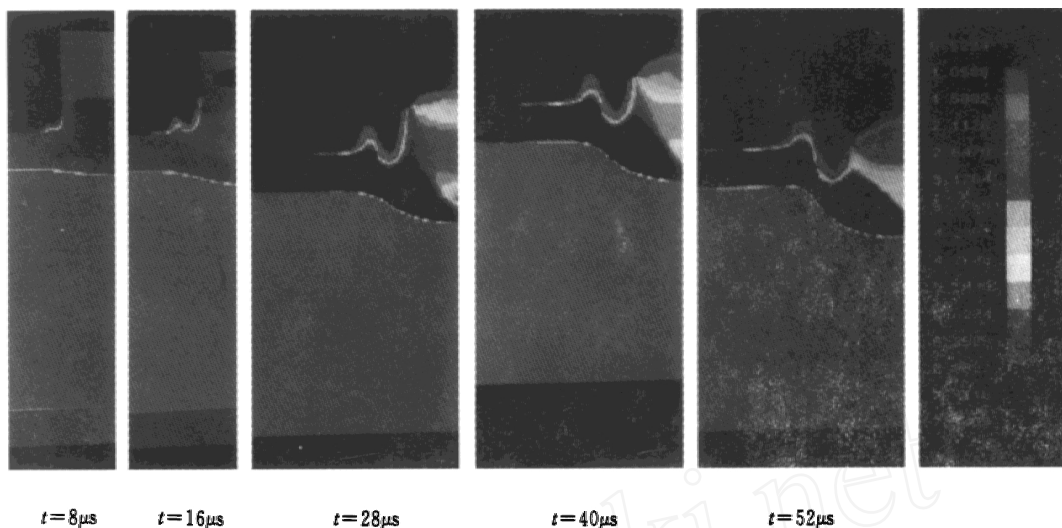


图3 圆柱型碎块($D = 10\text{ cm}$)撞击钢包混凝土防护门时, 不同时刻密度分布

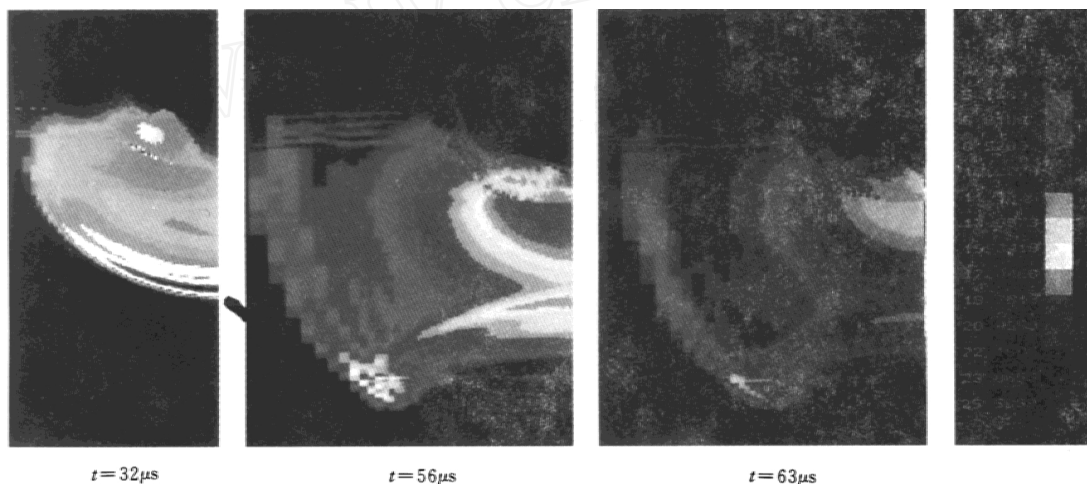


图4 圆柱型碎块($D = 10\text{ cm}$)撞击钢包混凝土防护门时, 不同时刻压力分布

为了检验计算结果合理性, 我们分析一下两个半无限大平面碰撞前和碰撞后的撞击过程. 两个半无限大平面(如图5所示), 其中介质1垂直于交界面以速度 v_p 撞击静止的介质2. 当两介质相撞时, 在介质1和介质2中形成冲击波, 其波阵面为 AB 和 CD , 冲击波从交界面向这两种介质内部传播. 假设在两种介质中传播的冲击波的波前具有无限宽度的区域, 在冲击波传播之后, 介质内的压力和速度会有突变.

我们用铁园柱以 2 km/s 撞击薄铁板 (3 cm 厚) 为例, 这时质点速度应为 1 km/s , 由此算

得冲击波速度为 $u = 4.54 \text{ km/s}$ 我们也可以从数值计算结果中, 相邻两个时刻的压力分布图上计算出冲击波在靶板内传播速度为 $u = 4.77 \text{ km/s}$ 两者相比, 分析值和计算值基本一致

其次, 我们来考察碎片云头部速度, 根据实验结果, 得出碎片云头部速度应约为撞击速度一半^[2], 我们用铁球以 2 km/s 撞击薄铁板为例, 从计算结果可以得到碎片云头部速度约为 0.94 km/s , 和实验结果是相符的

综上所述, 我们的数值模拟计算结果是合理的、可信的

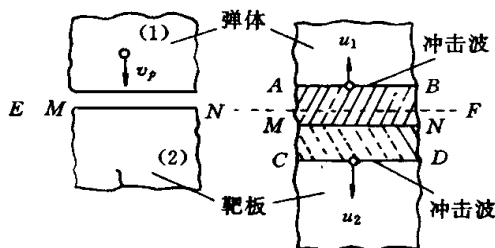


图5 两个半无限大平面撞击过程示意图

4 钢包防护门安全可靠分析

在碎破参数效应分析基础上, 我们对现场实用的钢包混凝土防护门的安全可靠性进行了计算

(1) 防护门形成的弹坑深度为 6 cm , 第一层铁板已被击穿, 但仅占整个防护门厚度 $1/4$ 左右, 而且从不同时刻弹坑形成过程看弹坑发展十分缓慢

(2) 从撞击过程的压力分布来看, 冲击波在防护门中传播, 反射以及冲击波相互作用过程十分清晰 在防护门中心混凝土部位, 反射冲击波和入射冲击波相互作用, 因而使压力明显加强, 在这个区域可能会引起混凝土断裂、破碎, 但是由于防护门两边有二层铁板包围着, 因此也不可能产生新的碎块飞射出来, 对防护门背后的设备和人员不会造成伤亡

综上所述, 在目前条件下, 钢包混凝土防护门是安全可靠的

5 结论

(1) 采用流体弹塑性模型, 进行数值分析碎块对钢包混凝土防护门安全可靠性是可行的, 从计算结果和分析来看, 与实验结果相比是合理的

(2) 在碎块撞击靶板过程中, 碎块质量、撞击速度对撞击破坏效应起着重要作用, 而碎块形状对撞击效应影响不大

(3) 钢包混凝土防护门设计是安全可靠的, 由于在 2 km/s 撞击速度下仍未破坏, 因此不存在临界冲孔撞击速度

参 考 文 献

- 1 谈庆明. 超高速碰撞效应数值模拟. 力学进展, 1993; 25(4)
- 2 Deliang Zhang, Qingming Tan. Experimental investigation of hypervelocity impact onto aluminium dual/plate structures ACTA Mechanica Sinica, 1992; 8(4)

(下转第19页)

STRUCTURAL INFLUENCE ON THE ADIABATIC SHEARING FAILURE OF PRE-TORQUED TUNGSTEN HEAVY ALLOY

Wei Zhigang Hu Shisheng Li Yongchi

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Fan Cunshan

(Inner Mongolia Metals Research Institute, Baotou, 014034)

Abstract A combined compression/shear testing method was used in order to investigate the propensity of pre-torqued tungsten heavy alloy containing 93% W and the Ni on Fe in a 7:3 ratio. The combined simultaneous loading is applied by a split Hopkinson pressure bar (SHPB), which generates strain rate as high as 10^3 s^{-1} . The cylindrical specimen has its axis inclined to the loading axis. Adiabatic shear localization has been observed in the high rate compression/shear tests; relatively narrow shear bands are formed, followed immediately by catastrophic fracture. The deformed microstructures are examined using electron microscopy and optical microscopy. Examination of the deformed microstructures supplies new insight into the deformation and failure mechanism of pre-torqued tungsten heavy alloy.

Key words adiabatic shear band, tungsten heavy alloy, split hopkinson bar

(上接第14页)

NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPACT EFFECTS OF A DEBRIS ON A DEFENSIVE DOOR

Zhang Deliang

Wang Fuhai Cheng Lai

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080) (The Third Institute, The Second Artillery, Beijing, 100080)

Abstract Since the structure of defensive gate is very complex, the defensive gate passed the complex phenomena during impact process. In order to understand very well on mechanical effects of debris with high velocity impacting a defensive gate, numerical simulation became an important mean. In this paper, the effects of a debris with high velocity impacting a defensive gate have been simulated numerically by using a hydro elastic-plastic model. The complex physical phenomena during impact process were described in detail. The influence of debris parameters on impact process were analyzed.

Key words high velocity impact, debris, defensive gate, hydro elastic plasticity, numerical simulation