

高速碰撞数值模拟中约束 滑移线判据的改进

周连胜 张志杰 贝新源

本文对冲塞损伤中约束滑移运动开关作了改进, 取塑性应变强度的某一量值作为约束滑移的开关, 改进了数值模拟效果, 表明它比剪切屈服开关更接近实际物理过程。

一、引言

高速弹丸撞击靶板属于大变形的弹塑性流动, 当采用拉格朗日型差分格式进行数值模拟时, 为了避免弹丸网格与靶板网格重叠^[1], 在靶板撞击面上设置J-自由滑移线^[2](或面)。随着弹丸初始能量的增大和侵彻时间增长, 将引起材料更大的变形, 甚至造成冲塞和贯穿损伤, 靶板介质之间亦将产生明显的滑移运动。所以, 除了上述自由滑移线之外, 还需要在靶板内部设置受约束的轴向(称为K-)滑移线^[3]。在文献[3]中, 我们曾将这条受约束的(K-)滑移线预先设置在靶中某一固定位置, 并赋予材料剪切(应力)屈服开关。当该K-线上的所有网格中, 达到剪切屈服的网格占50~70%时, 便解除约束, 使之成为一条自由滑移线。这样处理受约束的滑移线, 对检验模拟滑移运动的算法是可取的, 但用以模拟冲塞损伤需作改进。Seaman·L^[4]用塑性应变作为约束滑移的开关, 并结合网格重分技术, 得到了很好的数值模拟效果。

根据上述情况本文对靶板内部的约束滑移线作了三点改进, 1. 将剪切屈服开关改为塑性应变强度(或称等效塑性应变)开关, 认为塑性应变强度达到一定量值时, 才允许相对滑移运动; 2. 约束滑移线的位置由人为预先确定, 改为由计算机自动选定; 3. 当选定约束滑移线位置后, 其长度自撞击面起, 至达到开关值的网格止, 随着时间增长, 将逐渐向靶中延伸, 直至贯穿靶板为止。我们用自编向量程序^[5]在银河亿次机上作了数值检验, 在未采用网格重分技术情况下, 也能得到较好的模拟效果。

二、塑性应变强度开关

按照通常表示法, ϵ_{xx}^E, \dots 等表示弹性应变分量, ϵ_{xx}^P, \dots 等表示塑性应变分量, σ_{xx}, \dots 等表示应力分量, s_{xx}, \dots 等表示应力偏量分量。塑性应变强度定义为

$$\epsilon_i^P = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_{xx}^P - \epsilon_{yy}^P)^2 + (\epsilon_{yy}^P - \epsilon_{zz}^P)^2 + (\epsilon_{zz}^P - \epsilon_{xx}^P)^2 + \frac{3}{2} (\epsilon_{xy}^P)^2]^{1/2} \quad (1)$$

它反映了材料在各点处的塑性变形的程度, 可以用它的某一量值作为产生塑性屈服滑移的判

据。对高速碰撞而言,当靶板中某一网格的塑性应变强度达到该量值时,便认为该网格的介质可以沿着设置的 K -网格线作相对滑移运动。因此,对塑性应变强度规定的这一量值,可以作为打开约束滑移线的开关。随着靶板变形的发展,在上述 K -网格线上,达到规定的塑性应变强度量值的网格亦将增多。于是,这条约束滑移线的长度便随之延伸,直至贯穿整个靶板为止。

数值模拟时,为了节省内存单元,弹、塑性应变分量是合在一起存储的,因此,需要将塑性应变分量分离出来。

由于弹性应变分量是

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx}^E &= \left(\sigma_{xx} - \lambda \frac{\Delta V}{V} \right) / (2\mu) \\ \varepsilon_{yy}^E &= \left(\sigma_{yy} - \lambda \frac{\Delta V}{V} \right) / (2\mu) \\ \varepsilon_{\theta\theta}^E &= \left(\sigma_{\theta\theta} - \lambda \frac{\Delta V}{V} \right) / (2\mu) \\ \varepsilon_{xy}^E &= \tau_{xy} / \mu\end{aligned}$$

于是塑性应变分量可表成

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx}^p - \varepsilon_{yy}^p &= (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) - (\varepsilon_{xx}^E - \varepsilon_{yy}^E) = (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) - (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) / (2\mu) \\ &= (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) - (s_{xx} - s_{yy}) / (2\mu)\end{aligned}\quad (2)$$

同理

$$\varepsilon_{yy}^p - \varepsilon_{\theta\theta}^p = (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{\theta\theta}) - (s_{yy} - s_{xx}) / (2\mu) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta}^p - \varepsilon_{xx}^p = (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{xx}) - (s_{\theta\theta} - s_{xx}) / (2\mu) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{xy}^p = \varepsilon_{xy} - \tau_{xy} / \mu \quad (5)$$

这样,我们就导出一组计算塑性应变强度量值的公式,先由公式(2)~(5)计算出相应的塑性应变分量值,然后代入公式(1),便得到相应网格的塑性应变强度的量值。

我们在铁质弹丸撞击硬铝靶板的数值检验中,塑性应变强度的开关值分别取为0.15, 0.16, 0.18, 0.20与0.25进行数值模拟。发现在0.20附近选取塑性应变强度的开关值,较为适宜。

三、算 例 讨 论

计算实例取为圆柱形铁质弹丸,以1.2km/s的初始速度从左侧垂直而对称地撞击圆柱形铝质靶板。算例采用流体-弹塑性模型,用二维轴对称拉格朗日差分格式作数值模拟^[1],在轴对称平面 xoy 内,初始拉格朗日网格为 $0.1 \times 0.1 \text{cm}^2$ 的正方形网格。径向网格线为 J 网格线,平行于对称轴的网格线为 K 网格线。在撞击面上设置一条自由滑移线,靶内设置两条 K -约束滑移线(由于对称性,计算中只需考虑一条),其位置与长度均按所规定的塑性应变强度

的开关值由计算机自动选取。在模拟计算中, 自靶板撞击面起, 逐排网格计算其塑性应变强度的量值, 并寻找首先达到开关量值的网格, 取该网格所在的 K 网格线, 作为约束滑移线的位置, 其长度则为自撞击面起至该网格的长度。随着时间增加, 在约束滑移线上达到开关量值的网格亦逐渐向纵深发展, 约束滑移线的长度便随之增大。

为了比较塑性应变强度开关与剪切屈服强度开关的优劣, 取初始撞击速度 1.2 km/s 作对比检验。图 1 (图中含符号“+”的网格为已断裂网格, 以下各图相同) 是以剪切屈服强度作为开关值时, 分别在碰撞后 $3.5 \mu\text{s}$ 与 $4.0 \mu\text{s}$ 时, 由计算机打印输出的拉格朗日网格图。图 2、3、4 则是以塑性应变强度为开关值时, 分别在碰撞后 $5 \mu\text{s}$ 与 $7 \mu\text{s}$ 时的拉格朗日网格图。在这两组网格图中, 约束滑移线的相对位置 (图中以粗实线表示) 是相同的。但是, 在弹丸侵彻扩坑、靶板迎面翻唇等方面, 存在明显的差别。特别是图 1 中, 靶板迎面的部分 (位于约束滑移线外侧的一、二个) 网格点存在明显的飞散现象, 类似于理想流体自由飞溅的情景。在采用适当的塑性应变强度作为开关值的图 2、3、4 中, 则没有出现这种飞散情景, 这与靶板具有一定的强度是相符合的, 它表明以适当的塑性应变强度作为约束滑移运动开关的合理性。

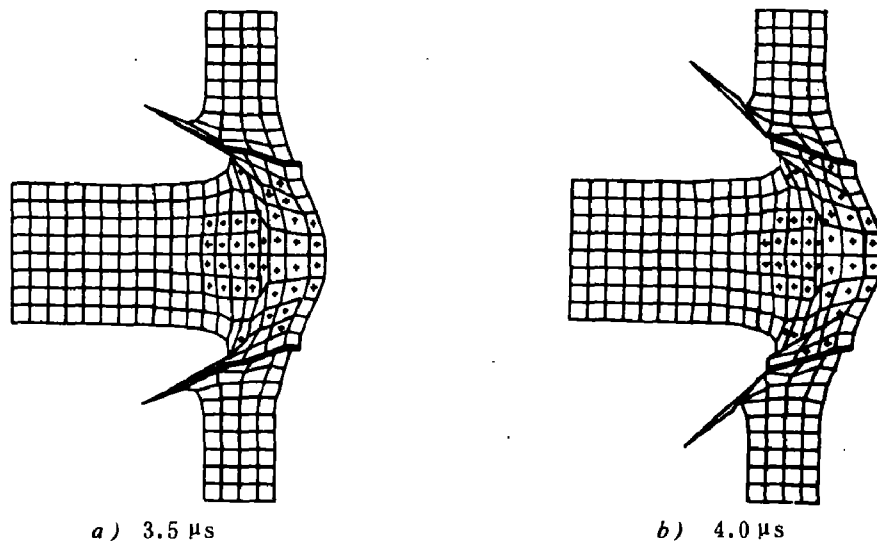


图 1 铁质弹丸以 1.2 km/s 初速撞击硬铝靶, 以剪切屈服强度作为打开约束滑移线的开关值, 分别在碰撞后 $3.5 \mu\text{s}$ 与 $4.0 \mu\text{s}$ 时的拉格朗日网格图, 图中粗体网格线为约束滑移线。

塑性应变强度开关值应由实验, 并结合数值模拟结果, 确定出一个最佳取值范围。美国斯坦福研究所高级研究员 Seaman · L^[4] 提出装甲钢板的塑性应变强度开关值为 0.25。我们在试算中, 对硬铝的塑性应变强度开关值分别取 0.15、0.16、0.18、0.20、0.25 进行试算。当开关值取为 0.25 时, 约束滑移线在碰撞后 $2 \mu\text{s}$ 打开, 当接近 $3 \mu\text{s}$ 时, 计算循环的时间步长为 $0.57 \times 10^{-12} \text{ s}$, 约为初始时间步长的十万分之一, 时间步长小到如此难以接受的程度, 是由于网格变形太大引起的。如若采用已成功的网格重分技术, 情况将能得到改善。当开关值取为 0.15, 约束滑移线在 $1.29 \mu\text{s}$ 时被打开, 从碰撞后 $7 \mu\text{s}$ 的网格图 (图 4) 中, 约束滑移线左端的主节点 (初始时刻位于撞击面上) 从靶材中突出来, 在翻唇内侧形成一个尖角。

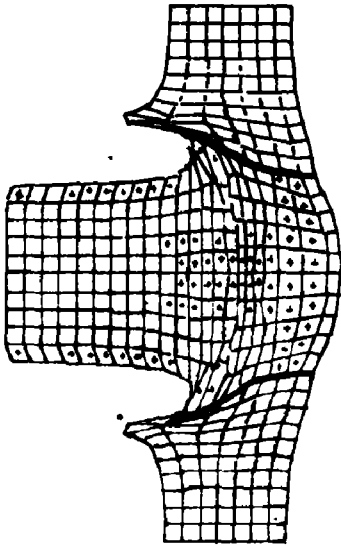


图2 铁质弹丸以1.2 km/s初速垂直对称地撞击硬铝靶板, 塑性应变强度开关值为0.20, 碰撞5 μ s后的拉格朗日坐标网格图。粗体实网格线为约束滑移线, 其长度已延伸到靶板背面的第二排网格点。

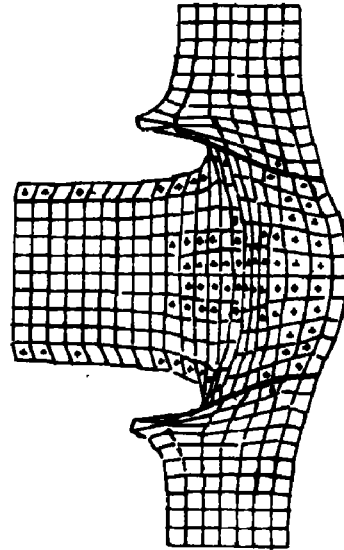


图3 塑性应变强度开关值为0.15, 约束滑移线的长度已贯穿整个靶板。其余与图2相同。

计算机输出数据表明, 此时该主节点的轴向速度分量为 -3.55074 km/s, 径向速度分量为 0.58019 km/s, 直到 10μ s时, 该主节点的速度分量仍然保持不变, 表明该点处于自由飞散状态。

当塑性应变强度开关值分别取为0.16、0.18与0.20时, 约束滑移线打开时间分别为1.36、1.51、1.63 μ s时, 没有发现迎面主节点自由飞散现象。计算循环时间步长的允许值随着开关值增大而减小, 例如, 开关值为0.20, 碰撞后8 μ s时, 时间步长为 0.247×10^{-9} s, 约为初始步长的0.35%。

根据上述数值模拟算例, 对硬铝靶材而言, 塑性应变强度开关值取为0.20左右较为适当。以上只是数值模拟的结论, 它的准确程度有待实验的进一步检验。

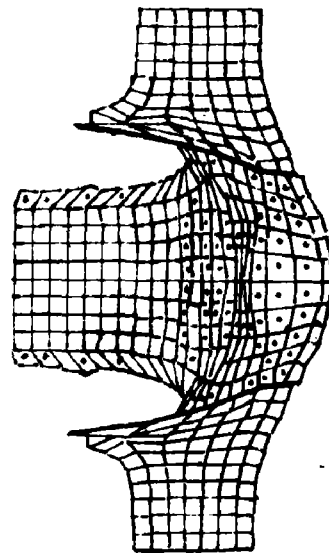


图4 由图3发展7 μ s时的网格图, 约束滑移线最左端的网格点具有很大的飞散速度, 形成明显的尖角。

参 考 文 献

- [1] 张志杰、贝新源、周连胜, 飞板碰撞的弹塑性流动的计算, 国防科技大学学报, 4 (1984), 13.
- [2] 周连胜、贝新源、张志杰, 二维流体弹塑性流动中 J_2 滑移线的数值模拟, 计算物理, 2 (2) (1985), 214.
- [3] 周连胜、贝新源、张志杰, 两条相交滑移线的数值模拟, 计算物理, 2 (4) (1985), 469.
- [4] Seaman·L, 在北京工业学院讲学稿“材料动力学”, 1983年9月.
- [5] 贝新源、张志杰、周连胜, 二维流体弹塑性程序的向量化, 爆炸与冲击, 8 (2) (1986), 131.

**AN IMPROVEMENT OF THE CRITERION OF
CONSTRAINED SLIDE LINE FOR NUMERICAL
SIMULATION OF HIGH VELOCITY IMPACT**

Zhou Liansheng Zhang Zhijie Bei Xinyuan

Abstract

In this paper the switch of constraining the motion of slide line is discussed for simulation of plug phenomena in penetration damage. A certain quantity of plastic strain strength is used as the switch. The results of numerical simulation show that the switch of plastic strain strength is preferable to the switch of shear yield, and it seems more suitable for practical phenomena.