DOI: 10.11883/bzycj-2017-0328 文章编号: 1001-1455(2018)05-0948-09

碎片云 SPH 方法数值模拟中的材料失效模型*

邸德宁[1],陈小伟[2,3]

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999;
2. 北京理工大学前沿交叉科学研究院,北京 100081;
3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 光滑粒子流体动力学方法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)被广泛应用于薄板超高速撞击碎片云的数值模拟。利用 AUTODYN 软件中的 SPH 模块,考察了无失效模型、Grady 失效模型和最大拉应力失效模型 3 种方案下碎片云模拟结果,发现无失效模型时计算结果及材料表现与实验明显不符;相比于 Grady 失效模型,最大拉应力失效模型下材料更难失效,将小幅度减弱碎片云扩散程度,碎片总数减少,粒子聚集产生更大碎片,碎片云侵彻性能提高,增大模型失效阈值亦有上述表现。相比而言,Grady 失效模型计算结果更符合实验,但 2 种失效模型间差异与撞击工况相关,材料破碎越充分差异越小。

关键词: 失效模型;SPH 方法;碎片云;碎片分布;超高速撞击

中图分类号: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

光滑粒子流体动力学法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)是一种 Lagrange 无网格粒子算法,超高速撞击中的强冲击波使材料表现出如流体一样的性质,伴随着材料大变形甚至破碎,传统网格方法难以求解,而基于流体动力学控制方程的 SPH 方法非常适用[1]。在 SPH 数值模拟前的处理中,必须设定材料模型,包括状态方程、强度模型和失效模型等。材料状态方程不可或缺,描述材料密度、压力和内能之间的关系;材料强度一般不可忽略,引入强度模型可计算材料偏应力张量和材料当前应变、应变率、温度等对屈服强度的影响。薄板超高速撞击中材料破碎形成碎片云的过程,被认为是稀疏波导致的拉应力超过材料断裂应力后材料不断层裂破坏的过程,而状态方程和强度模型均不能表征材料断裂方面的特征,因此需要考虑在计算中引入失效模型。

利用 SPH 方法对碎片云进行数值模拟,计算结果与实验吻合很好,但同时发现材料模型的选择对计算结果有影响。Groenenboom[2]发现 SESAME 状态方程在压力和径向速度方面稍小于多项式状态方程;张伟等[3]发现 Tillotson 和 Puff 状态方程相比于 Shock 状态方程,碎片云径向速度稍大,碎片云颗粒更细小且分散,而强度模型的选择对结果影响不大;Higashide 等[4]发现不包含材料相变的状态方程计算得到的碎片最大,考虑材料液化和气化的热力学完全状态方程对相态分布计算较准确,其中考虑了亚稳态相态情况的状态方程计算结果最准确;李宝宝等[5]通过比较 GRAY 三相物态方程与 Tillotson 物态方程,也发现材料相变对碎片云外形尺寸影响较大。然而,SPH 方法失效模型的选择尚无具体结论,有研究者认为 SPH 方法中不需要材料失效模型,另一些研究者则采用最大拉应力或 Grady 失效模型。另外,现有对材料模型方案的研究大多针对碎片云外形或运动状态,未能很好地讨论对碎片质量和数量分布的影响,以及影响程度与撞击工况的相关性,难以实际参考应用。

本文中,利用 AUTODYN 软件中的 SPH 模块,针对无失效模型、Grady 失效模型和最大拉应力失效模型 3 种方案,考察失效模型对碎片云外形尺寸及速度、粒子点失效表现和碎片数量分布的影响,讨论失效模型的影响程度随撞击工况的变化,并比较 Grady 失效模型下不同失效阈值导致的碎片云差异。本文旨在补充 SPH 方法中材料模型的选择,对碎片云数值模拟特别是碎片分布进行深入分析。

* **收稿日期**: 2017-08-26; **修回日期**: 2017-11-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(11225213)
第一作者: 邸德宁(1993—),男,硕士研究生; **通信作者**: 陈小伟,chenxiaoweintu@bit.edu.cn。

1　碎片云几何表现的差异

1.1　计算模型设置

本文中所用算例共 2 部分，第 1 部分参照实验情况[6]，取直径为 9.53 mm 的球形弹丸，材料为 2017-T4 铝合金，采用 Shock 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型；薄板材料为 6061-T6 铝合金，采用 Shock 状态方程和 Steinberg-Guinan 强度模型；弹丸正撞击薄板，表 1 中列出了共 3 种工况 7 个算例的薄板厚度、撞击速度及所采用的失效模型方案。

表 1 各算例的设置

Table 1 Settings of various cases

工况	算例	薄板厚度/mm	撞击速度/(km·s^{-1})	失效模型
1	01	0.467	6.62	无
1	02	0.467	6.62	Grady 模型
1	03	0.467	6.62	最大拉应力模型
2	04	0.467	4.71	Grady 模型
2	05	0.467	4.71	最大拉应力模型
3	06	0.972	6.72	Grady 模型
3	07	0.972	6.72	最大拉应力模型

最大拉应力模型即材料拉应力超过设定的失效阈值后材料失效，本文中通过主应力失效实现，设定 6061-T6 铝合金的失效阈值为 2.6 GPa[3]，2017-T4 铝合金的失效阈值为 2.5 GPa[6]，不考虑最大剪切力失效情况。

Grady 失效模型同样基于主应力判断失效，即主应力超过失效阈值 p_s 后材料失效，不同的是失效阈值 p_s 非固定值，而由下式计算得到：

$$p_s=\sqrt{2\rho c_0^2 Y\varepsilon_c}$$

式中：ρ 为材料密度，由材料连续性方程或核函数更新；Y 为屈服强度，由材料强度模型根据材料当前应变、应变率和温度计算更新，变化幅度较大，对 p_s 计算值影响严重；c_0 为材料体积声速，由材料体积模量和当前密度决定；ε_c 为临界失效应变[7]，材料常数，铝合金材料一般取 $\varepsilon_c=0.15$。可见，在不同区域、不同时刻，p_s 的取值均可能不同。

1.2　不同失效模型方案下碎片云几何表现的比较

为分析失效准则对碎片云计算结果的影响，设计了算例 01～03 作对比，算例 01 不引入失效模型，算例 02 采用 Grady 模型，算例 03 采用最大拉应力模型。另外，文中碎片云图像及分布统计均基于撞击后 20 μs 时的计算结果。

如图 1 对照所示，有、无失效模型对碎片云外形影响严重，特别是对弹丸碎片云部分；而 Grady 失效模型和最大拉应力失效模型的选择并无明显差别。测量碎片云整体尺寸，发现：算例 01 径向尺寸为算例 02 的 81%，轴向尺寸为算例 02 的 96%；算例 03 和算例 02 碎片云整体尺寸相差很小。

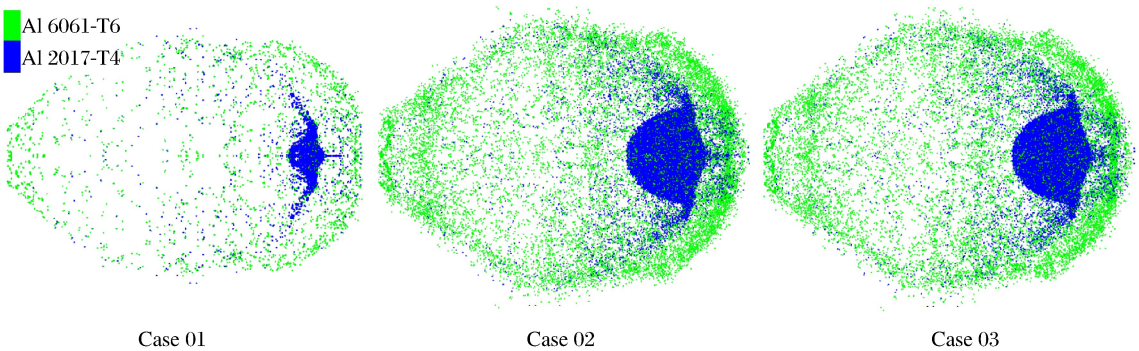


图 1 算例 01～03 数值模拟结果

Fig. 1 Simulation results of cases 01－03

针对弹丸碎片云部分，图 2 为算例 01～07 弹丸碎片主体碎片识别结果放大图，其中碎片识别为只显示包含有未失效粒子的碎片。对比各图可见，算例 01 中粒子聚集紧密形成一个大碎片，包含了弹丸

中 94.8%的粒子点;算例 02 和算例 03 结果相近,碎片孤立并高度分散,但算例 02 中碎片更多,且最前端平整,更接近实验图像。算例 01 中碎片云尺寸明显偏小。分析算例 02～07 碎片云特征速度[6]发现,最大拉应力模型下碎片扩散程度不及 Grady 模型,即前端和径向速度偏小但后端速度偏大,不过两者相差不大,都和实验很接近。

综上,不引入失效准则的计算结果明显与实验不符,有失效模型的计算结果均与实验符合,但最大拉应力模型下碎片云的扩散程度稍弱于 Grady 模型下。

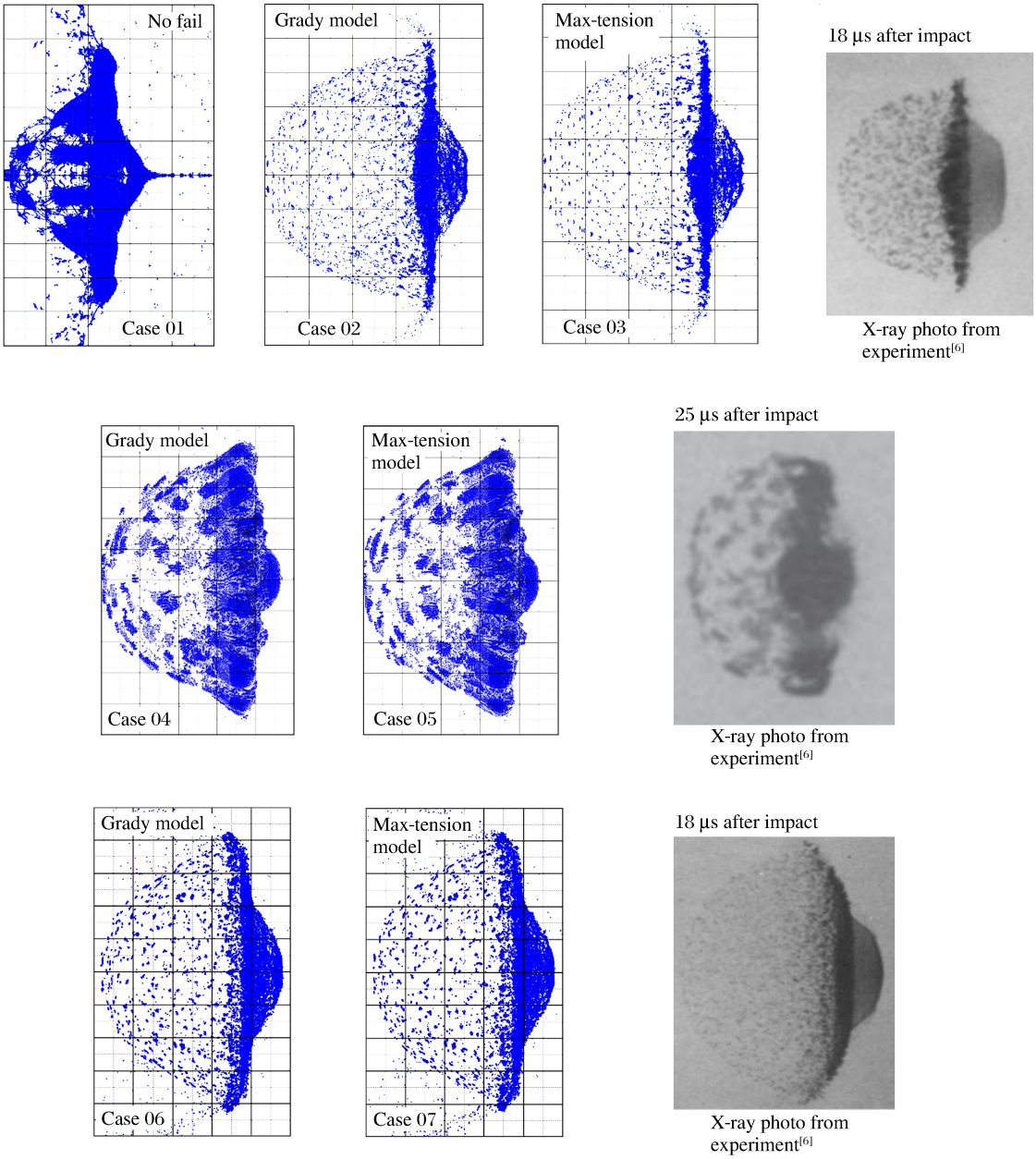


图 2 算例 01～07 弹丸碎片云碎片识别结果与实验对照[6]

Fig. 2 Main parts of projectile fragments of cases 01－07 compared with experiments[6]

2 材料失效细观表现的差异

失效模型方案不同导致碎片云计算结果有差异,为分析其内在机理,在计算模型中设置测量点,提取粒子点压力-时间历程作对比分析。

2.1　有、无失效模型计算结果的差异

首先对比有、无失效模型的情况，在算例 01 和算例 02 中设置测量点 A 和 B，图 3 绘制了测量点压力-时间历程。在冲击波作用段内同一测量点曲线完全重合，表明材料被冲击过程与失效模型无关。稀疏波到达一段时间后开始出现小的分歧，进入负压后曲线出现明显分歧。观察右上的放大图可见，算例 01 中测量点负压均超过6 GPa，并在达到峰值后圆滑回落；算例 02 中 A 点负压在到达 2.86 GPa 后突然跳到 0 GPa 并保持，B 点负压在到达峰值 2.12 GPa后圆滑回落，并在后期继续变化。上述差异正是由失效模型导致的，不引入失效模型时粒子点在强拉力下不会失效，从而完整地传递稀疏波，但这和工程材料拉伸断裂的实际表现明显不符；引入失效模型后，拉伸主应力超过失效阈值即会判为失效，粒子不再能承受拉应力或剪切力，如算例 02 中 A 点表现所示，负压跳变为 0 GPa。

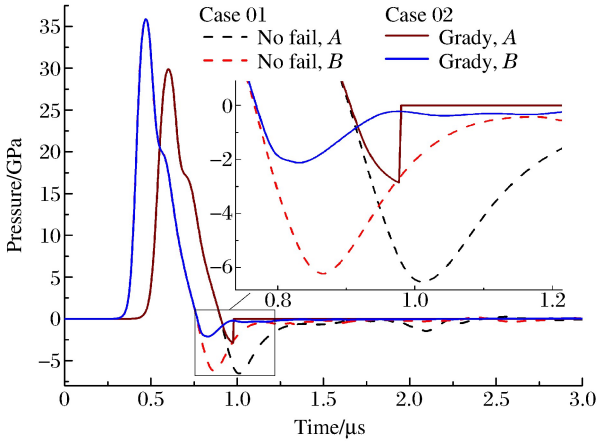


图 3　测量点 A、B 压力时间历程

Fig. 3　Pressure-time curves of gauge points A and B

考虑失效模型对碎片云宏观表现的影响，当粒子点失效后不再承受拉应力，效果即为断裂点，会阻碍稀疏波的传播，从而导致断裂点两侧粒子运动状态差异较大，碎片高度分散。大量失效粒子会构成断裂面，一个孤立碎片的表面即为失效粒子组成的断裂面，碎片内部粒子表现如同算例 02 中 B 点，应力波在碎片内部振荡导致其压力值不为零。反之，不引入失效模型，则不会出现断裂点，通过 SPH 算法核函数近似，近邻粒子之间无障碍地相互影响，导致粒子点速度矢量比较接近从而集中分布，出现图 2 中算例 01 所示聚集现象。但核函数近似的影响域有限大，若 2 个粒子速度差异较大而距离较远，则难以相互影响，也会产生相对孤立的碎片，形式上表现为碎片云。

综上，不引入失效模型也能得到相对孤立的碎片，但只是形式上表现为碎片云，材料表现与实际不符；引入失效模型后粒子点失效表现才符合物理实际，得到的碎片分布符合实验结果。

2.2　最大拉应力及 Grady 失效模型结果比较

进一步考虑，最大拉应力模型中材料失效阈值恒定，但 Grady 模型中随着材料当前状态的改变，阈值 p_s 的计算值也会变化。图 4 示例了 2 种失效模型下某粒子点处失效阈值变化及主应力失效规则的触发，可见 Grady 模型下失效阈值在冲击波到达后开始剧烈变化，事实上主要随屈服强度变化，密度和体积声速随时间变化不大，而粒子点在最大主应力超过失效阈值后立即被判为失效，应力值归零。

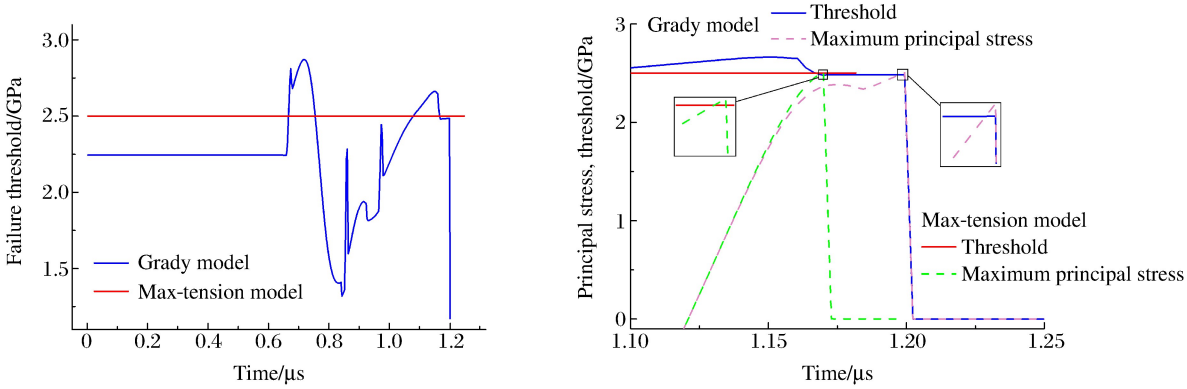


图 4　材料失效阈值变化及对应失效规则触发的示例

Fig. 4　An instance of material failure regulation and its failure threshold-time curve

在算例 02 和算例 03 中取不同位置处 C、D、E 等 3 个测量点，如图 5 所示为 3 个点处压力时间历程，比较 2 种失效模型下粒子点失效表现的差异。C 点粒子在 Grady 和最大拉应力模型下同时失效，但最大拉应力模型下负压更大；D 点粒子在最大拉应力模型下负压也更大，而且比 Grady 模型下更晚失效；E 点粒子在 Grady 模型下失效，但在最大拉应力模型下未失效。

由图 3 可见算例 02 中 B 点未失效，但其负压峰值远低于无失效模型的算例 01 下，可见其他粒子的失效导致的压力变化会影响 B 点压力，失效准则的引入降低了粒子点负压；无失效模型情况可视为粒子最难失效情况（不失效），结合图 5 中最大拉应力模型下粒子点负压大于 Grady 模型下，由此推断：材料更难失效的失效模型下粒子负压更大。从粒子失效时间可得到相近结论，更难失效的模型下粒子更晚失效甚至不会失效。

综上，从粒子点压力表现来看，在本文所采用失效参数下，最大拉应力模型下材料更难失效。

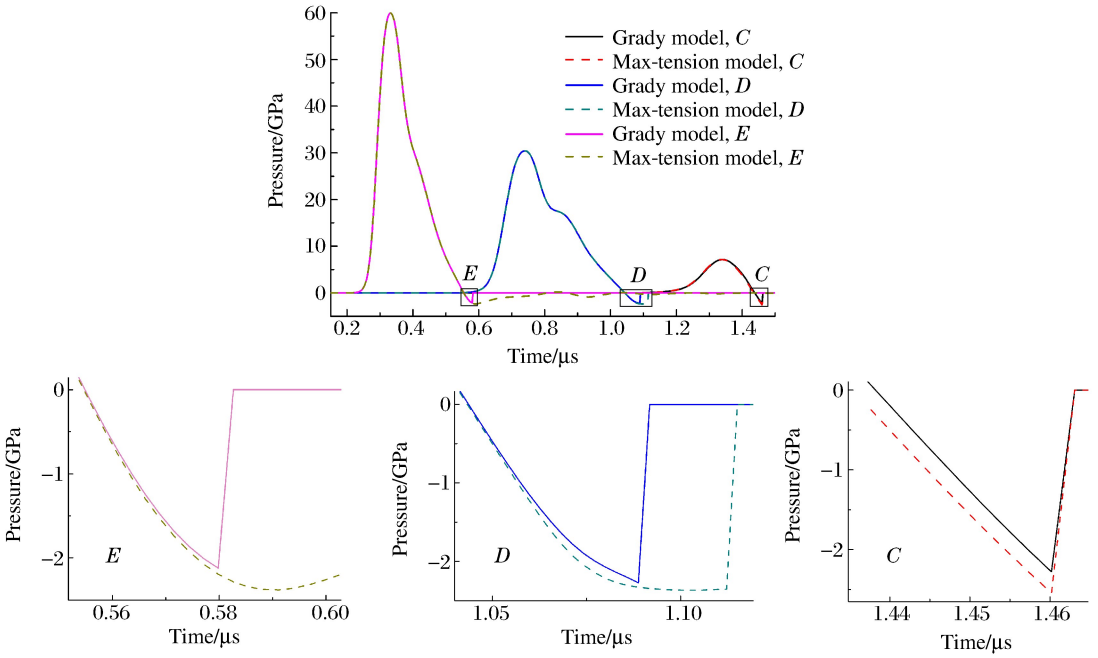


图 5 测量点 C、D、E 压力时间历程

Fig. 5 Pressure-time curves of gauge points C, D and E

3 碎片数量分布差异

3.1 碎片数量分布的整体比较

粒子失效后成为断裂点，孤立碎片的边界必然全是已失效粒子，AUTODYN 软件基于此进行碎片识别，获得 SPH 粒子和碎片的对应关系及碎片特征。本文中利用 AUTODYN 碎片识别功能，统计数值模拟结果中正向运动的弹丸碎片数量、质量。由于不引入失效模型的方案明显与实验不符，此处只对算例 02～07 进行比较，分析最大拉应力模型和 Grady 模型下结果的差异。

统计模拟结果中所有碎片，发现 3 个工况中 Grady 模型下碎片总数分别比最大拉应力模型下多 1.78%、4.48%、0.42%，碎片越多意味着失效粒子越多，这说明 Grady 模型下材料更易失效。因此，从碎片总数来看，在本文所采用失效参数下，最大拉应力模型下材料更难失效。

统计质量大于 0.01 mg 的弹丸碎片，得图 6 所示对数坐标下碎片无量纲质量 m/M 与累计数量 N_c 的关系，其中 N_c 为质量不小于 m 的碎片累计数量，M 为 0.01 mg 以上碎片总质量，3 种工况下依次取 683、936、340 mg。需要注意，对数坐标下坐标分布非线性，小质量碎片段差异被压缩。不同模型下曲线变化速度有差异，导致不同质量处碎片累计数量相对大小不一，$\lg(m/M)=-2.9$ 标记线起不同模型下曲线基本一致，直到 $\lg N_c=1.1$ 所标记的大碎片段位置。

从曲线整体来看，2 种模型下曲线变化趋势一致，各工况中 Grady 模型下曲线均接近直线，而最大拉应力模型下曲线波动大，偏离直线。不同工况下材料强度及冲击波强度等不同，Grady 模型能够很好地与撞击工况自适应，对应的调整失效阈值而在对数坐标下呈现出更好地线性分布，表现更佳。

3.2　大质量碎片分布差异比较

图 6 中 2 种模型下曲线 $\lg N_c=1.1$ 的大碎片段差异明显，3 种工况中均呈现 Grady 模型下碎片质量先更大后更小的规律。分析碎片位置发现 Grady 模型下将最大的若干个大碎片的部分材料分给了稍小的大碎片，使大碎片段质量分布更平缓。最大拉应力模型下粒子更聚集，导致最大的个别碎片偏大，其他大碎片偏小。另外，各工况中均为 Grady 模型下碎片总数更多，但在分界线处碎片数量基本一致，说明最大拉应力模型下是小碎片数量偏少。这同样是最大拉应力模型下材料难失效导致，小碎片附着在大碎片上未剥离，小碎片数量大幅减小，同时增加大碎片质量。

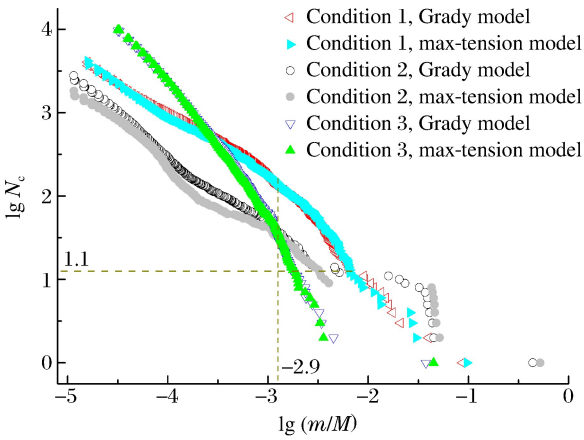


图 6　0.01 mg 以上碎片累计数量分布

Fig. 6　Distribution of cumulative number of debris above 0.01 mg

表 2　最大碎片球等效直径计算值与实验值对比（单位：mm）

Table 2　Comparison of simulation and experiment results of equivalent diameters of the largest fragments (unit in mm)

工况	Grady 模型	最大拉应力模型	实验值
1	2.82	2.51	2.95
2	6.23	5.92	6.36
3	1.30	1.28	1.45

最大碎片的侵彻性能可代表碎片云的侵彻极限，比较发现：各工况中 Grady 模型下最大碎片的质量分别比最大拉应力模型下小 9.84%、18.5%、19.2%，而轴向速度基本一致。综上可推断：Grady 模型下得到的碎片云侵彻极限更小，对后续靶板的损伤更均匀；最大拉应力模型下后续靶板损伤更严重。

测量计算结果中最大碎片在各坐标方向尺寸并计算其球等效直径，如表 2 所示为最大碎片球等效直径计算值与实验值的对比。虽然最大拉应力模型下最大碎片的质量较大，但由于其粒子聚集度高，碎片等效直径却稍小。不难看到，所有工况中 Grady 模型下最大碎片等效直径计算值更接近实验值，Grady 模型计算结果更符合实验。

4　失效模型影响随撞击工况变化

根据各工况板厚及撞击速度可知，工况 1 下材料初步破碎，工况 3 下材料充分破碎，工况 2 介于前两者之间。观察图 6 中各工况下两曲线间的差异，材料破碎越充分，曲线间差异越小，失效模型方案对计算结果影响越弱，从碎片总数也能得到此结论。

从材料失效考虑，当材料破碎不充分时，稀疏波强度与失效阈值相当，因此失效阈值上细微的差别就能导致很大的碎片分布差异；材料破碎充分时，稀疏波强度远大于失效阈值，失效模型影响便较弱。另外，Grady 模型中失效阈值主要随材料屈服强度改变，撞击较弱时应变、应变率等较小，导致失效阈值计算值偏小。Grady 模型下材料本就更易失效，更加偏小的失效阈值就会和最大拉应力模型下恒定的阈值差距更大，加剧两种模型下碎片分布差异。

撞击速度对稀疏波强度影响显著，工况 2 撞击速度远低于工况 1，而工况 3 的稍大于工况 1。因此，工况 2 相比于工况 1 和 3，不同失效模型下碎片数量曲线之间差异明显，且最大碎片显著减小。板厚主要改变强稀疏波作用时长和作用区域大小，严重影响小碎片数量，但弹丸材料总量不变，导致工况 3 下碎片总数显著增大，曲线斜率明显变化，但对曲线间差异影响不明显。

从细观上分析失效模型方案对粒子点失效的影响，在弹丸和薄板模型中轴线遍布测量点，图 7 为只在一种失效模型下失效而在另一种模型下不失效的测量点的轴向坐标 Z，0 点到弹丸尾端和薄板背面等距。图 7 中不同模型下失效表现相反的最远粒子的坐标，表征了失效模型对材料失效表现产生明显影响的起始位置。工况 2 中表现相反的最远粒子坐标最大，工况 3 中则坐标最小，正是上述的稀疏波强度和失效阈值的比较。工况 2 下初始稀疏波强度即和失效阈值相当，边缘位置处失效模型的影响已展现出；工况 3 下需要稀疏波不断衰弱直至中心附近才能表现出失效模型的影响；工况 1 下最远粒子坐标与工况 3 接近而与工况 2 差距较大，主要是由撞击速度的差异导致的。

值得关注的是，图 6 中大碎片段碎片质量出现明显分歧，但开始分歧位置均在 $\lg N_c=1.1$ 标记线附近，说明撞击工况对大碎片段差异大小影响弱。大碎片多靠近弹丸中心，材料不断层裂破碎同时降低稀疏波强度，导致大碎片位置时稀疏波强度均较低，因此撞击工况对大碎片段差异影响不显著。

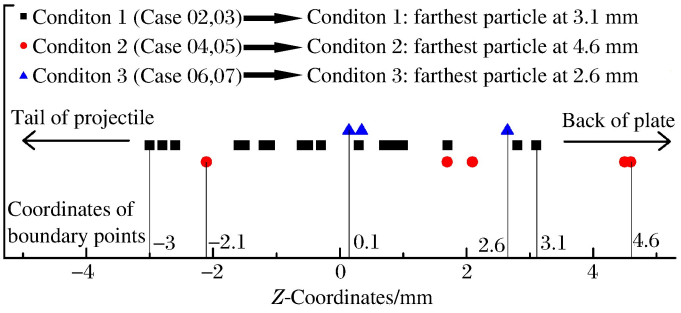


图 7 模型中轴线上不同失效模型下失效表现不同的粒子点

Fig. 7 Particles with different failure performance under Grady and max-tension models

5 失效阈值对碎片云的影响

Grady 模型中临界应变常数 ε_c 直接影响失效阈值计算值，其对所有材料被建议取值 0.15[7]，对于铝合金材料已被验证该取值较为适用。考虑到铜材料实验失效应力为 1.0～2.5 GPa，而 $\varepsilon_c=0.15$ 时 Grady 模型计算值仅为 1.0 GPa[7]，因此本文以 OFHC 为例，尝试 $\varepsilon_c=0.15$，0.30，0.45 和 0.60，考察失效阈值对碎片云的影响，同时确认铜材料合适的 ε_c 取值。

第 2 部分算例参照实验[8]取直径 7.72 mm、厚 2.36 mm 的 OFHC 圆盘正撞击 1 mm 厚的 6061-T6 铝薄板，弹速为 6.39 km/s，圆盘轴线与速度方向呈 4.6°夹角，采用 Shock 状态方程和 Steinberg-Guinan 强度模型。

图 8 为圆盘中心粒子失效时刻压力的变化曲线，随着 ε_c 增大，粒子负压增大且更晚失效。临界应变常数 ε_c 越大，失效阈值越大，材料越难失效。比较碎片云特征速度发现：随着 ε_c 增大，碎片云最前端速度减小 1.3%，最外侧径向速度减小3.5%，失效阈值的增大导致碎片云扩散程度下降。但由于边缘位置稀疏波强度很高，失效阈值对碎

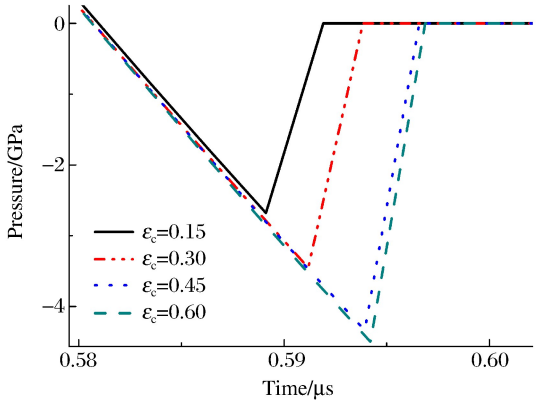


图 8 圆盘中心粒子失效时刻压力的变化

Fig. 8 Pressure-time curves of the center particles of the disc projectile

表 3 不同临界应变常数下碎片统计信息

Table 3 Detail information related to debris statistics under different critical strains

ε_c	碎片总数	最大碎片/mg
0.15	177 832	14.43
0.30	161 616	22.23
0.45	152 956	31.21
0.60	145 480	34.14

片云速度影响非常小。事实上，各 ε_c 取值下模拟的碎片云扩散程度均不及实验，因此 $\varepsilon_c=0.15$ 时速度结果最接近实验，但不同取值时碎片云特征速度变化不超过 3%，合适的 ε_c 取值需要根据具体算例中其他材料参数和人工黏性等确定。

临界应变常数 ε_c 不同直接导致材料破碎结果差异，图 9 为各 ε_c 取值下碎片识别结果，明显 ε_c 增大后碎片数量增多，大碎片变大。然而从表 3 可见 ε_c 增大碎片总数减少，图 10 中 0.01 mg 以上碎片累计数量随 ε_c 增大增多，可见失效阈值变大导致 0.01 mg 以下微小碎片聚集为小碎片。图 10 中不同失效阈值下曲线趋势一致，但由于微小碎片的聚集，曲线斜率随阈值增大而增大。表 3 中最大碎片质量也随失效阈值增大而显著增大，但由于 Grady 模型下失效阈值与 $\sqrt{\varepsilon_c}$ 相关，随着 ε_c 线性增大，碎片质量的增加幅度越来越小。

综上，增大 Grady 模型下临界应变常数 ε_c 直接导致材料更难失效，宏观表现为碎片云扩散程度小幅减弱，碎片总数减少但 0.01 mg 以上碎片增加，最大碎片质量明显增大，和前文中采用最大拉应力模型导致的材料更难失效表现基本一致。

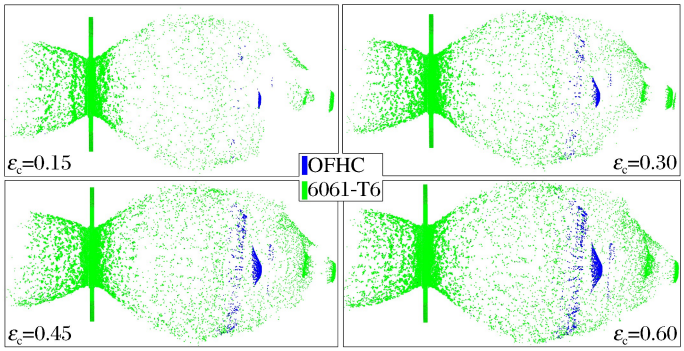


图 9　碎片云碎片识别结果侧视图

Fig. 9　Side view of debris recognition result of debris clouds

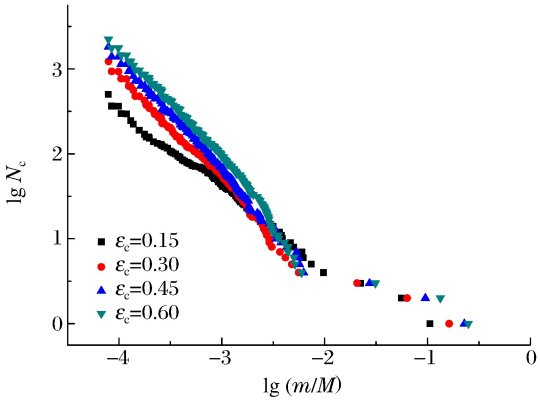


图 10　0.01 mg 以上碎片累计数量分布

Fig. 10　Distribution of cumulative number of debris above 0.01 mg

6　结　论

比较发现，不引入失效模型时，材料在强负压下不断裂的表现不符合物理实际，弹丸碎片中粒子高度聚集，与实验结果严重不符。因此，碎片云数值模拟中必须引入材料失效模型。有失效模型时，从碎片识别图像、碎片分布曲线及最大碎片尺寸来看，Grady 模型计算结果更符合实验。不过失效模型对碎片云的影响程度与撞击工况相关，材料破碎越充分，不同失效模型下碎片分布曲线之间差异越小。

在本文所用失效参数下，最大拉应力模型下材料更难失效，导致碎片云扩散程度小幅减弱，小碎片聚集为大碎片，大碎片质量变大，碎片云侵彻极限提高。增大失效阈值同样导致材料更难失效，亦有上述表现。

参考文献：

[1]　LIU G R, LIU M B. 光滑粒子流体动力学：一种无网格粒子法[M]. 韩旭，杨刚，强洪夫，译. 长沙：湖南大学出版社，2005：12-32.

[2]　GROENENBOOM P H L. Numerical simulation of 2D and 3D hypervelocity impact using the SPH option in PAM-SHOCK™[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20(1/2/3/4/5): 309-323. DOI: 10.1016/S0734-

743X(97)87503-3.

[3] 张伟,庞宝君,贾斌,等.弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟[J].高压物理学报,2004,18(1):47-52. DOI:10.3969/j.issn.1000-5773.2004.01.009.
ZHANG Wei, PANG Baojun, JIA Bin, et al. Numerical simulation of debris cloud produced by hypervelocity impact of projectile on bumper[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(1):47-52. DOI:10.3969/j.issn.1000-5773.2004.01.009.

[4] HIGASHIDE M E, KHISHCHENKO K V, LEVASHOV P R. Hypervelocity impact modeling with different equations of state[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,33(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12):625-633. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2006.09.078.

[5] 李宝宝,汤文辉,冉宪文.两种物态方程在超高速碰撞数值模拟中的比较[J].航天器环境工程,2010,27(5):576-580. DOI:10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.006.
LI Baobao, TANG Wenhui, RAN Xianwen. Comparison of two kinds of equation of state in numerical simulation of hypervelocity impact[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010,27(5):576-580. DOI:10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.006.

[6] PIEKUTOWSKI A J. Formation and description of debris cloud produced by hypervelocity impact: NASA CR-4707[R]. USA: NASA, 1996.

[7] GRADY D E. The spall strength of condensed matter[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1988,36(3):353-384. DOI:10.1016/0022-5096(88)90015-4.

[8] PIEKUTOWSKI A J. A simple dynamic model for the formation of debris clouds[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990,10(1/2/3/4):453-471. DOI:10.1016/0734-743X(90)90079-B.

Material failure models in SPH simulation of debris cloud

DI Dening[1], CHEN Xiaowei[2,3]

(1. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *Advanced Research Institute for Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
3. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The smoothed particle hydrodynamics (SPH) method is widely used in debris cloud simulation under hypervelocity impact. The SPH solver in AUTODYN was employed to investigate the effects of the no-failure model, the Grady failure model and the maximum tension failure model on the simulation results of debris cloud. When using the no-failure model, the simulation result and material response were not consistent with the experiment. Compared with the Grady model, the material under the maximum tension model was more difficult to fail, which would slightly weaken the expansion of debris cloud, produce less but heavier debris because of particles gathering, and thus improve the penetration performance of debris cloud. Similarly, by increasing the failure stress threshold, the above result was also obtained. Considering the material response and debris distribution, the simulation result by the Grady model was closer to the experiment. However, the difference between the Grady model and the maximum tension model was related to the impact condition, and more complete fragmentation of the material would lead to a smaller difference.

Keywords: failure model; SPH method; debris cloud; debris distribution; hypervelocity impact

(责任编辑 张凌云)