РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ РАКЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК
СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР

ЦЕНТР ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
РАКЕТНО-АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО БАЛЛИСТИКЕ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ МЕХАНИКИ

Сборник научных статей
Выпуск 3

Под общей редакцией академика РАРАН,
доктора технических наук, профессора
И.Б. Богоряда

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

1999

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Герасимов А.В., Пашков С.В.

ЦИОРАН Томского университета

Численный метод, используемый для расчета фрагментации твердых тел, должен учитывать распределение начальных неоднородностей по объему тела, а также описывать накопление поврежденностей в процессе деформирования, возникновение, рост и слияние трещин. При этом возникает ряд трудных вопросов относительно выбора вида расчетных ячеек, механизма раздвоения сеток (при образовании трещин), используемых моделей роста повреждений и образования трещин.

Одним из самых важных моментов при этом является выбор критерия разрушения (КР). КР по напряжениям позволяет решить ряд проблем, связанных с моделированием данного процесса: образование свободных поверхностей приводит к тому, что напряжения на них обнуляются и происходит концентрация напряжений в вершине трещины, что позволяет более корректно прогнозировать ее рост. В обычном виде ($\sigma_{max} \geq \sigma^{в}$, где $\sigma^{в}$ - динамический предел прочности на растяжение) КР по напряжениям описывает хрупкий материал, и обязательным условием описания разрушения пластичного материала является введение упрочнения. В импульсных задачах (при высокоскоростных соударениях и взрывном нагружении) возникают ударные волны, которые при выходе на свободную поверхность образуют область отрицательных давлений. Даже для слабых ударных волн среднее напряжение при этом кратковременно на 1-2 порядка превышает динамический предел прочности, поэтому при высокоинтенсивных нагрузках следует использовать КР в виде $f(\sigma_{ij},p) \geq \sigma^{в}$, то есть некоторым образом учитывать среднее напряжение.

Не менее важным с точки зрения исследования процесса высокоскоростного разрушения и для правильного определения ориентации трещины является вопрос о том, какая трещина реализовалась - отрывная или сдвиговая, и если сдвиговая, то как определить ее ориентацию (ведь максимальные касательные напряжения равны на взаимно перпендикулярных площадках). К сожалению, даже в тех немногих работах, где эта проблема упоминается, авторы лишь отмечают ее сложность и оставляют на уровне постановки задачи.

При выполнении в ячейке условия разрушения считается, что в данной ячейке образовалась микротрещина. При грубых расчетах микротрещины можно считать независимыми и просто обнулять напряжения в разрушенных ячейках. Однако при более тщательном подходе и для расчета скольжения в сдвиговых трещинах требуется вводить поверхность разрушения (макротрещину), т.е. перестраивать сетку. В настоящее время в задачах, когда характер разрушения недетерминирован, в основном используют два подхода для численного расчета фрагментации. Первый подход [1] состоит в том, что узел сетки раздваивается при выполнении в его окрестности некоторого КР. Второй подход [2-3] (для случая четырехугольных ячеек) заключается в том, что при выполнении в ячейке выбранного КР происходит локальная перестройка сетки. В этом случае параметры, характеризующие состояние среды, пересчитываются к новой ячейке как сумма по входящим в нее старым ячейкам, пропорционально их массовой доле.

Метод раздвоения узлов более прост, однако имеет ряд серьезных ограничений. Если среда обладает большой пластичностью, то перед разрывом в предельно растянутом материале ячейки вытянуты перпендикулярно росту трещины и при ветвлении по узлам невозможно обеспечить более-менее гладкую поверхность трещины и соответствие ориентации плоскости трещины максимальным напряжениям. Это приводит к тому, что становится невозможной полная и своевременная разгрузка на вновь образовавшихся поверхностях, что очень важно при высоких скоростях деформации. Если релаксация не происходит, то концентрации напряжений в вершине трещины практически не наблюдается и трещина распространяется не прямолинейно, что приводит к значительному ветвлению и более сильному дроблению. Расчет сдвиговых трещин при непрямолинейности трещины также затруднителен из-за невозможности скольжения берегов трещины друг по другу.

Метод локальной перестройки сетки свободен от недостатков метода раздвоения узлов и единственными недостатками при работе с ним являются относительная сложность и то, что при перестроении сетки накапливается вычислительная погрешность, но при аккуратном подходе это практически не влияет на баланс энергии и точность получаемых результатов. Численные расчеты показывают, что при значительных деформациях расчетной сетки перестроение сетки в вершине трещины при ее росте необходимо производить на глубину порядка 2 ячеек. Если область перестроения брать меньше, то сетка может получиться сильно неравномерной, с вытянутыми ячейками и тупыми углами и степень неоднородности будет увеличиваться при каждом акте перестроения.

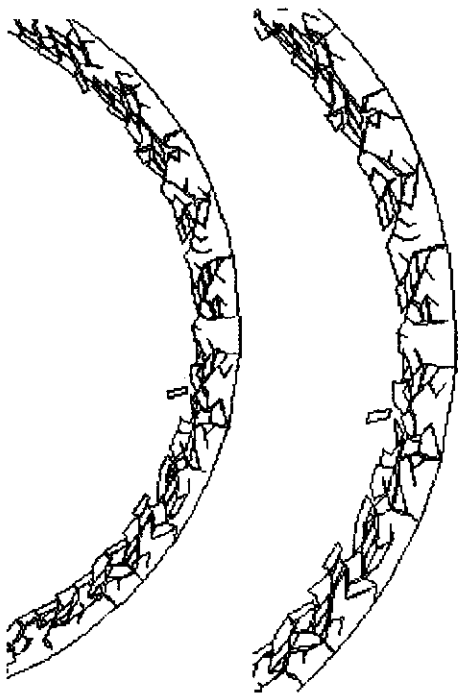

Рис. 1

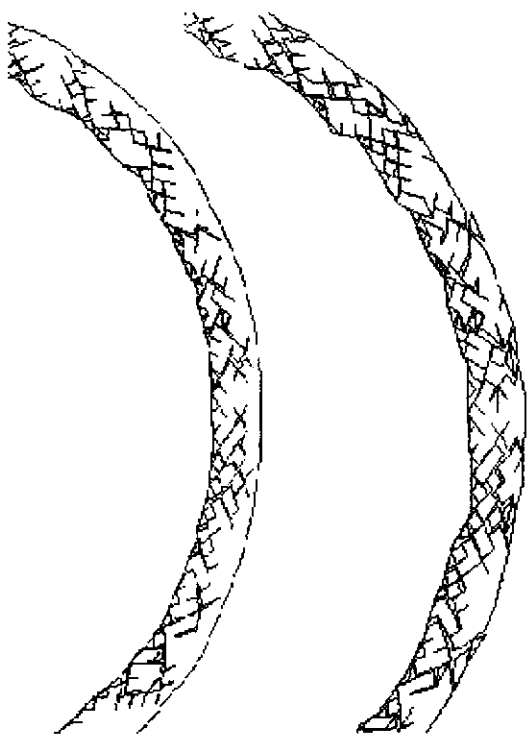

Рис. 2

В плоской двумерной постановке был проведен анализ фрагментации толстостенной цилиндрической оболочки под действием продуктов детонации ВВ. С использованием метода конечных элементов на треугольной сетке был сделан ряд расчетов для пары медь (оболочка) - гексоген (ВВ). В данной работе начальные неоднородности моделировались тем, что предел текучести изменялся по ячейкам оболочки по нормальному закону распределения со средним арифметическим, равным табличному значению, и варьируемой дисперсией с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения.

На рис.1 приведены результаты расчета процесса фрагментации для двух моментов времени, полученные при использовании метода локальной перестройки разностной сетки, на рис.2 - при использовании метода раздвоения узлов. На представленных на рис.1 фрагментах оболочки видно, что характер разрушения совпадает с данными, полученными экспериментально (многочисленные трещины сдвига на внутренней поверхности и ограниченное число магистральных радиальных трещин на внешней стороне). На основании проведенных численных расчетов можно сделать вывод о том, что при скоростях деформации $\cong 10^3$ c^{-1} и выше метод раздвоения узлов становится слишком грубым по сравнению с методом локальной перестройки сетки и не отражает реального характера фрагментации.

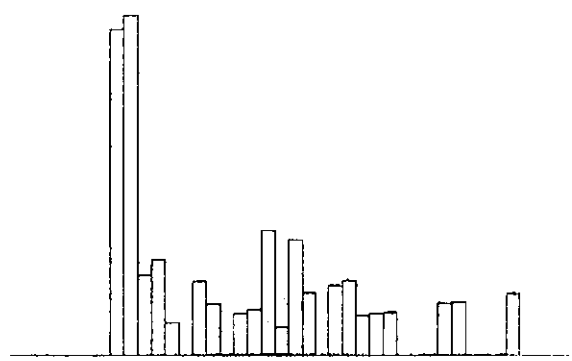

Рис. 3

Осколочный спектр, полученный при использовании метода локальной перестройки сетки и представленный на рис.3, качественно подтверждает экспериментальные данные о бимодальности распределения осколков по массе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Flis W.J. Advanced algorithms for computer simulation of hypervelocity impact // Int.J.Impact Engng. 1987. Vol.5. P. 269-275.
2. Гулидов А.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Алгоритм перестройки разностной сетки при численном решении задач соударения с образованием трещин // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Материалы 7-й Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1982. С.182-193.
3. Гулидов А.И., Шабалин И.И. Численное моделирование криволинейной трещины откола при соударении пластин// Численные методы теории упругости и пластичности: Материалы 9-й Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1986. С.117-121.