

УДК 623.562+623.451

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЕВОЙ АСИММЕТРИИ ЗАРЯДА НА СПОСОБНОСТЬ СТЕРЖНЕПОДОБНОЙ СТРУИ К УДАРНОМУ ИНИЦИИРОВАНИЮ

Я.-Д. Ли, Ю.-С. Дун, Ш.-Ш. Фэн

Государственная лаборатория взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института, Пекин 100081, Китай, liyandong@bit.edu.cn

Методами численного моделирования исследовано влияние осевой асимметрии заряда на характеристики стержнеподобной струи с целью улучшения ее способности к ударному инициированию. Согласно критерию Хэлда способность струи к ударному инициированию зависит от скорости и диаметра ее головной части. На детонационную волну от заряда, на прикладываемую к облицовке силу и, таким образом, на скорость и форму струи оказывает влияние положение точки инициирования детонации вдоль продольной оси, которое ограничено радиусом заряда (вдоль этой же оси). На основе данных закономерностей проведена оптимизация несимметричного относительно оси заряда. По сравнению с осесимметричными струями несимметричные относительно оси стержнеподобные струи обладают более высокой способностью к ударному инициированию.

Ключевые слова: осевая асимметрия, кумулятивный заряд, стержнеподобная струя, ударное инициирование, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к стержнеподобным струям и несимметричным относительно оси зарядам возник в связи с повышением требований к разрушающей способности кумулятивного заряда. Скорость стержнеподобной струи является промежуточной между скоростями ударного ядра и струи. Струя такого типа представляет собой плавный переход от струи к песту: различие скоростей ее головной и хвостовой частей меньше, чем у струи. Стержнеподобная струя более мощная, чем ударное ядро, и расстояние от заряда до поверхности брони у нее больше, чем у струи. Кинетическая энергия и область поражения несимметричного относительно оси заряда могут превышать аналогичные параметры ударного ядра и струи, что позволяет реализовать различные тактические задачи, такие как разрушение брони, бетона и двутавровой балки [1–5].

Ранее были исследованы некоторые кумулятивные заряды несимметричной формы [6–8], но несимметричные относительно оси заряды не изучались. Насколько известно авторам, в настоящее время нет работ по использо-

ванию несимметричных относительно оси кумулятивных зарядов для ударного инициирования. В данной статье рассмотрен механизм формирования несимметричной относительно оси стержнеподобной струи. Предложена схема несимметричного кумулятивного заряда, формирующего стержнеподобную струю с высокой способностью к ударному инициированию.

ПРЕИМУЩЕСТВА СТЕРЖНЕПОДОБНЫХ СТРУЙ ДЛЯ УДАРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

При исследовании ударного инициирования предложено несколько критериев этого процесса. Хэлд [9] на основе анализа результатов собственных экспериментов по инициированию взрывчатого вещества (ВВ) струей получил следующий критерий:

$$v_j^2 d = \text{const},$$

где v_j и d — скорость и диаметр головной части струи. Это выражение мы взяли в качестве критерия ударного инициирования стержнеподобных струй.

Рассматриваемые в данной работе несимметричные относительно оси кумулятивные заряды имеют одинаковые конструкции и материал облицовки. Таким образом, единственным

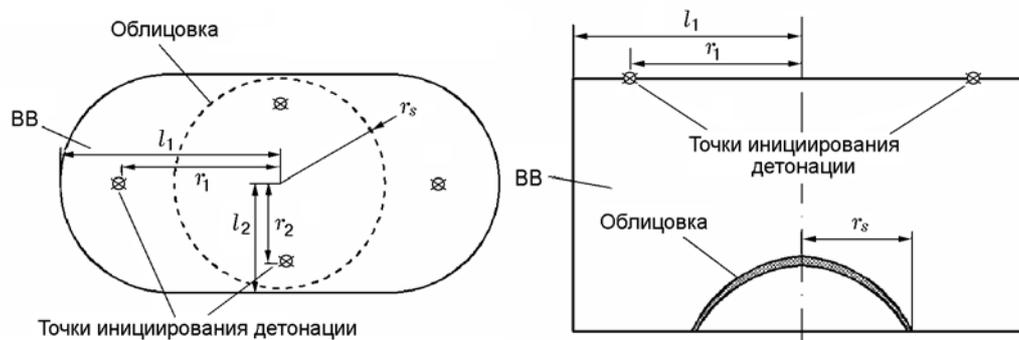


Рис. 1. Основные элементы конструкции заряда, несимметричного относительно оси

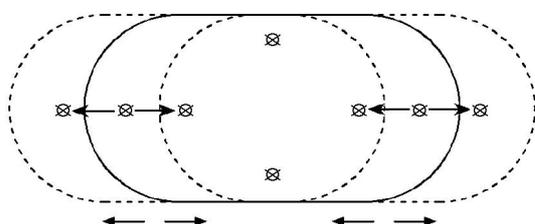


Рис. 2. Варианты форм заряда, несимметричного относительно оси

фактором, определяющим форму струи, является заряд. На рис. 1 представлена схема заряда. Здесь l_1, l_2 — радиусы заряда вдоль продольной и поперечной осей (далее — продольный и поперечный радиусы заряда), r_1, r_2 — расстояния в продольном и поперечном направлениях от центра заряда до точки инициирования детонации, r_s — радиус основания облицовки, высота заряда не варьируется. Параметры l_1 и r_1 являются переменными, как показано на рис. 2, и могут влиять на скорость и диаметр стержнеподобной струи. Чтобы изучить структуру несимметричного относительно оси заряда, введем в рассмотрение степень осевой асимметрии заряда l_1/l_2 и степень осевой асимметрии точек инициирования r_1/r_2 .

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА

Модель и варианты расчета

Для моделирования кумулятивного заряда использовался пакет LS-DYNA. Изучались следующие материалы: ВВ типа В, красная медь, углеродистая сталь [10]. Для ВВ типа В применялись модель HIGH_EXPLOSIVE_BURN

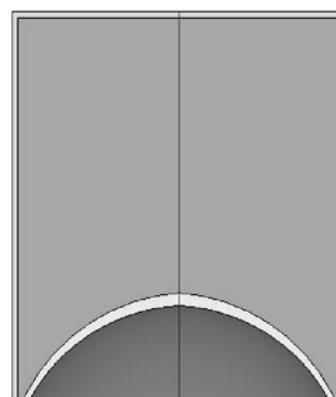


Рис. 3. Модель осесимметричного кумулятивного заряда (в разрезе)

и уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли, для красной меди — модель STEINBERG и уравнение состояния Грюнайзена, для углеродистой стали — модель деформации PLASTIC_KINETIC [10, 11].

Численное и экспериментальное моделирование некоторых форм кумулятивных зарядов приведено в работе [11]. Для воспроизведения формы такого кумулятивного заряда рассмотрен вариант с диаметром заряда $D_k = 52$ мм, четырьмя точками инициирования детонации на расстоянии от центра $D_k/3$, как показано на рис. 3. Два таких кумулятивных заряда генерируют похожие стержнеподобные струи, представленные на рис. 4 (варианты расчетов отличались только значениями некоторых параметров). Скорость головной части стержнеподобной струи в момент времени $t = 50$ мкс составляла 3 020 м/с. Сравнение этих результатов с известными экспериментальными данными (2 968.5 и 3 045 м/с) дает погрешность менее 5 %.

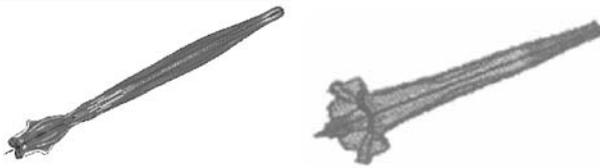


Рис. 4. Формы стержнеподобной струи в момент времени $t = 50$ мкс

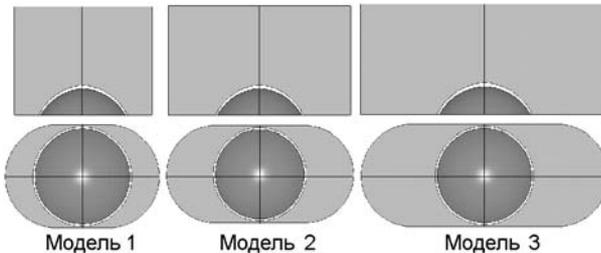


Рис. 5. Модели численного расчета:
верхний ряд — осевое сечение зарядов, нижний — вид на заряды снизу

В расчетах моделировали три конструкции со степенями осевой асимметрии заряда $l_1/l_2 = 1.5, 2, 2.5$ (рис. 5). Им соответствуют степени осевой асимметрии точек инициирования $r_1/r_2 = 1 \div 1.5, 1 \div 2, 1 \div 2.5$. Поперечный радиус заряда равен $l_2 = D_k/2 = 26$ мм, положение точки инициирования — $r_2 = D_k/3 = 17$ мм.

Начальная скорость струй, несимметричных относительно оси

Исследование влияния продольного радиуса заряда l_1 на форму детонационной волны проводилось при $r_1/r_2 = 1.5$ и $l_1/l_2 = 1.5, 2, 2.5$. Поскольку продольное расстояние r_1 остается фиксированным, то формы волн детонации сходны между собой и максимальное давление в волне во всех случаях составляет ≈ 42 ГПа при $t = 4$ мкс. Так как формы волн детонации и давление на их фронте мало отличаются для разных моделей заряда, скорость головной части струи во всех случаях примерно одинакова и равна ≈ 3400 м/с при $t = 50$ мкс. Различие значений l_1 влияет только на кромку детонационной волны с примыкающей боковой волной разрежения. Следовательно, продольный радиус заряда мало влияет на форму волны детонации и давление в ней, а тем самым и на скорость стержнеподобной струи.

Исследование влияния величины r_1 на форму детонационной волны проводилось по

модели 2, $l_1/l_2 = 2$ (см. рис. 5) с параметрами $r_1/r_2 = 1.2, 1.8, 2$. При изменении значений r_1 форма волны детонации также изменяется, максимальные давления в волне детонации в момент времени $t = 4$ мкс равны 41, 44, 45 ГПа соответственно трем значениям r_1/r_2 . Как следствие, скорость головной части струи в этих моделях составляет 3100, 3480, 3400 м/с при $t = 50$ мкс. Увеличение скорости кромки струи не следует точно за ростом давления на фронте волны детонации, поскольку на скорость влияет также форма волны детонации.

Большее расстояние r_1 до точки инициирования детонации ведет к увеличению области, в которой детонационные волны взаимодействуют друг с другом, и в результате область пикового давления отдалается от верхней части облицовки, так что влияние пикового давления на скорость головной части струи ослабляется. Рост расстояния r_1 приводит к некоторому уменьшению фиксированного продольного радиуса заряда. В результате боковая волна разрежения начинает сильнее влиять на кромку фронта детонации. Таким образом, величина r_1 , влияя на форму волны детонации и давление на ее фронте, оказывает тем самым значительный эффект на скорость стержнеподобной струи.

Рис. 6 иллюстрирует изменение скорости головной части струи в зависимости от r_1/r_2 при $t = 50$ мкс. Скорость увеличивается на всем рассматриваемом интервале. При $r_1/r_2 > 1.8$ она растет медленно; при $r_1/r_2 < 1.8$ рост скорости более интенсивный.

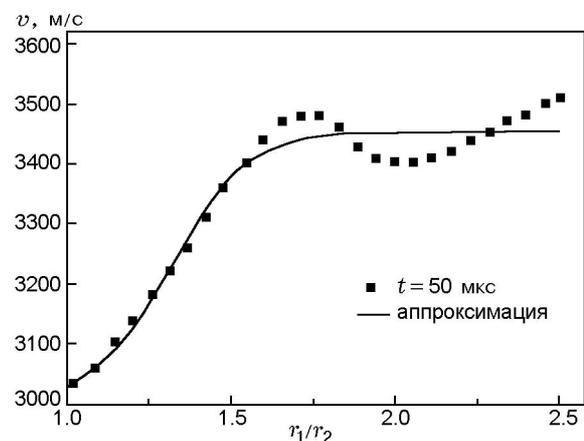


Рис. 6. Зависимость скорости головной части струи от параметра r_1/r_2

Форма несимметричных относительно оси стержнеподобных струй

С целью изучения влияния продольного радиуса заряда l_1 на форму стержнеподобных струй были рассмотрены модели с одинаковой степенью осевой асимметрии точки инициирования детонации $r_1/r_2 = 1.5$. Хотя продольные радиусы заряда различаются, продольные расстояния r_1 до точек инициирования детонации одинаковы, поэтому формы волн детонации сходны между собой. Пиковые значения давления на фронте детонации также примерно одинаковы (≈ 42 ГПа при $t = 6$ мкс). Все это приводит к сходству форм стержнеподобных струй.

Для исследования влияния продольного расстояния r_1 на форму стержнеподобной струи использовалась модель 2 с $r_1/r_2 = 1.2, 1.8, 2$. При вариации значений r_1 изменяется и форма волны детонации. Пиковые давления в волне составляют соответственно 41, 44, 45 ГПа при $t = 6$ мкс. Отличающиеся формы и давления волн детонации приводят к различию форм стержнеподобных струй.

На рис. 7 показана форма струи, полученная по модели 2 с $r_1/r_2 = 1.2$ в момент времени $t = 50$ мкс. Из-за силы, действующей на верхнюю часть облицовки, стержнеподобная струя имеет уплощенную головную часть и широкий хвост. Основание облицовки формирует оперение стержнеподобной струи. Область 4 является переходной между верхней частью облицовки и ее основанием. Рост сил сжатия в областях 2 и 3 приводит к увеличению здесь скорости, формирует обратный градиент скорости,

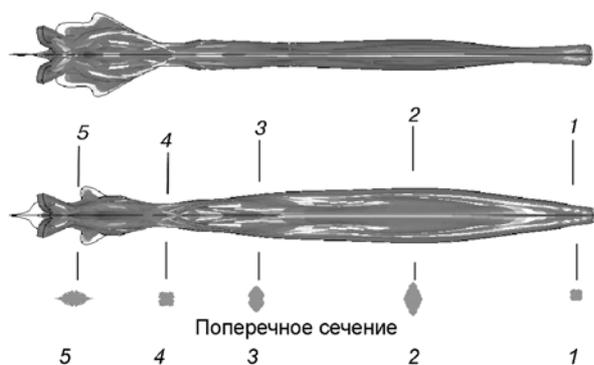


Рис. 7. Несимметричная относительно оси стержнеподобная струя, полученная по модели 2 при $r_1/r_2 = 1.2$ ($t = 50$ мкс)

вызывает запирание струи, и поэтому в областях 2 и 3 струи имеют более крупные головные части.

Выберем в качестве характерного размера половину длины r_{j1} и половину ширины r_{j2} головной части струи модели 2 в момент времени $t = 50$ мкс и исследуем влияние величины r_1/r_2 на r_{j1}/r_s и r_{j2}/r_s (рис. 8). Повторяя рост r_1/r_2 , значение r_{j1}/r_s увеличивается на всем интервале. При $r_1/r_2 < 1.5$ отношение r_{j2}/r_s уменьшается, поскольку волна сжатия приводит к уплощению головной части струи. При $r_1/r_2 > 1.5$ величина r_{j2}/r_s растет, поскольку обратный градиент скорости вызывает расширение головной части струи. При $r_1/r_2 = 1.8$ текущее значение r_{j2}/r_s превышает начальное. Эмпирические соотношения имеют вид

$$\frac{r_{j1}}{r_s} = 0.45 \frac{r_1}{r_2} - 0.32, \quad 1 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 2, \quad (1)$$

$$\frac{r_{j2}}{r_s} = \begin{cases} 0.41 - 0.24 \frac{r_1}{r_2}, & 1 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 1.5, \\ 0.97 \frac{r_1}{r_2} - 1.44, & 1.5 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 2. \end{cases} \quad (2)$$

Результаты численного моделирования показывают, что продольное расстояние r_1 до точки инициирования детонации существенно влияет на скорость и форму стержнеподобной струи. При $r_1/r_2 = 1.8$ рост скорости головной части замедляется, а ее размер увеличивается. Таким образом, значения $l_1/l_2 = 2$ и $r_1/r_2 = 1.8$ предлагается выбирать в качестве степеней осевой асимметрии радиуса заряда и положения точки детонации.

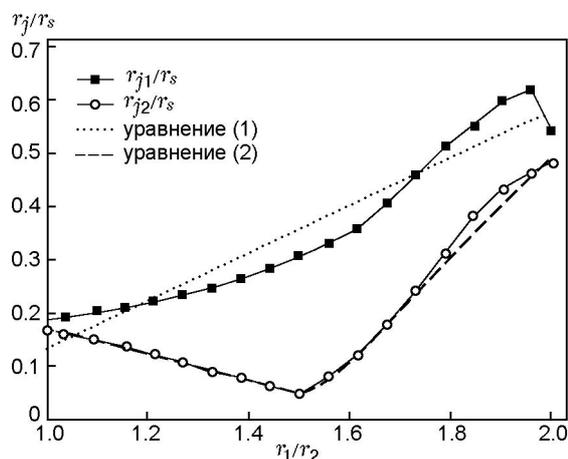


Рис. 8. Зависимости r_j/r_s от r_1/r_2 ($t = 50$ мкс)



Рис. 9. Формирование несимметричной (а) и симметричной относительно оси (б) стержнеподобных струй

СПОСОБНОСТЬ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ СТЕРЖНЕПОДОБНЫХ СТРУЙ К УДАРНОМУ ИНИЦИИРОВАНИЮ

Для того чтобы проиллюстрировать влияние осевой асимметрии заряда на способность стержнеподобных струй к ударному инициированию, рассмотрим осесимметричный заряд с эквивалентным количеством ВВ, четырехточечной схемой инициирования детонации, радиусом заряда 40 мм и расположением точек инициирования детонации на расстоянии $D_k/3$.

На рис. 9 показаны процессы формирования симметричных и несимметричных стержнеподобных струй. Скорость головной части несимметричной струи составляет 3480 м/с, скорость головной части осесимметричной струи — 3290 м/с, т. е. меньше на 5.78 %.

На рис. 10 для сравнения показаны формы головной части двух стержнеподобных струй в момент времени $t = 50$ мкс. Видно, что головная часть больше у несимметричной струи, а

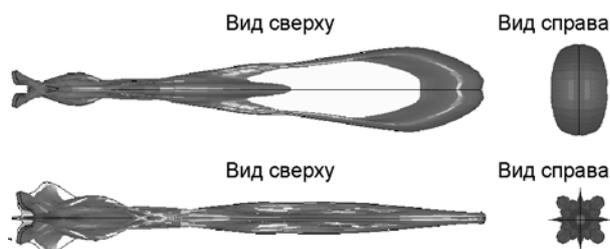


Рис. 10. Формы головной части двух стержнеподобных струй ($t = 50$ мкс)

форма головной части близка к эллипсу с длиной большой полуоси 11.4 мм, малой полуоси — 5.9 мм. Площадь этого эллипса 211.2 мм² равна площади круга радиусом 8.2 мм. Форма головной части осесимметричной струи близка к кругу радиусом 1.4 мм и площадью 6.2 мм².

Величина $v_j^2 d$ для несимметричной относительно оси струи равна 198.61 мм³/мкс², для осесимметричной струи — 30.31 мм³/мкс², т. е. меньше в 6.49 раза. Согласно критерию ударного инициирования Хэлда [9] несимметричные относительно оси стержнеподобные струи обладают более высокой способностью к ударному инициированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Согласно критерию ударного инициирования Хэлда [9] основными факторами, влияющими на способность стержнеподобной струи к ударному инициированию, являются скорость и диаметр струи.

- Методами численного моделирования показано, что продольное расстояние r_1 до точек инициирования детонации влияет на форму волны детонации и давление на ее фронте, силу воздействия на облицовку снаряда, а также определяет скорость и диаметр стержнеподобной струи. Продольный по оси радиус заряда определяет диапазон изменения расстояния r_1 .

- В соответствии с ростом продольного расстояния до точки инициирования критическому значению скорости головной части стержнеподобной струи соответствует соотношение $r_1/r_2 = 1.8$, а критической точке для ширины головной части струи — $r_1/r_2 = 1.5$.

• По сравнению с осесимметричным зарядом эквивалентного ВВ несимметричный относительно оси заряд генерирует стержнеподобные струи с более высокой способностью к ударному инициированию.

Работа выполнена в рамках проекта Государственной лаборатории взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института (грант N QNKT10-06).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Walters W. P., Zukas J. A.** Fundamentals of Shaped Charges. — New York: John Wiley&Sons, 1989.
2. **Baker E. L., Daniels A. S., Turci J. P., Vuong T. H., Homentowski E., Chin C. L.** Selectable initiation shaped charges // 20th Intern. Symp. on Ballistics. — 2002. — P. 589–596.
3. **Fong R., Ng W., Weimann K.** Nonaxisymmetric waveshaped EFP warheads // Ibid. — P. 582–588.
4. **Fong R., Kraft J., Thompson L., Ng W.** 3D Hydrocode analysis of novel asymmetrical warhead // ADA432103. — 2005. — P. 1–4.
5. **Tan G. E. B., Lam T. K., Tham Y. K.** Planar cutting jets from shaped charges // 22th Intern. Symp. on Ballistics. — 2005. — P. 507–513.
6. **Герасимов А. В.** Формирование кумулятивной струи при несимметричном сжатии оболочки // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 6. — С. 121–126.
7. **De Chant L. J.** An analytical solution for unsteady, inviscid jet formation due to asymmetric 2-d ring collapse // Intern. J. Impact Eng. — 2004. — V. 30. — P. 685–698.
8. **Ayisit O.** The influence of asymmetries in shaped charge performance // Intern. J. Impact Eng. — 2008. — V. 35. — P. 1399–1404.
9. **Held M.** Jet Initiation Phenomena Learned From Australia // 21th Intern. Symp. on Ballistics. — 2004. — P. 27–40.
10. **Li Yan-dong, Feng Shun-shan, Dong Yong-xiang.** Numerical simulation for forming high velocity shaped projectile using axial asymmetric charge // Acta Armamentar. — 2010. — V. 31, Supplement. — P. 55–58.
11. **Li Cheng-Bing, Pei Ming-Jing, Shen Zhao-Wu.** Three-dimensional numerical simulation of the high velocity rod-shaped projectile // Chin. J. High Pressure Phys. — 2007. — V. 21, N 2. — P. 165–172.

*Поступила в редакцию 21/VI 2011 г.,
в окончательном варианте — 13/IX 2011 г.*