

УДК 622.235

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ВЗРЫВОМ
С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ**

Мин-Вэн Танг, Юнг-Чин Динг

*Национальный технологический университет,
E-mail: tang0543@gmail.com, г. Тайбэй, Тайвань, Китайская Республика*

Для записи разрушения на примере взрыва бетонных образцов использовалась новейшая высокоскоростная камера со скоростью записи 30 000 кадров/с. Собраны данные по типам трещин и скорости их распространения. Показано, что максимальная степень расширения газа отмечается через 200 мкс после взрыва. Темп развития разрушения горной породы после взрыва достигает максимального значения через 130 мкс и постепенно уменьшается. Установлено, что высокоскоростная съемка обеспечивает информативную основу для изучения теории детонации взрывчатых веществ, механизма разрушения горной породы взрывом и анализа воздействий взрыва.

Высокоскоростная съемка, подрыв горной породы, механизм разрушения породы

DOI: 10.15372/FTPRPI20190408

В настоящее время теории взрыва недостаточно полно объясняют механизм разрушения породы в различных условиях проведения взрывных работ. При заданных параметрах невозможно точно спрогнозировать разрушение породы даже при идеальных условиях. Согласно существующим теориям разрушения породы взрывом, разрушение включает стадию воздействия взрывной волны и стадию квазистатического давления детонационного газа. Так как горные породы различаются в зависимости от реакции на динамические и статические нагрузки, теории разрушения горных пород также имеют различия. Воздействие детонационного газа на породу в зоне интенсивного дробления отличается от воздействия в зоне образования трещин (средняя зона) и в области упругого деформирования (дальняя). В зоне интенсивного дробления (ближняя зона) детонационный газ может проникать и расширять существующие в породе трещины и плоскости ослабления. Из-за распространения полей напряжений, вызванных давлением детонационного газа, и наличия внутренних напряжений в породе в средних и дальних областях происходит образование микротрещин [1].

Существующие модели разрушения породы взрывом учитывают лишь разрушение, вызванное образованием микротрещин под воздействием взрывной волны [2, 3]. Реальное разрушение породы взрывом не может быть полностью описано. Несмотря на то, что высокоскоростная съемка необходима для изучения и анализа процесса развития взрывных трещин, недостаточная освещенность, дым от взрыва и другие причины низкого разрешения изображения

усложняют оценку динамики развития трещины. Даже сочетание высокоскоростной съемки и компьютерной обработки изображения не всегда позволяет получить четкую картину развития процесса взрывных трещин [4].

Цель настоящей работы — использование новейшей высокоскоростной камеры для записи процесса разрушения породы при взрыве и изучение процессов возникновения, развития и затухания трещин при взрыве, а также разрушения породы под воздействием распространяющегося поля напряжений, вызванного давлением детонационного газа.

Для изучения и анализа механизма разрушения породы взрывом данные по структуре трещин и скорости их распространения записывались в количественном виде. Эти данные могут применяться в качестве теоретической основы для расчета энергии взрыва и разрушений от взрывной волны, а также для управления разрушением породы, что будет соответствовать развитию теории разрушения породы взрывом.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СЪЕМКА ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА В ГОРНОЙ ПОРОДЕ

В качестве опытного образца использовался бетонный цилиндр диаметром 60 см и длиной 50 см, имеющий в центре отверстие диаметром 8 мм и глубиной 15 см для размещения электрического детонатора диаметром 7 мм, являющегося источником взрыва. Высокоскоростная съемка проводилась на внешнем крае образца (рис. 1). С ее помощью записывалось развитие по времени распространения разрушающих трещин в образце при взрыве детонатора. В сравнительном анализе расчетов по существующим теориям рассматривалась зависимость между данными времени разрушения породы и степенью ее разрушения взрывной волной.

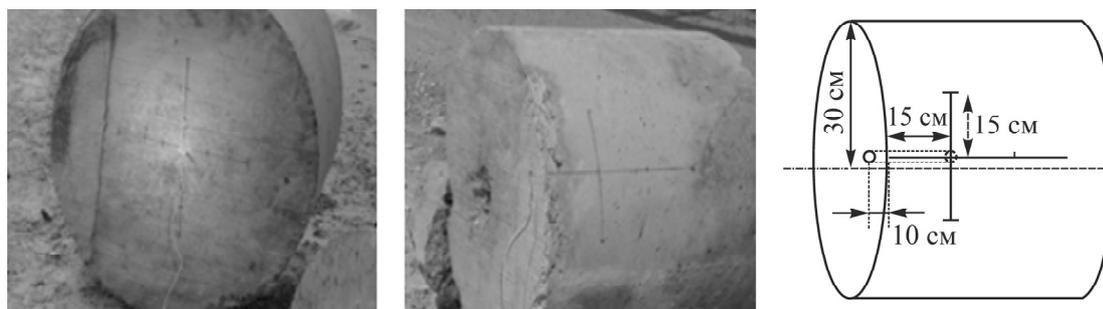


Рис. 1. Образец горной породы

Источником взрыва служил электрический детонатор с нулевой задержкой. Он содержал 450 мг тэна, скорость детонации 7 200 м/с. Для записи развития разрушения образца во времени применялась высокоскоростная камера Vision Research Phantom 7.3V со следующими характеристиками: матрица CMOS с разрешением 800×600 пикселей; глубина изображения 14 бит; чувствительность 4800ISO/ASA монохром; 1200 ISO/ASA цвет; количество кадров — до 6 688 кадр/с; возможные режимы — 190 476 кадр/с (стандартный режим), 500 000 кадр/с (режим Turbo) с опцией непрерывной настройки разрешения CAR. Время экспозиции менялось в зависимости от частоты кадров до 2 мкс и при необходимости достигало 1 мкс (стандартный режим), фиксированное значение 1 мкс (режим Turbo). Если скорость распространения взрывной волны после воздействия продуктов детонации на стенку отверстия составляет до 1/3 от исходной скорости детонации пентрита, то скорость распространения взрывной волны в породе равна ~ 2.4 мм/мкс. При максимальной кадровой частоте 190 000 кадр/с камеры можно ожидать, что динамические параметры разрушения и распространения трещин в результате воздействия взрывной волны будут полностью записаны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После высокоскоростной съемки для каждого изображения записывалось время от момента запуска детонатора и размеры зон разрушения. Эти данные могут использоваться для верификации теорий разрушения горных пород. Скорость развития трещин и их ускорение также могут быть рассчитаны по времени обнаружения трещины на изображениях в микросекундах.

Результаты эксперимента показали, что наиболее подходящая кадровая частота составляет $\sim 30\,000$ кадр/с (время между кадрами 32–33 мкс, время выдержки 4 мкс). При взрыве электрического детонатора взрывчатое вещество мгновенно превращается в газ с высокой температурой и высоким давлением, который воздействует на стенки отверстия и формирует ударную волну. Кадры расширения газа, вытекающего из отверстия, представлены на рис. 2 (начальной точкой является кадр 0 мкс).

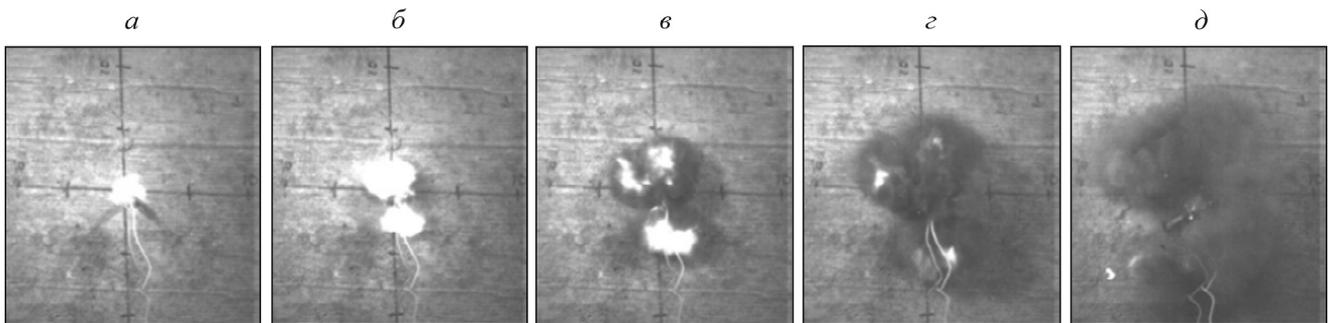


Рис. 2. Распространение газа после взрыва: *a* — 0 мкс; *b* — 32; *v* — 64; *z* — 129; *d* — 419 мкс

Зависимость объема вытекающего газа от времени с учетом того, что при съемке (рис. 2) фиксируется проекция сферической области, показана на рис. 3. Видно, что скорость расширения газа после взрыва достигает максимального значения после ~ 200 мкс и затем постепенно снижается. На рис. 4 показаны снимки возникновения и распространения взрывной волны. Время, при котором взрывная волна достигает поверхности образца, принято начальным (0 мкс). Разрушение образца взрывом заняло 0.05 с, в течение этого времени фрагменты породы полностью отделились от массива.

В некоторых работах предполагается, что из-за низкого значения предела прочности породы на растяжение тангенциальное растягивающее напряжение может стать причиной появления радиальных трещин. Скорость распространения таких трещин составляет 0.15–0.40 от скорости распространения волны напряжения. Когда тангенциальные растягивающие напряжения становятся меньше динамической прочности породы на растяжение, распространение трещины прекращается [5].

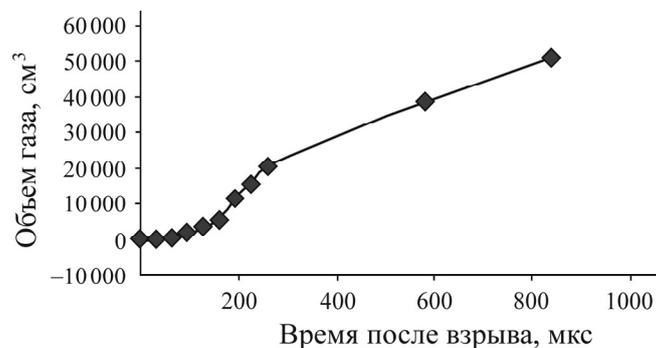


Рис. 3. Зависимость объема, вытекающего из скважины газа, от времени после взрыва

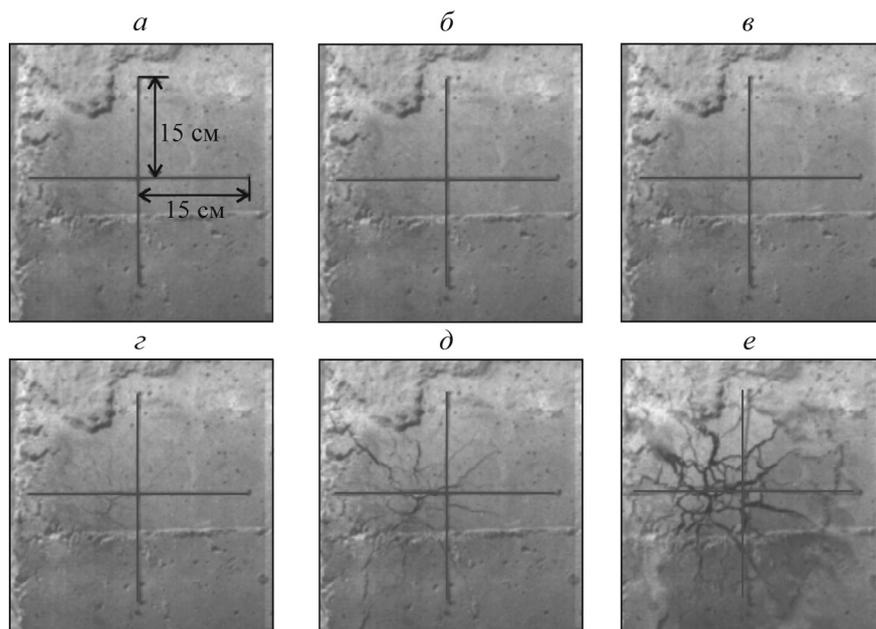


Рис. 4. Картины разрушения образца после взрыва: *a* — 0 мкс; *б* — 33; *в* — 65; *г* — 162; *д* — 484; *е* — 1323 мкс

Поскольку развитие трещин происходит в пространстве, в массиве могут присутствовать сложные трещины, которые невозможно учесть плоской моделью, при этом трещина не обязательно будет непрерывной. Следовательно, развитие трещин следует рассматривать с точки зрения трехмерной модели. Исходя из механики разрушения, основные виды разрушения связаны с появлением деформаций, растяжений поперечно-сдвиговых и продольно-сдвиговых деформаций. Взрывные трещины, полученные при наблюдениях, могут быть оценены длиной дуги веера взрывных трещин, которые располагаются на поверхности. Площадь трещины определяется длиной трещины на поверхности по формуле $A = 1/2rs$ ($r = 10$ см — расстояние от отверстия под детонатором до поверхности, s — длина трещины на поверхности). Такое преобразование трещин в веерные области позволяет оценить рост их площадей. Усредненные данные общей длины трещины на поверхности образца и их площади следующие:

Время, мкс	0	32	65	97	129	161
Общая длина трещин на поверхности, см	0	5	11	32	52	60
Площадь трещин, см ²		25	55	160	260	300

Согласно этим данным, максимальная скорость развития площади трещин достигается через 130 мкс после взрыва (рис. 5). Это время отвечает периоду развития вторичных трещин примерно с постоянной скоростью, связанному с тем, что воздействие взрывной волны напряжений на породу порождает большое количество случайно распределенных микротрещин. Под давлением детонационного газа происходит дальнейшее развитие этих микротрещин [3].

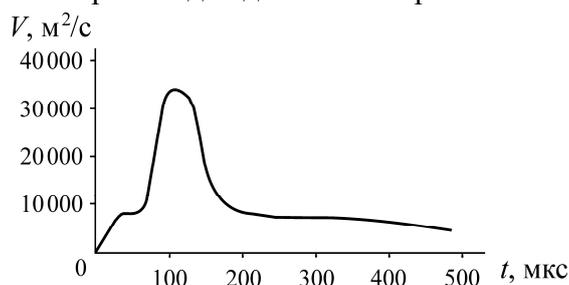


Рис. 5. Изменение скорости развития площади трещин после взрыва

Разрушение породы происходит в результате ударной волны и является процессом распространения микротрещин под действием взрыва, т. е. процессом эволюции разрушения. Модели разрушения горной породы строятся с учетом действия взрывной волны [1, 2], лишь в некоторых работах рассматривается механизм разрушения породы под воздействием детонационного газа. Так как взрыв оказывает динамическую и статическую нагрузку на породу, соответствующий механизм разрушения также должен различаться. Согласно двум фазам нагрузки породы, теория их разрушения должна иметь различия.

В 2003 г. Янг Ксао-лин и Ванг Шу-рен предложили новую теорию механизма разрушения горной породы в результате взрыва. В ближней зоне взрыва в породе образуются внутренние макротрещины. Далее область разрушения под действием давления детонационного газа расширяется. В области образования макротрещин порода полностью разрушается, коэффициент разрушения $D=1$. Классическая теория взрывных работ утверждает, что на область разрушения влияет взрывная ударная волна. В этой области нагрузка от давления взрывной ударной волны значительно превышает прочность породы на сжатие и порода разрушается. Динамическая прочность породы на сжатие может выступать критерием разрушения. Масштаб такого разрушения небольшой и превышает радиус заряда в 2–3 раза [6].

В настоящей работе использовался электрический детонатор диаметром 7 мм, масса заряда составляла 450 мг тэна. После взрыва образовалась полость взрыва диаметром $\sim 12–16$ мм (рис. 6). Тэн является мощным взрывчатым веществом, его удельная энергия взрыва больше, чем у обычного ВВ, поэтому образованная область разрушения намного больше, чем в общем случае.

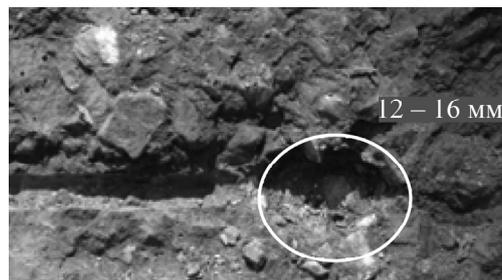


Рис. 6. Образование области разрушения

В зоне, расположенной рядом с ближней, взрывная волна создает множество случайно распределенных микротрещин. Их распространение происходит из-за действия растягивающих напряжений, проявляющихся в средней зоне в ограниченной области, на размер которой влияют давление газа при взрыве, напряжения в дальней области, свойства породы и размер трещин.

В соответствии с классической теорией взрывных работ, в процессе распространения взрывной волны горная порода подвергается сильному сжатию, сохраняя часть энергии упругой деформации. В момент, когда в центре взрыва напряжение уменьшается, эта часть энергии высвобождается, что приводит к центростремительному движению частиц породы и возникновению радиального растягивающего напряжения. Растягивающее напряжение в области разрушения превышает динамическую прочность породы на растяжение, создавая кольцевые трещины. Из-за пересечения радиальных и кольцевых трещин в области разрушения порода разделяется на фрагменты. Объем зоны трещиноватости превышает ее радиус в 5–7 раз [7].

Проведенные исследования показали, что при распространении взрывной волны в средней зоне окружное растягивающее напряжение может создавать радиальные трещины значительных размеров, которые направлены от центра взрыва. Теория о том, что растягивающее ради-

альное напряжение приводит к формированию кольцевых трещин не подтверждается. От момента взрыва распространение линейной трещины прекращается через 420 мкс. Напряжения, возникающие при расширении газа, вызывают выдвигание поверхности бетона и появление очагов упругопластической деформации, сопровождающихся возникновением кольцевых трещин. Начало их развития наблюдалось от наиболее отдаленного внешнего кольца зоны разрушения с образованием кольцевых трещин к центру. Их количество значительно меньше, чем радиальных, что приводит к появлению фрагментов породы в форме трапециев или треугольников (рис. 7). Трапециевидные и треугольные фрагменты отделялись от массива через 4000 мкс. Диаметр области разрушения (области трещин) составил 32 см, что в 45 раз больше радиуса детонатора.

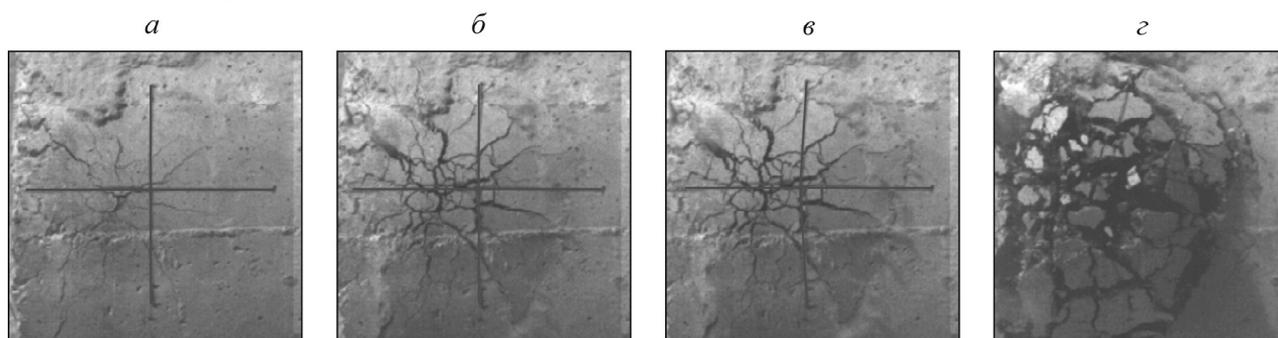


Рис. 7. Картины развития кольцевой трещины: *а, б* — 420 мкс; *в* — 1193; *г* — 4000 мкс

Для проведения исследований, связанных с взрывными работами, часто используется численное моделирование. В некоторых работах утверждается, что давление на стенку взрывной скважины достигает максимального значения через 1 мкс, а детонация прекращается через 12 мкс. Фактические наблюдения показали, что максимальное значение скорости развития разрушения породы после взрыва фиксируется через 130 мкс. Это существенно отличается от результатов численного моделирования. Для выявления причин такого несоответствия требуются дальнейшие исследования.

ВЫВОДЫ

Высокоскоростная съемка обеспечивает информативную научную основу для изучения теории детонации взрывчатых веществ и механизма разрушения горной породы взрывом, определения наиболее эффективных параметров взрыва. Получены высокоскоростные снимки с частотой кадров $\sim 30\,000$ кадр/с (время между кадрами 32 мкс, время выдержки 4 мкс) лабораторных взрывов. Изображения позволили рассмотреть процесс возникновения и развития трещин в горной породе в результате воздействия взрыва, а также провести анализ разрушения пород после распространения поля напряжений, вызванного давлением детонационного газа и исходных напряжений в породе. Скорость расширения истекающего из отверстия газа достигает максимального значения через 200 мкс после взрыва. Скорость развития разрушения породы максимальна через 130 мкс после взрыва.

Поскольку детонация взрывчатого вещества представляет собой химический процесс, требующий некоторого количества времени, определить точный момент начала взрыва не удалось. При выполнении подобных исследований сложно синхронизировать взрыв и высокоскоростную съемку. Для повышения точности регистрации необходимы дополнительные эксперименты. Ввиду того, что процесс разрушения горной породы является трехмерным, а высокоскоростная съемка может обеспечить лишь поверхностный осмотр разрушения массива, теоретическое исследование сложного механизма взрыва имеет некоторые ограничения.

Дальнейшее исследование с помощью высокоскоростной съемки должно быть направлено на синхронное проведение взрывных работ и трехмерный пространственный анализ этого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yang X. and Wang S.** Meso-mechanism of damage and fracture on rock blasting, *Explos Shock Waves.*, 2000, Vol. 20, No. 3. — P. 247–252.
2. **Grady D. E. and Kipp M. L.** Continuum modelling of explosive fracture in oil shale, *J. Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr.*, 1987, No. 17. — P. 147–157.
3. **Thorne B. J., Hommert P. J., and Brown B.** Experimental and computational investigation of the fundamental mechanisms of grating, *Proc. 3rd Int. Symp. Rock Frag. Blasting, Brisbane, Australia, August.* — P. 117–124.
4. **Xiao W., Xiao Z., Guo X., and Zhang Z.** Blast-induced crack developing velocity based on wavelet image processing, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2003, No. 12. — P. 2057–2061.
5. **Zhong-wei Q. U.** Rock blasting explosives in stress wave distribution of testing and research, *J. Anhui Univ Tech.*, 2009. — P. 5–26.
6. **Lemaitre J.** A course on damage mechanics, Publisher Location, Springer, 2nd Rev. and Enlarged ed. Edition, June 14, 1996.
7. **Qiang N. I. U.** Rock blasting mechanism, Shenyang: Northeast Institute of Technology Press, 1990.

Поступила в редакцию 30/XI 2017

После доработки 15/VI 2019

Принята к публикации 03/VII 2019