

УДК 622.235.5

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РАЗРЫВА И ВОДОСТРУЙНОЙ ВЫЕМКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ПРИ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКЕ

Д.-Ф. Су¹, Ю. Кан^{1,2}, Ф.-В. Янь¹, Д.-Д. Чжэн³, С.-Ч. Ван², М.-Я. Вэй^{1,4}

¹Чунцинский университет, Чунцин 400030, Китай

²Университет Уханя, Ухань 430072, Китай

³Управление по безопасности труда в Дачжоу, Дачжоу 635000, Китай

⁴Институт механики горных пород и почв Китайской АН, Ухань 430071, Китай

Естественный разрыв горной породы оказывает сильное влияние на прохождение ударной волны и распространение трещины при проведении взрывных работ. На основе волновой теории напряжений проанализирован наиболее важный механизм прохождения волны напряжения через разрыв, а также рассмотрено влияние естественного разрыва и водоструйной выемки на распространение трещины. Для понимания особенностей распространения трещины под воздействием ударной волны проведены эксперимент и численное моделирование с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Показано, что наличие водоструйной выемки способствует не только генерации основной трещины вдоль направления выемки при воздействии ударной волны, но и образованию вторичной трещины вблизи выемки. Естественный разрыв оказывает значительное влияние на направление распространения основной и вторичной трещин. При уменьшении расстояния между шпуром и естественным разрывом формируется область разрушений. При увеличении этого расстояния площадь зоны разрушений уменьшается, а влияние ударной волны на индуцированную взрывом трещину ослабевает.

Ключевые слова: распространение трещины, естественный разрыв, водоструйная выемка, взрывная нагрузка, ANSYS/LS-DYNA.

DOI 10.15372/FGV20180615

ВВЕДЕНИЕ

При взрывной нагрузке массива горной породы основными разрушающими факторами являются ударная волна и квазистатическое воздействие газовых продуктов. Горная порода обычно содержит естественные разрывы (трещины), которые оказывают существенное влияние на динамическое поведение горных пород и распространение волн напряжения. При столкновении с естественным разрывом волна напряжения частично отражается и частично проходит через разрыв. Энергия прошедшей волны сильно ослабляется, а область ее распространения изменяется, что влияет на воз-

никновение и движение индуцированной взрывом трещины. Поэтому важно исследовать влияние естественного разрыва на распространение трещины.

В общем случае эту проблему можно разделить на три части: влияние естественного разрыва на распространение ударной волны; взаимодействие ударной волны и естественного разрыва; влияние естественного разрыва на распространение индуцированной взрывом трещины. На сегодняшний день проведено много исследований по воздействию естественного разрыва на прохождение и отражение волн напряжения. В [1, 2] изучалось влияние множественных параллельных разрывов на кажущееся затухание волны напряжения в массивах горных пород. Результаты показали, что зависимость коэффициента пропускания от расстояния между разрывами и их количеством определяется отношением расстояния между разрывами к длине волны. Авторы также исследовали распространение волны напряжения через линейные деформационные швы и получили коэффициенты пропускания и отражения

© Su Deng-Feng¹, Kang Yong^{1,2}, Yan Fu-Wen¹, Zheng Dan-Dan³, Wang Xiao-Chuan², Wei Min-Yao^{1,4}, 2018.

¹State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China. ²Hubei Key Laboratory of Waterjet Theory and New Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China. ³Dazhou Administration of Work Safety, Dazhou 635000, China. ⁴State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China.

для волн напряжения. В [3] представлена модель динамических входов и исследовано влияние этих входов на распространение и затухание волн в сочлененных массивах горных пород. В этой работе также проанализирована применимость приближений VNI и SHI.

В [4] исследовалась проблема динамического взаимодействия ударных волн с границами раздела между анизотропными упругими средами, предложен метод, основанный на совместном использовании нулевого приближения лучевой теории и метода стереомеханического ударного воздействия. Этим методом прослеживается эволюция ударной волны, генерируемой ударным импульсом в сферической полости в поперечно-изотропной среде. В [5] получены коэффициенты пропускания и отражения для волны напряжения, пересекающей нелинейные деформационные швы. В этой работе использовались теория механики разрушения горных пород [6] и гипотеза об эквивалентности деформации. Полученный результат хорошо согласуется с численными результатами из работы [1]. В [7] разработана модель повреждения швов, основанная на фрактальной теории и представлено аналитическое решение для коэффициентов пропускания и отражения волн напряжения на стыках. Аналитическое исследование распространения наклонно падающих на стыки волн методом источника виртуальной волны выполнено в [8]. В [9–13] исследовалось взаимодействие волн напряжений с различными типами стыков горных пород и получены уравнения движения этих волн. В этих работах также предложен косвенный метод волнового разделения для лабораторных экспериментов по распространению волн с произвольным углом падения.

Распространение индуцированной взрывом трещины в трещиноватой горной породе ранее изучалось в ряде работ. В [14] рассмотрена роль индуцированного волной напряжения разрыва в сочлененных массивах горных пород численным методом с использованием программ ANSYS/LS-DYNA и UDEC. В [15] экспериментально исследовалось влияние углов падения волн напряжения на углы инициирования и распространения трещины. Показано, что при нулевом угле падения трещины распространяются вдоль плоскости поверхности разрыва. При угле падения $15 \div 75^\circ$ трещины разветвляются вдоль вершин первоначальных трещин, а при угле падения больше 75° наблю-

дается очень слабое трещинообразование.

На основе вышеприведенных исследований в настоящей работе предпринята попытка изучить влияние естественного разрыва и водоструйной выемки на распространение индуцированной взрывом трещины. Теория волн напряжения в ударных волнах была применена для описания прохождения ударной волны через разрыв и распространения индуцированной взрывом трещины. Проведен эксперимент по исследованию воздействия водоструйной выемки и естественного разрыва на распространение трещины. Выполнено численное моделирование с использованием программного обеспечения FEM ANSYS/LS-DYNA для описания прохождения и отражения ударной волны через разрыв и водоструйную выемку, а также распространения индуцированной взрывом трещины.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ

В качестве образца выбран ПММА из-за его уникальных свойств [16]. Механические параметры ПММА: плотность — 1.18 г/см^3 , модуль упругости — 5321.7 МПа , коэффициент Пуассона — 0.51 , прочность на разрыв — 68.6 МПа , прочность на изгиб — 106.8 МПа , скорость продольной волны — 0.232 см/мкс , скорость сдвиговой волны — 0.126 см/мкс . Параметры для каждого испытуемого образца приведены в табл. 1. В качестве источника ударной волны использовался электродетонатор № 8, его параметры: масса заряда — 0.9 г , плотность взрывчатого вещества — 1.816 г/см^3 , теплота взрыва — 5392 Дж/г , скорость детонации — 0.875 см/мкс , задержка — 0.075 мкс . Схема взрывного эксперимента с ПММА показана на рис. 1.

Согласно теории взрывных работ в горной породе [17, 18], во время взрыва на стенку шпура действуют огромные напряжения, затем в среде формируется и распространяется ударная волна. Поэтому, как показано на рис. 2, при взрыве электродетонатора № 8 на образец в плоскости XY оказывала влияние ударная волна. С другой стороны, поскольку Р-волна является основной волной напряжений, проходящей в породе на начальном этапе взрыва, в настоящей работе она определена как положительная. Согласно волновой теории напряже-

Таблица 1

Размеры образцов для испытаний

Номер образца	Размеры ПММА, см	Размеры естественного разрыва, см	Расстояние между разрывом и шпуром, см	Размеры водоструйной выемки, см	Угол между разрывом и водоструйной выемкой, град
1	40 × 40 × 0.6	—	—	—	—
2	40 × 40 × 0.6	6 × 0.4 × 0.6	6	0.6 × 0.2 × 0.6	60
3	40 × 40 × 0.6	6 × 0.4 × 0.6	3	0.6 × 0.2 × 0.6	0
4	40 × 40 × 0.6	6 × 0.4 × 0.6	6	0.6 × 0.2 × 0.6	0
5	40 × 40 × 0.6	6 × 0.4 × 0.6	9	0.6 × 0.2 × 0.6	0
6	40 × 40 × 0.6	6 × 0.4 × 0.6	12	0.6 × 0.2 × 0.6	0

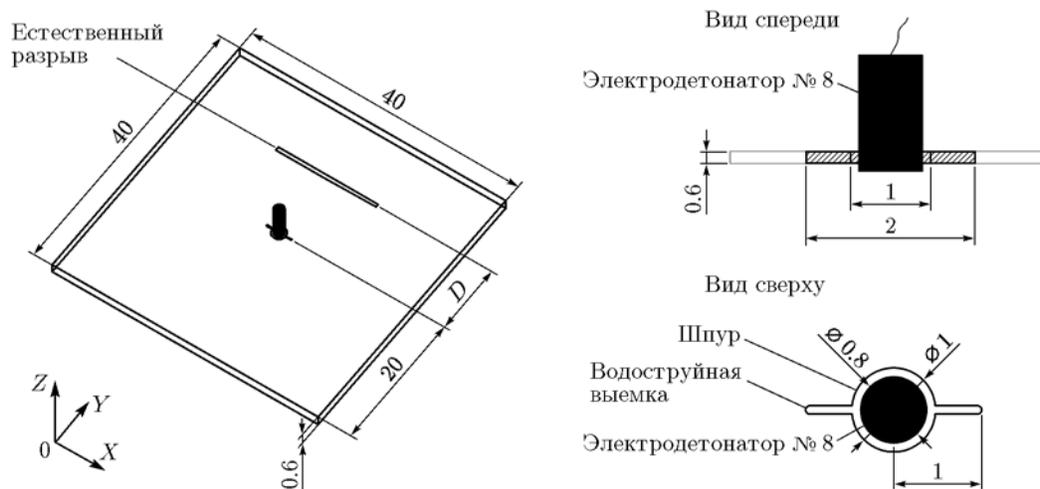


Рис. 1. Схема эксперимента

ний [19], при падении Р-волны на границу раздела двух сред происходит ее распад на отраженную и проходящую волны, как показано на рис. 2, на котором α и β — углы выхода соответственно падающей Р-волны и отраженной S-волны. Если критический угол падающей Р-волны определить как α_{cr} , где $0 \leq \alpha_{cr} \leq 90^\circ$, то при углах падения больше критического углы выхода отраженной и прошедшей волн уже не являются вещественными, что, впрочем, не будет обсуждаться в этой статье. Поэтому для нормального шпура кругового сечения ударно-волновая нагрузка равномерно воздействует на стенку шпура, а затем распространяется через передаточную среду. Схема передачи волны напряжения при взрыве показана на рис. 2. Однако в случае шпура с выемкой для струи воды, которую можно рассматривать как искусственный разрыв, отражение и прохождение волны

напряжения будут наблюдаться на границе водоструйной выемки. Проходящие волны будут взаимодействовать вблизи прорези для струи воды. Согласно теории волн напряжения [19], вследствие того, что эти волны распространяются в одном направлении, в передаточной среде формируются области усиления напряжения (см. линии I и II на рис. 2, в).

На рис. 3–5 показаны фотографии взрывного процесса испытуемых образцов. Для образца № 1 (рис. 3, а) с круглой формой сечения шпура зона дробления регулярная, индуцированные взрывом трещины равномерно распределены вблизи отверстия шпура, а длина взрывной трещины является случайной величиной. Образец № 2 (рис. 3, б) демонстрирует «кумулятивный эффект» водоструйной выемки под взрывной нагрузкой [20]. В этом образце основная трещина распространяется вдоль на-

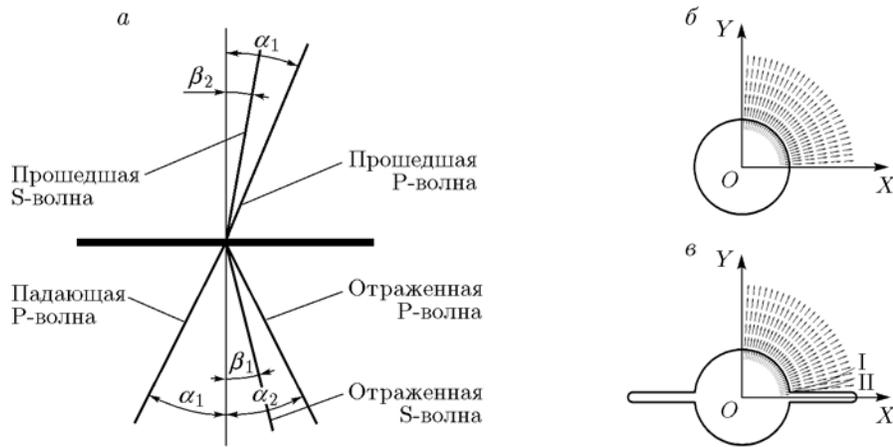


Рис. 2. Схема распространения волны напряжения (а) через естественный разрыв (б) и водоструйную выемку (в)

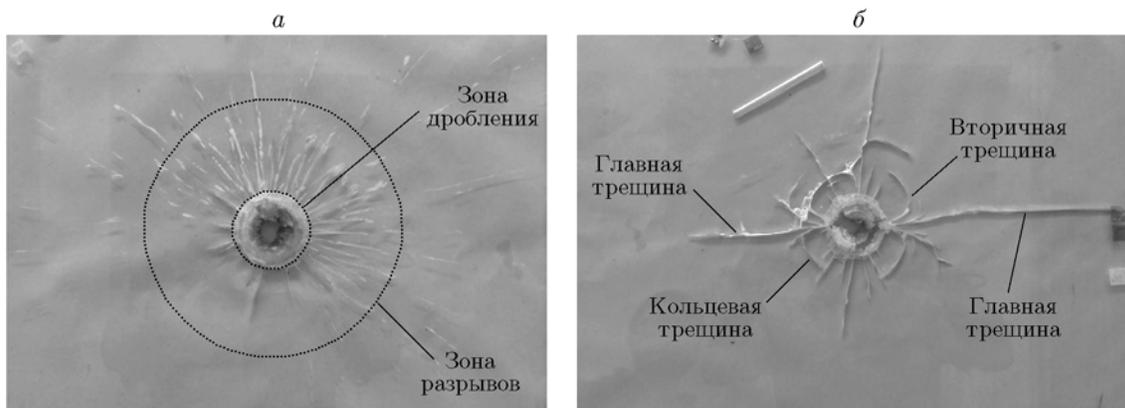


Рис. 3. Образцы № 1 (а) и № 2 (б)

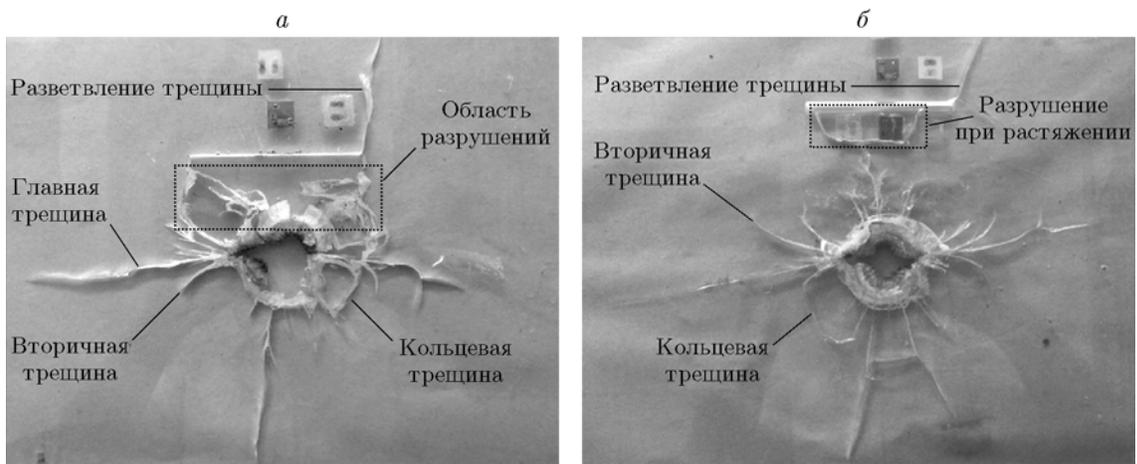


Рис. 4. Образцы № 3 (а) и № 4 (б)

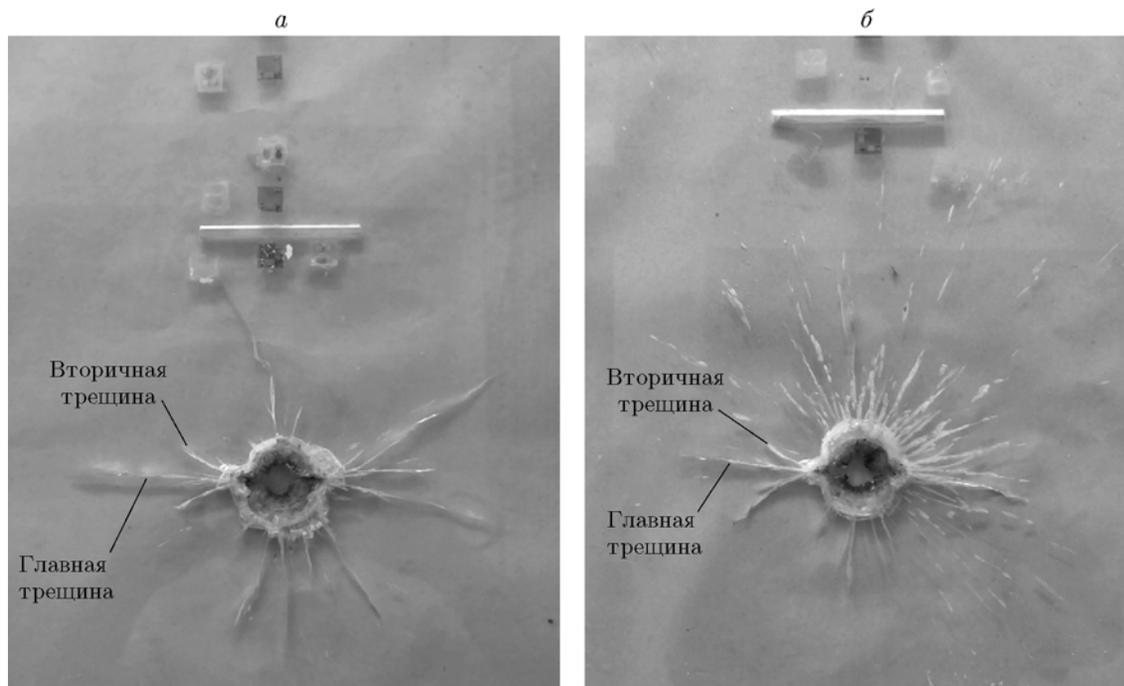


Рис. 5. Образцы № 5 (а) и № 6 (б)

правления выемки, но в области между шпуром и естественным разрывом направление ее распространения отчетливо изменилось из-за влияния отраженной волны.

На рис. 4 и 5 направление распространения вторичной трещины, образовавшейся вблизи водоструйной выемки под воздействием ударной волны, соответствует линии усиления напряжений. Этот результат согласуется с теоретическим анализом, проведенным выше. Кроме того, из-за существования естественного разрыва вторичная трещина развивается в круговую трещину. С увеличением расстояния между шпуром и естественным разрывом влияние разрыва на вторичную трещину становится слабее. В случае, когда расстояние между шпуром и естественным разрывом составляло 90 см, кольцевые трещины вокруг водоструйной выемки не возникали.

Из рис. 4 видно, что при малом расстоянии между шпуром и естественным разрывом возникает зона разрушений и формируются ответвленные трещины, а при увеличении этого расстояния зона разрушений уменьшается. Этот факт объясняется тем, что естественный разрыв при взрыве можно рассматривать как свободную поверхность, поэтому ударная волна при выходе на поверхность естественного разрыва отражается волной растяжения. За-

тем, когда растягивающее напряжение достигает предела прочности на разрыв, горная порода разрушается.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКЕ

2.1. Численное моделирование и его параметры

Для имитации распространения трещины и распределения давления при взрывной нагрузке использовалось программное обеспечение FEM ANSYS/LS-DYNA. Для того чтобы понять, какое влияние оказывает естественный разрыв и выемка для струи воды на распространение индуцированной взрывом трещины, было проведено моделирование для трех случаев (рис. 6). Вследствие симметрии объекта в каждом случае моделировалась половинная область с симметричными граничными условиями в направлении X , применялась также квазидвумерная имитационная модель. Для того чтобы приблизиться к фактическим условиям проекта, в каждом случае естественный разрыв и выемку для струй воды считали заполненными воздухом. Параметры для каждого случая приведены в табл. 2, в которой D

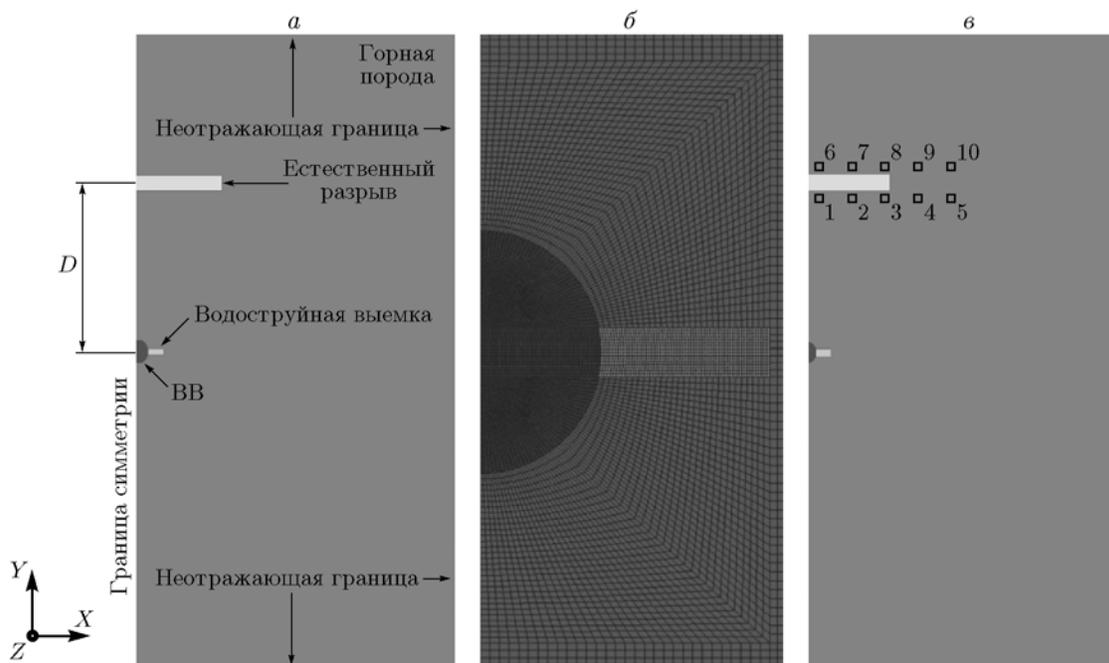


Рис. 6. Численная модель:

a — вид спереди, *б* — локальная карта построения расчетной модели, *в* — схема расположения контрольных точек

Таблица 2

Параметры численного моделирования

Вариант расчета	<i>D</i> , см	Размеры, см			Диаметр шпура, см
		порода	водоструйная выемка	естественный разрыв	
1	10	75 × 150 × 0.3	4 × 3 × 0.3	20 × 5 × 0.3	5
2	30	75 × 150 × 0.3	4 × 3 × 0.3	20 × 5 × 0.3	5
3	50	75 × 150 × 0.3	4 × 3 × 0.3	20 × 5 × 0.3	5

определяется как расстояние между шпуром и естественным разрывом.

Для анализа детонации взрывчатого вещества (ВВ) принят алгоритм сопряжения жидкость — твердое тело, для ВВ и воздуха использовался алгоритм ALE, для горной породы — алгоритм Лагранжа. Сетки в области ВВ и водоструйной выемки соединялись общими узлами, то же самое относится к горной породе и естественному разрыву. Сопряжение жидкость — твердое тело было определено между сетками в области ВВ, водоструйной выемки, породы и естественного разрыва с помощью зарезервированного слова `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID`.

Вокруг расчетной области применена

неотражающая граница, временной интервал моделирования задан равным 0.67, а время вычисления — 2500 мкс, в соответствии с характеристиками высокоскоростной деформации материала в процессе взрыва.

2.2. Модель материала

Горная порода

Горная порода была смоделирована материалом типа 3 LS-DYNA (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) [21]. При численном расчете использовались следующие параметры горной породы: плотность $\rho_r = 2.5 \text{ г/см}^3$, модуль Юнга $E_r = 0.225 \text{ Мбар}$, коэффициент Пуассона $P_R = 0.22$. Предел

текучести принят равным $3.0 \cdot 10^{-5}$ Мбар, касательный модуль — 0.042 Мбар. В численном расчете применялись также критерии пластической деформации: $F_S = 0.06$ — деформация разрушения элемента.

Тротил

Тротильный заряд моделировался материалом типа 8 LS-DYNA (*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN). Использовались следующие параметры: плотность заряда $\rho_e = 1.931$ г/см³, скорость детонации $v_d = 0.993$ см/мкс, давление на выходе $p_{out} = 0.337$ Мбар, входные параметры — $A = 3.712$ Мбар, $B = 7.431 \cdot 10^{-2}$ Мбар, $R_1 = 4.151$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.3$. В инженерных расчетах давление при выделении химической энергии описывалось уравнением состояния Джонса — Уилкинса — Ли (JWL) [22, 23] в виде

$$p_e = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E_e}{V}, \quad (1)$$

где p_e — давление, создаваемое продуктами детонации ВВ, ω , A , B , R_1 , R_2 — входные параметры задаваемые пользователем, V — относительный объем, E_e — внутренняя энергия начального объема.

Воздух

Воздух был смоделирован материалом типа 9 LS-DYNA (*MAT_NULL) и уравнением Грюнайзена. Давление p_a вычислялось из соотношения [24]

$$p_a = \rho_a C^2 \lambda [1 + (1 - 0.5\gamma_0)\lambda - 0.5\delta\lambda^2] / [1 - (S_1 - 1)\lambda - S_2\lambda^2 / (\lambda + 1) - S_3\lambda^3 / (\lambda + 1)^2] +$$

$$+ (\gamma_0 + \delta\lambda)E_a, \quad (2)$$

$$\lambda = \rho / \rho_a - 1,$$

где ρ_a — плотность воздуха, $\rho_a = 1.25$ г/см³; C — отрезок, отсекаемый на оси ординат кривой $u_s - u_p$, $C = 0.344$; S_1, S_2, S_3 — коэффициенты наклона кривой $u_s - u_p$, $S_1 = S_2 = S_3 = 0$; константы C, S_1, S_2, S_3 — входные параметры; γ_0 — коэффициент Грюнайзена, $\gamma_0 = 1.4$; δ — объемная поправка первого порядка к γ_0 ; E_a — внутренняя энергия исходного объема воздуха.

2.3. Результаты численного моделирования и их обсуждение

Для расчета эволюции взрывной волны напряжения и распространения трещины использовалось программное обеспечение пост-обработки (LS-PREPOST).

В общем случае для нормального шпура форма волны напряжения является круглой. Однако для направления вдоль водоструйной выемки она принимает форму эллипса. Это свидетельствует о том, что область распределения напряжений была изменена выемкой на начальной стадии взрыва. На рис. 7–9 показано, что волна напряжения отразилась от границы естественного разрыва, а дифракция на его вершине привела к концентрации напряжений и способствовала расширению разрыва. На рис. 10 показаны зависимости от времени эффективных напряжений в различных контрольных точках. Видно, что тенденции изменения напряжения в контрольных точках 5

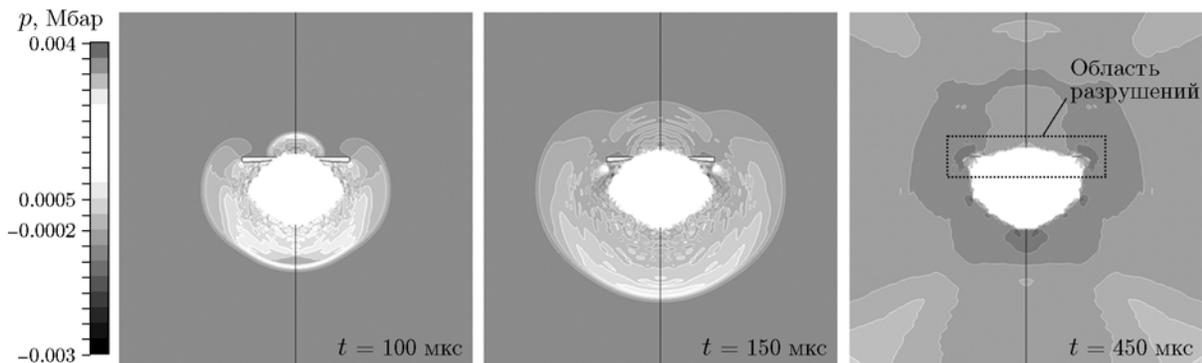


Рис. 7. Поле давления в прошедшей волне напряжения и в индуцированной взрывом трещине для случая 1

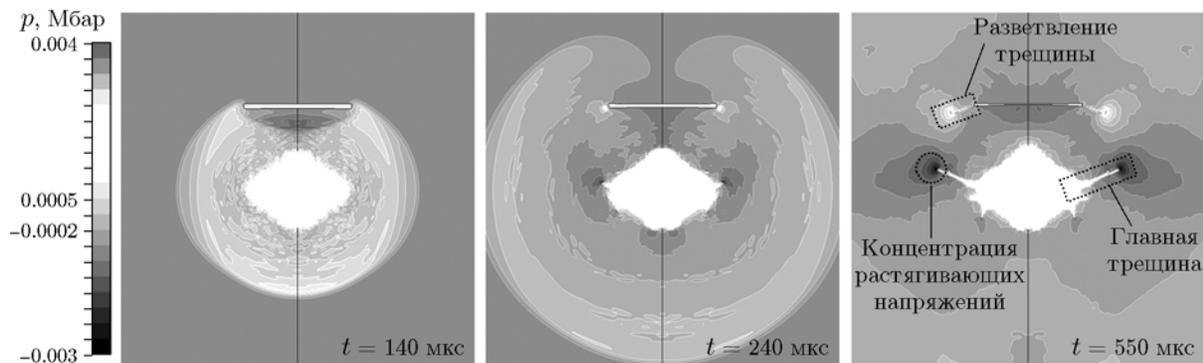


Рис. 8. Поле давления в прошедшей волне напряжения и в индуцированной взрывом трещине для случая 2

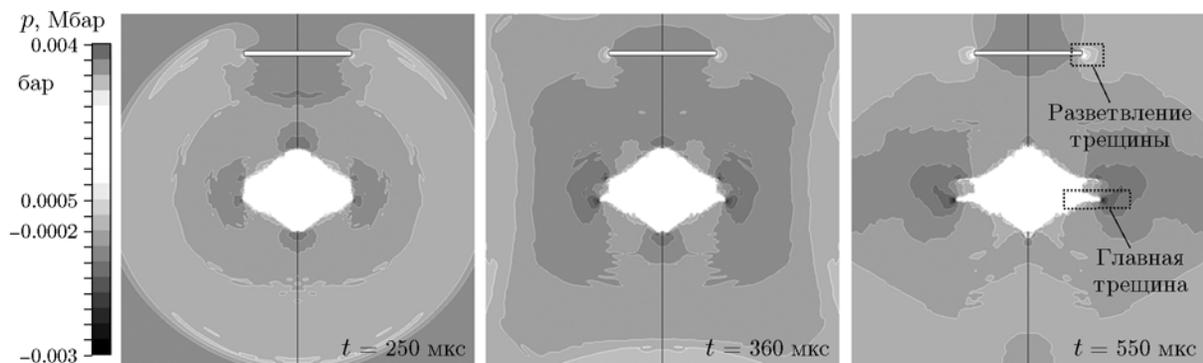


Рис. 9. Поле давления в прошедшей волне напряжения и в индуцированной взрывом трещине для случая 3

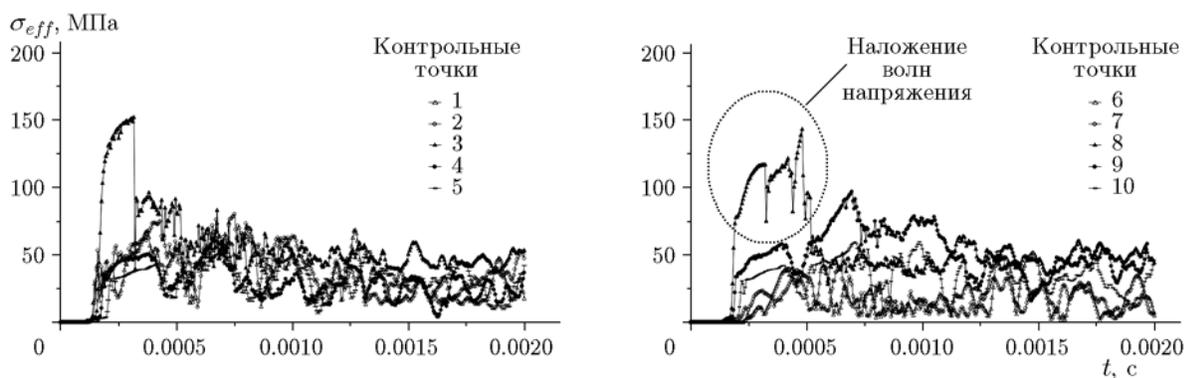


Рис. 10. Зависимость эффективного напряжения от времени в контрольных точках

и 10 подобны, но эффективные напряжения в точках, расположенных позади естественного разрыва (точки 6 и 7), меньше, чем напряжения в точках перед разрывом (точки 1 и 2). Это показывает, что энергия волны напряжения уменьшается при прохождении естественного разрыва. Кроме того, эффективное напряжение в контрольной точке, расположенной в

вершине разрыва, в два раза превышает эффективное напряжение в других точках наблюдения, и это свидетельствует о том, что в вершине естественного разрыва происходит концентрация напряжений, что согласуется с теоретическим анализом.

Если расстояние между шпуром и естественным разрывом мало (см. рис. 7), то, по-

сколькx разрыв ведет себя как свободная поверхность, вокруг разрыва фокусируется энергия, вследствие чего горная порода разрушается и в ней формируются индуцированные взрывом полости. Из рис. 7 и 8 видно, что индуцированная взрывом трещина распространяется вдоль естественного разрыва. С увеличением расстояния между скважиной и естественным разрывом влияние свободной поверхности разрыва становится всё слабее, что также подтверждается экспериментом, описанным выше в этом параграфе. В случае, когда это расстояние превышает 30 см, естественный разрыв не разрушается, но в какой-то степени деформируется.

Тем не менее, взрыв в шпурах с водоструйной выемкой является типом взрыва с контролируемым направлением, поскольку выемка задает направление для трещинообразования под взрывной нагрузкой [20, 25, 26]. При этом естественный разрыв оказывает серьезное влияние на управляющую функцию водоструйной выемки. Согласно теоретическому анализу, на границе раздела среды с естественным разрывом происходят пропускание и отражение волны напряжения, при этом отраженная волна взаимодействует с падающей волной вблизи водоструйной выемки. Если энергия отраженной волны достигает динамической прочности породы, то вблизи выемки генерируется микротрещина. С изменением расстояния между шпуром и естественным разрывом местоположение зоны концентрации напряжений также изменяется и вместе с ним изменяется направление индуцированной взрывом трещины. Таким образом, направляющий эффект выемки для воды ослабевает во время взрыва, а угол наклона индуцированной взрывом главной трещины к горизонтальной плоскости уменьшается при увеличении расстояния между шпуром и естественным разрывом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Естественный разрыв, который влияет на распространение трещины при взрывном нагружении, является одним из наиболее важных факторов, определяющих механические свойства горной породы. На основе теории волн напряжений был проанализирован закон прохождения волны напряжения через естественный разрыв и водоструйную выемку. Распространение трещины под воздействием ударной волны

исследовалось экспериментально, а также моделировалось численно с помощью пакета программ ANSYS/LS-DYNA. Результаты показали следующее.

(1) Наличие выемки для струй воды способствует не только генерации ведущей трещины вдоль ее направления, но и образованию вторичной трещины вблизи этой выемки под воздействием ударной волны. Наличие естественного разрыва влияет на распространение вторичной трещины: она может превращаться в круговую в случае, когда расстояние между взрывной скважиной и естественным разрывом слишком мало.

(2) Поскольку естественный разрыв можно рассматривать как свободную поверхность, то при очень малом расстоянии между скважиной и естественным разрывом образуются зоны разрушения и разветвления трещин. Кроме того, при увеличении расстояния между скважиной и естественным разрывом площадь зоны разрушения уменьшается, а влияние на индуцированную взрывом трещину ослабляется.

(3) Наличие естественного разрыва изменяет закон передачи волны напряжения при взрывной нагрузке, что приводит к концентрации напряжений и способствует расширению естественного разрыва. Изменение расстояния между скважиной и естественным разрывом изменяет местоположение зоны концентрации напряжений вблизи кончика выемки для струй воды и, в свою очередь, направление распространения индуцированной взрывом трещины. Угол наклона индуцированной взрывом главной трещины к горизонтальной плоскости уменьшается при увеличении расстояния между шпуром и естественным разрывом.

Финансовую поддержку этой работе оказали Фонд национальных фундаментальных исследований Китая (2014CB239203), Национальный фонд естественных наук Китая (51474158) и Открытые проекты Государственной ведущей лаборатории динамики и управления катастрофами в шахтах (Чунцинский университет, 2011DA105287-FW201412). Работа также поддержана программой «Новые таланты нового века в университете» (NCET-12-0424). Авторы хотели бы поблагодарить Государственную ведущую лабораторию динамики и управления катастрофами в шахтах (Чунцинский университет) и Лабораторию технологии гидроабразивной резки и новых технологий в провинции Хубэй (Университет Уханя).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Cai J. G., Zhao J.** Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses // Intern. J. Rock Mech. Min. — 2000. — V. 37, N 4. — P. 661–682.
2. **Zhao J., Cai J. G.** Transmission of elastic P-wave across single fractures with a nonlinear normal deformational behavior // Rock Mech. Rock Eng. — 2001. — V. 34, N 1. — P. 3–22.
3. **Fan S. C., Jiao Y. Y., Zhao J.** On modeling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method // Comput. Geotech. — 2004. — V. 31, N 1. — P. 57–66.
4. **Gulyayev V. I., Ivanchenko G. M.** Discontinuous wave interaction with interfaces between anisotropic elastic media // Intern. J. Solids Struct. — 2006. — V. 43, N 1. — P. 74–90.
5. **Wang W. H., Li X. B., Zuo Y. J.** Effect of nonlinearly normal deformational joint on elastic p-wave propagation // Chin. J. Rock Mech. Eng. — 2006. — V. 25, N 6. — P. 1218–1225.
6. **Dougill J. W., Lau J., Burt N. J.** Mechanics in Engineering. — American Society of Civil Engineers CASCE Press, 1976.
7. **Li Y. X., Zhu Z. M., Li B. X., et al.** Study on the transmission and reflection of stress waves across joints // Intern. J. Rock Mech. Min. — 2011. — V. 48, N 3. — P. 364–371.
8. **Zhu J. B., Zhao J.** Obliquely incident wave propagation across rock joints with virtual wave source method // J. Appl. Geophys. — 2013. — V. 88. — P. 23–30.
9. **Li J. C., Ma G. W.** Analysis of blast wave interaction with a rock joint // Rock Mech. Rock Eng. — 2010. — V. 43, N 6. — P. 777–787.
10. **Li J. C., Ma G. W., Zhao J.** Stress wave interaction with a nonlinear and slippery rock joint // Intern. J. Rock Mech. Min. — 2011. — V. 48, N 3. — P. 493–500.
11. **Li J. C., Ma G. W., Zhao J.** Analysis of stochastic seismic wave interaction with a slippery rock fault // Rock Mech. Rock Eng. — 2011. — V. 44, N 1. — P. 85–92.
12. **Li J. C., Liu T. T., Li H. B., et al.** Shear wave propagation across filled joints with the effect of interfacial shear strength // Rock Mech. Rock Eng. — 2015. — V. 48, N 4. — P. 1547–1557.
13. **Zou Y., Li J. C., He L., et al.** Wave propagation in the vicinities of rock fractures under obliquely incident wave // Rock Mech. Rock Eng. — 2015. — V. 49, N 5. — P. 1789–1802.
14. **Wang Z. L., Konietzky H.** Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses // Eng. Fract. Mech. — 2009. — V. 76, N 12. — P. 1945–1955.
15. **Hu R., Zhu Z. M., Hu Z. Y., et al.** Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads // Chin. J. Rock Mech. Eng. — 2013. — V. 32, N 7. — P. 1476–1481.
16. **Hernández G. L. H., Ruiz C.** Experimental evaluation of crack propagation velocity in PMMA under dynamic pressure loading // Intern. J. Fracture. — 1993. — V. 62, N 2. — P. 235–240.
17. **Dai J.** Dynamic Behaviors and Blasting Theory of Rock. — Metallurgical Industry Press, 2013.
18. **Guo X. B., Zhang J. C.** Blasting Engineering. — China Communication Press, 2007.
19. **Wang L. L.** Foundation of Stress Wave. — Beijing: National Defence Industry Press, 1985.
20. **Kang Y., Wang X. C., Yang X. F., et al.** Numerical simulation of control blasting with borehole protecting and water jet slotting in soft rock mass // Disaster Adv. — 2012. — V. 5, N 4. — P. 1532–1537.
21. **Shi D. Y., Li Y. C., Zhang S. M.** The Analysis of Explicit Explosion Mechanics Base on ANSYS/LS-DYNA 8.1. — Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
22. **Bai J. Z.** Basis Theoretical and Instance Analysis of LS-DYNA3D. — Beijing: Science Press, 2005.
23. **Cho S. H., Nakamura Y., Mohanty B., et al.** Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting // Eng. Fract. Mech. — 2008. — V. 75, N 13. — P. 3958–3966.
24. **LSTC.** LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 970. — Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2003.
25. **Yi C. P., Johansson D., et al.** Stress wave interaction between two adjacent blast holes // Rock Mech. Rock Eng. — 2016. — V. 49, N 5. — P. 1803–1812.
26. **Edwards D. H., Thomas G. O., Milne A., et al.** Blast wave measurements close to explosive charges // Shock Waves. — 1992. — V. 2. — P. 237–243.

*Поступила в редакцию 8/XI 2016 г.,
в окончательном варианте — 28/I 2018 г.*