

УДК 622.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ЭНЕРГОПОГЛОЩЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА
В ОКРЕСТНОМ ЗАБОЕ ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ

Сюй Ляньмань¹, Лэн Юаньхао¹, Ян Фэншо¹, Ли Хунбинь², Ма Юфэй¹,
Ли На³, Ван Хунян¹, Янь Вэйтин¹, Цзян Синьцзянь²

¹Ляонинский университет, E-mail: leng19961116@163.com, 110036, г. Шэньян, Китай

²Компания "Inner Mongolia Yitai group Co.,Ltd", 017000, г. Ордос, Китай

³Ляонинский технический университет, 123000, г. Фусинь, Китай

Разработана экспериментальная установка для определения энергопоглощения при испытании образцов угля на ударное сжатие. Получена корреляционная зависимость между удельным объемом скважины в образце и уровнем поглощения их энергии. Установлено, что изменение расположения двух-трех скважин в образце оказывает малое влияние на уровень поглощения энергии. Выявлено, что в пробуренном образце за счет концентрации напряжений вокруг скважин образуется большое количество микротрещин. При этом трещины в образцах с несколькими скважинами соединяются друг с другом, преобразуя энергию удара в разрушение и повышая способность угля к энергопоглощению.

Поглощение энергии угольным образцом, удельный объем скважин, забой, горный удар, ударная нагрузка

DOI: 10.15372/FTPRPI20240211

EDN: DYFLBL

Горный удар — одно из наиболее опасных динамических явлений, которые могут произойти в процессе добычи угля. Более 87% горных ударов происходят в подготовительных и очистных выработках, пройденных по угольному пласту [1–5]. По сравнению с другими методами, такими как гидроразрыв пласта и взрывание, бурение является эффективной мерой предотвращения горного удара. Основные преимущества данного метода — простота исполнения, низкие затраты, минимизация риска горного удара и высокая эффективность. Бурение активно применяется в угольных шахтах, склонных к горному удару [6–8].

Уголь считается пористой средой с определенными характеристиками поглощения энергии и свойствами демпфирования колебаний. Однако высокоплотный уголь обладает низкой способностью поглощать энергию. При применении технологии бурения угольного пласта в нем формируются искусственные полости, которые повышают его способность поглощать энергию. Изучение способности пород вокруг выработки поглощать и высвобождать энергию в случае горного удара актуально для обеспечения безопасности работ по добыче угля, а также для прогнозирования и предотвращения динамических явлений.

Учеными в Китае и других странах выполнен большой объем исследований по изучению параметров рассеивания и поглощения энергии углем, породой и другими пористыми материалами. В [2] проведен анализ влияния размеров углепородного массива на способность поглощать энергию с помощью удара шара на блок угля и породы. Выявлено, что поврежденный уголь и порода в насыпном виде хорошо поглощают энергию. В [9] проанализирован механизм рассеивания энергии в пробуренных образцах угля и показано, что наличие скважины в образце угля делает его менее склонным к динамическому разрушению. В [10] изучен механизм образования и развития трещин вокруг скважин и сделан вывод: чем больше плотность скважин, тем больше образуется трещин и высвобождается большее количество энергии. В [11] рассмотрены прочностные характеристики, механизм разрушения и эффективность поглощения энергии породой методом составного стержня Гопкинсона (ССГ) при различных динамических и комбинированных статических нагрузках. Установлено, что интенсивность поглощения энергии отличается в зависимости от типа приложенной нагрузки.

В [12] выполнены испытания по одноосному циклическому ударному нагружению гранита с горизонтальными скважинами и обнаружено, что вне зависимости от уровня осевого нагружения образцы разделяются по оси; при увеличении деформации также увеличивается уровень поглощения энергии. В [13] применен метод ССГ для изучения развития энергетических характеристик образцов с различными формами трещиноватости. Результаты показали, что рассеивание энергии трещиноватых образцов зависит от угла наклона и местоположения трещины. В [14] рассмотрены энергетические характеристики породных материалов при одноосном сжатии и показано, что плотность энергии упругой деформации и плотность рассеивания энергии увеличиваются по линейному закону. Также выявлено, что угольные образцы обладают линейными зависимостями накопления и рассеивания энергии. В [15] установлено, что при увеличении удельного объема скважин (УОС) угольный образец показывает более равномерный характер разрушения, что связано с уменьшением способности накапливать энергию упругой деформации. В [16] выполнено одноосное и трехосное сжатие образцов угля при различных скоростях нагружения и ограничивающих давлениях, показано влияние скорости нагружения и ограничивающего давления на параметры рассеивания энергии угольного образца.

В [17] рассмотрено влияние скорости удара и влажности образца на общую плотность поглощаемой энергии, ее рассеивание и параметры разрушения при ударной нагрузке. В настоящее время исследования поглощения энергии угольным пластом сфокусированы на условиях статического нагружения или на использовании стержня Гопкинсона для небольших образцов. В общем случае считается, что бурение скважин снижает напряжение в выработке в поперечном направлении и переносит повышенную концентрацию давления в глубь массива. Это увеличивает устойчивость породы вокруг выработки.

В настоящей работе представлена испытательная установка для определения уровня поглощения энергии и параметров деформации угольного образца при ударной нагрузке. Для анализа развития деформации и разрушения образцов использована система цифрового спекл-анализа. Влияние наличия скважин на характер разрушения проанализировано после ударного воздействия.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Описание испытательной установки. В настоящее время в Китае и в других странах для изучения механических свойств материалов под воздействием ударной нагрузки применяется составной стержень Гопкинсона (ССГ), который обеспечивает скорость деформации в диапазоне $10-10^4 \text{ с}^{-1}$ [18–20]. Этот диапазон скорости деформации, при котором происходит наиболее существенное изменение напряжений в материалах. Однако метод ССГ используется на небольших образцах, обес-

печивает высокую скорость удара и низкий уровень энергии. В рамках метода ССГ к исследуемому объекту и к измерениям предъявляются жесткие требования. В частности, рассматриваемый материал в процессе испытаний не должен полностью разрушиться.

Для испытания образцов угля в условиях удара с большой энергией изготовлена специальная испытательная установка на основе комплексного анализа различного экспериментального оборудования (рис. 1).

a

б

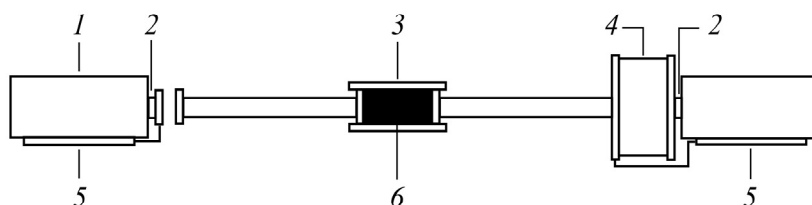


Рис. 1. Испытательная установка для определения уровня поглощения энергии (*a*) и ее схема (*б*): 1 — ударный гидроцилиндр; 2 — датчик давления; 3 — механизм крепления образца; 4 — датчик остаточной энергии; 5 — датчик смещения; 6 — образец угля

Испытательная установка состоит из ударного гидроцилиндра, механизмов передачи давления, крепления угольного образца с одной свободной поверхностью, датчика остаточной энергии и блока регистрации данных. Перед началом испытаний образец угля помещался в механизм крепления, который обеспечивал непосредственный контакт ударного стержня с гидроцилиндром с одной стороны и датчиком остаточной энергии — с другой, после чего устанавливалось требуемое усилие удара. Выходная энергия удара определялась по формуле $E_0 = \int_0^{S_0} F_0 dS_0$, где F_0 — усилие удара гидроцилиндра; S_0 — смещение гидроцилиндра при ударе.

На другом торце установки установлен датчик остаточной энергии, изготовленный из полиуретана. При сжатии данный материал упруго деформируется (рис. 2).

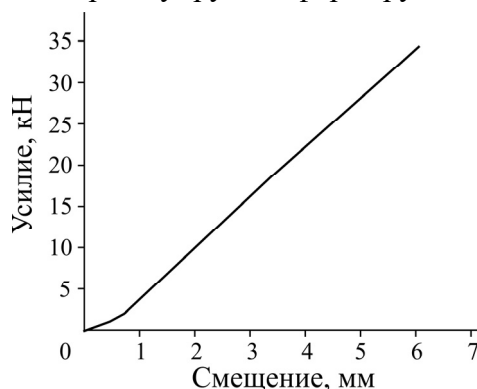


Рис. 2. Кривая “усилие – смещение” полиуретановых материалов

Исходя из этого, имеется возможность рассчитать количество накопленной остаточной энергии после удара, которая находится по формуле $E_s = \int_0^{S_0} F_s dS_s$. Здесь F_s — усилие удара на датчике остаточной энергии; S_s — деформация датчика остаточной энергии после удара.

Согласно закону сохранения энергии, можно получить формулу поглощенной энергии угольным образцом при ударе гидроцилиндром: $E_\alpha = E_0 - E_s$.

Данная установка имеет широкий спектр применения, так как позволяет изменять силу удара, размер образца и его формат фиксации в зависимости от задач проводимого исследования.

Подготовка образцов и порядок проведения испытаний. Уголь является естественной пористой геологической средой, которая по своим механическим свойствам отличается от других горных пород в широком диапазоне. Для испытаний взяты образцы угля из одной шахты с одинаковыми свойствами и приведены к стандартным размерам $50 \times 50 \times 100$ мм. Для цифрового спекл-анализа образцов на пробуренную сторону нанесены белые пятна. В конкретной ситуации при высоте угольного пласта 3.8 м проводилось бурение скважин с диаметром 150 мм и интервалом 1 м, в этом случае УОС составило 0.46 %.

Для соответствия реальным условиям бурения и проверке влияния различных способов расположения скважин рассмотрены следующие варианты: одиночные скважины в образцах с разными диаметрами; в варианте с несколькими скважинами их диаметр составлял 5 мм; две скважины в образце располагались вертикально или горизонтально; образцы с тремя и более скважинами различались расстоянием между рядами. Расположение скважин в образцах угля показано на рис. 3.

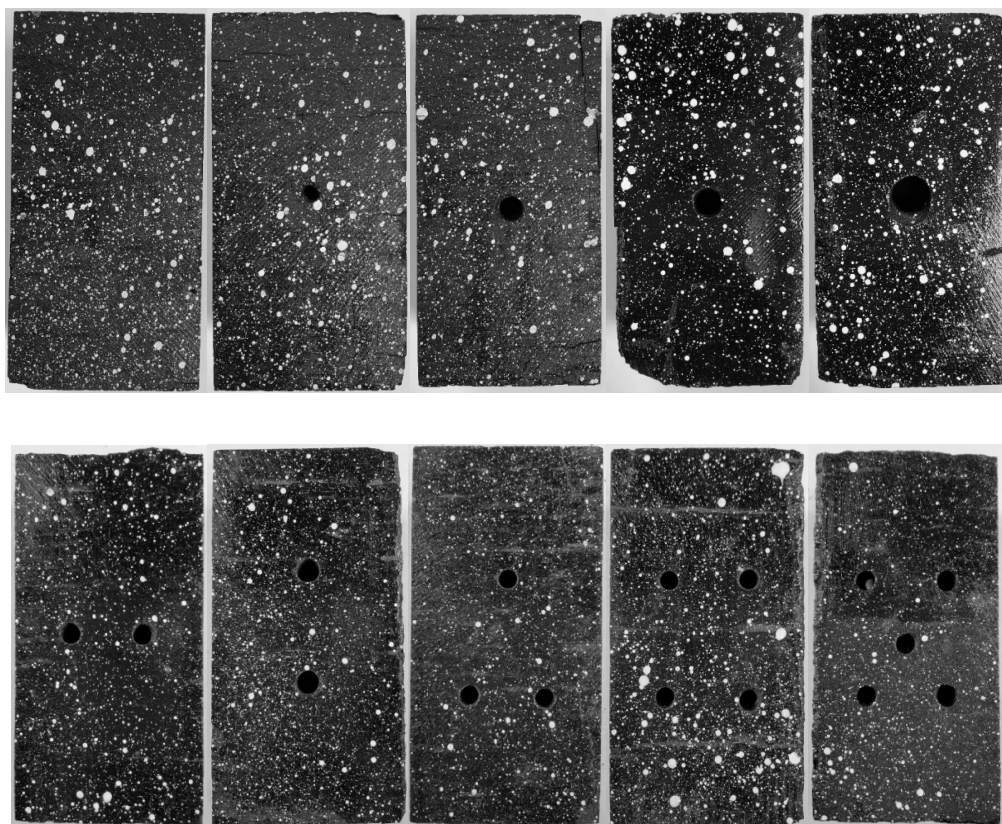


Рис. 3. Варианты расположения скважин в образцах угля

Ввиду того, что напряженное состояние пород вокруг выработки может изменяться по двум направлениям, для более реалистичного моделирования изготовлен механизм крепления образца, ограничивающий его с трех сторон. При этом одна сторона образца оставалась свободной. Сначала образец помещался в механизм крепления, затем проводилось бурение скважин на свободной стороне. В ходе испытаний выполнялась высокоскоростная съемка с частотой 1000 кадров/с.

ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ И БУФЕРНАЯ СПОСОБНОСТЬ УГЛЯ

На основании полученных данных с датчиков давления и смещения построены кривые “усилие – смещение”, соответствующие образцам с разными вариантами расположения скважин (рис. 4). В таблице представлены результаты расчета энергетических показателей на основе полученных кривых.

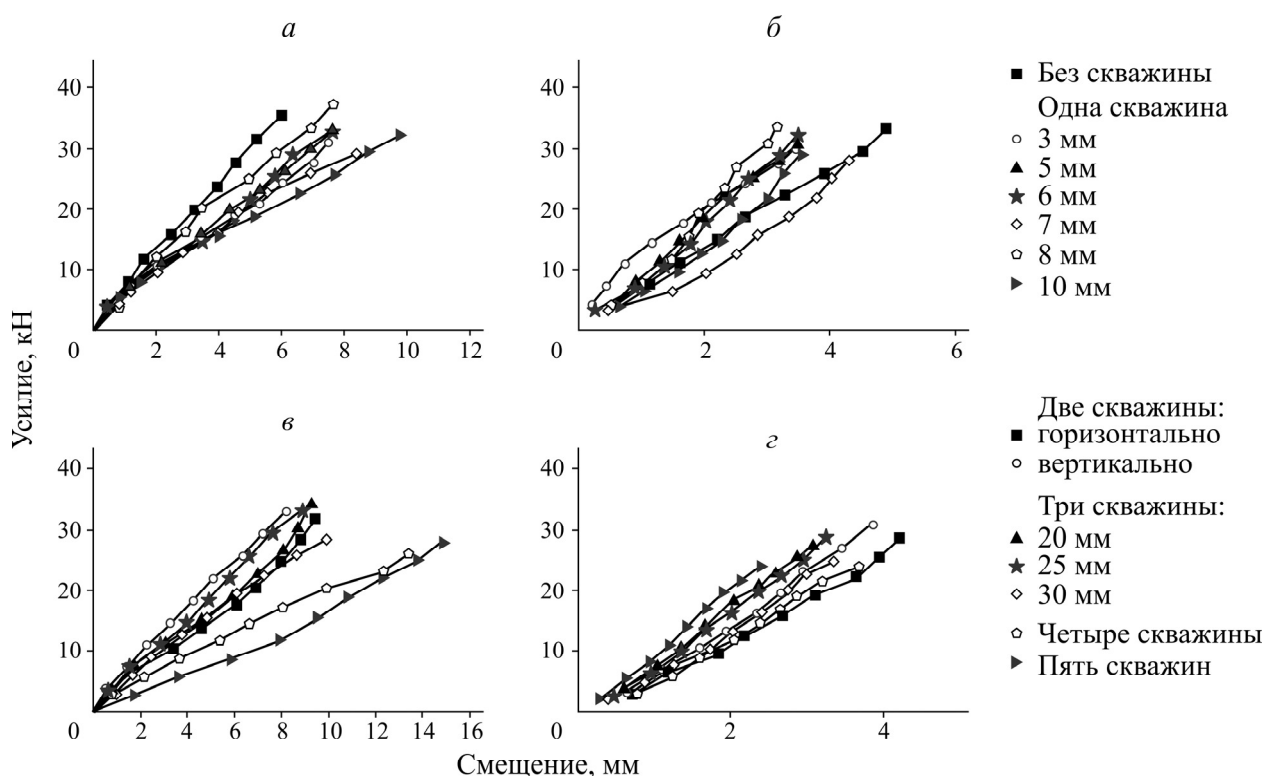


Рис. 4. Кривые “усилие – смещение” образцов угля без скважины, с одной скважиной, с несколькими скважинами; а, в — до удара; б, з — после удара

Влияние количества скважин в образце и удельного объема скважин на уровень поглощения энергии. Уровень поглощения энергии образцом угля без скважин составил 28.01 %. Это говорит о том, что естественные поры между частицами угля обладают определенной способностью поглощать энергию. Уровень поглощения энергии угольным образцом с одной скважиной Ø 5 мм составил 57.93 %. Последнее подтверждает, что скважина значительно повлияла на способность поглощать энергию.

Согласно рис. 5а, уровень поглощения энергии угольным образцом повышается при увеличении количества скважин. При этом также отмечается уменьшение интенсивности роста уровня поглощения энергии. Поглощение энергии образцом с 5 скважинами составило 85.09 %. Такое энергопоглощение свидетельствует о значительном изменении механических свойств угля.

Результаты расчета уровня поглощения энергии образцами угля с разными сочетаниями скважин

| Образец | УОС, % | Энергия, Дж | | | Уровень поглощения, % |
|------------------------------|-----------|-------------|------------|-------------|--------------------------|
| | | удара | остаточная | поглощенная | |
| Без скважины | 0 | 112.02 | 80.64 | 31.38 | 28.01 |
| Ø 3мм, одна скважина | 0.14 | 121.76 | 60.11 | 61.65 | 50.63 |
| Ø 5 мм, одна скважина | 0.39 | 128.97 | 54.26 | 74.71 | 57.93 |
| Ø 6 мм, одна скважина | 0.57 | 130.21 | 53.31 | 76.9 | 59.06 |
| Ø 7 мм, одна скважина | 0.77 | 141.59 | 50.46 | 91.13 | 64.36 |
| Ø 8 мм, одна скважина | 1.00 | 151.47 | 50.67 | 100.8 | 66.55 |
| Ø 10 мм, одна скважина | 1.57 | 173.86 | 43.66 | 130.2 | 74.89 |
| Две скважины, горизонтально | 0.78 | 139.86 | 52.25 | 87.61 | 62.64 |
| Две скважины, вертикально | 0.78 | 145.35 | 54.27 | 91.08 | 62.66 |
| Три скважины, интервал 20 мм | 1.17 | 148.55 | 39.44 | 109.11 | 73.45 |
| Три скважины, интервал 25 мм | 1.17 | 153.12 | 42.64 | 110.48 | 72.15 |
| Три скважины, интервал 30 мм | 1.17 | 154.93 | 37.52 | 117.41 | 75.78 |
| Четыре скважины | 1.56 | 189.86 | 40.84 | 149.02 | 78.49 |
| Пять скважин | 1.95 | 186.87 | 27.86 | 159.01 | 85.09 |

Из рис. 5б видно, что в диапазоне УОС 0–0.39 % наблюдается значительное увеличение уровня поглощения энергии, однако после 0.39 % скорость замедляется. В любом случае увеличение объема полостей является эффективной мерой повышения уровня поглощения энергии. Результаты показали, что чем больше значение УОС, тем значительнее повреждения образца при его ударном разрушении, т.е. чем больше запасено энергии в угле, тем больше ее высвобождается при разрушении.

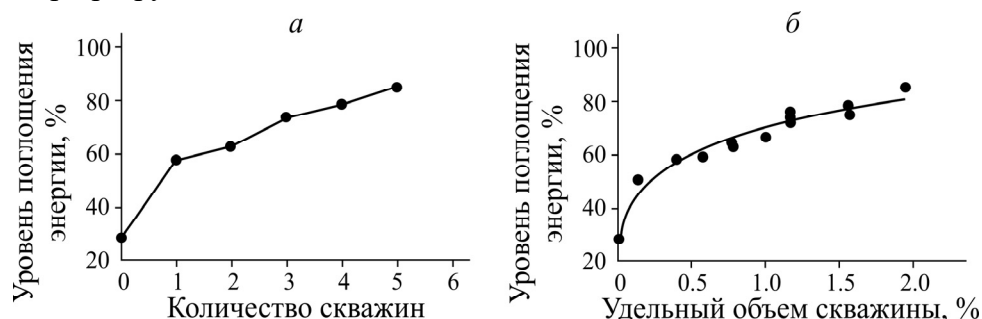


Рис. 5. Уровень поглощения энергии угольными образцами с разным количеством (а) и удельным объемом скважин (б)

Влияние расположения скважин на уровень поглощения энергии. На рис. 6 показан уровень поглощения энергии при различном расположении скважин в образце. Различие в уровне поглощения энергии между вертикальным и горизонтальным расположением двух скважин составило всего 0.02 %. Для образцов с тремя скважинами уровень поглощения энергии при интервале между верхним и нижним рядом 20 мм немного больше, чем при 25 мм, так как при меньшем интервале в момент удара скважины работают совместно друг с другом. Однако при интервале 30 мм уровень поглощения энергии больше, чем у других образцов. Это обусловлено легкостью образования трещин, поскольку скважины расположены близко к краям образца, что повышает уровень поглощения энергии. Тем не менее при изменении интервала между рядами скважин уровень поглощения энергии изменяется незначительно.

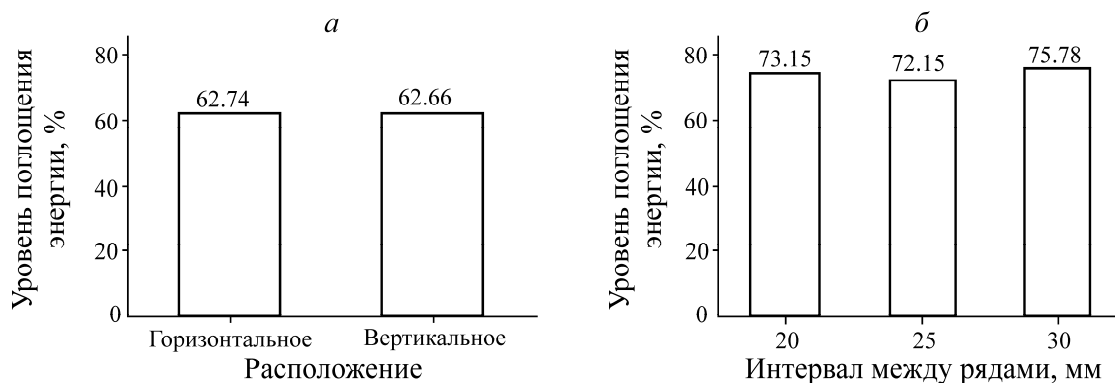


Рис. 6. Уровень поглощения энергии угольными образцами с разным расположением скважин: а — две скважины; б — три скважины

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ

Развитие деформации образцов угля. Деформация на поверхности образца исследована цифровым спекл-анализом [21–25]. Для анализа выбран участок, на котором рассмотрены деформации сдвига на интервале $t_1 \sim t_3$ и изучены параметры развития трещин. Так как процесс динамического нагружения является крайне быстрым, за отметку времени t_1 принят момент начала ударного приложения, за отметку времени t_3 — момент полномасштабного разрушения, а за отметку t_2 — момент времени, расположенный посередине между отметками t_1 и t_3 . Ввиду того, что механизм крепления образца частично закрывает его свободную сторону, деформация сдвига проанализирована на участке площадью 68×50 мм.

В момент удара внутри образца без скважин возникла небольшая равномерно распределенная деформация (рис. 7). По мере ударного нагружения началось образование трещин, формирование зон деформации в осевом направлении в середине образца. В конце нагружения в середине образовалась большая зона макроскопического разрушения. Обширная область деформации сформировалась внутри образца, в которой запасено значительное количество упругой энергии сжатия. После преодоления пиковой прочности происходит высвобождение накопленной энергии упругой деформации, которое сопровождается разрушением образца. Можно сделать вывод, что при ударном нагружении образца без скважин образуется большая область деформации и наблюдается низкий уровень рассеивания энергии.

Деформация образца с одной скважиной начинается вокруг скважины, а затем по мере развития нагружения она усиливается. Также на поверхности образуются другие равномерные области деформации. В конце нагружения происходит рассеивание энергии за счет разрушения поверхности образца. Наличие скважины изменило параметры и поле деформации, оно стало более сложным, при котором энергия в центральной части образца не накапливается. Также количество накопленной энергии уменьшается по мере развития трещин.

В образцах с двумя скважинами деформация также концентрируется вокруг скважин. В начале нагружения образуются равномерные области деформации, в конце — макротрещины. Аналогичный характер развития деформации отмечается и в образцах с тремя скважинами. Из-за неравномерности поля напряжений образцы имеют разную пиковую прочность, поэтому на одних и тех же временных отметках наблюдаются различные контуры деформации. Однако общий характер развития деформации одинаковый. При увеличении количества скважин внутри образца образуется большее число трещин, преобразующих области разрушения с внутренними поверхностями, на которых происходит рассеивание большего количества энергии удара.

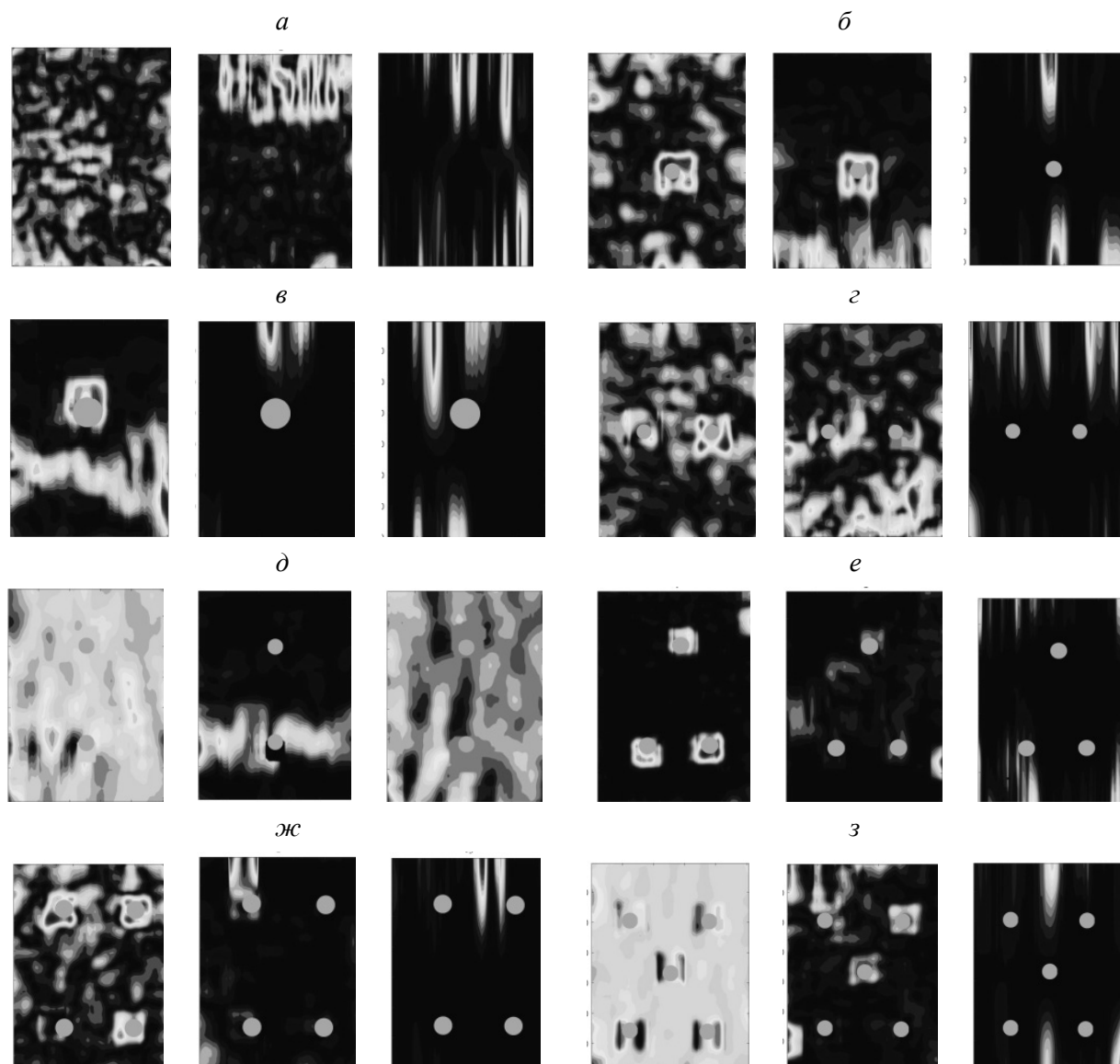


Рис. 7. Деформации сдвига угольных образцов с различными сочетаниями скважин в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 : без скважины (а); одна скважина: \varnothing 5 мм (б), \varnothing 10 мм (в); две скважины: горизонтально (г); вертикально (д); три скважины, интервал 30 мм (е); четыре скважины (ж); пять скважин (з)

Характер разрушения образцов угля. Параметры разрушения образца после удара отражают влияние скважины на способность поглощать энергию (т.е. чем больше количество крупных трещин в образце после удара при одинаковой динамической нагрузке, тем выше уровень поглощения энергии). На рис. 8 показано разрушение образцов с различным расположением скважин после удара. Из него следует, что морфология разрушения зависит от параметров скважин и характера их расположения. Анализ параметров разрушения показал следующее.

На свободной поверхности образца без скважины наблюдаются продольные трещины. На дальней от удара стороне образуются вторичные трещины, разделяющие образец на блоки. На свободной поверхности происходит значительное разрушение, однако степень фрагментации внутри образца достаточно низкая и он способен выдерживать осевую нагрузку после удара.

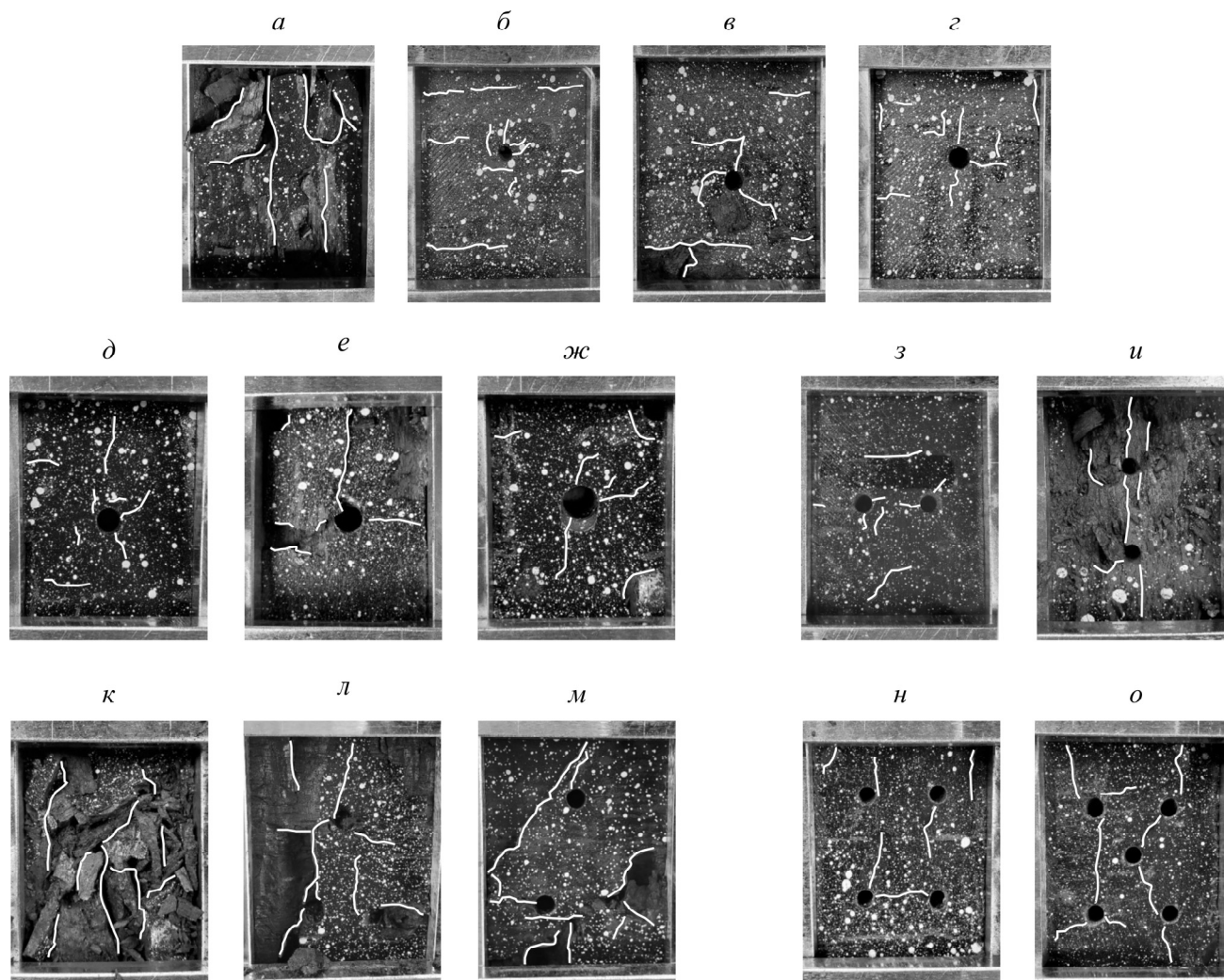


Рис. 8. Характер разрушения угольных образцов: без скважины (*а*); одна скважина: \varnothing 3 мм (*б*), \varnothing 5 мм (*в*), \varnothing 6 мм (*г*), \varnothing 7 мм (*д*), \varnothing 8 мм (*е*), \varnothing 10 мм (*ж*); две скважины, расположенные: горизонтально (*з*); вертикально (*и*); три скважины: интервал 20 мм (*к*), интервал 25 мм (*л*), интервал 30 мм (*м*); четыре скважины (*н*); пять скважин (*о*)

Степень разрушения образцов с двумя скважинами является умеренной. Вокруг скважин с диаметром 3, 5, 6 и 7 мм образуются микротрещины, развивающиеся по разным направлениям. В этом случае энергия удара расходуется на образование малых внутренних полостей. При диаметре скважин 8 и 10 мм образуются большие макротрещины, развивающиеся к дальней стороне образца. Характер разрушения поверхности свидетельствует о том, что при одной большой скважине энергия удара расходуется на образование на ней крупных макродефектов.

После ударного нагружения образцов с двумя скважинами образовались множественные вертикальные трещины с высокой степенью фрагментации. Образцы с тремя скважинами показали значительное повреждение образца. При интервале между скважинами 20 мм образец разделился на небольшие блоки в различных направлениях. При интервале между скважинами 25 мм произошло объединение трещин, при 30 мм — развитие трещин к краям образца. В образцах с 4 и 5 скважинами трещины объединились с высокой степенью фрагментации. В общем случае повреждение образца с большим количеством скважин достаточно значительное; часть энергии удара расходуется на его разрушение. Увеличение количества сква-

жин при одинаковой ударной нагрузке повышает степень повреждения образца, т. е. чем больше УОС, тем выше степень поверхностного повреждения и тем значительнее уровень поглощения энергии.

ВЫВОДЫ

Разработан экспериментальный стенд для определения энергопоглощения угольным массивом. В результате испытаний получена корреляционная зависимость между удельным объемом скважины и уровнем поглощения энергии угольным образцом. Установлено, что повышение удельного объема скважины (УОС) является эффективной мерой увеличения уровня поглощения энергии. Так, при увеличении УОС до 0.39 % происходит резкий рост уровня поглощения энергии с последующим снижением его интенсивности. Горизонтальное или вертикальное расположение двух скважин в образце почти не влияет на уровень поглощения энергии, как и изменение интервала между нижним и верхним рядом при трех скважинах в образце.

Бурение скважин изменяет характер разрушения угля. Образец без скважины разрушается по вертикальной линии на поверхности. Степень разрушения образца с одной скважиной после удара можно охарактеризовать как умеренную. При малых диаметрах скважин образуется большое количество микротрещин, при больших диаметрах возникают макротрещины. При увеличении пористости угля повышается степень повреждения поверхности и увеличивается уровень поглощения энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pan Yishan.** Rock burst in coal mine [M], Beijing: Sci. Press, 2018.
2. **Xu Lianman, Pan Yishan, Zeng Xianghua, Li Guozhen, Li Zhonghua.** Study on the energy-absorbing cushion performance of roadway surrounding rock crushing zone, J. China Coal Soc., 2015, 0 (6). — P. 1376–1382.
3. **Qi Qingxin, Li Yizhe, Zhao Shankun, et al.** Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system, Coal Sci. and Technol., 2019, Vol. 47, No. 09. — P. 1–40.
4. **Pan Yishan, Xiao Yonghui, Luo Hao, et al.** Study on safety of rockburst mine, J. China Coal Soc., 2023, Vol. 48, No. 05. — P. 1846–1860.
5. **Pan Yishan, Dai Lianpeng.** Theoretical formula of rock burst in coal mines, J. China Coal Soc., 2021, Vol. 46 (03). — P. 789–799.)
6. **Chen Tao, Ruan Xueyun, Wang Xiangyu, and Zhu Zhigang.** Analysis of influence factors of drilling pressure relief in preventing rock burst, Coal Technol., 2023, Vol. 42, No. 01. — P. 119–123.
7. **Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, et al.** State of the art review on mechanism and prevention coal bumps in China, J. China Coal Soc., 2014, Vol. 39, No. 02. — P. 205–213.
8. **Ma Binwen, Deng Zhigang, Zhao Shankun, Li Shaogang.** Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst, Coal Sci. and Technol., 2020, Vol. 48, No. 05. — P. 35–40.
9. **Wang Aiwen, Gao Qianshu, Pan Yishan, et al.** Bursting liability and energy dissipation laws of prefabricated borehole coal samples, J. China Coal Soc., 2021, Vol. 46, No. 03. — P. 959–972.
10. **Zhang S., Li Y., Shen B, et al.** Effective evaluation of pressure relief drilling for reducing rock bursts and its application in underground coal mines, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2019, Vol. 1147–16.
11. **Li Xibing, Zhou Zilong, Ye Zhouyuan, et al.** Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads, Chinese J. Rock Mech. and Eng., 2008, No. 200, No. 07. — P. 1387–1395.

12. **Dai Bing, Shan Qiwei, Chen Ying, et al.** Mechanical and energy dissipation characteristics of granite under cyclic impact loading, *J. Central South University*, 2022, Vol. 29, No. 01. — P. 116–128.
13. **Li Chengjie, Xu Ying, Zhang Yuting, et al.** Study on energy evolution and fractal characteristics of cracked coal-rock-like combined body under impact loading, *Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2019, Vol. 38, No. 11. — P. 2231–2241.
14. **Gong F., Yan J., Luo S., et al.** Investigation on the linear energy storage and dissipation laws of rock materials under uniaxial compression, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2019, Vol. 52, No. 11. — P. 4237–4255.
15. **Li Na.** Research on the mechanism of coal seam borehole to prevent rock burst, *Liaoning Technical University*, 2022.
16. **Ma Zhenqian, Jiang Yaodong, Li Yanwei, et al.** Experimental study on the influence of loading rate and confining pressure on coal energy evolution, *Chinese J. Geotech. Eng.*, 2016, Vol. 38, No. 11. — P. 2114–2121.
17. **Zhao Yixin, Gong Shuang, Hhuang Yaqiong.** Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading, *J. China Coal Soc.*, 2015, Vol. 40, No. 10. — P. 2320–2326.
18. **Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu.** Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test, *J. Min. and Safety Eng.*, 2013, Vol. 30, No. 03. — P. 401–407.
19. **Li Xibing, Gong Fengqiang, Gao Ke, et al.** Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads, *Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2010, Vol. 29, No. 02. — P. 251–260.
20. **Chen Yanlong, Li Ming, Pu Hai, et al.** Experimental study on dynamic mechanical characteristics of coal specimens considering initial damage effect of cyclic loading, *J. China Coal Soc.*, 2023, Vol. 48, No. 05. — P. 2123–2137.
21. **Song Yimin, Zhang Yue, Xu Hailiang, et al.** Temporal and spatial characteristics of displacement field of rock friction and sliding, *Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2018, Vol. 37, No. 08. — P. 1777–1784.
22. **Xu Hailiang, Ren Hehuan, Song Yimin.** Experimental study on the characteristics of the temporal and spatial evolution of the source and the rupture mechanism of red sandstone under uniaxial compression, *Experimental Mech.*, 2022, Vol. 37, No. 01. — P. 63–76.
23. **Lv Xiangfeng, Zhu Chenli, Song Yimin, et al.** Experimental study on the correlation between coal rock stability and deformation localization evolution, *Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2021, Vol. 40, No. 12. — P. 2466–2476.
24. **Song Yimin, Deng Linlin, Lv Xiangfeng, et al.** Study of acoustic emission characteristics and deformation evolution during rock frictional sliding, *Rock Soil Mech.*, 2019, Vol. 40, No. 08. — P. 2899–2906+2913.
25. **Song Yimin, Jiang Yaodong, Ma Shaopeng, et al.** Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure, *Rock Soil Mech.*, 2012, Vol. 33, No. 05. — P. 1352–1356+1365.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 20/II 2024

Принята к публикации 14/III 2024