РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2022

УДК 622.232:536.42

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИСКОВОГО РЕЗЦА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАГМЕНТАЦИИ ПОРОДЫ НА МАКРО- И МЕЗОСКОПИЧЕСКОМ УРОВНЕ

Энтони Коджо Амоа¹, Кан-лэй Сун¹, Хай-цин Ян^{1,2}

¹Государственная главная лаборатория по контролю чрезвычайных ситуаций на угольных шахтах, Чунцинский университет, E-mail: sklei@cqu.edu.cn, 400045, г. Чунцин, , Китай
²Национальная платформа разработки технологий и инноваций для автоматического мониторинга геологических угроз, Чунцинский исследовательский центр автоматического мониторинга геологических угроз, 400042, г. Чунцин, Китай

Проведены лабораторные испытания дискового резца на образцах из аргиллита с целью исследования влияния термомеханического воздействия на фрагментацию породы. Установлено, что во время процесса резания в области разрушения породы из-за теплоты трения образуется большое количество микротрещин и пор. Выполнен анализ соотношений между удельной энергией и состоянием поверхности образцов из аргиллита на мезоскопическом уровне. Выявлено, что термомеханическое воздействие значительно повышает эффективность разрушения породы. Полученные результаты могут использоваться для увеличения ресурса резцов, сокращения проектных затрат и рисков, возникающих при прокладке тоннеля с помощью тоннелепроходческого комплекса.

Термомеханическое воздействие, распространение трещины, показатель пространственного углубления (FPI), удельная энергия, дисковый резец

DOI: 10.15372/FTPRPI20220205

В связи с повышающимся спросом на строительство объектов инфраструктуры при прокладке тоннелей широко применяется тоннелепроходческий комплекс (ТПК), который отличается высокой эффективностью экскавации и безопасностью выполнения работ [1, 2]. В ходе работы ТПК, помимо распространения трещин под воздействием режущей головки, неизбежно выделяется теплота из-за трения резцов о породу [3], что приводит к повышению температуры как резца, так и породы. В общем случае при увеличении температуры физические и механические свойства породы изменяются [4]. Для повышения КПД тоннелепроходческого комплекса необходимо изучение характеристик фрагментации породы с учетом термомеханического воздействия.

Большое количество научных работ посвящено анализу процесса механического разрушения породы дисковым резцом. Факторы, влияющие на эффективность проходки тоннелей, могут быть разделены на две группы. В первую входят параметры породы, т. е. физические и механические свойства массива, а также ориентация и расположение отдельностей [5–10]. Для

№ 2

Работа выполнена при поддержке Фонда естественных наук Китая (№ 51879016) и Фонда студенческих исследований и инноваций г. Чонкин, Китай (грант СҮВ19015).

оценки производительности ТПК используются следующие параметры нетронутой породы: прочность на одноосное сжатие и растяжение, истираемость по Таберу, хрупкость и коэффициент скорости бурения [11–15]. В [16] процесс разрушения нетронутой породы разделен на две стадии: внедрение резца ТПК в породу и образование обломков породы между двумя резцами. В случае слоистой структуры массива распределение отдельностей оказывает значительное влияние на размер кусков породы, образованных между резцами, а также на эффективность резания породы [17]. На основе анализа результатов большого числа проходческих работ с использованием ТПК сделан вывод о том, что сокращение интервала между отдельностями положительно влияет на внедрение резца в породу [18]. Эффективность разрушения породы достигает максимума при ориентации отдельностей 60°.

Другой группой факторов влияния на производительность ТПК являются непосредственно параметры машины, включая усилие подачи и крутящий момент режущей головки, плотность размещения резцов и скорость углубления резца в породу [19–22]. Эксплуатационные параметры ТПК устанавливаются исходя из геологических условий местности, т. е. значения усилия подачи, крутящего момента, плотности размещения резцов и должны регулироваться на основе свойств породы.

В рамках теоретического исследования температуры резания разработана модель расчета теплопроводности дискового резца и проанализированы факторы влияния [23]. Характеристики распределения температуры дискового резца показали, что температура резания на кромке резца является наибольшей. С целью получения фактической температуры дискового резца в [24] представлен новый локальный метод измерения, результаты которого позволили провести анализ процесса разрушения породы с помощью ТПК. В [25] изучены характеристики разрушения породы дисковым резцом при различных значениях температуры породы и численно смоделирован механизм взаимодействия между резцом и породой. Обнаружено, что повышение температуры положительно влияет на эффективность резания за счет снижения прочностных свойств породы.

В настоящей работе представлен стенд с дисковым резцом для исследования влияния термомеханического воздействия на характеристики фрагментации породы при проходке тоннелей. В ходе испытаний с помощью инфракрасной камеры отслеживалось температурное поле дискового резца и породы в процессе ее разрушения. Стереомикроскопом фиксировались мезоскопические изменения на поверхности породы, такие как трещины и прослойки. Для оценки влияния термомеханического воздействия на эффективность разрушения породы полученная в ходе испытаний удельная энергия, затрачиваемая на разрушение, сравнивалась с расчетными результатами модели, построенной в Колорадской горной школе [26].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Благодаря высокой чувствительности к изменению температуры, в качестве породы для экспериментального образца выбран аргиллит, взятый из тоннелестроительной площадки в г. Чунцин. Физические и механические свойства образца аргиллита размером $80 \times 80 \times 100$ мм: плотность 2.545 г/см³; удельная теплоемкость 0.8 кДж/(кг·°С); модуль упругости $E_e = 1.79$ ГПа; трещиностойкость $K_{Ic} = 0.1935$ МПа·м^{1/2}.

На рис. 1*а* представлена специально разработанная лабораторная бурильная установка, которая была использована для испытаний. Она состоит из одного дискового резца, двух направляющих, грузиков, электродвигателя и инфракрасной камеры Zenmuse XT. Дисковый резец диаметром 70 мм изготовлен из стали H13 (аналог 4X5MФ1C) (рис. 1*г*) и имеет коэффициент геометрического подобия 6.2. Геометрические и физические параметры резца: диаметр 70 мм; угол конической кромки 60°; скорость вращения 70 об/мин; коэффициент трения 0.2; удельная теплоемкость 0.46 кДж/(кг.°С).



Рис. 1. Лабораторная установка для испытания: *а* — схема устройства установки; *б* — инфракрасная камера; *в* — образец из аргиллита; *г* — форма дискового резца

Во время испытаний образец породы крепится на двух ползунках, которые могут свободно скользить вдоль направляющих под действием нормально приложенной вертикальной силы, величина которой регулируется грузиками. Также на блоке породы располагается прокладка для преобразования точечной нормально приложенной силы в равномерно распределенную. Для регистрации температурного поля резца и блока породы использовалась инфракрасная камера Zenmuse XT с разрешением 640×512 пикселей, диапазоном измерения 40–550 °C и точностью измерения 0.1 °C. Дисковый резец закреплен на вращающейся оси, которая приводится в движение электродвигателем с максимальной мощностью 400 Вт. Учитывая среднюю линейную скорость дискового резца при реальной проходке тоннелей, скорость вращения дискового резца установлена на значении 70 об/мин.

В ходе эксперимента выполнен ряд испытаний резания породы с различными нормально приложенными силами (усилиями подачи), которые моделируют процесс прокладки тоннеля. Перед началом испытаний на расстоянии 0.5 м от бурильной установки устанавливалась инфракрасная камера. Затем между направляющими и прокладкой располагался образец из аргиллита. Усилие подачи при резании увеличивалось за счет добавления дополнительных грузиков. Согласно стандарту истираемости, AVS-теста [27] или теста Сиверса [18], масса грузиков выбрана 10 и 20 кг соответственно. Таким образом, для каждого образца фиксировалась нормально приложенная к дисковому резцу сила 50, 100, 150, 200 и 250 Н. После завершения подготовительных действий осуществлялся запуск электродвигателя.

Размер углубления резца в образец определялся путем измерения вертикального смещения прокладки вниз в течение первых 30 мин с интервалом 5 мин. После того как коническая часть резца полностью входила в образец, скорость углубления снижалась. В следующие 30 мин вертикальное смещение прокладки измерялось с интервалом 10 мин, последнее измерение выполнялось спустя 1 ч 20 мин с момента начала испытания. Температурные поля образца из аргиллита и дискового резца измерялись инфракрасной камерой каждые 5 мин. Продолжительность каждого испытания 80 мин. Затем определялись общий вес обломков и мезоскопические характеристики поверхности прореза с помощью стереомикроскопа.

АНАЛИЗ МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ АРГИЛЛИТА

В процессе проходки тоннеля массив горных пород разрушается дисковым резцом под воздействием нормально приложенной силы и крутящего момента режущей головки. Помимо механического воздействия, возникающая при трении теплота также положительно влияет на распространение трещин [28] и, следовательно, на производительность ТПК [28]. С целью исследования влияния термомеханического воздействия на разрушение породы с микроскопической и макроскопической точек зрения изучены характеристики поверхности прореза при различных значениях усилия подачи, а также эмпирический показатель проникания (FPI).

Температурные поля образцов породы и дискового резца в процессе резания. Инфракрасной камерой зафиксированы изменения температуры образцов из аргиллита и дискового резца при углублении последнего в блок породы. На рис. 2 представлены температурные поля образцов из аргиллита в момент окончания испытания при следующих значениях усилия подачи: 50, 100, 150, 200, 250 Н и температурное поле дискового резца при усилии подачи 250 Н после испытания. Согласно результатам, максимальная температура образцов из аргиллита при различном усилии подачи составила 70.6, 86.4, 101.6, 112.8, 124.5 °C соответственно. Максимальная температура резца достигала 128.2 °C. Наибольшая температура блоков породы в каждом испытании наблюдалась в области контакта резца и породы, так как здесь из-за трения выделялась теплота [29].

На рис. 3 показано изменение максимальной температуры блока породы в течение испытания. Согласно наблюдениям, изменения температуры имеют схожий тренд при различных значениях усилия подачи. Сначала температуры изменяется линейно 1-10 мин. Затем скорость роста температуры замедляется. Спустя 40 мин тренд температуры принимает устойчивое положение. Из рис. За видно, что максимальная температура аргиллита достигает 124.5 °C при усилии подачи 250 Н. Повышение усилия подачи в процессе разрушения породы приводит к образованию бо́льшего количества теплоты из-за трения между резцом и породы, что в результате сказывается на повышении температуры породы.



Рис. 2. Температурные поля образцов из аргиллита при следующих значениях усилия подачи: 50 (*a*); 100 (*б*); 150 (*в*); 200 (*г*); 250 H (*d*); температурное поле резца при усилии подачи 250 H (*e*)

Во время разрушения породы тепловая энергия трения обычно рассматривается как энергия, которая расходуется впустую [23]. Однако в результате испытания обнаружено, что теплота трения может быть использована для разрушения породы и повышения скорости углубления резца. На рис. 36 показано изменение скорости углубления резца с течением времени. Видно, что скорость углубления достигает минимума спустя 30 мин после начала резания. К этому времени температура имеет максимальное значение (рис. 3*a*). Затем скорость углубления немного увеличивается. На момент 80 мин она повышается на 55 % по сравнению с наименьшим значением. Это свидетельствует о том, что большое количество теплоты, образованное в процессе трения между резцом и породой, не рассеивается полностью, а оказывает влияние на разрушение породы.



Рис. 3. Изменение максимальной температуры образцов из аргиллита (*a*) и скорости углубления резца (б) с течением времени при различных усилиях подачи

Влияние термомеханического воздействия на распространение трещин. Распространение трещин является важным процессом при разрушении породы. Оно прямым образом влияет на степень фрагментации породы в ходе проходки тоннеля. С помощью стереомикроскопа OLYMPUS SZX16 изучены поверхности прорезов на образцах из аргиллита для выявления комбинированного влияния механического движения резца и теплоты трения на характер распространения трещин.

На рис. 4 приведены микрофотографии поверхности прореза при 100-кратном увеличении. При усилии подачи 50 Н поверхность прореза достаточно гладкая и наблюдаются лишь несколько микротрещин (рис. 4*a*). При увеличении усилия подачи количество микротрещин резко возрастает. Отдельные трещины развиваются и соединяются с другими. Образуется трещиноватая структура образцов из аргиллита (рис. 4*б*, *в*).



Рис. 4. Распределение трещин на фронтальной поверхности прореза при 100-кратном увеличении: 50 H (*a*); 150 H (*б*); 250 H (*в*)

В ходе предыдущих исследований установлено, что порода в области разрушения в процессе резания подвергается в основном деформации сдвига; ниже резца образуются тонкие гладкие трещины на поверхности породы. Из-за выделения теплоты в результате трения между резцом и породой температура аргиллита повышается, в результате чего происходит испарение воды и неравномерная деформация сжатия внутри породы. Это приводит к быстрому развитию множества микротрещин и пор на поверхностях прореза. При увеличении усилия подачи поверхность аргиллита становится более поврежденной. Следовательно, термомеханическое воздействие будет усиливать распространение трещин и разрушение массива породы в процессе проходки тоннеля.

Для количественной оценки процесса распространения микротрещин снимки подверглись цифровой обработке. Полученные статистические результаты сведены в табл. 1. Обнаружено, что изменение количества и совокупной длины трещин при различном усилии подачи обладает схожими трендами. При усилии подачи 50 Н количество трещин составляет 5, а совокупная их длина 4161 мкм. При значениях усилия подачи 150 и 250 Н количество трещин увеличивается приблизительно на 220 и 460%, а совокупная длина на 260 и 404% соответственно. Максимальная температура аргиллита при значениях усилия подачи 50, 150 и 250 Н составила 70.6, 101.6 и 124.5 °C соответственно.

Усилие подачи, Н	Количество трещин	Совокупная длина трещин, мкм	
50	5	4161.1	
150	16	14977.7	
250	30	20976.8	

ТАБЛИЦА 1. Количество трещин и их длина при различных усилиях подачи

Механизм влияния термомеханического воздействия на распространение микротрещин может быть представлен в виде трех пунктов:

• микротрещины продолжают увеличиваться при механическом воздействии усилия подачи и вращения резца. Микротрещины на поверхности расширяются из-за трения между дисковым резцом и породой. При увеличении усилия подачи сила давления режущего диска на породу превышает его совокупную прочность. В этом случае микротрещины быстро распространяются, приводя к прогрессирующему разрушению массива;

• трение между резцом и породой повышает температуру последней, что приводит к испарению воды. Испарение воды в аргиллите ослабляет когезионную связь между частицами, значительно снижая его механические свойства — твердость, прочность и т. д. Таким образом, даже небольшое усилие подачи резца способно достичь совокупной прочности аргиллита на поздней стадии испытания, расширяя трещины и делая породу более уязвимой для повреждения;

• повышение температуры аргиллита также приводит к возникновению температурных напряжений внутри массива, в результате чего образуется множество микротрещин и пор. Температурные напряжения нарушают изначальное распределение напряжений, расширяя уже имеющиеся трещины и генерируя новые микротрещины. Чем выше усилие подачи, тем больше температура аргиллита в конце испытания. Внутри породы образуются микротрещины при совместном воздействии механического усилия и температурных напряжений. Образованные микротрещины в конечном итоге приводят к возникновению трещиноватой структуры породы.

Влияние термомеханического воздействия на буримость аргиллита. Во время резания на поверхности прореза образуется множество полосок. Плотность их размещения можно использовать для измерения скорости углубления резца и сопротивляемости его внедрения.

На рис. 5 представлена микроструктура образца на одной стороне прореза при 100-кратном увеличении. После цифровой обработки изображения полосок отчетливо видны. При усилии подачи 50 Н плотность полосок достаточно велика, это свидетельствует о том, что аргиллит обладает большей сопротивляемостью внедрению. При увеличении усилия подачи до 250 Н плотность полосок резко снижается, демонстрируя, что резец легче углубляется в образец из аргиллита, который в этом случае обладает меньшей сопротивляемостью внедрению.



Рис. 5. Морфологическая структура стороны прореза при 100-кратном увеличении: 50 H (*a*); 150 H (*б*); 250 H (*в*)

Для оценки влияния термомеханического воздействия на сопротивляемость внедрению введем эмпирический показатель проникания (FPI). Данный показатель ранее использовался в [5] и широко применяется для оценки буримости массива горных пород. Определяется он следующим образом [30–33]:

$$FPI = \frac{F_n}{PR},$$

где *F_n* — усилие подачи, H; *PR* — скорость углубления мм/об.

Если порода прочная и резцу сложно ее разрушить, то для достижения приемлемой скорости углубления необходимо высокое усилие подачи, при этом значение FPI высокое. С другой стороны, слабая порода с трещиноватой структурой легко бурится резцом, в этом случае FPI имеет низкое значение.

В табл. 2 приведены значения углубления резца через равные промежутки времени при различном усилии подачи. Размер углубления определен путем измерения вертикального смещения прокладки образца породы вниз. С учетом размера углубления получена средняя скорость резца на разных временных отрезках. Далее рассчитаны значения FPI для аргиллита. Результаты показаны на рис. 6.

При одном и том же значении усилия подачи в начале испытания контактное давление между диском резца и образцом из аргиллита очень высоко из-за относительно маленькой площади контакта. В этом случае наблюдается высокая скорость углубления, а значение FPI является наименьшим. При увеличении углубления резца в образец сопротивляемость аргиллита растет, что делает его более сложным для резания. Происходит повышение значения FPI.

Время, мин	Углубление, мм					
	50 H	100 H	150 H	200 H	250 H	
0	0	0	0	0	0	
5	1.0	1.5	2.3	3.0	4.0	
10	2.0	2.5	3.3	5.2	7.2	
15	2.9	4.0	4.6	6.9	10.1	
20	4.1	4.8	5.5	7.5	11.8	
25	5.2	6.0	6.7	8.7	12.4	
30	6.2	7.0	7.6	9.9	13.2	
40	7.0	8.0	8.6	11.2	14.8	
50	8.0	9.0	9.8	12.3	16.3	
60	9.0	10.1	11.2	14.5	18.1	
80	11.2	13.2	14.2	18.3	22.0	

ТАБЛИЦА 2. Значения углубления резца при различных усилиях подачи

Значение FPI достигает пика спустя 30 мин после начала резания, а в последующие 20 мин оно существенно уменьшается (рис. 6). Это объясняется термомеханическим воздействием на разрушение породы в ходе резания. Как показано на рис. 3*a*, при продолжительном воздействии усилия подачи температура аргиллита достигает максимума и остается устойчивой до последней стадии испытания. Согласно [4], модуль упругости и пиковая прочность аргиллита постепенно уменьшаются при увеличении температуры. На последней стадии испытания снижение механических параметров аргиллита обеспечивает более эффективное разрушение.



Рис. 6. Изменение FPI при различных усилиях подачи с течением времени

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДЫ

В ходе работы ТПК процесс резания массива горных пород дисковым резцом представляет собой процесс преобразования энергии на микроскопическом уровне. В данном разделе для изучения влияния термомеханического воздействия на эффективность разрушения породы выполнен анализ доли участия каждого вида энергии в масштабах поверхности аргиллита на мезоскопическом уровне, в рамках всего образца из аргиллита и в рамках дискового резца.

Энергетический анализ поверхности на мезоскопическом уровне. На мезоскопическом уровне изучение поверхности ограничено областью наблюдения стереомикроскопом при 100-кратном увеличении. Следует отметить, что в совокупную энергию разрушения поверхности на мезоскопическом уровне входит энергия распространения трещин и энергия трения, потери других видов энергии не учитываются.

Удельная энергия распространения трещин E_s^c характеризует энергию, затрачиваемую на распространение трещин, при разрушении одной единицы объема породы. Энергия, высвобождаемая в ходе распространения трещин, необходима для разрушения породы [34]. На мезоскопическом уровне поверхности она определяется следующим образом:

$$E_s^c = \frac{G_{ic}l_cB}{V} = \frac{K_{lc}^2l_cB}{E_cV},$$

где K_{lc} — трещиностойкость, которая показывает количество энергии, необходимое для создания новой поверхности; E_e — модуль упругости аргиллита; G_{ic} — скорость высвобождения энергии; B — ширина прореза; l_c — совокупная длина трещин; V — разрушенный объем образца из аргиллита.

Трение образуется на поверхности контакта дискового резца и породы. Значение удельной энергии трения рассчитывается как

$$E_s^f = \frac{qst}{V} = \frac{F_f V_f st}{LZV}.$$

Здесь F_f — сила трения, действующая на поверхности контакта дискового резца и породы; V_f — скорость скольжения кромки резца по породе; L — длина контакта трения между породой и кромкой дискового резца; Z — ширина внешней кромки резца, приникающего в образец из аргиллита; q — количество теплоты, выделившейся на поверхности трения за единицу времени и на единице площади; s — площадь поверхности прореза, наблюдаемая стереомикроскопом при 100-кратном увеличении; t — время испытания.

В случае известного усилия подачи F_n и скорости вращения дискового резца ω сила трения F_f и скорость скольжения V_f во время углубления резца в породу определяются следующим образом:

$$F_{f} = \mu \frac{F_{n}}{2\sin\frac{\alpha}{2}},$$

$$V_{f} = \pi d\omega,$$
(1)

где μ — коэффициент трения между дисковым резцом и аргиллитом; α — угол конической кромки резца; d — диаметр резца; ω — скорость вращения резца.

Для простоты вычислений поперечное сечение резца упрощено до *V*-образной формы. На рис. 7 показана схема распределения сил на кромке резца под воздействием усилия подачи.



Рис. 7. Схема распределения сил в момент углубления резца в породу

На рис. 8*а* приведены результаты удельной энергии распространения трещин и удельной энергии трения относительно FPI при разных значениях усилия подачи. По двум линиям аппроксимации видно, что удельная энергия распространения трещин и удельная энергия трения уменьшаются при увеличении FPI: E_s^c уменьшается от 220 до 100 МДж/м³, E_s^f — от 180 до 40 МДж/м³. Видно, что увеличение усилия подачи сокращает потребление энергии разрушенной породой, что повышает разрушающую эффективность дискового резца.



Рис. 8. Сравнение удельных энергий распространения трещин E_s^c и трения E_s^f (*a*); E_s^c / E_s и E_s^f / E_s (*б*), определенных при мезоскопическом анализе поверхности прореза в образце из аргиллита (E_s — совокупное потребление энергии)

Согласно термомеханическому воздействию, повышение температуры благоприятно влияет на снижение механических свойств массива пород. На рис. 86 представлены доли удельных энергий E_s^c и E_s^f в составе совокупного потребления энергии. При увеличении FPI E_s^c / E_s увеличивается от 55 до 70%, в то время как E_s^f / E_s постоянно снижается, что свидетельствует о влияниеи термомеханического воздействия на разрушение породы. Таким образом, в процессе углубления резца в породу увеличение усилия подачи делает термомеханическое воздействие более заметным. Оно является благоприятным для разрушения породы и повышает КПД.

Энергетический анализ образца из аргиллита и дискового резца. В ходе испытаний дисковый резец разрезает породу в вертикальном направлении. Этот процесс определяет полную входную энергию. В состав выходной энергии в основном входит энергия трения между дисковым резцом и массивом, а также энергия распространения трещин в массиве породы.

Во время испытания происходят изменения температуры дискового резца и образца из аргиллита из-за трения между ними. Предположим, что трение между резцом и аргиллитом преобразуется в теплоту и пренебрежем потерями этой теплоты в окружающий воздух. В этом случае удельная энергия трения E_s^f может быть рассчитана на основе распределения температурного поля:

$$E_s^f = \frac{Cm\Delta t}{V},$$

где C — удельная теплоемкость; m — масса блока породы; Δt — разница температур блока до и после испытания.

Удельная энергия проходки тоннеля определяется как совокупная энергия, поступающая от усилия подачи и вращения, для разрушения единицы объема породы в процессе проходки тоннеля [34]. Входную энергию в рамках проводимого модельного испытания можно разделить на две части: работа усилия подачи и работа силы вращения. Одна часть энергии расходуется на разрушение породы резцом, другая часть рассеивается из-за работы трения, которая повышает температуру резца и аргиллита. Удельная энергия проходки тоннеля рассчитывается по формуле

$$E_{s}^{t} = \frac{F_{n}h + F_{f}l_{r}}{V},$$

$$V = abh,$$
(2)

где h — углубление резца после окончания испытания; F_f — сила трения, воздействующая на поверхность контакта между дисковым резцом и аргиллитом; l_r — длина контакта кромки резца с породой; V — объем обломков породы; a, b — длина и ширина обломков породы.

В формуле (2) расчет F_f аналогичен формуле (1), а l_r вычисляется следующим образом:

$$l_r = \pi d\omega t$$
,

здесь d — диаметр дискового резца; ω — скорость вращения резца; t — продолжительность испытания.

Для расчета удельной энергии аргиллита и дискового резца с помощью инфракрасной камеры измерена их температура. Для того чтобы рассчитать объем температурных круговых слоев на изображении температурного поля, каждый слой упрощен до части эллипсоида вращения с изменяющимися размерами с помощью цифровой обработки изображения. Применение данного метода для анализа изображений температурного поля описано в [35].

В рамках проведенного испытания износ резца крайне мал, поэтому энергия, затраченная на него, не учитывалась. С учетом пренебрежения потерями теплоты в окружающую среду выходная энергия включает в себя энергию трения между резцом и породой и энергию дробления массива. Удельная энергия дробления массива E_s^r является частью удельной энергии проходки тоннеля и равна разности удельной энергии проходки тоннеля и удельной энергии трения.

Для дополнительного доказательства влияния термомеханического воздействия на повышение эффективности разрушения породы значения усилия подачи резца и удельной энергии проходки тоннеля, полученные в результате испытаний, сравнивались с расчетными значениями CMS-модели [26]. CMS-модель используется для оценки результирующей силы *F*_t, действующей во время работы дискового резца [26]:

$$F_t = \int_0^{\varphi} TRp d\theta , \qquad (3)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{R - h}{R},\tag{4}$$

$$p = p_0 \left(\frac{\theta}{\varphi}\right)^{\psi},\tag{5}$$

55

где φ — угол половины сектора дискового резца, находящегося в контакте с породой; T — ширина кромки резца; R — радиус резца; h — углубление; p — напряжение в любой точке, расположенной в области дробления; p_0 — базовое напряжение в области дробления непосредственно под резцом ($\theta = \varphi$); θ — текущее значение угла; $\psi = 0.1$ — постоянная.

После подстановки (4) и (5) в (3) получаем формулу для расчета результирующей силы:

$$F_{t} = \int_{0}^{\varphi} TRp d\theta = \int_{0}^{\varphi} TRp_{0} \left(\frac{\theta}{\varphi}\right)^{\varphi} d\theta = \frac{TRp_{0}\varphi}{1+\psi}.$$
(6)

Базовое напряжение в области дробления может быть найдено следующим образом [26]:

$$p_0 = C_3 \sqrt{\frac{S\sigma_c^2 \sigma_t}{\varphi \sqrt{RT}}}, \qquad (7)$$

здесь $C \approx 2.12$; *S* — расстояние между резцами на режущей головке, переменная величина CSM-модели [26]. При рассмотрении одного резца принято, что расстояние между резцами *S* равно 20 величинам углубления; $\sigma_c = 1.2$ MPa — прочность породы на сжатие; $\sigma_t = 0.2$ MPa — прочность породы на растяжение.

Путем объединения (6) и (7) получим окончательные формулы для расчета нормально приложенного усилия подачи и силы вращения резца:

$$F_{n} = F_{t} \cos \frac{\varphi}{2} = C \frac{TR\varphi}{1+\psi} \sqrt[3]{\frac{S\sigma_{c}^{2}\sigma_{t}}{\varphi\sqrt{RT}}} \cos \frac{\varphi}{2},$$
$$F_{r} = F_{t} \sin \frac{\varphi}{2} = C \frac{TR\varphi}{1+\psi} \sqrt[3]{\frac{S\sigma_{c}^{2}\sigma_{t}}{\varphi\sqrt{RT}}} \sin \frac{\varphi}{2}.$$

На рис. 9*а* представлены составляющие совокупной удельной энергии, полученные в результате испытаний. По линиям аппроксимации видно, что при увеличении FPI E_s^r уменьшается от 450 до 200 МДж/м³, а E_s^f — от 300 до 75 МДж/м³. Кроме того, соотношение E_s^r / E_s^t увеличивается от 60 до 70% (рис. 96). Эти результаты согласуются с результатами анализа поверхности на мезоскопическом уровне. Также они объясняют с макроскопической точки зрения то, что термомеханическое воздействие, возникающее в процессе разрушения породы, способно увеличить долю использования энергии и значительно повысить эффективность разрушения породы резцом.



Рис. 9. Сравнение удельных энергий распространения трещин E_s^r и трения E_s^f (*a*); E_s^r / E_s^t и E_s^f / E_s^t (*б*), определенных по экспериментальным данным внедрения дискового резца в образец из аргиллита

На рис. 10*а* видно, что усилие подачи, полученное как в ходе испытаний, так и с помощью CSM-модели, увеличивается при росте углубления. При сравнении результатов испытаний и CSM-модели выявлено, что при одинаковом углублении опытное значение меньше смоделированного более чем на 20%. Это означает, что термомеханическое воздействие позволяет достичь такой же уровень эффективности разрушения породы, но при меньших усилиях подачи по сравнению с традиционными прогнозирующими методами, такими как CSM-модель. Однако простое увеличение механического усилия подачи может повысить износ резца и эксплуатационные затраты, что не позволит достичь желаемого уровня эффективности прокладки тоннеля.

Согласно рис. 10*б*, удельная энергия проходки тоннеля, полученная с помощью CSM-модели, значительно превышает результаты испытаний. Основной причиной является то, что при моделировании значения σ_c и σ_t приняты постоянными без учета термомеханического воздействия на механические свойства массива. Таким образом, традиционная модель прогнозирования удельной энергии Колорадской горной школы дает завышенные результаты. Учет термомеханического воздействия нического воздействия при прокладке тоннелей может значительно сократить потребление энергии и повысить эффективность разрушения породы.



Рис. 10. Сравнение усилия подачи резца (*a*) и удельной энергии проходки тоннеля (б), полученных опытным путем и CSM-моделью

На основании полученных в ходе испытаний результатов и их дальнейшего сравнения с результатами CSM-модели можно сделать вывод о том, что термомеханическое воздействие, возникающее в процессе разрушения породы резцом, способно значительно повысить эффективность разрушения породы и КПД тоннелепроходческого комплекса. При этом традиционная прогнозирующая CSM-модель не учитывает термомеханическое воздействие на процесс работы резца.

выводы

Проведены испытания углубления вращающегося дискового резца в образец из аргиллита при различных усилиях подачи. Инфракрасной камерой фиксировались температурные поля образцов и дискового резца. По микрохарактеристикам поверхности прореза и по затратам энергии выполнен анализ влияния термомеханического воздействия на эффективность разрушения породы.

Установлено, что теплота трения благоприятно воздействует на фрагментацию породы за счет испарения воды и температурных напряжений. При термомеханическом воздействии механические свойства аргиллита снижаются, приводя к уменьшению FPI. Результаты испытания показали, что КПД процесса резки увеличивается. При одинаковых условиях удельная энергия проходки тоннеля и усилие подачи резца на 80 и 20% ниже по сравнению с результатами CSM-модели, т. е. термомеханическое воздействие значительно повышает эффективность разрушения породы.

Поскольку при проведении испытаний не учитывались такие важные факторы, как содержание воды, наличие отдельностей и трещин, необходимо продолжать исследования для изучения термомеханического воздействия на массив при проходке тоннелей. Использованная бурильная установка требует дальнейшего совершенствования для повышения качества и точности результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Koyama Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan, Tunn. Undergr. Sp. Technol., 2003, Vol. 18, No. 2-3. P. 145-159. https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00040-3.
- 2. Yang H. Q., Li Z., Jie T. Q., and Zhang Z. Q. Effects of joints on the cutting behavior of disc cutter running on the jointed rock mass, Tunn. Undergr. Sp. Technol., 2018, Vol. 81. P. 112–120. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.07.023.
- 3. Liu B., Yang H., and Karekal S. Effect of water content on argillization of mudstone during the tunnelling process, Rock Mech. Rock Eng., 2020, Vol. 53, No. 2. P. 799-813. https://doi.org/10.1007/s00603-019-01947-w.
- Hudson J. A., Stephansson O., and Andersson J. Guidance on numerical modelling of thermo-hydromechanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2005, Vol. 42, No. 5–6 SPEC. ISS. — P. 850–870. https://doi.org/10.1016/ j.jjrmms.2005.03.018.
- Delisio A., Zhao J., and Einstein H. H. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötschberg base tunnel, Tunn Undergr Sp Technol., 2013, Vol. 33. — P. 131–142. https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.06.015.
- 6. Liu B., Yang H., and Karekal S. Reliability analysis of TBM disc cutters under different conditions, Undergr. Sp., 2020. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.01.001.
- 7. Nelson P. P. TBM performance analysis with reference to rock properties, Compr. Rock Eng., 1993, Vol. 4. P. 261–291. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-042067-7.50017-9.
- Wang R., Hu Z., Zhang D., and Wang Q. Propagation of the stress wave through the filled joint with linear viscoelastic deformation behavior using time-domain recursive method, Rock Mech. Rock Eng., 2017, Vol. 50, No. 12. — P. 3197–3207. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1301-4.
- 9. Yang H., Liu J., and Liu B. Investigation on the cracking character of jointed rock mass beneath TBM disc cutter, Rock. Mech. Rock Eng., 2018, Vol. 51, No. 4. P. 1263–1277. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1395-8.
- Zhao J. and Gong Q. M. Rock mechanics and excavation by tunnel boring machine issues and challenges, 2006. — P. 83–96. https://doi.org/10.1142/9789812772411_0007.
- 11. Gong Q. M. and Zhao J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite, Tunn Undergr. Sp. Technol., 2007, Vol. 22, No. 3. P. 317–324. https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.07.004.
- Howarth D. F., Adamson W. R., and Berndt J. R. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 1986, Vol. 23, No. 2. P. 171-175. https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90344-X.
- **13. Roxborough F. F. and Phillips H. R.** Rock excavation by disc cutter, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1975, Vol. 12, No. 12. P. 361–366. https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90547-1.

- 14. Torabi S. R., Shirazi H., Hajali H., and Monjezi M. Study of the influence of geotechnical parameters on the TBM performance in Tehran-Shomal highway project using ANN and SPSS, Arab J. Geosci., 2013, Vol. 6, No. 4. — P. 1215–1227. https://doi.org/10.1007/s12517-011-0415-3.
- **15. Yagiz S.** Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition, Tunn Undergr Sp. Technol., 2008, Vol. 23, No. 3. P. 326–339. https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.011.
- 16. Gong Q. M. and Zhao J. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 46, No. 1. P. 8–18. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.03.003.
- 17. Howarth D. F. The effect of jointed and fissured rock on the performance of tunnel boring machines. ISRM Int. Symp. IS 1981, 1981. P. 1069–1074.
- Bruland A. Hard rock tunnel boring, Vol. 8, Drillability test methods, 2000. https://doi.org/ 10.13140/ RG.2.1.3363.4729.
- Ates U., Bilgin N., and Copur H. Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, Tunn. Undergr. Sp. Technol., 2014,Vol. 40. — P. 46–63. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.004.
- 20. Frough O., Torabi S. R., and Tajik M. Evaluation of TBM utilization using rock mass rating system: a case study of Karaj-Tehran water conveyance tunnel (Lots 1 and 2), J. Min. Environ., 2012, Vol. 3, No. 2. — P. 89–98. https://doi.org/10.22044/jme.2012.86.
- Tuncdemir H., Bilgin N., Copur H., and Balci C. Control of rock cutting efficiency by muck size, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 2008, Vol. 45, No. 2. — P. 278–288. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.04.010.
- 22. Zhou J., Qiu Y., Zhu S., Armaghani D. J., Khandelwal M., and Mohamad E. T. Estimation of the TBM advance rate under hard rock conditions using XGBoost and Bayesian optimization, Undergr. Sp., 2020. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.05.008.
- Song L., Guo W., and Zhu D. Heat conduction model of TBM Disc cutter cutting temperature and its solution, 2015, IFToMM World Congr. Proceedings, IFToMM 2015. https://doi.org/10.6567/ IFToMM.14TH.WC.FA.025.
- 24. Zhang Z. X., Kou S. Q., and Lindqvist P. A. In-situ measurements of TBM cutter temperature in Äspö hard rock laboratory, Sweden, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 2001, Vol. 38, No. 4. P. 585–590. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00021-1.
- 25. Tan Q., Zhang G. ju, Xia Y. min, and Li J. fang. Differentiation and analysis on rock breaking characteristics of TBM disc cutter at different rock temperatures, J. Cent South Univ., 2015, Vol. 22, No. 12. P. 4807–4818. https://doi.org/10.1007/s11771-015-3032-6.
- **26.** Rostami J. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement, Colorado School of Mines, 1997.
- Macias F. J., Dahl F., and Bruland A. New Rock abrasivity test method for tool life assessments on hard rock tunnel boring: the rolling indentation abrasion test (RIAT), Rock Mech. Rock. Eng., 2016, Vol. 49, No. 5. — P. 1679–1693. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0854-3.
- Eppes M. C. and Griffing D. Granular disintegration of marble in nature: A thermal-mechanical origin for a grus and corestone landscape, Geomorphology., 2010, Vol. 117, No. 1–2. — P. 170–180. https://doi.org/ 10.1016/j.geomorph.2009.11.028.
- 29. Zhang X., Xia Y., Zhang Y., Tan Q., Zhu Z., and Lin L. Experimental study on wear behaviors of TBM disc cutter ring under drying, water and seawater conditions, Wear., 2017, Vol. 392–393. P. 109–117. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.09.020.

- 30. Gong Q. M., Zhao J., and Jiang Y. S. In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels, Tunn Undergr. Sp. Technol., 2007, Vol. 22, No. 3. P. 303–316. https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.07.003.
- **31.** Hassanpour J., Rostami J., Khamehchiyan M., and Bruland A. Developing new equations for TBM performance prediction in carbonate-argillaceous rocks: A case history of Nowsood water conveyance tunnel, Geomech. Geoengin., 2009, Vol. 4, No. 4. P. 287–297. https://doi.org/10.1080/17486020903174303.
- 32. Hassanpour J., Rostami J., Khamehchiyan M., Bruland A., and Tavakoli H. R. TBM performance analysis in pyroclastic rocks: A case history of Karaj water conveyance tunnel, Rock. Mech. Rock. Eng., 2010, Vol. 43, No. 4. — P. 427–445. https://doi.org/10.1007/s00603-009-0060-2.
- 33. Hassanpour J., Rostami J., and Zhao J. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning, Tunn. Undergr. Sp. Technol., 2011, Vol. 26, No. 5. P. 595–603. https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.04.004.
- 34. Xue Y. dong, Zhao F., Zhao H. xiang, Li X., and Diao Z. xing. A new method for selecting hard rock TBM tunnelling parameters using optimum energy: A case study, Tunn Undergr Sp Technol., 2018, Vol. 78. — P. 64–75. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.030.
- 35. Yang H., Liu B., and Karekal S. Experimental investigation on infrared radiation features of fracturing process in jointed rock under concentrated load, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 2021, Vol. 139. P. 104619. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104619.

Поступила в редакцию 22/II 2022 После доработки 07/III 2022 Принята к публикации 14/III 2022