

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 624.24.05

ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ ВИНТОВЫМ ЗАБОЙНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Чэн Женьхой^{1,2}, Чжан Чao^{1,2}, Цзэн Сянчжен^{1,2}, Дуань Чэне^{1,2}, Чэн Чжихэн^{1,2}

¹Сианьский университет науки и технологий,

Е-mai: crhalzj@126.com, 710054, г. Сиань, Китай

²Главная лаборатория западного недропользования и предотвращения катастроф,

Сианьский университет науки и технологий,

710054, г. Сиань, Китай

Для повышения эффективности бурения дегазационных скважин в угольных пластах рассмотрено использование винтовых забойных двигателей, обычно применяемых в нефтегазовом бурении. Выявлены преимущества бурения пластов винтовыми забойными двигателями относительно традиционного вращательного бурения. На основании экспериментальных планов Бокса–Бенкена получено распределение основных конструкционных параметров, влияющих на эффективность бурения: расход, нагнетаемое давление, усилие подачи. На угольной шахте Wangzhuang проведены полевые испытания винтового забойного двигателя с оптимальной конфигурацией параметров. В сравнении с традиционным вращательным бурением эффективность винтового бурения выше на 39.08 %, вынос бурового шлама увеличился на 48.28 %, что позволяет значительно повысить эффективность дегазационного бурения угольных пластов и уменьшить вентиляционный цикл и общие затраты на отработку пласта.

Винтовой забойный двигатель, вынос шлама, бурение дегазационной скважины, продолжительность бурения

DOI: 10.15372/FTPRPI20240408

EDN: LTETDV

Китай — крупнейший в мире производитель угля в настоящее время. Из-за увеличения глубины угледобычи шахтные чрезвычайные происшествия, связанные с содержащимися в угольных пластах газами, становятся более распространенными и катастрофическими [1–13]. Дегазация пластов — фундаментальный метод решения проблемы выбросов газа в выработку. Отвод газа осуществляется путем бурения в пластах скважин, что является основным способом дегазации [14–15].

В угольных шахтах применяется традиционное вращательное бурение, которое характеризуется простотой исполнения и низкими затратами, но вместе с тем и небольшим выносом бурового шлама, а также рядом конструкционных ограничений [16–19]. С целью повышения эффективности инженерных операций учеными выполнен ряд исследований по оптимизации

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 51974241, 52174203).

традиционного вращательного бурения. В работе [20] предложено усовершенствование долота-расширителя вращательного бура, в результате которого эффективность бурения увеличилась на 20 %. Проблемы шнекового бурения сквозных скважин проанализированы в [21], здесь также представлены методы контроля для повышения точности бурения. В [22] обсуждался метод пневматического направленного бурения в рыхлых трещиноватых угольных пластах, в [23] — метод повышения эффективности за счет увеличения диаметра направленного бурения. Анализ и сравнение эффективности трех методов бурения выполнены в [24]. Оптимизация конструкции долота, позволила повысить эффективность бурения на 71% [25]. Новый тип буровой трубы с высокой жесткостью и прочностью предложен в [26], что позволило снизить удельное количество отказов буров. В [27] разработана буровая труба, с применением которой удалось увеличить глубину бурения и расширения.

Большая часть данных работ рассматривает повышение эффективности бурения с точки зрения совершенствования долота. В настоящей работе на примере угольной шахты Wangzhuang, принадлежащей группе компаний Shanxi Luan, исследуется бурение дегазационных скважин винтовым забойным двигателем, которое обычно применяется в рамках нефтегазового бурения. Выполнен анализ трех основных параметров, влияющих на эффективность бурения, и с помощью многопараметрических испытаний выявлены их оптимальные значения, а также проведена проверка метода в реальных условиях.

ТЕХНОЛОГИЯ ВИНОВОГО БУРЕНИЯ

Метод винтового бурения угольных пластов заимствован из области нефтегазового бурения. В рамках винтового бурения промывочная жидкость выполняет функцию передачи мощности для преобразования гидравлической энергии в механическую энергию вращения долота через трансмиссионный вал. Данный метод используется для повышения скорости буровых работ [28]. В общем виде в устройство винтового забойного двигателя (ВЗД) входят: перепускной клапан, винтовой гидромотор (ГМ), универсальный вал, приводной вал и противосбросовый узел (рис. 1). Когда промывочная жидкость попадает в ВЗД, за счет разницы давления приводится в действие ГМ. В результате ротор начинает вращаться с высокой скоростью, которая ограничивается статором. Усилие, создаваемое универсальным валом, передается на долото для повышения скорости бурения.

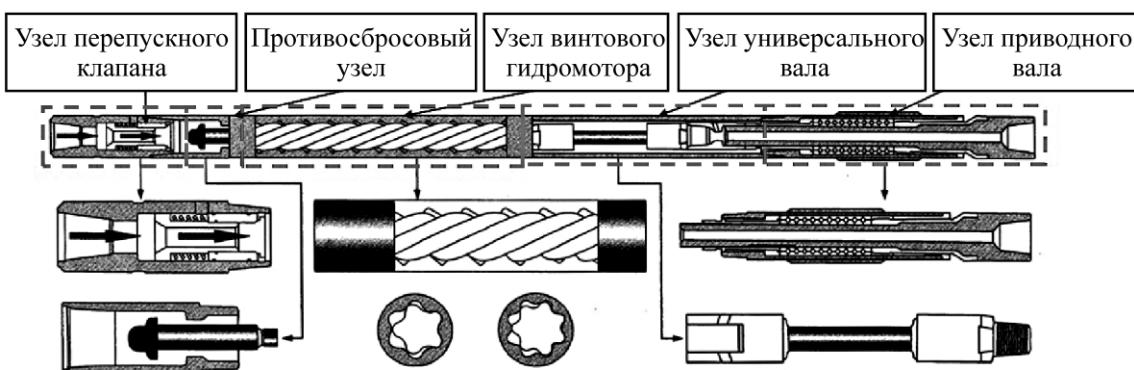


Рис. 1. Типовое устройство винтового забойного двигателя

Оптимизация перепускного клапана. В контексте нефтегазового бурения функция перепускного клапана заключается в уравновешивании давления внутри и снаружи буровой трубы. Однако при бурении угольного пласта разница давления внутри и снаружи буровой трубы достаточно мала, поэтому необходимость в ее уравновешивании отсутствует.

Противосбросовый узел предотвращает падение элементов бура в скважину. Винтовой гидромотор — главный приводной элемент ВЗД. Он состоит из двух частей: статора и ротора. Статор ГМ расположен снаружи от ротора. Действие ВЗД осуществляется за счет подачи промывочной жидкости под нагнетаемым гидронасосом высоким давлением на ротор, благодаря чему он совершает циклическое перемещение внутри статора и приводит в движение долото. Ротор традиционного ВЗД является сплошным. Такое исполнение ротора снижает влияние усилия подачи на скорость и момент вращения, что обеспечивает высокую эффективность бурения скальных пород. Значения момента и усилия подачи при бурении угольного пласта значительно меньше, чем при бурении скальных пород, поэтому сплошной ротор можно заменить полым (рис. 2). При бурении угля такая замена не снижает скорость бурения и позволяет увеличить вынос бурового шлама, что в значительной мере оптимизирует процесс в целом.

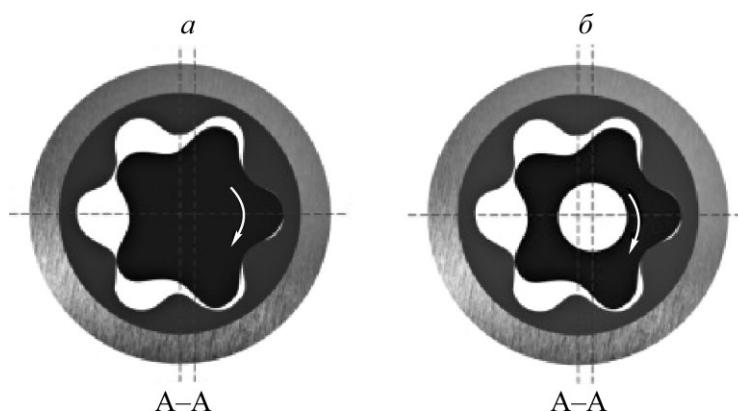


Рис. 2. Различные исполнения ротора винтового гидромотора: *а* — сплошной; *б* — полый

Узел универсального вала. Корпус с изогнутым универсальным валом используется для регулировки угла и траектории бурения. Бурение рассматриваемого угольного пласта является ненаправленным, глубина бурения и отклонение от заданной траектории небольшие, поэтому необходимость регулировки направления бурения отсутствует. Исходя из этого, вал выполнен в прямолинейной форме, которая предотвращает потерю мощности на изгибе скважины и обеспечивает высокое качество и скорость бурения.

Узел приводного вала передает крутящий момент и скорость, сгенерированные ГМ, на долото. При винтовом бурении происходит сложение скоростей вращения бурильной колонны и ВЗД, что обуславливает его высокую эффективность (рис. 3).

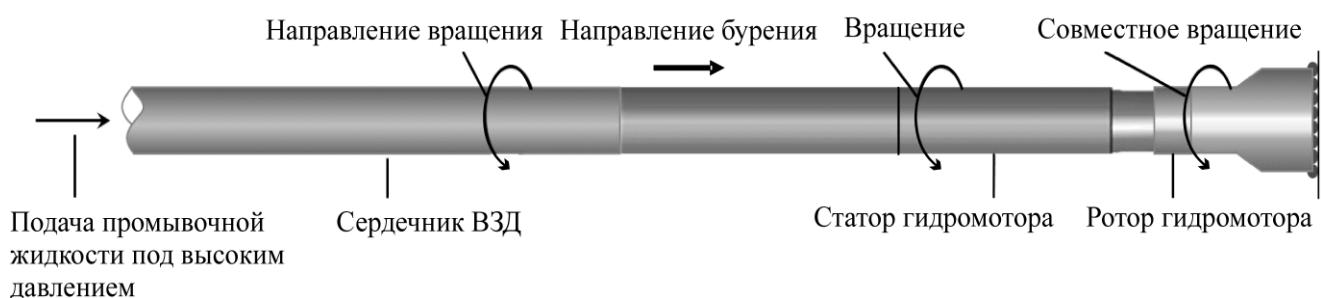


Рис. 3. Принцип работы винтового забойного двигателя

Основной объект применения винтового бурения в рамках настоящей работы — угольный пласт. Линейный универсальный вал обеспечивает равномерное усилие на буровую трубу, а также суперпозицию мощности вращения ВЗД и мощности вращения буровой каретки. Сложное вращательное движение обеспечивает высокую эффективность бурения угля. Полый ротор повышает объем выпуска бурового шлама.

Преимущества винтового бурения дегазационных скважин в угольном пласте следующие: винтовой забойный двигатель обеспечивает достаточную мощность движения долота для разрушения угля и сохранения высокой скорости бурения; гладкая траектория бурения решает проблему плохого выноса шлама, предотвращает слипание угля и породы, минимизирует риск заклинивания; снижается сопротивление трения, возникающего при взаимодействии бурового оборудования со стенкой скважины.

Эффективность бурения — один из ключевых показателей оценки любой технологии [29–31]. Конструкционные особенности бурового оборудования напрямую влияют на эффективность бурения. Бурение в подземных угольных шахтах характеризуется тремя ключевыми параметрами: усилием подачи, расходом жидкости и нагнетаемым давлением. Они определяются исходя из применяемой технологии бурения, геологических условий угольного пласта, используемого оборудования и параметров скважины. Разные значения параметров могут привести к большим различиям в результате бурения [32–34].

Усилие подачи. Осевое усилие, передаваемое долоту от буровой каретки, называется усилием подачи, которое создает требуемые условия для проникновения резца в угольное тело [35, 36]. При бурении непрочных угольных пластов высокое значение усилия подачи не требуется. Однако если угольный пласт имеет высокую прочность, то усилие подачи увеличивается до требуемого значения [37].

Расход промывочной жидкости. В процессе бурения промывочная жидкость выполняет функцию охлаждения долота, снижает его износ, а также предотвращает зашламление скважины, определяет скорость вращения долота

Нагнетаемое давление. Разрушение угля — результат комбинированного воздействия скорости и момента вращения долота в процессе бурения. Увеличение расхода повышает скорость вращения, тогда как момент вращения определяется нагнетаемым давлением. Давление не только создает момент вращения долота, но и обеспечивает равномерный вынос шлама из скважины и предотвращает слипание угля и породы.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОГО БУРЕНИЯ ДЛЯ РАССМАТРИВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Для определения оптимальной скорости бурения винтовым забойным двигателем выполнен многопараметрический анализ, выявляющий оптимальные значения методом поверхности отклика. Исследование выполнено на примере обратной вентиляционной выработки 91–105 угольной шахты Wangzhuang.

Согласно экспериментальным планам Бокса–Бенкена, в качестве целевого критерия на поверхности отклика выбрана продолжительность бурения (Z). Рассмотрено влияние трех параметров: нагнетаемое давление (A), расход жидкости (B) и усилие подачи (C) на продолжительность бурения дегазационной скважины винтовым забойным двигателем. Экспериментальные значения параметров представлены ниже:

Нагнетаемое давление, МПа	4	6	5
Расход жидкости, л/мин	180	200	220
Усилие подачи, МПа	5	8	11

Результаты испытаний приведены в табл. 1. Выбраны средние значения при бурении контрольной скважины в нормальных эксплуатационных условиях. Для каждой группы сочетаний параметров выполнены полевые испытания и получено фактическое значение продолжительности бурения Z (в минутах). Результаты обработаны в ПО Design Expert, выполнен квадратичный регрессионный анализ, построена поверхность отклика и спрогнозированы значения Z_1 для каждой группы сочетаний параметров, рассчитаны значения абсолютной ошибки.

ТАБЛИЦА 1. Схема проведения и результаты испытаний

Группа	A	B	C	Z	Z_1	Абсолютная ошибка (остаток)
1	4	180	8	76.06	77.03	-0.970
2	8	180	8	69.84	70.37	-0.530
3	4	220	8	70.21	69.68	0.530
4	8	220	8	71.31	70.34	0.970
5	4	200	5	72.74	72.20	0.550
6	8	200	5	68.19	68.09	0.100
7	4	200	11	69.57	69.67	-0.100
8	8	200	11	67.23	67.78	-0.540
9	6	180	5	73.14	72.71	0.430
10	6	220	5	67.06	68.13	-1.070
11	6	180	11	71.48	70.41	1.070
12	6	220	11	67.18	67.61	-0.430
13	6	200	8	55.45	56.65	-1.200
14	6	200	8	58.34	56.65	1.690
15	6	200	8	56.72	56.65	0.068
16	6	200	8	55.43	56.65	-1.220
17	6	200	8	57.32	56.65	0.670

Также в ПО Design Expert оценена значимость следующих моделей прогнозирования: линейной, 2FI, квадратичной и кубической (табл. 2). Согласно результатам анализа, наиболее подходящей является квадратичная модель, которая показывает наименьшее отклонение и наибольшее согласование данных. В то же время из табл. 1 видно, что после моделирования спрогнозированные значения Z_1 достаточно близки к фактическим Z , а абсолютная ошибка достаточно мала. Это свидетельствует о том, что квадратичная модель обладает высокой статистической значимостью.

ТАБЛИЦА 2. Анализ моделей

Модель	СКО	R^2	Скорректированный R^2	Спрогнозированный R^2	PRESS
Линейная	7.35	0.0656	-0.1500	-0.3494	1013.96
2FI	8.29	0.0861	-0.4623	-1.1739	1633.52
Квадратичная	1.31	0.9841	0.9636	0.8650	101.43
Кубическая	1.25	0.9917	0.9668		

Примечание. СКО — среднеквадратическое отклонение; R^2 — коэффициент корреляции; PRESS — спрогнозированная ошибка суммы квадратов (Prediction Error of Sum of Squares).

Корреляция модели, разработанной в ПО Design Expert, проверена путем построения графика нормального распределения вероятностей остатков, определенных по критерию Стьюдента. График позволяет выявлять выпадающие значения из массива наблюдений. Распределение точек абсолютной ошибки на графике почти коллинеарно, что доказывает относительную точность и надежность модели.

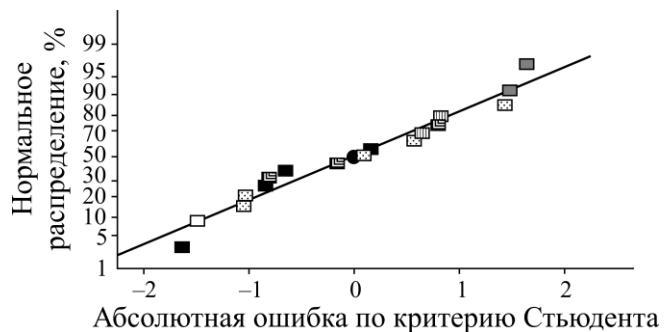


Рис. 4. Нормальное вероятностное распределение абсолютной ошибки остатков по критерию Стьюдента

Рассматриваемая квадратичная модель по результатам анализа ANOVA обладает крайне высокой статистической значимостью (табл. 3), так как значение F -критерия составило 48.05 ($p < 0.0001$). Уровень согласованности модели, т. е. степень разницы между двумя результатами, определяется P -критерием. Если значение P -критерия меньше 0.05, то параметр модели является значимым, как в случаях A , B , AB , A^2 , B^2 и C^2 . Значение P -критерия более 0.1 указывает на то, что параметр модели не является значимым. Степень свободы df (Degree of Freedom) — это количество переменных частей в массиве данных.

ТАБЛИЦА 3. Результаты квадратичной модели поверхности отклика и анализа ANOVA

Объект исследования	Сумма квадратов	df	Средний квадрат	F -критерий	$P > F$
Модель	739.44	9	82.16	48.05	<0.0001
A	18.03	1	18.03	10.55	0.0141
B	27.23	1	27.23	15.93	0.0053
C	4.02	1	4.02	2.35	0.1691
AB	13.40	1	13.40	7.83	0.0266
AC	1.22	1	1.22	0.71	0.4260
BC	0.79	1	0.79	0.46	0.5180
A^2	234.34	1	234.34	137.06	<0.0001
B^2	252.42	1	252.42	147.63	<0.0001
C^2	119.18	1	119.18	69.70	<0.0001
Абсолютная ошибка	11.97	7	1.71		
Потеря данных	5.73	3	1.91	1.22	0.4097
Чистая ошибка	6.24	4	1.56		
Итого	751.41	16			

Общее значение P -критерия для модели составило 0.4097, следовательно, модель не содержит несогласующихся параметров. Полученное уравнение регрессии можно использовать для анализа экспериментальных результатов вместо фактических значений. Кроме того, по результатам анализа ANOVA скорректированный коэффициент корреляции (Adjusted R^2) равен 0.9636, коэффициент вариации (С. В.) составил 1.97 %, т. е. только 3.64 % данных отклоняется от модели. Таким образом, можно сделать вывод, что модель хорошо согласуется с фактическими данными.

Значения P -критерия для параметров A^2 , B^2 и C^2 составили менее 0.0001, что показывает их высокую значимость влияния на продолжительность бурения. Значение P -критерия параметра A — 0.0141 (<0.05), параметра B — 0.0053 (<0.05), т. е. нагнетаемое давление (параметр A) и расход жидкости (параметр B) значительно влияют на продолжительность бурения. Однако значение P -критерия параметра C составило 0.1691 (>0.05), следовательно, усилие подачи (параметр C) в значительной мере не влияет на продолжительность бурения. Анализ значимости показал следующее распределение параметров: расход жидкости $>$ нагнетаемое давление $>$ усилие подачи.

Согласно квадратичной модели, в основе которой лежат мультиномиальные регрессионные уравнения, построены оптимизированные контуры между соответствующими переменными и поверхностями отклика (рис. 5).

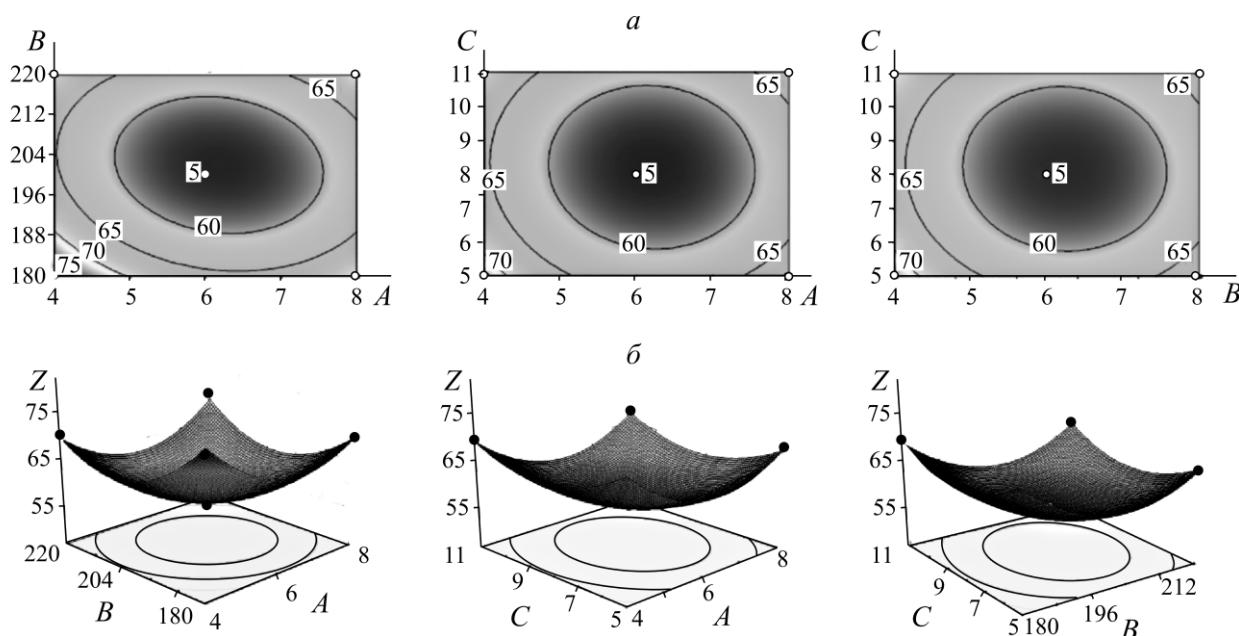


Рис. 5. Оптимизированные контуры между независимыми (а) и зависимыми (б) переменными: A — нагнетаемое давление, МПа; B — расход жидкости, л/мин; C — усилие подачи, МПа; Z — продолжительность бурения, мин

На рис. 5б показаны поверхности отклика, построенные на основе экспериментальных планов Бокса – Бенкена для 17 групп буровых испытаний с тремя переменными параметрами, каждый из которых имеет три уровня. Целью построения поверхностей является наблюдение малых изменений продолжительности бурения Z на различных уровнях параметров.

Форма и тренд развития контура на рис. 5а отражает значимость взаимодействия двух параметров между собой. Контурные графики AB , AC и BC относительно Z имеют эллиптическую форму, показывая, что все параметры оказывают влияние на продолжительность бурения. Изменение контура AB гораздо значительнее контуров AC и BC , изменения которых достаточно малы. Однако изменение контура AC немногого превышает изменение контура BC , показывая, что параметр A (нагнетаемое давление) и параметр B (расход жидкости) оказывают большее влияние на продолжительность бурения. Трехмерные поверхности отклика (рис. 5б) показывают, что поверхность AB имеет наибольшую крутизну, затем идет поверхность AC , а замыкает тройку поверхность BC (градиент поверхности показывает магнитуду значимости взаимодействия параметров между собой).

Ниже приведены результаты исследования с целью получения оптимальных параметров винтового бурения рассматриваемого угольного пласта:

Нагнетаемое давление, МПа	6.17
Расход жидкости, л/мин	202.17
Усилие подачи, МПа	8.18
Продолжительность бурения, мин	
теоретическая	56.4685
фактическая	56.68
Ошибка	0.22

Максимальная абсолютная ошибка между спрогнозированным и фактическим значением крайне мала при использовании соотношений, рекомендованных ПО Design Expert 8.0.6. Следовательно, разработанную модель можно считать надежной. При таких параметрах теоретическая продолжительность бурения скважины длиной 100 м составила 56 мин 46 с.

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Полевые испытания выполнены в угольной шахте Wangzhuang (пров. Шаньси, Китай). Испытания винтового бурения проведены в вентиляционной выработке 91 – 105, полученные результаты сравнены с традиционным вращательным бурением. В рамках испытаний выполнено бурение восьми групп скважин, каждая из которых состояла из двух (первая скважина — экспериментальная, вторая — контрольная). Бурение экспериментальных скважин проводилось при выявленных ранее оптимальных параметрах, а бурение контрольных — при обычных параметрах, применяемых в шахте.

Мониторинг процесса бурения осуществлялся каждые 10 мин. По окончании бурения выполнен анализ полученных данных, результаты которого для восьми групп показаны на рис. 6.

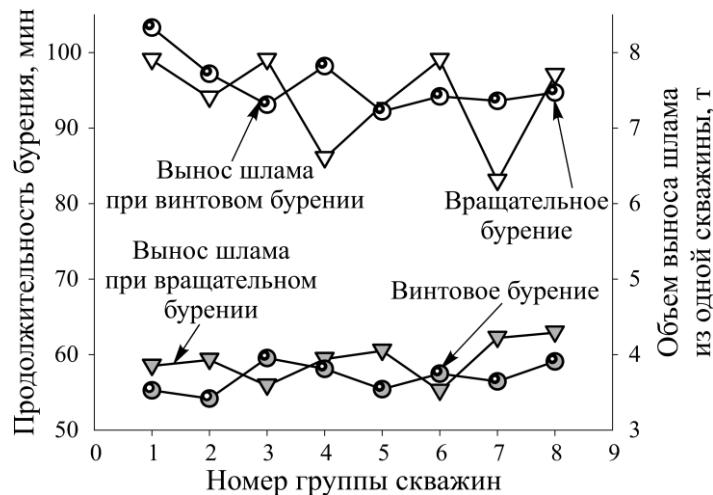


Рис. 6. Сравнение показателей винтового и вращательного бурения

Согласно полученным данным, продолжительность бурения дегазационной скважины длиной 100 м традиционным вращательным бурением составила 93.75 мин, винтовым — 57.12 мин. Продолжительность бурения в среднем сократилась на 36.63 мин, а эффективность увеличилась на 39.08 %. В то же время значительно возрос объем выноса бурового шлама из скважин — 3.92 – 7.58 т (48.28 %). Это связано с более высокой скоростью бурения, при которой происходит постоянное разрушение породы и предотвращается аккумуляция слипшейся породы, снижается вероятность заклинивания бура.

На основе результатов полевых испытаний можно сделать вывод, что технология винтового бурения обеспечивает более высокую мощность, скорость надежность и безопасность выполнения буровых работ. Использование данной технологии позволит повысить эффективность бурения и выноса бурового шлама, тем самым сократить продолжительность бурения дегазационных скважин в угольных шахтах и улучшить управление системой газоотвода.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований оптимальных условий использования технологии винтового бурения, выполненных с применением метода ANOVA, параметры распределились по значимости следующим образом: расход жидкости $>$ нагнетаемое давление $>$ усилие подачи.

С помощью анализа поверхности отклика получены оптимальные параметры винтового бурения: нагнетаемое давление 6.17 МПа, расход жидкости 202.17 л/мин и усилие подачи 8.18 МПа. При данных параметрах теоретическая продолжительность бурения скважины длиной 100 м составила 56 мин 47 с.

Для подтверждения эффективности технологии винтового бурения в угольной шахте Wangzhuang выполнены полевые испытания. По сравнению с традиционным вращательным бурением эффективность бурения увеличилась на 39.08 %, а вынос бурового шлама на 48.28 %. Таким образом, применение винтового забойного двигателя позволяет значительно повысить эффективность бурения дегазационных скважин в угольном пласте и сократить затраты на управление системой газоотвода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhang X. and Zou J.** Research on collaborative control technology of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster in goaf based on dynamic isolation, *Fuel*, 2022, Vol. 321. — 124123.
2. **Liang Y.** Scientific conception of precision coal mining, *J. China Coal Soc.*, 2017, Vol. 42, No. 1. — P. 1–7.
3. **Yuan L. and Zhang P.** Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining, *J. China Coal Society*, 2019, Vol. 44, — P. 2277–2284.
4. **Shi Y., Lin B., Liu T., and Hao Z.** Synergistic ECBM extraction technology and engineering application based on hydraulic flushing combing gas injection displacement in low permeability coal seams, *Fuel*, 2022, Vol. 318. — P. 123688.
5. **Zhang C., Cheng R.-H., Liu C., Xue J.-H., Liu H., Jin G.-H., Chang J., Yan J., Zeng X.-Z., and Wang X.-L.** Experimental study on strengthening and sealing materials and their application in coal mines, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2020. — P. 1–13.
6. **Zhang C., Liu H., Li S., Liu C., Qin L., Chang J., and Cheng R.** Experimental study on the expansion of a new cement-based borehole sealing material using different additives and varied water–cement ratios, *Arabian J. Sci. Eng.*, 2019, Vol. 44. — P. 8717–8725.
7. **Li S., Li Q., Wang H., Yuan L., Zhang Y., Xue J., Zhang B., and Wang J.** A large-scale three-dimensional coal and gas outburst quantitative physical modeling system, *Meitan Xuebao/J. China Coal Soc.*, 2018, Vol. 43. — P. 121–129.
8. **Dou L., He X., Ren T., He J., and Wang Z.** Mechanism of coal–gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology, *Zhongguo Kuangye Daxue Xueba, J. China University Min. Technol.*, 2018, Vol. 47. — 48–59.

9. **Xie H., Ni G., Li S., Sun Q., Dong K., Xie J., Wang G., and Liu Y.** The influence of surfactant on pore fractal characteristics of composite acidized coal, *Fuel*, 2019, Vol. 253. — P. 741–753.
10. **Li D.** Hydraulic drill hole reaming technology with large flow and draining of coal mine gas, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2019, Vol. 29. — P. 925–932.
11. **Zhai C., Xu J., Xiang X., and Zhong C.** Flexible gel (FG) for gas-drainage drilling sealing material based on orthogonal design, *J. Min. Sci. Technol.*, 2015, Vol. 25, Issue 6. — P. 1031–1036.
12. **Shu-Gang L. I., Bao R. Y., Zhang T. J., et al.** Determining the rational sealing depth for horizontal gas drainage borehole, *J. Xi'an University Sci. Technol.*, 2019.
13. **Si L., Li Z., Kizil M., Chen Z., Yang Y., and Ji S.** The influence of closed pores on the gas transport and its application in coal mine gas extraction, *Fuel*, 2019, Vol. 254. — P. 115601–115605.
14. **Linghu J., Li M., and Yue G.** Numerical simulation of integrated mechanics of drilling and mechanical cavitation in coal seam, *ACS Omega*, 2022, Vol. 7(3). — P. 2975–2988.
15. **Shi M., Jiang W., Hao D., et al.** Multiphase coupling deslagging mechanism and application of pneumatic floor drilling machine, *Safety in Coal Mines*, 2019.
16. **Zhichao Z.** Application of geophysical prospecting technology in geological prospecting and resource exploration, *Foreign Language Sci. Technol. J. Database (Digest Edition) Natural Sciences*, 2021, Vol. 4. — P. 3.
17. **Xu Z.** Discussion on deviation correction technology of long borehole in gas drainage, *IOP Conf. Series Earth Env. Sci.*, 2021, Vol. 651, No. 3. — 32079.
18. **Shi C. and Wang Y.** Data-driven construction of Three-dimensional subsurface geological models from limited Site-specific boreholes and prior geological knowledge for underground digital twin, *Tunnelling underground space technol.*, 2022, Vol. 126. — 104493.
19. **Wu X., Zhao Y., Yu Y., Zhang B., Jia L., and Du X.** Study on distribution law of stress and permeability around hydraulic fracturing borehole in coal and rock, *Energies*, 2022, Vol. 15. — P. 4210–4210.
20. **Tian H., Zhao J., Wang C., et al.** Development of spiral PDC ream bits for long borehole at high position of roof, *Coal Sci. Technol.*, 2019.
21. **Hao S., Peng X., and Xian I.** Research on direction drilling in accurate connecting roadway technology with long-distance and large-elevation in underground mine, *Coal Sci. Technol.*, 2019.
22. **Fang J., Liu F., Quanxin L. I., et al.** Air compound directional drilling technology and equipment for soft-fragmentized seam underground coal mine, *Coal Sci. and Technol.*, 2019.
23. **Wang X., Chao X. U., Quanxin L. I., et al.** Study on high-level directional borehole technology in complex roof stratum of Huainan mining area, *Coal Sci. Technol.*, 2018.
24. **Dou X., Jin X., Tong B., et al.** Comparative experimental study on drilling methods of hard rock borehole passed through strata in Huainan Mining Area, *Coal Sci. and Technol.*, 2018. Vol. 46(11). — P. 151–156.
25. **Gao X., Wang C., and Tian H.** Individualized design and test of PDC drill bit used for directional well of coal-bed methane development in Zhongshan block, *China Coal*, 2018.
26. **Dong M.** Development and application of $\Phi 73$ mm high toughness and high strength drilling pipe, *Coal Geol. Explor.*, 2017. Vol. 45, No. 2. — P. 152–156.
27. **Dong C., Tian D., Zhao J., et al.** Application and development on drill rod matched for large diameter and directional long borehole in underground coal mine, *Coal Sci. Technol.*, 2018.
28. **Salubi V., Mahon R., Oluyemi G., et al.** Effect of two-phase gas-liquid flow patterns on cuttings transport efficiency, *J. Petroleum Sci. Eng.*, 2021. — P. 109281.
29. **Wang H., Huang H., Bi W., Ji G., Zhou Bo, and Zhuo Lubin.** Deep and ultra-deep oil and gas well drilling technologies, *Prog. prospect*, *Natural Gas Industry B*, 2022, Vol. 9(2). — P. 141–157.

30. **Zhong L. I.** Progress and prospects of digitization and intelligentization of CNOOC's oil and gas well engineering, *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, Vol. 50, No. 2. — P. 1–8.
31. **Jin J.** Drilling fluid technology for igneous rocks in ultra-deep wells in the Shunbei area, Tarim Basin, *Petroleum Drilling Techniques*, 2016.
32. **Fang P., Yao K., Wang S., et al.** Development of drilling parameter monitoring system for directional drilling rig in coal mine, *Coal Sci. Technol.*, 2019.
33. **Han X., Yong L., and Shen J.** Development and application of SK-2Z16 drilling parameter meter, *China Petroleum Machinery*, 2008.
34. **Gidh Y. K., Purwanto A., and Ibrahim H.** Artificial Neural Network Drilling Parameter Optimization System Improves ROP by predicting / managing bit wear, *SPE Intelligent Energy International*, 2012.
35. **Quanxin L. I., Shi Z., Chao X. U., et al.** Efficient drilling technique of 2311 m ultra-long directional borehole along coal seam, *Coal Sci. Technol.*, 2018, Vol. 46, No. 4. — P. 27–32.
36. **Jin Y. and Wang M.** PDC bit drilling parameter optimization design integrating cost and drilling rate, *Petroleum Drilling Techniques*, 2012.
37. **Xue H., Jing L. I., Shao S., et al.** Research on optimizing feeding force parameters of deep-hole directional drilling of coal mine, *Safety Coal Mines*, 2017.

Поступила в редакцию 30/VI 2023

После доработки 06/XII 2023

Принята к публикации 27/VI 2024