РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2022

УДК 622.063.88

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИМЕРЗАНИЯ УГЛЯ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

Да Ан¹, Чуньхуа Ван^{1,2}

¹Шэньянский аэрокосмический университет, Шэньян, 110000, Китай ²Ляонинский технический университет, E-mail: 897785216@qq.com, Фуксин, 123000, Китай

Разработана регрессионная модель определения адгезионной прочности примерзания угля к типовым поверхностям транспортировочного оборудования из стали и резины. В основе модели лежит методология отклика поверхности и испытание адгезионной прочности примерзания угля. Исследовано влияние на адгезионную прочность внешних условий, характеристик угля и поверхности.

Транспортировка угля, адгезионная прочность примерзания угля, регрессионный анализ, методология отклика поверхности (RSM)

DOI: 10.15372/FTPRPI20220504

В провинциях Хейлунцзян, Цзилинь и в регионах Синьцзянь и Внутренняя Монголия Китая, а также в России, Украине, США и в других странах с холодным климатом при длительной открытой транспортировке в зимний период в условиях низких температур уголь, содержащий влагу, примерзает к поверхностям транспортировочного оборудования, образуя значительную адгезионную связь. Адгезия примерзшего угля негативно сказывается на безопасности и эффективности транспортировки, влияет на производительность выработки электроэнергии. Обычно наблюдается переполнение угольных вагонов из-за примерзшего к их поверхностям угля и невозможности выполнения разгрузочных работ в требуемое время, что приводит к штрафам, увеличению простоя рабочей силы и в результате к значительным экономическим потерям. На угольном разрезе в регионе Внутренняя Монголия, принадлежащем угледобывающей компании Datang Xilinhaote, ленточный конвейер простаивал примерно 540 ч в год из-за примерзания угля к поверхностям натяжного барабана и ленты, что привело к снижению объема добываемого угля почти на 1.35 млн т, чрезвычайным происшествиям на производстве и повреждению оборудования [1].

Для предотвращения адгезии угля при его примерзании к транспортировочному оборудованию используются химические, тепловые и механические методы. Химический метод предотвращает или замедляет примерзание угля путем добавления в него химических незамерзающих реагентов. Он широко применяется для устранения примерзания угля к поверхностям

39

<u>№</u> 5

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 51374120) "The study on strip mine belt conveying frozen stick mechanism in cold area" ("Исследование механизма примерзания к карьерному ленточному конвейеру в регионах с холодным климатом").

ленточного конвейера, однако имеет высокую стоимость, вызывает коррозию оборудования и загрязняет окружающую среду. Тепловой метод используется при разгрузке вагонов с примерзшим углем. Вагон с углем загоняется в бокс с источником тепла в виде подачи пара, горячей воды или теплого воздуха, где замерзший уголь оттаивает, после чего осуществляется его разгрузка. При тепловом методе происходит медленное оттаивание угля и потребляется большое количество энергии. Также следует учитывать, что если температура нагрева и оттаивания угля не контролируются, то это может привести к изменениям физико-химических свойств угля и повлиять на эффективность и экономичность его сгорания [2, 3]. В рамках механического метода применяются очистительные установки, щетки и различные механизмы для удаления примерзшего угля с поверхностей транспортировочного оборудования. Данный метод является наиболее простым и широко распространенным. К его недостаткам относится легкость повреждения транспортировочного оборудования, например возникновение задиров на поверхностях вагона, ленты конвейера, роликах и т. д.

Для изучения адгезии замерзшего угля выполнен ряд теоретических исследований. Компаниями SRI International и H.G. Engineering предложено объяснение образования адгезии примерзшего угля и механизма механической прочности, а также проанализировано влияние на нее окружающей температуры, поверхностной влажности, размера частиц и других факторов [4, 5]. В [6] изучено влияние химического незамерзающего реагента на прочность примерзания угля. В [8] методом конечных элементов разработана численная модель процесса оттаивания одиночной частицы угля в условиях естественной конвекции с учетом влияния конденсирования и испарения влаги на ее внешней поверхности. Показано, что влажность окружающей среды значительным образом влияет на время оттаивания замерзшего угля. Модель прочности замерзшего угля с учетом его влажности разработана в [9]. Для оценки спрогнозированной прочности замерзшего угля в локальных зимних климатических условиях в [9] применен статистический анализ Монте-Карло. Исследовательской группой из Цзилиньского университета (Китай) изучен механизм образования адгезии замерзшего угля, рассмотрено влияние различных факторов на его адгезию к поверхностям угольных вагонов [10–12] и предложена гиб-кая бионическая технология для уменьшения адгезии [13, 14].

Цель настоящей работы — исследование влияния на адгезионную прочность примерзания угля таких факторов, как влажность угля, размер частиц и давление [15–20] и разработка на основе сверхмолекулярного полиэтилена конвейерного натяжного барабана, препятствующего образованию адгезии [21, 22].

Адгезионная прочность рассмотрена как важная характеристика адзегии замерзшего угля, отражающая степень его примерзания к подложкам. Если она имеет высокое значение, то будет наблюдаться значительное примерзание, что существенно осложнит его предотвращение, если имеет малое значение, то устранение адгезии будет выполняться с меньшими усилиями. Большая часть исследований сфокусирована на изучении влияния одиночных факторов на адгезионную прочность, поэтому наблюдается недостаток исследований по прогнозированию и анализу адгезионной прочности примерзания угля при комплексном влиянии различных факторов.

В настоящей работе комплексно рассмотрен ряд факторов, влияющих на адгезионную прочность, а также выполнены испытания примерзания угля к типовым подложкам, результаты которых проанализированы методологией поверхности отклика. По результатам испытаний построены регрессионные модели прогнозирования адгезионной прочности примерзания угля к типовым подложкам, выполнен анализ и сравнение степени влияния каждого фактора. Данная работа может служить теоретической опорой для предотвращения и устранения адгезии примерзшего угля при его транспортировке.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИМЕРЗАНИЯ УГЛЯ

Подложки и образцы угля. Материалом поверхностей угольных вагонов, ковшей погрузчиков, роликов, скребок и других деталей ленточного конвейера, на которых происходит адгезия замерзшего угля, является углеродистая сталь. Для испытаний в качестве типового материала подложки выбрана сталь Q235 (ближайшие аналоги Cт3кп и Cт3сп). Поскольку поверхность ленты конвейера и натяжного барабана выполнена из резины, она тоже выбрана в качестве типового материала подложки. На рис. 1 показаны листы подложек из стали Q235 и резины, которые могут быть механически обработаны до различных значений шероховатости. Образцами угля являлся лигнит из разреза, расположенного во Внутренней Монголии и принадлежащего угледобывающей компании Datang Xilinhaote (Китай).



Рис. 1. Подложки для определения адгезии замерзшего угля: резина (*a*); сталь Q235 (б)

Влажность угля делится на внешнюю и внутреннюю. Внешняя влажность — показатель адсорбции влаги на поверхности частиц угля и в их больших порах, тогда как внутренняя — показатель адсорбции влаги в малых капиллярных порах, которую трудно удалить. На адгезию замершего угля в большей степени влияет внешняя влажность [23]. Из образцов с помощью сушки при температуре 40 °C в течение одного часа удалялась изначальная влага по методу A2 Национального стандарта GB/T211-2007 [24]. Затем образцы угля помещались в среду с различной окружающей влажностью для получения требуемых значений внешней влажности, которая измерялась также методом A2. Национального стандарта. Образцы угля с различными размерами частиц были получены с помощью сита и лазерного анализатора частиц.

Установка для определения адгезионной прочности примерзания угля. Термокамера, создающая условия для примерзания угля, имеет регулируемый температурный диапазон -65÷310 °C. Установка для испытания адгезионной прочности примерзания угля разработана исследовательской группой [25], ее структурная схема представлена на рис. 2. Образец угля помещался в установку и замораживался на подложке в термокамере при определенных условиях. Для определения прочности адгезии образец угля отделялся от подложки. Созданная установка обеспечивала условия растяжения для отделения образца от подложки.

Испытание адгезионной прочности примерзания угля. Сначала определялась адгезионная прочность примерзания угля. Прочность примерзания по касательному направлению поверхности адгезии влияет на фактическое отделение примерзшего угля. Адгезионная прочность примерзания рассчитывалась следующим образом:

$$c_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{S_{coal}},\tag{1}$$

где F_{τ} — растягивающая сила, действующая на образец при касательном отделении, H; S_{coal} — площадь адгезии (примерзания) угольного образца к подложке, мм².



Рис. 2. Структурная схема установки для определения адгезионной прочности примерзания угля: *1* — основание; *2* — прижимные лапки; *3* — торцевая крышка; *4* — уплотнительная прокладка; *5* — резьбовое соединение; *6* — корпус; *7* — трос; *8* — образец угля; *9* — направляющий штифт; *10* — основание корпуса; *11* — блок; *12* — подложка; *13* — зафиксированная ось основания; *14* — резьбовое соединение

Как показано на рис. 2, образец угля 8 с установленным значением внешней влажности и размером частиц помещается в установку и замораживается на подложке при определенных температуре, времени и давлении согласно методике проведения испытания [17]. После снятия прижимных лапок 2 и направляющего штифта 9 запускается растягивающая установка. Через трос 7 прикладывается тяговое усилие к основанию корпуса 10 для отделения примерзшего образца угля от поверхности подложки. Пиковое растяжение на кривой "сила – смещение" на растягивающей установке зафиксировано как растягивающая сила касательного отделения образца угля F_{τ} . Для каждой группы образцов проведено более 15 испытаний, значения с большим отклонением или с инструментальными ошибками исключены из дальнейшего анализа. Среднее значение успешных испытаний принято в качестве окончательного результата.

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА ДЛЯ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИМЕРЗАНИЯ УГЛЯ

Регрессионный анализ адгезионной прочности примерзания угля к подложкам из стали Q235 и резины выполнен с помощью методологии поверхности отклика (RSM). Основные влияющие факторы выбраны по трем аспектам: внешние условия, характеристики угля и характеристики подложки. Температура замерзания *T*, время замерзания *t* и давление на уголь *P* составляют внешние условия. Средний размер частиц угля \overline{d} и внешняя влажность угля δ — характеристики угля, в качестве характеристики подложки выбрана шероховатость ее поверхности *Wsm*. С учетом реальных условий определен диапазон влияющих факторов: *T*, °C: $z_1(-45 \div -10)$; *t*, ч: $z_2(0.5 \div 5.0)$; *P*, МПа: $z_3(0.25 \div 4.0)$; \overline{d} , мм: $z_4(0.05 \sim 4.0)$; δ , %: $z_5(15 \div 50)$; *Wsm*, мм: сталь *Q*235: $z_{61}(0.70 \div 1.81)$, резина: $z_{62}(0.54 \div 1.745)$.

Использовано унифицированное обобщенное вращение RSM, рассматриваемые факторы закодированы по формуле:

$$z_{j0} = \frac{z_{j(-1)} + z_{j1}}{2}, \quad \Delta_j = \frac{z_{j1} - z_{j0}}{r}, \quad x_j = \frac{z_j - z_{j0}}{\Delta_j}, \quad z_j = z_{j0} + x_j \Delta_j, \tag{2}$$

где $z_{j1}, z_{j(-1)}, z_{j0}$ — верхняя граница, нижняя граница и нулевой уровень фактора $z_j; z_{j(\pm r)}$ — уровень точки *r* от нулевого уровня; Δ_j — среднеквадратичное отклонение; x_j — закодированное значение z_j .

Для шести факторов получено значение r=2.378, верхняя и нижняя границы в диапазоне значений каждого фактора определены как $z_{j(\pm r)}$. Факторы в закодированном виде представлены в табл. 1 [26].

x_j	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z61	Z_{62}
-r	-45.00	0.50	0.25	0.05	15.00	0.70	0.54
-1	-34.86	1.80	1.34	1.19	25.14	1.02	0.89
0	-27.50	2.75	2.13	2.03	32.50	1.26	1.14
+1	-20.14	3.70	2.91	2.86	39.86	1.49	1.40
+r	-10.00	5.00	4.00	4.00	50.00	1.81	1.745
Δ_j	-7.36	0.95	0.79	0.83	7.36	0.23	0.25

ТАБЛИЦА 1. Закодированные факторы

Количество испытанных образцов N=53. Отклики получены на основе испытаний адгезионной прочности примерзания угля. Значения откликов и структура RSM показаны в табл. 2.

,				(· ·		,		
№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	<i>x</i> ₆₁	<i>x</i> ₆₂	\mathcal{Y}_1	y_2
1	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.945	0.840
2	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	0.240	0.210
3	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.125	0.900
4	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.668	0.650
5	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.367	1.010
6	1.00	- 1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.578	0.580
7	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	2.090	1.490
8	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	0.763	0.720
9	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	0.397	0.440
10	1.00	- 1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.140	0.150
11	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.950	0.780
12	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	0.340	0.290
13	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.363	0.960
14	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	0.500	0.360
15	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.523	1.100
16	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.750	0.420
17	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.770	1.250
18	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	0.855	0.790
19	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	2.230	1.550
20	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.277	0.900
21	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	2.290	1.570
22	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.605	1.140
23	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	2.400	1.600
24	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	2.160	1.530

ТАБЛИЦА 2. RSM-анализ и значение отклика (N=53, часть таблицы)

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИМЕРЗАНИЯ УГЛЯ

Для подтверждения соответствия регрессионной модели выбрано кубическое полиномиальное уравнение регрессии. Расчеты выполнены с помощью ступенчатой регрессии с тестовым уровнем $\alpha = 0.10$. Значения с низкой значимостью p > 0.05 в регрессионном анализе дисперсионной таблицы исключены, после чего получены окончательные результаты (табл. 3).

Истонник	Сумма квадратов df		Среднеквадратическое	Значение	е Значение р		
источник			значение	F			
Из стали Q235							
Модель	22.86	22	1.040	486.45	< 0.0001		
x_1	6.040	1	6.040	2828.31	< 0.0001		
x_2	0.770	1	0.770	359.86	< 0.0001		
x_3	1.250	1	1.250	584.26	< 0.0001		
x_4	0.430	1	0.430	202.42	< 0.0001		
x_5	7.770	1	7.770	3638.19	< 0.0001		
X_6	0.220	1	0.220	105.06	< 0.0001		
$x_1 x_6$	0.021	1	0.021	9.72	0.004		
$x_2 x_4$	0.015	1	0.015	6.98	0.0129		
x_1^2	0.440	1	0.440	205.46	< 0.0001		
x_2^2	0.630	1	0.630	293.56	< 0.0001		
x_{3}^{2}	0.360	1	0.360	169.20	< 0.0001		
x_4^2	0.350	1	0.350	165.39	< 0.0001		
x_{5}^{2}	0.650	1	0.650	303.74	< 0.0001		
x_{6}^{2}	0.190	1	0.190	86.94	< 0.0001		
$x_1 x_2 x_5$	0.055	1	0.055	25.84	< 0.0001		
$x_1 x_2 x_6$	0.012	1	0.012	5.75	0.0229		
$x_1x_3x_5$	0.430	1	0.430	199.28	< 0.0001		
$x_1 x_4 x_5$	0.068	1	0.068	31.65	< 0.0001		
$x_1^2 x_2$	0.069	1	0.069	32.28	< 0.0001		
$x_1^2 x_3$	0.032	1	0.032	15.16	0.0005		
$x_1^2 x_4$	0.057	1	0.057	26.78	< 0.0001		
$x_1^2 x_6$	0.041	1	0.041	19.00	0.0001		
Остаток	0.064	30	2.14E-03				
Несоответствие	0.046	22	2.11E-03	0.96	0.5669		
Чистая ошибка	0.018	8	2.21E-03				
Итого	22.930	52					
	1	I	Из резины	1			
Model	8.580	17	0.500	162.74	< 0.0001		
x_1	0.410	1	0.410	133.44	< 0.0001		
x_2	0.530	1	0.530	171.49	< 0.0001		
x_3	1.040	1	1.040	334.62	< 0.0001		
x_4	0.400	1	0.400	128.71	< 0.0001		
x_5	3.010	1	3.010	971.23	< 0.0001		
x_6	0.130	1	0.130	41.17	< 0.0001		
<i>x</i> ₄ <i>x</i> ₅	0.022	1	0.022	6.94	0.0125		
<i>x</i> 4 <i>x</i> 6	0.022	1	0.022	6.94	0.0125		
x_1^2	0.310	1	0.310	99.35	< 0.0001		
x_2^2	0.140	1	0.140	46.08	< 0.0001		
x_{3}^{2}	0.200	1	0.200	64.18	< 0.0001		
x_4^2	0.100	1	0.100	32.35	< 0.0001		
x_5^2	0.480	1	0.480	154.07	< 0.0001		

ТАБЛИЦА 3. Дисперсионный анализ статистической регрессии адгезионной прочности примерзания угля к подложке

x_{6}^{2}	0.040	1	0.040	13.03	0.0009
$x_1 x_2 x_5$	0.014	1	0.014	4.52	0.0406
$x_1 x_3 x_5$	0.120	1	0.120	39.08	< 0.0001
$x_1 x_2^2$	0.023	1	0.023	7.32	0.0105
Остаток	0.110	35	3.10E-03		
Несоответствие	0.096	27	3.57E-03	2.35	0.1045
Чистая ошибка	0.012	8	1.52E-03		
Итого	8.690	52			

Окончание табл. 3

Адекватность соответствия модели может быть проверена дисперсионным анализом. Значения p моделей адгезионной прочности примерзания угля к подложкам из стали Q235 и резины составляют менее 0.0001, что показывает их высокую статистическую значимость. Подобным образом каждая величина моделей является значимой. Значения p "несоответствия" 0.5669 и 0.1045 превышают 0.05, показывая, что "несоответствие" не обладает значимостью по отношению к чистой ошибке, которая подразумевает малую долю выпадающих ошибок, и что модели могут представить соотношение между y и $x_1, x_2, ..., x_n$. На рис. 3 представлены графики соотношения спрогнозированных и экспериментальных (фактических) значений адгезионной прочности примерзания угля, которые показывают высокое соответствие регрессионным моделям.



Рис. 3. Соотношение спрогнозированных значений к экспериментальным (фактическим) значениям адгезионной прочности примерзания угля: *а* — подложка из стали Q235; *б* — подложка из резины

Приведенные ниже уравнения являются окончательными численными моделями в контексте закодированных факторов адгезионной прочности примерзания угля к подложкам из стали *Q*235 и резины:

$$y_{1} = +1.79 - 0.37x_{1} + 0.26x_{2} + 0.33x_{3} - 0.20x_{4} + 0.42x_{5} - 0.14x_{6} + 0.025x_{1}x_{6} - 0.022x_{2}x_{4} - -0.086x_{1}^{2} - 0.10x_{2}^{2} - 0.078x_{3}^{2} - 0.077x_{4}^{2} - 0.10x_{5}^{2} - 0.056x_{6}^{2} - 0.013x_{1}x_{2}x_{3} + 0.042x_{1}x_{2}x_{5} - -0.020x_{1}x_{2}x_{6} + 0.12x_{1}x_{3}x_{5} - 0.046x_{1}x_{4}x_{5} - 0.091x_{1}^{2}x_{2} - 0.062x_{1}^{2}x_{3} + 0.083x_{1}^{2}x_{4} + 0.070x_{1}^{2}x_{6} ,$$

$$y_{2} = 1.30 - 0.19x_{1} + 0.11x_{2} + 0.15x_{3} - 0.096x_{4} + 0.24x_{5} - 0.054x_{6} + 0.026x_{4}x_{5} + 0.026x_{4}x_{6} - -0.072x_{1}^{2} - 0.049x_{2}^{2} - 0.058x_{3}^{2} - 0.041x_{4}^{2} - 0.090x_{5}^{2} - 0.026x_{6}^{2} + 0.021x_{1}x_{2}x_{5} + 0.062x_{1}x_{3}x_{5} - (4) - 0.052x_{1}x_{2}^{2} .$$

График отклонения (рис. 4) показывает, насколько изменяются отклики при изменении каждого фактора в диапазоне между нижней и верхней границами при постоянстве других факторов на нулевом уровне. Отклик y_1 и y_2 увеличивается при снижении факторов x_1 , x_4 и x_6 и повышении факторов x_2 , x_3 и x_5 . Это значит, что адгезионная прочность примерзания угля к подложкам из стали Q235 и резины увеличивается при уменьшении температуры замерзания T, среднего размера частиц угля \overline{d} и шероховатости поверхности *Wsm*. Также она увеличивается при повышении времени замерзания *t*, давления на уголь *P* и внешней влажности угля δ . Данные результаты согласуются с результатами предыдущих работ, посвященных изучению влияния одиночных факторов.



х: Отклонение от контрольной точки

Рис. 4. График отклонения: а — подложка из стали Q235; б — подложка из резины

Значение F каждой переменной моделей из табл. 3 отражает степень ее влияния на отклик. Чем больше значение F, тем большее влияние переменой. Для подложки из стали Q235 значимость факторов распределилась следующим образом: влажность угля; температура замерзания; давление на уголь; время замерзания; размер частиц угля; шероховатость поверхности подложки. Для подложки из резины значимость факторов следующая: влажность угля; давление на уголь; время замерзания; температура замерзания; размер частиц угля; шероховатость поверхности подложки.

С учетом формулы (2), на основе (3) и (4) получены окончательные выражения для определения y_1 и y_2 :

$$\begin{aligned} y_1 &= -7.45 - 0.172z_1 - 0.558z_2 - 2.47z_3 + -2.6z_4 + 0.0082z_5 + 7.65z_6 - 0.00447z_1^2 - \\ &- 0.111z_2^2 - 0.125z_3^2 - 0.112z_4^2 - 0.00185z_5^2 - 1.06z_6^2 - 0.103z_1z_2 - 0.164z_1z_3 + \\ &+ 0.135z_1z_4 - 0.00614z_1z_5 + 0.358z_1z_6 - 0.0647z_2z_3 - 0.0279z_2z_4 + 0.0224z_2z_5 - \\ &- 0.342z_2z_6 + 0.0771z_3z_5 - 0.0281z_4z_5 - 0.00177z_6^2z_2 - 0.00145z_1^2z_3 + 0.00185z_1^2z_4 + \\ &+ 0.00562z_1^2z_6 - 0.00235z_1z_2z_3 + 8.16e - 4z_1z_2z_5 - 0.0124z_1z_2z_6 + 0.0028z_1z_3z_5 - 0.00102z_1z_4z_5; \\ &y_2 &= -2.52 - 0.0214z_1 + 1.23z_2 - 0.709z_3 - 0.184z_4 + 0.0162z_5 + 0.727z_6 + 0.0298z_1z_2 - \\ &- 0.0471z_1z_3 - 0.00421z_1z_5 + 0.0112z_2z_5 + 0.0398z_3z_5 + 0.00426z_4z_5 + 0.136z_4z_6 - \\ &- 0.00133z_1^2 - 0.27z_2^2 - 0.0929z_3^2 - 0.0595z_4^2 - 0.00166z_5^2 - 0.491z_6^2 + 4.08e - 4z_1z_2z_5 + \\ &+ 0.00145z_1z_3z_5 - 0.00783z_1z_2^2. \end{aligned}$$

выводы

Разработана регрессионная модель определения адгезионной прочности примерзания угля к типовым подложкам из стали Q235 и резины. В основе модели лежат данные по испытанию адгезионной прочности. Исследованы степени влияния различных факторов на адзегионную прочность примерзания угля к подложкам из стали Q235 и резины. Для подложки из стали Q235 значимость факторов распределилась так: влажность угля; температура замерзания; давление на уголь; время замерзания; размер частиц угля; шероховатость поверхности подложки. Для подложки из резины значимость факторов следующая: влажность угля; давление на уголь; время замерзания; размер частиц угля; шероховатость поверхности подложки. Для подложки из резины значимость факторов следующая: влажность угля; давление на уголь; время замерзания; размер частиц угля; шероховатость поверхности подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ren Y. L., Ma Y. H., and Zhang D. J., Wang T. M., Wu L., and Zhang H. L. Research and development on anti-freezing and sticking drum and application to surface mine, Coal Sci. and Technol., 2012, Vol. 40, No. 4. P. 92–94+99.
- Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Anufrenkova P. S., and Epshtein S. A. Failure mechanism of coal under freeze-thaw conditions from the spectrum analysis of ultrasonic scanning data, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57. — P. 1–9.
- 3. Chemerinskiy M. S. Microwave defrosting of coal, Coke&Chemistry, 2014, Vol. 57, No. 5. P. 219–221.
- H.G. Engineering Ltd. A study of the mechanical properties of frozen westerncanadian coals, Montreal, 1978, Vol. 57. — P. 26–32.
- 5. Taglio S. Analysis of the market for a new frozen coal release device, Menlo Park: SRIInter-national, 1982.
- Glanville J. O. and Haley L. H. Physical chemistry of frozen coal, Min. Eng., Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomechanics Abstracts, 1982, Vol. 34, No. 2. — P. 182–186.
- 7. Richardson P. F., Roe W. J., and Perisho J. L. Influence of coal porosity on the effectiveness of freeze conditioning agents, Min. Eng., 1985, Vol. 37. P. 1057-1061.
- 8. Raymond J. F. and Rubinsky B. A Numerical study of the thawing process of a frozen coal particle, J. of Heat Transfer, 1983, Vol. 5, No. 1. P. 197–200.
- Juha S., Pertti A., Stefan H., Jyrki I., and Kalevi A. Freezing of coal in the underground storage of apower plant, Cold Regions Sci. and Tech., 2012, Vol. 79-80. — P. 38-42.
- Yang X. D., Chai X. L., and Cong Q. Adhesion law and adhesion mechanism analysis for tub, J. of Jilin University (Eng. and Technol. Edition), 2000, Vol. 30, No.4. — P. 66–69.
- Yang X. D., Chai X. L., and Cong Q. Experimental research on freezing adhesive between mine car model and coal particles, J. of Jilin University (Eng. and Technol. Edition), 2002, Vol. 32, No. 2. — P. 49-53.
- Cong Q., Wang W. T., Yan B. Z., and Ren L. Q. Experimental study of coal on normal adhesion and reducing adhesionby surface electroosmosis, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1999, No. 6. — P. 93–96.
- 13. Cong Q., Chai X. L., Yang X. D., and Jin J. F. Coal adhesion reduction on tramcar by flexible bionics technique, J. of Jilin University (Eng. and Technol. Edition), 2005, No. 4. P. 437–441.
- Cong Q., Yang X. D., Chai X. L., and Ren L. Q. Experiment on reducing coal adhesion by bionic flexible technology, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, No. 3. — P. 209–210.
- 15. Wang C. H., Qu H., Xu H. W., and Wang Z. X. Influence of moisture content on coal freezing adhesive strength, J. of China Coal Soc., 2015, Vol. 40, No. 9. P. 2213–2217.
- 16. Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H., Influence of the clay mineral on coal freezing adhesive strength of coal transportation equipment, Non-Metallic Mines, 2017, Vol. 40, No. 1. P. 33–36.
- 17. Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H. Influence of the Pressure on coal freezing adhesive strength on typical matrix material, Chinese J. of Appl. Mech., 2018, Vol. 35, No. 3. P. 675–680.
- Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H. The Analysis of influence of granularity and the surface waviness of steel plate on coal freezing adhesive strength, Chinese J. of Appl. Mech., 2017, Vol. 34, No. 5. — P. 950–955.
- 19. Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H. Analysis of the Influence on coal freezing adhesive strength of surface waviness of steel plate, Machine Design & Research, 2017, Vol. 33, No. 6. P. 187–191.

- Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H. The test analysis of influence of granularity on coal freezing adhesive strength of coal transportation equipmen, Machine Design and Research, 2017, Vol. 33, No. 6. P. 154–157.
- Wang C. H., Chi Y. F., An D., and Qu H. Regression forecasting and influence factor analysis of freezing adhesive strength on UHMWPE, Material of Anti-Freezing Adhesion Roller, 2019, Vol. 36, No. 5. — P. 1246–1252.
- 22. Wang C. H., Qu H., Xu H. W., and Wang Z. X. Experiment study on anti-freezing adhesive turnabout roller, J. Mech. Strength, 2015, Vol. 37, No. 02. P. 63–67.
- 23. Zhang X. Q. Coal and coal chemistry, Beijing: Chem. Industry Press, 2013.
- **24.** General Administration of quality supervision, inspection and quarantine of the people's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, GB/T211-2007 Determination of total moisture in coal, Beijing: Standards Press of China, 2008.
- 25. Wang C. H., Qu H., Xu H. W., Wang Z. X., An D., and Li H. J. China Patent CN 204855337 U, 2015.
- 26. Li Z. X. and Du S. K. Experimental optimization design and statistical analysis, Beijing: Sci. Press, 2010.

Поступила в редакцию 20/VIII 2022 После доработки 10/VI 2022 Принята к публикации 21/IX 2022