



# 不同煤化程度煤尘水分复吸特性及平衡预测模型研究

王飞 闫晶晶 李雨成 刘红威 高亚斌 李子文

## 引用本文：

王飞, 闫晶晶, 李雨成, 等. 不同煤化程度煤尘水分复吸特性及平衡预测模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 160–168.  
WANG Fei, YAN Jingjing, LI Yucheng. Study on moisture re-absorption characteristics and equilibrium prediction model of coal dust with different rank[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 160–168.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0784>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于主成分分析法的松软煤体煤尘润湿特性研究

Study on wetting characteristics of coal dust in soft coal based on principal component analysis

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9a06bfc7-067e-4c08-80ea-595a18abbaca>

#### 新型缓冲吸能装置手性结构吸能特性对比分析

Comparison and analysis of energy absorption characteristics of chiral structure in novel energy buffering absorption device

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 396–403 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1138>

#### 煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限的影响研究

Influence study of coal dust composition on the lower explosion limit of hybrid mixture of gas and coal dust

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d5760132-cf13-4c0a-b5c9-fdf0abef6c3e>

#### 高碱煤燃烧过程中碱金属沾污特性的预测模型研究

Study on prediction model of alkali metal contamination characteristics during high alkali coal combustion

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2e71dc82-2a2e-4d57-8f3d-ae7c550ef1f0>

#### 新型矿用组合折纹柱构件防冲吸能特性分析

Analysis on characteristics of anti-impact and energy absorption of new type of composite folding column used in mining

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 225–232 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0460>

#### 含水率对复垦土壤光谱特征及属性估测的影响

Effect of moisture content on spectral characteristics and attribute estimation of reclaimed soil

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 312–322 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b834bbea-8384-4e41-abde-eab6dbca4cee>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王 飞, 闫晶晶, 李雨成, 等. 不同煤化程度煤尘水分复吸特性及平衡预测模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 160–168.

WANG Fei, YAN Jingjing, LI Yucheng, et al. Study on moisture re-absorption characteristics and equilibrium prediction model of coal dust with different rank[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 160–168.

## 不同煤化程度煤尘水分复吸特性及平衡预测模型研究

王 飞<sup>1,2</sup>, 闫晶晶<sup>1,2</sup>, 李雨成<sup>1</sup>, 刘红威<sup>1,2</sup>, 高亚斌<sup>1</sup>, 李子文<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西煤矿安全研究生教育创新中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 水分复吸是一种有效评价煤尘润湿性大小的方法, 但不同类型煤尘的亲水性强弱存在差异。为了探究不同煤化程度煤尘水分复吸特性, 通过自行设计水分复吸试验系统, 对比分析不同煤尘在不同环境温度和相对湿度条件下水分复吸率变化规律, 明确煤尘特性对水分复吸特性的影响, 从而确立不同煤化程度煤尘水分复吸平衡预测模型。研究结果表明: 随着环境温度升高, 煤样水分复吸率先增大后减小, 达到复吸平衡的时间在逐渐缩短; 在相同温度条件下, 相对湿度增加会提高煤尘水分复吸能力, 水分复吸平衡时间与相对湿度成正比; 煤化程度越高, 其水分复吸能力越强。随着煤尘接触角增大, 水分复吸率与接触角成线性反比关系, 煤尘的润湿性与水分复吸能力成正相关线性关系; 含氧官能团占比增加, 水分复吸率整体上呈线性增加的趋势; 煤尘比表面积增大会抑制水分复吸过程, 而孔径增加会促进吸附水的储存, 总孔体积增大会为复吸水提供更多的空间, 因此可以根据煤尘特性参数有效预测不同煤化程度煤尘的水分复吸率及润湿性大小。通过对各预测模型的拟合结果, 发现 Henderson 模型是所有预测模型中拟合度最高的, 最适合不同煤化程度煤尘水分复吸平衡的精准预测模型。研究将有助于不同煤尘吸湿性大小的定性分析, 为煤尘润湿降尘技术研究提供借鉴。

**关键词:** 煤尘; 水分复吸; 润湿性; 温湿度; 理化特性; 复吸平衡预测

**中图分类号:** TD714    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-2336(2023)08-0160-09

## Study on moisture re-absorption characteristics and equilibrium prediction model of coal dust with different rank

WANG Fei<sup>1,2</sup>, YAN Jingjing<sup>1,2</sup>, LI Yucheng<sup>1</sup>, LIU Hongwei<sup>1,2</sup>, GAO Yabin<sup>1</sup>, Li Ziwen<sup>1</sup>

(1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Center of Shanxi Mine Safety for Graduate Education Innovation, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Moisture re-absorption is an effective method to measure wettability of coal dust, but for different types of coal dust, there are difference in their hydrophilicity. In order to explore the moisture re-absorption characteristics of coal dust with different degrees of coalification, the variation of moisture re-absorption rate of coal dust under different ambient temperature and relative humidity was compared and analyzed by a self-designing moisture re-absorption experimental system. The effect of coal dust properties on moisture re-absorption characteristics was clarified, and a prediction model for the moisture re-absorption equilibrium of coal dust with different degrees of coalification was established. The results showed that, with the increase of ambient temperature, the moisture re-absorption rate of coal sample firstly increased and then decreased, and the time to reach the re-absorption equilibrium was gradually shortened. In the same temperature condition, the moisture re-absorption rate of coal dust increased with increasing relative humidity, and the time to reach moisture re-absorption equilibrium was proportional to relative humidity. The higher the degree of coalification led to the stronger moisture re-absorption capacity. As the contact angle of coal dust increased, the moisture re-absorption rate was linearly inversely related to the contact angle,

收稿日期: 2022-08-23    责任编辑: 宫在芹    DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0784

基金项目: 2018 年度山西省重点研发计划资助项目 (201803D31053); 山西焦煤集团公司重大技术攻关资助项目 (201812xs06); 爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)开放课题资助项目 (KFJJ19-03M)

作者简介: 王 飞(1972—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 教授, 博士。E-mail: tyutwangfei@126.com

通讯作者: 闫晶晶(1991—), 男, 山西朔州人, 博士研究生。E-mail: tyutyjj@126.com

and the wettability of coal dust was positively linearly related to the moisture re-absorption capacity. The moisture re-absorption rate overall increased linearly with the increasing proportion of oxygen-containing functional groups. The increase of specific surface area of coal dust will inhibit the moisture re-absorption process, while the increase of pore size will promote the storage of adsorbed water, and the increase of total pore volume will provide more space for moisture re-absorption. The moisture re-absorption rate and wettability with different coalification can be effectively predicted based on the characteristic parameters of coal dust. By comparing and analyzing the fitted results of each prediction model, it was found that the Henderson model had the highest fitting degree among all the prediction models and was the most suitable for accurate prediction of moisture re-absorption equilibrium of coal dust at different coalification. The results will help to qualitatively analyze the hygroscopicity of different coal dust and provide a reference for coal dust wetting and reduction techniques.

**Key words:** coal dust; moisture re-absorption; wettability; temperature and humidity; physical and chemical characteristics; prediction model

## 0 引言

煤炭作为世界上最不可或缺的化石燃料之一,在当代能源安全中发挥着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。然而,在煤矿生产的各个环节中均不可避免地会产生大量的煤尘颗粒,严重危害员工生命健康和生产工艺安全<sup>[3]</sup>。目前,喷雾降尘技术以其简单经济和绿色高效的优点在煤矿井下得到了广泛应用,然而不同煤化程度煤尘的润湿性存在显著差异,直接影响煤矿井下降尘效率<sup>[4-5]</sup>。而水分复吸作为衡量煤尘润湿特性有效方法之一,在界面改性和表面润湿领域具有十分重要的应用价值<sup>[6]</sup>。因此研究不同类型煤尘的水分复吸特性对润湿降尘技术具有重要意义。

国内外学者在煤尘水分复吸规律进行了大量研究工作。刘晓阳等<sup>[7]</sup>采用量热法研究褐煤水分复吸规律,发现水分复吸率随复吸时间先快速增大并最终达到平衡态,而且提高环境温度会促进水分复吸过程。ZHAO 等<sup>[8]</sup>研究了煤尘在温度 20~35 °C 和相对湿度 50%~80% 条件下的水分复吸,研究结果揭示了温度升高可以增加水分子的碰撞频率并减低复吸平衡时间,同时随着相对湿度增大,煤尘微孔吸附和毛细管冷凝现象明显,水分复吸平衡所需时间也在逐渐增加。景晓霞等<sup>[9]</sup>研究发现,煤尘水分复吸能力主要取决于煤尘含水率、接触角、比表面及孔隙结构特征、含氧官能团数量等因素。莫琼等<sup>[10]</sup>研究了褐煤物化结构对水分复吸特性的影响,结果表明褐煤孔结构和含氧官能团破坏会抑制水分复吸行为。根据吸湿理论及水分复吸特性,煤尘水分复吸需要经历快速吸水、缓慢吸水和吸水平衡 3 个阶段,而水分复吸平衡含水率(EMC)是衡量煤尘润湿能力的重要指标。刘英鹏等<sup>[11]</sup>根据不同温度和湿度条件下褐煤水分复吸规律,发现 Chung-Pfost 模型可以有效预测水分复吸平衡 EMC。马亚飞<sup>[12]</sup>通过研究煤尘理化结构和环境温湿度对水分复吸特性的影响,揭示

了 3 种不同煤种水分复吸强度及对应的水分复吸平衡 EMC 模型。

然而,目前关于煤尘水分复吸特性主要集中在低阶褐煤方面,亟待开展不同煤化程度煤尘水分复吸特性研究,掌握不同变质程度煤尘的水分复吸规律。鉴此,笔者通过开展水分复吸试验,研究不同环境温度和相对湿度对水分复吸率的影响,阐明煤尘特性对水分复吸的内在影响机制,确立衡量煤尘润湿特性大小的水分复吸平衡 EMC 预测模型,为不同类型煤尘吸湿性大小研究奠定理论基础。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 煤样制备

根据煤化程度对水分复吸特性的影响,选取宝日希勒-褐煤(HM-B)、西易-烟煤(YM-X)、官地-焦煤(JM-G)和寺河-无烟煤(WY-S)4 种不同变质程度的煤样。首先,对破碎后的煤粉进行 120 目(0.125 mm)筛分处理;其次,利用电热鼓风干燥箱(R-WTH-1000 L)在空气气氛中以 105 °C 持续干燥 24 h;最后,将干燥后煤样迅速利用样品袋密封,以便后续水分复吸实验。此外,根据国标 GB/T212—2008《煤的工业分析方法》测定不同种类样品的工业分析和元素分析,结果见表 1。

表 1 煤样的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis %

煤样	工业分析				元素分析				
	$M_{ar}$	$V_d$	$FC_d$	$A_d$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$O_{diff}$	$N_{daf}$	$S_{daf}$
HM-B	11.58	34.28	35.72	20.59	60.78	12.70	17.59	3.72	5.21
YM-X	4.16	21.63	65.42	8.79	83.14	3.83	9.78	1.12	2.13
JM-G	3.96	14.13	75.39	6.52	88.38	5.03	4.82	1.57	0.20
WY-S	1.30	9.42	78.87	10.41	93.24	3.42	1.76	1.27	0.31

## 1.2 试验材料表征

煤尘是一种复杂的多孔有机体,其理化特性非常复杂。首先通过接触角测量仪(MG-SL200A)测定得到不同煤尘样品的接触角。其次利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR-1500)对煤尘官能团结构进行定量表征,分别得到样品HM-B、YM-X、JM-G、WY-

S红外光谱图。然后采用3H-2000PS2型全自动氮吸附比表面积测定仪对煤尘比表面积及孔隙度进行测定,得到不同样品在相对压力( $P/P_0$ )为0.001~0.995的低温液氮吸附与脱附等温线。煤样测试表征如图1所示。

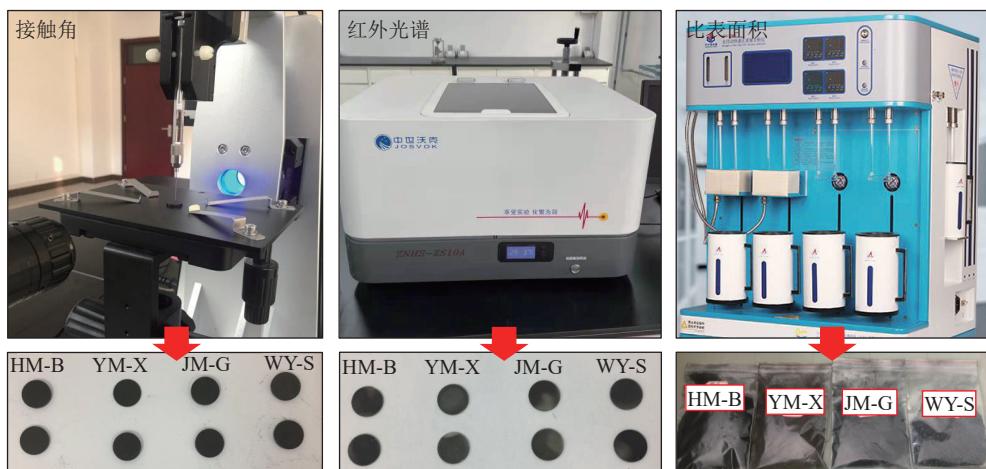


图1 不同变质煤尘测试表征

Fig.1 Testing and characterization of coal dust with different rank

## 1.3 试验方案

煤尘水分复吸试验装置如图2所示,水分复吸试验系统根据研究需求而自主设计,该系统包括4部分:湿度调节系统、温度控制系统、气路控制系统

和水分复吸箱。

将准备好的样品均匀的铺在 $\varnothing 60\text{ mm}$ 的表面皿上,每份样品质量为1.5 g,每种样品设置3组,具体试验步骤如下。

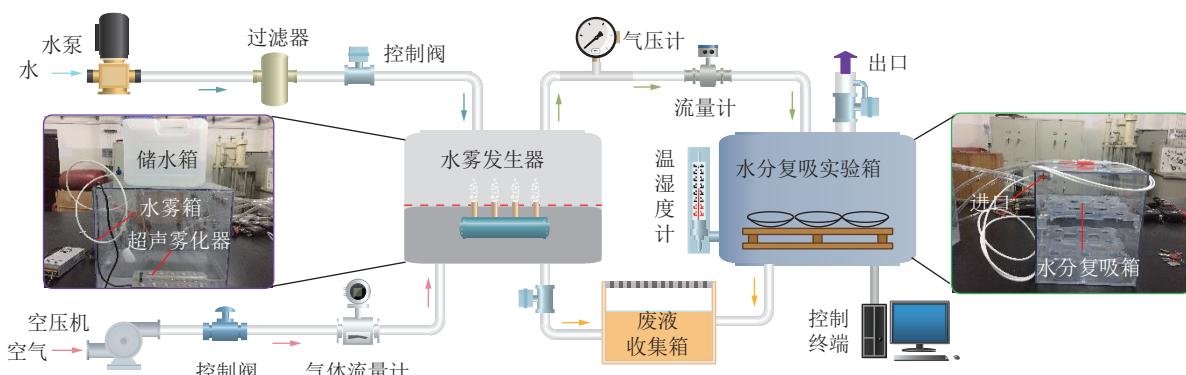


图2 水分复吸试验装置及流程

Fig.2 Experimental devices and process of moisture re-absorption

1)将水雾箱的进水口与储水箱连接,通过液位控制器控制水雾箱内的水量,确保12孔变频超声水雾器能够正常工作,然后调试超声雾化器,设置设备工作电压和频率分别为48 V和40 Hz,逐步开启雾化孔,确保水雾箱中能够充满足够的水汽。

2)将气泵与水雾箱的进气口相连,通过压力阀和流量计控制供气参数,利用高速气流的载流特性,将密封水雾箱内产生的大量水汽输送至水分复吸箱

内,确保实验箱内足够的水汽和相对湿度。

3)将定制的加热板均匀贴合在水分复吸试验箱表面,通过温控仪控制箱内的温度,将智能温湿度控制仪的探测头置于水分复吸试验箱内,将采集的温湿度数据通过与电脑主机相连,输出水分复吸试验箱内的相对湿度和温度等随时间的变化数据,同时,根据采集的数据调整压力、流量、雾化孔数量和温度,达到控制箱内温度和湿度。

4)待各设备装置调试稳定后,将实验样品按照次序装入水分复吸实验箱内,在不同温度  $T$  和相对湿度 RH(Relative Humidity)环境下连续监测 5 h,其中前 180 min 中每隔 20 min 称量样品并记录,由于后期吸水性能下降,每隔 60 min 测 1 次,直至 2 次称量差在 0.001 g 内,样品达到吸湿平衡,停止吸水实验。重复以上步骤,记录不同湿度和温度下样品质量的变化数据。

5)根据每种样品称量的质量计算出各个时刻的水分复吸率  $M_R$ <sup>[13]</sup>:

$$M_R = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

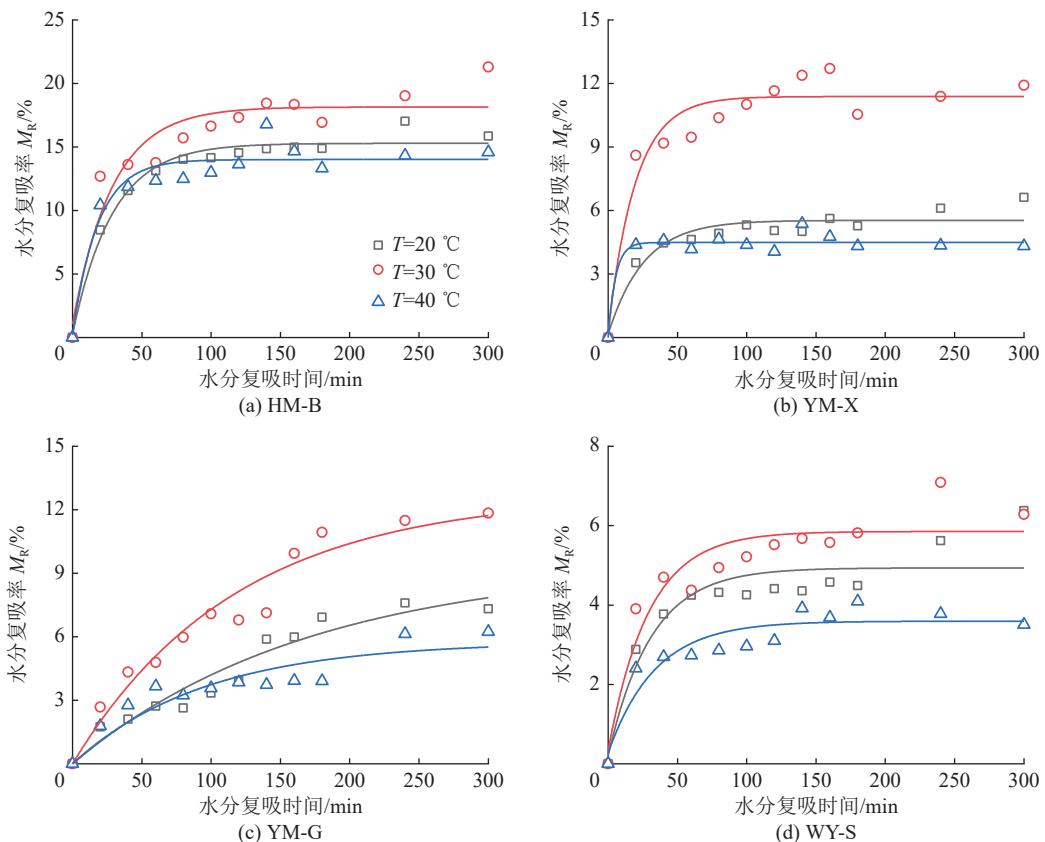


图 3 不同温度对煤尘水分复吸率的影响

Fig.3 Effects of different temperatures on moisture re-adsorption ratio of coal dust

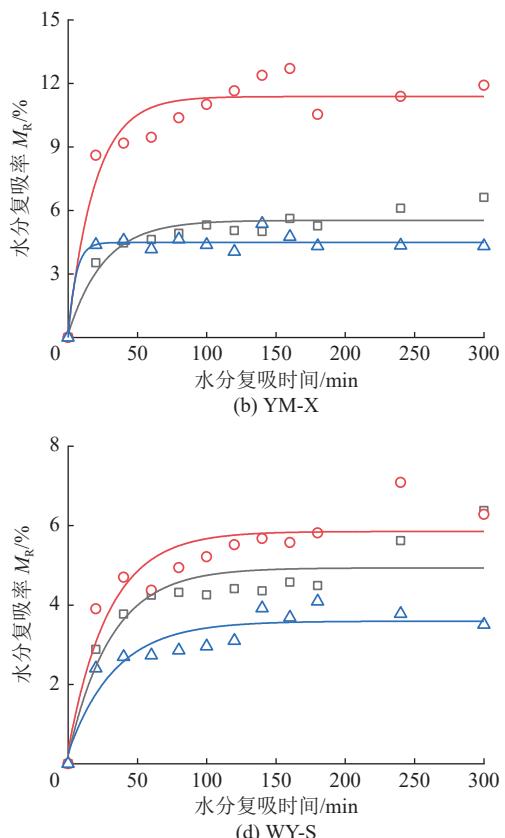
由图 3 可以看到,随着环境温度的升高,煤尘水分复吸率  $M_R$  先增大后减小,不同温度对应的  $M_R$  规律性和差异性很明显。根据煤尘 WY-S 不同温度的拟合曲线可以发现,相对于环境温度  $T=20$  °C 组的  $M_R=4.93\%$ ,  $T=30$  °C 组的平衡  $M_R$  则在此基础上提高了 18.7%, 达到了 5.85%, 而  $T=40$  °C 组则是下降了 27.2%。其中煤尘 HM-B 的水分复吸率  $M_R$  总体上较高,这与其含氧官能团含量高和总孔体积大有密切

关系式:  $M_R$  为任意时刻的水分复吸率, %;  $\Delta m$  为样品水分复吸过程中增加的质量, mg;  $m_0$  为样品在吸湿前的质量, mg。在某一温湿度条件下,当煤尘水分复吸达到饱和状态,此时样品的质量基本不变,内部的蒸汽水压与外界环境压力平衡时的含水量,即水分复吸平衡 EMC<sup>[14]</sup>。

## 2 结果讨论与分析

### 2.1 温度对煤尘水分复吸率的影响

为了研究温度对煤尘水分复吸特性的影响,在相对湿度 65% 的环境条件下,研究环境温度为 20、30、40 °C 时煤尘水分复吸率。图 3 为不同温度对煤尘水分复吸率的影响结果。



的关系,且  $T=40$  °C 组与  $T=20$  °C 组的平衡态  $M_R$  差异性较小,这说明样品 HM-B 的耐高温能力较强;而煤尘 YM-X 和 JM-G 在  $T=30$  °C 时明显高于其他温度,这同样可以说明这 2 种煤尘在该温度下的水分复吸能力最强。但煤尘 JM-G 在 300 min 的水分复吸过程中,其水分复吸率先逐渐增大后缓慢减小并趋于相对稳定的吸附状态,相对于其他几种煤尘, JM-G 的复吸过程较为缓慢。同时,随着环境温度的升

高,煤尘水分复吸达到平衡状态的时间在逐渐缩短。这充分说明温度升高会促进水分子的活化能,提高其与具有温度梯度的煤尘壁面发生吸附<sup>[15]</sup>。同时环境温度升高会改变空间的相对湿度,环境水汽质量分数就会发生改变,而相对湿度对应的相对压力会影响煤尘表面的吸附能力,进而也会影响煤尘的水分复吸行为。

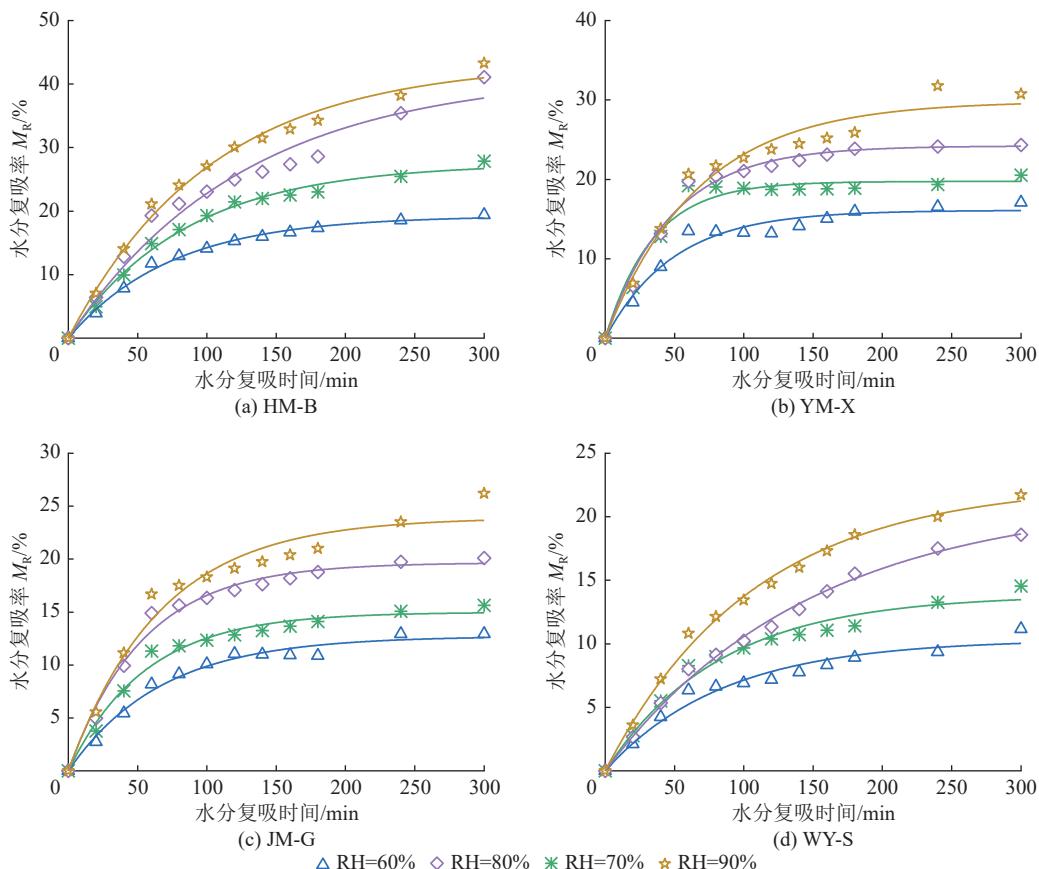


图4 不同湿度对煤尘水分复吸率的影响

Fig.4 Effects of different humidity on moisture re-absorption ratio of coal dust

从图中可以清晰看到:不同煤尘的水分复吸率 $M_R$ 存在明显的差异,在相同温湿度条件下,煤尘水分复吸能力大小为HM-B>YM-X>JM-G>WY-S。对于同一煤尘而言,随着复吸时间的增加,不同相对湿度参数下的水分复吸率 $M_R$ 逐渐增大并在一定时间达到稳定吸附的状态,而且相对湿度越大,样品水分复吸率 $M_R$ 逐渐增大,达到水分复吸平衡的时间也会明显的延长。同时,根据水分复吸率 $M_R$ 在不同相对湿度条件下的变化曲线可以明显发现RH=60%属于低水分复吸组,RH为70%和80%则属于中等水分复吸组,RH=90%属于高水分复吸组。如样品JM-G在水分复吸时间为180 min,RH=90%工况下的 $M_R$ 是RH=60%的1.93倍,同时不同相对湿度条件下达到

## 2.2 湿度对煤尘水分复吸率的影响

为了深入研究环境相对湿度对煤尘水分复吸行为的影响,按照水分复吸实验方法和流程,调整超声雾化器和智能温控仪,设置环境温度 $T$ 为30℃,观察相对湿度为60%、70%、80%和90%四种工况下的水分复吸率 $M_R$ 随时间的变化规律,如图4所示。

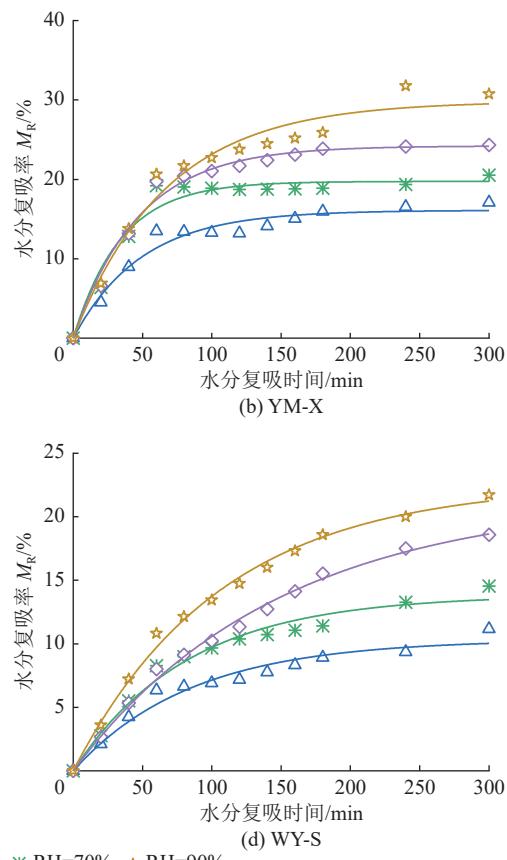


图4 不同湿度对煤尘水分复吸率的影响

复吸平衡的时间分别为133.1、158.3、174.9、197.5 min,这充分说明提高相对湿度对煤尘水分复吸率具有显著的影响,原因在于高湿环境提高了水汽分压,水分子受到的扩散推动力增强,不仅会增加煤尘吸附水汽分子的几率,同时大量的水汽分子在煤尘表面形成了一层薄膜<sup>[10]</sup>。相对湿度越高,成膜速率越快,薄膜会抑制煤尘内部水汽分子的脱附,提高了煤尘水分复吸的效率。

## 2.3 煤尘特性对水分复吸特性的影响

1)根据接触角测定结果可得各煤尘样品接触角分别为40.9°(HM-B)、52.9°(YM-X)、61.6°(JM-G)和72.6°(WY-S)。从图5可以看到:水分复吸率 $M_R$ 随接触角增大有明显减小的趋势,根据图5线性拟合

结果可以清晰发现水分复吸率与接触角成线性反比关系, 随着温度升高, 水分复吸率先增大后减小, 拟合度 $R^2$ 分别为0.73、0.96和0.82, 其中 $T=30\text{ }^\circ\text{C}$ 对应的水分复吸率 $M_R$ 明显高于 $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ 。随着相对湿度升高, 水分复吸率 $M_R$ 逐渐增大, 拟合度 $R^2$ 分别为0.73、0.78、0.84和0.92。李娇阳等<sup>[16]</sup>利用接触角大小表征煤尘润湿性, 随着煤尘接触角增大, 其润湿性逐渐减小。因此, 可以根据线性拟合结果推断出煤尘润湿性与水分复吸能力成正相关线性关系。

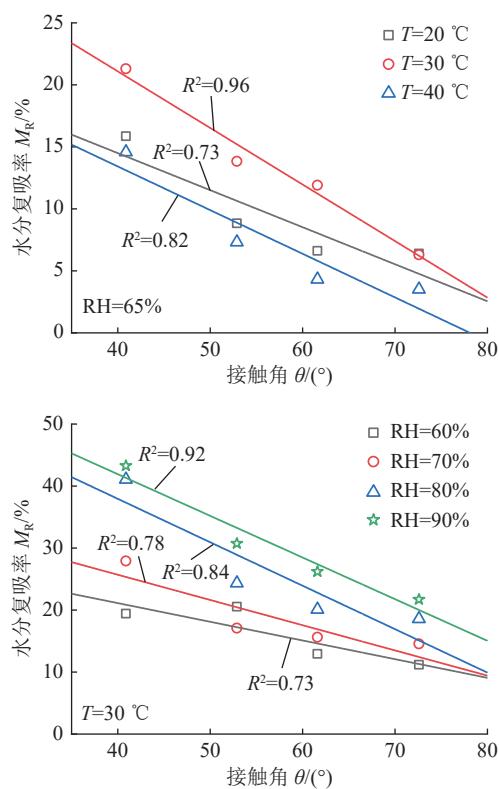


图5 接触角与水分复吸率的对应关系

Fig.5 Relationship between contact angle and moisture re-adsorption ratio

2)通过分峰拟合技术研究各样品红外光谱图, 可以发现煤尘HM-B、YM-X、JM-G和WY-S对应的峰值数目为22、21、19和23, 首先根据样品的特征峰位置及强度可以将光谱划分为7个特征峰强区域; 其次根据煤分子主要特征谱峰归属表及相关的煤化学理论<sup>[17]</sup>, 可以发现各样品含氧官能团羟基( $-\text{OH}$ )和醚键( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ )主要分布在第一区域( $3700\sim3000\text{ cm}^{-1}$ )和第五区域( $1200\sim1000\text{ cm}^{-1}$ ), 而个别样品含有羰基( $\text{C}=\text{O}$ )和羧基( $-\text{COOH}$ ), 具体占比分布见表2。

表2为不同样品含氧官能团占比分布,  $\alpha$ 表示峰面积占比, 由表2可知, 各类样品中的含氧官能团子峰面积占比分别为65.89%、54.27%、54.06%和48.98%,

其中样品HM-B的羟基( $-\text{OH}$ )含量最高, 而YM-X样品的醚键( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ )含量最高。从图6可以看到: 随着含氧官能团占比增加, 水分复吸率 $M_R$ 整体上呈线性增加的趋势,  $T=30\text{ }^\circ\text{C}$ 对应的水分复吸率高于其余两组温度, 而且随着相随湿度增大, 水分复吸率 $M_R$ 表现出呈线性增大的趋势。这充分说明含氧官能团的存在, 极易与水分子形成强的静电作用从改变煤尘的润湿性, 即含氧官能团数量越多, 煤尘表面的吸附位点越多, 水分复吸的能力越强, 因此可以根据煤尘含氧官能团的占比有效预测不同变质程度煤尘的水分复吸率。

表2 不同样品含氧官能团占比分布

Table 2 Proportion of oxygen-containing for different samples

样品	$\alpha(\text{C}-\text{O}-\text{C})/\%$	$\alpha(-\text{OH})/\%$	峰面积合计/%
HM-B	23.17	42.72	65.89
YM-X	26.24	28.03	54.27
JM-G	17.38	36.68	54.06
WY-S	20.32	28.66	48.98

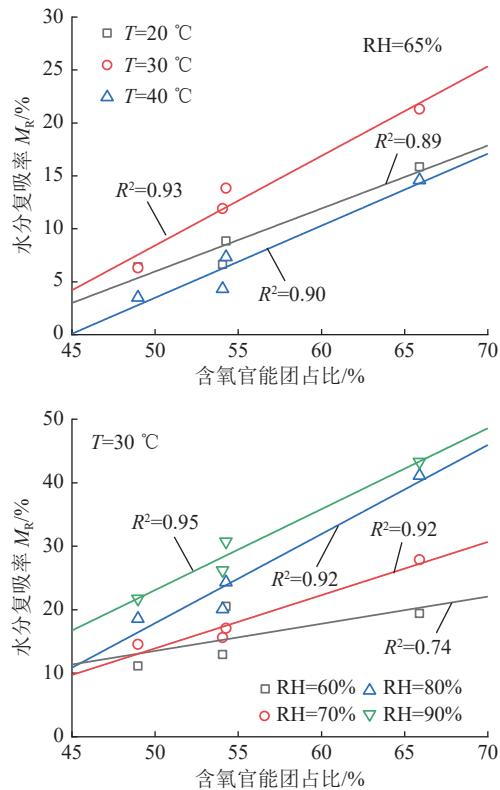


图6 含氧官能团占比与水分复吸率的对应关系

Fig.6 Corresponding relationship between the proportion of oxygen-containing and moisture re-adsorption ratio

3)煤尘水分复吸能力不仅与含氧官能团数量成正比, 同时与其比表面及孔隙结构参数密切相关, 见

**表3** 在环境温湿度  $T=30^{\circ}\text{C}$  和  $\text{RH}=80\%$  时, 尽管水分复吸率  $M_{\text{R}}$  的变化杂乱无序, 但随着比表面积增大, 煤尘  $M_{\text{R}}$  整体表现出减小的趋势。对于样品 HM-B 和 WY-S, 其比表面积的差异性较小, 而  $M_{\text{R}}$  却从 41.09% 急剧降低到 18.59%, 但从煤尘的总孔体积和平均孔径可以发现, 样品 WY-S 的总孔体积  $V_{\text{total}}$  和孔径明显减小, 这就解释了以上规律, 样品 JM-G 和 YM-X 也具有类似的现象, 而对于 WY-S 和 JM-G, 尽管  $V_{\text{total}}$  在减小, 但此时表面积减小和孔径增大共同促进了  $M_{\text{R}}$  从 18.59% 增加到了 20.11%。就单一因素而言, 孔径增加会促进吸附水的储存; 总孔体积增大会为复吸水提供更多的空间, 如从样品 HM-B 和 WY-S,  $V_{\text{total}}$  从 0.027 1 mL/g 降低到了 0.008 mL/g, 对应的  $M_{\text{R}}$  则锐减了 2.21 倍, 因此根据煤尘样品微观特征参数判断水分复吸能力时, 需要考虑各个影响因素的优先级, 对于研究中的 4 种煤尘: ①表面积优先于总孔体积和孔径; ②在比表面变化较小时, 总孔体积优先于孔径分布。

表3 煤尘微观特征参数与水分复吸率

**Table 3** Microscopic characteristic parameters of coal dust and moisture re-absorption ratio

样品	比表面积 $S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均孔径 $D_{\text{ave}}/\text{nm}$	总孔体积 $V_{\text{total}}/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	水分复吸率 $M_{\text{R}}/\%$
HM-B	5.967	18.166	0.027	41.09
YM-X	4.130	8.231	0.008	24.33
JM-G	0.249	36.918	0.002	20.11
WY-S	6.098	5.247	0.008	18.59

综上可知含氧官能团降低和比表面积增大均会削弱水分复吸过程, 而煤尘含水率的降低会提高煤尘的吸附势, 从而促进水分复吸过程, 接触角越小, 煤尘的亲水性越强, 而煤尘孔容增大, 内部吸水量随之增加, 可以有效促进水分复吸过程。因此, 可以根据不同煤化程度煤尘特性有效阐明水分复吸程度的内在机制。

#### 2.4 水分复吸平衡 EMC 模型优选

煤尘水分复吸过程遵守质量和能量守恒方程, 从不同温湿度对水分复吸行为的影响规律来看, 水分复吸是一个有限的水吸附过程, 复吸时间达到一定程度后, 煤尘会达到稳定的动态吸附状态。而且该状态有助于研究煤尘润湿特性, 故而可以通过水分复吸平衡 EMC 预测模型定性分析煤尘的可润湿程度。**表4** 为目前国内普遍认可的多孔材料吸湿平衡预测模型<sup>[18]</sup>, 表中  $A$  和  $B$  是与煤尘性质有关的常数。

结合**图3**和**4**可以有效得出不同相对湿度条件下的水分吸湿平衡 EMC, 运用**表4**中的预测模型对实验值 ( $T=30^{\circ}\text{C}$ ) 进行拟合, **图7**为不同预测模型对不同样品吸湿平衡 EMC 的预测结果。从图中可以看到, 煤尘在等温水分复吸过程中, 随着相对湿度的增大, 水分复吸平衡 EMC 拟合曲线均符合Ⅱ型典型等温吸附, 即随着复吸环境相对湿度的增加, 平衡 EMC 具有明显的 3 阶段变化过程, 当  $\text{RH}<40\%$  时, EMC 表现出快速增加的趋势, 这是因为其内部孔隙开放, 吸附能及毛细作用显著, 故而此阶段的 EMC 增速明显, 但由于环境含湿量有限, 所以 EMC 还处于一个低位状态; 当煤尘处在  $40\%<\text{RH}<70\%$  的区间范围时, EMC 增速放缓, 空气中的水分子在煤尘表面发生凝结覆盖成膜等现象, 煤尘内部吸附能力下降, 扩散速率降低, 故而 EMC 的变化幅度相对较小; 然而当  $\text{RH}>70\%$ , EMC 又表现出急剧增长的趋势, 这是由于相对湿度增大, 促进了水分压, 水分压增大驱动水分子向颗粒物扩散, EMC 逐渐增大, 相对湿度越大, 加速现象越明显。

表4 水分复吸平衡预测模型

**Table 4** Prediction model of moisture absorption equilibrium

预测模型	表达式
Halsey	$\text{EMC} = \left( \frac{-\exp A}{\ln \text{RH}} \right)^{\frac{1}{2}}$
Henderson	$\text{EMC} = \left[ \frac{\ln(1-\text{RH})}{A} \right]^{\frac{L}{2}}$
Oswin	$\text{EMC} = A \left( \frac{\text{RH}}{1-\text{RH}} \right)^{\frac{1}{s}}$
Chung-Pfost	$\text{EMC} = B \ln(A \ln \text{RH})$
Smith	$\text{EMC} = A + B \ln(1-\text{RH})$

根据拟合决定系数  $R^2$  判断各模型的预测精度, 其中越接近于 1.0 说明预测的准确性越高。通过分析各预测模型对试验值的拟合结果, 可以从中发现各模型的变化趋势与试验值具有较好的一致性, **表5** 为各预测模型拟合实验值的相关系数。根据表中的  $A$ 、 $B$  可以准确得出不同预测模型对样品 EMC 的预测值, 对比拟合度  $R^2$  可以发现, Henderson 模型和 Chung-Pfost 模型对 4 种样品的拟合度  $R^2$  都超过了 0.9, 其中样品 JM-G 和 YM-X 的  $R^2$  大于 0.95, 说明这 2 种模型对这 2 类样品的 EMC 预测精准度较高。Halsey 模型、Oswin 模型和 Smith 模型对各样品的拟合效果较差, 除了 Smith 模型对样品 HM-B 和 YM-X 的拟合度大于 0.9 外, 其余情况下的拟合度均未能

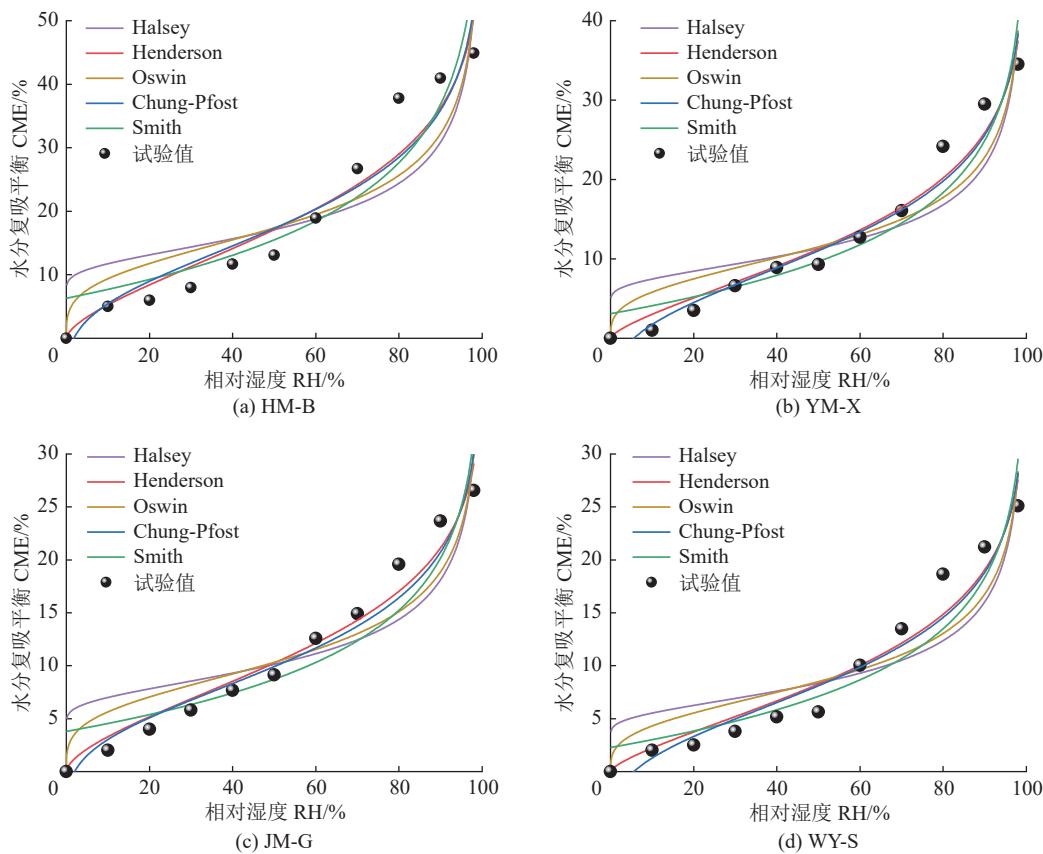


图 7 不同煤尘水分复吸平衡 EMC 预测结果

Fig.7 EMC prediction results of equilibrium moisture re-adsorption of different coal dust

### 3 结 论

1) 随着环境温度升高, 煤样水分复吸率先增大后减小, 达到复吸平衡的时间在逐渐缩短。当环境温度为 30 ℃ 时, 随着相对湿度增加, 煤尘水分复吸率逐渐增大, 水分复吸平衡时间与相对湿度成正比。在相同温湿度条件下, 煤化程度越高, 其水分复吸能力越强, 煤尘水分复吸能力大小为 HM-B>YM-X>JM-G>WY-S。

2) 随着煤尘接触角增大, 水分复吸率与接触角成线性反比关系, 煤尘润湿性与水分复吸能力成正相关线性关系。随着含氧官能团占比增加, 水分复吸率整体上呈线性增加的趋势。随着煤尘比表面积增大, 煤尘水分复吸率整体表现出减小的趋势, 而孔径增加会促进吸附水的储存, 总孔体积增大会为复吸水提供更多的空间。因此可以根据煤尘特性参数有效预测不同变质程度煤尘的水分复吸率。

3) 不同煤化程度煤尘在等温水分复吸过程中, 随着相对湿度的增大, 水分复吸平衡 EMC 拟合曲线均符合Ⅱ型典型等温吸附, 不同煤尘 EMC 具有明显的三阶段变化过程。根据各预测模型对实验值的拟合结果, Henderson 模型是所有预测模型中拟合度最

表 5 各预测模型拟合试验值的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of fitting experimental values of each prediction model

预测模型	参数	相关系数				
		Halsey	Henderson	Oswin	Chung-Pfost	Smith
A	HM-B	8.680	-0.007	17.384	-0.251	6.303
	YM-X	6.608	-0.022	11.521	-0.347	3.102
	JM-G	7.143	-0.015	10.320	-0.256	3.795
	WY-S	5.783	-0.034	8.499	-0.347	2.277
B	HM-B	3.186	1.595	3.560	-9.889	-13.268
	YM-X	2.873	1.434	3.212	-7.745	-9.479
	JM-G	3.242	1.658	3.636	-5.744	-7.114
	WY-S	2.895	1.434	3.232	-5.692	-6.973
$R^2$	HM-B	0.765	0.921	0.817	0.912	0.966
	YM-X	0.823	0.959	0.872	0.959	0.906
	JM-G	0.816	0.963	0.869	0.951	0.870
	WY-S	0.796	0.940	0.845	0.934	0.886

超过 Henderson 模型和 Chung-Pfost 模型, 这充分说明 Henderson 模型是所有预测模型中拟合结果最好的, 也是最适合本文研究煤尘水分复吸平衡 EMC 的精准预测模型。

高的,最适合不同煤化程度煤尘水分复吸平衡 EMC 的精准预测模型。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] BAO Qiu, NIE Wen, LIU Changqi, et al. The preparation of a novel hydrogel based on crosslinked polymers for suppressing coal dusts [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 249: 119343.
- [ 2 ] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].  
*煤炭学报*,2021,46(7):2197–2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [ 3 ] 孟 喆,杨玉中,鲁忠良,等.基于风幕隔尘集尘的综掘面粉尘防治研究[J].  
*安全与环境学报*,2020,20(6):2173–2180.  
MENG Han, YANG Yuzhong, LU Zhongliang, et al. On the dust prevention and control of the fully mechanized workface based on the dust separation and collection of the air curtain [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(6): 2173–2180.
- [ 4 ] 秦波涛,周 刚,周 群,等.煤矿综采工作面活性磁化水喷雾降尘技术体系与应用[J].  
*煤炭学报*,2021,46(12):3891–3901.  
QIN Botao, ZHOU Gang, ZHOU Qun, et al. Dust removal system and application of the surfactant-magnetized water spra in the fully mechanized mining face of coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3891–3901.
- [ 5 ] 程卫民,周 刚,陈连军,等.我国煤矿粉尘防治理论与技术20年研究进展及展望[J].  
*煤炭科学技术*,2020,48(2):1–20.  
CHENG Weimin, ZHOU Gang, CHEN Lianjun, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 1–20.
- [ 6 ] WANG Y, WANG Y Y, ZHANG S T. Effect of drying conditions on moisture re-adsorption and particulate matter emissions during the classification drying of coking coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 192: 65–74.
- [ 7 ] 刘晓阳,刘生玉,夏阳超.褐煤润湿性及水分复吸的量热法研究[J].  
*煤炭转化*,2017,40(3):8–14.  
LIU Xiaoyang, LIU Shengyu, XIA Yangchao. Calorimetry investigation on wettability and moisture re-adsorption of lignite [J]. *Coal Conversion*, 2017, 40(3): 8–14.
- [ 8 ] ZHAO P, LIN C, ZHANG J, et al. Moisture re-adsorption characteristics of hydrochar generated from the co-hydrothermal carbonization of PVC and alkali coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 213(8): 106636.
- [ 9 ] 景晓霞,杨云龙,李志强,等.褐煤物化结构对水分复吸的影响[J].  
*洁净煤技术*,2014,20(1):29–33.  
JING Xiaoxia, YANG Yunlong, LI Zhiqiang, et al. Influence of lignite physical and chemical structure on moisture re-absorption [J]. *Clean Coal Technology*, 2014, 20(1): 29–33.
- [ 10 ] 莫 琼,廖俊杰,常丽萍,等.水热提质对内蒙褐煤物化结构及水分复吸的影响 [J].  
*太原理工大学学报*,2018,49(4):533–537.  
MO Qiong, LIAO Junjie, CHANG Liping, et al. Influence of hydrothermal upgrading on physico-chemical structure and moisture re-adsorption of inner mongolia lignite [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2018, 49(4): 533–537.
- [ 11 ] 刘英鹏,杨 晴,胡 敏,等.褐煤干燥后水分复吸规律及平衡含水率预测[J].  
*煤炭学报*,2015,40(11):2661–2667.  
LIU Yingpeng, YANG Qing, HU Min, et al. Investigation on the moisture reabsorption law of lignite after drying and the prediction of equilibrium moisture content [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2661–2667.
- [ 12 ] 马亚飞.基于低场<sup>1</sup>H-NMR技术的不同煤种水分复吸形态研究[D].武汉:华中科技大学,2018: 35–42.  
MA Yafei. Study on the forms of water readsorption of different kinds of coal based on low field <sup>1</sup>H-NMR technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018: 35–42.
- [ 13 ] H CHOI, THIRUPPATHIRAJA C, KIM S, et al. Moisture readsorption and low temperature oxidation characteristics of upgraded low rank coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(10): 2005–2010.
- [ 14 ] CHEN S F, DANA O M G C. Modeling the equilibrium moisture content (EMC) of Miscanthus sinensis, miscane, energy cane, and energy sorghum [J]. *Fuel*, 2015, 147: 18–26.
- [ 15 ] 任 鹏,王 飞,闫晶晶,等.饱和水雾条件下环境温度对不同变质程度煤尘吸水率的影响 [J].  
*煤矿安全*,2021,52(6):34–39.  
REN Peng, WANG Fei, YAN Jingjing, et al. Effect of ambient temperature on water absorption of coal dust with different metamorphic degrees under saturated water mist [J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(6): 34–39.
- [ 16 ] 李娇阳,李凯琦.煤表面润湿性的影响因素 [J].  
*煤炭学报*,2016,41(S2):448–453.  
LI Jiaoyang, LI Kaiqi. Influence factors of coal surface wettability [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 448–453.
- [ 17 ] 程卫民,薛 娇,周 刚,等.基于红外光谱的煤尘润湿性 [J].  
*煤炭学报*,2014,39(11):2256–2262.  
CHENG Weimin, XUE Jiao, ZHOU Gang, et al. Study of coal dust wettability based on FTIR [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(11): 2256–2262.
- [ 18 ] J Langová, Tencl Ji-Í. Moisture sorption isotherms of whole milk powder in the temperature range of 5–35 °C and critical values of water activity prediction [J]. *Acta Veterinaria Brno*, 2015, 83(10): 35–40.