



## 水分对无烟煤破碎行为和研磨能耗的影响

李召辉 谢卫宁 林生茂 姜海迪 张峰彬 王帅 谭之海 何亚群 孙小路

引用本文：

李召辉, 谢卫宁, 林生茂, 等. 水分对无烟煤破碎行为和研磨能耗的影响[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 261–269.  
LI Zhaozhui, XIE Weineng, LIN Shengmao. Effect of moisture on anthracite crushing behavior and grinding energy consumption[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 261–269.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0869>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### SDS/SDBS对无烟煤润湿性影响的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of the effect of SDS / SDBS on the wettability of anthracite  
煤炭科学技术. 2022, 50(12): 185–193 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0414>

#### 温度冲击作用对无烟煤甲烷吸附-解吸特性影响的试验研究

Experimental study on adsorption and desorption characteristics of anthracite by temperature shock  
煤炭科学技术. 2022, 50(9): 93–103 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a76ce602-646f-4faf-aa59-2bf3070921d3>

#### 无烟煤和焦煤液氮冻融循环致裂效果对比试验

Contrast test of liquid nitrogen freeze–thaw cycle cracking effect between anthracite and coking coal  
煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8e8de07e-e56a-4036-8bf0-4473c07508e3>

#### 氧气浓度对含硫无烟煤自燃特性的试验研究

Experimental study on the influence of oxygen concentration on spontaneous combustion characteristics of sulfur-containing anthracite  
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 114–123 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1396>

#### 含水煤体纵波波速变化规律试验研究——以古汉山烟煤与赵固无烟煤为例

Experimental study on longitudinal wave velocity of water-bearing coal: taking Guhanshan bituminous coal and Zhaogu anthracite as examples  
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/777572b3-b30f-46c6-a146-7248e9feb077>

#### 基于分子模拟的微观结构特征对无烟煤吸附CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>影响规律对比研究

Comparative study on effect of microstructure characteristics on adsorption of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in anthracite based on molecular simulation  
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 106–114 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0692>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李召辉, 谢卫宁, 林生茂, 等. 水分对无烟煤破碎行为和研磨能耗的影响[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 261-269.  
LI Zhaojun, XIE Weining, LIN Shengmao, et al. Effect of moisture on anthracite crushing behavior and grinding energy consumption[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 261-269.

## 水分对无烟煤破碎行为和研磨能耗的影响

李召辉<sup>1</sup>, 谢卫宁<sup>1,2</sup>, 林生茂<sup>1</sup>, 姜海迪<sup>1</sup>, 张峰彬<sup>1</sup>, 王 帅<sup>2</sup>, 谭之海<sup>3</sup>, 何亚群<sup>1</sup>, 孙小路<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 现代分析与计算中心, 江苏 徐州 221116; 3. 湖南中天青鼎工程科技股份有限公司, 湖南 长沙 410021; 4. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** 煤中水分赋存形态和含量的变化会改变煤炭物理特性和孔隙结构, 进而影响其破碎过程。为研究煤炭所含水分对其破碎行为的影响, 以无烟煤为研究对象, 利用加装功率测量装置的哈氏可磨仪模拟中速磨煤机内的破碎环境, 对不同含水量煤样开展多时间批次的单独与混合破碎试验, 并研究水分对煤炭破碎速率、煤粉细度及研磨能耗的影响。试验结果表明: 相比于原始煤样, 均化浸泡煤样单独破碎时初始粒级物料破碎速率因含水量的增加明显减小, 其可磨性指数随水分增加先减小后增大, 煤粉细度  $t_{10}$  与含水量呈正相关关系。干、湿煤样混合破碎时 13.34% 含水量样品破碎速率和细粒级物料生成速率远大于相同水分的均化浸泡煤样, 且其可磨性指数大于原煤; 其他含水量的混配煤样可磨性指数略小于均化浸泡煤样, 此差异随含水量增加而变大, 而破碎速率和细粒级物料产率与均化浸泡煤样差别较小。经典能量—粒度关系模型可用来表征不同水分梯度样品单独和混合破碎过程, 内、外水分不同程度降低了无烟煤抵抗破碎的能力, 单独破碎时含水量增加可显著提高能量效率; 将含水量参数引入能耗模型, 实现对多梯度水分煤样破碎过程的表征。通过探究煤中含水量对煤炭破碎能耗的影响机理, 揭示煤炭破碎过程中能量损失方式并为优化煤炭破碎工艺、降低能耗提供理论指导。

**关键词:** 无烟煤; 破碎速率; 可磨性指数; 煤粉细度; 研磨能耗

中图分类号: TQ536 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)06-0261-09

### Effect of moisture on anthracite crushing behavior and grinding energy consumption

LI Zhaojun<sup>1</sup>, XIE Weining<sup>1,2</sup>, LIN Shengmao<sup>1</sup>, JIANG Haidi<sup>1</sup>, ZHANG Fengbin<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>,  
TAN Zhihai<sup>3</sup>, HE Yaqun<sup>1</sup>, SUN Xiaolu<sup>4</sup>

(1. School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Advanced Analysis and computation Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Hunan Zhongtian Qingding Engineering Technology Co., LTD, Changsha 410021, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The change of water occurrence form and content in coal will change the physical characteristics and pore structure of coal, and then affect its crushing process. In order to study the effect of moisture contained in coal on the crushing behavior of coal particles, anthracite coal was used as the research object. A Hastelloy grinding equipped with a power measuring device was applied to simulate the crushing environment in a medium-speed coal mill. The individual and mixed crushing experiments were carried out in multi-time batches of coal samples with different water content. Thus, the effects of water occurrence on coal crushing rate, pulverized coal fineness, and grinding energy consumption were studied. The experimental results showed that compared with the original coal samples, the initial particle size material crushing rate of homogenized soaked coal samples decreases significantly due to the increase of water content, its grindability index first decreased and then increased with increasing the water content when the homogenized immersed coal sample was

收稿日期: 2023-06-13 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2023-0869

基金项目: 国家自然科学基金青年项目资助项目(51904295); 长沙市第三批紧缺急需人才集聚工程资助项目(D2021049400); 内蒙古自治区自然科学基金项目资助项目(2021MS05055)

作者简介: 李召辉(1996—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生。E-mail: ts21040173P31@cumt.edu.cn

通讯作者: 谢卫宁(1987—), 男, 河北衡水人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: aacc\_wxn5718@cumt.edu.cn

crushed separately, and the fineness of pulverized coal  $t_{10}$  was positively correlated with water content. When dry and wet coal samples were mixed and crushed, the crushing rate and fine-grained material generation rate of 13.34% moisture content samples were much higher than that of homogenized soaked coal samples with the same moisture content, and their grindability index was larger than that of the original coal; The grindability index of the blended coal samples with other moisture contents was slightly smaller than that of the homogenized soaked coal samples, and this difference became larger with the increase of moisture content, while the crushing rate and the yield of fine-grained materials differed less from that of the homogenized impregnated coal samples. Also, the result indicated that the classical energy-particle size relationship model may be used to characterize the individual and mixed crushing processes of samples with different moisture gradients. The internal and external moisture reduced the ability of anthracite to resist crushing to varying degrees, and increasing the water content during separate crushing improved the energy efficiency significantly. So, the water content parameters were introduced into the energy consumption model to characterize the crushing process of various moisture coal samples. By exploring the influence mechanism of water content in coal on energy consumption of coal crushing, it reveals the way of energy loss in the process of coal crushing and provides theoretical guidance for optimizing coal crushing process and reducing energy consumption.

**Key words:** anthracite; crushing rate; grindability index; pulverized coal fineness; grinding energy consumption

## 0 引言

煤炭是一种重要的能源资源,广泛应用于电力、冶金、化工等行业,在煤炭使用过程中,破碎和研磨是必不可少的工序。由于煤炭化学组成的复杂性和物理特性的差异,其破碎行为受到很多因素的影响<sup>[1]</sup>。可磨性指数(HGI)是煤炭的一种重要的物理-机械性能,表示煤破碎的难易程度,可用于评估磨煤机的出力和能耗,辅助选择合适的煤种和煤源。煤种的可磨性指数与磨煤机的能量消耗之间具有一定的相关性<sup>[2]</sup>,探究可磨性指数的影响因素可以更好地指导工业生产,降低能耗。

目前关于煤炭可磨性影响过程的研究主要包括制样过程、设备状态等检测过程参数和样品煤化程度、水分、粒度、密度及混煤配比等样品性质参数两大类。王存宝等<sup>[3]</sup>通过研究由不同破碎设备制成的煤炭样品之间可磨性指数的差异,分析了样品制备过程中导致其研磨性质变化的原因,总结了无烟煤可磨性指数测试时较为可靠的样品制备方法。孟夏娟<sup>[4]</sup>结合煤的哈氏可磨性指数测定原理及测定步骤,分析了煤样制备方法、实验操作流程、哈氏可磨仪使用前的校准过程等因素对哈氏可磨性指数测定的影响。薛永妍等<sup>[5]</sup>阐述了可磨性指数测定过程中,制样设备、出样率、哈氏可磨仪和筛分设备的使用等方面的影响因素及应对措施。上述研究主要涉及可磨性指数测定过程中样品制备、仪器设备和操作条件等因素所导致的可磨性差异。胡卿等<sup>[6]</sup>通过对比五种褐煤在不同烘干温度下 HGI 值和失重率的变化,分析了烘干温度对褐煤可磨性指数(HGI)的影响,研究发现煤样孔隙结构分布差异是 HGI 随温度变化的根本原因。巢美林等<sup>[7]</sup>研究了煤的变质程度和水分与可磨性

之间的关系。吴任超等<sup>[8]</sup>使用哈氏可磨仪分别将4种不同粒度和4种不同密度低变质煤样研磨破碎后进行粒度分析,研究了煤的粒度与密度特性对煤样的 HGI 以及研磨后煤粉细度的影响规律。邸传耕等<sup>[9]</sup>通过开展5种高水分神东烟煤不同干燥时间条件下的研磨实验,探究了水分对烟煤可磨性的影响,并使用高炉喷煤燃烧模拟试验装置研究其燃烧率随含水量的变化趋势。陈亚飞<sup>[10]</sup>以大淑村矿无烟煤为实验对象,通过综合考量煤粉破碎粒度对燃烧性能和破碎能耗的关系,探究了煤粉细度对高炉喷吹的影响。VUTHALURU 等<sup>[11]</sup>研究水分对西澳大利亚的牧羊犬煤可磨性指数的影响时发现可磨性指数与残留水分有很好的相关性。施瑞盟等<sup>[12]</sup>在分析兰炭和喷吹煤的破碎特性时,采用 SEM 和氮气吸附法研究了兰炭和喷吹煤的破碎形貌和微观结构。研究结果表明,喷吹煤表面致密平整,而兰炭表面孔隙结构发达;喷吹煤以体积粉碎为主,而兰炭则以表面粉碎为主。以上研究主要是关于单相破碎时煤炭性质差异导致的可磨性指数变化,而多相混合破碎过程的影响因素要更为复杂。

张骁博等<sup>[13]</sup>探究了单煤及几种不同质量配比的混煤在哈氏可磨性指数测定仪中的粉碎机理,研究结果表明:在混煤混合粉碎的过程中,难磨煤对易磨煤的细颗粒深度粉碎有促进作用。李子文等<sup>[14]</sup>通过开展单煤及两两混煤破碎实验发现可磨性指数实测值与计算值间存在明显误差,分析其成因在于单煤之间可磨性指数不具有线性可加性。李荣鹏等<sup>[15]</sup>将兰炭和府谷煤、清徐煤按照不同比例混合,分析比较单煤和混煤样品的 HGI 以及产物粒度分布。结果表明:较难磨的府谷煤对兰炭混煤 HGI 的提高效果要好于易磨的清徐煤;兰炭与府谷煤混配后的 HGI 与配煤比例能够很好地遵循线性可加原则。李雄飞等<sup>[16]</sup>

选用可磨性差别较大的三种煤炭按照不同比例两两混合后开展研磨试验,根据破碎产物分析了混煤可磨性指数的变化趋势,发现混煤的可磨性指数不能简单计算各单煤的加权平均值,实测值和加权值之间存在一定的差异。XIE等<sup>[17-19]</sup>使用哈氏可磨仪开展了不同灰分及煤化程度煤炭的混合破碎实验,并利用煤中有机硫含量/衍射图谱特征比值与混合物中某一组分含量关系计算各物相在混合破碎后的粒度组成。张宇新等<sup>[20]</sup>利用加装功率测量仪的哈氏可磨仪开展了无烟煤与肥煤的单独和混合破碎实验,根据实验结果分析物料在哈氏可磨仪中的破碎行为,探究混合破碎条件下各组分的破碎速率和可磨性指数的变化规律。

煤中水分主要为吸附在颗粒表面及填充在颗粒间的外水和颗粒内部孔隙、裂隙中的内水,其赋存位置和含量的变化会对破碎行为及研磨能耗产生不同影响,而目前关于煤种内、外水差异在煤炭破碎研磨过程中影响的研究相对较少。本文选用无烟煤为研究对象,采用实验模拟的方法研究中速磨煤机内煤炭干燥程度对破碎行为和能耗的影响。考虑到无烟煤发育程度高,孔隙率偏低<sup>[21]</sup>,本文采用浸泡方式为样品添加不同梯度水分,并借助哈氏可磨仪开展无烟煤均化浸泡煤样和原始煤样的单独及混合破碎实验。在破碎产物粒度分析和能耗监测基础上评估水分对煤样初始粒级物料破碎速率、可磨性指数等破碎行为的影响,并建立能量-粒度关系模型以分析煤样研磨能耗对其所含水分的响应。

## 1 试验物料及方法设计

### 1.1 试验样品

此次试验选用采集太西选煤厂的+2 mm 无烟煤精煤,经自然风干后使用颚式破碎机和振动筛进行逐级破碎筛分,制备 0.63~1.25 mm 粒度煤样。最终该煤样的出样率为 55%,其工业分析结果见表 1。此样品的比表面积为 18.364 8 m<sup>2</sup>/g,孔隙率为 0.022 150 cm<sup>3</sup>/g,样品的比表面积和孔隙率属于较低水平。

利用哈氏可磨仪对该窄粒级分析煤样进行 3 次平行研磨试验,确定无烟煤的哈氏可磨性指数为 47.65。为实现对浸泡试验中样品水分的精确控制,首先向自然风干煤样中加入不同质量的水,将样品装入自封袋中搅拌均匀后静置 24 h,然后依据国标 GB/T 211—2017 进行样品内在和外在水分测试,结果见表 2。原始煤样的全水分是 4.9%,外水含量 1.2%,内水含量 3.7%。不同加水量样品的内水含量

差异较小,表明对于孔隙率较低的无烟煤样品而言,24 h 的浸泡未能让水分进入颗粒内部而大部分仍以游离态形式存在于颗粒表面或颗粒群间隙。基于此,选用全水分 13.34%、20.20%、26.58% 和 31.90% 样品,以及由自然风干煤样与全水分 20.20%、26.58%、31.90% 和 36.44% 的煤样混合配制的与前述样品具有相同全水分的混合样品(样品配制方案见表 3)开展不同时间批次的研磨与能耗监测试验研究。混合煤样研磨试验进行前,首先按表 3 分别称取相应质量的原始煤样和均化浸泡煤样。试验中,先将原始煤样平铺在研磨碗底部,然后将均化浸泡煤样均匀覆盖在原始煤样上方。此混合煤样制备过程模拟了新鲜入料加入磨煤机后研磨的环节。

表 1 煤样工业分析

Table 1 Coal sample industrial analysis

煤样	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$
无烟煤	3.87	3.69	16.05	76.38

表 2 含水量测试

Table 2 Water content test

加水比例/%	外水含量/%	内水含量/%	全水分/%
5.00	1.55	3.60	9.34
10.00	1.77	3.44	13.34
15.00	2.80	3.36	17.01
15.00	2.27	3.28	17.21
20.00	7.87	2.79	20.20
25.00	11.50	3.04	23.83
30.00	11.90	2.66	26.58
35.00	16.74	2.92	29.29
40.00	18.77	2.89	31.90
45.00	23.48	3.49	34.26
45.00	21.69	3.19	34.16
50.00	26.56	3.22	36.44

表 3 混合破碎样品的配制

Table 3 Preparation of mixed crushed samples

均化浸泡煤样 (含水量)质量/g	原煤(含水量) 质量/g	配置样品 全水分/%	配置样品 质量/g
(20.20%)27.58	(4.90%)22.42	13.34	50
(26.58%)35.29	(4.90%)14.71	20.20	50
(31.90%)40.13	(4.90%)9.87	26.58	50
(36.44%)42.82	(4.90%)7.18	31.90	50

## 1.2 研磨试验方法

使用加装功率测量装置的哈氏可磨仪对上述两类样品进行研磨试验,每种样品共设置7个破碎时间,分别为10、20、30、60、90、180和240 s,每个水分梯度增加一组平行试验以验证试验结果的可靠性。试验时利用功率测量仪记录破碎过程的功率(采样频率为1次/s),并在试验后与时间积分后获得破碎能耗。研磨试验完成后,先将研磨产物干燥再进行筛分试验,避免颗粒因含水团聚影响筛分过程。筛分试验中选用筛子孔径分别为0.63、0.09和0.074 mm。通过不同时间段样品中+0.63 mm粒级物料的质量变化获得初始粒级的破碎速率;将样品中的-0.09 mm(此粒度为0.63~1.25 mm物料几何平均粒度十分之一)破碎产物产率计为煤粉细度 $t_{10}$ ;筛分获得各样品在研磨180 s后产物中-0.074 mm粒级含量,利用经验公式计算样品可磨性指数。需要说明的是在假定各粒级样品间水分无明显差异的前提下,根据样品水分将筛分所得细粒级产率折算为含

相应水分时的质量,并据此计算可磨性指数。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同含水量对初始粒级物料破碎速率的影响

具有不同水分梯度样品单独和混合破碎时初始粒级物料含量变化如图1所示。与原始煤样相比,均化浸泡煤样单独破碎时初始粒级物料破碎速率随着含水量增加而大幅减小。分析认为样品中游离态水会在煤炭颗粒表面形成水膜,降低表面粗糙度进而减少颗粒间的摩擦剪切力,据此形成缓冲效果而减少了体积粉碎和表面粉碎<sup>[22]</sup>。研磨时间90 s以后的26.58%和31.90%含水量样品初始粒级物料的破碎比例和速率均大于13.34%和20.20%含水量的样品。原因可能是加水后的初始粒级煤炭颗粒具有一定的粘聚性,经挤压后积聚于内壁与钢球研磨区之间并附着在研磨碗壁上,减缓了进一步的破碎。而高水分样品煤炭含量少且体积更小,在有限的研磨区域内受到更大程度的破碎。

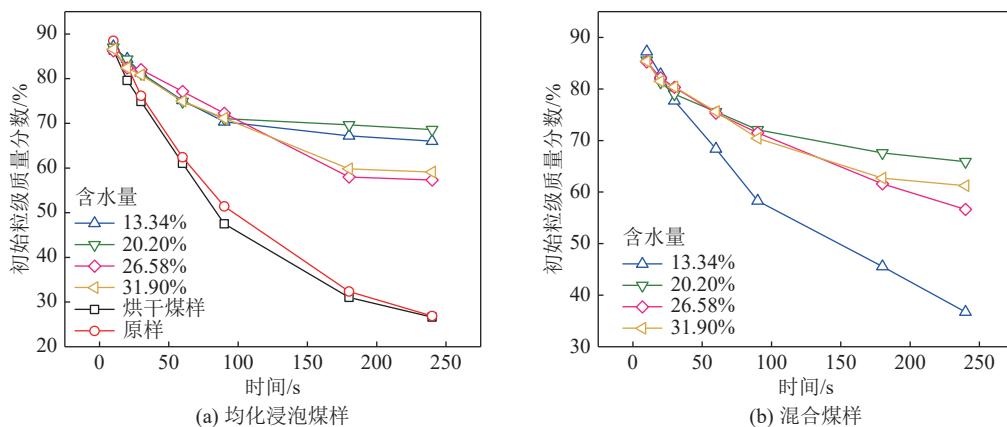


图1 单独及混合破碎时初始粒级物料质量分数随时间的变化  
Fig.1 Initial particle size content over time during individual and mixed crushing

混合破碎时加权水分(干、湿混合即原始煤样与均化浸泡煤样混合后样品的含水量,其计算方法为:原始煤样水分×混合样品中原始煤样质量分数+均化浸泡煤样水分×混合样品中均化浸泡煤样质量分数)为13.34%的混配煤样初始粒级破碎速率较其他试验组明显提高,这是因为混合煤样中的干煤和湿煤重量相差较小且整体含水率较低,在研磨破碎过程中干燥煤样一定程度上吸收了均化浸泡煤样中的游离水,避免了相同含水量的均化浸泡煤样在破碎初期因整体黏聚产生塑性形变紧贴内壁而无法破碎的现象,提高了整体有效破碎率。其他3组混合煤样初始粒级破碎速率的变化规律与均化浸泡煤样相似,

但在破碎初期30 s的时间段内,混合破碎的速率大于单独破碎,240 s后混合煤样初始粒级物料的整体破碎程度略高于均化浸泡煤样。原煤在搅拌混合过程中吸收湿煤表面部分游离水而削弱因水分而产生的黏聚力,减少颗粒堆积,提高了初始粒级物料的整体破碎率。

单独和混合破碎条件下各个水分梯度的平行试验结果见表4,从平行试验数据可以看出不同含水量样品两次平行试验中各个粒级产物所占比例相差很小,试验数据可靠性较好。

### 2.2 煤样可磨性指数对水分的响应

赋存在煤炭内部孔隙和表面的水会在样品破

表4 单独及混合破碎平行试验  
Table 4 Separone and mixed fragmentation parallel experiments

样品	含水量/%	破碎时间/s	不同粒度下产物含量/%			
			-0.074 mm	-0.09 mm	0.09~0.63 mm	+0.63 mm
原始煤样	4.9	180	10.07	12.55	55.11	32.34
			9.94	12.50	56.31	31.19
烘干煤样	0	180	10.90	13.61	57.72	28.66
			10.23	12.82	56.15	31.02
均化浸泡煤样	13.34	180	7.38	8.82	23.97	67.21
			13.41	16.35	46.8	36.85
	20.20	20	9.99	12.71	23.2	64.09
			13.54	16.81	46.64	36.55
	26.58	90	13.96	16.95	48.33	34.71
			6.87	7.96	19.91	72.13
	31.90	30	3.06	3.68	14.76	81.55
			3.54	4.21	14.98	80.81
混合煤样	13.34	90	7.26	8.80	32.93	58.27
			7.18	8.74	33.80	57.46
	20.20	20	2.47	3.01	15.68	81.31
			2.28	2.82	16.11	81.07
	26.58	60	4.89	5.84	18.84	75.32
			4.74	5.62	18.15	76.23
	31.90	180	12.29	14.23	23.08	62.70
			12.33	14.28	23.20	62.52

碎过程中产生缓冲或形成细粒级团聚行为,进而影响破碎效果。为更好评估此影响,探究了不同水分梯度样品和与其具有相同全水分含量的干湿混合(即原始煤样与均化浸泡煤样混合)样品的哈式可磨性指数差异,结果见表5。具有不同水分梯度的均化浸泡煤样单独破碎时可磨性指数随着水分含量增加而变大,含水量超过30%样品的可磨性指数已超过原始煤样。水分增加促使研磨产生的细颗粒(其中部分粒度大于0.074 mm)因黏聚性增强而团聚;团聚后的大颗粒在重新研磨后促进了-0.074 mm粒级产物的生成。此外水分增加还意味着固体颗粒含量降

低,在有限破碎空间内受到的研磨作用增强而提高了-0.074 mm物料产率。原始煤样经105 °C烘干后会引起孔隙率和孔隙结构变化<sup>[23]</sup>,导致机械强度降低,其可磨性指数较自然风干样品略有提升。

均化浸泡煤样与原煤混合破碎的可磨性指数随着含水量增加呈先减小后增大的变化规律。其中加权水分13.34%混合破碎煤样的HGI有较大的提高且大于原样和烘干样品;而其他水分混配煤样的HGI略小于均化浸泡煤样,此差异随含水量增加而变大,且小于混配煤样HGI的加权值(即混合样品中两种煤样HGI的加权平均值,其计算

表5 各样品的可磨性指数HGI  
Table 5 Aoughability index HGI of each sample

煤样类型	不同含水量煤样的HGI			
	13.34%	20.20%	26.58%	31.90%
均化浸泡煤样	34.76	41.14	56.10	61.44
混配煤样	55	40.1	52.85	56.17
混配煤样加权值	44.06	53.61	58.72	—

注: 烘干煤样HGI为50.91; 原始煤样HGI为47.65。

方法为原始煤样 HGI×混合样品中原始煤样质量分数+均化浸泡煤样 HGI×混合样品中均化浸泡煤样质量分数)。为进一步研究并确认此加权水分同其他含量下样品可磨性指数的离散式差异,设计补充由不同全水分样品配制加权水分为 13.34% 的干湿混合煤样,并进行单独和混合破碎对比试验,

分析质量比对破碎产物的影响,结果见表 6。加权含水量为 13.34% 时,在干煤中加入少量湿煤会使可磨性指数增加;由不同全水分煤样配制的干湿样品的破碎效果相似且可磨性指数均高于原始煤样和各全水分样品,重现并验证了前述试验研究的结果。

表 6 加权水分 13.34% 的不同干湿质量比混配煤样及混煤中相对应的均化浸泡煤样破碎产物粒度分布对比

Table 6 Weighted moisture content of 13.34% of the mixed coal samples and the corresponding homogenized soaked coal samples in the mixed coal comparison of the particle size distribution of the broken products

样品组成	不同粒度产物含量/%			
	-0.074 mm	-0.09 mm	0.09~0.63 mm	+0.63 mm
20.20%煤样混配	13.41	16.35	46.80	36.85
23.92%煤样混配	13.54	16.81	46.64	36.55
26.58%煤样混配	13.96	16.95	48.33	34.71
20.20%均化浸泡样品	7.26	9.58	21.81	68.61
23.92%均化浸泡样品	9.99	12.71	23.20	64.09
26.58%均化浸泡样品	12.45	15.28	27.42	57.30
原始煤样	13.35	16.51	56.61	26.88

### 2.3 水分对煤粉细度 $t_{10}$ 和能耗的影响

单独及混合破碎时煤粉细度  $t_{10}$ (煤粉细度  $t_{10}$  指小于初始粒级几何平均粒度十分之一物料的产率,研究中经计算可近似为-0.09 mm 产率)及其随时间的变化如图 2 所示。由于无烟煤内部孔隙不发达,24 h 的浸泡仅能使水分进入到颗粒内较短的距离,在 40 °C 烘干以测定外水含量时,此部分水分从颗粒孔隙蒸发逸出,进而被认定为外在水分。但在实际破碎中,此部分水因位于颗粒内部而实际发挥了内水作用,即软化颗粒微观结构,降低抗压强度,使其更容易被破碎<sup>[24]</sup>。因此,均化浸泡煤样单独破碎时煤粉细度  $t_{10}$  随含水量增加而变大。混合破碎时煤粉

细度  $t_{10}$  的变化规律与单独破碎时相似,其中 13.34% 含水量的混配煤样煤粉细度较均化浸泡煤样明显提高,而其他加权水分时的差异较小。这表明相对较低的加权水分下混合破碎具有较大优势。

煤粉细度  $t_{10}$  是样品破碎后-0.09 mm 的细粒级产物质量分数,外水对煤炭颗粒起到润滑缓冲作用,一方面减少颗粒群蠕动过程的挤压和摩擦,另一方面会使煤炭颗粒粘聚堆积在研磨碗与钢球挤压破碎区上部无法有效破碎,且外水使煤颗粒之间产生的粘连力会增加其抗破碎能力;而内水则会降低煤炭的机械强度。混合破碎时还需要考虑干、湿煤样不同的物理、化学特性在破碎行为发生时对能耗的影

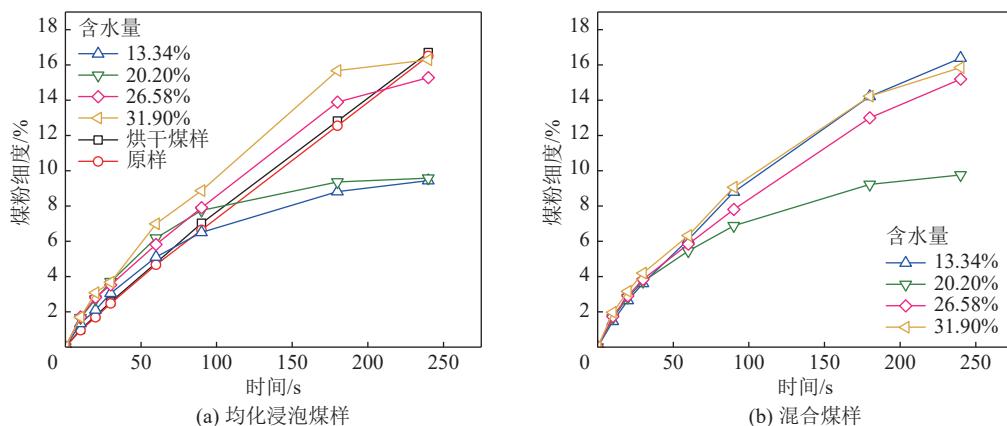


图 2 单独及混合破碎时煤粉细度  $t_{10}$  随时间的变化

Fig.2 The change of pulverized coal fineness with time during separate and mixed crushing

响。因此研磨能耗与煤粉细度  $t_{10}$  的关系变化是多种因素综合作用的结果。具有不同水分梯度的均化浸泡煤样单独和混合破碎条件下破碎能量和煤粉细度  $t_{10}$  关系如图 3 所示, 均化浸泡煤样单独破碎时, 输入相同的能量, 煤粉细度  $t_{10}$  随含水量增加而提高; 混合煤样破碎时, 20.20% 以上含水量的试验也符合这一规律。为进一步从输入能量角度分析单独和混合破

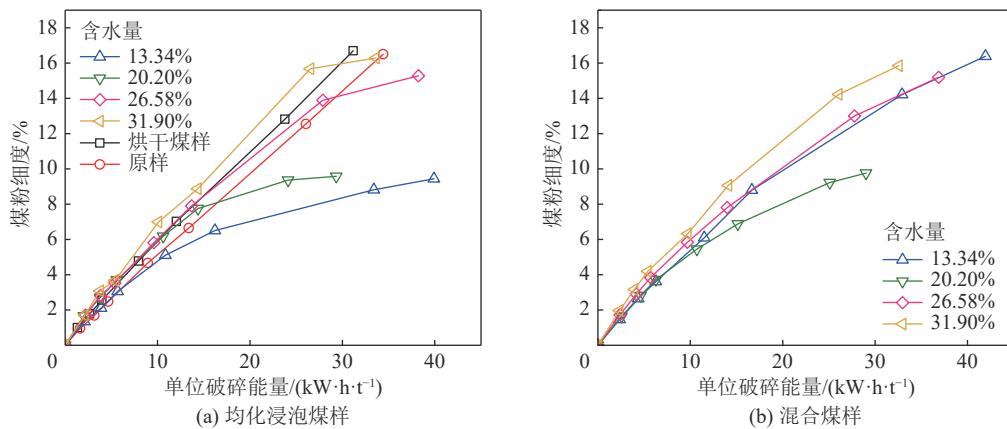


图 3 单独及混合破碎时煤炭破碎能量与煤粉细度的关系

Fig.3 Relationship between coal crushing energy and coal powder fineness in separate and mixed crushing

根据拟合结果计算得到烘干、原始和均化浸泡煤样单独破碎时的  $A \times b$  分别为 2.62、2.21、3.42、3.77、3.27 和 3.51, 加水处理后颗粒抵抗破碎能力有所减弱。混合煤样破碎时的  $A \times b$  分别为 2.76、3.01、3.10 和 3.55, 较均化浸泡样品有所降低。在图 3 煤炭破碎能量与煤粉细度  $t_{10}$  的关系曲线中, 单独和混合破碎的能耗和细度均呈离散分布。煤粉细度相同的条件下, 破碎能量与含水量成反比, 因此可以将不同水分梯度煤样的破碎能量与含水量相乘以降低数据点的分散程度。处理后的试验数据如图 4 所示。

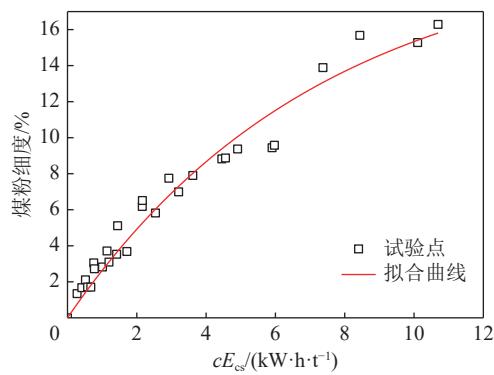


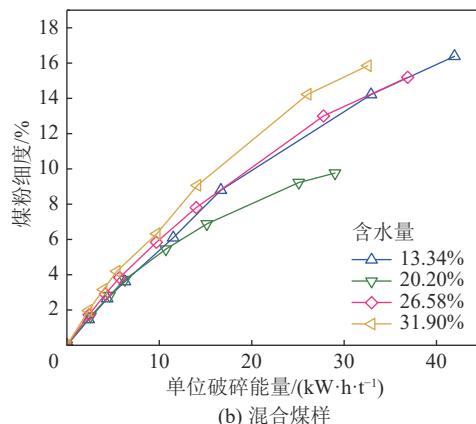
图 4 经归一化处理后不同含水量的均化浸泡煤样破碎能量与煤粉细度的关系

Fig.4 The relationship between the crushing energy of homogeneous soaking coal samples and the fineness of coal powder after normalization

碎环境下不同水分梯度煤样抵抗破碎的能力, 本文选用经典的能量—粒度关系模型拟合各试验数据。

$$t_{10} = A \times (1 - e^{-bE_{cs}}) \quad (1)$$

式中:  $t_{10}$  为产物细度, %;  $E_{cs}$  为单位破碎能量, ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ )/t;  $A$  为煤粉细度所能达到的最大值, %;  $b$  为单位能量所能破碎物料的质量, t/( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ),  $A \times b$  为表征物料抵抗破碎能力的指标。



(b) 混合煤样

与图 3 相比, 处理后的数据点分布相对集中, 可以采用单一模型表征, 即:

$$t_{10} = A \times (1 - e^{-bcE_{cs}}) \quad (2)$$

式中:  $c$  为煤样的含水量。

### 3 结 论

1)相较于原始煤样, 单独破碎时无烟煤中含水量(主要是颗粒表面和颗粒间游离水)的提高, 使初始粒级物料破碎速率明显降低; 而干煤与湿煤经充分搅拌混合后破碎, 煤样加权含水量在 13.34% 时破碎速率变化较小。

2)在水分黏结作用和样品固体颗粒含量变化的共同作用下, 可磨性指数随着含水量增加先减小后增大; 煤中水分较少时(含水量 13.34%)混合破碎会使外水发生迁移, 削弱煤颗粒间外水的黏聚作用, 减小因含水量增加对可磨性指数的影响; 混配煤样的可磨性指数在含水量超过 26.58% 后与均化浸泡煤样呈现相同的变化规律。

3)浸泡会使水分进入  $t_{10}$  颗粒内部孔隙, 降低粗粒级颗粒的抗压强度; 游离水会使细粒级颗粒团聚重新破碎, 增加  $-0.09 \text{ mm}$  粒级产物的生成, 因此随着含水量增加, 煤粉细度变大; 且外水会减小颗粒表面摩擦力, 增加体积粉碎的发生, 与内水共同作用, 降

低煤样抵抗破碎的能力,提高破碎能量效率。经过对能量—粒度减小模型参数优化,将含水量引入能耗模型,建立了可以表征不同含水量破碎过程的研磨能量模型,即:  $t_{10} = A \times (1 - e^{-bcE_{cs}})$ 。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 李伟,钟艺,郭敬杰,等.不同类型煤颗粒侧限压缩变形破碎特性试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(2):163-170.  
LI Wei, ZHONG Yi, GUO Jingjie, *et al.* Experimental study on confined compression deformation and breakage characteristics for different types of coal particles [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 163-170.
- [ 2 ] 王越.煤可磨性的预测模型及影响因素研究进展[J].煤质技术,2022,37(4):37-42.  
WANG Yue. Research on the prediction model and influencing factor of coal grindability [J]. Coal Quality Technology, 2022, 37(4): 37-42.
- [ 3 ] 王存宝,白利洲,王慧芳.浅谈样品破碎方式对哈氏可磨指数的影响[J].内蒙古煤炭经济,2019(10):25-26,36.  
WANG Cunbao, BAI Lizhou, WANG Huifang. The influence of sample breaking mode on Hardgrove grindability index [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(10): 25-26, 36.
- [ 4 ] 孟夏娟.分析煤的哈氏可磨性指数测定影响因素[J].当代化工研究,2019(5):182-183.  
MENG Xiajuan. Analysis of the influencing factors on the determination of Harrington grindability index of coal [J]. *Modern Chemical Research*, 2019(5): 182-183.
- [ 5 ] 薛永妍,薛玲芳,张小平.煤的哈氏可磨性指数测定的影响因素及对策措施[J].山西化工,2020,40(5):81-83,93.  
XUE Yongyan, XUE Lingfang, ZHANG Xiaoping. Influencing factors and countermeasures for determination of Hardgrove grindability index of coal [J]. Shanxi Chemical Industry, 2020, 40(5): 81-83, 93.
- [ 6 ] 胡卿,周建忠,徐爱民,等.不同烘干温度下褐煤可磨性指数研究[J].选煤技术,2022,50(1):34-37.  
HU Qing, ZHOU Jianzhong, XU Aimin, *et al.* Study on grindability index of lignite at different drying temperatures [J]. Coal Preparation Technology, 2022, 50(1): 34-37.
- [ 7 ] 巢美林,程启国.煤的水分与煤可磨性的关系分析[J].燃料与化工,2018,49(5):12-13,17.  
CHAO Meilin, CHENG Qiguo. The correlation between coal moisture and its grindability [J]. Fuel & Chemical Processes, 2018, 49(5): 12-13, 17.
- [ 8 ] 吴任超,何亚群,谢卫宁,等.低变质煤的密度与粒度对可磨性和能耗的影响[J].煤炭科学技术,2011,39(8):118-120,117.  
WU Renchao, HE Yaqun, XIE Weining, *et al.* Density and particle size of low metamorphic coal affected to grindability and energy consumption [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39( 8 ) : 118-120, 117.
- [ 9 ] 邱传耕,王振飞,张建良,等.神东烟煤水分对其高炉喷吹性能的影响[J].中国冶金,2020,30(1): 26-31.  
QIU Chuangeng, WANG Zhenfei, ZHANG Jianliang, *et al.* Effect of moisture of Shendong bituminous coal on its blast furnace injection performance [J]. China Metallurgy, 2020, 30(1): 26-31.
- [ 10 ] 陈亚飞.高炉喷吹用大淑村矿无烟煤粒度的优化研究[J].煤炭科学技术,2008,36(8):1-3,21.  
CHEN Yafei. Optimized research on particle size of Dashucun Mine anthracite for blast furnace injection [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(8): 1-3, 21.
- [ 11 ] VUTHALURU H B, BROOKE R J, ZHANG D K, *et al.* Effects of moisture and coal blending on Hardgrove Grindability Index of Western Australian coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 81(1): 67-76.
- [ 12 ] 施瑞盟,张龙,邹冲,等.兰炭和喷吹煤组成与结构特征对可磨性的影响[J].钢铁,2020,55(8):86-92,159.  
SHI Ruimeng, ZHANG Long, ZOU Chong, *et al.* Effect of composition and structural characteristics of char and injected coal on grindability [J]. Iron & Steel, 2020, 55(8): 86-92, 159.
- [ 13 ] 张晓博,赵虹,杨建国.混煤粉碎特性及哈氏可磨性指数的影响因素研究[J].动力工程学报,2011,31(4):253-256,272.  
ZHANG Xiaobo, ZHAO Hong, YANG Jianguo. Analysis on factors influencing HGI and crushing behaviors of blended coals [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(4): 253-256, 272.
- [ 14 ] 李子文,周志成,索永建.混煤可磨性指数(HGI)可加性研究[J].洁净煤技术,2013,19(4):37-40.  
LI Ziwen, ZHOU Zhicheng, SUO Yongjian. Additivity of mixed coal grindability index [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(4): 37-40.
- [ 15 ] 李荣鹏,张建良,王广伟.兰炭配煤可磨性规律及粒度分布研究[J].冶金能源,2017,36(6):21-25.  
LI Rongpeng, ZHANG Jianliang, WANG Guangwei. Study on the grinding behavior and particle size distribution of semi-coke blending coal [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2017, 36(6): 21-25.
- [ 16 ] 李雄飞,鄢晓忠,陈文,等.配煤比例对混煤可磨性及磨损性影响的试验研究[J].湖南电力,2020,40(3): 1-4, 22.  
LI Xiongfei, YAN Xiaozhong, CHEN Wen, *et al.* Experimental study about effect of blending proportion on grindability and wearing of the mixed coal [J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(3): 1-4, 22.
- [ 17 ] XIE W N, LU Q C, HE Y Q, *et al.* Discussion on the quantification of components in heterogeneous breakage of coals [J]. *Fuel*, 2020, 269: 117444.
- [ 18 ] DUAN J, LU Q C, ZHAO Z Y, *et al.* Grinding behaviors of components in heterogeneous breakage of coals of different ash contents in a ball-and-race mill [J]. *Minerals*, 2020, 10(3): 230.
- [ 19 ] LU Q C, XIE W N, ZHANG F B, *et al.* Energy-size reduction of mixtures of anthracite and coking coal in Hardgrove mill [J]. *Fuel*,

- 2020, 264: 116829.
- [20] 张宇新, 谢卫宁, 姜海迪, 等. 可磨性指数对煤炭混合破碎过程影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 2088–2095.  
ZHANG Yuxin, XIE Weining, JIANG Haidi, *et al.* Experimental investigation on the influence of hardgrove grindability index on the heterogeneous grinding of coal mixture[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 2088–2095.
- [21] 袁军伟, 常铎. 无烟煤和焦煤液氮冻融循环致裂效果对比试验[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 141–147.  
YUAN Junwei, CHANG Duo. Contrast test of liquid nitrogen freeze-thaw cycle cracking effect between anthracite and coking coal[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 141–147.
- [22] YANG Y, HE Y Q, BI X T, *et al.* Effect of moisture on energy-size reduction of lignite coal in Hardgrove mill[J]. *Fuel*, 2020, 270: 117477.
- [23] 杨晓毓, 姜英, 邵徇. 干燥强度对褐煤孔隙结构及水分复吸的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(4): 109–112, 125.  
YANG Xiaoyu, JIANG Ying, SHAO Xun. Drying intensity affected to pore structure and water re-adsorption in lignite[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(4): 109–112, 125.
- [24] REN Q Q, ZHANG Y F, ARAUZO I, *et al.* Roles of moisture and cyclic loading in microstructures and their effects on mechanical properties for typical Chinese bituminous coals[J]. *Fuel*, 2021, 293: 120408.