

DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.10.033



引用格式: 范浩东, 史鉴, 杨海瑞, 等. 煤泥抗拉强度特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 4142-4149.

Citation: FAN Haodong, SHI Jian, YANG Hairui, et al. Experimental study on tensile strength characteristics of coal slime[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2022, 53(10): 4142-4149.

## 煤泥抗拉强度特性试验研究

范浩东<sup>1,2</sup>, 史鉴<sup>3</sup>, 杨海瑞<sup>1</sup>, 吕俊复<sup>1</sup>, 金燕<sup>2</sup>, 高琴<sup>3</sup>, 张缙<sup>1</sup>, 秦舒宁<sup>2</sup>, 周宝<sup>2</sup>

- (1. 清华大学 能源与动力工程系, 北京, 100084;
2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原, 030024;
3. 上海锅炉厂有限公司, 上海, 200245)

**摘要:** 为了研究煤泥抗拉强度进而判断煤泥的入炉形态, 设计一套单轴拉伸试验系统来测量煤泥的抗拉强度, 通过试验确定煤泥最佳静置时间及步进伺服电动机拉伸速率, 并研究不同含水率及压实度对煤泥抗拉强度的影响规律。研究表明: 当静置时间小于等于2 d时, 煤泥的抗拉强度及其增速随着静置时间的延长而增大, 而后, 随着静置时间进一步延长, 煤泥的抗拉强度趋于不变; 拉伸速率通过影响煤泥内部的孔隙水压力进而影响煤泥抗拉强度, 过大或过小的拉伸速率都会使测量结果产生较大误差, 选取0.8 mm/min拉伸速率可有效避免端部应力集中的影响; 含水率与煤泥抗拉强度之间呈负相关关系, 含水率越大, 煤泥抗拉强度越小, 当含水率由25.12%增加至35.17%时, 煤泥抗拉强度从25.23 kPa减小至21.39 kPa; 压实度与煤泥之间呈正相关关系, 压实度越大, 煤泥抗拉强度呈线性增大, 当压实度从85 g增加至100 g时, 煤泥抗拉强度从19.44 kPa增加至29.92 kPa。

**关键词:** 煤泥; 单轴拉伸; 含水率; 压实度; 静置时间; 拉伸速率

**中图分类号:** TK0

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-7207(2022)10-4142-08

## Experimental study on tensile strength characteristics of coal slime

FAN Haodong<sup>1,2</sup>, SHI Jian<sup>3</sup>, YANG Hairui<sup>1</sup>, LÜ Junfu<sup>1</sup>, JIN Yan<sup>2</sup>, GAO Qin<sup>3</sup>,  
ZHANG Man<sup>1</sup>, QIN Shuning<sup>2</sup>, ZHOU Bao<sup>2</sup>

- (1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
3. Shanghai Boiler Works Co. Ltd., Shanghai 200245, China)

**Abstract:** A uniaxial tensile test system was developed to measure the tensile strength of coal slime in order to study the tensile strength of coal slime and then judge the morphology of coal slime into the furnace. The optimum dwell time of coal slime and the tensile rate of stepping servo motor were determined by experiments. The influence law of different water content on the tensile strength of coal slime was studied. The results show that in

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-01-01

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(U1810126) (Project(U1810126) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 张缙, 博士, 教授, 从事循环流化床研究; E-mail: zhangman@tsinghua.edu.cn

the first two days, the longer the dwell time is, the greater the tensile strength of the coal slime is, and the faster the growth rate is. After that, with the increase of the dwell time, the tensile strength of the coal slime tends to be unchanged. The tensile rate affects the tensile strength of the coal slime by affecting the pore water pressure inside the slime. When tensile rate is too large or too small, large error will occur in the measurement results. The 0.8 mm/min tensile rate can effectively avoid the influence of stress concentration at the end. There exists a negative correlation between the water content and the tensile strength of coal slime. The higher the water content is, the smaller the tensile strength of slime is. When the water content increases from 25.12% to 35.17%, the tensile strength of coal slime decreases from 25.23 kPa to 21.39 kPa. There exists a positive correlation between compression degree and coal slime. The tensile strength of coal slime increases linearly with the degree of the compression. When the compression degree increases from 85 g to 100 g, the tensile strength of coal slime increases from 19.44 kPa to 29.92 kPa.

**Key words:** coal slime; uniaxial tensile; water content; compression degree; dwell time; tensile rate

原煤入洗是使煤炭成为洁净燃料的最主要手段<sup>[1]</sup>, 近年来, 我国原煤入洗比例逐渐增大, 2020 年我国煤泥产量已达 3.12 亿 t, 对其进行简单静置处理会带来环境污染和能源浪费。因此, 如何对煤泥进行减量化、无害化、资源化处理, 形成循环经济模式, 是中国煤炭市场迫切需要解决的问题, 因此, 开发大规模高效清洁的煤泥综合利用技术势在必行。循环流化床燃烧是规模化高效利用煤泥的最佳方式<sup>[2-3]</sup>。然而, 由于煤泥具有粒度小、水分高、黏度大等特点, 其入炉形态、干燥以及燃烧过程与传统燃料不同。为了更好地分析煤泥进入循环流化床炉膛后的运动、干燥以及燃烧行为, 从而对锅炉的设计和运行进行优化指导, 很多学者进行了相关研究。王飞等<sup>[4]</sup>分别从时间和空间两个角度, 对煤泥团入炉后抗压强度、水分、矿物及官能团随时间的变化规律进行了研究。尹炜迪等<sup>[5]</sup>为计算煤泥燃烧行为的运动和干燥过程, 基于垂直方向一维运动与颗粒内部退缩蒸发界面假设建立了耦合模型, 计算了不同条件下煤泥的运动和内部温度参数。WANG 等<sup>[6]</sup>采用高速摄像机捕捉燃烧过程中颗粒宏观结构的变化, 研究了煤泥球形颗粒在空气中燃烧过程中的结构和形态演变过程, 通过 N<sub>2</sub> 吸附测试和分析, 发现煤泥颗粒内部存在大量的中孔和少量的微孔。上述研究主要针对煤泥入炉受热后的行为特性, 但针对煤泥入炉形态变化的研究鲜有报道, 而煤泥的断裂与煤泥的抗拉强度密切相关, 因此, 本文以循环流化床电厂用典型煤泥为研究对象, 从试验研究和机理分析两方面研究煤泥抗拉强度, 以期对煤泥入炉后形态变化的研究提供理论基础。

煤泥入炉形态包括煤泥长度和直径, 选择最佳长度范围的煤泥有利于提高整个炉膛的燃烧效率: 煤泥长度过长, 导致煤泥掉落炉排燃烧不充分; 煤泥长度过短, 又达不到资源化利用煤泥的目的。由于煤泥含水率高、黏度大、难以成型且实验过程中易发生端部应力集中现象, 煤泥抗拉强度测定难以实现, 本文通过借鉴物理性质与煤泥相近的黏土拉力测量方法, 进而研发测量煤泥抗拉强度的实验装置。目前, 测定黏土抗拉强度的试验方法主要有直接测量法和间接测量法 2 种<sup>[7]</sup>。直接测量法主要有单轴拉伸法和三轴拉伸法, 间接测量法主要有梁弯曲法、空心圆柱法、轴向压裂法。三轴拉伸法受围压影响较大, 间接测量法受周围环境和计算参数影响较大, 进而产生较大的误差, 而单轴拉伸试验方法操作简单、方便, 受外界因素影响较小, 精确度高, 适合室内操作。但是目前还没有适用于高含水率、高黏性的非牛顿流体的单轴拉伸试验仪器, 而且自行研制的简易拉伸仪和采用的制样方式都存在一定的弊端, 试验测定结果存在较大的误差。基于上述原因, 结合煤泥自身结构特性和现有试验技术, 本文首先研制一套单轴抗拉强度实验系统。试验系统采用光杆和滑块减小滑动摩擦力的影响, 同时采用“两头粗、中间细”的拉伸试样, 克服了以往试验仪器和试验方法端部应力集中的缺点, 不仅能够准确测定煤泥的抗拉强度, 而且操作简单、方便, 可使试验效率提高。

其次, 本文在该试验系统上开展煤泥抗拉强度特性研究, 在此基础上, 提出适用于工业应用的煤泥抗拉强度模型, 通过研究煤泥含水率及压

实度对煤泥抗拉强度的影响规律，进而分别建立煤泥抗拉强度与含水率及压实度之间的数学关系式。

# 1 煤泥单轴抗拉强度试验

## 1.1 抗拉强度试验系统

该套试验系统主要包括制样系统和拉伸装置两部分，制样系统如图1所示，主要包括压制桶、支撑钢架、滚动轴承、压杆、压盘、砝码篮。图1中， $L$ 为压制桶高度； $L_1$ 为杠杆短臂长度； $L_2$ 为长臂长度； $G$ 为砝码质量； $N$ 为向下压力； $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ 分别为压制桶内径和外径。该制样制备系统采用一次静压成型技术，保证了试样的整体性，压制桶采用“两头粗、中间细”的圆柱形状，用以减少拉伸试验过程中的端部应力集中现象，通过改变砝码篮内砝码的质量来控制压实度，直至压制压杆不再向下移动为止。

煤泥试样固定在不锈钢挡板和拉伸铝板中间，拉伸模具形状采用与制样模具同样尺寸的“两头

粗、中间细”的圆柱形状，试验由步进伺服电动机提供水平向右的拉伸力，拉动拉伸铝板向右产生水平移动，使煤泥柱发生形变，数据采集卡实时记录煤泥柱断裂过程中的拉力变化，单轴拉伸实验系统如图2所示。

## 1.2 煤泥拉伸断裂过程

煤泥含水率高、黏性大，表现出非牛顿流体的性质，在传统的非牛顿流体实验中，通常认为非牛顿流体断裂属于脆性断裂<sup>[8]</sup>，在拉伸过程中，当抗拉强度达到煤泥抗拉强度极限时，试样发生断裂。但在实际实验中发现，当煤泥抗拉强度到达极限值时，并不会突然断裂，典型的应力-位移曲线如图3所示。煤泥抗拉强度在达到临界抗拉强度之前，随着位移增加，进入微裂阶段，抗拉强度先会处于亚临界状态，亚临界状态下产生很多细小裂缝，细小裂缝会导致煤泥抗拉强度逐渐增大，出现局部回弹现象；当煤泥抗拉强度到达极限值时，煤泥部分裂缝对于煤泥抗拉强度的影响小于煤泥主裂缝对煤泥抗拉强度的影响，煤泥抗拉强度逐渐减小，失稳扩展阶段后煤泥最终被破坏。

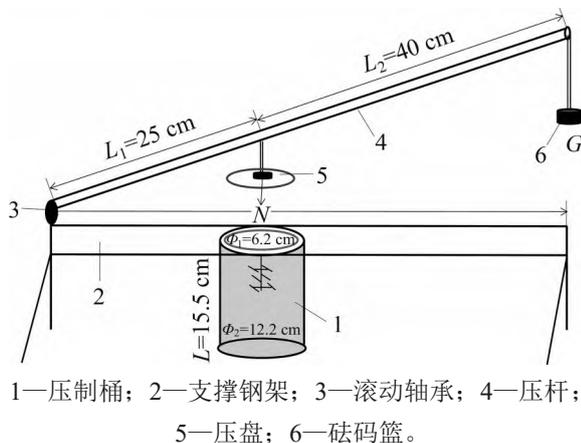


图1 制样系统  
Fig 1 Sample preparation system

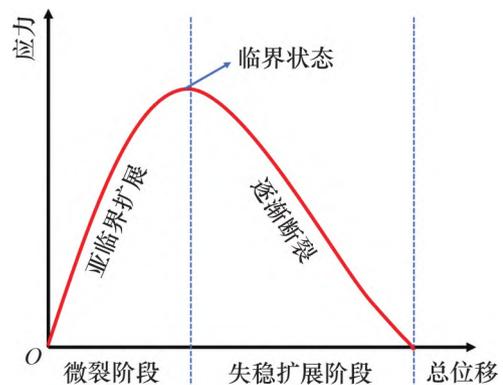


图3 单轴拉伸试验中煤泥的典型应力-位移曲线  
Fig. 3 Typical stress and displacement curves of coal slime in a uniaxial tensile test

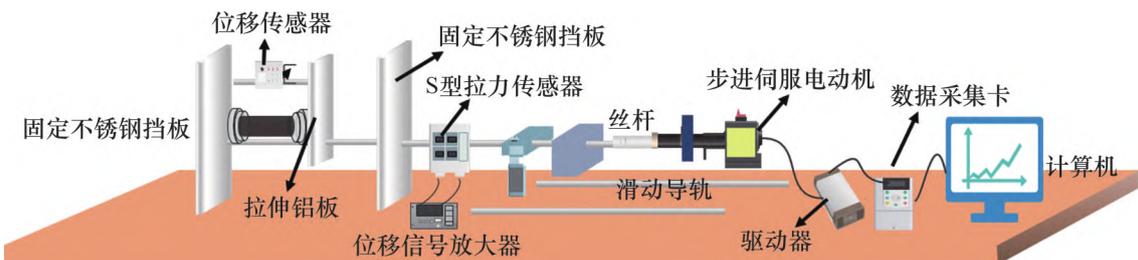


图2 单轴拉伸实验系统  
Fig. 2 Test system with a uniaxial tensile

## 2 实验边界条件的确定

### 2.1 试样静置时间对煤泥抗拉强度的影响规律

煤泥静置时间不同, 煤泥的抗拉强度也会有所变化, 其中, 煤泥原样的元素质量分数如表 1 所示。表 1 中, 1 号和 2 号试样初始含水率分别为 1.92% 和 1.73%。不同静置时间的 1 号煤泥如图 4 所示。通过试验研究确定煤泥静置时间对煤泥抗拉强度  $\sigma_T$  的影响规律, 实验结果如图 5 所示。图 5 中,  $t$  为静置时间,  $R^2$  和  $P$  为拟合相关系数。

由图 4 和图 5 可知: 前 2 d, 静置时间越长, 煤泥的抗拉强度越大, 且抗拉强度增加速率较快, 随着静置时间延长, 煤泥的抗拉强度趋于不变。这是因为对于原始煤泥, 颗粒间含有较多的孔隙水, 流动时需要克服的阻力小, 抗拉强度较小; 1~2 d 时, 孔隙水逐渐被蒸发, 抗拉强度增大; 3~5 d 时, 煤泥抗拉强度趋于不变。由于洗煤厂生产的煤泥首先会被集中静置, 根据生产工艺和发电厂利用情况的不同, 静置时间会有所不同<sup>[9]</sup>, 通常

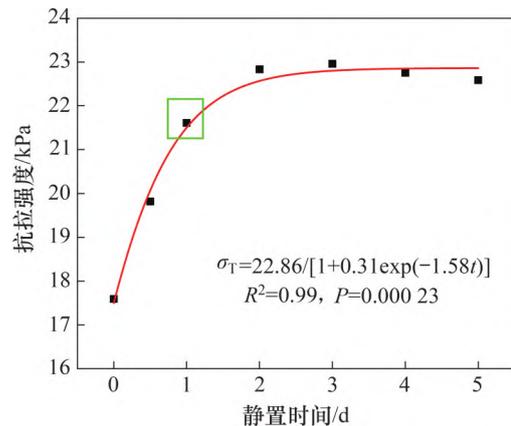


图 5 煤泥抗拉强度随静置时间的变化

Fig. 5 Variation law of tensile strength of coal slime with dwell time

为 1 d, 因此, 本试验所有试验静置时间均为 1 d。

### 2.2 拉伸速率对抗拉强度的影响

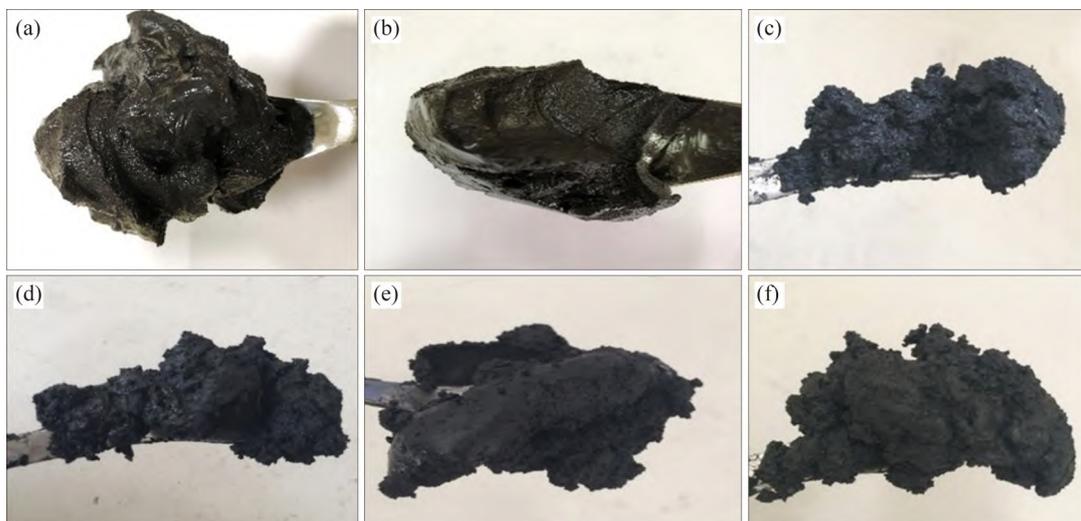
拉伸速率的变化使煤泥中孔隙水压力的作用效果发生变化, 导致测量结果存在一定差异。孔隙水压力指孔隙水所承受或者传递的压力, 孔隙水压力均匀地分布于颗粒表面, 不改变物料体积, 也不改变颗粒位置。当拉伸速率分别为 0.2, 0.4,

表 1 煤泥组分质量分数

Table 1 Component mass fraction of coal slime

试样编号	灰分 $A_{ad}$	挥发分 $V_{ad}$	固定碳 $FC_{ad}$	$C_d$	$H_d$	$O_d$	$N_d$	$S_d$
1 号	43.06	22.07	32.95	39.96	2.52	11.45	0.73	0.37
2 号	38.56	23.37	36.34	46.29	3.12	9.91	0.89	0.51

注: 下标 ad 表示空气干燥基; d 表示干燥基。



(a) 原样煤泥; (b) 静置 0.5 d 的煤泥; (c) 静置 1.0 d 的煤泥; (d) 静置 2.0 d 的煤泥; (e) 静置 3.0 d 的煤泥; (f) 静置 4.0 d 的煤泥

图 4 不同静置时间的 1 号煤泥

Fig. 4 No.1 coal slime at different dwell times

0.6, 0.8, 1.2, 1.4 和 1.6 mm/min 时, 进行单轴拉伸试验, 1 号煤泥抗拉强度随拉伸速率的变化如图 6 所示。

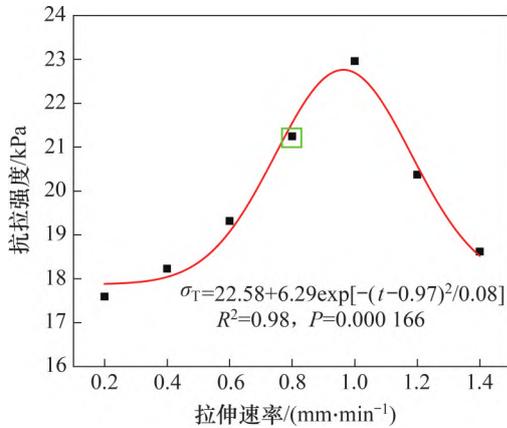


图 6 1 号煤泥抗拉强度随拉伸速率的变化

Fig. 6 Variation of tensile strength of No.1 coal slime with tensile rate

由图 6 可见: 随拉伸速率增大, 煤泥抗拉强度先增加后减小。煤泥抗拉强度受试样内部的孔隙水压力作用示意图如图 7 所示。在慢速拉伸过程中, 荷载增加速度慢, 试样内部的孔隙水压力逐渐消散; 而当拉伸速率较大时, 荷载增加速度较快, 持续时间短, 试样内部的孔隙水压力来不及消散, 使得测得的抗拉强度偏大, 如图 8 所示。因此, 本文选取孔隙水压力不发生突变时的拉伸速率即 0.8 mm/min 作为试验拉伸速率。

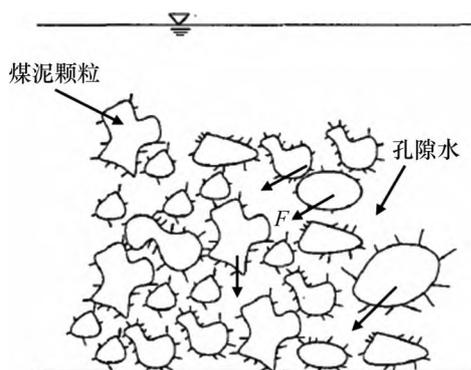


图 7 煤泥孔隙水压力作用示意图

Fig. 7 Schematic diagram of action of pore water pressure in coal slime

### 3 煤泥抗拉强度的测定

#### 3.1 含水率对煤泥抗拉强度的影响

测量边界条件确定后, 煤泥的抗拉强度仅仅

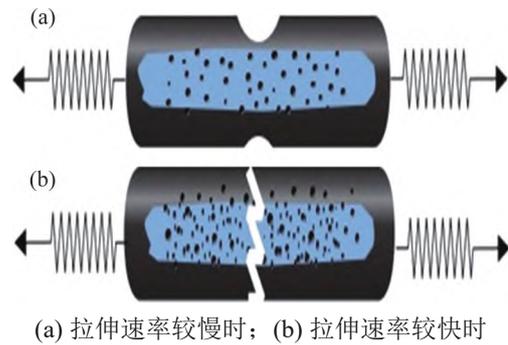


图 8 煤泥拉伸断裂示意图

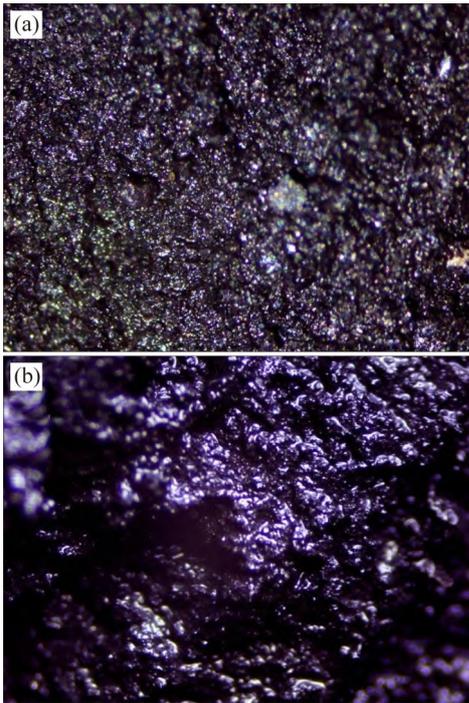
Fig. 8 Schematic diagram of tensile fracture of coal slime

取决于煤泥本身的特性, 在工业应用上, 其主要影响因素是煤泥含水率<sup>[10]</sup>, 本文中含水率  $w$  为煤泥水分的质量与煤泥总质量的比值, 较小的含水率变化会对煤泥的抗拉强度产生较大的影响<sup>[11-13]</sup>。为减小管道输送阻力, 流化床燃烧用煤泥含水率为 25%~38%<sup>[14]</sup>。取一定量 1 号煤泥, 用烘干法测定煤泥的含水率, 按控制含水率计算所需要参加的水的质量, 在 1 号煤泥样品中均匀喷洒去离子水, 控制含水率  $w$  分别为 25.12%, 28.39%, 30.46%, 33.18% 和 35.17%, 放置 24 h 进行养护, 保证水分分布均匀。在相同的压实度下将煤泥压制成型, 用单轴拉伸实验系统对试样进行拉伸试验, 在线定量研究煤泥抗拉强度随含水率  $w$  的变化规律。

试验开始后, 煤泥的抗拉强度随着含水率的增加而减小。当含水率为 25.12% 时, 煤泥抗拉强度为 25.23 kPa; 当含水率为 35.17% 时, 煤泥抗拉强度仅为 3.57 kPa。这是由于当含水率较小时, 颗粒之间的距离较近, 颗粒之间的联结性能较大, 抗拉强度较大<sup>[15-18]</sup>; 随着含水率增大, 煤泥颗粒之间的水化膜也随之增厚, 颗粒之间的接触面积变小, 联结性能减弱, 煤泥抗拉强度变小。不同含水率的煤泥断裂过程相似, 试验开始后, 煤泥试样经过微裂阶段到达临界状态, 之后随着拉伸铝板位移进一步增加, 煤泥进入失稳扩展阶段, 直至煤泥试样发生断裂。图 9 所示为含水率分别为 29.27% 和 33.21% 的煤泥形貌。

通过拟合可得出 1 号煤泥的抗拉强度与含水率关系曲线近似符合线性函数关系, 如图 10 所示。抗拉强度  $\sigma_T$  与含水率  $w$  的数学关系式为

$$\sigma_T = -0.41w + 35.85, 25.12\% \leq w \leq 35.17\% \quad (1)$$



(a)  $w=29.27\%$ ; (b)  $w=33.21\%$

图9 不同含水率  $w$  的煤泥形貌

Fig. 9 Morphologies of coal slime with different water contents

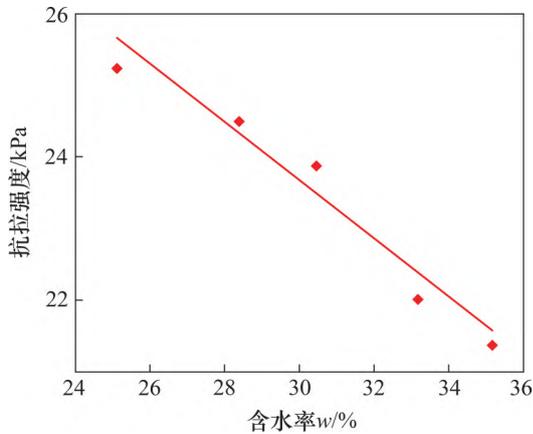


图10 1号煤泥抗拉强度随含水率变化拟合图

Fig. 10 Fitting diagram of No.1 coal slime tensile strength changing with water content

### 3.2 压实度对煤泥抗拉强度的影响

压实度是依据砝码质量人为定义的煤泥压实情况。当砝码质量为 100 g 时, 压至压杆不向下产生位移为止, 认为压实度为 100 g; 当采用质量为 95 g 的砝码压制时, 认为煤泥样品压实度为 95 g。压实度反映煤泥颗粒间紧密程度。用制样模具制备试样并进行拉伸试验, 固定含水率为 30.46%, 压实度分别为 85, 90, 95 和 100 g, 定量研究 1 号

煤泥抗拉强度随压实度的变化规律, 如图 11 所示。

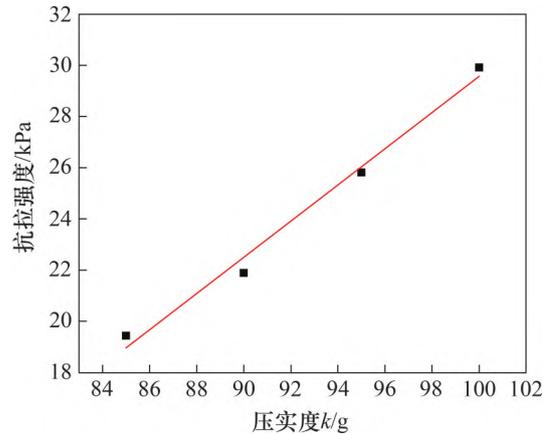


图11 1号煤泥抗拉强度随压实度变化拟合图

Fig. 11 Fitting diagram of No.1 coal slime tensile strength changing with compression degree

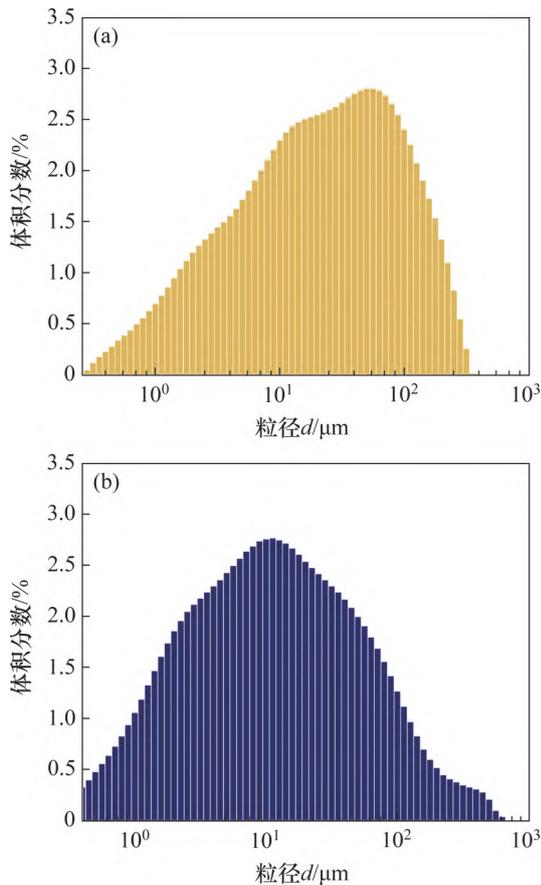
由图 11 可见: 在含水率不变的情况下, 煤泥抗拉强度随着压实度的增加而增大, 在压实度从 85 g 增大到 100 g 过程中, 煤泥抗拉强度从 19.44 kPa 增加至 29.92 kPa。这是因为随着压实度增大, 煤泥抗拉强度经过微裂阶段后到达抗拉强度极限值, 煤泥颗粒之间的间距变小, 颗粒之间相互接触的面积也随之增大, 颗粒之间的联结性能也增大; 而进入失稳扩展阶段后, 煤泥产生破坏时需要较大变形来克服颗粒之间的联结性能, 因此, 煤泥抗拉强度逐渐减小<sup>[19-24]</sup>。

通过拟合可知煤泥的抗拉强度与压实度  $k$  关系曲线近似符合线性函数关系(如图 11 所示)。其数学关系式为

$$\sigma_T = -41.17k + 0.71, 85 \text{ g} < k < 100 \text{ g} \quad (2)$$

## 4 数学关系式的验证

为验证本文所提数学关系式的适用性, 选取粒径更小的 2 号煤泥进行单轴拉伸实验验证并与模型预测结果进行对比, 粒径分布如图 12 所示。由图 12 可见 1 号煤泥粒径主要集中在 50  $\mu\text{m}$  附近, 2 号煤泥主要集中在 10  $\mu\text{m}$  附近。同时, 选取与 1 号煤泥初始含水率(为 25.12%)相差较大的 3 号煤泥(含水率为 34.37%)来验证模型。试验结果表明: 2 号与 3 号煤泥抗拉强度预测值与抗拉强度实际值相对误差范围在  $\pm 10\%$  以内(如图 13 所示), 表明数学关系式具有较强的适用性。



(a) 1号煤泥粒径分布; (b) 2号煤泥粒径分布

图 12 煤泥粒径分布对比图

Fig. 12 Comparison of coal slime particle size distribution

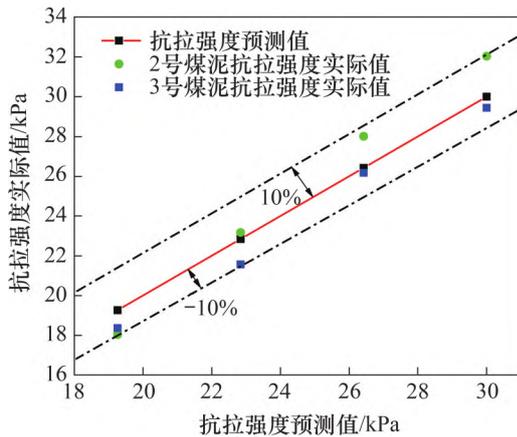


图 13 煤泥抗拉强度实际值与抗拉强度预测值对比图

Fig. 13 Comparison of the actual tensile strength and the predicted tensile strength of coal slime

## 5 结论

1) 通过煤泥断裂过程分析, 研究并搭建了单轴抗拉强度实验系统, 分别得出了静置时间及拉

伸速率对煤泥抗拉强度的影响规律。

2) 确定试验系统边界条件后, 依据煤泥破坏准则, 将煤泥拉伸断裂过程分为微裂阶段及失稳扩展阶段, 发现煤泥抗拉强度随着含水率的增加逐渐减小, 通过拟合建立了煤泥抗拉强度  $\sigma_T$  与含水率  $w$  的数学关系式:  $\sigma_T = -0.41w + 35.85$ 。该数学关系式适用于含水率为 25.12%~35.17% 的煤泥。

3) 随着压实度  $k$  增加, 煤泥抗拉强度呈线性增大, 通过拟合得到抗拉强度与压实度的数学关系式:  $\sigma_T = -41.17k + 0.71$ 。该数学关系式适用于压实度为 85~100 g 的煤泥。

4) 煤泥抗拉强度预测值和实际值的相对误差范围在 10% 以内, 表明本文所提数学关系式具有较强的适用性, 同时证明本文建立的模型可以很好地预测煤泥的抗拉强度, 可为工业界确定煤泥的入炉形态提供判断依据。

## 参考文献:

- [1] 李宁, 雷宏彬, 田忠文, 等. 煤泥资源化利用关键技术研究分析[J]. 煤炭工程, 2011, 43(12): 100-101.  
LI Ning, LEI Hongbin, TIAN Zhongwen, et al. Research and analysis on key technologies of coal slime resource utilization[J]. Coal Engineering, 2011, 43(12): 100-101.
- [2] SONG Zhanlong, JING Chuanming, YAO Liansheng, et al. Coal slime hot air/microwave combined drying characteristics and energy analysis[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 156: 491-499.
- [3] 李永茂, 赵江婷, 张圆圆, 等. 煤泥型煤爆裂行为的影响机制[J]. 煤炭转化, 2018, 41(3): 50-58.  
LI Yongmao, ZHAO Jiangting, ZHANG Yuanyuan, et al. Influence mechanism of coal slime briquette cracking behavior[J]. Coal Conversion, 2018, 41(3): 50-58.
- [4] 王飞, 赵江婷, 张圆圆, 等. 煤泥用于流化床燃烧时的结团过程研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 106-110.  
WANG Fei, ZHAO Jiangting, ZHANG Yuanyuan, et al. Investigation of agglomeration process of coal slime used in fluidized bed combustion[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 106-110.
- [5] 尹炜迪, 李博, 吴玉新, 等. 循环流化床锅炉煤泥燃烧行为模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1628-1633.  
YIN Weidi, LI Bo, WU Yuxin, et al. Model of coal slime combustion behavior in CFB boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1628-1633.
- [6] WANG Hui, LIU Songlin, LI Xiaotong, et al. Morphological and structural evolution of bituminous coal slime particles during the process of combustion[J]. Fuel, 2018, 218: 49-58.

- [7] 钮泽明, 陆士强. 粘性填土单轴抗拉强度的几个影响因素[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(2): 35-44.  
NIU Zeming, LU Shiqiang. On some factors influencing the uniaxial tensile strength of cohesive compacted fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(2): 35-44.
- [8] 党进谦, 张伯平, 熊永. 单轴土工拉伸仪的研制[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5): 31-32.  
DANG Jinqian, ZHANG BaiBo, XIONG Yong. Development of earthwork elongation apparatus[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(5): 31-32.
- [9] 党进谦, 郝月清, 李靖. 非饱和黄土抗拉强度的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 106-108.  
DANG Jinqian, HAO Yueqing, LI Jing. Study on tensile strength of unsaturated loess[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(6): 106-108.
- [10] 朱安龙. 粘性土抗拉强度试验研究及数值模拟[D]. 成都: 四川大学, 2005: 23-34.  
ZHU Anlong. Tension test and numerical analysis on cohesive clay[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 23-34
- [11] 吕海波, 曾召田, 葛若东, 等. 胀缩性土抗拉强度试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 615-620.  
LÜ Haibo, ZENG Zhaotian, GE Ruodong, et al. Experimental study of tensile strength of swell-shrink soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 615-620.
- [12] 谭波, 王传志, 刘忠攀, 等. 顶部给料全煤泥循环流化床燃烧与SO<sub>2</sub>排放不稳定性研究[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 111-118.  
TAN Bo, WANG Chuanzhi, LIU Zhongpan, et al. Investigation on combustion and SO<sub>2</sub> emission instabilities of top feeding coal slime fired circulating fluidized bed boilers[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 111-118.
- [13] LIU Bing, ZHANG Zhezi, ZHANG Hai, et al. Volatile release and ignition behaviors of single coal particles at different oxygen concentrations under microgravity[J]. Microgravity Science and Technology, 2016, 28(2): 101-108.
- [14] 梁斌, 冯强, 白浩隆, 等. 煤泥干粉在流化床中燃烧特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 560-567.  
LIANG Bin, FENG Qiang, BAI Haolong, et al. Combustion characteristics of dry coal slime powders in a fluidized bed [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 560-567.
- [15] SHAO Jingai, LEE D H, YAN Rong, et al. Agglomeration characteristics of sludge combustion in a bench-scale fluidized bed combustor[J]. Energy & Fuels, 2007, 21(5): 2608-2614.
- [16] 司玉成, 杜美利. 煤泥利用研究进展[J]. 广东化工, 2017, 44(4): 79-80.  
SI Yucheng, DU Meili. Research progress of slime utilization [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(4): 79-80.
- [17] 裴婷. 煤泥燃烧过程的试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016: 15-24.  
PEI Ting. Experimental study on combustion process of coal slime[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016: 15-24.
- [18] 蒋旭光, 池涌, 严建华, 等. 污泥在流化床内燃烧过程及结团微观机理分析[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(2): 121-127.  
JIANG Xuguang, CHI Yong, YAN Jianhua, et al. The combustion process in fluidized bed and agglomeration microstructure analysis for sludge[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(2): 121-127.
- [19] 黄中, 江建忠, 徐正泉, 等. 循环流化床锅炉大比例煤泥掺烧试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 112-116.  
HUANG Zhong, JIANG Jianzhong, XU Zhengquan, et al. Research on CFB boiler large proportion coal slime co-combustion test[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 112-116.
- [20] CAMPBELL J H. Pyrolysis of subbituminous coal in relation to *in situ* coal gasification[J]. Fuel, 1978, 57(4): 217-224.
- [21] 李佑楚. 流态化过程工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 14-36.  
LI Youchu. Introduction to Fluidization Process Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2008: 14-36.
- [22] LÜ J F, ZHANG J S, YUE G X, et al. Method of calculation of heat transfer coefficient of the heater in a circulating fluidized bed furnace[J]. Heat Transfer: Asian Research, 2002, 31(7): 540-550.
- [23] GUNN D J. Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidised beds[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(4): 467-476.
- [24] 范晓雷, 杨帆, 张薇, 等. 热解过程中煤焦微晶结构变化及其对煤焦气化反应活性的影响[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(4): 395-398.  
FAN Xiaolei, YANG Fan, ZHANG Wei, et al. Variation of the crystalline structure of coal char during pyrolysis and its effect on gasification reactivity[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(4): 395-398.

(编辑 伍锦花)