



王峰超,王恩茂,常博,等.急倾斜煤层水力压裂造缝规律及机理研究[J].矿业安全与环保,2023,50(3):18-22.  
WANG Fengchao,WANG Enmao,CHANG Bo,et al. Research on the law and mechanism of hydraulic fracturing in steeply inclined coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2023,50(3):18-22.  
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.03.004

扫码阅读下载

## 急倾斜煤层水力压裂造缝规律及机理研究

王峰超<sup>1</sup>,王恩茂<sup>2</sup>,常博<sup>1</sup>,王刚<sup>3,4</sup>

(1. 国家能源集团新疆能源有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590; 3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590; 4. 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**为了掌握急倾斜煤层水力压裂造缝规律及作用机理,为现场煤层水力压裂工艺提供技术指导,采用实验室实验的研究方法,以乌东煤矿作为研究对象,以三向应力、煤层层理为实验变量进行了实验室真三轴实验。研究表明:水力压裂效果主要取决于克服滤失效应的憋压过程;当层理与最大主应力方向垂直时,随着三向应力的增大,滤失效应减弱,有利于水力压裂;当层理与最大主应力方向平行时,随着三向应力的增大,滤失效应增强,不利于水力压裂。研究结果为急倾斜煤层水力压裂工艺提供了借鉴,完善了矿井水力压裂领域的研究内容。

**关键词:**急倾斜煤层;水力压裂;三向应力;煤层层理方向;滤失效应

**中图分类号:**TD327.2;TD712.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-4495(2023)03-0018-05

### Research on the law and mechanism of hydraulic fracturing in steeply inclined coal seam

WANG Fengchao<sup>1</sup>, WANG Enmao<sup>2</sup>, CHANG Bo<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>3,4</sup>

(1. National Energy Group Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China;  
2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;  
3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-Founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 4. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to master the law of fracture making and the action mechanism of hydraulic fracturing in steeply inclined coal seams and provide technical guidance for on-site coal seam hydraulic fracturing technology, using laboratory experiment research methods, the laboratory true triaxial experiment was carried out with Wudong Coal Mine as the research object and three-dimensional stress and bedding of coal seam as the experimental variables. The results show that the effect of hydraulic fracturing mainly depends on the process of pressure holding to overcome the filtration effect. When the bedding is perpendicular to the direction of the maximum principal stress, the filtration effect decreases with the increase of three-dimensional stress, which is conducive to hydraulic fracturing. When the bedding is parallel to the direction of the maximum principal stress, the filtration effect increases with the increase of three-dimensional stress, which is not conducive to hydraulic fracturing. The research results provide a reference for the hydraulic fracturing technology of steeply inclined coal seam and improve the research content in the field of mine hydraulic fracturing.

**Keywords:** steeply inclined coal seam; hydraulic fracturing; three-dimensional stress; bedding direction of coal seam; filtration effect

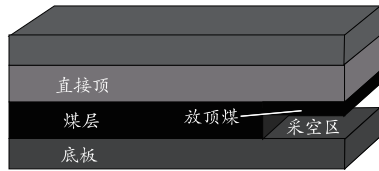
收稿日期:2022-03-16;2022-04-18 修订

基金项目:新疆维吾尔自治区高层次人才天池百人计划项目(2019-39)

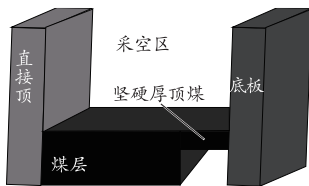
作者简介:王峰超(1983—),男,黑龙江牡丹江人,工程师,主要从事冲击地压防治方面的研究工作。E-mail: wang45779018@163.com.

急倾斜煤层具有特殊的地质构造,相比于缓倾斜煤层或水平煤层<sup>[1-3]</sup>,其特殊的水平分段开采方式导致了煤层采放比增大,致使急倾斜煤层的地应力

与缓倾斜、水平煤层的地应力存在显著的不同<sup>[4-5]</sup>，如图 1 所示。这种特殊的应力分布规律对于水力压裂造缝具有重要的影响。



(a) 水平煤层开采示意图



(b) 急倾斜煤层开采示意图

图 1 不同开采方式示意图

水力压裂技术<sup>[6-9]</sup>首先是在石油领域为了增产油气而采用的技术措施,后被引入到煤矿行业用于提高煤层卸压,同时增加煤层裂隙数量、煤层气产量<sup>[10-12]</sup>。对于水力压裂技术而言,一般认为,应力和应变<sup>[13-14]</sup>是影响水力压裂造缝的主要因素,而煤层是层状结构,从宏观上看其力学物理性质具有各向异性,在平行于层理的各个方向上力学物理性质较为相近<sup>[15-18]</sup>,可近似地认为相同,而在岩层层理面<sup>[19-21]</sup>的任一方向与垂直层理方向上的力学物理性质差异较大。因此水力压裂造缝的影响因素除了应力和应变大小外,还有煤层的层理结构和注水压力等。

为了探明急倾斜煤层水力压裂造缝规律及其作用机理,笔者结合急倾斜煤层应力分布规律分别设置三向应力的方向和煤层的方向 2 个变量,研究急倾斜煤层水力压裂造缝规律,并通过理论分析得出急倾斜煤层水力压裂造缝机理。

## 1 急倾斜煤层水力压裂实验

### 1.1 矿井概况

乌东煤矿煤层工作面采用单一走向长壁后退式采煤法,综采放顶煤采煤工艺,工作面沿煤层走向推进,沿煤层底板回采,机采高度 3.2 m,放煤高度 22.8 m,采放比 1:7,且回采煤层上部有面积采空区,放煤步距 1.6 m,采煤机截深 0.8 m,采用全部垮落法管理顶板。

### 1.2 实验用煤样制作

将乌东煤矿顶煤取出的大煤块,利用切割机等设备切割成 100 mm×100 mm×100 mm 的标准试样。分别沿煤层层理和垂直层理方向在试样正中央打

φ10 mm×60 mm 的钻孔,然后用 φ12 mm 的钻头在 φ10 钻孔的基础上进行扩展,扩展孔深 40 mm,留作预埋管所用。预埋管选用外径 12 mm,内径 10 mm,高 40 mm 的不锈钢管。预埋管的外壁涂硅橡胶后旋转插入钻孔中。为了防止液体从注水管与预埋管的缝隙中流出,将注水管上的“O”形圈与预埋管紧密贴合,以减小实验带来的误差。制作后的煤样用作研究三向应力、煤层层理方向对水力压裂造缝的影响规律。

### 1.3 实验仪器

真三轴压裂设备能够在横向、竖向及垂直方向 3 个方向的单独应力加载。注水管路只能沿 Z 方向从上而下注水,因此可以通过改变煤样的放置方向来改变注水方向与煤样层理之间的关系,如图 2 所示。该设备还可以通过设置参数,实现以恒压或恒距离加载方式将三轴应力加载至指定参数。操作全程都由设备自操作,因此试验误差较小,得到的数据精准可靠。

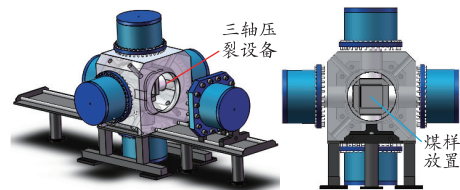


图 2 真三轴压裂设备图

### 1.4 实验方案及其参数设定

分别设置煤层层理垂直和平行最大主应力方向的 A、B 2 组实验,每组实验选用 3 个煤样按 0.1 MPa/s 的注水速率增加三向应力至实验值,三向应力设置如表 1 所示。

表 1 三向应力参数

实验编号	层理与最大主应力方向	$\sigma_x$ / MPa	$\sigma_z$ / MPa	$\sigma_y$ / MPa	注水压力/ MPa
A <sub>1</sub>	垂直	16	18	6	0.1
A <sub>2</sub>		18	18	6	0.1
A <sub>3</sub>		20	18	6	0.1
B <sub>1</sub>	平行	16	18	6	0.1
B <sub>2</sub>		18	18	6	0.1
B <sub>3</sub>		20	18	6	0.1

## 2 急倾斜煤层水力压裂造缝实验规律分析

### 2.1 三向应力对水力压裂造缝的影响规律

实验得出,在煤样层理与最大主应力方向垂直条件下且 X 方向最大主应力分别为 16、18、20 MPa

时的注水压力、压力泵上升高度结果曲线,如图3所示。

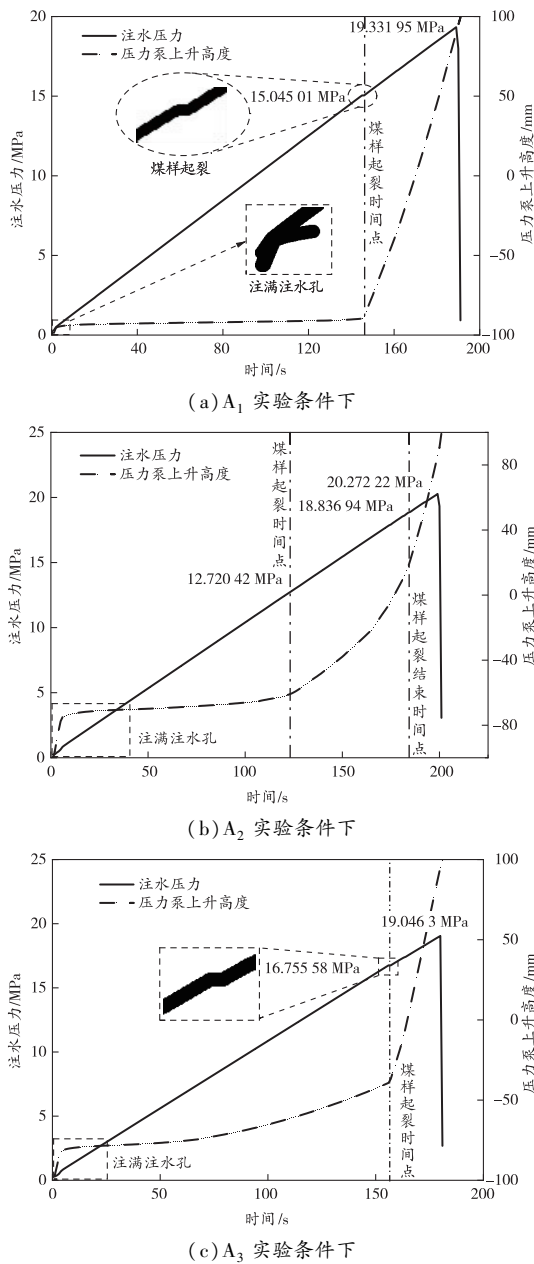


图3 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>3种实验条件下注水压力、压力泵上升高度结果曲线

由图3(a)和图3(c)可见,在A<sub>1</sub>、A<sub>3</sub>实验条件下,由于最大主应力方向单一,因此有明显的起裂时间点,且数据结果显示,煤样起裂压力分别为15.045 01、16.755 58 MPa。通过对比2个图中的数据可知,随着煤样三向应力的增大,煤样起裂压力呈现增大的趋势。

在A<sub>2</sub>实验条件下,由于在X和Z方向上的应力相等,都是最大主应力,因此煤样起裂方向并不是沿单一的最大主应力方向起裂,而是沿2个最大主应力所在的平面起裂。因此没有明显的起裂时间点,而是一个过程,从开始起裂压力为12.720 42 MPa,

到起裂结束的18.836 94 MPa。

实验得出,在煤样层理与最大主应力方向平行条件下且X方向为16、18、20 MPa时注水压力、压力泵上升高度结果曲线,如图4所示。

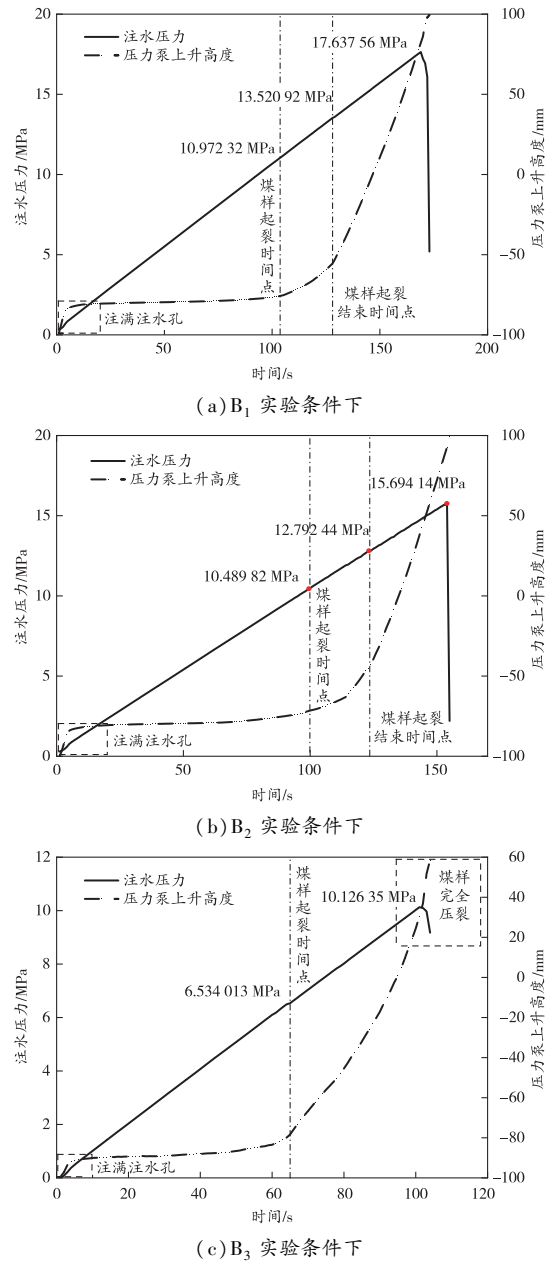


图4 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>3种实验条件下注水压力、压力泵上升高度结果曲线

由图4(a)和图4(b)可以看出,由于最大主应力相同,煤样的起裂时间点和煤样起裂结束时间点基本相同。且相比于垂直最大主应力方向的结果,滤失作用可能导致起裂时间点不明显。

图4(c)中的最大主应力为20 MPa,在压裂泵中的液体还没有完全注入时,煤样已经被完全压裂。对比图4(a)~(c)可以看出,在煤样层理与最大主应力方向平行,垂直于最小主应力的条件下,随着最



大主应力的增大,煤样的起裂压力变小。

## 2.2 煤层层理方向对水力压裂造缝的影响规律

为了方便对比煤层层理方向对水力压裂造缝的影响规律,将 2 种煤层层理方向得到的数据利用 Origin 软件进行图像绘制,其中没有明显起裂时间点的用开始起裂和起裂结束时的起裂压力平均值代替,编号按照表 1 所示进行标记,得到不同层理方向煤样起裂压力图,如图 5 所示。

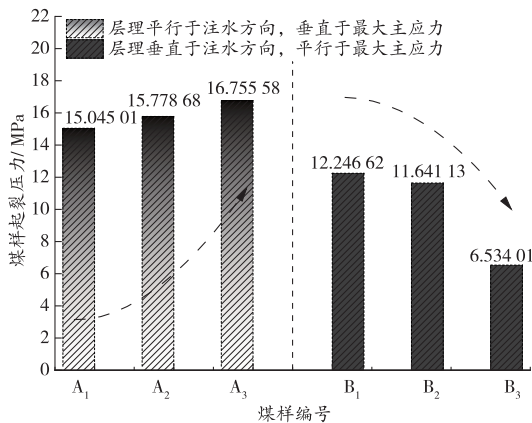


图 5 不同层理方向煤样起裂压力图

从图 5 可以看出,当煤样层理平行于注水方向、垂直于最大主应力时,随着最大主应力的增大,煤样起裂压力增大;当煤样层理垂直于注水方向、平行于最大主应力时,随着最大主应力的增大,煤样起裂压力减小。且从整体可以看出,煤样层理平行于注水方向、垂直于最大主应力的煤样起裂压力普遍大于煤样层理垂直于注水方向、平行于最大主应力时的起裂压力。

## 3 急倾斜煤层水力压裂造缝的作用机理

为了进一步研究三向应力、层理方向对水力压裂造缝的影响规律,掌握其作用机理,将实验前后煤样进行对比,如图 6 和 7 所示。



图 6 层理与注水方向平行条件下实验前后煤样图

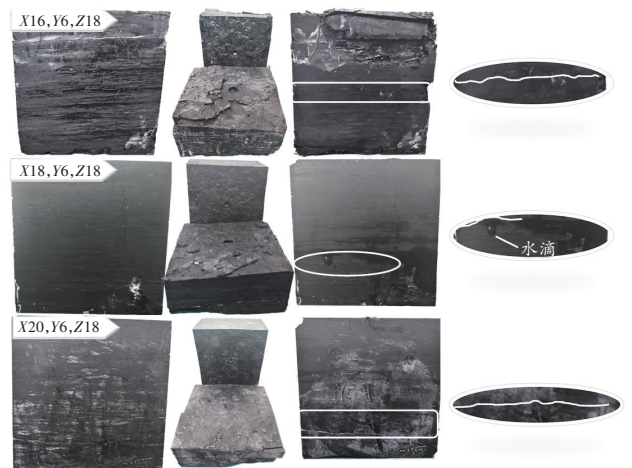


图 7 层理与注水方向垂直条件下实验前后煤样图

从图 6 可以看出,在 A<sub>1</sub> 实验条件下,实验后煤样并没有被完全压裂,只能在煤样表面发现几个细小的裂缝;在 A<sub>2</sub> 实验条件下,实验后煤样也没有被完全压裂,但裂缝长度较长;在 A<sub>3</sub> 实验条件下,实验后煤样表面发现贯通整个表面的裂缝。由此可以断定,煤层层理与最大主应力垂直,当注水压力一定时,随着三向应力的增大,煤样原有孔裂隙被压缩,滤失作用降低,煤层内部更容易形成憋压空间,进而促进了煤层水力压裂进程。

从图 7 可以看出,在 B<sub>1</sub> 实验条件下,实验后煤样表面出现明显的裂隙,且裂隙贯通整个断面;在 B<sub>2</sub> 实验条件下裂缝变短,注入的水从产生的裂隙中流出;在 B<sub>3</sub> 实验条件下,实验后煤样顺着原有层理方向裂隙扩大。由此可以分析得出,在煤层层理与最大主应力平行的条件下,随着三向应力的增大,原有裂隙得到扩展,增大了注水的滤失效应,因此不利于形成憋压空间,最终导致注水压力较低。

## 4 结论

主要研究了三向应力、煤层层理对煤层水力压裂的影响和作用机理。试验结果可以为现场顶煤水力压裂造缝提供基础数据指导,为预测本煤层及顶煤水力压裂产生的裂缝扩展规律提供借鉴,为定向水力压裂现场实施方案的设计提供帮助。主要得出以下结论:

1) 在 0.1 MPa/s 注水速率条件下,煤层水力压裂效果主要依靠憋压过程,当压力达到起裂压力时,煤样开始起裂。且煤样起裂方向都是沿着平行于最大主应力,垂直于最小主应力的方向。

2) 当煤层层理方向与最大主应力方向垂直时,随着三向应力的增大,起裂压力增大;当煤层层理方向与最大主应力方向平行时,随着三向应力的增大,

起裂压力减小。

3) 当煤层层理方向与最大主应力方向垂直时,三向应力能够减小煤样滤失效应,有利于煤层水力压裂;当煤层层理方向与最大主应力方向平行时,三向应力能够增大煤样滤失效应,不利于憋压过程,阻碍了煤层水力压裂。

参考文献 (References):

[1] 程卫民,李怀兴,刘义鑫,等.真三维应力下煤岩水力润湿范围动态监测试验系统研制[J].岩石力学与工程学报,2022,41(2):240-253.

[2] 黄小鹏,张鹏鹏,闫耀飞.矿井坚硬顶板定向水力压裂技术研究[J].中国煤炭,2017,43(7):55-57.

[3] 王建伟.松软低透气性煤层水力压裂增透瓦斯抽采技术研究[J].矿业安全与环保,2021,48(6):47-52.

[4] 何明川.不稳定流量水力压裂对深部低透气性煤层增透效果的影响[J].矿业安全与环保,2021,48(3):90-93.

[5] 王刚,程卫民,孙路路,等.煤层瓦斯压力及压力梯度影响因素的分析[J].煤矿安全,2013,44(2):152-156.

[6] 石焱,王志超.水力压裂卸压技术在维护回撤通道稳定性方面的应用[J].煤炭技术,2019,38(7):124-126.

[7] 郭跃辉,雷东记,张玉贵,等.水力压裂煤体复电阻率频散特征试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5):198-202.

[8] 庞贵良.坚硬顶板水力压裂技术及效果检验[J].煤炭工程,2021,53(3):27-30.

[9] 王刚,秦相杰,江成浩,等.温度作用下 CT 三维重建煤体微观结构的渗流和变形模拟[J].岩土力学,2020,41(5):1750-1760.

[10] 陈建,贾秉义,董瑞刚,等.煤矿井下水力压裂加骨料增透瓦斯抽采技术应用[J].煤炭工程,2021,53(2):

90-94.

[11] 赵向东,唐建平.水力压裂条件下煤层流固耦合模型的建立及数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2020,47(5):18-22.

[12] 李文龙.动压影响巷道水力压裂切顶卸压技术研究[J].煤炭工程,2020,52(8):54-59.

[13] 春辉.纳米技术在压裂作业中的应用[J].石油钻采工艺,2014,36(3):64.

[14] 刘乐,胡千庭,李全贵,等.流量引起的注入压力变化对水力压裂效果的影响研究[J].矿业安全与环保,2020,47(4):1-5.

[15] 徐雪战.低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):311-317.

[16] 孟召平,雷钧焕,王宇恒.基于 Griffith 强度理论的煤储层水力压裂有利区评价[J].煤炭学报,2020,45(1):268-275.

[17] 唐建平,孙东玲,武文宾,等.水驱气理论在煤层水力压裂工程实践中的应用[J].矿业安全与环保,2019,46(5):51-55.

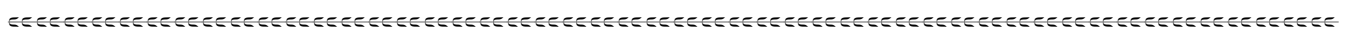
[18] 王刚,王世斌,李怀兴,等.考虑煤体孔—裂隙介尺度特征的水相渗流演化模型研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8):1547-1558.

[19] 孟小红.水力压裂技术在成庄煤矿低透气性突出煤层的应用及效果[J].矿业安全与环保,2019,46(4):95-97.

[20] 陶云奇,刘东,许江,等.大尺寸复杂应力水力压裂裂缝扩展模拟试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(2):405-412.

[21] 孙天榜,孙玉宁.含瓦斯煤体水力压裂过程中声发射损伤效应的数值模拟研究[J].煤炭技术,2019,38(3):100-103.

(责任编辑:陈玉涛)



(上接第 17 页)

[22] 冯春辉.黄海,长江口沉积物中真菌属种多样性初步研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[23] KIM B K, JUNG M, YU D S, et al. Genome sequence of an ammonia - oxidizing soil archaeon, " candidatus nitrosoarchaeum korensis " my1 [ J ]. Journal of Bacteriology, 2011, 193(19): 5539-5540.

[24] NKAMGA V D, DRANCOURT M. Methanomassiliicoccus [ M ]. In: Whitman WB ( ed ) Bergey ' s manual of systematics of archaea and bacteria. John Wiley & Sons, Chichester, 2016.

[25] YU Liang, MAHESH Bule, MA Jingwei, et al. Enhancing

volatile fatty acid ( vfa) and bio-methane production from lawn grass with pretreatment [ J ]. Bioresource Technology, 2014, 162: 243-249.

[26] 侯彪,王子升,周艺璇,等.不同煤阶煤制生物甲烷的代谢功能差异性研究[J].煤炭科学技术,2021,49(12):119-126.

[27] HAIDER R, GHOURI M A, SANFILIPPO J R, et al. Fungal degradation of coal as a pretreatment for methane production[J]. Fuel, 2013, 104: 717-725.

(责任编辑:逢锦伦)