

## 热压型煤成型条件优化试验研究方法

许江<sup>1</sup>, 贾立<sup>1</sup>, 甘青青<sup>1,2</sup>, 彭守建<sup>1</sup>, 闫发志<sup>3</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 戴诗杰<sup>1</sup>, 焦峰<sup>1</sup>, 李奇贤<sup>4</sup>, 陈月霞<sup>5</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 江西理工大学 应急管理与安全工程学院, 江西 赣州 341000; 3. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 4. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 5. 华北科技学院 应急技术与管理学院, 河北 廊坊 065201)

**摘要:** 针对当前煤矿瓦斯动力学物理模拟试验中型煤材料存在低强度和高渗透率问题, 建立了一套热压型煤成型条件优化试验研究方法。首先, 自主研发了热压型煤试验系统, 并对试验系统优势和今后改进方向进行了汇总, 同时基于 Horsfield 致密堆积理论创建了型煤材料最优配制方案, 最后形成了以马氏距离度量法和黄金分割法相结合的成型条件优化方法。为了验证试验方法的效果, 通过控制成型温度为 311.8 °C、升温速率为 5 °C/min 和保温时间为 5.3 h, 开展了不同成型压力条件下热压型煤试验研究, 研究了不同成型压力条件下的热压型煤微观结构、物理力学特性和渗透特性等响应特征。结果表明: 增加成型压力, 总孔隙度逐渐减小, 单轴抗压强度呈先增大后减少的变化趋势, 破坏形式以块状剥落和纵向破裂为主, 初始渗透率呈先减小后增大、最小渗透率则呈先减后增再减的变化趋势。以各成型条件的具体数值为试验点、热压型煤和原煤的关键参数为评价参量构建样本矩阵, 计算各成型条件下热压型煤和原煤之间的马氏距离, 再结合黄金分割法对试验区间进行优化求解, 优化后的最佳成型压力为 80 MPa, 在此成型条件下制作的热压型煤密度、单轴抗压强度和初始渗透率分别为 1.137 g/cm<sup>3</sup>、12.21 MPa、1.32 × 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>, 与原煤的 1.132 g/cm<sup>3</sup>、12.83 MPa、1.08 × 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup> 相似性极高, 达到了提高型煤强度、降低型煤渗透率的目的。

**关键词:** 煤矿瓦斯; 热压型煤; 单轴抗压强度; 渗透率

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)02-0739-14

## Experimental method for optimizing the molding conditions of hot-pressed briquette

XU Jiang<sup>1</sup>, JIA Li<sup>1</sup>, GAN Qingqing<sup>1,2</sup>, PENG Shoujian<sup>1</sup>, YAN Fazhi<sup>3</sup>, WANG Xu<sup>1</sup>, DAI Shijie<sup>1</sup>, JIAO Feng<sup>1</sup>, LI Qixian<sup>4</sup>, CHEN Yuexia<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Emergency Management and Safety Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

**Abstract:** In response to the problems of low strength and high permeability of coal materials in the current physical simulation test of coal mine gas dynamics, a set of experimental research methods for optimizing the molding conditions of hot-pressed briquette. Firstly, a hot-pressed briquette test system was independently established and the advantages and future improvement directions of the test system were summarized. At the same time, based on the Horsfield dense stacking theory, the optimal preparation plan for coal briquette materials was formulated. Finally, a molding condition optimization

收稿日期: 2023-10-21 修回日期: 2024-01-10 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1347

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074047, 51874055); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52104193)

作者简介: 许江 (1960—), 男, 湖南永兴人, 教授, 博士。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

通讯作者: 贾立 (1993—), 男, 云南曲靖人, 博士研究生。E-mail: L.Jia@cqu.edu.cn

引用格式: 许江, 贾立, 甘青青, 等. 热压型煤成型条件优化试验研究方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 739-752.

XU Jiang, JIA Li, GAN Qingqing, et al. Experimental method for optimizing the molding conditions of hot-pressed briquette[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 739-752.



移动阅读

method was developed that combines the Markov distance measurement method and the golden section method. To verify the effectiveness of the experimental method, the secondary carbonization experiments of briquette were conducted under different molding pressure conditions by controlling the molding temperature to 311.8 °C, heating rate to 5 °C/min, and holding time to 5.3 h. The response characteristics of the microstructure, physical and mechanical properties, and permeability characteristics of the hot-pressed briquette under different molding pressure conditions were studied. The results show that with the increase of molding pressure, the total porosity gradually decreases, and the uniaxial compressive strength shows a trend of first increasing and then decreasing. The main forms of failure are block spalling and longitudinal fracture. The initial permeability shows a trend of first decreasing and then increasing, while the minimum permeability shows a trend of first decreasing, then increasing and then decreasing. Using the specific values of each molding condition as the test points, and the key parameters of hot-pressed coal and raw coal as the evaluation parameters, a sample matrix was constructed to calculate the Mahalanobis distance between hot-pressed briquette and raw coal under each molding condition, and then optimize the experimental interval using the golden section method. The optimized final molding pressure is 80 MPa. Under these molding conditions, the density, uniaxial compressive strength, and initial permeability of the hot-pressed briquette produced are 1.137 g/cm<sup>3</sup>, 12.21 MPa, and  $1.32 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>, respectively. They are highly similar to the 1.132 g/cm<sup>3</sup>, 12.83 MPa, and  $1.08 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup> of the raw coal, achieving the goal of improving the strength of the briquette and reducing the permeability of the briquette.

**Key words:** coal mine gas; hot-pressed briquette; uniaxial compressive strength; permeability

能源是人类文明进步的重要物质基础,关系着人类生存与发展。富煤为我国资源禀赋基本国情,强化煤炭安全托底保障是国家重大战略<sup>[1-3]</sup>。实现“碳达峰、碳中和”过程中,煤炭扮演着基础能源角色<sup>[4-5]</sup>。然而,随着我国煤炭工业不断发展,地表浅层资源正逐渐枯竭,尤其是中东部,迫使开采深度正以每年20~50 m的速度向深部进行<sup>[6-7]</sup>。尽管,我国拥有丰富的高瓦斯矿井,且含气量高,但也面临着压力大和透气性差等问题,导致瓦斯抽采面临诸多挑战。因此,如何高效抽采瓦斯与有效防控煤矿瓦斯灾害,已成为亟待解决的重大问题。目前,国内外专家针对多个紧要问题已开展了系列研究<sup>[8-10]</sup>。

物理模拟试验是一种研究煤矿瓦斯灾害发生机制与防控的有效手段,常以原煤或型煤来研究含瓦斯煤岩的力学性质<sup>[11-13]</sup>。然而,原煤质非均质性强,很难制备出符合试验要求的试件。通过碎裂筛分,并在常温下成型的型煤,在一定程度上能大致模拟原煤特性,但在力学强度、渗透率和孔隙发育等方面,与原煤仍然存在显著差异。因此,使用型煤模拟原煤进行模拟试验,仍需优化研究<sup>[14-15]</sup>。型煤性能受成型压力、煤粉粒径分布、使用的黏结剂类型以及炭化条件等多种因素耦合影响。JIA等<sup>[16]</sup>基于致密填充理论和最大密度曲线理论确定了型煤粒径最优配比,通过添加质量比为6.8%乳白胶和3.0%石膏,优化出可以模拟大尺度煤层气开采的型煤相似材料。王汉鹏等<sup>[17]</sup>探究了粉煤颗粒级配和胶结剂浓度对型煤物理力学特性

的影响规律,使得型煤抗压强度可控范围在0.5~2 MPa、弹性模量在55~300 MPa以及黏聚力在60~170 kPa;ZHANG等<sup>[18]</sup>指出在CO<sub>2</sub>驱替煤层气相似物理模拟试验过程中,型煤相似材料的最优含水率为6.8%;康向涛等<sup>[19]</sup>以煤粉作为骨料,用石膏和水泥作为胶结剂制作了相似材料模拟原煤,得到了与原煤相似形变特征和破坏规律;孟祥跃等<sup>[20]</sup>选用粒级为0.1~0.2 mm的粉煤,并添加8.1%的水调配成型煤相似材料;田斌等<sup>[21]</sup>以无烟煤为研究对象,以腐植酸钠和高岭土复配物为黏结剂,制备了加压气化型煤,研究分析了成型压力和粉煤粒度组成对型煤冷压强度、热压强度以及热稳定性的影响规律;CHAIKLANG-MUANG等<sup>[22]</sup>指出当生物质黏结剂与褐煤按1:1配比时,获得的型煤性能最佳;BLESA等<sup>[23]</sup>选择糖浆作为黏结剂,探究了低阶煤和橄榄核在600 °C下炭化反应机理;凌向阳等<sup>[24]</sup>研究了腐植酸钠与型煤特性的基本关系,指出腐植酸钠对型煤具有很强的亲和力,能渗入煤的微孔结构中,且可以黏结煤颗粒,起到提高型煤强度的作用;郭云飞等<sup>[25]</sup>明确了生产高性能炭化型煤的最佳工艺,指出控制黏结剂用量16%、成型水的质量分数13%~15%、成型压力50 MPa以及炭化温度800 °C等条件,能得到抗压强度为13.2 MPa,以及跌落强度为98.2%的高性能炭化型煤。

综上,学者在型煤材料研究方面已经取得了丰硕成果,但针对热压型煤热压成型条件优化方法,仍鲜有报道。鉴于此,笔者提出了热压型煤成型条件优化

试验研究方法,并自主研发了热压型煤试验系统,对热压型煤热压成型条件优化方法进行了探讨,为研究型煤与原煤的相似性提供了一种新思路。

## 1 试验系统及试验方法

### 1.1 试验系统

为探究热压型煤热压成型条件优化方法,自主研发了热压型煤试验系统<sup>[26-28]</sup>(图 1)。该系统由电液伺服加载控制子系统、加热炉体及密封子系统、真空及

惰性气体保护子系统、电控子系统、水冷子系统和模具子系统等 6 个子系统组成。技术参数见表 1。

电液伺服加载自动控制系统中钢架最大承载压力为 200 kN,压头材质采用石墨碳钢,为直径 90 mm 的圆柱状;伺服液压加载工作站的液压部分采用双路额定流量为 3 L/min 压差式伺服油源,在横梁顶部配有位移传感器和力传感器,以连接缸体和压头。渗流系统中的数据测量系统,可实现力、位移的闭环控制;液压缸中含有位移传感器,可用于测量压缩量。

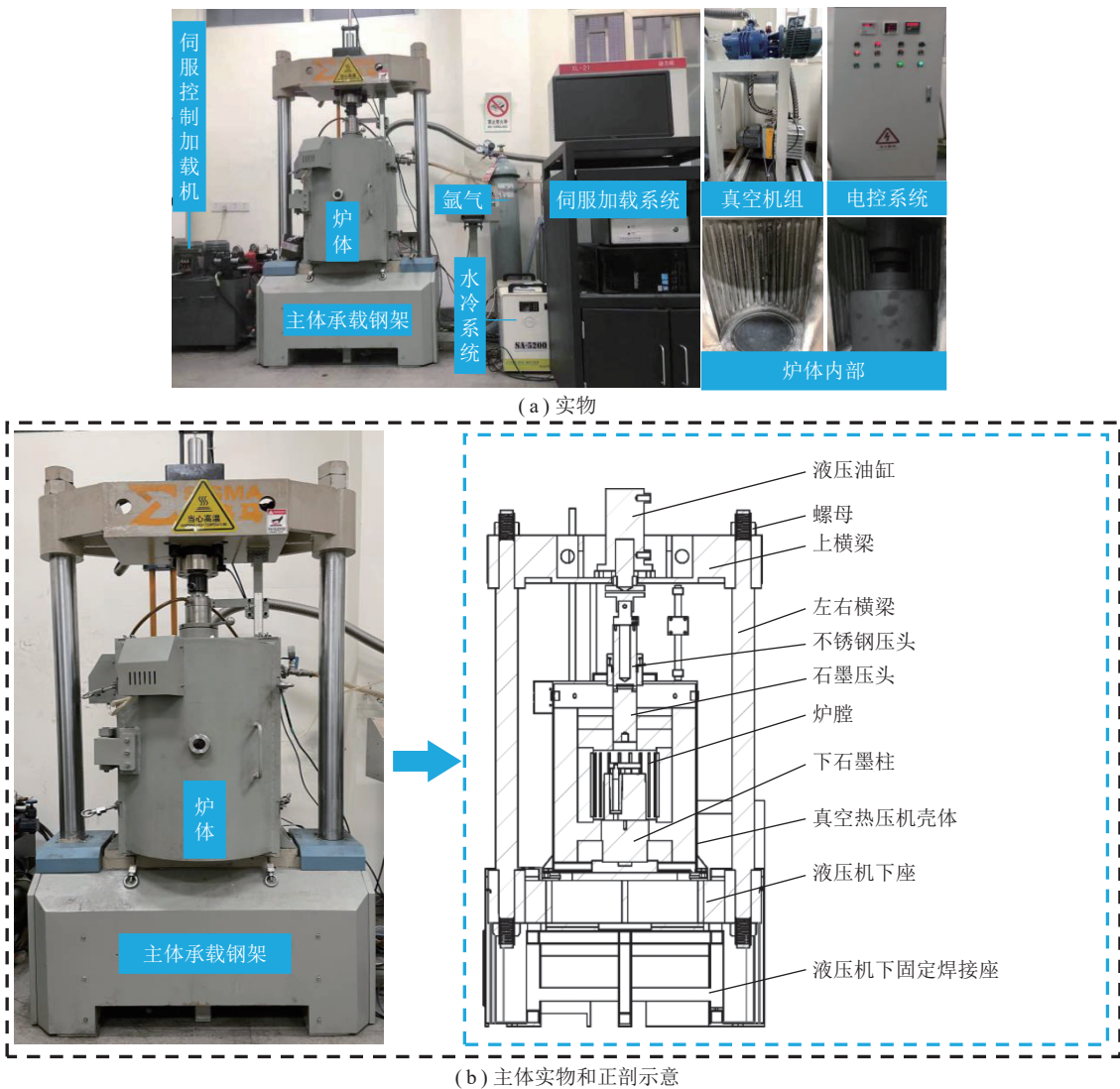


图 1 热压型煤试验系统

Fig.1 True diagram hot pressed coal forming device

加热炉体及密封系统中加热炉体外壳采用单层密封立式圆筒型结构,炉体外尺寸为  $\phi 800 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ ,炉膛内部尺寸为  $\phi 240 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ ,炉膛侧面配有真空压力表、放气阀。

真空及惰性气体保护系统中的真空机组极限真空度为 0.666 7 Pa,炉内使用真空度为  $\leq 10 \text{ Pa}$ ;采用氩气、氮气等惰性气体作为保护气体。

电控系统采用模块化与智能化控制方式。加热控制系统可实现成型温度的准确稳定控制。压力机控制系统采用计算机控制自动加载,实现力与位移控制,数据可显示力、位移和加载速率。当有断水、超温、超压、过流和缺相等异常情况,安全系统会发出声光报警提示,并具备相应的连锁反应保护。

水冷系统通过管路供给真空机组、炉体和加热电

表 1 系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of system

主要技术参数	数值
炉膛工作尺寸/(mm × mm)	φ240 × 260
最高烧结温度/℃	1 200
真空工作温度/℃	1 100
温度均匀性/℃	±6
升温速度/(℃ · min <sup>-1</sup> )	0.01~10
炉内使用真空度/Pa	≤10
压头行程/mm	100
最大压力/kN	200
压力控制方式	力或位移控制
测力精度	显示值的 ±1%
加载速率范围/(MPa · s <sup>-1</sup> )	0~30
液压缸行程/mm	150

极等。当水压低时,自动进行声光报警,并自动切断加热电源功能,以确保设备安全。

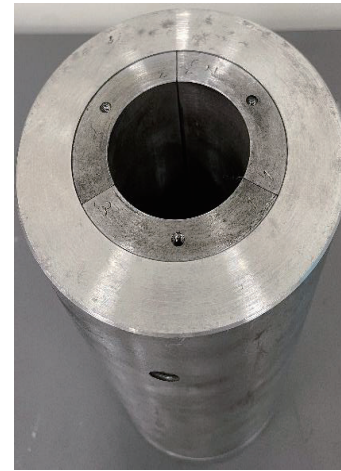
在探究热压型煤成型条件优化方法时,涉及到成型压力对热压型煤特性的影响,压力因素研究范围为 30~100 MPa,故模具强度需大于 100 MPa,因此设计了一套尺寸为 φ50 mm × 100 mm 的碳钢模具。碳钢模具的实物图、正剖图及对应尺寸如图 2 所示。

### 1.2 型煤材料配制方法

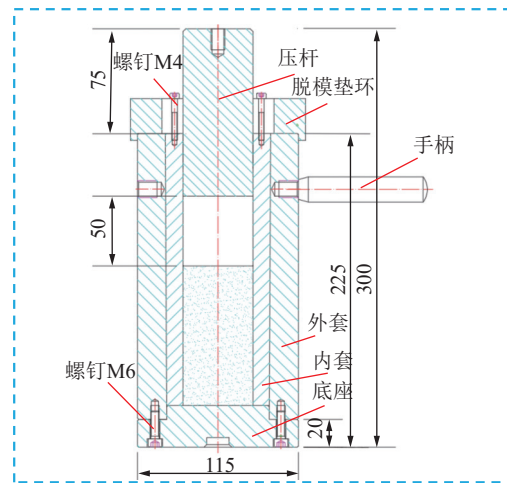
为缩小型煤与原煤之间的差异,笔者从理论研究角度优化型煤的粒径配比,在已有研究的基础上确定型煤材料的配制,主要包括型煤材料煤粉与黏结剂及水分的比例关系,最终得到更加接近原煤性质的型煤材料配比方案。

(1) 煤粉粒级配比。型煤是由煤粉颗粒堆积而成,其堆积结构直接影响着型煤成型坯体的密度、强度、透气性以及导热性等性能<sup>[29-30]</sup>,型煤的堆积问题其根本目的在于研究如何在有限空间放置更多的煤粉颗粒。假设颗粒等径球形颗粒,采用菱面体堆积的方式,颗粒之间的空隙率为 25.95%,相较其他堆积方式有所降低<sup>[26]</sup>。在此基础上,当在较大的等径球形颗粒中加入一定数量的较小球形颗粒,可有效降低其空隙率,具体堆积率、空隙率见表 2。由表 2 可知,当球体的组分大于 3 时,空隙率下降幅度逐渐减小,所以试验所用型煤的组分确定由 3 种不同粒径的煤粉颗粒构成。

笔者基于 Horsfield 致密堆积理论对型煤粒级配比进行了优化,其基本原理是:在均一颗粒球体产生的空隙中,连续填充适量比例和大小体积较小颗粒,可获得煤粉致密堆积。假设参与堆积的颗粒均呈球形,在“六方最紧密填充”排列中,其空隙的大小和形状有 2 种:一是 6 个球体围成的四角孔;二是 4 个球



(a) 实物



(b) 正视图

图 2 φ50 mm × 100 mm 碳钢模具

Fig.2 φ50 mm × 100 mm carbon steel mold

表 2 多组分球体颗粒的堆积特征

Table 2 Accumulation characteristics of multi-component spherical particles

球体组成	球体体积占比/%	空隙率/%	空隙率下降幅度/%
1	52.3	47.7	—
2	79.1	20.9	26.8
3	90.4	9.6	11.3
4	93.8	6.2	3.4
5	94.2	5.8	0.4

体围成的三角孔,如图 3 所示。假设均一颗粒球为 1 次球,半径  $r_1$  为  $r$ ;填入四角孔为 2 次球,半径  $r_2$  为  $0.414 r$ ;填入三角孔为 3 次球,半径  $r_3$  为  $0.225 r$ ;最后在堆积空隙中依次填充更小的球颗粒,则构成了六方最密填充,即“菱面体堆积”排列的最密堆积——Horsfield 致密堆积<sup>[31]</sup>。考虑到目前实验室客观条件的工艺水准及煤粉筛分难度,将所能筛分的最小粒径定为  $0.075 \text{ mm}$ ,则不同目数颗粒所对应的平均粒径见表 3。

由多元组合体系的组成可以求解各组分体积, 得到表 3 的分布规律。根据实验室的工艺水平和煤粉筛分的难度, 将粒径范围定为 0.85 ~ 0.425、0.250 ~ 0.180 和 0.150 ~ 0.125 mm 与 0.425 ~ 0.250、0.150 ~ 0.125 和 0.083 ~ 0.075 mm, 方差  $S_1^2$ 、 $S_2^2$  依次为

$8.12 \times 10^{-4}$  和  $4 \times 10^{-6}$ , 明显方差  $S_2^2 \ll S_1^2$ , 故后者为最佳粒径。考虑到前 3 次球的相对数量为 1、1 和 2, 由此计算出型煤粒径分别为 0.250 ~ 0.425、0.106 ~ 0.150 和 10.075 ~ 0.090 mm, 配比为 91.78 : 5.87 : 2.35。

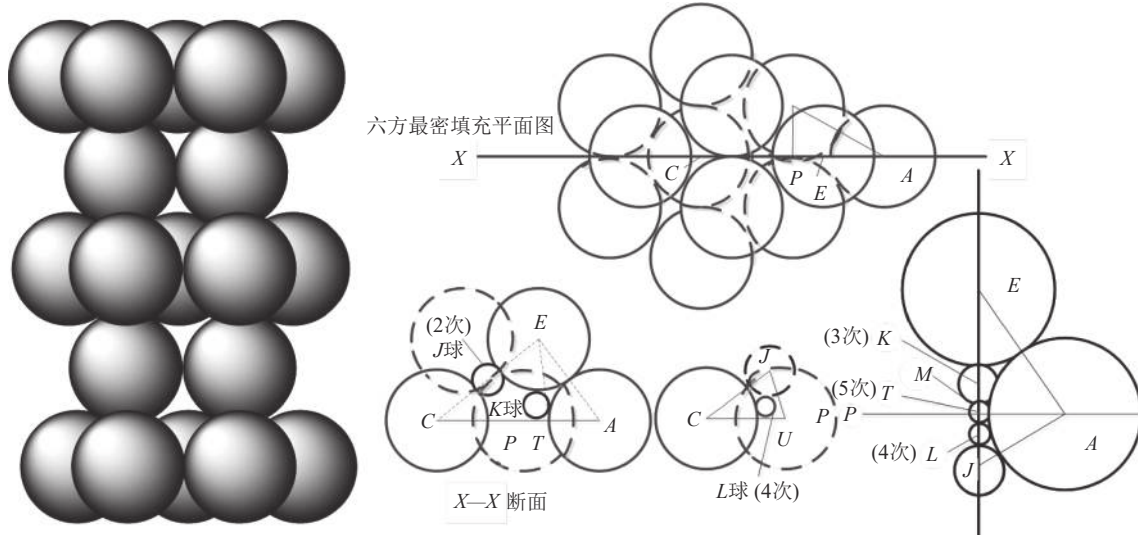


图 3 六方最紧密堆积及 Horsfield 填充

Fig.3 Hexagonal most tightly packed and Horsfield filling

表 3 异径球六方紧密堆积特征

Table 3 Packing characteristics of Hexagonal reducing balls closely packed

球序	球径	球的相对数量	空隙率/%	堆积率/%
1次	$r$	1	25.95	74.05
2次	$0.414 r$	1	20.70	79.30
3次	$0.225 r$	2	19.00	81.00
4次	$0.177 r$	8	15.80	84.20
5次	$0.116 r$	8	14.90	85.10
∴	∴	∴	∴	∴
∞	极小	极多	3.90	96.10

(2) 黏结剂在型煤的成型过程中, 添加适量的黏结剂有助于增强煤与黏结剂之间的作用力, 填充煤粒的孔隙和裂隙。因此, 在型煤制作过程中普遍采用添加黏结剂的成型工艺<sup>[31-32]</sup>。然而, 黏结剂的添加量必须适中。添加量过少会导致煤粒无法充分润湿和黏结, 而添加量过多不仅会增加成本, 还会使煤粒连接不紧密, 不利于脱模, 并且不易分散, 导致煤粉分布不均匀, 进而影响型煤的抗压强度。在预先试验腐植酸钠水溶液质量比时, 发现当腐植酸钠质量比为 20% 时, 煤粉与腐植酸钠黏结剂能够充分混合均匀。随着腐植酸钠水溶液浓度的进一步增加, 发现配制的腐植酸钠水溶液过于浓稠, 难以与煤粉混合。基于对材料特性和试验操作的综合考虑, 最终确定腐植酸钠溶液质量比为 20%。最终型煤配比方案见表 4。

表 4 型煤配比方案

Table 4 Briquette ratio scheme

组分	质量占比/%	质量/g
腐植酸钠	1.60	4.01
去离子水	6.40	16.04
0.250 ~ 0.425 mm 的煤粉颗粒	84.43	211.58
0.125 ~ 0.150 mm 的煤粉颗粒	5.40	13.53
0.075 ~ 0.083 mm 的煤粉颗粒	2.16	5.42

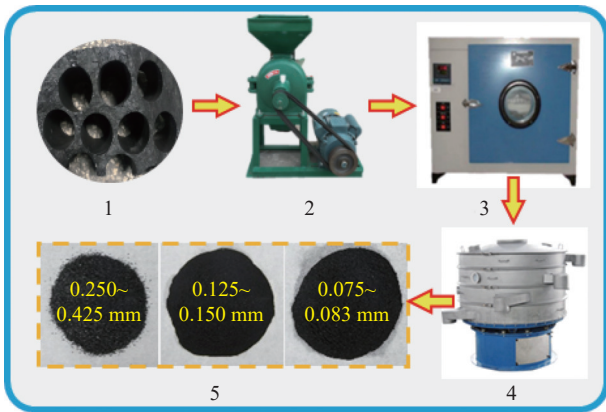
### 1.3 试件制备方法

(1) 采集煤样。试验用煤样取自内蒙古胜利煤矿褐煤, 为了防止煤样被氧化, 首先将采集的总质量为 300 kg 的原煤样用保鲜膜包裹密封, 其次装入填充塑料泡沫的密封箱运回至实验室, 进行型煤试件的制作试验。

(2) 制作煤粉。如图 4 所示, 首先, 将取心后剩余的原煤块, 利用鄂式破碎机进行首次破碎成较小的块煤; 再利用精细碎煤机将小煤块二次破碎成颗粒煤粉; 将破碎后的煤粉放入干燥箱在 105 °C 下干燥 24 h; 通过振动筛将干燥后的煤粉筛分至所需粒径。

(3) 确定煤粉粒级配比。根据 Horsfield “菱面体型” 堆积结构假设, 利用天平, 分别称取干燥后的 0.250 ~ 0.425、0.125 ~ 0.150、0.075 ~ 0.083 mm 的煤粉 211.6、13.5、5.5 g 放入 a 烧杯中, 并充分混合均匀。

(4) 配制型煤材料。称取 4.0 g 腐植酸钠倒入 b 烧杯中, 称取 16.0 g 去离子水倒入腐植酸钠中, 利用玻璃棒使腐植酸钠与水分充分搅拌混合均匀, 形成腐植



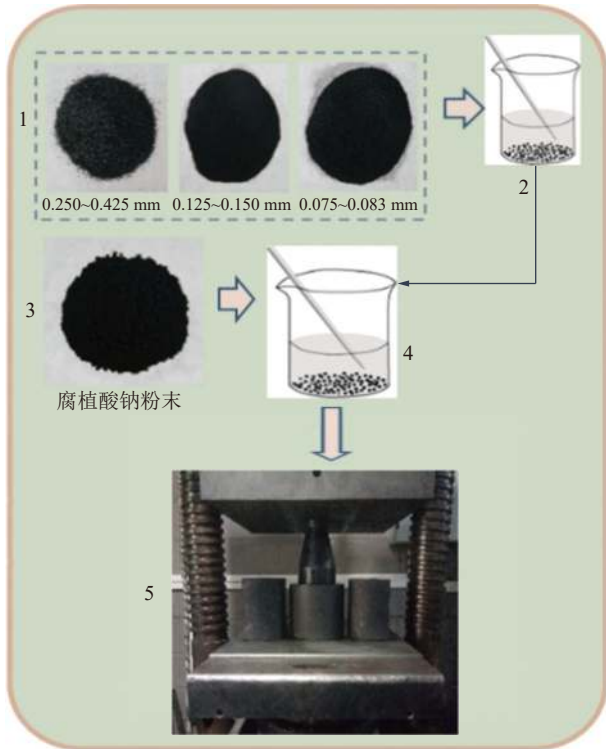
1—取心后剩余煤块；2—破碎机；3—干燥箱；  
4—筛分机；5—煤粉颗粒

图4 煤粉的制作过程

Fig.4 Flow chart to prepare briquette particles

酸钠水溶液；将 a 烧杯煤粉倒入 b 烧杯中，继续搅拌均匀，制得配置完成的型煤材料。

(5) 型煤材料预压成型。将配制完成的型煤材料放入型煤模具中。然后在内模套上涂抹适量润滑油以防止脱模困难。再将材料放入自制的碳钢模，具中，利用万能试验机，按照加载速率为 0.1 kN/s、成型压力为 50 MPa 的要求进行预压成型。具体试件制备流程如图 5 所示。



1—煤颗粒；2—烧杯 a；3—腐植酸钠；4—烧杯 b；5—万能试验机

图5 型煤试件制备流程

Fig.5 Flow chart for preparation of briquette specimens

#### 1.4 热压型煤试验步骤

(1) 前期准备。松开炉门的锁紧螺栓，并释放设备

的内部真空。

(2) 型煤装模。利用吸尘器去除腔体内部灰尘，开启前炉门并放入待烧结的试件，保证无缺件和压头位置适当。

(3) 型煤预压。启动压力机系统，对试件进行加压，达到目标压力后保压 1 h 进行预压冷压成型，将预压后的型煤进行卸压，取下模具的上套筒，将装有型煤的下套筒模具放入自主研发的热压型煤成型装置的炉膛内。

(4) 抽真空。关闭真空热压机炉门后开启旋片泵对炉内进行抽真空，使气压降到 200 Pa 以下后开启罗茨泵，继续抽至 100 Pa 以下，关闭罗茨泵和真空泵后充入惰性保护气体（氩气），达到气压平衡后关闭连通阀和供气系统。

(5) 型煤热压。启动电控系统的程序升温控制系统，编制加热控制程序，设定目标升温速率、热压终温及保温时间，满足设定条件后对炉体内的型煤试件进行带压烧结。

(6) 型煤脱模。完成热压操作后，关闭加热系统并开始进行降温步骤，但需保持真空及惰性气体保护系统和水冷系统完全降温后，再打开密封腔体的炉门，将模具中型煤试件取出。

#### 1.5 试验系统优势和改进方向

试验系统优势主要体现在以下 5 个方面：① 相较于冷压型煤成型系统，该系统能够在较高的真空度下同时对模具中的煤粉进行加温和加压操作，并可充入惰性保护气体；② 该系统能够灵活调节热压型煤的成型压力、成型温度、升温速率以及保温保压时间等热压成型条件；③ 炉膛尺寸设计紧凑，炉内温度分布均匀，能实现多种烧结方式，如热压烧结、无压烧结、真空烧结和惰性气体保护烧结；④ 热压型煤的模具具有低热膨胀系数和良好的耐高温性能，并且模具的组装和拆卸方便，能够成型 2 种尺寸的热压型煤，从而极大提高了试验效率；⑤ 成型的热压型煤试件具有渗透率低、力学强度高特性，可有效提高原煤和型煤的相似性，对于从而提高物理模拟试验的还原性具有重大意义。

试验系统仍存在改进方向：① 型煤的热压成型是一个复杂的过程，不仅要研究成型后的热压型煤，热压过程中析出的气体分子同样值得关注。完善试验系统，对成型过程中析出气体的组分和含量进行实时分析，对于厘清热压型煤的成型机理具有重要意义；② 物理模拟试验所用型煤尺寸较大，该系统制备的型煤为标准试件，改进设备以制作更大尺寸的试件，有助于更好地提高相关物理模拟试验的可靠性。

#### 1.6 试验系统适用条件

(1) 试件尺寸条件。自主研发了尺寸为  $\phi 25 \text{ mm} \times$

50 mm 和  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的真空热压型煤成型模具, 因此试验系统适用于以上 2 种尺寸标准试件的成型。

(2) 试验温度条件。炉体加热控制系统可实现对温度的智能化控制, 试验系统最高烧结温度为  $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ , 升温速率可调节范围为  $0.01 \sim 10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ , 在此范围内的成型温度和升温速率皆可满足。

(3) 试验压力条件。试验系统的压力可通过力或位移控制, 压头行程可达到  $100\ \text{mm}$ , 最大压力可达到  $200\ \text{kN}$ , 载荷加载速率为  $0 \sim 30\ \text{MPa}/\text{s}$ , 在此范围内的成型压力均可实现精准控制。

(4) 研究方向。试验系统在真空中的工作温度可达到  $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ , 拓宽了试验系统的用途。不仅可以用作制备热压型煤, 在炼焦、煤气化等领域也具有广阔的应用前景。

## 2 试验结果与分析

限于篇幅, 笔者以  $30 \sim 100\ \text{MPa}$  成型压力试验条

件为例展开分析试验结果, 试验中控制升温速率为  $5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ , 热压温度为  $311.8\ ^\circ\text{C}$ , 保温时间为  $5.3\ \text{h}$ 。

### 2.1 热压型煤微观结构响应特征

微观结构对于煤的性能具有重要影响, 开展热压型煤的微观结构响应特征研究, 对于评价热压型煤与原煤的相似程度以便进一步优化成型条件具有重要意义。

核磁共振技术是一种重要的非破坏性分析技术, 具有高分辨率、准确性高、非侵入性等特点, 经常被用来确定多孔介质中的孔隙结构。横向弛豫时间 ( $T_2$ ) 是核磁共振技术中的一个重要参数, 可用于描述煤体中大孔、中孔、微孔的分布情况以及各孔隙之间的连通性等参数。利用核磁共振技术对成型压力为  $30 \sim 100\ \text{MPa}$  制作的热压型煤微观结构响应特征进行了分析, 获得了不同成型压力下热压型煤的  $T_2$  光谱图, 如图 6 所示。根据表 5 测试得到的结果, 绘制了孔径含量及占比, 如图 7 所示。

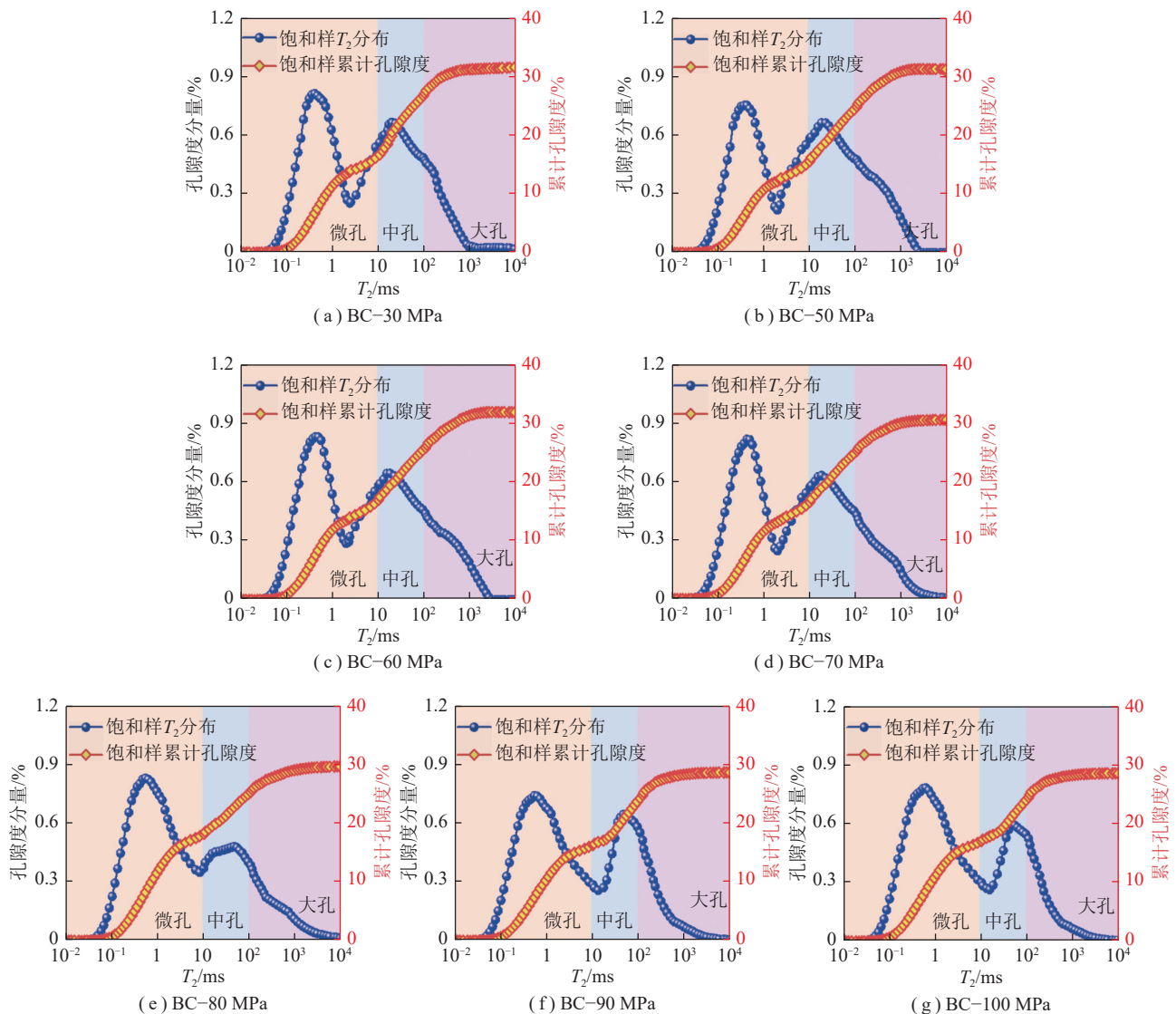


图 6 不同成型压力下制作的热压型煤的  $T_2$  谱图

Fig.6  $T_2$  spectrum of hot pressed coal under different forming pressures

表 5 不同成型压力下热压型煤的孔隙度分量及孔占比

Table 5 Porosity component content and proportion of hot pressed coal different forming pressures

成型压力/MPa	孔隙度分量/%				孔占比/%		
	微孔	中孔	大孔	累积孔	微孔	中孔	大孔
30	16.04	10.05	5.31	31.40	51.08	32.01	16.91
50	14.96	9.33	6.86	31.14	48.04	29.96	22.03
60	16.25	8.99	6.44	31.70	51.26	28.36	20.32
70	15.86	8.82	5.67	30.35	52.26	29.06	18.68
80	16.22	7.89	5.43	29.55	54.89	26.70	18.38
90	15.89	7.66	4.97	28.52	55.72	26.86	17.43
100	16.72	7.20	4.60	28.51	58.65	25.25	16.13

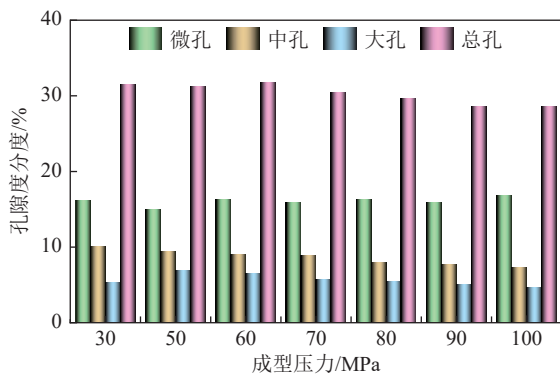


图 7 不同成型压力下热压型煤的孔隙度分量

Fig.7 Porosity component of hot pressed coal under different forming pressures

从图 6 可以看出,不同成型压力下  $T_2$  谱的演化规律不同,但各成型压力下的热压型煤皆是微孔的发育程度最高,中孔次之,而大孔的发育程度最小。此外,随着成型压力的增加,总孔隙度逐渐减小,成型压力的增加对于微孔的孔隙度影响最小。总体来说,微孔占比呈先减后增的趋势,中孔逐渐减少,大孔占比则呈现增后减的趋势。

## 2.2 热压型煤物理力学特性响应特征

密度属于材料的基本物理参数,与材料的机械性

能密切相关。研究包括密度在内的热压型煤相关基本物理参数,是优化热压煤成型条件的前提条件。在成型压力为 30 ~ 100 MPa 条件下制作的热压型煤的平均密度及其他基本物理参数见表 6,在 30 ~ 70 MPa 热压型煤的平均密度迅速上升,70 MPa 后基本无变化。针对表 6 中型煤烧失率呈现,随着热压成型压力的增加而增加,分析认为:煤粉颗粒在热压过程中,会经历脱水、脱气、软化、熔融和流动等环节,最后生成胶质体,随着热压成型压力增加,脱水和脱气量逐渐增加,析出焦油量增加,软化程度增大,煤粉颗粒脱落量增大,最终呈现烧失率增加,70 MPa 后趋于稳定。

提高型煤的强度是制作热压型煤的目的之一,因此需要考察热压型煤的力学特性响应特征,为热压型煤的评价及成型条件的优化提供重要依据。

对成型压力为 30 ~ 100 MPa 条件下制作的热压型煤开展了单轴压缩试验,获得了热压型煤变形曲线,如图 8 所示。从图 8 可以看出,各成型压力下的热压型煤皆可分为 4 个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、应变增强阶段和屈服阶段。以 30 MPa 为成型压力的热压型煤的应力峰值与其他条件下热压型煤存在明显不同,成型压力为 70 ~ 100 MPa 条件下的热压型煤

表 6 不同成型压力下热压型煤的工业分析及基础参数

Table 6 Proximate analysis and basic parameters of hot pressed coal under different forming pressures

成型压力/MPa	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%	烧失率/%	平均密度/(g · cm <sup>-3</sup> )
30	5.94	8.84	28.07	57.15	12.91	1.101
50	5.89	8.89	28.05	57.16	13.68	1.127
60	5.84	8.98	28.02	57.15	14.76	1.131
70	5.72	9.04	28.85	56.39	15.84	1.137
80	5.71	9.07	28.81	56.41	15.85	1.137
90	5.70	9.05	28.80	56.45	15.88	1.137
100	5.70	9.06	28.78	56.45	15.93	1.136

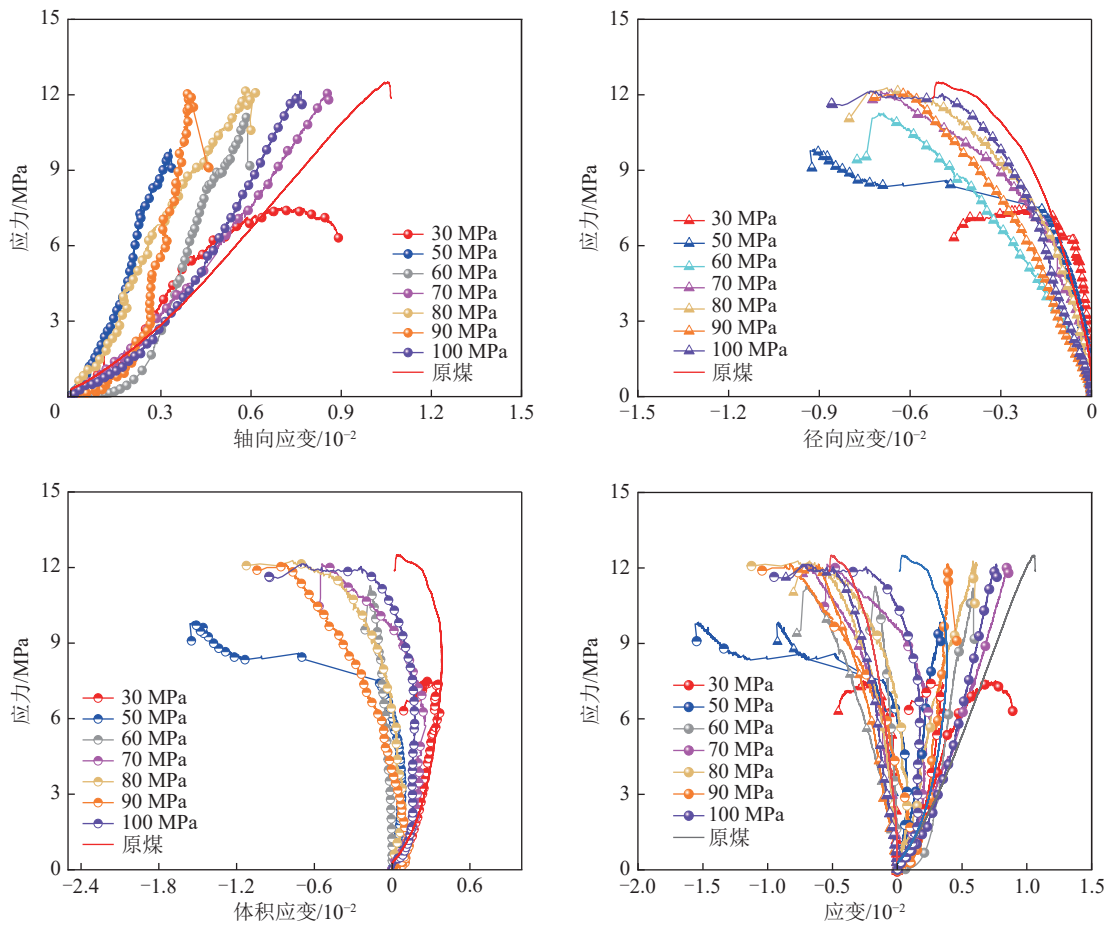


图 8 不同成型压力下热压型煤单轴压缩变形特性曲线

Fig.8 Uniaxial compression deformation characteristic curves of hot pressed coal under different forming pressures

都具有良好的力学性能。

表 7 为成型压力为 30 ~ 100 MPa 下热压型煤的力学特性汇总,从表 7 可以看出热压型煤单轴抗压强度呈现先增大后减少的趋势,但 30 ~ 70 MPa 条件下强度增加明显,70 ~ 100 MPa 条件下的强度变化不明显。其中 80 MPa 时有最大的单轴抗压强度 12.21 MPa,图 9 为各成型压力下热压型煤的单轴压缩破坏图,70 ~ 100 MPa 条件下的热压型煤具有相似的破坏形式,整体上都呈现少量的块状剥落和纵向破裂

表 7 不同成型压力下热压型煤试件基础力学参数

Table 7 Hot pressed coal basic mechanical parameters under different forming pressures

成型压力/MPa	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
30	7.51	0.386	0.472
50	9.85	0.633	0.301
60	11.27	0.472	0.316
70	12.15	0.491	0.357
80	12.21	0.578	0.296
90	12.16	0.674	0.284
100	12.14	0.489	0.360

的破坏形式。

### 2.3 热压型煤渗透率响应特征

冷压型煤与原煤相比通常具有渗透率高的特点,渗透率在瓦斯流动和瓦斯抽采等领域的研究是一个极其关键的参数<sup>[33]</sup>,因此需要对热压型煤开展三轴渗流试验以获得其渗透率响应特征,为下一步热压型煤成型条件的优化奠定基础。

图 10 为成型压力为 30 ~ 100 MPa 条件下热压型煤的渗透率-轴向应变-主应力差变化曲线,不同成型压力下热压型煤的渗透率-主应力差具有着相似的变化规律,渗透率皆呈现先减小后增大的趋势。70 ~ 100 MPa 主应力差峰值基本不变,破坏时轴向应变的最大和最小值分别来自 30 MPa 和 80 MPa。

表 8 为不同成型压力下热压型煤的初始渗透率和最小渗透率汇总,根据表 8 制作了初始和最小渗透率随成型压力的变化曲线,如图 10(i) 所示。随成型压力的增大,初始渗透率随着成型压力的增加先大幅减小后小幅增大,最小渗透率则出现先减后增再减的趋势。其中 70 ~ 100 MPa 的初始渗透率极为接近,而各成型压力下最低的初始渗透率和最小渗透率皆

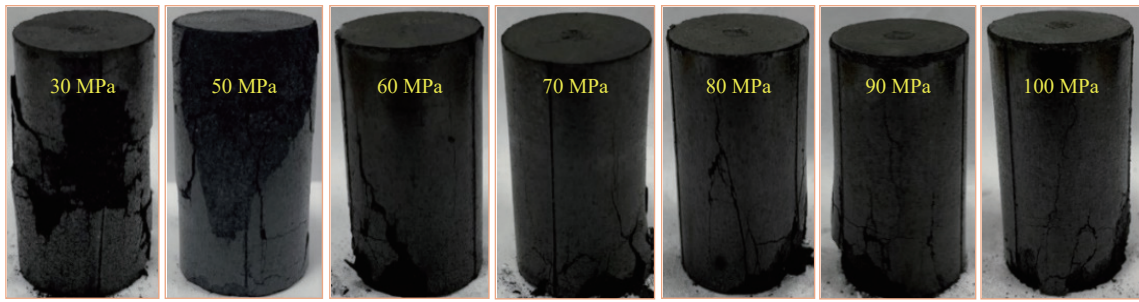


图9 不同成型压力下热压型煤单轴压缩破坏实物

Fig.9 Uniaxial compression failure diagram of hot pressed coal at different forming pressures

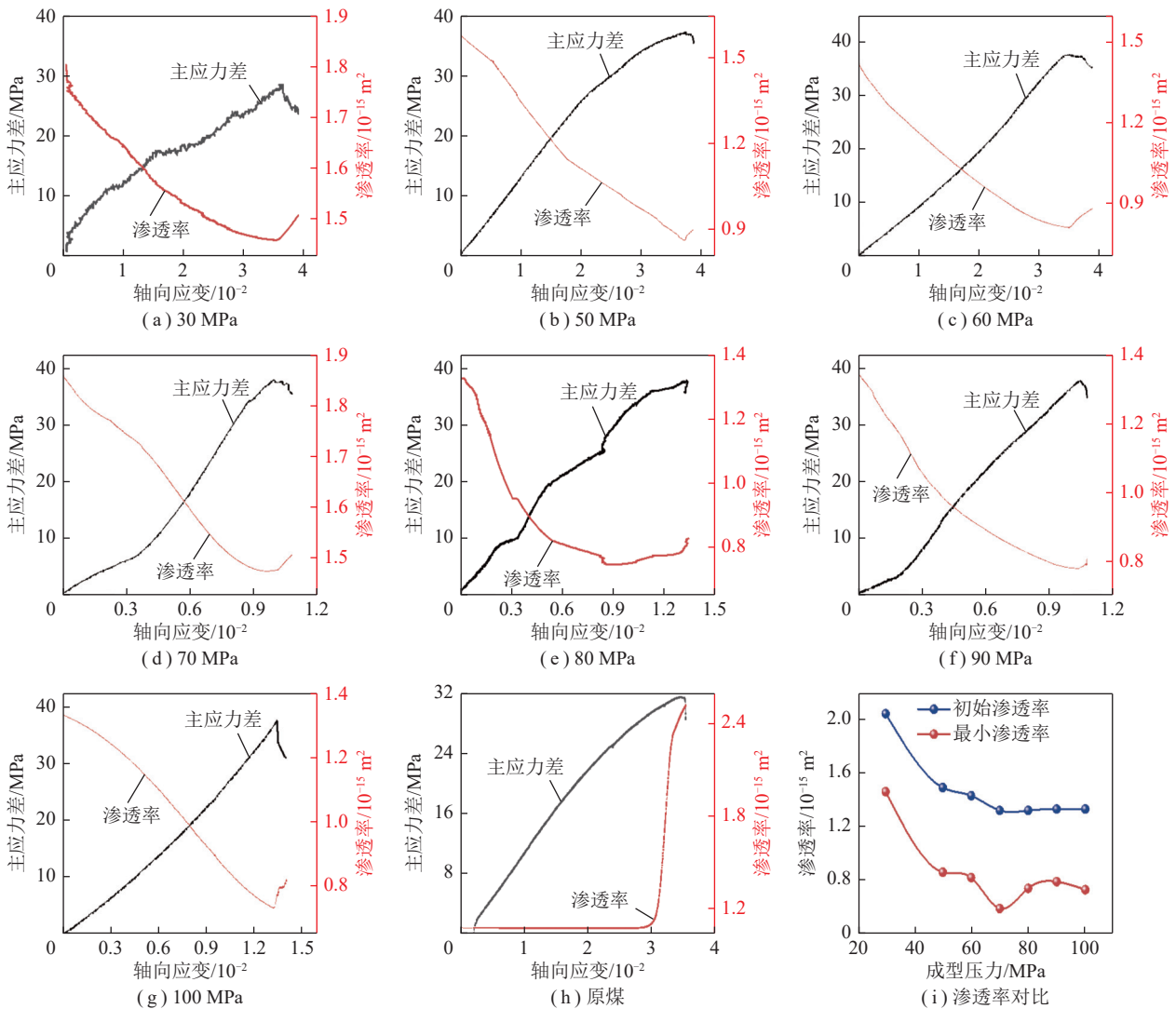


图10 不同成型压力条件下型煤渗透率-轴向应变-主应力差变化曲线

Fig.10 Variation curves of permeability-axial strain-principal stress difference of hot pressed coal under different forming pressures 是70 MPa时制作的热压型煤。

#### 2.4 热压型煤成型条件优化方法

至此已得到不同成型压力下热压型煤微观结构、物理力学特性和渗流特性响应特征。为了优化热压型煤性能,进一步提高其力学强度并降低其渗透率,使热压型煤和原煤更加相似,提出了通过马氏距离度量法(Mahalanobis Distance)<sup>[34]</sup>,同时结合黄金分割法<sup>[35]</sup>

来优化热压型煤成型条件。

马氏距离度量法是一种用于测量样本间相似性的统计方法,该方法不受量纲影响,且与度量单位无关。假设有2个样本集 $x$ 和 $y$ ,2者间的协方差距离即马氏距离 $d_M(x,y)$ ,其计算方法<sup>[36]</sup>为

$$d_M(x,y) = \sqrt{(x-y)^T S^{-1} (x-y)} \quad (1)$$

表 8 不同成型压力下热压型煤的渗透率参数汇总

Table 8 Secondary carbonization briquette permeability parameters under different forming pressures

成型压力/MPa	初始渗透率/ $10^{-15} \text{ m}^2$	最小渗透率/ $10^{-15} \text{ m}^2$
30	2.04	1.46
50	1.49	0.85
60	1.43	0.81
70	1.32	0.60
80	1.32	0.78
90	1.33	0.78
100	1.33	0.73

其中,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$(\mathbf{x} - \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} (x_{11} - y_1) & (x_{12} - y_2) & \cdots & (x_{1n} - y_n) \\ (x_{21} - y_1) & (x_{22} - y_2) & \cdots & (x_{2n} - y_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (x_{m1} - y_1) & (x_{m2} - y_2) & \cdots & (x_{mn} - y_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $x_{mn}$  为第  $m$  个试验点的第  $n$  个评价参量的对应值;  $y_n$  为第  $n$  个评价评价参量对应的值;  $\mathbf{S}^{-1}$  为矩阵  $\mathbf{x}$  和矩阵  $\mathbf{y}$  的协方差矩阵的逆矩阵。将热压型煤的试验数据和原煤试验数据分别看作矩阵  $\mathbf{x}$  和矩阵  $\mathbf{y}$ , 代入式 (1), 即可得到热压型煤与原煤的马氏距离  $d_M(x, y)$ 。马氏距离随试验点的变化趋势有 2 种情况, 如图 11 所示, 若曲线符合指数函数形式, 则可直接确定为最优试验点; 若曲线符合单峰极值函数形式, 则需要通过不断重复黄金分割法, 以得到与原煤最为接近的试验点。

黄金分割是指将整体一分为二, 其中较大部分与整体部分的比值约为 0.618, 同时等于较小部分与较大部分的比值。黄金分割法是一种优选法, 经过较少遴选次数便可快速找到较优方案。黄金分割法如图 12 所示, 其具体步骤为:

(1) 确定需要优选的试验区间  $[a, b]$ 。

(2) 找到试验区间  $[a, b]$  中点对称的 2 个黄金分割点  $P_1$  和  $P_2 (P_1 > P_2)$ 。

(3) 结合试验获得  $P_1$  和  $P_2$  试验点的评价参量数值, 计算试验点  $P_1$  和  $P_2$  的马氏距离, 舍劣取优, 保留区间的一侧。假设试验点  $P_1$  效果更好, 则保留区间  $[P_2, b]$  以进行下一步的试验点的遴选。

(4) 在试验区间  $[P_2, b]$ , 其 2 个黄金分割点分别为  $P_1$  和  $P_3 (P_3 > P_1)$ , 试验点  $P_3$  和  $P_1$  关于  $[P_2, b]$  中点对称。再次通过试验得到两试验点的评价参量数值, 计算并比较两点的马氏距离。重复操作, 直到保留区间

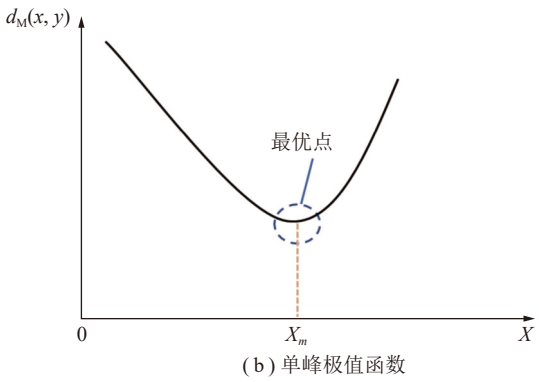
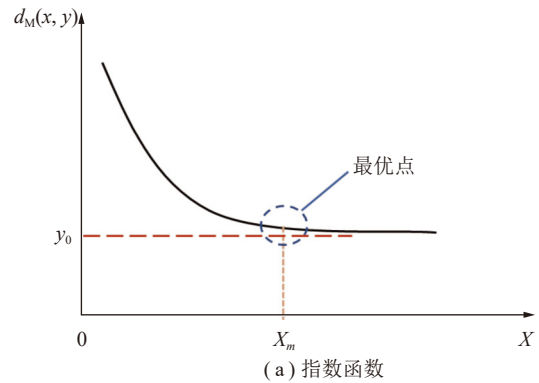


图 11 马氏距离分布曲线类型

Fig.11 Type of Mahalanobis distance distribution curve

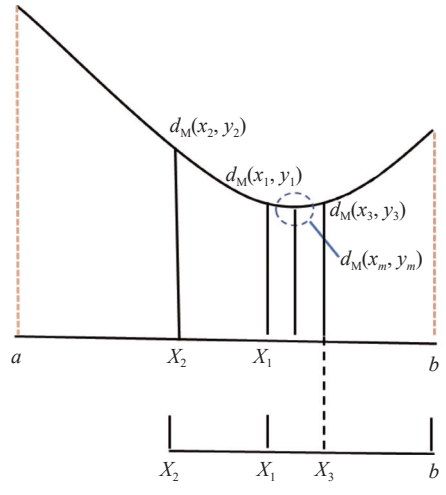


图 12 黄金分割法示意

Fig.12 Diagram of the golden section preference method

和试验点达到优化要求为止。

对于热压型煤成型压力优化, 试验点为不同成型压力, 选择热压型煤的密度、单轴抗压强度和渗透率作为评价参量, 其数值见表 9, 根据表 9 可构建不同成型压力下的热压型煤样本矩阵  $\mathbf{x}$ , 原煤的空间向量为  $\mathbf{y}$ , 如式 (4) 和式 (5) 所示。

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (1), 计算结果如下: 冷压型煤、以 30、50、60、70、80、90、100 MPa 的成型压力制作的热压型煤的  $d_M(x_1, y_1)$  分别为 8.288、6.852、

表 9 不同成型压力下热压型煤及原煤的评价参量

Table 9 Evaluation parameters of hot pressed coal and raw coal under different forming pressures

煤样	单轴抗压强度/MPa	初始渗透率/ $10^{-15} \text{ m}^2$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	
原煤	12.83	1.08	1.132	
冷压型煤	0.62	1.88	1.060	
30 MPa	7.51	2.04	1.101	
50 MPa	9.85	1.49	1.127	
热压型煤	60 MPa	11.27	1.43	1.131
70 MPa	12.15	1.32	1.137	
80 MPa	12.21	1.32	1.137	
90 MPa	12.16	1.33	1.137	
100 MPa	12.14	1.33	1.136	

6.149、5.880、5.366、5.168、5.361、5.327, 其中 80 MPa 最小。不同成型压力下制作的热压型煤与原煤之间的马氏距离演化曲线如图 13 所示, 拟合函数表达式如式 (6) 所示, 是典型的指数函数形式, 拟合精度  $R^2$  为 0.996 4。

$$x = \begin{bmatrix} 0.62 & 1.88 & 1.060 \\ 7.51 & 2.04 & 1.101 \\ 9.85 & 1.49 & 1.127 \\ 11.27 & 1.43 & 1.131 \\ 12.15 & 1.32 & 1.137 \\ 12.21 & 1.32 & 1.137 \\ 12.16 & 1.33 & 1.137 \\ 12.14 & 1.33 & 1.136 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$y = (12.83, 1.08, 1.132) \quad (5)$$

$$y = 5.017 + 5.043\exp(-x/29.645) \quad (6)$$

根据之前的理论, 当热压型煤与原煤的马氏距离演化曲线呈指数函数形式时, 只需要取马氏距离最小的试验点对应的成型压力作为最终优化的结果, 即

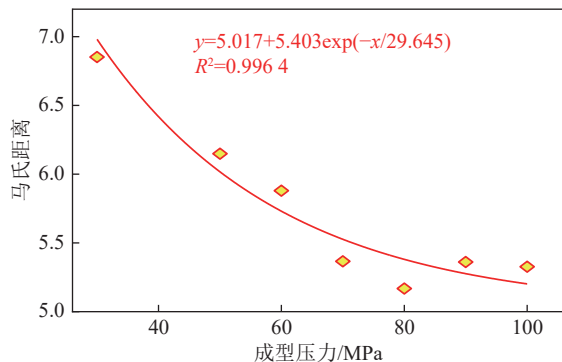


图 13 不同成型压力下热压型煤与原煤马氏距离变化曲线  
Fig.13 Mahalanobis distance between hot pressed coal and raw coal at different forming pressure

80 MPa 为成型压力最终优化的结果。

限于篇幅, 笔者仅以不同成型压力条件为例, 系统地论述了热压型煤成型条件优化试验研究方法, 并形成了具体的优化步骤如图 14 所示。关于其他热压成型条件, 如: 成型温度、升温速率和保温时间等, 皆可按照此方法, 并根据图 14 的步骤进行成型条件优化。本文优化后的最终成型条件依次为成型压力 80 MPa、成型温度 311.8  $^{\circ}\text{C}$ 、升温速率 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、保温时间 5.3 h, 在此成型条件下制作的热压型煤密度、单轴抗压强度和初始渗透率分别为 1.137  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、12.21 MPa 和  $1.32 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ , 与原煤的 1.132  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、12.83 MPa、 $1.08 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  相似性极高, 达到了提高型煤强度、降低型煤渗透率目的, 对于提高相关物理模拟试验还原性具有重大意义。

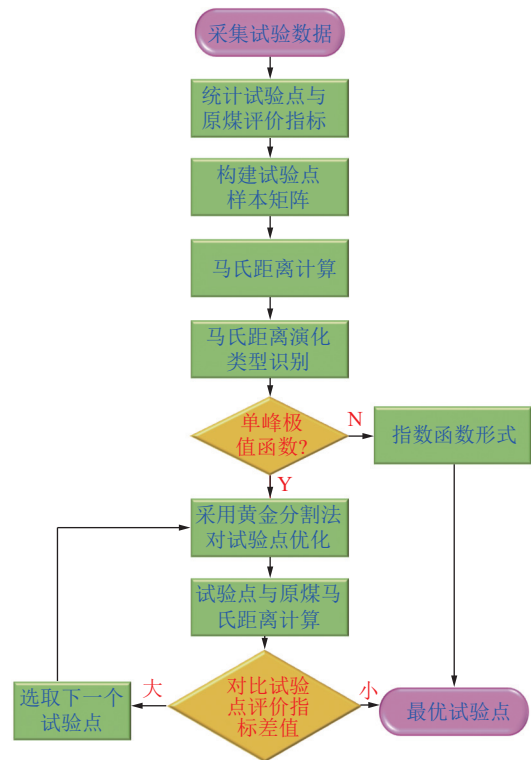


图 14 热压成型条件优化步骤

Fig.14 Optimization steps for hot pressing forming conditions

### 3 结论与展望

(1) 针对型煤强度低、渗透性高的特点, 自主研发了一套热压型煤成型系统, 该系统可实现在型煤的制作过程中同时加温加压。成型过程中的成型压力、成型温度、升温速率和保温保压时间等成型条件均可灵活调节, 热压型煤成型效率高、均一性好。

(2) 对不同成型压力条件下制备的热压型煤开展了微观结构、物理力学和渗透率响应特征研究, 不同成型压力条件下的热压型煤展现出了不同的演化特

征,不仅证明了该成型系统和优化方法的可靠性,而且提供了评价热压型煤的关键参数。

(3) 针对成型条件的优化,提出了马氏距离度量法和黄金分割法相结合的优化思路。4个成型条件优化完成后的热压型煤密度、单轴抗压强度和初始渗透率分别是原煤的1.004、0.947和1.222倍,与原煤的相似性极高。

尽管团队长期致力于煤岩力学特性研究,通过自主研发型煤热压试验系统,结合相关理论形成了从热压型煤制作到成型条件优化的完整方法,但关于使用热压型煤开展相似物理模拟试验研究结果的准确性还有待验证,且最终优化完成的成型条件是否适用于其他变质程度煤种还尚未可知。今后,针对热压型煤成型条件优化研究,可采用不同变质程度煤种进行相关研究,以完善各煤种热压过程中的成型条件,并开展相似物理模拟试验研究,进一步验证其准确性,为提高相关物理模拟试验的还原性提供一定的指导意义!

笔者以内蒙古胜利煤矿褐煤为研究对象,得到的不同成型压力下热压型煤热压成型条件,是否适用于其他煤种还有待验证;另外,目前的研究成果是基于 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体试件获得,能否推广到其他尺度的物理模拟试验仍需进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平,王金华,王国法,等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.  
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [2] QIU Menghan, LIU Ruiliang, LI Xingyuan, et al. Earliest systematic coal exploitation for fuel extended to  $\sim 3600\text{ B. P.}$ [J]. *Science Advances*, 2023, 9(30): eadh0549.
- [3] 彭守建,贾立,许江,等. 煤层瓦斯抽采多物理场参数动态响应特征及其耦合规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1235-1243.  
PENG Shoujian, JIA Li, XU Jiang, et al. Dynamic response characteristics and coupling law of multi physical field parameters in coal seam gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1235-1243.
- [4] 王双明,孙强,乔军伟,等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.  
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [5] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.  
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [6] ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, XU Jiang. A new method for coal and gas outburst prediction and prevention based on the fragmentation of ejected coal[J]. *Fuel*, 2021, 287: 119493.
- [7] 蔡美峰,吴允权,李鹏,等. 宁夏地区煤炭资源绿色开发现状与思路[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 1-10.  
CAI Meifeng, WU Yunquan, LI Peng, et al. Present situation and ideas of green development of coal resources in Ningxia[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 1-10.
- [8] WANG Haifeng, CHENG Yuanping, YUAN Liang. Gas outburst disasters and the mining technology of key protective seam in coal seam group in the Huainan coalfield[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 763-782.
- [9] KOZYREVA E N, PLAKSIN M S, RODIN R I, et al. Gas-kinetic properties of coal beds: New methods and analysis[J]. *Coke and Chemistry*, 2022, 65(8): 303-307.
- [10] WANG Shugang, ELSWORTH Derek, LIU Jishan. Mechanical behavior of methane infiltrated coal: the roles of gas desorption, stress level and loading rate[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 46(5): 945-958.
- [11] 唐巨鹏,潘一山,杨森林. 三维应力下煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 960-965.  
TANG Jupeng, PAN Yishan, YANG Senlin. Experimental study of coal and gas outburst under tridimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 960-965.
- [12] ZHOU B, XU J, YAN FZ, et al. Effects of gas pressure on dynamic response of two-phase flow for coal-gas outburst[J]. *Powder Technology*, 2021, 377: 55-69.
- [13] 贾立,彭守建,许江,等. 多层叠置含气系统煤层气合采储层流体动态响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 30-37.  
JIA Li, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Fluid dynamic response characteristics of CBM coproduction reservoir in MSGBS[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 30-37.
- [14] 王凯,蒋一峰,徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.  
WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [15] 曹树刚,李勇,郭平,等. 型煤与原煤全应力-应变过程渗流特性对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 899-906.  
CAO Shugang, LI Yong, GUO Ping, et al. Comparative research on permeability characteristics in complete stress-strain process of briquettes and coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 899-906.
- [16] JIA Li, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Interlayer interference during coalbed methane coproduction in multilayer superimposed gas-bearing system by 3D monitoring of reservoir pressure: An experimental study[J]. *Fuel*, 2021, 304: 121472.
- [17] 王汉鹏,李清川,袁亮,等. 煤与瓦斯突出模拟试验型煤相似材料研发与特性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1277-1283.  
WANG Hanpeng, LI Qingchuan, YUAN Liang, et al. Similar mater-

- ial research and property analysis of coal briquette in coal and gas outburst simulation test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1277–1283.
- [18] ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, LI Bobo, et al. Laboratory experiments of CO<sub>2</sub>-enhanced coalbed methane recovery considering CO<sub>2</sub> sequestration in a coal seam[J]. *Energy*, 2023, 262: 125473.
- [19] 康向涛, 黄滚, 邓博知, 等. 模拟原煤的相似材料试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(1): 138–142.  
KANG Xiangtao, HUANG Gun, DENG Bozhi, et al. Experimental study on similar material for simulating raw coal[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2015, 36(1): 138–142.
- [20] 孟祥跃, 丁雁生, 陈力, 等. 煤与瓦斯突出的二维模拟实验研究[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(1): 57–62.  
MENG Xiangyue, DING Yansheng, CHEN Li, et al. Two dimensional simulation experimental study on coal and gas outburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(1): 57–62.
- [21] 田斌, 许德平, 杨芳芳, 等. 成型压力与粉煤粒度分布对冷压型煤性能的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(10): 125–128.  
TIAN Bin, XU Deping, YANG Fangfang, et al. Briquetting pressure and fine coal particle distribution affected to performances of cool pressed briquette[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(10): 125–128.
- [22] CHAIKLANGMUANG S, SUPA S, KAEWPET P. Development of fuel secondary carbonization briquettes from biomass-lignite blends[J]. *Chiang Mai Journal of Science*, 2008, 35(1): 43–50.
- [23] BLESMA M J, MIRANDA J L, IZQUIERDO M T, et al. Curing temperature effect on mechanical strength of smokeless fuel secondary carbonization briquettes prepared with molasses[J]. *Fuel*, 2003, 82(8): 943–947.
- [24] 凌向阳, 黄光许, 王泽东. 黏结剂各组分对型煤特性的影响研究[J]. *中国煤炭*, 2008, 11(11): 79–81.  
LING Xiangyang, HUANG Guangxu, WANG Zedong. Study on the influence of various cementing agent components to briquette characteristics[J]. *China Coal*, 2008, 11(11): 79–81.
- [25] 郭云飞, 刘书福, 张永发. 影响炭化型煤成型性能的工艺参数研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(8): 82–84.  
GUO Yunfei, LIU Shufu, ZHANG Yongfa. Study on technical parameters affecting carbonized briquette properties[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(8): 82–84.
- [26] 许江, 蔡果良, 彭守建, 等. 温度对二次炭化型煤吸附特性及孔结构影响的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(11): 21–29.  
XU Jiang, CAI Guoliang, PENG Shoujian, et al. Effect of temperature on adsorption characteristics and pore structure of secondary carbonized briquette[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 21–29.
- [27] 许江, 甘青青, 蔡果良, 等. 二次炭化型煤成型装置及型煤制作方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 4055–4068.  
XU Jiang, GAN Qingqing, CAI Guoliang, et al. Thermal forming method and device for secondary carbonized briquette coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 4055–4068.
- [28] 彭守建, 王瑞芳, 许江, 等. 二次炭化温度对热压型煤力学性质及微观结构影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(5): 1221–1229.  
PENG Shoujian, WANG Ruifang, XU Jiang, et al. Experimental study of the effect of secondary carbonization temperature on mechanical properties and microstructure of hot-pressed coal briquette specimens[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1221–1229.
- [29] 卢寿慈. *粉体加工技术*[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [30] 叶菁. *粉体科学与工程基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [31] 钟恒, 刘益豪. 黄金分割法在选取实腹式拱桥加固层最优厚度中的应用[J]. *湖南交通科技*, 2018, 44(2): 143–146.  
ZHONG Heng, LIU Yihao. Application of gold segmentation method in selecting the optimum thickness of the reinforcement layer of the solid abdominal stone arch bridge[J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2018, 44(2): 143–146.
- [32] 王汉鹏, 张庆贺, 袁亮, 等. 含瓦斯煤相似材料研制及其突出试验应用[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1676–1682.  
WANG Hanpeng, ZHANG Qinghe, YUAN Liang, et al. Development of a similar material for methane-bearing coal and its application to outburst experiment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1676–1682.
- [33] 彭守建, 贾立, 许江, 等. 叠置煤层气系统采渗透率动态演化特征及其影响因素[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(10): 3501–3511.  
PENG Shoujian, JIA Li, XU Jiang, et al. Dynamic evolution and its influencing factors of coal seam permeability during joint gas production of superimposed CBM system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3501–3511.
- [34] XING E, JORDAN M, RUSSELL S J, et al. Distance metric learning with application to clustering with side-information[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2002: 505–512.
- [35] 甘青青. 二次炭化型煤炭化反应机理及其热压成型条件优化试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
GAN Qingqing. Study on carbonization reaction mechanism of secondary carbonization briquette and optimization of molding condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [36] 吴建国. 基于马氏距离度量的聚类集成算法研究[D]. 太原: 山西大学, 2023.  
WU Jianguo. Research on the clustering ensemble algorithm based on the mahalanobis distance metric[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023.