

# 构造煤渗透率对红外辐射功率响应变化试验研究

张永利,董毓斌,涂钰滢,刘 婷,马玉林

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

**摘要:**中国煤储层地质开采条件复杂,具有低压力、低渗透率、低饱和度以及含气量高等特点。众学者通过多种手段研究煤层气增产技术,实现了高速开采煤层气的目的,但由于对煤储层解吸渗流机理的不明确,未能实现大规模开采。通过温升实验,得到红外辐射下煤体温度变化规律,红外辐射功率越大,煤体升温速率越快,所能达到的温度也越高。分析得到煤体温度与红外辐射功率的关系式,该关系式为探究红外辐射下煤体的温升规律及后续的红外辐射下煤体的解吸-渗流实验提供参考。基于自主知识产权的红外辐射三轴加载实验系统开展煤体的解吸-渗流实验,该系统主要分为红外辐射子系统、三轴加载子系统、数据采集子系统。分别以轴压、围压、孔隙压力及红外辐射功率为变量对煤体的渗透率进行系统性研究,解决了红外场、应力场和渗流场不能同时加载的难题。该实验系统具有结构简单、安全性高、密封性好、压力范围大、数值稳定及参数可单独调控等特点。在现有研究基础上进行红外辐射作用下煤体渗流实验,定量分析煤体解吸渗流过程中的相关参数及演化规律。结果表明:在孔隙压力较低范围内,煤体渗透率随红外辐射功率整体呈上升趋势,渗透率最大增加 45%。在相同孔隙压力条件下,低围压状态下煤体的渗透率普遍高于高围压状态下煤体的渗透率。推导出煤体渗透率与红外辐射功率关系式,并对关系式中孔隙率相关参数  $k_0$  及热膨胀相关参数  $b$  进行分析,在红外辐射影响下,孔隙率相关参数随围压的增加而下降,煤体热膨胀相关参数在孔隙压一定时,随围压的增加变化范围在 0.004 5~0.003 0。对红外辐射作用下煤体渗透率损失率进行分析,低孔隙压力条件下,煤体渗透率损失率随红外辐射功率的增加整体呈减小趋势。考虑红外辐射功率敏感性,在孔隙压力一定的条件下,煤体红外辐射功率敏感系数与红外辐射功率呈正相关。在孔隙压力不同的条件下,煤体红外辐射功率敏感性存在差异,说明红外辐射功率敏感系数不仅与红外辐射功率有关,更是孔隙压力与围压共同作用的结果。通过对红外辐射作用下煤体渗透率影响因素的分析得到红外辐射功率与渗透率的关系式及影响参数。

**关键词:**构造煤;红外辐射;渗透率;渗透率损失率;功率敏感性

**中图分类号:**TD712;P618

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-9993(2022)10-3746-13

## Experimental study on permeability response of structural coal to infrared radiation power

ZHANG Yongli, DONG Yubin, TU Yuying, LIU Ting, MA Yulin

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The geological mining conditions of coal reservoirs in China are complex because of the characteristics of low

收稿日期:2021-10-17 修回日期:2021-12-31 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1586

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574138);辽宁省自然科学基金资助项目(2019-ZD-0035,2019-ZD-0040)

作者简介:张永利(1963—),辽宁阜新人,教授,博士生导师,博士。E-mail:yslxt2015@163.com

引用格式:张永利,董毓斌,涂钰滢,等.构造煤渗透率对红外辐射功率响应变化试验研究[J].煤炭学报,2022,47(10):3746-3758.

ZHANG Yongli, DONG Yubin, TU Yuying, et al. Experimental study on permeability response of structural coal to infrared radiation power[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3746-3758.



移动阅读

pressure, low permeability, low saturation, and high gas content. Many scholars have studied the CBM stimulation technology through various means to achieve the purpose of high-speed exploitation of CBM. However, due to the unclear mechanism of desorption and seepage in coal seams, a large-scale mining has not been realized. Through the temperature rise experiment, the temperature change law of the coal sample under infrared radiation was revealed. The greater the infrared radiation power is, the faster the temperature rise rate of the coal sample is, and the higher the temperature can be achieved. The relationship between coal sample temperature and infrared radiation power was obtained. The relationship provides a reference for exploring the temperature rise law of coal samples under infrared radiation and subsequent desorption seepage experiments under infrared radiation. The desorption seepage experiment of coal samples was carried out based on the infrared radiation triaxial loading experimental system with independent intellectual property rights. The system is mainly divided into the infrared radiation subsystem, three-axis loading subsystem, and data acquisition subsystem. The permeability of coal samples was systematically studied with axial pressure, confining pressure, pore pressure, and infrared radiation power as variables, the problem that infrared field, stress field, and seepage field cannot be loaded at the same time was solved. The experimental system has the characteristics of simple structure, high safety, good sealing, large pressure range, stable numerical value, and independent regulation of parameters. Based on the existing research, the coal sample seepage experiment under the action of infrared radiation was conducted to quantitatively analyze the relevant parameters and evolution law in the process of coal sample desorption seepage. The results show that in the range of low pore pressure, the permeability of coal samples increases with the infrared radiation power and the maximum permeability increases by 45%. Under the same pore pressure, the coal sample is in a state of low confining pressure, and the permeability is generally higher than that of high confining pressure. The relationship between coal sample permeability and infrared radiation power was derived, and the porosity-related parameters and thermal expansion-related parameters in the relationship were analyzed, under the influence of infrared radiation, porosity-related parameters decrease with the increase of confining pressure. When the pore pressure is constant, the variation range of coal expansion-related parameters with the increase of confining pressure is between 0.004 5 and 0.003 0. The permeability loss rate of coal under the action of infrared radiation was analyzed, under the condition of low pore pressure, the permeability loss rate of coal samples decreases with the increase of infrared radiation power. Considering the infrared radiation power sensitivity, under the condition of certain pore pressure, the infrared radiation power sensitivity coefficient of coal permeability is positively correlated with the infrared radiation power. Under the condition of different pore pressures, the power sensitivity of coal permeability is different, The power sensitivity coefficient is not only related to the infrared radiation power, but also to the result of the joint action of pore pressure and confining pressure. By analyzing the influencing factors of coal sample permeability under the action of infrared radiation, the fixed relationship and influencing parameters were obtained.

**Key words:** structural coal; infrared radiation; permeability; permeability loss rate; power sensitivity

中国的煤层气资源<sup>[1]</sup>位居世界第3位,有效利用煤层气资源是对国家能源供给侧结构性改革的推动,同时对保护环境,减少二氧化碳排放,实现我国能源类型转变有重大意义。现有开采手段由于对煤层解吸渗流机理的不明确,未能实现大规模开采。为了改善抽采理论及技术,提出利用红外激励开采低渗透煤储层煤层气的方法,研究在不同应力条件下,红外辐射功率对煤体渗透率的影响,对提高煤层气抽采率具有参考意义。

国内外学者做了大量关于煤岩渗透特性的研究。周世宁<sup>[2]</sup>、赵阳升<sup>[3-4]</sup>、梁冰<sup>[5-7]</sup>等建立了关于煤层气

渗流方面的理论与模型。以此为基础通过分析温度、应力等因素对煤岩渗透率的影响,得到在有效应力一定的条件下,煤体渗透率随温度增加而减小<sup>[8-10]</sup>的结论。在围压一定情况下,煤岩的渗透率随孔隙压力的增加呈先增加后减小<sup>[11-12]</sup>的变化趋势。文献[13]探究温度对煤体渗透率的影响,温度对煤体渗透率的影响取决于有效应力的大小,煤体温度的高低会影响应力状态下煤体渗透率的变化。在其他激励手段对煤层气渗透率的影响方面,鲜学福<sup>[14]</sup>率先提出了利用可控功率超声波通过物理激励方法来提高抽采率的思想,通过设计实验研究功率声波激励下煤层孔隙-

裂隙结构的发育情况<sup>[15]</sup>,学者们进一步开展对超声激励下的煤层中甲烷的渗透机理及试验研究<sup>[16-17]</sup>,结果表明超声波对煤岩存在致裂效果,可大幅度提高煤储层渗透性。在实验基础上 LI 等<sup>[18]</sup>模拟了超声波激励下煤层气藏的渗流特性,表明超声波对煤储层的渗透率及孔隙度有明显激励作用。张永利等<sup>[19]</sup>设计实验研究微波辐射后煤岩的渗透特性,得到煤岩的渗透率随微波功率与辐射时间的增加而增加的规律,以此为基础开展本文研究工作。

现有研究主要集中在煤层气开采的工艺手段、技术方法上,并取得了显著的成果,近几年开始考虑煤层气在煤岩中赋存时,通过改变煤体所处压力、煤体温度、煤体升温方式等条件,进而研究煤层气的吸附/解吸、渗流变化规律。通过研究发现电磁辐射对开采煤层气有促进作用,然而对电磁辐射的具体频段、类型以及功率大小等因素都未进行深入的探讨。文中利用自主研发的红外辐射三轴加载实验系统对不同红外辐射功率下煤体的渗透率变化规律进行研究,红外辐射以电磁波的形式传递能量,具有均匀性,热量传递不需要介质,能够直接深入物体的内部,使物体受热均匀,且具有直射与反射特性,不同的物质振动的固有频率不同,对红外辐射的吸收能力也不一样。通过对红外辐射作用下煤体渗流规律的研究,可为红外辐射开采煤层气技术提供理论参考,对煤层气增产有促进意义。

## 1 红外辐射温升实验

### 1.1 红外辐射机理

红外辐射<sup>[20]</sup>是电磁辐射的一种,波长 0.72 ~ 1 000  $\mu\text{m}$ ,频率(波长)不同的电磁波表现的作用不同,红外辐射的主要作用是热作用<sup>[21]</sup>,根据热辐射基本定律进行推导,得到红外辐射由定性分析到定量分析的关系式。红外辐射器的总辐射能  $W$  为

$$W = \varepsilon W_b = \frac{\varepsilon c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(c_2 \frac{\lambda_m}{a\lambda}\right) - 1} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon$  为红外辐射器的辐射率;  $W_b$  为黑体总辐射能,  $\text{W}/\text{cm}^2$ ;  $\lambda$  为波长,  $\text{m}$ ;  $c_1$  为第一辐射常数,  $3.742 \times 10^{-10} \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $c_2$  为第二辐射常数  $1.438 8 \times 10^{-2} \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $\lambda_m$  为光谱辐射通量密度的峰值波长,  $\mu\text{m}$ ;  $a$  为维恩位移常数,  $a = 2 897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

根据吸热公式可以得到

$$Q_r = M_c C \Delta T = W \quad (2)$$

其中,  $Q_r$  为红外辐射所释放的能量;  $M_c$  为煤的质量,  $M_c = \rho V$ ,  $\rho$  为煤的密度,  $V$  为煤的体积;  $C$  为煤的比热

容;  $\Delta T$  为温度的变化量。将式(1)代入式(2)可以得到温度的变化量与红外辐射率、红外辐射波长之间的关系式:

$$\Delta T = \frac{\varepsilon c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(c_2 \frac{\lambda_m}{a\lambda}\right) - 1} \frac{t}{\rho V C} \quad (3)$$

其中,  $t$  为时间,  $\text{s}$ 。由式(3)可知,红外辐射作用于煤体使煤体升温的温度取决于红外辐射发生器的辐射率、红外辐射的波长、煤的密度、比热容及加热时间。

### 1.2 红外辐射作用下煤体升温实验

通过设计煤体的温升实验来探究煤体在红外辐射作用下的温度变化规律。为了更加直观地得到煤体温度变化规律,利用红外热像仪对红外辐射下煤体的温度变化进行测量。实验仪器主要包括红外发生器、石棉、保温箱、红外热像仪等装置,分别以不同红外辐射功率进行了 5 组温升实验,见表 1。

表 1 温升实验方案

Table 1 Temperature rise test schemes

编号	红外辐射功率/W	辐射时间/s	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	10	700	22.4
2	25	700	22.4
3	40	700	22.4
4	50	700	22.4
5	60	700	22.4

实验数据通过 IRBIS3 红外热图像处理软件以及 Origin 软件进行整理分析,由此得到在不同红外辐射功率下,煤体温度随红外辐射时间增加的变化规律如图 1 所示。

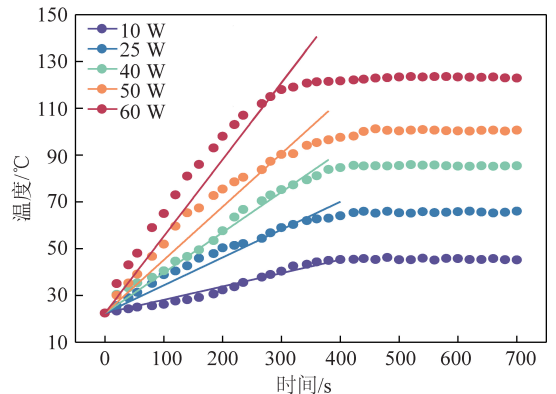


图 1 不同红外辐射功率下煤样温度变化规律  
Fig.1 Temperature variation of coal sample under different infrared radiation power

由图 1 可知,在红外辐射作用下,煤体温度随着红外辐射时间的增加而增加,从整体来看,在红外辐射功率较小的情况下,煤体在红外辐射作用后温度增加的变化速率并不大,且较为接近,随着辐射时间的

增加,温度稳步上升。随着功率的增加,辐射功率为 60 W 时,煤体升温速率与增长幅度是最大的。煤体在红外辐射作用下,初始阶段温度变化幅度较大,在经过一段时间的升温变化后,煤体的温度变化在一定的时间内保持相对平稳的状态。不同功率达到的升温程度也不同,红外辐射的功率越高,煤体所能达到的温度越高。对实验数据进行拟合,得到在不同红外辐射功率下实验煤体的温度随时间变化的函数关系见表 2。

表 2 不同红外功率下煤体温度与时间的拟合函数

Table 2 Fitting function of coal temperature and time under different infrared power

功率/W	拟合函数	$R^2$
10	$y = 22.4 + 0.057\ 08x \quad (x \leq 400\ \text{s})$	0.998\ 39
	$y = 45 + 1.00 \quad (x > 400\ \text{s})$	
25	$y = 22.4 + 0.119\ 1x \quad (x \leq 400\ \text{s})$	0.993\ 97
	$y = 65 \pm 1.00 \quad (x > 400\ \text{s})$	
40	$y = 22.4 + 0.172\ 62x \quad (x \leq 384\ \text{s})$	0.996\ 47
	$y = 85 + 1.00 \quad (x > 384\ \text{s})$	
50	$y = 22.4 + 0.227\ 49x \quad (x \leq 373\ \text{s})$	0.987\ 02
	$y = 100 \pm 1.00 \quad (x > 373\ \text{s})$	
60	$y = 22.4 + 0.328\ 49x \quad (x \leq 360\ \text{s})$	0.988\ 83
	$y = 122 \pm 1.00 \quad (x > 360\ \text{s})$	

通过拟合数据可知,以红外辐射功率为 10 W 为例,煤体在接受红外辐射 400 s 左右就达到了此功率下所能达到的最高温度,功率越大,煤体能达到的温度就越高。与此同时,煤体在辐射功率越大的情况下,达到最高温度的时间越短。从煤体升温速率与功率的拟合曲线(图 2(a))可知,在红外功率变化范围为 0~60 W 时,煤体的升温速率与红外辐射功率呈正相关。煤体在红外辐射作用下所能达到的最高温度与红外辐射功率的关系如图 2(b)所示,并得到温度  $T$  与红外辐射功率  $w$  的关系式:  $T = 20 + 1.673w$ 。

## 2 红外辐射渗流实验

### 2.1 煤样的采集与制备

构造煤是煤体由于构造作用(如断层、褶曲、滑移等)的影响,致使其原生结构会被破坏,造成煤体的严重破损甚至粉化的一种煤岩<sup>[22]</sup>。构造煤质地松软,承载能力较差,渗透率较低。本次实验煤样取自辽宁阜新五龙矿,阜新盆地大地构造位置在中朝地台的东部,内蒙古地轴南部的燕辽台褶带。东西两侧的盆缘断裂是阜新盆地的一级构造,该盆地次一级构造以褶皱为主,盆地内的断裂构造主要有 4 组,这 4 组断裂构造对煤层有较大影响。五龙矿区位于断裂构

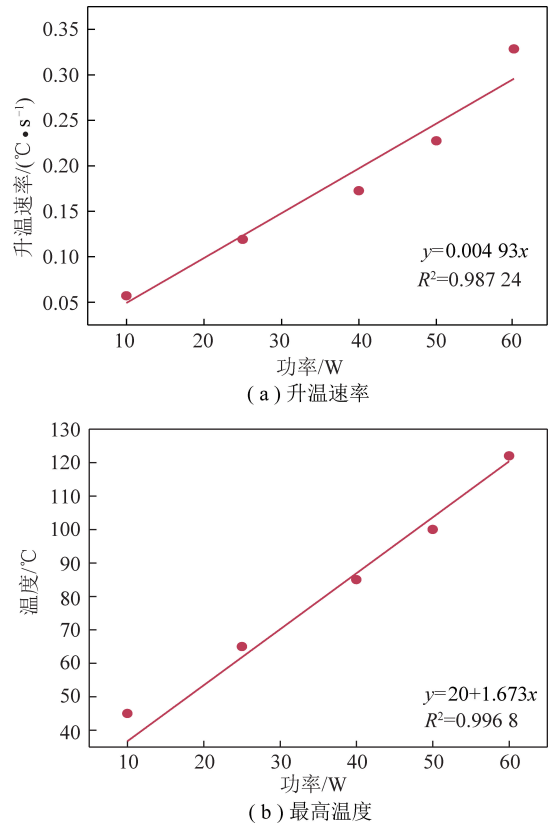


图 2 煤体升温速率和最高温度与红外辐射功率的关系

Fig.2 Relationship between heating rate, maximum coal temperature and infrared radiation power

造之上,矿区中存在几条正断层,该矿区的煤矿属于构造煤<sup>[23]</sup>。五龙矿区煤样成分见表 3。为减少煤样的差异性,保证煤样起始吸附量相同,控制基础变量,将构造煤制成型煤试样进行实验,参考不同文献确定了本实验型煤的制作方法。利用颚式破碎机将煤样充分粉碎,再利用粉末分级过滤筛对粉碎的颗粒煤体进行分级筛选,筛选出 0.25~0.18 mm(60~80 目)的煤粉颗粒备用,称取筛好煤粉 270 g,再配 8 g 松香粉末,充分搅拌均匀,将配比好的煤粉装入模具中,用 200 t 的数控液压机以 200 kN 的成型压力压制并稳压 30 min,制成  $\phi 50\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$  的型煤标准试件<sup>[24-25]</sup>,在成型煤样上钻孔以便放入红外发射管及热电偶,对制好的煤样干燥处理,进行密封保存。

表 3 样品组成

Table 3 Coal sample composition

成分	有机碳	黏土矿物	镜质组	其他
质量分数/%	75.00	10.28	6.22	8.50

### 2.2 实验装置

实验中采用团队自行研发的红外辐射三轴加载实验系统,该系统可以实现红外场、应力场、渗流场对煤体同时加载的功能,完成煤体在红外辐射及三轴应力

作用下的渗透率测定实验。该系统由红外辐射子系统、三轴加载子系统及数据采集子系统 3 部分组成。其中红外辐射子系统可对煤体实现红外辐射加热功能,该系统设有功率调节装置,可实现 0~100 W 辐射功率自由调控;三轴加载子系统可实现对煤体轴压、围压及孔隙压力的同时加载,确保煤样所处应力状态与实际相符;数据采集子系统可实现对实验过程中的轴压、围压、孔隙压力、温度及气体流量的实时监测,并可根据实验需求对各场参数进行单独调控。其中三轴加载装置具有较高抗压强度、冲击韧性和综合机械性能,满足实验所需压力要求,图 3 为该实验系统示意。

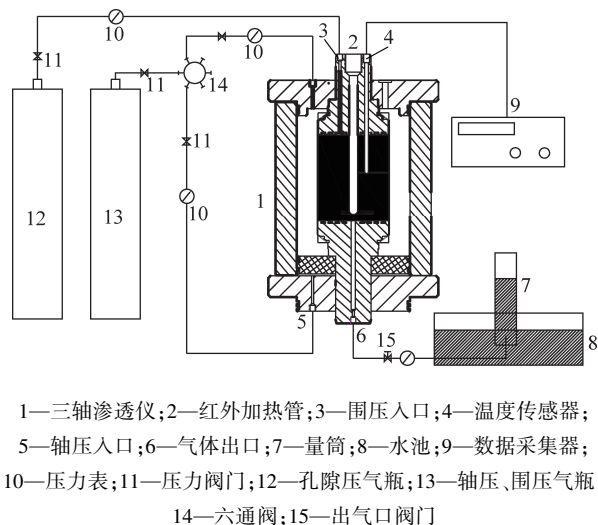


图 3 实验设备示意

Fig.3 Schematic diagram of experimental equipment

### 2.3 实验方案

对照文献中提出的关于三轴加载下煤体解吸渗流实验及红外辐射作用对煤体的孔隙结构及吸附/解吸特性实验研究的方案<sup>[26-29]</sup>,考虑实际构造煤层的应力状态,结合实验目的为研究应力加载及红外辐射作用下煤体渗透率的变化规律,特制定以下实验方案。实验方案见表 4,实验步骤如下:

① 将制备好的型煤试样与红外辐射装置进行连接,放入三轴夹持器中密封固定,将处理好的试件放入实验装置,如图 3 将各个实验装置进行连接。② 检查实验装置的气密性,实验系统连接无误后对实验系统中的试件进行施压,为了避免实验时因施压不稳导致试件破坏的情况,应使轴压、围压交替加载至指定压力,后进行稳压处理。③ 在围压和轴压稳定的情况下,对孔隙压力进行调节,然后打开实验装置的出气口阀门,利用排水法测量气体流量。④ 待出气量稳定时,打开红外辐射装置,设置红外辐射装置的辐射功率与辐射时间,对煤体施加红外辐射。⑤ 根据实验方案选取辐射功率,红外辐射作用后,出气口

速率出现变化,利用排水法测量其气体渗流量,并进行记录。⑥ 重新设置红外功率、孔隙压力、轴围压,重复步骤②~⑤,得到相应的实验数据,计算其渗透率。

表 4 实验方案

Table 4 Experimental scheme

红外辐射功率/W	围(轴)压/MPa	孔隙压力/MPa
	2	
	3	
0,10,25,40,50,60	4	0.2,0.4,0.6,0.8,1.0
	5	
	6	

### 3 实验结果及分析

根据上述实验方案,可以得到不同应力条件下施加不同功率红外辐射煤体的渗流量,按式(4)<sup>[30]</sup>计算煤体在不同红外辐射功率下的渗透率:

$$k = \frac{2P_2 L \mu Q}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (4)$$

其中, $L$ 为煤样的长度,cm; $Q$ 为气体流量, $\text{cm}^3/\text{s}$ ; $\mu$ 为气体的动力黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $A$ 为煤样的截面积, $\text{cm}^2$ ; $P_1$ 为瓦斯入口压力,MPa; $P_2$ 为瓦斯出口压力,MPa。式(4)中气体的动力黏性系数 $\mu$ 按公式(5)计算:

$$\mu = 1.36 \times 10^{-4} T^{0.77} \quad (5)$$

图 4 描述了不同孔隙压力下煤体渗透率随辐射功率的变化趋势,整体上看,功率增加时,煤样渗透率整体呈增长趋势,孔隙压力相同时,低围压条件下煤体的渗透率普遍大于高围压条件下煤体的渗透率。

当煤体未受红外辐射作用时,相同围压条件下,渗透率随孔隙压力增大而减小,在孔隙压力为 0.2 MPa 时渗透率最大,在 1 MPa 时渗透率最小,这是由于孔隙压力较小时,孔隙压力对煤体的固体骨架变形以及孔裂隙张开度影响较小,致使常温渗流实验中,有效渗流通道主要受到煤体总应力的影响,从而使渗流通道变窄,气体分子运移阻力加大,气体分子通过煤体的速率变缓<sup>[31]</sup>,在此孔隙压力范围内渗透率随孔隙压力增加而减小,并且随围压的增高,渗透率也减小,该规律与前人研究的规律大体一致<sup>[32]</sup>。

煤体经受红外辐射作用后,从红外辐射功率与围压对渗透率影响的角度分析,如图 4(a)所示,当孔隙压力为 0.2 MPa、红外功率为 0~10 W 时,煤体渗透率随着功率的增加而减小,然后在功率 10~60 W 的阶段,渗透率是呈上升趋势的。出现此种情况,考虑在孔隙压力较低情况下,煤体所受有效应力较大,低功

率红外辐射所引起的升温及孔隙扩张效果小于有效应力作用下骨架压缩变形效果,且煤基质颗粒受红外辐射作用,体积膨胀,同样压缩孔隙,致使煤体渗透率降低。随着红外辐射功率逐渐升高,升温速率与孔隙扩张效果增强,此时渗透率呈上升趋势,且与辐射功率呈正相关。当孔隙压力为 0.4 MPa 时,如图 4(b)所示,渗透率随功率的增加持续增长,在功率 10~25 W 时,渗透率增长速率普遍大于其他阶段,煤体升温及孔隙扩张的协同增渗效果作用明显。

在孔隙压力为 0.6~0.8 MPa 时,如图 4(c),(d)所

示,在围压较高时,煤体的渗透率在红外辐射功率为 10~30 W 时出现降低的情况,可能在此情况下,煤体的温度变化对此范围内的红外辐射功率更为敏感,在此功率范围内,煤体接受红外辐射,温度升高,在热应力的作用下膨胀,由于围压与孔隙压的作用导致煤样不能向外扩张膨胀,只能向内挤压孔隙和裂隙,从煤体的渗透率有一定程度的下降。如图 4(e)所示,在孔隙压力为 1.0 MPa 时,围压较高的情况下,煤体的渗透率在 0~25 W 随功率的增加变化程度不大,在 25~60 W 功率范围,煤体的渗透率随功率的增加而增加。

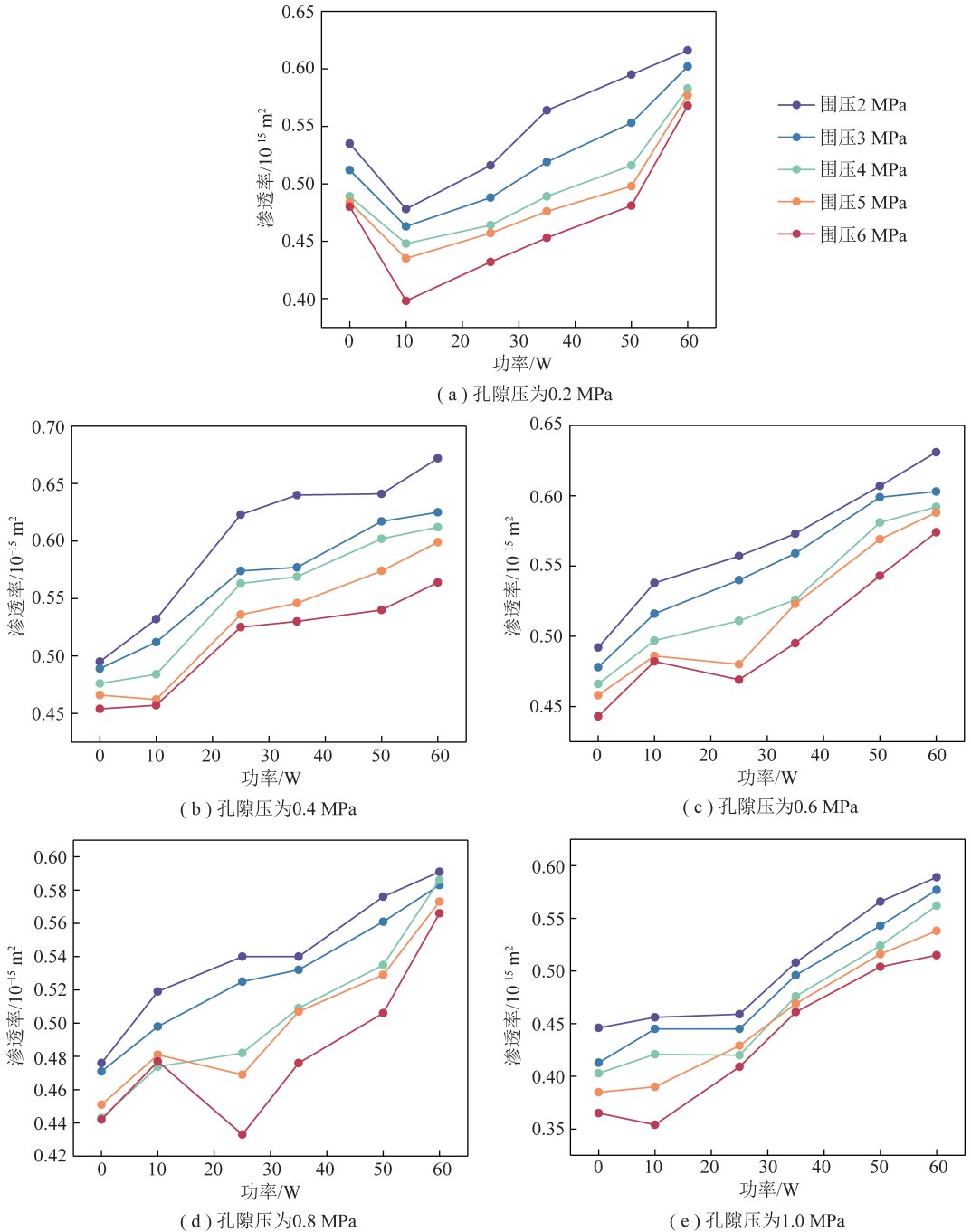


图 4 相同孔隙压下渗透率随功率变化关系

Fig.4 Relationship between permeability and power at the same pore pressure

现有研究认为温度对煤体渗透率的影响是多种因素共同作用的结果,温度升高时,煤体中瓦斯分子吸热,内能增加,活性增强,有利于渗透率增加;同时在温度升高过程中煤体产生膨胀变形,压缩孔隙,抑制煤体中气体流动,从而降低渗透率<sup>[9]</sup>。红外辐射对煤体有致裂效果,使煤体在温度上升的同时内部孔裂隙扩展,连通性增强,致使煤体渗透性增强。分析实验数据可知,对煤体施加红外辐射,在孔隙压力较低的范围内,煤体渗透率随红外辐射功率的增强整体呈增加趋势,该结果与学者们辐射增渗所得规律一致<sup>[28]</sup>。

红外辐射下改变煤样温度产生的应力  $\sigma_m$  为

$$\sigma_m = \frac{\alpha ET}{1 - 2\nu} \quad (6)$$

其中,  $T$  为煤样温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E$  为煤样弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $\alpha$  为线热膨胀系数。煤样总应力  $\sigma$  为

$$\sigma = \sigma_n - \delta\sigma_m \quad (7)$$

式中,  $\sigma_n$  为温度不变时由压应变产生的应力,  $\text{MPa}$ ;  $\delta$  为与温度相关的系数。

渗透率公式可表示为

$$k \propto \varphi^3 / (1 - \varphi^2) \quad (8)$$

式中,  $\varphi$  为孔隙率。

假设煤体有无数个单元体,每个单元体的体积为常数,因此体积变化可认为是孔隙率的变化,所产生的有效应力变化为

$$d\varphi = -\varphi C_p (1 - \varphi) d\sigma \quad (9)$$

其中,  $C_p$  为流体压缩系数,对式(9)进行积分并引入平均孔隙压缩系数  $\bar{C}_p$ ,简化后可得孔隙率表达式为

$$\varphi = \frac{\varphi_0 e^{-\bar{C}_p(\sigma - \sigma_0)}}{1 - \varphi_0 [1 - e^{-\bar{C}_p(\sigma - \sigma_0)}]} \quad (10)$$

式中,  $\sigma_0$  为初始应力,  $\text{MPa}$ ;  $\varphi_0$  为初始孔隙率。

将式(10)与式(8)结合化简<sup>[33]</sup>可得

$$k = k_0 e^{-3\bar{C}_p(\sigma - \sigma_0)} \quad (11)$$

式中,  $k_0$  为与初始孔隙率相关的系数,  $k_0 = \varphi_0^3 / (1 - \varphi_0)^2$ 。

联立式(7),(9),(11)并化简得渗透率与温度的关系式:

$$k = k_0 e^{3\bar{C}_p\delta\beta[T - (\sigma_n - \sigma_0)/(\delta\beta)]} \quad (12)$$

由红外辐射下煤样温升实验得到的温度与红外辐射功率拟合关系式  $T = 20 + 1.673w$  代入式(12)可以得到煤体渗透率与红外辐射功率的关系式:

$$k = k_0 e^{3\bar{C}_p\delta\beta[20 + 1.673w - (\sigma_n - \sigma_0)/(\delta\beta)]} \quad (13)$$

其中,  $\beta$  为热应力系数,  $\beta = \frac{\sigma_m}{T}$ 。令  $b = 5.019 \bar{C}_p \delta \beta$ ,  $c =$

$$\frac{\sigma_n - \sigma_0}{1.673\delta\beta} - 11.9546, \text{通过简化后可得到}$$

$$k = k_0 e^{b(w-c)} \quad (14)$$

表5给出不同功率下煤样渗透率变化的拟合结果,其中  $R^2$  在 0.9 左右,表明拟合效果较好。

表5 煤样渗透率与功率参数拟合结果

Table 5 Fitting results of coal sample permeability and power parameters

围压/MPa	孔隙压力为 0.2 MPa			
	$k_0$	$b$	$c$	$R^2$
2	0.504 84	0.003 24	-0.765 54	0.732 478
3	0.483 72	0.003 14	-0.140 10	0.665 910
4	0.467 00	0.002 96	0.564 85	0.546 500
5	0.454 98	0.002 99	0.576 32	0.508 600
6	0.434 45	0.003 37	1.990 80	0.431 430
围压/MPa	孔隙压力为 0.4 MPa			
	$k_0$	$b$	$c$	$R^2$
2	0.516 40	0.004 64	-1.535 03	0.855 81
3	0.497 16	0.004 09	-0.710 63	0.947 06
4	0.479 85	0.004 37	-0.678 35	0.921 57
5	0.454 98	0.004 44	-0.717 79	0.942 07
6	0.456 17	0.003 63	-0.794 06	0.893 88
围压/MPa	孔隙压力为 0.6 MPa			
	$k_0$	$b$	$c$	$R^2$
2	0.504 00	0.003 74	-0.355 76	0.969 500
3	0.488 23	0.003 76	-0.480 97	0.966 826
4	0.466 96	0.003 97	-0.470 19	0.967 880
5	0.452 62	0.004 26	-0.394 81	0.936 670
6	0.441 27	0.004 04	-0.507 59	0.899 510
围压/MPa	孔隙压力为 0.8 MPa			
	$k_0$	$b$	$c$	$R^2$
2	0.489 01	0.003 19	-0.587 38	0.937 84
3	0.476 40	0.003 32	-0.431 79	0.984 96
4	0.441 44	0.004 27	-0.446 91	0.949 67
5	0.447 91	0.003 67	-0.032 86	0.892 71
6	0.432 42	0.003 65	0.294 95	0.680 42
围压/MPa	孔隙压力为 1.0 MPa			
	$k_0$	$b$	$c$	$R^2$
2	0.428 830	0.005 15	-0.230 37	0.929 66
3	0.406 660	0.005 62	-0.666 94	0.958 48
4	0.387 740	0.005 87	-0.624 26	0.938 27
5	0.378 348	0.006 11	-0.771 94	0.984 69
6	0.349 360	0.006 74	-0.918 36	0.948 14

以孔隙压力 1.0 MPa 时为例,其拟合曲线如图 5 所示。对不同围压下  $k_0$  与  $b$  的拟合如图 6 所示,从图 6(a)可知,  $k_0$  随着围压的增加整体呈下降趋势。在孔隙压力为 1.0 MPa,  $k_0$  最低,在孔隙压力为 0.8 MPa 时,有一个小范围的波动变化。由图 6(b)可知参数  $b$  的变化范围集中于 0.004 5~0.003 0,但在孔隙压力为 1.0 MPa 时,参数  $b$  随围压的增加而增加,在 0.6, 0.8 MPa 时随着围压的增加而有小幅度的增加,在孔

隙压力为 0.4 MPa 时随着围压的增加而减小,在孔隙压力为 0.2 MPa 时,呈现缓慢减小后又增加的趋势。整体符合当孔隙压力减小时,  $b$  随围压增大而减小的变化趋势。分析其原因,得出孔隙压力越低时,在有效应力的挤压作用下,受辐射煤体热膨胀能力越小。因此参数  $b$  不仅受到围压与辐射功率的影响,孔隙压力、煤基质对红外辐射的吸收力等因素共同作用才导致如图 6 所示的变化规律。

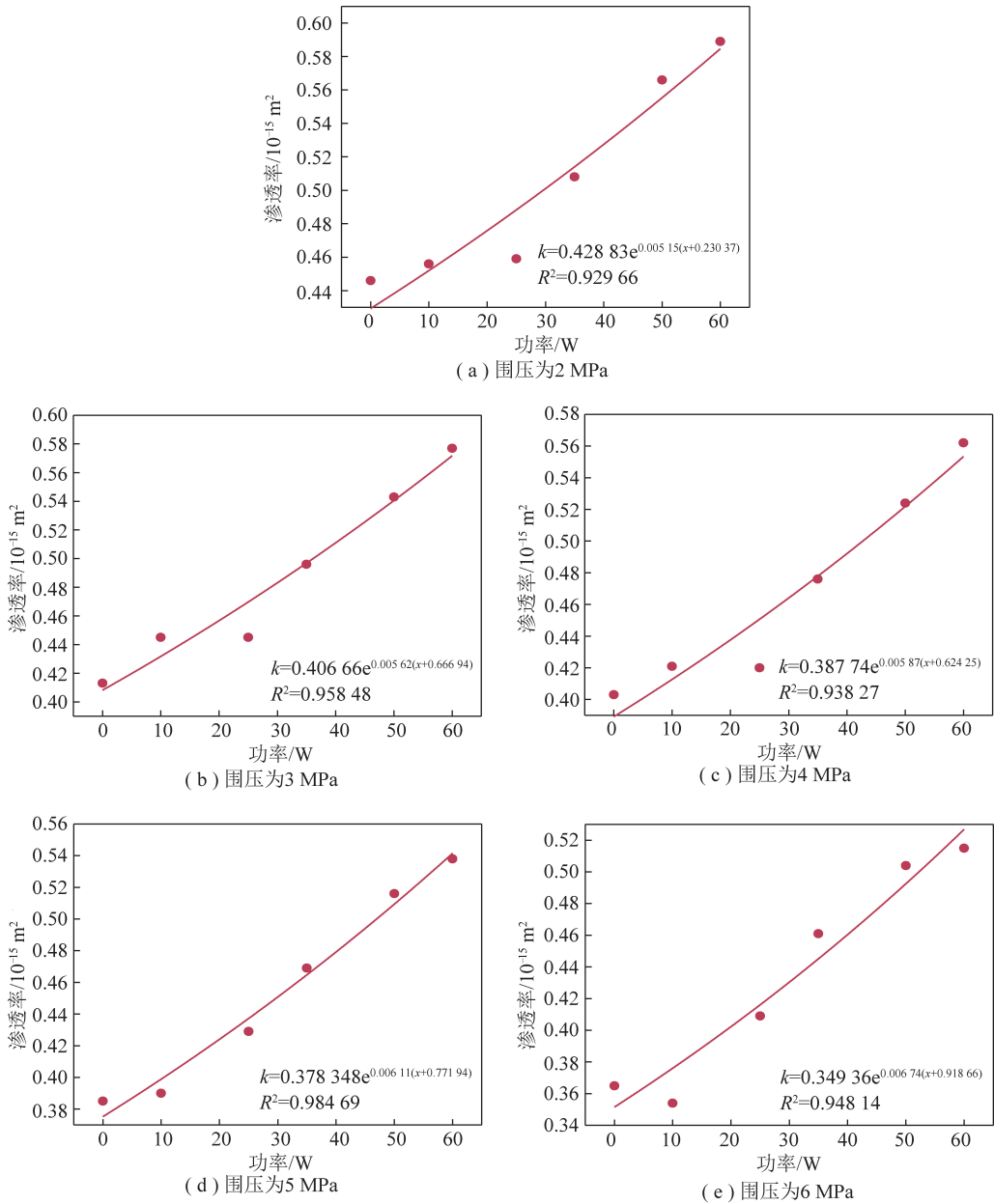


图 5 孔隙压力 1.0 MPa 下煤体渗透率与功率的拟合

Fig.5 Fitting of coal permeability and power under pore pressure of 1.0 MPa

#### 4 红外辐射功率敏感性分析

在进行红外辐射作用下的煤体渗流实验时,发现煤体渗透率发生改变,该结果不仅是红外辐射的作

用,围压与孔隙压力同样对煤体的渗透率存在影响。为探究红外辐射功率对渗透率的影响,文中引入红外辐射功率敏感性分析,从渗透率损失率及红外辐射敏感系数 2 个评价参数对渗透率进行研究。

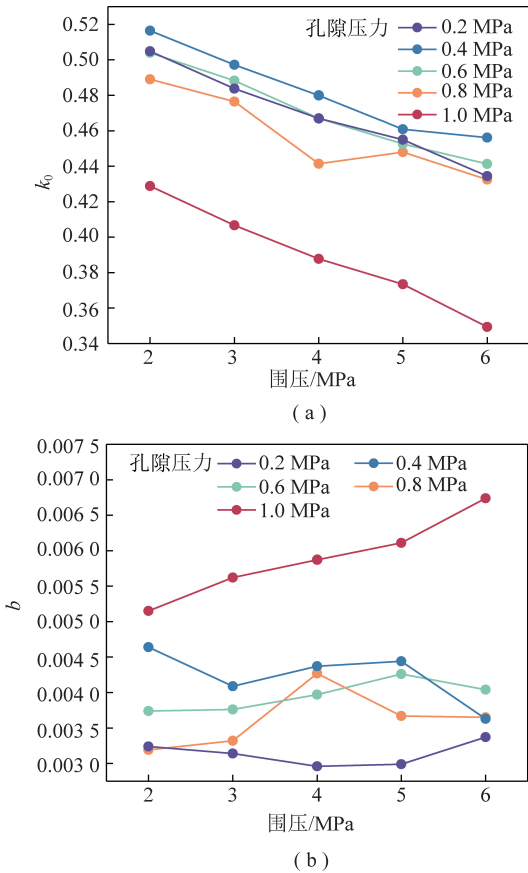


图6 拟合参数随围压的变化规律

Fig.6 Variation of fitting parameters with confining pressure

#### 4.1 渗透率损失率

渗透率损失率表示煤体在红外辐射作用后,煤体渗透率减少的百分数,可以表示为

$$k_{\Delta} = \frac{k_j - k_i}{k_j} \times 100\% \quad (15)$$

其中,  $k_{\Delta}$  为煤体在红外辐射功率变化下渗透率损失率,%;  $k_j$  为煤体在不加红外辐射时的初始渗透率,  $10^{-15} \text{ m}^2$ ;  $k_i$  为红外辐射任一功率下所测得的渗透率  $10^{-15} \text{ m}^2$ 。

对在相同孔隙压力不同围压条件下的煤体进行红外辐射,对其渗透率损失率进行计算,其变化规律如图7所示。从图7(a)可知,当孔隙压力为0.2 MPa,红外辐射功率为10 W时,煤体渗透率损失率是正值,说明在此功率下煤体的渗透率损失10%左右;在围压为6 MPa时,煤体的渗透率损失率最高,达到了15%左右。然后随着红外辐射功率的增加,煤体的渗透率损失率变为负数,说明在红外辐射作用下,煤体的渗透率增加,在功率为60 W时,无论围压大小,渗透率损失率集中在-15%~-20%。当孔隙压力为0.4 MPa时(图7(b)),煤体的渗透率损失率随着红外辐射功率的增加而降低,在红外辐射功率

为10 W时已经为负值,在围压为2 MPa时,其下降幅度最大。在功率为40~50 W时,其下降幅度比较平缓。在孔隙压力为0.6~1.0 MPa且红外辐射功率较低时,煤体渗透率损失率呈平缓上升趋势,随功率增加,渗透率损失率呈下降趋势。分析原因,煤体在此应力条件下,对红外辐射功率响应较强,致使煤体体积膨胀,并向内压缩,渗透率出现不变甚至降低的现象。煤体当孔隙压力为1.0 MPa时,围压较低为2,3,4 MPa煤体的渗透率损失率在10~25 W,保持平缓不动,在围压较高的范围内直接下降。孔隙压力为0.4 MPa时渗透率损失率持续下降,渗透率增加效果最为理想。

分析结果可知,在孔隙压力较低的情况下,煤体渗透率损失率在红外辐射作用下,不同围压下渗透率损失率变化趋势近似相同,因此渗透率损失率受围压的影响不大。

#### 4.2 红外辐射功率敏感系数

借鉴前人研究成果<sup>[34-35]</sup>,在温度敏感系数的基础上,将红外辐射功率引入关系式中,得到红外辐射功率敏感系数,即在其他影响因素保持不变的情况下,红外辐射功率每增加1 W所对煤体渗透率引起的变化。

温度引起的煤体渗透率的相对变化量为

$$C_T = \frac{1}{k_c} \frac{\partial k}{\partial T} \quad (16)$$

式中,  $C_T$  为温度敏感系数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\partial k$  为煤体的渗透率随温度的变化量,  $10^{-15} \text{ m}^2$ ;  $\partial T$  为温度变化量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_c$  为第1个测点所测得的煤岩渗透率,  $10^{-15} \text{ m}^2$ 。

将煤体温度与红外辐射功率的关系式  $T = 20 + 1.673w$  代入式(16)得到红外辐射功率敏感系数为

$$C_w = \frac{1}{k_c} \frac{\partial k}{\partial (20 + 1.673w)} \quad (17)$$

其中,  $C_w$  为红外辐射功率敏感系数。再将式(14)代入式(17)得到

$$C_w = \frac{Ak_c}{1.673} e^{b(w-c)} \quad (18)$$

对红外辐射功率敏感系数  $C_w$  与功率之间的关系进行量化分析,在相同孔隙压力不同围压条件下,红外辐射功率敏感系数  $C_w$  随功率变化的关系曲线如图8所示。由图8可以看出,在孔隙压力一定的条件下,煤体红外辐射功率敏感系数随着红外辐射功率的增加而增加,即煤体对红外辐射功率的敏感性越来越高。不同孔隙压力条件下的红外辐射功率敏感系数存在差异,如在孔隙压力为0.2,0.4 MPa时,围压为2 MPa

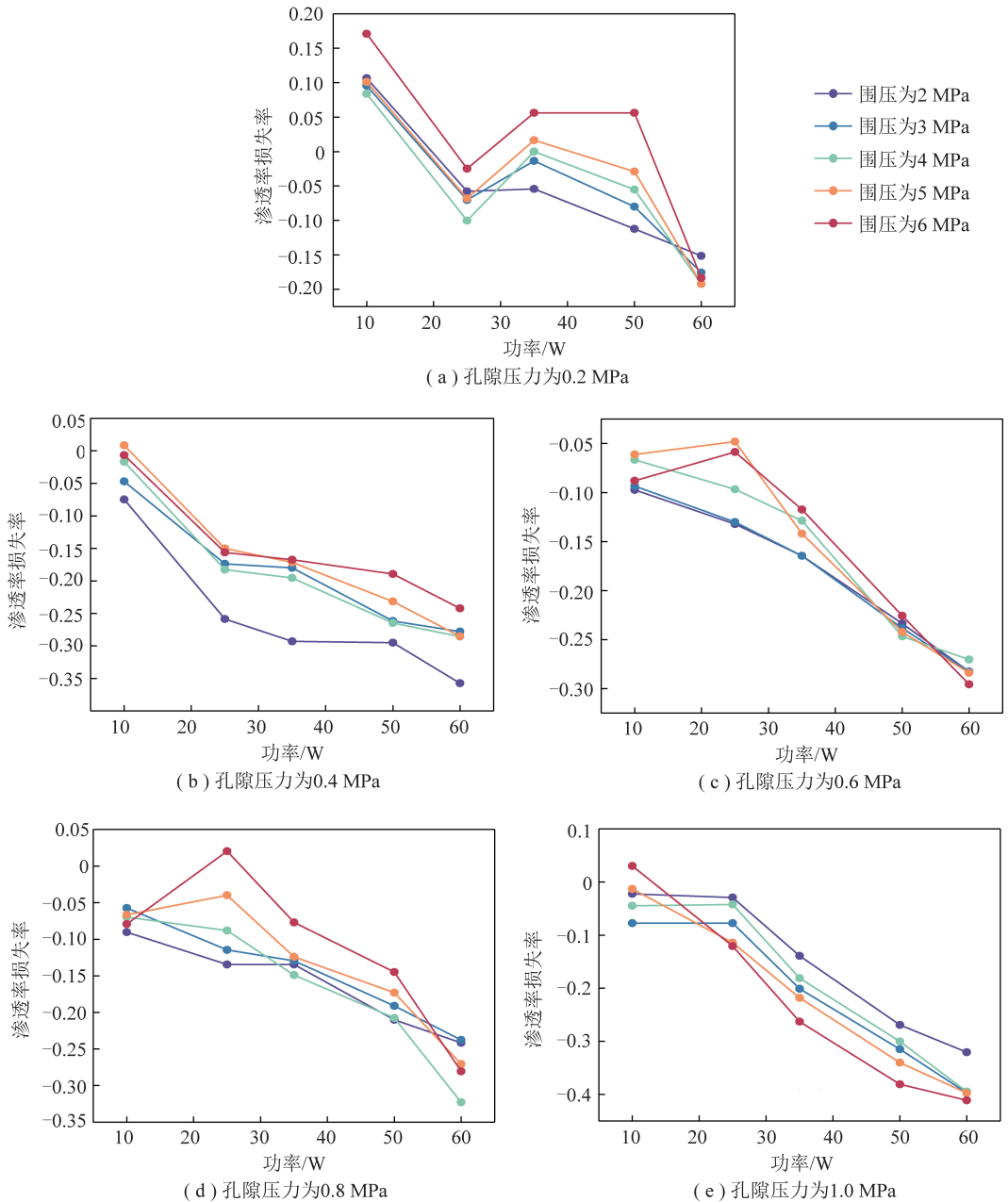


图 7 渗透率损失率随功率的变化规律

Fig.7 Variation of permeability loss rate with power

的煤体红外辐射功率敏感性最高,在孔隙压力为 0.6 MPa,煤体所受围压为 5 MPa 时其功率敏感性最高,在孔隙压力为 0.8 MPa 时,围压为 4 MPa 的煤体红外辐射功率敏感性最高,而在孔隙压力为 1.0 MPa、围压为 2 MPa 时,煤体的红外辐射功率敏感性最低。

综上所述,红外辐射功率敏感性不仅与红外辐射的功率有关,也受孔隙压力与围压的影响。

### 5 结 论

(1)通过对红外辐射下煤体温升结果与辐射功率进行拟合,得到煤体温度与红外辐射功率的关系式

$T = 20 + 1.673w$ ,煤体温度与红外辐射功率呈一次线性关系,红外辐射功率升高煤体温度增加,其拟合相关度为 0.997 44,该公式为红外辐射下煤样的温升规律研究提供参考。

(2)利用自主知识产权的红外辐射三轴加载实验系统进行了不同轴围压、孔隙压力下的构造煤型煤渗流实验。常温渗流实验中,在围压一定的情况下,煤体的渗透率随着孔隙压力的增大而减小,在孔隙压力为 0.2 MPa 时,煤样的渗透率达到最大;对煤体施加红外辐射时,渗透率随红外辐射功率的增加而增加,煤体渗透率与红外辐射功率呈正相关,红外辐射

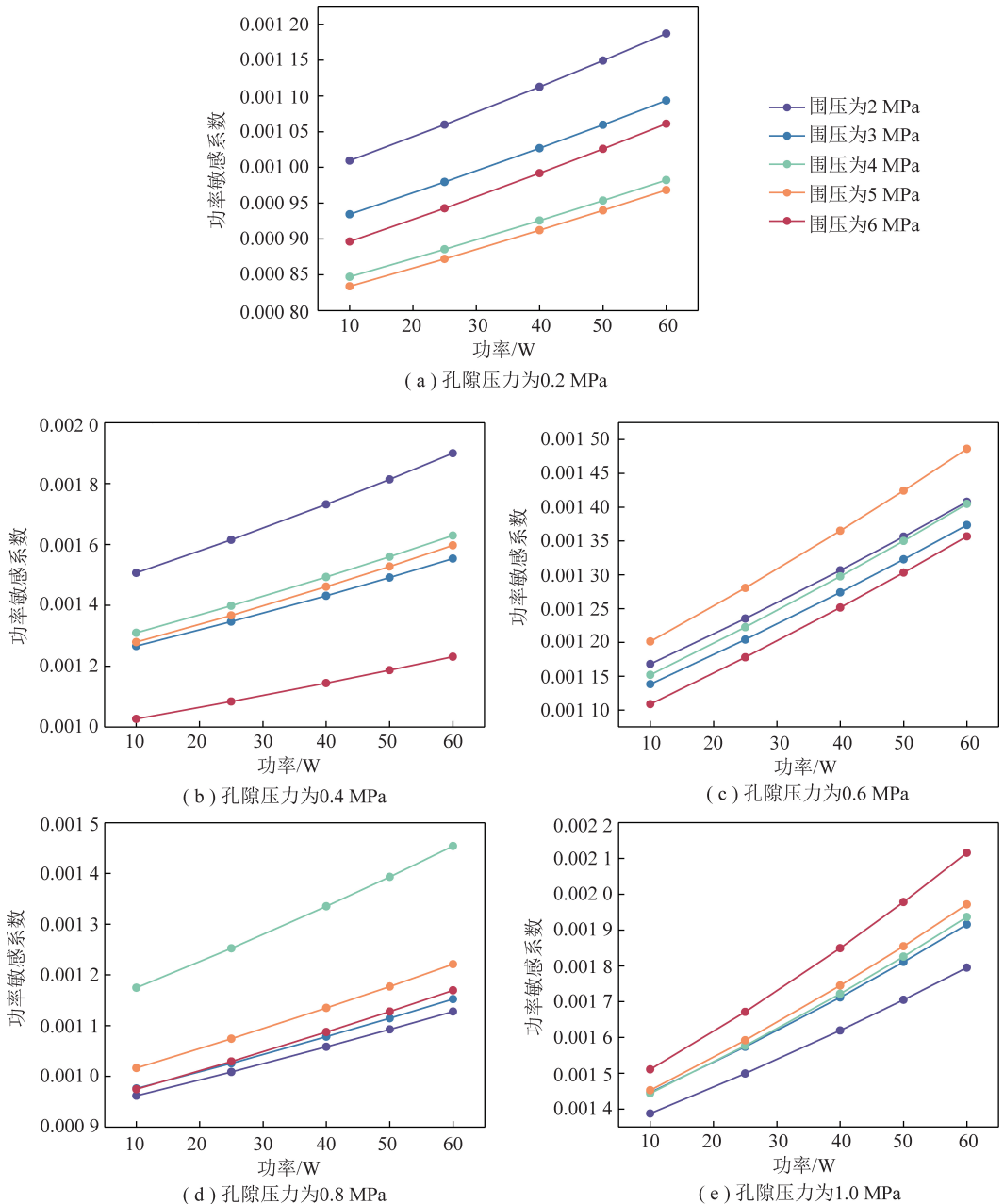


图8 功率敏感系数随功率变化曲线

Fig.8 Curves of power sensitivity coefficient changing with power

功率增大煤样渗透率增加。

(3) 依据渗透率公式、煤体所受有效应力及温升实验推导出红外辐射功率与温度的关系式,提出煤体渗透率与红外辐射功率的关系式  $k = k_0 e^{b(w-c)}$ ,通过煤体渗流实验数据对该公式进行验证,拟合度良好,对孔隙率相关拟合参数  $k_0$  及热膨胀相关参数  $b$  进行分析可知,在红外辐射影响下,煤体孔隙率相关的拟合参数  $k_0$  随着围压的增加而下降,煤体膨胀相关参数  $b$  在孔隙压力一定的条件下,随围压的增加其变化范围在 0.004 5~0.003 0。

(4) 煤体渗透率损失率随红外辐射功率的增加

整体呈减小趋势,煤体受到红外辐射功率越大,其渗透率损失率越低,在孔隙压力为 0.6~1.0 MPa,红外辐射功率较小情况时,会出现渗透率变化平缓甚至减小的趋势,整体分析,在孔隙压力较低情况下渗透率损失率受围压的影响不大,变化趋势近似相同。

(5) 当孔隙压力一定的条件下,煤体的红外辐射功率敏感系数随着红外辐射功率的增加而增加,即煤体对红外辐射功率的敏感性越来越高。在孔隙压力不同的条件下,煤体的红外辐射功率敏感性存在差异,煤体红外辐射功率敏感系数不仅与红外辐射的功率有关,同时也是孔隙压力与围压共同作用的结果。

## 参考文献 (References):

- [1] 国家能源局, 国能煤炭[2016] 334. 号煤层气(煤矿瓦斯)开发利用十三五规划[S]. 2016-11-24.
- [2] 周世宁, 孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1965, 2(1): 2436.  
ZHOU Shining, SUN Jizheng. Coal seam gas flow theory and its application [J]. Journal of China Coal Society, 1965, 2(1): 2436.
- [3] 赵阳升, 王瑞凤, 胡耀青, 等. 高温岩体地热开发的块裂介质固流热耦合三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1751-1755  
ZHAO Yangsheng, WANG Ruifeng, HU Yaoqing, et al. Three dimensional numerical simulation of solid fluid thermal disaster in block fracture medium for geothermal development of high temperature rock mass [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1751-1755.
- [4] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [5] 章梦涛, 潘一山, 梁冰, 等. 煤岩流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 93-98.
- [6] 梁冰. 煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 26-37.
- [7] 梁冰, 章梦涛, 王泳嘉. 应力、瓦斯压力在煤和瓦斯突出发生中作用的数值试验研究[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版): 1996, 15(1): 1-4.  
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, WANG Yongjia. Numerical experimental study on the role of stress and gas pressure in the occurrence of coal and gas outburst [J]. Journal of Fuxin Institute of Mining and Technology (Natural Science Edition), 1996, 15(1): 1-4.
- [8] 袁梅, 李波波, 许江, 等. 不同瓦斯压力条件下含瓦斯煤的渗透特性试验研究[J]. 煤矿安全, 2011, 42(3): 1-4.  
YUAN Mei, LI Bobo, XU Jiang, et al. Experimental study on permeability characteristics of gas bearing coal under different gas pressure [J]. Coal Mine Safety, 2011, 42(3): 1-4.
- [9] 孙光中, 王公忠, 张瑞林. 构造煤渗透率对温度变化响应规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1042-1048.  
SUN Guangzhong, WANG Gongzhong, ZHANG Ruilin. Experimental study on the response of structural coal permeability to temperature change [J]. Geotechnical Mechanics, 2016, 37(4): 1042-1048.
- [10] 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 study on seepage characteristics of full stress-strain process of briquette and raw coal [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 899-906.
- [11] 魏建平, 王登科, 位乐, 等. 两种典型受载含瓦斯煤样渗透特性的对比[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 93-99.  
WEI Jianping, WANG Dengke, WEI Le, et al. Comparison of permeability characteristics of two typical loaded gas bearing coal samples [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 93-99.
- [12] 王登科, 魏建平, 尹光志. 复杂应力路径下含瓦斯煤渗透性变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 303-310.  
WANG Dengke, WEI Jianping, YIN Guangzhi. Study on permeability change law of gas bearing coal under complex stress path [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 303-310.
- [13] PERERA M, RANJITH P G, CHOI S K, et al. Investigation of temperature effect on permeability of naturally fractured black coal for carbon dioxide movement: An experimental and numerical study [J]. Fuel, 2012, 94: 596-605.
- [14] 鲜学福. 我国煤层气开采利用现状及其产业化展望[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(S1): 1-5.  
XIAN Xuefu. Current situation and industrialization prospect of coalbed methane exploitation and utilization in China [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2000, 23(S1): 1-5.
- [15] 田洪波, 蒋曙光, 李玥, 等. 功率声波激励下无烟煤孔隙变化及裂隙发育研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(8): 9-12.  
TIAN Hongbo, JIANG Shuguang, LI Yue, et al. Study on pore change and fracture development of anthracite under power acoustic excitation [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(8): 9-12.
- [16] 肖晓春, 潘一山, 吕祥锋, 等. 超声激励低渗煤层甲烷增透机理[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1726-1733.  
XIAO Xiaochun, PAN Yishan, LÜ Xiangfeng, et al. Mechanism of methane antireflection in low permeability coal seams excited by ultrasound [J]. Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1726-1733.
- [17] 肖晓春, 徐军, 潘一山, 等. 功率超声影响的煤中甲烷气促解规律实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 65-71.  
XIAO Xiaochun, XU Jun, PAN Yishan, et al. Experimental study on the law of methane decomposition in coal affected by power ultrasound [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 65-71.
- [18] LI Xin, ZHANG Jie, LI Rongxin, et al. Numerical simulation research on improvement effect of ultrasonic waves on Seepage characteristics of coalbed methane reservoir [J]. Energies, 2021, 14(15): 4605.
- [19] 张永利, 尚文龙, 马玉林, 等. 微波作用下煤层渗透性变化规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(8): 48-53.  
ZHANG Yongli, SHANG Wenlong, MA Yulin, et al. Experimental study on the change law of coal seam permeability under the action of microwave [J]. China Science and Technology of Work Safety, 2018, 14(8): 48-53.
- [20] 宗兰. 红外辐射原理简介——科技小常识[J]. 激光与红外, 1973(7): 60.  
ZONG Lan. Introduction to the principle of infrared radiation-general knowledge of science and technology [J]. Laser and Infrared, 1973(7): 60.
- [21] 葛世名. 红外加热是节能减排绿色能源重要支撑技术[A]. 全国第十四届红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集[C]. 2013: 36-39.
- [22] 程远平, 雷杨. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 180-198.  
CHENG Yuanping, LEI Yang. Study on tectonic coal and relation between coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 180-189.
- [23] 杜维甲. 阜新矿区煤层气资源评价及开采规律研究[D]. 阜新:

- 辽宁工程技术大学,2010.
- DU Weijia. Study on CBM resource evaluation and exploitation law in Fuxin mining area [ D ]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2010.
- [ 24 ] 张荣. 复合煤层水力冲孔卸压增透机制及高效瓦斯抽采方法研究[ D ]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- ZHANG Rong. Study on pressure relief and anti-reflection mechanism of hydraulic punching in composite coal seam and efficient gas extraction method [ D ]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [ 25 ] 刘星光. 含瓦斯煤变形破坏特征及渗透行为研究[ D ]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- LIU Xingguang. Study on deformation and failure characteristics and seepage behavior of coal containing gas[ D ]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [ 26 ] 李惟慷, 杨新乐, 张永利, 等. 饱和蒸汽作用下煤体吸附甲烷运移产量规律试验研究[ J ]. 煤炭学报, 2018, 43( 5 ): 1343-1349.
- LI Weikang, YANG Xinle, ZHANG Yongli, et al. Experimental study on coal adsorption methane migration and production under saturated steam[ J ]. Journal of Chian Coal Society, 2018, 43( 5 ): 1343-1349.
- [ 27 ] SU Chang, ZHANG Yongli, YANG Xinle, et al. Numerical simulation of the temperature field of coal subjected to microwave directional heating[ J ]. IEEE Access, 2020, 8: 45084-45095.
- [ 28 ] 张永利, 尚文龙, 马玉林, 等. 微波作用下煤层渗透性变化规律实验研究[ J ]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14( 8 ): 48-53.
- ZHANG Yongli, SHANG Wenlong, MA Yulin, et al. Experimental study on permeability variation of coal seam under microwave[ J ]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14( 8 ): 48-53.
- [ 29 ] 马钱钱, 马凯. 红外热效作用对煤体孔隙结构影响试验研究[ J ]. 煤炭技术, 2020, 39( 6 ): 113-116.
- MA Qianqian, MA Kai. Experimental study on the effect of infrared thermal effect on coal pore structure [ J ]. Coal Technology, 2020, 39( 6 ): 113-116.
- [ 30 ] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福, 等. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究[ J ]. 煤炭工程师, 1998( 1 ): 11-14, 47.
- CHENG Ruiduan, CHEN Haiyan, XIAN Xuefu, et al. Experimental study on influence of temperature on permeability coefficient of coal sample[ J ]. Coal Engineer, 1998( 1 ): 11-14, 47.
- [ 31 ] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20( S1 ): 1801-1804.
- SUN Peide. Experimental study on permeability variation of coal samples during deformation[ J ]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20( S1 ): 1801-1804.
- [ 32 ] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 固流耦合作用下煤层气解吸-渗流实验研究[ J ]. 中国矿业大学学报, 2006, 35( 2 ): 274-278.
- TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study on desorption and seepage of coalbed methane under solid-flow coupling[ J ]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35( 2 ): 274-278.
- [ 33 ] 梁冰, 高红梅, 兰永伟. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24( 12 ): 2009-2012.
- LIANG Bing, GAO Hongmei, LAN Yongwei. Theoretical analysis and experimental study on the relationship between rock permeability and temperature [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24( 12 ): 2009-2012.
- [ 34 ] 许江, 曹偈, 李波波, 等. 煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32( 2 ): 225-230.
- XU Jiang, CAO Jie, LI Bobo, et al. Experimental study on the response of coal rock permeability to pore pressure change [ J ]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32( 2 ): 225-230.
- [ 35 ] 熊伟. 流固耦合渗流规律研究[ D ]. 廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2000.
- XIONG Wei. Study on fluid solid coupling seepage law [ D ]. Langfang: Institute of Seepage Hydrodynamics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [ 36 ] 刘世奇, 桑树勋, 杨恒林, 等. 沁南东区块3#煤层构造煤发育对渗透率的影响[ J ]. 煤矿安全, 2020, 51( 4 ): 167-171.
- LIU Shiqi, SANG Shuxun, YANG Henglin, et al. Influence of structural coal development on permeability of block 3# coal seam in Eastern Qinnan District [ J ]. Safety in Coal Mines, 2020, 51( 4 ): 167-171.
- [ 37 ] 王一巧. 红外加热煤体致裂特性研究[ D ]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- WANG Yiqiao. Study on the cracking characteristics of coal by infrared heating[ D ]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.