中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

预氧化煤体的力学参数和导热特性关系研究

肖 旸[1,2],刘志超[1,2],周一峰[1,2],马 砺[1,2]
(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;2. 陕西省煤火灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

摘 要:为了研究不同预氧化温度对煤体基础力学参数、导热特性参数的影响,以及两参数之间的线性相关度,选取新疆硫磺沟长焰煤,使用程序升温箱对煤样进行 30、80、140、200 ℃的预氧化处理,再借助 MTS880 电液伺服试验机、LFA457 激光导热分析仪和 FF35 CT 工业断层扫描仪机来研究煤体力学参数、导热系数及内部孔裂隙的变化情况,并引入 Pearson 相关系数来定量计算弹性模量和导热系数间的线性相关度。结果表明:140 ℃预氧化作用下煤样的弹性模量、抗压强度和导热系数都最大;200 ℃预氧化作用下煤样的微孔裂隙相对来说最多,而弹性模量、抗压强度最小;预氧化温度在 30~200 ℃,煤体的弹性模量和导热系数的相关系数不小于 0.992,为高度正相关,都随着预氧化温度的升高呈现出先增大后减小的趋势。

关键词:预氧化温度;力学参数;导热系数;线性相关度
中图分类号:TD75 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2018)04-0135-06

Study on relationship between mechanical parameters and thermal conductivity of pre-oxidized coal

XIAO Yang[1,2], LIU Zhichao[1,2], ZHOU Yifeng[1,2], MA Li[1,2]
(1. *School of Safety Science and Engineer, Xi' an University of Science and Technology, Xi' an* 710054, *China*;
2. *Shaanxi Provincial Key Lab of Coal Fire Prevention and Control, Xi' an* 710054, *China*)

Abstract: In order to study a different pre-oxidization temperature affected to coal basic mechanics parameter and thermal conductivity characteristic parameters as well as the linear correlation between the two parameters, a long-flame coal from Liuhuanggou, Xinjiang was selected, a programmed temperature rising box was applied to the pre-oxidization treatment of the coal samples with the temperatures of 30, 80, 140 and 200 ℃. Then a MTS880 electro-hydraulic servo testing machine, LFA457 laser thermal conductivity analyzer and FF35 CT industrial computed tomography system were applied to study the coal mechanics parameter, thermal conductivity coefficient and crack variation condition within the internal boreholes. The correlation coefficient was introduced to quantitatively calculate the linear correlation between the elastic modulus and the thermal conductivity coefficient. The results showed that under the pre-oxidation function with a temperature of 140 ℃, the elastic modulus, compressive strength and thermal conductivity coefficient would be the largest in all. Under the pre-oxidation function with a temperature of 200 ℃, the micropore cracks of the coal samples would relatively be the maximum and the elastic modulus and compressive strength would be the minimum. When the pre-oxidization temperature was at 30~200 ℃, the correlation coefficient between the elastic modulus and thermal conductivity coefficient would be greater or equal to 0.992, would be positively correlated with the height and all would be firstly increased and then would be reduced in tendency with the pre-oxidization temperature increased.

Key words: pre-oxidization temperature; mechanical parameter; thermal conductive coefficient; linear correlation

收稿日期:2017-11-15;**责任编辑**:王晓珍 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2018.04.023
基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2016M590963);国家自然科学基金面上资助项目(51574193);国家自然科学基金资助项目(51504186)
作者简介:肖 旸(1979—),男,贵州湄潭人,教授,博士。E-mail:877957837@qq.com
引用格式:肖 旸,刘志超,周一峰,等. 预氧化煤体的力学参数和导热特性关系研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(4):135-140,187.
XIAO Yang,LIU Zhichao,ZHOU Yifeng,*et al*.Study on relationship between mechanical parameters and thermal conductivity of pre-oxidized coal [J]. Coal Science and Technology,2018,46(4):135-140,187.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0 引　　言

因地表煤层露头燃烧由浅部不断向深部发展而形成的大面积火灾——煤田火灾,现已成为全球性的灾难[1-2]。我国因煤火每年烧损煤炭资源上万吨,直接经济损失达 20 亿元以上,燃烧产生的 CO_2 约占全球化石燃料碳排放的 0.10%~0.22%,造成巨大的资源浪费和环境污染,严重威胁着人类身体健康和生态环境[3-5]。

煤田火区煤岩体由于受热破坏,产生大量裂隙,随着温度的升高,煤体的导热特性参数即导热系数和基础力学特性如弹性模量、抗拉压强度发生改变[6]。而这些改变反过来影响温度场的变化和热应力的分布,导致煤体裂隙的发展变化。形成与地表沟通的复杂裂隙网络,引起气体的热力渗流,新鲜空气中的氧从地表通过裂隙源源不断地输送到火区,促进火区的发展[7-8]。故而研究中低温预氧化下煤体力学参数及导热特性参数对煤体裂隙的生成机理和发育规律的提出有指导意义,是预防和治理煤田火的基础。

近年来有很多关于煤体力学参数及导热系数的研究。马占国[9]通过伺服试验研究得出随着温度的升高,煤的强度和弹性模量呈减小、增大、减小趋势,应变呈增加、减小、增加趋势。查文华[10]指出在试验温度范围内不同温度下煤系砂质泥岩的力学特性有一定程度的差异,随着温度升高,峰值应力整体上呈降低趋势。彭担任等[11]在对矿井热害问题的研究中发现物体导热系数与温度的倒数成正比。WEN 等[12]研究发现煤体的比热容和导热系数随着温度的升高而增加,呈现出与热扩散系数相反的趋势。随着温度的变化,煤体的力学参数和导热特性参数都随之发生改变。目前关于温度对煤体基础力学参数或导热特性参数的影响研究较多,而对两参数受温度影响的相关性研究较少。笔者通过单轴压缩试验和导热特性试验得出煤样在不同温度作用下的基础力学参数和导热系数,并找出其线性相关度,为煤火灾害及煤体热破坏提供依据及工程应用基础。

1 试验装置及条件

我国煤田火区以新疆最为严重[13],故选取新疆火区硫磺沟长焰煤为试验基础煤样。

1.1 工业 CT 扫描试验

考虑到不同尺寸、形态、高径比对岩石强度的影响,故对选取的基础煤样依次使用自动取心机、厢式切割机及磨光机制得直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体,共分 4 组,每组 2 件,编号为 A_{01}、A_{02},B_{01}、B_{02},C_{01}、C_{02},D_{01}、D_{02},其中部分试样如图 1 所示。通常认为 200 ℃是高中温的分界点,再加前人预氧化处理温度及处理时间的研究经验[14-16],故而对 A 组常温 30 ℃处理,B、C、D 三组分别在程序升温箱中相对应 80、140、200 ℃下保持 2 h,然后再对图 1 所示样品进行 CT 扫描试验。

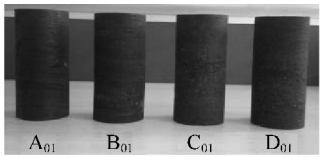


图 1　工业 CT 试验、单轴压缩试验部分试样

Fig.1　Partial sample of industrial computerized tomography and uniaxial compression experiment

试验采用高度灵活、高分辨率的 YXLON FF35 CT 工业断层扫描仪来测试煤体内部微孔孔隙的变化情况,其工作原理是探测器测量射线透过物体后的不同强弱变化,通过 CT 图像重建运算,从而获得煤体内部的详细信息。其扫描电压 140 kV,电流 60 μA,探测器帧频 2 F/S,放大系数 1.97。

1.2 单轴压缩试验

试验加载采用具有加载控制方式多、加载速率均匀且测试精度高的 MTS880 型电液伺服试验机,如图 2 所示。该机使用全数字闭环控制系统(Testar IIs 数字控制系统),载荷、应变、位移 3 种独立闭环控制方式,动态频率为 0.001~100 Hz,最大载荷为±500 kN。试验采用轴向位移控制,加载速率为 0.1 mm/min。



图 2　MTS880 型电液伺服试验机

Fig.2　MTS880 electro-hydraulic servo testing machine

CT 试验结束后将试验煤样 A_{01} 放置在试验机的承压板中心后开始试验,试验通过 Testar IIs 数字控制系统来实现,系统自动记录整个过程煤样的位移、破坏载荷等参数,A_{01} 测完之后将其移出,继续下一煤样的测定。各组煤样测量结束后,对各个样品试验结果通过式(1)进行整理。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

$$R_c = \frac{P}{S} \quad (1)$$

式中:R_c为试样单轴抗压强度,MPa;P 为试样破坏载荷,N;S 为试样初始截面积,mm^2。

1.3　导热特性试验

单轴压缩试验结束后将 A_{01}~D_{02}总共 8 个样品依次使用碎煤机将其粉碎,再通过 200 目(0.074 mm)的筛子筛选,称取适量煤粉,然后使用压片机将煤粉压成薄片,每个样品相对应各压 1 个薄片,并进行编号,编号为 A_{11}、A_{12},B_{11}、B_{12},C_{11}、C_{12},D_{11}、D_{12},如图 3 所示。其直径约为 12.7 mm、厚度 1 mm,随后再进行导热系数的测定。

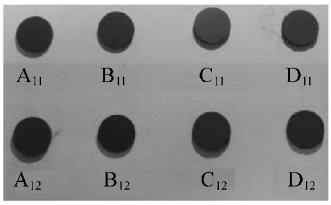


图 3　导热特性试验样品

Fig.3　Sample of thermal conductivity experiments

试验装置采用导热分析仪 LFA 457,如图 4 所示。该装置是根据激光闪射法原理测量煤样的热物性参数,即当激光照射到煤体的下表面时,下表面温度升高,与上表面形成温度差,红外探测器检测出煤体上表面中心的温度变化,从而得出煤体的导热系数、热扩散系数、比热容[17]。该仪器主要由加热炉、红外传感器、激光闪射系统和数据采集系统组成。

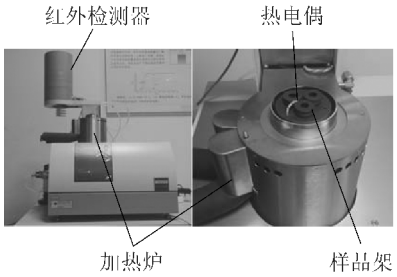


图 4　激光导热分析仪 LFA 457

Fig.4　LFA 457 laser thermal conductivity analyzer

将 A_{11}、A_{12}放入样品架后,向试样装置内冲入氮气,气体恒定流量 100 mL/min,测试温度设定为 30~200 ℃,升温速率为 1 ℃/min(数据收集点:30、60、80、100、120、…、200 ℃),当温度到达收集点后闪射 3 次求得参数的平均值,为了使试验数据更加准确,每组有 2 个试样,故将得到的这 2 个试样的值再平均。第 1 组试验完成后,取出 A_{11}、A_{12},继续下一组的测试。

2　试验结果及分析

完成工业 CT 试验、单轴压缩试验及热物性试验后整理得到煤样在不同预氧化温度下的 CT 扫描图、全应力应变曲线图以及导热系数随温度的变化趋势图。

2.1　煤样单轴压缩全应力-应变

从图 5 中可以看出,不同温度处理后的煤体的全应力-应变曲线大致分 4 个阶段,与前人[9,18]试验结果相同。

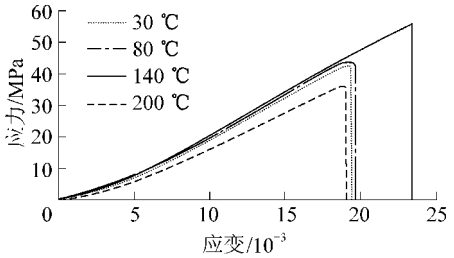


图 5　不同预氧化温度作用下煤体的全应力-应变曲线

Fig.5　Total stress-strain curves of coal under different pre-oxidation temperatures

1)压密阶段:当压力较低时,煤体内微孔裂隙受力被压密、闭合,从而曲线微向上弯曲。

2)弹性变形阶段:随着压力的增加,被压密的煤体未发生进一步的变化,应力应变属线性关系,卸载后可完全恢复,故曲线基本呈直线,该直线斜率为弹性模量。

3)塑性变形阶段:此阶段煤体受压开始产生微裂隙,出现塑性变形,曲线偏离线性。

4)破坏阶段:当压力到达峰值即煤体的最大承载力后,煤体爆裂,曲线呈垂线。

同时也可以看出处理温度在 200 ℃以下,全应力应变曲线形状与常温 30 ℃类似,而在 140、200 ℃下煤样相比常温 30 ℃峰值应力与应变变化较大。

计算单轴压缩试验的强度和弹性模量,结果见表 1。

由表 1 可知,在 30~200 ℃,试样的峰值应力、应变及弹性模量均在 140 ℃出现转折,是因为 140 ℃在煤自燃的干裂温度点附近,在此温度点煤分子中侧链开始断裂,乙烷、乙烯、一氧化碳等气体慢慢释放[14],受煤干裂的影响,在此温度点煤体的力学参数发生转折。30~140 ℃,随着温度的增加峰值应力及弹性模量都增加,这是由于在 140 ℃以下,结构热应力较小,随着温度的升高,主要是矿物颗粒受

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

热膨胀使煤体原生微孔裂隙逐渐闭合,使得 E_a 和抗压强度增大。由于在 30~80 ℃,微孔裂隙的变化缓慢,所以 E_a 和抗压强度增幅较小,在 80~140 ℃,由于 80 ℃在煤自燃临界温度点附近,在此温度点起煤氧复合加速,煤体内部物质变化加快,微孔裂隙迅速闭合,所以 E_a 和抗压强度增幅较大。140~200 ℃,随着温度的增加,煤体内部水分烘干,矿物颗粒之间变形与抑制变形的约束力加大,所产生的结构热应力也增大,大到超过热膨胀作用而产生了大量的新微孔裂隙或者扩展了旧微孔裂隙,造成煤体结构损伤[18],导致 E_a 的减小和煤体强度的降低。而在 200 ℃作用下的煤样的弹性模量最小,这是因为此温度处理后煤体内部微孔裂隙扩展发育,使其数量多于 30 ℃即常温下的原有微孔裂隙。

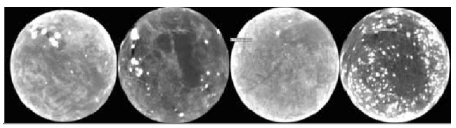
表 1　不同预氧化温度作用的煤体力学特性试验结果

Table 1　Experimental results of mechanical characteristics of coal under different pre-oxidation temperature

样品编号	温度/℃	峰值应力 σ/MPa		峰值应变 $\varepsilon/10^{-3}$		弹性模量 E_a/GPa	
		单值	均值	单值	均值	单值	均值
A01	30	43.462	43.049	19.361	19.521	2.678	2.664
A02		42.636		19.681		2.650	
B01	80	46.224	44.036	20.076	19.642	2.686	2.683
B02		41.848		19.208		2.680	
C01	140	58.84	55.662	24.818	23.373	2.777	2.753
C02		52.484		21.928		2.729	
D01	200	40.406	36.969	18.258	19.028	2.337	2.374
D02		33.532		19.798		2.411	

2.2　工业 CT 扫描结果

完成扫描后结合配套成图软件给出不同预氧化温度处理的试样的 CT 扫描俯视图,如图 6 所示,A_{01}、B_{01}、C_{01}、D_{01} 依次在 30、80、140、200 ℃预氧化处理。



A_{01}　B_{01}　C_{01}　D_{01}

图 6　不同预氧化温度作用的煤体 CT 扫描图

Fig.6　The CT scan of coal under different pre-oxidation temperatures

图片主要由灰色、白色、黑色部分组成,其分别代表有机质、岩石颗粒、孔裂隙[19]。可以看出,图 6 中 C_{01} 黑色部分相对最少,D_{01} 的黑色部分相对最多,即 140 ℃预氧化处理的煤样 C_{01} 微孔裂隙相对最少,200 ℃预氧化处理的煤样 D_{01} 微孔裂隙相对最多,这是由于 30~140 ℃主要受热膨胀作用,煤样原生微孔裂隙部分逐渐闭合,导致 C_{01} 的黑色部分稍少于 A_{01}、B_{01} 的黑色部分。140~200 ℃,主要受结构热应力的影响导致旧微孔裂隙的扩展或新微孔裂隙的产生,使得 200 ℃作用下的煤样 D_{01} 黑色间隔最多,即微孔裂隙最多。而这正好进一步佐证了弹性模量先升高后降低的原因分析。而 B_{01} 黑色部分似乎较多,可能是因为样品间本身存在的差异所致。

2.3　煤样的导热系数

为了研究导热系数与温度之间的相关性,对导热系数作拟合曲线。拟合公式见式(2),拟合参数和决定系数 R^2 见表 2。

$$C = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4 \quad (2)$$

式中:C 为导热系数;A_0 为截距;A_1、A_2、A_3、A_4 为拟合参数;T 为温度。

表 2　拟合参数和拟合度

Table 2　Fitting parameters and fit degree

温度/℃	A_0	$A_1/10^{-4}$	$A_2/10^{-6}$	$A_3/10^{-8}$	$A_4/10^{-11}$	R^2
30	0.112	−3.200 7	6.035 8	−3.093 0	5.180 0	0.993 2
80	0.108	0.530 6	0.853 6	−0.534 7	1.057 6	0.998 1
140	0.121	1.110 3	0.084 2	−0.234 2	0.676 1	0.989 6
200	0.117	0.798 3	−0.148 8	−0.053 6	0.087 1	0.989 6

由表 2 可以看出,煤样的导热系数与温度的拟合度高,由此说明式(2)适用于表示煤样的导热系数。

从图 7 可以明显看出,在 30~200 ℃,不同温度

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

的预氧化处理对煤样的导热系数随温度的变化趋势影响较小,即不同温度处理的煤样的导热系数均随温度的升高而升高,这是由于随着温度的升高,煤体内部分子热运动加剧,分子间的热交换也就越快,故而导热系数增大[12]。

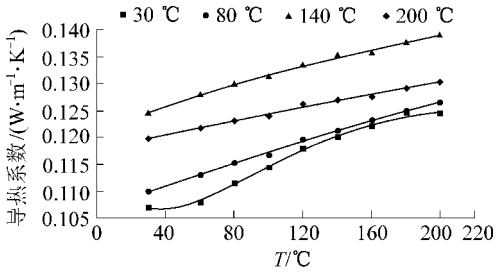


图 7　不同预氧化温度作用的煤体导热系数随温度的变化趋势

Fig.7　Variation trend of thermal conductivity of coal with temperature under different pre-oxidation temperatures

在同一温度下,预氧化处理煤样的导热系数随着预氧化温度的增加呈现出先增大后减小的趋势,即 30~140 ℃,煤样的导热系数增加,140~200 ℃煤样的导热系数减小。这是由于导热系数与煤体挥发分及内部孔裂隙有关,煤体挥发分含量越高,导热系数越小,煤体内部孔裂隙越大,矿物质接触热阻越大,导热系数越小。反之,煤体挥发分越低,导热系数越大,煤体内部孔裂隙越少,矿物质接触热阻越小,导热系数越大。而在 30~140 ℃,随着预氧化温度的升高,煤体挥发分轻微减少,且受热膨胀作用,煤体内部微孔裂隙部分闭合,故而导热系数增大。在 140~200 ℃,煤体挥发分也是轻微减少,但是此温度间由于受结构热应力作用,产生了相对较多的微孔裂隙,而此时微孔裂隙对导热系数的影响大于挥发分对导热系数的影响,故导热系数减少。因而导热系数随预氧化温度的升高先增大后减小的原因与弹性模量先增大后减小的原因接近。

3　煤体的弹性模量与导热系数的线性相关度

通过试验对比发现,30~200 ℃,不同温度处理的煤样的弹性模量和导热系数的变化趋势相同,为了精确了解煤样弹性模量与导热系数间的相关程度,引入 Pearson 相关系数公式[20],定量计算不同预氧化程度煤样导热系数和弹性模量之间的相关系数。计算公式见式(3),其中 $R_{xy}>0$ 表示 2 个数集呈正相关,$R_{xy}<0$ 则表示 2 个数集呈负相关,取值范围为[-1.0,1.0],其表征了 2 个数集之间的线性相关度,$|R_{xy}|$越接近 1,相关度越强,$|R_{xy}|$越接近 0,相关度越弱。

$$R_{xy}=\frac{n\sum x_i y_i-\sum x_i\sum y_i}{\sqrt{\left[n\sum x_i{}^2-\left(\sum x_i\right)^2\right]\left[n\sum y_i{}^2-\left(\sum y_i\right)^2\right]}} \tag{3}$$

式中:R_{xy}为样本 x 和样本 y 的相关系数;x_i为 x 中第 i 个观测值;y_i为 y 中第 i 个观测值,$i=1$、2、…、n,n 为样本量。

将不同预氧化温度处理后煤样的导热系数和弹性模量代入公式后分别求得其相关系数,见表 3。

表 3　不同预氧化温度处理后煤样的导热系数和弹性模量的相关系数

Table 3　Correlative coefficient of thermal conductivity and elastic modulus of coal specimens treated at different pre-oxidation temperatures

温度/ ℃	弹性模量/GPa	不同温度下导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)							
		30 ℃	60 ℃	80 ℃	100 ℃	140 ℃	160 ℃	180 ℃	200 ℃
30	2.664	0.107	0.108	0.111	0.114	0.12	0.122	0.124	0.125
80	2.683	0.110	0.113	0.115	0.117	0.121	0.123	0.125	0.127
140	2.753	0.125	0.128	0.130	0.131	0.135	0.136	0.138	0.139
200	2.374	0.120	0.122	0.123	0.124	0.127	0.128	0.129	0.130
相关系数 R_{xy}	—	0.992	0.998	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996	0.996

由表 3 可知,$R_{xy}\geqslant 0.992$,故而预氧化处理温度在 30~200 ℃,煤样的弹性模量与导热系数正相关,且为高度相关。其内在原因是随着预氧化处理温度的增加,在 30~140 ℃,煤体结构热应力较小,主要受热膨胀作用使煤体内微孔裂隙逐渐闭合;在 140~200 ℃,随着温度的增加,煤体的结构热应力逐渐增加,超过了煤体热膨胀作用导致煤体内部产生新的微孔裂隙或者又扩展了旧的微孔裂隙,而弹性模量与导热系数都受煤体内部微孔裂隙的影响,所以导致煤样弹性模量和导热系数的高度相关。而在 140

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

℃作用下的煤样的弹性模量、抗压强度和导热系数都是最大,这是因为 140 ℃在煤样的干裂温度点附近,受煤干裂的影响其弹性模量、抗压强度和导热系数在此发生转折,从预处理温度为 30~140 ℃下的升高转为 140~200 ℃下的降低。

4 结　论

1)经 140 ℃预氧化处理的煤样的弹性模量、抗压强度相对最大,这是由于 30~140 ℃,不同预氧化温度处理的煤样原微孔裂隙主要受到热膨胀作用而随温度的升高逐渐闭合所致。经 200 ℃预氧化处理的煤样,主要受结构热应力作用,其内部旧微孔裂隙扩展或新微孔裂隙产生而导致在此温度作用下煤样微孔裂隙相对最多,致使弹性模量、峰值应力相对最小。

2)经 140 ℃预氧化处理的煤样的导热系数相对最大,这是由于 140 ℃预氧化作用下煤体的内部孔隙相对较少,而导热系数也与煤体内部孔隙有关,内部孔裂隙越少,矿物质接触热阻越小,从而导热系数越大。

3)在 30~200 ℃,不同温度预氧化处理的煤样的弹性模量与导热系数的 Pearson 相关系数 $R \geqslant 0.992$,属于高度正相关,都随着预氧化温度的升高呈现出先增大后减小的趋势。

参考文献(References):

[1] REIN P.Coal and peat fires:a global perspective[J].Coal & Peat Fires A Global Perspective,2014,115(5):537-540.

[2] STRACHER G B.Coal fires burning around the world:a global catastrophe[J].International Journal of Coal Geology,2004,59(1/2):1-6.

[3] SONG Zeyang,KUENZER Claudia.Coal fires in China over the last decade:a comprehensive review[J].International Journal of Coal Geology,2014,133:72-99.

[4] 曹代勇,时孝磊,樊新杰,等.煤田火区环境效应分析[J].中国矿业,2007,16(7):40-42.
CAO Daiyong,SHI Xiaolei,FAN Xinjie,*et al*.Environmental effect analysis of coalfield fire[J].China Mining Magazine,2007,16(7):40-42.

[5] 武建军,刘晓晨,蒋卫国,等.新疆地下煤火风险分布格局探析[J].煤炭学报,2010,35(7):1147-1154.
WU Jianjun,LIU Xiaochen,JIANG Weiguo,*et al*.Spatial analysis of risk for underground coal fire in Xinjiang,China[J].Journal of China Coal Society,2010,35(7):1147-1154.

[6] 鲁军辉.煤田火区煤岩体热物性参数及热破坏特性研究[D].西安:西安科技大学,2016.

[7] 肖　旸,周一峰,马　砺,等.煤田火区煤体裂隙演化过程中温-压耦合模型研究[J].煤矿安全,2017,48(3):32-35.
XIAO Yang,ZHOU Yifeng,MA Li,*et al*.Research on temperature-pressure coupling model during crack evolution of coal in coalfield fire area.[J].Safety in Coal Mines,2017,48(3):32-35.

[8] 肖　旸.煤田火区煤岩体裂隙渗流的热—流—固多场耦合力学特性研究[D].西安:西安科技大学,2013.

[9] 马占国,茅献彪,李玉寿,等.温度对煤力学特性影响的试验研究[J].矿山压力与顶板管理,2005,22(3):46-48.
MA Zhanguo,MAO Xianbiao,LI Yushou,*et al*.Experimental study on influence of temperature on mechanical properties of coal[J].Ground Pressure and Strata Control,2005,22(3):46-48.

[10] 查文华,宋新龙.温度变化对煤系砂质泥岩三轴压缩力学特性的影响[J].安全与环境学报,2014,14(6):47-51.
ZHA Wenhua,SONG Xinlong.Effect of temperature changes on the mechanical properties of coal-serial sandy mudstone under triaxial compression[J].Journal of Safety and Environment,2014,14(6):47-51.

[11] 彭担任,赵全富,胡兰文,等.煤与岩石的导热系数研究[J].矿业安全与环保,2000,27(6):16-18.
PENG Danren,ZHAO Quanfu,HU Lanwen,*et al*.Study on thermal conductivity of coal and rock.[J].Mining Safety and Environmental Protection,2000,27(6):16-18.

[12] WEN H,LU J H,XIAO Y,*et al*.Temperature dependence of thermal conductivity,diffusion and specific heat capacity for coal and rocks from coalfield[J].Thermochimica Acta,2015,619:41-47.

[13] 邓　军,李　贝,王　凯,等.我国煤火灾害防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2016,44(10):1-7.
DENG Jun,LI Bei,WANG Kai,*et al*.Research status and prospect of coal fire disaster prevention technology in China[J].Coal Science and Technology,2016,44(10):1-7.

[14] 徐精彩.煤自燃危险区域判定理论[M].北京:煤炭工业出版社,2001:126-130.

[15] 张辛亥,李青蔚.预氧化煤自燃特性试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(11):37-40.
ZHANG Xinhai,LI Qinwei.Experiment study on spontaneous combustion characteristics of pre-oxidized coal[J].Coal Science and Technology,2014,42(11):37-40.

[16] 许锡昌,刘泉声.高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J].岩土工程学报,2000,22(3):332-335.
XU Xichang,LIU Quansheng.A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature[J].Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(3):332-335.

[17] 马　砺,魏高明,李珍宝,等.煤导热系数影响因素的试验研究[J].矿业安全与环保,2017,44(2):31-34.
MA Li,WEI Gaoming,LI Zhenbao,*et al*.Experimental study on influence factors of coal thermal conductivity[J].Mining Safety and Environmental Protection,2017,44(2):31-34.

(下转第 187 页)

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

Industry,2008,28(9):32-36.

[12] 白雪峰,张海桥.海拉尔盆地巴彦呼舒凹陷烃源岩评价及油源对比[J].世界地质,2011,30(2):231-236.
BAI Xuefeng, ZHANG Haiqiao. Evaluation on source rocks and the oil-source correlation in Bayanhushu Sag of Hailaer Basin [J]. Global Geology, 2011, 30(2): 231-236.

[13] 韩 莹.海拉尔盆地贝尔凹陷层序地层学研究[D].大庆:东北石油大学,2011:16-67.

[14] 赵小青,程日辉,于振峰,等.海拉尔盆地乌尔逊凹陷南一段物源:沉积体系与构造背景[J].吉林大学学报:地球科学版,2015,45(1):61-78.
ZHAO Xiaoqing, CHENG Rihui, YU Zhengfeng, *et al*. Provenance-sedimentary system and tectonic setting of first member of Nantun Formation in Wuerxun Depression of Hailar Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(1): 61-78.

[15] 姜洪福,张世广.复杂断块油田高分辨率层序地层学及砂体几何学特征-以海塔盆地贝尔凹陷呼和诺仁油田贝 301 区块南屯组二段为例[J].吉林大学学报:地球科学版,2014,44(5):1419-1431.
JIANG Hongfu, ZHANG Shiguang. High-resolution sequence stratigraphy and sandbody geometry characteristics of complicated fault oilfield: take the second segment of Nantun Group in Bei 301 Region of Huhenuoren Oilfield of Beier Depression in Haita Basin for example[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(5): 1419-1431.

[16] 平贵东,吕延防,范立民,等.海拉尔盆地乌尔逊-贝尔凹陷油气富集规律及主控因素分析[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(10):4167-4178.
PING Guidong, LYU Yanfang, FAN Linmin, *et al*. Rules and main controlling factors of hydrocarbon enrichment of Urxun—Beier Depression, Hailar Basin[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(10): 4167-4178.

[17] 郭 彪,邵龙义,马施民,等.扎赉诺尔凹陷下白垩统含煤岩系层序-古地理与聚煤规律研究[J].中国煤炭地质,2015,27(3):6-11
GUO Biao, SHAO Longyi, MA Shimin, *et al*. Lower Cretaceous coal-bearing strata sequence-Paleogeography and coal accumulation pattern in Zhalainuoer Depression [J]. Coal Geology of China, 2015, 27(3): 6-11

[18] 郭 彪,邵龙义,张 强,等.内蒙古海拉尔盆地早白垩世含煤岩系层序地层与聚煤规律[J].古地理学报,2014,16(5):631-640.
GUO Biao, SHAO Longyi, ZHANG Qiang, *et al*. Sequence stratigraphy and coal accumulation pattern of the early Cretaceous coal measures in Hailaer Basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 631-640.

[19] 朱筱敏.层序地层学[M].东营:石油大学出版社,2003.

[20] 郭 彪.海拉尔盆地早白垩世层序地层格架内聚煤模式研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.

[21] 中国地质科学院.中国地层概论[M].北京:地质出版社,1982.

[22] VAIL P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy (Part 1): seismic stratigraphy interpretation procedure[J]. American Association Petroleum Geology Studies in Geology, 1987, 27: 1-10.

[23] HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 4793(235): 1156-1167.

[24] 王 帅,邵龙义,闫志明,等.二连盆地吉尔嘎朗图凹陷下白垩统赛汉塔拉组层序地层及聚煤特征[J].古地理学报,2015,17(3):393-403.
WANG Shuai, SHAO Longyi, YAN Zhiming, *et al*. Sequence stratigraphy and coal accumulation of the Lower Cretaceous Saihantala Formation in Jiergalangtu Sag of Erlian Basin[J]. Journal of Pelaeogeography, 2015, 17(3): 393-403.

[25] 邵龙义,鲁 静,汪 浩,等.中国含煤岩系层序地层学研究进展[J].沉积学报,2009 27(5):904-912.
SHAO Longyi, LU Jing, WANG Hao, *et al*. Developments of coal measures sequence stratigraphy China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009 27(5): 904-912.

[26] 沈 凤,张金亮.乌尔逊凹陷大磨拐河组沉积体的地震地层学解释[J].石油与天然气地质,1991,12(1):71-78,101-102.
SHEN Feng, ZHANG Jinliang. Seismic stratigraphic interpretation of major sedimentary bodies in Damoguaihe Formation Wuerxun Depression[J]. Oil & Gas Geology, 1991, 12(1): 71-78, 101-102.

[27] 张鹏飞,彭苏萍,邵龙义.含煤岩系沉积环境分析[M].北京:煤炭工业出版社,1993:1-284.

[28] 邵龙义,鲁 静,魏克敏,等.四川攀枝花宝鼎盆地煤沉积环境与资源预测[M].北京:地质出版社,2011.

[29] 姜在兴.沉积学[M].北京:石油工业出版社,2010:1-401.

[30] 李思田.断陷盆地分析与煤聚集规律[M].北京:地质出版社,1988:1-367.

(上接第 140 页)

[18] 陈有亮,邵 伟,周有成.高温作用后花岗岩力学性能试验研究[J].力学季刊,2011,32(3):397-402.
CHEN Youliang, SHAO Wei, ZHOU Youcheng. Experimental Study on mechanical properties of granite after high temperature[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(3): 397-402.

[19] 于艳梅,胡耀青,梁卫国,等.瘦煤热破裂规律显微 CT 试验[J].煤炭学报,2010,35(10):1696-1700.
YU Yanmei, HU Yaoqing, LIANG Weiguo, *et al*. Micro-CT experimental research of lean coal thermal cracking laws[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1696-1700.

[20] 王 凯.陕北侏罗纪煤低温氧化反应性及动力学研究[D].西安:西安科技大学,2015.