

高温对煤的动态拉伸力学性能的影响

袁琪, 韩文梅, 郑翔, 赵鹏

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 深部煤矿的开采往往受到高温地热及爆破冲击等不利影响, 为保证安全生产和提高开采效率, 研究温度对煤的动态力学性能的影响至关重要。本研究利用分离式霍普金森杆(SHPB)系统对煤样进行巴西劈裂试验, 并结合X射线衍射技术(XRD)和颗粒流程序(PFC)仿真, 研究了不同温度、不同加载速率下煤的力学性能和破坏演化过程, 同时对其微晶结构及断裂模式进行了分析。试验结果显示: 高温使得煤发生劣化, 煤样的抗拉强度和与耗散能随温度的升高而减小。抗拉强度、入射能与耗散能随冲击速度的增大而增大, 且热处理后煤样的速率依赖性减弱。加热使得煤的层间距减小, 堆叠高度增大, 有向高阶煤发展的特征。热处理增强了煤的晶体结构有序性, 但是微晶尺寸小, 水分蒸发和热膨胀不均匀产生的微孔和裂纹对强度的削弱作用更大。PFC模拟煤样动态拉伸过程中, 沿着加载方向的主裂纹为拉伸劈裂, 两端的楔形区域破碎的类别主要为压剪破坏, 拉伸裂纹数量远多于剪切裂纹数量。

关键词: 高温劣化; 煤热解; 动态拉伸; 能量耗散; 分离式霍普金森杆

中图分类号: TD313 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.04.0021

引用格式: 袁琪, 韩文梅, 郑翔, 等. 高温对煤的动态拉伸力学性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 197-207.

YUAN Qi, HAN Wenmei, ZHENG Xiang, et al. Effect of high temperature on dynamic tensile mechanical properties of coal[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(2): 197-207.

Effect of High Temperature on Dynamic Tensile Mechanical Properties of Coal

YUAN Qi, HAN Wenmei, ZHENG Xiang, ZHAO Peng

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The mining of deep coal mines is often adversely affected by high temperature geothermal and blasting shocks. In order to ensure safe production and improve mining efficiency, it is very important to study the influence of temperature on the dynamic mechanical properties of coal. In this study, split Hopkinson bar (SHPB) system was used to carry out Brazilian splitting test of coal samples, and combined with X-ray diffraction (XRD) and particle flow program (PFC) simulation, the mechanical properties and failure evolution process of coal at different temperatures and loading rates were studied, and its microcrystal structure and fracture mode were analyzed. The test results show that the high temperature leads to the deterioration of coal, and the tensile strength and dissipative energy of coal samples decrease with the increase of temperature. The tensile strength, incident energy and dissipated energy increase with the

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 煤与煤层气共采国家重点实验室基金(2022KF10)

作者简介: 袁琪(2000—), 女, 硕士生, 主要从事岩石力学方面的研究。

通信作者: 韩文梅(1975—), 女, 副教授, 博士, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: taiyuanhanwenmei@126.com。

increase of impact velocity, and the rate dependence of coal samples decreases after heat treatment. Heating reduces the interlayer spacing of coal and increases the stacking height, which is characterized by the development of high-order coal. Heat treatment enhances the order of the crystal structure of coal, but the microcrystal size is small. Micropores and cracks caused by uneven water evaporation and thermal expansion play a greater role in weakening the strength. When PFC simulates the dynamic tensile process of coal samples, the main crack along the loading direction is tensile splitting, the type of fracture in the wedge-shaped region at both ends is mainly compression-shear failure, and the number of tensile cracks is much more than that of shear cracks.

Key words: high temperature degradation; coal pyrolysis; dynamic tension; energy dissipation; split Hopkinson bar

0 引言

煤炭在全球能源结构中占据重要地位,并且需求也在持续增长。随着开采深度的不断增加,煤炭处在了“三高一扰动”的复杂力学环境中,高地温诱发煤岩的力学性质发生变化^[1],受到扰动后,储存在岩体内的弹性能量猛烈地释放出来,导致冲击矿压、顶板脱落、底板突出等动力学灾害频发,研究煤在不同温度下的力学行为将有助于煤矿工程的设计和和实施,确保矿井的稳定。另一方面,学者们发现高温有利于提高煤层气的产出效率^[2],使注热开采、热压裂技术成为了研究热点,因此,对热作用后的煤进行力学研究将有助于优化注采工艺,提高资源利用率。

学者们研究了煤在高温下的力学性质和物理性能,如热变形、强度、孔隙度和渗透率等^[3-5]。Yu等^[6]发现加热后的煤在扫描电子显微镜图像下表现出结构从致密到松散,煤基质从均匀到断裂的损伤变化。赵雷等^[7]发现常温到200℃下煤的热解渗透率随温度的升高而急剧下降,认为这是由于在该温度下煤体本身几乎不热解,引起的是其本身物理力学性质的变化。近年来,大多数关于温度效应的研究集中在对煤强度影响方面。苏承东等^[8]通过单轴压缩试验结果分析发现:25~100℃时煤样内部水分蒸发和气体脱附导致内部孔隙和裂纹增加,抗压强度显著下降;100~400℃时煤样内部孔隙和裂纹增长速度放缓,因此强度下降幅度减小;煤样的弹性模量随着加热温度的升高而降低,泊松比则先降低后升高。杨永良等^[9]指出单轴压缩下,25~100℃处理的煤样发生柱状劈裂破坏,100~200℃处理的煤样发生剪切破坏,200~300℃处理的煤样经历柱状劈裂破

坏和剪切破坏,并且在这3个温度阶段,裂纹数量、孔隙率与单轴抗压强度先增加后减少最后又增加。李鹏龙等^[10]对煤的破坏特性、分形特征和渗透率进行研究,建立了热-力耦合煤岩的本构模型,发现温度升高会导致煤岩的动态抗压强度和弹性模量下降,失效应变增大,吸收能则呈现W型波动。杨振华等^[11]进一步指出,加载率增加,压缩强度增大,煤样破碎物的等效粒径会减小,裂隙所占比例会增加,而且在高加载率下中大孔的比例减少。吴秋红等^[12]对砂岩的动态拉伸强度与加载率建立了指数函数关系,并将热作用后砂岩的拉伸破坏模式分为两种,其主要区别在于热损伤裂纹是否与主裂纹和次生裂纹贯通。上述研究的动态力学试验表明岩石具有明显的加载率效应。杨仁树等^[13]对3种岩石进行研究,指出岩石波阻抗越大,反射波越少,透射波越多,岩石受力水平更高,加载率更大,受加载率效应影响,岩石拉伸强度增大的幅度更大。赵毅鑫等^[14]指出煤样损伤变量随冲击速度的增加而增加,总耗散能密度随着冲击速度的增大而增大。Liu等^[15]经过对煤样在多种高温高压条件下的微观变形特性进行研究,发现煤样的韧性变形与应变速率有关,随着应变速率的降低,煤样的韧性变形特征越来越明显。

煤是由矿物、孔隙和煤基质组成的不均匀可燃物,其成分、强度、孔隙形状有很大差异,通过SHPB测试系统很难直接得到煤样内部裂纹扩展和能量演化的全过程^[16],相比有限元法,离散元法有其独特的优势^[17],能够模拟煤的离散结构,且不受网格变形的限制,允许考虑颗粒间的断裂、碰撞和摩擦等物理过程,更贴近岩石破裂的实际情况^[18]。学者们通过离散元模拟对岩石的力学性质、裂纹的萌生和扩展进行了研究。王晓卿

等^[19]对煤单轴压缩力学行为进行模拟,指出结构面对煤的抗压强度与弹性模量起到弱化作用,并且决定煤的破坏形态。在PFC中模拟SHPB试验方面常使用连续-离散耦合方法,如Li等^[20]用此方法建立了SHPB耦合系统模型,研究了颗粒尺寸对动态载荷下的应变速率、拉伸强度和微裂纹等力学行为的影响,并与试验达到了较好的拟合效果。Tang等^[21]通过试验结果对模型参数进行校准,结果表明,冲击速率增加,耗散能率降低,耗散能总量增加,且碎片动能占比逐渐升高。徐浩淳等^[22]通过调整PFC模型的部分细观参数来模拟不同温度处理后的砂岩,以获得较好的拟合效果,指出高温处理会影响砂岩的细观结构,进而影响其宏观力学行为。

通过大量现实工程案例^[23]发现冲击地压已成为我国最为严重的煤矿动力灾害,然而工程中岩体的破裂通常源于局部的拉伸破坏,因此动态拉伸强度是工程中衡量岩石强度的重要指标^[24],对冲击地压致灾机理及防治措施的研究具有重要意义。煤岩体温度随深度基本呈线性递增趋势,深部矿井煤岩体温度一般高于40℃^[25],某些异常高热的储层温度接近100℃^[26]。煤层气原位注热开采注热温度达145℃^[27],注入过热水蒸气温度更高,可达200℃以上^[28],温度过高可能引发煤体自燃、失稳等不利现象^[29]。出于实际工程需要,研究常温到200℃的煤岩动态拉伸力学性能变化是非常有必要的。

尽管学者们已广泛使用SHPB试验装置对不同条件下的各种岩石的力学性质进行了深入研究并取得了显著成果,但针对高温处理后的煤拉伸力学特性和能量耗散规律的研究稍显不足。此外,目前探讨煤受热后微晶结构变化对其力学性质影响的研究也较少。本文将通过SHPB测试系统对热作用后的煤样进行动态拉伸试验,结合XRD试验阐述温度对煤的劣化损伤机制,并通过PFC模拟了煤的破坏过程,包括裂纹扩展和煤的整体变形特性,研究结果可为深部煤岩的开采工程提供指导。

1 试验方案与程序

1.1 试样制备及预处理

无烟煤试样选自中国沁水盆地南部山西组3号煤层,按照国际岩石力学学会推荐的方法,将其制成直径50 mm、高25 mm的巴西圆盘试件,共21个。

每个样品的两端都被研磨得平整光滑,呈哑光黑色,大小均匀,无明显缺陷。加热装置采用电热真空干燥箱,型号为DZF-6020A,额定功率0.3 kW,部分巴西圆盘煤样与干燥箱见图1。



图1 部分煤样与真空干燥箱图

Fig. 1 Some coal samples and vacuum drying box diagram

将煤样分为自然状态、100℃和200℃处理的三组,每组7个。试样编号规则如下:字母代表处理状态,N为自然状态未经热处理,A和B分别为100℃和200℃处理,数字即为试样编号,按冲击速度从小到大排列。将试样在设定温度下加热5 h后自然冷却,确保试样充分受热,内外温度一致。

1.2 SHPB试验设备

SHPB设备由驱动系统、压杆测试系统和信号采集系统三部分组成,如图2所示。子弹、入射杆、透射杆和吸收杆均为铝杆,直径0.05 m。杆件弹性模量为68 GPa,密度2 700 kg·m⁻³,纵波波速5 050 m·s⁻¹;子弹长度为0.4 m,入射杆、透射杆长度均为2.5 m,应变片安装在沿入射杆和透射杆轴向中点以收集应力波信号。在煤试样两端涂抹凡士林以降低端部摩擦效应。本次试验气压设置为0.1 MPa,调整子弹冲击速度分布在3.5~6.5 m·s⁻¹之间。在子弹与入射杆之间加入直径为10 mm、厚0.9 mm的橡胶片进行整形,用以降低矩形波在压杆中传播时的弥散效应。整形后经过动态平衡校核,波形如图3所示,波形基本吻合,加载过程达到应力平衡状态,满足应力均匀性假设,于是加载过程相当于准静态压缩^[30],动态拉伸强度可通过准静态方程(见式(1)~(3))得出。

$$P_1 = EA(\epsilon_i + \epsilon_r), \quad (1)$$

$$P_2 = EA\epsilon_t, \quad (2)$$

$$\sigma_i = -\frac{P_1 + P_2}{\pi DB}, \quad (3)$$

式中: P_1 、 P_2 为试样两端的加载力; E 和 A 分别为压杆的弹性模量和横截面积; ϵ_i 、 ϵ_r 和 ϵ_t 分别为杆中的入射、反射和透射应变; σ_i 的最大值为试样的动态拉伸强度; D 和 B 分别为试样的直径和厚度。

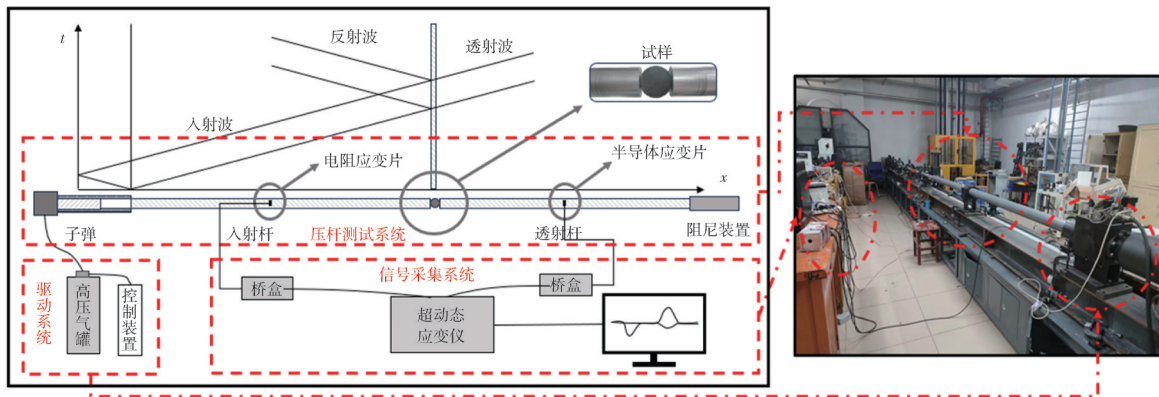


图2 SHPB系统及原理图

Fig. 2 SHPB system and schematic diagram

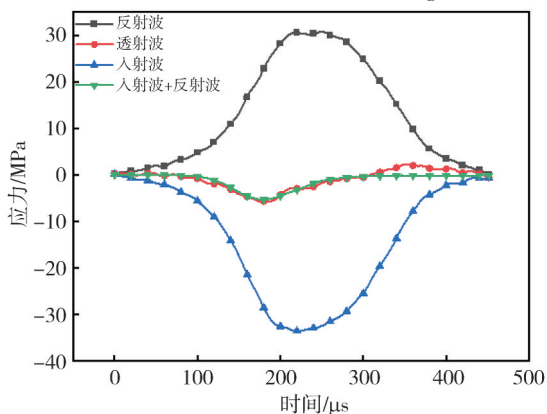


图3 典型动态拉伸试验的应力平衡校核

Fig. 3 Stress balance check for a typical dynamic tensile test

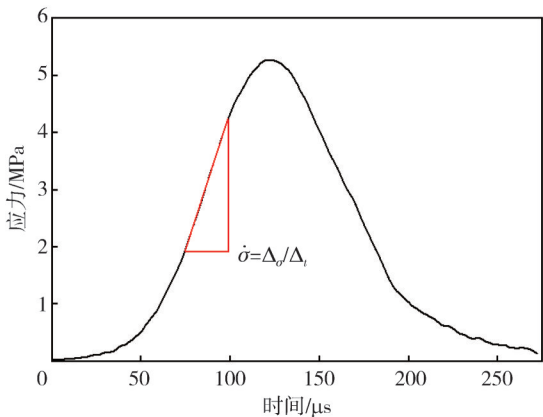


图4 典型动态拉伸试验加载率的确定

Fig. 4 Determination of loading rate of typical dynamic tensile test

加载率 $\dot{\sigma}$ 是岩石动态抗拉强度的一个重要参数,单位为 $\text{GPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图4可以看出,在达到峰值应力前有一段近似直线的增长区域,该区域的斜率即为加载率,本试验中所有试样的加载率均由此确定。

1.3 X射线衍射实验

实验仪器使用中科院煤炭化学所D8 Advance X-射线粉末衍射仪,采用Cu靶, Ka辐射,入射波长

为 0.15406 nm 。将3种不同工况的煤样碎片取 $2\sim 3\text{ g}$ 研磨至 $200\sim 300$ 目(约 $74\sim 49\ \mu\text{m}$)用于XRD实验,以了解热处理后煤样整体的分子结构变化。

2 试验结果及分析

2.1 煤的动态力学性能

对试样进行不同冲击速度加载下的动态拉伸试验,动态拉伸强度、加载率与冲击速度之间的关系分别如图5和图6所示,线性拟合关系见表1。

表1 拟合函数关系

Tab. 1 Fitting function relation

工况	抗拉强度 σ -冲击速度 v	加载率 $\dot{\sigma}$ -冲击速度 v
常温	$\sigma = -4.433 + 2.418v$	$\dot{\sigma} = -69.044 + 36.424v$
100 °C	$\sigma = -1.729 + 1.476v$	$\dot{\sigma} = -117.490 + 43.888v$
200 °C	$\sigma = -3.577 + 1.483v$	$\dot{\sigma} = -109.438 + 33.762v$

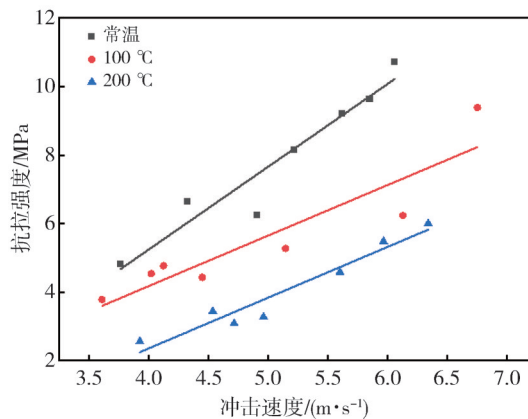


图5 抗拉强度-冲击速度关系

Fig. 5 Tensile strength-impact velocity diagram

由图5和表1可知,动态抗拉强度随温度的增加整体呈现下降趋势,原煤抗拉强度平均值最大,100 °C次之,200 °C最小,分别为 $7.916, 5.488$ 和 4.060 MPa ,分别下降了 30.7% 和 48.7% ,说明高温对煤具有劣化作用。抗拉强度随冲击速度的增加

而线性增加,但是增长幅度略有不同。抗拉强度与冲击速度的拟合直线斜率 k 可以表征冲击速度对抗拉强度的影响程度,斜率越大,加载率效应越明显。各组斜率的大小分别为 $k_N=2.418$, $k_A=1.476$, $k_B=1.483$, 加热后的斜率下降近 38.9%, 然而 100 °C 与 200 °C 的斜率差距不大。

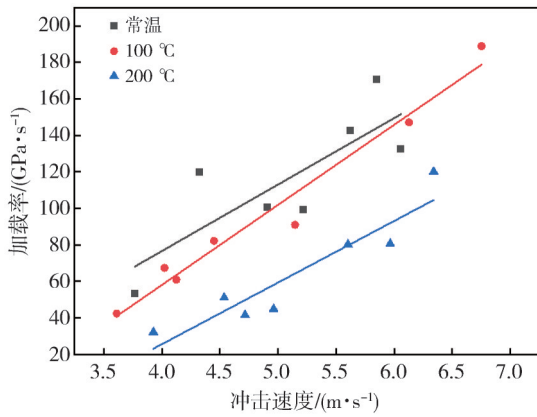


图 6 加载率-冲击速度关系

Fig. 6 Loading rate-impact velocity diagram

由上述结果可知,抗拉强度受到温度和冲击速度的双重影响。冲击速度一定时,抗拉强度随温度的增加而减小,一方面因为矿物质热解和孔隙度增加,使得煤的强度下降,有学者就指出矿物能增强煤试样的宏观力学性能,而孔隙能削弱煤样的力学性能^[31];另一方面因为煤颗粒受热发生膨胀,各组分热膨胀系数不同,造成煤样内部孔隙及裂纹扩展的无序性,颗粒之间因此产生新的应力,进一步削弱了煤样抵抗冲击的能力,煤样更容易发生破坏。因此,对处于高温的煤矿需及时做好降温工作,并加强支护,合理布置采场,减少拉伸破坏的发生。

在温度一定时,抗拉强度随冲击速度的增加而增加,这种现象主要是因动态冲击载荷下岩石试样的变形滞后所致。随着冲击速度的提高,试样内粒子由于惯性产生的停滞现象更明显,惯性效应更为显著,内部微小裂纹未及时开裂,导致试件的变形滞后,要使得试样裂开就需要更大的能量,因此,对于试样的动态抗拉强度起一定的增强作用^[32-34]。与原煤相比,热作用后的煤样的抗拉强度与冲击速度的斜率显著降低。说明高温下煤样的动态抗拉强度的加载率效应更弱,温度使得煤质量减少,惯性效应减弱,导致对抗拉强度的增强效应不明显,使得在相同的冲击速度变化量下,高温煤样的强度增量减少,即热作用后

煤样的速率依赖性减弱。

由图 6 可以看出,煤的加载率随冲击速度的增加而线性增加,拟合直线函数见表 1。常温、100 °C、200 °C 下加载率平均值的大小分别为 116.966, 97.146, 64.423 GPa·s⁻¹。结合图 3 的应力-时程曲线可以看出,加载率的大小大致受峰值应力和到峰值应力需要的时间这两个因素影响,冲击速度越大,使得煤强度越高,并且应力波传播速度越快,到达峰值应力的时间越短,加载率自然就大。

对冲击速度为 4.4 m·s⁻¹ 和 5.0 m·s⁻¹ 左右的煤样的数据进行研究,得到对应的应力-时程曲线如图 7 所示,两种冲击速度下煤的力学参数见表 2。在相同的冲击速度下,100 °C 和 200 °C 热作用后煤的动态抗拉强度与原煤相比依次降低 33.3% 和 48.2%, 15.6% 和 47.6%, 加载率分别降低 30.4% 和 57.4%, 9.6% 和 55.4%, 到达峰值应力的时间分别增加 8.7% 和 20.2%, 5.8% 和 32.4%。

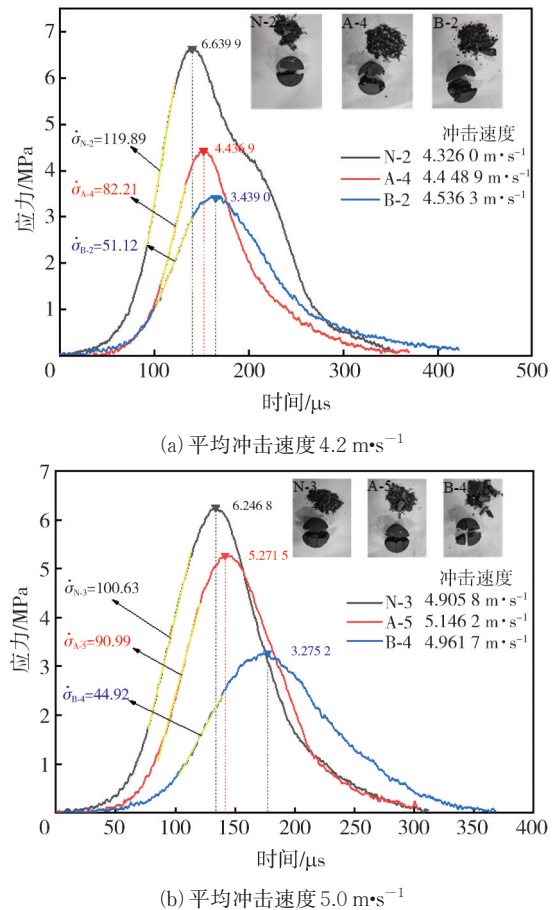


图 7 不同冲击速度下煤的应力波曲线

Fig. 7 Stress wave signals under different impact velocities

经过热作用的煤孔隙度增大,无序裂纹增加,这使得在相同冲击速度下应力波到达峰值应力的时间更长,因为超声波波速在空气中的波速

表2 两种冲击速度下煤的力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of coal at two kinds of impact velocity

编号	冲击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均冲击 速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	到达峰值 应力时间/ μs	峰值应力/ MPa	加载率/ ($\text{GPa}\cdot\text{s}^{-1}$)
N-2	4.326 0		140.4	6.639 9	119.89
A-4	4.448 9	4.437 1	152.6	4.430 9	82.21
B-2	4.536 3		168.8	3.439 0	51.12
N-3	4.905 8		133.8	6.246 8	100.63
A-5	5.146 2	5.004 5	141.6	5.271 5	90.99
B-4	4.961 7		177.2	3.275 2	44.92

远低于固体介质中的波速,最终导致加载率的减少。观察图中煤样的破碎程度还可以发现,处理温度越高,劈裂产生的两半煤样越不能保持良好的形态,有更多受热产生的无序裂纹使分离的两部分继续发生破裂,煤抵抗变形的能力越弱,破碎粒径减少,小碎块数目增加。

2.2 能量耗散特征分析

假设试样和杆件之间界面处的能量损失可以忽略不计,设入射波、反射波和透射波所携带的能量分别为 W_i , W_r 和 W_t , 试样总耗散能为 W_d , c 为弹性波波速。为了分析动载下煤样的能量耗散规律,定义耗散能与入射能之比为能量耗散率 γ 。计算公式为

$$W_i = A E c \int_0^t \epsilon_i^2 dt, \quad (4)$$

$$W_r = A E c \int_0^t \epsilon_r^2 dt, \quad (5)$$

$$W_t = A E c \int_0^t \epsilon_t^2 dt, \quad (6)$$

$$W_d = W_i - W_r - W_t, \quad (7)$$

$$\gamma = W_d / W_i. \quad (8)$$

图8为耗散能与动态抗拉强度的关系图,耗散能随抗拉强度线性增大,线性拟合相关系数从低温到高温分别为0.97, 0.97, 0.92, 均大于0.9,表明存在良好的相关性。耗散能包括多种形式的能量,如煤破碎所需的能量、碎片飞出时的动能、声能及摩擦引起的内能等,后几项占耗散能的比例相对较小,可以在分析中忽略不计。可得结论:煤强度的增加会导致破碎所需的能量即耗散能增加,而加热处理则会使煤的强度减弱,进而减少耗散能。由图9可以看出,随着冲击速度的增大,入射能线性增大,入射能与试样本身无关,只与冲击速度有关。

由图10可以看出,在温度不变的情况下,耗

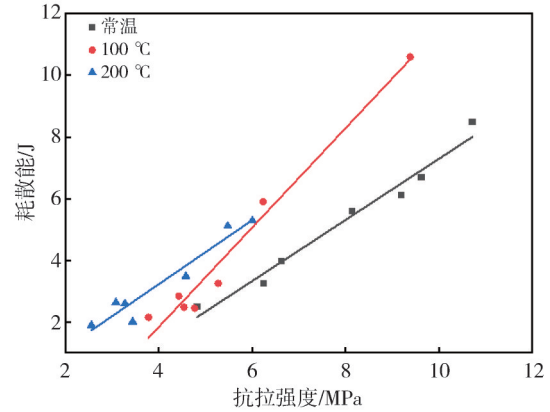


图8 耗散能-抗拉强度关系

Fig. 8 Dissipated energy-tensile strength diagram

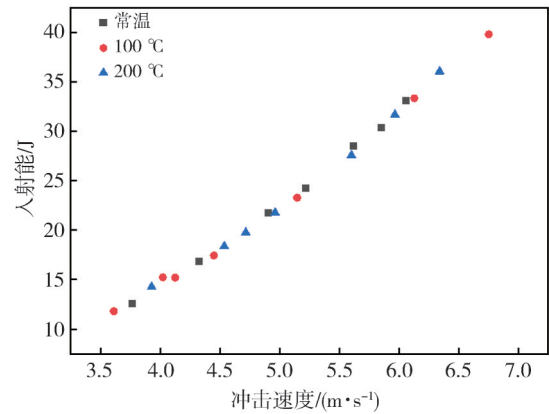


图9 入射能-冲击速度关系

Fig. 9 Incident energy - impact velocity diagram

散能与冲击速度呈幂函数增大。耗散能主要用于裂纹萌生和扩展,然而形成新裂纹所需的能量明显高于裂纹扩展所需的能量^[35],冲击速度较低时,煤的微裂纹扩展和贯通,将其劈裂成主要的两块,裂纹和碎块数目比较少,耗散能较低。冲击速度高时,在原本微裂纹扩展程度上能获得更多的能量,这些能量导致更多微裂纹的扩展和产生,于是需要更多的耗散能,从而加剧了煤的破坏程度。

图11为各工况下煤的能量耗散率与冲击速度关系图,可以看出煤的 γ 值离散性较大,但是 γ 值的大小整体呈现随温度增加而降低的趋势,各工况的 γ 均值为 $\gamma_N=0.215$, $\gamma_A=0.180$, $\gamma_B=0.133$, γ_A 和 γ_B 比 γ_N 依次降低了0.035和0.082。出现此现象的原因是不同工况煤的不同属性,如孔隙度和胶结度等,影响了其波阻抗的大小^[14]。波阻抗的增大意味着与杆件的匹配效果更好,反射波的生成更少,而透射能占入射能的比例更大。热作用后孔隙度增加导致煤样波阻抗减小,与杆件的匹配效果变差,使得入射波中更大的部分被转化为反射波,透射波减

小,自然减小了耗散能,耗散能与入射能之比也随之减小。在实际工程中,煤体破碎处理是常见作业,由于煤样在动态加载下的能量耗散率随加载速率的增加没有显著增长趋势,因此,在破碎处理煤体时可以采用低速加载方式。低速加载下,煤体强度相对较低,更容易破碎^[36]。

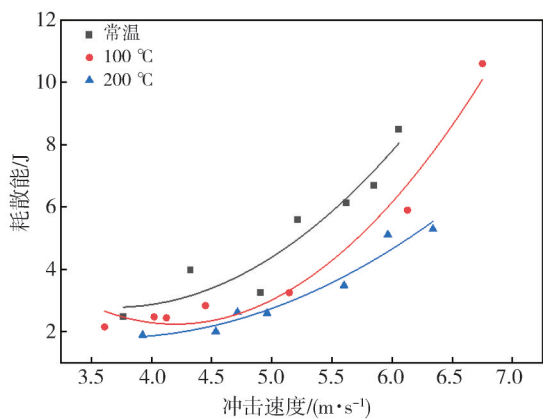


图 10 耗散能-冲击速度关系

Fig. 10 Dissipated energy - impact velocity diagram

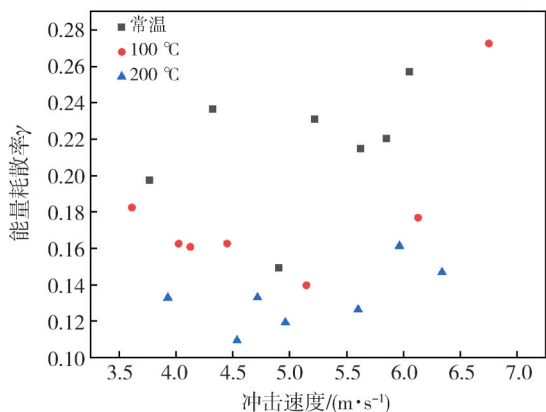


图 11 能量耗散率-冲击速度关系

Fig. 11 Energy dissipation rate - impact velocity diagram

2.3 XRD 射线衍射试验结果

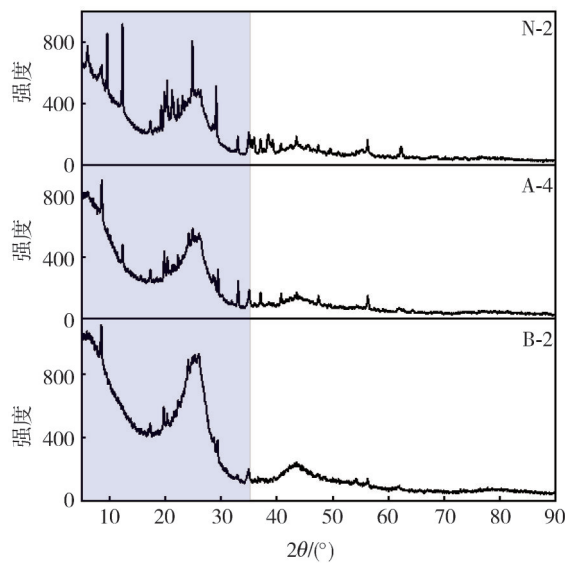
Sonibare 等^[37]用晶体结构的层间距(d_{002})和晶粒尺寸(横向尺寸 L_a 和堆叠高度 L_c)等 XRD 结构参数评估石墨化程度较低的煤和其他碳质材料的结构。这些参数可以使用 Scherrer 方程和 Bragg 公式来获得,计算公式为

$$L_c = \frac{0.89\lambda}{B_{002} \cos \varphi_{002}}, \quad (9)$$

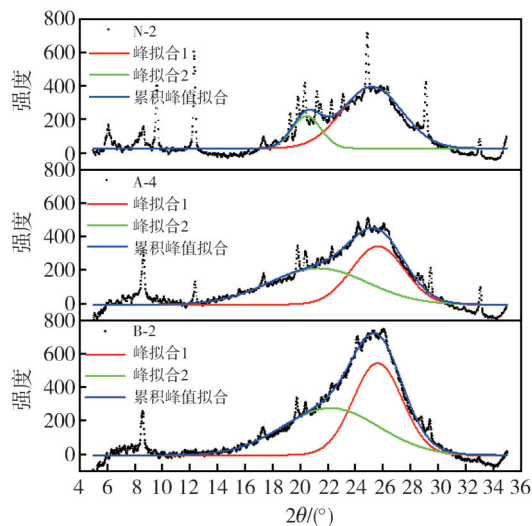
$$d_{002} = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi_{002}}, \quad (10)$$

式中: λ 为所用 X 射线的波长; B_{002} 为衍射(002)峰高度处 50% 的宽度, φ_{002} 为相应的衍射角; d_{002} 为晶面间距。

图 12 显示了煤样在 3 种工况下的 XRD 试验结果。



(a) 测试



(b) 拟合

图 12 各工况煤的 XRD 测试结果及拟合结果

Fig. 12 XRD test results and fitting results of coal under different working conditions

由图 12 可以看出,所有试样均表现出高背景强度,这表明煤样中含有一定比例的无定形碳,但特征(002)衍射峰所在位置大致相同,主要集中在 $5^\circ \sim 35^\circ$ 的衍射角范围内,煤样的(002)衍射峰面积随着温度的升高而明显增加,峰强度增加并且变得陡峭,说明煤的微晶结构趋向于有序,片层定向程度变得更好。杂峰随温度的增加而减少,这主要是因为矿物受热分解。

晶粒尺寸材料的微观组织对其力学性能有很大的影响^[38],通过式(9)和式(10)得到煤的微晶结构参

数,如表3所示,可以发现煤晶粒的堆叠高度随着加热温度的升高而升高,比常温依次增加了13.9%和22.1%,层间距却在减小,均减小了约1.7%。微晶结构的层间距在0.34~0.355 nm之间, d_{002} 值高于纯石墨(0.336~0.337 nm),表明所研究的煤样品中的石墨化度低,但热处理使其石墨化程度增加,促进了石墨层的有序排列,微晶结构更为整齐,煤的侧链和含氧官能团的大量脱落是层间距减小的原因。各工况002峰拟合并不对称,这是由于芳香族平行堆叠错位导致的^[39],而温度升高对称程度更好,这也说明了温度使得堆叠排列更加有序,Gan^[40]认为晶体排列有序可以使强度增加,然而N-2、A-4和B-2的抗拉强度分别为6.64、4.43和3.44 MPa,强度反而下降。对于本实验而言,加热产生的石墨微晶体积小,相对于因游离水分逸散和矿物质热解产生的孔隙对强度的影响小太多,变质程度高的无烟煤在2500℃以上热处理数个小时,制备的石墨的石墨化度通常在60%~70%之间^[41],本实验温度远达不到。

表3 各工况煤的微晶参数

Tab. 3 Microcrystal parameters of coal under different working conditions

煤样编号	$2\varphi_{002}/(^{\circ})$	$B_c/(^{\circ})$	d_{002}/nm	L_c/nm
N-1	25.200 54	5.136 15	0.353 11	1.567 3
A-1	25.633 13	4.511 61	0.347 25	1.785 78
B-1	25.620 26	4.211 6	0.347 42	1.912 94

3 颗粒流仿真及破坏分析

在PFC中,常用平行节理模型(Flat-joint模型,简称FJM模型)来进行部分岩石材料的动态拉伸力学特性模拟^[42-43]。基于此,使用PFC3D建立巴西圆盘试样模型。采用连续-不连续耦合方法建立了SHPB数值模型,为更加方便快捷地模拟应力波在杆件中传递的效果,对于连续介质的杆件使用等效荷载施加法施加入射波,定义的人射波与时间函数关系为

$$p = p_m [1 - \cos(2\pi ft)] / 2, \quad (11)$$

式中: p_m 为应力波幅值; f 为频率; $1/f$ 为应力波持续时间; t 为总计算时间。

由于煤样的细观参数难以通过实验直接测量得到,所以本文在PFC中模拟了所需的细观参数并通过试法来进行标定。标定一组冲击速度为 $3.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的不同工况煤样的细观参数,如表4所示,其试验与模拟结果如图13所示。值得注意的是,由于

实验条件的限制,并未考虑温度对煤的孔隙度、摩擦角及受热产生的微裂纹等因素的影响。同时,PFC中使用的刚性颗粒不能很好地模拟煤样的压密阶段,导致模拟中100℃和200℃试样的应力从零到峰值的时间小于试验时间。

表4 FJM细观参数

Tab. 4 Microscopic parameters of the FJM

细观参数	N-1	A-1	B-1
安装间隙 g_c/mm	0.28	0.28	0.28
径向和轴向单元 N_r, N_a	1, 3	1, 3	1, 3
摩擦角/ $(^{\circ})$	30	30	30
摩擦系数	0.3	0.3	0.3
法向刚度与切向刚度之比	2.5	2.5	2.5
粒子和键的有效模量/GPa	6.2	3.1	1.5
粘结抗拉强度/MPa	10.5	9.7	8.9
粘结内聚强度/MPa	11.9	4.6	2.1

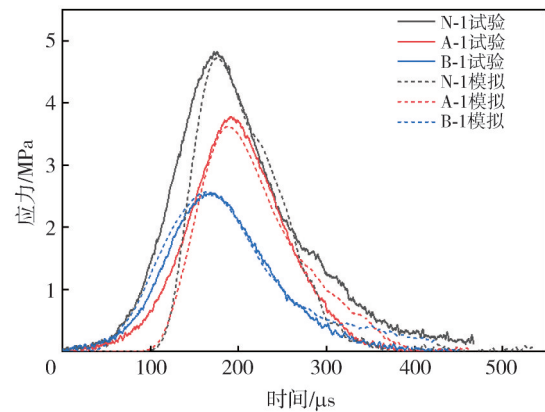


图13 不同工况煤的试验仿真对比

Fig. 13 Experimental simulation comparison of coal under different working conditions

由图13可以看出,煤的宏观动态抗拉强度减小了33.3%和48.2%,细观强度也随之降低,粒子和键的有效模量分别减小了50%和66.7%,粘结抗拉强度分别减小了7.6%和15.2%,粘结内聚强度分别减小了61.3%和82.3%。PFC的细观参数与宏观力学学性质有相同的变化趋势,高温影响了细观模型参数,最终导致了煤的宏观力学行为的变化,两者的具体关联还需后续进行深入系统的研究。

在破坏模式方面,以B-1号试样为例的数值模拟结果与试验结果如图14所示。应力波在加载40 μs 时从杆件中传递到试件中,入射杆与试件接触的一端开始出现轻微损伤,试样处于线弹性变形状态,拉伸裂纹稍多于剪切裂纹。随着应力波的进一步加载,中心出现了较小的裂纹,且基本沿着垂直杆面的方向,这是主拉伸裂纹的雏形,拉伸裂纹数量开始快速增长,试样两端因为应力集中产生了楔形的剪切破坏区域,剪切裂纹数量增长缓慢,拉伸裂纹

数量远大于剪切裂纹数量。加载 165 μs 后到达峰值应力,随着失效已经发展到试样内部,表面裂纹发展成具有一定深度的断裂,将试样一分为二,拉伸裂纹增速变缓,剪切裂纹数量进入小幅度增长期。最后阶段,圆盘四周表面裂纹延伸,分离的两个部分之间的裂缝越来越宽,分别向上下移动。从这一现象可以推断,拉伸破坏是煤样试件在巴西劈裂试验中的主要破坏模式,两端的破坏为压剪破坏。因此,在进行煤矿开采和利用的过程中,应根据其应力分布和破坏模式选择合适的支护方法^[44],调整围岩应力状态来减少这些破坏的发生。

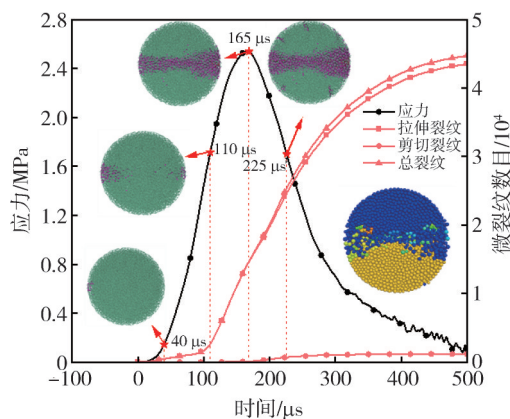


图 14 B-1 煤裂纹数量和裂纹演化

Fig. 14 Crack number and crack evolution of B-1 coal

4 结 论

本文以 SHPB 试验为基础,对煤的力学性能和能量耗散规律进行了研究,并利用 PFC 模拟了煤的动态劈裂过程,量化了裂纹数目,并分析了破坏模式。考虑到煤在加热过程中出现的化学变化,引入了 XRD 试验,研究了煤在热作用下微晶结构变化与力学性质变化之间的关联,得到结论如下:

1) 相同冲击速度下,温度增加,煤的抗拉强度减小,抗拉强度平均值降低了 30.7% 和 48.7%,温度使得煤样孔隙度增加和矿物质发生热解,同时加热使得煤样内部不同组分发生了不同程度的膨胀,导致裂纹扩展,从而使得强度降低。

2) 抗拉强度随冲击速度的增加而线性增加,在相同加载速率变化量下,高温煤样的强度增加量减少。

3) 冲击速度增大,入射能线性增大,耗散能非线性增大。耗散能入射能之比与冲击速度没有较明显的关系,与温度有一定关系,温度越高,比值越小。

4) 温度升高,煤样的芳香环层的堆叠高度依次增加了 13.9% 和 22.1%,层间距均减少约 1.7%,

意味着煤的石墨化度升高,晶体结构更加有序化,动态抗拉强度却在降低,说明石墨微晶的尺寸相对较小,对于煤岩强度的增强效果不明显。晶体结构是否受冲击速度影响还需要进一步研究。

5) 煤样动态拉伸过程中,圆盘中心的主裂纹为拉伸劈裂,两端产生的楔形区域破碎的类别主要为压剪破坏,拉伸裂纹远多于剪切裂纹,破坏程度与温度和冲击速度有关。

参考文献:

- [1] 何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2377-2393.
HE Manchao, GUO Pingye. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2377-2393. (in Chinese)
- [2] 孟召平, 任华鑫, 禹艺娜, 等. 沁水盆地南部煤储层赋存环境条件及其对渗透率的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 545-554.
MENG Zhaoping, REN Huaxin, YU Yina, et al. Geological conditions of coal reservoir occurrence in the southern Qinshui basin and its impact on permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 545-554. (in Chinese)
- [3] ZHAO Y S, QU F, WANG Z J, et al. Experimental investigation on correlation between permeability variation and pore structure during coal pyrolysis [J]. Transport in Porous Media, 2010, 82: 401-412.
- [4] 冯子军, 赵阳升. 煤的热解破裂过程: 孔裂隙演化的显微 CT 细观特征 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 103-108.
FENG Zijun, ZHAO Yangsheng. Pyrolytic cracking in coal: Meso-characteristics of pore and fissure evolution observed by micro-CT [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 103-108. (in Chinese)
- [5] WANG G, QIN Y, SHEN J, et al. Dynamic-change laws of the porosity and permeability of low-to medium-rank coals under heating and pressurization treatments in the eastern Junggar Basin, China [J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(3): 607-615.
- [6] YU L, ZHANG T, SU H, et al. Influence of heat treatment on dynamic and physical properties of anthracite coal [J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(3): 253-259.
- [7] 赵雷, 胡耀青. 高温阶段褐煤热解渗透的试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(1): 33-36.
ZHAO Lei, HU Yaoqing. Experimental research on pyrolysis and penetration of lignite at high temperature

- [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(1): 33-36. (in Chinese)
- [8] SU C D, QIU J D, WU Q H, et al. Effects of high temperature on the microstructure and mechanical behavior of hard coal[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(5): 643-650.
- [9] YANG Y L, ZHENG K Y, LI Z W, et al. Experimental study on pore-fracture evolution law in the thermal damage process of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116: 13-24.
- [10] 李鹏龙, 罗宁, 索云琛, 等. 力-热耦合作用下煤岩动力学特性和破碎机理研究[J]. 爆破, 2024, 41(4): 8-17. LI Penglong, LUO Ning, SUO Yunchen, et al. Study on dynamic characteristics and fracture mechanism of coal rock under action mechanical-thermal coupling[J]. Blasting, 2024, 41(4): 8-17. (in Chinese)
- [11] YANG Z H, FAN C J, LAN T W, et al. Dynamic mechanical and microstructural properties of outburst-prone coal based on compressive SHPB tests[J]. Energies, 2019, 12(22): 4236.
- [12] 吴秋红, 夏宇浩, 赵延林, 等. 不同温度及冷却速率下花岗岩动态拉伸力学特性[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2179-2193. WU QiuHong, XIA Yuhao, ZHAO Yanlin, et al. Effects of high temperature and cooling rate on dynamic tensile mechanical properties of granite [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2179-2193. (in Chinese)
- [13] 杨仁树, 李炜煜, 李永亮, 等. 3种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3107-3118. YANG Renshu, LI Weiyu, LI Yongliang, et al. Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3107-3118. (in Chinese)
- [14] 赵毅鑫, 龚爽, 黄亚琼. 冲击载荷下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2320-2326. ZHAO Yixin, GONG Shuang, HUANG Yaqiong. Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2320-2326. (in Chinese)
- [15] LIU H, JIANG B, LIU J, et al. The evolutionary characteristics and mechanisms of coal chemical structure in micro deformed domains under sub-high temperatures and high pressures[J]. Fuel, 2018, 222: 258-268.
- [16] 于利强, 姚强岭, 徐强, 等. 加载速率影响下裂隙细砂岩裂纹扩展试验及数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3488-3501. YU Liqiang, YAO Qiangling, XU Qiang, et al. Experimental and numerical simulation study on crack propagation of fractured fine sandstone under the influence of loading rate [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3488-3501. (in Chinese)
- [17] LI X, ZOU Y, ZHOU Z. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1693-1709.
- [18] ZHANG X, JIANG Y, WANG G, et al. Mechanism of shear deformation, failure and energy dissipation of artificial rock joint in terms of physical and numerical consideration [J]. Geosciences Journal, 2019, 23(3): 519-529.
- [19] 王晓卿, 康红普, 高富强, 等. 大尺寸节理煤体单轴压缩力学行为的离散元模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3088-3097. WANG Xiaoqing, KANG Hongpu, Gao Fuqiang, et al. DEM simulation of mechanical behavior of jointed coal in large scale under uniaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3088-3097. (in Chinese)
- [20] LI W Y, SHI C, ZHANG C. Numerical study on the effect of grain size on rock dynamic tensile properties using PFC-GBM [J]. Computational Particle Mechanics, 2024, 11(1): 481-489.
- [21] TANG W, ZHAI C, YU X, et al. Dynamic Brazilian splitting experiment of bedding shale based on continuum-discrete coupled method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 168: 104289.
- [22] 徐浩淳, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 热处理砂岩不同接触角巴西劈裂数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 588-597. XU Haochun, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Numerical study on Brazilian splitting of heat-treated sandstone under different contact angles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 588-597. (in Chinese)
- [23] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861-1874. QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874. (in Chinese)
- [24] PING Q, FANG Z H, MA D D, et al. Coupled static-dynamic tensile mechanical properties and energy dissipation characteristic of limestone specimen in SHPB tests [J]. Advances in Civil Engineering,

- 2020, 2020(2): 1-11.
- [25] 王世东, 虎维岳. 深部矿井煤岩体温度场特征及其控制因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 18-21. WANG Shidong, HU Weiyue. Research on coal and rock mass temperature fields characteristics and control factors in deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 18-21. (in Chinese)
- [26] BLAKE O O, FAULKNER D R, WORDEN R H, et al. Effect of thermal shock on the permeability and seismic wave velocity of the caprock and reservoir during CO₂ injection [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 118: 103691.
- [27] 胡林杰, 冯增朝, 周动, 等. 注热强化煤层气抽采的试验研究及工业应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 194-205. HU Linjie, FENG Zengchao, ZHOU Dong, et al. Experimental research and industrial application of heat injection-enhanced coalbed methane extraction [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 194-205. (in Chinese)
- [28] 徐晓鹏. 注过热水蒸汽条件下无烟煤的裂缝渗流特性演化规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [29] WANG J, LIU F, ZHAO W, et al. Study on coal spontaneous combustion at low-medium temperature in the same coal seam with different buried depths and protolith temperatures[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2022, 42(11): 3451-3463.
- [30] DAI F, HUANG S, XIA K, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 657-666.
- [31] MENG J, LYU C, WANG J, et al. Mechanical properties and failure mechanisms of different rank coals at the nanoscale[J]. Fuel, 2023, 345: 128209.
- [32] CAI X, CHENG C, ZHAO Y, et al. The role of water content in rate dependence of tensile strength of a fine-grained sandstone [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 22(1): 58.
- [33] FIELD J E, WALLEY S M, PROUD W G, et al. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(7): 725-775.
- [34] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1411-1478.
- [35] XU D, MU C, ZHANG W, et al. Research on energy dissipation laws of coal crushing under the impact loads [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1-13.
- [36] ZHOU Z L, CAI X, LI X B, et al. Dynamic response and energy evolution of sandstone under coupled static - dynamic compression: insights from experimental study into deep rock engineering applications [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 1305-1331.
- [37] SONIBARE O O, HAEGER T, FOLEY S F. Structural characterization of Nigerian coals by X-ray diffraction, Raman and FTIR spectroscopy [J]. Energy, 2010, 35(12): 5347-5353.
- [38] LIU A, LIU S, LIU Y, et al. Characterizing mechanical heterogeneity of coal at nano-to-micro scale using combined nanoindentation and FESEM-EDS [J]. International Journal of Coal Geology, 2022, 261: 104081.
- [39] WU D, ZHANG W. Evolution mechanism of macromolecular structure in coal during heat treatment: based on FTIR and XRD in situ analysis techniques [J]. Journal of Spectroscopy, 2019, 2019: 5037836.
- [40] GAN Q Q, XU J, PENG S J, et al. Effect of heating on the molecular carbon structure and the evolution of mechanical properties of briquette coal [J]. Energy, 2021, 237: 121548.
- [41] TANG Y, HUAN X, LAN C, et al. Effects of coal rank and high organic sulfur on the structure and optical properties of coal-based graphene quantum dots [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2018, 92(3): 1218-1230.
- [42] YIN T, ZHANG S, LI X, et al. A numerical estimate method of dynamic fracture initiation toughness of rock under high temperature [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204: 87-102.
- [43] LIU B, GAO Y T, JIN A B, et al. Fracture characteristics of orebody rock with varied grade under dynamic Brazilian tests [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(5): 2381-2398.
- [44] 左建平, 文金浩, 刘德军, 等. 深部巷道等强支护控制理论 [J]. 矿业科学学报, 2021, 6(2): 148-159. ZUO Jianping, WEN Jinhao, LIU Dejun, et al. Control theory of uniform strength support in deep roadway [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 148-159. (in Chinese)