

高温后无烟煤静动态压缩力学特性研究

蔚立元¹, 李光雷^{1, 2}, 苏海健¹, 靖洪文¹, 张涛^{1, 2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为探究温度对煤岩静、动态力学特性的影响规律, 首先采用箱式氛围炉在准真空环境下对直径 50 mm, 高度分别为 100 和 50 mm 的 2 组无烟煤试样进行 8 种温度水平的热处理(20 °C~500 °C), 然后分别利用液压伺服试验机和分离式 Hopkinson 压杆对 2 组试样进行静态单轴压缩和动态冲击试验。此外, 还通过扫描电镜和压汞试验获得各种温度后煤样的 SEM 图像、孔隙率及孔径分布。结果表明, 煤样热损伤以 300 °C 为界分为 2 个阶段, 分别以解吸、热破裂等物理反应和热解化学反应为主, 孔隙率逐步变大且中大孔占比逐渐增加; 煤岩承载和抗变形能力都随温度升高而逐步劣化, 第二阶段衰减趋势较第一阶段急剧, 500 °C 后的静、动态抗压强度分别降至常温时的 8.41% 和 16.94%。静载条件下煤样宏观力学性能的温度敏感性比动态冲击时显著, 抗压强度和弹性模量的动态增强因子随温度的变化规律不一致。

关键词: 岩石力学; 无烟煤; 静力学特性; 动力学特性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)11 - 2712 - 08

Experimental study on static and dynamic mechanical properties of anthracite after high temperature heating

YU Liyuan¹, LI Guanglei^{1, 2}, SU Haijian¹, JING Hongwen¹, ZHANG Tao^{1, 2}

(1. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*; 2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties of coal after thermal treatment, two sets of anthracite samples with different aspect ratios in a box-type muffle furnace were firstly prepared and heated subsequently under temperatures from 20 °C to 500 °C. The static uniaxial compression and dynamic impact tests were then conducted using the hydraulic servo testing machine and split Hopkinson pressure bar(SHPB) system respectively. The microstructure images, the porosity and the pore size distribution of typical samples were obtained using the scanning electron microscope(SEM) and mercury intrusion porosimetry(MIP). The experimental results show that the temperature range can be divided into two stages by a critical value of 300 °C. The physical reactivity and pyrolysis play the main roles in Stages 1 and 2 respectively. The porosity of coal and the proportion of super micropores and micropores increase gradually with temperature. The bearing and anti-deformation capacities of anthracite decrease with temperature, and the tendency is more obvious in stage 2

收稿日期: 2017 - 07 - 25; **修回日期:** 2017 - 09 - 19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0603001); 国家自然科学基金资助项目(51579239, 51704279)

Supported by the National Key Research and Development Program of China(Grant No. 2017YFC0603001) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51579239 and 51704279)

作者简介: 蔚立元(1982 -), 男, 博士, 2005 年毕业于山东大学水力水电工程专业, 现任副教授、博士生导师, 主要从事岩石动力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: yuliyuan@cumt.edu.cn。通讯作者: 苏海健(1988 -), 男, 博士, 现任助理研究员。E-mail: hjsu@cumt.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1169

than in Stage 1. The static and dynamic compressive strengths at 500 °C are only 8.41%/16.94% of those in the natural state. The static mechanical properties are more sensitive to the temperature than the dynamic properties due to the effect of strain rate. The variations in dynamic increasing factors of the compressive strength and elastic modulus are different.

Key words: rock mechanics; anthracite; static mechanical properties; dynamic properties

1 引言

煤炭在我国能源消费结构中的占比长期维持在70%左右,是最重要的基础能源。随着浅部资源日益枯竭,煤炭开发不断走向地球深部,地温逐渐增加,温度对煤岩体物理力学特性的影响愈加明显^[1-2]。此外,煤炭地下气化和煤层气注热开采等新工艺因其成本、效益和环境等优势,应用日益广泛^[3-5],而其涉及的温度甚至高达1 000 °C。因此,亟须掌握高温后煤岩的物理力学性能变化规律。

目前,国内外相关学者对高温后煤岩的物理力学性能进行了广泛的研究。Y. Yu等^[6]运用CT扫描技术跟踪观测了瘦煤中孔隙结构随温度的演化规律,包括孔隙数量、尺度、孔隙率和分形维数等参数。何满潮等^[7]利用深部煤岩温度-压力耦合瓦斯解析试验系统,证实了温度升高是诱发煤样中吸附气体大量解吸的因素之一。相关研究表明,煤岩渗透率随温度升高而增大,呈正指数关系^[8-9];而高温后煤岩静载条件下的力学强度、变形模量快速降低,承载能力大幅劣化^[10-12]。此外,煤炭资源开采中还经常遭遇到钻眼爆破、顶板垮落和冲击地压等动荷载的影响^[13-14]。分离式Hopkinson压杆(SHPB)是国际岩石力学学会(ISRM)推荐的岩石动力学试验设备^[15]。单仁亮等^[16]利用SHPB装置对车驾岭矿无烟煤试样进行了不同加载速率的冲击试验,建立了相应的动态本构模型。Y. Zhao等^[17]通过干燥及饱和状态煤样的动态巴西劈裂试验,发现损伤变量随冲击速度分别呈线性和指数函数形式增加,饱和状态下应变率效应更加显著。X. Liu等^[18]综合分析了静、动载条件下节理倾角和应变率对无烟煤破坏模式、断裂韧度、能量损失及分形维数的影响。李成武等^[19]研究发现,煤岩冲击破坏时的瞬变磁场信号幅值随应变率和断裂应力极限值的增大而增大,随破坏应变的增加而减小。

上述研究得到了诸多很有意义的结果,但是集中在高温后煤岩的物理和静力学性质,以及常温状态下煤岩的动力学性能方面,而高温后煤岩的动力

学行为目前还鲜有报导。本文首先对采自大同矿区忻州窑矿的无烟煤试样进行了准真空条件下的高温热处理,然后分别利用液压伺服试验机和分离式Hopkinson压杆(SHPB)装置对高温后的两组煤样开展了单轴压缩试验,以分析其静、动态力学特性。此外,还通过扫描电镜和压汞试验获得了各种温度后煤样的微观结构特征,以期揭示煤岩力学行为温度依赖性的微观机制。研究结论对相关领域的煤炭资源开采问题具有一定的借鉴意义。

2 煤样制备及试验

2.1 煤样制备

本文煤样为采自大同矿区忻州窑矿的原生结构试样,体积密度 $\rho=1.451\text{ g/cm}^3$,经过SDTGA-5000工业分析仪测定,该煤样干燥无灰基灰分 $V_{\text{daf}}=8.43\%$,为无烟煤^[20]。利用Axio Imager M1m显微分光光度计对煤样进行测定,其镜质组反射率为2.64%,镜质组含量为73.8%。经过钻芯、切割和打磨等工序由大块煤岩加工得到高度不同的2组标准圆柱形煤样,直径都为50 mm,高度分别为100和50 mm(见图1)。高径比2的煤样用于静态单轴压缩试验;高径比1的煤样用于动态冲击单轴压缩试验。



图1 忻州窑矿原煤试样

Fig.1 Raw coal specimens from Xinzhouyao mine

2.2 高温处理

煤样热处理设计 8 个温度水平：自然状态(常温 20 ℃)，100 ℃，200 ℃，300 ℃，350 ℃，400 ℃，450 ℃和 500 ℃。每个温度水平静态试样 3 个、动态试样 4 个(其中 3 个进行 SHPB 试验，另外 1 个进行物理性质测试)。除常温水平外，其余 7 个温度水平的试样采用上海微行炉业有限公司的 MXQ1700 箱式氛围炉在准真空条件下(气压低于 0.01 MPa)进行高温处理(见图 2)。为避免温度骤升致使煤样开裂，升温速率设定为 5 ℃/min^[21]，升高到目标温度水平后，保持恒温加热 2 h 以确保煤样发生充分的物理化学反应，然后关闭电源，煤样在炉腔内自然冷却至室温。



图 2 MXQ1700 高温氛围炉
Fig.2 Box-type muffle furnace MXQ1700

2.3 静态单轴压缩与动态冲击试验

静载单轴压缩试验采用 MTS 公司的 SANS 300 型高精度伺服试验机进行，加载方式为位移控制，加载速率为 0.004 mm/s。为减轻端面摩擦效应，试验时在煤样两端面涂抹适量的凡士林。

动态冲击试验采用解放军陆军军官学院的 SHPB 装置进行(见图 3)。该装置主要由驱动系统、压杆系统、吸能系统、信号采集和数据处理系统等四部分组成。系统杆件材质为 60Si2Mn 弹簧钢，弹性模量和屈服强度分别高达 200 和 1.2 GPa，纵波速度为 5 160 m/s。入射杆和透射杆长分别为 5 500，3 500 mm，子弹长 400 mm，所有杆件直径都是 75 mm。利用灵敏度高达 100 的半导体应变片采集入射波 ϵ_i ，反射波 ϵ_r 和透射波 ϵ_t 等数据，驱动系统气压固定为 0.30 MPa。

为消除矩形波加载带来的弥散效应以及实现恒定应变率加载，需进行入射波整形^[22-23]。本次试验的整形器采用直径 10 mm、厚 2 mm 的橡胶片。由

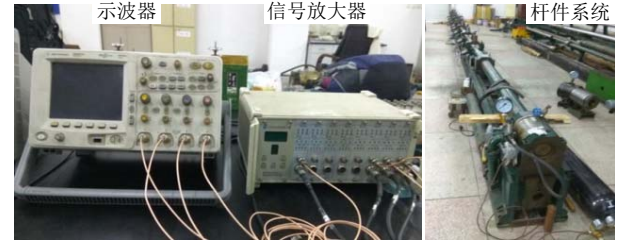
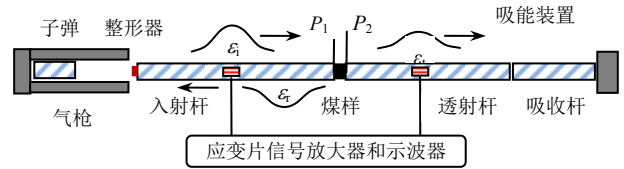


图 3 SHPB 系统示意图及实物
Fig.3 Diagram and photos of SHPB system

图 4 可知，实测入射信号呈缓慢上升的半正弦波形，体现了良好的整形效果。

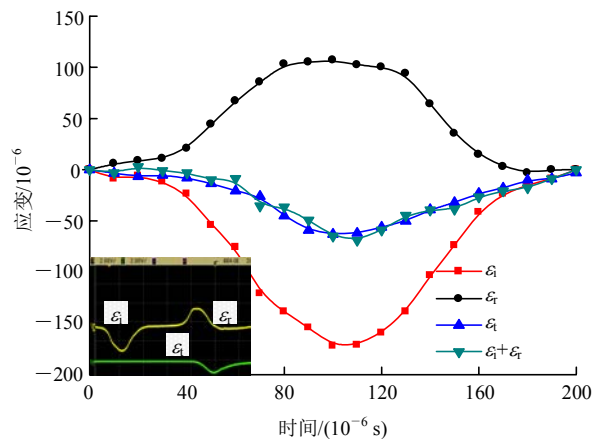


图 4 整形后的应变波
Fig.4 Strain waves after shaping

SHPB 装置施加在试样两端的荷载 P_1 , P_2 可用以下公式计算^[15]：

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= EA(\epsilon_i + \epsilon_r) \\ P_2 &= EA\epsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： A , E 分别为杆件横截面积和弹性模量； ϵ_i , ϵ_r , ϵ_t 分别为入射、反射和透射应变。图 4 表明，典型试样的 ϵ_i 与 $\epsilon_i + \epsilon_r$ 基本吻合，即试样动态受力平衡，保证了应力均匀假定和试验结果的可信性。

2.4 物理性质测试

各温度水平都有 1 个高径比为 1 的试样用来进行物理性质测试。首先用完整试样测定其干燥状态的体积密度 ρ ，然后取小块样品进行压汞试验和扫描电镜测试。压汞试验是利用汞对固体表面的不浸润性，将汞注入装有干燥样品的真空膨胀计中，然后逐步加压使汞进入到样品孔隙中，通过露出汞面

铂丝电阻阻值的变化测得压入孔隙的汞体积，进而获得煤样的孔隙率 ϕ 及孔径分布，设备采用美国麦克公司的 Auto Pore IV9510 型压汞微孔结构分析仪，液态汞的压力范围为 0.000 7~414 MPa，测得的孔径范围为 3.0 nm~1 000 μm 。扫描电镜可对样品新鲜断口的微观表面结构进行成像(SEM)，设备为美国 FEI 公司的 QuantaTM 250。

3 结果分析

3.1 密度与孔隙率

煤样密度与孔隙率随温度升高的变化曲线如图 5 所示，其中密度比为高温后煤样密度与常温密度值之比。可见，随温度增高，煤样密度和孔隙率分别呈持续下降和增大的趋势，且按变化趋势课分为平缓(20 $^{\circ}\text{C}$ ~300 $^{\circ}\text{C}$)和急剧(300 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$)2 个阶段。

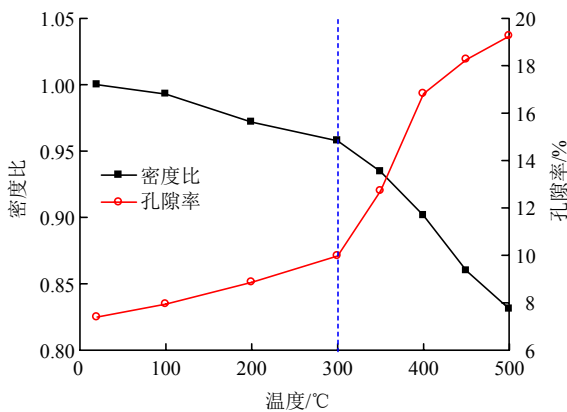
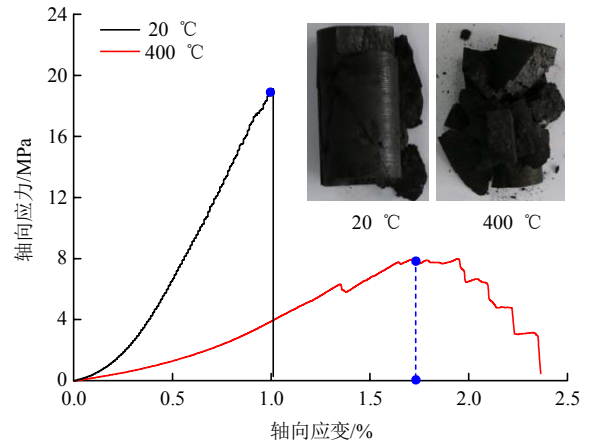


图 5 密度比和孔隙率随温度升高变化规律
Fig.5 Variations of density ratio and porosity with increasing temperature

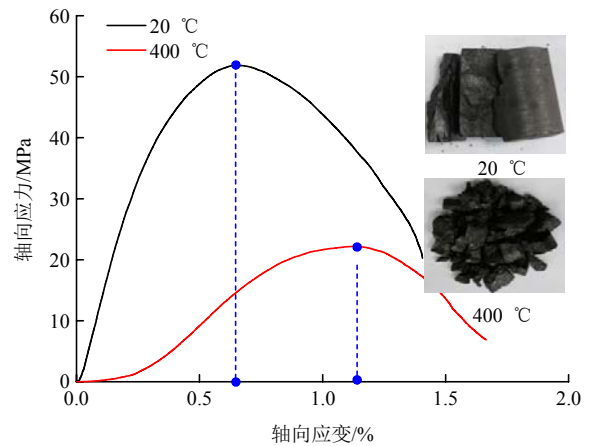
随着温度从室温逐渐升高到 200 $^{\circ}\text{C}$ ，煤样脱水、解吸、及热破裂等物理反应作用使得孔隙率 ϕ 缓慢增大，从室温状态的 7.39%逐渐增大到 9.97%；300 $^{\circ}\text{C}$ 时体积密度下降为室温时的 95.78%，下降趋势并不明显，密度损失率仅为 4.22%。温度继续升高，无烟煤试样开始发生热解反应，且热解程度随温度升高而逐渐剧烈，500 $^{\circ}\text{C}$ 时，热解气体大量溢出，导致煤样的密度比迅速下降，由 300 $^{\circ}\text{C}$ 时的 95.78%降至 83.01%；煤中有机质的大量损失又引起孔隙率的急剧增大，表现为高温 500 $^{\circ}\text{C}$ 处理后，孔隙率剧增到 19.25%，是室温状态的 2.6 倍。

3.2 抗压强度与破坏应变

煤样静态单轴压缩和动态冲击试验的典型应力 - 应变曲线和破坏情况见图 6。从图 6(a)可看出，静



(a) 静态压缩



(b) 动态压缩

图 6 不同温度状态应力 - 应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of coal specimens under different temperatures

载条件下，由于煤样孔隙率较大，具有明显的初始压密阶段。常温煤样具有明显的脆性特征，应力 - 应变曲线峰后急剧跌落，破坏块度较大；400 $^{\circ}\text{C}$ 高温后，强度降低而破坏应变增加，峰前出现了表征局部缺陷贯通的应力跌落，峰后曲折缓慢下降，承载能力逐渐损失，韧性特征显著，破坏后碎块多而块度较小。

图 6(b)显示，常温时煤样的应力应变曲线压密阶段不明显，这是由于 SHPB 冲击时加载率太高导致的，试样表现出明显的劈拉破坏模式。400 $^{\circ}\text{C}$ 高温后，由于孔隙率剧增，仍出现了下凹的压密段，与静载压缩一致，热损伤也导致了煤岩动态承载能力的下降以及对应破坏应变的增大，此时试样被冲击成较多的小碎块，破坏比较彻底。

煤样静、动态抗压强度(σ_{ss} , σ_{sd})与破坏应变(ϵ_{ps} , ϵ_{pd})随温度的变化规律如图 7 所示。材料的宏观力学特性一定程度上取决于其内部微观结构，20 $^{\circ}\text{C}$ ~300 $^{\circ}\text{C}$ 阶段内，煤样内部微孔隙、微裂纹等缺陷的

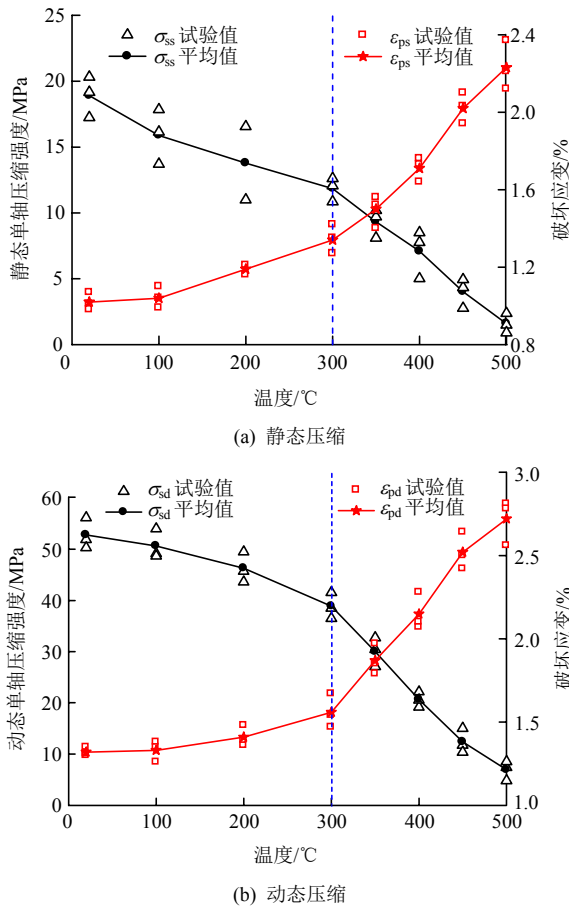


图7 峰值应力和破坏应变随温度升高的变化曲线
Fig.7 Variations of peak stress and failure strain with increasing temperature

增加导致静、动态抗压强度分别下降了 37.73%(由 18.91 MPa 降至 11.85 MPa)和 26.39%(从 52.78 MPa 减小到 38.86 MPa); 同时, 对应于抗压强度的破坏应变随温度增高而增大, 300°C时的静、动态破坏应变分别为室温时的 1.31 和 1.18 倍。

温度升高(300 °C~500 °C)导致有机质热解程度逐渐剧烈, 煤样物质的大量损失与孔隙率的急剧增大, 使得内部组分间的结合强度下降, 微观结构愈加疏松, 宏观表现为抗压强度大幅度劣化。高温 500 °C后, 煤样的静、动态抗压强度分别降至 1.59 和 8.94 MPa, 仅为常温状态时的 8.41%和 16.94%; 而煤样变形却由于空隙的增加而急剧增大, 此阶段的破坏应变增量是第一阶段增量的 2.78 倍(静态)和 4.83 倍(动态)。此外, 相对于动态冲击, 煤样的静态承载能力随温度升高下降得更明显, 表现出更显著的温度敏感性。

3.3 弹性模量

静态应力 - 应变曲线上近似成直线段的斜率即为静态弹性模量 E_s ; 而动态弹性模量 E_d 则利用

ISRM 推荐的计算方法获得^[15]:

$$E_d = \sigma / \dot{\epsilon} \tag{2}$$

其中, 加载率 $\dot{\sigma}$ 为应力 - 时间曲线中近似直线段的斜率, 应变率 $\dot{\epsilon}$ 为试样应力均匀阶段的应变率平均值。

煤样静、动态弹性模量随热处理温度的变化情况见图 8, 其中相对偏差为下降量与常温弹性模量的比值。由图 8 可知, 与抗压强度一致, 煤样弹性模量的变化趋势也以 300 °C为界分两阶段随温度增加而降低。第 1 阶段中, 煤样 E_s , E_d 分别以平均 0.28 GPa/100 °C和 0.46 GPa/100 °C的速率平缓下降, 300 °C时的相对偏差分别为 31.60%和 16.25%。300 °C之后, 煤岩以发生分解和解聚的热解反应为主, 挥发分大量产出极大地改变了介质的结构骨架。因此, 煤样 E_s 下降速率增大, 500 °C时仅为 0.20 GPa, 相对偏差高达 92.03%; 而 E_d 更是以急剧降低至 1.19 GPa(500 °C), 相对偏差达到 85.01%。同样地, 静载条件下煤样弹性模量的温度敏感性较动载时显著, 随温度增加下降地更加激烈。

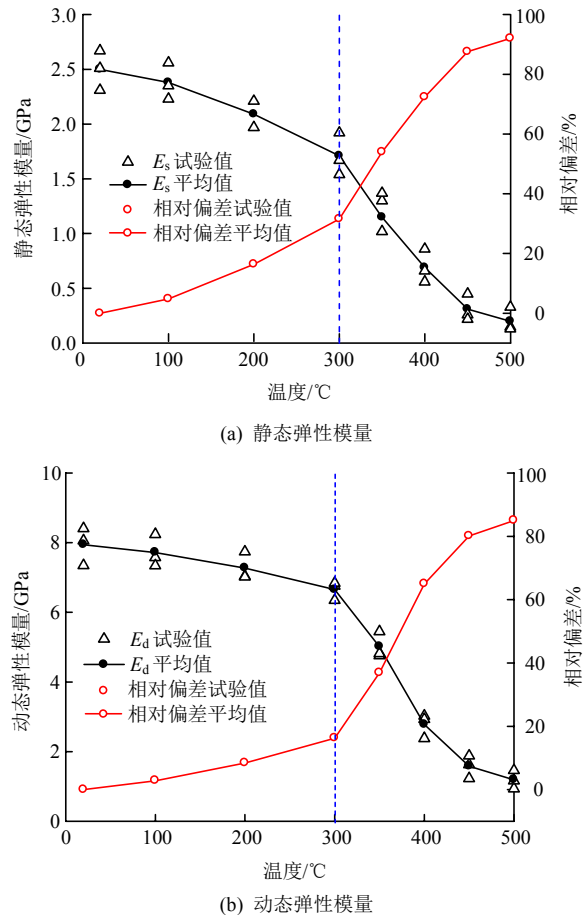


图8 煤样弹性模量随温度升高的变化曲线
Fig.8 Variations of coal specimens' modulus with increasing temperature

3.4 动态增强因子

岩石是应变率相关材料，采用动态增强因子 (*DIF*)作为冲击荷载下力学性能增幅的指标，该指标为试样动、静态力学参数的比值^[24]。抗压强度和弹性模量的动态增强因子 DIF_s 、 DIF_e 随温度的变化规律如图 9 所示。

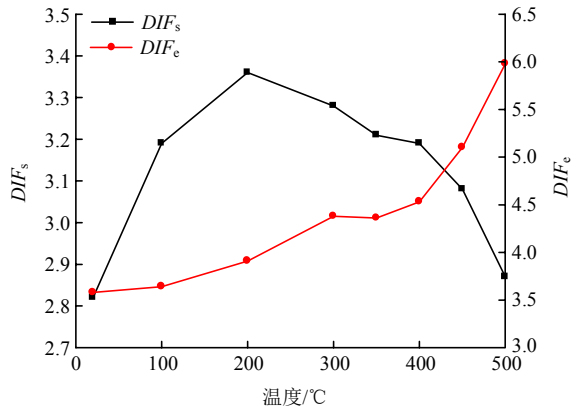


图 9 动态增强因子随温度升高的变化规律

Fig.9 Variations of DIF with increasing temperature

由图 9 可知，抗压强度和弹性模量的动态增强因子随温度的变化规律并不一致。 DIF_s 常温时为 2.82，先随温度升高增大，200 °C 时达到最大值 3.36，而后持续减小，500 °C 时衰减到 2.87。这与秦岭花岗岩高温后抗拉强度的动态增强因子的结果趋势一致^[25]。与 DIF_s 不同， DIF_e 随温度增高呈持续增大的趋势，从 20 °C 的 3.58 增加到 500 °C 的 5.98，增幅为 66.35%。高温后煤样动态增强因子复杂的变化规律是由热损伤程度和应变率效应两种相互影响的因素导致的。

4 讨论

煤是一种富含有机质的复杂多孔介质，随热处理温度升高，将会发生自由水分蒸发、自由气体和吸附气体解析和热膨胀引起的破裂，以及更高温度下的有机质热解反应，这将使得煤样内部结构和结构趋于疏松，孔隙、裂隙网络愈加发育^[6]，宏观上表现为强度降低和变形增大。图 10 中的 SEM 图像展现了各温度后煤样断口的微观形貌。采用霍多特方案^[26]将压汞试验获得的煤中孔隙根据孔径划分为 4 种类型：超微孔 v_a (3~10 nm)、微孔 v_b (10~100 nm)、中孔 v_c (3~10 nm)和大孔 v_d (>1 000 nm)。各种孔隙占总孔隙的体积百分比随温度的变化规律如图 11 所示。

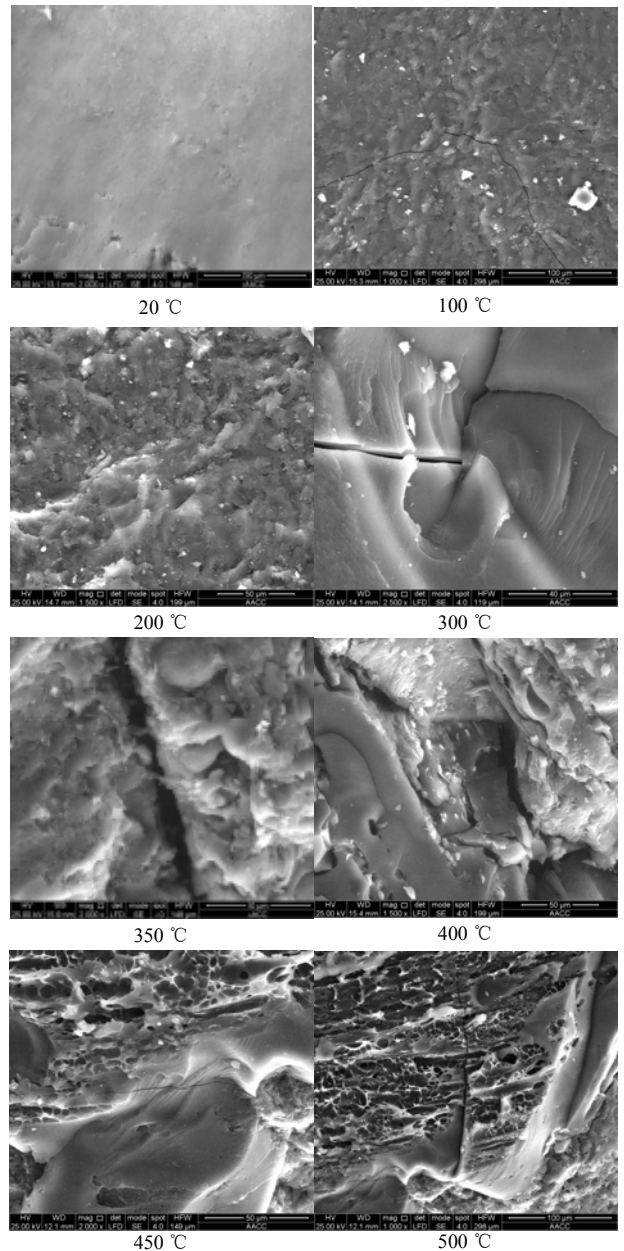


图 10 高温后煤样 SEM 图像

Fig.10 SEM images of coal specimens after heating treatment

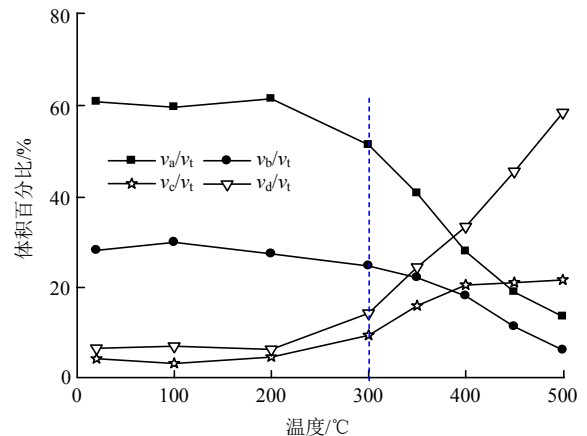


图 11 孔径分布随温度升高的变化规律

Fig.11 Variations of pore size distribution with increasing temperature

常温时, SEM 图像显示煤样相对致密均匀, 总孔隙率较小(7.39%), 主要为超微孔占主导优势(61.24%)的原生缺陷。温度水平不超过 200 °C 时, 煤样中矿物组分热膨胀系数的不同将会导致微小裂纹的萌生(100 °C), 并且毛细水、结合水、自由气体和吸附气体由于受热而蒸发或解吸^[27], 微观形貌上表现为蜂窝状的微孔隙发育明显(200 °C); 此时由于物质损失导致体积密度和孔隙率有了一定程度的改变, 但是孔径分布基本不变, 仍以超微孔和微孔为主(二者合计占比维持在 61.24%左右); 在宏观力学上, 静/动态条件下的抗压强度和弹性模量变化不甚明显, 稍有劣化。

高温 300 °C 时, 不均匀热膨胀引起局部热应力剧增, 成为煤样微观结构改变的主导因素, 当局部热应力远大于矿物颗粒之间的黏结力时, 微裂纹便持续扩展、张开, 发生明显的热破裂。虽然热破裂产生的优势裂纹开度和延展度较大, 但矿物颗粒热膨胀率的各向异性也会同时导致弱势缺陷的收缩和闭合。因此, 此时总孔隙率并未发生剧烈的变化, 仍旧平稳增长; 但孔径分布上显示中孔和大孔已经开始有了明显增加, 二者合计占比由 200 °C 的 10.69% 上升到 23.56%。宏观上, 这种以物理变化为主的热损伤并未严重降低煤样承载及抵抗变形的能力。

温度继续提高, 煤样便进入到以热解为主的化学反应阶段^[6]。煤中有机质大分子在无氧环境下受热发生不可逆的热化学分解和气化作用, 释放出大量热解气体(CH₄, H₂ 和 CO₂ 等)和煤焦油^[28], 裂纹的开度和长度进一步发展, 同时在煤中形成了许多中孔和大孔, 二者合计占比迅速上升到 40.35%(350 °C)和 53.97%(400 °C), 密度损失急剧增大而孔隙率迅速上升(见图 5), 直接导致其微观结构严重受损, 宏观力学性能剧烈劣化(见图 7 和 8)。400 °C 之后, 煤样热解反应更为全面彻底, 微缺陷孔径进一步增大, 大孔占比以直线形式迅猛增长, 从 450 °C 的 45.74% 增至 58.83%(500 °C); 同时无机矿物晶体也开始析出, 矿物颗粒间更易于相对滑动, 结构完整性和承载能力几乎完全丧失。

高温导致无烟煤试样微观组构逐渐由均匀致密变得多孔而疏松, 孔隙率增加且孔径分布由超微孔、微孔为主向中孔、大孔主导转变。但由于煤岩是应变率相关材料, SHPB 冲击高速加载时, 由于持时极短, 材料的惯性效应导致其由热损伤导致的微观结构改变体现得不如静载缓慢压缩时明显。因此, 与动态冲击相比, 静载条件下煤样的抗压强度和弹

性模量对热处理温度水平的依赖性更加显著。

5 结 论

本文对 2 种高径比的无烟煤试样进行了 6 种温度水平的热处理, 然后分别开展了常规静态单轴压缩和 SHPB 动态冲击试验, 并采用压汞试验和扫描电镜进行了微观测试, 得到了如下主要结论:

(1) 煤样热损伤以 300 °C 为界分为 2 个阶段: 阶段 1(20 °C~300 °C)以脱水、解吸和热破裂等物理反应为主, 密度和孔隙率变化平缓, 以超微孔和微孔占主导地位; 阶段 2(300 °C~500 °C)以热解化学反应为主, 密度和孔隙率变化剧烈, 中大孔发展为优势微缺陷。

(2) 静动载条件下, 煤岩的承载能力和抗变形能力都随热损伤的加剧而逐步劣化: 阶段 1, 煤岩的抗压强度和弹性模量小幅下降, 300 °C 时的最大下降幅度为 37.73%; 阶段 2, 宏观力学参数急剧减小, 500 °C 时静、动态抗压强度分别降至常温时的 8.41% 和 16.94%。

(3) 热损伤效应和应变率效应共同作用, 静载条件下煤样宏观力学性能的温度敏感性比动态冲击时显著; 抗压强度和弹性模量的动态增强因子随温度的变化规律不一致, DIF_s 先增大后减小而 DIF_e 持续增大。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547 - 556.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547 - 556.(in Chinese))
- [2] 冯子军, 万志军, 赵阳升, 等. 高温三轴应力下无烟煤、气煤煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 689 - 696.(FENG Zijun, WAN Zhijun, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental study of permeability of anthracite and gas coal masses under high temperature and triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 689 - 696.(in Chinese))
- [3] 梁杰, 刘淑琴, 余力, 等. 煤炭地下气化过程稳定控制方法的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 358 - 361.(LIANG Jie, LIU Shuqin, YU Li, et al. Method of stably controlling the process of underground coal gasification[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(5): 358 - 361.(in Chinese))
- [4] BHUTTO A W, BAZMI A A, ZAHEDI G. Underground coal gasification: From fundamentals to applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 189 - 214.
- [5] 杨新乐, 张永利. 热采煤层气藏过程煤层气运移规律的数值模拟[J].

- 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 89 - 94.(YANG Xinle, ZHANG Yongli. Numerical simulation on flow rules of coal-bed methane by thermal stimulation[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(1): 89 - 94.(in Chinese))
- [6] YU Y, LIANG W, HU Y, et al. Study of micro-pores development in lean coal with temperature[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 51(1): 91 - 96.
- [7] 何满潮, 王春光, 李德建, 等. 单轴应力 - 温度作用下煤中吸附瓦斯解吸特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 865 - 872.(HE Manchao, WANG Chunguang, LI Dejian, et al. Desorption characteristic of adsorbed gas in coal samples under coupling temperature and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 865 - 872.(in Chinese))
- [8] 李志强, 鲜学福, 隆清明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 523 - 527.(LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, LONG Qingming. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, 38(4): 523 - 527.(in Chinese))
- [9] 胡雄, 梁为, 侯么靖, 等. 温度与应力对原煤、型煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1 222 - 1 229.(HU Xiong, LIANG Wei, HOU Sijing, et al. Experimental study of effect of temperature and stress on permeability characteristic of row coal and shaped coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1 222 - 1 229.(in Chinese))
- [10] AKBARZADEH H, CHALATURNYK R J. Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 131(1): 126 - 146.
- [11] 万志军, 冯子军, 赵阳升, 等. 高温三轴应力下煤体弹性模量的演化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1 736 - 1 740.(WAN Zhijun, FENG Zijun, ZHAO Yangsheng, et al. Elastic modulus's evolution law of coal under high temperature and triaxial stress[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1 736 - 1 740.(in Chinese))
- [12] 姜波, 秦勇, 金法礼. 煤变形的高温高压实验研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1): 80 - 84.(JIANG Bo, QIN Yong, JIN Fali. Coal deformation test under high temperature and confining pressure[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(1): 80 - 84.(in Chinese))
- [13] YU L, SU H, JING H, et al. Experimental study of the mechanical behavior of sandstone affected by blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93(2): 234 - 241.
- [14] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机制和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205 - 213.(JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205 - 213.(in Chinese))
- [15] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 49(1): 105 - 112.
- [16] 单仁亮, 程瑞强, 高文蛟. 云驾岭煤矿无烟煤的动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 258 - 2 263.(SHAN Renliang, CHENG Ruiqiang, GAO Wenjiao. Study on dynamic constitutive model of anthracite of Yunjialing coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 258 - 2 263.(in Chinese))
- [17] ZHAO Y, LIU S, JIANG Y, et al. Dynamic tensile strength of coal under dry and saturated conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(5): 1 709 - 1 720.
- [18] LIU X, DAI F, ZHANG R, et al. Static and dynamic uniaxial compression tests on coal rock considering the bedding directivity[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(10): 5 933 - 5 949.
- [19] 李成武, 解北京, 杨威, 等. 煤冲击破坏过程中的近距离瞬变磁场变化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 973 - 981.(LI Chengwu, XIE Beijing, YANG Wei, et al. Characteristics of transient magnetic nearby field in process of coal impact damage n[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 973 - 981.(in Chinese))
- [20] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T5751—2009 中国煤炭分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T5751—2009 Chinese classification of coals[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.(in Chinese))
- [21] NASSERI M H B, SCHUBNEL A, YOUNG R P. Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 601 - 616.
- [22] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(1): 93 - 106.
- [23] 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 445 - 2 452.(ZHOU Zilong, LI Xibing, YAN Xiaoming. Loading condition for specimen deformation at constant strain rate in SHPB test for rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 445 - 2 452.(in Chinese))
- [24] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 冲击压缩荷载下角闪岩的动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2 113 - 2 120.(LIU Junzhong, XU Jinyu, LU Xiaocong, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of amphibolites under impact compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2 113 - 2 120.(in Chinese))
- [25] LIU S, XU J. Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71(1): 188 - 193.
- [26] 霍多特 B B. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊, 王佑安译. 北京: 中国煤炭工业出版社, 1966: 18 - 33.(HODOT B. B. Outburst of coal and coalbed gas[M]. Translated by SONG Shizhao, WANG You'an Beijing: China Coal Industry Press, 1966: 18 - 33.(in Chinese))
- [27] 冯子军, 赵阳升. 煤的热解破裂过程——孔隙演化的显微 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))
- [28] ARENILLAS A, RUBIERA F, PIS J J, et al. Thermal behaviour during the pyrolysis of low rank perhydrous coals[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 68(3): 371 - 385.