

文章编号: 1001-4888(2019)03-0478-11

SDS 水溶液作用下低煤阶煤体 物理力学特性及损伤实验研究^{*}

安文博¹, 王来贵¹, 刘向峰¹, 李喜林², 陈强¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为了探究 SDS 水溶液对低煤阶煤体物理力学特性的影响及损伤程度, 采用十二烷基硫酸钠(SDS)水溶液为有机溶液, 以低煤阶煤体(阜新长焰煤)为研究对象, 通过电镜扫描、压汞实验、纵波波速实验和单轴压缩实验, 对 SDS 水溶液浸泡前后煤样的微观孔隙结构、孔隙率、纵波波速、峰值强度及弹性模量进行表征, 分析煤样在 SDS 水溶液作用下物理力学特性随浸泡温度的变化规律, 并建立了 SDS 水溶液作用下受荷载煤样的损伤演化模型, 探讨煤样损伤机制。结果表明: (1) 经 SDS 水溶液作用后, 煤样微观孔隙分布不均匀, 孔隙率随浸泡温度增加而增加, 在 55℃ 时, 孔隙率为 57%, 比原煤样孔隙率增加了 46%; 煤样纵波波速、峰值强度和弹性模量均随浸泡温度增加而降低, 在 55℃ 时, 纵波波速、峰值强度和弹性模量分别为 571m/s、6.73MPa、356MPa, 比原煤样分别降低了 416m/s、5.12MPa、1129MPa; (2) SDS 水溶液与荷载的共同作用加剧了煤样的总损伤程度, 表现出明显的非线性特征, 煤样损伤在微观上表现为矿物质组成与结构的改变过程, 宏观上表现为煤样力学强度的降低及抵抗破坏的能力减弱; (3) 运用新的浸泡实验结果验证所提出的损伤演化模型, 实验结果与损伤演化模型十分吻合, 相关系数 $R^2 = 0.999$, 由此可见, 该损伤演化模型具有良好的可靠性。

关键词: SDS 水溶液; 低煤阶煤体; 物理力学特性; 损伤演化模型

中图分类号: TD713 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-265

0 引言

在众多岩石工程领域中, 岩体的结构破坏受到周围环境的影响, 化学溶液是影响因素之一^[1-3]。由于岩石是由矿物颗粒或晶体相互胶结在一起的集合体, 内部存在着大量的初始微裂纹和缺陷, 化学溶液能够渗透其中并与岩石的矿物晶体或矿物颗粒之间的胶结物产生物理化学作用, 使其内部缺陷进一步加深, 从而降低了岩石的物理力学特性^[3]。因此, 化学溶液对岩石物理力学特性的影响已成为当今的研究热点^[4,5]。

近年来, 一些学者在化学溶液对岩石物理力学特性的影响方面已取得了较多的研究成果。苗胜军等^[6]对酸性环境下花岗岩损伤机理进行研究, 发现花岗岩受水化学溶液侵蚀的损伤机制取决于水化学溶液的性质与成分、岩石中的矿物组分及颗粒、孔隙、裂纹等结构之间的耦合作用, 并最终改变了岩石的微观成分和细观结构。韩铁林等^[7]研究了砂岩在不同化学溶液作用下的腐蚀机制, 认为化学溶液对砂岩的腐蚀从微细观上表现为化学溶液对砂岩试样的腐蚀引起其成分、结构发生变化, 从而导致其孔隙率

^{*} 收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51474121, 51274110)资助

通讯作者: 王来贵(1962—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事地下煤岩结构和力学特性的研究。Email: 1611525041@qq.com

增大,而在宏观上则表现为砂岩试样力学特征的劣化。丁梧秀等^[8,9]开展了不同化学溶液对灰岩强度损伤的影响,认为化学溶液腐蚀作用下,矿物颗粒间联结受到扰动,同时颗粒受到溶蚀等作用,使岩石强度显著下降,岩石结构产生损伤,并建立了化学溶液作用下灰岩的断裂准则和损伤方程。目前研究成果主要集中在无机化学溶液(主要是酸、碱、盐溶液)对岩石的力学特性影响及腐蚀损伤模型的建立,有机溶液对岩石力学特性影响的研究尚少,还需要进一步的探索。

基于此,本文采用十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate, SDS)作为有机溶剂,配置 SDS 水溶液作为有机溶液,开展了 SDS 水溶液对低煤阶煤样物理力学特性影响及损伤实验研究,监测了 SDS 水溶液浸泡前后煤样的孔隙结构、纵波波速随浸泡温度的变化规律,分析探讨了煤样的物理力学特性变化规律,并以宏观统计损伤模型为基础,建立了 SDS 水溶液作用下受荷载煤样的损伤演化模型,探讨浸泡温度对煤样内部损伤扩展的影响,并借助煤样单轴压缩实验结果对模型进行验证。

1 实验

1.1 煤样制作

实验所用低煤阶煤样取自阜新平安矿的长焰煤,在实验室内进行加工,采用岩石取芯机在煤样上进行取芯,为了保证煤样的均匀性,每一组的煤样尽量在同一煤块上钻取,利用岩石切割机将岩芯切割成大小为 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准煤样,并除去具有明显缺陷的煤样,对煤样进行声波波速测试,将波速离散性较大的煤样剔除,选择均一性良好的煤样,保存、备用。标准煤样见图 1(a)。图 1(b)为原煤样与单轴压缩实验后煤样对比图。图 1(c)为原煤样电镜扫描图,在微观尺度下观察煤样孔隙结构,原煤样还有许多原始微孔隙、孔洞($1 \sim 10\mu\text{m}$)及原始微裂隙、裂纹($0.1 \sim 1\mu\text{m}$)等缺陷。



图1 (a)实验用标准煤样,(b)单轴压缩对比图,(c)原煤样电镜扫描图

Fig. 1 (a) Standard coal samples were used for experiment, (b) uniaxial compression comparison chart, (c) electron microscopy of raw coal sample

1.2 有机溶液的选择

经课题组前期实验研究,首先通过单因素实验初步确定有机溶剂的种类、投量和浸泡时间,但考虑

到单因素实验不能对连续的点进行分析和优化,存在一定的局限性,因此,在单因素实验基础之上,采用正交法进行实验,进一步优化实验条件,最终选择有机溶剂为十二烷基硫酸钠(也可称作十二烷基磺酸钠),质量分数为 0.5%,浸泡时间为 48h,并配制成质量分数为 0.5%的 SDS 水溶液。SDS 的化学式为 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{-OSO}_3\text{Na}$,其分子结构中一端含有疏水基,一端含有带负电荷的亲水基,其在酸性介质以及加热条件下都不会分解,无腐蚀性,化学性质十分稳定,具有良好的乳化、渗透、去污和分散性能,常作为一般的阴离子表面活性剂用于科学研究中。

1.3 实验方法

1.3.1 压汞实验

采用美国麦克公司 Au-toPore IV 9510 型全自动压汞仪,将实验样品在 110°C 条件下真空脱气 2h 后进行压汞实验,汞的表面张力为 485.0mN/m ,汞与煤样的接触角为 140° ,仪器的压力范围为 $0.1\sim 60000\text{Pa}$,测量的孔径范围为 $3.0\text{nm}\sim 1000\mu\text{m}$ 。

1.3.2 纵波波速实验

采用康科瑞公司 NM-4A 型非金属超声波检测分析仪对不同浸泡温度下的煤样进行纵波波速测试。实验前,为确保其发射信号的稳定性,需采用标准铝块对其进行标定,在实验过程中超声波换能器采用 30Hz 探头,为保证煤样与探头紧密接触,在煤样与探头之间涂抹少量凡士林进行耦合。超声波测试仪装置和工作原理示意图如图 2、图 3 所示。



图 2 非金属超声波检测分析仪

Fig. 2 Non-metallic ultrasonic testing analyzer

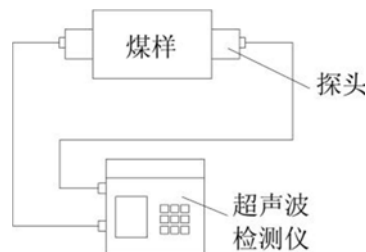


图 3 超声波检测仪工作示意图

Fig. 3 Ultrasonic detector work diagram

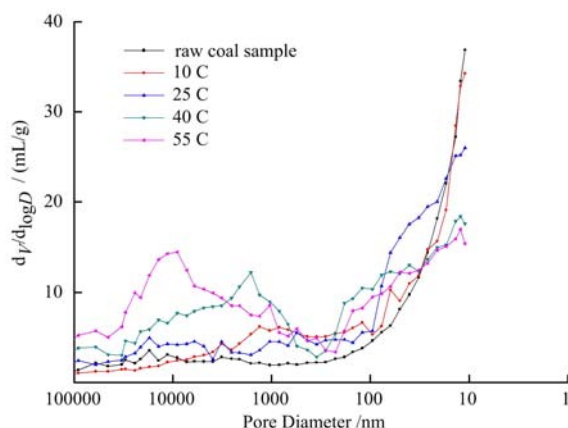


图 4 煤样浸泡前后孔隙结构分布图

Fig. 4 Pore structure distribution of coal samples before and after soaking

($100\text{nm}\geq D>10\text{nm}$),微孔($D\leq 10\text{nm}$)四种类型。

图 4 为煤样浸泡前后孔隙结构分布图。由图 4 可以看出,随着浸泡温度的增加,微孔、过渡孔的含量逐渐减少,而中孔、大孔的含量逐渐增加,孔径分布逐渐由“单峰态”变化为“双峰态”特征,孔隙结构分布不均匀。结合煤样浸泡后电镜扫描结果(图 5)可以看出,在微观尺度下,浸泡后煤样孔隙尺寸随着温

1.3.3 单轴压缩实验

单轴压缩实验在 YAW-2000 液压伺服试验机上进行,实验过程采用轴向位移控制方式,加载速率恒定在 0.01mm/s ,实验前,对煤样进行超声波检测,剔除波速离散性较大的煤样,选取 25 个直径和高度误差均小于 $\pm 0.05\%$ 的标准煤样,分为 5 组,每组 5 个煤样。

2 实验结果与分析

2.1 孔隙率变化规律

在压汞法实验基础上,采用 Wasburn 公式^[10]评估煤样的孔径分布和总孔隙。根据霍多特方案^[11],将煤中孔隙划分为大孔($D>1000\text{nm}$),中孔($1000\text{nm}\geq D>100\text{nm}$),过渡孔

度增加而增大,且孔隙尺寸大小分布不均匀。可以看出压汞实验与电镜扫描结果一致,即随着浸泡温度增加,煤样孔隙尺寸逐渐增加,孔隙结构分布逐渐不均匀。但煤样浸泡前后总孔隙率与浸泡温度的关系如何变化,需进一步分析。

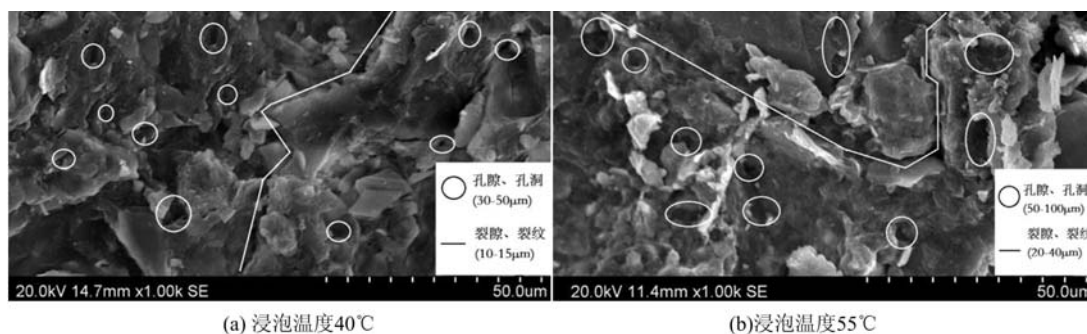


图5 浸泡后煤样电镜扫描图

Fig. 5 Electron microscopy of coal samples after soaking

通过压汞实验,得到煤样浸泡前后总孔隙率随浸泡温度的变化规律,见图6。从图6可以看出煤样总孔隙率曲线呈上升趋势,原煤样的孔隙率为11%,经浸泡温度为10°C、25°C、40°C、55°C的SDS水溶液浸泡后煤样的总孔隙率为12%、33%、43%、57%,可见,随着浸泡温度的增加,煤样总孔隙率逐渐增加,说明SDS水溶液对煤样的内部损伤程度也随温度增加而增加,可通过下列纵波波速实验给予证明。

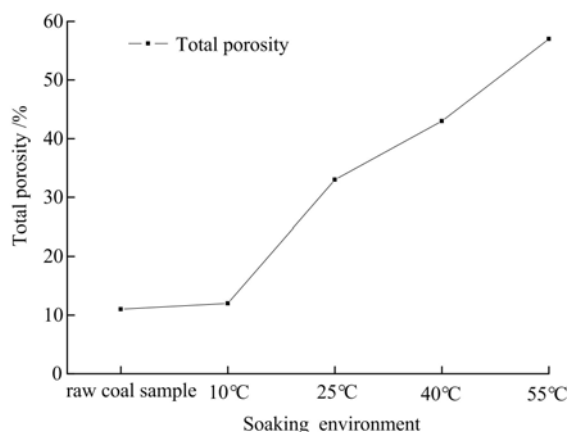


图6 煤样总孔隙率随浸泡温度的变化规律

Fig. 6 The change of total porosity of coal samples with immersion temperature

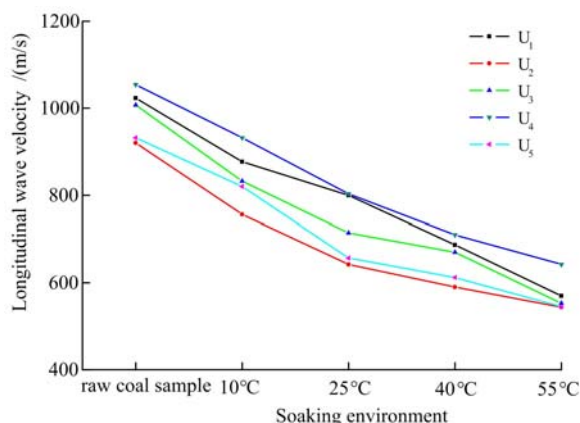


图7 煤样纵波波速随温度的变化曲线

Fig. 7 Longitudinal wave velocity curve of coal samples with temperature

2.2 纵波波速变化规律

首先,对编号为 $U_1 \sim U_5$ 的5个浸泡前标准原煤样进行超声波检测,记录数据,将烘干箱温度调节至10°C,放入SDS水溶液并保持一段时间,使SDS水溶液温度达到10°C,将烘干后煤样放入10°C溶液中浸泡48h后取出,放在105°C烘干箱中烘干24h后,对煤样进行超声波检测。按照上述步骤依次将煤样放入25°C、40°C、55°C的SDS水溶液中分别浸泡48h,烘干后,记录数据,进行超声波检测,测出纵波波速,测量过程中需进行多次并取平均值,实验结果见图7。

图7为煤样的纵波波速随浸泡温度的变化曲线,从图中可以看出,随着浸泡温度的增加,煤样 $U_1 \sim U_5$ 的曲线均呈下降趋势,原煤样的平均纵波波速为987m/s,经浸泡温度为10°C、25°C、40°C、55°C的SDS水溶液浸泡后煤样的平均纵波波速分别为843m/s、723m/s、654m/s、571m/s,说明随着浸泡温度的增加,煤样纵波波速逐渐减弱。产生这种现象的原因主要是:煤样在SDS水溶液的浸泡下,由于SDS具有固定的亲水端和疏水端,SDS水溶液吸附在煤样表面,并在煤样表面形成固-液界面,使得SDS分子与煤中大分子发生化学反应,导致煤样表面分子原子等的重新排列,化学键发生断裂或形成新的化学

键,从而导致煤中原始微孔隙、孔洞等缺陷不断萌生、扩展,且随着浸泡温度的增加,这种反应更加剧烈,煤样孔隙率逐渐增大,这与压汞实验结果一致。煤样的孔隙率越大,纵波沿测试方向传播遇到孔隙、孔洞等微缺陷时将发生反射、绕射以及折射现象越严重,使得波的传播距离相对增加,导致纵波波速降低,这与文献[12]的研究结果一致。

2.3 单轴压缩实验结果分析

为了避免煤样差异对实验结果造成影响,选取 5 组,每组 5 个标准煤样,1 组作为空白对照样,其他 4 组分别放入浸泡温度为 10℃、25℃、40℃、55℃的 SDS 水溶液中浸泡 48h,取出后放在 105℃烘干箱中烘干 24h,对烘干煤样进行单轴压缩实验。由于煤样是由形状、大小各异的块状颗粒叠压而成,形成的原始微裂隙、孔洞及颗粒胶结物等各不相同^[13],单轴压缩实验得到的结果离散性也较大,因此,为了简化后续分析,对每组煤样的测试结果选取平均值作为实验结果,见表 1,并绘制应力—应变曲线,见图 8。

表 1 单轴压缩实验结果

Tab. 1 The results of uniaxial compression experiment

组数	1	2	3	4	5
σ_m/MPa	11.58	9.11	8.35	7.59	6.73
E/MPa	1485	574	510	447	356

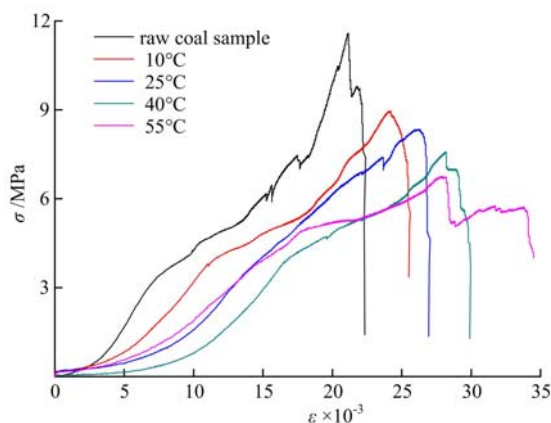


图 8 煤样应力—应变曲线随温度变化的规律

Fig. 8 Variation of stress-strain curve of coal sample with temperature

由图 8 可知,整体上看,浸泡前后煤样的应力—应变曲线可将整个压缩过程分为压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段和峰后应变软化阶段。从原煤样的应力—应变曲线可以看出,原煤样的平均峰值强度和弹性模量分别为 11.58MPa、1485MPa,峰值强度最大,峰值前变形几乎是线弹性的,局部出现 1~2 次锯齿状波动,这是由于在压缩过程中煤样表面开始剥落,并伴随着响亮的破裂声,支撑能力降低,应力—应变曲线突然下降,而随着继续加载,煤样承受荷载能力增加,应力—应变曲线上升,当强度达到峰值强度时,煤样彻底破坏^[14]。从其他 4 条应力—应变曲线可以看出,浸泡温度为 10℃时,平均峰值强度和弹性模量分别为 9.11MPa、574MPa;浸泡温度为 25℃时,平均峰值强度

和弹性模量分别为 8.35MPa、510MPa;浸泡温度为 40℃时,平均峰值强度和弹性模量分别为 7.59MPa、447MPa;浸泡温度为 55℃时,平均峰值强度和弹性模量分别为 6.76MPa、356MPa。随着浸泡温度的增加,煤样平均峰值强度和弹性模量较原煤样分别降低了 2.74MPa、911MPa; 3.23MPa、975MPa; 4.26MPa、1038MPa; 5.12MPa、1129MPa。可见,随着浸泡温度的增加,煤样的峰值强度和弹性模量逐渐减小,主要是因为 SDS 水溶液能够吸附在煤样表面,形成固—液界面,改变界面的化学性质,随着 SDS 水溶液的逐渐渗入,从而引起煤样内部组分发生离子交换、离子转移、溶质迁移等化学反应,可从微细观上改变煤中的矿物质组成与结构,使煤样的原始微裂隙、孔洞等逐渐增加,降低其抵抗变形的能力,进而减弱其峰值强度和弹性模量等宏观力学性质。

3 SDS 水溶液作用下煤体损伤劣化机理

煤是一种复杂的高分子化合物,表面含有大量的脂肪烃和芳香烃等憎水的非极性基团,从而使煤体表面具有较强的疏水性,水对煤的润湿效果较差。当向水中添加 SDS 阴离子表面活性剂时,因为 SDS 具有带一个负电荷的亲水基,所以 SDS 溶于水后能够与煤体表面发生吸附作用。煤体在吸附过程中,因为煤体表面含有许多微孔隙、孔洞等缺陷,且缺陷表面的原子处在不对称的力场中,所以这些缺陷将

造成煤体表面不平衡,煤体表面产生过剩的自由能。为使表面能降低,煤体表面的分子会自发地利用其未饱和的自由分子来捕获 SDS 分子,使之在界面上富集,形成固-液界面的吸附。煤体表面对 SDS 的吸附主要包括物理吸附和化学吸附。物理吸附主要是范德华力,吸附发生时,SDS 与煤体表面组成均不会改变。化学吸附主要是 SDS 与煤体表面间发生化学作用,包括电子交换、电子转移或共存,从而导致煤体表面原子的重新排列,化学键发生断裂或形成新的化学键。

煤体在吸附过程中,煤体中许多原始微孔隙、孔洞等缺陷,在 SDS 水溶液作用下,不断萌生、扩展、互相贯通形成孔隙通道,SDS 分子通过孔隙通道逐渐渗透到煤体内部,在煤体内部形成新的固-液界面。SDS 水溶液在固-液界面上的吸附,就是 SDS 分子或离子自溶液中迁移至固液界面并富集于界面的过程。因为 SDS 分子结构中含有亲水基和疏水基,所以 SDS 分子容易从溶液内部迁移而富集于固-液界面而发生界面吸附。当界面发生吸附后,必然改变体系的界面状态,影响界面性质,对煤体表面起到一个改性的作用,从而改变煤体物理力学特性。

4 SDS 水溶液作用下受荷载煤样损伤的演化方程

4.1 SDS 水溶液作用下受荷载煤样损伤的本构关系

通过上述单轴压缩实验可以看出,经 SDS 水溶液作用后,煤样的力学强度较原煤样力学强度减弱,随着浸泡温度的增加,煤样的力学强度发生了不同程度的降低,煤样损伤程度也不同。因此,选取弹性模量作为损伤变量,可将煤样受 SDS 水溶液作用后引起的损伤 D_n 定义为:

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (1)$$

式中, E_0 为煤样状态下的弹性模量; E_n 为 SDS 水溶液作用后的弹性模量。

张全胜等^[15]根据 Lemaitre 应变等价原理^[16,17]提出了推广后的应变等价原理,即材料受到力的作用后损伤会发生扩展,任取其中两种损伤状态,则材料在第一种损伤状态下的有效应力作用于第二种损伤状态引起的应变等价于材料在第二种损伤状态下的有效应力作用于第一种损伤状态引起的应变。因此根据文献^[17]的研究,将本文中经 SDS 水溶液作用后煤样的损伤状态作为第一种损伤状态,SDS 水溶液作用后受载引起的损伤状态作为第二种损伤状态,得到煤样的两种损伤状态的本构关系分别为式(2)和式(3):

$$\sigma_n = E_0 \epsilon_n (1 - D_n) \quad (2)$$

$$\sigma = E_n \epsilon (1 - D) \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)可得有 SDS 水溶液作用后受载煤样的应力-应变关系为:

$$\sigma = E_0 \epsilon (1 - D_t) \quad (4)$$

其中,

$$D_t = D_n + D - D_n D \quad (5)$$

式中, D_t 为煤样经 SDS 水溶液作用后受载总损伤; D_n 为 SDS 水溶液作用后损伤; D 为受荷载引起的损伤; $D_n D$ 为耦合项。

4.2 SDS 水溶液作用下受荷载煤样损伤演化方程

由于煤样内部微裂隙、孔洞等缺陷是随机分布的,不可能用单一的特征值来描述其力学性质。假设将煤样介质分成若干个基元体(该基元体大到能包含矿物晶体等微缺陷,小到可视为连续介质力学中的一个质点),则基元体可用 Weibull 分布函数来描述^[18,19],其破坏概率密度函数 $\varphi(\epsilon)$ 的表达式为:

$$\varphi(\epsilon) = \frac{m}{\alpha} \left(\frac{\epsilon}{\alpha} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\epsilon}{\alpha} \right)^m} \quad (6)$$

式中, $\varphi(\epsilon)$ 为基元体的破坏概率密度函数; ϵ 为基元体应变; α, m 为 Weibull 分布参数,其中 α 为煤样的物理力学参数,与弹性模量、泊松比等有关, m 为煤样损伤演化特征参数。

煤样的破坏是一种连续损伤的过程,在物理上表现为微观结构的变化,而宏观上表现为内部缺陷的萌生与演化的过程。因此,煤样受荷载时的宏观统计损伤演化方程为:

$$D = \int_0^{\epsilon} \varphi(\epsilon) d\epsilon = 1 - e^{-\frac{1}{m}(\frac{\epsilon}{\epsilon_m})^m} \quad (7)$$

式中, ϵ_m 为峰值应力 σ_m 对应的峰值应变值, $m = 1/\ln\left(\frac{E_0 \epsilon_m}{\sigma_m}\right)$ 。

因此,煤样在 SDS 水溶液作用下受荷载的总损伤演化方程为:

$$D_t = 1 - \frac{E_n}{E_0} e^{-\frac{1}{m}(\frac{\epsilon}{\epsilon_m})^m} \quad (8)$$

由式(8)可知,当分别考虑两种特殊情况时,损伤演化方程为:

$$D_t = \begin{cases} 1 - \frac{E_n}{E_0} & \text{当仅考虑 SDS 水溶液作用时, } \epsilon = 0 \\ 1 - e^{-\frac{1}{m}(\frac{\epsilon}{\epsilon_m})^m} & \text{当仅考虑荷载作用时, } E_n = E_0 \end{cases} \quad (9)$$

5 计算实例与模型验证

根据实验数据和式(9)计算得到的 SDS 水溶液作用下受荷载煤样的损伤演化特征参数(m 和 ϵ_m)及损伤模型演化曲线分别见表 2 和图 9。

表 2 煤样损伤演化特征参数

Tab. 2 Damage evolution characteristic parameters of coal samples					
浸泡环境	原煤样	10℃	25℃	40℃	55℃
$\epsilon_m \times 10^{-3}$	21.2	24.2	26.0	28.3	28.3
m	1	0.73	0.65	0.58	0.55

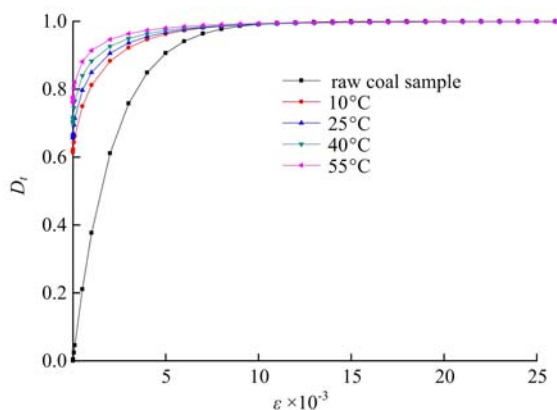


图 9 煤样损伤模型演化曲线

Fig. 9 Damage model evolution curves of coal samples

通过图 9 可以看出:

(1) 煤样的损伤劣化程度随着应变的增加而增大,在受载初期,煤样内部的微孔隙、孔洞等缺陷受压逐渐闭合,使得煤样的孔隙率逐渐减小,密度逐渐增加,表现为压密阶段;之后煤样处于线弹性阶段,随着应变继续增加,煤样内部缺陷不断萌生、扩展贯通,损伤劣化速度加快,直到总损伤变量趋于 1,出现了宏观裂纹的过程,煤样的强度达到峰值强度,煤样完全破坏。

(2) 随着浸泡温度的增加,煤样受 SDS 水溶液作用后损伤程度逐渐增加,当煤样受荷载后,随着应变增加,煤样损伤速率先加快后缓慢,

但在同一应变条件下,煤样损伤程度均呈梯度递增。可见,温度对煤样损伤程度的影响较大。

(3) 考虑到温度是煤样损伤过程的一个重要影响因素,因此,对浸泡温度(T)与煤样受 SDS 水溶液作用的损伤变量(D_n)之间的关系进行拟合,见图 10。得到的拟合方程为:

$$D_n = 0.157 e^{(x/75.857)} + 0.435 \quad (R^2 = 0.995) \quad (10)$$

(4) 为了验证损伤演化模型的可靠性,后续实验研究了增加浸泡温度对煤样损伤的影响,通过单轴压缩实验进行验证,实验结果见表 3、图 11~图 13。

表 3 煤样力学参数及损伤演化特征参数

Tab. 3 Mechanical parameters and Damage evolution characteristic parameters of coal samples

浸泡环境	60℃	70℃	85℃	100℃
σ_m/MPa	5.96	5.63	4.69	2.04
E/MPa	329	265	169	55
$\epsilon_m(10^{-3})$	30.1	32.7	42.1	44.9
m	0.50	0.46	0.39	0.29

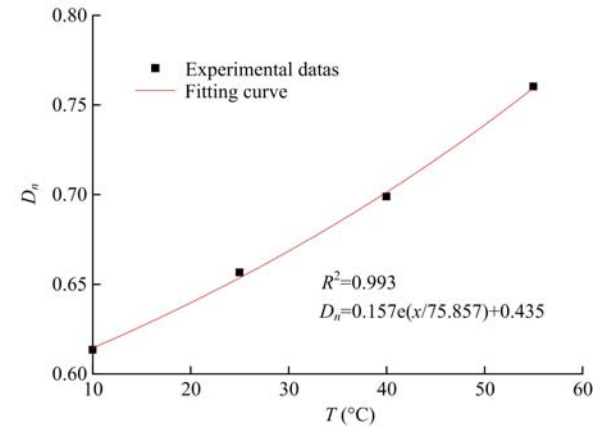


图 10 煤样拟合曲线(10~60℃)

Fig. 10 Fitting curve of coal samples(10~60℃)

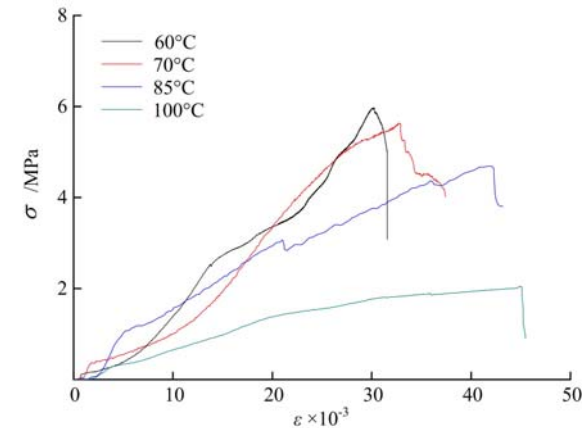


图 11 煤样应力—应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of coal samples

图 11 为煤样应力—应变曲线随浸泡温度(60~100℃)的变化规律,由图可以看出,煤样在单轴压缩破坏过程中,同样经历了四个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段和峰后应变软化阶段,随着浸泡温度的增加,煤样的弹性模量和峰值强度逐渐减小,而峰值应变和总应变呈增加的趋势。

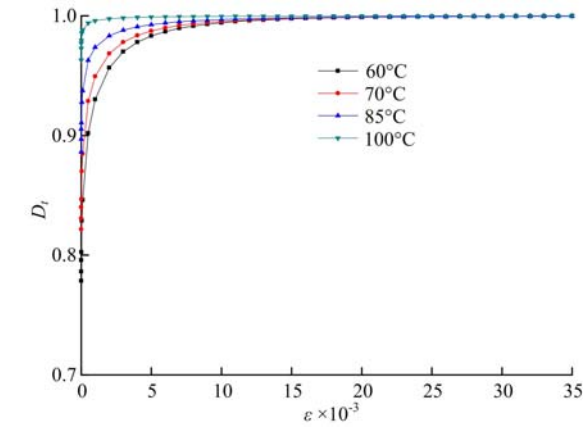


图 12 煤样损伤模型演化曲线

Fig. 12 Damage model evolution curves of coal samples

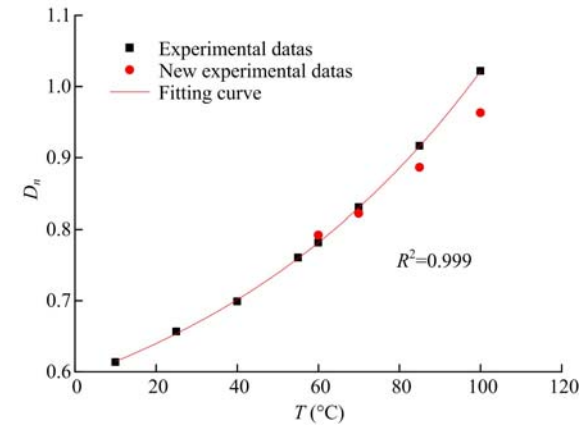


图 13 煤样拟合曲线(60~100℃)

Fig. 13 Fitting curve of coal samples(60~100℃)

利用新的实验数据验证所提出的损伤演化模型(式(9)),得到的损伤模型演化曲线见图 13。由图 13 可以看出,随着浸泡温度的增加,煤样的总损伤逐渐增加,且煤样的损伤劣化程度随应变的增加而逐渐趋于 1。可见,该损伤模型演化曲线与上述演化曲线的变化趋势一致,说明新的实验数据可初步验证所提出的损伤演化模型。

为了进一步验证实验数据与模型的相关性,利用相关性系数公式(11),计算出相关系数 $R^2 = \rho = 0.999$,可见,实验数据与模型非常吻合。

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \quad (11)$$

式中, X 为实验数据; Y 为模型计算的数值。

综上, 根据本文提出的 SDS 水溶液作用下受荷载煤样损伤演化模型与上述一系列实验现象及分析结论十分吻合, 可见, 本文提出的损伤演化模型具有良好的可靠性。

6 结 论

通过对 SDS 水溶液作用下煤样的物理力学特性及损伤机制进行研究, 得到了煤样在 SDS 水溶液作用后的物理力学特性随浸泡温度的变化规律, 并提出了 SDS 水溶液作用下受荷载煤样的损伤模型及损伤机理。主要结论如下:

- (1) 经 SDS 水溶液浸泡后, 煤样孔隙率随浸泡温度增加而增加, 煤样纵波波速、峰值强度及弹性模量随浸泡温度增加而降低, 煤样损伤程度也随之增加。
- (2) SDS 水溶液与荷载的共同作用加剧了煤样的总损伤程度, 表现出明显的非线性特征, 煤样损伤在微观上表现为矿物质组成和结构的改变, 宏观上表现为煤样力学强度的降低及抵抗破坏的能力减弱;
- (3) 运用新的浸泡实验结果验证所提出的损伤演化模型, 实验结果与损伤演化模型十分吻合, 相关系数 $R^2 = 0.999$, 可见, 该损伤演化模型具有良好的可靠性。

参考文献:

- [1] 凌斯祥, 巫锡勇, 孙春卫, 等. 水岩化学作用对黑色页岩的化学损伤及力学劣化试验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(4):511—524 (LING Sixiang, WU Xiyong, SUN Chunwei, et al. Experimental study of chemical damage and mechanical deterioration of black shale due to water-rock chemical action[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(4):511—524 (in Chinese))
- [2] 韩铁林, 陈蕴生, 师俊平. 化学腐蚀后砂岩三轴压缩力学特性及其能量机制的试验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(5):694—706 (HAN Tielin, CHEN Yunsheng, SHI Junping. Experimental study of mechanical properties and energy mechanism of sandstone subjected to chemical erosion and tri-axial compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5):694—706 (in Chinese))
- [3] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 化学腐蚀下三峡花岗岩的破裂特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(5):817—821 (CHEN Sili, FENG Xiating, LI Shaojun. The fracture behaviors of three gorges granite under chemical erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5):817—821 (in Chinese))
- [4] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2):3607—3617 (WANG Wei, LIU Taogen, LU Jun, et al. Experimental study of influence of water-rock chemical interaction on mechanical characteristics of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2):3607—3617 (in Chinese))
- [5] Ju Yiwen, Luxbacher Kray, Li Xiaoshi. Micro-structural evolution and their effects on physical properties in different types of tectonically deformed coals[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 364—375.
- [6] 苗胜军, 蔡美峰, 冀东, 等. 酸性化学溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5):1137—1144 (MIAO Shengjun, CAI Meifeng, JI Dong, et al. Aging features and mechanism of Granite's damage under the action of acidic chemical solutions[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5):1137—1144 (in Chinese))
- [7] 韩铁林, 陈蕴生, 师俊平, 等. 水化学腐蚀对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2):3065—3072 (HAN Tielin, CHEN Yunsheng, SHI Junping, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone subjected to hydrochemical erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2):3065—3072 (in Chinese))

- [8] 丁梧秀, 陈建平, 徐桃, 等. 化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7):1825—1830 (DING Wuxiu, CHEN Jianping, XU Tao, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone during chemical erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7):1825—1830 (in Chinese))
- [9] 丁梧秀, 冯夏庭. 化学腐蚀下裂隙岩石的损伤效应及断裂准则研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6):899—904 (DING Wuxiu, FENG Xiating. Damage effect and fracture criterion of rock with multi-preexisting cracks under chemical erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6):899—904 (in Chinese))
- [10] 杜守继, 马明, 陈浩华, 等. 花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11):1803—1806 (DU Shouji, MA Ming, CHEN Haohua, et al. Testing study on longitudinal wave chearacteristics of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11):1803—1806 (in Chinese))
- [11] Gregg S J, Sing K S W. Adsorption surface area and porosity(2nd ed)[M]. London: Academic Press, 1982.
- [12] 霍多特 B B. 宋士钊, 王佑安 译. 煤与瓦斯突出[M]. 北京: 中国工业出版社, 1996:27—30 (Hototte B B. SONG Shizhao, WANG Youan, translation. Outburst of coal and gas[M]. Beijing: China Industry Press, 1996:27—30 (in Chinese))
- [13] 夏冬, 常宏, 卢宏建, 等. 浸水时间对饱水岩石纵波波速影响的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(1):68—71 (XIA Dong, CHANG Hong, LU Hongjian, et al. The experiment research for the influence of immersion time on wave velocity of saturated rocks[J]. Mining R & D, 2016, 36(1):68—71 (in Chinese))
- [14] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰, 等. 煤岩强度离散性及三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10):1763—1766 (YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie, et al. Experimental study on strength discreteness and triaxial compression of coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10):1763—1766 (in Chinese))
- [15] 刘刚, 李明. 煤岩单轴与三轴压缩试验研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(7):4—6 (LIU Gamg, LI Ming. Experimental study of coal rock uniaxial and triaxial compression[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(7):4—6 (in Chinese))
- [16] 张全胜, 杨更社, 任建喜, 等. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1):30—34 (ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi, et al. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1):30—34 (in Chinese))
- [17] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(1):233—245.
- [18] 勒迈特 J 著. 陶春虎 译. 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996 (Lemaitre J. TAO Chunhu translation. Journal of damage mechanics tutorial[M]. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese))
- [19] 张慧梅, 雷利娜, 杨更社. 基于 Weibull 统计分布的岩石损伤模型[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(3):29—32 (ZHANG Huimei, LEI Lina, YANG Gengshe. Research on rock statistical damage model and determination of parameters[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2014, 29(3):29—32 (in Chinese))
- [20] 唐欣薇, 周元德. 基于改进 Weibull 分布模型的岩石单轴压缩变形破裂规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1):2802—2807 (TANG Xinwei, ZHOU Yuande. Study of rock uniaxial compeission deformation and failure character based on an improved Weibull distribution model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1):2802—2807 (in Chinese))

Experimental study of physical and mechanical characteristics and damage evolution of low-rank coal subjected to action of SDS aqueous solution

AN Wen-bo¹, WANG Lai-gui¹, LIU Xiang-feng¹, LI Xi-lin², CHEN Qiang¹

(1. College of Mechanics Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of SDS aqueous solution on the physical and mechanical characteristics and the damage degree of low-rank coal, adopting sodium dodecyl sulfate (SDS) aqueous solution as organic solution, and low rank coal body (Fuxin long flame coal) as study object, through scanning electron microscope (SEM), mercury injection experiment, longitudinal wave velocity experiment and uni-axial compression experiment, the microscopic pore structure, porosity, longitudinal wave velocity, peak strength and elastic modulus of coal samples were characterized before and after soaking in SDS aqueous solution; the variation pattern of physical and mechanical properties of coal samples subjected to action of SDS aqueous solution was analyzed with the variation of immersion temperature; the damage evolution model of loaded coal sample subjected to action of SDS aqueous solution was established, and the damage mechanism of coal sample was discussed. Results show that (1) After immersion in SDS aqueous solution, the micro pore distribution is not uniform, the total porosity of coal samples increases with the increase of soaking temperature; when temperature is 55℃, the total porosity of coal samples is 57%, which is increased by 46% compared with the total porosity of raw coal sample; the longitudinal wave velocity, peak intensity and elastic modulus of coal samples decline with the increase of soaking temperature, the longitudinal wave velocity, peak intensity and elastic modulus are 571m/s, 6.73MPa, 356MPa, respectively, compared with the raw coal sample were reduced by 416m/s, 5.12MPa, 1129MPa; (2) The combination of SDS aqueous solution and load that intensification the total damage degree of coal samples, showing a distinct non-linear characteristic, the damage of coal samples is microscopic manifestation of the change process of mineral composition and structure, and the macroscopic manifestation is the decrease of the mechanical strength of coal samples and the weakening of resistance to damage. (3) Using the results of new immersion experimental to verify the damage evolution model, the experimental results are in good agreement with the damage evolution model, correlation coefficient is 0.9999. It can be seen that the damage evolution model has good reliability.

Keywords: SDS aqueous solution; low-rank coal; physical and mechanical characteristics; damage evolution model