

不同浸润时间下煤岩蠕变力学模型研究^{*}

Studyon Creep Mechanical Models of Coal and Rock under Different Infiltration Times

张智敏

(中铁一院集团 陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要:以煤岩为研究对象,进行不同浸润时间下的单轴压缩蠕变试验。试验表明:煤岩在轴向应力加载瞬间,产生瞬时弹性应变,接着出现衰减、稳定蠕变,当加载应力高于长期强度时,表现出加速蠕变行为;通过等时应力-应变曲线求拐点的方式,确定煤岩长期强度,随着浸润时间的增长而递减。基于煤岩蠕变的黏弹塑性,确定基础蠕变模型,利用考虑损伤的 Hooke 体描述煤岩瞬时弹性应变,分数阶黏滞体表征黏弹性应变,分数阶黏塑性体反映黏塑性应变,构建一个新的改进后的煤岩蠕变力学模型。结果表明:改进后模型对煤岩蠕变曲线具有良好模拟效果,能较为准确反映煤岩在不同浸润时间下的蠕变力学行为。

关键词: 浸润时间; 煤岩; 加速蠕变; 长期强度; 模型

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0039-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.008

ZHANG Zhimin

(China Railway First Institute Group Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Shanxi Xi'an 710043, China)

Abstract: Conduct uniaxial compression creep tests on coal and rock under different infiltration times. The experiment shows that coal rock undergoes instantaneous elastic strain at the moment of axial stress loading, followed by attenuation and stable creep. When the loading stress is higher than the long-term strength, it exhibits accelerated creep behavior; By calculating the inflection point through the isochronous stress-strain curve, the long-term strength of coal and rock is determined, which decreases with the increase of infiltration time. Based on the viscoelastic plasticity of coal rock creep, a basic creep model is determined. The Hooke volume considering damage is used to describe the instantaneous elastic strain of coal rock, the fractional order viscous body represents the viscoelastic strain, and the fractional order viscous plastic body reflects the viscoelastic strain. A new improved mechanical model of coal rock creep is constructed. The results indicate that the improved model has a good simulation effect on the creep curve of coal and rock, and can accurately reflect the creep mechanical behavior of coal and rock under different infiltration times.

Keywords: infiltration time; coal rock; accelerated creep; long-term strength; model

0 引言

采矿工程中,防水隔离煤柱处于水浸润状态同时受顶板荷载作用,蠕变效应显著。随着时间推移蠕变现象愈发明显,易致使煤柱失稳、顶板塌陷等灾害,对矿井巷道运营安全造成威胁^[1-2],由此开展煤岩在水和荷载同时作用下的蠕变特性研究。

目前已有较多煤岩蠕变的研究成果,但针对倾斜变形边坡岩石的研究较少。Brijes 等^[3]开展单轴、

^{*} 基金项目:中国地质调查局二级项目(DD20201119)。

作者简介:张智敏(1987—),男,满族,本科,工程师,

主要研究方向:地质勘察工作。

收稿日期:2023-08-17

岩土力学

三轴煤岩蠕变试验,分析煤岩蠕变破坏机制;李高阳^[4]探索了煤岩蠕变应变、速率及长期强度随浸润时间的变化规律;张天军等^[5]系统分析了不同环境湿度对煤岩蠕变分形、蠕变承载能力的影响规律;王兴开等^[6]分析了煤岩蠕变应变、蠕变速率、长期强度与应力水平之间的关系,在 Burgers 模型基础上,引入一个加速蠕变启动时间的元件,串联得到一个辨识效果较好的非线性蠕变模型;赵建会等^[7]开展不同含水率下的煤岩蠕变试验,在西原模型基础上,引入损伤变量,建立了可体现含水率的蠕变损伤模型。

以贵州毕节市某煤矿为研究背景,进行不同浸润时间下的煤岩单轴压缩蠕变试验。分析蠕变试验结果,基于煤岩蠕变的黏弹塑性,确定基础蠕变模型,利用考虑损伤的 Hooke 体描述煤岩瞬时弹性应变,分数阶黏滞体表征黏弹性应变,分数阶黏塑性体反映黏塑性应变,构建一个新的改进后的煤岩蠕变力学模型。求解模型参数,验证模型的可行性和适用性。

1 煤岩蠕变特征及基础模型择取

众多试验研究^[4,6-7]发现,煤岩在荷载作用下的蠕变特征表现为衰减蠕变和非衰减蠕变,如图 1 所示。曲线①、②分别表示衰减蠕变和非衰减蠕变特征,区域在于应力条件中加载应力 σ 和长期强度 σ_p 的大小差异。当 $\sigma \leq \sigma_p$ 时,表现为衰减蠕变特征, $0 \leq t \leq t_1$ 阶段蠕变速率递减,应变逐渐累积; $t_1 \leq t \leq t_2$ 阶段蠕变速率稳定,应变恒定。当 $\sigma > \sigma_p$ 时,表现为非衰减蠕变特征, $0 \leq t \leq t_1$ 阶段蠕变速率递减,应变逐渐累积; $t_1 \leq t \leq t_2$ 阶段蠕变速率稳定,应变逐渐增长; $t_2 \leq t \leq t_3$ 阶段发生加速蠕变,蠕变速率剧增,应变大幅增长。

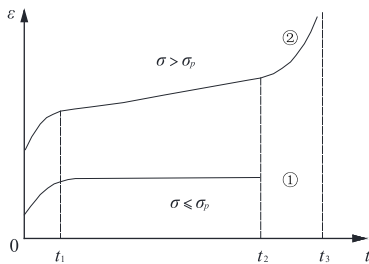


图 1 蠕变特征示意图

Fig. 1 Creep characteristic diagram

图 1 中的应力-应变行为蕴含了黏弹塑性,力学模型应含 Hooke 体、Newton 体和塑性体。尽管目前煤岩蠕变力学模型辨识效果较好,但大多存在公式复杂、参数多的缺陷,本文串联 Hooke 体、Newton 体和带开关功能的塑性体,作为煤岩蠕变的基础模型,其示意图如图 2 所示。

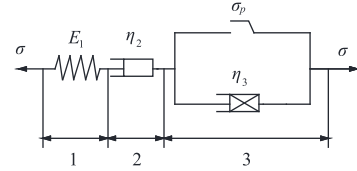


图 2 基础模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the basic model

图 2 中的 Hooke 体用于描述煤岩瞬时弹性变形,Newton 体反映黏弹性行为,带开关的塑性体表征黏塑性变形。

该基础模型的蠕变状态方程为

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \varepsilon_1 = \sigma_1 / E_1 \\ \sigma_2 = \eta_2 \varepsilon_2 \\ \sigma_3 = \sigma_p + \eta_3 \varepsilon_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为总应变; E_1 为瞬时弹性模量; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为图 2 基础模型第 1-3 部分的应力; ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为该模型第 1-3 部分的应变; η_2 和 η_3 分别为该模型第 2、3 部分的黏滞系数。

解析式 (1) 可得

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_2} t & \sigma \leq \sigma_p \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_2} t + \frac{\sigma - \sigma_p}{\eta_3} t & \sigma > \sigma_p \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 即为本文煤岩蠕变基础模型的本构方程。

2 蠕变模型改进

2.1 损伤变量定义

损伤力学理论中有能量损伤和几何损伤^[8]的定义方式,由于几何损伤中有效承载面积的变化难以确定,故采用基于弹性模量变化的能量损伤来定义损伤变量 D 。认为矿井巷道煤柱在受扰动前,煤岩岩体的弹性模量存在初始值 E_0 ,之后在外界因素的影响下逐渐衰

减至一个稳定值 E_∞ , 故定义: (1) 当时间 $t=0$ 时, $D=0$, 对应无损状态; (2) 当 $t \rightarrow \infty$, $D=1$, 对应完全损伤状态。随着 t 的增长, D 逐渐趋于 1。

由此构建损伤演化方程

$$D(t) = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} (1 - e^{-\delta t}) \quad (3)$$

式中: δ 为反映损伤的系数。

假定岩石材料为各向同性损伤, 则弹性模量 $E(t)$ 可表示为

$$E(t) = E_0 [1 - D(t)] \quad (4)$$

卡恰诺夫^[9]提出一维应力状态下的蠕变损伤发展过程可表示为

$$\dot{D}(t) = C \left[\frac{\sigma}{1 - D(t)} \right]^\nu \quad (5)$$

式中: C 和 ν 为材料参数。

积分式 (5) 可得蠕变破坏时间 t_e 为

$$t_e = [C(\nu + 1)\sigma^\nu]^{-1} \quad (6)$$

联立式 (5)、(6) 可得

$$D(t) = 1 - (1 - t/t_e)^{1/(\nu+1)} \quad (7)$$

2.2 考虑损伤的 Hooke 体

当应力超过长期强度后, 岩石材料还会表现有加速蠕变行为, 此时损伤急剧累积^[10]。假定岩石材料在应力水平低于长期强度时的损伤忽略不计, 则煤岩在无损状态下 Hooke 体的本构方程为

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_0} \quad (8)$$

当应力水平高于长期强度时, 依据 Lemaitre 等效应力原理^[11], 将式 (4) 代入式 (8) 可得

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_0 [1 - D(t)]} \quad (9)$$

再将式 (7) 代入式 (9) 可得

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma [1 - C(\nu + 1)\sigma^\nu t]^{-\nu+1}}{E_0} \quad (10)$$

式 (10) 即为应力超过长期强度时的考虑损伤的 Hooke 体的本构方程。

2.3 分数阶黏滞体

分数阶微积分在物理、数学、力学等研究领域广泛应用, 其有多种定义方法, Riemann-Liouville (简称 R-L) 理论^[12]因其形式简练、效果良好而最为常用。假定函数 $f(t)$ 在区间 $[\alpha, +\infty)$ 上 α 阶可积, 则 $f(t)$ 的 R-L 分数阶导数定义为

$$D_t^\alpha f(t) = \frac{d^m}{dt^m} J_t^{m-\alpha} f(t) \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{d^m}{dt^m} \int_0^t (t-s)^{m-\alpha-1} f(s) ds$$

式中: $m = [\alpha]$, $m - \alpha$ 为分数阶阶数。

Gamma 函数可表示为

$$\Gamma(m-\alpha) = \int_0^\infty t^{m-\alpha-1} e^{-t} dt \quad (12)$$

当 $f(t)$ 在 $t=0$ 附近可积, 且 $\alpha \in [0, 1]$ 时,

存在 $\hat{f}(t)$ 表示 $f(t)$ 的拉普拉斯变换, 则 R-L 分数阶微积分的拉普拉斯变换公式为

$$L[D_t^\alpha f(t)] = s^\alpha \hat{f}(s) \quad \forall \alpha > 0 \quad (13)$$

参考 Blair 等^[13]引入一种可变软体元件, 用于描述介于理想固体和流体间某种状态, 其本构为

$$\sigma = \eta_2^\alpha \frac{d^\alpha \varepsilon_2}{dt^\alpha} \quad (14)$$

式中: η_2^α 为该黏滞体中的黏滞系数。当 $\alpha=0$ 时, 可描述理想固体; 当 $\alpha=1$ 时, 式 (14) 退化为 Newton 体, 可描述理想流体; 当 $0 < \alpha < 1$ 时, 可描述介于理想固体和流体间某种状态。

当 σ 保持不变时, 对式 (14) 进行 R-L 分数阶积分可得

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{\eta_2^\alpha} \frac{t^{\alpha_1}}{\Gamma(1+\alpha)} \quad 0 \leq \alpha_1 \leq 1 \quad (15)$$

式中: α_1 为分数阶黏滞体的阶数, 式 (15) 即分数阶黏滞体的本构方程。

取 σ 为 10 MPa, η_2^α 为 100 MPa · h 时, 代入式 (15), 绘制不同 α 值的蠕变曲线, 如图 3 所示。

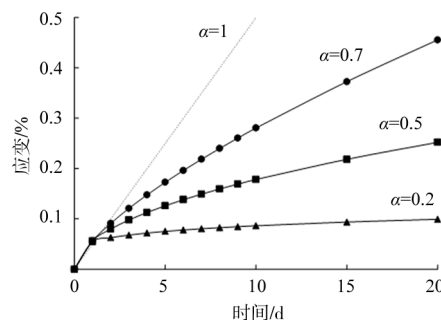


图 3 分数阶黏滞体蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves of fractional viscous body

由图 3 可看出, α 值的不同使得蠕变曲线形态发生变化, 随着 α 值在 $[0, 1]$ 区间的递减, 蠕变曲

岩土力学

线逐渐向时间横轴靠拢,非线性特征愈发明显。

2.4 分数阶黏塑性体

采用连续损伤理论,依据 Lemaitre 应变等价性假设^[11],通过损伤变量 $D(t)$ 来描述黏塑性体黏滞系数的劣化,将软体元件的本构方程写为式(13)。需注意的是,当应力水平超过了长期强度,损伤分数阶黏塑性体才会表现出黏塑性变形,由此应将 σ 替换成 $(\sigma - \sigma_p)$ 。图2中带开关的黏塑性体的应力表示为

$$\sigma_3 = \sigma_s + \sigma_n \quad (16)$$

式中: σ_n 表示黏塑性体的应力, σ_s 定义为

$$\sigma_s = \begin{cases} \sigma_3 & \sigma_3 \leq \sigma_p \\ \sigma_p & \sigma_3 > \sigma_p \end{cases} \quad (17)$$

当应力超过长期强度后,加速蠕变阶段中黏塑性应变开始大量累积,应力未达长期强度时,黏塑性应变为0。

当 $\sigma > \sigma_p$ 时,黏塑性体中的总应力 σ_3 为

$$\sigma_3 = \sigma_p + \eta_3^\alpha \frac{d^{\alpha_2} \varepsilon_3}{dt^{\alpha_2}} \quad (18)$$

式中: η_3^α 为该黏塑性体中的黏滞系数; α_2 为分数阶黏塑性体的阶数。

对式(18)进行 R-L 型分数阶积分可得

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma - \sigma_p}{\eta_3^\alpha} \frac{t^{\alpha_2}}{\Gamma(1 + \alpha_2)} \quad 0 \leq \alpha_2 \leq 1 \quad (19)$$

式(19)即为分数阶黏塑性体的本构方程。

2.5 改进后煤岩蠕变力学模型

利用考虑损伤的 Hooke 体描述煤岩瞬时弹性应变,分数阶黏滞体表征黏弹性应变,分数阶黏塑性体反映黏塑性应变,三者相结合来体现煤岩蠕变的黏弹塑性。在图2模型的基础上,得到改进后煤岩蠕变力学模型,如图4所示。

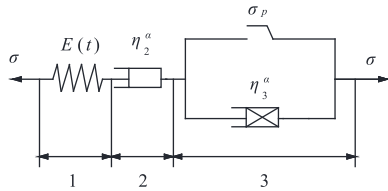


图4 改进后煤岩蠕变力学模型示意图
Fig.4 Schematic diagram of improved coal rock creep mechanical model

根据图4模型的结构形式,结合式(8)、(10)、(15)和(19),得到改进后煤岩蠕变力学模型方程为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\eta_2^\alpha} \frac{t^{\alpha_1}}{\Gamma(1 + \alpha_1)} & \sigma \leq \sigma_p \\ \varepsilon = \frac{\sigma [1 - C(\nu + 1)\sigma_0^\nu t] \nu + 1}{E_0} + \frac{\sigma}{\eta_2^\alpha} \frac{t^{\alpha_1}}{\Gamma(1 + \alpha_1)} \\ \quad + \frac{\sigma_0 - \sigma_p}{\eta_3^\alpha} \frac{t^{\alpha_2}}{\Gamma(1 + \alpha_2)} & \sigma > \sigma_p \end{cases} \quad (20)$$

式(20)即为本文改进后煤岩蠕变力学模型的本构方程。

3 模型验证

3.1 煤岩蠕变试验

贵州毕节某煤矿,取样后运回试验室加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱样,上下两端打磨光滑。由于煤柱所受荷载来源于顶板,处于单轴受压状态,故采用 DNS200 型电子万能试验机进行单轴蠕变压缩试验。蠕变试验之前,取3组试样单轴抗压强度试验平均值 σ_c 为 25.6 MPa,以 $0.25\sigma_c$ 、 $0.4\sigma_c$ 、 $0.55\sigma_c$ 、 $0.7\sigma_c$ 为蠕变试验的逐级加载荷载,每一级加载时间设为 30 h^[4]。设三种含水状态作为控制因素,其浸润时间分别为 0、1 和 3 d,开展蠕变试验时每种含水状态设两组平行样。浸润完成后,用保鲜膜密封试样后进行试验,试验结果如图5所示。

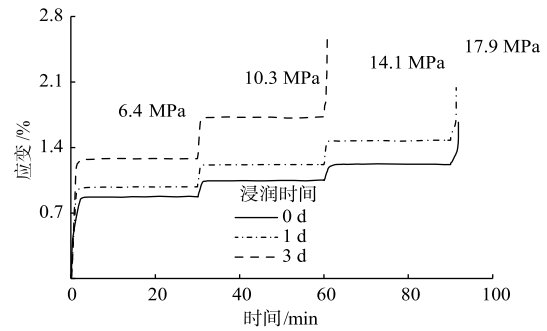


图5 蠕变试验结果
Fig.5 Creep test results

由图5可看出,煤岩在加载瞬间表现出瞬时弹性应变,第一级加载下的瞬时弹性应变最大。浸润时间达到 3 d 时,第三级加载便发生加速蠕变行为;而浸润时间为 0 和 1 d 工况下均是第四级加载发生加速蠕变;且浸润时间越长,应变值越大,这说明浸润时间的增长促进煤岩蠕变发展。

3.2 长期强度

将图 5 蠕变曲线进行玻尔兹曼线性叠加^[4,6-7]处理, 得到分别加载蠕变曲线, 在此图基础上择取 0.1、5、10、15、20、25 和 30 h 共 7 个时刻点的蠕变数据, 绘制等时应力-应变曲线 (图 6), 通过取拐点^[14]的方式确定长期强度, 以浸润时间 1 d 为例。

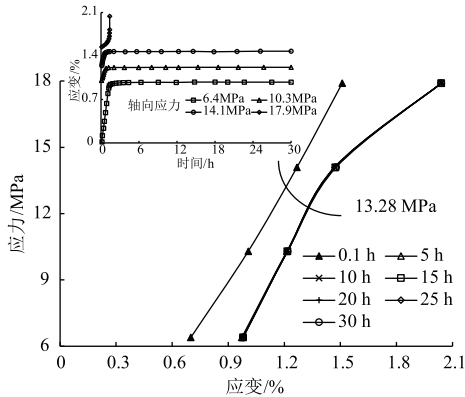
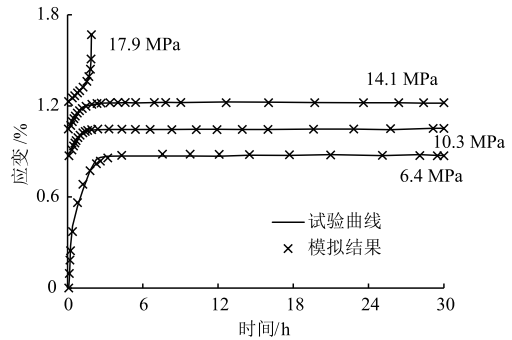


图 6 等时应力-应变曲线
Fig. 6 Isochronous stress-strain curves

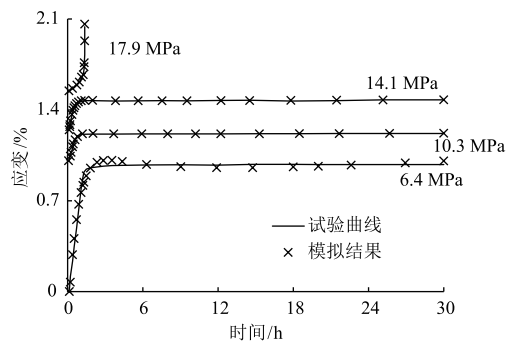
由图 6 可看出, 等时应力-应变曲线的右侧曲线簇表现出明显非线性特征, 通过取拐点的方式确定长期强度为 13.28 MPa。

3.3 参数求解及模拟对比

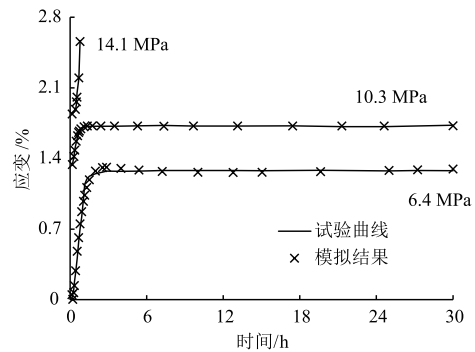
式 (20) 中有 E_0 、 η_2^α 、 η_3^α 、 C 、 ν 、 α_1 、 α_2 和 σ_p 这 8 个参数, 其中 σ_p 通过等时应力-应变曲线求拐点的方式确定, 浸润时间 0、1 和 3 d 下煤岩的 σ_p 分别为 14.59、13.28、10.47 MPa, σ_p 随着浸润时间的增长而递减, 其余参数通过数学软件 1stOpt, 基于遗传算法对煤岩蠕变试验数据进行模型解析, 模拟效果对比如图 7 所示, 模型参数见表 1。



(a) 浸润时间为 0 d



(b) 浸润时间为 1 d



(c) 浸润时间为 3 d

图 7 模拟效果对比图
Fig. 7 Comparison of simulation effects

表 1 蠕变模型参数
Table 1 Creep model parameters

浸润时间/d	应力/MPa	E_0/MPa	$\eta_2^\alpha/(\text{MPa} \cdot \text{h})$	$\eta_3^\alpha/(\text{MPa} \cdot \text{h})$	C	ν	α_1	α_2	R^2
0	6.4	503.94	82.47	—	—	—	0.13	—	0.989 2
	10.3	465.80	62.02	—	—	—	0.17	—	0.990 3
	14.1	408.72	45.29	—	—	—	0.19	—	0.987 8
	17.9	324.58	30.85	7.63	12.85	0.04	0.27	0.07	0.986 9
1	6.4	424.87	64.13	—	—	—	0.22	—	0.985 2
	10.3	374.58	48.52	—	—	—	0.27	—	0.991 2
	14.1	315.83	36.19	—	—	—	0.17	—	0.985 9
	17.9	274.61	29.73	4.84	11.52	0.07	0.40	0.04	0.987 4
3	6.4	385.62	59.30	—	—	—	0.24	—	0.987 9
	10.3	294.72	40.27	—	—	—	0.20	—	0.991 1
	14.1	189.355	26.67	4.18	5.84	0.15	0.17	0.02	0.985 3

岩土力学

由图7可看出,所建改进蠕变力学模型对不同浸润时间下煤岩蠕变过程的识别效果较好,准确度较高,平均 R^2 达到0.9880。

3.4 模型适用性验证

引用文献[15]中的陕北煤矿煤岩蠕变数据,利用所建模型进行模拟,得到模拟效果对比图如图8所示。模拟结果与试验曲线吻合较好,平均 R^2 达到0.9863,结合图7可知,改进后模型能较为准确反映煤岩在不同浸润时间下的蠕变特性。

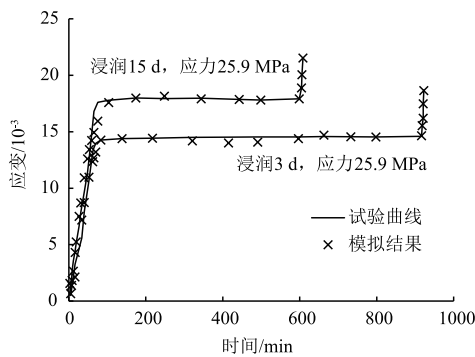


图8 模拟效果对比图
Fig. 8 Comparison of simulation effects

4 结 论

(1) 开展不同浸润时间下的煤岩单轴压缩蠕变试验,试验发现煤岩在轴向应力加载瞬间,产生瞬时弹性应变,接着出现衰减、稳定蠕变,当加载应力高于长期强度时,表现出加速蠕变行为,此时损伤累积,应变剧增。

(2) 利用考虑损伤的Hooke体描述煤岩瞬时弹性应变,分数阶黏滞体表征黏弹性应变,分数阶黏塑性体反映黏塑性应变,三者相结合构建一个新的改进后煤岩蠕变力学模型。

(3) 验证了改进后模型识别能力较强,平均 R^2 超过0.98,证明改进后模型的可行性和适用性。

参 考 文 献

[1] 王中伟. 综采面高强度采动影响下浸水煤柱的稳定性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.

[2] 张村, 韩鹏华, 王方田, 等. 采动水浸作用下矿井地下水库残留煤柱稳定性[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 220-227, 247.

[3] BRIJES, MISHRA, PRIYESH, et al. Uniaxial and triaxial single and multistage creep tests on coal-measure shale rocks-Science Direct[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 137(1): 55-65.

[4] 李高阳. 水对煤岩蠕变力学特性影响的试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.

[5] 张天军, 郭毅, 庞明坤, 等. 不同环境湿度下承压破碎煤岩蠕变变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1037-1044.

[6] 王兴开, 夏才初, 朱哲明, 等. 单级荷载下极软煤岩长期蠕变规律及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2078-2088, 2098.

[7] 赵建会, 许鸿忆. 不同含水率孔周煤岩体蠕变试验及蠕变模型研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(12): 35-41.

[8] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[9] 卡恰诺夫. 连续介质损伤力学引论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.

[10] 周星越. 基于岩石统一强度理论的损伤本构模型建立与数值试验研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2022.

[11] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 1985, 107(1): 83-89.

[12] 胡浩. 基于分数阶微积分的岩石非线性蠕变本构模型研究及其在Flac 3D中的二次开发[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所, 2019.

[13] BLAIR G W S. Analytical and integrative aspects of the stress-strain-time problem[J]. Journal of Scientific Instruments, 1944, 21(5): 80-84.

[14] 李良权, 徐卫亚, 王伟, 等. 基于流变试验的向家坝砂岩长期强度评价[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 127-136, 143.

[15] 张慧梅, 王赋宇, 李焕容, 等. 不同浸润时间和应力水平下煤(岩)蠕变损伤模型研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 399-407.