

基础研究

考虑强度参数弱化非线性损伤本构模型研究

陈清通^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;

2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 (煤炭科学研究总院), 北京 100013)

[摘 要] 为了研究不同孔隙水压作用下砂岩蠕变特性和岩石强度参数的劣化规律, 通过 MTS815.02 试验机开展不同孔隙水压条件下的砂岩蠕变试验, 根据 Lemaitre 应变等效基本假定推导出关于强度参数劣化的损伤变量公式, 并结合基本西原体模型建立了砂岩加速蠕变阶段的非线性损伤本构模型, 得出以下结论: 在孔隙水压作用下, 岩石的应变响应更加灵敏; 随着水压的增大岩石蠕变加速阶段的蠕变速率显著增大, 说明水压对岩石强度参数具有削弱作用; 同时当砂岩处于高应力状态下, 即应力超过长期强度时岩石的强度力学参数存在明显的弱化, 不再是一个定值且随着时间和过应力差变化而变化, 并且受孔隙水压的影响; 最终结合非线性蠕变损伤模型曲线与三轴蠕变试验曲线的良好吻合性, 验证了所建立损伤本构模型的正确性与合理性, 对采空区覆岩稳定性评价尤其是富水地层条件的沉陷区土地重复利用、安全评价具有指导意义。

[关键词] 强度参数; 弱化; 非线性损伤模型; 蠕变; 孔隙水压

[中图分类号] TU458 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2018) 06-0001-05

Nonlinear Damage Constitutive Model Based on Weakening Strength Parameters

CHEN Qing-tong^{1,2}

(1. Safety Institute, China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resource High Effective Mining & Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study weakening principle of rock strength parameters and sandstone creep characters under different water pore pressure, rock creep tests with different water pore water were proceed by MTS815.02 testing machine, damage variable formula of strength parameters weakening was elicited based on basic assumption of Lemaitre strain, nonlinear damage constitutive model of sandstone accelerate creep step was built based on basically Xiyuan model, the following conclusions were put forward, which were about rock strain response was more sensitive under water pore pressure, creep rate increased outstanding during rock creep accelerate step with water pressure increased. As sandstone under high stress state, strength parameters appeared obviously weakening as stress exceed long time strength, and it would not a constant value, but varied with time and stress difference variation, and also influenced by water pore pressure, last validity of damage constitutive model was verified under better congruency between nonlinear creep damage model curves and triaxial creep testing curves, it could referenced for safety evaluation and land reclamation of subsidence zone with water rich layers.

Key words: strength parameters; weakening; nonlinear damage constitutive model; creep; pore water pressure

煤炭资源的开发为工业发展和人民生活水平的提高做出了巨大贡献, 同时也产生了大量的采空区, 采空区的形成导致覆岩底部约束缺失, 应力平衡状态消失, 覆岩在自身重力作用下向采空区方向发生变形、破坏。岩石强度是影响覆岩破坏的诸因素中最重要的因素之一, 水的作用对岩石强度的影响不可忽视。

作为一种特殊的地质构造材料, 岩石内部结构不均匀, 存在大量缺陷^[1-2], 其在外部荷载作用下, 岩石内部缺陷的产生、发育、扩展和贯通之后

所表现出的力学特性具有非线性和各向异性特征, 运用传统弹塑性力学分析很难解决, 引入损伤力学来进一步研究岩石在荷载作用下应力应变之间关系, 而建立岩石损伤模型需要引入损伤变量这一反应材料内部特性的内变量^[3-5]。

为了更好地研究材料内部损伤的变化规律, 需要根据不同损伤过程来选取合适的损伤变量, 从而建立考虑材料损伤的本构关系, 来具体反映材料宏观上受力与变形特征。曹瑞琅^[6]等基于对残余强度修正的思想, 通过 weibull 分布建立岩

[收稿日期] 2018-05-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51674142)

[作者简介] 陈清通 (1983-), 男, 福建上杭人, 助理研究员, 从事采空区勘查评估治理相关工作。

[引用格式] 陈清通. 考虑强度参数弱化非线性损伤本构模型研究 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (6): 1-5, 51.

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2018.06.001

石损伤软化统计本构模型，很好地描述了岩石在压缩破裂过程中应力应变关系和残余强度特征。董春亮等^[7]考虑岩石在压缩工程中能量转化和声发射特征建立损伤演化模型，很好地反映了岩石损伤各个过程，使得本构模型更加符合实际工程应用。李天一^[8]等利用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统，对节理岩石进行水-岩耦合三轴试验，基于试验结果，分析强度参数随孔隙水压力增加的变化规律，得出当孔隙水压大于 2MPa 时，黏聚力可能完全丧失。刘再斌^[9]为了研究孔隙水压力对岩石抗剪强度参数的影响，对不同岩性岩石进行了水-岩耦合三轴压缩试验，然后通过最小二乘法计算出不同孔隙水压力作用下黏聚力和内摩擦参数。

虽然前人对于岩石损伤本构模型研究已有很多，但是从强度参数出发，考虑岩石在孔隙水压作用下建立损伤变量的研究就甚少。因此，本文通过对砂岩在不同孔隙水压作用下蠕变试验研究，推导出关于强度劣化的损伤变量，从而建立基于强度参数影响的岩石损伤软化模型，为采空区覆岩破坏尤其是采空区地表稳定性评价提供理论依据。

1 砂岩蠕变试验

采用 MTS815.02 岩石试验机对砂岩进行室内压缩蠕变试验，负荷控制施加围压，以 0.25MPa/s 的加载速率通过油压系统不断给压力室施加围压，到达设定的预定值后，稳定一段时间；将拟施加的轴向荷载分成若干等级，以同样的加载负荷控制速率施加轴压，当轴压达到预定值后，在施加孔隙水压至预定值后，立即读取此时的轴向、径向变形值并记录下来。当变形值基本保持稳定即可施加下一级荷载，三轴蠕变实验所需围压为 20MPa，而孔隙水压分别拟定为 0MPa，5MPa，10MPa 和 15MPa，各级应力水平如表 1 所示。

表 1 各级应力水平 MPa

孔隙水压	第一级	第二级	第三级	第四级	第五级
0	60	70	80	90	0
5	70	80	90	100	5
10	75	90	105	120	10
15	80	95	110	135	15

由于实际岩体往往都是处在三维的应力状态中，且易受高孔隙水压作用的影响，因此很有必要进行带孔隙水压的三轴蠕变实验研究。三轴实验仍采用单体分级加载形式加载，三轴蠕变应力加载以单轴为参考，由于单轴在 0.5 倍偏应力下没有发生流变现象，而且岩石的三轴抗压强度大，为尽可能缩小寻找蠕变发生的应力范围，综合考虑以 0.5 倍

偏应力作为起始加载应力，直到岩石发生蠕变破坏为止，获得的蠕变曲线如图 1 所示。

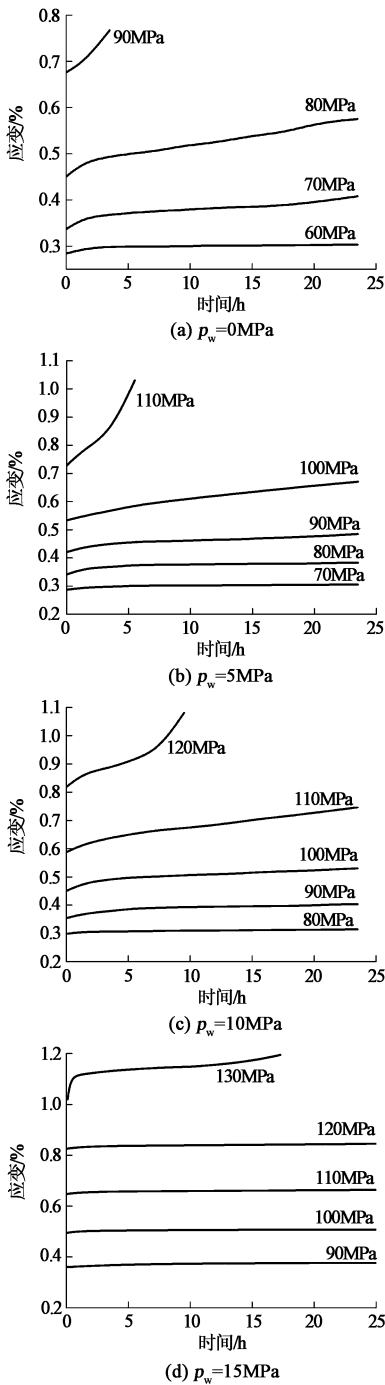


图 1 不同孔隙水压下轴向分阶段蠕变曲线
图 1 中分别给出了砂岩试样在孔隙水压为 0MPa，5MPa，10MPa 和 15MPa 情况下的轴向蠕变变形曲线，每一级应力加载初期都会出现瞬时弹性变形，其量值随着应力水平的提高而增加。孔隙水压 5MPa 和 10MPa 下第一级轴向应变速率分别经过 10.4h 和 15.2h 衰减到零，此时应变不再随时间发展而增长，所施加的应力还未超出长期强度，表现为稳定蠕变。当应力水平高于长期强度时，第三级蠕变曲线，应变经过衰减阶段进入等速蠕变阶段，

蠕变变形稳定发展, 表现为亚稳定蠕变。第四级蠕变曲线, 其所施加的应力已超出长期强度, 变形很快从减速蠕变阶段过渡到等速蠕变阶段。

2 基于强度参数劣化的岩石损伤本构方程

由于岩石本身为损伤体, 在岩石蠕变压缩试验中, 岩石的强度会随着外部荷载作用逐渐劣化, 用岩石强度参数的变化规律便可以较好地反映岩石损伤过程, 而由于孔隙水压作用一定程度上加剧了岩石的损伤进度, 所以在引入损伤变量过程中需要考虑孔隙水压对于损伤变量的影响。

根据 Lemaitre 应变等效基本假定可以得出关于强度参数劣化的损伤变量公式如下:

$$D = 1 - \frac{C^*}{C} \tag{1}$$

式中, D 为损伤变量; C 为岩石黏聚力; C^* 为 t 时刻下岩石黏聚力。

在三轴压缩蠕变试验中, 强度参数黏聚力 C

与时间、应力水平和孔隙水压有关, 且随着时间逐渐减小, 根据文献 [10] ~ [11] 可知, 此时黏聚力不仅与时间 t 和孔隙水压 p_w 有关, 还与外荷载和长期强度之差有关联^[12-13], 即

$$C^* = C(\sigma - \sigma_\infty, t, p_w) \tag{2}$$

式中, σ_∞ 为长期强度; p_w 为孔隙水压; $\sigma - \sigma_\infty$ 为过应力差。

$$C = A \times \exp(-(\sigma - \sigma_\infty)t/B) + E \tag{3}$$

式中, A, B, E 为试验拟合参数。

当施加在岩石上的外界荷载低于某一应力固定值时, 岩石蠕变试验只会产生衰减蠕变阶段, 且此蠕变阶段最终蠕变速率衰减至零, 蠕变变形值达到恒定值; 当施加在岩石上的外界荷载大于此应力值时, 岩石蠕变试验除产生衰减蠕变阶段外, 还存在稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段, 此时将此恒定应力值称为岩石的长期强度值^[14-15]。根据上述原理可以计算出岩石黏聚力与时间 t 和外荷载与长期强度之差, 计算结果如表 2 所示。

表 2 砂岩力学参数和 $(\sigma - \sigma_\infty)t$ 关系

$(\sigma - \sigma_\infty)t /$ (MPa · h)	C / MPa 孔隙水压 0MPa	$(\sigma - \sigma_\infty)t /$ (MPa · h)	C / MPa 孔隙水压 5MPa	$(\sigma - \sigma_\infty)t /$ (MPa · h)	C / MPa 孔隙水压 10MPa	$(\sigma - \sigma_\infty)t /$ (MPa · h)	C / MPa 孔隙水压 15MPa
0	13.32	0	13.32	0	13.32	0	13.32
200	12.95	200	12.75	300	12.52	300	12.48
400	12.54	400	12.26	600	11.87	900	11.74
800	12.02	800	11.89	1200	11.43	1800	11.01
1200	11.73	1600	11.44	1800	11.07	2400	10.59
1600	11.23	2000	11.04	2400	10.66	3000	10.12
2000	10.91	2400	10.56	3000	10.18	3300	9.89

而此时只是考虑了应力和时间对于岩石的共同作用, 根据表 2 和式 (3) 可以拟合出各孔隙水压

下 $(\sigma - \sigma_\infty)t$ 与黏聚力之间的曲线, 如图 2 所示。

图 2 为应用式 (3) 得到的高围压不同孔隙水

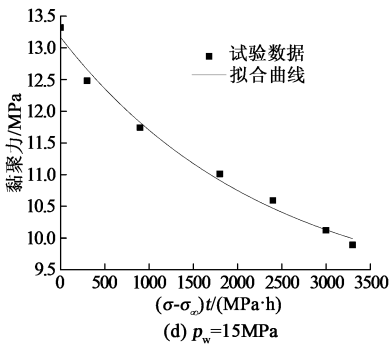
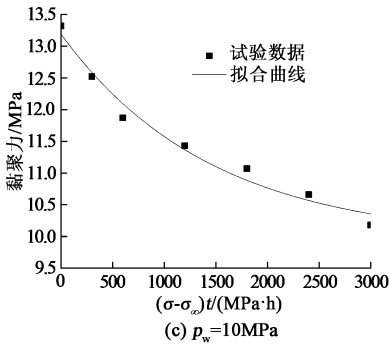
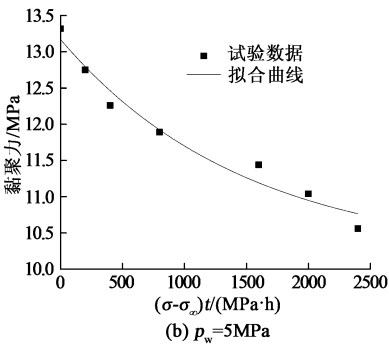
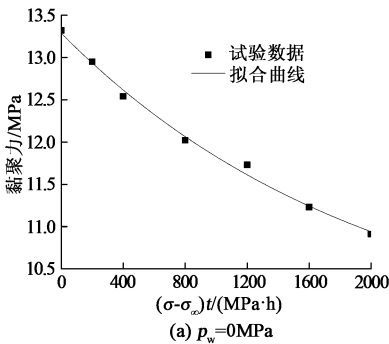


图 2 不同孔隙水压条件下 $(\sigma - \sigma_\infty)t$ 与黏聚力 C 的关系曲线

压作用下砂岩三轴压缩蠕变试验加速蠕变段曲线与理论曲线的对比，对应的拟合参数如表 3 所示，参数拟合相关系数平方均达到了 0.95 以上，故采用指数函数对不同孔隙水压下砂岩 $(\sigma - \sigma_\infty) t$ 与黏聚力之间曲线进行拟合是合适的。

表 3 不同孔隙水压下拟合参数

孔隙水压 P_w/MPa	拟合参数			
	A	B	E	R^2
0	3.7249	1453.2361	9.5638	0.9925
5	3.0071	2185.8542	10.1668	0.9924
10	3.2500	2267.9825	9.9435	0.9986
15	4.1914	2325.7071	8.9762	0.9948

其中拟合参数 E 为岩石黏聚力在初始零时刻时与 y 轴截距，水对 A 和 E 变化幅度影响不大且没有规律性可循，故本文暂不考虑他们对损伤变量的影响^[16-17]，而拟合参数 B 值随着孔隙水压的增大而增大，且具有较为明显的变化规律性，采用软件 Origin 对其按照下式 (4) 进行非线性拟合，拟合曲线如图 3 所示，对应的拟合参数见表 4，参数拟合相关系数平方均达到 0.99 以上，拟合效果比较理想。

$$B = ap_w^b + c \tag{4}$$

式中， a, b, c 为拟合参数。

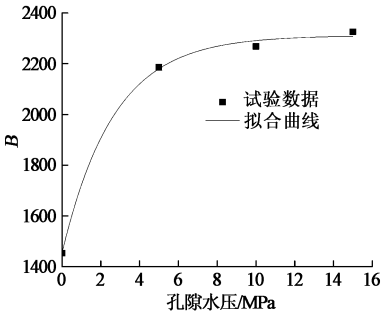


图 3 B 数据分布及其拟合曲线

表 4 孔隙水压与参数 B 拟合参数

拟合参数	a	b	c	R^2
	-857.44361	2.66192	2311.09268	0.9947

由式 (1) ~ (4) 可知损伤变量 D 为:

$$D = 1 - \frac{A \exp(-(\sigma - \sigma_\infty) t / (ap_w^b + c)) + E}{C} \tag{5}$$

根据齐亚静^[18]对于西原体改进推导过程可得西原体如图 4 的三维蠕变损伤本构方程。

当 $\sigma < \sigma_s$ 时，

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1} t\right) \right) \tag{6}$$

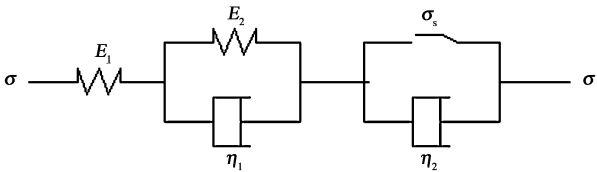


图 4 西原模型

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时，

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} \right) \frac{1}{1 - D} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1} t\right) \right] \frac{1}{1 - D} + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{3\eta_2} \right) \frac{t}{1 - D} \tag{7}$$

式中， σ_1 和 σ_3 为最大主应力和最小主应力； G_0 、 G_1 为剪切模量； K 为体积模量； η_1, η_2 为黏滞性系数。

3 岩石损伤本构模型参数识别

对于本文所建立的非线性蠕变损伤模型的参数辨识，采用软件 Origin，基于最小二乘法原理^[19]利用本文所建立的模型分别对不同孔隙水压下三轴蠕变试验曲线进行参数辨识，得到其模型参数及相关系数见表 5。

表 5 西原体模型的蠕变参数 ($p_w = 0\text{MPa}$)

轴压 /MPa	损伤模型蠕变参数										
	K/GPa	G_0/GPa	η_1/GPa	G_1/GPa	η_2/GPa	A	E	a	b	c	R^2
60	1490	2770	10142.3	920.7	11203	0.06207	5.33×10^{10}	0.0193	-20.442	0.06207	0.93
70	4705	4270	14793	3338	12783	1.94×10^{-8}	0.7234	3201.65	20782.6	1.94×10^{-8}	0.95
80	818	9559	19330	3670	19910	4.1572	-2.2384	-2.24×10^{-6}	-2.97×10^{-5}	4.1572	0.93
90	509.37	14816	27080	6180	38080	2.1971	-9.54×10^{10}	-7.94×10^{-6}	-8.69×10^{-5}	2.1971	0.91

利用所取得的参数，经计算获得的非线性蠕变损伤模型曲线与三轴蠕变试验曲线的对比结果见图 5。整体上模型计算结果与试验结果具有良好的吻合性，在低围压作用下模型曲线与试验曲线拟合程度较高，而在最后一级加载蠕变破坏阶段时，模型曲线与试验曲线出现偏差，但是相关性系数均在 0.98 以上，说明了该模型可以较好地描述衰减蠕

变、稳定蠕变、加速蠕变，克服了传统西原体难以描述加速蠕变特性的缺点，验证了该模型的正确性与合理性。

4 结 论

岩石的蠕变是一个岩石结构非线性劣化破坏的过程，而且深部围岩受高孔隙水压的影响，使得岩

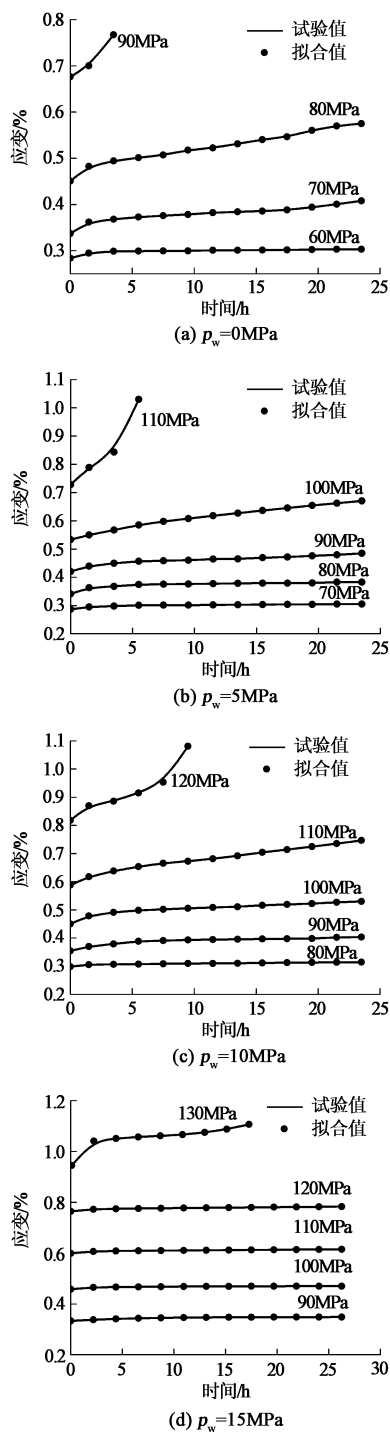


图5 试验结果与计算值对比

石强度参数随应力水平、时间和孔隙水压变化而变化,建立非线性损伤本构模型,得出如下结论:

(1) 在孔隙水压作用下,岩石的应变更明显,且随着水压的增大岩石蠕变加速阶段的蠕变速率显著增大;且水压越大对于岩石强度参数削弱能力越强。

(2) 当处于高应力状态下,即应力超过长期强度时岩石的强度力学参数存在明显的弱化,不再是一个定值,而是随着时间和过应力差变化而变

化,并且受孔隙水压的影响。

(3) 基于西原模型引入关于强度参数的损伤本构模型,较好地描述了岩石蠕变全过程,并且对西原体难以描述的加速蠕变阶段特性有较好分析;经计算获得的非线性蠕变损伤模型曲线与三轴蠕变试验曲线的对比,具有良好的吻合性。

(4) 孔隙水压力在采空区覆岩体中普遍存在,现有采空区覆岩稳定性评价中常忽略孔隙水压力对岩石强度的影响导致参评岩石强度偏高,建议开展富水地层区域采空区覆岩相关评价工作时适当降低岩石强度。

[参考文献]

- [1] 徐国文,何川,胡雄玉,等. 基于分数阶微积分的改进西原模型及其参数智能辨识[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 132-138, 147.
- [2] 王军保,刘新荣,郭建强,等. 盐岩蠕变特性及其非线性本构模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 445-451.
- [3] 尹光志,何兵,王浩,等. 深部采动影响下覆岩蠕变损伤破坏规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1390-1395.
- [4] 左清军,吴立,袁青,等. 软板岩膨胀特性试验及微观机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 986-990, 997.
- [5] 魏元龙,杨春和,郭印同,等. 单轴循环荷载下含天然裂隙脆性页岩变形及破裂特征试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1649-1658.
- [6] 曹瑞琅,贺少辉,韦京,等. 基于残余强度修正的岩石损伤软化统计本构模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1652-1667.
- [7] 董春亮,赵光明. 基于能量耗散和声发射的岩石损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1116-1122, 1128.
- [8] 李天一,徐进,王璐,等. 高孔隙水压力作用下岩体软弱结构面(带)力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3936-3941.
- [9] 刘再斌. 孔隙水压作用下岩石抗剪强度参数计算[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(4): 30-33.
- [10] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- [11] 刘新荣,傅晏,王永新,等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302.
- [12] 王宏贵,魏丽敏,赫晓光. 根据长期单向压缩试验结果确定三位流变模型参数[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 669-673.
- [13] 陈炳瑞,冯夏庭,丁秀丽,等. 基于模式搜索的岩石流变模型参数识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 207-211.
- [14] 邓华锋,肖志勇,李建林,等. 水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 2690-2698.

(下转 51 页)

$1^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 在 43308 工作面上部 42208 工作面采空塌陷区, 距离 13~17m, 平均 15m。43308 运输巷道掘进宽度 5.5m, 留巷宽度 4.5m, 柔模混凝土宽度为 1m, 混凝土标号为 C20^[15]。

可知 $A=4.5\text{m}$, $B=1\text{m}$, 因 43308 工作面上部是采空区, θ 取 10° , 采高 1.87m, 垮落带高度的中值为 4.3m, 高值为 5.8m。根据充填体载荷计算公式, 当垮落带取中值时, 充填体的载荷 $Q = \left(\frac{4.5}{2} + 1 + 4.3\tan 10^{\circ}\right) \times 100 \times 0.027 = 9\text{MPa}$; 当垮落带取高值 5.8m 时, 充填体的载荷 $Q = \left(\frac{4.5}{2} + 1 + 5.8\tan 10^{\circ}\right) \times 100 \times 0.027 = 10.7\text{MPa}$ 。

文献 [15] 现场实测充填体的载荷为 10MPa, 载荷估算公式较好吻合现场实测数据, 无论裂缝带取高值还是中值, 充填体载荷估算公式计算结果都小于充填体设计强度。理论计算结果证明沿空留巷是成功的, 这和现场实测数据及应用效果一致。

4 探讨与结论

(1) 实践表明, 巷道埋深浅并不意味着充填体载荷小。在浅埋深沿空留巷过程中需要充填体能够控制巷道变形, 不仅需要充填体具有较高早期强度、切顶能力, 而且需要充填体后期强度高, 承载能力强, 能够满足工程需要。

(2) 在高强度柔模混凝土沿空留巷载荷估算分析中, 把充填体看作一个煤柱, 结合长壁煤柱载荷分析方法, 提出充填体载荷的估算公式。该公式包括采高、留巷宽度、充填体宽度和巷道顶板岩性等关键参数。为留巷宽度、充填体宽度和充填材料及强度选择提供基础, 减少沿空留巷参数设计的盲目性。

(3) 载荷估算公式在软弱顶板条件下, 比较符合现场实测的充填体载荷, 仍需要在中硬顶板、坚硬顶板等条件下进一步验证。

【参考文献】

[1] 吴 健, 孙恒虎. 巷旁支护载荷和变形设计 [J]. 矿山压力,

1986 (2): 2-11.

[2] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34 (12): 78-81.

[3] 孙恒虎, 赵炳利. 沿空留巷的理论与实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.

[4] 颜志平, 漆泰岳, 张连信, 等. ZKD 高水速凝材料及其泵送充填技术的研究 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (3): 270-275.

[5] 柏建彪, 周华强, 侯朝炯, 等. 沿空留巷巷旁支护技术的发展 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (2): 183-186.

[6] 康红普, 牛多龙, 张 镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (10): 1977-1987.

[7] 孙恒虎, 吴 健, 邱运新. 沿空留巷的矿压规律及岩层控制 [J]. 煤炭学报, 1992 (1): 15-24.

[8] 李化敏. 沿空留巷顶板岩层控制设计 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (5): 651-654.

[9] 李迎富, 华心祝, 蔡瑞春. 沿空留巷关键块的稳定性力学分析及工程应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29 (3): 357-364.

[10] 张 农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (8): 1635-1641.

[11] 韩昌良, 张 农, 李桂臣, 等. 大采高沿空留巷巷旁复合承载结构的稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (5): 969-976.

[12] 袁 亮, 薛俊华, 张 农, 等. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (9): 6-11.

[13] 涂 敏. 沿空留巷顶板运动与巷旁支护阻力研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1999, 18 (4): 347-351.

[14] 谭云亮, 于凤海, 宁建国, 等. 沿空巷旁支护适应性原理与支护方法 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (2): 376-382.

[15] 杨继元, 王晓利, 吴玉意, 等. 柔模混凝土沿空留巷稳定性监测方法应用 [J]. 陕西煤炭, 2014, 33 (6): 105-108.

[16] 王海兵. 沿空留巷在浅埋深、薄基岩综采工作面的应用研究 [J]. 中国煤炭, 2015 (10): 53-55.

[17] 杨俊彩. 浅埋深厚煤层柔模混凝土沿空留巷矿压规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43 (S2): 29-32.

[18] 李雪佳. 浅埋深大采高工作面大断面巷道沿空留巷技术 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43 (S2): 56-59.

[19] Mark C. (2006). The Evolution of Intelligent Coal Pillar Design: 1981-2006. Proceedings of 25th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV: West Virginia University, 2006 Aug: 325-334. [责任编辑: 施红霞]

[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37 (3): 435-441.

[18] 齐亚静, 姜清辉, 王志俭, 等. 改进西原模型的三维蠕变本构方程及其参数辨识 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (2): 347-355.

[19] 李青麒. 软岩蠕变参数的曲线拟合计算方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (5): 559-564.

[责任编辑: 潘俊锋]

(上接 5 页)

[15] 沈明荣, 谌洪菊, 张清照. 基于蠕变试验的结构面长期强度确定方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (1): 1-7.

[16] 刘文彬. 岩石蠕变本构模型的辨识及应用 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.

[17] 张树光, 刘文彬, 王有涛. 花岗岩非正常蠕变及其参数确定