

尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型

刘志祥, 刘青灵, 党文刚

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对灰砂比分别为 1:4, 1:8 和 1:10 的尾砂胶结充填体进行了力学试验, 得出了其在单轴压缩条件下的物理力学特性。根据统计损伤理论, 在材料微元强度服从 Weibull 分布规律的基础上, 引入有效损伤率参数来表征损伤材料的承载能力, 建立尾砂胶结充填体在单轴压缩条件下的损伤软-硬化本构模型。经对比验算, 尾砂胶结充填体损伤软-硬化模型与实验结果相吻合。该模型在体现尾砂胶结充填体损伤随机性、应变软化过程的同时, 反映了尾砂胶结充填体峰后应变硬化过程及规律, 为充填体强度设计提供了依据。

关键词: 尾砂胶结充填体; 损伤; 本构模型; 软-硬化

中图分类号: TD823.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)02-0036-06

On Softening-hardening Intrinsically Constitutive Model for Damage of Tailings-cemented Filling Body

LIU Zhixiang, LIU Qingling, DANG Wengang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The mechanical tests of tailings-cemented filling body with cement-sand ratio of 1:4, 1:8, and 1:10 were conducted, obtaining the physical and mechanical properties under the uniaxial compressive condition. Then, according to the statistical damage theory and based on the principle that material micro-unit strength obeys Weibull distribution, a softening-hardening intrinsically constitutive model for damage of tailings-cemented filling body under the uniaxial compressive condition was established by introducing effective damage rate parameter which demonstrates the bearing capacity of material in damage. The contrast checking shows that the conclusion of softening-hardening constitutive model for the damage of filling body agrees with experimental results. The proposed model not only demonstrates damage randomness, strain softening process of tailings-cemented filling body but also reflects its strain hardening regularity after the pressure peak, providing the guide for strength design of filling body.

Key words: tailings-cemented filling body; damage; intrinsically constitutive model; softening and hardening

随着人们对矿业可持续发展意识的增强, 充填采矿法的应用比重不断增加, 尾砂胶结充填是当前矿山实现无废开采的最佳模式之一^[1-4]。根据采矿工艺, 科学地确定胶结充填体的强度是充填采矿技术的关键^[5-7]。尾砂胶结充填体的物理力学特性, 尤其是峰后承载特性, 是科学确定尾砂胶结充填体所需强度的基础^[8]。水泥含量过高, 胶结充填体虽然能够达到较好的承载和自稳能力, 但对于采场大体积充填体而言, 会大幅度提高充填成本。大体积充填体在与围岩、矿柱的相互作用、应力吸收和转移过程中, 多处于塑性状态或峰后变形阶段^[9]。尾砂胶结充填体在充入采场后, 在特殊受荷环境中, 其峰后承载特性与岩石和混凝土不同, 胶结充填体的残余强度能够稳定地维持在一定数值^[10-12], 胶结充填体损伤部分仍然具有承载能力^[13]。国内外相关研究主要侧重于胶结充填体的峰值强度特性, 对胶结充填体的峰后力学特性研究较少。

本研究对配比分别为 1:4, 1:8 和 1:10 的尾砂胶结充填体进行了力学试验, 分析了不同配比充填体

收稿日期: 2011-07-07

基金项目: 国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(51074177)

作者简介: 刘志祥(1967—), 男, 湖南宁乡人, 教授, 博士, 主要从事岩石力学与采矿工程研究. E-mail: liulzx@csu.edu.cn

在单轴压缩条件下的物理力学特性,得到了尾砂胶结充填体物理力学参数及全应力-应变曲线。根据统计损伤理论,在材料微元强度服从 Weibull 分布规律的基础上,引入有效损伤率参数来表征损伤材料的承载能力,建立了尾砂胶结充填体单轴压缩条件下的损伤软-硬化本构模型,为充填体强度设计提供了依据。

1 尾砂胶结充填体力学实验与破坏规律

1.1 尾砂胶结充填体力学实验

按照国际岩石力学试验规范以及工程岩体试验标准(GB/T50266-99),采用分级尾砂与 325# 普通硅酸盐水泥制备灰砂比(以下简称配比)分别为 1:4,1:8,1:10 的试块,试块配制浓度为 72%。试块在 20 °C 恒温养护室中养护 28 d 后,在 MTS 刚性压力机上进行单轴压缩实验,得到不同配比尾砂胶结充填体单轴压缩全应力-应变曲线,如图 1 所示。由于充填体在邻近破坏时,设备难以描述其后期的全部破坏过程,故对破坏后的部分曲线段进行了必要的修正处理(图中虚线部分)。

1.2 尾砂胶结充填体破坏规律

根据实验得出尾砂胶结充填体在单轴压缩条件下的全应力-应变曲线(图 1,坐标原点以 O 表示),其变形与破坏过程分为 5 个阶段:

1)微孔隙、微裂纹压密阶段(OA 段,图 1,下同)。尾砂胶结充填体在受压初期,充填体内的微孔隙、微裂纹被压密。充填体全应力-应变曲线在 OA 段体现为下凹形,曲线斜率增加。工程实践中,在这一阶段,充填体受围岩压缩而被压实。

2)线弹性变形阶段(AB 段)。充填体全应力-应变曲线表现为直线,表现为充填体变形随压力增加而线性增长,充填体配比越高,线性部分斜率越大。工程实践中,这一阶段,围岩变形压缩充填体,充填体产生反作用力,与此同时,充填体的抗反力随压缩变形呈线性增长。

3)弹塑性变形阶段(BC 段)。尾砂胶结充填体达到屈服强度后,原生裂纹开始扩展,并产生新裂纹。充填体在继续产生弹性变形的同时,也产生塑性变形。充填体全应力-应变曲线表现为上凸形,曲线斜率逐步减小,最终为 0。高配比充填体的弹塑性变形过程更明显,峰值强度更高,可以更好地适应和抑制围岩变形。

4)破坏阶段(CD 段)。尾砂胶结充填体达到峰值强度后,裂纹持续扩展,形成宏观裂纹。充填体全应力-应变曲线斜率为负,承载能力下降。

5)剩余变形阶段(DE 段)。尾砂胶结充填体峰后应变软化后,出现明显的应变硬化过程,刚性实验机必须进一步对充填体做功,才能使充填体破坏。尾砂胶结充填体完全破坏后,充填体承载能力并没有完全失去,仍然保持一定的剩余强度。充填配比低的胶结充填体并未完全损伤,配比高的充填体能较好地发挥其承载能力。

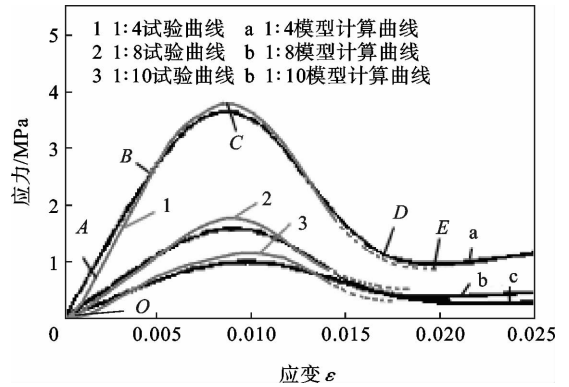


图 1 尾砂胶结充填体单轴受压全应力-应变曲线图
Fig. 1 Uniaxial compressive full stress-strain curves of tailings-cemented filling body

2 尾砂胶结充填体损伤软-硬化模型

2.1 损伤本构关系建立

材料应变行为对损伤的响应是通过有效应力来实现的。根据 Lemaitre 应变等价原理^[14],无损伤材料本构关系中的应力更改为有效应力就可以建立材料损伤本构关系。本研究引入有效损伤率参数 α 来表征损伤材料仍然具有的承载能力。建立的本构关系如下:

$$[\sigma] = [I - \alpha D][\sigma^*] = [I - \alpha D][C][\epsilon]. \quad (1)$$

其中:[σ]-名义应力矩阵;[σ^*]-有效应力矩阵;[I]-单位矩阵; α -有效损伤率, $0 \leq \alpha \leq 1$;D-损伤变量;[C]-材料弹性矩阵;[ϵ]-应变矩阵。

2.2 尾砂胶结充填体损伤软-硬化模型

复合材料损伤机理复杂,构造不均匀,材料内部的微孔隙、微裂纹具有随机性。材料微元体强度服从 Weibull 分布^[15], 概率密度函数为

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]. \quad (2)$$

其中: F —微元体强度分布变量; m, F_0 —Weibull 分布参数。

材料微元体的不断屈服破坏引起材料的损伤,设在某一级荷载作用下已破坏的微元数为 N_t , 定义损伤变量为已破坏微元数与总微元数 N 之比, 即

$$D = \frac{N_t}{N}. \quad (3)$$

任意区间 $[F, F+dF]$ 内已破坏的微元数为 $NP(t)dt$, 当加载到某一水平 F 时, 已破坏的微元数为

$$N_t(F) = \int_0^F NP(t)dt = N\{1 - \exp[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m]\}; \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 得到损伤变量为

$$D = \frac{N_t}{N} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]; \quad (5)$$

式(5)是将连续损伤理论和统计理论有机地结合起来建立的损伤模型的一般性损伤演化方程。分布变量 F 取不同的物理量可建立不同的损伤模型。材料的破坏实际上是局部受拉或受剪切破坏及其裂纹扩展的结果。本研究采用应变作为分布变量, 损伤演化方程为

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right]. \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)得到尾砂胶结充填体在单轴压缩条件下的损伤软-硬化本构关系:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - \alpha D) = E\varepsilon\{1 - \alpha[1 - \exp[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m]]\}. \quad (7)$$

2.3 尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型参数求解与模型验证

根据尾砂胶结充填体全应力-应变曲线的几何边界条件, 得:

$$\sigma|_{\varepsilon=0} = 0; \quad (8)$$

$$\sigma|_{\varepsilon=\varepsilon_p} = \sigma_p; \quad (9)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}|_{D=0} = E; \quad (10)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}|_{\varepsilon=\varepsilon_p} = 0. \quad (11)$$

其中: σ_p —峰值应力; ε_p —峰值应变。

将式(10)和式(11)代入式(7), 联立方程组解出 F_0 和 m , 然后代入式(8)和式(9)进行验算。

令 $k = \frac{\alpha \frac{\sigma_p}{E\varepsilon_p} + \alpha^2 - 2\alpha + 1}{\alpha \frac{\sigma_p}{E\varepsilon_p} + \alpha^2 - \alpha}$, 得出:

$$F_0 = \left(\frac{m\varepsilon_p^m}{k}\right)^{\frac{1}{m}}; \quad (12)$$

$$m = -\frac{k}{\ln\left(\frac{\sigma_p}{E\varepsilon_p} + \alpha - 1\right)}; \quad (13)$$

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{k}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^m\right]; \quad (14)$$

$$\sigma = E\varepsilon\{1 - \alpha + \alpha \exp\left[-\frac{k}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^m\right]\}. \quad (15)$$

根据尾砂胶结充填体单轴压缩试验结果,得到弹性模量、峰值应变、峰值应力,求解出不同配比尾砂胶结充填体的 Weibull 分布参数 m 和 F_0 ,将参数代入式(15),可得出不同配比尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构关系(表 1)。

表 1 损伤软-硬化本构模型参数及其方程表

Tab. 1 The parameters and equations of softening-hardening intrinsically constitutive model for damage of filling body

配比	弹性模量 E/MPa	峰值应力 σ_p/MPa	峰值应变 $\epsilon_p/10^{-2}$	极限应变 $\epsilon_u/10^{-2}$	m	α	本构方程
1:4	573.03	3.92	0.863	1.899	3.16	0.90	$\sigma = E\epsilon\{0.10 + 0.90\exp[-0.37(\frac{\epsilon}{0.00863})^{3.16}]\}$
1:8	231.10	1.71	0.901	1.619	3.97	0.94	$\sigma = E\epsilon\{0.06 + 0.94\exp[-0.27(\frac{\epsilon}{0.00901})^{3.97}]\}$
1:10	140.80	1.07	0.965	1.400	3.63	0.96	$\sigma = E\epsilon\{0.04 + 0.96\exp[-0.29(\frac{\epsilon}{0.00965})^{3.63}]\}$

根据尾砂胶结充填体损伤软-硬化模型本构关系,得到不同配比充填体全应力-应变理论计算曲线(图 1)。从图 1 可以看出,建立的尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型的理论计算曲线与试验测得的全应力-应变曲线相吻合,建立的模型在体现胶结充填体损伤随机性、应变软化过程的同时,反映了胶结充填体的峰后应变硬化过程。

本研究建立的尾砂胶结充填体损伤软-硬化模型有以下优点:

- 1)引入有效损伤率参数 α 建立的模型符合尾砂胶结充填体变形破坏规律。
- 2)模型能反映尾砂胶结充填体应力-应变变化规律,同时体现了尾砂胶结充填体的峰后应变软化和硬化特性。

2.4 不同灰砂比充填体损伤演化规律

在建立的尾砂胶结充填体损伤软-硬化模型基础上,得出尾砂胶结充填体灰砂比与损伤变量 D 之间的关系(图 2)。从图 2 可以看出,配比不同的尾砂胶结充填体具有不同的物理力学特性和损伤特征。应变极限点的损伤值随尾砂胶结充填体配比的降低而减少。充填配比低的尾砂胶结充填体不能很好地发挥损伤承载能力,在突变破坏时,充填体并未完全损伤。

3 胶结充填体剩余承载能力与模型参数物理意义

3.1 尾砂胶结充填体剩余强度

对建立的损伤软-硬化模型采用不同的有效损伤率 α ,可得到不同灰砂比的充填体全应力-应变曲线(图 3—图 5)。由图可见,尾砂胶结充填体完全破坏后,充填体承载能力并没有完全失去,仍然保持一定的剩余强度。以灰砂比为 1:8 的尾砂胶结充填体为例(图 4),有效损伤率参数 α 体现了材料产生损伤后仍然所具有的承载能力。尾砂胶结充填体剩余承载能力随有效损伤率 α 的增加而减小,有效损伤率 $\alpha = 1$ 时,尾砂胶结充填体剩余承载能力近似为 0。

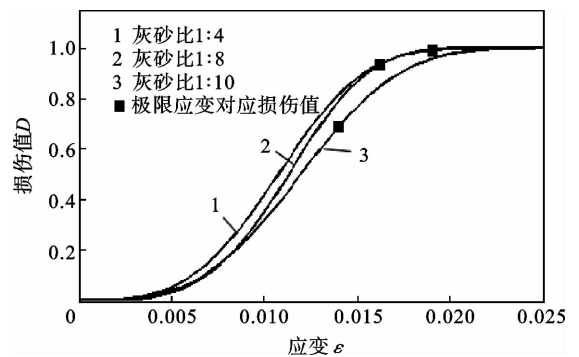


图 2 损伤-应变曲线图

Fig. 2 Damage-strain curves

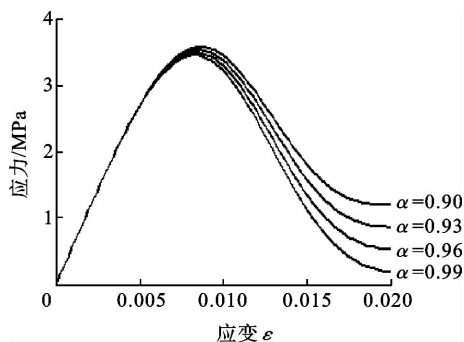


图 3 α 对充填体剩余承载能力的影响图 (配比 1 : 4)

Fig. 3 Influences of value α on residual strength of filling body (cement-sand ratio 1 : 4)

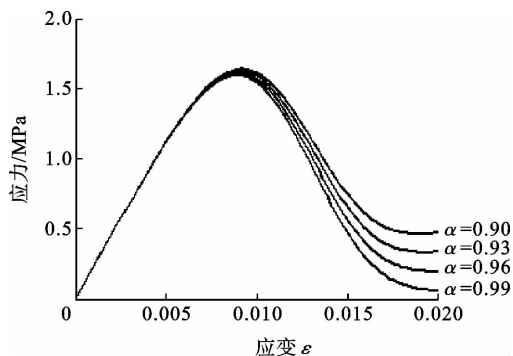


图 4 α 对充填体剩余承载能力的影响图 (配比 1 : 8)

Fig. 4 Influences of value α on residual strength of filling body (cement-sand ratio 1 : 8)

3.2 模型参数的物理意义

从式(13)可以得出,参数 E 反映无损材料初始杨氏模量值,体现了材料的弹性特征。保持 E 和 α 不变,有效损伤率参数为 0.94,得到不同 m 对尾砂胶结充填体全应力-应变曲线的影响(图 6—图 8)。以灰砂比为 1 : 8 的尾砂胶结充填体为例,从图 7 可以看出,尾砂胶结充填体的峰后曲线斜率随 m 的增大而减小, m 越大,应力-应变曲线越陡,材料的脆性增加。模型参数 m 在宏观上体现了尾砂胶结充填体的峰后跌落特性。

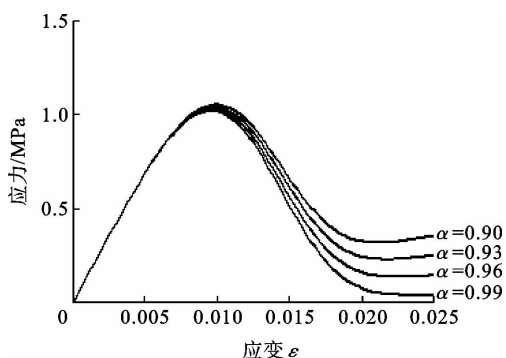


图 5 α 对充填体剩余承载能力的影响图 (配比 1 : 10)

Fig. 5 Influences of value α on residual strength of filling body (cement-sand ratio 1 : 10)

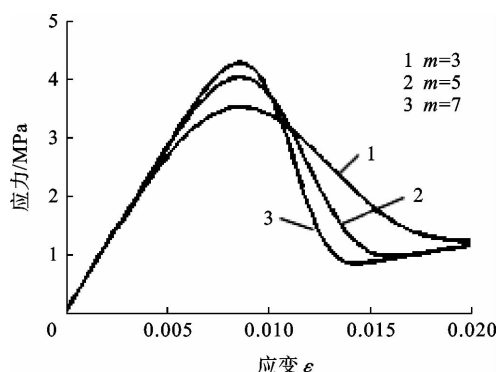


图 6 m 对充填体全应力-应变曲线的影响图 (配比 1 : 4)

Fig. 6 Effect of value m on full stress-strain curve of filling body (cement-sand ratio 1 : 4)

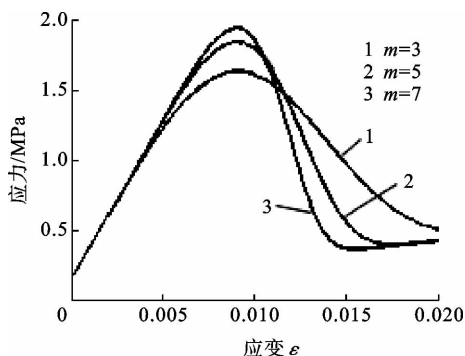


图 7 m 对充填体全应力-应变曲线的影响图 (配比 1 : 8)

Fig. 7 Effect of value m on full stress-strain curve of filling body (cement-sand ratio 1 : 8)

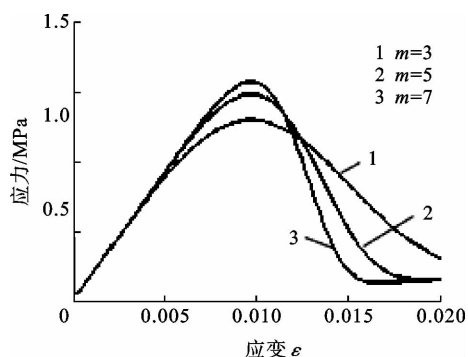


图 8 m 对充填体的全应力-应变曲线的影响图 (配比 1 : 10)

Fig. 8 Effect of value m on full stress-strain curve of filling body (cement-sand ratio 1 : 10)

4 结论

1)不同灰砂比的尾砂胶结充填体具有不同的物理力学特性和损伤特征。应变极限点的损伤值随尾砂胶结充填体配比的减小而减少。在胶结充填体承载极限,充填配比低的尾砂胶结充填体并未完全损伤,配比高的充填体也能较好地发挥其承载能力。

2)通过验算对比分析,引入有效损伤率参数 α 建立的尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型与试验结果吻合,能反映尾砂胶结充填体应力-应变变化规律,同时揭示了尾砂胶结充填体峰后应变软化和硬化特性,全面展示了尾砂胶结充填体的破坏规律。

3)尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型对矿山充填强度设计具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] BENZAAZOUA M, DEMERS I, AUBERTIN M, et al. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(4): 330-340.
- [2] 蔡嗣经. 充填采矿技术的应用现状及发展方向: 第六届国际充填采矿大会述评[J]. 国外金属矿山, 1998(6): 25-32.
- [3] ERCIKDI B, CIHANGIR F, KESIMAL A, et al. Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2-3): 848-856.
- [4] RANKINE R, PACHECO M, SIVAKUGAN N. Underground mining with backfills[J]. Soils and Rocks, 2007, 30(2): 93-101.
- [5] 卢平. 制约胶结充填采矿法发展的若干充填体力学问题[J]. 黄金, 1994, 15(7): 18-22.
LU Ping. A few points about the mechanics of back filling which restrain the development of cementing backfilling method [J]. Gold, 1994, 15(7): 18-22.
- [6] FALL M, BENZAAZOUA M, SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 80-90.
- [7] ERCIKDI B, KESIMAL A, CIHANGIR F, et al. Cemented paste backfill of sulphide-rich tailings: Importance of binder type and dosage[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(4): 268-274.
- [8] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2): 147-174.
- [9] TESARIK D R, SEYMOUR J B, YANSKE T R. Long-term stability of a backfilled room-and-pillar test section at the Buick Mine, Missouri, USA[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(7): 1182-1196.
- [10] YILMAZ E, BENZAAZOUA M, BELEM T, et al. Effect of curing under pressure on compressive strength development of cemented paste backfill[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(9-10): 772-785.
- [11] OUELLET S, BUSSIRE B, MBONIMPA M, et al. Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(5): 407-419.
- [12] 邓代强. 安庆铜矿特大型采场充填体力学性能、损伤及稳定性研究[D]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2005.
- [13] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [14] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering & Design, 1984, 80(1): 233-245.
- [15] 唐春安. 岩石破裂过程中的突变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.