

基于 Markov 理论的立井冻结压力预测分析

王国富^{1,2}, 王磊^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木建筑学院 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室 山东 青岛 266590)

摘要:为研究西部矿井井壁压力沿纵向和环向的分布规律,确定井壁设计的关键荷载参数,根据现场监测数据,构建基于 Markov 理论的立井井壁受压预测模型。该模型以有限的监测点数据预测未设置测点区域的井壁压力值,并给出预测值的可能概率。通过建模预测分析并对比实测数据表明:测点等间距分布时可采用 Markov 模型进行井壁压力预测;沿环向井壁压力可用正弦函数形式描述。

关键词:弱胶结软岩;冻结凿井;井壁压力;Markov 链;井壁压力预测

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)03-0047-06

Prediction of Pressures on Shaft Lining with Freezing Sinking Method in Vertical Shaft Based on Markov Theory

WANG Guofu^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the distribution law of shaft lining pressures along vertical and ring directions in coalmines in western China and determine the key load parameters for the design of shaft linings, this paper established a model for prediction of pressures on shaft linings with freezing sinking method based on Markov chain theory and field monitoring data. The model predicted the lining pressures in the areas without setting monitoring points by means of the data obtained from the limited monitoring points and gave out the possible probability of the pressure data predicted. The prediction analysis of modeling and contrast with field monitoring data showed that the lining pressure could be predicted by means of Markov model with an equidistant distribution of monitoring points; the shaft pressure along ring direction can be described by sin function.

Key words: weakly cemented soft rock; freezing sinking; shaft pressure; Markov chain; prediction of walling pressure

历经几十年的开采,我国东部煤炭资源几近枯竭,煤炭开采往中西部转移。软岩地层冻结凿井井壁设计是中西部地区矿井建设遇到的难题。目前,中西部冻结凿井井壁设计仍采用东部深厚表土冻结凿井井壁设计经验公式,井壁设计整体偏厚,局部强度偏低,不仅使投资成本过高,还存在局部安全隐患,出现多起井壁开裂事故^[1-2]。关于冻结凿井井壁受压力学机理至今尚未得到清晰认识,国内外专家根据现场实测和室内模型试验分析结果提出了大量经验计算公式和力学模型。王渭明等^[3-4]根据孙村煤矿、石集煤矿、榆树井煤矿、上海庙煤矿、梁宝寺煤矿等多个井筒井壁压力实测结果,提出深立井井壁受压经验公式,并给出了任意荷载

收稿日期: 2012-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174128)

作者简介: 王国富(1964—),男,山东荣成人,教授级高工,博士研究生,主要从事岩土工程设计方面的研究。

E-mail: wangguofu2009@126.com

作用下井壁应力函数,为冻结凿井井壁设计提供依据。荣传新等^[5]基于粘弹性理论建立了冻结壁与外层井壁及周围土体共同作用模型,并导出了井壁受力计算公式和井壁应力分布规律;钟贵荣等^[6-7]根据大量实测结果,提出冻结壁与外层井壁相互作用原理指导下的井壁设计方法;Auld^[8]分析了冻结壁融沉作用下井壁内力分布规律,并给出了冻结凿井井壁结构设计方案;马巍等^[9]根据巨野矿区冻结凿井冻结压力现场实测,指出冻结壁内外部冻胀力的积聚是冻结压力产生的根本原因,并对冻结凿井井壁混凝土性能提出了限制性要求;盛天宝^[10]根据河南赵固煤矿冻结凿井压力实测数据,提出应用黄金分割理论确定不同深度的冻结压力值;杨挺青等^[11]根据西部深基岩冻结凿井压力实测,指出西部基岩层冻结压力明显小于东部深厚表土层冻结压力。

上述研究成果从不同角度探讨了冻结凿井井壁压力问题,但还没有形成成熟的理论来分析人工冻结条件下井壁受力问题^[12-15],现场实测成为解决这一问题的有效途径。本研究采用经过优化的有限测点数据,基于条件 Markov 理论对西部弱胶结软岩冻结凿井冻结压力进行了预测分析。

1 冻结压力测点布置与实测分析

1.1 工程概况

上海庙矿业公司新上海一号煤矿和榆树井煤矿位于鄂尔多斯毛乌素沙漠西缘,井筒设计深度 540 m,井筒开挖半径为 4.0~4.25 m,外壁厚度 350 mm,内壁厚度 400~900 mm。井筒穿越白垩纪、侏罗纪软岩地层,典型岩层为泥岩、泥质砂岩、泥砂岩互层、砂岩,根据地质钻探数据和典型岩层室内试验数据,岩体质量指标为 13%~27%,单轴抗压强度为 5~8 MPa,软化系数为 0.18~0.26,热膨胀系数为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 。

1.2 监测布置

测试系统采用集成压力、温度和水压传感器的可长期连续监测的智能监测系统,测点布置如图 1 所示。传感器于井壁支护前安装,采集冻结凿井整个施工期外层井壁受压变化值。

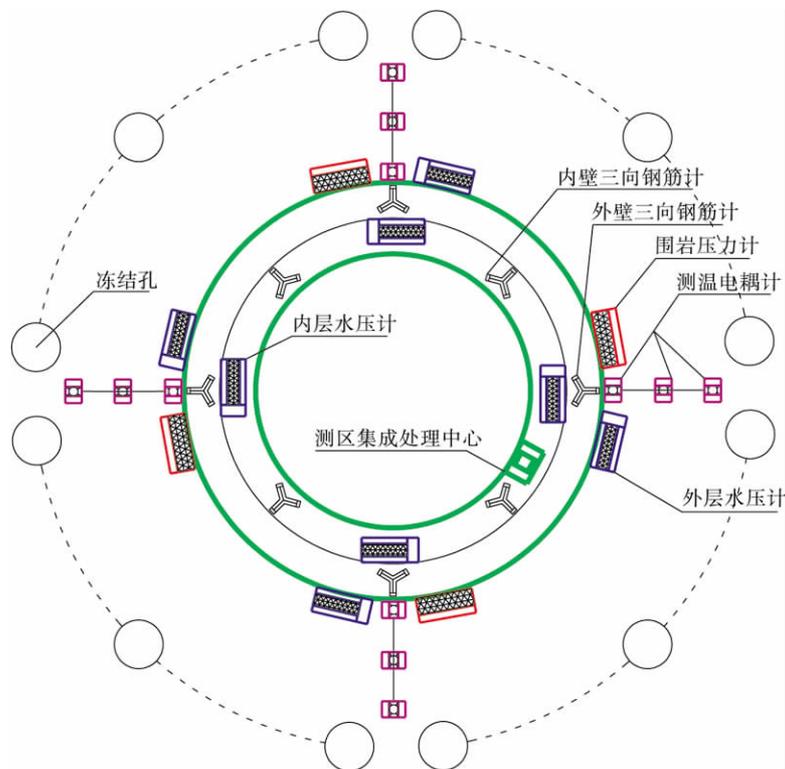


图 1 测点布置图

Fig. 1 The arrangement of monitoring points

1.3 典型测点监测结果分析

在新上海一号煤矿立井,依据测试方案,井深范围内布置三个监测断面,分别为 292,415,504 m 监测断面,每个监测断面布置东、南、西、北四个压力传感器,从中分析井壁受压规律。选取 292,415 m 两个测区的东侧点监测结果为例进行分析(图 2、图 3)。

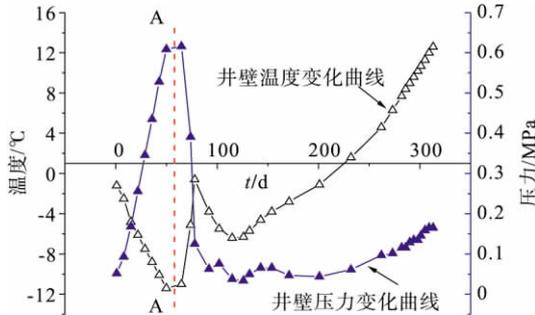


图 2 292 m 东侧点冻结压力和温度变化实测曲线

Fig. 2 The measured curves of pressure and temperature at east monitoring points of 292 m with freezing sinking

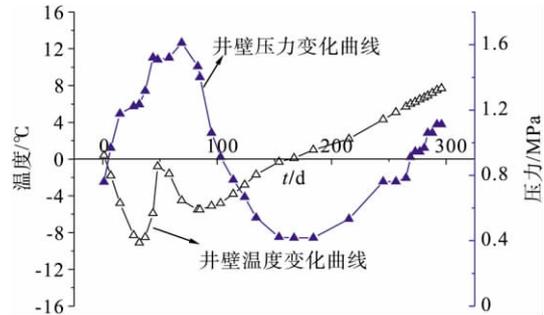


图 3 415 m 东侧点冻结压力和温度变化实测曲线

Fig. 3 The measured curves of pressure and temperature at east monitoring point of 415 m with freezing sinking

从图 2、图 3 中井壁压力随温度变化曲线可以看出:冻结压力并不是随温度的降低而一直增大,开始冻结压力随温度的降低而增大,当增大到一定程度后不再增大,即最大冻结压力出现的时间是在温度最低之前;井筒施工过程中,水化热作用出现一个冻融循环,在这个过程中前期的冻结压力得以调整,引起应力重新分布,后期温度降低也不再出现压力明显上升的趋势,只是压力消减放缓;另外,通过这两个不同深度测区的监测结果比较可知,415 m 断面压力明显比 292 m 大,无论是初测压力还是后期增长压力都比 292 m 测试断面大,结合井检孔资料分析,应是受最大含水层压力的影响,并且 415 m 断面压力变化明显滞后于温度变化。

2 基于 Markov 理论的冻结压力预测

井壁受压实际监测测点有限,如何利用有限的测点推测井壁受压的纵向和环向变化规律是井壁设计的关键。传统方法基本上是采用测点数据进行线性插值分析,没有考虑冻结压力分布的条件随机性,不能准确反映冻结压力的分布规律。本研究采用条件 Markov 理论,基于有限的测点数据对冻结菌井井壁压力值进行预测分析。

2.1 Markov 链

Markov 过程^[16-17]是具有无后效性的随机过程,即在时间 t_m 时的系统状态已知,时间大于 t_m 时的 t 时刻系统所处状态的发生概率,只与过程 t_m 时刻系统所处的状态有关,而与过程 t_m 时刻以前系统的状态无关。

假设 Markov 过程的参数集为 T ,状态集合为 S ,则 Markov 过程可以表示为

$$P\{X(t_{m+n})=s_j | X(t_m)=s_i, X(t_r)=s_r, \dots, X(t_2)=s_2, X(t_1)=s_1, X(t_0)=s_0\} = P\{X(t_{m+n})=s_j | X(t_m)=s_i\}, t_i \in T, t_i \in T, i=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

即条件概率

$$P_{ij}(m, m+n) = P\{X(t_{m+n})=s_j | X(t_m)=s_i\} \quad (2)$$

为 Markov 过程在时刻 t_m 处于状态 s_i 的条件,在时刻 t_{m+n} 变化到状态 s_j 的概率。

在解决空间问题时,时间参数变化为空间距离参数,根据 Markov 过程参数集合 T 和状态 S 的性质可以分为三类:①参数离散状态离散的 Markov 链;②参数连续状态离散过程;③参数连续状态连续过程。

对于立井井壁压力监测,测点有限,数据不连续,显然属于 Markov 链分析过程。

在一维状态下,当转移概率只与状态 i, j 和间距 n 有关时,则转移概率具有平稳性,并称该过程为 Markov 齐次链。所以间距离散、状态离散的 Markov 单步转移概率可以表示为

$$P_{ij}^{(1)} = P_{ij}(1) = P\{X_{m+1} = j \mid X_m = i\}。 \quad (3)$$

对于 n 种不同状态之间的转移概率矩阵可以表示为

$$P(1) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad (4)$$

且矩阵 $P(1)$ 满足行元素和为 1 的性质,即

$$p_{i1} + p_{i2} + \cdots + p_{in} = 1。 \quad (5)$$

根据 C-K(Chapman-Kolmogorov,切普曼-柯尔莫哥洛夫)原理,对于任意的 $u, v \in T$,有

$$P_{ij}(u+v) = \sum_{k=1}^{\infty} P_{ik}(u)P_{kj}(v), i, j = 1, 2, \cdots \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可以确定 n 步转移概率矩阵为

$$P(n) = [P(1)]^n = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix}^n。 \quad (7)$$

其中, n 个单位步的转移概率为

$$P_{ij}^{(n)} = P_{ij}(n) = P\{X_{m+n} = j \mid X_m = i\}, m, n = 1, 2, \cdots \quad (8)$$

当式(8)中转移概率只依赖于 n ,而与 m 无关时,为均匀 Markov 链。

2.2 冻结压力分布的 Markov 链模型的建立

通过对孙村煤矿、石集煤矿、榆树井煤矿、上海庙煤矿以及梁宝寺煤矿等多个井筒井壁压力实测结果分析,冻结压力分布规律具有明显的序贯性,在空间上以某种形式相联系,采用 Markov 链描述冻结压力分布时,假定:

1) 冻结凿井井壁压力监测测点布置是等间距的,即在竖向和环向上都是等间距的,该过程是间距离散状态离散的随机过程;

2) 测点之间的数据信息是互不相关的;

3) 冻结压力的分布状态满足齐次、平稳的 Markov 链。

由测点距离布置分布假设,建立井壁受压分析的网格模型

如图 4 所示。

步长纵向设计为沿着井筒深度 $H/12$,环向设计为 $L/12$, H, L 分别为井筒深度和井壁外缘周长。

冻结压力分别取冻结阶段最大值和解冻后稳定值进行分析。Markov 预测采用 Matlab 编程计算,以 415 m 测区为例进行预测分析,如表 1 所示。

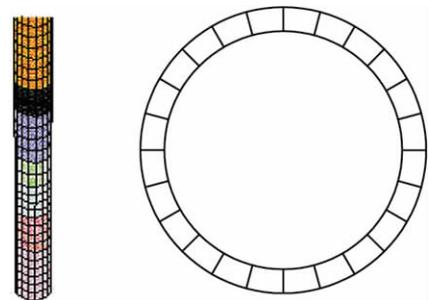


图 4 Markov 分析模型图

Fig. 4 Markov analysis model

表 1 预测分析表类
Tab. 1 Prediction analysis

角度/(°)	0	45	90	135	180	225	270	315
监测值/MPa	1.562	1.129	0.556	1.275	1.610	1.184	0.583	1.251
预测值/MPa		1.236		1.318		1.106		1.214
转移概率/%		78.6		86.1		85.7		88.9
计算误差/%		9.48		3.37		6.59		2.96

根据表 1 分析结果,采用监测值建模,计算未监测区域的压力值,并对计算结果的可靠性(即转移概率)进行了分析。从误差分析来看,虽然最大误差超过了 5%,但是对于立井施工这类复杂地下工程受力分析,该误差精度,可以接受。

2.3 冻结压力预测结果分析

根据 Markov 理论,以 415 m 测区为例,计算冻结压力环向分布规律(图 5),图中 $P_{dmax}=1.61$ MPa,为该测区实测冻结压力最大值。

为描述预测冻结压力的环向分布规律,结合井壁结构特点,采用正弦函数的形式回归求冻结压力环向分布表达式

$$P_d = P_{dmax}(1 - \beta|\sin \theta|) \quad (9)$$

其中: P_{dmax} —最大冻结压力值; β —冻结压力不均匀指标系数,与最小冻结压力有关; θ —不均匀分布角度,取 $\theta \in (0, 90^\circ)$ 。

对图 5 所示结果,经式(9)拟合可得 415 m 测区冻结压力的环向分布可以表示为

$$P_d = 1.61(1 - 0.665|\sin \theta|) \quad (10)$$

同理可得 292、504 m 监测断面环向应力拟合结果。将三个监测断面的 P_{dmax} 和 β 值汇总如表 2 所示。进而根据实测结果可计算冻结压力纵向分布规律,如图 6 所示。

表 2 监测断面拟合公式系数汇总表

Tab. 2 The coefficients of fitting formulae at monitoring section

测区	岩性	P_{dmax}/MPa	P_{dmin}/MPa	β
第一测区(292 m)	砂质泥岩	0.616	0.213	0.654
第二测区(415 m)	细砂岩	1.611	0.539	0.665
第三测区(504 m)	煤层	1.236	0.439	0.645

根据实测结果,对井筒全深度范围内冻结应力场纵向应力进行预测,结果表明:冻胀压力受岩土层的类型影响很大,岩性不同,形成的冻土性质不同,富水砂岩冻胀性较不含水或含少量水的泥岩、砂质泥岩大;冻结应力包含壁后岩土层冻胀压力和冻结壁形变压力两部分,冻胀压力与土层性质,含水状况有关,而冻结壁形变压力则与所处位置地层初始应力、含水层水压有关。

3 结论

分析了冻结凿井井壁受力与温度之间的变化关系以及各测区冻结压力沿环向分布的不均匀性;根据 Markov 理论预测结果,对预测断面的环向应力进行拟合计算,得到较为简便的预测公式,可以为立井冻结法施工和井筒设计的冻结应力计算提供参考依据;通过部分测点数据建模预测了井壁压力的环向分布特征,并对预测值的转移概率以及误差进行了分析,考虑研究问题的复杂性,该误差可以接受;应用 Markov 理论对上海庙矿区冻结凿井井壁压力进行了分析,并与部分监测值进行对比,结果表明,以 Markov 链模型预测冻结压力分布是可行的。

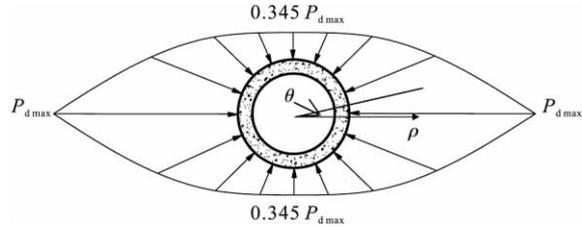


图 5 冻结压力环向分布示意图

Fig. 5 The ring distribution of lining pressures with freezing sinking

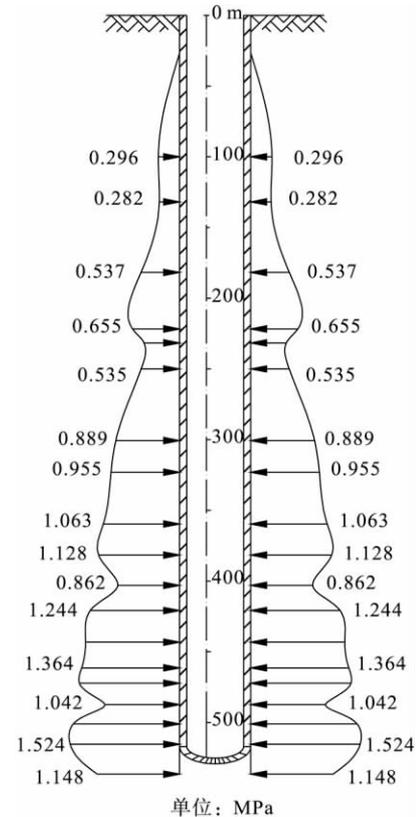


图 6 冻结压力纵向分布图

Fig. 6 The vertical distribution of pressures with freezing sinking

参考文献:

- [1]周晓敏,陈建华,罗晓青. 孔隙型含水基岩段竖井壁厚度拟设计研究[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1174-1178.
ZHOU Xiaomin, CHEN Jianhua, LUO Xiaoqing. Research on the preliminary thickness design of shaft lining in porous rock aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1174-1178.
- [2]姚直书,程桦,张国勇,等. 特厚冲积层冻结法凿井信息化施工外层井壁受力实测研究[J]. 煤炭科学技术,2004,32(6):49-52.
YAO Zhishu, CHENG Hua, ZHANG Guoyong, et al. Research on situ measurement of outer shaft lining in freezing sinking shaft in special thick alluvium[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(6): 49-52.
- [3]王渭明,孔亮. 超深立井围岩压力测试与分析[J]. 土工基础,2003,17(3):78-80.
WANG Weiming, KONG Liang. The measurement and analysis of surrounding rock pressure for extra deep shaft [J]. Soil Engineering and Foundation, 2003, 17(3): 78-80
- [4]代春泉,王磊. 基于弹性地基梁模型的重叠隧道衬砌变形研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2012,31(1):39-44.
DAI Chunquan, WANG Lei. Study on lining deformation in overlap tunnels based on elastic foundation beam model[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(1): 39-44.
- [5]荣传新,王秀喜,程桦. 深厚冲积层冻结壁和井壁共同作用机理研究[J]. 工程力学,2009,26(3):235-237.
RONG Chuanxin, WANG Xiuxi, CHENG Hua. A study on interaction mechanism of frozen soil wall and shaft lining in deep alluvium[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 235-237.
- [6]钟贵荣,周国庆,王建州,等. 深厚表土层非均质冻结壁黏弹性分析[J]. 煤炭学报,2010,35(3):397-401.
ZHONG Guirong, ZHOU Guoqing, WANG Jianzhou, et al. Viscoelastic analysis of heterogeneous frozen wall in deep alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 397-401.
- [7]王建州. 深厚表土层非均质厚冻结壁力学特性研究[D]. 北京:中国矿业大学,2008.
- [8]AULD F A. Freeze wall strength and stability design problems in shaft sinking[C]// Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing, Sappora, 1985, 16(2): 343-350.
- [9]马巍,吴紫旺. 冻土的蠕变及蠕变强度[J]. 冰川冻土,1995,16(2):113-118.
MA Wei, WU Ziwan. Creep and creep strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 16(2): 113-118.
- [10]盛天宝. 赵固一矿特厚冲积层冻结技术方案探讨[J]. 煤炭科学技术,2005,33(6):57-60.
SHENG Tianbao. Discussion on freezing technology for special thick alluvium in Zhaogu No. 1 mine[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(6): 57-60.
- [11]杨挺青,罗文波,徐平,等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [12]李栋伟,汪仁和,范菊红. 基于卸荷试验路径的泥岩变形特征及数值计算[J]. 煤炭学报,2010,35(3):387-391.
LI Dongwei, WANG Renhe, FAN Juhong. The deformation properties of mudstone and numerical calculation based on unloading path[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 387-391.
- [13]YOSHINAKA R, TRAN T V, OSADA M. Mechanical behavior of soft rocks under triaxial cyclic loading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 354-361.
- [14]ADACHI T, OKA F. An elasto-plastic constitutive model for soft rock with strain softening[J]. International for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19(4): 233-247.
- [15]YIN J H, GRAHAM J. Elastic viscoplastic modeling of the time-dependent stress-strain behaviour of soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 736-745.
- [16]YOO C, KIM J H. A web-based tunneling-induced building/utility damage assessment system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(5): 497-511.
- [17]LI H B, LI J R, ZHOU Q C, et al. Study on the mechanical properties of soft rock under dynamic uniaxial compression[J]. Key Engineering Materials, 2004, 261(15): 277-282.