

水岩作用下露天矿蚀变岩石力学试验研究

冯佰研^{1,2}, 秦哲^{1,2}, 牛传星^{1,2}, 付厚利^{1,3}, 齐伟林^{1,2}

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590; 2. 山东省防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 临沂大学, 山东 临沂 276000)

摘要: 为了探究水位升降对边坡稳定性的影响, 选取莱州仓上露天矿坑边坡蚀变岩样, 对不同饱水-失水循环次数的蚀变岩进行了三轴压缩试验。通过探究各力学参数的变化规律, 建立了函数关系描述蚀变岩的力学性质受水岩循环作用影响的变化形式, 引入损伤率概念分析了循环次数对蚀变岩力学性质的影响。结果表明: 相同饱水-失水循环次数下, 蚀变岩极限抗压强度随围压增大而提高; 不同循环次数下, 蚀变岩黏聚力随次数增加衰减迅速, 并呈持续衰减状态, 内摩擦角损伤较弱; 随蚀变、碎裂程度增加, 水岩作用对岩石的各项力学性质损伤不断增加, 黏聚力损伤率可达70%, 内摩擦角损伤率可达30%; 水岩作用对蚀变岩力学性质的影响主要体现在黏聚力降低方面, 水位升降时蚀变岩黏聚力变化对边坡稳定性有较大影响。

关键词: 水岩作用; 蚀变岩; 三轴压缩试验; 岩石损伤规律

中图分类号: TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)03-0039-05

Study on mechanics test of altered rock under water-rock interaction in surface mine

Feng Baiyan^{1,2}, Qin Zhe^{1,2}, Niu Chuanxing^{1,2}, Fu Houli^{1,3}, Qi Weilin^{1,2}

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Lab of Disaster Prevention and Reduction, Qingdao 266590, China; 3. Linyi University, Linyi 276000, China)

Abstract: In order to explore a water table fluctuation affected to the slope stability, altered rock samples were taken from the slope in Laizhou Cangshang Surface Mine, triaxial compression tests were conducted on the altered rock with different water saturation-dehydration circulation times. With the exploration on the variation law of each mechanics parameter, a function relation established was applied to explain the mechanics property variation mode of the altered rock affected by the water-rock circulation interaction and the damage probability conception introduced was applied to analyze the circulation times affected to the mechanics property of the altered rock. The results showed that under the same water saturation-dehydration circulation times, the ultimate compressive strength of the altered rock would be increased with the surrounding rock pressure increased. Under the different circulation times, the cohesion force of the altered rock would be rapidly decreased with the circulation times increased, and would be in a sustained decreasing status. The damage of the internal friction angle and would be weak. With the alteration and broken degree increased, the water-rock interaction damaged to each mechanics property of the rock was continuously increased, the cohesion force damage rate was up to 70% and the damage rate of the internal friction angle was up to 30%. The water-rock interaction affected to the mechanics property of the altered rock mainly would be the cohesion force reduction and the cohesion force variation of the altered rock would have high influences to the slope stability when the water table was fluctuated.

Key words: water-rock interaction; altered rock; triaxial compression test; rock damage law

0 引言

蚀变岩是近矿围岩与热液发生反应时, 通过交

代作用产生的一系列新物质替代旧物质而形成岩石。文献[1-3]对水岩作用影响下的边坡稳定性进行探索, 提出了水位升降是影响边坡稳定性的重要

收稿日期: 2015-10-07; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.03.008

作者简介: 冯佰研(1992—)男, 山东日照人, 硕士研究生。Tel: 17854284565, E-mail: 562636552@qq.com

引用格式: 冯佰研, 秦哲, 牛传星, 等. 水岩作用下露天矿蚀变岩石力学试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 39-43, 105.

Feng Baiyan, Qin Zhe, Niu Chuanxing, et al. Study on mechanics test of altered rock under water-rock interaction in surface mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 39-43, 105.

因素。文献[4-10]通过试验对经过饱水-失水循环的岩石力学性质进行研究,得出了水岩作用下岩石的力学性质损伤规律。文献[11-14]对蚀变岩的相关特性进行研究,通过三轴压缩试验分析了蚀变岩力学性质。文献[15-20]在探索岩石损伤规律的基础上进一步进行了岩石的损伤机理分析。蚀变作用对于岩石的各项力学性质影响极大,其影响尤其以降低岩石黏聚力为主;同时水岩作用也是改变岩石力学性质重要影响因素,作为各种地质灾害中重要影响因素的水,对岩体物理状态和受力特性的改变非常显著。综上所述,水位升降使得边坡岩体,特别是蚀变带蚀变岩的力学特性劣化,严重影响工程的稳定性。

笔者依托“三山岛仓上露天坑尾矿库边坡安全状态监测、分析及预警技术开发与应用研究”重大科研项目,仓上露天坑于2013年开始作为三山岛选矿厂尾矿库使用,坑内水位不断升降对边坡稳定性的影响日益突出。故选取仓上露天坑尾矿库边坡3号蚀变带处黄铁绢英化花岗质碎裂岩($S_{\gamma}JH$)和黄铁绢英岩化花岗岩(γJH)岩样,进行不同饱水-失水循环次数的岩石常规三轴压缩试验。对比分析不同饱水-失水循环次数下岩石各项力学性质变化趋势,总结建立蚀变岩 $S_{\gamma}JH$ 和 γJH 力学性质变化形式的函数关系式,总结了蚀变岩在水岩作用作用下的力学特性,探究了饱水-失水循环作用对蚀变岩的力学损伤原因。

1 三轴压缩试验

1.1 岩样制作与试验准备

现场采取钻孔取心的方法对蚀变岩 $S_{\gamma}JH$ 和 γJH 进行岩样采集,2种岩石工程地质特征见表1。

根据含水率试验结果: $S_{\gamma}JH$ 和 γJH 岩样在浸水48 h状态下和浸水24 h相比含水率仅提高0.04%和0.03%,综合考虑确定试验饱水-失水循环模拟

时间为浸水24 h后烘干12 h。

表1 岩石工程地质特征

Table 1 Geological characteristics of rock

岩样	结构构造	蚀变、破碎程度	分布地段
$S_{\gamma}JH$	花岗变晶结构	黄铁绢英化较重	3号蚀变带
	碎裂块状构造	碎裂程度较重	
γJH	花岗变晶结构	黄铁绢英化较轻	3号蚀变带
	块状构造	碎裂程度较轻	

加工岩样成标准岩样(高为100 mm,直径50 mm),剔除外观上有明显层理和裂痕的岩样,再通过声波仪测定岩样波速,选取有代表性的岩样作为试验岩样。将岩样在水中浸泡24 h后取出,置于烘箱内12 h至恒重,为一次饱水-失水循环模拟;根据饱水-失水循环模拟方法制作不同循环次数的岩样试件(1、5、15次)。

1.2 试验方案

目前测定岩石抗剪强度的试验方法包括室内试验和现场试验2种方法。由于现场试验条件的局限性,该试验运用假三轴试验方法测定岩石的抗剪强度。三轴压缩试验采用山东科技大学自行研发的TAW-2000电液伺服岩石三轴试验机。

将不同饱水-失水循环次数(1、5、15次)下的2种岩样,分别在围压为2、5、9 MPa状态下进行三轴压缩试验。对试件的轴向进行缓慢加载直到岩块发生破坏,记录试件应力-应变变化,并对破坏状态进行详细描述;注意在试件的破坏面比较完整的情况下,应当测定最大轴向力作用面与破坏面两者间的角度,经校核试验数据,并计算得到内摩擦角。

2 试验数据及分析

2.1 岩石力学参数与饱水-失水循环次数关系

不同饱水-失水循环次数与不同围压状态下 $S_{\gamma}JH$ 和 γJH 三轴压缩试验极限抗压强度见表2。

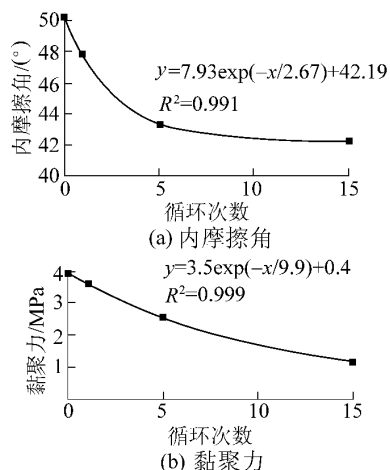
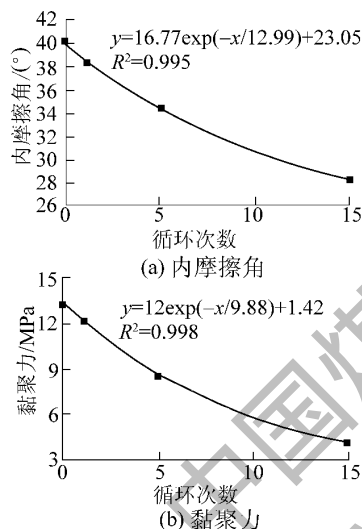
表2 饱水-失水循环作用下不同围压三轴压缩试验结果

Table 2 Results of triaxial compression test under saturation-dehydration circulating effect with different surrounding pressure

岩样	自然状态			循环1次抗压强度/MPa			循环5次抗压强度/MPa			循环15次抗压强度/MPa		
	2 MPa	5 MPa	9 MPa	2 MPa	5 MPa	9 MPa	2 MPa	5 MPa	9 MPa	2 MPa	5 MPa	9 MPa
$S_{\gamma}JH$	34.98	54.99	89.44	30.22	47.51	74.69	18.71	29.41	32.21	7.89	12.41	20.18
γJH	64.99	75.99	89.69	56.15	65.65	76.09	34.75	40.63	47.81	14.66	17.15	22.25

根据花岗质碎裂岩($S_{\gamma}JH$)和花岗岩(γJH)的三轴压缩试验数据,利用摩尔应力圆求得岩样黏聚

力 C 、内摩擦角 φ 随饱水-失水循环次数变化关系,计算拟合结果如图1、图2所示。

图 1 S γ JH 岩样力学性质随循环次数的变化Fig. 1 Changes of physical property with different cycle times of S γ JH rock samples图 2 γ JH 岩样力学性质随循环次数的变化Fig. 2 Changes of physical property with different cycle times of γ JH rock samples

1) 相同饱水-失水循环次数下 2 种岩石的极限抗压强度随围压增大而增大; 随蚀变、破碎程度增大, 蚀变程度更大的 S γ JH 在相同的相邻围压级别的作用下, 极限抗压强度提升比例更大。

2) 不同饱水-失水循环次数下, 随循环次数增加, 岩石的极限抗压强度随之减小, C 、 φ 值也不断减小。

3) 从图 1、图 2 中可以看出, S γ JH 和 γ JH 在三轴压缩过程中, 岩石的黏聚力和内摩擦角随饱水-失水循环次数的增加变化规律比较明显, 即呈指数变化规律为

$$y = A \exp(x/B) + M \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 M 为拟合常数; x 为饱水-失水循环次数。

2.2 岩石损伤率和饱水-失水循环次数的关系

2.2.1 岩石累计损伤率分析

根据三轴抗压强度随着饱水-失水循环次数的变化分析结果看, 2 种蚀变岩在饱水-失水循环作用下, 其内部损伤扩展, 为分析这种损伤变化的规律, 引入损伤率概念进行量化的描述损伤演化规律, 其计算式为

$$\begin{cases} D_C = (C_0 - C_n) / C_0 \\ D_\varphi = (\varphi_0 - \varphi_n) / \varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_C 、 D_φ 为 n 次循环后的 C 、 φ 累计损伤率; C_0 为未经过饱水-失水循环的黏聚力; C_n 为经过 n 次饱水-失水循环的黏聚力; φ_0 为未经过饱水-失水循环的内摩擦角; φ_n 为经过 n 次饱水-失水循环的内摩擦角。

由 2 种岩石三轴压缩试验结果, 根据式 (2) 计算岩样经历不同次数的饱水-失水循环作用后, 岩石的累积损伤见表 3。

表 3 各岩石物理性质损伤参数

Table 3 Physical property damage parameters of rocks

岩样	循环次数	黏聚力 C/MPa	内摩擦 角 $\varphi/(\circ)$	损伤率/%	
				$D_C = (C_0 - C_n) / C_0 \times 100\%$	$D_\varphi = (\varphi_0 - \varphi_n) / \varphi_0 \times 100\%$
S γ JH	自然状态	3.912	50.00	—	—
	循环 1 次	3.630	47.89	7.21	4.22
	循环 5 次	2.530	43.19	35.33	13.62
	循环 15 次	1.190	42.34	69.58	15.32
γ JH	自然状态	13.346	40.00	—	—
	循环 1 次	12.393	38.31	7.14	4.23
	循环 5 次	8.622	34.55	35.40	13.63
	循环 15 次	4.069	28.32	69.51	29.20

所示根据表4计算结果,岩石的累积损伤变化具有以下特点:①2种岩石在经历不同次数饱水-失水循环作用后,其累积损伤值均增加,但是岩石 $S_{\gamma}JH$ 对水的敏感程度大于 γJH ,蚀变、破碎程度越大,对水敏感性越强。②岩石损伤值增加越来越慢,即开始进行饱水-失水循环试验时其损伤发展较快,越往后其发展越慢,到后期几乎不再受饱水-失水循环的影响。

2.2.2 岩石力学性质损伤变化分析

为分析这种影响程度,分别对累计损伤值变化进行拟合分析,如图3和图4所示。

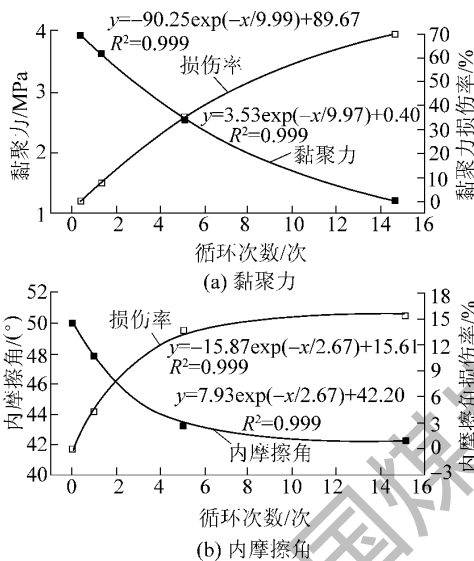


图3 $S_{\gamma}JH$ 岩样力学性质损伤变化

Fig. 3 Physical property damage of $S_{\gamma}JH$

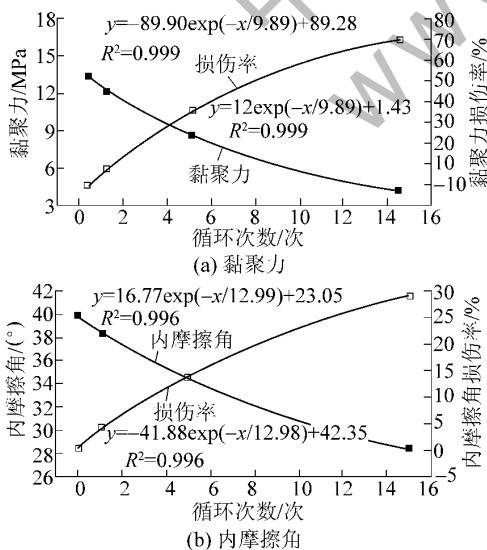


图4 γJH 岩样力学性质损伤变化

Fig. 4 Physical property damage of γJH

根据图3—图4所示,在三轴压缩试验中蚀变

岩的损伤变化开始损伤扩展较为迅速,后期趋于稳定。极限损伤值及达到95%极限损伤值所需要的循环次数见表4。

表4 岩石三轴压缩损伤变化分析

Table 4 Analysis of damage change under rock triaxial compression

岩样	力学参数	拟合表达式	极限值/%	95%极限值循环次数
$S_{\gamma}JH$	黏聚力	式1	69.58	14
	内摩擦角	式2	15.32	6
γJH	黏聚力	式3	69.51	13
	内摩擦角	式4	29.2	11

注: 式1: $y = -90.25 \exp(-x/9.99) + 89.67$; 式2: $y = -15.87 \exp(-x/2.67) + 15.61$; 式3: $y = -89.90 \exp(-x/9.89) + 89.28$; 式4: $y = -41.88 \exp(-x/12.98) + 42.35$ 。

由图3—图4及表4可知:

1) $S_{\gamma}JH$ 与 γJH 的黏聚力损伤率大于其内摩擦角损伤率,从强度降低角度来讲,水岩作用对蚀变岩的黏聚力的损伤作用更强。

2) $S_{\gamma}JH$ 与 γJH 黏聚力达到95%极限值的循环次数大于其内摩擦角达到95%极限值的循环次数,水岩作用下蚀变岩黏聚力的损伤呈现持续损伤状态,边坡水位升降对蚀变带等薄弱地带的影响很大。

2.3 水岩作用对蚀变岩力学性质损伤

岩石在蚀变作用下内部结构发生变化进而导致其力学性质的变化,特别在水岩作用下蚀变岩的物理力学性质变化更加明显。

三轴压缩试验中,随蚀变、破裂程度增加,应力-应变曲线不规律波动增加,同时岩石含水率等力学指标均有所提高。根据水对岩石的物理损伤效应相关理论分析:

蚀变岩 $S_{\gamma}JH$ 和 γJH 相对于花岗岩等未蚀变或蚀变程度低的岩石有着更多的微缺陷或不均匀性,同时岩石矿物组成成分在蚀变作用下同样发生了改变。对蚀变岩来讲,水岩作用改变岩石物理力学性质,同时对岩石的受力状态也有所影响,具体而言:一是在岩石不连续面边界上产生润滑作用;二是变化的结构面中岩体充填物物理特性发生改变。就其力学性质损伤来讲,主要为对其内摩擦角和黏聚力损伤,其中以黏聚力长时损伤对边坡工程等影响更大。

3 结 论

1) 对蚀变岩样进行不同围压、不同饱水-失水

循环次数下的三轴压缩试验,根据试验数据绘制岩样的摩尔应力圆,求得各种岩样的 C 、 φ 值。计算结果发现,随着围压的增大,岩石的极限抗压强度有所增加;随着循环次数的增加,岩石的极限抗压强度与岩样 C 、 φ 值均随之减小。

2) 通过三轴压缩试验数据分析,建立函数关系描述蚀变岩的各项力学性质受饱水-失水循环作用影响的变化形式,引入损伤率概念分析蚀变岩 C 、 φ 随饱水-失水循环次数的变化关系。饱水-失水循环作用后,累积损伤率增加;蚀变、破碎程度越大,对水敏感性越强;岩石损伤值增加呈越来越慢趋势。

3) 从强度降低角度讲,水岩作用对蚀变岩的黏聚力的损伤作用更强;同时,从长时损伤角度讲,蚀变岩黏聚力在水岩作用下呈现持续损伤状态。水岩作用对蚀变岩影响主要体现在黏聚力降低方面,其黏聚力变化对边坡水位升降时的稳定性影响更大。

4) 蚀变岩在水岩作用下的力学损伤主要来自岩石不连续边界的润滑作用,以及结构面中填充物的物理性态的改变。

参考文献(References):

- [1] 王新刚.饱水-失水循环劣化作用下库岸高边坡岩石流变机理及工程应用研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2014.
- [2] 王永新.水岩相互作用机理及其对库岸边坡稳定性影响的研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [3] 刘新荣,傅晏,王永新,等.水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J].岩土力学,2009,30(3):613-616.
Liu Xinrong, Fu Yan, Wang Yongxin, et al. Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 613-616.
- [4] 邓华锋,李建林,朱敏,等.饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J].岩土力学,2012,33(11):3306-3312.
Deng Huafeng, Li Jianlin, Zhu Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under "saturation-air dry" circulation function [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3306-3312.
- [5] 刘业科.水岩作用下深部岩体的损伤演化与流变特性研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [6] 朱敏.“风干-浸泡”循环作用下损伤砂岩力学特性研究[D].宜昌:三峡大学,2013.
- [7] 曹平,杨慧,江学良,等.水岩作用下岩石亚临界裂纹的扩展规律[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(2):649-654.
Cao Ping, Yang Hui, Jiang Xueliang, et al. Subcritical crack growth of rock during water-rock interaction [J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2010, 41(2): 649-654.
- [8] 宋勇军,雷胜友,毛正君,等.干燥和饱水状态下炭质板岩力学特性试验[J].煤炭科学技术,2014,42(10):48-52.
- [9] Song Yongjun, Lei Shengyou, Mao Zhengjun, et al. Testing study on mechanical property of carbonaceous slate under dry and saturated states [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 48-52.
- [9] 姜永东,阎宗岭,刘元雪,等.干湿循环作用下岩石力学性质的实验研究[J].中国矿业,2011,20(5):104-106.
Jiang Yongdong, Yan Zongling, Liu Yuanxue, et al. Experimental study on mechanical properties of rock under the conditions of wet and dry cycles [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(5): 104-106.
- [10] 郭宏云,李兵,孙崇华,等.深部矿并钙质页岩吸水特性试验研究[J].煤炭科学技术,2013,41(11):103-107.
Guo Hongyun, Li Bing, Sun Chonghua, et al. Experiment research on water absorption features of calcareous shale in deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 103-107.
- [11] 王旭东,付小敏.蚀变岩在三向应力状态下的力学及变形特性研究[J].实验室研究与探索,2007(10):280-283.
Wang Xudong, Fu Xiaomin. The research of conventional triaxial compression test about rotten rock [J]. Laboratory Research and Exploration, 2007(10): 280-283.
- [12] 杨燕,付小敏.某工程蚀变岩抗剪强度特性的影响因素[J].实验室研究与探索,2009(1):42-44,107.
Yang Yan, Fu Xiaomin. Study on project altered rock shear strength characteristics factors [J]. Laboratory Research and Exploration, 2009(1): 42-44, 107.
- [13] 魏伟,沈军辉,苗朝,等.风化、蚀变对花岗斑岩物理力学特性影响分析[J].工程地质学报,2012,20(4):599-606.
Wei Wei, Shen Junhui, Miao Zhao, et al. Influence analysis of weathering and altering for physical and mechanical characteristics of granite-porphry [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 599-606.
- [14] 苗朝,沈军辉,李文纲,等.大岗山坝区辉绿岩脉蚀变泥化特征及机理研究[J].工程地质学报,2014,22(1):130-136.
Miao Zhao, Shen Junhui, Li Wengang, et al. Argillization and mechanism characteristics of altered-dolerite in Dagangshan hydropower station [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 130-136.
- [15] 肇肇云,张亚涛,张学尧.泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J].煤炭学报,2015,40(5):1188-1193.
Chai Zhaoyun, Zhang Yatao, Zhao Xueyao. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1188-1193.
- [16] 付金伟,朱维申,曹冠华,等.岩石中三维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(3):411-417.
Fu Jinwei, Zhu Weishen, Cao Guanhua, et al. Experimental study and numerical simulation of propagation and coalescence-process of a single three dimensional flaw in rocks [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 411-417.
- [17] 张巍,尚彦军,曲永新,等.泥质膨胀岩崩解物粒径分布与膨胀性关系试验研究[J].岩土力学,2013,34(1):66-72.
Zhang Wei, Shang Yanjun, Qu Yongxin, et al. Experimental study

(下转第105页)

- (9): 1107–1110.
Liu Hai ,Wang Chudong ,Yan Huaicheng *et al.* Based on the model parameters of the saturation relay feedback identification and self-tuning controller parameters [J]. Computers and Applied Chemistry 2012(9) : 1107–1110.
- [12] 王 豪 ,郑恩让 ,张金果.基于继电器反馈自整定 PID 控制器研究及应用[J].计算机仿真 2011(2) : 192–195 203.
Wang Hao ,Zheng Enrang ,Zhang Jinguo. A relay feedback based auto tuning PID controller and its application [J]. Computer and Simulation 2011(2) : 192–195 203.
- [13] 马明达 ,朱新坚.继电器反馈多模型控制及应用[J].计算机仿真 2006(2) : 150–153.
Ma Mingda ,Zhu Xinjian. Relay feedback multiple model control and its application [J]. Computer and Simulation 2006(2) : 150–153.
- [14] 黄勇强 ,吴建华 ,熊振华 ,等.基于继电器反馈的伺服系统 PID 参数整定研究[J].机械制造 2008(12) : 4–7.
Huang Yongqiang ,Wu Jianhua ,Xiong Zhenhua *et al.* The servo system based on relay feedback PID parameter setting [J]. Machine Manufacturing 2008(12) : 4–7.
- [15] 潘 帅 ,杨 平.基于继电器反馈的 PID 自整定控制技术进展[J].上海电力学院学报 2008 24(2) : 132–135.
Pan Shuai ,Yang Ping. Based on relay feedback self-tuning PID control technology progress [J]. Shanghai Electric Power College Journal 2008 24(2) : 132–135.
- [16] 王 谦.基于继电器反馈的预测 PI 控制系统性能评价[D].沈阳: 沈阳工业大学 2008.
- [17] 侯 洪 ,韩震宇.基于继电器反馈的 PID 参数自整定[J].机电工程技术 2014(7) : 63–65 ,187.
Hou Hong ,Han Zhenyu. Based on relay feedback self-tuning of PID parameters [J]. Mechanical and Electrical Engineering 2014 (7) : 63–65 ,187.
- [18] Loh A P ,Tan WW ,Vasani V U. Relay feedback of multivariable systems and its use for auto-tuning of multi-loop PI controllers , control [C]. International Conference on Control. [sl] ,1994.
- [19] Khalore A G ,Date T N ,Singh S. Performance overview of relay feedback tuning of PID controller ,India Conference (INDICON) [C]. 2012 Annual IEEE. [sl] 2012.
- [20] Menani S ,Koivo H N. Automatic tuning of multivariable controllers with adaptive relay feedback ,decision and control [C]. Proceedings of the 35th IEEE Conference. [sl] ,1996.
-
- (上接第 43 页)
- on grain size distribution of collapsed scraps of argillaceous rock and its relationship with expansibility [J]. Rock and Soil Mechanics 2013 34(1) : 66–72.
- [18] 杨 庆 ,贺 洁.非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究 [J].岩土力学 2003 24(1) : 13–16.
Yang Qing ,He Jie. Comparative study on shear strength of unsaturated red clay and expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics , 2003 24(1) : 13–16.
- [19] 杨 逾 ,李 盈 ,周小科.基于西原加速模型的煤岩蠕变试验研究[J].煤炭学报 2014 39(11) : 2190–2194.
Yang Yu ,Li Ying ,Zhou Xiaoke. Study on the coal creep test based on the improved Nishihara model [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(11) : 2190–2194.
- [20] 张 明 ,王 菲 ,杨 强.基于三轴压缩试验的岩石统计损伤本构模型[J].岩土工程学报 2013 35(11) : 1965–1971.
Zhang Ming ,Wang Fei ,Yang Qiang. Statistical damage constitutive model for rocks based on triaxial compression tests [J]. Journal of Geotechnical Engineering 2013 35(11) : 1965–1971.