

文章编号:0253-9993(2010)12-2028-05

构造煤单轴压缩条件下电阻率变化规律的实验研究

孟磊¹,刘明举²,王云刚²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2. 河南理工大学安全科学与工程学院,河南 焦作 454003)

摘要:为了研究煤与瓦斯突出灾害在孕育、形成、发生过程与构造煤受力失稳破坏的关系,对构造煤在单轴压缩条件下其电阻率变化规律进行测试。结果表明:对于以电子导电为主的构造煤,荷载达到其抗压强度之前,电阻率持续下降,电阻率最小值出现在荷载达到煤样抗压强度时,随后随着煤样失稳破坏,其电阻率突然升高;中等变质程度的鹤壁贫瘦煤样,当荷载达到其抗压强度的75%左右时,出现电阻率突然下降的情况,而高变质程度的焦作无烟煤和低变质程度的淮南气肥煤,在单轴压缩的过程中,其电阻率下降较为平缓。另外,随着加载速率的增加,构造煤在单轴压缩的过程中其电阻率变化幅度减小。

关键词:构造煤;单轴压缩;电阻率;加载速率

中图分类号:TD713.1 **文献标志码:**A

Study on the rules of electrical resistivity variation of tectonic coal in uniaxial compression experiment

MENG Lei¹, LIU Ming-ju², WANG Yun-gang²

(1. School of Mechanics, Architecture and Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between the coal and gas outburst generating process and the instability and failure of tectonic coal, the uniaxial compression experiment was conducted for tectonic coal, and the electrical resistivity of tectonic coal was tested simultaneously. The results indicate that electrical resistivity of tectonic coal samples decline before external load reaches the pressive strength, the minimum value of electrical resistivity appears when external load reaches the pressive strength and the electrical resistivity suddenly increases with tectonic coal samples being instability and failure. When external load reaches 75% of compressive strength value of medium metamorphic grade coal samples from Hebi mining area, their electrical resistivity abruptly deceases, while the coal samples with high metamorphic grade and low metamorphic grade respectively from Huainan mining area and Jiaozuo mining area gently, their electrical resistivity decreases without abrupt change. In addition, the change amplitude of electrical resistivity of tectonic coal samples decreases as loading speed increases.

Key words: tectonic coal; uniaxial compression; electrical resistivity; loading speed

我国绝大多数的煤矿是地下开采,受煤层地质赋存条件等客观因素的制约,煤岩动力灾害严重。在煤矿重大灾害事故中,70%以上是瓦斯事故,死亡人数占煤矿事故总死亡人数的40%左右^[1]。在煤矿瓦斯事故中,煤与瓦斯突出事故因其本身危险性大且可能

诱发瓦斯爆炸等其它次生灾害,一直是煤炭行业安全生产研究的重点和难点。

有研究表明^[2-5],一定厚度构造煤的存在是发生煤与瓦斯突出的必要条件。煤与瓦斯突出在孕育过程中,发生的主体是地质构造异常带和构造煤发育区

收稿日期:2010-08-21 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226801);国家自然科学基金资助项目(50904024,50704034);中央高校基本科研业务专项资金;煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题资助

作者简介:孟磊(1986—),男,河南鹤壁人,博士研究生。Tel:010-51734825, E-mail: tntmllove@126.com

与瓦斯富集区的叠加区域,其孕育、形成、发生过程与构造煤所受应力状态以及能量耗散存在紧密联系^[6]。在煤与瓦斯突出孕育过程中,处于地质构造异常区域和应力集中带煤岩体的电性参数(主要是电阻率和介电常数)会发生异常变化。这种电性参数的异常变化,会引起电磁场的空间分布状态和时空分布规律显著变化,而正是基于这种异常变化,可以进行分析 and 研究电磁场的分布状态和规律,准确地找到地质构造异常带和构造煤发育区域。所以从某种意义上讲,对受载构造煤电阻率变化规律的研究也就是对在煤与瓦斯突出孕育过程中构造煤内应力状态或能量的累积释放与构造煤电阻率的异常变化存在内在联系的研究。

1 煤样孔隙结构特征、型煤制作和测试原理

1.1 煤样孔隙结构特征分析

煤是一种由孔隙、裂隙及煤骨架构成的复杂的多

孔介质。当煤体受压后部分原生裂隙、孔隙被压密闭合,随着应力的不断增加,煤体原生和外生裂隙和孔隙不断地形成、发育和扩展成一条较大的破碎带,并最终破裂。由于煤体结构中的孔隙、裂隙以及新产生的裂隙对煤体的电阻率有很大的影响,煤样在受压前后以及破坏前后,电阻率会发生相应的变化。因此孔隙结构特征是分析煤体受载条件下电阻率变化规律的基础。

为了便于实验结果分析,对煤样进行了水分(M_{ad})、灰分(A_d)、挥发分(V_{daf})、真密度、视密度、孔隙率(f)等基本参数的测定,测定结果见表1。

通过对所取煤样进行工业分析和扫描电镜实验,实验结果如图1、2所示。发现随煤化程度的提高,煤的孔隙率和裂隙密度变化较为明显,但其总的趋势是中等变质程度的煤孔隙率和裂隙密度最小,并且煤的变质程度继续增大或减小时,孔隙率和裂隙密度均增加。

表1 构造煤样基本参数

Table 1 Basic parameters of coal samples

编号	采样地点	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	真密度/($g \cdot cm^{-3}$)	视密度/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙率 f
1	焦作九里山煤矿	1.92	9.82	9.49	1.54	1.47	4.76
2	鹤壁六矿	4.36	8.88	11.38	1.41	1.35	4.26
3	淮南丁集煤矿	2.59	21.22	30.66	1.74	1.56	10.34

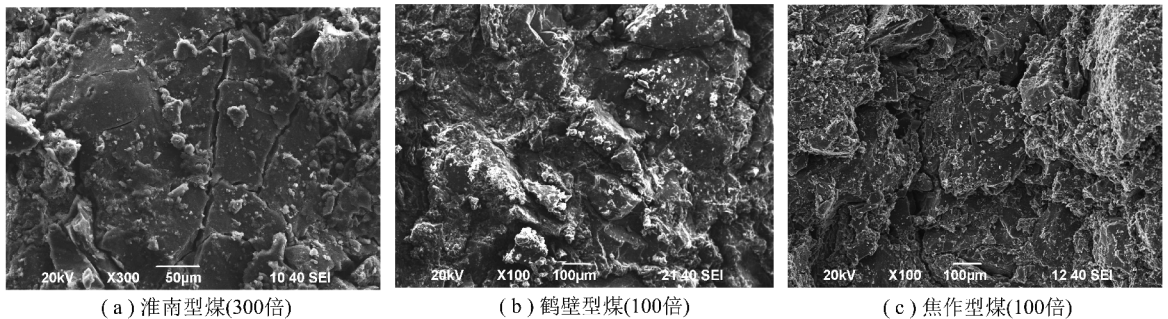


图1 实验煤样扫描电镜照片

Fig. 1 SEM images of experimental coal samples

另外根据对希尔施煤分子物理模型的分析和张井等^[7]的研究发现,低变质程度的煤的孔隙度、密度、比表面积、水分都比较高,孔径分布以大孔、中孔、过渡孔为主,微孔较少;中变质程度煤的孔隙度最小,大孔、中孔、过渡孔减少,微孔增加,比表面积降低;高变质程度煤的芳香核增大,叠合程度增加,分子排列有序,结构紧密,孔隙度增加,孔径分布以微孔占优势,而大孔、中孔、过渡孔降至最低,比表面积增加。

综合上述分析,可宏观地认为低变质程度煤的孔隙发育以大孔、中孔、过渡孔为主且相对分布均匀;中

等变质程度煤的孔隙大小分布不均匀;高变质程度煤以微孔隙发育为主且相对分布均匀。

1.2 型煤制作

强度较高的原生结构煤样,可以通过岩芯管钻取煤柱,然后用切割机切割成合适长度,最后进行打磨,使得所制煤样上下端面平行、光滑,以利于受力均匀,且与导电电极接触良好。构造煤是“煤体原生结构遭受构造作用破坏的煤”,其煤质松软,层理紊乱,甚至可以用手捻成粉末,无法通过常规的方法进行取样。而研究当前地压下的煤与瓦斯突出就必须研究

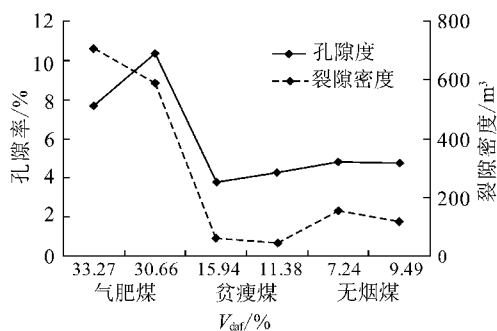


图2 孔隙度、裂隙密度与变质程度的关系

Fig. 2 The relationship between porosity, crack density and metamorphic grade

这些松软煤的力学性质。

本次实验研究选择将所取的煤样用球磨机磨成煤粉,然后将其装入专用模具,再施加高压压制成型煤(图3),在这一过程中不加任何添加剂,这样成型的煤样是模拟突出区域内构造煤较为理想的材料^[8]。加工成的型煤为圆柱状,其长度为10.0 cm,直径为5.0 cm,上下表面平行、光滑,以利于和压力压头接触,受力均匀。

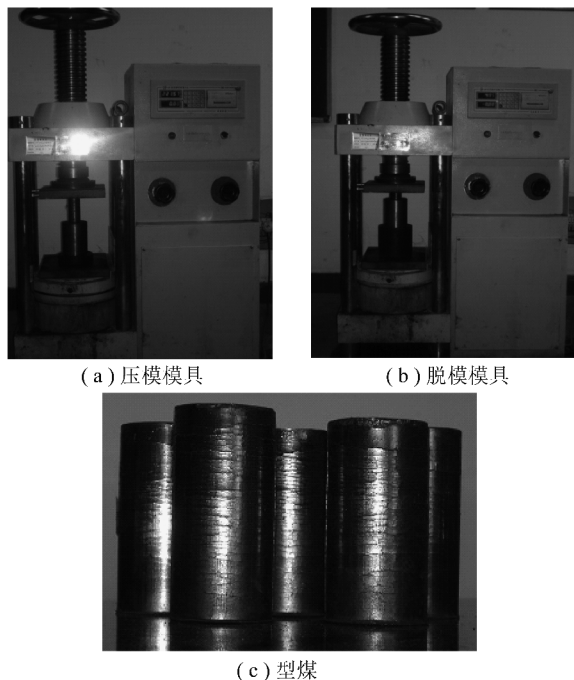


图3 型煤模具及型煤煤样

Fig. 3 Shaped coal mould and shaped coal samples

1.3 测试原理

基于前人的研究成果^[9-10]以及LCR表的原理,设计并加工了一套完整的单轴压缩过程中煤岩电性参数测试系统,如图4所示。

将测定的电阻值通过下式换算成实验样品的电阻率。

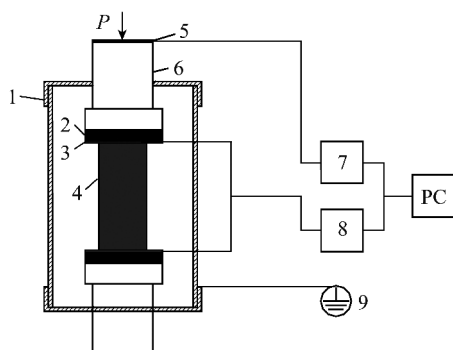


图4 外加力场下(单轴压缩)电性参数实验装置

Fig. 4 Experimental facility of electrical parameters of

externally applied stress field on the coal samples

1—屏蔽腔体;2—聚四氟乙烯绝缘板;3—导电电极板;

4—型煤试样;5—压力传感器;6—压力机压头;

7—压力机动态电阻应变器;8—LCR表;9—地线插板

$$|Z| \cos \theta = R \quad (1)$$

$$\rho = |Z| \cos \theta \frac{S}{L} = R \frac{S}{L} \quad (2)$$

式中, $|Z|$ 为阻抗绝对值; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$; R 为电阻, Ω ; S 为试样的横截面积, m^2 ; L 为试样长度, m 。

2 实验结果分析

2.1 构造煤单轴压缩条件下的电阻率变化规律

实验所使用的煤样是干燥过的,在剔除水分对电阻率影响的前提下,干燥型煤电阻率随应力的变化主要取决于孔隙率的变化。

(1) 实验结果如图5所示,型煤受载后,型煤孔隙率减小,煤体颗粒间的接触更加紧密,电阻率下降;随着外加载荷的持续增加,煤体原生孔隙与裂隙继续减小、闭合,并会产生新的裂隙,但此刻型煤孔隙率还是呈减小的趋势,也即原生孔隙与裂隙减小、闭合的速度大于新生裂隙产生、扩展、贯通的速度,型煤不断密实,煤体的电阻率仍会持续较小;当外加载荷达到型煤抗压强度时,破裂后的孔隙集成一条较大的破碎带会造成型煤破坏,这时型煤孔隙率的急剧增加,使得电阻率会迅速增大。无论是何种变质程度的型煤,都是遵从这条规律,这些规律由图5可以明显的看出。

根据固体电介质理论^[11]的解释,固体导电按导电载流子的种类分为离子导电和电子导电。因此可以认为,煤的导电性主要是由离子导电和电子导电所构成的,且所有的煤均存在电子导电,而离子导电主要是由水分和矿物质引起的。当煤体在受载过程中,一方面分子之间的间距缩小,离子在分子间跃迁的自由空间减少,这将使离子跃迁困难,离子迁移率降低,离子导电率下降;另一方面,应力的增加使分子间的

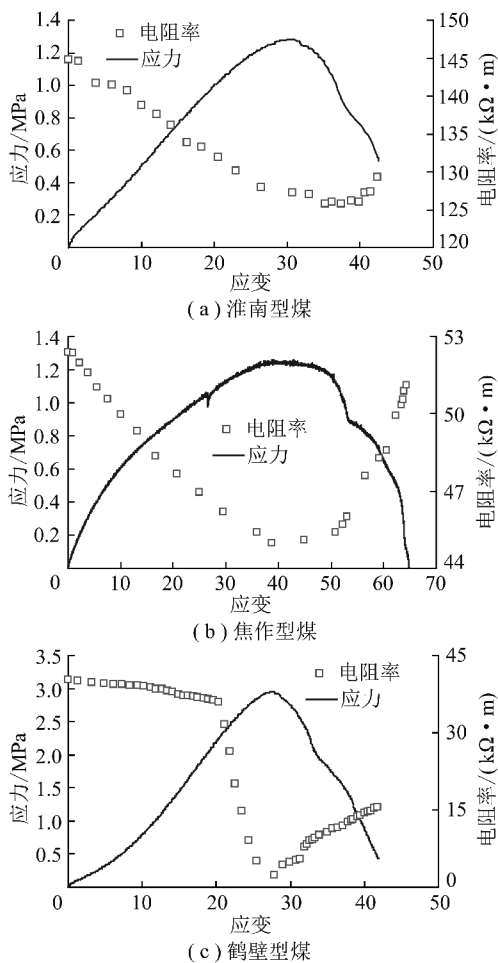


图5 型煤单轴压缩条件下电阻率变化曲线

Fig. 5 The resistivity change curves of coal samples in uniaxial compression tests

电子云重叠,电子在分子间的迁移率增加,电子导电率上升。基于煤样导电的机理,不能断定一种煤是以离子导电为主还是以电子导电为主,研究^[10,12]发现一些以离子导电为主的煤样,随着应力增加,其电阻率上升,所以对于一种煤样的导电性是以离子还是电子为主,还需进行具体的实验研究。针对本次实验而言,3个矿区不同变质程度的煤样均是以电子导电为主。

(2)对于中等变质程度的鹤壁贫瘦煤,当荷载达到其抗压强度的75%左右,电阻率突然下降;而对于变质程度较低的淮南气肥煤和高变质程度的焦作无烟煤,在单轴压缩的过程中,这些型煤电阻率下降平缓,没有突变现象出现。

基于对煤样孔隙结构特征的分析,对高变质程度的无烟煤来说,大孔、中孔以及过渡孔较少而微孔较为发育,可以认为其内部孔隙是以微孔为主且均匀分布,所以在单轴压缩的过程中,以相对均匀的微小孔隙、裂隙为主的缺陷较匀速地不断的被压缩闭合,并且新生裂隙的产生和扩展也会放慢电阻率下降速度,

所以其电阻率在单轴压缩的过程中没有发生突然下降的现象,而是下降较为平缓;大孔、中孔以及过渡孔为主要发育孔隙的淮南气肥煤同样是这样情况;而鹤壁矿区型煤在其抗压强度的75%左右时电阻率突然下降,主要因为中等变质程度的贫瘦煤孔隙度相对最小,大孔、中孔、过渡孔减少,微孔增加,比表面积降低,其孔隙分布不均匀,所以在单轴压缩的过程中,在其电阻率突降之前,主要是一些微孔以及部分大孔、中孔以及过渡孔在相对均匀的闭合,在达到型煤抗压强度的75%左右时,大孔、中孔以及过渡孔会大量地闭合,使得煤体突然密实,造成其电阻率的突降,随后随着荷载持续增加,型煤孔隙不断的被压缩闭合,并且一些外生裂隙的出现(可以在压缩过程中明显看到),电阻率下降趋势又趋于缓和。

2.2 加载速率对构造煤电阻率的影响

煤岩试样加载速率是影响煤岩强度和弹性模量的一个变量,也就是加载速率的变化会影响岩石的力学性质及其裂纹扩展机理的转化^[13-14]。当加载速率(应变速率)小于某一定值速率时,随着加载速率的增加,煤岩内部的微裂纹和微裂隙来不及发展,出现变形滞后应力的现象,因而其强度会提高,弹性模量也会增加;当加载速率大于该定值时,其强度不再增加,基本保持不变;而当应变速率降低时,岩石的力学性质会由脆性向韧性转变,具有流变的性质。

由于型煤抗压强度较低,除了鹤壁矿区的型煤抗压强度在3.1 MPa左右,其他矿区型煤的抗压强度都在1.0 MPa左右。过快的加载速率会加快型煤的破坏过程,妨碍实验的正常进行,所以其加载速率不宜过快,本实验的加载速率选用0.005 mm/s和0.010 mm/s两个加载速率;另外,由于型煤样品加工难度较大,所以只对焦作矿区型煤进行测定。在单轴压缩过程中,加载速率对煤体的电性参数的影响如图6所示。当加载速率为0.005 mm/s时,焦作型煤抗压强度为1.8 kN,而在0.010 mm/s速率下,焦作型煤抗压强度提高到了3.2 kN。对于这一煤样来讲,加载速率的提高增加了煤样的强度,与上述理论分析一致。

随着加载速率的增加,型煤在单轴压缩的过程中其电阻率变化幅度减小。基于上面理论的叙述,这主要是因为随着加载速率的增加,强度较低的型煤在其内部的微裂纹和微裂隙没有完全闭合与密实就发生了破坏,也即型煤在孔隙率较高时破坏,由煤样孔隙结构特征所控制的电阻率也就相对较大。所以在较高加载速率条件下,型煤的电阻率变化幅度较小。

3 结 论

(1)阐述了在单轴压缩过程中型煤电阻率的变

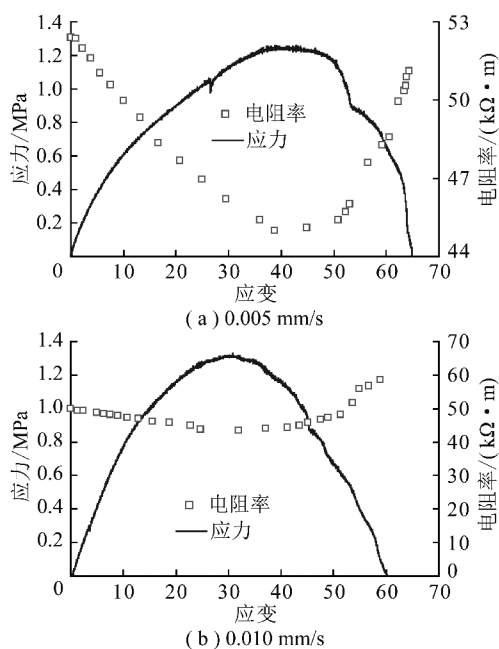


图6 不同速率单轴压缩条件下焦作型煤电阻率变化曲线

Fig.6 The resistivity change curves of Jiaozuo tectonic shaped coal samples of different load velocity

化规律,对于中等变质程度且相对强度较高的鹤壁矿区型煤,当荷载达到其抗压强度的75%左右时,出现电阻率突然下降的情况;而低变质程度的淮南贫瘦煤和高变质程度的焦作无烟煤,在单轴压缩的过程中,电阻率下降较为平缓。这主要由不同变质程度的煤样孔隙结构特征所控制。

(2)随着加载速率的增加,型煤在单轴压缩的过程中其电阻率变化幅度减小,这主要是因为随着加载速率的增加,强度较低的型煤在其内部的微裂纹和微裂隙没有完全闭合与密实就发生了破坏,也即型煤在孔隙率较高时破坏,由煤样孔隙结构特征所控制的电阻率也就相对较大。

参考文献:

[1] 范启炜,王魁军,曹林.我国煤矿瓦斯灾害事故频发的原因分析[J].中国煤炭,2003,29(7):9-11.
Fan Qiwei, Wang Kuijun, Cao Lin. Analysis of coal mine gas disasters frequently in China[J]. China Coal, 2003, 29(7): 9-11.

[2] 据宜文,姜波,侯泉林,等.构造煤结构-成因新分类及其地质意义[J].煤炭学报,2004,25(9):514-517.
Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, et al. The new structure-genetic classification system in tectonically deformed coals and its geological significance [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 25(9): 514-517.

[3] 郝吉生,袁崇孚.模糊神经网络技术在煤与瓦斯突出预测中的应用[J].煤炭学报,1999,24(6):624-627.
Hao Jisheng, Yuan Chongfu. The applying of fuzzy network techniques in prediction of coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 624-627.

[4] 张玉贵,张子敏,曹运兴.构造煤结构与瓦斯突出[J].煤炭学报,2007,32(3):281-284.
Zhang Yugui, Zhang Zimin, Cao Yunxing. Deformed-coal structure and control to coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 281-284.

[5] 王继仁,邓存宝,邓汉忠.煤与瓦斯突出微观机理研究[J].煤炭学报,2008,33(2):131-135.
Wang Jiren, Deng Cunbao, Deng Hanzhong. Study on the microcosmic mechanism for coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 131-135.

[6] 焦作矿业学院.瓦斯地质概论[M].北京:煤炭工业出版社,1990.

[7] 张井,于冰,唐家祥.瓦斯突出煤层的孔隙结构研究[J].中国煤田地质,1995,8(2):71-74.
Zhang Jing, Yu bing, Tang Jiaxiang. Study on the pore structure of coal seam with gas outburst hazard [J]. Coal Geology of China, 1995, 8(2): 71-74.

[8] 孟磊.煤电性参数的实验研究[D].焦作:河南理工大学,2010.

[9] 何学秋,刘明举.含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.
He Xueqiu, Liu Mingju. The EME dynamics of methane contained rock & coal failure [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1995.

[10] 文光才.无线电波透视煤层突出危险性机理的研究[D].徐州:中国矿业大学,2003.

[11] 陈季丹,刘子玉.电介质物理学[M].北京:机械工业出版社,1982.

[12] 康建宁.电磁波探测煤层突出危险性指标敏感性研究[D].重庆:煤炭科学研究总院重庆分院,2003.
Kang Jianing. Study on the Index's Sensitivity of ratio wave penetrating the outburst dangerous zone of coal seam [D]. Chongqing: Chongqing Branch of China Coal Research Institute, 2003.

[13] 吴绵拔.加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响[J].岩土工程学报,1982,4(2):97-106.
Wu Mianba. The effect of loading rate on the compression and tensile strength of rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(2): 97-106.

[14] 尹小涛,葛修润,李春光,等.加载速率对岩石材料力学行为的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2 610-2 615.
Yin Xiaotao, Ge Xiurun, Li Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2 610-2 615.