

孔径及孔隙率对火山岩强度特性影响的模拟

陈崇枫^{1,2}, 徐涛^{1,2}, Heap Michael³, 杨天鸿^{1,2}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 法国斯特拉斯堡大学 岩石变形研究所, 法国 斯特拉斯堡 67084)

摘 要: 在对火山岩圆球形孔隙结构研究的基础上,运用岩石破裂过程分析系统模拟了火山岩单轴压缩过程,研究了孔径及孔隙率对火山岩岩石变形强度特性的影响. 研究表明:孔径从 0.1 mm 增加到 0.3 mm,极限应变的降低百分率随着孔隙率的增加保持在一定范围内波动;弹性模量的降低百分率随着孔隙率的增加逐渐增加,并且呈现明显的线性增加趋势. 在恒定孔隙率下,孔径对其影响主要表现在随孔径的增大,破坏模式由剪切破坏逐渐向劈裂破坏过渡.

关 键 词: 孔径大小;孔隙率;强度特性;破坏模式;数值模拟

中图分类号: TU 521.2⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)05-0725-05

Modeling of the Influence of Pore Size and Porosity on Strength Characteristics of Volcanic Rock

CHEN Chong-feng^{1,2}, XU Tao^{1,2}, HEAP Michael³, YANG Tian-hong^{1,2}

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Laboratoire de Déformation des Roches, équipe de Géophysique Expérimentale, Institut de Physique de Globe de Strasbourg, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France. Corresponding author: XU Tao, professor, E-mail: xutao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the study of the pore structure of volcanic rock, the uniaxial compression process of volcanic rock was numerically performed to investigate the influence of pore size and porosity on strength characteristics of volcanic rock using rock failure process analysis system (RFPA2D). The results show that under the pore size increasing from 0.1 to 0.3 mm, reduction percentage of ultimate strain with the increase of porosity keeps fluctuation within a certain range, elastic modulus' reduction percentage increase with the increase of porosity and shows a linear increasing trend. Under the same porosity, the influence of pore size mainly shows that, with the increasing of the pore size, failure mode of the samples gradually tends to split fracture.

Key words: pore size; porosity; strength properties; failure mode; numerical simulation

火山岩因其复杂的形成过程导致其内部孔隙发育有不同大小的孔径及孔隙分布^[1]. 在自然状态下,很难同时取得孔径大小和孔隙率相同的试件^[2-3]. 即使能取到孔径大小相差不多的,但孔隙率就很难保证相同,反之亦然^[4]. 针对此类岩石不同孔径和孔隙率对岩石强度影响的研究,仅靠室内试验,在目前的技术条件下,很难完成. 所以,

数值模拟^[5-6]提供了一种较好的研究方法.

针对此类问题,国内外学者曾做过一些相关研究. Backer 等^[2]和 Voltolini 等^[3]采用 X 射线断层摄影技术获取火山岩的二维 μ -CT 扫描图片,并利用二维图片对火山岩的微观结构进行了三维重建,研究火山岩的孔隙结构. Ju 等^[7]利用模型材料制作了与天然砂岩具有相同孔隙特征及物理

收稿日期: 2015-12-18

基金项目: 国家基础研究发展计划项目(2013CB227900,2014CB047100); 国家自然科学基金资助项目(41672301,51474051,41172265); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N150102002); 中法蔡元培项目(36605ZB); 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0801607).

作者简介: 陈崇枫(1991-),男,山东菏泽人,东北大学博士研究生; 徐涛(1975-),男,湖北随州人,东北大学教授,博士生导师; 杨天鸿(1968-),男,辽宁抚顺人,东北大学教授,博士生导师.

力学性能的岩石圆盘模型,并分析了物理模型孔隙数量、孔隙尺寸等分布特征. Fakhimi 等^[5]和 Gharahbagh 等^[6]模拟了不同岩样尺寸大小情况下的不同孔隙率(11% ,16% 和 24%)以及不同孔径大小(0.5 mm 和 0.25 mm)对弹性模量、致裂压力以及抗拉压强度的影响.

以上工作主要集中于孔隙率对岩石力学性能的影响,但尚未系统地开展孔径及孔隙率大小对岩石抗压强度和岩石破坏特征影响的研究. 本文系统开展了圆球形气孔的不同孔径及孔隙率大小对火山岩强度以及破坏特性影响的数值研究,以期了解其对火山岩力学性能的影响,并为火山岩中岩石工程设计施工提供理论基础和设计指导.

1 数值模型及参数

本文主要研究火山岩圆球形气孔对岩石强度的影响. 原生气孔的形成与火山喷发和固结有很大关系^[8],岩浆在上升过程中,孔径和孔隙率随着熔浆各方面因素的变化而不断变化. 主要表现为由于岩浆上升喷发的过程中的压力不断减小,熔融状态下气体溶解度不断降低,导致气体不断出溶. 岩浆上升初期即固结火成岩的底部气孔比较少见,而且气孔体积比较小;上部的岩浆温度降低,黏度增大,流动性减小,有大量气体逸出,气孔逐渐增多,随着气体体积变大,上升到了顶部,气孔不断聚结,数量变少,体积增大,所以在火山岩上部,常见较多的气孔和大气孔^[9-10].

本文数值模拟采用岩石破裂过程分析系统(RFPA^{2D})软件,采用系统随机产生基于 Weibull 分布的孔隙. 数值试验采用平面应力模型,模型尺寸 40 mm × 20 mm,网格划分为 400 × 200 个单元. 整个加载过程采用位移控制的加载方式,加载量 $\Delta s = 0.005$ mm,数值模型采用上部加载,不加载围压,具体模型的受力分析见图 1,数值模型中的主要力学参数: E_0 为 100 GPa, σ_0 为 2 300 MPa,泊松比 μ 为 0.25,其他力学参数见文献^[10]. 为了更直观地观测出孔径大小以及孔隙率对岩石抗压强度产生的影响,参考火山岩实际情况^[2-3]以及前人对此类岩石的研究^[1,5],设置模型的孔径大小分别为 $R = 0.1, 0.3, 0.5, 1$ mm;孔隙率大小分别为 $\Phi = 2\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%, 35\%, 40\%$. 因篇幅有限,仅部分模型列于表 1 中.

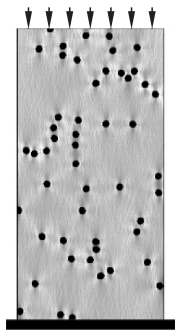


图 1 数值模型
Fig. 1 Numerical model

表 1 数值模型
Table 1 Numerical models

孔隙率/%	R/mm			
	0.1	0.3	0.5	1
2				
40				

2 模拟结果与分析

2.1 孔隙率和孔径对极限抗压强度的影响

孔隙率和孔径对极限抗压强度的影响见图 2. 由图 2a 可知在同一孔径下,极限抗压强度随孔隙率的增大逐渐降低. 恒定孔径下孔隙率对极限强度的影响呈指数衰减形式,其变化逐渐趋于平缓;当孔隙率大于 30% 以及孔径大于 0.3 mm 时,其孔隙率的变化对强度的影响较小. 而孔径为

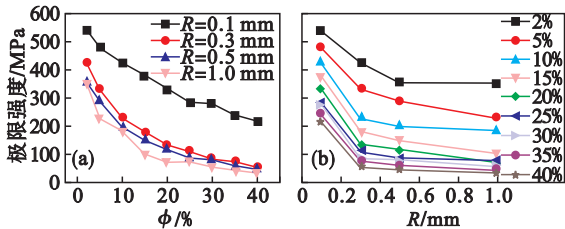


图 2 孔径和孔隙率与极限抗压强度的关系
Fig. 2 Influence of pore size and porosity on ultimate strength

(a)—不同孔径; (b)—不同孔隙率.

0.1 mm 时的强度比其他孔径时的要高得多,特别是当孔隙率增大时,强度差距增大,这说明孔径为 0.1 mm 时,比其他孔径对极限抗压强度的影响要小得多;当孔径大于 0.3 mm 时,不同孔径的强度曲线之间相差不是太大,说明当孔径大于 0.3 mm 时,孔径对强度的影响已不太明显。

图 2b 显示出恒定孔隙率下,极限抗压强度均随着孔径的增大而逐渐减小,而后逐渐趋于平稳.在孔径小于 0.3 mm 时,随孔径增大,试样的极限抗压强度衰减较快;继续增大孔径,试样的极限抗压强度衰减变缓并趋于稳定.由图 3 可知,随着孔隙率的增加,极限强度下降率保持逐渐增加趋势,曲线小孔径下孔隙率对极限强度的影响。

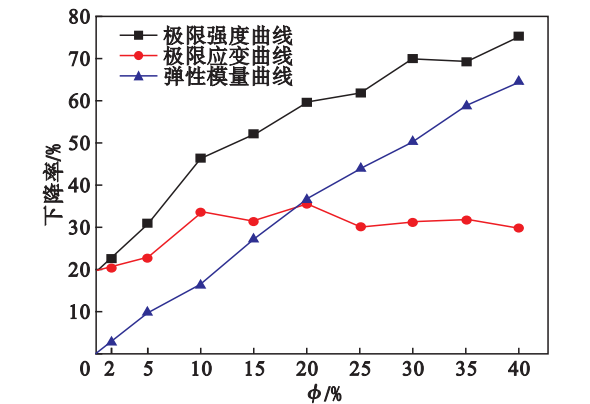


图 3 不同孔隙率下 0.1 到 0.3 mm 孔径强度特性下降曲线

Fig. 3 Strength property decrease curves of samples for pore size ranging from 0.1 to 0.3 mm

孔隙率以及孔径的增大导致了孔隙与孔隙之间的距离减小,在受压时就会在孔隙的上下端产生拉应力集中,因为应力集中导致孔隙周边应力集中部位裂纹的产生,一旦产生了裂纹,就会因为基质的抗拉强度小于拉应力而造成裂纹的萌生、扩展和贯通.因此随孔隙率和孔径的增大宏观表现为试样极限抗压强度的降低。

2.2 孔隙率和孔径对极限应变的影响

孔隙率和孔径对极限应变的影响见图 4. 图 4a 显示,在孔径恒定情况下,岩石破坏时的应变随孔隙率的增加逐渐减小并趋于平缓.当孔径为 0.1 mm 时,岩石破坏的应变明显大于孔径大于 0.3 mm 时的应变.在孔径大于 0.3 mm 孔隙率大于 30% 时,恒定孔径下,增大孔隙率对极限应变的影响较小。

图 4b 说明,在恒定孔隙率情况下,岩石破坏时所发生的应变随孔径的增加逐渐减小,并且有趋向于平缓的趋势.在孔隙率大于 10%,孔径小于 0.3 mm 时,孔径的变化对极限应变的影响较

大,即使孔径只是较小的增加,也会造成极限应变的较大降低.如图 4 中极限应变曲线所示,在小孔径范围内,孔隙率对极限应变的影响并没有表现出如极限强度的特性,而是保持在一定值(25%)上下波动,这说明,在小孔径范围内,孔隙率对极限应变的影响并不是很明显。

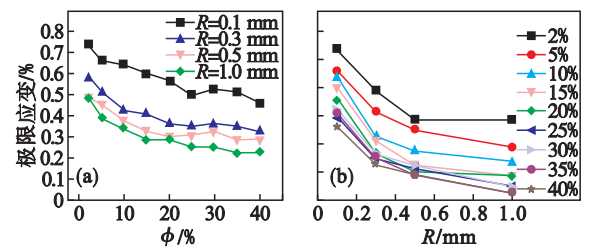


图 4 孔径和孔隙率与极限应变的关系曲线

Fig. 4 Influence of pore size and porosity on ultimate strain

(a) — 不同孔径; (b) — 不同孔隙率.

2.3 孔隙率和孔径对弹性模量的影响

孔隙率和孔径对弹性模量的影响见图 5. 由图 5a 可见,当孔径恒定时,岩石的弹性模量随孔隙率的增大逐渐减小;而孔隙半径为 0.1 mm 时,相比其他孔径,弹性模量的减小程度要小得多.当孔径大于 0.3 mm 时,孔径大小对弹性模量的影响程度较小或者是几乎没有影响,并且弹性模量与孔隙率的关系曲线近乎线性.如图 5b 所示,当孔隙率一定时,岩石的弹性模量随孔径的降低量,随着孔隙率的增加下降的幅度越大,如图 5 中弹性模量曲线所示,在孔径从 0.1 增加到 0.3 mm 时,其弹性模量的降低百分率随着孔隙率的增加逐渐增加,并且呈现明显的线性增加的趋势.但在恒定孔隙率下,弹性模量随孔径增加而降低到一定程度之后逐渐保持稳定.值得注意的是,当孔隙率为 2% 时,弹性模量随孔隙半径的增加,几乎没有变化,由此可知孔隙率小于等于 2% 时,孔隙率对弹性模量的影响不大。

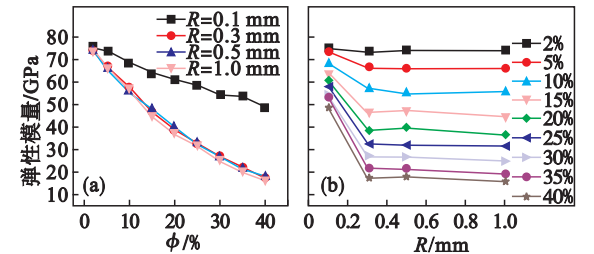


图 5 孔径和孔隙率对弹性模量的影响

Fig. 5 Influence of pore size and porosity on elastic modulus

(a) — 不同孔径; (b) — 不同孔隙率.

2.4 孔隙对破坏模式的影响

当前了解岩石细观破坏过程的一个较广泛的方法就是通过监测岩石破坏过程中的声发射. RFPA^{2D} 基于岩石的声发射与损伤具有一致性的假设来模拟岩石破裂过程中的声发射,其声发射的数量同损伤的单元数成正比,声发射的能量与岩石损伤释放的弹性能成正比,从而计算出岩石破裂过程中声发射的数目及每个声发射事件的能量. 在声发射图中,一个圆代表一个声发射事件,而圆的大小代表单元发生破坏所释放的能量大小. 图 6 给出了孔隙率为 5%, 孔径为 1.0 mm 的试样的应力-应变-声发射曲线,图中曲线标示字母位置对应的破坏过程中的声发射演化列于图 7 中.

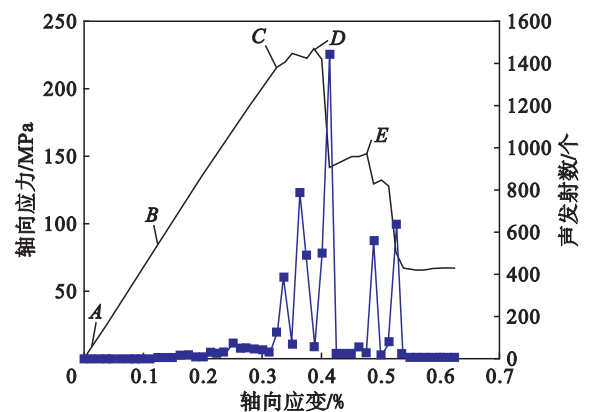


图 6 应力-应变-声发射曲线($\phi=5\%$, $R=1.0\text{ mm}$)

Fig. 6 Simulated stress-strain-AE curves ($\phi=5\%$, $R=1.0\text{ mm}$)

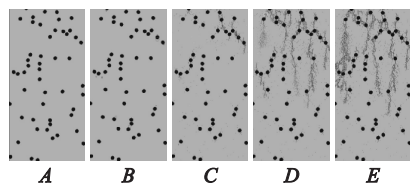


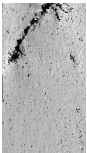
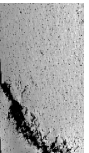
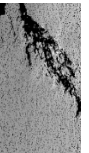
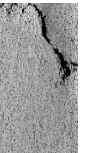

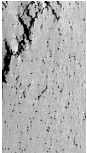
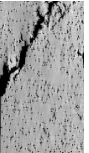

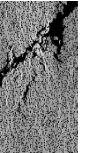

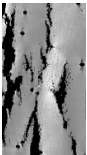
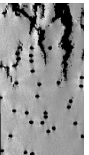
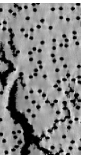
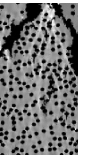
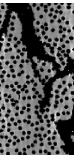
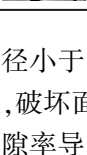
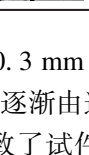
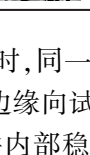
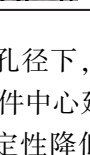
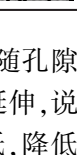
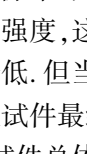
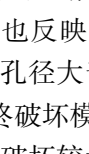
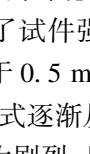
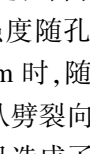
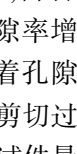
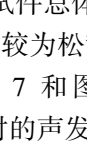
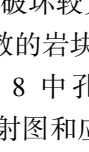
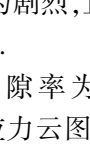
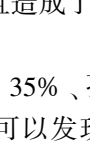
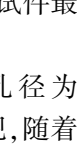
图 7 破坏过程的声发射图($\phi=5\%$, 孔径=1.0 mm)

Fig. 7 AE picture of failure process($\phi=5\%$, $R=1.0\text{ mm}$)

由图 7 可以看出,在加载的初期,试样内部主要在孔隙周边出现因拉应力诱发的损伤破坏,但是其位置的随机性比较大,这是受到均质度的影响导致一些抗拉强度较小的部位首先发生破坏. 破坏部位为孔隙的上下端,并且大部分是在随机产生孔隙相对较为集中时开始出现的,这是由于圆孔的上下端面拉应力集中,导致圆孔的上下端面的拉应力大于基质的抗拉强度. 孔隙的集中分布导致了基质的抗拉强度相对其他部位较小,抗拉能力减弱,最终导致裂纹的产生. 随着进一步加

载,拉应力逐渐增大,裂纹沿着最先产生的方向延伸,这表明裂纹是由最先破坏的一些单元沿着抗拉强度较小的方向发生扩展的. 在岩样破坏的整个过程中,只是间歇性地出现了一些剪应力,总体来说,此类孔隙岩样的破坏形式主要为拉破坏.

如表 2 所示在相同孔隙率下,孔径对其影响主要表现在随孔径的增大,破坏面的角度逐渐变大,破坏形式逐渐演变为贯穿性破坏,破坏模式逐渐趋于劈裂破坏. 如图 8 所示(表中纵向表示一定孔隙率和孔径下的不同加载过程中的应力截图),在孔隙率为 2% 孔径为 0.1 mm 时,其破坏时从一侧靠近端部产生,逐渐向端部中间位置延伸,直到破坏面的形成;相比之下,在 1.0 mm 时,初始裂纹从试件的中部产生,向上下两端逐步延伸,形成若干条竖向裂纹,最后形成劈裂破坏模式. 在孔隙率为 35% 时,其总体情况和孔隙率为 2% 时类似,孔径较小时,裂纹从试件一侧产生并且向端部中点处延伸,形成一个倾角较小的宏观裂纹,当孔径较大时,其破坏模式为一条破坏倾角较大并能够近乎贯穿试件的较大的破坏面.

表 2 最终破坏模式应力图					
Table 2 Final stress snapshots of failure process					
孔径/mm	孔隙率/%				
	2	5	15	25	35
0.1					
					
0.3					
					
1.0					
					

当孔径小于 0.3 mm 时,同一孔径下,随孔隙率的增大,破坏面逐渐由边缘向试件中心延伸,说明增大孔隙率导致了试件内部稳定性降低,降低了试件的强度,这也反映了试件强度随孔隙率增大逐渐降低. 但当孔径大于 0.5 mm 时,随着孔隙率的增大试件最终破坏模式逐渐从劈裂向剪切过渡,但是试件总体破坏较为剧烈,且造成了试件最终破坏为较为松散的岩块.

由图 7 和图 8 中孔隙率为 35%、孔径为 1.0 mm 时的声发射图和应力云图可以发现,随着

加载的进行,岩样受到压缩变形,试样内孔隙逐渐被压缩为椭圆形,在椭圆的上下顶端出现较高的拉应力集中,当集中的拉应力达到一定程度时,会在椭圆的上下两顶端较薄弱地带撕裂,从而形成裂隙.当加载位移逐渐增大,就会加强这种撕裂状态从而沿着裂隙逐渐扩展.当基质较少的区域相对较集中时,就会很容易发生裂隙的贯通,从而形成了更大的裂隙,这就是裂纹的扩展,逐渐导致试件的最终破坏.

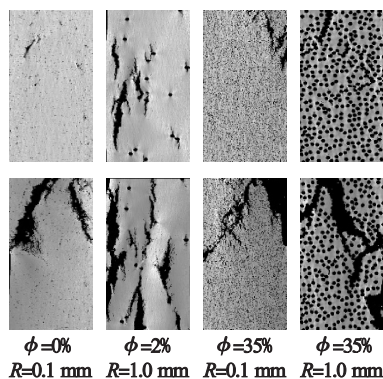


图 8 破坏过程中的应力图

Fig. 8 Stress snapshots of failure process

综上所述,岩样最初的细观破坏是从孔隙上下顶端开始的,随后逐渐增多,并且逐渐延伸扩展.孔隙的存在降低了岩样的强度,使岩样更容易发生破坏,当孔隙越多、孔径越大时,这种现象也越明显,这也就解释了岩样的孔隙率越高、孔径越大,其相应的岩石强度就会越小的现象.

3 结 论

1) 同孔径下,岩石的极限抗压强度、弹性模量及极限应变随孔隙率的增大而逐渐减小;同孔隙率下,岩石的极限抗压强度、弹性模量及极限应变随孔径的增加逐渐降低并趋于稳定.

2) 当孔隙率大于 30% 以及孔径大于 0.3 mm 时,增大孔隙率对极限强度以及极限应变的影响较小;当孔径大于 0.3 mm 时,孔径大小对弹性模量的影响程度较小,且弹性模量与孔隙率的关系曲线近乎线性的;特别是当孔隙率为 2% 时,孔径的变化对弹性模量的影响较小.

3) 孔径从 0.1 mm 增加到 0.3 mm,其极限强度的降低率随孔隙率的增加,保持逐渐增加趋势;极限应变的降低率随孔隙率的增加保持在一定范围内波动;弹性模量的降低率随孔隙率的增加逐渐增加,并呈明显的线性增加趋势.

4) 在相同孔隙率下,孔径对其影响主要表现

在随着孔径的变大,剪切面的角度逐渐变大,破坏形式逐渐演变为贯穿性破坏,宏观上的破坏模式由剪切破坏逐渐向劈裂破坏过渡.

参考文献:

- [1] Al-Harathi A A, Al-Amri R M, Shehata W M. The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia [J]. *Engineering Geology*, 1999, 54 (3): 313 – 320.
- [2] Baker D R, Mancini L, Polacci M, et al. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks [J]. *Lithos*, 2012, 148: 262 – 276.
- [3] Voltolini M, Zandomeneghi D, Mancini L, et al. Texture analysis of volcanic rock samples: quantitative study of crystals and vesicles shape preferred orientation from X-ray microtomography data [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 202 (1): 83 – 95.
- [4] Zhang J, Tao G, Huang L, et al. Porosity models for determining the pore-size distribution of rocks and soils and their applications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (34): 3960 – 3970.
- [5] Fakhimi A, Gharahbagh E A. Discrete element analysis of the effect of pore size and pore distribution on the mechanical behavior of rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48 (1): 77 – 85.
- [6] Gharahbagh A E, Fakhimi A. The effect of pore size on tensile and compressive strengths of rock: a bonded particle simulation [J]. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2011, 36 (5): 814 – 825.
- [7] Ju Y, Yang Y M, Song Z D, et al. A statistical model for porous structure of rocks [J]. *Science China Technological Sciences*, 2008, 51 (11): 2040 – 2058.
- [8] 王乃军, 罗静兰, 郭永峰, 等. 黄骀拗陷歧口凹陷新生界火山岩孔隙类型、孔隙结构特征及分类评价 [J]. *现代地质*, 2013 (1): 200 – 207.
(Wang Nai-jun, Luo Jing-lan, Guo Yong-feng, et al. The pore types, pore structure characteristics and classification of evaluation for cenozoic volcanic rocks of Qikou sag in Huanghua depression [J]. *Modern Geology*, 2013 (1): 200 – 207.)
- [9] 卢继平. 徐家围子营城组火山岩储层成岩作用及孔隙演化 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
(Lu Ji-ping. Diagenesis and porosity evolution in K1yc volcanic reservoir in Xujiaweizi [D]: Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.)
- [10] Heap M J, Xu T, Chen C F. The influence of porosity and vesicle size on the brittle strength of volcanic rocks and magma [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2014, 76 (9): 1 – 15.