

黄土劈裂注浆土体裂纹扩展模型研究*

马连生^{1,2}, 王腾¹, 周茗如¹, 朱冬梅³

(1.西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,兰州 730050; 2.兰州理工大学 理学院,兰州 730050;
3.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 上海 200240)

摘要:土体裂纹扩展几何形态是劈裂注浆加固设计中需要考虑的一个重要因素,但土体注浆劈裂的发生、发展过程很难可视化。本文结合兰州新区某快速道路工程K1+662.053段加固工程,通过分析劈裂注浆裂纹扩展走势,研究了黄土地区劈裂注浆对湿陷性黄土的加固机理。并从断裂力学的角度出发,对劈裂注浆过程中土体裂纹在浆液压力下的扩展、止裂行为展开了研究并给出了相应的判断依据,建立了裂纹扩展模型。研究表明:劈裂注浆裂纹形成纵横扩展形式呈张开型,属于I型裂纹;裂纹的扩展行为受注浆压力及土层地应力的影响;浆液在裂纹中通过挤压土体形成浆脉,对土体加固起到骨架支撑作用。

关键词:黄土;劈裂注浆;裂纹;断裂力学;扩展行为;判断依据

中图分类号:TU472.6 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)04-0962-06

Study on the Crack Extended Model for Loess with Fracturing Grouting

Ma Liansheng^{1,2}, Wang Teng¹, Zhou Mingru¹, Zhu Dongmei³

(1. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, P.R. China; 2. school of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P.R. China 3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P.R. China)

Abstract: The extended geometric shape of soil crack is an important factor in the strengthenment design of split grouting, but the occurrence and development of soil split grouting is difficult to visualize. Based on the reinforcement engineering of the expressway engineering K1+662.053 in Lanzhou New Area, by analyzing the extended trend of fracturing grouting crack, the reinforcement mechanism of collapsible loess with split grouting in loess area was studied. During the process of fracturing grouting, the crack extension and arrest behavior of soil body flaw caused by slurry pressure was studied from the aspects of fracture mechanics, and the crack growth model was established. The results show that the vertical and horizontal expansion caused by fracturing grouting was open type, and it belonged to I crack type; the crack extension was affected by grouting pressure and soil layer stress; the grouting fabric was formed by slurry squeezing soil in the crack, and it can act as a framework in soil reinforcement.

Keywords: loess; fracturing grouting; crack; fracture mechanics; propagation behavior; judgment basis

* 收稿日期:2018-01-21(修改稿)

作者简介:马连生(1963-),男,山东临朐人,博士,教授,博士生导师,主要从事非线性力学理论及应用的研究。

E-mail:18919075046@163.com

通讯作者:王腾(1986-),男,山东潍坊人,博士,主要从事注浆加固及复合地基优化的研究。

E-mail:wangteng2035@163.com

基金项目:甘肃省建设科技攻关项目(JK2014-34)

0 引言

在西部大厚度黄土地区,对沉降建筑物使用注浆加固已成为有效的技术手段^[1]。虽然新型注浆材料及设备被越来越频繁的更新,但对注浆理论方面的研究却极为缓慢^[2]。大部分工程设计存在盲目性,对注浆参数的选择往往凭主观经验进行判断,造成施工时对浆液的扩散及土体变形情况难以获知,使得对加固后的评测造成了不确定性^[3-5]。

为解决这一问题,许多学者对浆液的扩散规律进行了研究。郑卓等^[1]建立了基于浆液对岩体单向耦合作用下的裂隙岩体注浆理论模型;邹金锋等^[6]为了获得裂隙岩体中劈裂注浆压力的计算方法,采用了断裂力学中非线性 Hoek-Brown 强度准则,建立了裂隙岩体中 II 型和复合型裂纹的劈裂注浆压力计算方法,对基于均匀裂纹情况下的劈裂注浆扩散规律及压力衰减进行了研究。Gustafson 等^[7]基于宾汉体本构模型建立了恒压注浆条件下单一平板裂纹浆液运移方程。然而,这些研究依然局限在浆液的运移规律上,忽略了裂纹在土体中的扩展行为,对大厚度黄土地区劈裂注浆加固机理不能作出很好的阐释。

为此,本文结合兰州新区某快速道路工程 K1+662.053 段加固工程,通过分析劈裂注浆裂纹扩展走势,研究了黄土地区劈裂注浆对湿陷性黄土的加固机理,并从断裂力学的角度出发,对劈裂注浆过程中土体裂纹在浆液压力下的扩展、止裂行为展开了研究并给出了相应的判断依据,建立了裂纹扩展模型,希望对西部大厚度黄土地区劈裂注浆的工程

实践提供一定的指导与借鉴。

1 理论推导

1.1 问题分析及假定

当劈裂注浆的压力达到一定数值时,土体开始剪切破坏^[8],形成劈裂裂隙,此阶段一般称为劈裂流动阶段。当裂纹发展到一定程度时,地层中的大小主应力方向发生变化,水平向主应力转化为被动土压力状态,出现二次劈裂。对于均质地层,理论上劈裂面沿最小主应力面(即垂直面)形成,劈裂压力与地基中的小主应力及抗拉强度成正比^[9]。但实际上,由于地层的不均匀性,劈裂裂纹的分布是不规则的,呈树枝状分布。

基于上述分析,为简化计算,本文做出如下假定:①浆液为牛顿流体,且浆液的流动为层流运动符合达西定律^[1];②土体的断裂为线弹性断裂;③裂纹沿处置水平最小地应力平面呈椭圆形。

根据大厚度黄土地区劈裂注浆形成裂纹的特征,本文裂纹扩展模型选用二维垂直缝计算模型。劈裂注浆裂纹在土体中的扩展模型如图 1 所示。

研究表明黄土劈裂注浆时浆液在注浆孔内并非球形扩散或柱状扩散,而是沿注浆孔侧壁垂直劈裂土体(图 1)。作用于裂纹面上的浆液压力是裂纹扩展的驱动力,浆液侵入裂缝并继续扩展后形成片状楔形体,应视为片状劈裂扩散^[10],裂纹扩展及应力分布如图 2。同时,浆液在裂纹内的流动包括沿裂纹面的切向流动和垂直裂纹面的法向流动。本文将黄土在劈裂注浆过程中的土体裂纹形态简化为二维垂直缝^[11],简化模型如图 3。

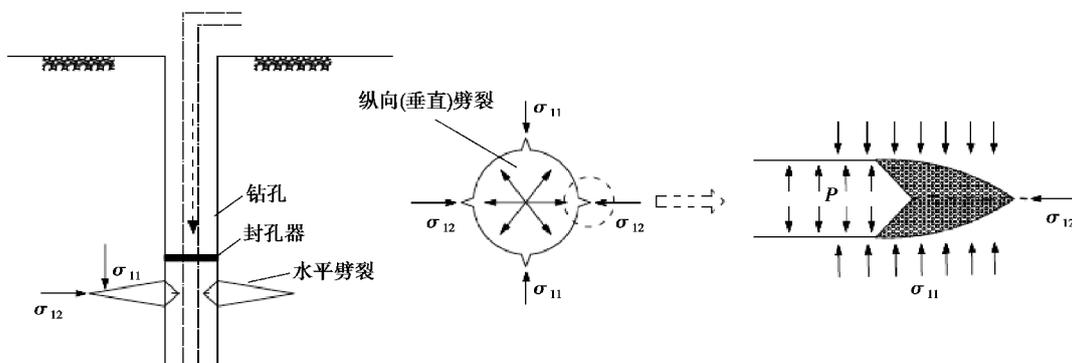


图 1 劈裂裂缝继续扩展示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack expanding

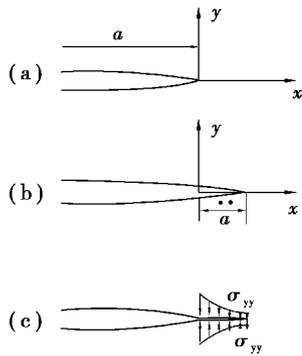


图 2 裂纹扩展及应力分布

Fig. 2 Crack propagation and stress distribution

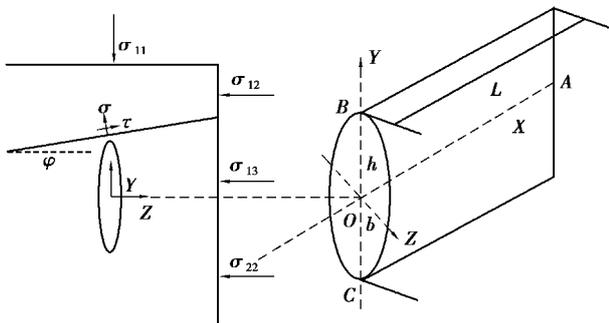


图 3 裂缝形态扩展模型

Fig. 3 The extended model of crack shape

图 3 中： σ_{11} 为土体上覆压力； σ_{12} 为土体最小水平地应力； φ_1 为最小主应力与土体界面的倾角。

1.2 浆液裂纹方向发展规律

根据假定,对黄土断裂符合线弹性理论,裂纹的扩展方向并不一定沿轴线方向延伸,可能与轴线成一定夹角,一般把这个角度称为断裂角,用 φ_1 表示。按照断裂力学理论^[11]可知,裂纹顶端附近都存在一个塑性区,若塑性区的尺寸同裂纹尺寸相比很小,则 K 判据依然适用。

各向同性介质圆柱形孔扩张问题,可简化为平面厚壁圆环问题^[12]。在平面应力状态下,裂纹扩展与应力分布如图 2 所示。根据渐近公式和主应力计算公式得到^[11]:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi_1}{2} \left(1 \pm \sin \frac{\varphi_1}{2} \right) \quad (1)$$

考虑在平面应力状态下 $\sigma_3 = \sigma_{zz} = 0$, 根据 von Mises 屈服准则,可以继续得出:

$$\sigma_s = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{\cos^2 \frac{\varphi_1}{2} \left(1 + 3 \sin^2 \frac{\varphi_1}{2} \right)} \quad (2)$$

根据 K 判据^[11],浆液在裂纹中的启裂扩展条

件为,裂纹前端任意一点的应力强度因子达到某一临界值,此临界值为土体的断裂韧性 K_C 。因此裂纹的扩展判断依据为:

$$K_1 = K_C \quad (3)$$

式中: K_1 为裂纹扩展判据,即为裂纹应力强度因子; K_C 为断裂韧度。

当裂纹发生在主应力面时,该面上的剪应力为零,此时根据 von Mises 屈服准则可以得到裂纹失稳后黄土土体裂纹最可能扩展的方向:

$$\cos^2 \frac{\varphi_1}{2} \left(1 + 3 \sin^2 \frac{\varphi_1}{2} \right) = 0 \quad (4)$$

1.3 裂纹扩展规律

当裂纹在界面停止扩展时,扩展点处的裂纹长度和高度远远大于宽度,内部浆液压力可以近似看成沿 Z 轴方向。应用复变函数解法,对式(2)采用第二类完全椭圆积分函数,得出受均匀内压椭圆裂纹前端任意一点的 I 型应力强度因子的表达式^[13]:

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi h}{b}} \left[\frac{p - \sigma_{13}}{E(k)} \right] (h^2 \cos^2 \varphi_1 + b^2 \sin^2 \varphi_1)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中: h 为裂纹半高; b 为裂纹半长; p 为裂纹内浆体压力; E 为第二类全椭圆积分函数。

由式(3)知,当裂纹前段应力强度因子等于土体断裂韧性时,裂纹停止扩展。此时,浆液流体压力等于应力强度因子,即:

$$p_1 = K_1 = K_C \quad (6)$$

当 $l=2h$ 时,式(6)可以简化为:

$$K_A = \sqrt{\frac{2l}{\pi}} (p - \sigma_{13}) = K_{IC} \quad (7)$$

式中: K_A 为 A 点应力强度因子; K_{IC} 为 A 点土体的断裂韧度; l 为裂缝延展深度。

得到 A 点浆液临界压力为:

$$p_1 = K_{IC} \sqrt{\frac{\pi}{2l}} + \sigma_{13} \quad (8)$$

2 模型应用分析

2.1 工程概况

兰州新区某快速道路工程 K1+662.053 段工程,地层自上而下为黄土、砂砾层和基岩。依据现场条件,设计的注浆深度在 2.0 m,原状黄土 SEM 下的微

观结构图如图4,原状黄土的力学性能见表1。

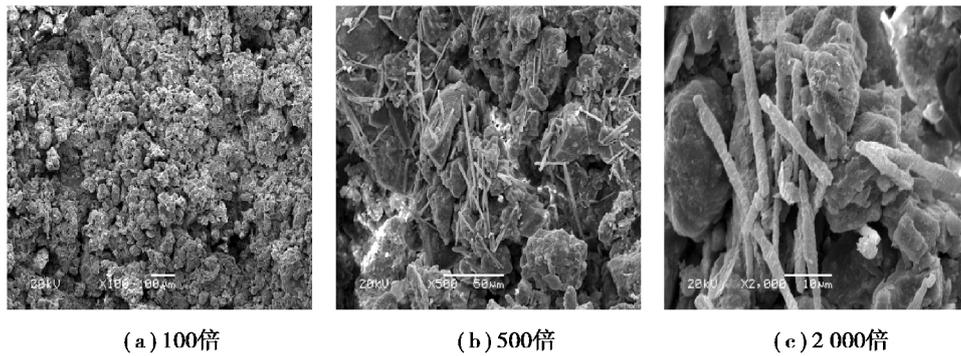


图4 原状黄土 SEM 下的微观结构

Fig. 4 Microstructure of undisturbed loess by SEM

表1 原状黄土的力学性能

Table 1 Mechanical properties of intact loess

含水量 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	湿密度 $\rho_0/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩系数 $/\text{MPa}^{-1}$	孔隙比 e	饱和度 S_r	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
20.3	1.46	1.8	0.39	1.11	55.65	28.8	17.9	32	28.6

2.2 注浆设计

根据弹性理论可知^[13],在垂直于钻孔的平面内,受2个相等的地应力作用,即 $\sigma_{13} = k\gamma z$ 。劈裂裂纹扩展模型如图1。在现场地质条件下, $k = 0.5$,取土体天然重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$,土的抗拉强度 $\sigma_t = 10 \text{ kPa}$,得到钻孔中发生垂直劈裂的最大和最小起始劈裂压力为: $p_{1\max} = 100 \text{ kPa}$ 和 $p_{1\min} = 46 \text{ kPa}$ 。

粘性土单位体积所需的浆液灌入率为: $Q_{\max} = 27\%$, $Q_{\min} = 13.7\%$,施工时根据当地情况取中间值^[12],即要求浆液灌入率为20%。

2.3 数据分析

根据测试1~6加固土层的监测资料(表2),劈裂后裂缝高度在1.5~2.0 m,随深度有所降低。同时发现,在低压力下,扩散距离较小,但在注浆管附近,土体位移量较大。因此可以推断,在低压力下,浆液会长时间处于鼓泡形式,对土体进行挤密,高压下土体以劈裂为主,浆液流动较远。同时,断裂面总体呈现出一直沿着劈裂面向下劈裂趋势,很少可能出现二次劈裂。

表2 裂缝高度测试结果

Table 2 Test results of fracture height

编号	土层深度/m	注浆压力/MPa	裂缝长度/m	上延高度/m	下延高度/m
测试1#	2	0.5	1.8	0.37	0.55
测试2#	2	0.5	1.7	0.46	0.65
测试3#	2	0.5	1.8	0.51	0.70
测试4#	2	0.3	1.4	0.59	0.77
测试5#	2	0.3	1.5	0.72	0.65
测试6#	2	0.3	1.5	0.62	0.74

由于测区内裂缝扩展形式比较复杂,难以进行判断统计,因此本文选取了试验段比较有代表性的几个测点进行测量,得出实测裂缝的分布散点图如图 5。

基于本文建立的裂缝扩展模型,对加固区裂缝长度和宽度进行了计算,得到缝长与缝宽的扩展分布图如图 6,不同压力下裂缝宽度与长度的比值如图 7。

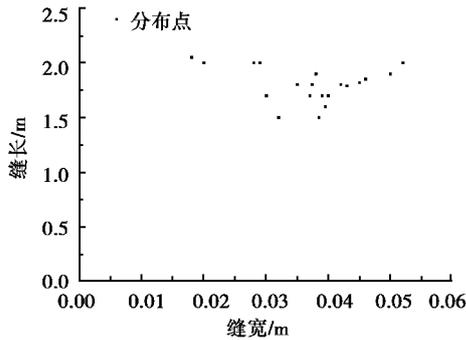


图 5 实测裂缝的分布散点图

Fig. 5 Scatter diagram of measured fracture

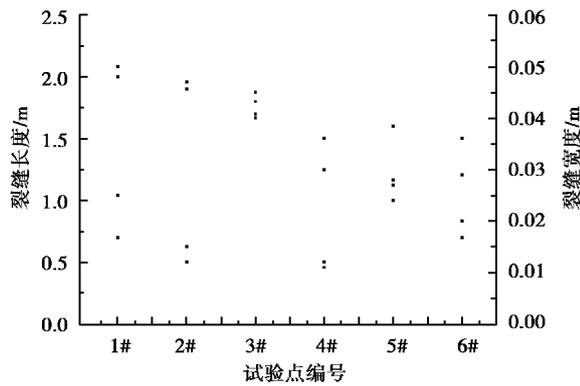


图 6 计算裂缝长度、宽度的分布散点图

Fig. 6 Scatter diagram of fracture length and width

对图 5、图 6 分析可以发现,裂缝扩展模型计算与测值在局部有些点偏离曲线,这主要是因为现场注浆时土体具有离散性,微观结构分析(图 4)发现,土体结构空隙分布存在差异,导致劈裂面具有不确定性,使得每次注浆时浆液走向不同,造成周围土体裂缝扩展在局部存在离散性。

由于测区内裂缝扩展形式比较复杂,本文利用闫蓓等^[14]基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法对实测裂缝的分布散点进行了初步拟合,拟合后的裂缝宽度与长度的比值如图 8。与图 7 中不同压力下裂缝宽度与长度比值进行对比分析发现,根据模

型计算得到注浆压力为 0.3 ~ 0.5 MPa 下黄土劈裂后裂缝宽度与长度比值计算结果存在差异,大体呈现同一土层下压力越大比值越大,且裂缝宽度与长度的比值在 0.02~0.025 之间。与现场实际测量值进行对比,本文构件的裂缝扩展模型虽然在不同压力下得出的计算结果与实测值均有一定误差,但实测值与模型计算值走势基本保持一致,且误差范围在 10%左右,一定程度上表明了该模型在黄土地区具有一定的适用性。

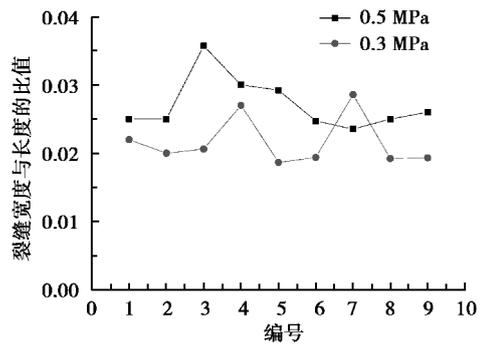


图 7 不同压力下裂缝宽度与长度比值曲线

Fig. 7 Curves of the ratio of fracture width vs. length under different pressure

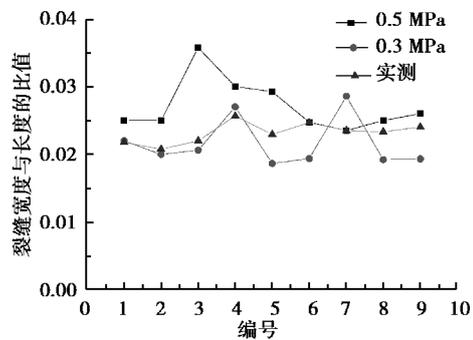


图 8 实测值与模型计算值对比图

Fig. 8 Contrasting pattern of measured values and model values

3 结论

(1)从断裂力学的角度出发,对劈裂注浆过程中土体裂纹在浆液压力下的扩展、止裂行为展开了研究并给出了相应的判断依据,建立了黄土地区劈裂注浆裂纹扩展模型。

(2)通过断裂力学分析可知,劈裂注浆裂纹扩展行为呈张开型,属于 I 型裂纹,且断裂面总体呈现一直沿着劈裂面向下劈裂趋势。

(3)应用裂缝扩展模型,得出黄土裂纹长度与宽度比值存在一定的比例关系:在注浆压力为

0.3~0.5 MPa 下,裂缝宽度与长度的比值在 0.02~0.025 之间。通过实测值与计算得出的宽度与长度结果对比,发现本模型预测结果在一定程度上与实测值相符,表明该模型在黄土地区的适用性。

(4)通过分析可知,劈裂注浆裂纹形成纵横扩展形式,裂纹的扩展行为受注浆压力及土层地应力的影响,且在裂纹的扩展过程中,使浆液在裂纹中流淌形成脉络,起到加固土体的作用。

参考文献(References)

- [1] 郑卓,李术才,刘人太,等. 裂隙岩体注浆中的浆液-岩体耦合效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 4054-4062. (Zheng Zhuo, Li Shucui, Liu Rentai, et al. Analysis of coupling effect between grout and rock mass during jointed rock grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 4054-4062. (in Chinese))
- [2] 张庆松,韩伟伟,李术才,等. 灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2412-2419. (Zhang Qingsong, Han Weiwei, Li Shucui, et al. Comprehensive grouting treatment for water gushing analysis in limestone breccias fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2412-2419. (in Chinese))
- [3] 张霄. 地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机制研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2011. (Zhang Xiao. Study on mechanism of slurry diffusion and sealing at the process of underground engineering moving water grouting and its application [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese))
- [4] Bezuijen A, Grotenhuis R T E, Tol V A F, et al. Analytical model for fracture grouting in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(6): 611-620.
- [5] 郭炎伟,贺少辉,管晓明等. 劈裂注浆复合土体平面等效弹性模型理论研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2193-2201. (Guo Yanwei, He Shaohui, Guan Xiaoming, et al. Theoretical study of plane equivalent elastic model of composite soils with fracturing grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 193-2201. (in Chinese))
- [6] 邹金锋,李亮,杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. 水力学报, 2006, 37(3): 314-319. (Zou Jinfeng, Li Liang, Yang Xiaoli. Penetration radius and pressure attenuation law in fracture grouting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 314-319. (in Chinese))
- [7] Gustafson G, Claesson J, Fransson A. Steering parameters for rock grouting [J]. Journal of Applied Mathematics, 2013, 22(5): 1643-1652.
- [8] 王起才,张戎令. 劈裂注浆浆液走势与不同压力下土体位移试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(12): 107-111. (Wang Qicai, Zhang Rongling. Experimental research on the trend of slurry about fracturing grouting and soil displacement in different pressure [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(12): 107-111. (in Chinese))
- [9] 孙锋,张顶立,陈铁林,等. 土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 474-480. (Sun Feng, Zhang Dingli, Chen Tielin, et al. Meso-mechanical simulation of fracture grouting in soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(3): 474-480. (in Chinese))
- [10] 方新宇,许金余,孔戈,等. 岩石动态劈裂试验中能量变化的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 691-697. (Fang Xinyu, Xu Jinyu, Liu Shi, et al. Finite element analysis on energy variation of rock dynamic splitting tests [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 691-697. (in Chinese))
- [11] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (Fan Tianyou. Theoretical basis of fracture [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [12] 李冠奇. 致密土体劈裂注浆的力学机理及试验研究[D]. 北京: 铁道科学研究院, 2006. (Li guanqi. Fracturing grouting mechanism and experiment study in low-permeability soil [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2006. (in Chinese))
- [13] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (The Research Group of Grouting Theories and Case Histories. The grouting theories and case histories [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [14] 闫蓓,王斌,李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 295-298. (Yan Bei, Wang Bin, Li Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(3): 295-298)