

劈裂注浆技术研究新进展述评

秦鹏飞

(郑州铁路职业技术学院铁道工程学院, 河南 郑州 451000)

摘要: 软弱土、风化岩和破碎带等不良地质体在铁路、矿业、建筑及水利等行业广泛存在, 劈裂注浆技术在这些不良地质体加固中具有优异的效果。基于黏性流体力学和弹性力学的基本理论, 对劈裂注浆过程中注浆压力的衰减规律和劈裂缝的扩展规律进行深刻揭示, 并在此基础上从理论计算、机理分析、试验探究及计算机数值模拟等方面对劈裂注浆技术的最新研究成果进行阐释和述评, 主要是针对裂隙岩体的劈裂注浆机制、非对称荷载作用下的劈裂注浆机理及劈裂缝发展规律等进行深层次剖析, 期望这些阐释和述评能为工程技术人员和科研人员提供有益启示和新见解。

关键词: 劈裂注浆; 劈裂浆脉; 扩展形态; 理论和试验研究; 数值计算; 研究进展

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096 - 7195(2019)02 - 0017 - 06

作者简介: 秦鹏飞 (1984 -), 男, 河南平顶山人, 工学博士、讲师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: qinpengfei@emails.bjut.edu.cn。

New progress in theory and experiment of splitting grouting

QIN Peng-fei

(School of Railway Engineering, Zhengzhou University of Railway Vocational Technology, Shanghai 450010, China)

Abstract: Weak soils, weathered rocks and broken belts are widely present in railway, mining, construction and water Conservancy industries. Slitting grouting technology has excellent effect in the reinforcement of these poor geological bodies. The soft soil and other unfavorable geological bodies have played an irreplaceable role in strengthening, and have achieved obvious economic and social benefits. At the same time, the splitting grouting theory and experimental research have made great progress. Based on the basic theory of viscous fluid mechanics and elastic mechanics, the attenuation law of grouting pressure and the expansion law of splitting crack are deeply revealed. On the basis of this, the latest research results of splitting grouting technology are explained and reviewed from the aspects of theoretical calculation, mechanism analysis, experimental exploration and computer numerical simulation. This paper mainly analyzes the cracking grouting mechanism, the cracking grouting mechanism under asymmetric load and the law of crack development. It is hoped that these explanations and reviews can provide useful inspiration and new insights for engineers and researchers.

Key Words: split grouting; cracking veins; extended form; theoretical and experimental studies; numerical calculations; research progress

0 引言

工程实践表明, 劈裂注浆技术在不良地质体加固和防渗中具有优异的效果, 目前已广泛应用于建筑地基基础、地铁隧道和矿山巷道、水利工程堤防建设等工程中^[1-5]。在劈裂注浆过程中, 注浆压力持续升高将地层启劈并产生劈裂缝, 劈裂缝随后在地基中发展直至形成纵横交错的网状浆脉, 浆脉起到骨架支撑作用和“加筋”作用从而提高了地基的整体强度和刚度^[6-9]。由于劈裂注浆的物理力学机理非常复杂, 目前对劈裂注浆理论和机制的认识尚

不深刻。本文基于黏性流体力学和弹性力学的基本理论, 对劈裂注浆过程中注浆压力的衰减规律和劈裂缝的扩展规律进行深刻揭示, 并在此基础上对劈裂注浆技术的理论与试验研究新成果进行阐释和述评, 期望能为工程技术人员和科研人员提供有益启示和新见解。

1 劈裂机理

基金项目: 郑州铁路职业技术学院博士科研启动基金 (201801002)

收稿日期: 2019 - 09 - 16

劈裂注浆机理研究是劈裂注浆技术发展进步的重要前提和基础，同时也是其在工程实践中进一步推广应用的保证。劈裂注浆理论研究目前已经取得了丰硕的研究成果，使得注浆理论体系日益丰盈。

1.1 劈裂过程

注浆过程中随着压力的衰减和能量的耗散，浆液扩散经历了不同的变化阶段。一般意义上来说，完整的劈裂注浆过程主要包括能量积聚、劈裂流动和浆液能量转移3个阶段：

(1) 能量积聚阶段

随着注浆压力的升高，浆液逐渐在注浆孔附近积聚并形成浆泡，对塑性影响区范围的土体产生压密作用。土体受挤压作用发生塑性变形，并在变形过程中以塑性应变能的形式贮存能量。注浆压力在土体塑性应变能增加过程中不断地影响和破坏着土体的微观结构，为劈裂缝的产生和发展提供了足够的能量基础。

(2) 劈裂流动阶段

注浆压力持续升高达到土体的启劈压力，积聚

了高能量的浆液沿着土体的最薄弱面将土体劈裂。浆液沿劈裂通道向远端扩散，致使注浆压力有所降低。经过一段时间浆液得到补充后注浆压力回升，并产生二次劈裂。劈裂过程往复循环，最终在土体中产生足够数量的劈裂浆脉。

(3) 浆液能量转移阶段

劈裂通道形成后浆液不断向周边扩展，锋面压力降低浆液转而以渗透扩散为主，浆液所携带和储存的能量向土体转移，开挖后可观察到由近及远、由粗渐细的多次劈裂浆脉。

1.2 能量消耗

根据能量守恒原理，劈裂注浆所消耗的能量由储存于土体中的能量和启劈所耗费的能量两部分构成，即

$$\Delta E = (\Delta E_s + \Delta E_f) + (\Delta E_{ic} + \Delta E_{ip} + \Delta E_{iv} + \Delta E_{is} + \Delta E_{it}) \quad (1)$$

式中： ΔE_s 和 ΔE_f 分别为土体和浆液的弹性应变能； ΔE_{ic} 为启劈土体所消耗的能量； ΔE_{ip} 为土体弹塑性过渡变形所消耗的能量； ΔE_{iv} 、 ΔE_{is} 和 ΔE_{it} 为浆液流场与土体应力场产生耦合作用所消耗的能量。

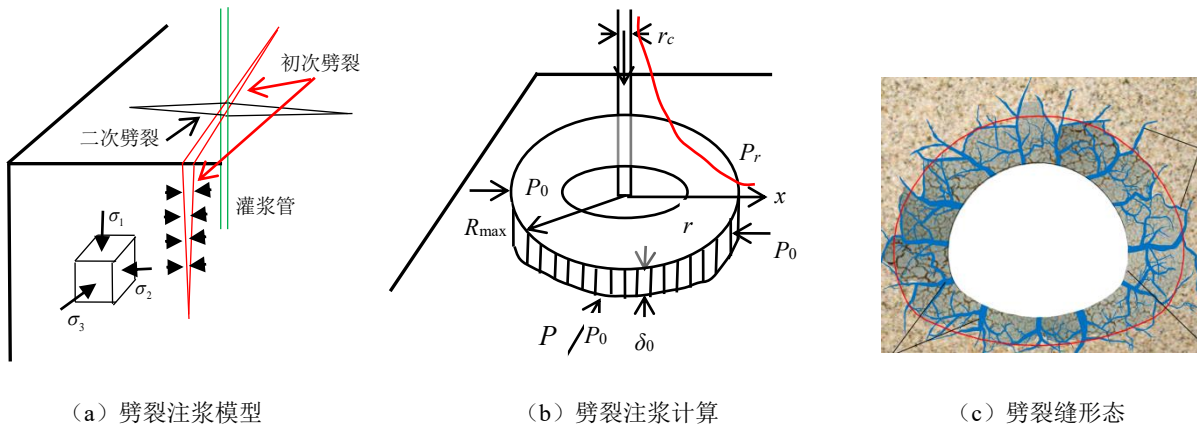


图1 劈裂注浆机理分析
Figure 1 Analysis of splitting grouting mechanism

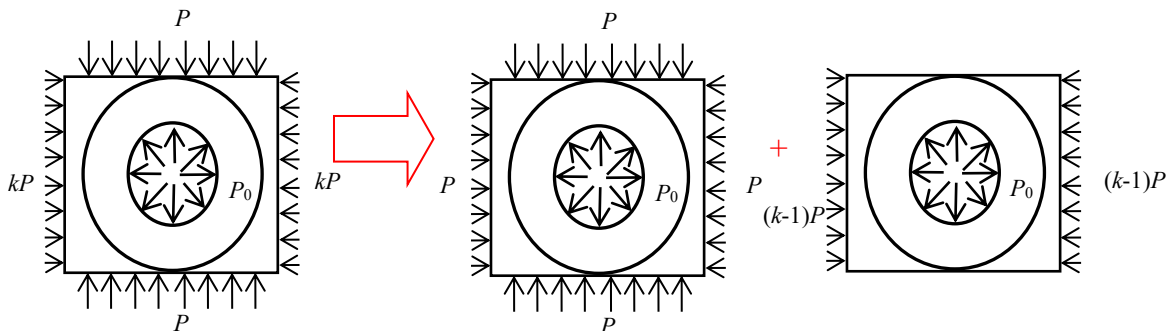


图2 非对称荷载下劈裂注浆力学机制分析
Figure 2 Mechanical mechanism analysis of splitting grouting under asymmetric load

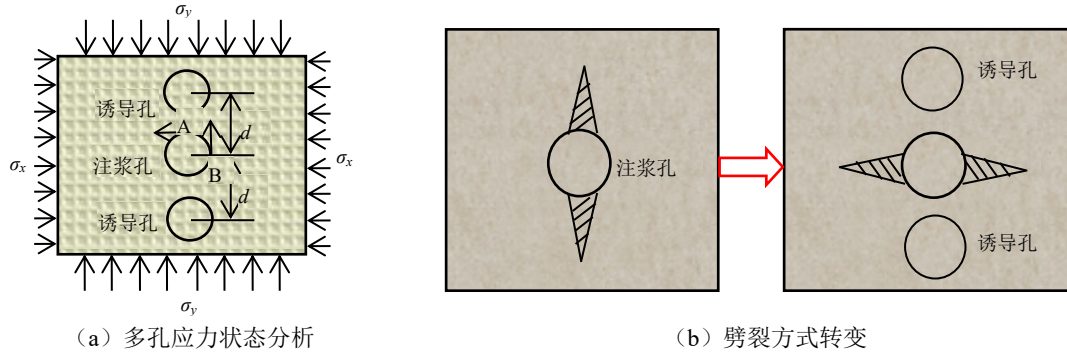


图 3 诱导劈裂注浆力学机制

Figure 3 Mechanical mechanism of induced splitting grouting

2 理论计算与机理分析

2.1 土体劈裂注浆

以土体的弹塑性应力应变分析为基础，并结合土的强度准则（SMP准则、Lade-Duncan准则、M-C准则或双剪统一强度准则）进行劈裂注浆机理分析是有效的途径。张淼（2013）^[10]基于扩孔理论和统一强度准则对非称荷载下的启劈压力进行了计算（图2），分析表明非对称荷载下的启劈压力明显小于对称荷载下的启劈压力，且土的抗剪强度参数 c 、 φ 和侧压力系数 k 等对启劈压力 p 均有较显著的影响；黄明利（2013）^[11]指出当注浆孔与诱导孔的间距达到临界值 d 时孔周大小主应力将发生改变，浆液由竖向劈裂方式转变为水平向劈裂方式（图3），劈裂方式的转变有利于在土体中形成横向组合梁或承载拱型式的浆脉骨架，显著提高注浆效果；周茗如（2018、2019）^[12-13]在塑性力学和大变形理论基础对黄土地基的劈裂注浆机理进行了分析，得到了水平和竖向劈裂注浆压力的计算公式（式2、3），所得结果在黄土地基劈裂注浆工程中具有较高的实用价值。

$$P_{uvv} = (\sigma_{rp} - \sigma_0) \left(\frac{q_p}{G\sqrt{k+2}} \right) + \sigma_0 \quad (2)$$

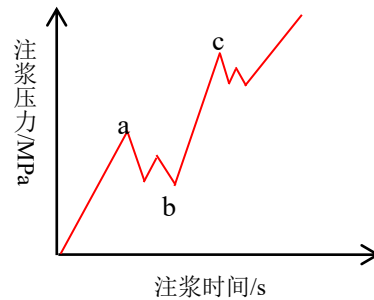
$$P_{uuh} = (1+\eta) \left[(\sigma_{rp} - \sigma_0) \left(\frac{q_p}{G\sqrt{k+2}} \right)^{\frac{k(\eta-1)}{k+1}} \right] + 2[\eta(\nu+1) + \nu - 1]\sigma_0 \quad (3)$$

式中： p_{uvv} 和 p_{uuh} 分别为竖向和水平向劈裂注浆压力； σ_{rp} 为弹塑性边界上的径向应力； q_p 为八面体偏应力； G 和 ν 为土体的剪切模量和泊松比； σ_0 和 η 为土体的强度参数； k 为扩孔系数。

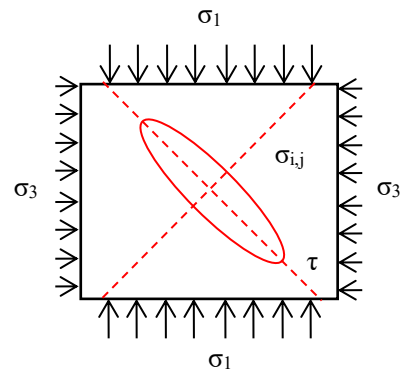
2.2 岩体劈裂注浆

谢涛锋（2015）^[14]利用RFP分析系统建立了岩体破裂过程的渗流-应力-损伤数学模型，并对岩体劈裂注浆规律进行了研究，分析发现岩体劈裂破坏

呈张开裂，且随多次分支劈裂的产生注浆压力呈震荡升高趋势（图4a）；邹金锋（2013）^[15]基于非线性Hoek-Brown强度准则，利用断裂力学对II型和复合型裂隙岩体的劈裂注浆机理进行分析（图4b），研究表明岩体材料参数、裂纹长度 a 及地质强度指标GSI对岩体启劈压力影响均十分显著。



(a) 注浆压力震荡上升



(b) 裂隙断裂力学分析

图 4 裂隙岩体劈裂注浆力学机制

Figure. 4 Mechanics mechanism of induced splitting grouting

2.3 非牛顿流体劈裂注浆

宾汉流体和冥律流体等日益得到广阔的工程应用，因而亟需加强非牛顿流体的劈裂注浆机理研究。孙锋（2011）^[16]基于宾汉体黏度时变性方程和平板裂缝模型（图5），推导了宾汉体浆液劈裂注浆的启劈压力和扩散半径计算公式（式4、5）。

$$P_u = \frac{12\eta_{p0}\delta_u^2 \left(e^{\frac{kR}{\bar{u}}} - 1 \right) - 3\tau_s kR(\delta^2 - 4y_p^2)}{k(\delta^3 - 8y_p^3)} + c \quad (4)$$

$$R = \frac{(\delta^3 - 8y_p^3)(P_u - c)}{12\eta(t)\delta\bar{u} - 3\tau_s(\delta^2 - 4y_p^2)} \quad (5)$$

式中： δ 为裂缝高度， u 为浆液平均流速， τ_s 和 $\eta(t)$ 为浆液流变参数， c 为锋面压力；

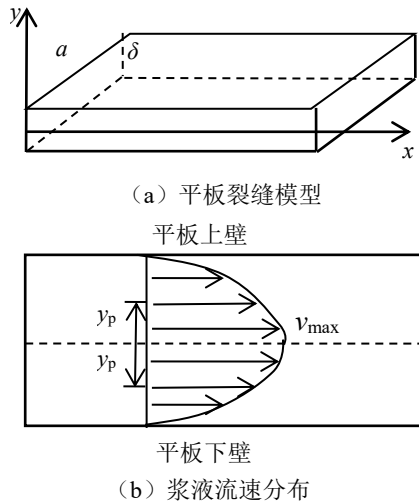


图5 幂律型浆液劈裂注浆机理

Figure. 5 Mechanism of splitting grouting with power-law grout

张军贤(2016)^[17]考虑幂律型浆液的流变特征，推导出幂律流体在劈裂通道中的平均流速及最大扩散半径计算公式(式6、7)：

$$\bar{u} = -\frac{n}{2n+1} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} b^{\frac{n+1}{n}} \quad (6)$$

$$R_{\max} = (p_0 - p_1) \frac{b^{n+1}}{\mu} \left(\bar{u} \cdot \frac{2n+1}{n} \right)^{-n} \quad (7)$$

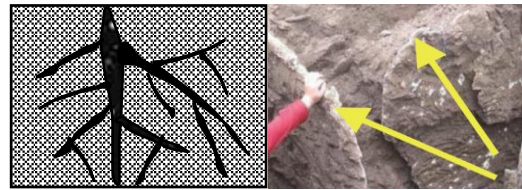
式中： n 为流变指数， μ 为黏度系数， dp/dx 为压力梯度， b 为裂缝高度， p_0 为启劈压力， p_1 为浆液锋面压力；等。这些理论推导为非牛顿流体的劈裂注浆工程应用提供了重要的技术支持。

3 试验探索

3.1 模型试验及劈裂效果分析

李鹏(2014)^[18-19]通过模型试验发现劈裂注浆浆脉呈现为环注浆孔多区域分布特征，细观则表现为多条分支浆脉衍生于同一条主骨架浆脉，主次浆脉在劈裂注浆过程中同步发展、共生共存(图6a)；石明生(2016)^[20]定向钻孔并注入非水反应高聚物材料在堤坝中形成2~3cm厚超薄柔性防渗墙，渗入土体微孔隙的部分浆液则与防渗墙形成复合防渗体，注浆改良效果极好(图6b)；朱明昕(2018)^[21-22]指出劈裂注浆所形成的浆脉与原土体的物

理力学性质差异较大，当承受荷载时两者将产生较大的非协调变形。浆脉骨架可提高土体的黏聚力 c 并降低其内摩擦角 φ ，却不能显著提高注浆加固体的抗压强度等其它指标。



(a) 主次浆脉 (b) 防渗体

图6 劈裂注浆模型试验及效果分析

Figure. 6 Model test and effect analysis of splitting grouting

3.2 劈裂注浆机制分析

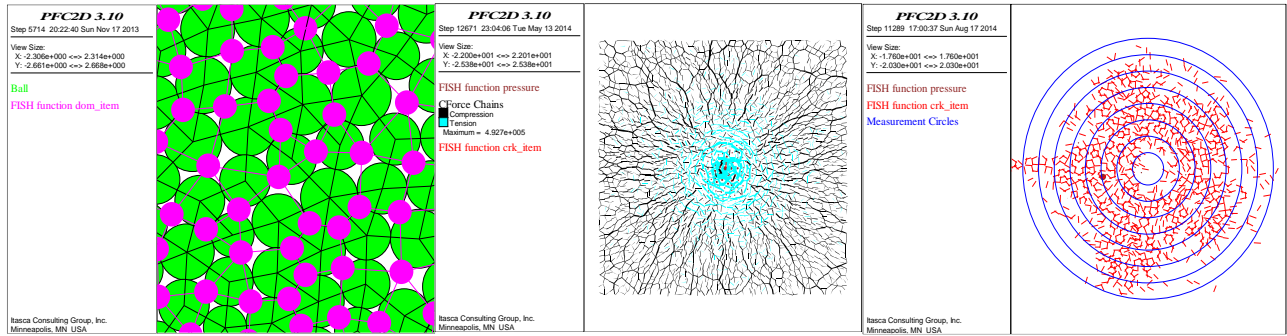
张庆松(2016)^[23-24]根据试验结果分析认为浆液流场与土体应力场存在耦合效应，受浆液流场限制劈裂通道宽度随注浆压力衰减呈现非线性衰减特征，劈裂通道宽度与浆液的黏度呈正比，与土体的弹性模量呈反比；张家奇(2018)^[25]指出土石分层介质中浆液的扩散模式及加固效果与单一介质差别较大，根据被注时序和被注介质的不同浆液将产生“渗透-界面”、“劈裂-渗透”和“渗透-界面-劈裂”等多种模式的扩散方式，注浆加固体对应呈现出浆脉黏结、贯穿浆脉连接和并行浆脉架构等多种加固机制；张连震(2018)^[26-28]研究显示劈裂注浆加固体的力学性能呈现各向异性特征，平行于浆脉方向的土体侧向刚度和抗变形能力较高，但抗剪性能和抗渗性能却较低，研究还显示注浆压力、注浆孔间距和单孔注浆量是影响注浆加固体力学性能的主要因素。这些模型试验及其研究成果进一步揭示了劈裂注浆的深层机理及其发生、发展规律。

4 数值模拟计算

宿辉^[29]指出劈裂灌浆作用发生时，劈裂缝的出现拓展了灌浆孔周边的区域空间，孔隙率较灌浆前明显增加，基本呈同心圆状辐射分布，外围颗粒则受明显挤压作用而产生侧移。

郑刚^[30]通过PFC2D仿真试验指出注浆压力对浆液的扩散半径、扩散形态及地层结构均有显著的影响，注浆孔附近土体的孔隙率、密实度及应力状态等各项物理力学性能指标较其它区域有显著的改变。

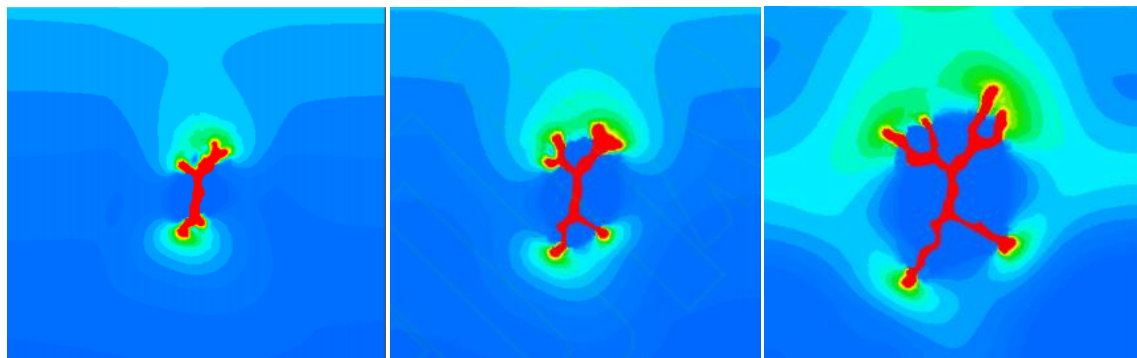
耿萍^[31]通过颗粒流软件模拟出的动态效果及数据分析，验证了劈裂注浆是压密-劈裂-压密-劈裂的动态过程，直至浆液的扩散压力不足以再劈裂围岩颗粒时趋于稳定；多孔同时注浆时浆体很难进入到中心位置，现场注浆施工要针对实际地质情况，合理安排注浆孔以及注浆顺序。



(a) 数值模型 (b) 应力分布 (c) 劈裂形态

图 7 注浆数值计算图示

Figure 7 Illustration of grouting numerical calculation



(a) 初次劈裂 (b) 二次劈裂 (c) 后续劈裂

图 8 劈裂注浆发展形态

Figure 8 Development form of splitting grouting

5 结 语

劈裂注浆理论分析、模型试验和数值计算研究取得了许多重要的研究成果，有力地推动了劈裂注浆技术在工程实践中的应用。文中分析了劈裂注浆的发展过程和能量消耗方式，然后从土体、裂隙岩体和非牛顿流体劈裂注浆等方面对劈裂注浆的力学机理进行理论分析，并从模型试验等方面对劈裂机制进行阐释述评，最后结合离散元和有限元数值计算对劈裂注浆机制进行了进一步深刻揭示，期望这些研究成果能为技术人员和科研人员提供有益启示和新见解。

参考文献:

[1] Yang Z Q, Hou K P, Guo T T. Research on time-varying behavior of cement grouts of different water-cement ratios[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 75: 4398-4401.
 [2] Gustafson G, Claesson J, Fransson A. Steering parameters for rock grouting[J]. Journal of Applied Mathematics, 2013,

(1): 1-9.
 [3] Birdsell D, Rajaram H, Lackey G. Imbibition of hydraulic fracturing fluids into partially saturated shale[J]. Water Resources Research. 2015, 8: 112-119.
 [4] Kitazume M, Maruyama K. Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment[C]// Proceedings of the International Conference on Deep Mixing 2005. US: ASCE, 2005: 245-254.
 [5] 张忠苗, 邹健. 桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J]. 岩土工程学报. 2008, 30(2): 181-184.
 [6] Gustafson G, Claesson J, Fransson Å. Steering parameters for rock grouting[J]. Journal of Applied Mathematics, 2013, 1: 1-9.
 [7] 朱光轩, 张庆松, 刘人太, 等. 基于渗滤效应的沙层劈裂注浆扩散规律分析及其 ALE 算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 4167-4176.
 [8] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2415-2421.

- [9] 石明生. 高聚物注浆材料特性与堤坝定向劈裂注浆机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [10] 张淼, 邹金锋, 陈嘉祺, 等. 非对称荷载作用下土体劈裂注浆压力分析[J]. 岩土力学, 2013(8): 2255-2263.
- [11] 黄明利, 管晓明, 吕奇峰. 基于弹性力学的诱导劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2059-2065.
- [12] 周茗如, 张建斌, 卢国文, 等. 扩孔理论在非饱和黄土劈裂注浆中的应用[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1): 368-378.
- [13] 周茗如, 卢国文, 王腾, 等. 结构性黄土劈裂注浆力学机理分析[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 169-181.
- [14] 谢涛锋, 谢文兵, 荆升国, 等. 地下工程劈裂注浆的数学模型研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 105-109.
- [15] 邹金锋, 童无欺, 罗恒, 等. 基于 Hoek-Brown 强度准则的裂隙岩体劈裂注浆力学机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2889-2896.
- [16] 孙锋, 张顶立, 陈铁林. 基于流体时变性的隧道劈裂注浆机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 88-93.
- [17] 张军贤. 幂律型流体劈裂注浆机理研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(12): 113-118.
- [18] 李鹏, 张庆松, 张霄. 基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3221-3230.
- [19] 李鹏, 张庆松, 王倩, 等. 隧道泥质断层多序注浆动态劈裂扩散规律[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 328-338.
- [20] 石明生, 王复明, 刘恒, 等. 堤坝高聚物定向劈裂注浆试验与有限元模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 1087-1092.
- [21] 朱明听, 张庆松, 李术才. 劈裂注浆加固土体的数值模拟和试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 1213-1220.
- [22] 朱明听, 张庆松, 李术才, 等. 土体劈裂注浆加固主控因素模拟试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(11): 2058-2067.
- [23] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 基于“浆-土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 323-330.
- [24] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(03): 744-752.
- [25] 张家奇, 李术才, 张霄, 等. 土石分层介质注浆扩散的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(5): 914-924.
- [26] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [27] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1483-1493.
- [28] 张连震, 刘人太, 张庆松, 等. 砂层劈裂-压密注浆模拟试验系统研发及试验[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 321-330.
- [29] 宿辉, 王丽影, 牛贝贝. 均匀粗砂层中注浆机理细观数值模拟研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 73-76.
- [30] 郑刚, 张晓双. 劈裂注浆过程的二维颗粒流的模拟研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 54(6): 905-912.
- [31] 耿萍, 卢志楷, 丁梯, 等. 基于颗粒流的围岩注浆动态过程模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 3: 34-40.