

doi: 10.11799/ce201810036

# 动水流速对浆液留核稳定性的影响研究

李金华, 岳鹏举, 苏培莉, 陈籽涵, 段东, 孙冠临

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 文章通过有限元数值模拟和室内动水注浆试验, 分析了水流速度对单裂隙注浆留核稳定性的影响。研究表明: 动水绕流后会产生典型的尾迹流现象, 初始流速越大产生的尾迹流越混乱, 对留核产生的扰动越大; 当初始流速大于等于 0.1m/s 时, 尾迹流呈紊流流态, 对留核稳定性影响较大, 当初始流速小于 0.1m/s 时, 尾迹流呈层流流态, 对留核稳定性影响较小。

**关键词:** 动水流速; 尾迹流; 数值模拟; 注浆试验

**中图分类号:** TD265.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2018)10-0154-03

## Influence of dynamic water velocity on the stability of slurry deposition zone

LI Jin-hua, YUE Peng-ju, SU Pei-li, CHEN Zi-han, DUAN Dong, SUN Guan-lin

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Water flow velocity is a key parameter in the design of dynamic water grouting, which is the main factor affecting the grouting effect of hydrodynamic water. In this paper, the effects of water flow velocity on the stability of single-fracture grouting slurry deposition zone are analyzed using finite element numerical simulation and indoor dynamic water grouting test. The results show that the typical wake flow phenomenon occurs after the moving water flows. The larger the initial flow velocity, the more chaotic the wake flow is, and the greater the disturbance to the slurry deposition area. When the initial flow velocity is greater than or equal to 0.1m/s, the wake flow is in a turbulent flow regime and has a great influence on the stability of the slurry deposition zone. When the initial flow velocity is less than 0.1m/s, the wake flow is in a laminar flow regime, which has little effect on the stability of the slurry deposition zone.

**Keywords:** dynamic water flow rate; wake flow; numerical simulation; grouting test

煤矿开采中, 突水和涌水作为一种常见的水害, 严重影响了矿井的安全生产。注浆法作为一项主要防灾手段, 具有不剥夺地下水资源, 不破坏生态环境的优点, 它已经成为煤矿防治此类水害的一种有效手段。水流速度是动水注浆设计中的关键参数, 它的设计是否合理, 直接影响到动水注浆效果和治理成本。因此进行动水注浆之前, 必须弄清楚水流速度与注浆效果(即留核稳定性)之间的规律。

目前, 有专家学者对煤—岩体裂隙的注浆问题展开了研究。李金华等<sup>[1]</sup>研究了浆液沉积压力曲线性质, 提出了一种注浆效果评价方法。刘嘉材<sup>[2]</sup>、湛铠瑜<sup>[3]</sup>、田美霞<sup>[4]</sup>分别研究了牛顿型浆液的扩散方程。罗平平<sup>[5]</sup>研究了宾汉

浆液在平板和倾斜裂隙中的流动规律。阮文军<sup>[6,7]</sup>基于浆液粘度时变性推导注浆扩散方程。谷拴成等<sup>[8,9]</sup>研究了壁后注浆压力与堵水效果的关系。张改玲<sup>[10]</sup>研究水流速度对化学浆液扩散的影响。郭东明等<sup>[11]</sup>, 针对聚氨酯材料进行了材料性能试验。杨仁树等<sup>[12,13]</sup>, 基于自主研发的注浆系统, 展开一系列注浆材料的研究。王茂盛等<sup>[14]</sup>, 展开了一系列水泥基新型无极注浆材料的试验研究。

综上所述, 目前关于动水注浆理论和实践的研究尚处于初步发展阶段。本文在总结前人研究成果与成果中的不足后, 通过数值模拟和室内试验, 重点对动水流速与留核稳定性的联系展开研究。

**收稿日期:** 2018-08-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助(51508462)

**作者简介:** 李金华(1977—), 男, 山东滕州人, 副教授, 主要从事岩石力学方面的教学及研究工作, E-mail: nxljh@xust.edu.cn。

**引用格式:** 李金华, 岳鹏举, 苏培莉, 等. 动水流速对浆液留核稳定性的影响研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 154-156.

### 1 数值分析

在有限元软件分析之前，将流场模型设置为宽1m、长2m的矩形平面。首先模拟浆液在裂隙中的扩散形态，了解扩散规律浆液材料，多相流计算模型选取VOF模型，采取隐式计算方法，将动水水流设置为基础相，模拟材料设定水泥浆液，注浆压力为0.1MPa，裂隙开度5mm，对动水速度分别为0.1m/s、0.15m/s、0.2m/s、0.3m/s时的注浆过程进行模拟，其扩散结果如图1所示。

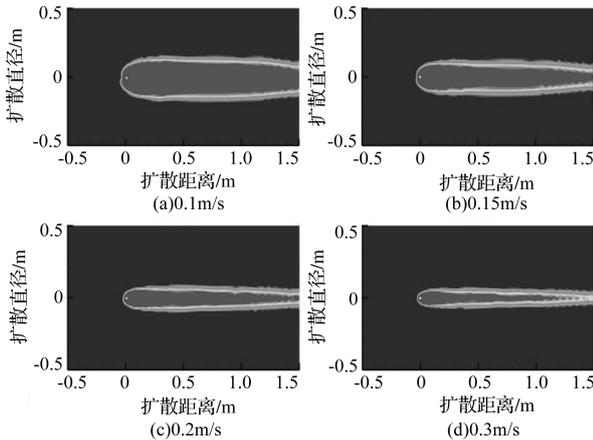


图1 不同动水速度下浆液扩散图

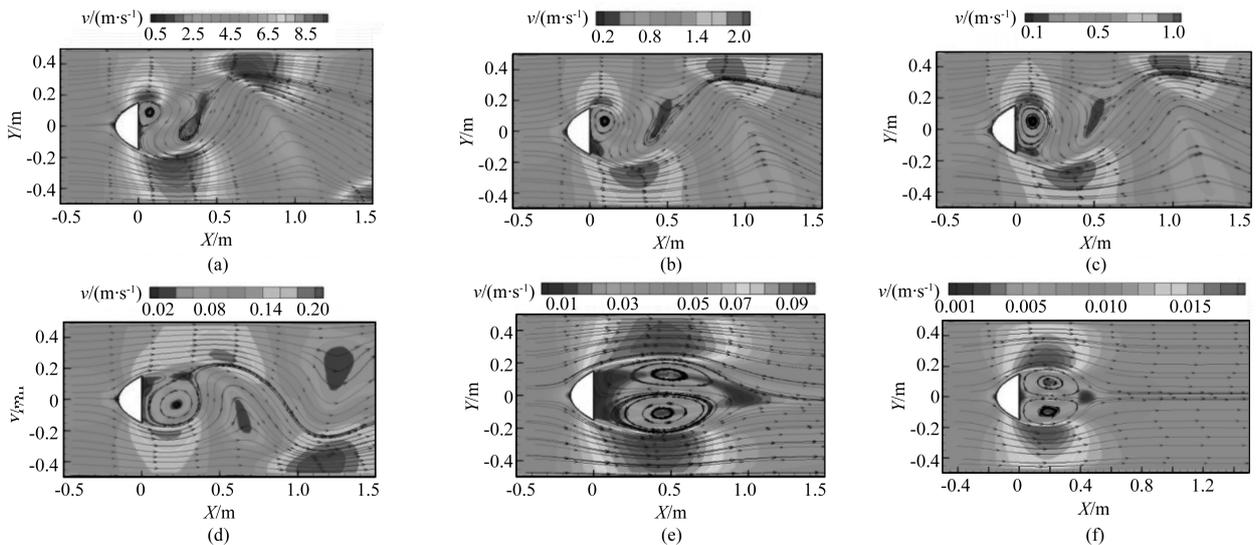


图2 不同流速下动水绕流的速度流线与云图

总结图2可以知道，在注浆孔左侧的浆液逆水扩散区域——动水与浆液的接触面处，动水速度明显减慢，动水在留核左侧时流速比较稳定，为层流状态。沉积留核将原先的动水流动路径分成上下两个部分，动水受到沉积留核的阻拦改变流向，沿着留核边界流动，因为受沉积留核的影响，动水水流在绕过留核的过程中，由原先近似直线流线的变为曲线，流动状态也由渐变流向急变流转变，流动路径变窄，所以在沉积留核的两侧偏注浆孔位置的动水速度明显加快，随着动水流速的增大，该处的流速也随之增大。由于留核的存在，动水在绕过留核时不论流速大小均

会产生尾迹流现象，但流速越大绕流后流速和流向的变化也随之增大，即对留核产生的扰动越大。

由图1可知，图中中间区域表示浆液形成的沉积堵水留核，周边区域代表动水，在中间和周边之间夹杂的是浆液受动水影响产生的浆—水分层扩散区，在动水条件下浆液的扩散形态在注浆之初为水滴形，随着浆液的不间断注入，扩散形态逐渐由水滴形向倒U形转变，并且沉积留核越大，能够形成有效堵水的区域越大，因此根据此模拟得到的浆液扩散形态。在流场中用一块半径为0.15m的椭圆形区域代表浆液留核的前半段，这样就可以清晰的看到动水绕流后的变化；使用三角形网格对流场进行单元划分，在留核边界处加密划分，这样可以提高计算精度；流场入口的边界条件定义为速度入口，对流速分别为0.01m/s、0.05m/s、0.1m/s、0.5m/s、1m/s、5m/s时的动水绕流进行模拟。

为了取得良好的模拟结果，迭代采用PISO算法，设定迭代步数为10000步，步间距0.01s，得到不同动水速度下，流场内的速度流线与云图，研究动水水流在绕过留核时速度大小与方向的变化。模拟结果如图2(a)~(f)所示，可以看出动水初始流速不同，绕流后产生的尾迹流漩涡、流速和紊流区大小亦不同。

会产生尾迹流现象，但流速越大绕流后流速和流向的变化也随之增大，即对留核产生的扰动越大。

对图2(f)进行分析，当流速为0.01m/s时，动水绕过留核后速度分布均匀仍能以层流状态继续流动，在留核右侧形成小范围的漩涡，紊流区流速范围：0.001~0.008m/s，小于初始流速；对图2(d)进行分析，当流速为0.1m/s时，动水在绕过留核后各处速度分布不均匀，呈波浪型流动状态，整体呈紊流状态，紊流区流速范围：0.02~0.16m/s，其最大值已近超过初始流速。

当流速分别为0.5m/s、1m/s和5m/s时，其紊流区流

速范围分别为 0.15~1m/s、0.25~1.8m/s、0.9~9m/s，可以看出初始流速越大，动水绕过留核后就会产生扰动越大，流态由层流向紊流转变，并且影响后面的动水产生摆动的尾流。尾流的变化主要取决于流速，而雷诺数的大小反映流速的变化，当雷诺数较小时，扰动在流体粘性控制范围内，被转化成热能消耗掉；当雷诺数较大时，流体粘性无法抑制扰动，就会产生流动失稳。

## 2 室内试验

试验采用自主设计的模拟裂隙动水注浆试验平台进行，该平台由模拟裂隙系统、注浆控制系统、动水水源系统、试验框架系统、数据采集系统、试验监控系统组成。

纯水泥浆液在裂隙中的扩散方式大致可归为两类：第一类是浆液进入裂隙之后开始扩散，以注浆孔为中心向外依次是沉积留核区与浆—水分层扩散区，即水泥浆液在扩散过程中产生了析水现象；第二类是浆液进入裂隙后以驱替扩散的模式流动，浆液的沉积留核区远大于浆—水分层扩散区。无论是哪种扩散方式，沉积留核区始终是注浆堵水的关键区域，通过试验发现沉积留核区越大堵水效果越好，究其原因该处水泥浆液受动水影响较小，沉积留核区内水泥浆液中颗粒容易沉淀而且不断地注浆压力和浆液帮助其扩散，又因为浆液的黏度、密度均大于水，从而形成了由一定高度具有堵水效果的沉积留核；浆—水分层扩散区是沉积留核区的附带区域，其生成原因是水泥浆液受动水冲刷产生了析水，使水泥颗粒迅速下沉，并且该区域处于浆液与动水的混合区，浆液与动水间存在流速差，由于密度的差异，动水将浆液中多余的水分带走，而水泥颗粒沉积于此。

采用纯水泥浆液，在相同注浆压力(0.1MPa)、水灰比(1.0)、开度(5mm)、倾角(0°)的条件下进行，动水流速范围：0.01~0.50m/s，试验结果如下：

浆液的扩散形态在注浆之初以椭圆形扩散，逐步出现浆液的沉积留核区与浆—水分层扩散区，随着浆液不断增加，扩散形态渐渐变为水滴形并向 U 形转变，扩散半径约为 0.19m，其中沉积留核区越大堵水效果越好，但是绕流后的动水对沉积留核边界冲刷，使留核的稳定性受到影响。

当动水初始流速约为 0.103m/s，动水绕过沉积留核后，对留核边缘产生了较强的扰动，留核边界呈波浪形分

布，如图 3(a)所示，较大的动水流速使沉积留核的稳定性下降，不易获得良好的注浆堵水效果。

当将初始流速约为 0.021m/s，动水绕流后并没有使留核产生波浪形的边界，由于浆液自身的粘聚力，足以抵抗动水绕流后产生的扰动，因此留核边缘近似为线型，更易获得较好的注浆堵水效果，如图 3(b)所示。

## 3 结论

本文通过数值模拟手段对动水流速与留核稳定性间的联系展开研究，并采用室内试验对结果进行验证，主要结论如下：

1) 动水流速越大，绕流后的流速和流向变化越大，对留核产生的扰动越大。

2) 绕流过程中会产生尾迹流现象，绕过留核后各处速度分布不均匀，初始流速越大，产生的尾迹流越混乱。

3) 当初始流速较小时，浆液自身存在粘聚力，动水对留核产生的扰动较小。

### 参考文献：

- [1] 李金华, 孙冠临, 苏培莉, 等. 动水注浆沉积压力特征与注浆效果试验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(6): 21-24.
- [2] 刘嘉材. 裂隙注浆扩散半径研究 [C] //中国水利水电科学院科学研究论文集. 北京: 水利水电出版社, 1982.
- [3] 湛铠瑜, 隋旺华, 高岳. 单一裂隙动水注浆扩散模型 [J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1659-1663, 1689.
- [4] 田美霞. 考虑浆液黏度时变性的单裂隙动水注浆扩散模型 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(S1): 536-537, 669.
- [5] 罗平平, 李志平, 范波, 等. 倾斜单裂隙宾汉浆液流动模型理论研究 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 43-47.
- [6] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究 [J]. 岩土工程学报, 2005(1): 69-73.
- [7] 阮文军. 基于浆液粘度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(15): 2709-2714.
- [8] 谷拴成, 苏培莉, 樊志斌, 等. 注浆技术在煤矿加固防渗中的应用 [J]. 煤炭工程, 2009, 41(4): 60-62.
- [9] 谷拴成, 苏培莉, 罗金满, 等. 注浆浆液配方的优化设计与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(7): 46-49.
- [10] 张改玲, 湛铠瑜, 隋旺华. 水流速度对单裂隙化学注浆浆液扩散影响的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 403-406.
- [11] 郭东明, 程志, 蹇蕴奇, 等. 水玻璃-纳米二氧化硅复合聚氨酯注浆材料性能试验 [J]. 现代矿业, 2018, 34(4): 157-160, 170.
- [12] 杨仁树, 薛华俊, 郭东明, 等. 基于注浆试验的深井软岩 CT 分析 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 345-351.
- [13] 杨仁树, 薛华俊, 李涛涛, 等. 九龙煤矿深部岩体注浆浆液配比优化研究 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(2): 1-4.
- [14] 王茂盛, 王萌, 都海龙. 新型无机注浆材料加固破碎围岩技术 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 8-11.

(责任编辑 赵巧芝)



图3 动水绕流对留核边界扰动图