

静水条件下浆液粘度时变特性与微观结构研究*

袁敬强¹ 陈卫忠^{1,2} 于建新³ 郑朋强¹ 杨帆¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心 济南 250061; 河南理工大学 土木工程学院 河南 焦作 454000)

摘要: 浆液的凝胶特性是影响注浆效果的关键因素,为研究浆液的粘度变化过程与凝胶特性、揭示凝胶产物的微观结构特征,采用旋转粘度计对浆液在静水及无水条件下的凝胶变化过程进行系统试验,并采用SEM扫描电子显微镜对凝胶产物微观结构进行分析。研究结果表明,浆液在水下粘度变化具有明显的时变特性,粘度变化过程可分为低粘度期、初始上升期和快速上升期三个阶段。静水条件下低粘度期比无水条件下明显延长,使得浆液更容易被分散冲刷。通过对凝胶产物微观结构分析表明,浆液凝胶分层具有不同的微观结构,静水条件下凝胶较无水条件下微孔隙含量更高,结构更为松散。研究成果丰富了注浆理论并可为优化注浆工艺提供参考,具有一定的理论价值及工程意义。

关键词: 注浆; 速凝浆液; 水泥水玻璃; 静水条件; 时变特性; 微观结构

中图分类号: TU93

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2016)05-1264-07

Micro-structure and Time-varying Characteristic of Cement-sodium Silicate Grout under Still Water

Yuan Jingqiang¹, Chen Weizhong^{1,2}, Yu Jianxin¹, Zheng Pengqiang¹, Yang Fan¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P.R.China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, P.R.China; 3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P.R.China)

Abstract: In tunnelling and underground engineering, there always exist challenges of water blockage and ground stabilization. Grouting technique is widely used to control seepage, increase strength and lessen the deformability of formations in underground engineering. And the gelling property of grout significantly influences the sealing and strengthening effect. This study carries out the viscosity test to evaluate the time-varying characteristic of viscosity and gelling process of grouting. Additionally, the microstructure scanning of the gel is carried out to reveal the microstructure of grout gel under different conditions. The time-varying characteristic of viscosity of the grout with different proportioning under water is studied by using the NDJ-5S rotational viscometer. And the changing process of viscosity of the grout in the water can be divided into three stages, which is low-viscosity stage, initially increasing stage, and quick increasing stage, respectively. The low-viscosity stage of grout under water is much longer than mixture that directly mixed, which means the grout is more likely to be diluted and washed out by the water. Further on, the microstructure of grout gel is characterised by using scanning electron microscope (SEM), and the microstructure of the grout gel under different conditions is revealed. The SEM scanning result shows that the grout gel has different micro-

* 收稿日期: 2015-08-12(修改稿)

作者简介: 袁敬强(1985-) 男, 河北巨鹿人, 博士, 助理研究员, 主要从事隧道突水灾害机制与防治方面的研究工作。

E-mail: cumtyjq@163.com

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036006); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(51225902, 51509246, 51379007); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(16A440008)

structure under water with directly mixed condition. This research enriches the underwater grouting theory and provides references for the optimization of the grouting technique, and has a significance on the grouting theory and practical engineering.

Keywords: grouting; fast-gelling grout; cement-sodium silicate grout; still water; time-varying characteristic; microstructure of grout

1 引言

随着我国地下工程建设向大、长、深发展的趋势,突水突泥地质灾害逐渐成为制约我国隧道建设发展的瓶颈问题,严重时会造成重大人员伤亡事故与经济损失^[1-6]。注浆是工程实践中广泛采用的堵水加固措施,在突水突泥灾害治理工程实践中,水泥水玻璃浆液是经常使用的速凝浆液。在无水条件下,水泥水玻璃浆液具有凝胶时间短、浆液结石率高、结石体强度高、绿色环保及价格低廉等优点,使其相比其他浆液具有更广泛的应用。

目前,注浆研究主要集中在注浆材料性能改善、注浆工艺优化及注浆过程自动化等方面,基础研究相对滞后。在浆液粘度时变特性研究方面,目前广泛采用的 Magg 球形理论、柱形扩散理论、卡罗尔理论、刘嘉才的单平板裂隙注浆渗透模型、Baker 公式以及 Lombardi 等建立的注浆理论^[7-9]均未考虑注浆材料粘度时变特性;部分研究者在研究中对注浆材料粘度时变特性进行了平均化处理^[10-13];Ish-shalom 等^[14]针对普通水泥浆液粘度时变性作了深入分析;阮文军^[15-16]对于普通水泥浆液、水泥基复合浆液以及化学浆液的流型进行了划分,认为浆液粘度时变性规律复合指数函数;李术才等^[17]对水泥水玻璃浆液和高聚物改性水泥浆液在无水条件下的粘度时变特性进行了研究,划分了浆液粘度变化的不同阶段,完善了浆液时变特性研究理论。然而在地下水丰富或者岩溶地区地下工程中,浆液注入后面临的是复杂的水力环境,在地下水作用下浆液凝胶过程及结石体特性将受到显著影响,因此需要对速凝浆液在水下的粘度时变特性进行深入研究。

本文针对浆液在静水条件下的粘度时变特性与凝胶性质,采用旋转粘度计对不同配比水泥水玻璃速凝浆液的粘度时变特性进行研究,揭示浆液在静水及无水条件下的粘度变化规律,并采用 SEM 扫描电子显微镜对浆液凝胶产物进行微观结构分析,揭示水泥水玻璃浆液在静水及无水条件下的微观结构特征。

2 浆液粘度时变特性试验

2.1 试验材料

2.1.1 水泥

试验所用水泥为武汉武钢华新水泥有限责任公司生产的华新堡垒牌 P.C. 32.5 复合硅酸盐水泥,水泥品质符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)标准。

2.1.2 水玻璃

选用武汉昌盛泡花碱厂生产的工业级改性水玻璃,水玻璃波美度为 40°Bé、模数为 3.16,根据工程中经常采用的水玻璃配比,将水玻璃原液稀释配制成 30°Bé 的浆液。

2.2 试验仪器

粘度测量仪器选用国产 NDJ-5S 在线式数显旋转粘度计,粘度量程为 0.001~100 Pa·s,温度量程为 0~100 °C,可以实现实时在线测量,得到浆液粘度和温度随时间的变化曲线。



图1 NDJ-5S 旋转粘度计

Fig.1 NDJ-5S rotatory viscometer

凝胶微观结构分析采用 Quanta 250 扫描电子显微镜,最大放大倍数为 10^6 ,通过电子枪发射出的电流激发到样品表面,产生二次电子,通过信号收集与信号转换到达屏幕,可看到样品表面的同步扫描照片,实现对样品表面的形貌进行微观表征。

2.3 试验方案

(1) 根据注浆工程中常用水泥水玻璃配比方

案,采用水泥浆水灰比 W/C 为 1.0,水泥浆与水玻璃溶液体积比 C/S 分别为 1:1、2:1、3:1,其中水玻璃波美度为 30°Bé;

(2) 将水玻璃原液稀释至试验所需波美度 配制好水泥浆 将水泥浆和水玻璃按照比例在烧杯内混合 搅拌均匀后,注入盛有 500 mL 水的量杯中,将粘度计转子调至标准刻线位置,开始采集数据,粘度变化可以实时显示在电脑上,并可对数据进行存储记录;

(3) 作为对比试验,还进行了无水条件下(即将水泥浆与水玻璃溶液直接混合不注入静水中)浆液的粘度时变特性试验。

3 试验结果与分析

3.1 浆液粘度时变特性试验曲线

进行了水灰比 W/C 为 1.0 的水泥浆以体积比 1:1、2:1、3:1 分别与 30°Bé 水玻璃组成双液浆的粘度特性试验。

图 2 给出了静水条件下水灰比 W/C 为 1.0,水泥浆水玻璃体积比 C/S 分别为 1:1、2:1 和 3:1 的粘度和温度随时间的变化曲线;图 3 给出了无水条件下水灰比 W/C 为 1.0,水泥浆水玻璃体积比 C/S 分别为 1:1、2:1 和 3:1 的粘度和温度随时间变化曲线。

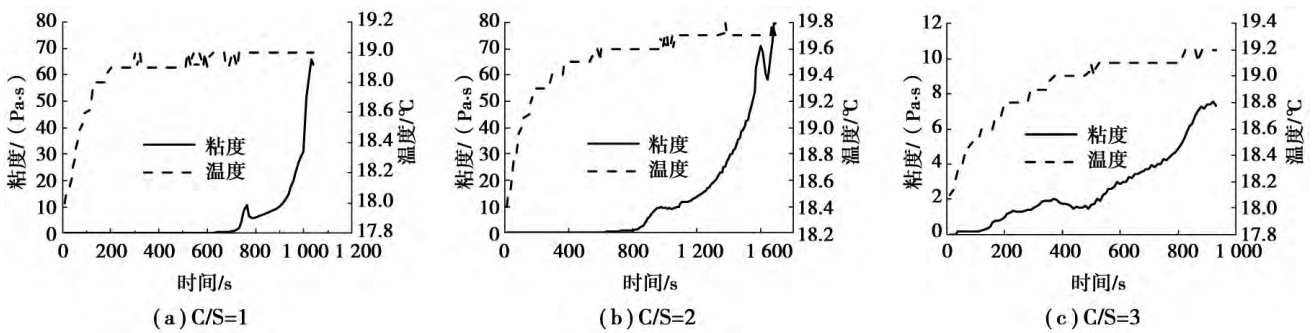


图 2 水泥水玻璃浆液在静水下的粘度和温度变化曲线

Fig.2 Viscosity and temperature curves of cement-sodium silicate grout under stagnant water

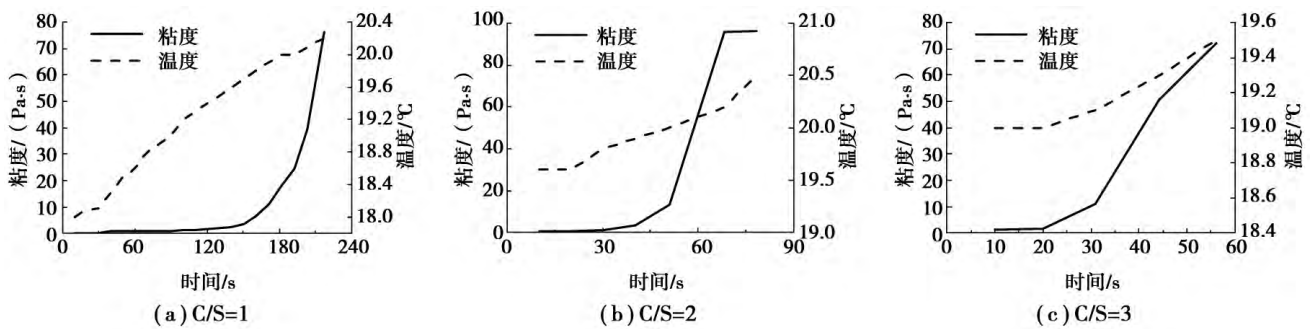


图 3 水泥水玻璃浆液粘度和温度变化曲线

Fig.3 Viscosity and temperature curves of cement-sodium silicate grout

3.2 浆液粘度时变特性分析

静水条件下的浆液粘度试验结果表明,浆液粘度变化具有明显的时变特性。根据浆液粘度与温度的变化特征,可以将水泥水玻璃浆液在水下的粘度变化划分为低粘度期、初始上升期、快速上升期 3 个阶段,如图 4。

水泥水玻璃浆液混合注入静水中以后,铝酸三钙 C₃A、硅酸三钙 C₃S 等成分发生水化反应,生成水化铝酸钙晶体并且释放出大量的热量。水化铝酸钙与石膏反应生成水化硫铝酸钙针状晶体(钙

矾石)。钙矾石难溶于水,包裹在水泥熟料的表面上(的钙矾石)形成保护膜,阻碍水分进入水泥内部,使水化反应延缓^[18]。由于水泥水化程度与水化生成的 Ca(OH)₂ 含量成正比^[19-20],水化反应的延缓导致反应生成的 Ca²⁺ 总量有限,与水玻璃反应生成的水化硅酸钙 C-S-H 总量也相应较少,表现为浆液粘度值很低,低粘度期持续约 10 min,这与康宇等^[20]采用电导率方法测得的 Ca²⁺、OH⁻ 等溶出形成水化液相的时间一致。

钙矾石形成的保护膜是一种半透膜,钙离子可

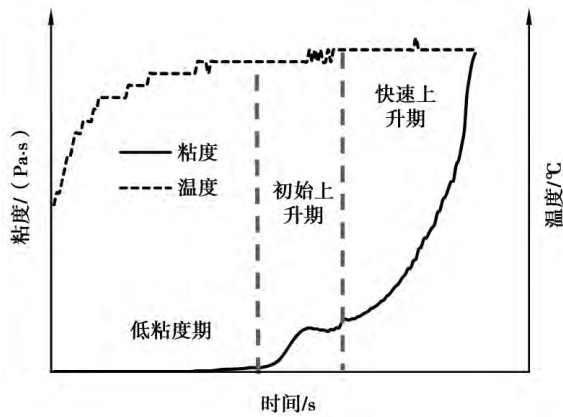


图4 水泥水玻璃浆液水下粘度时变特性

Fig.4 Time varying characteristic of the viscosity of CS grout under stagnant water

以通过此膜向外扩散,但有一部分又会被过量的负电荷吸附在保护膜表面,形成一扩散双电层^[22]。该薄膜以下的未水化物溶解后形成的硅酸盐离子则不能通过渗透膜,使渗透压力增加。当渗透压力增大至足以使薄膜在薄弱处破裂,缺钙的硅酸盐离子就被挤入液相,并和钙离子结合,生成各种不定形的C-S-H。使得浆液粘度出现增大,进入初始上升期。初始上升期浆液粘度变化又可细化为两个阶段,即粘度增长期与粘度调整期。由于水泥水化产物与水玻璃的反应速度远大于水泥水化的反应速度^[23],这一阶段水泥水化产物被消耗之后,浆液粘度进入稳定调整阶段。

在渗透压力与化学反应的共同作用下,水泥熟料表面的保护膜被完全破坏,水泥水化反应进入加速期^[22]。钙离子和硅酸盐浓度相对于C-S-H来说达到过饱和,与水玻璃反应生成大量水化硅酸钙相互聚集凝胶,凝胶体形成较大的空间网络结构^[24],浆液粘度进入快速上升期,这一阶段是静水条件下水泥水玻璃浆液粘度增大的主要阶段。

3.3 静水条件对浆液粘度时变特性的影响

水泥水玻璃浆液在静水与无水条件下粘度时变曲线如图5所示。

无水条件下水泥水玻璃浆液粘度时变特性试验曲线结果与李术才等^[17]的研究结论类似,浆液粘度低且粘度期非常短,在3min以内即迅速进入上升期,随后浆液凝胶固化。

对比无水条件下浆液的粘度时变曲线,静水条件下水泥水玻璃浆液的低粘度期远大于无水条件下,同时浆液粘度的增长过程也相对较平缓,这是由于水泥水玻璃浆液注入静水中以后,受到水环境

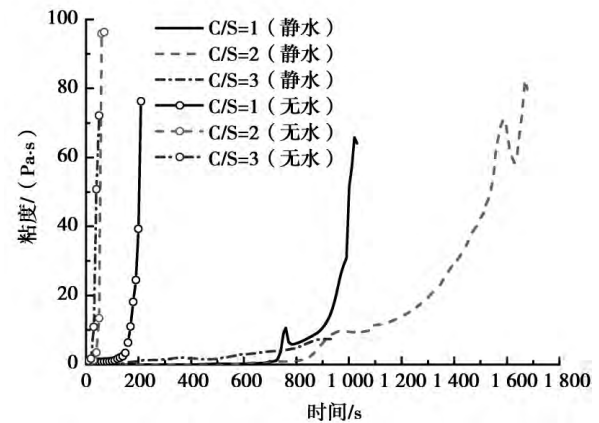


图5 静水与无水条件下水泥水玻璃浆液粘度时变曲线

Fig.5 Viscosity curves of CS grout under stagnant water and anhydrous conditions

的稀释、缓凝作用,同时水泥水化反应产生的热量还会被水体吸收,降低了水泥水化的反应环境温度,并降低反应速度,因此浆液在水下浓度降低、反应减缓、凝胶过程增长。

水泥水玻璃凝浆液凝胶固化主要是靠水玻璃中的硅酸根和水泥水化产生的 Ca^{2+} 发生反应生成C-S-H凝胶或硅凝胶来维持^[24-26]。当注浆材料处于富水条件下时,由于反应产物中存在大量的 NaOH 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性物质,且容易溶出,碱性物质的溶出会导致C-S-H凝胶分解,导致结构体破坏。这也表明,水泥水玻璃浆液在无水条件下所具有的速凝、结石体强度高的优点在水下将会明显弱化,这将会直接影响水泥水玻璃浆液用于堵水加固的适用性与有效性。

同时,对比静水条件下不同水泥水玻璃浆液体积比(C/S)的粘度时变曲线可以看出,C/S较小时浆液的低粘度期较长,C/S=1和C/S=2时浆液低粘度期均在10min以上,这是由于水泥水化生成的 Ca^{2+} 含量是一定的,因此过多水玻璃对结石体的强度无益,反而可能会使体系稀释而导致强度下降^[20],减缓粘度增长过程。随后初始上升期与快速上升期粘度增加明显,分别在16min和27min左右粘度增大超出粘度计测量范围。当C/S增大后,由于水泥水化产生的 Ca^{2+} 相对较多,可迅速与硅酸钠反应,浆液低粘度期缩短,但由于浆液含有的硅酸钠总量少,反应生成的水化硅酸钙总量有限,因此浆液的粘度值也较低,浆液粘度增长过程较为平缓。

3.4 浆液凝胶微观结构分析

水泥水玻璃浆液在静水条件下分层凝胶情况

如图 6 所示。



(a) 凝胶分层 (b) 上层凝胶形态

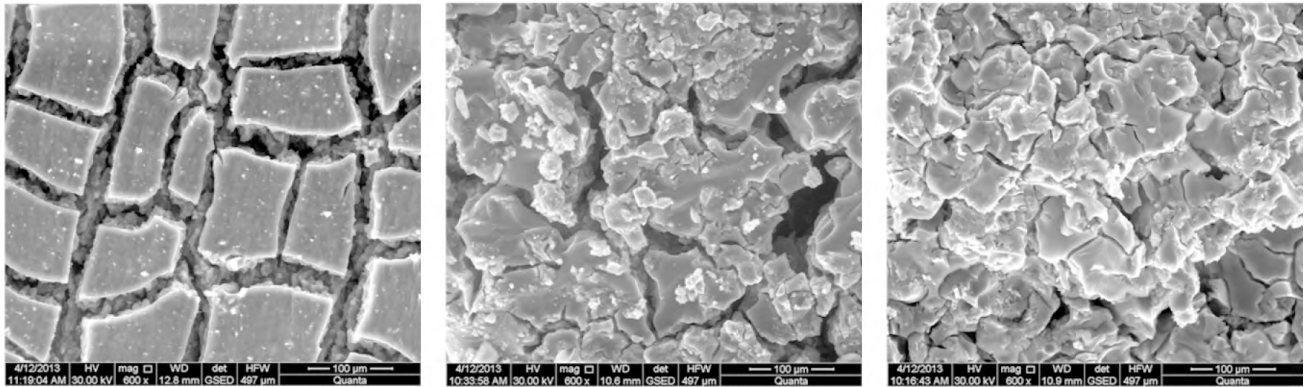
图 6 静水条件下浆液分层凝胶

Fig.6 The delamination of grout under stagnant water

由图 6 可以看出,水泥水玻璃浆液在静水中出

现明显的分层凝胶现象,且分层之间界限明显,各层凝胶体在颜色、粘度、强度等宏观方面性质存在明显差异。

分别取静水条件下不同位置的凝胶和无水条件下凝胶试样进行扫描电镜分析,扫描电镜结果如图 7 所示。图 7(a) 是静水条件下水泥水玻璃浆液上层凝胶的 SEM 图像,凝胶产物存在较为明显的微孔隙(裂隙)结构,SEM 扫描图像显示这些部位颜色较暗,表明微孔隙裂隙中存在一定量的水分。图 7(b) 是静水条件下水泥水玻璃浆液下层凝胶的 SEM 图像,凝胶产物也含有一定的微孔隙(裂隙)结构,但孔隙率相比上层凝胶要小,浆液反应胶结程度更高。图 7(c) 是无水条件下水泥水玻璃浆液凝胶产物的 SEM 图像,凝胶产物微孔隙(裂隙)较少,整体胶结情况较好。



(a) 静水条件上层凝胶 (b) 静水条件下层凝胶 (c) 无水条件凝胶

图 7 600 倍放大条件下浆液凝胶扫描电镜图像

Fig.7 SEM images of grout samples at magnification of 600

对比图 7 中静水及无水条件下的浆液凝胶产物 SEM 图像可以看出:

(1) 静水条件上层凝胶较下层凝胶具有更为明显的微孔隙(裂隙)结构,结构更为松散,与上层凝胶产物呈现脆性、含水量高的宏观特性相一致。同时,下层凝胶水化产物更加复杂多样,相应增加了凝胶体的粘度和强度。

(2) 静水条件凝胶产物较无水条件下凝胶产物的微孔隙(裂隙)结构更为明显,结构更加松散,孔隙率更高,且孔隙中含水量也更多,表明静水条件凝胶试样相比无水条件胶结情况要差,凝胶产物结构整体性差,这与静水条件凝胶强度低于无水条件凝胶强度的宏观特征相一致。

4 结 论

(1) 水泥水玻璃浆液在静水条件下具有明显的粘度时变特性,浆液粘度变化可分为低粘度期、初始上升期、快速上升期 3 个阶段。

(2) 水泥水玻璃浆液在静水条件下会出现不同程度的分层离析现象,上层为果冻状凝胶体,强度低且呈脆性,微孔隙(裂隙)结构发育,孔隙率高,且含水量较高,下层为絮状或多孔状凝胶体,存在一定量的微孔隙(裂隙)结构,孔隙率相比上层凝胶要小。

(3) 静水条件下的浆液低粘度期远长于无水的情况,浆液粘度增长过程也比无水条件下缓慢,浆液在静水中出现不同程度的凝胶体分层现象,微

孔隙发育造成水泥水玻璃浆液凝胶更容易被水冲蚀破坏。

在地下工程注浆堵水加固实际应用中,水泥水玻璃浆液注入后会面临更为复杂的水力条件,将受到更为剧烈的溶蚀、稀释与冲刷作用,注浆的有效性与可靠性相比无水条件下会明显降低,在工程实践中应引起足够的重视,进行有针对性的优化改进。

参考文献(References)

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956. (Qian Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956. (in Chinese))
- [2] 李术才, 张霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2377-2396. (Li Shucai, Zhang Xiao, Zhang Qingsong, et al. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2377-2396. (in Chinese))
- [3] 刘招伟, 张顶立, 张民庆. 圆梁山隧道毛坝向斜高压富水区注浆施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1728-1734. (Liu Zhaowei, Zhang Dingli, Zhang Mingqing. Grouting technique for high-pressure and water-rich area in Maoba syncline at Yuanliangshan tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1728-1734. (in Chinese))
- [4] 张旭东, 汪海滨, 封明君, 等. 释能降压工法在高压富水岩溶隧道风险规避中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2782-2791. (Zhang Xudong, Wang Haibin, Feng Mingjun, et al. Study of the application of energy releasing and pressure reducing aim to evade risk in water-enriched high hydraulic pressure latent karst tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup.1): 2782-2791. (in Chinese))
- [5] 张成平, 张顶立, 叶英, 等. 高压富水岩溶隧道注浆机理及作用效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 996-1002. (Zhang Chengping, Zhang Dingli, Ye Ying, et al. Analysis of grouting mechanism and its effect for karst tunneling in high water pressure and water-enriched region [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 996-1002. (in Chinese))
- [6] 王档良. 承压含水层群孔注浆效应及现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2): 1956-1960. (Wang Dangliang. Effect of hole group grouting in confined aquifer and its field experiment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 1956-1960. (in Chinese))
- [7] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839-841. (Yang Mijia, Chen Guoxiong, He Yongnian. The development trend and research present condition of grouting theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 839-841. (in Chinese))
- [8] 《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, 2001. (Research group of grouting theories and case histories. The grouting theories and case histories [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [9] Lombardi G. 水泥灌浆浆液是稠好还是稀好[A]//现代灌浆技术译文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 76-81. (Lombardi G. Should cement grout be thick or thin [A]// Collection of Translation of Modern Grouting Techniques [C]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1991: 76-81. (in Chinese))
- [10] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803-1806. (Yang Xiuzhu, Lei Jinshan, Xia Linong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1803-1806. (in Chinese))
- [11] 孙斌堂, 凌贤长, 凌晨, 等. 渗透注浆浆液扩散与注浆压力分布数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 37(11): 1402-1407. (Sun Bintang, Ling Xianchang, Ling Chen, et al. Numerical simulation for diffusion and pressure distribution of permeation grouting [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 37(11): 1402-1407. (in Chinese))
- [12] Funehag J, Gustafson G. Design of grouting with silica sol in hard rock—new methods for calculation of penetra-

- tion length , part I [J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2008 , 23(1) : 1-8.
- [13] Fransson A , Tsang C F , Rutqvist J , et al. A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2007 , 44 (7) : 1011-1021.
- [14] Ish-shalom M , Greenberg S A. The rheology of fresh Portland cement pastes [A]// Proceedings of the 4th International Symposium Chemistry Cement [C]. 1960: 731-749.
- [15] 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 , 27(1) : 69-73. (Ruan Wenjun , Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2005 , 27(1) : 69-73. (in Chinese))
- [16] 阮文军. 基于浆液黏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 , 24(15) : 2709-2714. (Ruan Wenjun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(15) : 2709-2714. (in Chinese))
- [17] 李术才 , 韩伟伟 , 张庆松 , 等. 地下工程动水注浆速凝浆液粘度时变特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报 , 2013 , 32(1) : 1-7. (Li Shucai , Han Weiwei , Zhang Qingsong , et al. Research on time-dependent behavior of viscosity of fast curing grouts in underground construction grouting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2013 , 32(1) : 1-7. (in Chinese))
- [18] 马振珠 , 岳汉威 , 宋晓岚. 水泥水化过程的机理、测试及影响因素 [J]. 长沙大学学报 , 2009 , 23(2) : 43-46. (Ma Zhenzhu , Yue Hanwei , Song Xiaolan. The mechanism of the cement hydration process test and influencing factors [J]. Journal of Changsha University , 2009 , 23(2) : 43-46. (in Chinese))
- [19] 李林香 , 谢永江 , 冯仲伟 , 等. 水泥水化机理及其研究方法 [J]. 混凝土 , 2011(6) : 76-80. (Li Linxiang , Xie Yongjiang , Feng Zhongwei , et al. Cement hydration mechanism and research methods [J]. Concrete , 2011 (6) : 76-80. (in Chinese))
- [20] Mounanga P , Khelidj A , Loukili A , et al. Predicting Ca (OH)₂ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach [J]. Cement and Concrete Research , 2004 , 34(2) : 255-265.
- [21] 康宇 , 李浩璇 , 余晓阳 , 等. 水化早期水泥净浆电导的特征及与凝结时间相关性的研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版) , 2006 , 31(增) : 173-176. (Kang Yu , Li Haoxuan , Yu Xiaoyang , et al. Investigation of electrical conductivity on cement paste during early hydration and relativity between electrical conductivity and setting time [J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed) , 2006 , 31(Supp.1) : 173-176. (in Chinese))
- [22] 吕鹏 , 翟建平 , 聂荣 , 等. 环境扫描电镜用于硅酸盐水泥早期水化的研究 [J]. 硅酸盐学报 , 2004 , 32(4) : 530-536. (Lü Peng , Zhai Jianping , Nie Rong , et al. Investigation on the early stage hydration of portland cement using environmental scanning electron microscopy [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society , 2004 , 32(4) : 530-536. (in Chinese))
- [23] 刘玉祥 , 柳慧鹏. 水泥-水玻璃双液注浆中的最优参数选择 [J]. 矿冶 , 2005 , 14(4) : 1-3. (Liu Yuxiang , Liu Huipeng. Optimal parameter selection of cement-water glass two-shot grouting [J]. Mining and Metallurgy , 2005 , 14(4) : 1-3. (in Chinese))
- [24] 王红喜. 高性能水玻璃悬浊型双液灌浆材料研究与应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学 , 2007. (Wang Hongxi. Research on high performance sodium-silicate suspension two-shot Grouting Materials and its Application [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology , 2007. (in Chinese))
- [25] Ryu J S , Otsuki N , Minagawa H. Long-term forecast of Ca leaching from mortar and associated degeneration [J]. Cement and Concrete Research , 2002 , 32(10) : 1539-1544.
- [26] Garrabrants A C , Sanchez F , Kosson D S. Leaching model for a cement mortar exposed to intermittent wetting and drying [J]. Aiche Journal , 2003 , 49(5) : 1317-1333.