文章编号: 1000-8608(2016)03-0252-05

水泥-水玻璃双液注浆材料工程性能及孔隙结构

杨建康1,陆海军*1,2,李继祥1,朱登峰1

(1. 武汉轻工大学 多孔介质力学研究所, 湖北 武汉 430023;

2. 大连理工大学 土木工程学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要:水泥-水玻璃双液注浆材料由于其凝胶时间短、早期强度高、材料经济且来源广泛等诸多优点,而被大量用于工程注浆堵水中.通过黏度试验、凝胶时间试验、线膨胀试验与低温氮气吸附试验,深化了对双液注浆材料基本性能的认识,同时结合试验结果提出最优双液注浆材料配合比.凝胶时间试验表明,在水泥掺量增加、温度升高的过程中,浆液的凝胶时间从 $148\sim367$ s 减少到 $71\sim211$ s;黏度试验表明,由 20 ℃升温到50 ℃时,黏度从 $10.39\sim178.57$ m^2/s 非线性降低到 $6.84\sim83.58$ m^2/s ,浆液表现出明显的非牛顿流体的特性;浆液结石体低温氮气吸附条件下,浆液孔径分布在 $2\sim10$ nm,浆液孔隙分布均匀,不易发生渗漏现象;凝固后的浆液结石体线膨胀系数在30 ℃到60 ℃有下降趋势,但浆液仍表现为热膨胀性,而在大于70 ℃时线膨胀系数变为负值,浆液结石体出现收缩性质.

关键词: 注浆;黏度系数;孔隙结构;膨胀系数

中图分类号:TV131.2

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201603005

0 引 言

矿井、隧道以及地基等在深挖时,随着卸荷的进行,当被卸荷的土体不足以承受地下承压水的压力时,地基或隧道频频出现流砂和管涌现象.为了防止工程事故发生以及完工后的工程能够达到安全使用要求,岩体注浆技术因其诸多优点被广泛应用,其中注浆材料的选择一直是岩体注浆技术控制的重点.工程上主要有以聚氨酯为代表的有机注浆材料[1]和以水泥-水玻璃为代表的无机注浆材料[2].作为无机注浆材料代表的水泥-水玻璃注浆材料虽然被大量运用于工程上,但没有明确的标准规范来指导工程运用,大多仅凭借工程经验.因此深化双液注浆材料的研究、规范对注浆材料的认识,对指导工程应用有着十分重要的意义.

许多学者开展了对水泥-水玻璃注浆材料性能的研究,并分别提出了水泥-水玻璃浆液最佳配合比,但是目前所有研究还仅仅停留在对其凝胶时间、强度、安定性等性能研究上[3],如刘玉祥

等^[4]、庞宗霞等^[5]通过对双液注浆材料的强度和应力应变的研究提出了水泥-水玻璃的最佳配合比,闫勇等^[6]通过对凝胶时间、强度以及安定性研究,提出不同水泥-水玻璃配合比下抗压强度曲线以及凝胶时间曲线.但对于双液注浆材料的黏度、热收缩性、孔隙结构演化和热效应规律的研究还较少.

为分析浆液在裂隙中的流动情况,评价浆液 在岩层中的扩散情况,以及浆液在凝固后与岩层 的相互作用和自身抗渗性,有必要对浆液堵水结 石过程中的黏度、热膨胀系数以及孔隙结构进行 分析.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究中所用的材料来源于陕西秦岭水泥股份有限公司生产的普通 425 # 硅酸盐水泥以及湖南省冷水江市红星水泥外加剂有限责任公司生产的缓凝高效减水剂和 AC-I 型速凝剂,水玻璃来源于成都鸿瑞化工有限公司,其为液体状态.

1.2 试验方法

为了研究不同温度和不同水泥-水玻璃配合比下的黏度、凝胶时间、热收缩性以及孔隙分布情况,本试验双液注浆材料参数为水灰比 0.8:1,速凝剂 4%,减水剂 5%,水玻璃密度 1.2 g/mL,水玻璃模数 3.1~3.4,水玻璃质量分数 20%.水泥-水玻璃质量比有 1.0:1、1.1:1、1.2:1、1.3:1、1.4:1、1.5:1 共 6 种.

1.2.1 凝胶试验 本试验采用倒杯法^[7]测量浆液的凝胶时间 t_g . 首先将配制好的普通硅酸盐水泥单浆液和水玻璃溶液单浆液分别置于两个不同的烧杯中,将水玻璃单浆液向水泥单浆液中进行倒杯,然后再把混合的浆液倒入原水玻璃烧杯中,交替多次,直至最后烧杯在倾斜 45° 浆液未流动时停止. 整个过程所用的时间就为本试验所求的凝胶时间.

1.2.2 黏度试验 采用 SYD-265E 沥青运动黏度测定仪(武汉格莱莫检测设备有限公司),先将浆液迅速融合后,在20.4、30.7、41.0、50.8 \mathbb{C} 水浴加热的条件下,用秒表测量不同温度和各种配合比浆液在特定的黏度计中的流动时间(t). 再根据每个特定黏度计的黏度系数(K),求出各种条件下的运动黏度(ν =tK).

1.2.3 低温氮气吸附试验 采用北京精微高博科学技术有限公司生产的 JW-BK 静态氮吸附仪,检测各种配合比浆液试样的孔隙特征. 各取0.5 g 在常温下养护 7 d 的不同配合比的浆液结石体试样进行试验. 先将试样碾碎筛分后,选取 $1\sim2~mm$ 部分,然后采用纯度为99.9%的氮气作为吸附试验的吸附介质,在相对压力 $p/p_0=0.010\sim0.995$ 的条件下,进行吸附和脱附,并根据标准 BET 试验方法[8] 检测不同配合比浆液结石体试样的孔径和孔容分布情况.

1.2.4 热膨胀试验 将不同配合比的浆液分别置于模具中,制成长 50 mm、直径 10 mm 的圆柱形浆液结石体,经过 7 d 的常温养护后,取出试样置于 XPY 型热膨胀系数测定仪(上海精密仪器仪表有限公司),设备加热温度控制在 $30\sim80$ ℃,同时每隔 10 ℃对其膨胀系数进行测量.

2 试验结果与分析

2.1 凝胶特性

双液注浆材料的凝胶时间特性如图 1 所示, 从图中可以看出,浆液的凝胶时间总体很短,在 $71\sim367$ s 内变化. 凝胶时间随水泥-水玻璃配合比的增大从 $148\sim367$ s 减少到 $71\sim211$ s,在温度较低区间内下降较快,而在温度较高的区间内下降较慢.

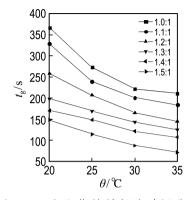


图 1 双液注浆材料凝胶时间曲线

Fig. 1 The gelation time curve of double solution grouting material

双液注浆材料的凝胶时间随水泥-水玻璃配合比的增大而减少.水泥-水玻璃的配合比较小时,其混合溶液中水泥的水灰比相对较大,水的含量相对较多,致使浆液颗粒间的相对距离增大,相互作用减小;而多余水不能被水泥溶液与水玻璃充分反应,致使反应后水残留较多,凝胶时间较长,均延长了反应时间.浆液凝胶时间受温度影响明显,温度升高主要是加速了浆液化学反应速率,浆液在高温下凝结速度加快,致使凝胶时间有减少的趋势.

2.2 黏度特性

不同配合比以及不同温度下的双液注浆材料运动黏度如图 2 所示,可以看出浆液黏度从 $10.39\sim178.57~\text{m}^2/\text{s}$ 非线性降低到 $6.84\sim83.58~\text{m}^2/\text{s}^{[9]}$,并且在温度较低区域下降趋势更为明

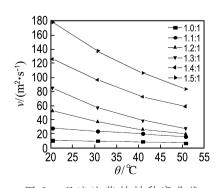


图 2 双液注浆材料黏度曲线

Fig. 2 The viscosity curve of double solution grouting material

显. 在水泥-水玻璃配合比较大时, 双液注浆材料的黏度大于配合比较小时的黏度.

双液注浆材料的黏度性质表现出浆液的流变性,是由浆液内部相互之间摩擦阻力引起的.黏度随温度升高而非线性下降,凸显了浆液为非牛顿流体特性,主要是由于浆液分子间引力产生的黏滞性随温度升高而降低,浆液内部摩擦阻力减小.水泥-水玻璃配合比较大时,黏度较大,主要是由于配合比越大,浆液中水泥微颗粒相对越多,较多的微颗粒增大了浆液内部之间的摩擦阻力,致使浆液流动性下降,黏度增大.

2.3 孔隙结构特性

浆液结石体吸附-脱附等温线如图 3 所示,由于不同配合比的浆液吸附-脱附等温线相似,选取配合比为 1.0:1 为例进行分析. 根据 IUPAC 的分类,浆液结石体吸附等温线为 IV 型等温线,随着 p/p_0 的增大,吸附量逐渐上升,其中 p/p_0 在 $0\sim0.2$,上升速度较快,这时浆液结石体颗粒对氮气分子进行单层吸附; p/p_0 增大到 0.6 时,颗粒孔隙内的气体分子接近饱和,吸附数量有所减少,此时曲线较为平缓,对气体的吸附速度有所减慢; p/p_0 增大到 0.8 时,吸附曲线斜率增加,吸附气体量大幅增加,相对压力到达二次吸附的临界值,气体分子发生了多层吸附.

滯回环形状的差异性反映了孔结构的差异性[8],浆液结石体的吸附-脱附等温线在 p/p_0 为

0.2~0.8 出现了 H₃ 型滞回环,这是因为氮气分子间的范德华力使脱附时所需的相对压力略微增加,以至于脱附曲线较吸附曲线有滞后现象.

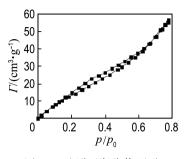


图 3 吸附-脱附等温线

Fig. 3 The adsorption-desorption isotherm

浆液的孔容-孔径分布曲线如图 4 所示,根据 IUPAC 颁发的标准,孔隙直径小于 2 nm 时,被称为微孔;孔隙直径为 2~50 nm 时,被称为介孔;而大于 50 nm 时,被称为大孔^[10].可以发现,浆液的孔径全部都分布在 2~10 nm,属于介孔范畴^[11],说明浆液结石体孔隙孔径很小,浆液结石体矿物之间结构致密,有利于注浆体防渗.随着水泥-水玻璃配合比增大,可以看到,当浆液配合比为 1.1:1 时,总孔容为 0.129 cm³/g;而配合比上升到 1.5:1 时,总孔容下降为 0.115 cm³/g,总体上总孔容变为下降趋势,主要是由于随着水泥浆液的增多,浆液结石体矿物结构致密,孔隙分布较少.

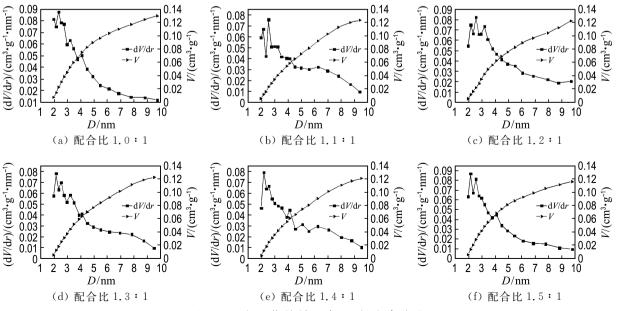


图 4 双液注浆材料孔容-孔径分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of pore volume and size of double solution grouting material

2.4 线膨胀特性

双液注浆材料的线膨胀特性如图 5 所示,由图可知,在 30~60 ℃下,浆液结石体的线膨胀系数随温度的升高而逐渐减低,但仍为正值;温度达到 60~80 ℃时,线膨胀系数出现负值,浆液结石体在高温下出现收缩现象.在不同配合比、相同温度条件下,水泥-水玻璃的配合比越大,其线膨胀系数越小;而不同配合比、不同温度下,配合比越小的浆液,其线膨胀系数随温度升高变化越明显.

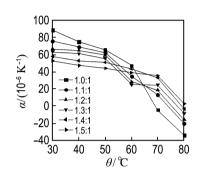


图 5 双液注浆材料线膨胀系数曲线 Fig. 5 The linear expansion coefficient curve of double

solution grouting material

浆液结石体主要有未被水化的水泥颗粒、各种水化产物、少量空气和水,以及由空气和水组成的孔隙.当水泥-水玻璃配合比较小时,空气和水的含量相对较多,而水和空气的线膨胀系数比水化物和未被水化的水泥颗粒大,因而当温度较低时,配合比较小的浆液结石体线膨胀系数较大.高温下浆液内的结合水被蒸发出来,而配合比较小的结石体因为孔隙较多,结石体中水相对较多,在水被蒸发后,收缩较大[12].

3 结 论

- (1)浆液的凝胶时间随水泥掺量增加、温度升 高有所减少.
- (2)浆液表现出明显的非牛顿流体的特性,浆液黏度随温度升高,从 $10.39\sim178.57~\text{m}^2/\text{s}$ 非线性降低到 $6.84\sim83.58~\text{m}^2/\text{s}$.
- (3)低温氮气吸附条件下,可以看出浆液结石体孔径主要分布在 2~10 nm,浆液孔隙很小,属于介孔范畴,而总孔容随配合比的增大出现减小趋势.
- (4)凝固后的浆液结石体线膨胀系数在常温 30 ℃到 60 ℃有下降趋势,但浆液仍表现为热膨

胀性;而在大于 70 ℃时线膨胀系数变为负值,浆液结石体出现收缩性质.

参考文献:

- [1] 冯志强,康红普. 新型聚氨酯堵水注浆材料的研究及应用[J]. 岩土工程学报,2010,3(3):375-380. FENG Zhi-qiang, KANG Hong-pu. Development and application of new waterproof grouting materials of polyurethane [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,3(3):375-380. (in Chinese)
- [2] 郭金敏,汪建立,张 超. 水泥-水玻璃双液注浆在饱和动水砂层隧道施工中的应用研究[J]. 煤炭工程,2005(8):33-36.
 GUO Jin-min, WANG Jian-li, ZHANG Chao. Research on application of cement and water glass double grouts to tunnel construction in dynamic water saturated sands [J]. Coal Engineering, 2005(8):33-36. (in Chinese)
- [3] Kazemian S, Prasad A, Huat B K, et al. Effects of cement-sodium silicate system grout on tropical organic soils [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012, 37(8):2137-2148.
- [4] 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):1-3,22.
 LIU Yu-xiang, LIU Hui-peng. Optimal parameter selection of cement-water glass two-shot grouting [J]. Mining and Metallurgy, 2005,14(4):1-3,22. (in Chinese)
- [5] 庞宗霞,田利民. 水泥-水玻璃浆液的室内试验与研究[J]. 山西交通科技, 2010(5):15-16, 19. PANG Zong-xia, TIAN Li-min. The indoor test and research of cement-silicate grout [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2010(5): 15-16, 19. (in Chinese)
- [6] 闰 勇,郑秀华. 水泥-水玻璃浆液性能试验研究[J]. 水文地质工程地质,2004,31(1):71-72,81. YAN Yong, ZHENG Xiu-hua. Study on the performance of cement-water glass grout [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(1):71-72,81. (in Chinese)
- [7] 王红喜,张高展,丁庆军,等. 碱激发-工业废渣双液注浆材料性能研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(3):374-378.
 WANG Hong-xi, ZHANG Gao-zhan, DING Qing-

WANG Hong-xi, ZHANG Gao-zhan, DING Qingjun, et al. Research on the performance of double solution grouting material with alkali-activated

- industry waste slag [J]. **Journal of Building Materials**, 2007, **10**(3):374-378. (in Chinese)
- [8] Pham S T, Prince W. Effects of carbonation on the specific surface BET of cement mortar measured by two different methods: Nitrogen adsorption and water adsorption [J]. Advanced Materials Research, 2014, 931-932;421-425.
- [9] HAN Wei-wei, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Experiment study on viscosity behavior and its temperature influence grouts [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 256-259 (Part 1): 153-156.
- [10] Gregg S J , Sing K S W. Absorption, Surface Area, and Porosity [M]. 2nd ed. New York: Academic

- Press, 1982.
- [11] 胡克伟, 贾冬艳, 颜 丽, 等. 改性沸石对 Zn²⁺的吸附特性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011(1):49-52. HU Ke-wei, JIA Dong-yan, YAN Li, *et al*. Effect of natural zeolite and modified zeolite on adsorption of Zn²⁺[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2011(1):49-52. (in Chinese)
- [12] 姚 武,郑 欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(1):77-81,87.

YAO Wu, ZHENG Xin. Effect of mix proportion on coefficient of thermal expansion of concrete [J]. **Journal of Tongji University** (Natural Science), 2007, 35(1):77-81,87. (in Chinese)

Engineering properties and pore structure of cement-sodium silicate double solution grouting material

YANG Jian-kang¹, LU Hai-jun^{*1,2}, LI Ji-xiang¹, ZHU Deng-feng¹

- (1. Institute of Poromechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
 - 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Cement-sodium silicate double solution grouting material has been widely used in engineering grouting because of its short gel time, high early strength, economical and wide range of material resources, etc.. The basic properties of the double solution grouting material were investigated by viscosity test, gel time test, linear expansion test and low temperature nitrogen adsorption test. The optimum mixture ratio of double solution grouting material is proposed. The gel time test shows that the gel time decreases from 148-367 s to 71-211 s in the process of cement dosage increasing and temperature increasing. Through the viscosity test, it is found that when the temperature increases from 20 °C to 50 °C, the viscosity of double solution grouting material nonlinearly reduces from 10. 39-178. 57 m²/s to 6. 84-83. 58 m²/s, and the slurry shows obvious characteristics of non-Newtonian fluid. Under the condition of low temperature nitrogen adsorption, it can be seen that the slurry pore, size distribution is between 2 nm and 10 nm, and it is not easy to leak because of its size distribution's uniform. The linear expansion coefficient of the solided crystal decreases from 30 °C to 60 °C, but it still has the thermal expansion property. In the meantime, when the temperature is above 70 °C, the linear expansion coefficient is negative, and its crystal shows the characteristics of the shrinkage.

Key words: grouting; viscosity coefficient; pore structure; expansion coefficient