

# 密实剂对水泥抗氯离子渗透性能的影响

丁向群,杨宝鑫,王艺潼,段锦涛

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究密实剂对水泥抗氯离子渗透性能的影响。方法 选择三种密实剂(S、Y、T),研究不同掺量下密实剂对水泥力学性能和抗氯离子渗透性能的影响,利用压汞测孔法分析内部孔隙结构,并利用扫描电子显微镜观察水泥的微观结构特征。结果 当密实剂在单掺条件下,S掺量为0.02%,Y掺量为0.03%,T掺量为0.02%时,水泥3 d和28 d的抗压强度均得到改善,氯离子渗透性能与空白试样相比,28 d电通量分别降低了7.75%、9.44%、10.2%。密实剂的掺入能够使水泥水化更充分,并有效降低孔隙及裂缝的数量,改善水泥石结构的密实性。结论 密实剂在低掺量下对水泥强度的发展有促进作用,可以降低水泥石的孔隙率,改善孔结构,并提高水泥抗氯离子渗透性能。

**关键词** 密实剂;抗压强度;电通量;抗渗性能;孔隙率

中图分类号 TU525

文献标志码 A

**引用格式:**丁向群,杨宝鑫,王艺潼,等.密实剂对水泥抗氯离子渗透性能的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):731-737.(DING Xiangqun, YANG Baoxin, WANG Yitong, et al. Study on the effect of compacting agent on the resistance of cement to chloride ion permeation[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 731-737.)

## Study on the Effect of Compacting Agent on the Resistance of Cement to Chloride Ion Permeation

DING Xiangqun, YANG Baoxin, WANG Yitong, DUAN Jintao

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To study the effect of compacting agent on the resistance of cement to chloride ion penetration. Three kinds of compacting agents (S, Y, T) were selected to study the influence of compacting agents on cement mechanical properties and chloride ion penetration resistance under different dosage. The pore structure was analyzed by mercury injection and scanning electron microscope. When the content of S is 0.02%, Y is 0.03% and T is 0.02%, the compressive strength of cement 3 d and 28 d is improved, and the electric flux of 28 d is reduced by 7.75%, 9.44% and 10.2%, respectively, compared with the blank sample. The addition of the compacting

收稿日期:2023-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52108235)

作者简介:丁向群(1970—),男,教授,博士,主要从事高性能混凝土等方面研究。

agent can make the cement more hydrated, reduce the number of pores and cracks effectively, and improve the compactness of the cement stone structure. Compaction agent can promote the development of cement strength at low content, reduce the porosity of cement, improve the pore structure, and enhance the resistance of cement to chloride ion penetration.

**Key words:** compacting agent; compressive strength; electrical flux; impermeability; porosity

密实剂是混凝土工程中常用的一种外加剂,具有改善水泥石抗渗透性、抗化学侵蚀,以及施工简便、无毒和环保等特点,有利于提高水泥石结构的耐久性能。因此密实剂被广泛应用于地下结构、桥梁工程、地铁、隧道、石油化工、水电水利工程、河水处理工程等众多领域<sup>[1-3]</sup>。诸多学者对如何改善水泥、混凝土密实性,提高抗渗性能进行了研究。李广彦等<sup>[4]</sup>研究发现,以不同活性化合物复配的防水材料对混凝土的抗渗性、密实性、力学性能等性能均有提高作用。牛振山等<sup>[5]</sup>将不同种类和不同掺量的密实组分和结晶组分材料进行复合,并测试了抗渗性能,结果显示均能有效提升混凝土抗渗性能。蒋正武<sup>[6]</sup>研究发现,水泥渗透和结晶过程在一定程度上相互促进和依赖,两者的主导阶段不同:前期,活性物质在混凝土表面的渗透过程占主导地位;中后期,活性物质与基质内部的化学物质逐渐结晶并逐渐增强。王丹<sup>[7]</sup>针对种水泥基渗透结晶防水材料研究发现,晶体可以有效填充混凝土的空隙,堵住裂缝,从而达到自愈合的效果。王宗余等<sup>[8]</sup>研究了不同用量的渗透型无机防水剂对水泥渗透性能的影响,结果表明,水泥净浆总孔隙率随水性渗透型无机防水剂用量的增加而降低。徐教强等<sup>[9]</sup>进行了内掺水泥基渗透结晶型防水材料和无机纳米抗裂减渗剂对水泥试件抗压和抗渗试验,并进行SEM微观分析,结果表明,水泥基渗透结晶型防水材料主要生成针状结晶,更有利于堵塞裂缝及孔隙,无机纳米抗裂减渗剂改善孔隙的效果最好。

虽然国内外众多学者做了大量有关密实

剂的研究,但现有关于密实剂对水泥石抗渗性能影响的研究还不够系统,缺乏试验数据的积累。基于此,笔者选择了三种密实剂,研究不同掺量下密实剂对水泥抗压强度和抗氯离子渗透性能的影响,并进行微观试验和机理分析。结果表明,密实剂在低掺量下对水泥强度的发展有促进作用,可以降低水泥石的孔隙率,改善孔结构,并提高水泥抗氯离子渗透性能。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥:普通硅酸盐水泥(P·O 42.5),山水水泥集团生产。

砂子:普通河砂,细度模数2.5。

水:城市自来水,水温( $20 \pm 2$  °C)。

密实剂:S,粉体,为铝矾矿物;Y,液体,为硅烷类有机化合物,固含量为30%;T,液体,为胺类有机化合物。

### 1.2 试验方法

#### (1) 强度测试

按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB 17671—1999)进行。

#### (2) 抗氯离子渗透性能测试

电通量法,根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)制作水泥胶砂试件,按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)有关规定进行测试。

#### (3) 孔隙结构测试

试验采用压汞测孔法进行测试,依据《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度》(GB/T 21650.1—2008)。

(4) 微观形貌测试

利用 S-4800 扫描电子显微镜 (SEM) 观察 28d 硬化试样的微观结构。

2 结果与分析

2.1 强度

图 1 为不同掺量下密实剂 S 对水泥胶砂试样强度的影响。从图中可以看出,随着 S 掺量的增加,试样的抗折强度和抗压强度呈先升高后降低的变化趋势。与空白试样对比,当 S 的掺量为 0.02% 时,水泥砂浆的 3 d、7 d、28 d 抗压强度分别提高了 10.3%、6.3%、6.6%。当掺量大于 0.02% 时,抗压强度逐渐减小,这可能是因为密实剂 S 在水泥水化过程中能够在碱金属催化作用下,自身发生分解不断产生混合型细小气泡,并产生细微膨胀以补偿塑性阶段的收缩,形成比较致密的浆体结构<sup>[10]</sup>。

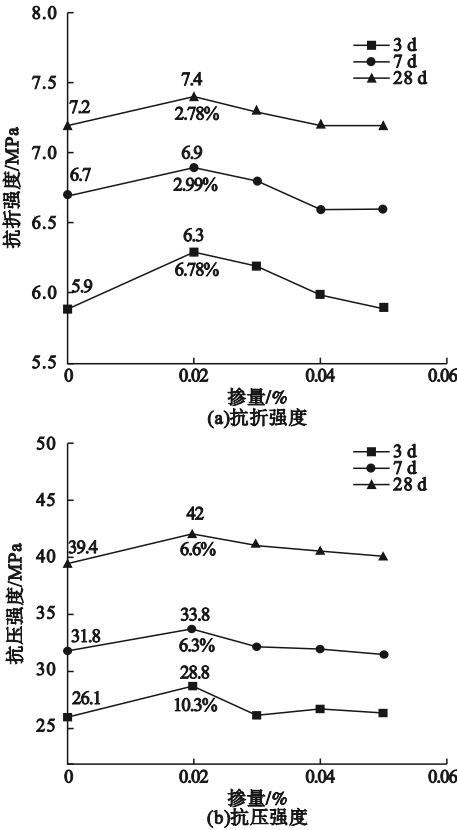


图 1 密实剂 S 对水泥胶砂强度的影响

Fig. 1 Effect of compacting agent S on the strength of cement mortar

图 2 为不同掺量下密实剂 Y 对水泥胶砂试样强度的影响。从图中可以看出,随着 Y 掺量的增加,试样的抗折强度和抗压强度呈先升高后降低的变化趋势。当 Y 的掺量为 0.01% 时,与空白试样相比,砂浆的 3 d、7 d、28 d 的抗折和抗压强度均有小幅提升,抗压强度提升较为明显,分别提高了 9.8%、8.28%、8.18%。这可能是由于掺入的密实剂 Y 在结构材料内部生成相互堆叠的网状化合物,填充内部结构使其更加密实导致<sup>[11]</sup>。

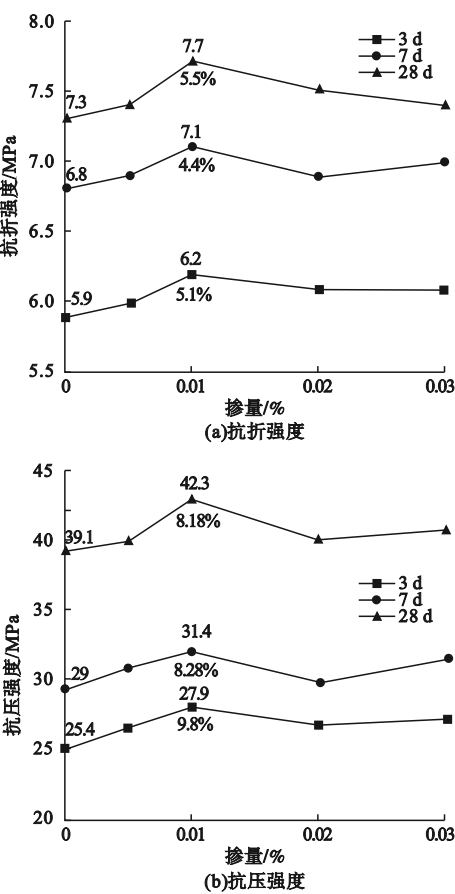


图 2 密实剂 Y 对水泥胶砂强度的影响

Fig. 2 Effect of compacting agent Y on the strength of cement mortar

图 3 为不同掺量下密实剂 T 对水泥胶砂强度的影响。从图中可以看出,随着 T 掺量的增加,试样的抗折强度和抗压强度呈升高趋势。当 T 的掺量为 0.02% 时,与空白试样相比,试样的抗折强度均有提高,3 d 时提

高了14.3%;试样的抗压强度在3 d、7 d、28 d时分别提高了29.5%、14%、7.62%。这可能是由于密实剂T能够促进C3A的水化,加快水化产物钙矾石AFt的形成,从而使水泥抗压强度得到了提高<sup>[12-14]</sup>。

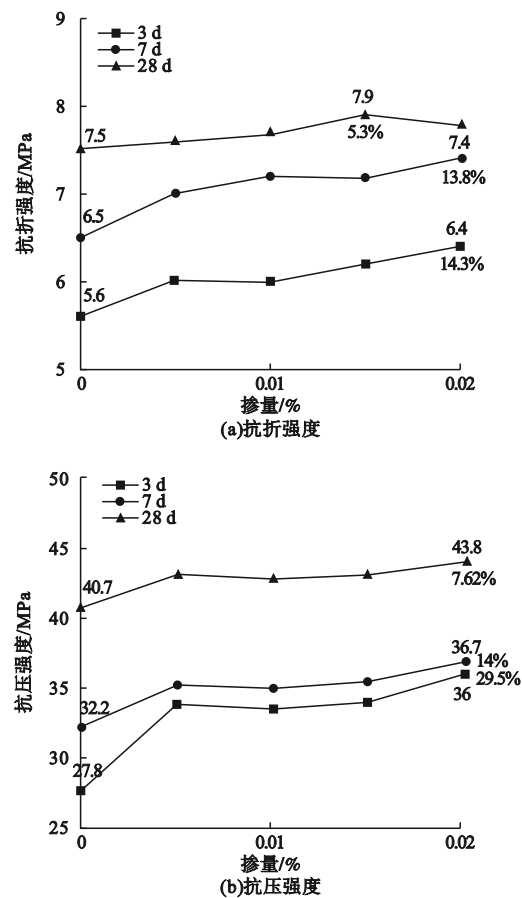


图3 密实剂T对水泥胶砂强度的影响  
Fig. 3 Influence of compacting agent T on the strength of cement mortar

2.2 抗氯离子渗透性能

密实剂对水泥砂浆试样的抗氯离子渗透性能的影响曲线如图4所示。从图中可以看出,与空白试样相比,S掺量为0.02%时,试样的电通量降低了7.75%,随着掺量的增大,电通量缓慢增大。这是因为密实剂S的掺入会产生细小气泡,减少毛细孔的产生进而使其电通量降低,但随着掺量增加产生气泡过多导致孔隙率升高,进而导致电通量升高。随着密实剂Y和T掺量的增加,可以明显改善试样的抗氯离子渗透性能,当Y和T

掺量分别为0.03%和0.02%时,试样的电通量分别降低了9.44%和10.2%。这是因为密实剂Y在水泥水化过程中可以在其内部生成网状化合物,填充内部结构使其更加密实;密实剂T可以使水泥水化更加充分,并加快水化产物生成,使结构更加密实,从而提高抗氯离子渗透性能<sup>[15-17]</sup>。

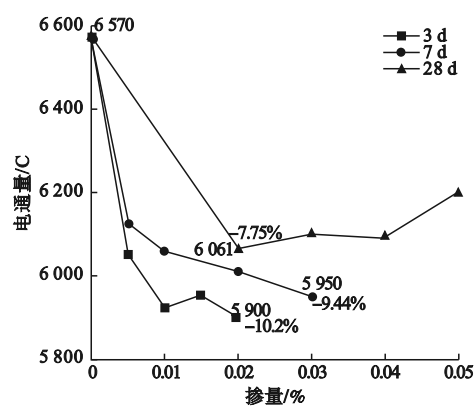


图4 密实剂对水泥试样抗氯离子渗透性能影响  
Fig. 4 Effect of compacting agent on chloride ion penetration resistance of cement sample

2.3 密实剂对孔隙结构的影响

选取密实剂S掺量0.02%、密实剂Y掺量0.03%和密实剂T掺量0.02%的试样进行压汞试验,并与空白试样的压汞试验结果对比,分析密实剂对水泥试样孔隙结构的影响。

密实剂对累计孔体积的影响曲线如图5所示。

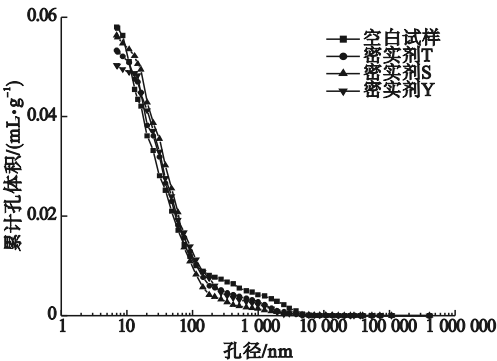


图5 密实剂对累计孔体积的影响  
Fig. 5 Effect of compacting agent on cumulative pore volume

从图中可以看出,密实剂的掺入使试样的总体孔隙降低,这是由于密实剂 S 的掺入会破坏水泥试样内部毛细孔和大孔,使试件内部更加密实,孔隙率降低。密实剂 Y 和 T 均导致水泥试件内部有更多水化物质的生成,填充试件内部结构使其孔隙率与空白组相比有所降低,不同密实剂对孔隙率影响从大到小依次为 S、Y、T。

密实剂对不同孔径进汞量的影响曲线如图 6 所示,孔结构特征参数见表 1。从图 6 和表 1 可以得出,水泥试样的最可几孔径尺寸均小于 30 nm,随着密实剂掺入,最可几孔径均向左偏移,有害孔和多害孔数量减少,并转化为无害孔和少害孔,表明密实剂的掺入对水泥试件内部孔隙有细化的作用,有效地减少有害孔的生成,并降低有害孔向多害孔转化。与空白试样对比,密实剂 S 使总孔隙量降低了 4.41%,有害孔和多害孔比例分别

降低了 30.86% 和 63.17%;密实剂 Y 使总孔隙量降低了 18.14%,有害孔和多害孔比例分别降低了 13.58% 和 51.26%;密实剂 T 使总孔隙量降低了 21.02%,有害孔和多害孔比例分别降低了 19.06% 和 42.62%。表明密实剂的掺入改善了水泥砂浆试样的抗氯离子渗透性能<sup>[18-20]</sup>。

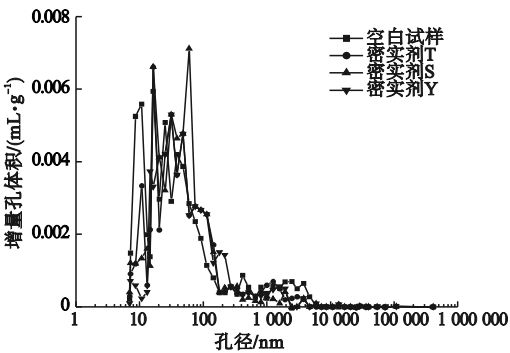


图 6 密实剂对不同孔径进汞量的影响  
Fig. 6 Effect of compacting agent on mercury intake of different pore sizes

表 1 不同密实剂对孔结构特征参数的影响

试样编号	总孔隙量/ (mL·g <sup>-1</sup> )	最可几孔径/ nm	孔径分布/%			
			小于 20 nm	20~50 nm	50~200 nm	大于 200 nm
空白	0.059 0	25.13	18.67	34.79	29.23	18.30
密实剂 S	0.056 4	16.37	33.23	39.82	20.21	6.74
密实剂 Y	0.048 3	20.39	24.04	41.78	25.26	8.92
密实剂 T	0.046 6	25.13	28.27	37.57	23.66	10.50

2.4 SEM 分析

为进一步研究密实剂对水泥砂浆试样微观结构的影响,选取空白试样以及 S、Y 和 T 三种密实剂掺量分别为 0.02%、0.03% 和 0.02% 的试样,观察其微观结构。图 7 为龄期 28 d 时水泥胶砂试样的微观结构。从图中可以看出,空白试样的结构中有少量纤维状的钙矾石(Aft)、Ca(OH)<sub>2</sub> 和 C-S-H 凝胶,孔隙大,内部结构疏松,可能对强度和抗氯离子渗透性能产生一定的影响。掺入密实

剂 S 后,结构中的孔隙明显降低,结构更加致密;密实剂 Y 的掺入使水化产物之间密切搭接,网络结构中的孔隙被填充,结构更加密实;掺入密实剂 T 的试样结构中有大量的水化硅酸钙与钙矾石胶结在一起填充在网络结构的空隙中,结构更加致密。说明掺入密实剂后,有利于结构中孔隙细化,改善结构的致密性,从而有利于提高水泥抗压强度和抗氯离子渗透性能<sup>[21-23]</sup>。



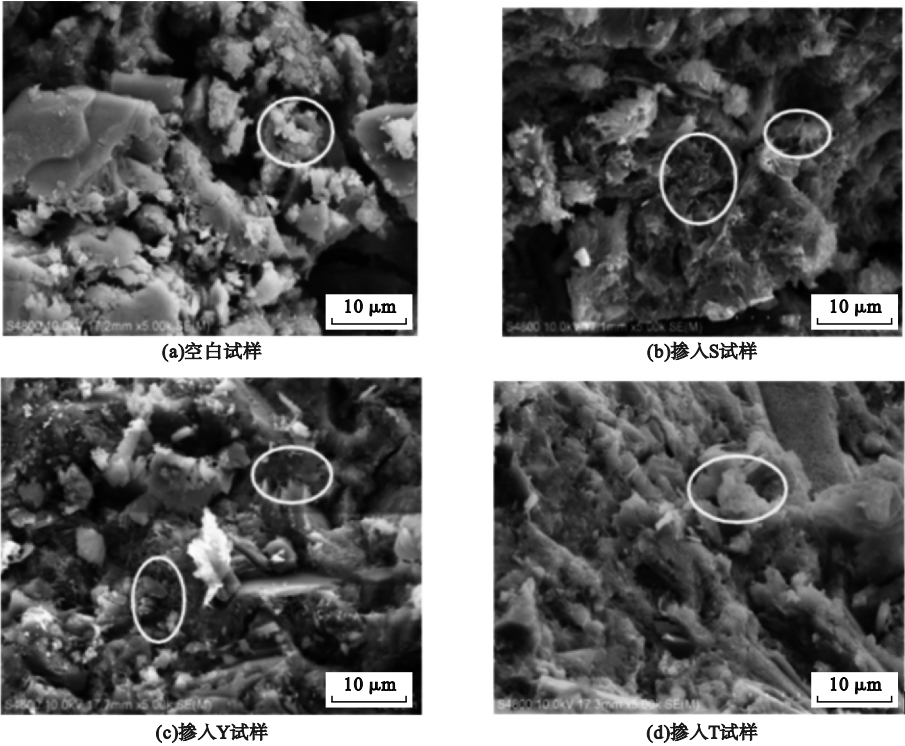


图7 龄期28 d时水泥试样的微观结构

Fig. 7 Microstructure of cement sample at 28 d

3 结 论

(1)密实剂的掺入有利于水泥各个龄期强度的发展;当S的掺量为0.02%时,3 d和28 d的抗压强度分别提高10.3%和6.6%;Y掺量为0.01%时,3 d和28 d的抗压强度分别提高9.8%和8.18%;T掺量为0.02%时,3 d和28 d的抗压强度分别提高29.5%和7.62%。

(2)密实剂的掺入有利于改善水泥抗渗性能;当S、Y、T的掺量分别为0.02%、0.01%和0.02%时,电通量分别降低了7.75%、9.44%、10.2%。

(3)三种密实剂有利于细化水泥孔隙结构,提高结构的致密性。

参考文献

[1] 杨斌. 水泥基渗透结晶型防水材料及其产品合格判定[J]. 中国建筑防水, 2017(24): 1-5.  
(YANG Bin. Cementitious capillary crystalline waterproofing material and its product

qualification determination [J]. China building waterproofing, 2017(24): 1-5.)  
[2] 鲍旺, 韩冬冬, 倪坤, 等. 水泥基渗透结晶型防水涂料作用机理研究进展和分析[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(9): 79-83.  
(BAO Wang, HAN Dongdong, NI Kun, et al. The analysis and research status on mechanism of cementitious capillary crystalline waterproofing coating [J]. New building materials, 2011, 38(9): 79-83.)  
[3] BASHEER L. Strength and permeation properties as an indicator of durability of concrete [J]. Materials & structures, 2011, 10: 136361205.  
[4] 李广彦. 水泥基渗透结晶型防水材料制备及其自修复性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
(LI Guangyan. Preparation and self-healing properties of cement-based permeable crystalline waterproofing materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)  
[5] 牛振山. 渗透结晶型混凝土防水剂的研制与性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.  
(NIU Zhenshan. Research on the development and performance of permeable crystalline concrete waterproofing agent [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.)  
[6] 蒋正武. 正确认识水泥基渗透结晶型防水材料[J]. 中国建筑防水, 2005(10): 10-13.  
(JIANG Zhengwu. Correct understanding of cement-based osmotic crystalline waterproofing materials [J]. China building waterproofing,

- 2005(10):10-13.)
- [7] 王丹,张玉奇,曾昌洪,等.水泥基渗透结晶型防水剂的性能研究及微观分析[J].新型建筑材料,2008(2):77-80.  
(WANG Dan, ZHANG Yuqi, ZENG Changhong, et al. Study on properties and microscopic analysis of cement-based permeable crystalline waterproofing agent [J]. New building materials, 2008(2):77-80.)
- [8] 王宗余,黄洪胜,李保全.水性渗透型无机防水剂微观分析和作用机理研究[J].建筑材料,2013,8(12):51-54.  
(WANG Zongyu, HUANG hongsheng, LI baoquan. Microscopic analysis and mechanism study of waterborne permeable waterproofing agent [J]. Building materials, 2013, 8(12):51-54.)
- [9] 徐教强,王珍珍,杨晶,等.内部结晶与抗裂双重作用的混凝土自防水研究[J].海南大学学报(自然科学版),2024,42(1):94-102.  
(XU Jiaoqiang, WANG Zhenzhen, YANG Jing, et al. Concrete self-waterproofing with dual effects of internal crystallization and crack resistance [J]. Journal of Hainan university (natural science), 2024, 42(1):94-102.)
- [10] 康勇.复合膨胀剂在预应力孔道压浆材料中的应用试验研究[J].低温建筑技术,2020,42(5):34-36.  
(KANG Yong. Experimental study on the application of composite expansion agent in prestressed tunnel grouting materials [J]. Low temperature building technology, 2020, 42(5):34-36.)
- [11] 刘月雷,杨洋,李福海,等.水泥基渗透结晶型防水材料作用机理及性能评价[J].市政技术,2021,39(11):146-151.  
(LIU Yuelei, YANG Yang, LI Fuhai, et al. Action mechanism and performance evaluation of cement-based permeable crystalline waterproof material [J]. Municipal technology, 2021, 39(11):146-151.)
- [12] 孙册,王启宝,王栋民,等.三乙醇胺对硅酸盐水泥早期水化的影响[J].混凝土,2021(6):64-66.  
(SUN Che, WANG Qibao, WANG Dongmin, et al. Effect of triethanolamine on early hydration of Portland cement [J]. Concrete, 2021(6):64-66.)
- [13] KUMAR M. Effect of water proofing admixture on the hydration of Portland cement [J]. Indian journal of chemical technology, 2009, 16(6):499-506.
- [14] 汪圆圆.掺入塑性膨胀剂对水泥基压浆材料性能特征影响试验研究[D].合肥:安徽农业大学,2016.  
(WANG Yuanyuan. Experimental study on the influence of plastic expansion agent on the properties of cement-based grouting materials [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.)
- [15] 曾旺,顾连胜,陈松靖,等.纤维对超高性能混凝土力学性能及微观结构影响研究[J].广西科技大学学报,2023,34(1):20-27.  
(ZENG Wang, GU Liansheng, CHEN Songjing, et al. Effect of fiber on mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Guangxi university of science and technology, 2023, 34(1):20-27.)
- [16] 刘昊.混凝土早期收缩和开裂的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
(LIU Hao. Study on early shrinkage and cracking of concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [17] REINHARDT H W, JOOSS M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width [J]. Cement and concrete research, 2003, 33(7):981-985.
- [18] 袁洁.复合防水剂对脱硫石膏砌块力学性能和防水性能的影响[J].化工矿物与加工,2022,51(3):36-40.  
(YUAN Jie. Effect of compound waterproofing agent on mechanical properties and waterproofing properties of desulfurized gypsum block [J]. Chemical minerals and processing, 2022, 51(3):36-40.)
- [19] 阎杰,单豆豆,邢国斌,等.活化煤矸石粉作为矿物掺合料对煤矸石混凝土性能的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(3):266-273.  
(YAN Jie, SHAN Doudou, XING Guobin, et al. Influence of activated coal gangue powder as mineral admixture on performance of coal gangue concrete [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2023, 42(3):266-273.)
- [20] TALAIEKHOZAN A, KEYVANFAR A, SHAFAGHAT A, et al. A review of self-healing concrete research development [J]. Journal of environmental treatment techniques, 2014, 2(1):1-11.
- [21] 李淑进,赵铁军,吴科如.混凝土渗透性与微观结构关系的研究[J].混凝土与水泥制品,2004(2):6-8.  
(LI Shujin, ZHAO Tiejun, WU Keru. Study on the relationship between permeability and microstructure of concrete [J]. Concrete and cement products, 2004(2):6-8.)
- [22] 张剑峰,余剑英,刘仕琪,等.络合型自修复功能材料配制及评价方法对比研究[J].中国港湾建设,2023,43(6):17-23.  
(ZHANG Jianfeng, YU Jianying, LIU Shiqi, et al. Comparative study on preparation and evaluation methods of complex self-healing functional materials [J]. China harbor construction, 2023, 43(6):17-23.)
- [23] 张弯,韩超,段耀鹏,等.内掺水泥基防水剂的防水混凝土配合比设计与研究[J].建筑技术,2022,53(10):1301-1304.  
(ZHANG Wan, HAN Chao, DUAN Yaopeng, et al. Mix proportion design and research of waterproof concrete mixed with cement-based water repellent agent [J]. Architecture technology, 2022, 53(10):1301-1304.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)