

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220330002

文章编号: 1672-9331(2024)04-0103-12

引用格式: 马亚飞, 杨莹, 彭安银, 等. 膨润土-PVA纤维混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 103-114.

Citation: MA Yafei, YANG Ying, PENG Anyin, et al. Research on compressive strength and chloride ion penetration resistance of bentonite-PVA fiber concrete [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 103-114.

# 膨润土-PVA纤维混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性研究

马亚飞, 杨莹, 彭安银, 李晶

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙, 410114)

**摘要:**【目的】针对在不利环境和复杂荷载下混凝土开裂、钢筋锈蚀等日益突出的问题, 研究同时掺入膨润土和聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维对混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性能的提升效果, 以期改善混凝土在恶劣条件下的耐久性。【方法】通过对16组不同配合比的膨润土-PVA纤维混凝土开展抗压强度试验和抗氯离子渗透性试验, 分析了养护龄期、膨润土替代率和PVA纤维掺量对混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能的影响。同时, 采用扫描电子显微镜技术深入研究了不同掺量下的膨润土-PVA纤维混凝土的微观结构特性。【结果】适量掺入膨润土和PVA纤维可提高混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性能, 膨润土的最佳替代率为5.0%, PVA纤维最佳体积掺量为1.2 kg/m<sup>3</sup>。【结论】膨润土颗粒附着在纤维表面, 这不仅增加了纤维的粗糙度, 还增强了纤维与混凝土间的黏结性, 使混凝土内部结构更紧密, 从而显著改善了混凝土的力学性能。本研究可为实际工程中混凝土改性提供参考。

**关键词:** 膨润土; 聚乙烯醇纤维; 抗压强度; 抗氯离子渗透; 扫描电子显微镜(SEM)

中图分类号: U444

文献标志码: A

## Research on compressive strength and chloride ion penetration resistance of bentonite-PVA fiber concrete

MA Yafei, YANG Ying, PENG Anyin, LI Jing

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] In view of the increasingly prominent problems of steel corrosion and cracking in concrete under harsh environments and complex loads, the effect of mixing bentonite and polyvinyl alcohol (PVA) fiber on the compressive strength and chloride ion penetration resistance of concrete was investigated, so as to improve the durability of concrete under harsh conditions. [Methods] Compressive strength test and chloride ion penetration resistance test were carried out on 16 groups of bentonite-PVA fiber concrete with different mix proportions. The effects of curing age, bentonite substitution rate, and PVA fiber content on the compressive strength and chloride ion penetration resistance of concrete were analyzed. At the same time, the microstructure

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-04-22; 接受日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600900); 湖南省杰出青年科学基金项目(2024JJ2003)

通信作者: 马亚飞(1984—)(ORCID: 0000-0002-5230-8192), 男, 教授, 主要从事桥梁耐久性和可靠性研究。

E-mail: yafei.ma@csust.edu.cn

characteristics of concrete with different amounts of bentonite and PVA fiber were observed by the scanning electron microscope (SEM) technology. [Findings] Moderate amounts of bentonite and PVA fiber can improve the compressive strength and chloride ion penetration resistance of concrete. The optimal bentonite substitution rate is 5.0%, and the optimal volume fraction of PVA fiber is 1.2 kg/m<sup>3</sup>. [Conclusions] The adhesion of bentonite particles on the surface of PVA fiber increases the roughness of the fiber and enhances the bonding between the fiber and the concrete, which makes the internal structure of concrete more compact, thus significantly improving the mechanical properties of concrete. This study can provide a reference for concrete modification in actual engineering.

**Key words:** bentonite; polyvinyl alcohol fiber; compressive strength; chloride ion penetration resistance; scanning electron microscope (SEM)

**Foundation items:** Project (2021YFB2600900) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (2024JJ2003) supported by National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Hunan Province

**Corresponding author:** MA Yafei (1984—) (ORCID: 0000-0002-5230-8192), male, professor, research interest: bridge durability and reliability research. E-mail: yafei.ma@csust.edu.cn

## 0 引言

在不利环境和复杂荷载作用下,混凝土开裂的问题日益突出。混凝土开裂后,使得外界氯离子更易渗透至其内部,加速了钢筋锈蚀,导致混凝土结构服役性能显著降低。工程实践表明,在混凝土中掺入碳纤维、玻璃和环氧树脂等材料,能改善混凝土的部分力学性能。在混凝土中加入玻璃纤维,可大幅提高混凝土抗压强度;将泡沫剂水溶液加入混凝土中,可使混凝土轻质化,同时改善材料的保温性能和防水性能;在聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维混凝土中掺入适量的钠基膨润土,在PVA纤维和膨润土的共同作用下,混凝土性能得到提升,结构使用年限得以延长。

膨润土具有阳离子交换性、流变性和可塑性等特点,已被广泛应用于建筑材料领域<sup>[1]</sup>。膨润土的化学成分丰富,主要包括二氧化硅、三氧化二铝、水、氧化铁、氧化镁,还包括钾、钠、钙等金属元素<sup>[2-3]</sup>。蒙脱石作为膨润土的主要矿物成分,其含量约占膨润土的85%以上。蒙脱石晶体结构具有阳离子置换性能,使膨润土具有分散悬浮性、流变性、可塑性、离子交换性、膨胀性、吸附性、高极限强度、低渗透性等特点<sup>[4-5]</sup>。在混凝土中掺入膨润土,可减少混凝土内部初始裂缝。

HINCHBERGER等<sup>[6]</sup>通过侧压试验指出掺入膨润土会降低混凝土强度,但可以提高其延性。有研究<sup>[7-9]</sup>表明,掺入膨润土会降低混凝土的抗压和抗折强度,但可以提高混凝土抗裂性和变形能力。丁向群等<sup>[10]</sup>开展了气体渗透试验和抗氯离子渗透试验,发现掺入膨润土能有效提高混凝土的抗氯离子渗透性能。膨润土按组成不同,分为钙基膨润土和钠基膨润土,钠基膨润土具有更好的保水性、悬浮性、增稠性、热稳定性、黏结性和可塑性<sup>[11]</sup>。肖佳等<sup>[12]</sup>对比了分别掺入钙基膨润土和钠基膨润土的混凝土的抗侵蚀性,指出掺入后者的混凝土抗腐蚀能力更优。上述研究表明,掺入膨润土可提高混凝土的抗渗透性和抗腐蚀性,但掺入膨润土后对混凝土力学性能的影响仍需要进一步量化。

在改善混凝土性能的工程应用中,有学者指出在混凝土中掺入适量的纤维可提高其强度和耐久性<sup>[13-15]</sup>。其中,PVA纤维因强度高、弹性模量大、耐酸碱盐、与水泥亲和性好等特点被广泛应用。在混凝土中掺入PVA纤维,纤维间相互拼接组成纤维网,可增强混凝土的整体性。曹雅娴等<sup>[16]</sup>指出掺入PVA纤维可提高混凝土的轴心抗压强度和抗折强度。白建文等<sup>[17]</sup>通过弯曲疲劳试验给出了PVA纤维掺量与混凝土疲劳寿命的关系。沈才华等<sup>[18]</sup>发现混凝土峰值强度、抗折强度和折

压比均随PVA纤维体积掺量的增加呈先增加后降低的变化趋势。纤维长度和体积掺量均是影响纤维混凝土性能的重要因素。部分学者<sup>[19-20]</sup>对比了不同PVA纤维长度对混凝土力学性能的影响,并指出长度为12.0 mm的PVA纤维可显著提高混凝土抗折强度和劈裂抗拉强度。闫长旺等<sup>[21]</sup>指出当PVA纤维长度为12.0 mm且纤维体积掺量为1.2 kg/m<sup>3</sup>时,纤维混凝土的抗盐侵蚀性能最优。YEW等<sup>[22]</sup>发现当PVA纤维体积分数为0.5%时,纤维对轻质混凝土的力学性能增强效果最好。

综上所述,目前已有研究主要集中于单一掺入膨润土或PVA纤维对混凝土性能的影响方面,鲜有研究涉及同时掺入这两种材料对混凝土特性的影响。本文在混凝土中同时掺入膨润土和PVA纤维,研究这两种材料对混凝土力学性能的影响。本研究设计制备了16组不同膨润土和PVA纤维掺量的混凝土试件,对膨润土-PVA纤维混凝土试件开展了抗压强度试验和抗氯离子渗透性试验,探究了养护龄期、膨润土替代率和PVA纤维体积掺量对混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能的影响。在此基础上,通过扫描电子显微镜从微观角度揭示了膨润土-PVA纤维混凝土性能的变化规律,推荐了膨润土与PVA纤维的最优掺量。本研究可为实际工程中提高混凝土结构抗压强度和抗氯离子渗透性能提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制备

本试验选用由南京蓝科环保科技有限公司生产的钠基膨润土(已煅烧,图1),其主要性能指标见表1。PVA纤维采用长度为12.0 mm的国产PVA纤维(图2),其主要性能指标见表2。水泥采

用P·O42.5普通硅酸盐水泥,粗骨料采用粒径小于20.0 mm的天然石灰石,细骨料采用细度模数为2.3的天然河砂,减水剂为萘系高效减水剂。混凝土设计强度等级为C40,水胶比为0.36,砂率为40.0%。

混凝土抗压强度试验和抗氯离子渗透性能试验分别设置16组不同配合比的试件,每组配合比制备3个试件。抗压强度试验采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,抗氯离子渗透性能试验采用直径为100 mm,高为50 mm的圆柱体试件。混凝土抗压强度试件配合比见表3,表3中试件编号B0、B5、B10和B15分别表示膨润土替代水泥量为0.0%、5.0%、10.0%和15.0%,即体积掺量分别为0.0、23.0、46.0和69.0 kg/m<sup>3</sup>;P0、P6、P12和P18分别表示PVA纤维体积掺量为0.0、0.6、1.2和1.8 kg/m<sup>3</sup>。

膨润土具有较好的分散性,可直接掺入骨料



图1 膨润土

Fig. 1 Bentonite



图2 PVA纤维

Fig. 2 PVA fiber

表1 膨润土主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of bentonite

细度(目)	黏度/(mPa·s)	膨胀容/(ml·g <sup>-1</sup> )	胶价价/[ml·(15 g) <sup>-1</sup> ]	2 h吸水率/%	含水率/%
325	32	25~50	91	300	≤12

表2 PVA纤维性能指标

Table 2 Performance indexes of PVA fiber

长度/mm	直径/μm	伸长率/%	抗拉强度/MPa	抗拉弹性模量/GPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
12	15.09	6.9	1 830	40	1.29

表3 抗压强度试验混凝土试件配合比

试件编号	水泥	细骨料	粗骨料	水	膨润土	PVA 掺量	减水剂
B0P0	461	710	1 064	166	0	0.0	3.46
B0P6	461	710	1 064	166	0	0.6	3.46
B0P12	461	710	1 064	166	0	1.2	3.46
B0P18	461	710	1 064	166	0	1.8	3.46
B5P0	438	710	1 064	166	23	0.0	3.46
B5P6	438	710	1 064	166	23	0.6	3.46
B5P12	438	710	1 064	166	23	1.2	3.46
B5P18	438	710	1 064	166	23	1.8	3.46
B10P0	415	710	1 064	166	46	0.0	3.46
B10P6	415	710	1 064	166	46	0.6	3.46
B10P12	415	710	1 064	166	46	1.2	3.46
B10P18	415	710	1 064	166	46	1.8	3.46
B15P0	392	710	1 064	166	69	0.0	3.46
B15P6	392	710	1 064	166	69	0.6	3.46
B15P12	392	710	1 064	166	69	1.2	3.46
B15P18	392	710	1 064	166	69	1.8	3.46

搅拌均匀。PVA 纤维分散难度较大,根据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)要求,采用分批掺入 PVA 纤维、分次搅拌的方式进行。根据表 3 给出的配合比,将水泥、膨润土、粗骨料、细骨料和 PVA 纤维材料采用搅拌机干拌。搅拌结束后,分批次加入水和减水剂并继续搅拌 60 s,待充分搅拌均匀后振捣入模并放入温度为 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 95% 的标准养护箱进行养护。养护 24 h 后拆模,将试件继续置于养护箱养护。每组混凝土抗压试验的 3 个试件分别养护 7、14 和 28 d;抗氯离子渗透性能试验试件先养护 21 d,然后清水预浸泡 7 d,共养护 28 d。养护完成后的混凝土试件如图 3 所示。对立方体试件进行抗压强度测试,对圆柱体试件进行氯离子渗透测试。



(a) 抗压试验试件



(b) 抗渗试验试件

图3 混凝土试件

Fig. 3 Concrete specimens

## 1.2 试验过程

混凝土抗压强度试验采用数显式压力试验机。根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)对混凝土试件进行抗压强度试验,从养护箱取出养护龄期分别为 7、14 和 28 d 的混凝土试件,对试件表面清洁平整后测量其尺寸公差,尺寸公差不超过 1.0 mm。抗压强度试验的加载速度设定为 0.5~0.8 MPa/s,观察试件在加载过程中的破坏情况,并记录破坏压力值和破坏形态。

混凝土抗氯离子渗透试验先采用 NJ-BSJ 型混凝土智能真空饱水机对混凝土试件进行饱盐处

理,再采用NJ-RCM-9通道全自动混凝土氯离子扩散系数测定仪进行氯离子扩散系数测定。根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),采用快速氯离子迁移系数(RCM)法研究混凝土的抗氯离子渗透性。首先,将真空饱盐预处理后的试件侧面涂一层厚厚的密封剂,并放入橡胶皮筒。然后,将电源负极置于溶液试验箱底部,试件和橡胶筒连接电源负极,将电源正极和温度探头置于橡胶筒内。最后,在橡胶筒中加入NaOH溶液,在试验槽中加入NaCl溶液。图4为抗氯离子渗透性能试验装置。试验结束后,将试件置于万能压力机上进行劈裂试验,在劈裂面喷涂AgNO<sub>3</sub>溶液进行显色,静置15 min后,观察断面显色反应的轮廓线,测量轮廓线与试件底面的距离。

扫描电子显微镜试验步骤如下:首先,在抗压强度试验中破坏试件的中心位置选取部分试件,该试件尺寸不超过10 mm×10 mm×5 mm;然后,将该试件在无水乙醇中浸泡2 d后放入60 °C烘干箱干燥24 h后进行密封;最后,用双面导电胶将试件固定在样品台上,将样品台置于离子溅射仪中,建立5 Pa的真空工作环境,在试样表面喷涂导电薄涂,进行扫描电子显微镜试验。

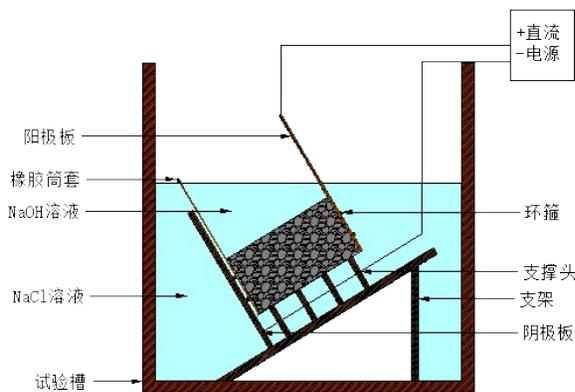


图4 RCM试验装置  
Fig. 4 RCM test device

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土抗压试验

图5所示为B0P0和B5P12两种混凝土试件经抗压试验后的破坏形态。由图5可知,掺入PVA

纤维和膨润土试件的破坏形态和未掺两种材料的存在明显差异。B0P0试件在加载过程中先沿加载方向出现一条主裂缝,然后随着荷载的增加,主裂缝逐渐扩展,试件底面出现剥落碎块,最后,当荷载增加至极限荷载时,试件发出声响并向四周崩裂,发生脆性破坏。B5P12试件在抗压试验完毕后表面出现多条微小裂缝,试件破坏后仍能保持完整轮廓。这表明混凝土中加入PVA纤维和膨润土可增加混凝土的整体性,其破坏后仍能保持完整形态。



(a) B0P0



(b) B5P12

图5 不同试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of different specimens

表4列出了不同试件在不同养护龄期下的抗压强度。由表4可知,随着养护龄期的增加,所有试件抗压强度的逐渐增加。本节仅对养护28 d的混凝土试件的抗压强度进行分析。图6所示为膨润土替代率与混凝土抗压强度的关系图。由图6可知,当PVA纤维掺量较少时,即体积掺量未超过1.2 kg/m<sup>3</sup>,随膨润土替代率的增加,混凝土抗压强度呈先减小后增大再减小的三阶段变化趋势,此时膨润土最佳替代率为10.0%。当PVA纤维掺量较高时,随着膨润土替代率的增加,混凝土抗压强度先增大后减小,此时膨润土最佳替代率为5.0%。

图7所示为PVA纤维掺量与混凝土抗压强度的关系图。由图7可知,当膨润土替代率一定时,随着PVA纤维体积掺量的增加,混凝土抗压强度

先增大后减小。B0P0、B0P6、B0P12和B0P18试件在养护28 d后的抗压强度分别为41.68、43.10、43.35和40.20 MPa。这表明当PVA纤维掺量较少时,混凝土强度与PVA纤维体积掺量成正比;当PVA纤维体积掺量超过1.2 kg/m<sup>3</sup>时,继续增加其掺量会降低混凝土强度。图8所示为膨润土-PVA纤维混凝土试件在养护28 d后的抗压强度。由图8可知,膨润土替代率为5.0%且PVA纤维体积掺

量为1.2 kg/m<sup>3</sup>时,混凝土抗压强度达到峰值,该掺量组合为最佳掺量组合。由图6~8可知,B5P12的抗压强度为45.63 MPa,分别比B0P12和B15P0的抗压强度(43.35、38.78 MPa)增加了5.3%和17.7%。这表明与单一掺入膨润土或PVA纤维的混凝土相比,同时掺入PVA纤维和膨润土的混凝土抗压强度增加显著。

表4 膨润土-PVA纤维混凝土抗压强度

Table 4 Compressive strength of bentonite-PVA fiber concrete

试件编号	膨润土替代率/%	PVA 体积掺量/(kg·m <sup>-3</sup> )	$f_{cc,7d}$ /MPa	$f_{cc,14d}$ /MPa	$f_{cc,28d}$ /MPa	$f_{cc,7d}/f_{cc,28d}$ /%
B0P0	0	0.0	32.34	38.48	41.68	77.59
B0P6	0	0.6	33.58	40.04	42.81	78.44
B0P12	0	1.2	31.36	40.45	43.35	72.34
B0P18	0	1.8	30.15	38.15	40.20	75.00
B5P0	5	0.0	28.70	36.02	39.62	72.44
B5P6	5	0.6	31.11	38.20	42.58	73.06
B5P12	5	1.2	30.47	42.00	45.63	66.78
B5P18	5	1.8	28.78	39.21	44.02	65.38
B10P0	10	0.0	28.21	37.97	40.12	70.31
B10P6	10	0.6	29.57	43.45	45.39	65.15
B10P12	10	1.2	27.61	39.17	41.40	66.69
B10P18	10	1.8	26.98	38.95	40.88	66.00
B15P0	15	0.0	27.22	34.78	38.78	70.19
B15P6	15	0.6	27.60	37.73	42.05	65.64
B15P12	15	1.2	25.62	36.30	40.12	63.86
B15P18	15	1.8	26.60	35.81	39.70	67.00

注: $f_{cc,7d}$ 、 $f_{cc,14d}$ 、 $f_{cc,28d}$ 分别为养护龄期7、14、28 d的混凝土抗压强度。

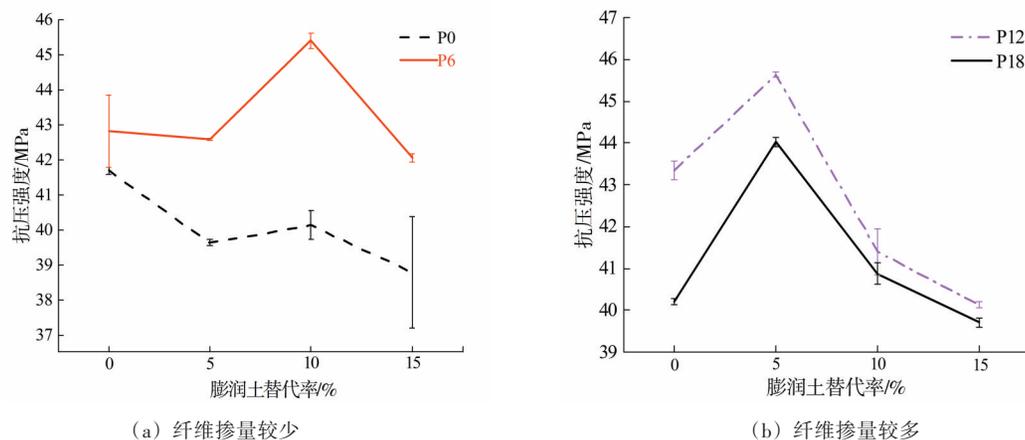


图6 膨润土替代率与混凝土抗压强度关系

Fig. 6 Relationship between bentonite substitution rate and compressive strength of concrete

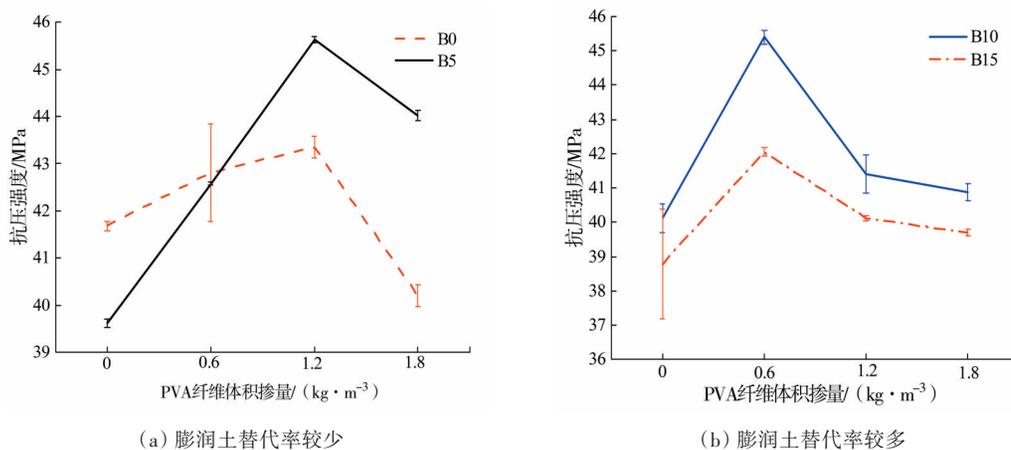


图 7 纤维掺量与混凝土抗压强度关系  
 Fig. 7 Relationship between fiber amount and compressive strength of concrete

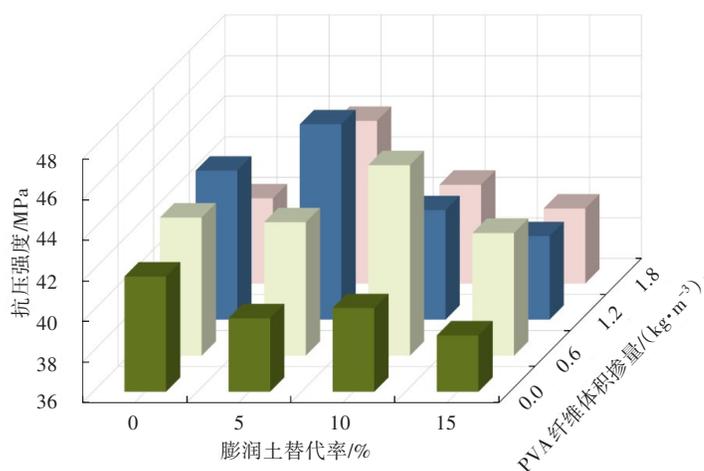


图 8 膨润土-PVA 纤维混凝土 28 d 抗压强度  
 Fig. 8 Compressive strength of bentonite-PVA fiber concrete cured for 28 days

2.2 抗氯离子渗透性试验

混凝土的抗氯离子渗透性可反映其抵抗外界介质侵入内部的能力<sup>[23]</sup>。利用 RCM 法在试件断面喷洒硝酸银溶液显色剂,显色反应的深度即为氯离子在混凝土中的扩散深度。图 9 展示了典型试件的氯离子扩散深度。由图 9(a)~9(d)可知,在试件断面上氯离子扩散深度近似为直线,渗透深度较均匀,但也存在部分试件因骨料阻挡氯离子渗透和试件密封性差显色部分为整个断面的现象,如图 9(e)~9(f)所示。由图 9 可知,B0P0 组试件与 B15P18 组试件的显色面积较大,B5P12 组试件的显色面积最小。这表明适量掺入膨润土和 PVA 纤维可增强混凝土的抗氯离子渗透性。

剔除因骨料阻挡、密封性差等因素导致的测试数据极端的试件,整理得到各组试件的氯离子

渗透系数  $D_{RCM}$ ,见表 5。图 10 所示为 PVA 纤维掺量与氯离子扩散系数的关系曲线。由图 10 可知,在膨润土替代率一定的条件下,氯离子扩散系数随 PVA 纤维掺量的增加呈先减小后增大的变化趋势。以未掺膨润土的 B0 组试件为例,当 PVA 纤维体积掺量为 0.6、1.2、1.8 kg/m<sup>3</sup> 时,其氯离子扩散系数较 B0P0 试件的分别减小了 11.5%、32.9% 和 26.9%。纤维分布在混凝土中并构成纤维网约束混凝土,增强了混凝土的抗氯离子渗透性。但当混凝土中的纤维过多时,易出现纤维成团等分布不均匀的情况,进而造成了混凝土内部缺陷。图 11 所示为膨润土替代率与氯离子扩散系数的关系图。当 PVA 纤维掺量一定时,氯离子扩散系数随膨润土替代率的增加也呈先减小后增大的变化趋势。以 P0 组试件为例,当膨润土替代率为 5.0%、

10.0%、15.0%时,其氯离子扩散系数较B0P0试件的分别减小了26.4%、37.7%和2.7%。分析以上试验数据可知,适量掺入膨润土和PVA纤维可有效增强混凝土试件的抗氯离子渗透性。当膨润土替

代率为5.0%且PVA纤维体积掺量为1.2 kg/m<sup>3</sup>时,混凝土试件的氯离子渗透系数最小,其氯离子扩散系数较B0P0试件的降低60.2%。

表5 氯离子扩散系数

**Table 5** Chloride ion diffusion coefficient 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s

试件编号	$D_{RCM}$	试件编号	$D_{RCM}$	试件编号	$D_{RCM}$	试件编号	$D_{RCM}$
B0P0	19.70	B5P0	14.49	B10P0	12.27	B15P0	19.16
B0P6	17.43	B5P6	13.35	B10P6	9.72	B15P6	13.95
B0P12	13.22	B5P12	7.84	B10P12	11.42	B15P12	16.39
B0P18	14.40	B5P18	8.95	B10P18	11.85	B15P18	19.70

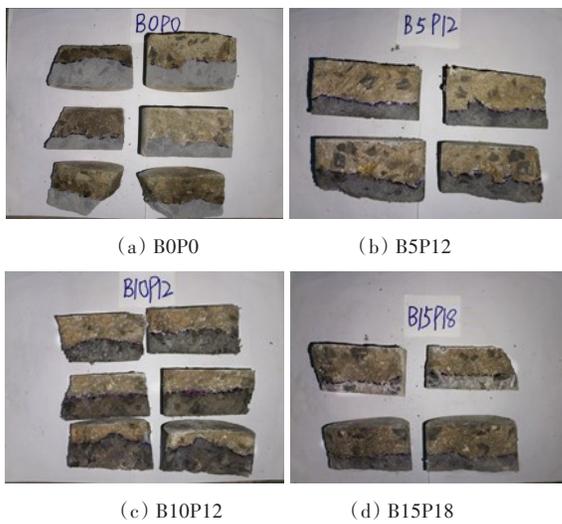


图9 氯离子扩散深度  
Fig. 9 Chloride ion diffusion depth

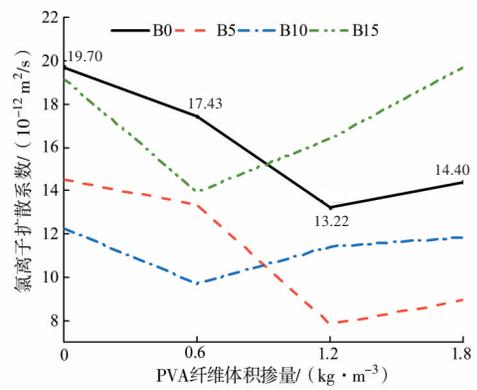


图10 PVA纤维掺量与氯离子扩散系数关系  
Fig. 10 Relationship between PVA fiber amount and chloride ion diffusion coefficient

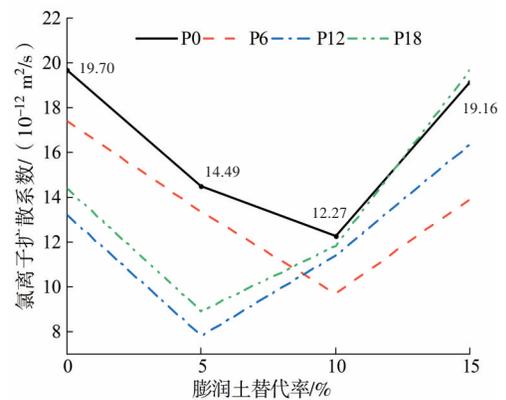
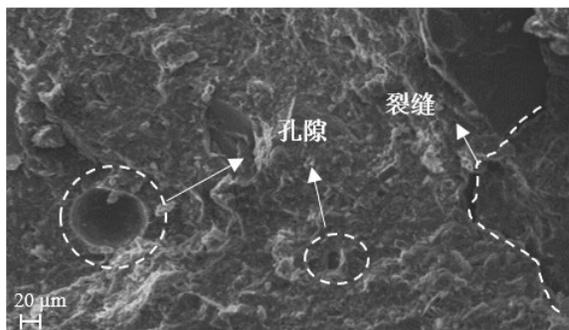


图11 膨润土替代率与氯离子扩散系数关系  
Fig. 11 Relationship between bentonite substitution rate and chloride ion diffusion coefficient

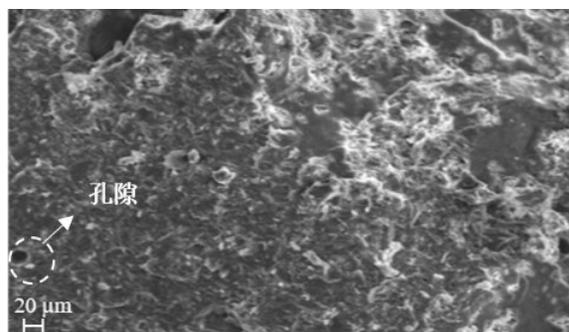
### 2.3 微观特性分析

图12和图13分别为B0P0和B5P12混凝土试件在养护龄期为7、28 d时的电子显微镜扫描图。由图12~13可以看出,在养护早期两种试件内部均存在较多孔隙与裂缝,试件表面较粗糙。在养

护 28 d 后试件表面相对平整,内部孔隙和裂缝均减少。主要原因为养护初期试件的水化反应不完全,导致试件内部结构松散,留有较大孔隙。相比

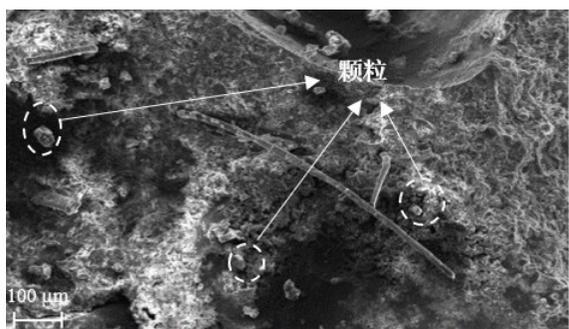


(a) 7 d



(b) 28 d

图 12 BOPO 混凝土试件电子显微镜扫描图  
Fig. 12 SEM results of concrete specimen BOPO



(a) 7 d

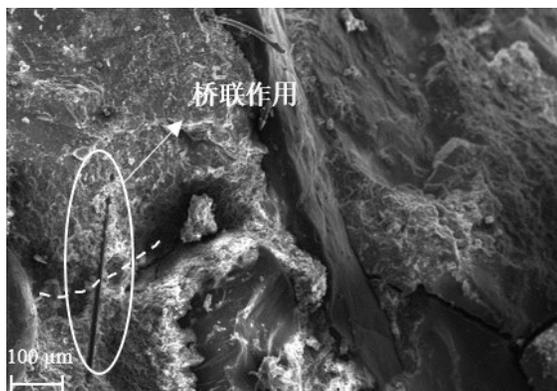


(b) 28 d

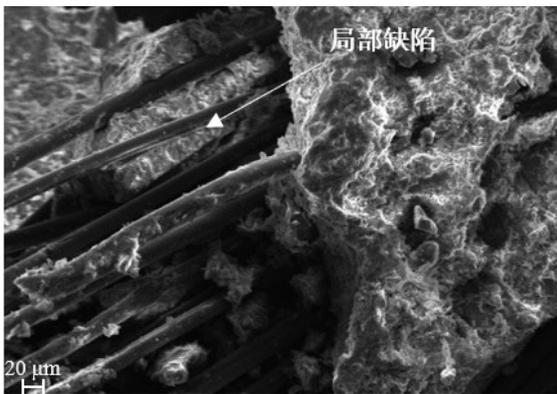
图 13 B5P12 混凝土试件电子显微镜扫描图  
Fig. 13 SEM results of concrete specimen B5P12

BOPO 的早期试件, B5P12 的早期试件表面附有诸多颗粒。这是因为 B5P12 混凝土中掺有膨润土,膨润土颗粒细腻易分散,在养护初期,膨润土颗粒吸附在水泥颗粒表面,形成一层薄膜包裹水泥颗粒,将水泥与水隔开,从而阻碍了水化反应。随着水化反应的进行,膨润土充分反应,试件内部结构更为紧密,从而提高了混凝土强度和抗氯离子渗透性。

纤维增强混凝土的机理是纤维桥接裂缝。图 14 为掺入 PVA 纤维的混凝土试件电子显微镜扫描图。由图 14(a)可知,当纤维分布方向与混凝土裂缝方向垂直时,纤维能有效抑制裂缝发展。当纤维方向与裂缝方向平行时,纤维难以发挥桥联作用,如图 14(b)所示。因此,在试件制作过程中应充分搅拌,避免出现纤维结团引起纤维与混凝土连接处出现大孔隙和裂缝,使混凝土过早发生开裂。此外,膨润土颗粒具有良好的依附性和分散性,可吸附在纤维上。随着水化反应的进行,膨润土与水化产物发生二次反应,生成的凝胶产物



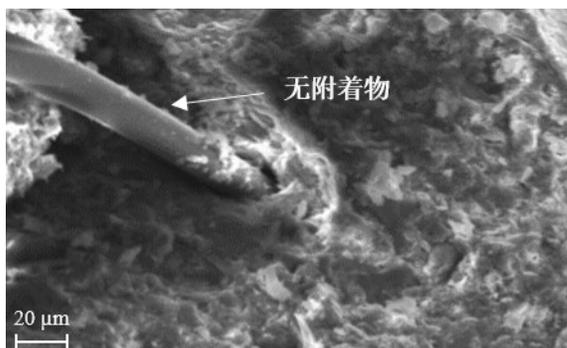
(a) 桥联作用



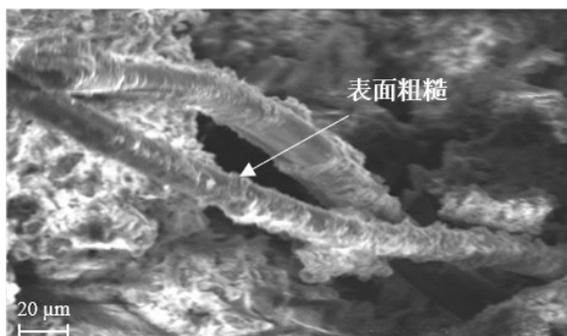
(b) 纤维成团

图 14 PVA 纤维作用下的混凝土试件电子显微镜扫描图  
Fig. 14 SEM results of concrete specimens with PVA fiber

包裹在纤维表面,使纤维表面更加粗糙,增强了纤维与混凝土间的黏结,如图15所示。上述试验结果表明,纤维的桥联作用能有效抑制混凝土内部微观裂缝的发展,膨润土可提高混凝土的和易性且能依附在纤维上,在这两种材料的共同作用下,混凝土的抗压性能和抗渗透性均得到显著提高。



(a) BOP12



(b) B5P12

图15 BOP12和B5P12混凝土试件电子显微镜扫描图

Fig. 15 SEM results of concrete specimens BOP12 and B5P12

### 3 结论

本文通过对不同掺量的膨润土-PVA纤维混凝土试件进行抗压强度试验和抗氯离子渗透性试验,并采用电子显微镜扫描技术对其进行微观分析,得出主要结论如下:

1) 随PVA纤维掺量的增加,混凝土抗压强度先增大后减小;随膨润土和PVA纤维两种材料掺量的增加,混凝土氯离子扩散系数先减小后增大。当膨润土替代率为5.0%、PVA纤维体积掺量为 $1.2 \text{ kg/m}^3$ 时,混凝土抗压强度最大,氯离子扩散系数最小。

2) PVA纤维的桥联作用能有效抑制混凝土内

部微裂缝的发展。膨润土颗粒依附在纤维上,使纤维表面更加粗糙,进而增强了纤维与混凝土之间的黏结,使内部结构更加紧密,提高了混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性。

3) 本文研究了不同替代率的膨润土和不同掺量的PVA纤维对混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能的影响,由于试件数量有限,本研究所得结论适用于钠基膨润土和PVA纤维,对于其他类型掺入材料的适应性还须进一步研究。

#### [参考文献]

- [1] SHAKEEL A, KIRICHEK A, CHASSAGNE C. Rheology and yielding transitions in mixed kaolinite/bentonite suspensions [J]. *Applied Clay Science*, 2021, 211: 106206. DOI: 10.1016/j.clay.2021.106206.
- [2] 干方群, 杭小帅, 刘云, 等. 苏南地区膨润土物理化学和矿物学特性研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 945-954. DOI: 10.11766/trxb201711240517. GAN Fangqun, HANG Xiaoshuai, LIU Yun, et al. Physicochemical and mineralogical properties of bentonites in South Jiangsu, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4): 945-954. DOI: 10.11766/trxb201711240517.
- [3] 张崙铭, 龙明旭, 蔡树生, 等. 改进的膨胀土直剪试验方法研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(2): 33-39. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxxbzk.2021.02.005. ZHANG Yuming, LONG Mingxu, CAI Shusheng, et al. Study on improved direct shear test method of expansive soil [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(2): 33-39. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxxbzk.2021.02.005.
- [4] 郑健龙, 缪伟. 膨胀土路基温度现场观测分析与研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 4(4): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2007.04.002. ZHENG Jianlong, MIAO Wei. Analysis and study on temperature field observing in the expansive soil subgrade[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2007, 4(4): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2007.04.002.
- [5] SHI L N, ZHANG X, CHEN Z L. Removal of chromium (VI) from wastewater using bentonite-supported nanoscale zero-valent iron [J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 886-892. DOI: 10.1016/j.watres.2010.09.025.
- [6] HINCHBERGER S, WECK J, NEWSON T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic

- concrete for seepage cut-off walls [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(4): 461-471. DOI: 10.1139/t09-103.
- [7] 贾慧娜, 李亚丽, 张舜泉. 膨润土和石灰石粉对珊瑚混凝土力学与耐久性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(11): 87-91. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.11.087.05.
- JIA Huina, LI Yali, ZHANG Shunquan. Experimental study on the mechanical properties and durability of coral concrete mixed with bentonite and limestone powder[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(11): 87-91. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.11.087.05.
- [8] 王四巍, 李小超, 李杨, 等. 膨润土及水泥用量对塑性混凝土变形及破坏特征的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(1): 33-37. DOI: 10.7521/j.issn.0454-5648.2014.01.7.
- WANG Siwei, LI Xiaochao, LI Yang, et al. Effects of bentonite and cement content on plastic concrete deformation and failure [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(1): 33-37. DOI: 10.7521/j.issn.0454-5648.2014.01.7.
- [9] 张玉平, 高树威, 李传习, 等. 基于钢纤维混凝土弹塑性损伤模型的钢混结合段吊装分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 17(4): 32-41, 84. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.005.
- ZHANG Yuping, GAO Shuwei, LI Chuanxi, et al. Hoisting analysis of steel-concrete joint section based on steel fiber reinforced concrete elastoplastic damage model[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2020, 17(4): 32-41, 84. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.005.
- [10] 丁向群, 陈灿, 赵丽佳, 等. 膨润土对混凝土抗渗透性能影响的研究[J]. *混凝土*, 2021(1): 102-106. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.01.025.
- DING Xiangqun, CHEN Can, ZHAO Lijia, et al. Effect of bentonite on the permeability resistance of concrete [J]. *Concrete*, 2021(1): 102-106. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.01.025.
- [11] 丁国庆, 蒋林华, 储洪强, 等. 膨润土种类及掺量对塑性混凝土性能的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2011, 31(2): 34-37. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.008.
- DING Guoqing, JIANG Linhua, CHU Hongqiang, et al. Influences of types and dosage of bentonite on properties of plastic concrete [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31(2): 34-37. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.008.
- [12] 肖佳, 孟庆业, 郭明磊, 等. 膨润土改善水泥基材料抗低温硫酸盐侵蚀性能[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1): 156-161. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.01.026.
- XIAO Jia, MENG Qingye, GUO Minglei, et al. Improvement of resistance of cementitious materials to sulfate attack at low temperature by bentonite [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1): 156-161. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.01.026.
- [13] 王海龙, 罗月静, 彭光宇, 等. 掺合料对纤维增强水泥基材料拉伸性能的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2017, 52(1): 61-68. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.01.009.
- WANG Hailong, LUO Yuejing, PENG Guangyu, et al. Effect of admixtures on tensile behavior of fiber reinforced cementitious composites [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(1): 61-68. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.01.009.
- [14] 叶艳霞, 王宗彬, 谢夫林, 等. 钢纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 63-70. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.009.
- YE Yanxia, WANG Zongbin, XIE Fulin, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1): 63-70. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.009.
- [15] 张鹏, 亢洛宜, 郭进军, 等. 纳米SiO<sub>2</sub>和PVA纤维增强水泥基复合材料的断裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(5): 908-915. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.002.
- ZHANG Peng, KANG Luoyi, GUO Jinjun, et al. Fracture properties of nano-SiO<sub>2</sub> and PVA fiber reinforced cementitious composites [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(5): 908-915. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.002.
- [16] 曹雅娴, 侯慧芳, 刘曙光, 等. PVA纤维混凝土力学性能增长规律研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2021(5): 56-59. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.05.056.04.
- CAO Yaxian, HOU Huifang, LIU Shuguang, et al. Study on the growth law of mechanical properties of PVA fiber concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2021(5): 56-59. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.05.056.04.
- [17] 白建文, 赵燕茹, 苏颂. 玄武岩纤维混凝土弯曲疲劳性能研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(7): 186-191, 127. DOI: 10.13204/j.gyjzG20091001.
- BAI Jianwen, ZHAO Yanru, SU Song. Analysis on flexural fatigue performance of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(7): 186-191, 127. DOI: 10.13204/j.gyjzG20091001.
- [18] 沈才华, 钱晋, 陈晓峰, 等. 纤维掺量对PVA纤维混凝土力学参数的影响及压缩韧性指标的计算方法

- [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3152-3160. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.10.012.
- SHEN Caihua, QIAN Jin, CHEN Xiaofeng, et al. Influence of fiber content on mechanical parameters of PVA fiber concrete and method for calculating compression toughness index [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(10): 3152-3160. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.10.012.
- [19] NOUSHINI A, SAMALI B, VESSALAS K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fiber on dynamic and material properties of fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 374-383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035.
- [20] NOUSHINI A, VESSALAS K, SAMALI B. Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete (PVA-FRC) [J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(9): 465-483. DOI: 10.1680/mac.13.00320.
- [21] 闫长旺, 曹云飞, 刘曙光, 等. PVA纤维混凝土抗盐侵蚀性能的试验研究[J]. 混凝土, 2020(12): 56-60. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2020.12.012.
- YAN Changwang, CAO Yunfei, LIU Shuguang, et al. Experimental study on salt erosion resistance of PVA fiber concrete [J]. Concrete, 2020(12): 56-60. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2020.12.012.
- [22] YEW M K, BIN MAHMUD H, ANG B C, et al. Effects of low volume fraction of polyvinyl alcohol fibers on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 425236. DOI: 10.1155/2015/425236.
- [23] 潘艺倩, 梁超锋, 何智海, 等. 再生骨料混凝土抗氯离子渗透性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 501-507. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.02.020.
- PAN Yiqian, LIANG Chaofeng, HE Zhihai, et al. Research progress on the chloride permeability of recycled aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2): 501-507. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.02.020.

(责任编辑:刘平;校对:毛娜)

(上接第90页)

- and corresponding cathode material [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(6): 197-200. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.06.043.
- [20] VAN BOMMEL A, DAHN J R. Analysis of the growth mechanism of coprecipitated spherical and dense nickel, manganese, and cobalt-containing hydroxides in the presence of aqueous ammonia [J]. Chemistry of Materials, 2009, 21(8): 1500-1503. DOI: 10.1021/cm803144d.
- [21] 夏凌峰, 李灵均, 杨慧平, 等. 共沉淀反应时间对  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  正极材料形貌和电化学性能的影响 [J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 123-126. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2020.02.030.
- XIA Lingfeng, LI Lingjun, YANG Huiping, et al. Effect of reaction time of coprecipitation on morphology and electrochemical properties of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2): 123-126. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2020.02.030.
- [22] HU C Y, GUO J, DU Y, et al. Effects of synthesis conditions on layered  $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$  positive-electrode via hydroxide co-precipitation method for lithium-ion batteries [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 114-120. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60686-9.
- [23] SUN Y J, WANG C H, HUANG W J, et al. One-step calcination synthesis of bulk-doped surface-modified Ni-rich cathodes with superlattice for long-cycling Li-ion batteries [J]. Angewandte Chemie (International Ed), 2023, 62(20): e202300962. DOI: 10.1002/anie.202300962.
- [24] 张永杰, 唐银港, 欧阳健, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术对花岗岩残积土渗透性的影响规律研究 [J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 1-8, 107. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202303142024061981.
- ZHANG Yongjie, TANG Yingang, OUYANG Jian, et al. Study on the effect law of microbial induced calcite precipitation technique on the permeability of granite residual soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(3): 1-8, 107. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202303142024061981.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平)