

# 浅谈PVA纤维对混凝土力学性能及耐久性能的影响

戎泽斌<sup>1</sup>, 王成<sup>1,2</sup>, 李曦彤<sup>1</sup>, 李桢怡<sup>1</sup>, 薛山<sup>1</sup>

<sup>1</sup>塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

<sup>2</sup>塔里木大学南疆岩土工程研究中心, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2022年3月12日; 录用日期: 2022年3月29日; 发布日期: 2022年4月8日

## 摘要

混凝土是当代建筑工程中不可或缺的材料之一, 随着社会经济的飞速发展, 环境保护方面也显得尤为重要, 因此新型绿色建筑材料已经成为世界各国主要研究对象。结合众多学者的研究成果, 本文对聚乙烯醇纤维(简称PVA纤维)混凝土的发展历程、力学性能及耐久性能进行了详细地阐述。

## 关键词

聚乙烯醇纤维混凝土, 绿色建筑材料, 力学性能, 耐久性能

## Brief Talking about the Effect of PVA Fiber on the Mechanical Properties and Durability of Concrete

Zebin Rong<sup>1</sup>, Cheng Wang<sup>1,2</sup>, Xitong Li<sup>1</sup>, Zhenyi Li<sup>1</sup>, Shan Xue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Hydraulic and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer Xinjiang

<sup>2</sup>Southern Xinjiang Geotechnical Engineering Research Center, Tarim University, Alaer Xinjiang

Received: Mar. 12<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 29<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 8<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Concrete is one of the indispensable materials in contemporary construction projects. With the

\*通讯作者。

rapid development of society and economy, environmental protection is also particularly important. Therefore, new green building materials have become the main research objects in countries around the world. Combined with the research results of many scholars, this paper expounds on the development history, mechanical properties and durability of polyvinyl alcohol fiber (PVA) concrete in detail.

## Keywords

Polyvinyl Alcohol Fiber Concrete, Green Building Materials, Mechanical Properties, Durability

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当代建筑工程中,混凝土作为主要原材料是不可或缺的,它具有成本低、抗压强度高的优点,但也有脆性大、抗拉强度低、易腐蚀等缺点。在极端环境中,混凝土结构容易受到硫酸盐侵蚀、干湿循环和冻融循环等腐蚀破坏。因此为了提高混凝土的综合性能表现,世界各国对混凝土复合材料开展了大量的研究。混凝土复合材料(简称 ECC)是指将纤维掺入到混凝土中,与混凝土原材料相结合构成一种全新的稳定基体。经研究发现,ECC 材料具有高抗裂性、高韧性以及高抗拉强度等优点。

合成纤维中,聚乙烯醇纤维(简称 PVA 纤维)的性能尤为突出,它有着良好耐蚀性和稳定性,同时还具有一定的引气效果[1]。PVA 纤维掺入混凝土后,不但可以约束混凝土结构的早期开裂,而且还能提高其韧性[2]因此,在混凝土结构中掺入适量的聚乙烯醇纤维可以改善混凝土结构的力学性能和耐久性能,聚乙烯醇纤维混凝土也将在未来工程基础设施建设发展应用中占据重要地位[3]。本文对聚乙烯醇纤维混凝土发展历程及基本性能进行了多方面的概述,为今后聚乙烯醇纤维混凝土在建筑工程中的应用提供了一定的理论依据。

## 2. 纤维混凝土的发展历程

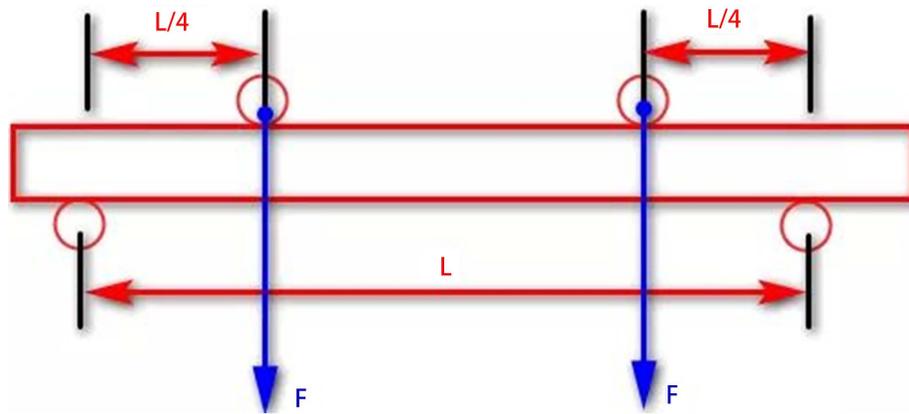
随着社会时代的发展和科学技术的进步,合成纤维在国家及民生的发展中扮演越来越重要的角色。世界各国对于聚乙烯醇纤维混凝土的研究也愈发增多。

美国密歇根大学土木工程材料研究实验室(简称 ACE-MRL)于 1992 年对 ECC 材料进行了四点弯曲试验(图 1)发现[4],当纤维掺量大致在 2%~3% 的范围内时,能够有效控制混凝土的塑性开裂以及疲劳开裂等。

2005 年,Naaman 和 Reinhard 分别对 SIFCON(钢纤维混凝土)、SIMCON(钢纤维网混凝土)以及 ECC 进行了拉伸试验[5],研究结果发现,纤维掺量为 12% 时,SIFCON 和 SIMCON 的韧性远远不如 ECC。

ACE-MRL 在此基础上对 ECC 材料进行了更深入的研究[6],将体积掺量为 2% 的 PVA 纤维掺入混凝土中,发现可以明显提高混凝土的延性,其应变能力达到了 6%~8%,很好地满足了建筑工程中的结构抗震要求。

到了 20 世纪 80 年代,PVA 纤维逐步退出传统纺织行业,进而向工业建筑领域进发。日本可乐丽公司率先开展了 PVA 纤维在建筑工程中的应用研究[7],研究结果发现,PVA 纤维有着良好的分散能力,在基体中能够与水泥完美结合,显著增强混凝土的性能。



**Figure 1.** Schematic diagram of four-point bending test  
**图 1.** 四点弯曲试验示意图

日本在 2006 年[8]将 PVA 纤维应用于高层建筑连梁中(图 2), 美国在 2002 年采用 PVA 纤维对路基路面以及桥梁工程进行修复(图 3), 结果表明, PVA 纤维能够明显提升混凝土材料的性能。



**Figure 2.** Tokyo PVA fiber concrete high-rise building  
**图 2.** 东京 PVA 纤维混凝土高层建筑



**Figure 3.** PVA fiber concrete roadbed  
**图 3.** PVA 纤维混凝土路基

通过上述研究结果显示, PVA 纤维掺入混凝土中能够明显提高混凝土的综合性能。这是由于 PVA

纤维自身有着良好的稳定性,在混凝土内部碱性环境中,与水泥基材料不发生化学反应,同时 PVA 纤维在混凝土内部形成了三维乱向分布,其桥接作用减少了裂缝的扩展,与水泥基材构成了一种全新的稳固基体,因此提高了混凝土的整体性能。

### 3. PVA 纤维对混凝土力学性能影响研究现状

#### 3.1. PVA 纤维对混凝土抗压强度的影响

混凝土抗压强度性能是混凝土在建筑构件中应用的基础,它直接反映出混凝土结构是否符合建筑施工的安全应用。PVA 纤维被誉为“21 世纪引起产业化革命”的新型绿色建筑材料,它有着无毒无害、安全可靠等优点。PVA-ECC 材料是一种新型建筑材料,具有十分高效的性能,随着世界各国的大力推广,PVA 纤维混凝土的抗压强度性能研究也变得十分广泛。

戴丽[9]通过开展 0%、1%、2%、3% 四种不同体积掺量的聚乙烯醇纤维混凝土在 7 d、28 d 龄期下的抗压强度试验,研究结果表明,当 PVA 纤维掺量为 2% 时,混凝土抗压强度相较于其它掺量的纤维混凝土试件得到了较大的提升,同时弹性模量也显著增加。随着纤维掺量的增多,混凝土抗压强度反而下降。梁腾飞[10]通过开展不同体积掺量(0%, 0.05%, 0.1%, 0.15%, 2%)的 PVA 纤维混凝土的抗压强度对比试验发现,其中纤维掺量为 0.1% 时,混凝土结构抗压强度达到最大值,当纤维掺量超过 0.2% 时,试件的抗压强度较掺量为 0% 的试件下降,研究结果表明适量的纤维掺量可以提升混凝土的抗压强度,过量的纤维反而对其产生不利的影响。陈伟[11]分别将 8 mm、12 mm、18 mm 三种长度的纤维以  $0.6 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.8 \text{ kg/m}^3$  的体积掺量掺入混凝土中,开展抗压强度试验,结果表明,掺量为  $1.8 \text{ kg/m}^3$  (12 mm) 的 PVA 纤维混凝土抗压强度提升幅度最大,相较于基准混凝土提高了 11.9%。Fischer [12]分别对 PE 纤维混凝土、PVA 纤维混凝土进行了立方体抗压强度的试验研究,结果发现,PVA 纤维混凝土在达到峰值破坏后,其压应力明显出现缓慢下降的趋势,而 PE 纤维混凝土破坏后的压应力则出现快速降低的情况,从而可以看出,PVA 纤维能够显著增强混凝土的韧性。

综上所述,可以得出以下结论:1) 适量的 PVA 纤维的掺入混凝土中可以提高混凝土的抗压强度,但纤维掺量超过一定的数量时,反而对混凝土的抗压强度产生不利的影响;2) 纤维的长度是改善混凝土抗压强度的重要因素之一,合适的纤维长度可以明显提升混凝土的抗压强度,这是因为合适的纤维长度可以提高水泥基材料之间的黏结度;3) PVA 纤维掺入混凝土中可以提高混凝土的应力应变以及弹性模量;4) PVA 纤维相较于其它纤维,对混凝土的韧性改善更为明显。

#### 3.2. PVA 纤维对混凝土抗折强度和劈裂抗拉强度的影响

混凝土抗折强度性能和劈裂抗拉强度性能在建筑结构、路基路面以及桥梁工程中尤为重要,保证了工程的整体稳定性。同时,抗开裂性能是抗折强度和劈裂抗拉强度的评价指标之一。因此,混凝土的这两项力学性能也是重点研究对象。

黄加圣[13]通过对纤维体积掺量为 0%、0.05%、0.1%、0.15%、0.2% 的聚乙烯醇纤维混凝土进行抗折强度和劈裂抗拉强度对比试验发现,当水胶比固定时,掺量为 0.1% 的 PVA 纤维混凝土的抗折强度以及劈裂抗拉强度提升最明显,同时混凝土的脆性以及韧性都得到了一定程度地改善。闻洋[14]通过开展不同纤维长度(6 mm, 8 mm, 12 mm)、不同体积掺量( $0 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.6 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.8 \text{ kg/m}^3$ ,  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $1.4 \text{ kg/m}^3$ )的抗开裂性能试验研究发现,当掺量  $1.4 \text{ kg/m}^3$  长度为 8 mm 为 PVA 纤维混凝土的抗开裂性能较基准混凝土提升最大。林晖[15]通过对 PVA 纤维混凝土的力学性能试验研究发现,掺量为 0.9% 的 PVA 纤维混凝土裂缝数量相较于素混凝土明显减少。但是,随着纤维掺量的增多,混凝土的凝缩性能显著下降。杨忠[16] [17] [18] [19] [20]将体积掺量为 2% 的聚乙烯醇纤维混凝土与普通混凝土进行抗折强度和劈裂抗拉强度试验研究发

现, PVA 纤维混凝土相较于普通混凝土有着良好的韧性和断裂能, 同时延长了其破坏时间。Maalej 等通过对 PVA 纤维混凝土和钢纤维混凝土的抗折强度试验中发现[21], PVA 纤维混凝土极限抗弯强度远远大于钢纤维混凝土, 在试件开裂后, PVA 纤维混凝土在 1613 s 后才出现裂缝扩展趋势, 而钢纤维混凝土则在 137 s 后便出现裂缝扩展趋势。大连理工大学徐世焯团队对 PVA 纤维混凝土进行了拉伸试验[22], 研究发现, 当纤维体积掺量为 2.0% 时, 混凝土结构的极限拉伸应变表现最好, 稳定在 3.6%~4.5%。

综上所述, 可以得到以下结论, 1) 适量的 PVA 纤维掺入混凝土中可以有效提高混凝土的抗折强度和劈裂抗拉强度, 过量反而会使其强度下降; 2) 合适的 PVA 纤维掺量和合适的纤维长度可以提高混凝土的抗开裂性能, 当结构受到外界荷载冲击时, PVA 纤维紧密拉结了水泥基材料, 使基体整体变得更加稳固; 3) PVA 纤维提高了混凝土结构的抗拉强度, 抑制了裂缝的发展, 增强了混凝土的抗开裂性能, 延长了破坏时间; 4) PVA 纤维提高了混凝土的拉伸应变能力, 同时合适的纤维长度也能够大幅改善混凝土的抗裂性能。

## 4. PVA 纤维对混凝土耐久性能影响研究现状

### 4.1. PVA 纤维对混凝土抗盐蚀性能影响

我国西北地区气候干燥、昼夜温差大、盐渍土分布广泛, 该地区混凝土构筑物常年遭受盐蚀-干湿循环作用的影响[23], 从而导致混凝土结构出现硫酸盐腐蚀破坏。这一系列破坏导致构筑物后期修复需要花费大量的人力物力, 同时对社会经济的发展也起到了一定的阻碍。因此, 国内外学者对 PVA 纤维混凝土耐久性能进行了大量的研究。

黄加圣[24]通过开展五种不同水胶比的聚乙烯醇纤维混凝土与普通混凝土的抗硫酸盐侵蚀试验, 结果表明, 在干湿循环作用下, 聚乙烯醇纤维对混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能有着显著的提高。王洪宇[25]通过开展在复合盐长期浸泡环境下的不同纤维掺量(0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%)的聚乙烯醇纤维混凝土抗盐蚀性能试验, 研究发现, 随着复合盐浓度的升高, 纤维掺量越多, 混凝土的抗盐蚀性越强。可以看出, 聚乙烯醇纤维对混凝土的抗盐蚀性能提升较明显。Lepech 和 Li 对 PVA 纤维水泥基材料和钢丝网增强砂浆进行了渗水试验研究[26], 发现 PVA-ECC 材料在应变为 1.5% 时的抗渗透性能表现与未产生裂缝的砂浆类似, 可以看出, PVA 纤维可以明显提高水泥基材的抗渗透性。Maalej 等开展了利用 PVA 纤维代替钢筋作为混凝土的加强相进行氯离子扩散试验[27], 在干湿循环达到 83 d 时, PVA 纤维混凝土氯离子含量仅为钢混结构氯离子含量的 25%。

综上所述, 可以得到以下结论: 1) PVA 纤维掺入混凝土中可以明显提高混凝土抗盐蚀性能, 混凝土由于徐变作用容易导致结构出现自发性孔隙, PVA 纤维的掺入可以抑制其裂缝及孔隙的生成。当混凝土结构遭受硫酸盐侵蚀的时候, PVA 纤维具有一定的引气效果, 引入的微小气泡填充在混凝土内部微缝隙处, 从而封锁了硫酸根离子的侵蚀通道; 2) 在极端环境下, 随着地表水盐分含量的增多, PVA 纤维掺量越多, 对混凝土结构的抗硫酸盐侵蚀性能越好, 这是由于 PVA 纤维的掺入占据了一定的空间, 盐蚀产物有足够的容纳空间, 提高了混凝土的密实度, 提高了混凝土的抗盐蚀性能; 3) 相较于其它增强材料, PVA 纤维具有高抗拉性能, 提高了混凝土的抗开裂性能, 增强了混凝土抗渗水性能; 4) 在混凝土结构特殊要求部位, PVA 纤维高弹高模性可以用来代替钢筋用来增强混凝土的抗离子渗透性能, 改善了钢筋易受腐蚀的问题。

### 4.2. PVA 纤维对混凝土抗盐冻性能影响

混凝土的抗冻性能也是混凝土结构耐久性能指标之一。我国东部沿海地区地处海洋环境, 该地区混凝土建筑物、路基路面、桥梁等结构长时间遭受海水的侵蚀以及低温影响, 容易造成结构出现严重的冻

融破坏。因此,学者们在混凝土结构抗冻性能方面也进行了大量的研究。

张生[28]通过对聚乙烯醇纤维混凝土与普通混凝土的抗冻性试验对比研究发现,聚乙烯醇纤维可以通过改变混凝土内部孔隙结构,减少孔洞数量,从而来提升混凝土的抗冻性能。马佳晨[29]开展了混凝土在强碱性环境下的耐久性试验研究发现,在强碱性环境浸泡下,与普通混凝土相比,PVA纤维掺入混凝土中不与水泥基材发生化学反应,抑制了混凝土裂缝的增长,能够明显提升混凝土原材料的化学稳定性能,混凝土结构在严酷环境下的耐碱性能。安嘉伟[30]通过开展PVA纤维混凝土的抗冻试验,在冻融循环次数达到150次时,聚乙烯醇纤维混凝土的相对动弹性模量仅仅下降了20%以内;而素混凝土在冻融循环次数75次时,其相对动弹性模量便下降至55.2%,从而表明。聚乙烯醇纤维可以改善混凝土的抗冻性能。

Lepech 和 Li 对 PVA 纤维混凝土和普通混凝土进行了冻融循环对比试验[31],研究表明,普通混凝土在100次循环时便已经发生严重破坏,而PVA纤维混凝土则在300次循环后出现轻微破坏现象。

由上述研究结果可以发现,1)PVA纤维对混凝土抗盐冻性能的提升十分明显。根据静水压和渗透压理论可知,混凝土结构反复遭受冻胀-融化过程,使得混凝土基体逐渐分散,最终发生崩裂破坏。PVA纤维的掺入引入了一定数量的气泡,减少了水分子结冰数量,降低了冻结作用所引发的混凝土破坏概率;2)在冻融循环作用后期,水泥基体已承受不住冻胀应力和渗透压力的双重作用,导致结构破坏。此时,PVA纤维在混凝土内部形成了桥接作用,加强了水泥基各相的连接,抑制了裂缝的扩展,阻止了离子的侵蚀,从而提高了混凝土的抗盐冻性能。

## 5. 结论

通过对PVA纤维混凝土的发展历程、力学性能以及耐久性能的研究分析,可得以下主要结论。

1) 随着社会科技的不断发展,PVA纤维从传统服装制造领域转向于工业建筑领域,并取得了显著的成果。

2) 适量的PVA纤维可以明显提高混凝土的抗压强度、抗折强度以及劈裂抗拉强度,但过多的纤维掺量反而会导致混凝土力学性能下降。PVA纤维在混凝土内部的桥接作用提高了混凝土的抗拉性能,增强了混凝土的韧性。

PVA纤维对极端环境下的混凝土耐久性能有着良好的改善。PVA纤维自身带有一定的引气效果,阻止了外部环境离子的侵入,延缓了混凝土结构的腐蚀破坏时间。同时PVA纤维的高弹高模性能增强了混凝土的抗开裂性能,确保了水泥基体的完整性,从而增强了混凝土的耐久性能。

## 基金项目

新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划项目(2019AB016)。

## 参考文献

- [1] 杜志芹,孙伟.纤维和引气剂对现代水泥基材料抗渗性的影响[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(3):614-618.
- [2] 徐亚茜.聚乙烯醇-碳纤维混凝土的负泊松比设计与力学性能研究[D]:[硕士学位论文].青岛:青岛理工大学,2021.
- [3] 王彦书.钢筋聚乙烯醇纤维混凝土梁斜截面受力性能研究[D]:[硕士学位论文].长春:长春工程学院,2020.
- [4] 蔡新华.超高韧性水泥基复合材料耐久性能试验研究[D]:[博士学位论文].大连:大连理工大学,2010.
- [5] Naaman, A.E. and Reinhard. H.W. (2006) Proposed Classification of HPFRC Composites Based on Their Tensile Response. *Materials and Structures*, **39**, 547-555. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9103-2>
- [6] 沈荣熹,崔琪,李清海.新型纤维增强水泥基复合材料[M].北京:中国建材工业出版社,2004.
- [7] Du, E. (2017) Mechanical Property Test of PVA Fiber Reinforced Concrete. *Chemical Engineering Transactions*, **62**,

- 727-732.
- [8] Bellezze, T. (2006) Corrosion Behaviour in Concrete of Three Different Galvanized Steel Bars. *Cement and Concrete Composites*, **28**, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.011>
- [9] 戴丽, 杨峰, 周美容, 符仁建. 纤维混凝土复合材料的制备及力学性能的研究[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12095-12099.
- [10] 梁腾飞, 雷瑛. 聚乙烯醇纤维掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 合成纤维, 2021, 50(10): 48-50+54.
- [11] 陈伟. PVA 纤维混凝土力学性能及抗氯离子渗透性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- [12] Fischer, G. and Li, V.C. (2007) Effect of Fiber Reinforcement on the Response of Structural Members. *Engineering Fracture Mechanics*, **74**, 258-272. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.01.027>
- [13] 黄加圣, 杨鼎宜, 朱振东, 等. 聚乙烯醇纤维混凝土的长期力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(4): 76-80.
- [14] 闻洋, 陈伟. 聚乙烯醇纤维混凝土早期抗裂抗渗性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 267-274.
- [15] 林晖. 掺 PVA 纤维混凝土的力学及变形性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [16] 杨忠. 聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(4): 45-48.
- [17] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 姚武, 吴科如. 混凝土拉伸应力-应变全曲线试验测定的条件[J]. 同济大学学报, 1996, 24(2): 142-145.
- [19] Kabele, P. and Horrii, H. (1996) Analytical Model for Fracture Behaviors of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites. *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements (Proceedings of JSCE)*, **532**, 209-219. [https://doi.org/10.2208/jscej.1996.532\\_209](https://doi.org/10.2208/jscej.1996.532_209)
- [20] 李庆华. 超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力-应变全曲线实验测试与分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 79-85.
- [21] Maalej, M., et al. (2002) Corrosion Durability and Structural Response of Functionally-Graded Concrete Beams. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, 307-316. <https://doi.org/10.3151/jact.1.307>
- [22] 徐世焱, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 4-60.
- [23] 杨保存, 汪为巍, 杨柳. 新疆盐渍土路基盐-冻胀变形综合防治技术研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 133-142.
- [24] 黄加圣, 杨鼎宜, 朱振东, 等. 聚乙烯醇纤维混凝土耐久性能试验研究[J]. 混凝土, 2019(6): 61-65.
- [25] 王洪宇. 聚乙烯醇纤维混凝土盐蚀损伤劣化试验研究[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
- [26] Lepech, M.D. and Li, V.C. (2009) Water Permeability of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 744-753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.002>
- [27] Maalej, M., et al. (2010) Effect of Cracking, Corrosion and Repair on the Frequency Response of RC Beams. *Construction and Building Materials*, **24**, 719-731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.036>
- [28] 张生. 多种纤维混凝土抗冻性能研究[J]. 四川建筑, 2018, 38(1): 242-245.
- [29] 马佳晨, 张炉青, 张学旭, 刘中伟, 张书香. 改性水泥基材料用聚乙烯醇纤维耐碱性能研究[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(2): 61-63.
- [30] 安嘉伟, 赵建军, 刘曙光, 闫长旺, 白茹, 徐勇彪. 聚乙烯醇纤维对混凝土抗冻性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(7): 51-54.
- [31] Lepech, M.D. and Li, V.C. (2014) Long Term Durability Performance of Engineered Cementitious Composites. *Restoration of Buildings and Monuments*, **12**, 119-132. <https://doi.org/10.1515/rbm-2006-6038>