

纤维对混凝土性能影响的研究现状

晏云潇¹, 杨鼎宜^{1,2*}, 钱云峰¹, 金自然¹, 祁中天¹, 汪志康¹, 范 晟¹

¹扬州大学, 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州

²扬州大学, 绿色建筑材料研究所, 江苏 扬州

收稿日期: 2022年3月2日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年3月29日

摘 要

纤维混凝土材料的制备及对混凝土力学性能和耐久性能的探究有着重要影响, 其中纤维的种类、组合等的研究是主要方向之一。本文整理并概述了近年来学者们围绕不同种类纤维混凝土展开的研究与成果, 分析了无机纤维、有机纤维, 以及其他纤维对混凝土性能的影响, 指出了目前存在的问题。并对纤维混凝土的未来发展前景进行展望, 以期为后来纤维混凝土的发展研究提供帮助和思考。

关键词

纤维混凝土, 有机纤维, 无机纤维, 力学性能, 耐久性能

Research Status of the Influence of Fiber on the Performance of Concrete

Yunxiao Yan¹, Dingyi Yang^{1,2*}, Yunfeng Qian¹, Ziran Jin¹, Zhongtian Qi¹, Zhikang Wang¹, Sheng Fan¹

¹College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²Research Institute of Green Building Materials, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Mar. 2nd, 2022; accepted: Mar. 22nd, 2022; published: Mar. 29th, 2022

Abstract

The preparation and research of fiber reinforced concrete materials have an important impact on the mechanical properties and durability of concrete, among which the research on the types and combinations of fibers is one of the main directions. This paper summarizes the composition and composition of fibers in concrete, arranges and summarizes the research and achievements of

*通讯作者。

scholars around different kinds of fibers in recent years, and analyzes the existing problems. The future development prospect of fiber reinforced concrete is prospected, in order to provide help and thinking for the later development and research of fiber reinforced concrete.

Keywords

Fiber Reinforced Concrete, Organic Fiber, Inorganic Fiber, 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

混凝土的原材料来源广泛,因而成为世界上最受欢迎的建筑材料之一,但随着经济建设的发展,人们对于混凝土的建筑强度要求越来越高,普通混凝土由于耐久性差、强度低等缺点,已经不能满足现代建筑规范要求。对于厚度较薄和裂缝要求较高的结构时,如采用传统的钢筋增强,要正确的放置钢筋位置是十分困难的,而素混凝土的抗拉性能,抗裂性能非常的差,不能够满足建筑规范要求。

有学者研究发现在混凝土中加入纤维可以有效弥补普通混凝土存在的缺点,在加入纤维后,对于混凝土的抗拉、抗压、抗折等力学性能以及抗冻、抗腐蚀等耐久性能都有着很大的提高,这一优点对提高结构的安全性、适用性和耐久性都非常有利。

纤维混凝土具有巨大的发展潜力,学者们展开了大量研究。1963年美国学者从理论上阐明了钢纤维的增强作用和机理,为纤维混凝土的进一步发展奠定了理论基础,使得对纤维混凝土的研究开启了从点到面的发展。1990年、1991年取得了大量研究成果也正式拉开了纤维混凝土研究的序幕。现在纤维混凝土被大量应用到高速公路、桥梁、房建等土木工程中,高强度、高韧性、高耐久性的纤维混凝土研究成果不断涌现。

本文从纤维混凝土的纤维分类(有机纤维、无机纤维、其他纤维)出发,系统整理了多种纤维组成(聚丙烯纤维、聚甲醛纤维、聚乙烯醇纤维、钢纤维、碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、植物纤维)对混凝土性能的影响,为今后对纤维混凝土的研究和发展提供帮助和参考依据。

2. 有机纤维

有机合成纤维是由合成的高分子化合物制成的,具有优越的耐碱性能、耐疲劳性能,可在水泥基材料中均匀分散等特点,在水泥基材料中起到了良好的阻裂作用[1] [2]。此外,在混凝土加载过程中起到搭接作用,使得基体出现较大、较多裂缝时,能进一步承受外部荷载,保持良好的外貌形态及承载力[3],因此,近些年广泛应用于混凝土中。

2.1. 聚丙烯纤维(PP)

聚丙烯纤维(PP)是一种近些年新推出的对混凝土的性能有增强的纤维,有着混凝土的“二次增强筋”这一称号。PP纤维在混凝土中与混凝土相结合的性能较好,且易于分散,增强了混凝土的握持力。此外,PP纤维具有耐腐蚀、耐高温、抗冻、抗辐射等优点,在各种新型复合混凝土纤维材料中也属于佼佼者。PP纤维在增强混凝土领域有极大的优势。PP纤维对混凝土性能的提升包括力学性能和耐久性能等多个

方面。

2.1.1. 力学性能

余春[4]等人从通过许多各个方面的深入探索对大量 PP 纤维喷射混凝土的冲击性能问题进行一系列的深入研究。这些结果表明,在一定高温条件下,随着大量 PP 纤维在塑料混凝土中固化掺量的不断增加,混凝土的冲压劈裂缓冲抗拉保护强度较素塑料混凝土的劈裂抗拉保护强度还要有所提高。这些研究还特别表明 PP 纤维的大量加入对塑料混凝土的劈裂抗冲击保护性能的大幅提高也可以有着不俗的应用效果。

王兆[5]等人从各个方面深入研究了大量 PP 纤维对高温喷射塑料混凝土的冲击性能及其影响。这些研究结果发现,加入了大量 PP 的喷射混凝土的粘结面抗拉强度为 1.9 MPa 而未加入纤维的混凝土粘结面抗拉强度为 1.3 MPa, 粘结面上的抗拉强度相较于基准组提高了 45.16%。此外,对于喷射混凝土也能提升其一定的抗渗性能。

武海轮[6]等人对掺入了 PP 纤维的混凝土的各项性能的影响开展了实验和研究。实验结果显示,钢纤维和 PP 纤维两种常用纤维都不仅对基层混凝土的力学抗压耐折运动强度提高起到一定的抗压提升保护作用,并且不同材料种类的专用钢纤维和 PP 两种纤维的抗折效果性能相差不明显。

张悦[7]等人通过正确控制基层混凝土的长期养护和龄期和增加 PP 纤维的粘度含量,深入浅出研究了基层混凝土的流体力学性能。研究结果表明,纤维的含量加入大大提高了基层混凝土的力学抗压运动强度和可伸延性,提高了基层混凝土的力学抗压性和韧性。讨论了不同养护龄期和纤维含量对混凝土力学性能的影响,提出了应力应变本构模型。

梁宁慧[8]等人分别依次选择不同力学强度值和尺寸的材料采用 PP 纤维,在相同力学强度尺寸条件下依次分别进行各种建筑材料混凝土墙体开裂后的强度测量试验。结果表明,不同厚度聚丙烯纤维的加入能有效防止混凝土开裂,延缓混凝土硬化阶段裂缝的形成,大大提高混凝土的抗裂性能。

周鹏[9]等人借助于控制 PP 纤维的尺寸和掺量进行正交实验来探究 PP 纤维对再生混凝土力学性能的影响规律。周鹏团队进行了大量控制变量正交实验,最终得出:将混凝土至于保温室内养护 7 d 时,再生混凝土的单轴抗压强度的提高主要由 PP 纤维的长度决定,劈裂抗拉强度主要的影响因素则是由 PP 纤维的掺量,然而养护至 28 d 时,混凝土单轴抗压强度的主要因素不再是 PP 纤维的长度,而是 PP 纤维的掺量,混凝土抗拉强度正好与其相反,劈裂抗拉强度转变为由 PP 纤维的长度主导;不同 PP 纤维的直径对再生混凝土的力学性能没有明显差异。

Ccasani Jean [10]等人研究了两种不同长度的 PP 纤维对增强混凝土骨料的抗压强度和抗折强度的影响和规律变化,实验结果表现为,纤维混凝土实心板早期形成的裂缝数量及开裂程度与普通混凝土相比有着极大地改善提高。而且混凝土试样中加入了 PP 纤维,这使得混凝土试样的延展性得到了提高,使得实心板构件有了更高的强度。

朱江[11]等人借助大量的实验数据,研究了 PP 纤维增强混凝土的力学性能,并对相关性能进行了具体数值分析。并将其与普通混凝土和钢纤维混凝土进行了大概的数值对比。当 PP 纤维的掺量不大于千分之一时,PP 纤维增强混凝土的抗压强度没有较为明显的提升。而当 PP 纤维掺量大于千分之一时,PP 纤维增强混凝土的力学强度甚至还低于普通混凝土。

通过众多学者的实验研究,向混凝土中加入合适量的 PP 纤维,可以在一定范围内增大混凝土的劈裂抗拉强度和轴心抗压强度。除此之外,PP 纤维在施工方面较为简单容易,还能起到增强、增韧、抗裂缝等作用。但是 PP 纤维由于本身结构特征,使得对混凝土的抗拉强度的提高并不显眼,但当 PP 纤维与钢纤维混和一同加入混凝土试样中时,在钢纤维的协同作用下,不仅能达到混凝土的力学性能稳定,也可以极大比率地增强混凝土的抗拉强度,这有着很广阔的市场前景。

2.1.2. 耐久性能

杨虹[12]等人还着力深入研究了新型 PP 混凝胶粉轻复合骨料改性混凝土的耐温抗冻硬化性能与流体力学性能。研究表明,一定量的 PP 纤维能够让橡胶轻复合骨料混凝土的抗冻性得到有效的提高。实验结果显示,当 PP 的体积含量为 0.1% 时,橡胶轻复合骨料混凝土的抗冻性能达到最佳使用效果。

汪华莉[13]进行了相关 PP 纤维混凝土抗氯离子腐蚀的研究,通过使用不同纤维掺量和纤维尺度揭示了纤维对混凝土耐久性能的改善效果。该实验通过检测氯离子的扩散深度来衡量 PP 纤维混凝土的耐久性能。结果见表 1, 表 2, 结果表明:当掺入 1.0% 的 PP 纤维时,伴随着纤维掺入率的增加,混凝土内部的氯离子浓度的变化趋势是减少的。不过随着纤维掺量在 1.0% 走上时,混凝土氯离子浓度反倒有了上升的迹象。得出结论:PP 纤维的最佳掺入量是 1.0%, 纤维长度则不应太大,应小于 16 mm。

Table 1. Effect of polypropylene fiber content on concrete performance

表 1. 聚丙烯纤维掺量对混凝土性能的影响

聚丙烯纤维掺量/%	坍落度/mm	抗压强度/Mpa	氯离子渗透深度/mm
0	84	42.6	24
0.2	81	43.7	23
0.5	78	45.6	21
1	76	48.1	19
1.5	75	47.9	20
2	74	47.1	20

Table 2. Effect of polypropylene fiber length on concrete performance

表 2. 聚丙烯纤维长度对混凝土性能的影响

聚丙烯纤维长度/mm	坍落度/mm	抗压强度/Mpa	氯离子渗透深度/mm
1103	71	52.3	15
13	74	50.7	17
16	76	48.1	19
20	77	46.9	20
24	78	45.7	21

刘肖凡[14]等人进行了众多实验研究了刚性 PP 纤维对透水混凝土耐久性能的改善效果。实验结果表明:伴随纤维掺入量的增大,透水混凝土的抗冻融性能得到了显著的增强。其中,在当 PP 纤维掺量为 1.0% 时,混凝土的抗冻融循环性能最佳。

张克纯[15]研究了不同掺量 PP 纤维混凝土的耐久性能。实验表明:纤维的掺入能有效提高混凝土的抗渗强度,PP 纤维的最佳掺量为 2%。

梁宁慧[16]等人采用多种尺度的 PP 纤维混凝土,通过在五种轴向荷载作用下混凝土内部的氯离子扩散情况,以达到分析 PP 纤维混凝土的抗氯离子渗透性能与纤维尺度之间关系的目。轴向荷载在增大的过程中,混凝土内部氯离子扩散系数先降低,然后增大。相较于空白基准组,混凝土内部氯离子扩散系

数有大幅度降低。这个实验现象清晰地表明一点：PP纤维是可以在一定范围内提高混凝土构件的抗氯离子渗透性能，其抗渗性能在普通混凝土的水平上有极其显著的提高。

S. Ranjith [17]等人研究了PP纤维混凝土的耐久性能，该实验通过控制改变PP纤维的体积分数改变，测量混凝土构件内部的离子浓度，以反映混凝土的耐久性能。实验结果表明：纤维的加入提高混凝土复合骨料的耐久性能，当体积分数为1.5%时，混凝土构件有最优的耐久性能。

由以上实验研究成果，我们可以知道：向混凝土中加入一定量的PP纤维，由于混凝土内部有大量细而长的PP纤维作用，混凝土及内部骨料的抗寒冻性能、抗冻融循环性能和抗渗性能等等其他耐久性能得到了显著的提高。钢筋混凝土构件的使用性能得到了极大的改善，极大地延长建筑的使用寿命，使得钢筋混凝土结构能够在恶劣的环境中正常工作承受荷载，具有良好的经济性。在建筑结构上具有广阔的潜力和前景。

2.2. 聚甲醛纤维(POM)

聚甲醛(POM)纤维是一种高强度、高模量，并且拥有出色的热稳定性和耐腐蚀性的有机合成纤维。研究发现POM纤维对混凝土性能的提升有很大的帮助，学者们为进一步探究POM纤维对混凝土各种性能的影响，展开了多种试验方法，如改变纤维的尺度，掺量等。

2.2.1. 力学性能

张丽辉[18]等人为了深入探究POM纤维对整体混凝土综合性能的直接影响，将POM纤维与PP纤维进行了直接对比，得出结论：POM纤维虽然可能会对整体混凝土的某些性能产生不良影响，如混凝土的抗压性能、新拌性能以及干燥收缩产生的变形，但是却能大幅提高混凝土的整体抗裂性能、抗拉性能和耐腐蚀性能。而且与PP纤维作对比，两者使用相同的掺入量，POM纤维对混凝土性能的提升效果更佳出色，如提高新拌性能、耐冻性能、抗裂性能、抗拉强度等[19]。

吕锦飞[20]等人为了探究目前POM纤维对建筑混凝土抗压、抗拉和抗折性能等力学性能的影响，改变了纤维的整体掺入含量，并在试验中得出结论：纤维的掺入量对混凝土的力学性能有着一定的影响，虽然POM纤维对混凝土抗压性能的提升作用不是很明显，但对于改善混凝土抗拉与抗折性能有着非常优异的效果，而且当掺入量为 1.2 kg/m^3 时，效果最为显著[21]。

杨富花[22]等人为了探究POM纤维对混凝土坍落度、和弯曲韧性等力学性能的直接影响，改变了纤维的长度和体积，并在坍落度试验、四点弯曲试验中得出了结论：POM纤维的长度和体积越大，混凝土的坍落度就越小；当纤维长度为6 mm，体积占0.5%时，其对混凝土的力学性能增强的效益最大。同样的，混凝土抗折和抗压性能也得到了一定的提高，弯曲韧性提升了2.21~4.79倍[23]。

安宇坤[24]等人为了探究POM纤维对混凝土抗收缩和抗渗透性能的影响，在接触法收缩实验以及渗水高度法抗渗试验中改变纤维的长度和掺量，得出了结论：POM纤维的掺入对混凝土的抗渗、抗收缩性能有着明显的提升。并发现了最佳尺度和掺量：掺量少于0.25%，纤维长度为15 mm。同时根据试验结果也发现，当纤维掺量过多以及长度过大时，反而会使混凝土的抗收缩、抗渗性能有所不良的影响。

Rui Yu [25]等人研究了钢纤维和聚甲醛纤维对超高性能混凝土(UHPC)性能的影响。结果表明，POM纤维可以轻微干扰UHPC的填充骨架，并扩大基体和纤维之间的界面过渡区(ITZ)。因此，为了有效地将POM纤维应用于UHPC，建议将其与钢纤维结合，其最佳含量应为1%左右。

由以上学者的研究探讨，我们可以得出POM纤维对混凝土抗裂、抗拉、耐冻等力学性能有着不错的提升，其呈现趋势大都为前期随着纤维长度和掺量的增加而递增，后期则随之递减，未来还需要更加深层次的研究。

2.2.2. 耐久性能

王天琪[26]等人就混凝土用 POM 纤维的耐久性能进行了研究。结果表明聚甲醛纤维的腐蚀是一个逐层腐蚀的过程。碱溶液首先腐蚀纤维表面和内部杂质,然后腐蚀结构缺陷,导致 C-O-C 和 CH₂ 基团发生位移,导致纤维力学性能下降。但 POM 纤维整体结构框架腐蚀不严重,具有良好的耐碱性[27]。

胡晨光[28]等人为了探究 POM 纤维对水泥砂浆耐紫外老化有何影响,通过改变 POM 纤维的长度和掺入量,对 POM 纤维水泥砂浆进行耐紫外老化的相关试验,并得出试验规律:在 POM 纤维水泥砂浆在紫外老化的影响下,其水化速度得到了一定的提高,并且还强化了自身的抗压和抗折性能。从数据中可以得出最优纤维掺量和长度分别为 0.2% 和 6 mm。在紫外线照射下,水泥砂浆局部收缩,直至破碎。聚甲醛纤维可以降低砂浆表面的粘结强度,提高砂浆表面的硬度。POM 纤维含量为 0。当长度小于 9 mm 时,显微硬度最高。紫外老化对聚乙烯纤维水泥砂浆早期水化耐磨性影响不大。在中和后期,纤维含量可使砂浆耐磨性提高 0.2%,但纤维长度超过 12 mm 时,耐磨性下降[29]。

由以上学者的研究探讨,我们可以得出 POM 纤维所有者良好的耐腐蚀性能,并且有利于水泥砂浆的耐紫外老化性能、耐磨性能等,而具体影响程度受到 POM 纤维的长度和掺入量等因素的影响,未来仍需进一步的探究。

2.3. 聚乙烯醇纤维(PVA)

聚乙烯醇合成纤维(PVA)是一种用途相当广泛的水溶性高分子聚合物,性能介于塑料和橡胶之间。一般来说模量与墙体力学载荷强度都很高,耐酸和耐水抗酸的碱性也很强,最重要的一点那就是由于聚酯纤维与各种建筑墙体混凝土、水泥等的力学载荷层和粘合相互作用力学强度高,并且很环保,对自然环境中既无毒性也完全无害。

在混凝土中,加入一定量的纤维[30],能对混凝土起到了很好的粘结作用,从而增加混凝土的抗疲劳性能。但由于单丝纤维之间的表面吸附,短切的纤维在自然状态下只能呈束状,这种状态使得纤维在传统的搅拌方式下,会形成一种“纤维球”,不仅对搅拌轴的转动加以限制[31][32][33][34],同时使得很难均匀分散 PVA 纤维,从而无法做到复合加强提高抗疲劳性能的目的。

当下生活中,PVA 纤维主要应用于高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)中[35]。在各种建筑墙体混凝土中如果同时加入适量的聚酯纤维则真的就是可以有效起到降低 62%~75% 的墙体纵向建筑墙面化学力和它的横向墙体力学力对载荷层和粘合剂的作用,同时通过数据综合分析也真的可以清楚显示,添加适量的聚酯纤维还真的就是通过有效增加力学强度值来增强建筑墙体上的力学载荷层的粘合强度,提高其抗压性能[36][37][38]。

梁腾飞[39]等研究人为了深入研究建筑聚乙烯醇(PVA)橡胶纤维对建筑混凝土抗压强度的主要影响,研究发现,PVA 橡胶纤维在建筑混凝土中有时可以直接形成充分受力包裹的收缩状态,使其在建筑水泥砂浆凝结或者硬化后的过程中能够起到随意收缩的运动作用,从而有效限制住了混凝土的随意收缩运动,从而提高混凝土的整体韧性。

赵阳[40]等人为探究 PVA 纤维分散后在沥青中抗疲劳性能的影响,采用旋转活塞式拌和法对 PVA 纤维沥青进行拌和分散,对 PVA 纤维沥青进行时间疲劳扫描,通过复数模量衰减 N_f50 和累积耗散能比对 PVA 纤维沥青胶浆疲劳性能进行评价。结果发现:随着 PVA 纤维掺量的增加,复数模量增加,疲劳性能增加。控制应力增大,疲劳性能相应降低。PVA 纤维表面有不均匀的小颗粒,它们在沥青中起到了增黏、稳定、复合加筋等作用,综合提升了纤维与沥青的适配性。

CONSOLIN C [41]等人在研究不同掺入纤维的混凝土的力学性能中,对混凝土施加竖向荷载作用,这样引起试样沿轴向压缩以及沿横向膨胀的结果。纤维素混凝土发生轴向长度变短后,同时产生了横向

扩张,从而引起双剪切脆性破坏的结果。当在混凝土中加入 PVA 纤维后,试样在横向膨胀过程中会对环向纤维造成拉伸作用,之后纤维又可以对试样产生约束反作用,从而减小试样横向上的膨胀程度,由此获得更高抗压强度。

牛海成[42]等人为研究纤维对高强再生骨料混凝土的抗弯力学性能的影响,以纤维种类、粗骨料类型、纤维体积掺量为变化参数,分析了不同条件下高强再生骨料混凝土梁的裂缝宽度、开裂荷载、挠度、抗弯承载力和延性等。结果发现:混凝土梁的开裂荷载、刚度等一系列指标都不如加入纤维的混凝土梁,且挠度较大,裂缝较宽;掺入聚乙烯醇纤维能够在一定程度上抑制混凝土的开裂和进一步扩展,提高了混凝土的稳定性。

通过以上这些学者们得出的结论,我们可以了解到在加入一些 PVA 纤维材料的不同混凝土的抗压,抗弯等力学性能都有着一定程度的提高,能够达到变形加固时的效果,从而有效限制住了混凝土的随意收缩运动,提高混凝土的整体韧性。

3. 无机纤维

3.1. 钢纤维

钢纤维为增强砂浆或混凝土而加入的、长度和直径在一定范围内的细钢丝。常用截面为圆形的长直钢纤维,其长度为 10~60 毫米,直径为 0.2~0.6 毫米,长径比为 30~100。钢纤维混凝土作为一种比较先进的技术广泛应用于工程中,能够有效提高混凝土的各种性能。目前钢纤维还有很多不成熟的地方,需要广泛的实验来探究对混凝土性能的影响。

3.1.1. 力学性能

陈宇良[43]等人用 168 个圆柱混凝土试件来研究混凝土在掺入钢纤维后的力学性能,做出应力应变曲线观察三向轴压下混凝土的应力应变关系。探究出混凝土的峰值应力应变随着围压的增大而增大,钢纤维的加入使得混凝土的残余应变增大,在掺量 1% 时能够最优化改善混凝土的力学性能。

叶门康[44]在配置超高混凝土时选择了掺入不同规格的钢纤维,并探索了掺入混凝土后混凝土力学性能的改善。通过改变钢纤维的长细比、长度和直径,发现超高混凝土的抗折强度会随着纤维长细比的增加而增加,而抗压强度会先增加后降低。当含量一定时,纤维直径的减小会降低混凝土的工作性和抗压强度。

周聪[45]采用自制的落锤实验研究钢纤维再生混凝土的力学性能,选用不同掺量体积、不同类型的钢纤维和不同的粗骨料取代率制备出混凝土,研究混凝土抗冲击性能和抗压性能。实验结果表明,再加入纤维后,混凝土的抗冲击性和延性能够显著提高,当掺量为 1.5%,抗冲击性能会提高 7.13 倍。但是当增大粗骨料取代率时,混凝土的抗压性能和抗冲击性能却会降低。

马煜东[46]用 4 个不同尺寸的钢纤维掺入高强混凝土,研究混凝土构建的应力应变曲线和破坏。研究结果得出钢纤维能够使混凝土裂缝开展更加缓慢,从而使结构具有更大的刚度。此外,纤维还可以显著提升混凝土的承载能力和变形能力,加载过程中短纤维可以抑制混凝土裂缝的形成,长纤维可以一直混凝土裂缝的进一步开展,两种纤维能够提高混凝土的受剪性能。

张相凯[47]通过改变钢纤维的体积率以及混凝土的水灰比制备混凝土试块并进行力学试验。用钢纤维体积率 0%~2%,置换率 0%~100%,水灰比用 0.35、0.38、0.41、0.44、0.47 试块进行试验。实验得出,当钢纤维体积率增大时,混凝土强度显著提高;再骨料的提高却会降低混凝土的强度;水灰比的提高至 0.41 混凝土抗压强度达到最大,在提高时会降低混凝土抗压强度。

M.卡尔帕纳[48]通过研究钢纤维混凝土认为,在混凝土中加入钢纤维即使少量也有助于防止混凝土

发生脆性破坏,并且在极大提高混凝土抗弯强度。另外,增加钢纤维的数量也能使混凝土强度得到提高。随着纤维含量的增加,对减少脆性破坏方面起着至关重要的作用,当混凝土受到压缩和弯曲破坏时,破坏模式就会从脆性变为韧性,大大提高混凝土的力学性能。可以得出结论,钢纤维是改善混凝土机械性能的很好选择。

李进荣[49]等人使用钢纤维和箍筋共同作用来研究超高性能混凝土梁的抗冲击能力,结果表明,加入钢纤维和箍筋后可以提高混凝土梁的抗冲击性能,提高梁的承载能力,更高的能量耗散能力以及更低的最大位移和残余位移。对于没有钢纤维和箍筋的试样,在静态和冲击载荷条件下会发生脆性剪切破坏。

K. Kosa [50]等人采取室内加速腐蚀试验,实验得出,在氯盐溶液侵蚀下,碳化过程可以加快钢纤维混凝土中钢纤维的锈蚀速度。当采取干湿循环实验 9 个月,碳化 21d 时,钢纤维的直径损失高达 67%,钢纤维混凝土的抗拉与抗折强度也出现急剧下降。

Alsaif A [51]等人采取模拟海洋环境的实验,使用水胶比为 0.35 的钢纤维橡胶混凝土将其置于浓度为 3%NaCl 的溶液中使其加速干湿循环腐蚀 150 天和 300 天,当达到腐蚀的规定天数后,发现钢纤维橡胶混凝土试件表面均未出现开裂现象,反而力学性能略有提升,表现出良好的耐久性能。

从研究中我们可以得出,对于力学性能,在混凝土中加入钢纤维可以抑制混凝土裂缝的形成明显改善素混凝土抗裂性能较差的特点,同时可以增大混凝土的抗拉性能,但是会影响混凝土原本优秀的抗压性能。

3.1.2. 耐久性能

张紫键[52]采用 TDR-16 快速冻融分别对 1.0%的端钩型钢纤维、1.2%的波浪型钢纤维等几组试块进行冻融循环试验,借此研究冻融环境对钢纤维混凝土耐久性能影响。实验每次冻融循环用时 2.8 h,温度在 $-19^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ 范围内,且每当冻融 25 次后,将试块上下两端调换。实验得出钢纤维种类和掺量的不同会影响混凝土耐久性能。但随着冻融循环次数的增加,可以发现试块的相对动弹性模量都呈下降趋势。

潘慧敏[53]等人通过进行了快速碳化试验,借以探究钢纤维体积掺量以及钢纤维混凝土的强度等级对其碳化速度的影响,通过实验得出结论:当掺加钢纤维后,可以有效增加高强度等级的混凝土抗碳化能力,当钢纤维掺量的增加时,混凝土抗碳化能力也会随之降低。

程红墙[54]用试件尺寸为 100 mm 立方体试块用于测试试件冻融循环后的强度,在冻融温度为 $-19^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ 条件下,冻融循环 3.0 h。试验过程中,试件始终处于湿润状态。冻融循环次数为 0、25、50、75 次。实验得出,当冻融循环次数的增加时,混凝土的相对动弹模逐渐下降、质量损失率增大,劈拉强度的不断降低。加入钢纤维能有效提高混凝土抗冻性能。

由以上学者的研究探讨,我们可以总结出混凝土在加入钢纤维后可以有效提高混凝土的抗冻性能,抗碳化能力,但是会降低混凝土的动弹性模量,将来仍需进一步的探究。

3.2. 碳纤维

碳纤维是一种碳含量大于 90%的高强度、高弹性纤维。此外,它还具有优异的耐高温和耐腐蚀性,常用来作为增强材料,提升其他材料的各种性能。学者们为了探究碳纤维对混凝土各种性能的影响,进行了多种试验方法。

尹俊红[55]等人为了深入探究碳纤维对混凝土力学性能的直接影响,将碳纤维的长度以及掺量作为变量进行了多组试验。试验结果表明:总体上来看,碳纤维含量越高,混凝土的抗压强度越高。碳纤维含量达到一定水平,抗压强度的增强幅度就越来越小。试验还得出,碳纤维长度达到 20 mm 时,反而会影响混凝土的抗压性能。最终得出了最佳纤维长度为 10 mm,对混凝土的抗压强度的提升最为明显[56]。

孟欣[57]等人对碳纤维对混凝土力学性能的影响进行了大量研究。针对混凝土的冲击强度,对碳纤维

混凝土进行了冲击压缩试验。结果表明：碳纤维掺量越多，混凝土的抗冲击性能呈现先提高再降低的现象。并发现了当掺量为 0.2% 时，混凝土抗冲击性能的提升最大。也就是说 0.2% 是碳纤维的最优掺量。

毕磊[58]等人为了深入探究碳纤维对混凝土耐久性的直接影响，通过改变碳纤维的掺量，进行了混凝土耐久性的试验。研究表明：当碳纤维的掺量在 1% 以下时，混凝土的各种耐久性能得到了一定的提升。但是当掺量大于 1% 时，混凝土的耐久性能反而下降了。因此该试验的最佳纤维掺量为 1% [59]。

从以上学者们的研究分析，我们能够得出碳纤维的添加有助于提高混凝土的耐压强度，抗震性和耐久性，而具体影响受到碳纤维的掺入量和长度的影响，其规律大致呈随着掺量的增加而先增强后衰弱的趋势，将来仍需进一步的探究。

3.3. 玄武岩纤维

玄武岩纤维(Basalt fiber)是由天然矿石——玄武岩加工而来，享有“21 世纪的纯天然高性能纤维”的美誉[60]。玄武岩纤维的优点有很多：较高的弹性模量、良好的抗冻性与耐热性、耐腐蚀性等，玄武岩纤维与普通混凝土的密度也相差不大，两者之间拥有良好的粘结力，同时能增加混凝土的耐久性[61] [62] [63]。玄武岩纤维混凝土内部具有更合理的孔隙结构[64]，可以限制混凝土中裂缝的产生和扩展。根据玄武岩纤维混凝土在某些特定腐蚀环境下的防腐性能，一些专家也对此进行了相关研究[65]。结果表明，掺入玄武岩纤维的混凝土还能部分提高混凝土的耐腐蚀和耐碱性。

Dan F. Adkins [66]等人研究玄武岩纤维经过 1450℃~1500℃融化后，采用铂铑合金拉丝漏板高速控制而成的连续纤维，与混凝土具有天然的相容性，对混凝土有很好的增强增韧效果，被认为是“21 世纪的纯天然高性能纤维”。研究结果还表明，玄武岩纤维的掺入，对于混凝土的耐腐蚀以及耐碱性能具有一定提高作用。

刘永旺[67]等人为了探讨玄武岩纤维钢筋混凝土在高温后的力学性能，对应力 - 应变曲线和不同体积曲线进行力学试验，结果发现：随着温度的逐步升高，加入玄武岩纤维的混凝土的抗压强度不是呈线性关系，而是有一个先增大，后降低的过程。从不同温度组的拟合图中可以看出，前者呈线性增加关系，而后者呈非线性减小规律。

余彦锋[68]为了探讨玄武岩纤维混凝土的力学性能和渗透性，不同长度和混合的影响是抗弯强度试验和裂纹抗拉强度试验的影响。结果表明，加入玄武岩纤维可以提高其力学性能和抗渗透性，具有最佳价值。

通过以上这些学者们得出的结论，我们可以了解到玄武岩纤维的加入不仅能够明显提高混凝土的抗压强度和抗折强度等，还能提高混凝土的抗侵蚀性能等部分维度的耐用性能，从而有效地延长混凝土结构的使用寿命，但是在不同环境因素下玄武岩对混凝土不同性能指标的影响可能有所不同，所以仍需要大量实验证明多种因素下玄武岩对混凝土性能的影响方面与程度。

3.4. 耐碱玻纤

耐碱玻纤，全称耐碱玻璃纤维，也叫 AR 玻璃纤维。由于其具有优异的耐碱、抗腐蚀能力以及抗拉、抗弯等力学性能，因此，它是一种可用于加固混凝土的肋筋材料，也是一种广泛应用于高性能钢筋混凝土的新型绿色环保材料。

王威[69]等人为了深入研究了耐碱玻璃纤维对高性能混凝土抗裂性能的影响。通过添加不同量的耐碱玻璃纤维，记录裂纹数量、最大裂纹宽度和总裂纹面积，探讨其影响。通过对照组，研究了耐碱玻璃纤维对钢筋混凝土抗压和抗拉性能的影响。其结果表明：随着纤维掺量的增加，混凝土的裂纹条数逐渐减少，总开裂面积也有明显的降低，并得出当纤维掺量为 0.11% 时，能够较好的防止混凝土早期裂缝的出现。此外，与对照组相比，耐碱玻纤对混凝土的抗压性能影响不是很明显，不过混凝土的劈裂抗拉强度

和韧性大大提高，混凝土的抗裂性显著提高[70]。

李茜莎[71]等人探究了耐碱玻纤对轻质混凝土强度的影响。结果表明：轻质混凝土的抗压、抗拉强度随着耐碱玻纤产量的增加呈先增大后减小的趋势，也就是说过量的耐碱玻纤对轻质混凝土力学的影响反而有不利影响，通过数据分析当耐碱玻纤的掺量为 0.6 kg/m^3 ，其影响最为显著。

马少春[72]等人深入探讨了陶粒替代率和耐碱玻璃纤维含量对陶粒混凝土力学性能的影响。通过数据分析发现，陶粒混凝土的抗压强度、弹性模量等指标前期随着耐碱玻璃纤维含量的增加而增加，后期随着纤维的增加而降低。当陶粒替代率低于 20% 时，耐碱玻璃纤维陶粒混凝土的比强度优于对照组。最终确定最佳纤维含量为 0.3%，最佳陶粒替代率为 15% [73]。

陈志纯[74]等人深入探讨了不同耐碱玻璃纤维含量对蒸压砂加气混凝土各项力学性能的影响，并成立对照组作为对比，研究耐碱玻璃纤维在蒸压砂加气混凝土中的适用性。结果表明，耐碱玻璃纤维在混凝土中不易腐蚀，分散性好。通过数据分析得出，当纤维含量为 0.3% 时，纤维对混凝土力学性能的增强效果最好。

从以上学者们的探究分析，我们可以得出由于耐碱玻纤自身耐碱、不易腐蚀、抗拉、抗裂、抗冻的特点，混凝土的力学性能，如抗拉强度、抗裂性和部分耐久性，可以通过适当的添加得到显著改善。然而，为了保证耐碱玻璃纤维的加固效果和结构的安全可靠，有必要保持玻璃纤维在混凝土中的长期强度和韧性。但项目使用的水泥基材料会腐蚀耐碱玻璃纤维，破坏材料的性能稳定性，降低材料强度[75]。

4. 其他纤维

植物纤维混凝土体的组织结构及其主要含纤维成分的通常来源是由天然的纤维素、半纤维素、木质素、果胶类物以及有少量的蜡质物类等的天然物质。在与水泥的外承表面的荷载共同作用的状态前提下，植物纤维也能够同时与钢筋混凝土水泥基体共同作用，能大大提升混凝土力学性能。

李超飞[76]等人通过将两种不同比例掺沙量和不同颗粒形态含量的干稻草秸秆纤维掺沙入钢筋混凝土模板中并测试混凝土养护时间 8 d 左右后钢筋的变形力学性能，随着干稻草纤维含量比例的持续增加，混凝土结构的变形抗压强度、劈裂时抗拉强度系数和扭转抗弯强度也都会有所降低。

张昌[77]等人也通过试验结果发现，添加了竹纤维材料可以明显大大的提高了混凝土钢筋的抗劈裂与抗拉断强度，这也与李超飞等的实验研究所得结果的不充分一致。

白诗淇[78]等人的指出由于竹纤维的抗拉剪切强度通常为在 350 MPa 至 500 MPa 范围[79]，比其它秸秆纤维都高强得多，当裂纹已经发展严重到能与普通竹纤维断裂相交处时，竹纤维仍然可以继续承受到更大限度的断裂拉力作用来尽量阻止这种裂纹发生的继续发展。

Ramakrishna [79]等人分别运用剑麻纤维、黄麻纤维、椰壳纤维和木槿大麻素纤维 4 种不同的纤维运用不同的方法浸入不同的溶液中进行研究，发现四种纤维中的木质素、半纤维素和纤维素成分均减少，并且被腐蚀的纤维起到增强水泥抗压、抗折的效果也不如未被腐蚀的纤维。于是得出植物纤维混凝土的耐腐蚀性并不出色的结论。为了解决这类问题，通常是对纤维进行预泡处理，或者加入粉煤灰、硅灰等替代一些水泥，也有采用低碱水泥等手段。

通过以上这些学者们得出的结论，我们可以了解到不同种类的植物纤维对混凝土起着可能完全不同的影响，比如稻草秸秆的加入可能降低了混凝土的抗拉抗弯强度，但是竹纤维的加入却能大大提升其力学性能，同时只有适当掺量的纤维才能完全发挥植物纤维混凝土的优势。

5. 增强机理

纤维通过在混凝土基体中形成局部空间结构来增强混凝土，有效地克服了骨料颗粒的相对滑移。由

于存在纤维，混凝土的开裂部分仍然可能有效结合在一起，减缓了裂缝的扩张速度，并使混凝土保持了较高的变形能力。根据高春妹[80]的研究，纤维与混凝土之间的粘结力相当好，且纤维与混凝土相互之间的作用力是化学连接力，而非普通的物理机械连接。当今主要有如下三种理论：

5.1. 多缝开裂理论

根据多缝开裂理论假设，当在混凝土中加入纤维后，其特性主要取决于纤维的体积比大小。当纤维的体积比大于临界体积比大小时，则纤维在混凝土的受拉区开裂位置上承受了全部载荷，将应力传导到周围尚未破裂的基体上。当所施加的应力不断增大时，周围的基体不断断裂，形成更多断裂现象。这样就有效地改善了混凝土材料低破坏性能的特征。

5.2. 复合材料力学理论

该学说以复合材料力学中的混合规律为基点，它说明了复合材料的整体抗拉力和弹性模量，及其复合材料中各组成部分特性之间的弹性叠加关系都是一致的。该理论主要研究了纤维混凝土的横向抗拉强度，以及纤维与基体之间的黏结能力和玻璃纤维长径比间的关系，并考虑了纤维的连续性、分散与均匀性能，以及在基体中的均匀分布方向等对补强能力的影响。该理论可以做出判断，在复合材料中各部分的弹性叠加与在纤维和基体之间的黏附力和纤维中一些参数间的相关系数之间是完全没有分歧的，除此之外还慎重地考虑了纤维不间断性、分布均匀性和纤维在混凝土基体中的分布方向对增强效果的改变，一致认定复合材料中每一个组分的弹性组合相加与本身的强度和弹性是相容的(如图 1 所示)。

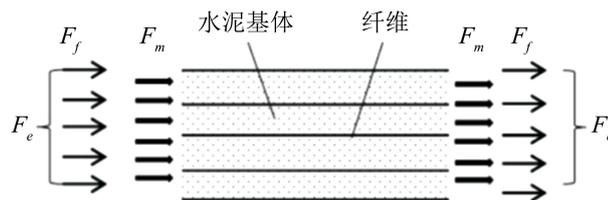


Figure 1. Theoretical model of fiber composites

图 1. 纤维复合材料理论模型

5.3. 纤维间距理论

该理论以弹性断裂力学为基础，指出弹性断裂力学在混凝土结构的产生和破坏过程中起着重要作用，在基体中掺入纤维可以有效地提高基体的抗裂纹扩展能力，达到纤维加固混凝土的目的。纤维间距的概念可以简单地解释为：当纤维在混凝土基体中各个部分分布数量大致相同时，能够有效地阻碍混凝土块体中的小型裂缝。认为混凝土基体容易产生微裂纹，裂缝的产生和发展受到添加纤维的约束，导致仅仅能在混凝土基体中发生没有危害的结构空腔或尺寸半径较小地空腔，这一理论在这一层面上与第二条理论存在一定地关联(如图 2 所示)。

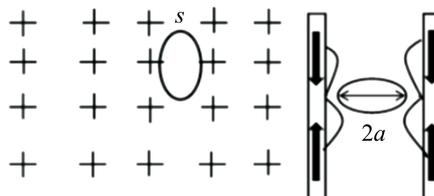


Figure 2. Theoretical model of fiber spacing

图 2. 纤维间距理论模型

6. 结语

从整体上来讲,混凝土是多种材料组成的混凝土,不同种类以及掺量的纤维对混凝土的性能影响各不相同,而且从大量的参考实验中可以总结出纤维的加入对混凝土的力学性能和耐久性能等普遍有着不同程度的提高。并且随着混凝土越来越广泛的运用,混凝土对不同极端环境下的抗性需求也越来越大,此时纤维对混凝土抗冻、抗侵蚀等性能的提升有着极大的优势,使混凝土满足不同情况下的需求。本文从纤维种类、长度、直径、掺量等方面梳理了纤维对混凝土性能的影响。在混凝土生产过程中,按照实际情况对纤维加入混凝土进行严格的控制和检测,使其符合规范和实际使用要求,确保加入纤维后混凝土的性能达到最佳的效果。本文系统整理了不同种类纤维混凝土的相关研究现状,希望为今后的研究和发 展提供参考与帮助,在未来可以通过一个标准来衡量不同环境下在混凝土中加入何种纤维、纤维掺量的多少等,以充分发挥纤维混凝土的优势,满足不同的需求。

基金项目

江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目“多尺度纤维增强混凝土力学性能和耐久性能研究”(202111117106Y)阶段性研究成果。

参考文献

- [1] 张强强. 柔性纤维混凝土阻裂机理及在连续刚构桥中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [2] 梁宁慧. 多尺度聚丙烯纤维混凝土力学性能试验和拉压损伤本构模型研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [3] 何杰. 多尺度纤维组合增强超高性能混凝土应变硬化效果研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [4] 余春. 高性能聚丙烯纤维混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [5] 王兆. 聚丙烯纤维、纤维素纤维对衬砌混凝土性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [6] 武海轮, 陈景, 李琪, 王福涛. 钢纤维与聚丙烯纤维复合机场道面混凝土性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4): 53-58. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2018.04.013>
- [7] 张悦. 聚丙烯纤维混凝土力学性能及损伤破坏形态研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [8] 梁宁慧, 刘新荣, 孙霁. 多尺度聚丙烯纤维混凝土抗裂性能的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1304-1309. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2012.08.005>
- [9] 周鹏, 刘永军. 基于正交试验的聚丙烯纤维再生混凝土力学性能分析[J]. 合成纤维, 2022, 51(1): 53-56. <https://doi.org/10.16090/j.cnki.hcxw.2022.01.019>
- [10] Ccasani, J., Eduardo, C., Rodriguez, J. and Eyzaguirre, C. (2021) Characterization of the Physical and Mechanical Properties of Concrete with Polypropylene Fibers for Solid Mezzanine Slabs of Multi-Family Homes. *Materials Science Forum*, **1033**, 172-177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1033.172>
- [11] 朱江, 苏健波, 李士恩. 聚丙烯纤维混凝土的力学性能研究[J]. 广西工学院学报, 2000(2): 60-64. <https://doi.org/10.16375/j.cnki.cn45-1395/t.2000.02.017>
- [12] 杨虹. 聚丙烯纤维胶粉轻骨料混凝土力学及抗冻性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [13] 汪华莉. 聚丙烯纤维长度和掺量对混凝土耐久性影响试验研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(9): 63-65.
- [14] 刘肖凡, 林武星, 李继祥. 刚性聚丙烯纤维改性透水混凝土耐久性性能研究[J]. 混凝土, 2017(1): 133-136.
- [15] 张克纯. 聚丙烯-玄武岩混杂纤维混凝土的耐久性性能研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(5): 45-47+51.
- [16] 梁宁慧, 严如, 田硕, 刘新荣, 许益华, 郭哲奇. 预加荷载下聚丙烯纤维混凝土抗渗机理研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(9): 155-162. <https://doi.org/10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2021.09.017>
- [17] Ranjith, S., Venkatasubramani, R. and Sreevidya, V. (2017) Comparative Study on Durability Properties of Engineered Cementitious Composites with Polypropylene Fiber and Glass Fiber. *Archives of Civil Engineering*, **63**, 83-101. <https://doi.org/10.1515/ace-2017-0042>

- [18] 张丽辉, 刘建忠, 周华新, 阳知乾. 聚甲醛纤维对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(1): 58-62. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2018.01.013>
- [19] 胡昱, 牛旭婧, 杨宁, 李庆斌, 牟荣峰, 乔雨, 鹿永久, 刘伟佳. 低热水泥混凝土早期塑性开裂风险研究[J]. 混凝土, 2021(3): 19-22+26.
- [20] 吕锦飞. 聚甲醛纤维混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2019. <https://doi.org/10.27441/d.cnki.gyzdu.2019.001695>
- [21] 唐百晓. 热力耦合作用下纤维混凝土力学性能研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(5): 93-98. <https://doi.org/10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.05.017>
- [22] 杨富花, 石宵爽, 栾晨晨, 张宽裕, 代金芯, 王清远. 聚甲醛纤维增强地聚物再生混凝土的力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(5): 52-56+70.
- [23] 马海鹏, 杜智超, 尹迪. 再生塑料混凝土复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(10): 13-16. <https://doi.org/10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2021.10.004>
- [24] 安宇坤, 王亚涛, 李建华, 金旺, 胡晨光, 姚少巍, 刘刚, 马旺坤, 封孝信. 聚甲醛纤维混凝土抗收缩与抗渗透性研究[J]. 混凝土世界, 2019(3): 64-67. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2019.068075>
- [25] Yu, R., Liu, K., Yin, T., Tang, L., Ding, M. and Shui, Z. (2022) Comparative Study on the Effect Steel and Polyoxymethylene Fibers on the Characteristics of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*, **127**, Article ID: 104418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104418>
- [26] 王天琪, 杨鼎宜, 谈永泉, 范志勇. 混凝土用聚甲醛纤维的耐碱性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(12): 52-55. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2019.12.052.04>
- [27] 王金辉, 葛晨, 谈永泉, 俞君宝. 合成纤维混凝土弯曲韧性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(11): 61-65. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2020.11.061.05>
- [28] 胡晨光, 王亚涛, 李建华, 金旺, 贾援, 姚少巍, 刘刚, 安宇坤, 封孝信. 聚甲醛纤维水泥砂浆耐紫外老化性能的研究[J]. 混凝土世界, 2019(1): 60-64. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2019.068076>
- [29] 田国峰, 李建华, 战佳宇, 王亚涛, 武德珍. 聚甲醛纤维对砂浆性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(7): 51-54. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2017.07.011>
- [30] 马立杰, 杨春风. 掺加纤维对高模量沥青混合料柔韧性及路用性能影响研究[J]. 功能材料, 2019, 50(1): 1164-1173+1177.
- [31] 章汪琛, 扈惠敏, 熊亮, 黄欢. 不同纤维沥青胶浆抗剪切性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4890-4895.
- [32] 于华洋, 马涛, 王大为, 王朝辉, 吕松涛, 朱兴一, 刘鹏飞, 李峰, 肖月, 张久鹏, 罗雪, 金娇, 郑健龙, 侯越, 徐慧宁, 郭猛, 蒋玮. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001>
- [33] 李丽华, 万畅, 梅利芳, 裴尧尧, 高萌, 陈艳君, 罗诗哲. 玻璃纤维水泥土无侧限抗压强度特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(3): 252-256. <https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2018-03-011>
- [34] 樊健生, 刘入瑞, 张君, 杨松, 艾祖斌, 陈钊. 采用混杂纤维 ECC 的叠合板组合梁负弯矩受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 57-67. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.2021.04.007>
- [35] 陈港, 包超, 车佳玲, 杨淑雁, 林加胜. 钢管-纤维增强水泥基复合材料混凝土叠合柱轴压性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2823-2829.
- [36] 刘洋, 欧忠文, 朱卡尔, 罗伟, 王聚瑞, 李灿. 增强纤维对超高性能混凝土改性效果及优化研究[J]. 合成纤维, 2019, 48(8): 30-34. <https://doi.org/10.16090/j.cnki.hcxw.20190813.005>
- [37] 李捷斌, 王飞龙. 合成纤维对超高韧水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 合成纤维, 2019, 48(7): 40-42+55. <https://doi.org/10.16090/j.cnki.hcxw.20190709.001>
- [38] 王涵, 刘心洁, 王聪, 程树良, 辛亚军. 纤维增强自密实混凝土高温性能研究综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(4): 64-68. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2021.04.064.05>
- [39] 梁腾飞, 杨瑞娟, 赵伟. 聚乙烯醇纤维混凝土抗压力学性能及加固机理研究[J]. 高科技纤维与应用, 2021, 46(5): 47-51.
- [40] 赵阳, 贾晓东, 梁乃兴, 陈思雨. 基于分散技术的聚乙烯醇纤维沥青胶浆疲劳性能分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13886-13892.
- [41] Consoli, N.C., Vaz Ferreira, P.M., Tang, C.S., et al. (2016) A Unique Relationship Determining Strength of Silty/Clayey Soils—Portland Cement Mixes. *Soils and Foundations*, **56**, 1082-1088.

- <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.11.011>
- [42] 牛海成, 高锦龙, 李博涵, 范玉辉, 王永贵. PVA-钢纤维对高强再生骨料混凝土梁抗弯性能的影响[J/OL]. 复合材料学报: 1-13. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211110.003>, 2021-12-10
- [43] 陈宇良, 吉云鹏, 陈宗平, 叶培欢, 吴辉琴. 钢纤维再生混凝土三轴受压力学性能试验[J/OL]. 复合材料学报: 1-11. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210903.006>, 2021-12-08
- [44] 叶门康, 林东, 刘冠升, 郭武广, 吴琼景. 钢纤维规格对超高性能混凝土性能的影响[J]. 广东建材, 2021, 37(9): 30-31.
- [45] 周聪, 何文昌, 孔祥清, 郑泽宇, 王学志. 钢纤维再生混凝土抗冲击性能研究[J]. 混凝土, 2021(5): 36-41.
- [46] 马煜东, 马恺泽, 魏慧, 刘伯权. 掺入不同尺寸钢纤维的高强混凝土深梁抗剪性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 20-27+38.
- [47] 张相凯. 钢纤维再生粗骨料混凝土的力学性能试验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(4): 34-37.
- [48] Kalpana, M. and Tayu, A. (2020) Light Weight Steel Fibre Reinforced Concrete: A Review. *Materials Today: Proceedings*, **22**, 884-886. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.095>
- [49] Lee, J.-Y., Yuan, T., Shin, H.-O. and Yoon, Y.-S. (2020) Strategic Use of Steel Fibers and Stirrups on Enhancing Impact Resistance of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Cement and Concrete Composites*, **107**, Article ID: 103499. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103499>
- [50] Kosa, K. and Naaman, A.E. (1990) Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Materials Journal*, **87**, 27-37.
- [51] Alsaif, A., Bernal, S.A., Guadagnini, M. and Pilakoutas, K. (2018) Durability of Steel Fibre Reinforced Rubberised Concrete Exposed to Chlorides. *Construction and Building Materials*, **188**, 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.122>
- [52] 张紫键. 钢纤维种类对玄武岩纤维混凝土力学性能的影响及耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. <https://doi.org/10.27229/d.cnki.gmnu.2021.000880>
- [53] 潘慧敏. 钢纤维混凝土碳化和钢筋锈蚀性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [54] 程红强, 高丹盈, 朱海堂. 钢纤维混凝土抗冻耐久性能试验研究[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集. 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会纤维混凝土委员会: 中国土木工程学会, 2008: 231-233.
- [55] 尹俊红, 纪艳春, 赫中营, 耿腾飞. 碳纤维增强混凝土力学性能研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 699-705.
- [56] 娄蒙凡, 张建伟, 李荣翔, 丁乐, 樊亚龙. 碳纤维增强复合桩水平承载特性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 102-108.
- [57] 孟欣, 白二雷, 王志航, 吴云泉, 杨宁. 碳纤维增强聚合物混凝土抗冲击性能试验研究(英文) [J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20211014.1309.002.html>, 2021-12-01
- [58] 毕磊, 刘源. 碳化环境下碳纤维-混凝土复合材料的耐久性分析[J]. 林产工业, 2020, 57(8): 29-32+40.
- [59] 季强. 环保节能型纤维混凝土制备及其性能研究[J]. 林产工业, 2021, 58(1): 11-14.
- [60] 杨军. 玄武岩纤维对高性能混凝土性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [61] 蒋威, 张智雅, 严寒, 杨金, 许陈聪, 贾思宁. 玄武岩纤维混凝土的研究现状及发展[J]. 建材发展导向, 2019, 17(8): 9-12. <https://doi.org/10.16673/j.cnki.jcfzdx.20190416.014>
- [62] 王海良, 钟耀海, 杨新磊. 玄武岩纤维混凝土研究进展与建议[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 639-643. <https://doi.org/10.13204/j.gyjz2013.s1.020>
- [63] 张向冈, 秦文博, 田琦, 汪昉, 范玉辉. 玄武岩纤维混凝土材料性能研究进展[J]. 混凝土, 2018(2): 94-97.
- [64] 张兰芳, 王道峰. 玄武岩纤维掺量对混凝土耐硫酸盐腐蚀性和抗渗性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1946-1950. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.06.024>
- [65] 赵燕茹, 刘芳芳, 白建文, 王立强. 玄武岩纤维混凝土抗盐冻性能试验研究[J]. 混凝土, 2019(8): 68-71.
- [66] Adkins, D.F., Merkley, G.P. and Brito, G. (1993) Mathematics of Concrete Scaling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **5**, 280-288. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:2\(280\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:2(280))
- [67] 刘永旺, 刘磊, 孟祥. 不同温度和掺量条件下玄武岩纤维混凝土力学性能研究[J/OL]. 化工矿物与加工: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1492.TQ.20210923.2340.004.html>, 2022-01-21.
- [68] 余彦锋. 玄武岩纤维混凝土力学性能及抗渗性研究[J]. 科学技术创新, 2021(25): 135-138.
- [69] 王威, 宿利平, 姜瑞双. 耐碱玻纤改善高性能混凝土抗裂性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(3): 48-51.

- <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2021.03.048.04>
- [70] 代腾飞. 水泥混凝土桥面铺装层早期开裂控制及层间粘结性能提升研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2021. <https://doi.org/10.27034/d.cnki.ggxii.2021.000311>
- [71] 李茜莎. 耐碱玻纤和粉煤灰对轻质混凝土强度及冻融耐久性的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 51-55+60. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2020.05.051.06>
- [72] 马少春, 贾鹏举, 鲍鹏, 袁其梦. 耐碱玻纤增强陶粒混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(12): 45-49. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2020.12.045.05>
- [73] 王辉明, 贺正波, 朱文. 钢纤维轻骨料混凝土细观均匀化及受扭构件极限承载力研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3376-3384. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20210805.002>
- [74] 陈志纯, 李应权, 扈士凯, 史志花. 高耐碱玻纤在蒸压砂加气混凝土中的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(1): 136-138+143.
- [75] 邓宗才, 薛会青, 王力, 曾洪超, 张磊. 耐碱玻璃纤维混凝土的弯曲韧性[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(5): 23-24.
- [76] 李超飞, 苏有文, 陈国平, 王飞. 稻草纤维混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2013 (10): 30-32+37.
- [77] 张昌, 黄真, 王贤栋, 陈国维. 竹纤维增强混凝土的力学性能与计算方法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(1): 220-225.
- [78] 白诗淇. 植物纤维混凝土性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(24): 73-75. <https://doi.org/10.13612/j.cnki.cntp.2020.24.024>
- [79] Ramakrishna, G. and Sundararajan, T. (2005) Studies on the Durability of Natural Fibres and the Effect of Corroded Fibres on the Strength of Mortar. *Cement & Concrete Composites*, 27, 575-582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008>
- [80] 高春妹. 玄武岩纤维沥青混凝土性能研究与增强机理微观分析[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.