

钢纤维对混凝土物理力学性能及耐久性研究综述

魏华北¹, 安巧霞^{1,2}, 肖涛¹, 彭明岭¹

¹塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

²南疆岩土工程研究中心, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

素混凝土结构由于延性不足, 受压区混凝土易被压碎而使结构提前失效, 所以在素混凝土结构受压区采用钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)替代素混凝土, 合理利用钢纤维粘结的作用, 非常有效地控制了混凝土裂缝的产生和发展。所以, 钢纤维混凝土力学性能的研究对推广钢纤维混凝土结构的应用具有非常重要的意义。本文对钢纤维混凝土国内外研究现状和发展趋势做了相关陈述, 对于不同掺量的钢纤维对混凝土力学性能的影响进行了讨论, 得到比较合适的钢纤维掺量, 对钢纤维的长度、长径比对混凝土的影响进行了探讨, 得到较合适的钢纤维长度和长径比, 对钢纤维分散、定向对混凝土的影响进行了研究, 找到比较合适的钢纤维取向。深入探讨了钢纤维对混凝土耐久性性能的影响。

关键词

钢纤维, 力学性能, 耐久性

Review of Research on Physical Mechanical Properties and Durability of Concrete by Steel Fiber

Huabei Wei¹, Qiaoxia An^{1,2}, Tao Xiao¹, Mingling Peng¹

¹School of Water Resources and Construction Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang

²South Xinjiang Geotechnical Engineering Research Center, Alar Xinjiang

Received: Mar. 2nd, 2023; accepted: Mar. 23rd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

Due to the insufficient ductility of plain concrete structure, the concrete in the compression zone

文章引用: 魏华北, 安巧霞, 肖涛, 彭明岭. 钢纤维对混凝土物理力学性能及耐久性研究综述[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 407-414. DOI: 10.12677/hjce.2023.123045

is easy to be crushed and the structure fails in advance. Therefore, Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is used to replace plain concrete in the compression zone of plain concrete structure, and the bonding effect of steel fiber is rationally utilized. It is very effective to control the generation and development of concrete cracks. Therefore, the study of the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete is very important to popularize the application of steel fiber-reinforced concrete structures. In this paper, the research status and development trend of steel fiber coagulation at home and abroad are stated. The influence of different dosages of steel fiber on the mechanical properties of concrete is discussed and the appropriate dosage of steel fiber is obtained. The influence of the length and length-diameter ratio of steel fiber on concrete is discussed and the appropriate length and length-diameter ratio of steel fiber is obtained. The influence of steel fiber dispersion and orientation on concrete is studied and the suitable orientation of steel fiber is found. The influence of steel fibers on the durability performance of concrete is explored in depth.

Keywords

Steel Fiber, Mechanical Properties, Durability

Copyright © 2023 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

硅酸盐水泥自从发明以来到现在已经快有两百年的历史了，其制作成的混凝土具有高强度、高耐火性、取材方便、价格便宜、工法简单等一系列的优点，被广泛运用到现代的工程当中[1]。但是，混凝土在实际的使用中也存在许多缺点，比如自重重大、脆性大、混凝土抗拉强度较低、易裂，因此，普通混凝土结构经常带裂缝工作，混凝土结构在设计中常忽略环境对其性能，尤其是耐久性能方面的影响，使得混凝土结构经常过早失效。

南疆地区的特殊气候环境对其南疆地区的混凝土结构的破坏是非常严重的，比如道路的变形问题、对道路盐-冻胀变形、对道路水稳层破坏效应[2] [3]。因此，对于南疆的特殊气候环境，提高其混凝土结构的韧性、延性、耐久性等性能是非常有必要的。一直以来也有大量的学者来研究，钢纤维混凝土在工程中的运用十分广泛，比如在结构工程、路面工程、水利电力以及其他工程[4]。钢纤维乱向分布时可以有效地阻止混凝土内部微裂缝的扩展，可以明显改善混凝土的力学性能，具有较好的延性[5]。

2. 不同掺量钢纤维对混凝土力学性能的影响

2.1. 钢纤维混凝土对韧性的影响

钢纤维混凝土对韧性的影响，樊俊江等[6]采用了钢、聚乙烯醇和聚丙烯等3种粗纤维，取比例0%、0.5%、1%、1.5%、2%掺入到混凝土进行对比试验，钢纤维对混凝土韧性的改善远高于其他两种粗纤维。陈立福等[7]通过对钢-聚丙烯混合纤维混凝土的抗裂性能进行研究，研究成果表明，混凝土中产生裂缝之后，发现裂缝端部与纤维相交后，因为有纤维的存在，所以裂缝的扩展将被抑制。张远鹏等[8]进行了相关试验研究，结果表明，钢丝纤维可以影响及改变试件的破坏方式，使得纤维混凝土在极限压应变情况下不至于像素混凝土那样发生脆性的突然性崩裂，而是表现出了一定的韧性，出现了许多裂缝与蜕皮现象。黄瑞源等[9]、柳艳杰等[10]的研究结果表明，当钢纤维掺入率为1.5%时，对抗压强度的影响达到最佳，显著提高了材料韧性，使抗压强度由64.2 MPa提高到72.8 MPa，峰值压应力对应的应变由0.0049

提高到 0.0087。钟晨等[11]试验结果则表明, 钢纤维掺入率分别取 0.75%、3%时, 抗压强度较普通混凝土能增加 23%和 55%, 钢纤维掺入率的增大显著增加了受压韧性。杨松霖等[12]、张晓燕等[13]通过对不同钢纤维体积率、聚丙烯纤维掺量下研究, 发现混凝土的弯曲初裂强度、等效弯曲强度、弯曲韧性比以及弯曲韧性指数都会随着钢纤维体积率的增加而得到显著提高。胡锐等[14]通过钢纤维体积掺量对超高性能混凝土柱破坏形态的研究, 发现随着钢纤维体积掺量的提高, 混凝土的压碎剥落现象得到显著改善, 减缓了受压钢筋屈曲现象的发生, 因此提高了柱的延性。韩建平等[15]通过对钢-PVA 混杂纤维增强混凝土轴心受压研究, 发现延性破坏。

2.2. 钢纤维混凝土对拉压的影响

Khaloo 等[16]认为, 当混凝土强度增大, 钢纤维对其抗压能力的增幅逐渐减小, 增幅降低原因为混凝土密实性因为钢纤维的掺入而降低。Marar [17]采用四种不同掺入率的钢纤维对混凝土进行了轴压试验, 根据所得应力 - 应变曲线, 他认为钢纤维的掺入率越高, 混凝土的压缩变形的能力变得越强。Bencardino 等[18]对钢纤维体积率为 1%、1.6%和 3%的混凝土圆柱体进行了试验, 极限压应变都超过现行国外设计规范采用的 0.0035, 对后两种较高体积含量, 极限压应变可达现行规范的 3~5 倍, 且相应于压应变 0.01 的残余强度分别可达峰值应力的 74%和 78%, 但对 1%含量钢纤维混凝土, 对受压软化段的影响不明显。崔涛等[19]研究了混杂纤维混凝土在单轴受压时的性能, 纤维分为钢纤维、聚乙烯醇、聚丙烯纤维, 能使残余应力达到峰值应力的 27.2%~35.3%, 峰值应变达到普通混凝土的 2.5~4.4 倍, 通过与多种模型的拟合, 建立了与试验结果吻合度最高的本构关系。张常安[20]对铰削型钢、玻璃、聚丙烯单丝、聚丙烯网状等纤维进行了受压试验, 他认为钢纤维对抗压强度的增长优于另外三种纤维。蔡鹏飞等[21]、郑辉[22]掺入体积率为 0.5%的 PVA 纤维和 1.25%的钢纤维时, 混杂纤维对基体的增强效果较好。张仓[23]研究发现, 钢纤维体积率为 0.5%时, 混凝土劈裂抗拉强度提高 14%, 相对应的钢纤维混凝土试件力学性能表现更佳。杨艳敏等[24]通过研究钢纤维体积掺量为 0、1%、2%时的全轻混凝土试块, 进行力学性能实验, 得到钢纤维能够有效地限制全轻混凝土试块裂缝的扩展。牛龙龙等[25]通过研究钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响, 得到钢纤维体积掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的混凝土进行实验时, 随着钢纤维掺量增加, 混凝土力学性能显著提高。柳艳杰等[10]通过研究钢纤维掺入率得到, 混凝土抗压、抗拉强度随钢纤维掺量增加而增大, 钢纤维的掺入可以有效地提高混凝土的力学性能。

2.3. 钢纤维混凝土对劈裂的影响

张雪梅等[26]通过研究发现, 当钢纤维掺量为 4.0%时, 试样的混合效应系数可以达到 1.35, 此时产生正混合效应可以提升高性能混凝土试样的劈裂抗拉强度, 所以, 钢纤维的混合效应提升了试件的劈裂抗拉强度。张振雷[27]研究素纤维掺量为 1.6 kg/m^3 时, 其力学性能较普通混凝土分别提高了 13.94%、35.46%、18.75%。谢雨霏等[28]研究发现, 对抗压强度, 钢纤维的最优体积掺量为 0.8%。钢纤维体积掺量为 0.5%时, 劈裂抗拉强度比普通混凝土提高了 15.56%, 钢纤维的最优掺量为 1.3%。

2.4. 钢纤维混凝土对冲击的影响

王贤栋[29]通过钢纤维的纤维掺入量进行了相关的实验研究, 通过研究发现了混凝土试件的整体性得到了很好的改善, 钢纤维混凝土的抗冲击性能得到了明显的改善; 其中以混合纤维的抗冲击性能测试得到其抗冲击性能提高幅度最为显著。Wang 等[30]通过研究用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)对圆柱形钢纤维混凝土进行了动态冲击试验, 通过相关的实验研究得到的结果显示, 随着钢纤维掺量的增加, 混凝土的破坏模式是由脆性进而向韧性慢慢发生改变。Yoo 等[31]通过研究时采用准静态试验和落锤式冲击试验

机进行了相关的测试研究,对钢纤维混凝土梁在准静态状态下进行了相关的冲击荷载作用下的受弯性能的测试,实验结果表明,冲击荷载下纤维含量和残余弯曲性能的影响。梁一鸣等[32]通过研究,分别对钢纤维掺量进行了相关的实验研究,钢纤维的掺量百分比分别为 0、0.5%、1.0%,在不同掺量下进行了高强混凝土的冲击压缩试验研究,经过实验研究表明,钢纤维高强混凝土受冲击压缩作用后其展现出来呈脆性破坏特征,然后当钢纤维的掺量在 1.0%时,在大气压为 1.0 MPa 下,动态的抗压强度值是可以达到 180.9 MPa。

综上所述可以得出,钢纤维的掺量对混凝土是有影响的,钢纤维能够有效地增强钢纤维混凝土的力学性能。钢纤维的掺入率的提高对试件的抗压强度、极限压应变时的残余强度、变形能力等均能得到有效的提升等。掺入钢纤维是可以增加钢纤维混凝土韧性的,其韧性也随钢纤维掺量的增大而有所提升;钢纤维的掺入可以有效地增强混凝土的力学性能,有效地提高了混凝土试块的抗劈裂、抗拉强度;钢纤维混凝土在受冲击压缩作用后其呈现出来的特征是呈脆性破坏特征等。

3. 钢纤维的长度、长径比对混凝土的影响

Lee 等[33]通过对端钩型钢纤维混凝土受压性能的研究,他认为钢纤维长径比和纤维体积含量是影响峰值应力对应的应变以及软化阶段性能的主要因素。李川川[34]、李世超等[35]对钢纤维混凝土进行了轴压试验,二者均认为更短的纤维更能填补混凝土内部的间隙,增韧效果也是随着钢纤维掺入率的增加而有所提高。其中,比较短的钢纤维对混凝土抗压能力的提升更加明显。李悦等[36]通过试验研究,得到了与上述相反结论,他认为当钢纤维掺量提高时,钢纤维对混凝土抗压强度的影响比较小,更长的钢纤维对混凝土抗压能力的提升更明显。

张裕显[37]通过研究纤维长度为 12 mm、体积掺量为 0.1%时,得到透水混凝土抗压强度和抗折强度最大,分别为 27.4 MPa、4.07 MPa。于晓伟等[38]研究在聚乙烯(PE)纤维体积掺量固定为 1%时,钢纤维体积掺量分别为 0、0.3%、0.6%、0.9% 4 种工况下,较低的体积掺量可以有效提升试件的抗压强度,直径越小的钢纤维试件抗压性能越好。马恺泽等[39]通过研究发现,当钢纤维长度不一样时,在长、短钢纤维混掺比例合适时,钢纤维混凝土的抗劈裂、抗拉强度也有所增加。在不同长度的钢纤维,当长、短钢纤维混合相掺时,对钢纤维混凝土的韧性改善效果是非常的明显,当长钢纤维掺量为 1.50%与短钢纤维掺量为 0.50%时,两种不同钢纤维相互混掺时,可以达到很好的增韧效果。

戴涛[40]通过研究钢纤维混凝土受压试验,对钢纤维掺量、分布方向,其中包括乱向分布和定向分布情况,对试件进行了相关的研究。研究结果表明,试件的弯曲抗拉强度、韧性随着方向效应系数提高得到提高,构件的初裂性能决定于基体的本身强度。水胶比、钢纤维长度、掺量相同时,随着钢纤维长度的增加,构件的抗拉性能得到明显的提高。李悦等[36]通过研究发现,钢纤维混凝土的流动性随着钢纤维掺量的增加而降低,随着钢纤维掺量的增加,钢纤维混凝土的抗压强度、韧性、劈裂强度和抗冲击性都有提高。马煜东等[41]通过研究发现,短钢纤维主要起到对基体的增强作用,抑制裂缝的扩展,提高构件的抗裂能力。张亚芳等[42]研究不同尺寸的钢纤维在混凝土中产生协同作用,且当长、短纤维的混杂比例接近时,混杂性能达到最佳。

综上所述可以得出,直径越小的钢纤维试件抗压性能越好,随着钢纤维掺量的增加,钢纤维混凝土的力学性能均有不同程度的提高,当长、短纤维的混杂比例接近时,混杂性能最佳等。钢纤维的长度对混凝土也有一定的影响作用,短钢纤维能更好地增强混凝土力学性能,更好地抑制混凝土内部微裂缝的发展。

4. 钢纤维取向对混凝土的影响

Alberti 等[43]的研究表明,当钢纤维长度越长、试模底部纤维占比越多时,钢纤维分散越不均匀。

当长径比不变时, 体积掺量越大, 钢纤维之间越容易发生碰撞和机械互锁。钢纤维之间的碰撞会导致额外的能量损耗, 降低拌合物的流动性, 从而导致分散性更差。丁亚红等[44]通过试验测定掺入不同钢纤维量及不同掺入方式对混凝土力学性能及流动性的影响得出, 掺入方式对混凝土流动性能的影响比力学性能更为显著。随着钢纤维掺量的增大至 1% 后, 将钢纤维加入混凝土的方式改为钢纤维等体积取代骨料并改变砂率的方式得到的混凝土性能更佳。

田稳苓等[45]通过研究发现, 定向钢纤维要明显高于相同掺量的乱向钢纤维, 定向钢纤维构件的临界等效裂缝长度小于相同掺量的乱向钢纤维构件。魏磊磊等[46]通过研究发现, 断裂过程损伤特性受纤维掺量影响较大。苟鸿翔等[47]研究发现, 随着钢纤维掺量的增加, 乱向分布钢纤维混凝土(L-UHPC)的抗压强度先增大后减小, 定向分布钢纤维混凝土(D-UHPC)的抗压强度继续增大。

综上所述可以得出, 钢纤维取向对混凝土有一定的影响作用钢纤维长度越长, 试模底部纤维占比越多, 分散越不均匀, 效果越差, 增加纤维掺量可有效改善定向钢纤维混凝土的损伤特性, 乱向分布钢纤维混凝土的抗压强度先增大后减小等。定向分布的钢纤维混凝土力学性能要优于乱向分布的钢纤维混凝土。

5. 钢纤维对混凝土的耐久性性能影响

5.1. 抗盐腐蚀性及抗冻性

Kosa 等[48]研究通过对加速腐蚀试验研究发现, 钢纤维腐蚀程度对混凝土性能的影响, 结果显示, 腐蚀钢纤维的钢纤维混凝土的抗拉强度和抗弯强度都有所下降, 但是对抗压强度的影响比较小。宫巍[49]通过研究发现了, 纤维混合掺有利于增强混凝土的抗氯盐侵蚀性能。余红发等[50]研究发现, 钢纤维的直径大小会因为腐蚀而减小, 任何对钢纤维的环境腐蚀都会导致混凝土强度和韧性的下降。韩铁生[51]研究认为, 对硫酸盐侵蚀的混凝土的加入钢纤维后混凝土性能有积极影响。纪泳丞等[52]研究发现, 使用钢纤维可以限制化学侵蚀的扩展。Yoo 等[53]研究发现, 处于酸性环境中的建筑物加入钢纤维可以更好地抵抗酸性溶液侵蚀。

Nam 等[54]通过研究, 对 PVA 纤维和纤维增强水泥基复合材料进行了抗冻性能的研究, 从试验结果显示, 可以得到 PVA 纤维与 FRCC 的相互混合对抗冻性有一定的效果。姜锦磊等[55]通过研究了腐蚀后纤维混凝土的刚开始开裂的荷载和弯曲强度, 实验结果表明, 都有所下降。在腐蚀前后, 也可得到的结果是 PVA-钢混杂纤维混凝土的韧性普遍高于普通混凝土。杨全兵等[56]研究了钢纤维混凝土抗冻性能, 结果表明, 钢纤维对混凝土的流动性有负面影响, 但可以提高混凝土的抗折强度, 对抗压强度影响不大。牛获涛等[57]研究表明, 钢纤维混凝土比普通混凝土能更好抵抗冻融循环。姜磊[58]研究表明, 钢纤维体积率对混凝土抗冻性能影响显著, 当掺量为 1.5% 时, 混凝土抗冻性能最好。

5.2. 抗渗性

Lawler 等[59]通过研究纤维种类, 特别是纤维几何形状, 然后发现钢纤维对钢纤维混凝土渗透性有较明显的影响, 结果表明, 短纤维掺入到混凝土中可有效改善混凝土渗透性能, 但长纤维对渗透性的影响非常小。彭书成等[60]研究了高强改性聚酯合成纤维与屏蔽钢纤维混合纤维混凝土的抗裂、防渗性能。结果表明, 混合纤维在混凝土中构成了均匀的支撑体系, 减少了混凝土中的毛细管通道, 提高了纤维混凝土的防腐防渗能力。周静海等[61]通过研究对聚丙烯纤维混凝土进行了相关的实验研究, 然后发现了废弃的聚丙烯纤维是可以提高混凝土的抗渗性能的。在纤维长度达到 19 mm, 体积掺量达到 0.16% 时, 构件的抗渗性能能够达到比较理想的状态。宋闻辉[62]研究表明, 钢纤维轻骨料混凝土的抗渗能力的提高与钢纤维的掺量没有同步关系。冯虎[63]研究表明, 对整体钢纤维混凝土试件, 随着纤维体积率的增加, 试件的渗透高度和相对渗透系数逐渐减小, 混凝土的抗渗性略有提高。

综上所述可以得出, 钢纤维混凝土对抗盐腐蚀性、抗冻性、抗渗性有一定的抑制效果, 钢纤维的掺入对混凝土抗抗氯盐侵蚀、抗酸性溶液侵蚀都有一定的积极影响。钢纤维混凝土的掺入对混凝土的抗冻性有一定的改善作用, 钢纤维掺入抑制了混凝土剥落, 降低了钢纤维混凝土冻融破坏损伤速率。钢纤维的掺入对混凝土的抗渗性有积极作用, 钢纤维掺入率对混凝土抗渗性也有一定的作用, 短纤维掺入可有效改善混凝土渗透性, 但长纤维对渗透性的影响非常小等。

6. 结论

钢纤维作为增强水泥基材料在混凝土中的运用是非常广泛的, 可以显著地改善混凝土的抗拉、抗弯、抗冲击及抗疲劳性能, 具有较好的延性。国内外对其做了很多研究, 像钢纤维的掺量、分散、长径比、体积含量、类型等在其力学性能、耐久性、防震等方面的研究。还有钢纤维和其他材料组合成复合材料在混凝土中的研究, 但在钢纤维在取向和钢纤维材料微观上的研究还较少。研究钢纤维取向、掺量在南疆地区对其混凝土力学性能的影响, 能否运用到南疆的道路工程中, 改善其混凝土的耐久性、延性等问题, 使其道路使用得更久而不被破坏是非常重要的。

参考文献

- [1] 时冬冬. 钢纤维混凝土劈拉与弯曲性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [2] 杨保存. 南疆盐渍土路基盐-冻胀变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [3] 王飞. 季冻区盐渍土环境作用对道路水稳层破坏效应的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2018.
- [4] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 10.
- [5] 赵国藩, 黄承逵. 钢纤维混凝土的性能和应用[J]. 工业建筑, 1989(10): 2-9.
- [6] 樊俊江, 於林锋, 韩建军, 王琼. 不同种类粗纤维混凝土基本力学性能及弯曲韧性试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(20): 1-5.
- [7] 陈立福, 何伟, 杨建新, 等. 低掺量纤维混凝土增强抗裂性能试验研究[J]. 混凝土, 2008(7): 75-77.
- [8] 张远鹏. 高强钢纤维混凝土抗弯韧性及弯曲疲劳性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 1998.
- [9] 黄瑞源, 王志亮, 李永池, 等. 钢纤维混凝土力学特性与本构模型研究[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(8): 32-34.
- [10] 柳艳杰, 周世杰, 高凯, 等. 钢纤维混凝土抗压性能试验研究[J]. 黑龙江大学学报, 2018, 9(2): 13-18.
- [11] 钟晨, 叶中豹, 王颖. 钢纤维混凝土增强增韧机理和力学分析[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2019, 35(7): 37-42+49.
- [12] 杨松霖, 刁波, 叶英华. 钢筋超高性能混合纤维混凝土梁力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 17-23.
- [13] 张晓燕, 李长永, 袁浩, 潘丽云. 混合纤维增强全轻混凝土弯曲韧性试验研究[J]. 水力发电, 2013, 39(5): 87-89.
- [14] 胡锐, 方志, 许宝丹. 不同配箍率和钢纤维掺量 UHPC 柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 65-77.
- [15] 韩建平, 文旭皓, 韩维丽. 钢-PVA 混杂纤维增强混凝土轴压力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(9): 45-49.
- [16] Khaloo, A.R. and Kim, N. (1996) Mechanical Properties of Normal to High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Cement, Concrete, and Aggregates*, **18**, 92-97. <https://doi.org/10.1520/CCA10156J>
- [17] Marar, K. (2001) Relationship between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete. *Materials Letters*, **5**, 297-304. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00253-6](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00253-6)
- [18] Bencardino, F. and Rizzuti, L. (2008) Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **20**, 255-263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:3\(255\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(255))
- [19] 崔涛, 何浩祥, 闫维明, 等. 混杂纤维混凝土单轴受压本构模型[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(10): 967-977.
- [20] 张常安. 不同种类纤维对混凝土性能的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(8): 32-34.
- [21] 蔡鹏飞, 钱斌. 纤维混凝土立方体抗压性能试验研究[J]. 四川建材, 2021, 47(3): 31+35.
- [22] 郑辉. 钢-PVA 混杂纤维增强混凝土的力学性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.

- [23] 张仓. 钢纤维混凝土基本力学性能试验研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(22): 83-85.
- [24] 杨艳敏, 陈宇, 王勃, 龚玉宝, 田铎如. 钢纤维全轻混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2020(2): 114-117.
- [25] 牛龙龙, 张士萍, 韦有信. 钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(3): 51-54.
- [26] 张雪梅, 周美容. 钢纤维和碳纤维的混合效应对高性能混凝土力学性能的影响[J]. 功能材料, 2021, 52(1): 1208-1213.
- [27] 张振雷. 混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(6): 43-48.
- [28] 谢雨霏, 盛梦, 吕一帆. 钢纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 四川水泥, 2020(7): 14-15.
- [29] 王贤栋. 竹纤维和钢纤维混杂纤维混凝土的抗冲击性能试验研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [30] Wang, Z.L., Shi, Z.M. and Wang, J.G. (2011) On the Strength and Toughness Properties of SFRC under Static-Dynamic Compression. *Composites Part B: Engineering*, **42**, 1285-1290. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.027>
- [31] Yoo, D.Y., Yoon, Y.S. and Banthia, N. (2015) Flexural Response of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Beams: Effects of Strength, Fiber Content, and Strain-Rate. *Cement and Concrete Composites*, **64**, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.001>
- [32] 梁一鸣, 贺锋, 李季, 耿民. 钢纤维高强混凝土抗冲击压缩力学性能研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(5): 70-76.
- [33] Lee, S.C., Oh, J.H. and Cho, J.Y. (2015) Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers. *Materials*, **8**, 1442-1458. <https://doi.org/10.3390/ma8041442>
- [34] 李川川. 钢纤维混凝土立方体与圆柱体试件力学性能及其关系研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [35] 李世超, 黄瑞源. 钢纤维混凝土增韧效果研究[J]. 混凝土, 2017(12): 63-66+74.
- [36] 李悦, 王兴雷, 丁庆军. 钢纤维长度与掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2017(7): 62-65+69.
- [37] 张裕显. 玄武岩-聚丙烯混杂纤维透水混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [38] 于晓伟, 谢群, 于卫涛, 林明强, 王欣. 混杂纤维高韧性水泥基复合材料抗压性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(5): 68-74.
- [39] 马恺泽, 刘亮, 刘超, 刘伯权. 高强混合钢纤维混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 261-265.
- [40] 戴涛. 定向钢纤维 RPC 弯曲性能及其单轴受压应力-应变曲线研究[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州大学, 2019.
- [41] 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.
- [42] 张亚芳, 李琳. 不同尺寸钢纤维混杂增强混凝土弯曲性能数值分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2012, 11(1): 49-52.
- [43] Alberti, M.G., Enfedaque, A. and Gálvez, J.C. (2017) On the Prediction of the Orientation Factor and Fibre Distribution of Steel and Macro-Synthetic Fibres for Fibre-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **77**, 29-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.008>
- [44] 丁亚红, 卢山, 李一凡, 等. 钢纤维掺入方式对混凝土流动性及力学性能的影响[J]. 混凝土, 2018(10): 90-93.
- [45] 田稳苓, 刘博雄, 卿龙邦, 慕儒. 钢纤维定向对水泥基复合材料等效断裂韧度的影响[J]. 混凝土, 2018(7): 58-61.
- [46] 魏磊磊, 卿龙邦, 杨卓凡, 曹国瑞, 慕儒. 基于 DDM 方法的定向钢纤维混凝土断裂特性研究[J]. 混凝土, 2021(9): 7-11.
- [47] 苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 杨正宏. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1756-1764.
- [48] Kosa, K. and Naaman, A.E. (1990) Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, **87**, 27-37. <https://doi.org/10.14359/2337>
- [49] 宫巍. 聚丙烯-玄武岩混杂纤维混凝土氯盐侵蚀耐久性试验研究[J]. 中国水能及电气化, 2021(6): 35-38.
- [50] 余红发, 孙伟, 李美丹. 荷载对混凝土在腐蚀-冻融作用下强度的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 297-301.
- [51] 韩铁生. 钢纤维混凝土硫酸盐侵蚀长期性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [52] 纪泳丞, 徐文文, 张秦源, 等. 冻融和化学侵蚀下钢纤维混凝土劣化性能研究[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 99-108.
- [53] Yoo, D.Y., Shin, W. and Banthia, N. (2021) Corrosion of Partially and Fully Debonded Steel Fibers from Ultra-High-Performance Concrete and Its Influence on Pullout Resistance. *Cement and Concrete Composites*, **124**, Article ID: 104269. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104269>

-
- [54] Nam, J., Kim, G., Lee, B., *et al.* (2016) Frost Resistance of Polyvinyl Alcohol Fiber and Polypropylene Fiber Rein-Forced Cementitious Composites under Freeze Thaw Cycling. *Composites Part B: Engineering*, **90**, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.009>
- [55] 姜锦磊, 孙敏, 李风雷. 海水腐蚀环境下 PVA-钢混杂纤维混凝土弯曲韧性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(12): 53-56.
- [56] 杨全兵. 钢纤维对混凝土抗盐冻剥蚀性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(4): 375-378.
- [57] 牛荻涛, 姜磊, 白敏. 钢纤维混凝土抗冻性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 80-84+98.
- [58] 姜磊. 钢纤维混凝土抗冻融性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [59] Lawler, J.S., Shah, S.P. and Zampini, D. (2002) Permeability of Cracked Hybrid Fiber-Reinforced Mortar under Load. *ACI Materials Journal*, **99**, 379-385. <https://doi.org/10.14359/12220>
- [60] 彭书成, 丁志超, 陈美兰, 等. 混合纤维混凝土增强抗裂抗渗性能试验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(3): 56-59.
- [61] 周静海, 刘子赫, 李婷婷, 等. 废弃纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度试验[J]. 沈阳建筑大学学报, 2013, 29(5): 797-802.
- [62] 宋闻辉. 钢纤维轻骨料混凝土抗渗和抗冻性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014.
- [63] 冯虎. 钢纤维混凝土与既有混凝土粘结劈拉及抗渗性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2007.