

粉煤灰及混杂纤维对混凝土弯曲韧性的影响研究

陆进保

(乌鲁木齐职业大学 智能制造学院, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为了进一步提高混凝土的弯曲韧性, 以粉煤灰、聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维为研究对象, 以混凝土的抗弯强度和韧性指数为评价指标, 开展了粉煤灰以及混杂纤维对混凝土弯曲韧性的影响研究。结果表明: 单独掺入粉煤灰时对混凝土弯曲韧性的影响相对较小, 当粉煤灰的掺量为 20% 时, 混凝土的抗弯强度和韧性指数均可达最大值。单独掺入聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维时, 混凝土的弯曲韧性均可得到不同程度的改善, 其中钢纤维对混凝土弯曲韧性的改善效果最好。混杂纤维的掺入对混凝土弯曲韧性的提升效果更好, 其中将钢纤维和玄武岩纤维混合掺入混凝土时, 可显著提升混凝土的抗弯强度和韧性指数, 当钢-玄武岩混杂纤维的掺量为 1.2% 时, 混凝土的抗弯强度为 11.08 MPa, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别可以达到 8.01、12.15、15.87, 相对于空白混凝土而言, 抗弯强度提升了 73.67%, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 71.15%、67.36%、48.46%, 混凝土的弯曲韧性得到了明显的改善。研究结果认为粉煤灰及混杂纤维联合使用可发挥良好的协同增效作用, 使混凝土的弯曲韧性得到较大幅度的提升。

关键词: 混凝土; 粉煤灰; 混杂纤维; 弯曲韧性; 掺量; 抗弯强度

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0031-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.005

Study on the Influence of Fly Ash and Mixed Fibers on the Flexural Toughness of Concrete

LU Jinbao

(College of Intelligent Manufacturing, Urumqi Vocational University, Urumqi 830002, China)

Abstract: In order to further improve the flexural toughness of concrete, a study was conducted on the effects of fly ash, polypropylene fiber, basalt fiber, and steel fiber on the flexural toughness of concrete, with the flexural strength and toughness index of concrete as evaluation indicators. The results show that the effect of adding fly ash alone on the flexural toughness of concrete is relatively small. When the fly ash content is 20%, the flexural strength and toughness index of concrete can reach their maximum values. When polypropylene fiber, basalt fiber, and steel fiber are separately added, the flexural toughness of concrete can be improved to varying degrees, with steel fiber having the best effect on improving the flexural toughness of concrete. The addition of hybrid fibers has a better effect on improving the flexural toughness of concrete. When steel fibers and basalt fibers are mixed into concrete, the flexural strength and toughness index of concrete can be significantly improved. When the content of steel basalt hybrid fibers is 1.2%, the flexural strength of concrete is 11.08 MPa, and the toughness indices I_5 , I_{10} and I_{20} can reach 8.01, 12.15, and 15.87, respectively. Compared with blank concrete, the flexural strength is increased

项目来源: 教育部第三期供需对接就业育人基金项目 (2023122936603)。

作者简介: 陆进保 (1982—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑工程教学以及建筑工程设计和施工。

收稿日期: 2025-12-12

材料科学

by 73.67%, and the toughness indices I_5 、 I_{10} and I_{20} are increased by 71.67%, respectively. 15%, 67.36%, and 48.46% showed significant improvement in the flexural toughness of concrete. The research findings suggest that the combined use of fly ash and hybrid fibers can achieve a synergistic effect, significantly enhancing the flexural toughness of concrete.

Key words: concrete; fly ash; mixed fibers; bending toughness; dosage; flexural strength

0 引言

混凝土的弯曲韧性是评价其变形能力和耐久性的一项重要指标^[1]。普通混凝土材料通常存在脆性较大、变形能力差、抗裂性能不足等缺陷,在桥梁铺装、隧道衬砌、建筑结构加固以及路基加固等工程中,对混凝土弯曲韧性的要求较高。使用普通混凝土材料通常会过早出现裂缝,存在较大的安全隐患^[2]。因此,在建筑施工领域,研究如何提高混凝土的弯曲韧性具有十分重要的应用价值。

通过材料改性手段提升混凝土的弯曲韧性和变形能力是目前混凝土材料领域的研究热点。在混凝土中加入矿物掺合料(如粉煤灰、硅灰等)以及纤维类材料是改善混凝土韧性和强度的有效途径之一^[3-4]。目前,已有众多研究者开展了关于粉煤灰以及纤维类材料提高混凝土弯曲韧性的相关研究^[5-6]。孟慧迪^[7]研究了泵送混合砂钢纤维混凝土的弯曲韧性,结果表明粉煤灰和钢纤维的掺量变化均会对混凝土的弯曲韧性造成显著影响;刘元刚^[8]研究了硅灰、粉煤灰以及钢纤维掺量对水工混凝土弯曲韧性的影响,结果表明硅灰、粉煤灰和钢纤维的最优掺量分别为2%、20%、1.8%,其中钢纤维的掺入可显著改善混凝土的弯曲韧性;杨艳春等^[9]研究了钢纤维掺量对高性能混凝土弯曲韧性的影响,结果表明当钢纤维的掺量为1.5%时,可显著提高混凝土的弯曲韧性;刘文胜等^[10]研究了粉煤灰和钢纤维掺量对尾矿砂喷射钢纤维混凝土弯曲韧性的影响,结果表明当粉煤灰和钢纤维的掺量分别为20%、40%时,混凝土的变形性能和经济性能较好;刘兵等^[11]研究了不同混杂纤维对珊瑚混凝土抗弯性能的影响,结果表明当碳纤维和玄武岩纤维的掺量为0.15%、塑钢纤维的掺量为7 kg/m³时,珊瑚混凝土的弯曲韧性相较于基准组有较大幅度的提升;赵健等^[12]研究了混杂纤维对超高强度混凝土弯曲韧性的影响,结果表明钢纤维和聚丙烯纤维的掺入均能明显改善混凝土

的弯曲韧性。目前,针对单一纤维及混杂纤维对混凝土弯曲韧性的影响研究较多,也取得了较多的研究成果^[13-14],而同时掺入粉煤灰和混杂纤维时对混凝土弯曲韧性的影响研究则相对较少^[15-16]。

因此,为探究粉煤灰及混杂纤维对混凝土弯曲韧性的影响,选用二级粉煤灰、聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维作为原材料,以混凝土的抗弯强度和韧性指数为评价指标,采用万能材料试验机对混凝土试件的弯曲韧性进行评价,为进一步提高混凝土的弯曲韧性提供参考和借鉴。

1 试验部分

1.1 试验材料

采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;二级粉煤灰(性能符合国家标准GB/T 1596-2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》要求);聚丙烯纤维(长度为12 mm,密度为0.92 g/cm³,抗拉强度为560 MPa,弹性模量为4.5 GPa);玄武岩纤维(长度为10 mm,密度为2.75 g/cm³,抗拉强度为3 150 MPa,弹性模量为85.6 GPa);钢纤维(长径比为50,抗拉强度为1 250 MPa,弹性模量为214.2 GPa);聚羧酸盐高效减水剂;细骨料为细砂(细度模数为2.8);粗骨料为碎石(5~20 mm连续级配),试验用水为自来水。

1.2 混凝土配合比设计

选择水灰比为0.3,砂率为32%,通过改变粉煤灰和纤维的掺量对混凝土的配合比进行设计。其中,水用量为150 kg/m³,细骨料用量为570 kg/m³,粗骨料用量为1 222 kg/m³,减水剂用量为3.5 kg/m³,水泥用量根据粉煤灰掺量(0~30%)进行调整,单一纤维和混杂纤维的掺量按照混凝土总体积的百分比进行设计,单一纤维掺入量为0~1.0%,混杂纤维掺入量为0~2.0%。

1.3 混凝土弯曲韧性评价试验方法

参照交通行业标准JTG 3420—2020《公路工程

水泥基水泥混凝土试验规程》中水泥混凝土弯拉强度试验方法, 以及中国工程建设协会标准 CECS 13-2009《纤维混凝土试验方法标准》中弯曲韧性试验部分的要求, 以抗弯强度和韧性指数 (I_5 、 I_{10} 和 I_{20}) 为评价指标, 采用万能材料试验机对混凝土试件的弯曲韧性进行评价。混凝土试件的养护龄期均为 28 d, 每组配合比制备 3 个平行试件, 共计 96 个试件。

2 结果与讨论

2.1 粉煤灰掺量对混凝土弯曲韧性的影响

由图 1 可知, 粉煤灰掺量对混凝土抗弯强度和韧性指数的影响趋势基本相似。随着粉煤灰掺量的增大, 混凝土的抗弯强度和韧性指数均呈现出“先增大后减小”的趋势。当粉煤灰的掺量为 20% 时, 混凝土的抗弯强度和韧性指数均达到最大值, 此时抗弯强度为 6.38 MPa, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别为 4.68、7.26、10.69, 与基准混凝土相比, 抗弯强度提升了 9.25%, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 8.33%、6.14%、4.96%。当粉煤灰的掺量超过 20% 时, 混凝土的抗弯强度和韧性指数均有所减小。分析原因是由于当粉煤灰的掺量达到 20% 时, 粉煤灰自身可有效填充混凝土内部的孔隙, 并与水泥水化产物进一步反应, 增强基体的黏结作用, 有助于增强混凝土的弯曲韧性。而当粉煤灰的掺量大于 20% 时, 过多的粉煤灰无法与水泥水化产物继续发生反应, 混凝土内部物质结合不够紧密, 致使结构疏松, 混凝土整体强度以及弯曲韧性均有所下降。因此, 为充分发挥粉煤灰对混凝土弯曲韧性的增强效果, 推荐粉煤灰的最佳掺量为 20%。

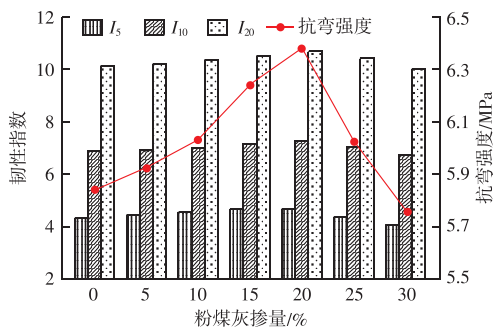


图 1 粉煤灰掺量对混凝土弯曲韧性的影响
Fig. 1 The influence of fly ash content on the flexural toughness of concrete

2.2 单一纤维对混凝土弯曲韧性的影响

由图 2 可知, 随着聚丙烯纤维掺量的逐渐增大, 混凝土的抗弯强度先增大后减小, 而韧性指数则呈逐渐增大的趋势。当聚丙烯纤维的掺量为 0.6% 时, 混凝土的抗弯强度达到最大值 (7.35 MPa), 而此时混凝土的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别为 5.08、7.89 和 11.25, 相较于单独掺入粉煤灰时有一定程度的提升。相对于基准混凝土而言, 掺入 0.6% 聚丙烯纤维时混凝土的抗弯强度提升了 15.20%, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 8.55%、8.68% 和 5.24%。继续增大聚丙烯纤维掺量, 混凝土的抗弯强度有所减小, 而韧性指数则继续小幅度增大。分析原因是由于当聚丙烯纤维掺量超过一定值时, 纤维在混凝土基体中的分散效果变差, 团聚现象可致使混凝土基体内部出现缺陷, 造成混凝土整体强度以及抗弯强度的下降。因此, 从单一聚丙烯纤维对混凝土弯曲韧性的角度考虑, 推荐聚丙烯纤维的最佳掺量为 0.6%。

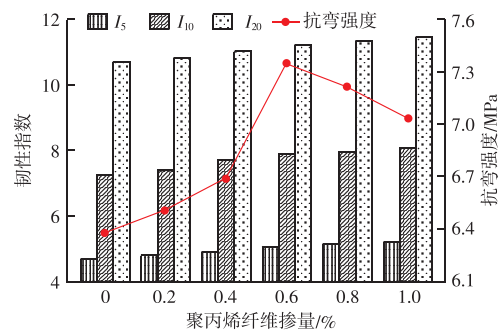


图 2 聚丙烯纤维掺量对混凝土弯曲韧性的影响
Fig. 2 The influence of polypropylene fiber content on the flexural toughness of concrete

由图 3 可知, 随着玄武岩纤维掺量的逐渐增大, 混凝土的抗弯强度先增大后减小, 而韧性指数同样呈逐渐增大的趋势, 试验结果与图 2 中聚丙烯纤维的结果基本相似。当玄武岩纤维的掺量为 0.6% 时, 混凝土的抗弯强度达到最大值 (8.06 MPa), 而此时混凝土的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别为 5.35、8.07 和 11.58, 相较于单独掺入聚丙烯纤维时有一定程度的提升。相较于基准混凝土而言, 掺入 0.6% 玄武岩纤维时混凝土的抗弯强度提升了 26.33%, 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 14.32%、11.16% 和 8.33%。继续增大玄武岩纤维掺量, 混凝土的抗弯强度有所减小, 而韧性指数则继续小幅度增大。玄武岩纤维

材料科学

对混凝土弯曲韧性的影响机理同上述聚丙烯纤维相同。此外,由于玄武岩纤维自身的抗拉强度和弹性模量明显高于聚丙烯纤维,所以在相同的纤维掺量下,玄武岩纤维对混凝土抗弯强度和韧性指数的提升幅度要高于聚丙烯纤维。同样的,从单一玄武岩纤维对混凝土弯曲韧性的角度考虑,推荐玄武岩纤维的最佳掺量为 0.6%。

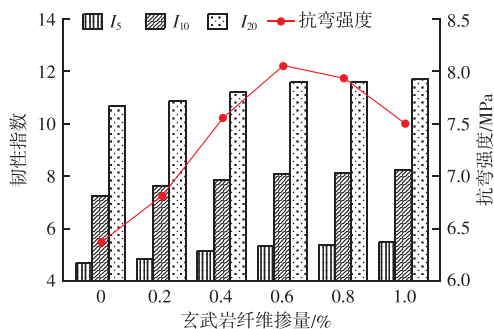


图3 玄武岩纤维掺量对混凝土弯曲韧性的影响

Fig. 3 The influence of basalt fiber content on the flexural toughness of concrete

由图4可知,随着钢纤维掺量的逐渐增大,混凝土的抗弯强度先增大后减小,而韧性指数则呈逐渐增大的趋势。当钢纤维掺量为 0.8% 时,混凝土的抗弯强度达到最大值 (9.92 MPa),而此时混凝土的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 也分别为 6.59、9.35 和 13.24,相较于单独掺入聚丙烯纤维或者玄武岩纤维时均有明显的提升。相较于基准混凝土而言,掺入 0.8% 钢纤维时混凝土的抗弯强度提升了 55.49%,韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 40.81%、28.79% 和 23.85%,提升幅度均明显高于单独掺入粉煤灰、聚丙烯纤维和玄武岩纤维。继续增大钢纤维掺量,混

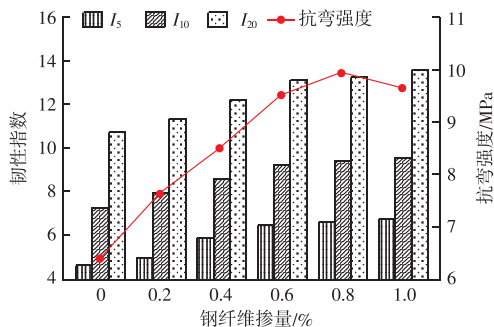


图4 钢纤维掺量对混凝土弯曲韧性的影响

Fig. 4 The influence of steel fiber content on the flexural toughness of concrete

凝土的抗弯强度略有减小,而韧性指数则继续小幅度增大。这是由于钢纤维自身的抗弯拉强度和弹性模量均明显高于聚丙烯纤维和玄武岩纤维,甚至超过混凝土基体自身,是承担外部弯曲应力的核心组成部分。但当钢纤维的掺入量过大时,同样会出现内部分布不均匀的问题,致使混凝土的抗弯强度略有下降。因此,从单一钢纤维对混凝土弯曲韧性的角度考虑,推荐钢纤维的最佳掺量为 0.8%。

2.3 混杂纤维对混凝土弯曲韧性的影响

由图5可知,随着钢-聚丙烯混杂纤维掺量的逐渐增大,混凝土的抗弯强度先增大后减小,而韧性指数则呈逐渐增大的趋势,试验结果与单一纤维试验结果趋势相似。当钢-聚丙烯混杂纤维的掺量为 1.2% 时,混凝土的抗弯强度达到最大值 (10.59 MPa),而此时混凝土的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 也分别为 7.56、11.24 和 15.32,相较于单独掺入聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维时均有明显提升。相较于基准混凝土而言,掺入 1.2% 钢-聚丙烯混杂纤维时混凝土的抗弯强度提升了 61.94%,韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 61.54%、54.82% 和 43.31%,提升幅度均明显高于单独掺入粉煤灰、聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维。继续增大钢-聚丙烯混杂纤维掺量,混凝土的抗弯强度略有减小,而韧性指数则继续缓慢增大。这是由于钢-聚丙烯混杂纤维的掺入可以有效发挥钢纤维和聚丙烯纤维各自的优点,起到良好的协同增效作用。其中钢纤维可有效阻止微小裂缝的贯穿扩展,承担主裂缝上的弯曲应力;而聚丙烯纤维则可在施加弯曲载荷后期发挥良好的增韧效果,减少混凝土基体中的应力集中现象。但混杂纤维的

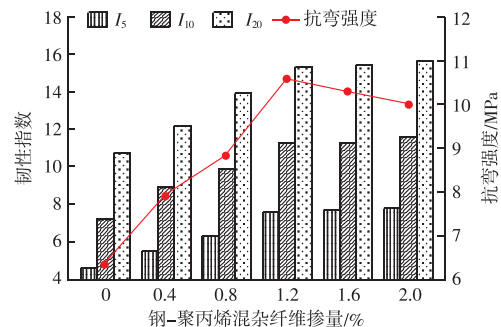


图5 钢-聚丙烯混杂纤维掺量对混凝土弯曲韧性的影响

Fig. 5 The influence of steel polypropylene hybrid fiber content on the flexural toughness of concrete

掺量过大时,同样会出现纤维团聚现象,不利于混凝土整体结构的稳定。因此,从混杂纤维对混凝土弯曲韧性的角度考虑,推荐钢-聚丙烯混杂纤维的最佳掺量为 1.2%。

由图 6 可知,随着钢-玄武岩混杂纤维掺量的逐渐增大,混凝土的抗弯强度先增大后减小,而韧性指数则呈逐渐增大的趋势,试验结果与单一纤维试验结果趋势相似。当钢-玄武岩混杂纤维的掺量为 1.2% 时,混凝土的抗弯强度达到最大值 (11.08 MPa),而此时混凝土的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 也分别为 8.01、12.15 和 15.87,相较于单独掺入聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维时均有提升,比掺入钢-聚丙烯混杂纤维时也有一定的提升。相较于基准混凝土而言,掺入 1.2% 钢-玄武岩混杂纤维时混凝土的抗弯强度提升了 73.67%,韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提升了 71.15%、67.36% 和 48.46%,提升幅度均明显高于单独掺入粉煤灰、聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维,也略高于掺入钢-聚丙烯混杂纤维。继续增大钢-玄武岩混杂纤维掺量,混凝土的抗弯强度略有减小,而韧性指数则继续缓慢增大。钢-玄武岩混杂纤维对混凝土弯曲韧性的影响机理同上述钢-聚丙烯纤维相同。从混杂纤维对混凝土弯曲韧性的角度考虑,推荐钢-玄武岩混杂纤维的最佳掺量同样为 1.2%。

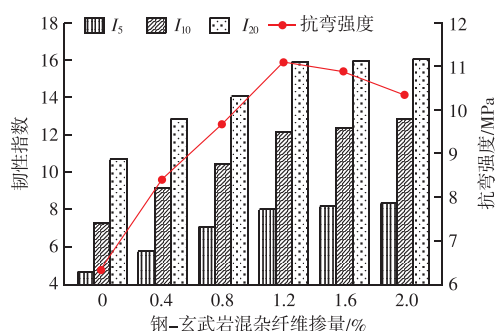


图 6 钢-玄武岩混杂纤维掺量对混凝土弯曲韧性的影响
Fig. 6 The influence of steel basalt hybrid fiber content on the flexural toughness of concrete

2.4 粉煤灰及混杂纤维对弯曲韧性的影响机理

根据 2.1~2.3 中的试验结果,粉煤灰及混杂纤维增强混凝土弯曲韧性的作用机理主要包括以下内容:合适掺量的粉煤灰可与水泥水化产物发生二次水化反应,水化产物可填充混凝土内部的微小孔隙,发挥良好的微集料填充效应。此外,粉煤灰的加入

还可有效调控水泥的水化放热过程,减少由于温度变化而产生的裂缝数量,上述综合作用可在一定程度上增强混凝土的弯曲韧性;钢纤维自身具有较高的力学强度和弹性模量。在混凝土试件施加弯曲应力初期,钢纤维的变形量相对较小,可有效抑制混凝土中微裂缝的扩展,起到良好的增韧效果;随着弯曲应力的不断增大,混凝土基体内的微小裂缝不断贯穿扩展,形成宏观裂缝。此时,钢纤维对混凝土基体的黏结作用开始下降,相对较长的聚丙烯纤维或者玄武岩纤维开始发挥作用,纤维产生较大的形变后可有效增强混凝土的弯曲韧性。因此,将粉煤灰及混杂纤维联合使用可发挥良好的协同增效作用,使混凝土的弯曲韧性得到较大幅度的提升。

3 结论

以粉煤灰、聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维为研究对象,以混凝土的抗弯强度和韧性指数为评价指标,考察了粉煤灰掺量、单一纤维掺量以及混杂纤维掺量对混凝土弯曲韧性的影响,主要得出以下结论:

(1) 粉煤灰的掺量越大时,混凝土的抗弯强度和韧性指数先增大后减小,推荐最佳的粉煤灰掺量为 20%,此时混凝土的抗弯强度为 6.38 MPa,韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别为 4.68、7.26 和 10.69。

(2) 单一聚丙烯纤维、玄武岩纤维和钢纤维的掺量越大时,混凝土的韧性指数越大,而抗弯强度则先增大后减小。其中钢纤维对混凝土弯曲韧性的提升效果最好,其次为玄武岩纤维和聚丙烯纤维。推荐单一聚丙烯纤维和玄武岩纤维的最佳掺量为 0.6%,钢纤维的最佳掺量为 0.8%。

(3) 混杂纤维对混凝土弯曲韧性的提升效果明显优于单一纤维。随着混杂纤维的掺量增大,混凝土的韧性指数越大,而抗弯强度则先增大后减小。推荐最佳的混杂纤维掺量为 1.2%。此时,钢-玄武岩混杂纤维混凝土的抗弯强度为 11.08 MPa,韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别为 8.01、12.15 和 15.87,混凝土的弯曲韧性明显增强。

参 考 文 献

[1] 卿双全,李传习. 基于正交试验的高强高延性混凝土力学性能

材料科学

- [J]. 工业建筑, 2025, 55 (5): 280-291.
- [2] 贺晓铭, 张振龙, 尚汇源. 弯钩型钢纤维混凝土弯曲韧性试验研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2025 (6): 319-324.
- [3] 彭玉发, 胡利超, 李洪碧. 纤维混凝土强度及弯曲韧性试验研究 [J]. 四川建材, 2022, 48 (4): 6-7, 9.
- [4] 邢红杰, 宋叶房. 混杂纤维对桥梁铺装混凝土弯曲韧性的影响 [J]. 当代化工, 2025, 54 (4): 839-842, 847.
- [5] 段丹丹, 井玮翌. 高韧性纤维混凝土材料及应用性能研究 [J]. 化学工程师, 2024, 38 (1): 92-95, 60.
- [6] 吴三元. 基于钢纤维与聚丙烯纤维喷射混凝土的弯曲韧性 [J]. 合成纤维, 2023, 52 (2): 66-69.
- [7] 孟慧迪. 泵送混合砂钢纤维混凝土配合比及性能研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [8] 刘元刚. 矿物掺合料和钢纤维对水工混凝土性能影响研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7 (3): 56-60.
- [9] 杨艳春, 张海红, 梁兴荣. 纤维增强硅粉高性能混凝土试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (9): 54-57, 61.
- [10] 刘文胜, 陈晓云, 刘显峰, 等. 尾矿砂喷射钢纤维混凝土弯曲韧性研究 [J]. 低温建筑技术, 2017, 39 (2): 9-11.
- [11] 刘兵, 牟荣存, 王洋, 等. 多尺寸混杂纤维增强珊瑚混凝土的抗弯性能 [J]. 混凝土, 2025 (7): 173-179.
- [12] 赵健, 李伟清, 亓佳利, 等. 混合纤维超高强度混凝土的制备及力学性能研究 [J]. 煤矿现代化, 2026, 35 (4): 71-77.
- [13] 王金辉, 葛晨, 谈永泉, 等. 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.
- [14] 满晨, 袁琳琳. 玄武岩纤维增强混凝土破坏形态及弯曲韧性研究 [J]. 合成纤维, 2024, 53 (6): 75-78.
- [15] 任海涛, 何娟, 符清露, 等. 混杂纤维对 OPC-CSA 复合模壳混凝土弯曲韧性和抗变形性的影响 [J]. 新型建筑材料, 2026, 53 (2): 49-55.
- [16] 许锋, 曾林, 柳德虎, 等. 基于钢纤维与聚丙烯纤维的喷射混凝土弯曲韧性研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53 (1): 78-80.

(上接第 30 页)

参考文献

- [1] 范明辉, 李薇, 焦宇浩, 等. 基于 SR-SSA-SVR 的铁尾矿砂混凝土抗压强度预测 [J]. 材料导报, 2025, 39 (24): 117-124.
- [2] 黄伟, 薛葵, 张子龙, 等. 铁尾矿砂的研究与应用进展 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3655-3665.
- [3] Cheng Yunhong, Huang Fei, Qi Shanshan, et al. Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118147.
- [4] Manaviparast H R, Miranda T, Pereira E, et al. A comprehensive review on mine tailings as a raw material in the alkali activation process [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (12): 5127.
- [5] 孙志磊. 铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土耐久性能的影响 [J]. 材料化学前沿, 2024, 12 (1): 1-6.
- [6] Wu Xian, Zhou Xian, Guo Chao, et al. Behavior of hematite, magnetite, and reduced iron powder in geopolymers: Effects of mechanical properties and reaction mechanism [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141178.
- [7] Yao Geng, Wang Qiang, Su Yuewei, et al. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings [J]. Minerals Engineering, 2020, 145: 106068.
- [8] Yao Geng, Wang Qiang, Wang Zhiming, et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement [J]. Powder Technology, 2020, 360: 863-871.
- [9] 王圣杰, 顾晓薇, 王岫宇, 等. 铁尾矿砂蒸压加气轻质混凝土的制备与孔隙结构研究 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (3): 232-238.
- [10] 张海军, 李涛, 秦广冲. 铁尾矿砂对混凝土强度及抗硫酸盐冻融的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (2): 76-81.
- [11] 郎文丽, 谢群, 惠婧, 等. 聚乙烯醇纤维掺量与铁尾矿砂替代率对混凝土抗压性能的影响 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2025 (2): 245-251.
- [12] Shettima A U, Hussin M W, Ahmad Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120 (sep. 1): 72-79.
- [13] 张延年, 林吉森, 陈昊, 等. 铁尾矿基固废混凝土抗压性能及微观结构分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46 (2): 225-232.
- [14] Zhang Weifeng, Gu Xiaowei, Qiu Jingping, et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119917.
- [15] Zhao Jiangshan, Ni Kun, Su Youpo, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122968.
- [16] 李致远, 陈峰. 铁尾矿砂绿色混凝土的制备与性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (6): 6230-6236.