

混杂纤维与矿物掺合料共同作用对砂浆力学性能的影响

吴昊, 张佳豪, 吴松翰, 杨帅源, 贾艳敏*

东北林业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: *yanminjia2008@126.com

收稿日期: 2021年5月28日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月24日

摘要

主要研究了掺入混杂玻璃纤维和聚丙烯纤维, 以及不同比例的粉煤灰、硅灰和矿粉等矿物掺合料对纤维增强砂浆力学性能的改善情况。试验结果表明: 纤维和矿物掺合料对砂浆的强度特性都有显著影响。掺入不适宜比例的矿物掺合料, 会造成矿物掺合料的“负混掺效应”抵消掺入纤维的正增强效应, 造成砂浆抗压强度的降低。试验中得到了综合考虑混杂纤维和矿物掺合料作用下混杂纤维增强砂浆的强度改善效果的最优配合比。

关键词

混杂纤维, 矿物掺合料, 砂浆, 力学性能

Effect of Hybrid Fiber and Mineral Admixture on the Mechanical Properties of Mortar

Hao Wu, Jiahao Zhang, Songhan Wu, Shuaiyuan Yang, Yanmin Jia*

School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang
Email: *yanminjia2008@126.com

Received: May 28th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

Abstract

This paper mainly studies the effect of hybrid glass fiber and polypropylene fiber, as well as dif-
*通讯作者。

文章引用: 吴昊, 张佳豪, 吴松翰, 杨帅源, 贾艳敏. 混杂纤维与矿物掺合料共同作用对砂浆力学性能的影响[J]. 土木工程, 2021, 10(6): 535-541. DOI: 10.12677/hjce.2021.106060

ferent proportions of mineral admixtures such as fly ash, silica fume and mineral powder, on the improvement of the mechanical properties of fiber-reinforced mortar. The results showed that: Both fibers and mineral admixtures have significant effects on the strength characteristics of mortar. Incorporating an inappropriate ratio of mineral admixtures will cause the “negative mixing effect” of the mineral admixtures, offset the “positive reinforcement effect” of the fibers, and reduce the compressive strength of the mortar. In the experiment, the optimal mix ratio was obtained which comprehensively considered the strength improvement effect of the fiber-reinforced mortar under the combined action of the hybrid fiber and the mineral admixture.

Keywords

Hybrid Fiber, Mineral Admixture, Mortar, Mechanical Properties

Copyright © 2021 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

水泥基复合材料如砂浆、混凝土等被广泛应用于建筑行业，但是由于一些固有缺陷，比如抗拉强度较低、延性较差、脆性较大等使其在工程应用中受到了很多的局限。通过掺入纤维和矿物掺合料为上述不足提供了改善途径。

混杂纤维水泥基复合材料是将两种或两种以上不同性能的纤维复合掺入到水泥基胶凝材料中，通过纤维的混杂效应对砂浆、混凝土等水泥基复合材料的力学性能、耐久性等进行了优化，进一步扩展其在工程上的应用范围[1] [2] [3]。纤维混杂方法包括不同长度、直径、模量和拉伸强度的纤维组合。由于纤维的大小不同，具有小尺寸的纤维会弥合微裂纹，而较大的纤维则可以阻止宏观裂纹的扩展。控制微裂纹和宏观裂纹分别会提高复合材料的强度并显著改善其断裂韧性[1] [4]。对基于不同模量的纤维混杂研究发现，更坚硬的纤维提供了首个开裂应力和极限强度，而相对柔韧性的纤维则提高了后裂区的韧性和应变能力[5]。因此，混杂纤维可以有效改善水泥基材料的抗压和抗折强度等力学性能[6] [7] [8]。

在混凝土中掺入工业废渣或天然矿物质作为掺合料有着悠久历史，近年来，随着绿色高性能混凝土的发展，矿物掺合料与水泥、骨料、水以及外加剂一样受到广泛重视，被称为混凝土的第六组分。混凝土中掺入粉煤灰等矿物掺合料一般可以大量消耗工业废渣，减少其造成的环境污染以及土地占用的问题，另一方面，可以减少水泥用量从而降低能耗和节约资源，降低混凝土生产成本[9]。对矿物掺合料的研究发现，一些天然矿物掺合料和工业废渣有利于改善混凝土的诸多性能，如工作性、力学性能和耐久性等[10] [11]。

综上所述，目前针对混杂纤维对混凝土性能的影响、矿物掺合料对混凝土性能的影响已有大量研究成果，但是同时考虑混杂纤维和矿物掺合料对水泥基材料性能的影响的相关报道并不多见，因此，本研究将玻璃纤维和聚丙烯纤维混杂，并用不同比例的粉煤灰、硅灰和矿粉替代水泥，对混杂纤维和矿物掺合料共同作用对砂浆的力学性能的影响进行试验研究。

2. 试验材料及试块制备

2.1. 原材料

试验所用水泥为哈尔滨亚泰水泥厂生产的 P.O42.5 水泥，水泥的物理力学性能见表 1，矿物掺合料包

括一级粉煤灰、硅灰和矿粉。水泥、粉煤灰、硅灰和矿粉的化学成分见表 2。试验用砂采用自然河沙，细度模数为 2.66。试验中所掺纤维为玻璃纤维和聚丙烯纤维，纤维的形貌见图 1，纤维的主要物理参数见表 3。

Table 1. Physical and mechanical properties of cement

表 1. 水泥的物理力学性能

| 水泥 | 体积安定性 | 凝结时间 | | 抗压强度(MPa) | | 抗折强度 | |
|---------|-------|-------|-----|-----------|-------|-------|------|
| | | (min) | | (MPa) | | (MPa) | |
| | | 初凝 | 终凝 | 3 天 | 28 天 | 3 天 | 28 天 |
| P-O42.5 | 合格 | 186 | 219 | 26.32 | 49.85 | 7.83 | 8.6 |

Table 2. Chemical composition of cement, fly ash, silica fume and mineral powder

表 2. 水泥、粉煤灰、硅灰和矿粉的化学组成

| 化学成分(%) | 水泥 | 粉煤灰 | 硅灰 | 矿粉 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 21.5 | 66.67 | 93.82 | 32.08 |
| CaO | 59.81 | 3.05 | 0.41 | 38.09 |
| Al ₂ O ₃ | 5.86 | 18.97 | 0.21 | 15.06 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.85 | 4.39 | 0 | 0.94 |
| MgO | 2.23 | 1.24 | 0.65 | 8.26 |
| SO ₃ | 2.06 | 0.3 | 0.64 | 0.17 |
| Na ₂ O | 0.2 | - | 0.32 | - |
| K ₂ O | 0.67 | - | 0.85 | - |
| 烧失量 | 4.82 | 5.38 | 3.1 | 5.4 |



(a) 玻璃纤维



(b) 聚丙烯纤维

Figure 1. Appearance of fibers

图 1. 纤维的外观形貌

Table 3. Main parameters of glass fiber and polypropylene fiber

表 3. 玻璃纤维和聚丙烯纤维的主要参数

| 长度 | 直径 | 密度 | 抗拉强度 | 弹性模量 | 熔点 | 伸长率 | |
|-------|----|----------------------|-------|-------|------|---------|------|
| (mm) | μm | (g/cm ³) | (MPa) | (GPa) | (°C) | % | |
| 玻璃纤维 | 15 | 10 | 2.36 | 1800 | 80 | 160 | 2.45 |
| 聚丙烯纤维 | 9 | 40 | 0.91 | 690 | 70 | 160~170 | 20 |

2.2. 配合比设计及试件制备

本试验中玻璃纤维和聚丙烯纤维按照不同比例混杂, 纤维总掺量为 2% (按体积分数计算), 设置不掺纤维的对照组 M1 作为对比。胶凝材料总用量为 350 kg/m^3 , 矿物掺合料为粉煤灰、硅灰和矿粉, 按不同比例替代水泥, 详细配合比如表 4 所示。试件尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 每组制备 6 个试块。图 2 显示了砂浆的部分制备过程。将原材料放入砂浆搅拌机(图 2(a)), 搅拌均匀后入模(图 2(b))并振捣均匀(图 2(c))。室温养护 24 h 后脱膜, 放入水中养护至规定龄期进行力学性能测试, 试验程序按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70-2009)进行。

Table 4. Mix ratio

表 4. 配合比

| 试件编号 | 纤维掺量 (%) | 玻璃纤维 (%) | 聚丙烯纤维 (%) | 胶凝材料总量 (kg/m^3) | 粉煤灰 (%) | 硅灰 (%) | 矿粉 (%) |
|------|----------|----------|-----------|----------------------------|---------|--------|--------|
| M1 | 0 | 0 | 0 | 350 | 30 | 0 | 30 |
| M2 | 2 | 2 | 0 | 350 | 40 | 0 | 15 |
| M3 | 2 | 2 | 0 | 350 | 0 | 5 | 15 |
| M4 | 2 | 1.6 | 0.4 | 350 | 20 | 5 | 30 |
| M5 | 2 | 1.2 | 0.8 | 350 | 30 | 5 | 30 |
| M6 | 2 | 1.2 | 0.8 | 350 | 50 | 0 | 30 |

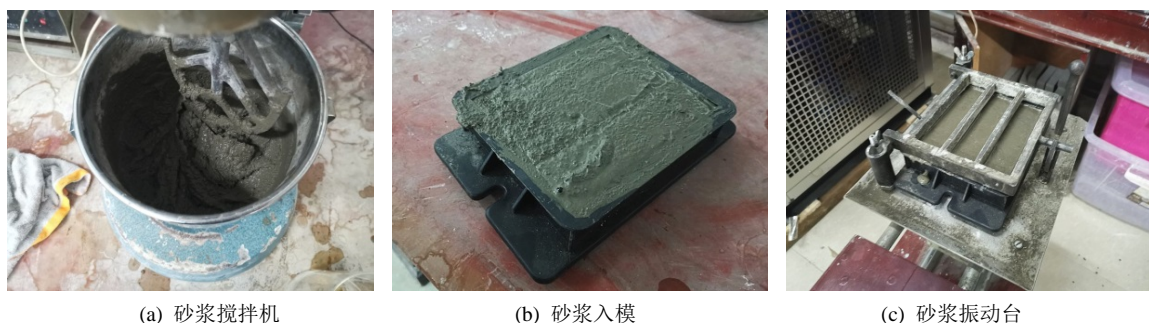


Figure 2. Preparation process of mortar
图 2. 砂浆制备过程

3. 结果与讨论

3.1. 抗折强度

砂浆 7 d 和 28 d 抗折强度试验结果分别如表 5、图 3 和图 4 所示。图 3 为砂浆 7 d 龄期的抗折强度, 通过图 3 可知, 砂浆 7 d 抗折强度值呈现先增加后降低的趋势, 但掺入 2% 的单掺玻璃纤维或混杂纤维后, 7 d 抗折强度都得到显著改善, 明显高于 M1 组的 1.77 MPa 。其中 M4 的抗折强度达到最大值 5.8 MPa , 相比于 M1 提高了 227.7%。

图 4 为砂浆 28 d 龄期的抗折强度, 通过图 4 可知, 掺入纤维对砂浆 28 d 抗折强度改善效果同样非常显著, 且 28 d 龄期抗折强度的变化趋势与 7 d 龄期完全相同, 最大值 M4 的抗折强度达到 7.23 MPa , 相对于 M1 的 3.21 增幅达到 125.2%。即掺入纤维对砂浆抗折强度的改善效果显著。这是因为混杂的玻璃纤维和聚丙烯纤维均匀的分布在砂浆基体中, 形成的三维网状结构能够限制砂浆的基体内裂缝的产生和扩展, 改变裂缝的方向并阻止裂缝的二次扩展, 进而延缓裂缝的发展速率。分别对比 M2 和 M3、M5 和

M6 的抗折强度可知, 在纤维掺量种类和混杂比例相同的情况下, 无论 7 d 还是 28 d 龄期, M3 的抗折强度值都大于 M2, M5 的值都大于 M6, 此时矿粉掺量相同, 即掺入 5% 硅灰的效果优于 40% 的粉煤灰, 5% 硅灰 + 30% 粉煤灰的效果优于 50% 粉煤灰。可知 M2 和 M6 中粉煤灰已超过适宜掺量。M4 中的 20% 为本试验中粉煤灰最适宜掺量。M4 中玻璃纤维和聚丙烯纤维的混杂比例以及粉煤灰、硅灰、矿粉的掺入比例为本试验中综合考虑纤维混杂效应和矿物掺合料掺入比的最优掺量。

Table 5. Test results of flexural strength

表 5. 抗折强度测试结果

| 编号 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 7 d 抗折强度 | 1.77 | 2.4 | 3.78 | 5.8 | 3.48 | 3.34 |
| 28 d 抗折强度 | 3.21 | 3.32 | 4.76 | 7.23 | 4.91 | 4.32 |

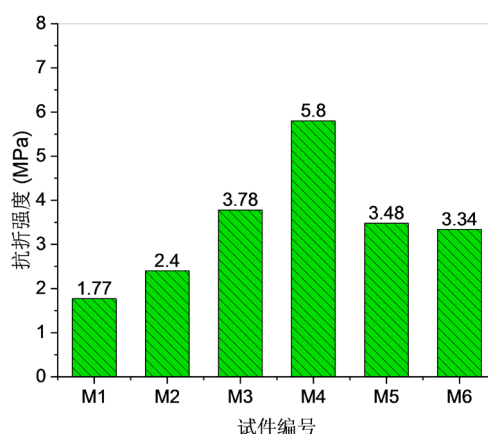


Figure 3. 7 d flexural strength

图 3. 7 d 抗折强度

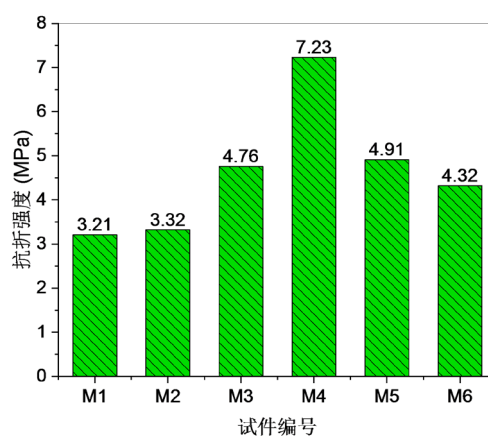


Figure 4. 28 d flexural strength

图 4. 28 d 抗折强度

3.2. 抗压强度

砂浆 7 d 和 28 d 抗压强度试验结果分别如表 6、图 5 和图 6 所示。图 5 为砂浆 7 d 龄期的抗压强度, 通过图 5 可知, M2 的 7 d 抗压强度小于 M1, 相比 M1 降低了 47.4%, 其他组的 7 d 抗压强度值都明显高

于不掺纤维的 M1 的值。砂浆 7 d 龄期的抗压强度最大值发生在 M4 组，为 68.9 MPa，是 M1 的 15.33 MPa 的 4.49 倍。

图 6 为砂浆 28 d 龄期的抗压强度，通过图 6 可知，M2 的 28 d 抗压强度同样小于 M1，相比 M1 降低了 47.1%。对比 M1、M2、M3 的抗压强度值可知，M3 的抗压强度大于 M1，及 M2 强度值的降低并不是掺入 2% 的玻璃纤维造成，而是矿物掺合料的影响，即矿粉由 30% 降低为 15%，同时粉煤灰由 30% 增加到 40% 造成的。即此时矿物掺合料的掺入比例造成了矿物掺合料的“负混掺效应”，抵消了玻璃纤维掺入的正增强效应。

掺入纤维后，砂浆的抗压强度先增加后降低，M4 的 28 d 的抗压强度值最大，为 81.86 MPa，是对照组 M1 强度值的 3.17 倍。

Table 6. Compressive strength test results

表 6. 抗压强度测试结果

| 编号 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7 天抗压强度 | 15.33 | 8.06 | 17.91 | 68.9 | 26.94 | 18.33 |
| 28 天抗压强度 | 25.8 | 13.65 | 31.74 | 81.86 | 41.5 | 29.1 |

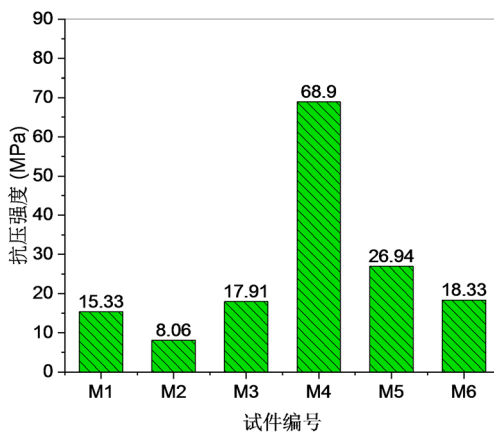


Figure 5. 7 d compressive strength

图 5. 7 d 抗压强度

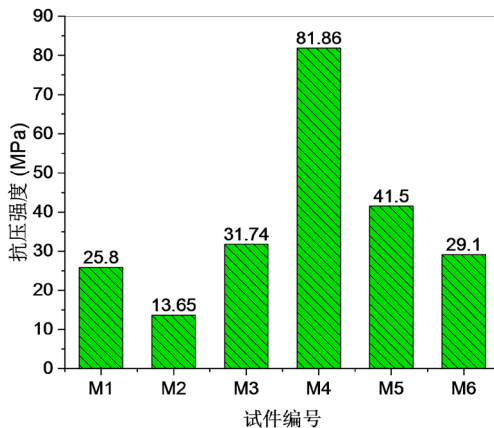


Figure 6. 28 d compressive strength

图 6. 28 d 抗压强度

4. 结论

1) 掺入混杂玻璃纤维和聚丙烯纤维, 以及粉煤灰、硅灰和矿粉等矿物掺合料对砂浆的强度特性都有显著影响。

2) 掺入不适宜比例的矿物掺合料, 会造成矿物掺合料的“负混掺效应”抵消掺入纤维的正增强效应。造成砂浆抗压强度的降低。

3) 本试验中 M4 的 28 d 抗折强度和抗压强度分别是 7.23 MPa 和 81.86 MPa, 分别是对照组 M1 的 2.25 倍和 3.17 倍。综合考虑混杂纤维和矿物掺合料作用下混杂纤维增强砂浆的强度改善效果, M4 为最优配合比。

基金项目

省级大学生创新训练计划项目(编号: S202010225101)。

参考文献

- [1] Pakravan, H.R., Latifi, M. and Jamshidi, M. (2017) Hybrid Short Fiber Reinforcement System in Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **142**, 280-294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059>
- [2] 赵凯月, 王艳, 张金团, 等. 混杂纤维混凝土研究现状[J]. 混凝土, 2018, 341(3): 138-143+146.
- [3] 朱亮. 混杂纤维改性混凝土的力学性能与微观机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [4] Banthia, N. and Gupta, R. (2004) Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC): Fiber Synergy in High Strength Matrices. *Materials and Structures*, **37**, 707-716. <https://doi.org/10.1007/BF02480516>
- [5] Banthia, N., Moncef, A., Chokri, K., et al. (1995) Uniaxial Tensile Response of Microfibre Reinforced Cement Composites. *Materials & Structures*, **28**, 507-517. <https://doi.org/10.1007/BF02473155>
- [6] 王高明, 郭兆来, 郑春扬, 等. 纤维混杂对水泥基材料力学性能以及抗裂性能的影响[J]. 混凝土世界, 2012(7): 59-62.
- [7] 吴昊, 李志家, 彭伟康, 等. 聚乙烯醇纤维对粉煤灰水泥体系的力学性能影响[J]. 土木工程, 2020, 9(6): 8.
- [8] 权长青, 焦楚杰, 杨云英, 等. 混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019(3): 363-370.
- [9] 胡红梅, 马保国. 混凝土矿物掺合料[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [10] 张丽蓉. 矿物掺合料对混凝土力学性能及抗氯离子渗透性能研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [11] 谭毅. 矿物掺合料对混凝土力学性能和氯离子扩散影响的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.