

纤维混杂对超高性能纤维增强水泥基复合材料力学性能的影响

张 浩¹, 张丽辉², 刘建忠²

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 南京 211189; 2. 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 211110)

摘 要:采用最紧密堆积理论对 UHPFRC 进行配合比设计, 并通过应用 Excel Solver Tool 进行编程求解, 实现了 UHPFRCC 符合体系的理论设计, 利用石灰石粉改善流动性的作用得到最终配合比。基于基准配合比, 研究了钢纤维与合成纤维混杂对 UHPFRCC 的力学性能的影响。试验结果表明: 基于 Dinger-Funk 模型可实现自密实 UHPFRCC 的配合比设计; 混杂纤维可增强 UHPFRCC 的抗压强度, 但抗折强度有所降低; 相比于单掺 2% 钢纤维的 UHPFRCC, 合成纤维的取代掺入均降低了 UHPFRCC 的抗压强度和抗折强度。

关键词:超高性能纤维增强水泥基复合材料; 纤维混杂; 配合比; 力学性能

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0199-05

Effect of hybrid fibers on mechanical behavior of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites

Zhang Hao¹, Zhang Lihui², Liu Jianzhong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China;

2. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Nanjing 211110, P. R. China)

Abstract: Based on the closest packing theory, combining Funk-Dinger model with Microsoft Excel Solver Tool determines the weight of cementitious materials which is used to develop the UHPFRCC. Using limestone to improve the flowability can determine the final mix proportion. Experimental results show that the maximum density theoretical model based on the Dinger-Funk equation can be applied to the mix proportion design of UHPFRCC; Hybrid fibers can increase the compressive of UHPFRCC and decrease flexural strength; compared with the UHPFRCC in corporation of 2% steel fibers, addition of synthetic fibers reduces the compressive strength and flexural strength of UHPFRCC.

Key words: UHPFRCC; hybrid fibers; mix proportion; mechanical behavior

超高性能水泥基纤维增强复合材料 (ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites, UHPFRCC) 具有比强度高、复合能力强、耐久性优异等特点, 其在防护工程、高层建筑、大跨结构领域具有广阔前景。近年来, UHPFRCC 已经成为了国际工程材料领域的一个研究热点^[1-2]。

在现有研究中基于线性填充密度模型

(LPDM), 固体悬浮模型 (SSM) 和压缩密实模型 (CPM) 3 种模型的配合比设计方法是在固体组分或组分组合填充充分数的基础上进行的, 但 UHPFRCC 原料大多为细颗粒, 这些方法较难确定细颗粒的填充充分数^[3]。此外, 纤维是 UHPFRCC 中重要的组分, 起到增强增韧的作用, 有效改善了水泥基基体的抗拉抗弯性能。自身弹性模量较低的有机纤维虽然

对水泥基材料的增强增韧效果不明显,但可以阻止早期混凝土塑性裂缝发展的侨联作用,提高混凝土的介质连续性,从而提高硬化混凝土的抗拉强度,钢纤维起到组织硬化混凝土破坏时宏观裂纹的发展的作用,从而提高了混凝土的断裂韧性^[4]。因此,文章基于密实堆积理论几何计算工具优化了 UHPFRCC 的配合比,在最佳基体配合比基础上研究了混杂纤维对 UHFRCC 力学性能的影响。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

水泥采用江南小野田 P·II52.2,7 d 抗压强度为

57.5 MPa,抗折强度为 8.2 MPa,粉煤灰采用南京热电厂生产的超细粉煤灰,比表面积为 800 m²/kg;微硅粉密度为 2.19 g/cm³,比表面积为 2 200 m²/kg;细集料采用标准中级砂;纤维采用江苏博特新材料江苏省博特新材料有限公司研制和生产的润强丝,纤维的类型选用断面为圆形的平直型钢纤维、新型聚甲醛(POM)纤维和聚乙烯醇纤维(PVA),纤维特性参数见表 1 所示;外加剂采用江苏省博特新材料有限公司研制和生产的超高减水型羧酸类高性能减水剂(简称 SP),固含量为 40%,最大减水率可达 40%;水采用自来水;胶凝材料的化学组成见表 2 所示。

表 1 纤维性能指标

纤维种类	纤维类型	纤维直径/ μm	长度/mm	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	断裂强 度/MPa	弹性模 量/GPa	断裂伸 长率/%
钢纤维(LS)	圆直型	200.0	13	7.8	2 900	210.0	4.0
聚甲醛纤维(POM)	束状单丝	27.6	12	1.4	576	5.7	21.3
聚乙烯醇纤维(PVA)	束状单丝	27.6	12	1.3	1 000	8.0	9.0

表 2 胶凝材料的化学组成 %

成分	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	LOI
C	63.80	19.41	1.29	2.91	4.33	3.90	2.44
SL	34.53	29.86	11.25	0.54	18.11	3.13	2.78
SF	0.14	98.10	0.23	0.11	0.21	0.51	1.04

1.2 成型及养护方式

先将水泥、硅灰及超细矿粉倒入搅拌机干拌 30 s,加入水和外加剂出现流动状态后加入砂和纤维,搅拌 4~7 min,搅拌完成后浇筑 40 mm×40 mm×160 mm 的三联模中成型强度试件,常温静停 12 h,拆模后再 90 °C 的热水中养护 2 d。

1.3 试验方法

1) 原材料粉料颗粒粒径分布采用激光粒度仪进行测试得到。

2) 流动度按照《水泥胶砂流动度测试方法》(GB2419—1999)中的流动度测试模具进行流动度测试,不进行跳桌试验。

3) 参考硅酸盐水泥混凝土试验标准 GBJ80—85《普通混凝土力学性能试验方法》规定对超高性能混凝土进行抗压抗折试验,抗压试验中加载速度为 2 400±200 N/s,抗折试验加载速度为 50±10 N/s。

2 基于 Dinger-Funk 方程的最紧密堆积模型与配合比设计

对于连续力度体系,最紧密堆积的数学模型的基础为 Fuller 紧密堆积理论和 Andreasen 模型为

$$P(D) = \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^q, \quad (1)$$

在此基础上 Dinger 和 Funk 在粉体中引入小颗粒对 Andreasen 方程进行了修正,得到 Dinger-Funk 模型为

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}, \quad (2)$$

式中: D 表示粒径, μm ; $P(D)$ 表示是小于粒径 D 的总固体分数; D_{\max} 表示最大粒径, μm ; D_{\min} 表示最小粒径, μm ; q 表示分布模量。

Brouwers^[5]揭示了在理论上 q 值取 0~0.28 时将得到最优堆积,Hunger^[6]通过试验验证了设计 SCC 是需要取 q 值的范围在 0.22~0.25。因此,研究中确定 q 值为 0.23。进而,通过调整不同物料的掺入比例得到最符合 Fuller 曲线的比例确定料比。

配合比问题转化为给定的配制超高性能混凝土的各种细粒的粒径分布函数、整个体系中最大粒子直径和最小粒子直径,以及理想曲线的曲线拟合问题,通过运用最小二乘法求其均方差 RSS 最小来实现:

$$RSS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1}))^2}{n} \rightarrow \min. \quad (3)$$

限定条件为 $0.145 \leq V_c \leq 0.323, 0.001 \leq V_{SF} \leq 0.114, 0.001 \leq V_{SL} \leq 0.278, 0.001 \leq V_w \leq 0.025, V_w + V_{sp} + V_{air} + V_{aggregat} = 1$; 通过 Microsoft Excel 中自

带有 Excel Solver Tool 规划求解程序进行求解, 基于石粉可以改善水泥分散和减少胶状物产生的作用, 并同时保证强基础上, 选用超细碳酸钙替代矿粉; 凝胶材料的粒径分布如图 1 所示; 求解结果如图 2 所示; 配合比确定如表 3 所示。

表 3 优选配制配合比

砂胶比	水胶比	水/kg	水泥/kg	硅灰/kg	超细矿粉/kg	石灰石粉/kg	砂/kg	减水剂
1.1	0.17	176	770	110	110	110	1 100	3.3%胶材

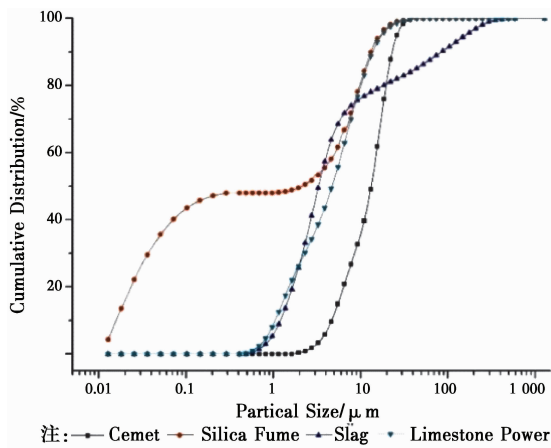


图 1 胶凝材料的粒径分布

POM; 钢-PVA 纤维混杂方式分别为 1.99%LS+0.01%PVA, 1.97%LS+0.03%PVA, 1.95%LS+0.05%PVA; 对流动性影响如图 3 和图 4 所示。

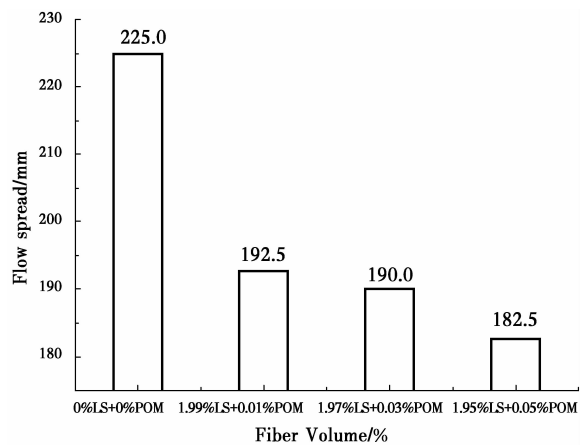


图 3 钢-POM 纤维混杂对超高性能混凝土扩展度的影响

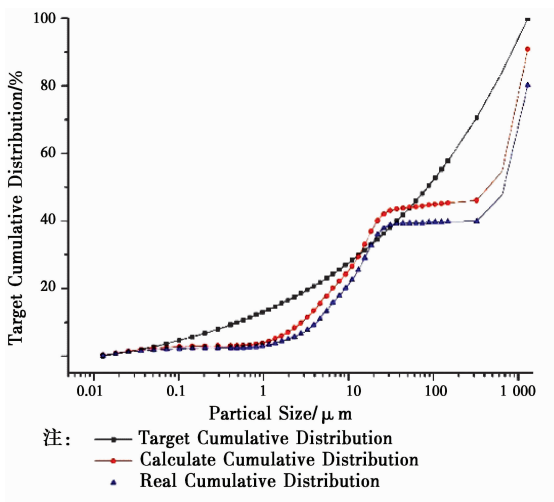


图 2 基于最紧密堆积模型配合比求解结果与理想粒径分布曲线的比较

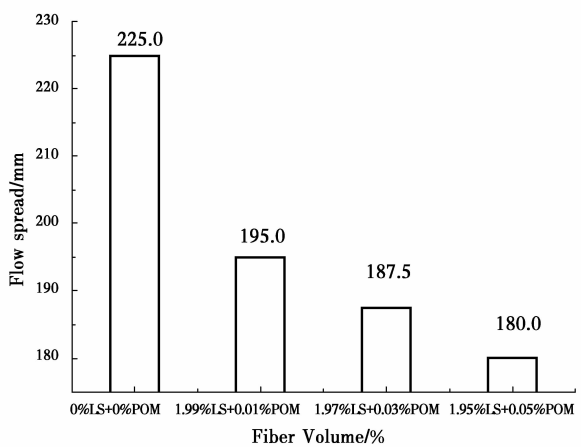


图 4 钢-PVA 纤维混杂对超高性能混凝土扩展度的影响

3 混杂纤维对 UHPFRC 的流动性影响

纤维掺入方式按照总的体积掺量为 2%, 钢-POM 纤维混杂方式分别为 1.99%LS+0.01%POM, 1.97%LS+0.03%POM, 1.95%LS+0.05%

钢纤维与合成纤维混杂对流动扩展度影响显著, 随着 POM 与 PVA 纤维体积掺量, 流动扩展度降低了幅度增加。也可分析得到, 加入 PVA 纤维对流动度影响比加入 POM 显著。纤维对超高性能混

凝土的影响主要是对骨料的堆积密实度产生影响是大幅度降低堆积密实度,进而降低了超高性能混凝土的屈服应力。即中的被降低,导致的降低。

4 混杂纤维对 UHPFRCC 的抗压强度影响

图 5 和图 6 分别为钢-POM 和钢-PVA 纤维混杂对抗压强度的影响。从图中可以分析得到,随着合成纤维的掺入量的增加,抗压强度呈上升趋势;与掺量为 2%长钢纤维超高性能混凝土的抗压强度相比,掺入 PVA 和 POM 纤维等体积替代钢纤维后的抗压强度都低于掺量为 2%长钢纤维超高性能混凝土的抗压强度合成纤维体积掺量较高对混凝土抗压强度不利,该规律与 Moncef 等^[7]发现的规律一致。

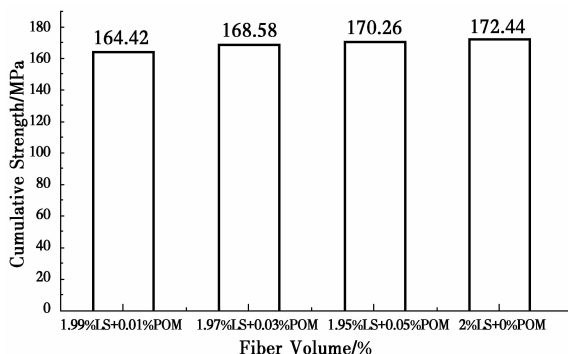


图 5 钢-POM 纤维混杂对抗压强度的影响

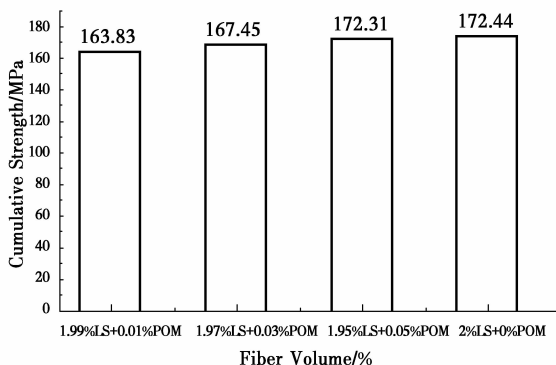


图 6 钢-PVA 纤维混杂对抗压强度的影响

5 混杂纤维对 UHPFRCC 的抗折强度影响

图 7 和图 8 分别为钢-POM 和钢-PVA 纤维混杂对抗折强度的影响。从实验结果可以分析得到: 1)与基准超高性能混凝土相比,钢-合成纤维混杂提高了超高性能混凝土的抗折性能;2)随着合成纤维

的掺入量的增加,抗折强度呈下降趋势;3)与掺量为 2%长钢纤维超高性能混凝土的抗折强度相比,掺入 PVA 和 POM 纤维等体积替代钢纤维后的抗折强度都低于掺量为 2%长钢纤维超高性能混凝土的抗折强度都降低,降低幅度较大;4)对比 POM 与 PVA 纤维替代钢纤维相同比例下,使用 PVA 纤维的抗折强度比 POM 替代后的抗折强度要高。

合成纤维的加入大大降低了流动度,合成纤维对基体流动度的减小导致钢纤维在垂直钢纤维加载方向上的分散不均匀。进行抗折试验时,纤维在拔出过程中的桥接作用无法充分地发挥,因此,合成纤维的加入导致了抗折强度的降低。

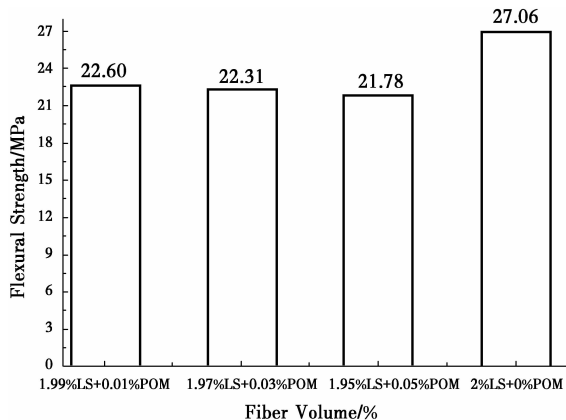


图 7 钢-POM 纤维混杂对抗折强度的影响

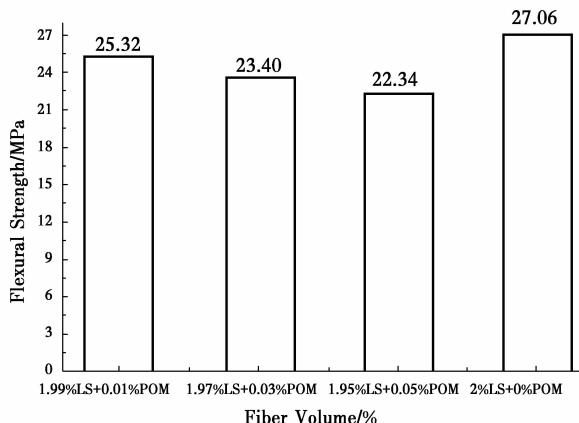


图 8 钢-PVA 纤维混杂对抗折强度的影响

6 结 论

1)基于最紧密堆积理论,采用 Funk-Dinger 模型,并利用 Microsoft Excel 中 Solver Tool 实现了对 UHPC 中胶凝材料质量的确定,准配合比质量比如下:m(水泥):m(硅灰):m(超细矿粉):m(超细碳酸钙):m(中级砂):m(水):m(减水剂)=770:110:

110:110:1 100:176:33。

2)利用悬浮液粘度公式和混凝土与水泥净浆的屈服应力的关系分析得到,钢纤维的加入降低了骨料的堆积密实度,进而降低了超高性能混凝土的屈服应力影响其流动性。

3)钢-合成混杂纤维随着合成纤维体积掺量的增加,抗压强度随之增加,但小于单掺2%钢纤维的抗压强度。

4)随着合成纤维的掺入量的增加,抗折强度呈下降趋势,同时,PVA纤维的抗折强度比POM替代后的抗折强度要高,从纤维分散的角度揭示了以上现象。

参考文献:

[1] 赖建忠,孙伟,张云升.生态型超高性能混凝土的弯曲行为研究[J].武汉理工大学学报,2007,29(3):42-45.
[2] Peda M M, Shrive N G, Gillott J E. Microstructural investigation of innovative UHPC [J]. Cement & Concrete Research,1999,29(3):323-329.

[3] Yu R, Spiesz P, Brouwers H J H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) [J]. Cement & Concrete Research,2014,56(2):29-39.
[4] Bantia N, Gupta R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete [J]. Cement & Concrete Research, 2006,36(7):1263-1267.
[5] Brouwers H J H, Radix H J. Self-compacting concrete; theoretical and experimental study [J]. Cement & Concrete Research, 2005,35:2116-2136.
[6] Hunger M. An integral design concept for ecological self-compacting concrete [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology,2010.
[7] Lin Z, Kanda T, Li V C. On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites [J]. Materials & Structures, 2011,1.

(编辑 詹燕平)