第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200216

# 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计

余 睿[1]，范定强[1,2]，水中和[1]，王鑫鹏[3]

(1. 硅酸盐建筑材料国家重点实验室，武汉 430070；2. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070；
3. 青岛理工大学土木工程学院，青岛 266033)

**摘 要**：针对修正的 Andreasen-Andersen (MAA)颗粒堆积模型设计超高性能混凝土(UHPC)时会存在两个弊端，(即未验证湿堆积状况下的可靠性、未考虑钢纤维掺入对颗粒堆积体系的扰乱)，采用二次饱和 D-最优化模型和钢纤维等效颗粒直径模型对其进行优化与完善，并利用 UHPC 材料性能对提出的新思路进行反向验证。结果表明：基于建立的湿堆积密实度二次饱和 D-优化设计模型有效验证了 MAA 模型在湿堆积状态下的适用性和可靠性；同时，通过评价钢纤维和等效替代颗粒对湿堆积密实度的影响，确定了长 13 mm、直径 0.2 mm 的钢纤维的等效颗粒直径为 5.65 mm；将钢纤维以球形颗粒的形式纳入 MAA 模型中，可以制备出基体密实、抗压强度较高的 UHPC 材料。

**关键词**：超高性能混凝土；Andreasen-Andersen 模型；D-最优设计；钢纤维；等效颗粒直径
**中图分类号**：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1145–10
**网络出版时间**：2020–06–23



## Mix Design of Ultra-High Performance Concrete Based on Particle Densely Packing Theory

*YU Rui*[1], *FAN Dingqiang*[1,2], *SHUI Zhonghe*[1], *WANG Xingpeng*[3]
(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan 430070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 430070, Shandong, China)

**Abstract:** There are two inherent drawbacks in designing ultra-high performance concrete (UHPC) by the modified Andreasen-Andersen (MAA) model, *i.e*., unproven reliability under wet conditions and ignorance of disturbing effect of steel fiber on particle packing skeleton. In this work, the D-optimal mixture design model and the equivalent spherical diameter of steel fires were adopted to verify and optimize the MAA model, and the properties of the optimized UHPC were utilized to verify the feasibility of the new proposed method. The results reveal that the MAA model is also suitable to be utilized under wet conditions. Moreover, the equivalent spherical diameter of steel fibers ($L$=13 mm, $d$=0.2 mm) is 5.65 mm, which is determined by evaluating the effect of screening particles and steel fibers on wet packing density. In addition, the employed steel fibers that are treated as spheroidal particles can be implanted into the MAA model for the optimized design of new UHPC, which has a densely packing structure and an admirable compressive strength.

**Keywords:** ultra-high performance concrete; Andreasen-Andersen model; D-optimal design; steel fiber; equivalent particle diameter

超高性能混凝土(UHPC)是一种革命性的新型水泥基复合材料，基于颗粒最紧密堆积理论，实现了超凡的机械性能与耐久性能，在工程建设中具有巨大的潜力与价值[1–5]。不同于普通混凝土，超高性能混凝土制备的基本原则为：优化颗粒级配以形成堆积密实的基体，并通常需要加入钢纤维进行增韧[2,4–5]。由此，科学合理设计 UHPC 的配合比以形成基体的最紧密堆积以及适量掺入钢纤维增强是保证其优越性能的关键[2, 4–5]。传统的 UHPC 设计通常是基于经验性或者大量实验佐证，缺乏科学的颗粒堆积理论指导，且基于这些传统方法设计的配合比，通常得到的只是“可用”的而不是最优的配合比，导

收稿日期：2020–03–20。　修订日期：2020–04–28。
基金项目：国家自然科学基金(51608409)。
第一作者：余睿(1986—)，博士，研究员。

**Received date:** 2020–03–20.　**Revised date:** 2020–04–28.
**First author:** YU Rui (1986–), male, Ph.D., Professor.
**E-mail:** r.yu@whut.edu.cn

致 UHPC 配合比复杂多样，性能不稳定，造价昂贵等问题，制约了 UHPC 的工程应用与发展[2, 5–6]。因此，建立起科学化、理论化的 UHPC 配合比设计方法是必要的。

当前，UHPC 的理论化设计主要是基于颗粒的紧密堆积模型。其中，改进的 Andreasen 和 Andersen (Modified Andreasen and Andersen，MAA)模型是一种经典的连续颗粒堆积模型。相比于其他堆积模型，MAA 模型由于其具有理论性与实用性，被广泛应用于混凝土的配合比设计中[5–7]。Yu 等[5, 8]采用 MAA 颗粒堆积模型优化了原材料的级配组成，设计了一种具有密实骨架的 UHPC，结果表明利用 MAA 模型可以设计水泥用量相对较低但性能优异的 UHPC。进一步地，Wang 等[9–11]根据 MAA 模型，将铅锌矿尾矿、再生珊瑚基材料、建筑拆迁垃圾等废弃物纳入 UHPC 中以替代水泥，开发了生态型 UHPC。因此，将 MAA 用于优化设计 UHPC 配合比是可行的，并表现出较大的优势。然而，不可忽略的是，MAA 模型存在其固有弊端：(1) 该模型是基于颗粒在干燥状态下的理论堆积模型，然而事实上混凝土的颗粒堆积是在湿润状态(加入了水和减水剂)下完成的，伴随着水化作用，颗粒团聚作用，水膜包裹作用等，因此，在湿堆积状态下是否仍能保持颗粒的最紧密堆积状态有待验证[12–13]；(2) 该模型只适用于优化固体颗粒堆积，而未考虑纤维的加入对堆积体系的扰乱与破坏[5, 14–15]。因此，为了更加准确高效地设计 UHPC，对 MAA 模型进行完善与优化是必要的。

二次饱和 D-最优设计方法是一种有效的统计设计方法。其可以将多个变量对响应值的影响以及变量之间的交互作用转换成数学模型，具有计算简便、精度高、且考虑了变量变异等优点，可以有效应用于混凝土优化设计中[16–17]。例如，Khan 等利用二次饱和 D-最优设计方法建立了水胶比(W/B 比)、水泥掺量、粉煤灰掺量细集料百分率和减水剂掺量对混凝土工作性能、机械性能影响的统计模型，并基于此求得了最佳自密实混凝土的配合比[17]，结果表明二次饱和 D-最优设计能准确评价减水剂等原材料和混凝土宏观性能的关系。另一方面，为了减小纤维对颗粒堆积体系的扰乱，Grünewald 利用 Yu. A.B.纤维等效直径模型，将纤维视为有一定等效球形直径的颗粒纳入颗粒堆积模型中，以此优化设计自密实混凝土[18]。然而 Yu. A.B.模型是一种纯物理模型，并未考虑混凝土的湿堆积状态，使得其在混凝土颗粒优化设计中受到限制[18–19]。由此看来，无论是为了更加准确验证 MAA 的堆积可靠性，还是优化纤维对混凝土堆积体系的扰乱，都必须基于颗粒的湿堆积状态下。

为此，通过实验与理论相结合以完善 MAA 颗粒堆积模型，并设计一种具有高密实程度的超高性能混凝土。首先利用二次饱和 D-最优设计建立 UHPC 各原材料组分(包括减水剂)与湿堆积体系的关系，得出堆积密实度最高的 UHPC 配比，并以此对 MAA 模型的湿堆积可靠性进行验证；之后，为了实现纤维对 UHPC 堆积系统扰乱的最小化，通过使用不同粒径的细砂颗粒来代替钢纤维，建立替代颗粒粒径与湿堆积密实度的数值模型，以确定钢纤维的等效颗粒直径，并将其以球形颗粒的形式纳入 MAA 颗粒堆积模型中，由此设计一种具有高密实程度的 UHPC。

# 1 实验

## 1.1 原料

水泥，华新生产的 P·II 52.5 级普通硅酸盐水泥；硅灰，成都东南星生产的粉末状硅灰；石灰石粉，白色粉末。水泥、硅灰、石灰石粉作为胶凝材料，其化学成分如表 1 所示。骨料，选用洗净的连续级配河砂，含泥量小于 0.5%。减水剂为江苏苏博特公司生产的高效聚羧酸减水剂，固体含量为 20%。采用贝卡尔特公司生产的镀铜圆直钢纤维(长度为 13 mm，截面直径为 0.2 mm，抗拉强度为 2 GPa)。

## 1.2 MAA 模型

采用改进的 Andreasen＆Andersen 颗粒堆积模型[5, 7–8]得到混凝土的基本配合比，以分析混合物中

**表 1 胶凝材料的化学组分**

**Table 1 Chemical compositions of the utilized cementitious materials** *w*/%

| Material | $SiO_2$ | CaO | $Fe_2O_3$ | MgO | $SO_3$ | $Al_2O_3$ | $K_2O$ | $Na_2O$ | $P_2O_5$ | L.O.I. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OPC | 19.20 | 64.93 | 3.32 | 1.61 | 3.35 | 4.18 | 0.78 | 0.09 | 0.09 | 2.49 |
| LP | 2.90 | 49.27 | 0.14 | 0.75 | 0.04 | 1.06 | 0.57 | 0.08 | 0.24 | 39.30 |
| SF | 94.65 | 0.36 | 0.15 | 0.47 | 0.69 | 0.25 | 0.84 | 0.13 | 0.17 | 2.29 |

OPC: Ordinary Portland cement; LP: Limestone powder; SF: Silica fume; *w* is mass fraction.

所有应用颗粒材料的最佳粒径分布从而实现最紧密堆积以形成较高密实度的基体，具体如式(1)所示：

$$P(D)=\frac{D^q-D_{\min}^q}{D_{\max}^q-D_{\min}^q} \tag{1}$$

式中：$P(D)$是总固体中小于粒径 $D$ 的分数；$D$ 是粒径(μm)；$D_{\max}$ 是体系中的的最大粒径；$D_{\min}$ 是最小粒径；$q$ 是分布模量(取 0.23)。利用 MATLAB 软件对式(1)进行建模，采用最小二乘法(LSM)的算法[如式(2)所示]，调整混凝土混合物中每种材料的质量比例，直到达到混合物与目标曲线之间的最佳拟合位置。

$$S_s=\sum\nolimits_{i=1}^{n}[(P_{\text{mix}}(D_i^{i+1})-P_{\text{tar}}(D_i^{i+1})]^2 \tag{2}$$

式中：$S_s$ 为残差平方和，$P_{\text{mix}}$ 及 $P_{\text{tar}}$ 分别为目标级配曲线和实际堆积曲线。

### 1.3　制备方法

采用的搅拌流程如图 1 所示，搅拌完成后将浆体倒入相应尺寸模具，养护 24 h 后拆模并置于标准养护室[温度(20±2) ℃，湿度大于 95%]养护至相应龄期。

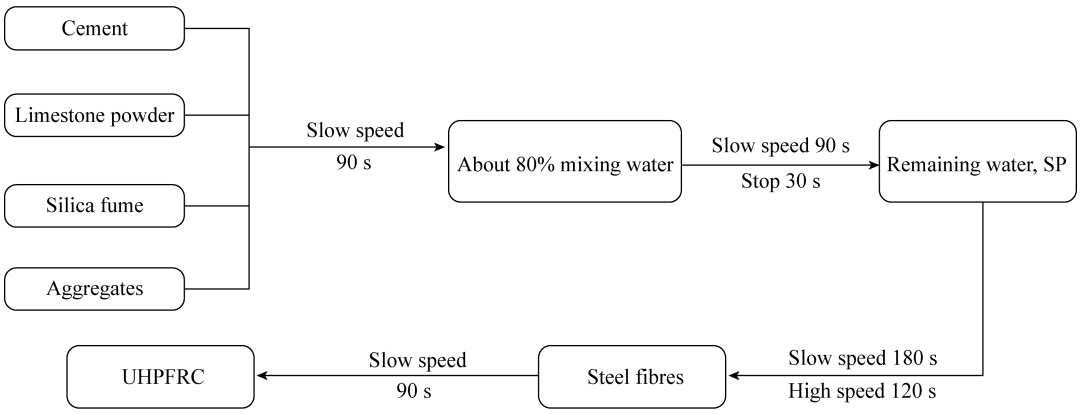



图 1　UHPC 搅拌制备流程

Fig. 1　Mix processes of UHPC

### 1.4　测试

1.4.1　湿堆积密实度　　采用湿堆积密度法表征 UHPC 的实际湿堆积状况[12–13, 20]。将已制备的浆体倒入一个容积为 220 mL 的圆柱形容器，加满后固定在振动台上振动 30 s，刮平溢出的多余部分，并称量容器中浆体的质量，然后利用式(3)计算密实度。通过调整水固比以找出最大密实度即为湿堆积密实度 $\psi$。

$$\psi=\frac{M/V}{\rho_w R_w+\rho_a R_a+\rho_{SF} R_{SF}+\sum\rho_x R_x} \tag{3}$$

式中：$M$ 为浆体质量；$V$ 为容器体积；$\rho_w$、$\rho_a$、$\rho_{SF}$ 和 $\rho_x$ 分别为水、骨料、钢纤维和胶凝材料的表观密度；$R_w$、$R_a$、$R_{SF}$ 和 $R_x$ 分别为水、骨料、钢纤维和胶凝材料的体积与所有固体总体积的比值。

1.4.2　抗压强度　　抗压强度按照标准 GB17671—1999 进行。试块养护至指定龄期，将 3 个尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体切割成 6 个尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm 的立方块进行测试，并取其算术平均值作为抗压强度值。

1.4.3　孔结构　　微观孔结构采用压汞法(MIP)：将养护 28 d 的试块切割成边长为 5 mm 的立方块并浸泡在丙酮中终止水化，然后在(60±2) ℃的真空气氛中干燥 4 h。之后，将立方试块置于 AutoPore IV9510 型全自动压汞仪中进行微观孔结构测试。此外，UHPC 孔隙率需要根据下式进行换算：

$$P_{SM}=P_M\cdot\frac{V_M}{V_S+V_M} \tag{4}$$

式中：$P_{SM}$ 为 UHPC 孔隙率，经由 MIP 测试获得；$V_S$ 为钢纤维体积，可由配方获得；$V_M$ 为砂浆体积，亦可由配方获得；$P_M$ 为砂浆孔隙率，即实际需要对比项。

采用 Zeiss Xradia 510 X 射线计算机断层扫描(X-CT)系统进行 UHPC 试样的细观结构测试，该系统由 X 射线源、探测器和样品台 3 部分组成，通过对样品在 360°范围内旋转投影图的三维进行重构以获得样品内部三维结构信息，共扫描像素为 2 048×2 048 的二维图片 1 601 张；然后利用 ORS Dragonfly 软件对扫描结果的孔结构进行三维重构与数值分析。

## 2 基于二次饱和 D-最优设计法的 MAA 模型验证

### 2.1 模型的建立

利用二次饱和 D-最优设计方法的优点，通过该方法建立起 UHPC 各原材料组分(包括液相)与堆积体系(湿堆积密实度)的关系的数值模型，得出湿堆积密实度最大的配合比。具体步骤如下：

1) 确定变量及其取值范围。UHPC 原材料组分(减水剂、硅灰、水泥、石灰石和砂)为自变量，湿堆积密实度为因变量，且这些变量的取值范围如表 2 所示。

2) 试验设计。使用二阶多项式对实验数据进行回归拟合，其中二级多项式如式(5)和式(6)所示；

$$E(y)=\sum_{i=1}^{q}\beta_i x_i+\sum_{i=1}^{q-1}\sum_{j=i+1}^{q}\beta_{ij}x_j x_i \tag{5}$$

$$0\leqslant x_i\leqslant 1 \qquad i=1,2,3.....q \qquad \sum_{i=1}^{q}x_i=1 \tag{6}$$

式中：$E(y)$为堆积系统响应值；$x_i$ 为各种原材料；$\beta$ 表示对应项的系数；$q$ 为自变量个数。根据统计试验设计软件 Design-Expert 8.0 确定试验方案，具体实验数据如表 3 所示。

3) 模型的建立与准确性评估。利用式(5)和式(6)对试验结果进行回归拟合，拟合结果如式(7)所示，同时进行方差分析以评估建立模型的准确性。根据方差分析，模型的 $F$ 值为 32.95，且 $P$ 值<0.000 1，说明了该模型极显著。此外，该模型的校正决定系数 Adj-$R^2$=0.95，说明此模型可以解释 95%的响应值变化；复相关系数 Pre-$R^2$=0.89，说明模型拟合程度高，如表 4 所示。综合来看，根据 D-优化设计建立的拟合某些具有较高的可靠性，且分析可信度高。

**表 2 二次饱和 D-最优设计方法的变量及其取值范围**

**Table 2 Variables and their value ranges based on D-optimal design**

| Variable | Coding | Value range | | Expectation |
|---|---|---|---|---|
| | | Min | Max | |
| SF | $x_1$(A) | 0.005 | 0.100 | |
| OPC | $x_2$(B) | 0.200 | 0.500 | |
| LP | $x_3$(C) | 0.000 | 0.200 | |
| RS | $x_4$(D) | 0.400 | 0.600 | |
| SP | $x_5$(E) | 0.008 | 0.025 | |
| WPD | $y$(F) | 0.500 | 0.900 | Maximize |

RS: River sand (0–0.6 mm); SP: Superplasticizer; WPD: Wet packing density.

**表 3 试验配合比及响应**

**Table 3 Experimental mixtures and response**

| Sample No. | $x_1$(A) | $x_2$(B) | $x_3$(C) | $x_4$(D) | $x_5$(E) | Response |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.025 | 0.35 | 0.2 | 0.4 | 0.025 | 0.657 9 |
| 2 | 0.025 | 0.353 | 0.103 | 0.503 | 0.017 | 0.729 3 |
| 3 | 0.063 | 0.313 | 0 | 0.6 | 0.025 | 0.686 8 |
| 4 | 0.1 | 0.292 | 0.2 | 0.4 | 0.008 | 0.534 5 |
| 5 | 0.025 | 0.2 | 0.2 | 0.567 | 0.008 | 0.681 9 |
| 6 | 0.1 | 0.2 | 0.084 | 0.6 | 0.017 | 0.747 2 |
| 7 | 0.025 | 0.35 | 0.2 | 0.4 | 0.025 | 0.665 6 |
| 8 | 0.025 | 0.5 | 0 | 0.45 | 0.025 | 0.619 4 |
| 9 | 0.1 | 0.392 | 0 | 0.5 | 0.008 | 0.636 6 |
| 10 | 0.025 | 0.283 | 0.2 | 0.484 | 0.008 | 0.635 5 |
| 11 | 0.025 | 0.434 | 0.134 | 0.4 | 0.008 | 0.544 5 |
| 12 | 0.025 | 0.367 | 0 | 0.6 | 0.008 | 0.612 7 |
| 13 | 0.1 | 0.375 | 0.1 | 0.4 | 0.025 | 0.606 1 |
| 14 | 0.025 | 0.283 | 0.084 | 0.6 | 0.008 | 0.601 0 |
| 15 | 0.062 | 0.326 | 0.146 | 0.446 | 0.021 | 0.696 0 |
| 16 | 0.025 | 0.5 | 0 | 0.45 | 0.025 | 0.652 5 |
| 17 | 0.025 | 0.2 | 0.15 | 0.6 | 0.025 | 0.713 1 |
| 18 | 0.081 | 0.269 | 0.119 | 0.519 | 0.012 | 0.686 9 |
| 19 | 0.025 | 0.5 | 0.067 | 0.4 | 0.008 | 0.512 7 |
| 20 | 0.1 | 0.392 | 0 | 0.5 | 0.008 | 0.676 8 |
| 21 | 0.063 | 0.2 | 0.13 | 0.6 | 0.008 | 0.605 1 |
| 22 | 0.084 | 0.5 | 0 | 0.4 | 0.017 | 0.646 6 |
| 23 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.475 | 0.025 | 0.727 8 |
| 24 | 0.1 | 0.2 | 0.084 | 0.6 | 0.017 | 0.753 6 |
| 25 | 0.1 | 0.292 | 0.2 | 0.4 | 0.008 | 0.552 2 |

通过式(8)计算相对误 $\varepsilon$，进一步评价模型的准确性。上述结果表明，利用二次饱和 D-优化设计可以有效评估 UHPC 各组分和湿堆积密实度的关系。

$$\begin{aligned}y=&10.966\,12x_1+1.709\,54x_2-0.955\,44x_3-\\&0.541\,76x_4-1138.354\,16x_5-\\&21.394\,64x_1x_2-13.754\,68x_1x_3-\\&7.732\,67x_1x_4+1174.469\,79x_1x_5-\\&3.037\,16x_2x_3+1.761\,64x_2x_4+\\&1\,187.401\,28x_2x_5-4.712\,73x_3x_4+\\&1\,178.592\,76x_3x_5+1\,185.569\,90x_4x_5\end{aligned} \tag{7}$$

$$\varepsilon=\frac{y_1-y_2}{y_1}\times 100\% \tag{8}$$

式中：$y_1$ 为实验值；$y_2$ 为模拟值。

**表 4 模型显著性评价结果**

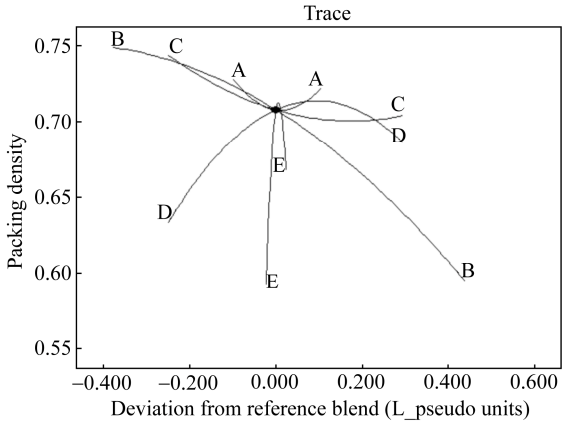
**Table 4 Evaluation of model significance**

| Response | Adj-$R^2$ | Pre-$R^2$ | $P$-value | $F$-value | Lack of fit |
|---|---|---|---|---|---|
| Values | 0.95 | 0.89 | ＜0.0001 | 32.95 | 0.43 |

### 2.2 分析变量影响

图 2 反映了不同的原材料组分(水泥、石灰石粉、硅灰、河砂和减水剂)对 UHPC 湿堆积密实度的

影响曲线，其中曲线越接近水平，代表该组分对 UHPC 湿堆积密实度的影响越小。从图 2 可以看出，减水剂的变化曲线最陡，意味着减水剂对 UHPC 的湿堆积密实度有着显著的影响。在一定掺量下，减水剂可以有效提高 UHPC 密实度。然而，但减水剂掺量进一步增加时，UHPC 的密实度将不再增加。这个现象可以解释为减水剂的使用减少了水膜厚度，使得固体粉末更易分散在 UHPC 基体，从而提升堆积密实度；然而，过量的减水剂会带来引气效应，劣化 UHPC 的堆积体系[16]。同时，细砂的加入也表现出类似的效应，即适量的细砂有利于 UHPC 形成紧密的堆积体系。过量的细砂会导致堆积体系的紊乱使得密实度下降。此外，图 3 为胶凝材料对湿堆积密实度影响的三维图与等高线图，结合图 2 和图 3 可以看出，硅灰和石灰石粉的加入可以有效提高基体密实度，这可以归因于硅灰和石灰石粉的填充效应[21−23]。因此，适量用石灰石粉取代水泥可有利于基体密实程度的提高，同时可以降低 UHPC 的能耗，有利于 UHPC 的经济化与生态化发展。



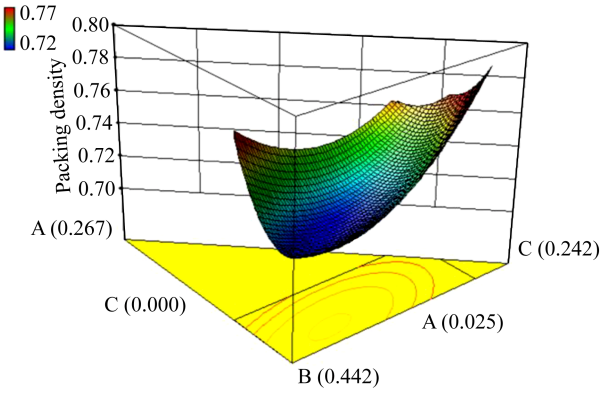

A: Silica fume, B: Limestone powder, C: Cement, D: Sand, E: Superplasticizer.

图 2　UHPC 各组分对堆积密实度的影响

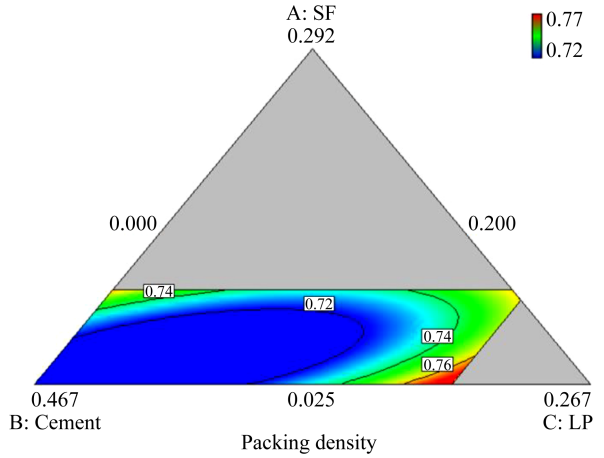
Fig. 2　Effect of variation on UHPC packing density

## 2.3　配合比设计及验证

根据建立的二次饱和 D-优化设计模型进行配合比设计，确定原材料取值范围，将模型湿堆积密实度作为目标输出，取其输出最大值作为配合比最优解，由此得到的输出响应面图(如图 4 所示)，并由此得到超高性能混凝土配合比，见表 5。表 5 对比分析了二次饱和 D-优化设计模型与 MAA 模型设计的配比，结果显示，两个模型设计的配合比具有一致性因此，虽然 MAA 颗粒堆积模型未考虑到水和减水剂等液相组分对基体堆积体系的影响，但其设计的配合比依旧能够具有最大的湿堆积密实度。上述验证试验表明使用 MAA 模型的配合比设计方法能够有效制备出高密实程度的超高性能混凝土。




(a) 3D diagram




(b) Contour plot

图 3　胶凝材料对 UHPC 湿堆积密实度的影响

Fig. 3　Effects of cementitious on wet packing density of UHPC

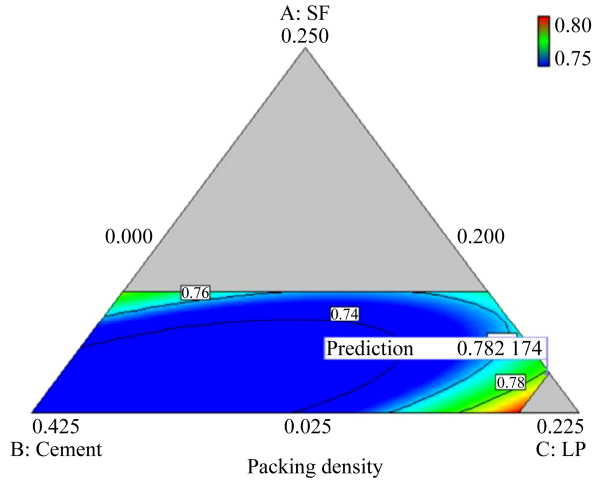



图 4　最优化设计响应面图

Fig. 4　Response of optimal mix design

表 5 超高性能混凝土的配合比设计

Table 5 Mix design of UHPC kg/m$^3$

| Model | OPC | SF | LP | RS | Water | SP |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D-optimal | 400 | 100 | 400 | 1 060 | 218 | 38 |
| MAA | 400 | 114 | 400 | 1 040 | 220 | 38 |

## 3 基于 MAA 模型的优化设计

### 3.1 钢纤维等效颗粒直径的确定

采用了 5 种粒径范围的颗粒替代等体积钢纤维，通过评估两者对湿堆积密实度的影响来确定钢纤维的等效颗粒直径。同时，为了评估 UHPC 堆积骨料对钢纤维等效直径的影响，采用了 4 种最大粒径分别为 0.60、2.36、4.75、6.00 mm 的 UHPC 进行试验测试(见表 6)。图 5 为替代颗粒和钢纤维对不同的 UHPC 的湿堆积密实度的影响。从图中可以看出，钢纤维和替代颗粒的加入会使得 UHPC 的密实度有所下降，这可以解释于额外加入的钢纤维和替代颗粒会增大堆积体系的“墙效应”[14]、“松动效应”[14]和“楔入效应”[24]，扰乱了原有的堆积系统。此外，从图 5 可以看出，当替代颗粒的粒径为 5~6 mm 时，与钢纤维对 4 种 UHPC 湿堆积密实度的影响最为接近，密实度差值依次为 0.6%、0.13%、0.2%、0.07%。由此，可以确定钢纤维的等效颗粒直径范围为 5~6 mm。

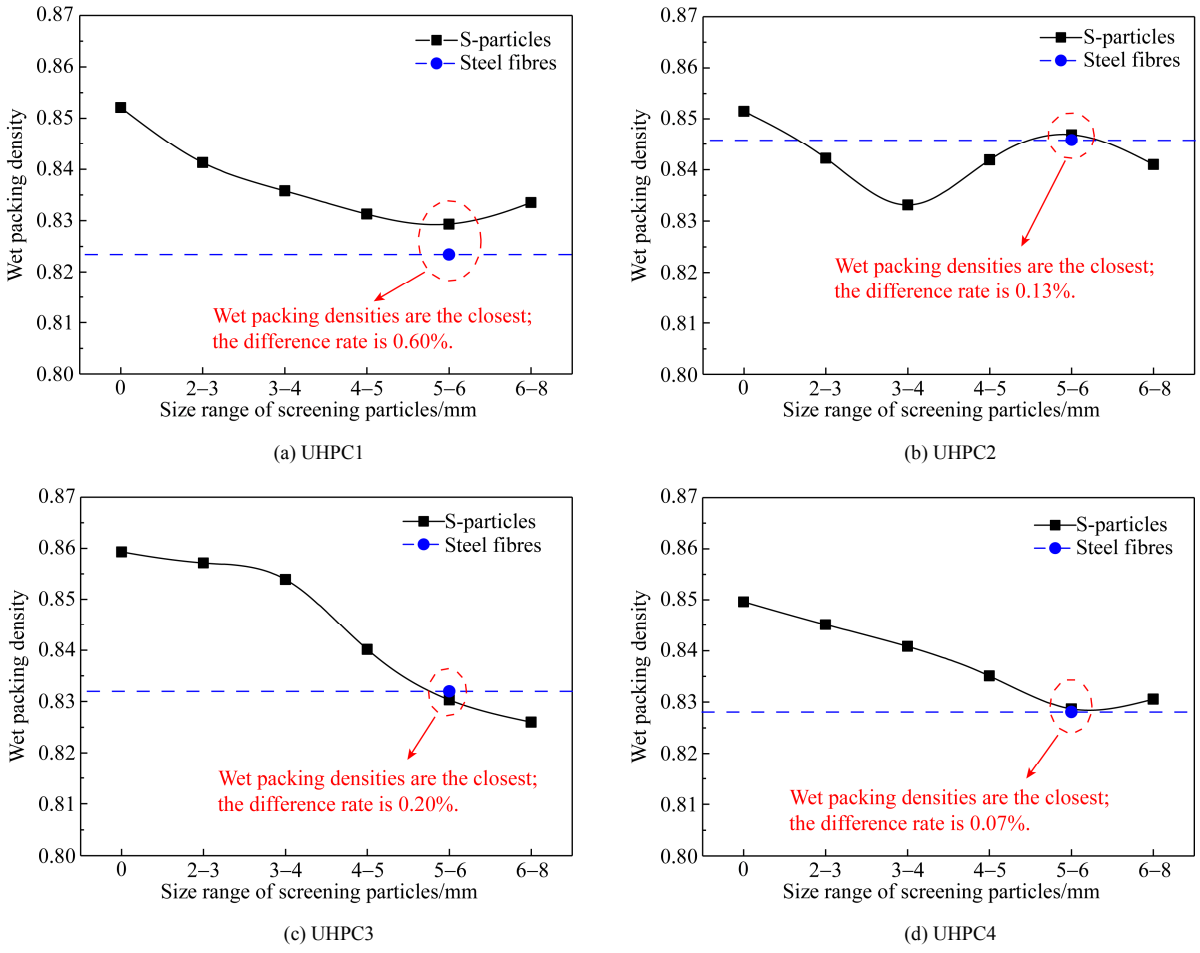



图 5 替代颗粒与钢纤维对湿堆积密实度的影响

Fig. 5 Effect of substituted particles and steel fibres on wet packing density

由于钢纤维通常是均匀的，故钢纤维的实际等效颗粒直径也应是确定值。Bui 等[25]考虑到骨料在浆体中的相互作用，骨料与浆体的体积比，骨料粒度分布和粗细骨料的影响，提出了不影响颗粒骨料

表 6 测试组 UHPC 配合比

Table 6 Mixtures of UHPC used for testing kg/m$^3$

| Mixture | OPC | SF | LP | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | SP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| UHPC1 | 690 | 114 | 255 | 1 054 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 |
| UHPC2 | 690 | 114 | 255 | 0 | 724 | 330 | 0 | 0 | 32 |
| UHPC3 | 690 | 144 | 255 | 0 | 422 | 221 | 411 | 0 | 32 |
| UHPC4 | 690 | 144 | 255 | 0 | 303 | 369 | 0 | 382 | 32 |

A1: Aggregates with the size range of 0–0.6 mm; A2: Aggregates with the size range of 0–1.25 mm; A3: Aggregates with the size range of 1.25–2.36 mm; A4: Aggregates with the size range of 2.36–4.75 mm; A5: Aggregates with the size range of 2.36–6.00 mm; SP: Superplasticizer.

堆积的平均粒径模型，如式(8)所示。

$$d_{\mathrm{av}}=\frac{\sum_i d_i m_i}{\sum_i m_i} \tag{9}$$

式中：$d_{\mathrm{av}}$ 表示颗粒的平均直径；$d_i$ 表示颗粒组分 $i$ 的平均粒径；$m_i$ 表示这部分的质量。由此，根据筛分替代颗粒的粒径分布，可计算出粒径范围为 2~3、3~4、4~5、5~6、6~8 mm 的 5 种替代颗粒的等效堆积直径依次为 2.53、3.65、4.59、5.65、7.28 mm。由此，综合上述，长度为 13 mm，截面直径为 0.2 mm 的圆直钢纤维的等效颗粒直径为 5.65 mm。

### 3.2　钢纤维植入 MAA 模型优化设计 UHPC

为了减小钢纤维对 MAA 堆积体系的干扰，将钢纤维以直径为 5.65 mm 的等效颗粒纳入 MAA 颗粒堆积模型中优化设计 UHPC。由于钢纤维的等效直径为 5.65 mm，而 MAA 模型要求颗粒级配是连续的，因此选用了颗粒粒径为 0~1.25 mm、1.25~2.36 mm、2.36~6.00 mm 骨料。根据 MAA 模型确定了钢纤维的最佳用量为每立方 2%体积分数，具体配合比如表 7 所示。此外，为了评价钢纤维对超高性能混凝土性能的影响，并证明钢纤维含量 2%是最优掺量，设计了其余 6 组不同钢纤维掺量的 UHPC (钢纤维掺量分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.5%、3.0%)作为对照组。

**表 7　基于 MAA 模型最优化设计的 UHPC 配合比**

**Table 7　Optimal mix design of UHPC based on MAA model**

| Materials | Content/(kg·m$^{-3}$) |
|---|---|
| Ordinary Plant cement P·II 52.5 | 690 |
| Silica fume | 100 |
| Limestone powder | 250 |
| Aggregate A (0–1.25 mm) | 357 |
| Aggregate B (1.25–2.36 mm) | 373 |
| Aggregate C (2.36–6.00 mm) | 302 |
| Steel fibre | 156 |
| Superplasticizer | 32 |
| Water | 190 |

### 3.3　性能评价

3.3.1　抗压强度　　图 6 为钢纤维掺量对不同养护龄期的 UHPC 抗压强度的影响。从图 6 可以看出，随着钢纤维掺量的增加，UHPC 的抗压强度逐渐上升，说明了钢纤维对 UHPC 强度具有显著的提升作用[4, 26–27]。同时，最优组 UHPC (钢纤维体积掺量 2%)在养护 28 d 后抗压强度达 171 MPa，说明了将钢纤维纳入 MAA 颗粒堆积模型可以制备得抗压强度较高的超高性能混凝土。图 6 中，钢纤维掺量超过 2%时，28 d 抗压强度达 170 MPa 以上，这与一些文献中进行高温养护后强度相当[28–29]，表明制备的 UHPC 抗压性能相对较为优异。该现象可以解释如下[30–32]：(1) 加入的高活性粉末和采用优化的颗粒堆积模型带来的积极作用；(2) 将钢纤维以等效颗粒的形式纳入了颗粒堆积模型，削弱了钢纤维对堆积体系的扰乱与破坏，从而充分发挥钢纤维增强基体强度的积极作用。此外，如图 6 所示，当钢纤维掺量超过 2%时，钢纤维对 UHPC 增强效率开始下降。

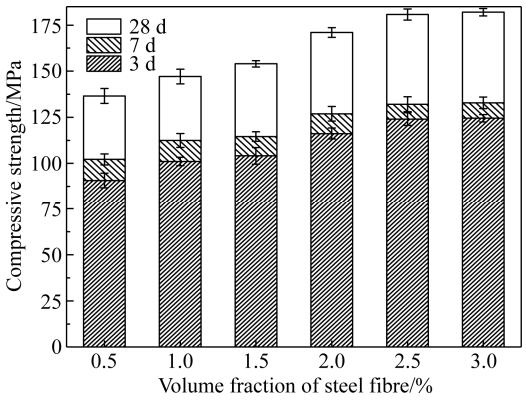



图 6　钢纤维掺量对抗压强度的影响

Fig. 6　Effects of steel fibres content on compressive strength

因此，为了深入研究钢纤维掺量对 UHPC 增强效率的影响，以提高钢纤维使用效率，研究了抗压强度随着钢纤维掺量的增长速率，结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，抗压强度的增长速率呈现先下降再上升，然后下降的趋势，其中在钢纤维掺量为 2.0%时达到了最大值，意味着此时钢纤维的增强效率是最高的，充分发挥钢纤维的增强作用。同时，图 7 描述了钢纤维掺量对湿堆积密实度的影响。根据图 7，钢纤维掺量从 0 增长到 1.0%时，湿堆积密实度逐渐下降，可解释为钢纤维的加入会扰乱堆积体系，使得 0~1.0%组湿堆积密实度有所下降。由于湿堆积密实度的下降，使得 0.5%~1.0%的钢纤维增强效率也有所下降。此外，可以发现，其变化规律与钢纤维对 UHPC 增强效率的影响规律整体上是一致的，即同样地在钢纤维掺量为 2.0%出现峰值。这说明：一方面湿堆积密实度与 UHPC 的抗压强度成正相关关系；另一方面，将钢纤维以等效颗粒的形式纳入 MAA 颗粒堆积系统是可行的，可以将钢纤维对堆积体系的负面影响最小化，以制备出抗压强度较高的 UHPC。通常情况下将钢纤维额外掺入堆

积体系中会造成堆积系统的扰乱，使得堆积密实度下降[14–15, 24]。另外，适量的钢纤维对堆积体系也有一定的填充优化作用，尤其是将钢纤维以等效颗粒的形式纳入堆积体系可有效的减小其负面影响从而充分发挥其积极效应[15, 18, 32]。因此，将钢纤维纳入 MAA 颗粒堆积体系是可行的，可以充分发挥钢纤维的积极作用，从而制得密实程度高，抗压强度较高的超高性能混凝土。

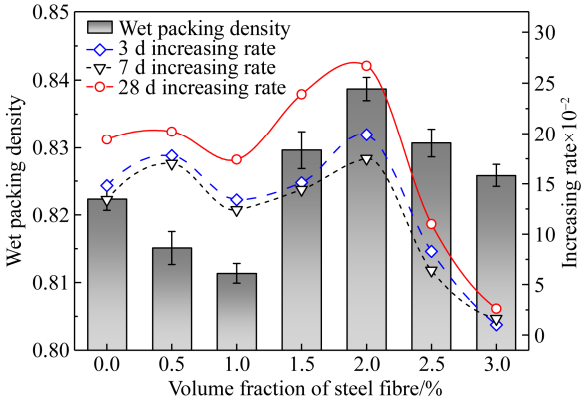
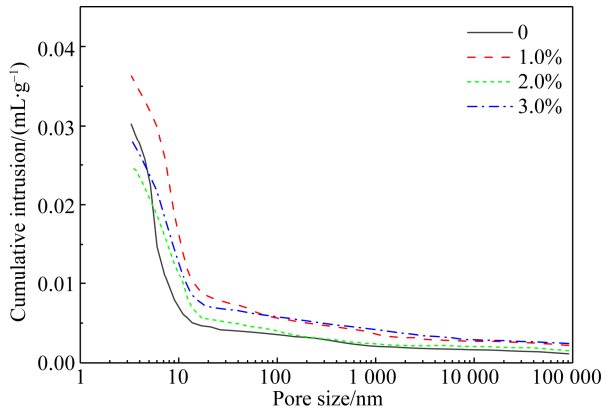
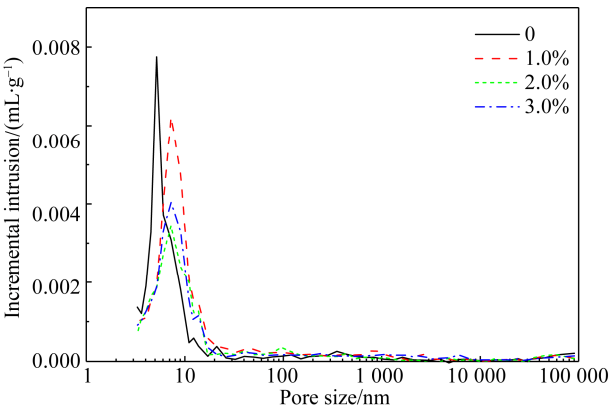



图 7 钢纤维掺量对纤维增强效率和湿堆积密实度的影响

Fig. 7 Effects of steel fibres content on enhancement efficiency and wet packing density




(a) Cumulative intrusion volume




(b) Incremental intrusion volume

图 8 不同钢纤维掺量的 UHPC 在 28 d 时的微观孔径分布

Fig. 8 Pore size distributions of UHPC with different content of steel fibres at 28 d

3.3.2 微观孔结构 利用压汞法研究分析了钢纤维掺量在微观尺度上对 UHPC 孔结构的影响，结果如图 8 所示。从图 8a 可以看出，当钢纤维掺量为 2%时，其孔体积最小，为 0.024 mL/g，而钢纤维掺量为 0%、1%、3%时，孔体积分别是 0.030、0.036、0.028 mL/g。图 8b 表示了不同纤维掺量下的 UHPC 孔径分布，UHPC 的孔径主要分布在 4~20 nm，而通常小于 20 nm 的孔对混凝土的机械性能危害较为有限，这也是 UHPC 获得优异的机械性能的重要原因之一[33]。此外，需要注意的是，与未加钢纤维的 UHPC 相比，钢纤维的加入会使得最可几孔径有所增大，这说明了钢纤维的加入会使得微观孔孔径有所增大。钢纤维的比表面积相对较大，使得增大了纤维与浆体间的过渡界面，而通常界面过渡区是混凝土的薄弱区域，该处的孔径明显大于其他区域，导致了混凝土的微观最可几孔径有所增大。总之，钢纤维以等效粒径的形式加入 UHPC 的颗粒堆积体系在微观尺度上可以使得孔隙最小化，有利于 UHPC 性能的发展。

3.3.3 细观孔结构 图 9 为不同钢纤维掺量的 UHPC 孔结构的分布情况。从图 9 可以看出，UHPC 的中微观孔结构主要分布在孔体积 $2\times10^{-6}$ 至 $1\times10^{-5}$ $mm^3$。从表 8 可以看出，在中微观尺度上，优化设计的 UHPC 组(2%钢纤维掺量)具有最低总孔隙率为 2.47%，意味着该组配比设计的 UHPC 具有最佳的孔结构，有利于其机械性能的发展。同时可以发现，UHPC 内部的气孔以非连通孔为主，然而随着钢纤维掺量的增加，UHPC 连通孔隙率也逐渐增加，尤其是钢纤维掺量超过 2.0%时，其连通孔隙率达到 1.25%，占总孔隙率的 37.87%。通常钢纤维表面容易附着气孔，而这些气孔通常是长条形或者椭圆形，容易形成物理通路，即导致了连通孔的产生[34–36]。众所周知，相比于非连通，连通孔的渗透性强，导致其对混凝土的耐久性危害更大，因此，为了限制连通孔带来的负面影响，钢纤维体积掺量不宜大于 2.0%。

因此，结合上述分析，将钢纤维以等效粒径的形式纳入 MAA 颗粒堆积模型是可行的，而且可以有效减少钢纤维对超高性能混凝土的孔结构带来

的负面影响，有利于制备性能优异的超高性能混凝土。

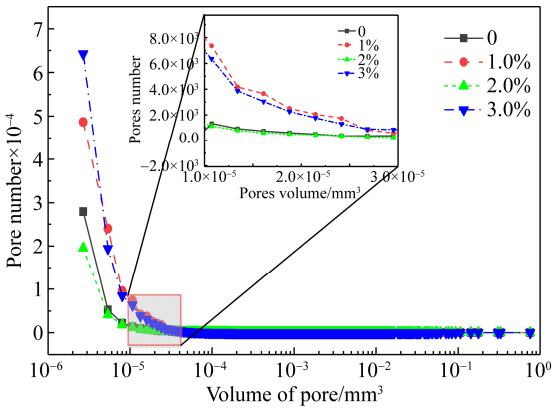



图 9　UHPC 的孔结构分布

Fig. 9　Distributions of pore size of UHPC

**表 8　钢纤维含量对 UHPC 孔隙率的影响**

**Table 8　Effects of steel fibres content on porosity of UHPC**

| Volume fraction of fiber/% | Porosity/% | | |
|---|---|---|---|
| | Connected | Non-connected | Total |
| 0 | 0.337 | 2.850 | 3.187 |
| 1 | 0.540 | 3.120 | 3.660 |
| 2 | 0.718 | 1.754 | 2.472 |
| 3 | 1.246 | 2.041 | 3.287 |

## 4　结论

1) 减水剂对 UHPC 的湿堆积密实度具有显著影响：一方面，加入适量的降水剂可以分散固体粉末从而提高基体密实度；另一方面，过量的减水剂易引入额外的气泡导致密实度下降；

2) 建立了基于湿堆积密实度的二次饱和-D 最优设计模型，并以此验证了修正的 Andreasen 和 Andersen 颗粒堆积模型优化设计 UHPC 在湿堆积状态下是适用且可靠的；

3) 通过评价钢纤维和等效替代颗粒对湿堆积密实度的影响，结合颗粒等效堆积的平均粒径公式，确定了长 13 mm，直径 0.2 mm 钢纤维的等效直径为 5.65 mm；

4) 将钢纤维以 5.65 mm 的等效颗粒形式纳入了 MAA 颗粒堆积模型，以此将钢纤维对堆积体系的负面影响最小化，并由此制备出密实程度高，抗压强度较高的 UHPC；

5) 验证了 MAA 模型的湿堆积可靠性并解决了其与钢纤维不兼容的问题，由此设计了一种性能优异的超高性能混凝土丰富了 UHPC 设计的紧密堆积理论。

**参考文献**:

[1] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 14–24.
CHEN Baochun, WEI Jiangang, SU Jiazhan, et al. J Archit Civil Eng (in Chinese), 2019, 36(2): 14–24.

[2] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741–751.

[3] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33–43.
SHAO Xudong, QIU Minghong, YAN Banfu, et al. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 33–43.

[4] 史才军, 何稳, 吴泽媚, 等. 纤维对UHPC力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015(8): 157–166+177.
SHI Caijun, HE Wen, WU Zemei, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015(8): 157–166+177.

[5] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC)[J]. Cem Concr Res, 2014, 56: 29–39.

[6] 赵筠, 路新瀛. 构建科学智能混凝土配制新技术体系的设想和建议(一)[J]. 混凝土世界, 2019(124): 51–61.
ZHAO Jun, LU Xinying. Build Decoration Mater World (in Chinese), 2019(124): 51–61.

[7] BROUWERS H J H, RADIX H J. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(11): 2116–2136.

[8] YANG R, YU R, SHUI Z, et al. Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC)[J]. J Cleaner Prod, 2020: 120673.

[9] WANG X, SHUI Z, YU R, et al. Effect of coral filler on the hydration and properties of calcium sulfoaluminate cement based materials[J]. Constr Build Mater, 2017, 150: 459–466.

[10] WANG X, YU R, SHUI Z, et al. Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete[J]. J Cleaner Prod, 2019, 221: 805–816.

[11] 范定强, 水中和, 余睿, 等. 铅锌尾矿回收制备环保型超高性能混凝土研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7): 2231–2236.
FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, YU Rui, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(7): 2231–2236.

[12] Wong H H C, Kwan A K H. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method[J]. Mater Struct, 2008, 41(4): 689–701.

[13] KWAN A K H, WONG H H C. Packing density of cementitious materials: part 2—packing and flow of OPC+ PFA+ CSF[J]. Mater Struct, 2008, 41(4): 773.

[14] DE LARRARD F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach[M]. CRC Press, 1999.

[15] LI L G, ZHUO H X, ZHU J, et al. Packing density of mortar containing polypropylene, carbon or basalt fibres under dry and wet conditions[J]. Powder Technol, 2019, 342: 433–440.

[16] WANG X, YU R, SONG Q, et al. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density[J]. Cem Concr Res, 2019, 126: 105921.

[17] KHAN A, DO J, KIM D. Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete based on D-optimal design[J]. J Constr Eng

Manag, 2016,143: 04016108.
[18] GRÜNEWALD S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete[D]. Delft University of Technology, 2004.
[19] HOY C W. Mixing and mix proportioning of fibre reinforced concrete. University of Paisley, 1998.
[20] 卓红霞. 纤维对水泥砂浆密实度影响的试验研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2018.
ZHOU Hongxia. Experimental study on the Influence of Fiber on the Packing density of Cement Mortar (dissertation, in Chinese). Guangdong University of Technology, 2018.
[21] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount[J]. Constr Build Mater, 2014, 65: 140–150.
[22] WANG D, SHI C, FARZADNIA N, et al. A review on effects of limestone powder on the properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 192: 153–166.
[23] FELEKOGLU B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)[J]. Resour, Conserv Recycl, 2007, 51(4): 770–791.
[24] WONG V, KWAN A K H. A 3-parameter model for packing density prediction of ternary mixes of spherical particles[J]. Powder Technol, 2014, 268: 357–367.
[25] BUI V K, AKKAYA J, SHAH S P. Rheological model for self-consolidating concrete[J]. ACI Mater J, 2002, 99(6): 549–559.
[26] SONG Q, YU R, SHUI Z, et al. Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC)[J]. Cem Concr Compos, 2018, 94: 191–200.
[27] 杨简, 陈宝春, 苏家战. 钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 652–658.
YANG Jian, CHEN Baochun, SU Jiazhan. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(5): 652–658.
[28] PARK J S, KIM Y J, CHO J R, et al. Early-age strength of ultra-high performance concrete in various curing conditions[J]. Materials, 2015, 8(8): 5537–5553.
[29] YOO D Y, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cem Concr Compos, 2016, 73: 267–280.
[30] SONG Q, YU R, SHUI Z, et al. Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)[J]. Cem Concr Compos, 2018, 94: 191–200.
[31] XUAN D X, SHUI Z H, WU S P. Influence of silica fume on the interfacial bond between aggregate and matrix in near-surface layer of concrete[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(7): 2631–2635.
[32] RAMEZANIANPOUR A A, ESMAEILI M, GHAHARI S A, et al. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers[J]. Constr Build Mater, 2013, 44: 411–418.
[33] WANG X, YU R, SHUI Z, et al. Development of a novel cleaner construction product: Ultra-high performance concrete incorporating lead-zinc tailings[J]. J Cleaner Prod, 2018, 196: 172–182.
[34] TAM V W Y, GAO X F, TAM C M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(6): 1195–1203.
[35] HWANG J P, JUNG M S, KIM M, et al. Corrosion risk of steel fibre in concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 239–245.
[36] STROEVEN P, HU J, KOLEVA D A. Concrete porosimetry: aspects of feasibility, reliability and economy[J]. Cem Concr Compos, 2010, 32(4): 291–299.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



余睿，武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室研究员、博士研究生导师，荷兰埃因霍温理工大学博士、博士后、客座研究员，中国混凝土与水泥制品协会 UHPC 分会专家委员、中国硅酸盐协会固废分会青年委员。其长期致力于超高性能混凝土的研究工作，主持和参与国家自然科学基金、军工 863 计划、国家科技支撑计划、十三五重点研发计划等国项目 20 余项，发表各类学术论文 90 余篇，SCI 检索 60 余篇，总计影响因子约 240，文章总引用次数达 1500 余次，发表 ESI 高被引论文 1 篇，出版英文学术专著 1 部，获得国家授权发明专利 3 项，软件著作权 1 项。