

文章编号:1007-9629(2023)07-0739-07

超高性能混凝土颗粒紧密堆积理论优化探索

刘康宁^{1,2}, 尹天一^{1,2}, 余睿^{1,2,*}

(1. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 材料科学与工程国际化示范学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对修正的 Andreasen-Andersen 模型(MAA 模型)在应用于超高性能混凝土(UHPC)配合比设计中的不足,提出了一个基于物理化学的协同优化方法.首先,通过试验探索了 MAA 模型的关键参数、颗粒分布模量(q)和最大骨料粒径(D_{\max})对 UHPC 性能的影响,得到了最优的 D_{\max} 以及 q 值;然后,根据水泥水化程度的发展,基于一种水泥水化球壳模型建立了新的水泥水化等效粒径并得到了优化配比,完善了 MAA 模型在 UHPC 设计中的应用.

关键词:超高性能混凝土;MAA 模型;配合比设计

中图分类号:TU525

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.006

Optimization Exploration of Particle Close Packing Theory in Ultra-high Performance Concrete

LIU Kangning^{1,2}, YIN Tianyi^{1,2}, YU Rui^{1,2,*}

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, China; 2. International School of Materials Science and Engineering, Wuhan

University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the modified Anderson-Andreessen model(MAA model) in the mix design of ultra-high performance concrete(UHPC), a physical and chemical based collaborative optimization method was proposed. Firstly, the multiple effects of the key parameters of MAA model, particle distribution modulus(q) and maximum aggregate size(D_{\max}) on the performance of UHPC matrix are explored through experiments, and the optimal D_{\max} and q value are found. According to the development trend of cement hydration degree, a new cement hydration spherical shell model is used to establish a new cement hydration equivalent particle size to optimize the MAA model.

Key words: ultra-high performance concrete(UHPC); modified Anderson-Andreessen model; mix design

超高性能混凝土(UHPC)是一类具有超高力学性能和优异耐久性的水泥基建筑材料,近年来已经被广泛应用于桥梁和道路工程建设之中^[1-3].目前,UHPC 配合比设计中最为广泛接受的方法是颗粒紧密堆积理论,其核心思想是通过在有限空间内寻找原料颗粒紧密堆积的最佳解决方案来获得致密结构^[4].多年来,学者们对颗粒紧密堆积

理论进行了大量研究,其中最著名的理论是 Dinger 和 Funk 提出的修正的 Andreasen-Andersen 模型(MAA 模型)^[5]:

$$P_{D_i} = \frac{D_i^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

式中: P_{D_i} 为粒径小于 D_i 的颗粒所占的体积分,%; q 为粒度分布模数; D_{\max} 和 D_{\min} 分别为制备 UHPC 所

收稿日期:2022-09-23; 修订日期:2022-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178249);国家大学生创新创业训练计划(S202110497009)

第一作者:刘康宁(1999—),男,湖北咸宁人,武汉理工大学硕士生. E-mail:liukangning@whut.edu.cn

通讯作者:余睿(1986—),男,湖北咸宁人,武汉理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail: r.yu@whut.edu.cn

用原料中的最大和最小粒径, μm .

然而,不可忽视的是,MAA模型也存在其固有的弊端:首先,在式(1)中,关键参数 D_{\max} 值和 q 值对UHPC材料各项性能的影响尚未被明晰;其次,该模型是基于颗粒在干燥状态下的理论堆积模型,而随着水化的进行,水泥颗粒的粒径会发生改变.如何在硬化状态下继续保持UHPC基体的颗粒紧密堆积状态还有待探索^[6-7].

为此,本文通过试验探索了 q 值和 D_{\max} 值对UHPC基体性能的影响,找出了最优的 q 值和 D_{\max} 值.然后,基于最优的结果,采用一种新型的水泥水化模型,建立了新的水泥水化等效粒径来优化MAA模型,为UHPC配合比设计提供了新的设计理念.

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料为华新水泥公司生产的P·II 52.5普通硅酸盐水泥(C)和埃肯公司生产的硅灰(SF),非活性矿物掺和料选用石灰石粉(LP).骨料为河砂,根据粒度分布的不同,可分为0.18~1.25 mm的超细砂(UFS)、0.36~2.19 mm的细砂(FS)、0.83~4.36 mm

的粗砂(CS)和1.91~6.61 mm的超粗砂(UCS).减水剂采用江苏苏伯特公司生产的高效减水剂(SP).原材料的粒径分布如图1所示.

1.2 配合比设计

根据所用原材料的粒径分布以及Yu等^[8]的研究中对 q 值的推荐,得到了 $q=0.13\sim 0.29$ 的20组配合比,如表1所示.表中编号前半部分为最大粒径的骨料,后半部分为 q 值.

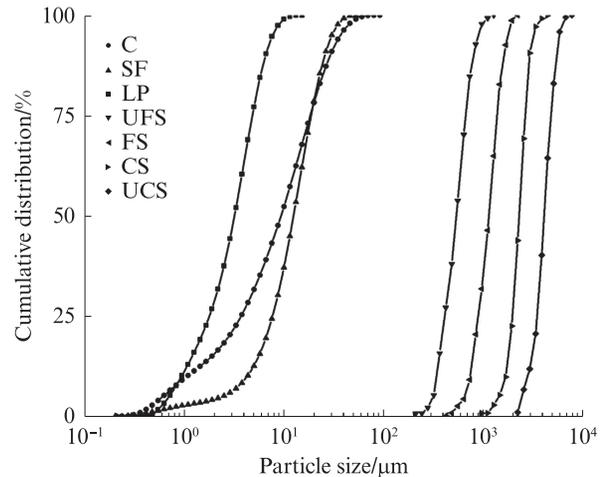


图1 原材料的粒径分布

Fig. 1 Particle size distributions of the raw materials

表1 配合比
Table 1 Mix proportions

Group No.	C	SF	LP	UFS	FS	CS	UCS	kg/m ³
UFS-13			342.34	870.31				
UFS-15			302.45	909.76				
UFS-17	721.65	168.00	263.16	948.62				
UFS-19			224.55	986.81				
UFS-21			206.32	1 004.84				
FS-19				713.94	392.79			
FS-21				666.40	431.46			
FS-23	721.65	168.00	103.30	624.24	473.61			
FS-25				581.88	515.97			
FS-27				539.41	558.45			
CS-21				489.96	110.20	497.69		
CS-23				440.56	136.82	520.48		
CS-25	721.65	168.00	103.30	391.44	162.68	543.74		
CS-27				342.77	187.70	567.37		
CS-29				294.69	211.81	591.35		
UCS-21				260.91	258.77	97.32	489.74	
UCS-23				202.69	291.92	90.18	521.94	
UCS-25	721.65	168.00	103.30	145.34	324.05	82.92	554.42	
UCS-27				89.00	355.08	75.54	587.11	
UCS-29				33.82	384.90	68.07	619.93	

1.3 制备过程

采用目前较为常用的搅拌方法^[9],将UHPC浆体制成尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的标准试块,并放置在具有标准养护条件((20±2)℃、相对湿度不低于95%)的喷淋养护室中养护至标准龄期。

1.4 测试方法

(1)湿堆积密实度(ψ) 采用Li等^[10]提出的湿堆积密实度测试方法测量UHPC浆体的湿堆积密实度,其核心思想是通过改变1组配合比中的用水量来找到最佳耗水量,并测试此时的湿堆积密实度.湿堆积密实度可通过下式计算:

$$\psi = \frac{M/V}{\rho_w R_w + \rho_a R_a + \sum \rho_x R_x} \quad (2)$$

式中: M 为不同用水量下固定容器中浆体的最大质量,g; V 是容器的体积,mL; ρ_w 、 ρ_a 和 ρ_x 分别为水、骨料和胶凝材料的密度,g/mL; R_w 、 R_a 和 R_x 分别为水、骨料和胶凝材料的体积与浆体总体积的比值。

(2)力学性能 抗压强度的测试按照GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行,UHPC试块为40 mm×40 mm×40 mm的立方体,压机的加载速率为2.4 kN/s。

(3)UHPC的微观孔隙结构 使用¹H低场核磁共振仪(NMR)对UHPC样品的孔隙结构进行测量.将UHPC试块切割为20 mm×20 mm×40 mm的样品,在真空饱和机中饱水20 h后置于Niumag MesoMR12-060H-1型NMR中进行测试。

(4)UHPC的水泥水化程度(γ) 使用²⁹Si固体NMR对UHPC样品的水泥水化程度进行测定.将试块粉碎成粒径小于200 μm的粉末,并使用磁铁排除粉末的磁性部分.采用AVANCE III 400M型宽腔体固体NMR对粉末样品进行测试.水泥的水化程度可由下式计算:

$$\gamma = 1 - I(Q^0)/I_0(Q^0) \quad (3)$$

式中: $I(Q^0)$ 和 $I_0(Q^0)$ 分别为对测试组基体与按原配比混合后的原材料进行测试后得到的固体核磁共振²⁹Si谱的分峰结果中 Q^0 峰的面积占各峰总面积的比例^[11]。

2 MAA模型关键参数的优化探索

2.1 湿堆积密实度

图2为UHPC样品的湿堆积密实度.由图2可见:各组样品的湿堆积密实度均随着 q 值和 D_{\max} 值的增加先增加后降低;当 D_{\max} 值恒定时,随着 q 值的增加,UHPC样品的湿堆积密实度呈现先增大后减小

的趋势;在 q 值一定的情况下,随着 D_{\max} 值的增大,UHPC样品的湿堆积密实度也呈现先增大后减小的趋势;当 D_{\max} 值最小, q 值最大(0.29)时,UHPC样品的湿堆积密实度的预测值达到最低,具有最大 D_{\max} 值和最小 q 值的预测值也是如此。

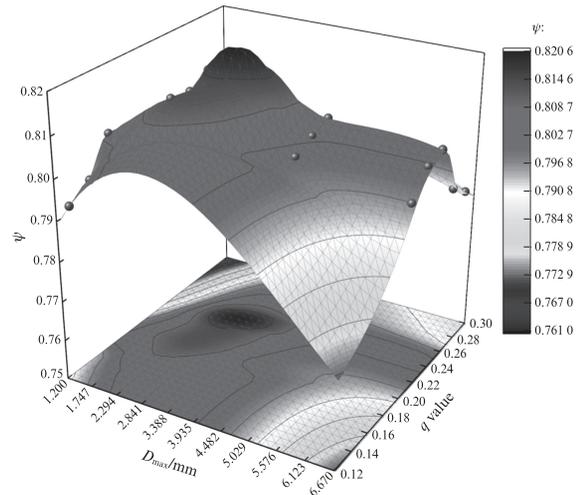


图2 UHPC样品的湿堆积密实度
Fig. 2 Wet packing density of UHPC samples

q 值的变化直接影响UHPC基体的堆积状态.研究证明^[12],在一般球的物理堆积中,当 q 值接近0.37时,填充状态更加密实.较高度度的物理堆积会在UHPC浆体状态下提供较高的湿堆积密实度.因此,在 q 值达到0.37之前, q 值的增加会导致物理的密实度增加,进而导致湿堆积密实度增加.而随着 D_{\max} 值和 q 值的增加,骨料的分布将向着更粗的方向偏移,这将导致一些大孔的出现,从而导致湿堆积密实度降低.上述结果表明, q 值和 D_{\max} 值对UHPC的湿堆积密实度具有协同效应,适当的 q 值和 D_{\max} 值对设计高湿堆积密实度的UHPC具有促进作用。

2.2 力学性能分析

图3为UHPC样品的28 d抗压强度.由图3可见:随着 q 值的增加,各 D_{\max} 值UHPC样品的抗压强度均呈现先增加后降低的趋势;随着 D_{\max} 值的增加,各组UHPC样品的最高抗压强度呈现先增加后降低的趋势; D_{\max} 值为2.19 mm的UHPC样品具有最高的抗压强度。

抗压强度的变化出现上述趋势有2个方面的原因:

(1)一方面, q 值的变化影响UHPC基体骨架的堆积状态.粒径相对较粗的骨料和粒径相对较细的骨料的的比例随着 q 值的变化而改变.当粒径相对较粗的骨料和粒径相对较细的骨料之间的比例失衡时(粒径相对较粗的骨料过多和粒径相对较细的

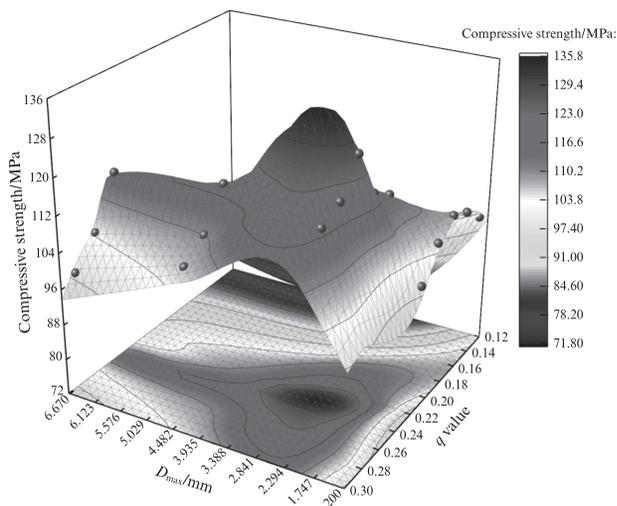


图3 UHPC样品的28 d抗压强度

Fig. 3 28 d compressive strength of UHPC samples

骨料过多),基体骨架将不再致密,从而导致UHPC样品的抗压强度降低.2.1中的试验结果表明,在一定的 D_{\max} 值条件下, q 值的变化导致不同的堆积状态, q 值合适的UHPC样品具有更高的湿堆积密度,从而获得更好的力学性能.

(2)另一方面,随着 D_{\max} 值的增加,粗骨料的引入提供了更高的抗压能力,UHPC样品的抗压强度上升.但随着 D_{\max} 值的进一步增加,UHPC基体中的孔隙也越来越大,导致基体结构更加松散,UHPC样品的力学性能下降.因此,随着 D_{\max} 值的增加,UHPC样品的抗压强度呈现先增加后降低的趋势.

值得注意的是,在图3的等高线图中,当 q 值在适当范围内(0.21~0.25)时,即使 D_{\max} 值大幅增加,UHPC样品的抗压强度仍保持在较高水平.然而,当 D_{\max} 值在2.19~4.36 mm时,基体的抗压强度会随着 q 值的降低而发生很大的变化.所以,在抗压强度试验中,适当的 q 值对 D_{\max} 值具有高容忍度(在合适的 q 值范围内, D_{\max} 值的变化不会使抗压强度出现迅速降低),而适当的 D_{\max} 值对低 q 值没有容忍度(在一定的 D_{\max} 值范围内, q 值的变化会使抗压强度出现迅速降低),表明 D_{\max} 值是影响UHPC样品抗压强度的关键参数.因此,根据本文的结果,当设计具有高抗压强度的UHPC时,2.19 mm的 D_{\max} 值被认为是更合适的选择,此时相应的 q 值应为0.23.

2.3 微观孔隙分布分析

图4为UHPC样品的横向弛豫时间(T_2)分布谱和孔隙率(体积分数).由图4可见:所有UHPC样品的孔径分布均呈现双峰形式;随着 D_{\max} 值的增加,左峰(凝胶孔隙)^[13]的信号峰值对应的 T_2 持续增加,峰值的高度也呈现上升趋势;当 D_{\max} 值恒定时,随着 q

值的增加,左峰的峰值信号强度呈现先增大后减小的趋势;在右峰部分(表面水峰)中,随着 D_{\max} 值的增加,峰值对应的 T_2 向右移动.

可以发现,孔隙率的变化趋势与2.2中抗压强度的发展趋势基本一致.在最佳耗水量的情况下,基本上可以认为,引入粗骨料会导致UHPC的堆积结构变得不紧凑,因此会出现更大的孔,并且信号峰值对应的 T_2 会向着更大的方向发展.当 D_{\max} 值保持不变时,随着 q 值的增加,信号峰值先减小后增大,表明具有最佳 q 值样品的孔分布更好.因此,采用适当的 D_{\max} 值和 q 值对UHPC样品的微孔结构有积极影响.

3 化学优化设计

3.1 水泥水化程度分析

根据2.1、2.2以及2.3的结果,可以确定在 q 值取0.23以及 D_{\max} 值取2.19 mm时,所得UHPC样品的各项性能都较为优异.根据该样品(FS-23)的配合比制备了新一批的样品,分别取开始水化(自向搅拌锅中加水开始计时)0、8、16 h及1、3、7、28 d的试块(分别编号为FS-23-1、FS-23-2、FS-23-3、FS-23-4、FS-23-5、FS-23-6、FS-23-7)进行²⁹Si固体NMR测试.图5为不同水化时长样品FS-23的²⁹Si固体核磁共振结果.

根据图5并依照式(3)对不同水化时长样品的水泥水化程度进行计算,由此推导并计算UHPC样品中水泥的水化程度随时间的发展关系,结果如图6所示.由图6可见:阶段I中水泥颗粒刚被水膜包裹,此时其水化反应进程主要受相关水化反应控制,故在此阶段中水泥的水化程度迅速发展,在原来的水泥颗粒范围内形成水化产物;随着水泥颗粒被较为完整的水化产物膜包裹后,其水化反应进程则由化学反应控制逐渐转变为由离子通过水化产物层的扩散速率所控制,阶段II中水泥的水化速率出现大幅下降,原因在于离子的扩散速率要小于水泥和水直接发生水化反应的速率;阶段III显示的则是随着水泥水化产物层的不断增厚,生成的各类水化产物逐渐占据原来水膜的填充空间,离子的扩散受到了水化产物层的影响与阻碍,故此阶段中水泥的水化进程逐渐减慢,28 d后水泥的水化反应可视为接近停止^[14].

3.2 配合比优化

根据图6中显示样品FS-23的水泥水化程度,可以发现在养护28 d后仍在反应的水泥数量已微乎其微,所以本研究中将样品FS-23在养护28 d时的水泥水化程度39.01%作为体系的最终水化程度.而为了

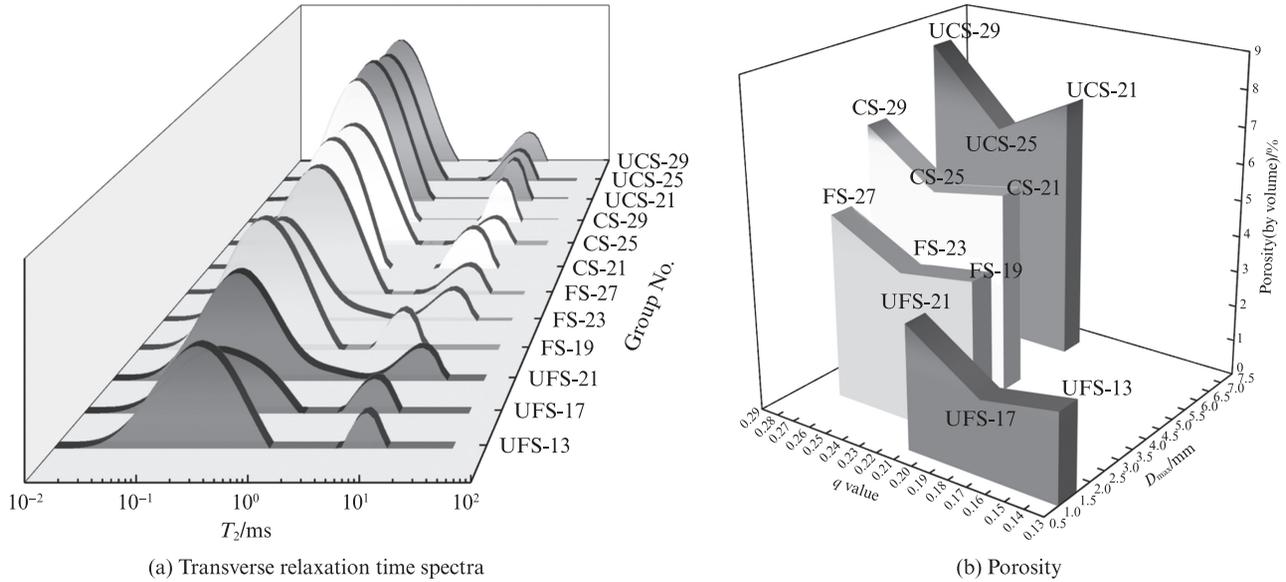


图4 UHPC样品的横向弛豫时间分布谱和孔隙率
Fig. 4 Transverse relaxation time spectrum and porosity of UHPC samples

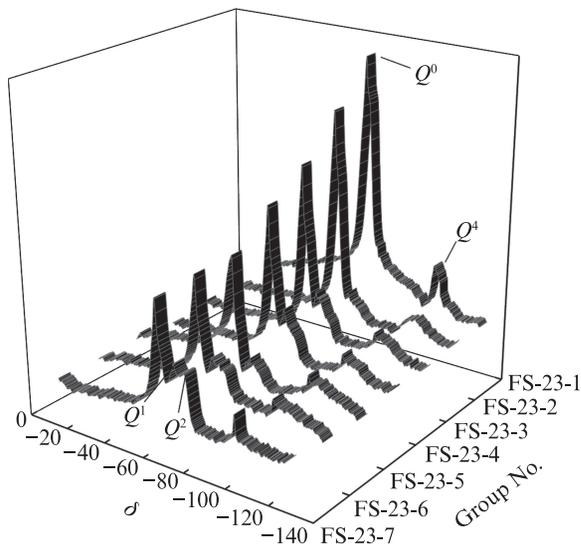


图5 不同水化时长样品FS-23的²⁹Si固体核磁共振结果
Fig. 5 Results of ²⁹Si solid state NMR of sample FS-23 of different ages

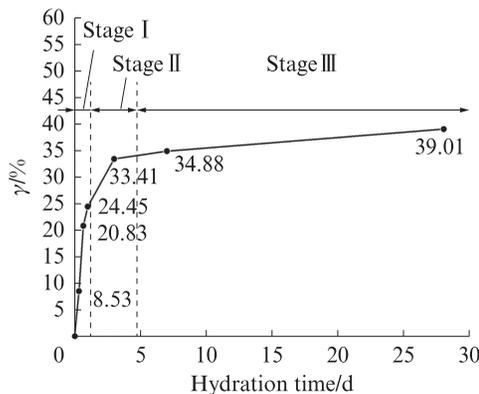


图6 样品FS-23中水泥水化程度随水化时间发展的关系
Fig. 6 Cement hydration degree of sample FS-23 of different ages

方便计算水泥颗粒的等效粒径分布,本研究进行以下假设:

- (1)水泥颗粒视为内外化学组成均相同的球形密实颗粒.
- (2)水泥颗粒各方向同时发生水化反应产生分布均匀的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶以及氢氧化钙(CH)等水化产物.
- (3)水化产物在未反应完全的水泥颗粒表面形成“外层水化产物-内层水化产物-未水化完全的水泥颗粒”型的多层球壳模型(见图7),其中R表示水泥颗粒的初始粒径,R'表示水化反应后剩余水泥颗粒的等效粒径.

按照表2中水泥主要水化产物的含量与密度数据综合计算水泥水化产物的密度.由此可得,每当1 cm³的水泥发生水化时,便产生了大约2.2 cm³的水化产物,这个结果也与文献[16]中的数据相吻合.

基于上述假设、水化产物与水泥体积比以及基准组UHPC试块中水泥的水化程度便可计算水泥颗粒的等效粒径分布,计算过程如下:

$$V_0 = V_1 + V_2 = (V_3 - V_4) + 2.2V_4 = (1 - \gamma)V_3 + 2.2\gamma V_3 = (1 + 1.2\gamma)V_3 = (1 + 1.2\gamma) \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq R^2} dx dy dz \quad (4)$$

式中:V₀为球壳模型下水泥颗粒体积,μm³;V₁为未水化完全的水泥体积,μm³;V₂为水化产物的体积,μm³;V₃为原水泥颗粒的体积,μm³;V₄为已水化水泥的体积,μm³;

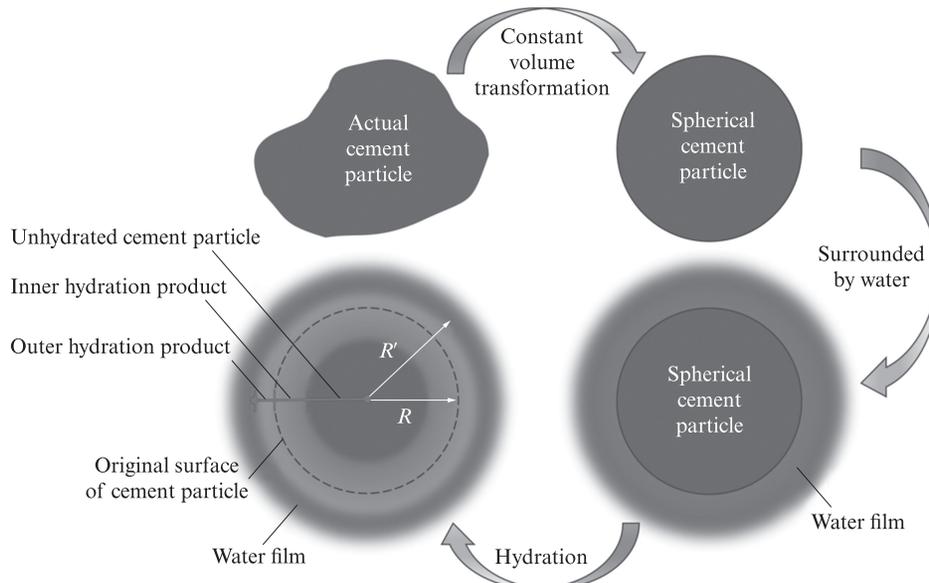


图7 水泥等效粒径假设示意图

Fig. 7 Equivalent particle size hypothesis of cement particle^[15]

表2 水泥充分水化后主要水化产物的基本特征

Table 2 Basic characteristics of the main hydration products of cement

Hydration product	Density/(g·cm ⁻³)	Crystallinity	Proportion ¹ /%
C-S-H gel	2.30-2.60	Very poor	70
Ca(OH) ₂	2.24	Good	20
Ettringite	1.75	Good	7
3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·(30-32)H ₂ O	1.95	Very good	7

Note: ¹ Unhydrated residual clinker and other trace components account for about 3%.

$$\text{由 } V_0 = \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq R^2} dx dy dz, \text{ 并代入 } \gamma = 39.01\%,$$

可以解出 $R' = 1.137R$.

最终本研究取 $R' = 1.137R$ 作为水泥颗粒的等效粒径. 然后将计算得出的水泥颗粒等效粒径分布代入 MAA 模型中进行优化计算, 选择的 q 值以及 D_{\max} 值仍然为 2.2 中得到的最优值 (q 值为 0.23, D_{\max} 值为 2.19 mm), 可获得物理化学协同优化 UHPC 原料的配合比如表 3 所示.

表3 物理化学协同优化 UHPC 原料的配合比

Table 3 Mix proportion of the physical chemistry collaborative optimization group UHPC

kg/m ³				
C	SF	LP	UFS	FS
768.5	149.0	181.6	752.2	237.5

4 结论

(1) 通过解析 q 值和 D_{\max} 值对 UHPC 基体性能的影响, 发现合适的参数 (q 值取 0.23 与 D_{\max} 值取 2.19 mm) 对设计具有密实结构、优异力学性能以及低孔隙率的 UHPC 基体有着指导意义. 这为使用

MAA 模型设计出具有更加优异性能的 UHPC 材料提供了理论支撑.

(2) 根据具有综合性能最优 q 值和 D_{\max} 值的样品 FS-23 中水泥水化程度的发展趋势, 通过“外层水化产物-内层水化产物-未水化完全的水泥颗粒”的球壳模型建立了新的水泥颗粒等效粒径分布, 计算得到了水化后的水泥颗粒粒径为原来水泥粒径的 1.137 倍, 并由此得到了一个优化的 UHPC 原料配合比.

(3) 本文提出的基于物理化学的协同优化方法进一步丰富了 UHPC 配合比设计的紧密堆积理论的内涵与意义, 为实际过程中更加合理地设计出具有更加优异性能的 UHPC 材料提供了一定的理论基础.

参考文献:

[1] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of ultra high performance concrete research[J]. Chinese Journal of Building Science and Engineering, 2014, 31(3): 1-24. (in Chinese)

- [2] 黄政宇, 阳东翱. 超高性能混凝土基体的组成与微结构关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12):4104-4111.
HUANG Zhengyu, YANG Dong'ao. Relationship between composition and microstructure of UHPC matrix[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(12):4104-4111. (in Chinese)
- [3] 陈庆, 马瑞, 蒋正武, 等. 基于GA-BP神经网络的UHPC抗压强度预测与配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):176-183, 191.
CHEN Qing, MA Rui, JIANG Zhengwu, et al. Compressive strength prediction and mix proportion design of UHPC based on GA-BP neural network[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):176-183, 191. (in Chinese)
- [4] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:741-751.
- [5] ZHOU M, WU Z M, OUYANG X, et al. Mixture design methods for ultra-high-performance concrete—A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 124:104242.
- [6] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8):1145-1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. Mix design of ultra-high performance concrete based on particle densely packing theory[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8):1145-1154. (in Chinese)
- [7] WANG J N, YU R, JI D D, et al. Effect of distribution modulus (q) on the properties and microstructure development of a sustainable ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 125:104335.
- [8] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete(UHPFRC)[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56:29-39.
- [9] YU R, LIU K N, YIN T Y, et al. Comparative study on the effect of steel and polyoxymethylene fibers on the characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127:104418.
- [10] LI L G, KWAN A K H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 39:33-42.
- [11] 王磊, 何真, 张博, 等. 基于红外与核磁共振技术揭示C-S-H聚合机理[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4):447-451, 458.
WANG Lei, HE Zhen, ZHANG Bo, et al. Polymerization mechanism of C-S-H: Identified by FTIR and NMR[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4):447-451, 458. (in Chinese)
- [12] FUNK J E, DINGER D R. Predictive process control of crowded particulate suspensions [J]. Materials and Manufacturing Processes, 1998, 13(5):793-794.
- [13] 余安明, 马坤, 王中平, 等. 低场核磁共振低温测孔技术表征硬化水泥浆体孔结构[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):916-920.
SHE Anming, MA Kun, WANG Zhongping, et al. Characterization of pore structure in hardened cement paste by low field NMR cryoporometry [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):916-920. (in Chinese)
- [14] 林宗寿. 胶凝材料学(第二版)[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
LIN Zongshou. Cementitious materials [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018. (in Chinese)
- [15] 廉慧珍, 师海霞. 解读吴中伟“水泥基复合材料的中心质假说”[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5):777-786.
LIAN Huizhen, SHI Haixia. Interpretation of Wu Zhongwei's "centroplasm hypothesis of cement based composites"[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(5):777-786. (in Chinese)
- [16] 杜景红, 曹建春. 无机非金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
DU Jinghong, CAO Jianchun. Inorganic nonmetallic materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016. (in Chinese)