

文章编号:1007-9629(2022)07-0693-07

基于 MAA 模型的 UHPC 基体配合比设计和特性分析

温得成^{1,2}, 魏定邦^{1,2,*}, 吴来帝¹, 任国斌¹, 郭海贞¹

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030;

2. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:以水泥、粉煤灰和硅灰为原材料,利用修正的 Andreasen-Andersen(MAA)模型指导超高性能混凝土(UHPC)配合比设计,研究了配合比、水胶比和养护方式对 UHPC 工作性能、抗压强度、表观密度和水化产物特性的影响,以残差平方和(RSS)作为堆积密实度指标,分析了 UHPC 抗压强度和水化产物特性。结果表明:硅灰对提升 UHPC 的堆积密实度有利;当 UHPC 的残差平方和达到最小值 570.64 时,标准养护 28 d 和蒸气养护 3 d 条件下的 UHPC 抗压强度分别可达到最大值 140.4、153.9 MPa,说明基于 MAA 模型设计的 UHPC 配合比合理;通过研究 UHPC 水化产物特性,发现 UHPC 中水泥水化反应不完全,高水胶比和高水泥掺量可促进水化反应,粉煤灰与硅灰在碱性环境中反应会消耗氢氧化钙,形成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,降低了体系的钙硅摩尔比,改善了 UHPC 的显微结构,提升了 UHPC 的致密性与强度。

关键词:超高性能混凝土;最紧密堆积;MAA 模型;微观分析;抗压强度

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.07.006

Research on Mix Design and Characteristics of UHPC Matrix Mixture Based on MAA Model

WEN Decheng^{1,2}, WEI Dingbang^{1,2,*}, WU Laidi¹, REN Guobin¹, GUO Haizhen¹

(1. Gansu Province Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

2. School of Materials and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Cement, fly ash and silica fume were used as raw materials, and modified Andreasen-Andersen(MAA) model was used to guide the mix design of the ultra-high performance concrete (UHPC). The work performance, compressive strength, apparent density and hydration product characteristics of UHPC under different mix proportions, water-binder ratios and curing methods were studied. The residual sum of squares (RSS) was used as an index of the stacking density, and the characteristics of hydration products and compressive strength of UHPC was analyzed to prove the rationality of MAA model guiding UHPC mix design. The results show that silica fume was beneficial to improve the stacking density of UHPC. When the RSS of UHPC reaches the minimum of 570.64, the compressive strength of UHPC under standard curing and steam curing reaches the maximum of 140.4, 153.9 MPa, indicating that the mix proportion design of UHPC by MAA model has high accuracy. Through the

收稿日期:2021-05-17; 修订日期:2021-06-16

基金项目:甘肃省科技重大专项计划(21ZD3GA002);甘肃省科技厅重点研发计划(18YF1GA036);甘肃省交通运输厅 2021 年第一批揭榜挂帅制项目

第一作者:温得成(1995—),男,青海海东人,甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司工程师,中国地质大学(北京)硕士生。E-mail: wendc1211@163.com

通讯作者:魏定邦(1984—),男,甘肃兰州人,甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司高级工程师,兰州交通大学硕士生校外导师,博士。E-mail: 286237855@qq.com

research of UHPC hydration products, it is found that the hydration reaction is not complete. High water-binder ratio and high cement content can promote the hydration reaction. The reaction of fly ash and silica fume in an alkaline environment consumes calcium hydroxide to form calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. The system Ca/Si mole ratio is reduced, the microstructure of UHPC is improved, and the density and strength of UHPC are improved.

Key words: ultra-high performance concrete (UHPC); most close packing; modified Andreasen-Andersen (MAA) model; microscopic analysis; compressive strength

作为目前应用最广的水泥基复合材料,超高性能混凝土(UHPC)因其优异的强度和耐久性能被广泛关注,是未来大跨度桥梁、超大型水电站、核电站、标志性建筑物等适宜选用的理想材料^[1].与传统混凝土相比,UHPC抗压强度是普通混凝土的3~10倍、氯离子扩散系数是普通混凝土的0.1%,表明UHPC在实际工程中的应用价值远高于普通混凝土^[2-3].

目前,国内外关于UHPC的研究均以颗粒最紧密堆积模型为基础^[4-5].Van Der Putten等^[6]基于UHPC可压缩最紧密堆积(CPM)模型研究了颗粒相互作用对堆积密实度的影响,并利用统计学的方法建立了不同配合比下UHPC实际堆积密实度的算法,以此指导UHPC配合比设计.但是,CPM模型的弊端在于计算颗粒实际堆积密实度的算法过于复杂,并且CPM模型未考虑水和纤维对UHPC堆积密实度的影响.Yu等^[7]采用修正的Andreasen-Andersen(MAA)模型对原材料的组成级配进行了优化,研究表明利用MAA模型可以便捷地设计出水泥用量更低但抗压强度更高的UHPC.因此,在UHPC配合比设计中采用MAA模型具有更高的简便性和可行性,是目前UHPC材料配合比设计中最主要的设计模型.

目前大多关于UHPC的研究均以最紧密堆积理论来设计其配合比,很少关注UHPC水化反应和微观形貌变化对其力学性能的影响^[8-10].本文以水泥、粉煤灰和硅灰为原料,利用MAA模型设计UHPC配合比,研究配合比、水胶比和养护方式对UHPC流动性、抗压强度和水化产物的影响;以混合料合成曲线函数与MAA模型目标曲线函数之间的残差平方和(RSS)作为UHPC堆积密实度的指标,以RSS与表观密度的

相关性来证明MAA模型的准确性;通过分析不同水胶比和配合比UHPC的水化产物特性,对MAA模型作进一步证明,以期更准确地设计UHPC配合比.

1 试验

1.1 原料

水泥(C)为P·O 42.5水泥,中材甘肃水泥有限责任公司生产,其化学组成¹⁾如表1所示.由表1可见:水泥中SiO₂和CaO含量分别为13.56%、57.06%,基础钙硅摩尔比 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 为4.5;其中,16.25%的SO₂是由石膏相所致.水泥X射线衍射(XRD)图谱见图1.由图1可知,水泥中主要物相为硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)和铝酸三钙(C₃A),还包含石膏相(G),这与化学组成分析结果一致.铝酸三钙反应会生成水化铝酸钙(C-A-H)凝胶,石膏可与C-A-H凝胶进一步反应生成钙矾石(Aft)^[11].

粉煤灰(FA)为武威电厂生产,其化学组成如表1所示.由表1可见:粉煤灰中SiO₂和Al₂O₃含量分别为56.36%、27.93%;CaO和Fe₂O₃含量分别为6.38%、4.99%,因此所用粉煤灰属于低钙粉煤灰.粉煤灰XRD图谱如图2所示.由图2可知,粉煤灰的主要物相为石英和莫来石,并含有一定的非晶相.粉煤灰中的非晶相是具有碱反应活性的SiO₂和Al₂O₃,能够参与水泥水化反应并生成水化硅酸钙铝(C-(A)-S-H)凝胶.

硅灰(SF)为甘肃三远硅材料有限公司生产,其化学组成见表1.由表1可见,硅灰中SiO₂含量为96.25%,其化学性质稳定.

减水剂(SP)为聚羧酸减水剂,广东龙湖科技股份

表1 原料化学组成
Table 1 Chemical composition of raw materials

Raw material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₂	CO ₂	Total
C	13.56	5.39	3.51	57.06	1.11	0.82	0.62	16.25	0	98.32
FA	56.36	27.93	4.99	6.38	0.75	1.18	0.82	0	0.22	98.63
SF	96.25	0.33	0.54	0.52	0.31	1.87	0.18	0	0	100.00

1)文中涉及的组成、含量和掺量等除特别说明外均为质量分数.

有限公司生产,外观为微黄色粉末,减水率大于30%。

水(W)为实验室自来水。

C₃S—Hatrurite(PDF#86-4020) C₂S—Larnite(PDF#33-0302)
C₃A—Brownmillerite(PDF#30-0226)
G—Gypsum(PDF#33-0311)

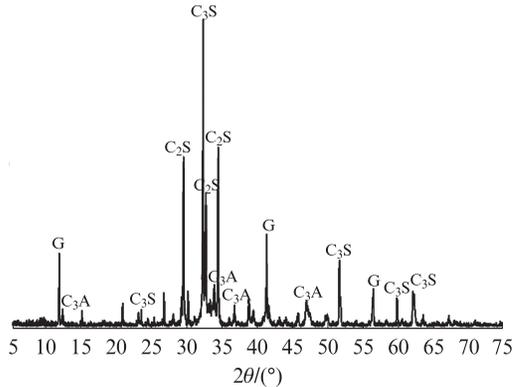


图1 水泥XRD图谱
Fig. 1 XRD pattern of cement

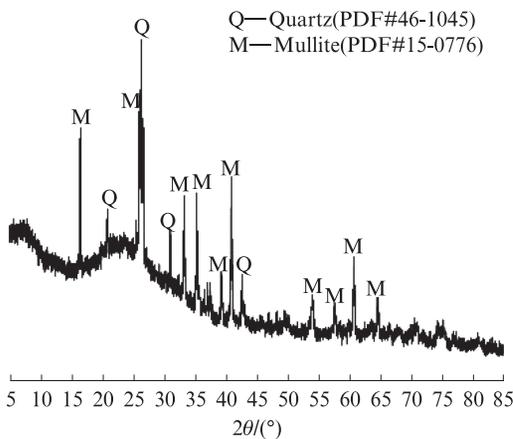


图2 粉煤灰XRD图谱
Fig. 2 XRD pattern of fly ash

1.2 配合比设计

UHPC配合比设计的原则是优化颗粒级配以达到最紧密堆积.科学合理地设计UHPC配合比以形成基体的最紧密堆积是保证其优越性能的关键.在UHPC最紧密堆积的试验设计中,经典的颗粒连续堆积模型由Andreasen和Andersen提出,称为A-A模型^[7,10]:

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

式中: D 为颗粒粒径, μm ; P 为颗粒的含量,%; D_{\max} 为最大粒径, μm ; q 为分布模量,其大小取决于体系中大颗粒和小颗粒的比值,且大颗粒越多 q 越大。

A-A模型的缺点在于未考虑颗粒最小粒径和混合料湿润状态的影响.因此,Dinger和Funk在A-A模型中引入有限小的颗粒最小粒径 D_{\min} 和新的分布模量 q 对其加以修正,提出修正的MAA模型^[7]:

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

利用Matlab软件对MAA模型进行建模,采用最小二乘法(LSM),调整干混料中原材料的配合比,计算不同原材料配合比下混合料合成曲线函数与MAA模型目标曲线函数之间的偏差,并用残差平方和(RSS)进行表征.RSS的计算式如下:

$$RSS = \sum_{i=1}^n \left(P_{\text{mix}}(D_i^{i+1}) - P_{\text{tra}}(D_i^{i+1}) \right)^2 \quad (3)$$

式中: P_{mix} 、 P_{tra} 分别为混合料合成曲线函数和MAA模型目标曲线函数; n 表示计算RSS时将函数分成 n 份; i 表示计算RSS时的每一份; D_i^{i+1} 为划分的粒径区间。

本文原材料颗粒累计粒径分布如表2所示.由表2可知,颗粒最大粒径 $D_{\max} = 98.10 \mu\text{m}$,最小颗粒粒径 $D_{\min} = 0.46 \mu\text{m}$.取分布模量 $q = 0.23$,建立MAA模型目标曲线^[11],如图3所示。

表2 原材料颗粒累计粒径分布
Table 2 Cumulative particle size distribution of raw materials

$D/\mu\text{m}$	$P/\%$		
	C	FA	SF
0.46	0	0	0.1
1.13	3.5	2.3	0.5
2.75	12.2	18.5	1.7
5.21	25.0	36.2	16.5
9.86	41.5	52.4	43.7
14.50	53.7	62.8	66.9
21.10	68.2	72.5	78.9
31.30	82.9	80.9	96.3
51.80	96.2	97.1	100.0
98.10	100.0	100.0	100.0

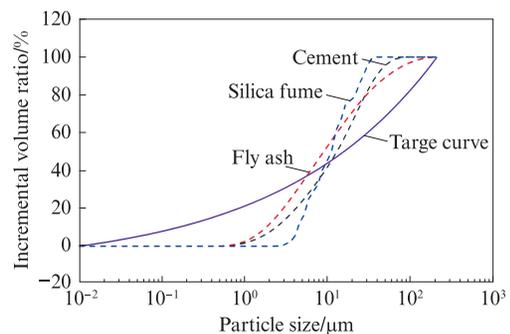


图3 原材料粒径分布曲线与MAA模型的目标曲线
Fig. 3 Raw material particle size distribution curves and target curve of MAA model

通过激光粒度仪(Better size 2000)分析原材料粒径,得到原材料粒径分布曲线,也示于图3.选取水泥、粉煤灰和硅灰用量,利用Matlab软件对混合料粒

度分布进行计算,分析不同混合料合成曲线函数与MAA模型目标曲线函数之间的偏差,得到9组UHPC配合比,并用RSS表征其堆积密实度,见表3.

表3 基于MAA模型的UHPC配合比及残差平方和
Table 3 RSS and mix proportion of UHPC based on MAA model

Specimen No.	$m(C):m(FA):m(SF)$	RSS
UHPC70-20-10	70:20:10	690.99
UHPC70-15-15	70:15:15	628.97
UHPC70-10-20	70:10:20	570.64
UHPC60-30-10	60:30:10	799.91
UHPC60-25-15	60:25:15	730.68
UHPC60-20-20	60:20:20	670.67
UHPC50-40-10	50:40:10	948.37
UHPC50-35-15	50:35:15	884.79
UHPC50-30-20	50:30:20	821.72

RSS表征了混合料合成曲线函数与MAA模型目标曲线函数的接近程度,当体系混合料合成曲线函数与MAA模型目标曲线函数的RSS最小时,对应配合比下UHPC的堆积密实度最大.由表3可见,RSS随着硅灰和水泥掺量的提高而减小,当 $m(C):m(FA):m(SF)$ 为70:10:20时,RSS取得最小值570.64,理论上此配合比下UHPC达到最紧密堆积.

1.3 试件制备

将不同配合比原材料与减水剂(掺量0.7%)混合,在搅拌机中低速(100 r/min)搅拌2 min,确保干混料混合均匀;然后在干混料中加入自来水(水胶比 m_w/m_b 为0.17或0.18),低速(100 r/min)搅拌3 min、高速(200 r/min)搅拌5 min,确保原材料、水和减水剂充分接触,最后将浆料注模养护,试件尺寸为160 mm×40 mm×40 mm. UHPC试件标准养护(StC)温度为(20±1)℃,相对湿度为98.0%,养护龄期为28 d;蒸气养护(SeC)温度为(80±2)℃,相对湿度为98%,养护龄期为3 d.

1.4 测试方法

参照GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,采用Hegeman圆锥^[7]测定UHPC浆料的流动度,以表征其工作性能^[11].测定浆料的最大直径 d_1 和垂直直径 d_2 ,浆料的实际流动度 $d=(d_1+d_2)/2$.

参照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,采用CMT4304型微机控制电子万能试验机测定UHPC试件的抗压强度.

参照JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》,采用浸水天平测定UHPC试件的表观密度.

原料和样品的物相组成通过X射线衍射仪(XRD, D8 Advance)进行分析.试验条件:Cu靶,扫描范围为 $2\theta=5^\circ\sim 85^\circ$,扫描速率为 $8^\circ/\text{min}$.

原料和样品的微观结构通过扫描电镜-能谱测试仪(SEM-EDS, ZEISS, SUPRA55)进行分析.试验条件:束斑范围1.5~3.5 mm,最大放大倍数100 000倍,真空度 1.05×10^{-8} MPa,样品观察距离10.0~10.5 mm.

2 结果与讨论

2.1 工作性能

UHPC浆料流动度的数据如图4所示.

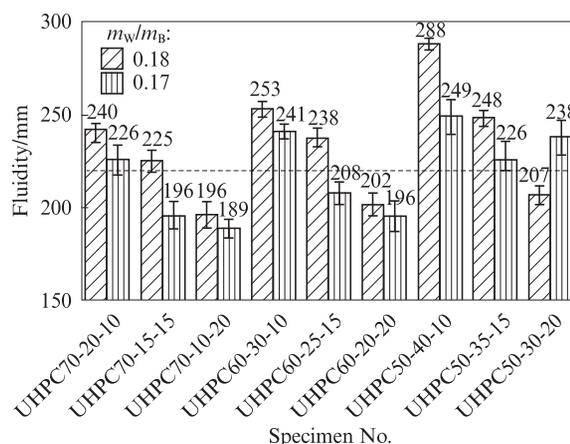


图4 UHPC浆料流动度
Fig. 4 Fluidity of UHPC

由图4可见,UHPC浆料的流动度整体随着水胶比 m_w/m_b 的降低而降低, m_w/m_b 从0.18降低至0.17时,UHPC浆料整体流动度平均下降了11.5%.UHPC浆料由于具有较低的水胶比(小于0.20),常被认为是非牛顿流体,其流变时必须克服内部屈服应力才能流动,且一旦流动,剪切应力将随剪切速率增大而呈线性增加.因此,对于 $m_w/m_b=0.18$ 的UHPC浆料,其屈服应力和塑性黏度均小于 $m_w/m_b=0.17$ 的UHPC浆料.当 $m_w/m_b=0.17$ 时,比较试件UHPC70-10-20和UHPC60-20-20的流动度可见,当硅灰含量固定、以10%的粉煤灰取代水泥时,UHPC浆料的流动度增大3.7%.这可能是因为UHPC浆料中球状粉煤灰未参与初始水化反应,导致高粉煤灰含量的UHPC浆料具有更高的初始流动度.由图4还可见,随着硅灰掺量的增加,UHPC浆料流动度呈现明显的降低.当 $m_w/m_b=0.17$ 时,比较试件UHPC70-10-20和UHPC70-20-10的流动度可见,当水泥含量固定、以10%的硅灰替代粉煤灰时,UHPC浆料流动度下降16.4%.

在UHPC设计中硅灰颗粒通常填充于水泥与粉

煤灰之间^[12].UHPC浆料均匀混合后,水在颗粒表面形成水膜,水膜带动颗粒移动使得浆料具有流动性.固定水胶比不变时,随着硅灰含量的增加,UHPC体系比表面积增大,相邻2个颗粒之间的相对间距减小,最终使得体系颗粒表面水膜的厚度减小,水膜带动颗粒移动的能力减弱,导致高硅灰掺量UHPC体系浆料流动性降低.

综上所述,水在颗粒表面形成水膜带动颗粒移动使得浆料具有流动性,颗粒表面水膜厚度决定了浆料整体流动性的大小,影响水膜厚度的因素为体系水胶比和体系比表面积.UHPC中硅灰的掺量不仅决定了体系堆积密实度,还影响体系比表面积.实际施工要求浆料流动性高于220 mm,为满足此要求,根据图4,当 $m_w/m_b=0.18$ 时,硅灰掺量应低于15%;当 $m_w/m_b=0.17$ 时,硅灰掺量应低于15%,且粉煤灰掺量应高于20%.

2.2 抗压强度

MAA最紧密堆积理论是UHPC研究的基础,分析不同配合比UHPC的抗压强度能够进一步验证最紧密堆积模型的合理性.本文研究了不同配合比UHPC在不同水胶比和养护方式下的抗压强度,用于验证最紧密堆积模型的合理性.

图5、6分别为UHPC标准养护28 d和蒸气养护3 d后的抗压强度.由图5、6可知:在标准养护28 d后,水胶比 $m_w/m_b=0.17$ 的UHPC抗压强度明显高于 $m_w/m_b=0.18$ 的UHPC,平均抗压强度增幅为21.5%;UHPC抗压强度随着硅灰掺量的增加而增

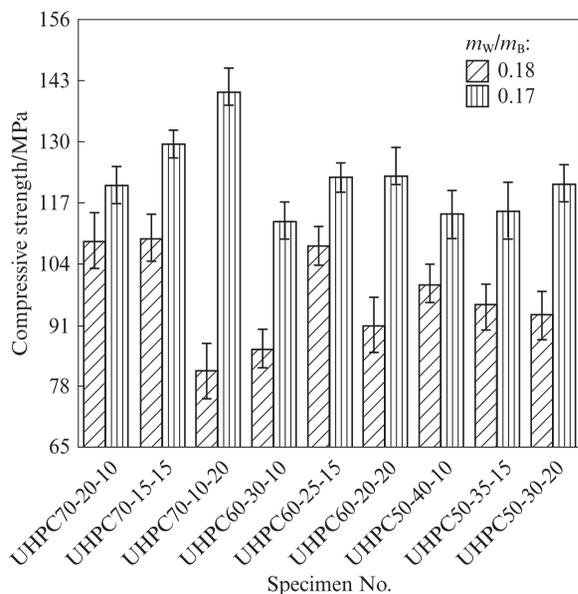


图5 UHPC标准养护28 d后的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of UHPC after standard curing for 28 d

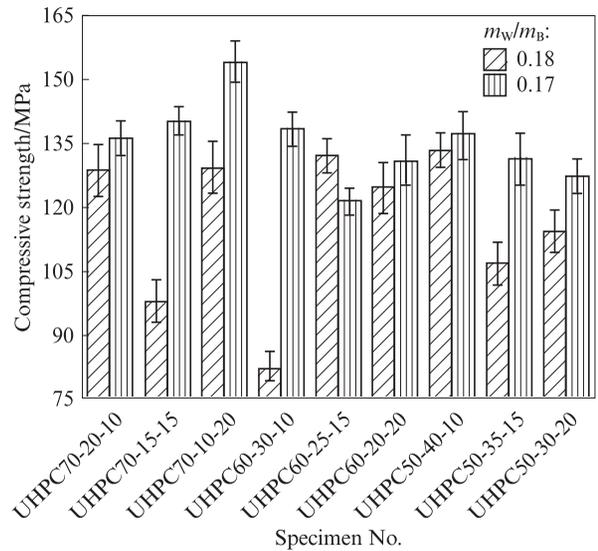


图6 UHPC蒸气养护3 d后的抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of UHPC steam curing for 3 d

大,固定水胶比 $m_w/m_b=0.17$,比较试件UHPC70-10-20和UHPC70-20-10的平均抗压强度可见,当体系中硅灰掺量由10%增至20%时,UHPC平均抗压强度增大14.0%,这是因为增加硅灰掺量可以提高UHPC的堆积密实度,进而提高抗压强度;高粉煤灰掺量的UHPC抗压强度较低,固定水胶比 $m_w/m_b=0.17$,比较试件UHPC70-10-20和UHPC60-20-20的平均抗压强度可见,当以10%的粉煤灰替代水泥时,UHPC平均抗压强度下降12.8%,这是由于粉煤灰火山灰反应缓慢且不完全^[13];当 $m_w/m_b=0.17$ 时,试件UHPC70-10-20在标准养护28 d和蒸气养护3 d后抗压强度达到最大值140.4、153.9 MPa,此配合比下RSS为最小值570.64(见表3),与MAA最紧密堆积理论的分析结果一致,进一步验证了MAA模型用于UHPC设计的合理性.

2.3 表观密度

在MAA模型中RSS定性表征UHPC颗粒的紧密堆积程度,RSS越小表示颗粒堆积密实度越大^[11,13].同时,由于原材料真密度固定,当不同配合比原材料制备成UHPC后,其表观密度也反映了颗粒堆积密实度,表观密度与RSS理论上存在线性负相关性.

UHPC的表观密度见图7.由图7可见,UHPC表观密度变化范围为2.086 7~2.207 8 g/cm³.表观密度与RSS的关系见图8.由图8可见:水胶比为0.18、0.17时拟合曲线的相关系数分别为0.938 3、0.900 1.高硅灰掺量增加了颗粒堆积密实程度,表现为UHPC的RSS降低;由于硅灰填充效应,随硅灰掺量增加,相邻两颗粒的间距必然减小,表现为UHPC表

观密度增大^[12].由此进一步说明利用MAA模型设计UHPC配合比具有合理性.

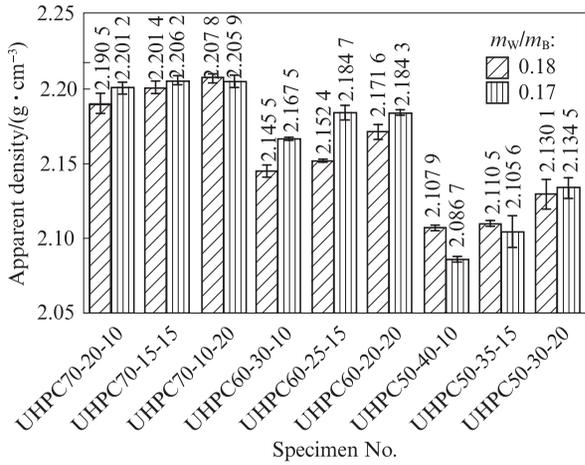


图7 UHPC的表现密度

Fig. 7 Apparent density of UHPC

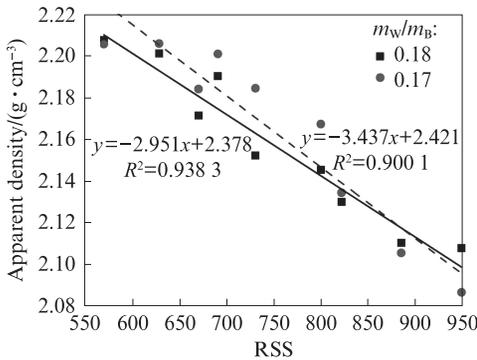


图8 表现密度与RSS的关系

Fig. 8 Relationship between RSS and apparent density

2.4 水化产物特性

基于抗压强度分析可知,水胶比为0.17的试件UHPC70-10-20具有最高的抗压强度,证明MAA模型设计配合比具有合理性.以试件UHPC70-10-20为基础,研究其在不同养护方式和水胶比下的XRD图谱,如图9所示.由图9可见:UHPC主要包含物相为硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)、钙矾石(Aft)、氢氧化钙(CH)、石英和莫来石,非晶相的衍射特征峰明显;结合原材料的XRD图谱(图1、2)可知,原来水泥中的铝酸三钙(C₃A)衍射特征峰消失,C₃S和C₂S的衍射特征峰强度也均下降,说明UHPC水化反应不完全;在相同粉煤灰掺量下,UHPC中石英和莫来石衍射特征峰强度随水胶比和养护方式的变化较小,说明粉煤灰中的石英和莫来石很少参与水化反应,大部分充当骨料,起到了填充的作用^[11].

根据水泥水化理论,C₃S、C₂S和C₃A的水化反应式见式(4)~(6).C₃S和C₂S发生水化反应形成水化

C₃S—Hatrurite(PDF#86-4020) C₂S—Larnite(PDF#33-0302)
 AFt—Ettringite(PDF#41-1451) CH—Ca(OH)₂(PDF#44-2481)
 Q—Quartz(PDF#46-1045) M—Mullite(PDF#15-0776)

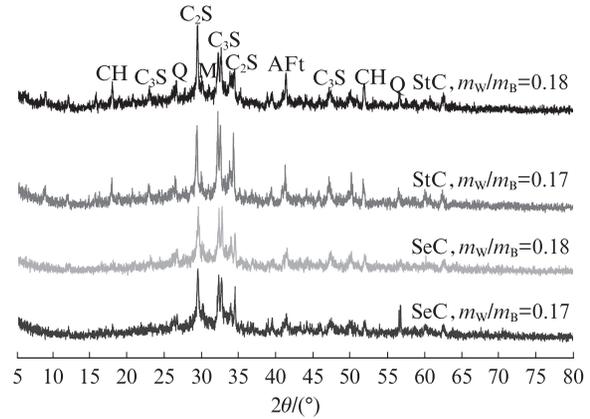
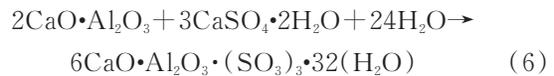
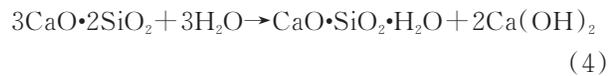


图9 试件UHPC70-10-20的XRD图谱

Fig. 9 XRD patterns of UHPC70-10-20

硅酸钙(C-S-H)凝胶和氢氧化钙(CH),C₃A和石膏发生水化反应形成钙矾石(Aft).由于水化形成的C-S-H凝胶是无定型的,不能被XRD检测到,因此可以根据C₃S、C₂S衍射特征峰强度的下降值和CH的衍射特征峰强度的增加值来表征C-S-H凝胶的生成^[13].



由图9可见:与蒸气养护条件下 $m_w/m_B=0.17$ 的试件UHPC70-10-20相比,标准养护条件下 $m_w/m_B=0.18$ 的试件UHPC70-10-20的XRD图谱中CH和AFt衍射特征峰强度明显较高,说明高水胶比可促进UHPC的水化反应,生成更多C-S-H凝胶;当水胶比相同时,水泥掺量决定了UHPC中CH和AFt衍射特征峰的强度,说明UHPC水化过程中水泥水化占据主导地位.粉煤灰和硅灰中的非晶相氧化硅可在碱性环境中发生反应,生成硅质凝胶,协同参与水化反应,如式(7)所示.



对XRD图谱进行Rietveld精修,得到水胶比为0.17的试件UHPC70-10-20在不同养护方式下的物相含量,如图10所示.由图10可知:标准养护和蒸气养护条件下,试件UHPC70-10-20中C₃S、C₂S含量差异仅为1.6%、2.7%,说明水泥水化反应不受养护方式的影响;标准养护条件下UHPC70-10-20中CH的含量明显高于蒸气养护条件下,说明蒸气养护使UHPC中C₃S和C₂S水化形成CH,更多地参与到粉

煤灰和硅灰的火山灰反应中,消耗了体系中的CH并形成更多C-S-H凝胶.C-S-H凝胶改善了UHPC的力学性能,导致蒸气养护条件下UHPC的抗压强度明显高于标准养护下的相应值.

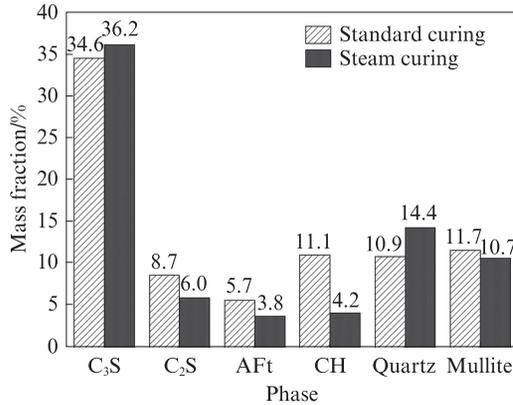


图10 水胶比为0.17的试件UHPC70-10-20在不同养护方式下的物相含量

Fig. 10 Phase content of UHPC70-10-20 sample ($m_w/m_b=0.17$) with different curing methods

利用SEM-EDS对蒸气养护条件下 $m_w/m_b=0.17$ 的试件UHPC70-10-20和UHPC70-20-10中C-S-H凝胶元素含量进行测试,计算钙硅比 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$,结果见图11.由图11可知,高硅灰含量的试件UHPC70-10-20中C-S-H凝胶平均钙硅比为0.92,低硅灰含量的试件UHPC70-20-10中C-S-H凝胶平均钙硅比为1.54,说明高硅灰掺量有利于降低钙硅比.硅灰可在碱性环境中反应并消耗氢氧化钙,生成更低钙硅比的C-S-H凝胶.低钙硅比有利于C-S-H凝胶聚合度的增加,高聚合度C-S-H凝胶具有更加致密的组织结构,可提高UHPC的抗压强度^[13].

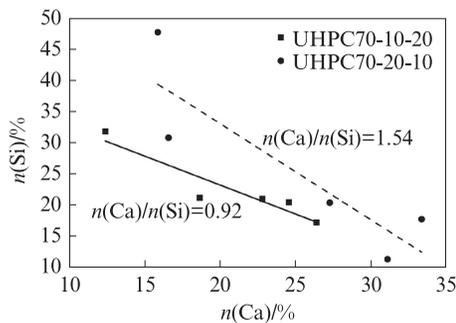


图11 UHPC材料钙硅比

Fig. 11 Ca/Si mole ratio of UHPC

3 结论

(1)MAA模型中残差平方和(RSS)可表征UHPC的堆积密实度,高硅灰掺量对提升UHPC堆

积密实度有利.当水泥、粉煤灰、硅灰的质量比为70:10:20时,UHPC的RSS达到最小值570.64.

(2)UHPC流动度随水胶比降低和硅灰掺量增加而减小,RSS和浆体流动度呈线性相关.

(3)低水胶比的UHPC抗压强度更高,当RSS达到最小值时,UHPC在标准养护28d和蒸气养护3d条件下的抗压强度达到最大值140.4、153.9MPa,验证了MAA模型用于UHPC基体配合比设计的合理性.

(4)UHPC水化反应不完全,高水胶比和高水泥掺量可促进水化反应,粉煤灰与硅灰在碱性环境中会反应并消耗氢氧化钙形成更多的C-S-H凝胶,降低体系钙硅摩尔比,改善UHPC的显微结构,提升UHPC材料致密性与抗压强度.

参考文献:

[1] AMBILY P S, RAVISANKAR K, UMARANI C, et al. Development of ultra-high-performance geopolymer concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(2): 82-89.

[2] WETZEL A, MIDDENDORF B. Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high-performance concrete based on alkali-activated slag [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 100: 53-59.

[3] SHI C J, WANG D H, WU L M, et al. The hydration and microstructure of ultra-high-strength concrete with cement-silica fume-slag binder[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 61: 44-52.

[4] ZHANG J, SHI C J, ZHANG Z H. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 598-613.

[5] JIAO D W, SHI C J, YUAN Q, et al. Mixture design of concrete using simplex centroid design method[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 89: 76-88.

[6] VAN DER PUTTEN J, DILS J, MINNE P, et al. Determination of packing profiles for the verification of the compressible packing model in case of UHPC pastes[J]. Materials and Structures, 2017, 50(2): 118.

[7] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC)[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 29-39.

[8] QIAN D, YU R, SHUI Z H, et al. A novel development of green ultra-high-performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121231.

[9] 水亮亮. 超高性能混凝土抗压强度尺寸效应及收缩特性[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 632-637.

SHUI Liangliang. Size effect of compressive strength and shrinkage characteristics of ultra-high performance concrete[J].