

赤泥-石灰石粉超高性能混凝土的力学性能及水化研究

陈 强, 黄 悦*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘 要:超高性能混凝土(UHPC)因其具有优异的力学性能和耐久性,在世界上得到了广泛的研究和应用。然而,UHPC作为一种水泥含量高的水泥基材料,会产生昂贵的生产成本以及较大的环境危害。通过使用辅助胶凝材料(SCMs)替代UHPC中的水泥,已经成为一种减少水泥消耗的有效途径。近年来,赤泥(RM)常被用作辅助胶凝材料部分取代水泥。但之前的研究表明,由于RM的反应性低,RM的加入可能会使UHPC性能降低。众所周知,胶凝材料中的铝相可以与碳酸钙发生协同作用,促进水化产物的形成,提高基体的性能。由于RM中含有丰富的铝相,将RM与石灰石粉(LP)协同替代部分水泥,开发出一种可持续的UHPC。通过力学试验、水化热分析、X射线衍射测试、孔隙率测试以及碳排放测试,研究了RM的掺量对UHPC力学性能、水化、孔隙结构以及碳排放的影响。结果表明,掺入RM和LP的UHPC早期强度普遍低于参考组,但由于RM、LP和水泥之间的协同作用,其后期强度发展迅速。随着RM掺量的增加,RM的成核效应及其提供的高碱度环境会导致主放热速率峰出现时间提前,水化反应加速。由于RM的填充作用以及RM、LP和水泥之间的协同作用,RM和LP的复合添加可以降低UHPC基体的孔隙率。此外,RM和LP的加入有效降低了UHPC的碳排放。

关键词:超高性能混凝土;赤泥;协同反应;力学性能;水化;孔隙率;碳排放

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)06-0010-08

Study on the mechanical properties and hydration of red mud-limestone powder ultra-high-performance concrete

CHEN Qiang, HUANG Yue*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Ultra-high-performance concrete (UHPC) has been widely studied and applied in the world because of its excellent mechanical properties and durability. However, as a cement-based material with high cement content, UHPC can lead to higher production costs and greater environmental harm. The use of supplementary cementitious materials (SCMs) to substitute the cement in UHPC has become an effective way to reduce cement consumption. In recent years, red mud (RM) is frequently used as a supplementary cementitious material to partly replace cement. However, previous studies have shown that incorporating RM may undermine the performance of UHPC due to its low reactivity. It is well known that the aluminum phase in cementitious materials can synergistically interact with carbonate

收稿日期:2023-09-28

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME201);山东省泰山学者项目(tsqn201909127)

作者简介:陈 强(1998—),男,山西临汾人。硕士,研究方向为超高性能混凝土和固废材料资源化利用。E-mail:626510226@qq.com。

* 通信作者:黄 悦(1982—),男,河北唐山人。博士,教授,主要从事 FRP 结构加固、UHPC 及固废材料等方面的研究。

E-mail:jeff.yue.huang@outlook.com。

to promote the production of hydration products and improve the performance of the matrix. Since RM is rich in aluminum phase, a sustainable UHPC is developed in this study by a synergistic use of RM and limestone powder (LP) to partially substitute cement. The effects of the admixture amount of RM on the mechanical properties, hydration, pore structure and carbon emission of UHPC are investigated through mechanical tests, calorimetry analysis, X-ray diffraction, porosity tests and carbon emission tests. The results show that UHPC incorporated with RM and LP generally exhibits lower early-age strength than the reference mix, but its late-age strength develops more rapidly due to the synergistic reaction among RM, LP and cement. As the RM dosage increases, the main exothermic rate peak occurs earlier and the hydration reaction is accelerated owing to the nucleation effect and high alkalinity of RM. The coupled addition of RM and LP could lower the porosity of UHPC matrix due to RM's filling effect and the synergistic effect among RM, LP and cement. Moreover, the incorporation of RM and LP effectively reduces the carbon emissions of UHPC.

Key words: ultra-high-performance concrete (UHPC); red mud(RM); synergistic reaction; mechanical properties; hydration; porosity; carbon emission

超高性能混凝土(Ultra-High-Performance Concrete, UHPC)是一种新型水泥基材料,因其具有优异的力学性能(抗压强度 ≥ 120 MPa)和耐久性,被广泛应用于土木工程建设中。然而,由于 UHPC 存在水胶比($W/B < 0.2$)较低、水泥消耗量大($900 \sim 1200$ kg/m³)等缺点,使其生产成本高,碳排放量巨大。此外,由于 UHPC 水胶比较低,UHPC 中大量的水泥处于未水化的状态(水化率仅为 30%~35%)^[1],所以大量水泥仅作为填料存在于混凝土基体中。因此,有必要采用低成本的辅助胶凝材料(Supplementary Cementitious Materials, SCMs)去替代 UHPC 中部分水泥,这不但可以减少水泥用量及生产成本,而且 SCMs 自身存在的火山灰效应也可以提高混凝土的力学性能和耐久性^[2-3]。

石灰石粉(Limestone Powder, LP)是石灰石采石场的工业副产品,主要成分为方解石(CaCO_3)。石灰石粉现已广泛用作水泥基材料的矿物外加剂。石灰石粉的加入有利于提高普通混凝土和 UHPC 的力学性能和耐久性^[4-5]。石灰石粉作为水泥基材料的矿物外加剂存在以下 4 种作用:①填充效应,石灰石粉的加入可以增加水泥基材料的填充密度^[5]。②成核效应,石灰石粉可以为水化产物的生长提供更多的成核位点,从而加速水泥的水化^[4,6]。③稀释效应,当石灰石粉的粒径较大时,会对胶凝体系产生稀释作用,使水泥颗粒可以接触到更多的水,从而促进水化^[7]。④化学效应,石灰石粉中 CaCO_3 可以与水泥或者 SCMs 中的铝相发生协同效应,形成碳铝酸盐。碳铝酸盐可以稳定钙矾石的形成,从而导致水化产物体积增大,使混凝土微观结构更加致密^[8]。然而在铝相含量有限的胶凝体系中,石灰石粉的化学效应并不明显^[9]。

因此,向掺有石灰石粉的水泥中添加含有铝相的外加剂增强铝相与石灰石粉中的 CaCO_3 之间的协同效应是一个非常具有研究意义的课题。赤泥(Red Mud, RM)是生产 Al_2O_3 时产生的具有高度碱性的有害固体废渣,其存在丰富的铝相,因此可被视为一种理想的辅助胶凝材料。拥有比较大的表面积的赤泥会填充混凝土中的孔隙,而且其含有大量的铝和硅等氧化物,这为赤泥成为辅助胶凝材料奠定了基础^[10]。目前,已经进行了大量关于使用赤泥作为辅助胶凝材料的研究,TANG 等^[11]和 VIYASUN 等^[12]研究发现, RM 的加入起到了内部养护作用,这改善了水泥与骨料之间的黏结作用,从而提高了混凝土的强度。由于其具有结合氯化物的能力和降低毛细孔之间连通性的作用, RM 还可以提高混凝土的耐腐蚀性。但 HOU 等^[13]将赤泥应用于 UHPC 中,发现随着赤泥掺量的升高, UHPC 力学性能不断下降。这是由于水泥的低反应性会导致 UHPC 基体水化产物的减少。当赤泥的掺量过多时,赤泥的稀释作用将大于填充作用,对混凝土的强度发展产生负面影响。

因此,本研究旨在开发一种由赤泥与石灰石粉复合替代水泥的可持续发展的超高性能混凝土。赤泥提供的额外铝相可以与石灰石、水泥发生协同反应,从而增强 UHPC 基体性能。通过力学试验研究了不

同含量赤泥对UHPC力学性能的影响;通过水化热分析研究了UHPC的早期水化动力学表现;通过X射线衍射(XRD)测试确定了UHPC的水化产物组成;通过孔隙率测试研究了不同含量赤泥对各UHPC试样孔隙率的影响;通过测定UHPC的水泥消费指数研究了赤泥与石灰石粉的添加对UHPC碳排放的影响。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

水泥采用的是P·O 52.5级普通硅酸盐水泥。选用的硅灰SiO₂质量分数为98%以上。拜耳法赤泥取自中铝集团的露天赤泥堆场,其原料为湿润的块状,外观呈红色。在使用之前,需将块状赤泥置于100℃的烘箱中烘干24h,之后在球磨机中将赤泥研磨至0.3~110 μm。图1显示了赤泥的X射线衍射(XRD)结果,结果表明:赤泥中重要的矿物相为赤铁矿(Hematite, Fe₂O₃)、针铁矿(Goethite, FeO(OH))、石英(Quartz, SiO₂)、方解石(Calcite, CaCO₃)。此外还存在一些具有火山灰性质的沸石,如柱沸石(Epistilbite, Ca₂(Si₆Al₃)O₂₄·8H₂O)、鹅溪石(Gooseckrite, CaAl₂Si₆O₁₆·5H₂O)、水钙沸石(Gismondine, CaAl₂Si₂O₈·4H₂O),前人的研究中表明这些沸石能增强混凝土的性能^[14]。细骨料选用粒径为0.125~1.18 mm的细石英砂。所选用石灰石粉粒径均小于200 μm,比表面积为550 m²/kg,主要成分为CaCO₃。选用的钢纤维是长度为13 mm、直径为0.2 mm的表面镀铜钢纤维。选用的减水剂为聚羧酸盐系减水剂(Superplasticizer, SP),减水率为35%~40%。各原料的粒径分布曲线见图2。水泥、硅灰、赤泥以及石灰石粉的化学成分见表1。

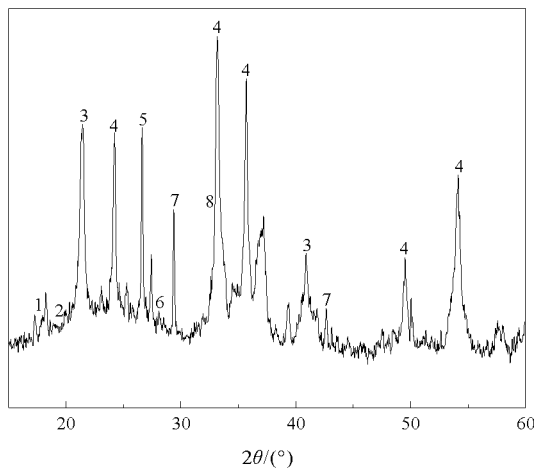


图1 赤泥的XRD图谱

1—柱沸石; 2—鹅溪石; 3—针铁矿; 4—赤铁矿;
5—石英; 6—水钙沸石; 7—方解石

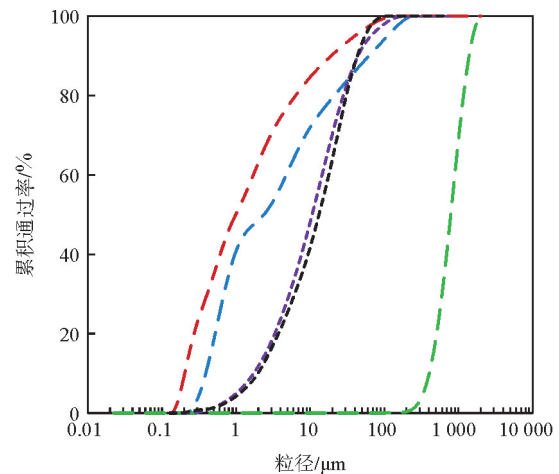


图2 原材料的粒径分布曲线

--- 水泥; --- 硅灰; --- 赤泥;
--- 石灰石粉; --- 石英砂

表1 原材料的化学成分

材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	%
水泥	64.67	17.33	5.52	3.67	3.11	0.27	1.06	2.94	—	
硅灰	0.45	98.46	0.25	0.04	—	—	0.09	0.62	—	
赤泥	4.49	10.34	19.26	52.40	—	6.13	0.20	0.88	5.23	
石灰石粉	53.93	2.04	0.98	0.81	0.21	0.01	0.15	0.48	—	

1.2 配合比设计

在本研究中制备了4种不同成分的砂浆试样。原材料为水泥、硅灰、赤泥、石英砂、石灰石粉、水、钢纤维和减水剂,试验配合比见表2。参考组Ref为普通UHPC。试验组共制备3组不同赤泥替代水平的UHPC,分别为R10、R20、R30。试验组中石灰石粉的替代比例统一为10%,而赤泥的替代比例从10%增

加到 30%,增量为 10%。所有批次的 UHPC 水胶比(W/B)均为 0.18。试验龄期为 3、7、14、28、56 d。

表 2 试验配合比

试样编号	水泥	硅灰	赤泥	石英砂	石灰石粉	水	钢纤维	减水剂	水胶比
Ref	895	179	0	1074	0	193	157	22	0.18
R10	681	179	107	1074	107	193	157	22	0.18
R20	574	179	214	1074	107	193	157	22	0.18
R30	467	179	321	1074	107	193	157	22	0.18

注:Ref 为参考组;R10 表示赤泥替代比例为 10%的试样。

1.3 试件的制备和养护

UHPC 砂浆样品的制备流程如下:①将所有粉末状的原料和石英砂混合 2 min;②向搅拌机中加入水与高效减水剂,以 68 r/min 的速率搅拌 3 min,然后以 147 r/min 的速率再搅拌 3 min;③向搅拌机中添加钢纤维,以 147 r/min 的速率搅拌 1 min,搅拌完毕后,将搅拌好的砂浆浇铸到尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱形模具中,并进行时长为 15 s 的振捣。振捣后立即用保鲜膜覆盖模具表面,并将其置于标准养护条件下(温度为(20±3)℃,湿度为 97%)养护 24 h。养护完毕后,将样品脱模,并将其放入标准养护室中进行标准养护,养护至规定的龄期后取出进行相关试验。所有试件均按照同样的工序制备和养护。

1.4 试验方法

1.4.1 力学性能测试

根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)^[15],测试了 UHPC 在龄期为 3、7、14、28、56 d 的抗压强度。每组共制备 3 个 40 mm×40 mm×160 mm 的混凝土棱柱试样用于抗压试验。通过 2.4 kN/s 的加载速率对棱柱样品进行抗压试验,有效抗压强度取所有测量值的平均值。

1.4.2 水化热分析

水化热分析采用的测试仪器为等温量热仪(TAM Air, TA instruments)。采用等温量热仪测试 UHPC 浆体在 72 h 内的放热速率和总放热量。

1.4.3 X 射线衍射(XRD)

采用 X 射线衍射技术测试了龄期为 28 d 的 Ref 与 R10 的水化产物组成。扫描角度范围是 5~55°,扫描速率为 5(°)/min。

1.4.4 孔隙率测试

通过真空饱和技术测量各砂浆样本的孔隙率^[16]。该技术需将绝干状态的试块(试块的形状尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm)置于混凝土真空饱水机中进行 24 h 的饱水处理,然后取出试块将其表面的水彻底擦拭干净,使试块处于饱和面干状态。试块的孔隙率计算:

$$p = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_w} \times 100\%$$

式中: p 为孔隙率,%; m_s 为试块在水饱和状态下的质量,g; m_d 为试块在绝干状态下的质量,g; m_w 为饱和面干状态下的试块在静水中的质量,g。

1.4.5 碳排放测试

根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[17],计算 CO₂ 排放量。水泥消费指数是指达到一定强度时的 CO₂ 排放量,即试件碳排放量与抗压强度的比值。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

不同龄期 UHPC 的抗压强度如图 3 所示。所有的 UHPC 试件的抗压强度随着养护时间的延长而增

加。对于添加了RM的UHPC,其早期抗压强度(前7 d)随着RM的掺量增加而不断降低。这是由于RM的反应性有限^[18],从而导致混凝土中水化产物减少,强度降低。另外,由于RM较大的比表面积会促使UHPC基体内部发生团聚现象,导致内部额外孔隙的发展,从而降低强度。但7 d后,R10—R30的强度相比Ref发展较为迅速,抗压强度差异逐渐缩小。例如,当混凝土养护龄期为3、7、14、28和56 d时,R30的抗压强度相对于Ref分别降低了20.6%、19.6%、11.2%、9.0%和7.1%。R10在龄期为28与56 d的抗压强度甚至超过了Ref。后期强度发展的主要原因是LP中的CaCO₃与RM提供的额外铝相之间发生协同反应,导致水化产物体积增大,降低基质孔隙率,从而提高强度。此外,RM中存在一些具有火山灰性质的沸石(如水钙沸石等,见图1),这也有利于后期强度的发展^[14]。添加了20% RM和10% LP的R20在28 d的抗压强度仅比Ref小2%。在HOU等^[13]的研究中,添加了相同比例RM但不含LP的UHPC的28 d抗压强度相对于Ref下降了15%。这进一步证明了LP和RM之间的协同作用有利于水泥基材料力学性能的发展。

2.2 水化热

图4展示了UHPC试样在前72 h水化的放热速率以及放热总量的测试结果。从图4(a)中可以看出,原料与水接触后5~10 min左右出现第1个放热速率峰,这是由于铝酸三钙、硅酸三钙以及石膏等在溶液中迅速溶解^[19],生成钙矾石并放出大量的热。初始反应阶段结束后,进入水化反应的诱导阶段,所有样品的放热速率均显著降低。但在这一阶段,含有RM的UHPC试样的放热速率比参考组(Ref)更大,这是由于RM的加入增大了胶凝材料的比表面积,致使胶凝材料与水的反应加速,从而提高水化放热速率^[20]。第2个放热速率峰出现在29~32 h,这是由于硅酸三钙的水化反应生成了C-S-H凝胶和Ca(OH)₂。从图4(a)中可以看出,R10的主放热速率峰略高,且峰值出现时间早于Ref。主放热速率峰较高的原因是超细颗粒的RM可以为水化产物的形成提供成核点^[21],从而提高单位质量水泥释放的热量。峰值提前的原因是RM提供的高碱度环境促进了水化作用,而且RM颗粒的保水性可使水泥颗粒快速与剩余的自由水结合^[22]。随着RM用量的增加,R20和R30的放热速率峰明显下降,这主要是因为RM内

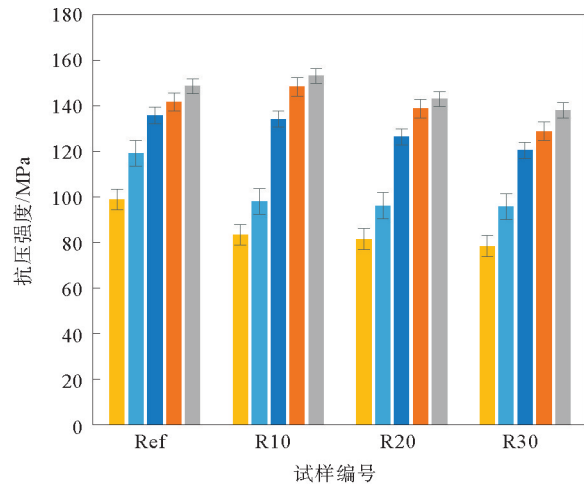


图3 不同龄期UHPC试样的抗压强度

■ 3 d; ■ 7 d; ■ 14 d; ■ 28 d; ■ 56 d

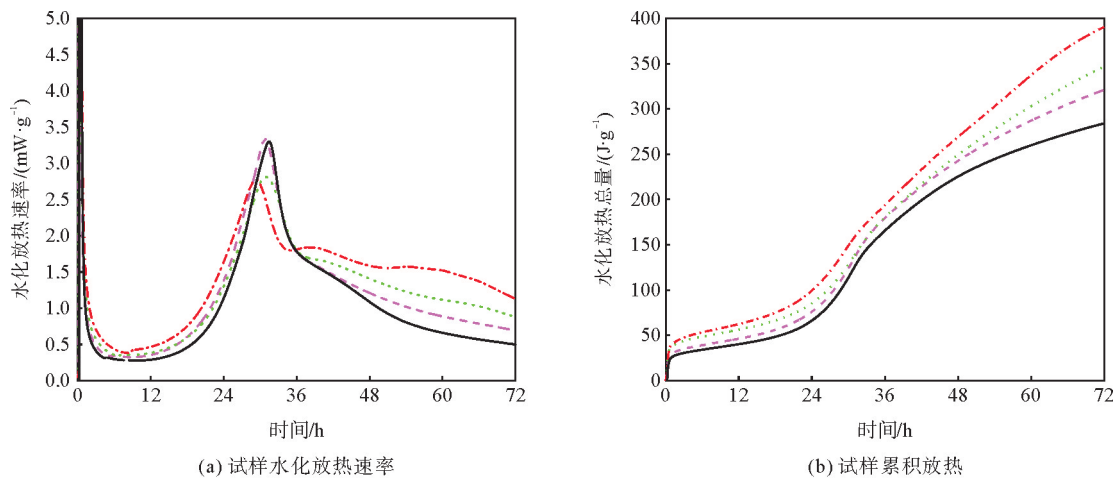


图4 前72 h水化热测试结果

— Ref; - - R10; ··· R20; - · - R30

部丰富的毛细孔会吸收更多的水,使可用于水化的自由水减少,从而降低了单位质量水泥的水化程度。R20 和 R30 的主放热速率峰出现的时间也早于 Ref,这主要是由于 RM 提供的高碱度环境以及可用自由水的减少^[22]。在主放热速率峰之后,添加了 RM 的样品在 35 h 左右会出现一个微弱的放热速率峰。这个放热速率峰出现的原因是 RM 中的铝酸盐随着水化的发展而不断溶解,使溶液中铝酸盐的可用性增大,促进了钙矾石的形成^[19],单位时间放热量提高。大约在 55 h 左右,硫酸盐消耗殆尽,铝酸盐与钙矾石反应生成 AFm 相(单硫铝酸盐以及碳铝酸盐),产生了一个微弱的放热速率峰,这一现象在 RM 含量高的样本中尤为明显。累积放热曲线如图 4(b)所示,可以发现 R10—R30 的累积放热均高于 Ref,并且随着 RM 掺量的增加,累积放热量也逐渐升高。

2.3 X 射线衍射

龄期为 28 d 的 Ref 和 R10 的 XRD 图谱见图 5。UHPC 的水化产物为钙矾石(Ettringite, E)、半碳型铝酸钙(Hemicarboaluminate, Hc)、单碳型铝酸钙(Monocarboaluminate, Mc)、氢氧化钙(Portlandite, CH)、碳酸钙(Calcite, CC)、水滑石(Hydrotalcite, Ht)等。由于 RM 和 LP 的加入, R10 的 CaCO_3 衍射峰强度相对于 Ref 更高。R10 的钙矾石衍射峰强度也比 Ref 高,这是由于 RM 中丰富的铝酸盐会与 SO_4^{2-} 反应生成更多的钙矾石^[19]。此外, R10 呈现出较强的碳铝酸盐(Hc 与 Mc)衍射峰,碳铝酸盐可以阻止钙矾石向单硫铝酸盐的转化^[23]。因此, R10 的钙矾石含量更高,水化产物的总体积更大, UHPC 的内部结构更致密。在 XRD 图谱中观察到了水滑石,该产物是 LP 中的白云石与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应形成的。

2.4 孔隙率

图 6 展示了龄期为 28 d 的 UHPC 试样的孔隙率。结果显示: Ref、R10、R20 和 R30 的孔隙率分别为 7.5%、6.9%、8.1% 和 12.6%。在所有种类的 UHPC 试样中, R10 呈现出最低的孔隙率,比 Ref 低约 8%,其抗压强度也高于其他组(图 3)。R10 的孔隙率较低的原因是 RM 本身存在一定的物理填充作用^[18],而且 RM、LP 和水泥之间的协同效应有助于钙矾石的形成,使水化产物的体积增大,从而降低 UHPC 基体的孔隙率^[9]。但随着 RM 掺量的增加, UHPC 试样的孔隙率不断增大。当 RM 掺量为 30% 时, UHPC 试样的孔隙率最大,相较于 R10 孔隙率增加了 83%。这主要归因于 UHPC 基体中存在大量未反应的 RM 与 LP 固体颗粒,这会削弱颗粒间的胶结作用,导致额外孔隙的发展。RM 导致 UHPC 孔隙率增大的另一个原因是 RM 与 LP 替代水泥会减少水化产物的生成。此外,前人的研究表明^[9],如果水泥中的铝酸盐含量有限,含有石灰石粉的混凝土体系中的协同效应不会特别明显。

2.5 碳排放

图 7 展示了不同 UHPC 试样的 CO_2 排放量以及抗压强度。图 8 展示了不同 UHPC 试样的水泥消费

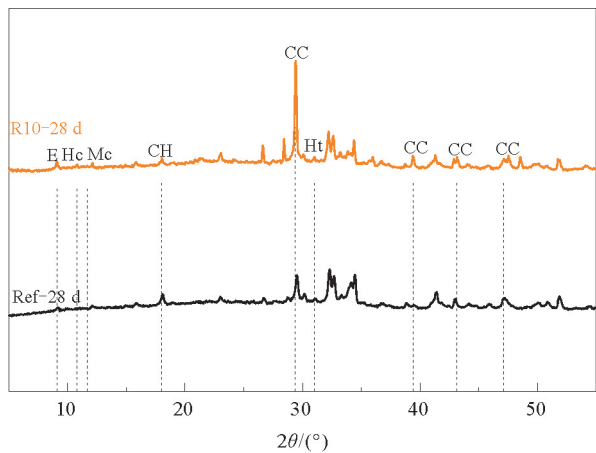


图 5 UHPC 试样的 XRD 图谱

E—钙矾石; Hc—半碳型铝酸钙; Mc—单碳型铝酸钙;
CH—氢氧化钙; CC—碳酸钙; Ht—水滑石

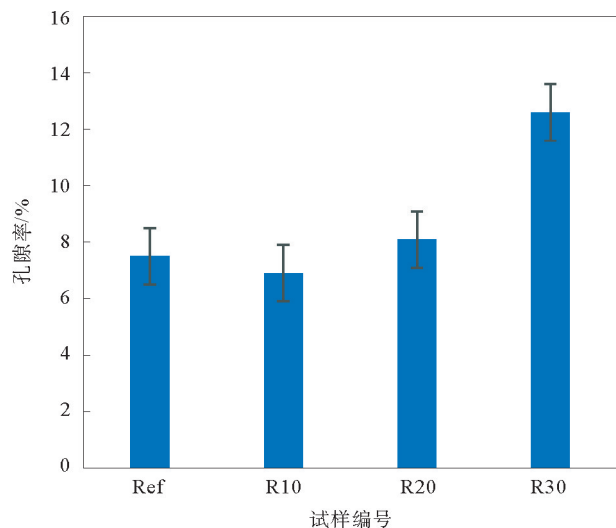


图 6 UHPC 试样的孔隙率

指数。一般来说,水泥消费指数越低,UHPC的可持续性越高,对资源的有效利用率越高^[24]。如图8所示,Ref的水泥消费指数约为7.29 kg/MPa,而R10—R30的水泥消费指数相对于Ref分别降低了19%、22%、28%。并且R10的56 d抗压强度超过了Ref,R20的56 d抗压强度仅小于Ref约2%(图3及图7)。这表明在不影响UHPC力学性能的前提下,使用RM与LP协同替代UHPC中的水泥是更加环保的,并且有利于推动建筑行业的节能减排。

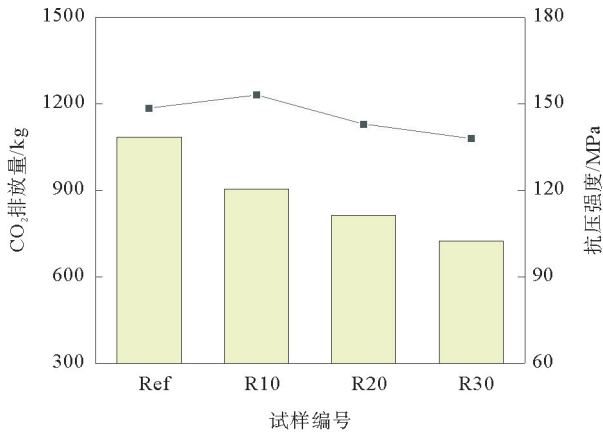


图7 UHPC试样的CO₂排放量以及抗压强度

■ CO₂; —■ 56 d抗压强度

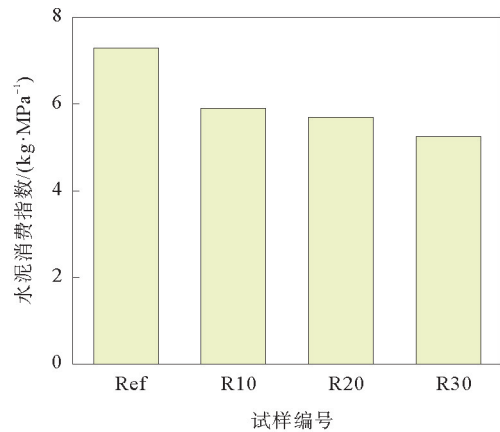


图8 UHPC试样的水泥消费指数

3 结论

本文旨在利用固废材料赤泥(RM)(10%~30%)与石灰石粉(10%)替代水泥研发出一种可持续发展的超高性能混凝土(UHPC)。并且通过力学性能测试、水化热分析、X射线衍射测试、孔隙率测试以及碳排放测试去表征RM的掺量对UHPC力学性能、水化、孔隙结构以及碳排放的影响。基于上述试验结果,可以得出以下结论:

1) 添加了RM与LP的UHPC在前7 d的抗压强度低于普通UHPC,而在7 d后强度发展迅速,这是由于LP、RM以及水泥之间发生了协同效应以及RM中沸石的火山灰反应有利于UHPC后期强度的提高。

2) 随着RM用量的增加,水泥前72 h的累积放热逐渐增加。并且RM的加入可以使主放热速率峰值出现的时间提前,这归因于RM提供的高碱度环境会促进水化以及RM的保水性使自由水与水泥的结合加速。

3) 添加了10% RM和10% LP的UHPC的孔隙率最低。这主要是由于RM的物理填充作用以及RM、LP和水泥之间的协同作用,导致水化产物体积增加,基体孔隙率降低。但随着RM用量的增加,UHPC的孔隙率也随之增加,因为未反应的RM和LP颗粒降低了UHPC基体的胶结能力,减少了水化产物的形成,导致额外孔隙的发展。

参考文献(References):

- [1] KORPA A, KOWALD T, TRETTIN R. Phase development in normal and ultra high performance cementitious systems by quantitative X-ray analysis and thermoanalytical methods[J]. *Cement & Concrete Research*, 2009, 39(2): 69-76.
- [2] NGUYEN V T, YE G, BREUGEL K V, et al. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4): 2030-2035.
- [3] YAZICI H, YIGITER H, KARABULUT A Ş, et al. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete[J]. *Fuel*, 2008, 87(12): 2401-2407.
- [4] LI P P, BROUWERS H J H, CHEN W, et al. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118112.

- [5] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A quantitative study on physical and chemical effects of limestone powder on properties of cement pastes[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 58-69.
- [6] HUANG W, KAZEMI-KAMYAB H, SUN W, et al. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2017, 77: 86-101.
- [7] OEY T, KUMAR A, BULLARD J W, et al. The filler effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(6): 1978-1990.
- [8] LOTHENBACH B, SAOUT G L, GALLUCCI E, et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements[J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(6): 339-356.
- [9] WEERDT K D, KJELSEN K O, SELLEVOLD E, et al. Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33(1): 30-38.
- [10] GHALEHNOVI M, SHAMSABADI E A, KHODABAKHSHIAN A, et al. Self-compacting architectural concrete production using red mud[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 418-427.
- [11] TANG W C, WANG Z, DONNE S W, et al. Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 379: 120802. 1-120802. 9.
- [12] VIYASUN K, ANURADHA R, THANGAPANDI K, et al. Investigation on performance of red mud based concrete[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 39(1): 796-799.
- [13] HOU D S, WU D, WANG X P, et al. Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): Design and performance evaluation[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2021, 115: 103862.
- [14] LIU R X, POON C S. Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(3): 384-391.
- [15] GB/T 17671—2021, 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S].
GB/T 17671—2021, Test method of cement mortar strength (ISO method)[S].
- [16] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2015, 55: 383-394.
- [17] GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准[S].
GB/T 51366—2019, Standard for building carbon emission calculation[S].
- [18] RIBEIRO D V, LABRINCHA J A, MORELLI M R. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement[J]. *Materials Research*, 2011, 14(1): 60-66.
- [19] ROMANO R C O, BERNARDO H M, MACIEL M H, et al. Hydration of Portland cement with red mud as mineral addition[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2018, 131: 2477-2490.
- [20] FUJII A L, TOEERS D D R, ROMANO R C D O, et al. Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 432-439.
- [21] LAWRENCE P, CYR M, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration[J]. *Cement & Concrete Research*, 2003, 33(12): 1939-1947.
- [22] RIBEIRO D V, SILVA A S, LABRINCHA J A, et al. Rheological properties and hydration behavior of portland cement mortars containing calcined red mud[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2013, 40(6): 557-566.
- [23] WEERDT K D, HAHA M B, SAOUT G L, et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash[J]. *Cement & Concrete Research*, 2011, 41(3): 279-291.
- [24] YANG R, YU R, SHUI Z H, et al. Environmental and economical friendly ultra-high performance-concrete incorporating appropriate quarry-stone powders[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 112-121.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)