香港混凝土学会2023年学术年会

Innovative Application of UHPC in Construction with both Functional and Aesthetic Effect

UHPC在工程中的创新应用——功能性与观赏性

汇 报 人：周孝军 副教授 西华大学

团队成员：丁庆军 、刘自力、季孝敬 、李天鹏

2024年1月 中国 香港

目录

01 UHPC优势与工程需求

02 功能化研究与创新应用

03 推广应用案例

■ UHPC组成与性能

- **超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete，简称UHPC），**由水泥、活性掺合料、纤维和功能外加剂等，加水拌合后凝结硬化所形成，**抗压强度≥120MPa、抗拉强度≥8M，抗折强度≥14MPa，性能指标明确、具有新本构关系和超长结构寿命的新型水泥基结构工程材料。**

主要参数	UHPC	高性能混凝土（HSC）	
		指标	倍数
抗压强度/MPa	120-400	60-80	2-4
抗折强度/MPa	14-60	6-10	3-6
抗拉强度/MPa	8-30	3-5	2-6
断裂能/N·m-1	150-40000	150	1-25
氯离子扩散系数/$10^{-12}m^2·s^{-1}$	0.05	1.0	30
钢筋锈蚀速率/μm·年	0.01	0.25	25

一、UHPC优势与工程需求

UHPC构件特点

- **超高强度**—在保持结构力学性能的同时，相比普通混凝土可有效减轻结构的自重。
- **创新性**—UHPC构件拥有轻质结构，能够实现更薄界面、更长跨距，轻质优雅，更具创新性。
- **环保**—UHPC构件结构，能够有效减小原材料的使用，促进实现“双碳”目标。

UHPC构件

制备原理

- 去除粗骨料，减小缺陷，增强过渡区；
- 优化粉体级配，提高硬化体密实度；
- 掺细微高强钢纤维，增加韧性和强度；
- 使用功能外加剂，降低W/B、提高工作性；
- 高温养护，促进胶材水化反应。

一、UHPC优势与工程需求

关键技术

极低水胶比高效分散技术

针对极低水胶比体系，开发了专用分散功能材料，实现了极低水胶比条件下UHPC大流态化，为UHPC施工便利性提升与工程应用提供了关键支撑。

湿状态堆积拟合技术

突破传统干状态模型限制，开展了湿状态下多尺度细颗粒紧密堆积模型研究，为物理层面的紧密堆积体系设计提供了理论指导。

幼龄期免热养护技术

针对当前UHPC材料幼龄期通常需要蒸汽养护的应用限制，开发了幼龄期免蒸（热）养技术，为复杂施工环境下UHPC的应用提供了便利。

体积收缩同步补偿技术

以体系设计为基础，系统研究了水化过程体积变化规律，开发了多源复合收缩补偿材料与应用技术，避免了龄期收缩对UHPC性能的不利影响。

相关技术标准

- ✓ 瑞士标准：《超高性能纤维增强水泥基复合材料 (UHPFRC)-建筑材料、尺寸和应用》 SIA 2052
- ✓ 加拿大标准：《混凝土材料和混凝土施工方法-附录U 超高性能混凝土 (UHPC)》CSA A23.1:19
- ✓ 法国标准：《混凝土-混凝土结构施工-针对UHPRFC的特定规则》NF P 18-451
- ✓ 美国标准：

  《超高性能混凝土 (UHPC) 的预制和预应力混凝土应用指南》 TR-9-22

  《超高性能混凝土试样的制造和测试标准实施规程》C1856/C1856M-17
- ✓ 中国标准：

  《活性粉末混凝土》GB/T31387-2015

  《超高性能混凝土预制构件生产技术规程》T/CBMF 127/T/CCPA 22-2021

  《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规程 》T/CBMF 128/T/CCPA 23-2021

  《超高性能混凝土结构设计规程》T/CBMF 185、T/CCPA 35-2022
- ✓ ……

近年应用情况

- 截止2022年底，马来西亚已建造了187座UHPC桥梁，总桥面面积达134,300㎡；
- 2003-2022年间，瑞士有350项UHPFRC工程应用，总用量15,041m³；
- 2022年，中国超高性能混凝土用量超过82,000m³，其中48%用于桥梁，23%用于建筑，29%用于电力市政、维修加固等；
- ……

■ 工程需求与应用技术问题 ——工程科学研究：源自工程、立足工程、服务工程

➢ 成都青龙湖览锦台—UHPC挂板

- 总高12.8m，外挂板材全部使用UHPC120，工厂预制，现场安装。
- 外表完整光洁，美观，装饰性好。

性能指标	设计要求
抗压强度/MPa	≥120
抗折强度/MPa	≥18
弹性模量/GPa	≥50

◆难点：高模量弧面板，低收缩/抗裂

- 30mm UHPC核心筒表皮

- 100mmUHPC实体栏板

- 30mm UHPC楼梯踏步板

- 20mmUHPC吊顶板

一、UHPC优势与工程需求

➢ 成都建工大厦—UHPC装饰板

- 裙楼外立面高27.2m
- 挂板尺寸1.8×5.4m
- 490张，总面积5000㎡

性能指标	设计要求
抗压强度/MPa	≥120
抗折强度/MPa	≥15
弹性模量/GPa	≥48
抗拉强度/MPa	≥6

◆难点：异型构造应力集中、抗裂性

一、UHPC优势与工程需求

技术难题

- ✓ 如何根据结构需求，开发相适应的UHPC材料，发挥UHPC潜能
- ✓ 应用属地材料开发高性价比UHPC材料，提升UHPC市场竞争力
- ✓ 如何应用材料学原理，多用活性固废，开发绿色低碳环保UHPC材料

解决思路

- ✓ 掺加粗骨料与混杂纤维，提升力学性 → 减水胶材，提升模量、韧性与抗裂性
- ✓ 复合高能膨胀剂，减小收缩 → 保持强度与膨胀减缩效应协同发展
- ✓ 多孔高钛矿渣集料，内养护 → 促进低水胶比致密环境下水化进程
- ✓ 功能外加剂与掺合料解决流变性 → 改善含粗骨料混杂纤维UHPC工作性

目录

01 UHPC优势与工程需求

02 功能化研究与创新应用

03 推广应用案例

探明了粗骨料掺入方式对UHPC性能的影响

表1　含粗骨料的超高性能混凝土配合比（：kg/m³）

组别	水泥	降粘剂	微硅粉	纤维	**机制砂**	石子	水	外加剂
基准组	800	200	160	钢-78	1100	/	200	3%
A1	800	200	160	钢-78	880	220	200	3%
A2	800	200	160	钢-78	770	330	200	3%
A3	800	200	160	钢-78	660	440	200	3%
A4	800	200	160	钢-78	550	550	200	3%
B1	736	184	147.2	钢-78	1012	220	184	3%
B2	704	176	140.8	钢-78	968	330	176	3%
B3	672	168	134.4	钢-78	924	440	168	3%
B4	640	160	128	钢-78	880	550	160	3%

粗骨料替代**砂**

粗骨料替代**浆体**

工作性能

- **粗骨料替代浆体，**对混凝土工作性能（坍落度/扩展度）的影响，**比替代砂对混凝土的影响大，对扩展度影响更明显。**

坍落度

扩展度

粗骨料：330kg/m³

➢ 力学性能

- **粗骨料替代浆体**时，混凝土试件各龄期力学性能，均**比替代砂时高；掺粗骨料后弹模增加较明显。**

抗压强度

抗折强度

弹性模量

体积变形性能

- **掺粗骨料能减小UHPC收缩；粗骨料替代浆体，**混凝土试件收缩**比替代砂时小。**

二、功能化研究与创新应用

- 混掺不同尺度有机纤维

明确了合理纤维掺量与混杂方式

- **纤维掺量：**胶材不变，随纤维掺量增大，混凝土工作性退化。低掺量时两种掺入方式工作性差别不大；高掺量时，粗骨料替代浆体的工作性能明显较替代机制砂的工作性能差。

坍落度

扩展度

- 纤维掺量1.75%时，对UHPC抗压与抗折强度贡献最明显。

二、功能化研究与创新应用

- **混杂方式：**纤维长径比越大，对工作性影响明显；对抗折贡献大；不同尺度纤维混杂对强度贡献最突出。

膨胀剂与多孔集料内养护协同收缩，促进强度发展和膨胀性匹配控制

- 超高强UHPC用水量极低；
- 致密条件，与外界几乎无水交换；

常规膨胀剂用于高致密UHPC后水化膨胀产物生成量受限，抑制收缩变形不明显。

$$C_4A_3 + 2(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 31\,H_2O \rightarrow AFt + 2\,Al(OH)_3\text{（gel）} \quad (1)$$

$$2Al(OH)_3\text{（gel）} + 3Ca(OH)_2 + 3\text{（}CaSO_4 \cdot 2H_2O\text{）} + 20\,H_2O \rightarrow AFt \quad (2)$$

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (3)$$

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 \quad (4)$$

CaO、MgO型膨胀剂需水量低

- **高能复合膨胀剂：**优选不同膨胀特性的膨胀源复配、控制煅烧温度、调整粉磨细度，降低水化反应需水量、提高膨胀率，实现高致密状态下UHPC强度和体积稳定性协调发展。

二、功能化研究与创新应用

- **高能复合膨胀剂开发：** 基于不同膨胀剂时效特点与对混凝土强度的影响，对超高强混凝土膨胀性合理设计，开发高能复合膨胀剂：**选用HCSA、氧化镁和石膏进行复配（=68:22:10）**，膨胀整体稳定，对强度无明显影响，符合超高强混凝土在致密条件下的膨胀率与稳定收敛期要求。

编号	复配比例/%		
	HCSA	MgO	石膏
1	55	35	10
2	68	22	10
3	80	10	10

HCSA型 ⇨ 早期膨胀，消耗水量多，中后期水化供水不足

MgO型 ⇨ 延迟膨胀，后发挥作用，影响水泥石微结构

坍落度/mm		扩展度/mm		T_{500}/s	含气量/%	60d膨胀率/×10^{-4}	抗压强度/MPa		
初始	2h	初始	2h				3d	7d	28d
270	250	630	610	11	2.0	1.43	84.1	102.4	133.4

二、功能化研究与创新应用

- **多孔高钛型高炉渣内养护：**钒钛磁铁矿高炉冶炼形成的高钛型高炉渣（$TiO_2 \geq 18\%$），具有高强、多孔特性；为细集料，可发挥内养护效应，促进胶材与膨胀剂水化，减小收缩、，且不影响强度。

加工成

人工集料

高钛型高炉矿渣具有多孔、高吸水率等特性作混凝土骨料有内养护作用

二、功能化研究与创新应用

- 利用高能复合膨胀剂、采用多孔高钛型高炉渣发挥内养护作用：膨胀剂+内养护，协同减小收缩。

膨胀剂+矿渣砂复合作用

二、功能化研究与创新应用

- 水化产物演变

取代量和龄期增长 → C_3S、C_2S衍射峰降低 ⇨ 水化进程加快

取代量和龄期增长 → $Ca(OH)_2$衍射峰降低 ⇨ AFt相和C-S-H凝胶增多

粘聚性与大流态调控技术

- **化学调控：**采用低含气量、高减水、长时保坍减缩型减水剂，掺入优质消泡剂、引气剂、稳泡剂，形成大量50-100μm内微小稳定气泡，含气量≤2%，改善了低水胶比下超高强混凝土的流动性、粘聚性及集料匀质性。

外加剂类型	扩展度（3h）/mm	倒坍（2h）/s	含气量/%	28d抗压强度/MPa
常规外加剂	650（550）	11（20）	2.6	136.7
专用外加剂	720（700）	7（9）	1.8	147.4

常规外加剂

专用外加剂

二、功能化研究与创新应用

- **物理调控：**采用降粘、增强等矿物掺合料复合，调整粉料级配，进一步增加流动性，微细观尺度上改善匀质性。

类型	扩展度/mm	倒坍时间/s	28d抗压强度/MPa	28d干燥收缩率/×10^{-6}
调控前	630	11s	125.8	359
调控后	710	6.5s	145.6	243

体积稳定性对比

创新应用—成都青龙湖览锦台装饰板

- 总高12.8m，外挂板材全部使用UHPC120，工厂预制，现场安装。
- 顶部宽15.0m，悬挑楼梯宽3.2m。

二、功能化研究与创新应用

览锦台UHPC配合比（Kg/m³）

水泥	降粘剂	白硅粉	钢纤维	石英砂+矿渣砂	碎石	水	高能膨胀剂	外加剂
680	200	120	130	1030	200	170	40	40

实测性能

坍落度/mm		倒坍/S		T500/s		扩展度/mm		含气量/%
0h	2h	0h	2h	0h	2h	0h	2h	0h
275	265	6	8	6	9	770	710	1.8

抗压强度/MPa			弹模/MPa	抗折强度/MPa		56d收缩率/x10^{-4}
3d	7d	**28d**	28d	7d	28d	
118.4	125.6	**132.6**	5.22×10^{4}	20.4	22.5	3.43

二、功能化研究与创新应用

- 30mm UHPC核心筒表皮

除尘

化整为零

拆分为12层
每层12个构件

磨光

上色

二、功能化研究与创新应用

- 30mm UHPC核心筒表皮

- 30mmUHPC旋转楼梯踏步

- 25mm平台钢柱UHPC表皮

- 100mmUHPC实体栏板

- 20mmUHPC吊顶板

二、功能化研究与创新应用

- **25mm平台钢柱UHPC表皮**

  1个圆周：3块板拼接

二、功能化研究与创新应用

创新应用—成都建工大厦UHPC挂板

- 分为两种构件（镂空、实心）
- 利用UHPC自持性能，楼层中不打断构件，构件高度贴近层高（5.4m），保证安装效率。
- 构件宽度以两个菱形单元一组划分（1.8~2.4m），板厚4cm，

建工大厦UHPC配合比（Kg/m³）

水泥	降粘剂	微硅粉	钢纤维	POM	石英砂+矿渣砂	碎石	水	高能膨胀剂	外加剂
700	300	150	150	7	1000	240	150	70	55

实测性能

坍落度/mm		倒坍/S		T500/s		扩展度/mm		含气量/%
0h	2h	0h	2h	0h	2h	0h	2h	0h
270	265	7	9	5	8	740	690	1.6

抗压强度/MPa			弹模/MPa	抗折强度/MPa		56d收缩率/x10^{-4}
3d	7d	**28d**	28d	7d	28d	
115.6	127.5	**147.3**	4.96×10^{4}	19.5	22.7	3.13

二、功能化研究与创新应用

- 板厚4cm，背楞处布置φ6钢筋;
- 单块材料用量0.3m³；重量约0.8吨。

- 预制构件的高度达到5米，属于大型构件，对于生产模具、工艺、存放、运输以及安装均有高要求，进行了专项系统研究。

产品名称	综合单价
石材幕墙	1500元/㎡
UHPC装饰板	1194元/㎡

二、功能化研究与创新应用

目录

01 UHPC优势与工程需求

02 功能化研究与创新应用

03 推广应用案例

UHPC在钢管混凝土强劲骨架结构应用

- **乐西高速苏坝大桥：钢管混凝土强劲骨架-C120**
  - 苏坝特大桥全长835.5米，主桥为370.5m上承式钢筋混凝土拱桥（主跨350m。主拱采用超高强钢管混凝土劲性骨架成拱法施工，劲性骨架为每肋上、下各三根Φ508×14(18/22)mm、内灌C120补偿收缩自密实砼（首次应用C120）的钢管砼组合桁式结构。

- 外包混凝土：由8环降为3环

三、推广应用案例

管内混凝土要求

- 低含气+高保坍
- 大流态+粘聚性+匀质性
- 自密实+不收缩
- 不脱粘/脱空

常见问题：

三、推广应用案例

机制砂C120混凝土配合比（Kg/m³）

水泥	降粘剂	微硅粉	钢纤维	机制砂	碎石	水	高能膨胀剂	外加剂
619	62	68	40	629	984	125	30	27

机制砂C120混凝土实测性能

坍落度/mm		倒坍/S		T500/s		扩展度/mm		含气量/%
0h	3h	0h	3h	0h	3h	0h	3h	0h
270	265	6	8	8	12	710	690	2.0

抗压强度/MPa			弹模/MPa	抗折强度/MPa		56d自由膨胀率/x10^{-4}
3d	7d	**28d**	28d	7d	28d	
117.6	123.5	**142.6**	4.96×10^{4}	11.5	12.7	1.13

三、推广应用案例

- 混凝土抗压强度与密闭条件下膨胀率满足设计要求；钢管内混凝土密实性好，敲击与超声波检测显示无脱黏脱空现象。

第 1 页，共 1 页

水泥混凝土立方体抗压强度试验检测报告

BGLQO5002F

检测单位名称（专用章）：四川慧鲁达工程检测有限责任公司乐西高速马边 报告编号：BG-202207(S1-2)-TYH-0071

施工/委托单位	四川公路桥梁建设集团有限公司	工程名称	乐山至西昌高速公路马边至昭觉段
工程部位/用途	苏坝特大桥拱肋左右幅内侧主弦管内灌		
样品信息	样品名称：水泥混凝土试件 样品编号：YP-202207(S1-2)-TYH-0071 样品状态：表面平整、无砂灰痕面、无缺损 样品数量：三组		
检测依据	JTG 3420-2020	判定依据	设计文件
主要仪器设备名称及编号	微机电液伺服压力试验机(201)，电子数显卡尺(209)		
混凝土种类	自密实混凝土	强度等级	C120
搅拌方式	机械搅拌	养护条件	标准养护
取样时间	2022-07-14		

试件编号	龄期(d)	成型日期	试验日期	技术要求(MPa)	试验结果(MPa)	结果判定
YP-202207(S1-2)-TYH-0071-01	28	2022-07-14	2022-08-11	≥120	138.4	合格
YP-202207(S1-2)-TYH-0071-02	28	2022-07-14	2022-08-11	≥120	143.0	合格
/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/

检测结论：经检测，该水泥混凝土试件28天抗压强度值达到设计要求。

附加声明：/

监理意见及签字：符合设计要求

检测：张磊 审核：[illegible] 批准：詹洪 日期：2022年08月11日

报告摘要

工程名称	乐西高速马边至昭觉段（S1-2标段）苏坝特大桥主拱圈钢管混凝土密实度检测项目		
部位名称	苏坝特大桥第10孔	钢管编号	YF-上弦杆-01、YF-上弦杆-02、YF-上弦杆-03、YF-下弦杆-01、YF-下弦杆-02、YF-下弦杆-03、ZF-上弦杆-01、ZF-上弦杆-02、ZF-上弦杆-03、ZF-下弦杆-01、ZF-下弦杆-02、ZF-下弦杆-03
检测方法	超声波法		
检测依据	《超声法检测混凝土缺陷技术规程》（CECS 21：2000）		
检测主要结论	根据《超声法检测混凝土缺陷技术规程》（CECS 21：2000）对所测数据分析：已检测的测区钢管混凝土密实性良好。		

28d实测强度143.0MPa

超声检测报告结果：密实度良好

三、推广应用案例

■ **沿江高速西宁河大桥：钢管混凝土强劲骨架-C100**

该桥为主跨510米的上承式钢筋混凝土拱桥，主拱圈采用劲性骨架法施工，劲性骨架为型钢与钢管混凝土组成的桁架结构，每肋劲性骨架横向由四片桁片构成，每片桁片的上、下弦杆均采用φ540×22~26毫米、内灌C100自密实超高强混凝土，外包C50低收缩混凝土，2环、12工作面外包。

成桥全景

钢管桁架骨架吊装

主管灌注
C100混凝土

骨架外包
钢筋混凝土

主拱截面

三、推广应用案例

石粉含量6.7%机制砂C100混凝土配合比（Kg/m^3）

水泥	降粘剂	微硅粉	膨胀剂	机制砂	碎石	外加剂	水
480	90	70	35	705	1066	1.8%	131

机制砂自密实补偿收缩C100钢管混凝土性能

坍落度/mm		扩展度/mm		T_{500}/s	容重(Kg/m^3)	含气量	抗压强度/MPa	
初始	5h	初始	5h				3d	**28d**
270	250	685	640	9	2580	1.9%	93.4	**127.5**

三、推广应用案例

三、推广应用案例

汇报结束，敬请批评指正！

感谢：

武汉理工大学 丁庆军 教授的指导！

成都东蓝星新材料公司 刘自力 先生的支持！

香港混凝土学会 杨世杰 博士/主席的支持！