

# GRC和UHPC在建筑装饰工程中的应用

苗春, 李中皓, 刘雄

上海建科检验有限公司, 上海

收稿日期: 2024年6月29日; 录用日期: 2024年7月19日; 发布日期: 2024年7月30日

## 摘要

GRC和UHPC都是用于建筑装饰工程的新型材料, 具有可塑性良好、表现力强、轻质高强以及绿色经济等优点。本文介绍了GRC和UHPC材料的发展及应用情况, 结合国家和行业标准对GRC和UHPC的物理性能进行比较, 就其应用在建筑装饰工程中的应用情况进行分析。最后, 针对GRC和UHPC在使用中出现的问题进行了阐述并提出改进方向, 为后续的推广应用提供参考。

## 关键词

GRC, UHPC, 建筑幕墙

# Application of GRC and UHPC in Building Decoration Engineering

Chun Miao, Zhonghao Li, Xiong Liu

Shanghai Jianke Inspection Co., Ltd., Shanghai

Received: Jun. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

GRC and UHPC are new materials used in architectural decoration engineering, characterized by good plasticity, strong expressiveness, lightweight high strength, and eco-friendliness. This article introduces the development and application of GRC and UHPC materials, compares the physical properties of GRC and UHPC based on national and industry standards, and analyzes the advantages and disadvantages of their application in architectural decoration engineering. Finally, the paper expounds the problems in the use of GRC and UHPC and proposes the improvement direction to provide a reference for the subsequent promotion and application.

## Keywords

GRC, UHPC, Building Curtain Wall

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

改革开放以来,中国城市建设日新月异,各类建筑像雨后春笋般破土而立,各种建筑新材料、新技术的应用使得建筑质量得到大幅提高,建筑外表肌理也是千姿百态,散发着艺术的气息。建筑材料领域,复合化、改性增强是改进与提升材料性能,扩展其使用领域的重要技术手段。由于具有力学性能优异、自重轻、安装简便、可塑性强、表面纹理丰富等特点,GRC和UHPC装饰制品作为一种丰富建筑立面造型的重要手段,现已应用于各类建筑中。

玻璃纤维增强水泥装饰制品是一种以玻璃纤维为增强材料,水泥净浆或砂浆为基体,预制生产用于建筑物或构筑物,并起到装饰功能的制品,简称GRC装饰制品。

超高性能混凝土装饰制品是一种在传统水泥基混凝土中增加了矿物掺合料、细骨料、外加剂、钢纤维或有机纤维或无机纤维等增强材料,采用浇注、挤出、压制或喷射等工艺工厂化预制而成的非承重超高强增韧混凝土装饰制品,简称UHPC装饰制品。

## 2. GRC和UHPC发展应用概况

### 2.1. GRC发展情况

20世纪40年代,研究人员在观察到玻璃纤维对高分子材料力学性能的优异强化作用,开始尝试使用玻璃纤维增强水泥基材料,形成最早的GRC制品。针对玻璃纤维易受到高碱度水泥腐蚀的问题,科学家展开了长期的研究[1]。直到20世纪70年代,通过使用抗碱玻璃纤维配合低碱性水泥,并经过长时间的实验验证后,真正意义上具有耐久性能的GRC材料[2]。

在解决了GRC材料长期耐久性问题后,GRC制品凭借其生产制造方式以及卓越的力学性能,实现了多品种、机械化、规模化生产,并不断推广应用于各种工程中。随着不断迭代更新升级改进,GRC制品表面质感获得质的突破,逐渐脱离了低端仿材的概念,甚至在某些方面超越了传统的天然材料。

### 2.2. UHPC发展情况

超高性能混凝土(UHPC),在本质上是用纤维增韧的同时用细砂取代传统粗骨料而改善其堆积性能的超塑化混凝土,是高强混凝土和纤维的结合。“UHPC”这一概念的定义也经过多次迭代变化,最初是由法国学者Larrard基于紧密堆积理论提出的,经过不断地研究及实践,美国科学家Schmidt将“与钢纤维进行复合使用的高性能混凝土”定义为UHPC。UHPC构件在欧洲已经被广泛应用, Van Tuan等人对UHPC的概念进一步明确,确定为抗压强度超过150Mpa的混凝土。

当然,目前国内外学术界对UHPC并没有明确的界定,国外学者更侧重其优异的物理性能,而国内学者则更加注重对UHPC制备工艺的优化改进。因此在国内将具有装饰属性的UHPC定义为“以白色硅酸盐水泥以及白色矿物掺合料为基本胶凝体系,采用石英砂和纤维为增强材料,并加入适量颜料调色,

常规工艺条件下 28 d 的抗压强度大于 120 Mpa, 同时具有良好的流动性能、耐久性能、力学性能和装饰性能的水泥基材料”。

## 2.3. GRC 和 UHPC 在工程中的应用

### 2.3.1. GRC 制品在工程中的应用

#### 1) 室内隔墙

GRC 制品因为其轻质高强、隔声、隔热等特性被用作建筑室内隔墙, 以南京晨光江宁办公楼为例, 其建筑高度为 49.2 m, 共计 8 层, 总建筑面积为 20,824 m<sup>2</sup>。相比传统的加气混凝土砌块, 在采用 GRC 轻质隔墙板后成功降低了荷载, 增加了建筑使用面积, 直接节省各类费用达 14 万元人民币。

#### 2) 屋面系统

GRC 材料还可被用于建造屋面系统, 马志明等人设计了一款轻质 GRC 拱形弦波屋面系统, 该系统具有较好的抗冲击韧性, 其承载力与自重之比为普通钢筋混凝土结构 4.5 倍, 而且造价低、施工周期快。除了作为屋面系统使用外, GRC 材料还被用作屋面装饰层, 海南国际会展中心钢结构异型屋面在完成基层、保温层、防水层后, 通过搭建模板, 采用喷射成型工艺完成异型屋面装饰层。

#### 3) 外围护构件

GRC 材料的制备工艺突破了传统胶凝材料的局限性, 可以根据建筑师的不同需求制作大跨度、多曲面的构件。武汉国家地球空间信息产业化基地(新区)一期工程作为典型的以复杂双曲面为代表的特异体型幕墙工程, 该项目利用 BIM 技术, 结合 GRC 材料可塑性强的特点, 批量输出 GRC 单元板块。特别是该项目的飘带造型部分, 在竖向用三块 GRC 大板拼接成一块高 7 m、宽 3 m 左右的超大板, 大板间做无缝拼接工艺, 使用同一个背附钢架。飘带整体无水平分缝, 效果大方气派, 同时也有效地控制了项目成本[3]。

### 2.3.2. UHPC 制品在工程中的应用

#### 1) 桥梁工程

UHPC 制品已应用于桥梁工程中, 例如浙江省舟山市的富翅门大桥、南京长江第五大桥等。UHPC 材料可被用于装配式桥梁接缝部位、箱梁、盖梁、桥面板以及桥墩。例如上海市嘉闵高架的普通混凝土梁、盖梁墩柱和墩柱承台之间就使用 UHPC 湿接缝工艺进行连接。大跨度桥梁常使用钢和钢-普通混凝土组合梁两种梁型。传统的钢梁和钢混组合梁均有明显的缺点, 因此钢-UHPC 组合梁凭借 UHPC 优异的性能, 具有自重轻、抗裂性能好、易于修复补强、施工迅速等优点是未来桥梁发展的方向之一。另一方面也可以使用 UHPC 预制桥面板代替普通混凝土桥面, 达到为降低钢-普通混凝土组合梁的自重, 提高桥面抗裂性能的作用。

#### 2) 外围护构件

由于 UHPC 自身的优越性能和加工优势, 近年来建筑外围护结构是其最广泛的应用领域之一, 如建筑幕墙、外墙(装饰)挂板等。深圳悦彩城展示中心幕墙的弧形镂空板和实心板厚度只有 2~3 cm, 但幕墙的面积达到了 3.6 m<sup>2</sup>, 其曲面镂空工艺通过 UHPC 的超高综合性能得以完美展现。上海上音歌剧院立面 UHPC 外墙单板在面积达 6 m<sup>2</sup>、开孔率 40% 情况下厚度只有 5 cm, 大大降低了工程的施工难度。

## 3. GRC 和 UHPC 在装饰工程中的应用分析

### 3.1. GRC 和 UHPC 物理性能比较

根据现行行业标准 JC/T 940-2022《玻璃纤维增强水泥(GRC)装饰制品》、JC/T 1057-2021《玻璃纤维增强水泥(GRC)外墙板》、现行中国建筑材料联合会标准 T/CBMF 172-2022《超高性能混凝土(UHPC)装

饰制品》、T/CBMF 171-2022《超高性能混凝土(UHPC)外墙板》的要求，GRC 装饰制品、GRC 外墙板、UHPC 装饰制品、UHPC 外墙板的物理力学性能参数应分别符合表 1~4 的要求。

**Table 1.** Physical and mechanical performance index of GRC decorative products [4]

**表 1.** GRC 装饰制品物理力学性能指标[4]

性能	I级	II级
体积密度/(g/cm <sup>3</sup> )	≥2.0	≥1.8
抗压强度(面外)/MPa	≥40.0	
抗弯极限强度/MPa	≥18.0	≥10.0
抗拉强度/MPa	≥7.0	≥5.0
抗冲击强度/MPa	≥12.0	≥8.0
吸水率/%	≤8.0	≤10.0
抗冻性	冻融循环后，无起层、剥落等破坏现象 (冻融循环次数为严寒地区 100 次，寒冷地区 75 次、其他地区 50 次)	

注：抗压强度、抗弯极限强度、抗拉强度和抗冲击强度为制品结构层性能。

**Table 2.** Physical and mechanical properties indexes of GRC external wall panels [5]

**表 2.** GRC 外墙板物理力学性能指标[5]

性能	指标要求	
抗完比例极限强度/Mpa	平均值	≥7.0
	单块最小值	≥6.0
抗弯极限强度/Mpa	平均值	≥18.0
	单块最小值	≥15.0
抗冲击强度/(kJ/m <sup>2</sup> )	≥12.0	
体积密度(干燥状态)/(g/cm <sup>3</sup> )	≥2.0	
吸水率/%	≤8.0	
抗冻性	冻融循环后，无起层、剥落等破坏现象	
收缩率/%	≤0.10	

注 1：抗弯比例极限强度、抗弯极限强度、抗冲击强度为 GRC 结构层性能。注 2：冻融循环次数为严寒地区 100 次，寒冷地区 75 次、其他地区 50 次。

**Table 3.** Physical and mechanical performance indexes of UHPC decorative products [6]

**表 3.** UHPC 装饰制品物理力学性能指标[6]

性能	指标要求		
	浇注工艺 钢纤维	浇注/挤出/压制工艺 有机/无机纤维	喷射工艺 玻璃纤维
抗压强度/MPa ≥	120	120	120
抗弯比例极限强度/MPa ≥	13.0	12.0	11.0
抗弯极限强度/MPa ≥	20.0	12.0	22.0
抗冲击强度/MPa ≥	24.0	9.0	15.0
体积密度(干燥状态)/(g/cm <sup>3</sup> ) ≥	2.4	2.2	2.2
吸水率/% ≤	1.2	1.5	1.5
抗冻性	冻融循环 200 次后，无起层、剥落等破坏现象		
收缩率/% ≤	0.06		

**Table 4.** Physical and mechanical properties indexes of UHPC exterior wall board [7]  
**表 4.** UHPC 外墙板物理力学性能指标[7]

性能	指标要求		
	浇注工艺	浇注/挤出/压制工艺	喷射工艺
	钢纤维	有机/无机纤维	玻璃纤维
抗压强度/MPa ≥	120	120	120
抗弯比例极限强度/MPa ≥	13.0	12.0	11.0
抗弯极限强度/MPa ≥	20.0	12.0	22.0
抗冲击强度/MPa ≥	24.0	9.0	15.0
体积密度(干燥状态)/(g/cm <sup>3</sup> ) ≥	2.4	2.2	2.2
吸水率/% ≤	1.2	1.5	1.5
抗冻性	冻融循环 200 次后, 无起层、剥落等破坏现象		
不透水性	静置 48 h 试件背面无湿痕或水滴形成		
收缩率/% ≤	0.06		

对比上述物理力学性能指标, UHPC 的抗压强度为 120 MPa 以上, GRC 的抗压强度为 40 MPa 以上, UHPC 的抗压强度是 GRC 的 3 倍以上; UHPC 的密度要求为 2.2 g/cm<sup>3</sup>~2.4 g/cm<sup>3</sup>, GRC 的密度为 1.8 g/cm<sup>3</sup>~2.0 g/cm<sup>3</sup>, 相比之下 UHPC 的密实度更高; UHPC 的抗弯强度、抗冲击性也高于 GRC 的抗弯强度; UHPC 的吸水率 ≤ 1.2~1.5, 远低于 GRC 的吸水率 ≤ 8.0~10.0; UHPC 的抗冻性和收缩率性能也高于 GRC 对应的指标。因此从物理力学性能角度来说, UHPC 拥有比 GRC 更广阔的应用范围, UHPC 优秀的力学性能能够使其作为结构件使用, 而 GRC 基本是用作装饰构件。

### 3.2. GRC 和 UHPC 在装饰工程中的应用情况

近十年来, GRC 装饰条、装饰柱、遮阳板有了较广泛的应用; 以 GRC 材料作为装饰面层、以金属型钢作为支撑肋, 并内嵌保温层的复合型装饰墙板也被成功应用; UHPC 板作为幕墙面板应用在一些文化项目、综合体项目, 建筑立面表现效果惊艳。

GRC 和 UHPC 制品独特的工艺特性具有强大的造型能力, 其模具通常进行反向的造型设计, 喷射到模具上固化成型后可以直接获得正向的墙板观看面。由于板材的生产基于模具成型, 因此在制造时可以相对地自由调整墙板形状、大小、表面纹理以及表观颜色等各方面参数, 给设计者留下足够的想象空间, 帮助完成创造性思维的实现。

GRC 和 UHPC 制品的优势不仅仅在于为设计师们的奇思妙想提供可能性, 还因为其原材料可以由废弃尾矿的石粉、石渣以及再生骨料组成。相比传统石材和混凝土的使用, GRC 和 UHPC 材料的使用能够大幅减少自然资源的开采, 有利于保护生态环境。GRC 和 UHPC 材料的主要成分均为无机物, 在使用过程中不易受到氧化、光老化、湿热老化等恶劣自然环境的影响, 不会出现变色、起皮、粉化、脱落等构件质量问题。此外, UHPC 材料也具有优异的保色性能和自洁性能, 其使用寿命完全可以与建筑的整体生命周期相匹配。这一环保、节能且资源再生利用的特性, 完全符合政府和人类对可持续发展的追求。

将 GRC 和 UHPC 与其他幕墙材料进行比较, 可知 GRC 和 UHPC 材料均具有轻质高强、造型能力多变、装饰表现力强、成型难度低以及节能环保等优点, 如表 5 所示。

**Table 5.** Comparison of the physical properties of GRC and UHPC with other curtain wall materials  
**表 5.** GRC 和 UHPC 与其他幕墙材料物理性能的比较

项目	陶板	GRC	石材	UHPC
厚度/mm	15~40	15~20	25~40	25~50
重量/(kg·m <sup>-2</sup> )	30~60	30~70	60~100	35~37
抗压强度/MPa	50~70	60~80	80~150	120~150
吸水率/%	6~10	5~8	3~10	2~3
泊松比	0.13	0.20	0.125	0.19~0.24
板块尺寸	单块小于 1 m <sup>2</sup>	较大尺寸	单块小于 1 m <sup>2</sup>	可根据要求做超大尺寸
表面效果	烧结质感	颜色丰富、造型多变	天然质感	质感丰富、造型多变
环保性能	能耗高、有污染	能耗低、有污染	对环境破坏大、不可再生	能耗低、无污染
安全性能	脆性破坏	强度低、易破碎	脆性破坏	延性破坏
固定方式	干挂或背栓	干挂/背栓/背负钢架	干挂或背栓	干挂/背栓/背负钢架
曲面成型	难度大、费用高	难度适中	难度大、费用高	难度适中

## 4. GRC 和 UHPC 在装饰工程应用中常见问题

### 4.1. GRC 制品

#### 1) GRC 制品耐久性相对较差

GRC 中的玻璃纤维在混凝土中会受到高碱水泥的腐蚀, 受到化学侵蚀、物理侵蚀以及微结构变化导致的侵蚀的影响, 长期使用后的 GRC 抗弯强度、抗拉强度、韧性等均会有所下降。若用于外立面, 老化后的 GRC 面板存在高坠隐患, 可能会威胁到城市安全。为解决 GRC 制品耐久性问题, 学者除采用抗碱玻璃纤维和低碱水泥外还使用粉煤灰、矿渣、硅灰、偏高岭土、聚合物乳液等掺合料对 GRC 制品进行耐久性的改善。

#### 2) GRC 制品耐污染性差

GRC 制品的孔隙率大, 在缺少防护、长期雨水侵袭作用下, 内部的碱容易析出, 出现泛碱情况。泛碱现象是由水泥基材料内部的水分迁移和表面水分蒸发带出的可溶性盐在水泥基材料表面形成白色沉积物造成的, 会严重影响饰面砂浆的装饰效果。经测试分析, 白色沉积物质的主要成分是 CaCO<sub>3</sub>, 另外还有少量的 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 等硫酸盐类物质。

为控制 GRC 材料泛碱的情况, 学者提出了以下方案: ① 抑制 GRC 材料泛碱必须做到尽量使用低碱水泥, 如果加入可以吸收碱的原料, 可以较好地实现抑制泛碱的效果。② 在 GRC 材料制备中添加一定细度的填料例如活性二氧化硅、偏高岭土、石灰石粉等。③ 利用微生物抑制 GRC 材料泛碱, 通过加入某种矿化细菌后, 试件的抗泛碱性能明显幅提升[8]。

#### 3) GRC 制品易裂

贯通 GRC 断面的裂缝产生的主要原因是 GRC 构件与安装节点的设计有问题, 其断裂过程受控于材料中原有的损伤、缺陷和微裂纹, 其破坏过程实质上就是损伤及微裂缝的萌生、扩展、贯通直至失稳断裂的过程。要改善 GRC 裂纹主要通过增强 GRC 制品本身的断裂韧性, 改善成型工艺和施工工艺。学者通过对机喷 GRC 的断裂韧性机理进行研究, 发现机喷成型工艺可以有效提高 GRC 的断裂韧性, 配合施工现场管理, 可以有效杜绝 GRC 裂纹的出现[9]。

## 4.2. UHPC 制品

### 1) UHPC 的价格昂贵

UHPC 的原材料通常包含微细钢纤维或铜纤维，其用量占比最高达 10%，因此其材料成本约为普通混凝土的 10 倍，同时在 UHPC 成型后通常需要采用高温蒸汽养护、热养护、热水-干热组合养护，其养护工艺复杂，能耗较大要求高。因此其成本高昂，限制了其广泛使用。

为了降低成本，目前已有采用例如聚甲醛纤维等高分子材料制备了 POM-UHPC，该类材料具有良好的流动性、力学性能、韧性及耐火特性，是钢纤维或铜纤维 UHPC 制品的可替代选择之一[10]。

### 2) UHPC 的评价体系不完善

国内目前已经有很多关于 UHPC 的标准，但是关于 UHPC 的耐久性能以及纤维结构抗冲击性能等性能方面的评价方法存在缺失，有待完善。UHPC 制品在国内已在不同领域有了初步应用，随着不断的研究，UHPC 材料会建立起更加完善的评价体系。

## 5. 结论

GRC 和 UHPC 具有自重轻、力学性能好、安装简便，可以工厂批量化生产等特点，是装饰工程中的理想材料，因此，GRC 和 UHPC 正越来越多地应用于装饰工程中。结合工程实际案例可知，GRC 具有耐久性差和耐污染性差等特点，后期应重视 GRC 耐久性的研究，寻找合适的添加剂解决玻璃纤维的腐蚀问题，工程应用中应做好表面防护工程，防止泛碱和污染。GRC 和 UHPC 在设计、生产过程中，注意材料选择、生产工艺条件控制，控制好其收缩性，杜绝影响其性能的收缩裂纹产生，确保其产品质量和安全性。同时在设计中，要考虑整体刚度，各连接、挂节点的强度，确保其在承受风荷载、地震位移荷载、温度荷载、自重荷载等短期、长期荷载作用下，不会裂开。

## 基金项目

本文的相关研究得到了上海市科委课题《高层建筑幕墙脱落风险感知与智能诊断管控关键技术研究》与《示范》(课题资质编号: 21DZ1200402)的资助。

## 参考文献

- [1] 张亚芳, 陈江平. 不同掺量玻璃纤维增强水泥细观数值研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2010, 27(1): 103-108.
- [2] 陈永平. 非承重混凝土外挂墙板的发展与应用[J]. 技术与市场, 2012(6): 35-36+38.
- [3] 戴维, 张倩. 曲面 GRC 幕墙工程设计要素探讨——以武汉国家地球空间信息产业化基地(新区)一期工程为例[J]. 城市建筑, 2024, 21(4): 179-182.
- [4] JC/T 940-2004 玻璃纤维增强水泥(GRC)装饰制品[EB/OL]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=gisQO9UvOsbuVIADXtvvNH4QwRn2Ylkqo3-5cROkjo1VbpDTmryCjXATGZNRKB0ugcF-F9ejFYj-cArKfVp\\_TMI0jEA7ZYOObs4bke\\_2\\_A8NgDMv2VNw\\_a9-SSQjXlm-AD\\_InQuGMSxUddwORBQKAPK94JyUknPCdk013zwFpg-OtAsluPB1KqvCftpN5tUI&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=gisQO9UvOsbuVIADXtvvNH4QwRn2Ylkqo3-5cROkjo1VbpDTmryCjXATGZNRKB0ugcF-F9ejFYj-cArKfVp_TMI0jEA7ZYOObs4bke_2_A8NgDMv2VNw_a9-SSQjXlm-AD_InQuGMSxUddwORBQKAPK94JyUknPCdk013zwFpg-OtAsluPB1KqvCftpN5tUI&uniplatform=NZKPT&language=CHS), 2024-07-29.
- [5] JC/T 1057-2007 玻璃纤维增强水泥外墙板[EB/OL]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=gisQO9UvOsYMvPF8Rf4o18fysWRFvYIz9C5wmbmHJvIY3Tnv77z4RC8zvW4vVy-i4sjath04fDZoS\\_QyT78ZeKZNXCGhCbbh-sPnTXxjQQMa\\_zmKgdJnmymDfK8aPGWgqUIDUP-R4U3zoF\\_rg7M2zfeNybUtRI8pZbWyPcriz\\_PbNlnAyqtsDEz0PyzWSsD6&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=gisQO9UvOsYMvPF8Rf4o18fysWRFvYIz9C5wmbmHJvIY3Tnv77z4RC8zvW4vVy-i4sjath04fDZoS_QyT78ZeKZNXCGhCbbh-sPnTXxjQQMa_zmKgdJnmymDfK8aPGWgqUIDUP-R4U3zoF_rg7M2zfeNybUtRI8pZbWyPcriz_PbNlnAyqtsDEz0PyzWSsD6&uniplatform=NZKPT&language=CHS), 2024-07-29.
- [6] T/CBMF 172-2022 超高性能混凝土(UHPC)装饰制品[EB/OL]. <https://www.renzhunla.com/std/t23/tcbmf1722022/>, 2024-07-29.
- [7] T/CBMF 171-2022 超高性能混凝土(UHPC)外墙板[EB/OL]. <https://www.renzhunla.com/std/t23/tcbmf1712022/>, 2024-07-29.

- [8] 周横一, 钱春香, 陈燕强. GRC 制品抗泛碱性能的提升及机理[J]. 材料导报, 2021, 35(Z1): 225-231.
- [9] 郭学明. GRC 构件常见裂缝原因与对策[J]. 混凝土世界, 2019(9): 94-95.
- [10] 耿春雷, 董阳, 左然芳, 等. 超高性能混凝土研究及工程应用现状[J]. 混凝土世界, 2023(12): 74-79.