

# 彩色工程水泥基复合材料(C-ECC)的单轴拉伸与压缩行为试验分析

杨永龙<sup>1</sup>, 付玉娇<sup>2</sup>, 车佳玲<sup>1</sup>, 马熙伦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

<sup>2</sup>宁夏农垦建设有限公司, 宁夏 银川

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年8月25日; 发布日期: 2026年9月8日

## 摘要

本研究通过向ECC中掺入氧化铁系颜料(红、黄、绿、蓝)制备彩色工程水泥基复合材料(Colored Engineered Cementitious Composites, C-ECC)。通过轴心抗压试验与单轴抗拉试验, 系统研究了颜料种类及掺量(0%、2%、4%、6%、8%)对C-ECC力学性能的影响。结果表明: 轴心抗压试验中, 氧化铁红与氧化铁黄的最佳掺量均为6%, 此时抗压强度分别提升18.8%和33.3%, 8%掺量时强度未进一步增长; 氧化铁绿在掺量2%时抗压强度最佳(33.80 MPa, 提升16.8%); 氧化铁蓝因酞菁蓝组分阻碍水泥水化并劣化纤维分散性, 抗压强度显著降低(掺量6%时降幅最高, 达35.4%)。单轴抗拉试验中, 各C-ECC试件均保持多缝开裂与应变硬化特征; 氧化铁红在掺量2%时抗拉强度提升最显著, 从5.24 MPa提升至7.17 MPa, 提高36.8%, 超过4%后强度降低; 氧化铁黄在掺量  $\leq 4\%$  时可维持稳定延性, 更高掺量导致强度劣化; 氧化铁蓝即使在2%低掺量下仍使抗拉强度降低(降幅12.0%); 氧化铁绿在掺量  $\leq 4\%$  时抗拉性能与基准ECC相当。综上, 氧化铁红与氧化铁黄可在6%掺量下兼顾色彩与力学性能, 氧化铁绿建议低掺( $\leq 2\%$ ), 氧化铁蓝需谨慎使用。研究结果可为彩色ECC在建筑装饰领域的工程应用提供配比参考。

## 关键词

彩色ECC, 氧化铁系颜料, 轴心抗压性能, 单轴抗拉性能, 多缝开裂

# Experimental Analysis of Uniaxial Tension and Compression Behavior of Colored Engineered Cementitious Composites (C-ECC)

Yonglong Yang<sup>1</sup>, Yujiao Fu<sup>2</sup>, Jialing Che<sup>1</sup>, Xilun Ma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

<sup>2</sup>Ningxia Agricultural Reclamation Construction Co., Ltd., Yinchuan Ningxia

文章引用: 杨永龙, 付玉娇, 车佳玲, 马熙伦. 彩色工程水泥基复合材料(C-ECC)的单轴拉伸与压缩行为试验分析[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 9-21. DOI: 10.12677/hjce.2026.159219

## Abstract

In this study, colored engineered cementitious composites (C-ECC) were produced by incorporating iron oxide pigments (red, yellow, green, and blue) into ECC. The effects of pigment type and dosage (0%, 2%, 4%, 6%, 8% by weight of binder) on the mechanical properties of C-ECC were systematically investigated through axial compression tests and uniaxial tensile tests. The results show that in the axial compression tests, the optimum dosage for both red and yellow iron oxide pigments is 6%, at which the compressive strength increases by 18.8% and 33.3%, respectively; at 8% dosage, no further strength gain is observed. For green iron oxide, the highest compressive strength (33.80 MPa, a 16.8% increase) is achieved at 2% dosage. Blue iron oxide pigment significantly reduces compressive strength, with the maximum reduction reaching 35.4% at 6% dosage, because the phthalocyanine blue component hinders cement hydration and impairs fiber dispersion. In the uniaxial tensile test, all C-ECC specimens exhibited multiple cracking and strain-hardening behavior. Iron oxide red achieved the most pronounced increase in tensile strength at a content of 2%, rising from 5.24 MPa to 7.17 MPa (a gain of 36.8%); strength declined at contents exceeding 4%. Iron oxide yellow maintained stable ductility at contents  $\leq 4\%$ , while higher contents led to strength deterioration. Iron oxide blue reduced tensile strength even at a low content of 2% (a decrease of 12.0%). Iron oxide green yielded tensile properties comparable to those of the reference ECC at contents  $\leq 4\%$ . Overall, iron oxide red and iron oxide yellow can provide both color and acceptable mechanical performance at a content of 6%; iron oxide green is recommended at low contents ( $\leq 2\%$ ); and iron oxide blue should be used with caution. These findings offer proportioning guidance for the engineering application of colored ECC in architectural decoration.

## Keywords

Colored ECC, Iron Oxide Pigments, Axial Compressive Behavior, Uniaxial Tensile Behavior, Multiple Cracking

Copyright © 2026 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

高延性水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)自美国密歇根大学 Victor Li 提出微观力学设计理论以来,通过彻底去除粗骨料、采用聚乙烯醇纤维(PVA)或聚乙烯纤维(PE)增强,实现了裂缝宽度小于 100 微米的多缝开裂行为,同时获得了超过 3%拉伸应变的应变硬化效应,显著克服了传统混凝土脆性大、延性差的缺陷[1]-[3]。其优异的变形能力与自修复特性,使其在抗震结构、桥隧修复等领域广泛应用[4]。

近年来,随着绿色建筑材料的发展,传统建筑外墙涂料因耐久性差、延展性较低[5]等缺点,在自然环境的侵蚀、外墙变形及人为作用下易出现开裂脱落问题[6]。ECC 具有优异的延展性、耐久性、抗风化及抗紫外线能力[7]-[9],且与基层粘结良好[10],作为外墙装饰层具有潜在优势。已有学者[11]证实采用原状毛乌素沙漠砂完全替代河砂制备的 PVA 纤维增强 ECC (PVA-DSECC),极限拉应变可达 2.451%,能有效抑制因应力、温湿度变化引起的开裂。然而,传统 ECC 色调以黑白灰为主,外观单调、呆板,难以

满足现代建筑对美观与色彩多样性的需求[12]。

为赋予水泥基材料丰富的色彩，许多研究学者在彩色水泥基的研究上不断深入，Mehreen Z. Heerah 等[13]基于对彩色水泥基材料的系统表征，揭示了含杂质绿色颜料( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )会显著劣化砂浆性能(吸水率上升 165%、抗压强度下降 82%)，而高纯度红/蓝色颜料则通过微填充效应提升密实度与强度，并建立了适用于含颜料砂浆的成熟度预测模型，为装饰混凝土的颜料选型与质量控制提供关键依据。杜浩洋等[14]系统分析了氧化铁颜料掺量(1%~10%)对彩色混凝土性能的影响，并验证氧化铁颜料耐水性、抗紫外线老化性优异，适用于透水混凝土工程。Li 等[15]基于氧化铁黄(IOY)、红(IOR)、蓝(IOB)及绿(IOG)颜料的清水混凝土体系，系统揭示了颜料掺量对工作性、力学性能及表观特性的影响规律，并通过浸水、碳化、干湿循环、自然暴露四类服役环境下的色差分析证实 IOY 混凝土在自然环境中色稳性最优。上述研究为彩色水泥基材料的制备提供了重要基础，但其对象主要为普通砂浆、透水混凝土或清水混凝土(均不含纤维)，而纤维增强 ECC 的流动性、纤维分散性及多缝开裂机制对颜料的敏感性远高于普通混凝土。目前针对彩色 ECC (Colored ECC, C-ECC)的系统力学性能研究尚属空白。此外，已有文献[16]-[18]多聚焦于着色体系优化或高韧性基材的独立设计，未将颜料类型与掺量对 ECC 拉伸应变硬化、多缝开裂行为的影响纳入统一分析框架。

为此，本研究以 ECC 为对象，通过引入氧化铁红、氧化铁黄、氧化铁绿、氧化铁蓝四种颜料，变化掺量(0%、2%、4%、6%、8%)，系统探究不同类型及掺量颜料对 C-ECC 轴心抗压强度和单轴抗拉性能的影响规律。旨在保障核心力学性能的前提下赋予材料色彩与装饰特性，从而改善高延性水泥基材料的装饰功能，为拓展其在建筑装饰领域的应用及提升城市建筑美学品质提供材料解决方案。

## 2. 试验概述

### 2.1. 试验原材料

本试验中混凝土采用的水泥为宁夏赛马牌 42.5R 普通硅酸盐水泥(OPC)，宁夏灵武热电厂 I 级粉煤灰，内蒙古自治区阿拉善地区腾格里沙漠砂(粒径分布如图 1 所示)，聚羧酸高性能减水剂，国产 PVA 纤维(具体参数如表 1 所示)，氧化铁系颜料，宁夏地区实验室自来水。

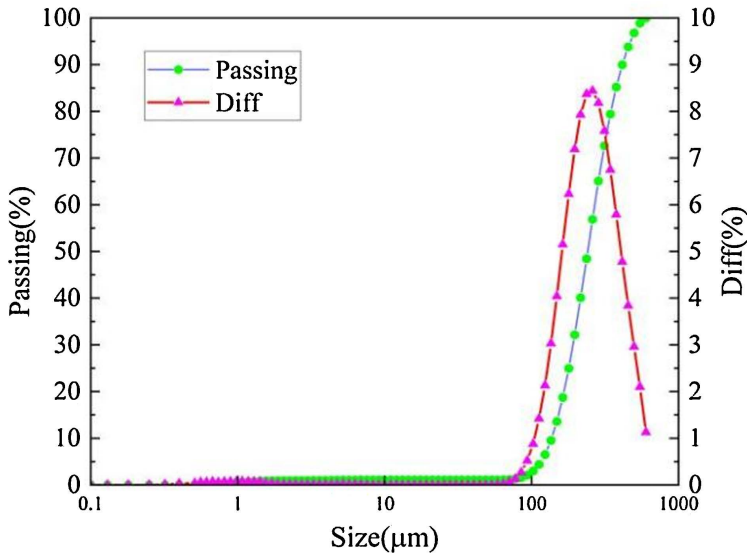


Figure 1. Particle size distribution of desert sand  
图 1. 沙漠砂粒径分布图

**Table 1.** PVA fiber performance indicators  
**表 1.** PVA 纤维性能指标

| 纤维  | 抗拉强度/MPa | 弹性强度/GPa | 直径/ $\mu\text{m}$ | 长度/mm | 密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 熔化温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-----|----------|----------|-------------------|-------|------------------------------|--------------------------|
| PVA | 1610     | 41       | 39                | 12    | 1.29                         | 230                      |

**2.2. 试验配合比**

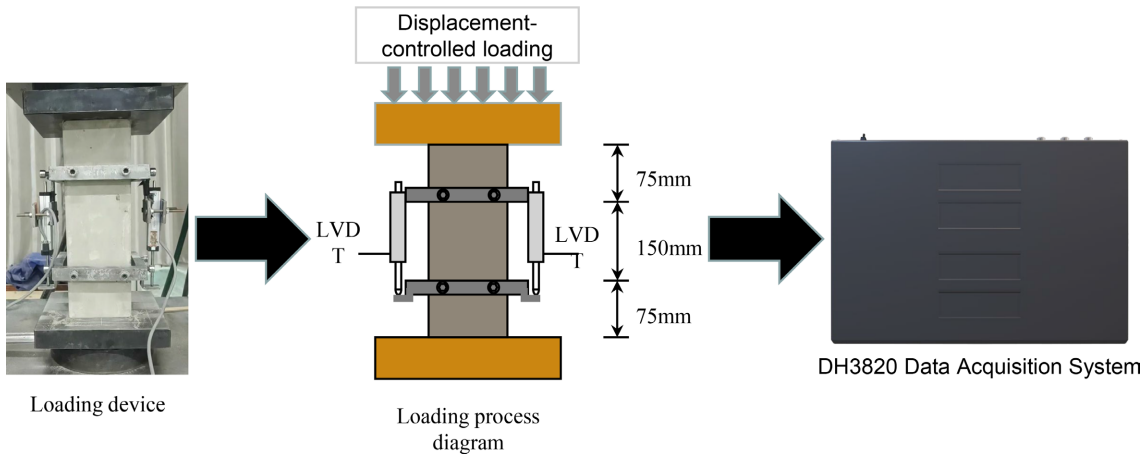
本试验所使用的工程水泥基复合材料配合比见表 2 所示。

**Table 2.** ECC mix ratio  
**表 2.** ECC 配合比

| 水胶比  | 砂胶比  | PVA 纤维体积分数 |
|------|------|------------|
| 0.25 | 0.26 | 2%         |

**2.3. 轴心抗压强度试验**

依据国家标准 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>1</sup>，本试验所用的棱柱体试件尺寸为 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  300 mm (每组 3 个，标准养护 28 d)，用于测定轴心抗压强度。试验使用 SHT4106/100 t 型电子万能试验机进行加载，采用位移控制加载方式，加载速率设定为 0.3 mm/min。试验机配备负载传感器，实时采集压缩荷载数据。试验过程示意图见图 2。



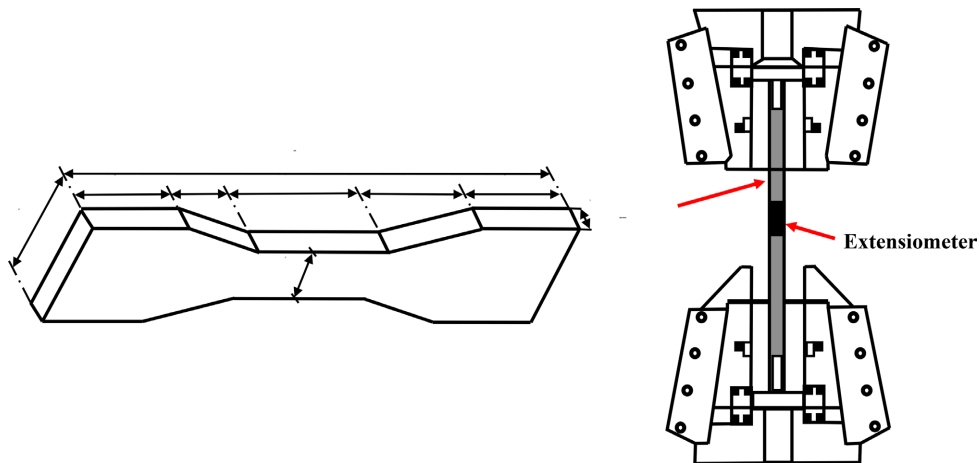
**Figure 2.** Schematic of a uniaxial compression test  
**图 2.** 单轴抗压试验示意图

**2.4. 单轴抗拉强度试验**

单轴拉伸性能测试依据建材行业标准 JC/T 2461-2018《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》<sup>2</sup>进行。采用标准哑铃型试件，尺寸为 330 mm  $\times$  60 mm  $\times$  15 mm (每组 6 个，标准养护 28 d)。哑铃型试件放在 SHT4106/100 t 型电液伺服万能材料试验机上进行拉伸，同样采用位移控制加载方式，加载速率设定为 0.3 mm/min。在试件等截面区安装引伸计测量位移。以 20 Hz 的系统采集频率同步记录荷载与位移信号，经处理后获得应力 - 应变曲线。试件及试验过程示意图见图 3。

<sup>1</sup><https://www.soujianzhu.cn/NormAndRules/NormContent.aspx?id=1572>

<sup>2</sup><https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F257FABB19E05397BE0A0AB44A>



**Figure 3.** Dumbbell-shaped specimen and uniaxial tensile test schematic  
**图 3.** 哑铃型试件与单轴抗拉试验示意图

## 2.5. 试验设计与材料制备

试验设置两个控制变量：颜料种类、颜料掺量。试验选取氧化铁红、氧化铁黄、氧化铁绿、氧化铁蓝四种颜料，加入方法为整体掺入法，颜料掺量为 0%、2%、4%、6%、8% 五种。将水泥、粉煤灰、氧化铁系原料和沙漠砂加入搅拌机中干拌 2 min，然后加入实验室自来水，自来水加入量大约为 80%，拌合 1 min。随后将剩下的水和碱水剂加入搅拌机中搅拌 3 min，在搅拌的过程中加入 PVA 纤维，然后进行浇筑，使用振动台振动成型。拆模后龄期为 24 h，试件在室温条件下养护至测试龄期，龄期为 28 d。试件放置在温度  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为  $95\% \pm 2\%$  的环境下养护至测试龄期。

## 3. 试验结果及原因分析

### 3.1. 轴心抗压试验

#### 3.1.1. 试验现象分析

图 4 中，正常高延性水泥基复合材料棱柱体试件破坏是基本符合多裂缝开展机制的，该混凝土试件随着荷载的增加，试件的两边会出现多条细裂缝，然后出现一条主裂缝，最终伴随一声崩裂响声，试件出现一条巨大的斜裂缝，但试件并没有整体碎裂，这是由于 PVA 纤维与水泥基体界面的设计为可控滑移模式(脱粘后仍保持摩擦桥接)，使每条裂缝在扩展中被纤维约束在微米级宽度，抑制裂缝贯通形成碎片[19]。

彩色高延性水泥基复合材料棱柱体试件(彩色 ECC)与正常高延性水泥基复合材料(ECC)棱柱体试件破坏现象具有高度的一致性。彩色 ECC 试件与正常 ECC 试件在轴心受压试验中，加载初期试件表面无明显变化，随荷载增加至峰值荷载的 70%~80% 时，两端均出现多条细小裂缝(宽度  $< 0.05\text{ mm}$ )，破坏时均具有突然性，伴随明显破坏声，试件本身出现贯穿整体的巨大直裂缝或斜裂缝。但不同颜料改性的彩色 ECC 试件破坏形态存在细微差异：红色 ECC 试件主裂缝呈左向右  $45^{\circ}$  斜向延伸，贯穿试件全截面，其周围伴随 3~5 条次级微裂缝(间距约 20~30 mm)，形成“主裂缝 - 次要裂缝”网络状分布；黄色 ECC 试件主裂缝为右向左  $20^{\circ}$  斜向发展，截面中部无明显次要裂缝，但右上角区域出现 2~3 条分叉微裂缝(长度  $< 10\text{ mm}$ )，呈局部集中分布；蓝色 ECC 试件则是出现一条由右往左  $30^{\circ}$  的主裂缝，该主裂缝整体相对平滑，并没有出现较为明显的次要裂缝，破坏形态表现为单一主裂缝快速扩展；绿色 ECC 试件主裂缝左向右  $45^{\circ}$  斜向延伸，贯穿过程中衍生 4~6 条次要裂缝，呈交叉分布，形成“主裂缝 - 次要裂缝”破坏特征。

由于试件中 PVA 纤维的桥联作用，试件破坏后较为完整，展现出裂而不碎的特点，如图 4 所示。



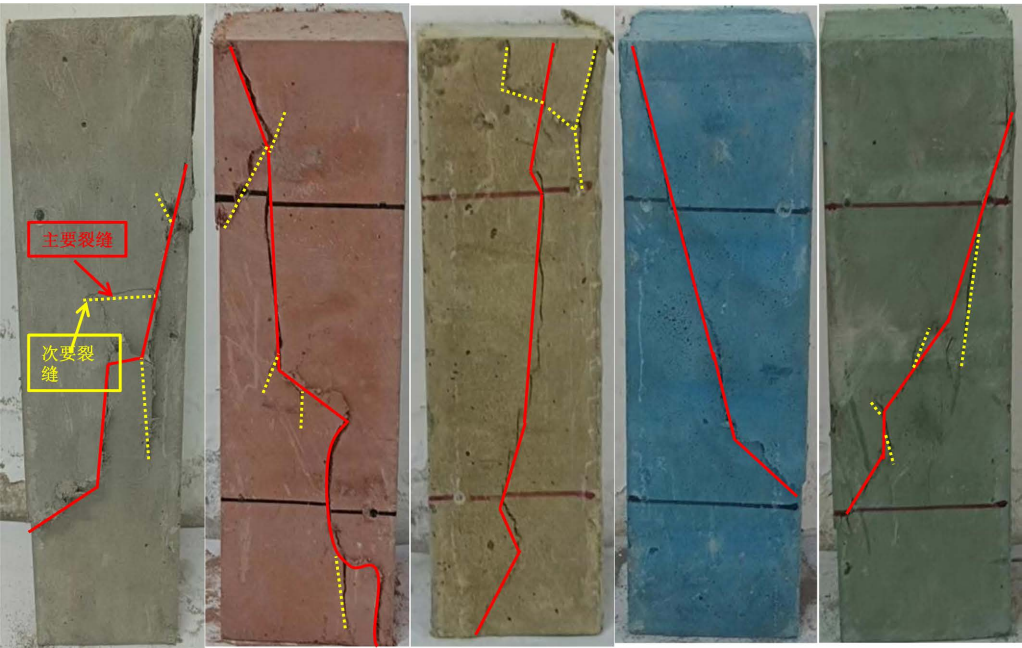


Figure 4. Comparison of axial compression failure patterns of normal and colored ECC prismatic specimens  
图 4. 正常与彩色 ECC 棱柱体试件轴心受压破坏形态对比

3.1.2. 数据及原因分析

试验测得彩色 ECC 单轴抗压强度与不同颜料相应梯度掺量的关系图，如图 5 所示。

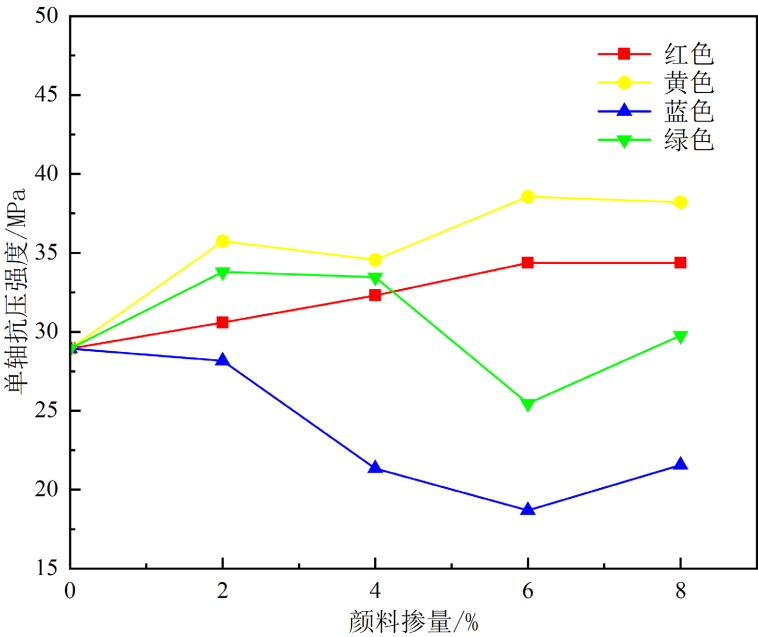


Figure 5. Relationship between the compressive strength of colored ECC at the core and the gradient dosage of different pigments  
图 5. 彩色 ECC 轴心抗压强度与不同颜料相应梯度掺量关系图

氧化铁系颜料属于无机颜料，本身不具活性。由图 5 可知，添加了氧化铁红、氧化铁黄、氧化铁绿的彩色 ECC 棱柱体的抗压强度整体都高于正常 ECC 棱柱体；添加了氧化铁蓝的彩色 ECC 棱柱体抗压强

度均低于正常 ECC 棱柱体,这是由于氧化铁蓝中含有酞菁蓝[20],酞菁蓝为铜络合卟啉大分子,有很强的疏水性和表面活性,会包裹硅酸盐水泥并阻碍其水化反应,因此导致了氧化铁蓝色 ECC 的抗压强度低于正常 ECC [21]。随着氧化铁红与氧化铁黄颜料掺量的增加,抗压强度也逐渐提高,当氧化铁红的颜料掺量为 2%、4%、6%、8%时,其氧化铁红色 ECC 的轴心抗压强度分别提高了 5.7%、11.6%、18.8%、18.8%;当氧化铁黄的颜料掺量为 2%、4%、6%、8%时,其氧化铁黄色 ECC 的轴心抗压强度分别提高了 23.5%、19.5%、33.3%、32.1%;其强度提升一方面是因为氧化铁红与氧化铁黄颜料的粒径相较水泥更小,能吸附大量自由水,导致水胶比减小;另一方面由于颜料的加入会起一定的填充效应,减小混凝土本身的孔隙率,提高混凝土本身的密实度。而随着颜料掺量到 8%,强度不再有明显提升,颜料对 ECC 中 PVA 纤维中分散性开始造成影响,削弱纤维自身的桥接增韧作用。说明彩色 ECC 的氧化铁红与氧化铁黄颜料最佳掺量为 6%左右。对于添加了氧化铁绿颜料的彩色 ECC 而言,当其颜料掺量为 2%、4%、6%、8%时,其氧化铁绿色 ECC 的轴心抗压强度分别提高了 16.8%、15.7%、-11.2%、2.9%,说明彩色 ECC 的氧化铁绿色颜料最佳掺量为 2%左右,此时的强度最高;对于氧化铁绿颜料,由于本身细度虽比水泥高,但低于氧化铁蓝。所以颜料掺量较低时,对轴心抗压强度仍起积极作用;随着掺量的增加,填充效应的积极作用和降低纤维分散性的消极作用相互抵消。但如果工程中要考虑更多的显色效果时,此时也可取 8%的绿色颜料掺量,彩色 ECC 颜色最深。

对于氧化铁蓝颜料,其掺入后抗压强度下降,当氧化铁蓝的颜料掺量为 2%、4%、6%、8%时,其氧化铁蓝色 ECC 的轴心抗压强度分别降低 2.7%、26.2%、35.4%、25.5%;一方面是因为氧化铁蓝本身的粒径较大,会包裹水泥颗粒,阻碍了水泥的水化作用;另一方面由于其粗颗粒较多,无法很好填充混凝土孔隙的同时,阻碍 PVA 纤维均匀分散。

### 3.2. 单轴抗拉试验

#### 3.2.1. 试验现象分析

彩色 ECC 仍保持 ECC 本身的良好延性和多裂缝开展特性。随着试件夹持端荷载的施加,可观察到纤维拔出或断裂的连续声音,测段中间出现较多细小裂缝;当施加荷载达到峰值应力时,试件本身出现一条或数条较大裂缝贯穿截面,可以观察到裂缝中纤维将试件相互连接,如图 6 所示。当夹持端荷载卸下,单轴抗拉试件上细小裂缝消失。

由图 6 可知,所有试件均展现出多缝开裂特征,这是 ECC 材料基于微观力学设计的典型表现。受拉过程中,应力通过纤维桥接作用在基体中分散传递,抑制单一主裂缝贯通发展,促使多条细微裂缝萌生与稳定扩展,符合 ECC “伪应变硬化”及“多缝开裂”的理论模型,体现了材料优异的裂缝分散能力与抗拉韧性。

红色试件裂缝呈现局部集中特征,部分区域裂缝密度显著高于其他彩色组。由于氧化铁红密度( $4.8 \text{ g/cm}^3$ )显著高于水泥基体(约  $3.1 \text{ g/cm}^3$ ),且其颗粒呈球形纳米级( $0.2 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ),推测红色颜料氧化铁红引入后,高密度导致搅拌过程中易沉降,而纳米尺度颗粒因范德华力易团聚,形成局部富集区,诱发微裂缝优先在这些区域产生并扩展。

黄色试件裂缝弯折度相对更高,裂缝路径呈现非平直化发展。初步分析是由于氧化铁黄呈针状/棒状结构,当裂缝扩展至针状颗粒时,颗粒长轴与主应力方向夹角可能会引发局部应力旋转,迫使裂缝转向,或是多颗粒叠加形成“迷宫效应”,从而显著延长裂缝路径。

蓝色试件裂缝数量偏少,但单缝宽度略大于其他组。推测是由于氧化铁蓝在碱性水泥环境中化学稳定性高,几乎不参与水化反应,且氧化铁蓝颜料属于惰性颜料,吸附的自由水较少,从而导致了基体水化更均匀,局部薄弱区减少,浆体水分分布更均匀,裂缝萌生点少。

绿色试件裂缝分布与开裂过程协调性较好,裂缝数量相对较多。这可能是由于氧化铁绿由微米级



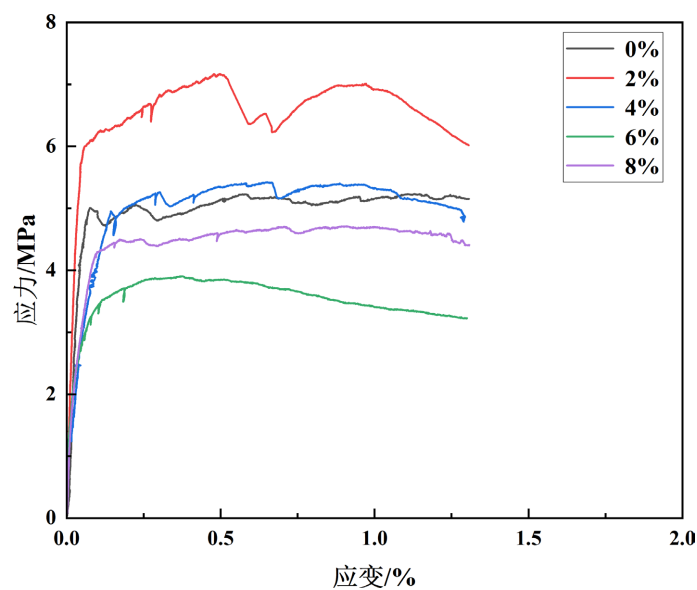
**Figure 6.** Cracks in normal ECC dumbbell specimens and colored ECC specimen sections

**图 6.** 正常 ECC 哑铃型试件和彩色 ECC 试件测段裂缝

氧化铁黄(针状)与纳米级酞菁绿(片状)复合而成, 而且针状  $\text{FeOOH}$  会引发裂缝偏转, 片状的酞菁绿能填充孔隙, 细化基体微结构, 从而导致裂缝在多尺度缺陷间反复分叉, 形成高密度、细而均匀的网状裂缝。

### 3.2.2. 数据及原因分析

据本试验测得数据所作应力 - 应变曲线如图 7~10 所示。



**Figure 7.** Red iron oxide

**图 7.** 氧化铁红



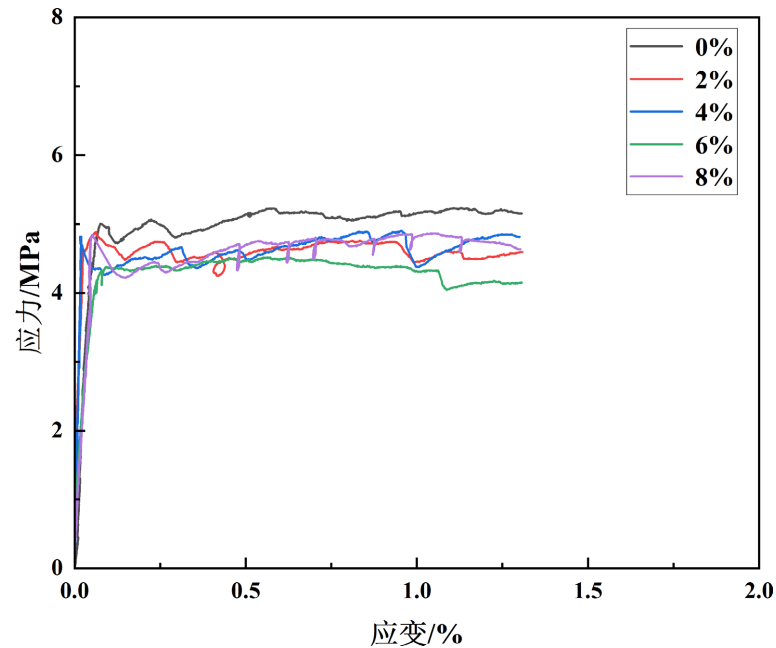


Figure 8. Yellow iron oxide  
图 8. 氧化铁黄

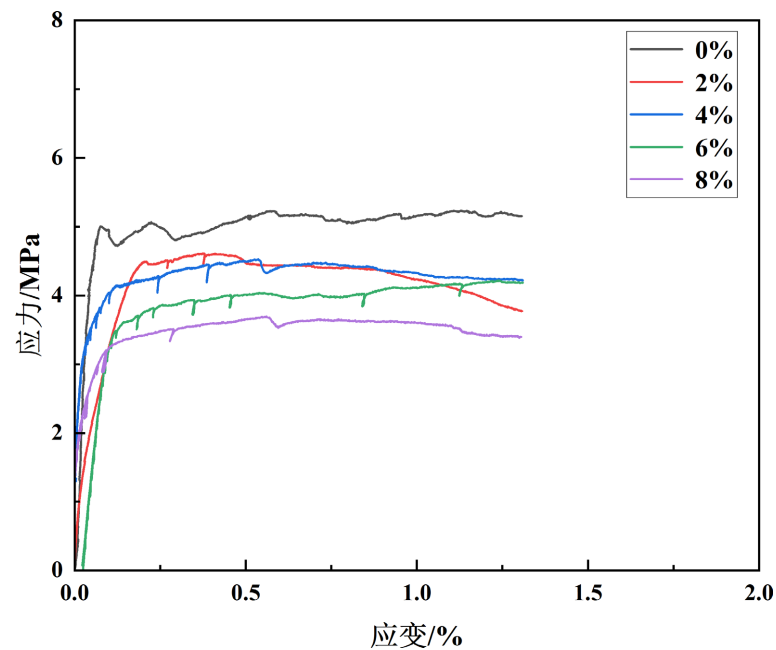


Figure 9. Ferric ferrocyanide  
图 9. 氧化铁蓝

由应力 - 应变曲线分析得到高延性混凝土的单轴抗拉强度与不同颜料相应梯度掺量的关系图, 如图 11 所示。

在彩色 ECC 与正常 ECC 应力 - 应变曲线的上升初始阶段均近似线性上升, 说明材料在受拉初期表现出弹性变形特征。应力与应变成正比, 符合胡克定律。

由图 7 可知, 对于掺量为 2%氧化铁红的彩色 ECC 而言, 曲线峰值应力高于对照组, 且应变硬化段

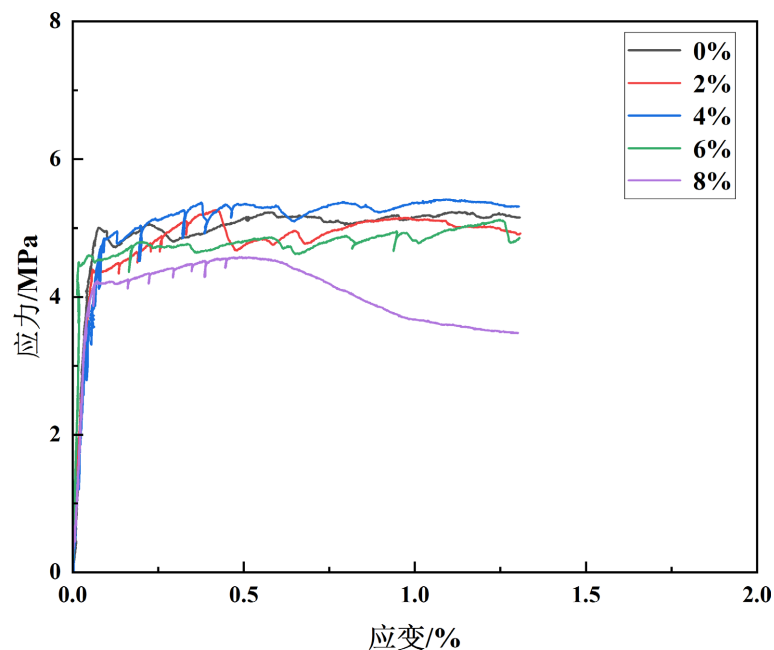


Figure 10. Ferrous oxide green

图 10. 氧化铁绿

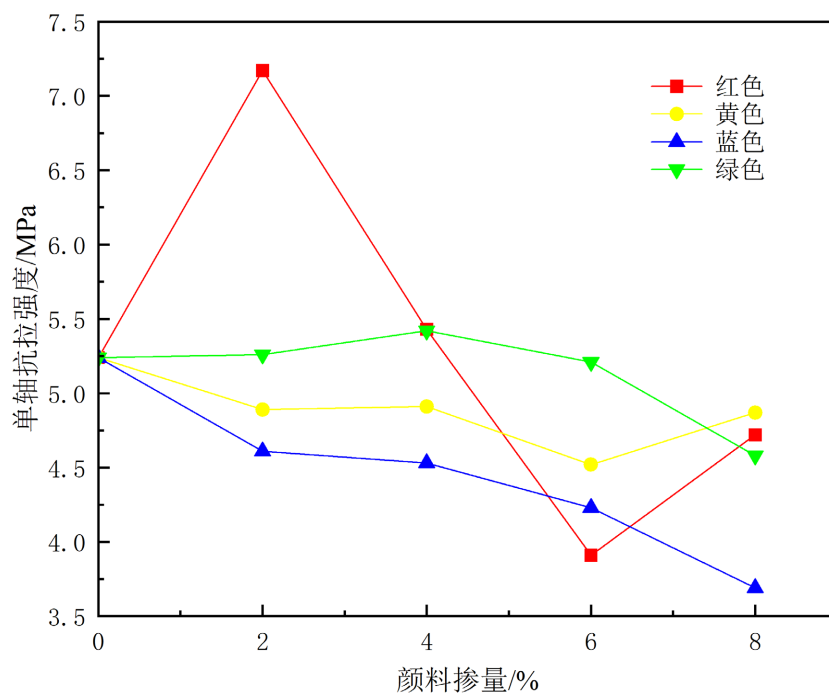


Figure 11. Relationship between the uniaxial tensile strength of colored ECC and the corresponding gradient content of different pigments

图 11. 彩色 ECC 单轴抗拉强度与不同颜料相应梯度掺量关系图

更平缓,说明 2%氧化铁红掺量在一定程度上增强了材料的应变硬化能力。可能是颜料颗粒改善了纤维与基体的界面粘结,延缓了纤维拔出,使材料能承受更大应变;4%掺量的峰值应力与 2%掺量接近,但应变硬化段长度增加,表明 4%掺量进一步优化了多缝开裂过程,材料在更大应变下仍能保持较高应力。6%

掺量时, 峰值应力略有下降但应变硬化段持续较长, 这与颜料增加导致基体缺陷增多、初始开裂应力降低有关, 而纤维桥接作用仍维持一定承载能力; 8%掺量时, 峰值应力显著下降且应变硬化段缩短, 过高掺量破坏基体均匀性, 引发微裂缝过早萌生, 加速纤维桥接失效, 导致材料抗拉性能退化。且从图 11 可知, 与对照组的正常 ECC 试件相比, 只有掺量为 2%和 4%的红色 ECC 试件抗拉强度是提高的(分别提高 36.8%和 3.6%), 掺量为 6%和 8%的红色 ECC 试件抗拉强度则是下降的, 因此氧化铁红 2%掺量时抗拉强度提高最为明显。

由于氧化铁黄颜料粒径较氧化铁红颜料更小, 对同等掺量下对水胶比的减小影响更为明显, 当掺入 ECC 时抗拉强度表现为降低。由图 8 和图 11 可知, 在氧化铁黄掺量为 2%和 4%时, 其应力 - 应变曲线与对照组(未掺加颜料)呈现融合交织特征, 表明材料仍能有效实现多缝开裂, 纤维 - 基体协同工作机制未受显著破坏, 应变硬化过程相对稳定, 材料具备一定的应变承载能力。然而, 当掺量提升至 6%和 8%时, 曲线整体应力水平降低且波动频率增加。此现象可归因于较高颜料掺量可能对基体均匀性产生不利影响, 或改变纤维 - 基体界面粘结特性, 致使裂缝萌生与扩展的协同性下降, 应力传递效率降低, 材料的应变硬化能力因而受到削弱。

氧化铁蓝颜料因其粒径较大, 颜料颗粒中存在较多粗颗粒, 在混凝土搅拌时易与加入的 PVA 纤维纠缠在一起成团块, 严重影响纤维均匀分散, 随着颜料掺量的增加混凝土延性降低, 抗拉强度降低。由图 9 可知, 2%掺量的蓝色 ECC 试件的峰值应力与对照组接近, 应变硬化阶段曲线与对照组贴合度高。表明 2%氧化铁蓝颜料掺入后, 未明显破坏材料内部结构, 纤维仍能有效桥接裂缝, 多缝开裂协同性良好。但图 11 中显示, 当掺入不同质量分数氧化铁蓝颜料的 ECC 构件受拉力后, 抗拉强度就立马下降, 随着掺量增加, 分别下降 12.0%, 13.5%, 19.3%, 29.6%。上述分析可知, 氧化铁蓝掺量为 2%时, 其抗拉强度相对来说能满足普通工程对抗拉强度的需求。

氧化铁绿颜料粒径比水泥大, 但远低于氧化铁蓝颜料, 因而对水胶比影响不大, 掺量低时对纤维分散性也影响不大, 但随着掺量的增加也会让抗拉强度降低。图 10 显示, 所有曲线初始段呈近似线性上升, 不同掺量组弹性阶段斜率(弹性模量)差异极小, 说明氧化铁绿颜料掺入未显著改变 ECC 初始弹性刚度。在应变硬化与多缝开裂阶段, 氧化铁绿掺量显著影响 ECC 性能。2%掺量与对照高度一致, 都呈现典型的应变硬化特征, 应力随应变缓慢波动上升, 表明颜料掺入未破坏基体协同作用。4%掺量下应变硬化表现略有增强, 峰值应力微升, 推测源于颜料适度优化基体密实度或界面粘结。6%和 8%掺量下峰值应力显著降低, 应变硬化阶段应力快速衰减, 多缝开裂机制失效, 材料转变为损伤累积主导, 归因于颜料团聚引发的局部应力集中及界面薄弱。结合图 11 中绿色组的单轴抗拉强度数据, 低掺量组(0%、2%、4%)维持良好延性, 而高掺量组(6%、8%)因裂缝集中扩展导致承载能力急剧退化, 延性显著。

#### 4. 结论

将氧化铁系颜料掺入 ECC 中制备彩色 ECC, 通过轴心抗压与单轴抗拉两大基本力学性能试验研究不同颜料种类和颜料掺量对 ECC 的基本力学性能影响, 结论如下:

(1) 四种 C-ECC 在单轴受压破坏形态上与基准 ECC 一致, 均呈现多缝开展、主裂缝贯通后试件保持整体完整(未发生崩裂性破坏)的特征。颜料类型与掺量对轴心抗压强度的影响规律如下: 氧化铁红与氧化铁黄通过填充密实与降低有效水胶比机制提升强度, 最佳掺量均为 6%, 此时抗压强度分别提升 18.8%与 33.3%, 8%掺量时强度未进一步增长; 氧化铁绿在低掺量(2%)时强度提升 16.8%, 高掺量(6%)时出现下降; 氧化铁蓝因酞菁蓝组分阻碍水泥水化并劣化纤维分散性, 在掺量 6%时强度降幅最大(达 35.4%)。因此, 红、黄颜料宜控制掺量于 6%左右, 绿颜料宜低掺( $\leq 2\%$ ), 蓝颜料需谨慎使用。

(2) C-ECC 在单轴受拉下继承 ECC 的多缝开裂与应变硬化特性, 但颜料类型与掺量显著调控抗拉性

能：氧化铁红在掺量 2%时抗拉强度提升最显著(提高 36.8%)，超过 4%后强度降低；氧化铁黄在掺量  $\leq 4\%$ 时可维持稳定延性，高掺量( $\geq 6\%$ )导致强度劣化；氧化铁蓝即使在 2%低掺量下仍使抗拉强度降低(降幅 12.0%)，主要归因于颜料粗颗粒与 PVA 纤维纠缠成团，劣化纤维分散性；氧化铁绿在掺量  $\leq 4\%$ 时抗拉性能与基准 ECC 相当，掺量  $\geq 6\%$ 后因颜料团聚效应导致强度骤降。

(3) 由于颜料掺量对彩色 ECC 抗压强度与抗拉性能的影响呈非同步演化特征，两者之间存在明显的性能此消彼长关系，因而在实际工程应用中难以确立单一的通用最佳掺量，需依据结构服役条件与核心受力侧重点实施差异化的配比设计。具体而言，若工程侧重于抗压强度并满足结构承重需求(如装饰混凝土路面或桥面铺装层)，宜选用氧化铁红或氧化铁黄，并将其掺量控制在 6%左右以充分发挥抗压优势；若工程侧重于抗裂控制及变形容限(如薄层修补、墙体挂板或外立面装饰构件)，则须在兼顾基本强度的前提下优先保障抗拉韧性，此时氧化铁红掺量宜控制在 2%~4%，氧化铁黄及氧化铁绿掺量不宜超过 4%。对于氧化铁蓝，鉴于其对基体受压及受拉性能均产生显著劣化，仅在对色彩具有特殊设计需求时方可考虑使用，且掺量需严格限定在 2%以内。

(4) 研究局限性与展望：需要说明的是，本研究现阶段主要侧重于彩色 ECC 的基本力学性能。实际工程应用背景下，高流动度状态下颜料对新拌拌合物性能的影响，以及其在自然气候、干湿循环、碳化及紫外老化等多元耦合环境作用下的长期颜色稳定性与力学耐久性，都是制约其规模化推广应用的关键因素。上述性能指标及作用机制在后续研究中具有非常广阔的研究前景，后期予以颜色耐久性进行系统研究将为彩色 ECC 在建筑装饰领域的综合性能评价提供更加全面的理论依据。

## 基金项目

项目等级：校企合作横向技术开发课题项目；项目名称：耐养殖固废腐蚀混凝土研发及新施工工艺研究(第一阶段)；项目编号：2023640101000379。

## 参考文献

- [1] 徐冉, 董泽坤, 王耀, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)加固砌体平面外力学性能研究[J/OL]. 工程力学: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250421.1422.012>, 2026-08-28.
- [2] 孙星亮, 郎军星, 段远钊, 等. 可喷射沙漠砂混杂纤维 ECC 力学性能及本构模型研究[J/OL]. 工程力学: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250117.2257.044>, 2025-06-23.
- [3] 邓宗才, 刘东岳. 混杂纤维增强水泥基复合材料抗冲击性能[J/OL]. 北京工业大学学报: 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.2286.T.20260629.1648.016>, 2025-06-18.
- [4] 项斌峰, 蔡素燕, 邱洪华, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料拉伸性能试验方法综述[J]. 中国建材科技, 2025, 34(S1): 300-304.
- [5] 郑兵, 庄梓豪, 王莹. 温湿度、酸雨环境因素对外墙饰面材料耐久性的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(3): 56-58, 62.
- [6] Zhao, J., Li, S. and Wang, H. (2025) Development and Seismic Damage Assessment of Alkali-Activated Non-Formwork Insulation Composite Shear Wall. *Engineering Structures*, 335, Article ID: 120310. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120310>
- [7] 白亮, 周枫, 谢鹏飞, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 108-113.
- [8] 寇佳亮, 高如月, 孙浩康, 等. 高延性混凝土抗紫外线老化性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1336-1341.
- [9] 邓明科, 景武斌, 秦萌, 等. 高延性纤维混凝土抗压强度试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(23): 79-84.
- [10] 王振波, 刘小慧, 张悦宁, 等. 粉煤灰及混杂纤维对 ECC 流变与力学行为的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(2): 85-91.
- [11] 车佳玲, 郭紫薇, 张艺馨, 等. 沙漠砂制备工程水泥基复合材料单轴拉伸性能分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1597-1603.
- [12] Yıldız, S.A. (2023) Mechanical, Durability and Solar Reflectance Properties of Colored Self-Compacting Concrete.

- Challenge Journal of Concrete Research Letters*, **14**, 89-95. <https://doi.org/10.20528/cjcr.2023.03.003>
- [13] Heerah, M.Z., Galobardes, I. and Dawson, G. (2021) Characterisation and Control of Cementitious Mixes with Colour Pigment Admixtures. *Case Studies in Construction Materials*, **15**, e00571. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00571>
- [14] 杜浩洋, 杨杰, 刘海风, 等. 氧化铁掺量对彩色混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2023(7): 57-61.
- [15] Li, Z., Mao, J., Tao, H., He, Z., Xie, Y. and Li, J. (2024) Performance Evaluation of Pigmented Fair-Faced Concrete under Various Environments: Mechanical Properties, Apparent Properties, and Color Stability. *Case Studies in Construction Materials*, **21**, e03978. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03978>
- [16] Jang, H., Kang, H. and So, S. (2014) Color Expression Characteristics and Physical Properties of Colored Mortar Using Ground Granulated Blast Furnace Slag and White Portland Cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**, 1125-1132. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0452-z>
- [17] Miranda, J., Valença, J. and Júlio, E. (2019) Colored Concrete Restoration Method: For Chromatic Design and Application of Restoration Mortars on Smooth Surfaces of Colored Concrete. *Structural Concrete*, **20**, 1391-1401. <https://doi.org/10.1002/suco.201900006>
- [18] Oh, Y. and OhYon Yim, (2014) Influence of Inorganic Pigments on Physical Properties and Chromaticity of Color Concretes. *Journal of Korea Society of Color Studies*, **28**, 133-142. <https://doi.org/10.17289/jkscs.28.3.201408.133>
- [19] 苗海强, 高启程, 王任. PVA-ECC 材料的力学与收缩性能研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(8): 23-27.
- [20] C. Staniford, M., Lezhnina, M.M. and Kynast, U.H. (2015) Phthalocyanine Blue in Aqueous Solutions. *RSC Advances*, **5**, 3974-3977. <https://doi.org/10.1039/c4ra11139g>
- [21] López, A., Tobes, J.M., Giaccio, G. and Zerbino, R. (2009) Advantages of Mortar-Based Design for Coloured Self-Compacting Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 754-761. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.005>