

# 钢渣 UHPC 受拉力学性能及破坏机理试验研究

郭敏<sup>1,2</sup>, 韩林轩<sup>1\*</sup>, 李京军<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区土木工程安全与耐久性重点实验室(内蒙古科技大学), 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**以低碳环保为目标,探索将固废钢渣应用到超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)中,制备绿色环保钢渣 UHPC。通过轴向拉伸试验,研究钢渣微粉替换水泥、钢渣骨料替换石英砂及同时替换时不同掺量,对 UHPC 轴拉全曲线、力学指标等的影响规律,并分析钢渣 UHPC 受拉破坏机理。试验结果表明,替换钢渣微粉或钢渣骨料后,UHPC 轴向抗拉强度下降,但仍能保持 UHPC 基本水平。钢渣掺量对材料延性影响明显,单独掺钢渣微粉,试件延性增强;单独掺钢渣骨料,试件延性降低。混合掺量较小时,材料延性较好,呈多裂缝破坏形态。通过分析钢渣 UHPC 各受拉应力、应变特征值,给出钢渣掺量建议值。

**关键词:**超高性能混凝土;钢渣微粉;钢渣骨料;拉伸性能

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

**引用格式:**郭敏,韩林轩,李京军. 钢渣 UHPC 受拉力学性能及破坏机理试验研究[J]. 山东大学学报(工学版),2026,56(1):105-113.

GUO Min, HAN Linxuan, LI Jingjun. Experimental investigation of tensile mechanical properties and failure mechanisms of steel slag ultra-high performance concrete[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):105-113.

## Experimental investigation of tensile mechanical properties and failure mechanisms of steel slag ultra-high performance concrete

GUO Min<sup>1,2</sup>, HAN Linxuan<sup>1\*</sup>, LI Jingjun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability (Inner Mongolia University of Science and Technology), Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** With the goal of low-carbon environmental protection, the application of solid waste steel slag in ultra-high performance concrete (UHPC) was explored to develop green and environmentally friendly steel slag UHPC. The research examined the effect of varying contents of steel slag powder and steel slag aggregate on the tensile properties of steel slag UHPC through axial tensile tests. Specifically, it analyzes the effects of replacing cement with steel slag powder and quartz sand with steel slag aggregate at different contents on the axial tensile curve and mechanical indices of UHPC. The tensile failure mechanisms of steel slag UHPC were also explored. The results indicated that while the axial tensile strength of UHPC decreased with the inclusion of either steel slag powder or steel slag aggregate, it remained within acceptable limits. The material's ductility is impacted by the type and amount of steel slag used; specifically, adding steel slag powder alone enhanced ductility, whereas adding steel slag aggregate alone reduced it. When the combined content of steel slag powder and aggregate was relatively low, the material exhibited good ductility and a multi-crack failure mode. Based on the analysis of the tensile stress and strain characteristics, an optimal steel slag content for steel slag UHPC was recommended.

**Keywords:** ultra-high performance concrete; steel slag powder; steel slag aggregate; tensile properties

## 0 引言

超高性能混凝土 (ultra-high performance

concrete, UHPC) 是一种具有超高抗压强度、高韧性、高耐久性的新型纤维水泥基复合材料<sup>[1-5]</sup>。其抗拉性能对承载、抗裂与耐久能力影响重大<sup>[6-8]</sup>。

UHPC 制备时剔除了粗骨料,每生产 1 m<sup>3</sup>

收稿日期:2024-11-01

基金项目:内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2024QNJS111)

第一作者简介:郭敏(1983—),女,内蒙古包头人,讲师,硕士生导师,博士,主要研究方向为超高性能混凝土。E-mail:2021975@imust.edu.cn

\* 通信作者简介:韩林轩(1998—),男,河北廊坊人,硕士研究生,主要研究方向为超高性能混凝土。E-mail:1229266505@qq.com

UHPC 所需水泥用量是普通混凝土的 3~4 倍。水泥生产和使用会释放大量  $\text{CO}_2$ , 消耗大量资源与能源。细骨料是 UHPC 重要组成材料, 其颗粒形态显著影响基体组织填充密实度和需水量, 目前石英砂使用效果最佳。但大量使用这种精细优质细骨料, 是 UHPC 成本高的因素之一, 且石英砂提取、研磨和精炼过程会产生  $\text{CO}_2$  排放、粉尘污染等环境问题。为响应国家“双碳”政策, 在保证 UHPC 性能前提下, 降低水泥、石英砂等高能耗组分用量, 发展环保型 UHPC, 不仅是 UHPC 自身发展应用所需, 也是混凝土行业实现可持续发展的重要途径<sup>[9]</sup>。

我国是钢铁生产大国, 钢渣作为主要废渣, 排放量约为粗钢产量的 15%~20%, 利用率仅 40% 左右<sup>[10-11]</sup>。钢渣直接排放既浪费资源, 又会污染环境<sup>[12]</sup>。钢渣中富含活性玻璃质化学成分, 且钢渣与硅酸盐水泥熟料成分相近<sup>[13]</sup>, 有利于提高内部凝胶体强度, 因此, 将钢渣应用到 UHPC 中制备钢渣 UHPC 具有可行性。

本研究采用钢渣微粉替代水泥、钢渣骨料替代

石英砂制备环保型钢渣 UHPC, 并通过轴向拉伸试验研究钢渣掺入对 UHPC 拉伸性能的影响规律。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料及配合比

制备钢渣 UHPC 用的原材料主要包括水泥、硅灰、粉煤灰、石英砂、钢渣、减水剂、钢纤维和水。依据颗粒最紧密堆积理论和正交实验, 经多次适配调整得钢渣 UHPC 配合比, 如表 1 所示。其中, 水泥采用蒙西 P.O52.5 普通硅酸盐水泥; 硅灰比表面积  $22\ 100\ \text{m}^2/\text{kg}$ , 密度  $2\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 需水比 110%,  $\text{SiO}_2$  含量 90.68%; 粉煤灰比表面积  $860\ \text{m}^2/\text{kg}$ , 密度  $2\ 350\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 需水比 85%,  $\text{SiO}_2$  含量 49.65%。石英砂分粗、中细三种, 粒径范围分别为 16~30 目、30~50 目和 50~100 目。钢渣为钢渣骨料和钢渣微粉两种, 钢渣骨料分粗、中、细三种, 粒径范围同石英砂, 钢渣微粉粒径为 325 目。减水剂用聚羧酸系高性能减水剂母液, 钢纤维用长 13 mm、直径 0.3 mm 的端钩形镀铜钢纤维。

表 1 UHPC 基础配合比  
Table 1 UHPC base mix ratio

单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$

水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂			水	外加剂	钢纤维
			粗	中	细			
811	109	170	460	340	280	174	22	156

### 1.2 需水量比测试

钢渣掺量变化可能影响钢渣 UHPC 工作性能。对钢渣微粉和钢渣骨料进行需水量比测试发现: 基准组需水量比为 100%, 加入 20% 钢渣微粉时需水量比为 96%, 加入 30% 钢渣微粉时需水量比为 108%。这表明, 水胶比一定时, 掺 20% 钢渣微粉, 因需水量比小, 能提高整体流动度, 并且由于钢渣粉在微观上呈现球状, 在一定程度上起到了滚珠效应, 从而提升工作性能; 掺量超过 30%, 颗粒间黏聚力随之增加, 使得需水量提升, 工作性能会有所降低。钢渣骨料的需水量比为 100%, 与标准组需水量比一样, 说明加入钢渣骨料不影响工作性能。加入钢渣微粉时, 可通过控制减水剂用量来保证工作性能。

### 1.3 安定性测试

钢渣中游离  $\text{CaO}$  含量较高, 为避免钢渣掺量过大引发体积安定性问题, 本研究根据规范<sup>[14-15]</sup> 对普通硅酸盐水泥试件 A、掺 40% 钢渣微粉的硅酸盐水泥试件 B、掺 80% 钢渣骨料的硅酸盐水泥试件 C、掺 100% 钢渣骨料的硅酸盐水泥试件 D 进行沸煮、压蒸釜后计算膨胀率, 如图 1 所示, 以此研究钢渣对材料安定性影响。

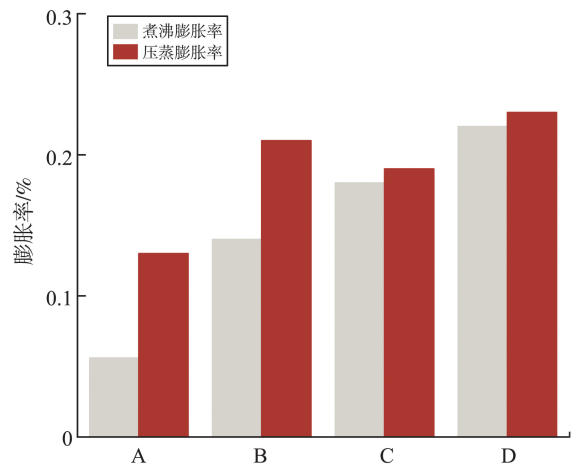


图 1 钢渣对胶凝材料膨胀率的影响

Fig.1 The effect of steel slag on the expansion rate of cementitious materials

由图 1 可知, 掺入钢渣后四组试件发生了膨胀, 但压蒸后膨胀率均小于 0.5%, 符合规范要求。因此, 钢渣掺量过大时, 试件不会因体积安定性而引发不良影响。

### 1.4 试件设计

轴向拉伸实验可直观反映钢渣 UHPC 拉伸性

能,便于分析其内部破坏机理<sup>[16-18]</sup>,试件采用瑞士规范中的狗骨头形状<sup>[19]</sup>,尺寸如图 2 所示。

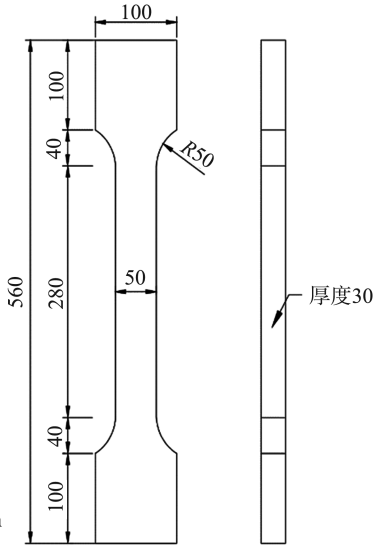


图 2 狗骨型试件尺寸图

Fig.2 Dimensional drawing of dog bone type specimen

距内安装 2 个高精度线性位移计测轴向变形,在侧立面粘贴 8 mm 应变片,如图 3 所示。本研究试验分三类:钢渣微粉单独替代水泥、钢渣骨料单独替代石英砂,钢渣微粉和钢渣骨料对水泥和石英砂进行混合替换三类进行,如表 2 所示,其中钢渣微粉、钢渣骨料和基准组分别用 F、G 和 JZ 表示,JZ 每组试验做 4 个试件以保证准确性。



图 3 拉伸试验机

Fig.3 Tensile testing machine

为更精确测量试件变形,在试件两个正立面标

表 2 钢渣 UHPC 试件设计

Table 2 Design of steel slag UHPC specimens

试件编号	钢渣微粉 替换率/%	钢渣骨料 替换率/%	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	钢渣微粉/ (kg·m <sup>-3</sup> )	钢渣骨料/目			石英砂/目		
					粗	中	细	粗	中	细
JZ	0		811.0	0						
F10	10		729.9	81.1						
F20	20	0	648.8	162.2	0			460	340	280
F30	30		567.7	243.3						
F40	40		486.6	324.4						
G20		20			92	68	56	368	272	224
G40		40			184	136	112	276	204	168
G60	0	60	811.0	0	276	204	168	184	136	112
G80		80			368	272	224	92	68	56
G100		100			460	340	280	0	0	0
F10G20		20			92	68	56	368	272	224
F10G40		40			184	136	112	276	204	168
F10G60	10	60	729.9	81.1	276	204	168	184	136	112
F10G80		80			368	272	224	92	68	56
F10G100		100			460	340	280	0	0	0
F20G20		20			92	68	56	368	272	224
F20G40		40			184	136	112	276	204	168
F20G60	20	60	648.8	162.2	276	204	168	184	136	112
F20G80		80			368	272	224	92	68	56
F20G100		100			460	340	280	0	0	0
F30G20		20			92	68	56	368	272	224
F30G40		40			184	136	112	276	204	168
F30G60	30	60	567.7	243.3	276	204	168	184	136	112
F30G80		80			368	272	224	92	68	56
F30G100		100			460	340	280	0	0	0
F40G20		20			92	68	56	368	272	224
F40G40		40			184	136	112	276	204	168
F40G60	40	60	486.6	324.4	276	204	168	184	136	112
F40G80		80			368	272	224	92	68	56
F40G100		100			460	340	280	0	0	0

## 2 破坏过程及机理分析

单掺钢渣微粉的试件呈多缝开裂特征,如图4所示。从微观上看,如图5所示,钢渣的加入会在内部发生水化反应。钢渣微粉掺量小于20%时,如图5(a)、(b)所示。钢渣UHPC表面相对密实,大量的C-S-H凝胶覆盖基体。当钢渣微粉掺量达到30%时,如图5(c)所示。钢渣UHPC表面会出现孔隙缺陷。当钢渣微粉掺量达到40%后,如图5(d)所示。表面会出现大量未水化钢渣颗粒,水化产物不足,导致孔隙的增加。所以在拉伸过程中由于钢渣微粉掺量20%时钢渣UHPC有较好的多裂缝发展,而钢渣微粉掺量达到40%时应力应变均很低。



图4 单掺钢渣微粉试件开裂特征图  
Fig.4 Cracking characteristics of single steel slag powder specimen

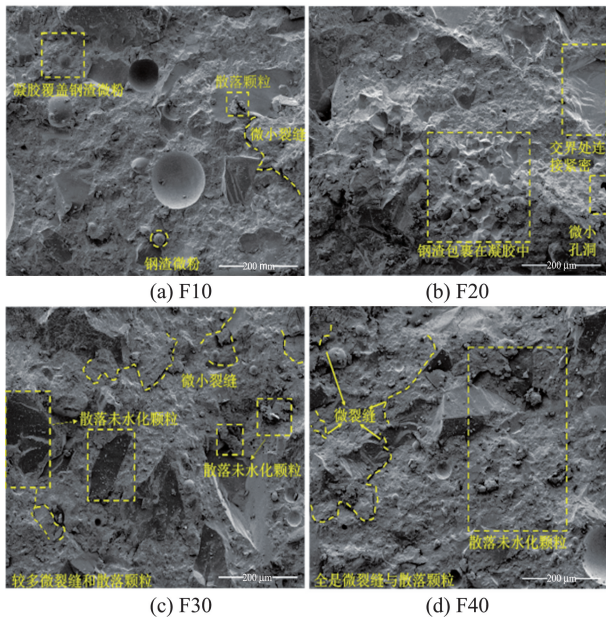


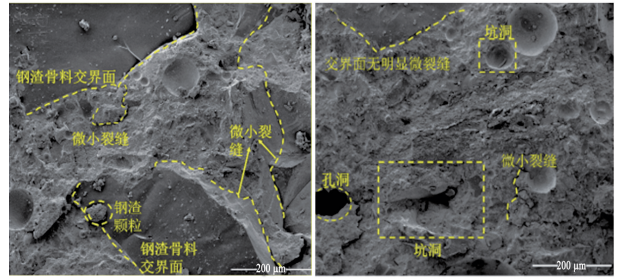
图5 各组钢渣微粉的微观形貌

Fig.5 Microscopic of each group of steel slag powder

单掺钢渣骨料的试件呈单缝开裂特征,如图6所示。从微观上看,如图7所示,单独掺入钢渣骨料时:如图7(a)所示,在钢渣骨料与凝胶过渡区存在着明显的微裂缝。如图7(b)所示,可以看到钢渣骨料的加入影响了整体的致密性,内部零散着钢渣颗粒和孔洞。



图6 单掺钢渣骨料试件开裂特征图  
Fig.6 Cracking characteristics of single steel slag aggregate specimen



(a) G40 (b) G60

图7 各组钢渣粉集料的微观形貌图  
Fig.7 Microscopic of each group of steel slag powder aggregate

混掺钢渣微粉和钢渣骨料时,当钢渣微粉掺入量小于20%时,骨料掺量小于60%时试件会发生多缝延性破坏并且其中一条裂缝发展成为主裂缝,如图8(a)所示。但当钢渣微粉掺入量大于30%时,骨料掺量大于60%时试件只出现了一条裂缝并发展成了主裂缝,如图8(b)所示。



(a) F10G80 (b) F40G80

图8 混掺试件开裂特征图  
Fig.8 Cracking characteristics of mixed specimens

综上所述:基准组试件破坏特征与单独替换钢渣微粉时试件破坏特征相同,均呈现多裂缝开

裂的特征,裂缝处的应力通过钢纤维的传递会在一定范围内产生新的微裂缝,最后形成贯通裂缝。单独替换钢渣骨料试件时破坏特征与基准组试件破坏特征相反,呈现出单裂缝开裂特征,由于内部孔洞、微裂缝的存在会提前形成贯通裂缝。而同时替换钢渣微粉和钢渣骨料时,钢渣微粉掺量小于20%且钢渣骨料掺量小于60%的试件会呈现多裂缝开裂的特征,反之会呈现单裂缝开裂的特征。这表明加入少量钢渣的钢渣 UHPC 是可以应用在建筑等行业的。

### 3 轴向拉伸性能

#### 3.1 拉伸损伤破坏分析

每组试件得到的应力-应变曲线之间存在一定的差异,取各组曲线应力的平均值,绘制平均应力-应变曲线,如图9、10所示。

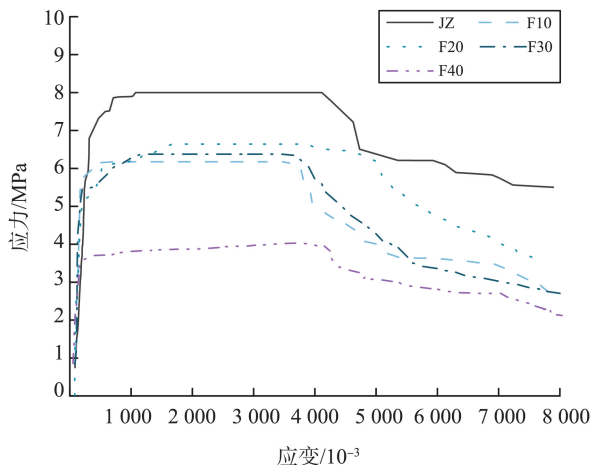


图9 钢渣微粉组的应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of steel slag powder groups

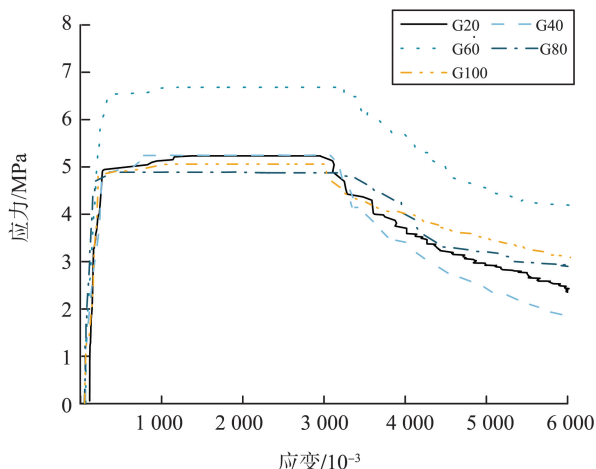


图10 钢渣骨料组的应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of steel slag aggregate groups

结合试验结果与图9、10的应力应变曲线,钢渣

UHPC 拉伸损伤破坏过程可分四个阶段:

(1)线弹性阶段:初始应力较小,应力随应变线性增长,曲线近似直线,基体未开裂。当基体内部薄弱处首次出现离散微观裂缝,曲线偏离线性,刚度首次下降,此阶段结束。

(2)内部微裂缝开展阶段:钢纤维限制钢渣 UHPC 基体中离散微观裂缝发展,因其高强度和高刚度,钢渣 UHPC 开裂强度增加,曲线呈刚度逐渐减小的非线性。离散微观裂缝发展贯通形成微细连续裂缝,钢纤维开始发挥桥联增韧作用,曲线发生明显转折。

(3)裂缝发展阶段:微细连续裂缝间应力通过钢纤维桥联传递。若产生新微细裂缝所需能量小于现有微细裂缝贯通所需能量,初始微细裂缝宽度不会持续增加,而是在基体其他位置形成新微细裂缝;当新微细裂缝形成所需应力高于初始微裂缝时,裂缝发展成主裂缝,应力随应变缓慢增长,直至某裂缝处钢纤维黏结作用达极限,钢渣 UHPC 达到峰值拉应力,此阶段表现出明显的应变硬化。由图9~11可知,加入钢渣微粉、钢渣骨料时曲线与基准组相同,仍有明显应变硬化特征。根据应力-应变曲线,掺入钢渣时各组曲线弹性阶段占比大于基准组,说明钢渣加入延缓了试件开裂。从破坏现象和微观看,钢渣微粉掺量较小时内部相对密实,且拉伸过程中与钢纤维粘结性良好。而钢渣骨料加入后,未见延缓开裂的证明。

(4)持续损伤阶段:此阶段为峰值点后的快速下降段,应力随应变增加而明显下降。此时,试件微细裂缝数量不再增加,裂缝处钢纤维因不再满足应力传递条件而发生黏结滑移,不能有效约束裂缝宽度增长,拉应力下降,直至裂缝处钢纤维完全脱黏,钢渣 UHPC 主裂缝贯通形成断裂面,断裂面处钢纤维发生不同程度拔出,产生持续、稳定的界面摩擦损伤;当基体内钢纤维基本被拔出后,断裂面应力逐渐降至零,试件最终在该处断裂破坏。

#### 3.2 钢渣 UHPC 本构方程

##### 3.2.1 模型的建立

本构模型是钢渣 UHPC 轴向拉伸性能最基础的体现。目前,学者对 UHPC 受拉应力-应变关系模型提出多种表达方式,但对钢渣 UHPC 的研究较少。经对比多种计算模型并结合工程应用,本研究采用文献[20]提出的三段式应力-应变模型,如图11、式(1)所示。

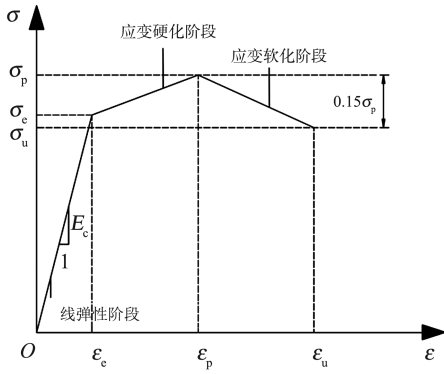


图 11 应力-应变曲线  
Fig.11 Stress-strain curve

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ \sigma_e + (\varepsilon - \varepsilon_c) \frac{\sigma_p - \sigma_e}{\varepsilon_p - \varepsilon_c}, & \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma_p \left( 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right), & \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_e$  和  $\varepsilon_e$  分别为开裂应力和应变,  $\sigma_p$  和  $\varepsilon_p$  分别为峰值应力和应变,  $\varepsilon_u$  为极限应变。

基于钢渣微粉替代水泥配制的钢渣 UHPC 轴向拉伸试验所得应力-应变曲线, 得到本构模型:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{\sigma_{cr}}{\varepsilon_{cr}} \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cr} \\ \sigma_{cr} + \beta_f (\varepsilon - \varepsilon_{cr}) \frac{\sigma_p - \sigma_{cr}}{\varepsilon_p - \varepsilon_{cr}}, & \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma_p \left( 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right) + \frac{\nu_f}{10R + 1}, & \nu_f \leq 1 \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \\ \sigma_p \left( 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right) - \frac{\nu_f}{10R + 1}, & \nu_f > 1 \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{cr}$  和  $\varepsilon_{cr}$  分别为开裂应力和应变,  $\sigma_p$  和  $\varepsilon_p$  分别为峰值应力和应变,  $\varepsilon_u$  为极限应变,  $\beta_f$  为硬化阶段修正参数,  $\nu_f$  为软化阶段修正系数,  $R$  为替换率。

根据钢渣骨料替代水泥配置而成的钢渣 UHPC 开展轴向拉伸试验所得应力-应变关系曲线, 得到本构模型:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{\sigma_{cr}}{\varepsilon_{cr}} \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cr} \\ \sigma_{cr} + \beta_g (\varepsilon - \varepsilon_{cr}) \frac{\sigma_p - \sigma_{cr}}{\varepsilon_p - \varepsilon_{cr}}, & \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma_p \left( 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right) + \frac{\nu_g}{10R}, & \nu_g \leq 1 \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \\ \sigma_p \left( 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right) - \frac{\nu_g}{10R}, & \nu_g > 1 \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{cr}$  和  $\varepsilon_{cr}$  分别为开裂应力和应变,  $\sigma_p$  和  $\varepsilon_p$  分别为峰值应力和应变,  $\varepsilon_u$  为极限应变,  $\beta_g$  为硬化阶段修正参数,  $\nu_g$  为软化阶段修正系数,  $R$  为替换率。

### 3.2.2 模型的参数确定

#### 1. 弹性阶段模型的确立

在弹性阶段, 钢渣的掺入对 UHPC 的本构模型没有明显的影响, 如式(4)。

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_e \quad (4)$$

#### 2. 硬化阶段模型的确立

##### (1) 钢渣微粉替代水泥配置钢渣 UHPC

考虑钢渣微粉替代水泥不同替代率的影响, 引入修正参数  $\beta_f$ , 建立  $\beta_f$  与钢渣微粉替换率  $F$  关系, 如图 12(a) 所示:

$$\beta_f = a - bF + cF^2, \quad (5)$$

式中,  $\beta_f$  为修正参数,  $F$  为钢渣微粉的替换率,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为根据试验数据拟合的常数, 本处中  $a = 0.96123$ ,  $b = 0.0064$ ,  $c = 1.971 \times 10^{-4}$ ,  $R^2 = 0.86$ 。

##### (2) 钢渣替代骨料配置钢渣 UHPC

考虑钢渣替代骨料不同替代率的影响, 引入修正参数  $\beta_g$ , 建立  $\beta_g$  与钢渣骨料替换率  $G$  关系, 如图 12(b) 所示:

$$\beta_g = c + \frac{2aw}{\pi(4(G-b)^2 + w^2)}, \quad (6)$$

式中,  $\beta_g$  为修正参数,  $G$  为钢渣骨料的替换率,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $w$  为根据试验数据拟合的常数, 本处中  $a = -1.6489$ ,  $b = 58.4552$ ,  $c = 0.9925$ ,  $w = 33.151$ ,  $R^2 = 0.89$ 。

#### 3. 软化阶段模型的确立

##### (1) 钢渣粉替代水泥配置钢渣 UHPC

考虑钢渣粉替代水泥不同替代率的影响, 引入修正参数  $\nu_f$ , 建立  $\nu_f$  与钢渣微粉替换率  $F$  关系(7), 如图 13(a) 所示:

$$\nu_f = a - bF + cF^2 - dF^3, \quad (7)$$

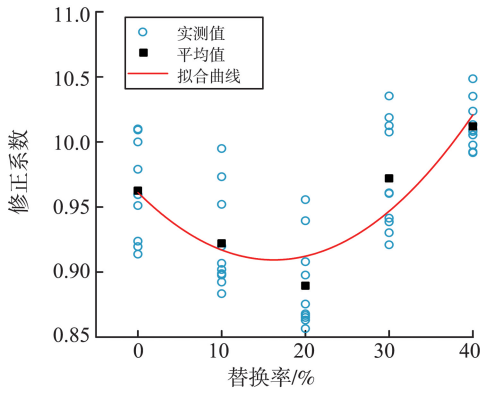
式中,  $\nu_f$  为修正参数,  $F$  为钢渣微粉的替换率,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为根据试验数据拟合的常数。本处中  $a = 0.8978$ ,  $b = 0.00807$ ,  $c = 8.593 \times 10^{-4}$ ,  $d = 1.55 \times 10^{-5}$ ,  $R^2 = 0.97$ 。

##### (2) 钢渣替代骨料配置钢渣 UHPC

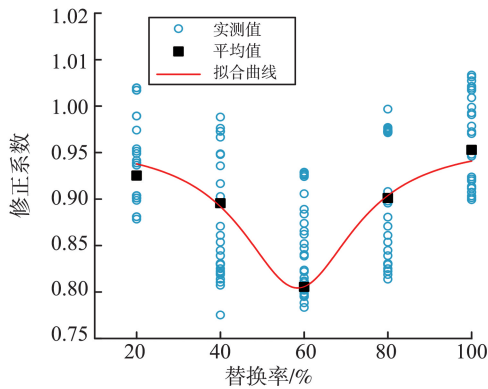
考虑钢渣替代骨料不同替代率的影响, 引入修正参数  $\nu_g$ , 建立  $\nu_g$  与钢渣替换率  $G$  关系(8), 如图 13(b) 所示:

$$\nu_g = c + a \sin\left(\frac{\pi(G-b)}{w}\right), \quad (8)$$

式中,  $\nu_g$  为修正参数,  $G$  为钢渣骨料的替换率,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $w$  为根据试验数据拟合的常数, 本处中  $a = 1.026$ ,  $b = -39.904$ ,  $c = 1.026$ ,  $w = 30.961$ ,  $R^2 = 0.96$ 。



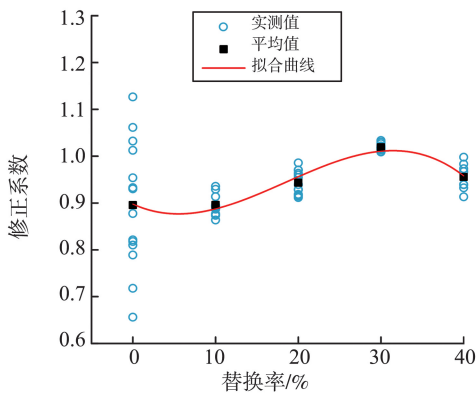
(a) 上升段微粉与修正系数关系



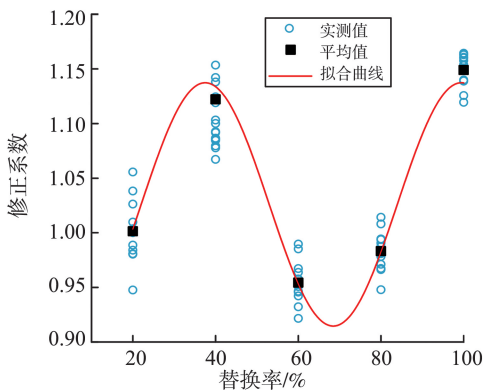
(b) 下降段微粉与修正系数关系

图 12 钢渣替换率与修正参数的关系

Fig.12 Relationship between steel slag replacement rate and modified parameters



(a) 上升段骨料与修正系数关系



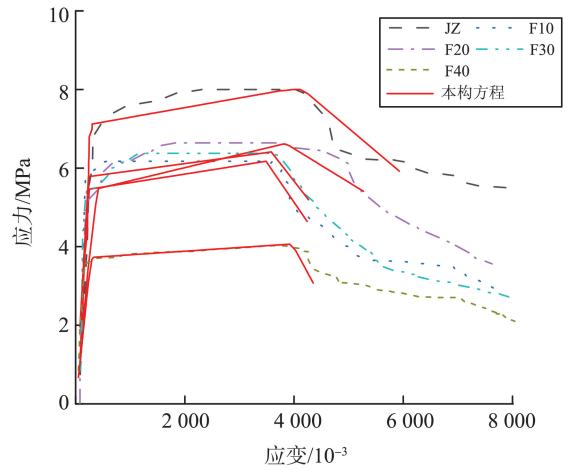
(b) 上升段骨料与修正系数关系

图 13 钢渣骨料替换率与修正参数的关系

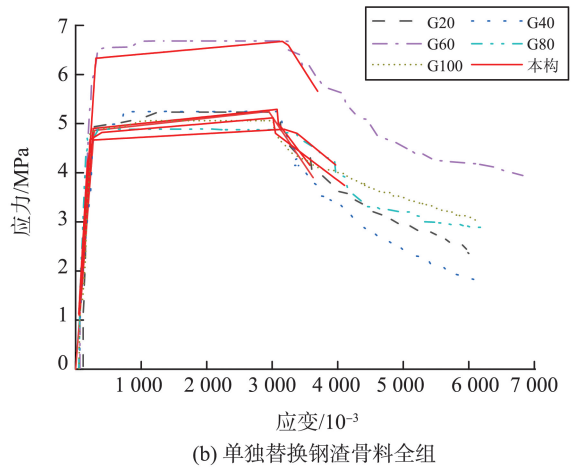
Fig.13 Relationship between steel slag aggregate replacement rate and modified parameters

### 3.2.3 模型验证

将修正后的本构对实测应力-应变曲线进行对比如图 14(a)和(b)所示。



(a) 单独替换钢渣微粉全组



(b) 单独替换钢渣骨料全组

图 14 本构的验证

Fig.14 Verification of constitutive model

## 4 曲线特征参数对钢渣 UHPC 的影响

通过分析曲线各阶段特征值,研究钢渣对钢渣 UHPC 轴向拉伸性能的影响,以确定钢渣最佳掺量,为工程应用提供参考。

用钢渣微粉替代水泥时,各组试件特征值如图 15 所示。加入钢渣微粉后,试件应力有所下降,但当钢渣微粉替换率为 20%时,试件应变明显高于其他组。因此,建议钢渣微粉替换水泥的最优替换率约为 20%。

用钢渣骨料替代石英砂时,各组试件特征值如图 16 所示。加入钢渣骨料后,试件应力应变特征值均降低,但当钢渣掺入 60%时,应力和应变均明显高于其他组,且与基准组相比降低不大。因此,建议钢渣骨料的最优替换率约为 60%。

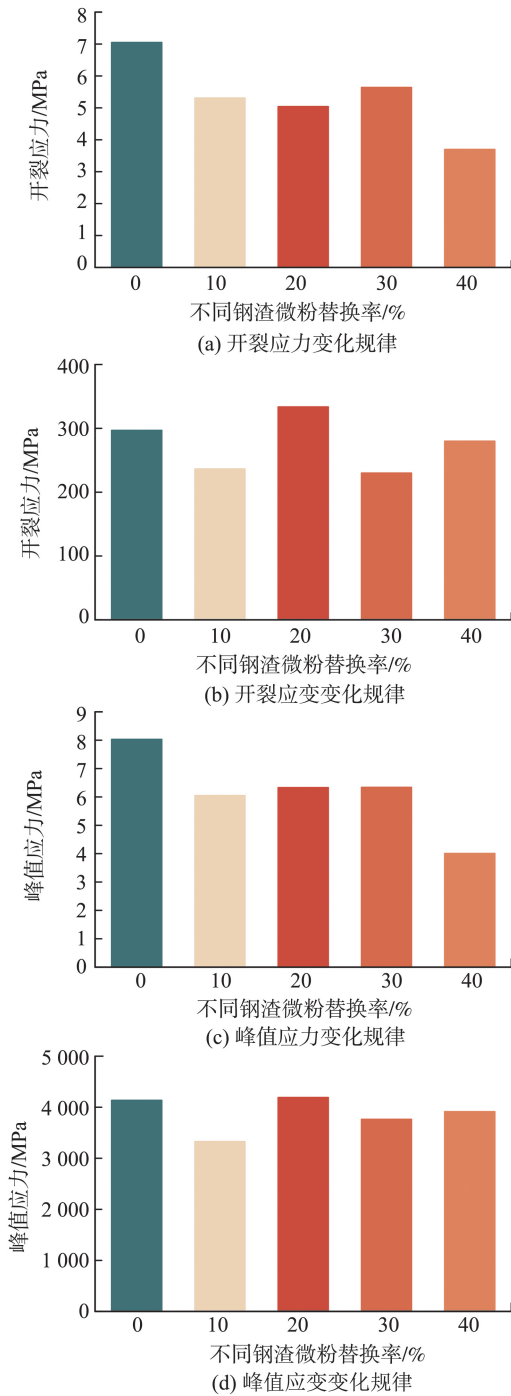


图 15 掺入钢渣微粉各特征参数的变化规律  
Fig.15 The change rule of characteristic parameters of steel slag powder

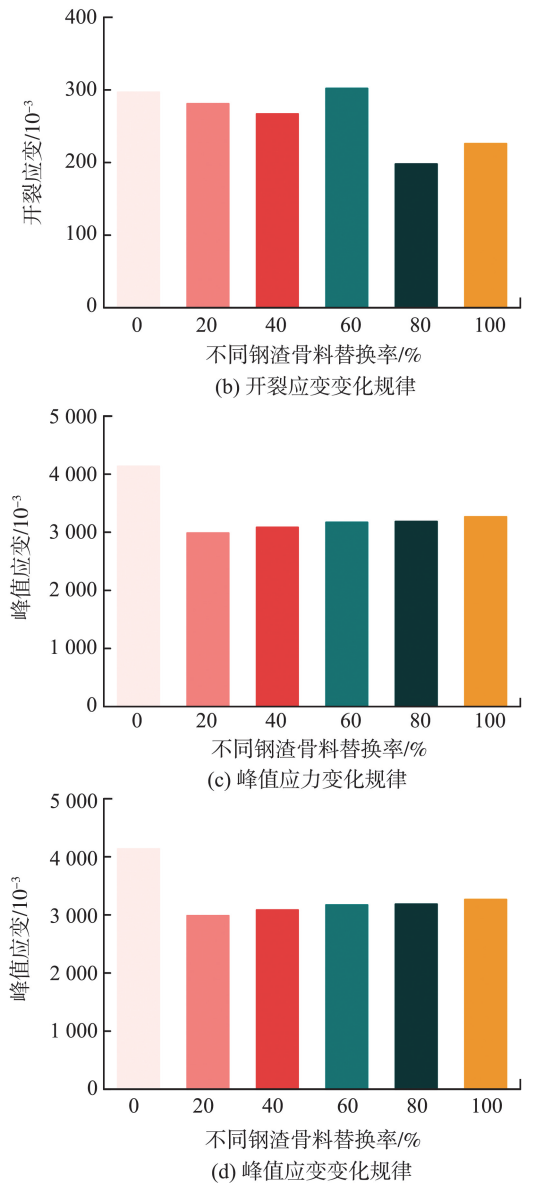
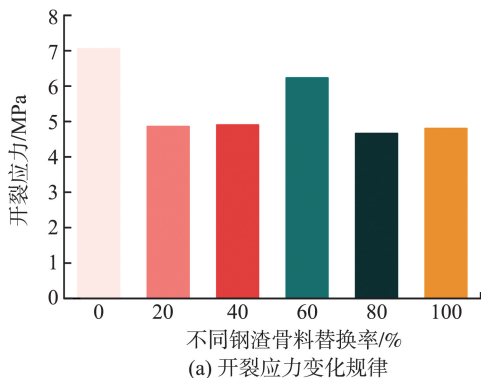


图 16 掺入钢渣骨料各特征参数的变化规律  
Fig.16 The change rule of characteristic parameters of steel slag aggregate

综合考虑,F20 和 G60 组为轴向拉伸最优替换组。对 F20、G60 组进行轴向拉伸试验发现,与基准组相比,其应力应变均有所降低,但与单独掺入钢渣微粉或钢渣骨料时试件特征值相差不大。因此,建议同时替换 60% 钢渣骨料和 20% 钢渣微粉为混合掺入的最优替换率。

### 5 结论

本研究明确钢渣参数与钢渣替换率的关系,从而建立考虑钢渣影响钢渣 UHPC 轴向拉伸本构模型,能较好的预测材料特性,并为钢渣 UHPC 应用到建筑项目工程中提供试验及理论依据,得出主要结论如下。

(1)单独掺入钢渣微粉,试件延性增强;单独掺入钢渣骨料,试件延性降低。混合掺量较小时,试件出现多裂缝;混合掺量较大时,仅有单条裂缝。

(2)掺入钢渣后,UHPC 轴向抗拉强度均有所下降,但在拉伸破坏中可以看出有明显的拉伸硬化阶段,所以加入少量钢渣的钢渣 UHPC 是可以应用在建筑等行业的。

(3)随着钢渣加入,钢渣微粉掺量较小时钢渣 UHPC 内部相对密实,钢渣骨料的加入使内部出现明显的孔洞。考虑钢渣对轴向拉伸性能的影响,建议掺入钢渣骨料 60% 和钢渣微粉 20% 时为最优替换率。

#### 参考文献:

- [1] AKEED M H, QAIDI S, AHMED H U, et al. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. part 3: fresh and hardened properties[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01265.
- [2] YOO D Y, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 73: 267-280.
- [3] LI P P, BROUWERS H J H, YU Q L. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 136: 103434.
- [4] LI P P, SLUIJSMANS M J C, BROUWERS H J H, et al. Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 183: 107680.
- [5] WANG W, LIU J, AGOSTINI F, et al. Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) under progressive aging [J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 55: 1-13.
- [6] AKEED M H, QAIDI S, AHMED H U, et al. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. part II: hydration and microstructure[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01289.
- [7] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 741-751.
- [8] AKEED M H, QAIDI S, FARAJ R H, et al. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part I: developments, principles, raw materials[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01290.
- [9] FAN D Q, YU R, SHUI Z H, et al. A new development of eco-friendly Ultra-High performance concrete (UHPC): towards efficient steel slag application and multi-objective optimization[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124913.
- [10] 彭术, 陈浩, 水中和, 等. 废弃混凝土再生粉制备超高性能混凝土基体的性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2125-2130.
- PENG Shu, CHEN Hao, SHUI Zhonghe, et al. Properties of ultra-high performance concrete matrix prepared with powder of waste concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7): 2125-2130.
- [11] 许娜, 陈军琪. 复掺粉煤灰和矿渣对高性能混凝土抑制骨料碱活性效能及其强度的影响研究[J]. *价值工程*, 2019, 38(17): 158-160.
- XU Na, CHEN Junqi. Effect of complex fly ash and slag on the activity and strength of high performance concrete for inhibiting aggregate alkali activity[J]. *Value Engineering*, 2019, 38(17): 158-160.
- [12] 简洪树. 绿色超高性能钢纤维增强混凝土的静动态韧性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- JIAN Hongshu. Research on static and dynamic toughness of green ultra-high performance steel fiber reinforced concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [13] 高陟, 任鑫明, 马北越. 钢渣高附加值利用研究现状[J]. *耐火与石灰*, 2021, 46(4): 13-17.
- GAO Zhi, REN Xinming, MA Beiyue. Research status of high value-added utilization of steel slag[J]. *Refractories & Lime*, 2021, 46(4): 13-17.
- [14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥压蒸安定性试验方法: GB/T 750—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢渣应用技术要求: GB/T 32546—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] JABIR H A, ABID S R, MURALI G, et al. Experimental tests and reliability analysis of the cracking impact resistance of UHPFRC [J]. *Fibers*, 2020, 8(12): 74.
- [17] FUJIKAKE K, SENGA T, UEDA N, et al. Effects of strain rate on tensile behavior of reactive powder concrete [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1): 79-84.
- [18] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(3): 583-598.