第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20210233

# 钢–聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土单轴循环受压力学性能

池 寅，尹从儒，徐礼华，王淑楠，陈子甲

(武汉大学土木建筑工程学院，武汉 430000)

**摘 要**：对钢–聚丙烯混杂纤维超高性能混凝土(SP-UHPC)开展受压力学性能研究，通过单调和循环受压加载试验，分析纤维种类、长径比和体积掺量对 SP-UHPC 关键力学性能指标的影响，并基于扫描电子显微镜结果揭示钢–聚丙烯混杂纤维增强机理。结果表明：钢–聚丙烯混杂纤维可以显著提高 SP-UHPC 受压力学性能；与未掺入纤维的 UHPC 相比，SP-UHPC 表现出明显的延性破坏特征，峰值强度、峰值应变和韧性明显提高，刚度退化速率减缓。建立了 SP-UHPC 单轴循环受压应力–应变关系数学表达式，能够准确预测含有不同纤维特征参数的 SP-UHPC 在单轴受压条件下的力学响应。

**关键词**：超高性能混凝土；混杂纤维；循环受压试验；力学性能；应力–应变关系
**中图分类号**：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2331–15
**网络出版时间**：2021–10–11



# Compressive Mechanical Properties of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Ultrahigh-Perfromance Concrete under Cyclic Compression

*CHI Yin*, *YIN Congru*, *XU Lihua*, *WANG Shunan*, *CHEN Zijia*
(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Compressive mechanical behavior of the steel-polypropylene hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete (SP-UHPC) with respect to the impacts of fiber types, fiber aspect ratio and volume fraction was investigated. The monotonic and cyclic compression tests were both conducted. Besides, the fiber reinforcing mechanism was analyzed by scanning electron microscopy. The results demonstrate that the inclusion of steel-polypropylene hybrid fiber can enhance the compressive mechanical properties of UHPC. Compared to the UHPC without fiber addition, the SP-UHPC shows a ductile failure mode with improved peak stress, peak strain, toughness and alleviated stiffness degradation process. Based on the experimental data, a constitutive model was proposed for SP-UHPC subjected to cyclic compression, which could be used to predict the mechanical response of the SP-UHPC at various fiber parameters.

**Keywords:** ultra-high performance concrete; hybrid fiber; cyclic compression test; mechanical properties; stress-strain relation

混凝土自 19 世纪出现后，因成本低廉、施工方便、强度较高等特性迅速成为工程建设中使用最多、最广泛的材料之一。但随着人们对于空间利用率的要求不断提高，建筑结构向着更高、更深、更长的方向发展，不断建设发展的交通网络也要求工程材料能够在极端恶劣的环境中正常稳定地服役，但传统混凝土脆性大、延性差、耐久性差，限制了其在新兴工程中的应用[1]。超高性能混凝土(UHPC)这一新型混凝土材料被认为具备应对以上工程挑战的能力。人们向高强混凝土基体中掺入钢纤维成功制备了 UHPC，进一步通过剔除粗骨料、使用活性矿物掺合料和高效减水剂等措施保证了 UHPC 优异的基体密实度。混凝土基体中的钢纤维形成多向约束系统，其“桥接”裂缝的行为使得混凝土在保证强度的同时延性明显提升[2–4]。已有研究表明 UHPC 具有高强度、高韧性、高耐久性的特点[5]，与传统

收稿日期：2021–04–07。　修订日期：2021–05–20。
基金项目：国家自然科学基金项目(51878519，51738011)。
第一作者：池 寅(1984—)，男，博士，副教授。
通信作者：徐礼华(1962—)，女，博士，教授。

**Received date:** 2021–04–07.　**Revised date:** 2021–05–20.
**First author:** CHI Yin (1984–), male, Ph. D., Associate Professor.
**E-mail:** yin.chi@whu.edu.cn
**Correspondent author:** XU Lihua (1962–), female, Ph. D., Professor.
**E-mail:** xulihuad@163.com

混凝土相比，UHPC 的抗压强度可以达到 120 MPa[6]或更高[7]，抗拉强度可以达到 15 MPa[8–9]。由于基体密实度的提高，UHPC 的耐氯离子侵蚀、抗冻融能力也显著改善[10–11]。基于以上优势，近年来 UHPC 在机场跑道、运输管道、防撞护栏等工程中被广泛使用[12]。

目前，已有诸多学者对 UHPC 的受压力学性能开展了相关研究。史才军等[13]对比了掺入不同比例长短钢纤维的 UHPC 受压力学性能，发现掺入 1.5%长纤维加 0.5%短纤维为最优配比，可以使 UHPC 峰值应力、峰值应变分别提高 34%和 46%，掺入 2%短纤维的 UHPC 受压力学性能最差。黄政宇等[14]研究发现，钢纤维体积掺量对 UHPC 弹性模量的影响较小，但对其受压破坏形态影响显著，掺入 1%钢纤维的 UHPC 表现为劈裂破坏，掺入 2%、3%钢纤维的 UHPC 则以剪切破坏为主。杨兆鹏[15]的研究表明，掺入钢纤维可以显著提高 UHPC 力学性能，但过高的掺量可能会降低增强效果，这是由于过多的纤维在混凝土基体内结团导致。更进一步，闫光杰[16]、吴有明[17]、黄政宇等[18]、马亚峰[19]提出了 UHPC 单轴受压本构关系，为结构非线性分析和 UHPC 循环受压试验研究提供了重要参考。

然而有研究表明钢纤维仅能抑制宏观裂缝[20–21]，在微裂缝拓展阶段难以发挥阻裂作用[22–23]。考虑到纤维混凝土是由多尺度组分组成的复合材料，人们提出可以从多个层次综合提高混凝土的力学性能[10]，即将宏观尺度的钢纤维和微观尺度的聚丙烯纤维组合使用。聚丙烯纤维弹性模量低、延性好，在抑制早期开裂，减少初期收缩变形[24]，提高材料韧性、耐火性能[25]方面具有独特效果。已有许多学者对钢–聚丙烯混杂纤维混凝土(SP-HFRC)的力学性能开展了研究。徐礼华等[26]研究表明，与不掺加任何纤维的基体混凝土相比，SP-HFRC 的脆性明显改善，这是由于混杂纤维增强效果呈现多层次，逐级阻裂的特点。徐礼华等[26]、梅国栋等[27]、Li 等[28]的研究表明 SP-HFRC 具有峰值应力高、延性好、滞回耗能能力强、性能退化程度低等优势。此外，张元元[29]、焦楚杰等[25]的研究确认了聚丙烯纤维与钢纤维之间的“正混杂效应”，即掺有钢–聚丙烯混杂纤维的混凝土立方体抗压强度、轴心抗拉强度和劈裂抗拉强度均明显高于只含有钢纤维的混凝土。

综上所述，UHPC 具有优异的受压力学性能，并且钢–聚丙烯混杂纤维表现出积极的正混杂效应，因此钢–聚丙烯混杂纤维和 UHPC 的结合具有相当大的实际意义。目前已有学者对 SP-UHPC 开展了部分研究，但大多集中于轴拉试验[30]和劈拉试验[30–32]，关于 SP-UHPC 受压力学性能的研究则十分有限。考虑到混凝土材料在工程结构中主要承担压应力，开展 SP-UHPC 受压力学性能研究十分必要。此外，我国是地震多发国家[3,33]，计算结构在地震作用下的动力响应需要进行结构非线性分析，其中首先就要解决材料的本构关系问题。因此，通过对 10 组共 60 个试件进行单调受压和循环受压试验，研究钢–聚丙烯混杂纤维对 SP-UHPC 在单调和循环受压下的力学性能的影响；基于 SEM 结果揭示钢–聚丙烯混杂纤维对 UHPC 力学性能的增强机理；基于试验结果，提出 SP-UHPC 单轴循环受压的应力–应变关系数学表达式，为 UHPC 实际工程设计提供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料性能

由于剔除了粗骨料、加入了活性矿物粉末，UHPC 的基体密实度较高。参考前期研究成果[34–35]和余睿等[36–37]的研究，基于颗粒最紧密堆积理论设计了 UHPC 基体，其配合比如表 1 所示。混凝土基体水胶比 0.14，水泥为 52.5 普通硅酸盐水泥，堆积密度 1 700 kg/m$^2$，平均粒径 0.1~0.3 μm；粉煤灰密度为 2 460 kg/m$^3$，平均粒径 10~25 μm；硅灰密度 2 100 kg/m$^3$，比表面积 $2\times10^5$ cm$^2$/g；优质石英砂细度模数 2.4，平均粒径 400~600 μm。水泥、硅灰和粉煤灰的化学组成见表 2。减水剂为减水率≥35%的聚羧酸高效减水剂。此外，共使用了 3 种不同长径比的钢纤维(SF)和 1 种长径比为 280 的聚丙烯纤维(PF)，钢纤维和聚丙烯纤维的主要性能指标见表 3。分别用 SA、SB、SC 表示长径比为 30、60、80 的 3 种钢纤维，用 P 表示聚丙烯纤维。各组混凝土浆体的流动度见表 4。

**表 1 UHPC 基体配合比**

**Table 1 Constituents of UHPC matrix**

| Water/binder ratio | Mix proportion/(kg·m$^{-3}$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cement | Silica fume | Fly ash | Silica sand | Water | Superplasticizer |
| 0.14 | 800 | 100 | 100 | 1 250 | 140 | 35 |

表 2　水泥、粉煤灰和硅灰的化学组分

Table 2　Composition (mass fraction) of cement, fly ash and silica fume　　*w*/%

| Material | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | $Na_2O$ | $SO_3$ | $K_2O$ | Loss on ignition |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Silica fume | 92.10 | 0.34 | 0.79 | 0.83 | 0.72 | 1.40 | | | 2.14 |
| Fly ash | 52.51 | 4.65 | 25.08 | 6.86 | 1.23 | | 0.38 | | 2.60 |
| Cement | 20.70 | 62.90 | 4.84 | 3.18 | 2.15 | 0.15 | 3.56 | 0.85 | 1.47 |

*w* is mass fraction.

表 3　钢纤维和聚丙烯纤维的主要性能

Table 3　Major properties of steel fiber and polypropylene fiber

| Fiber type | | Length (*l*)/mm | Diameter (*d*)/mm | Aspect ratio *l*/*d* | Tensile strength/MPa | Elastic modulus/GPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Steel fiber(SF) | SA | 6.0 | 0.22 | 30 | ≥2 000 | 200 |
| | SB | 13.0 | 0.22 | 60 | ≥2 000 | 200 |
| | SC | 17.0 | 0.22 | 80 | ≥2 000 | 200 |
| Polypropylene fiber(PF) | P | 13.6 | 0.05 | 280 | ≥400 | 7 |

表 4　水泥浆流动度

Table 4　Fluidity of paste

| Sample | Fluidity/mm | Sample | Fluidity/mm |
|---|---|---|---|
| S000P00 | 276 | SB20P10 | 198 |
| S000P15 | 261 | SB20P15 | 192 |
| SB10P15 | 222 | SB20P20 | 190 |
| SA20P15 | 210 | SC20P15 | 189 |
| SB20P00 | 193 | SB30P15 | 182 |

表 5　试件主要参数

Table 5　Main parameters of the specimens

| Sample | SF | | Volume fraction of PF $\varphi_{pf}$/% | $f_{cu}$/MPa |
|---|---|---|---|---|
| | Volume fraction $\varphi_{sf}$/% | *l*/*d* | | |
| S000P00 | | | | 119.19 |
| S000P15 | | | 0.15 | 120.03 |
| SB10P15 | 1 | 60 | 0.15 | 133.32 |
| SA20P15 | 2 | 30 | 0.15 | 125.88 |
| SB20P00 | 2 | 60 | | 131.57 |
| SB20P10 | 2 | 60 | 0.10 | 130.63 |
| SB20P15 | 2 | 60 | 0.15 | 139.24 |
| SB20P20 | 2 | 60 | 0.20 | 135.64 |
| SC20P15 | 2 | 80 | 0.15 | 140.75 |
| SB30P15 | 3 | 60 | 0.15 | 144.97 |

SA20P15 is the specimen containing 2% steel fiber (SA, *l*/*d* = 30) and 0.15% polypropylene fiber. SF and PF stand for steel fiber and polypropylene fiber respectively.

### 1.2　试件设计

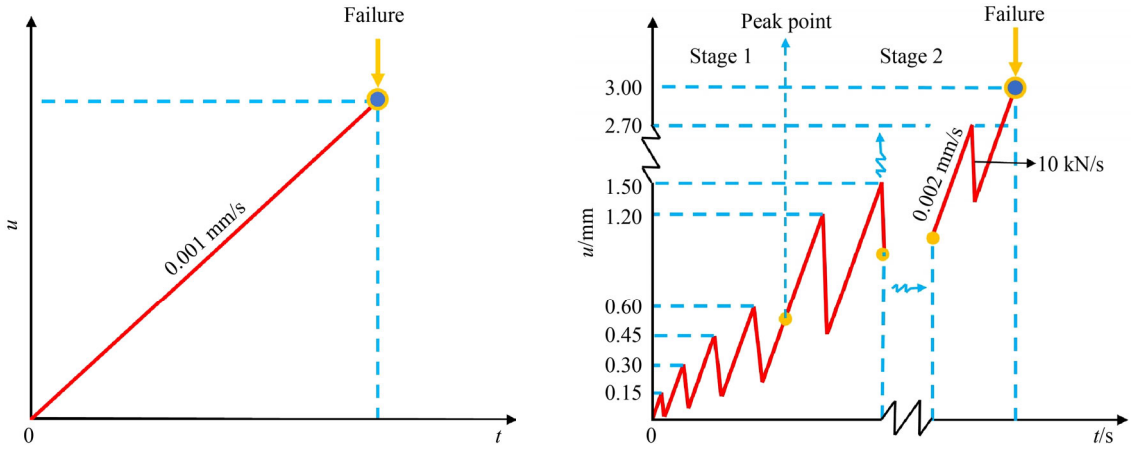
参考《混凝土结构设计规范 GB50010—2010》[38]，浇筑 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件测试抗压强度，浇筑 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件用于单轴受压试验。浇筑 7 组钢–聚丙烯混杂纤维 UHPC，以及 2 组掺有单一纤维的 UHPC 和 1 组不含纤维的 UHPC (S000P00)作为对照组。参考文献[39–40]以及《活性粉末混凝土 GB T31387—2015》[41]，选择钢纤维体积掺量为 1%、2%、3%；选择聚丙烯纤维体积掺量为 0.10%、0.15%、0.20%。所有试件的基体混凝土相同，每组的纤维配比和立方体抗压强度见表 5。

### 1.3　测试

1.3.1　仪器选择　　轴压试验在电液伺服岩石力学试验机 INSTRON-1346 上完成。试验前将试件上下底面打磨平整，而后在试件顶部放置带延伸翼缘的垫块，翼缘与沿试件高度方向上布置的量程为 5 mm 的位移计(LVDT)相连以测量轴向变形。应力值由试验机的压应力传感器自动记录。

电镜扫描试验使用蔡司 SIGMA-500 场发射扫描电镜，加速电压为 20 kV。送测前，试样使用无水乙醇浸泡 24 h 后放入 60 ℃恒温烘箱中烘干 48 h，扫描前使用离子溅射镀膜设备在试件表面喷涂金粉。

1.3.2　加载制度　　分为单调受压试验和循环受压试验，试验开始前对试件进行预加载，预加荷载大小为峰值荷载的 10%。单调受压试验和循环受压试验的加载制度如图 1 所示。单调加载为位移控制，保持加载速率为 0.001 mm/s 直至试件破坏。循环加载为位移和力分段控制，加载段由位移控制，加载速率为 0.002 mm/s，卸载段为力控制，卸载速率为 10 kN/s。此外，考虑到在峰值点处卸载可能影响试验结果，将循环受压试验加载段分为两部分，峰值点前每个循环位移增幅为 0.15 mm，峰值点后每个循环位移增幅为 0.30 mm。




(a) Monotinic compressive loading scheme (b) Cyclic compressive loading scheme

图 1 单调及循环受压加载制度

Fig. 1 Loading schemes of monotonic compression test and cyclic compression test

## 2 结果与讨论

### 2.1 破坏形态

未掺入纤维的 UHPC 与掺入纤维的 UHPC 呈现出完全不同的破坏形态。未掺入纤维的 UHPC 为明显的脆性破坏，当荷载达到峰值应力时，试件破坏，发出明显的爆炸声并伴随着大量碎块剥落飞出，最终碎裂成几部分，展现为脆性的爆裂破坏模式，如图 2 中 S000P00 所示。从图 2 可以看出，掺入单一纤维的 UHPC 和 SP-UHPC 表现出明显的延性破坏特征，当荷载达到峰值应力时同样发出明显的开裂声，试件表面可以观察到许多裂纹，但由于钢纤维和聚丙烯纤维的裂缝桥接作用，试件可以保持完整的形态直至试验结束。随着钢纤维和聚丙烯纤维体积掺量和长径比的提高，试件表面的宏观裂缝数量逐渐减少，混凝土的破坏模式从劈裂破坏转变为剪切破坏，这是由于纤维的桥接作用逐渐增强，对裂缝的产生和扩展起到了阻碍作用。将破坏后的试件沿主要裂缝剖开，可以看到开裂面上有在受压过程中因裂缝两侧试件相互摩擦产生的白色擦痕，裂缝断面有大量弯折变形的钢纤维，说明钢纤维可以有效桥接裂缝两侧。

### 2.2 单调受压力学性能分析

图 3 为 10 组试件的单调受压试验得到对应的应力–应变曲线，曲线中的关键力学性能指标及变化规律见表 6 和图 4。参考崔涛等[23]、钟光淳等[42]、

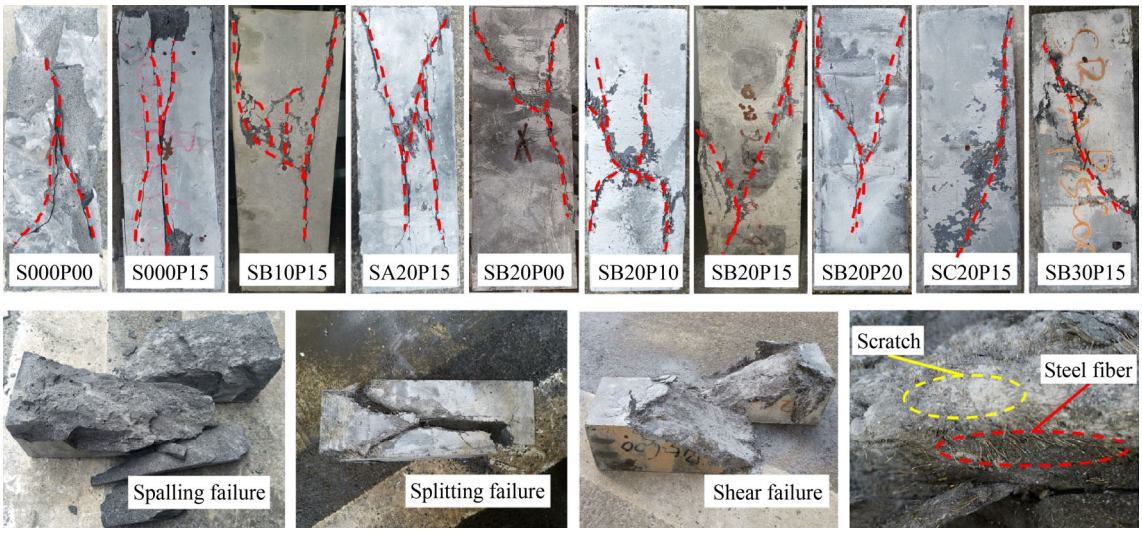
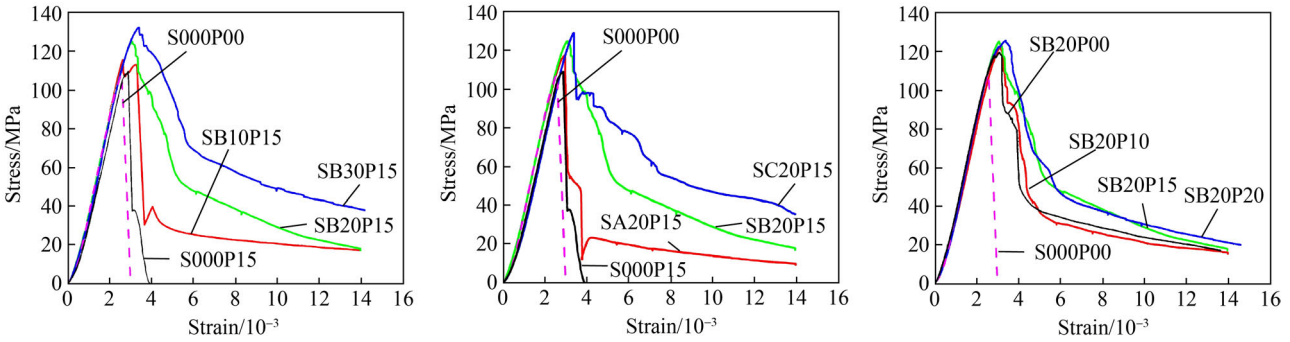



图 2 SP-UHPC 试件破坏形态

Fig. 2 Various failure patterns of SP-UHPC specimens




(a) SF, volume fraction　　(b) SF, aspect ratio　　(c) PF, volume fraction

图 3　单调受压应力–应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of monotonic compression test

**表 6　单调曲线特征点试验值**

**Table 6　Characteristic values in stress-strain curves of monotonic compressive test**

| Sample | Peak stress $\sigma_{cu}$/MPa | Peak strain $\varepsilon_{cu}$/% | Elastic modulus $E$/GPa | Toughness index/kPa |
|---|---|---|---|---|
| S000P00 | 108.3 | 0.273 | 44.87 | 154.83 |
| S000P15 | 109.8 | 0.261 | 45.22 | 181.47 |
| SB10P15 | 115.3 | 0.296 | 48.96 | 474.73 |
| SA20P15 | 117.6 | 0.282 | 49.33 | 423.44 |
| SB20P00 | 122.2 | 0.302 | 50.03 | 544.66 |
| SB20P10 | 122.4 | 0.313 | 50.92 | 535.00 |
| SB20P15 | 124.8 | 0.307 | 51.19 | 669.51 |
| SB20P20 | 125.2 | 0.319 | 52.05 | 695.24 |
| SC20P15 | 129.1 | 0.338 | 53.64 | 840.11 |
| SB30P15 | 131.9 | 0.339 | 54.91 | 906.35 |

高丹盈等[43]的相关研究，选取上升段中 0.3 倍和 0.6 倍峰值应力点间的斜率值为弹性模量，韧性指标按照应力–应变曲线所包络的面积计算。从图 3 的应力–应变曲线和图 4 的力学性能指标变化规律可以看出：

1) 应力–应变曲线特征与宏观试验现象相吻合，对照组 UHPC (S000P00)的应力–应变曲线在达到峰值应力后应力很快降至 0，与混凝土的脆性破坏行为对应。SP-UHPC 试验组得到了完整的峰后曲线，与混凝土的延性破坏模式对应，这是由于纤维的桥接作用阻止了基体的失稳开裂，保证了混凝土的整体性并使其可以继续承担压应力。

2) 钢纤维和聚丙烯纤维对宏观裂缝的抑制效果不同。在图 3a 和图 3b 中，钢纤维长径比和体积掺量的提升均能明显改善混凝土峰值点后的力学行为，表现为应力–应变曲线更加饱满、残余强度更高。上述结果说明钢纤维在宏观裂缝拓展阶段依然可以发挥桥接作用。从图 3c 可以看出，增加聚丙烯纤维的掺量对峰值点后应力–应变曲线的影响不显著，并且单掺聚丙烯纤维试验组(S000P15)的应力–应变曲线在峰值点后快速降低至零，说明聚丙烯纤维仅能在峰值点前微裂纹拓展阶段生效，而对峰值点后出现的宏观裂缝桥接能力有限，这是因为此时裂缝处的聚丙烯纤维由于强度较低大部分已经断裂，无法继续工作。

3) 增加钢纤维长径比和体积掺量可以显著提高 UHPC 各项力学性能指标，而聚丙烯纤维的影响相对有限。随着钢纤维长径比和体积掺量增加，峰值应力、峰值应变、弹性模量和韧性指数最大提高 21.8%、29.9%、21.4%和 398.4%，而聚丙烯纤维仅能相应的提高 2.4%、5.6%、4.9%和 27.6%。造成这种现象的原因是钢纤维的弹性模量和强度均高于聚丙烯纤维，故钢纤维在抑制微裂纹与宏观裂缝的产生和拓展方面效果更佳。此外，可以看出 SP-UHPC 表现出明显的正混杂效应，其各个力学性能指标相比单一纤维 UHPC 均有提升。

4) 为了定量表示钢纤维和聚丙烯纤维对 UHPC 峰值应力和峰值应变的影响，方便后续应力–应变关系的提出，现引入纤维特征值 $\lambda=\varphi\cdot(l/d)$，其中 $\varphi$ 代表纤维体积掺量，$l/d$ 代表纤维的长径比。参考已有研究[20,44]采用公式 $f_{cu}=f_0(1+k_1\lambda_{sf}+k_2\lambda_{pf})$ 及 $\varepsilon_{cu}=(1+k_3\lambda_{sf}+k_4\lambda_{pf})$对 SP-UHPC 试件的峰值应力和峰值应变进行回归计算，其中 $\sigma_{cu}$ 和 $\varepsilon_{cu}$ 分别为 SP-UHPC 的峰值点强度(MPa)和应变，$\lambda_{sf}$ 和 $\lambda_{pf}$ 代表钢纤维纤维特征值和聚丙烯纤维特征值，$k_1$、$k_2$、$k_3$、

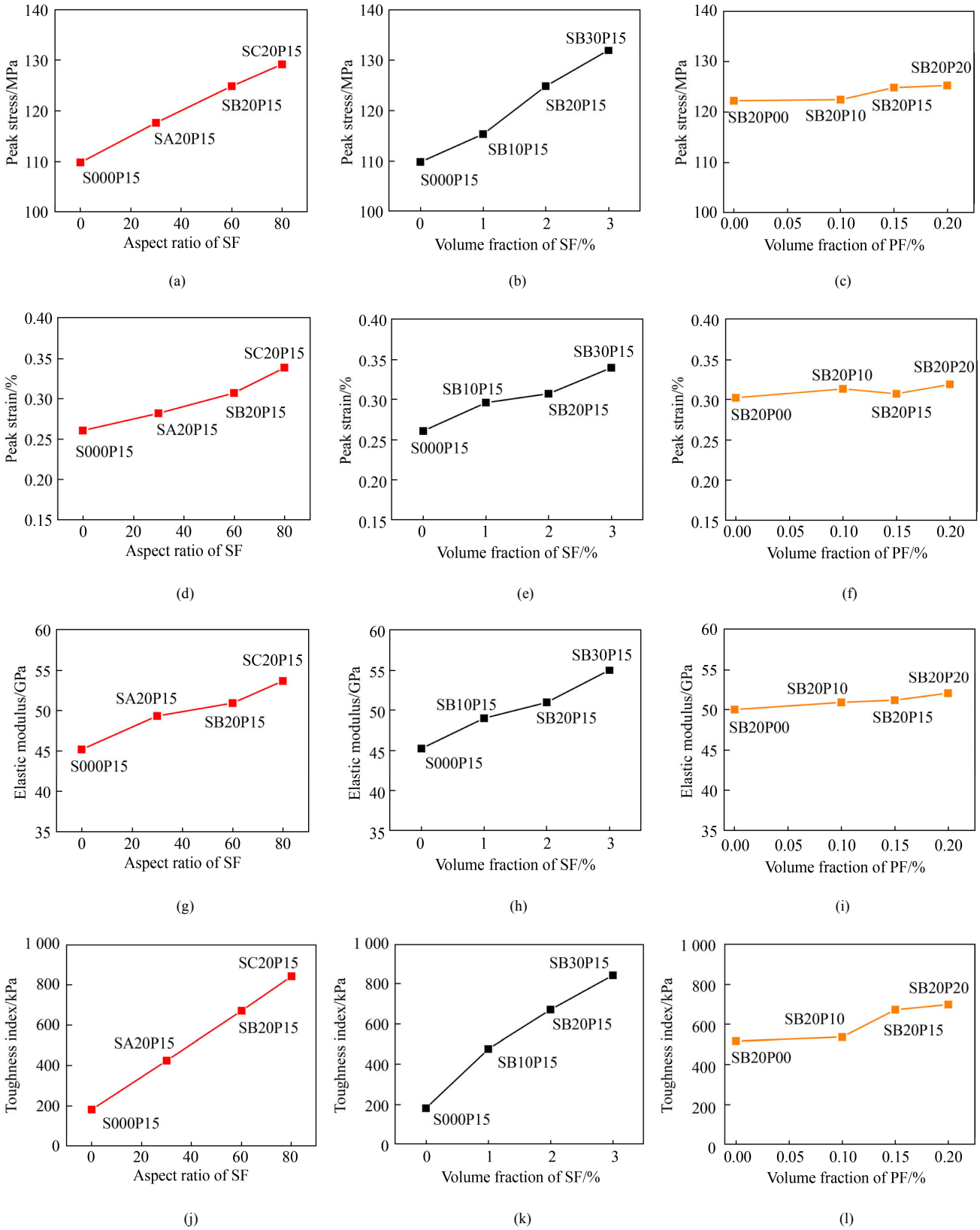


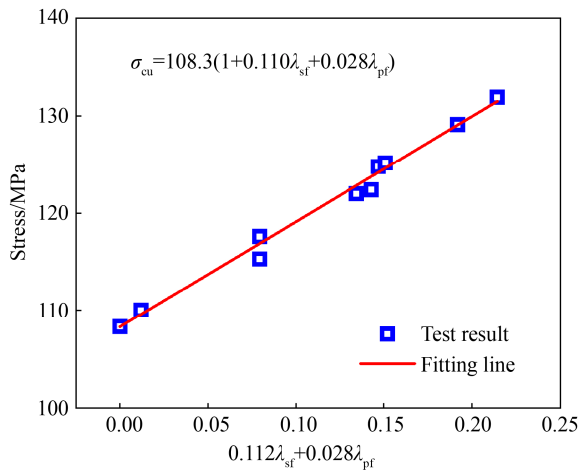

图 4 钢纤维和聚丙烯纤维对力学性能的影响

Fig. 4 Influence of steel fiber and polypropylene fiber on mechanical properties

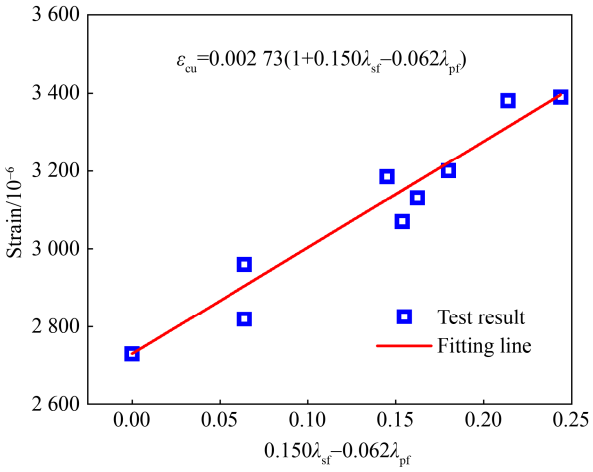
$k_4$ 为无量纲的纤维增强系数，最终回归公式见式(1)、式(2)和图 5。

$$\sigma_{cu} = 108.3(1 + 0.11\lambda_{sf} + 0.028\lambda_{pf}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.002\,73(1 + 0.15\lambda_{sf} - 0.062\lambda_{pf}) \quad (2)$$




(a) Fitting result of peak stress




(b) Fitting result of peak strain

图 5　峰值应力及峰值应变回归曲线

Fig. 5　Fitting curves of the peak stress and peak strain

## 2.3　循环受压力学性能分析

典型的混凝土循环受压应力–应变曲线示意图及关键力学性能指标见图 6，其中 $E_{unl}$ 为卸载刚度，定义为卸载过程的起点和终点间连线的斜率。$\varepsilon_{unl}$ 为卸载点应变，由加卸载制度决定(预设卸载点的位移/试件长度)，对应的应力值为 $\sigma_{unl}$。$\varepsilon_{pl}$ 代表塑性应变，即卸载路径终点应力为零时对应的应变。试验得到的各组试件的循环受压应力–应变曲线如图 7 所示。

1) 曲线形态

对于普通混凝土和纤维混凝土，已有大量研究表明循环加载下应力–应变曲线的包络线与单调加载下的应力–应变曲线接近[45–47]。图 7 表明 SP-UHPC 的应力–应变曲线同样满足此规律，这也是后续提出应力–应变表达式的研究基础。在峰值点前的 4 个加卸载循环中，卸载和再加载曲线基本重合，说明此阶段混凝土的力学性能并未发生明显的退化。随着位移逐渐增加，峰值点后的卸载曲线和再加载曲线偏离明显、滞回环面积增加，并且滞回环面积主要受钢纤维长径比和体积掺量的影响，而聚丙烯纤维的体积掺量影响较小。这与两种纤维不同的作用层次有关，聚丙烯纤维主要负责桥接峰值点前的微裂纹，而钢纤维主要负责抑制峰值点后宏观裂缝的扩展，因此峰值后滞回环的面积随着钢纤维的不断耗能拔出而增加。

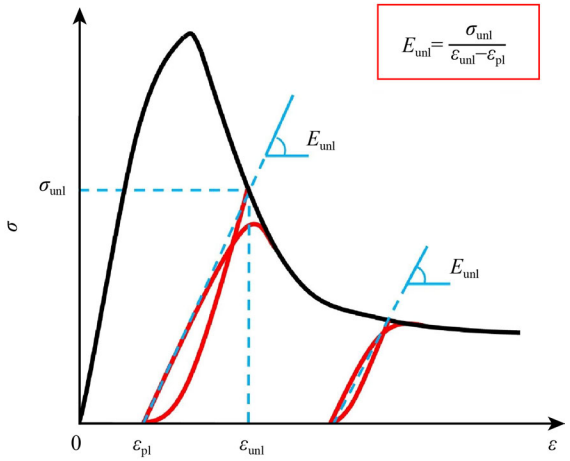



图 6　循环受压应力–应变曲线示意图

Fig. 6　Sketch of the stress-strain curve for cyclic compression test

2) 塑性应变累积

各组试验的卸载点应变–塑性应变关系如图 8 所示。可以看出，峰值点前的循环过程并未产生明显的塑性变形，而峰值点后的循环过程塑性变形与卸载点应变呈线性相关增长。钢纤维和聚丙烯纤维的掺入并未对塑性应变累积过程产生明显影响，即相同卸载应变时不同 SP-UHPC 中的塑性变形几乎相同。已有研究表明循环加载过程中塑性应变和卸载点应变存在线性关系[48–49]，并且塑性应变累积过程只与材料本身有关，与加载制度、纤维参数和外部约束等因素没有关系。通过对试验结果的回归分析，卸载点应变和塑性应变之间的关系见式(3)，其中 $\varepsilon_{pl}$ 为塑性应变值，为 $\varepsilon_{unl}$ 卸载点应变值，相同的加载制度下各试验组的 $\varepsilon_{unl}$ 为固定值。

$$\varepsilon_{pl}=1.136\varepsilon_{unl}-0.002\,46 \tag{3}$$

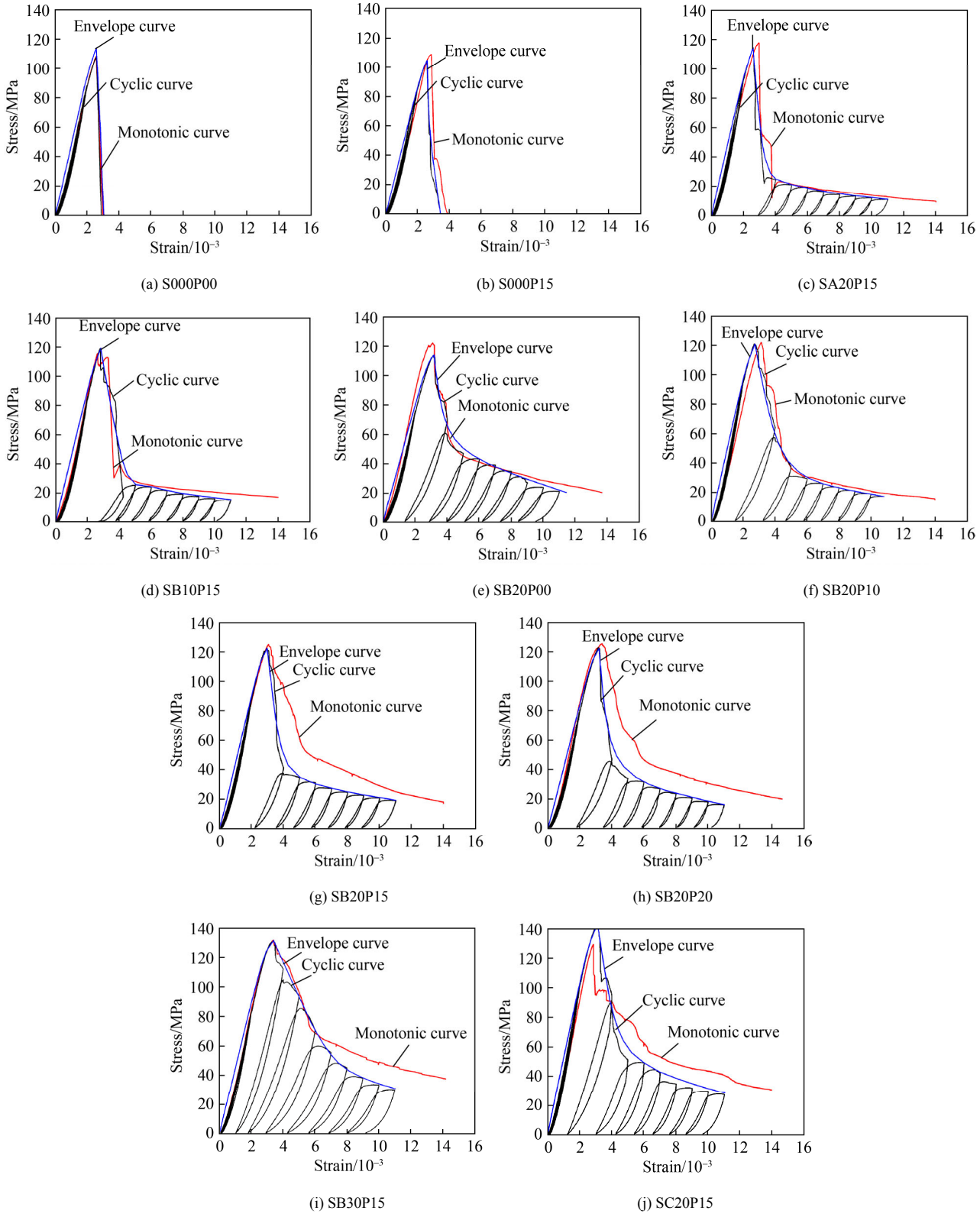



图 7 循环受压应力−应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of cyclic compression test

3) 刚度退化

各试验组的刚度随循环次数的变化曲线如图 9 所示，可以看出在峰值前阶段 SP-UHPC 的刚度会有所增加，这是因为试件内部初始的微孔洞和微裂缝在受压过程中被压缩密实，材料整体密实度提高导致刚度提高。为了更加清晰的展示各组

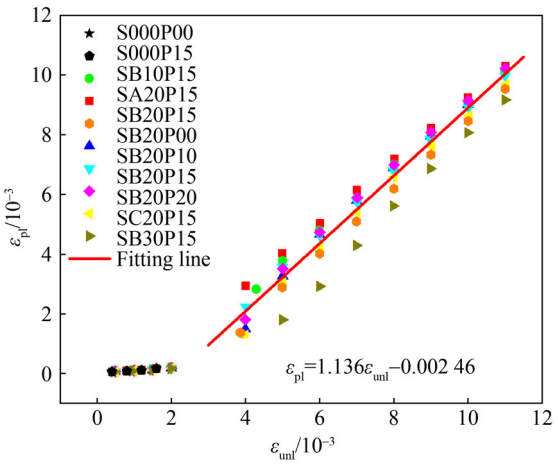
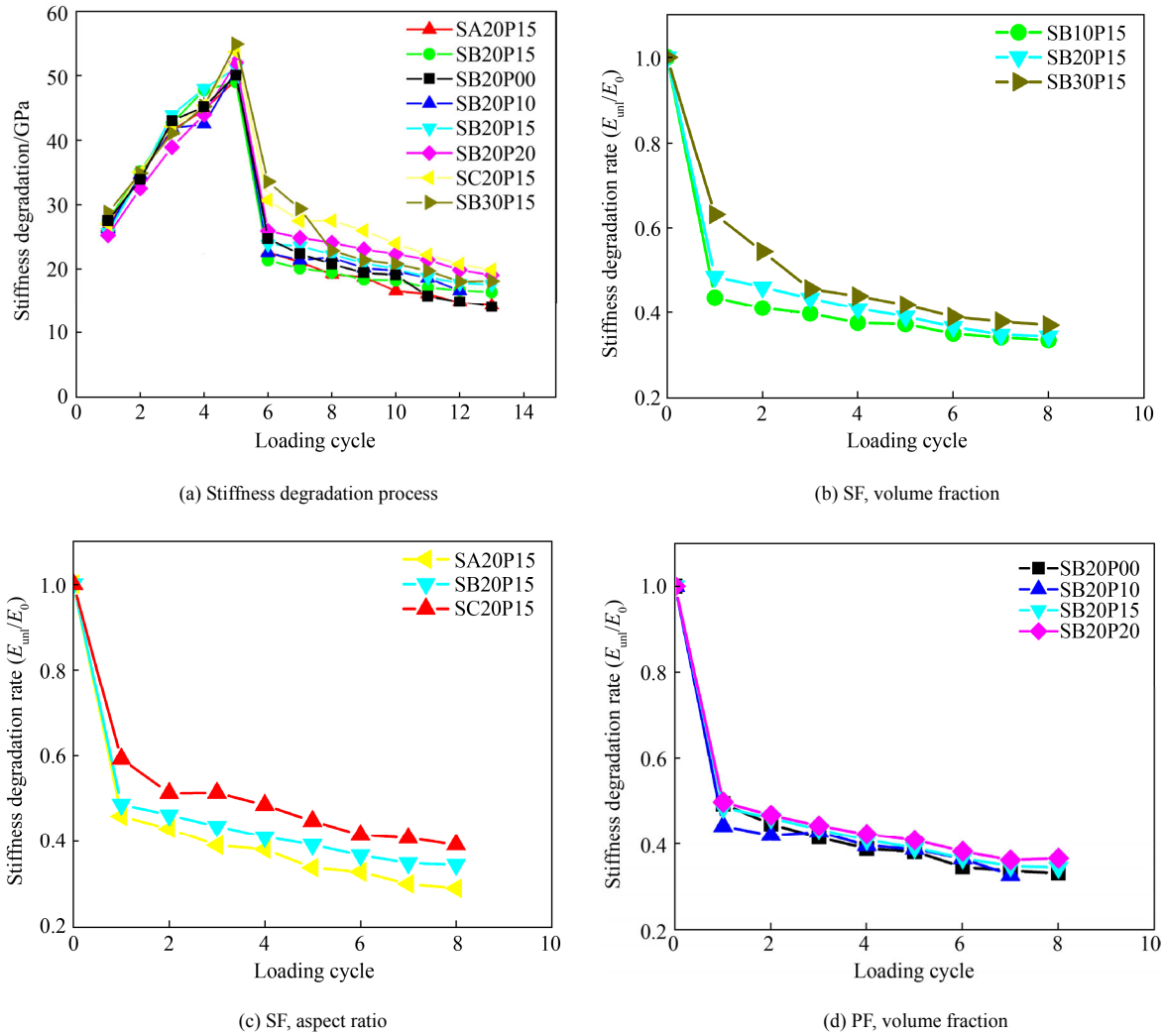



图 8　塑性应变累积

Fig. 8　Plastic strain accumulation

UHPC 的刚度退化过程，将峰值点之前部分省略后各组刚度如表 7 所示。考虑到各组试件的初始刚度不同，使用刚度比 $E_{unl}/E_0$ 分析不同因素对 UHPC 刚度退化过程的影响，如图 9b~图 9c。

由图 9b~图 9d 可知，混凝土刚度退化过程大致以峰值点后第 1 个加卸载循环处为界，分为快速退化和缓慢退化两部分，这是由于峰值点附近混凝土中应变能快速释放导致基体迅速开裂。但随着钢纤维的长径比和体积掺量的提高裂缝的扩展被抑制，刚度退化速率因此减缓(如 SC20P15、SB30P15)。进一步对比图 9b~图 9d 可知，钢纤维是影响 SP-UHPC 刚度退化的主要因素，聚丙烯纤维对刚度退化过程的影响相对较小，这是由于峰值点后混凝土破坏主要是由于宏观裂缝拓展导致，而聚丙烯纤维仅对微观裂纹的扩展起到较好的抑制作用。此外，钢纤维的长径比相较体积掺量对混凝土刚度退化过程的影响更加明显。这是由于钢纤维掺量的提升增加了混凝土基体内的钢纤维数量，引入了更多的纤维–基体




(a) Stiffness degradation process

(b) SF, volume fraction

(c) SF, aspect ratio

(d) PF, volume fraction

图 9　各组 UHPC 刚度退化过程

Fig. 9　Stiffness degradation process of SP-UHPC

表 7 各组混凝土刚度退化计算结果

Table 7 Stiffness degradation of the SP-UHPC

| Loading cycle | Stiffness/GPa | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SA20P15 | SB10P15 | SB20P00 | SB20P10 | SB20P15 | SB20P20 | SC20P15 | SB30P15 |
| 0 | 49.331 | 48.964 | 50.034 | 50.922 | 51.191 | 52.058 | 53.646 | 54.915 |
| 1 | 22.605 | 21.350 | 24.724 | 22.533 | 23.846 | 25.941 | 30.700 | 33.589 |
| 2 | 21.143 | 20.120 | 22.383 | 21.412 | 23.595 | 24.878 | 27.480 | 29.373 |
| 3 | 19.207 | 19.466 | 20.800 | 21.816 | 22.243 | 24.117 | 27.507 | 22.864 |
| 4 | 18.749 | 18.401 | 19.436 | 20.165 | 20.967 | 23.068 | 25.975 | 21.395 |
| 5 | 16.627 | 18.245 | 19.092 | 19.739 | 19.999 | 22.348 | 23.985 | 20.808 |
| 6 | 16.138 | 17.148 | 17.295 | 18.601 | 18.746 | 21.468 | 22.211 | 19.752 |
| 7 | 14.762 | 16.711 | 16.849 | 16.645 | 17.816 | 19.879 | 20.756 | 18.062 |
| 8 | 14.261 | 16.396 | 16.571 | | 17.619 | 19.052 | 19.885 | 18.133 |

界面薄弱区，导致了更多的初始损伤，而增加钢纤维的长径比可以增加纤维在基体中的埋置深度，即延长了钢纤维的滑移–拔出过程从而起到了缓解刚度退化的作用。

## 2.4 混杂纤维增强机理分析

通过电镜扫描断裂面上的钢纤维形态发现，几乎全部钢纤维在混凝土破坏后都保持完整，并未发生断裂(图 10a)，说明钢纤维并非通过自身断裂耗能。而对钢纤维表面进一步观察发现，钢纤维表面附着了混凝土薄层和大量碎屑(图 10b)，这是在裂缝发展过程中随着钢纤维从基体中滑动拔出产生的，说明钢纤维与混凝土间形成了稳定的粘结，同时说明钢纤维通过与混凝土基体间的脱粘和滑移耗能，而稳定的粘结力也足以保证钢纤维对宏观裂缝的充分约束。观察断面上聚丙烯纤维(图 10c)发现，聚丙烯纤维桥接了微裂缝两侧，

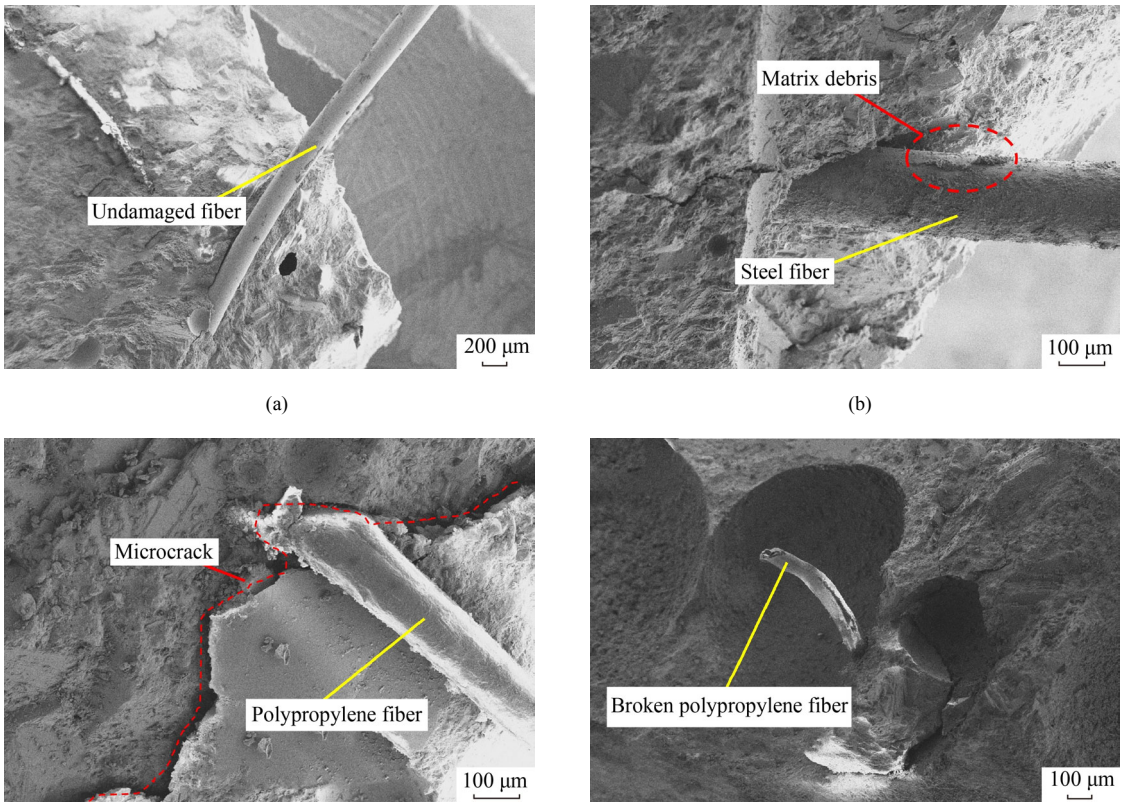



图 10 钢纤维和聚丙烯纤维电镜扫描图像

Fig. 10 SEM images of steel fiber and polypropylene fiber

抑制了微裂缝的进一步发展。对断裂面上大量聚丙烯纤维观察结果表示，多数聚丙烯纤维已经发生断裂破坏(图 10d)，说明这种低弹模、高延性的纤维是通过自身的延长和断裂吸收能量并阻碍微裂纹发展，但当微裂纹扩展、汇合形成宏观裂缝时，已断裂的聚丙烯纤维无法继续产生桥接作用。

图 11 为钢–聚丙烯混杂纤维对基体混凝土的增强机理。受压荷载下混凝土的破坏过程实际是微裂缝的产生、扩展、形成宏观裂缝直至贯穿的过程。在峰值点前微裂纹扩展阶段，极细小的聚丙烯纤维大量分布在混凝土当中，并通过自身伸长及断裂耗能延缓微裂纹生长，所以聚丙烯纤维的数量十分重要：当聚丙烯纤维体积掺量提高时，跨越微裂纹两侧的纤维数量上升，微裂纹继续扩展导致更多的聚丙烯纤维发挥桥接作用，吸收更多的能量。而在宏观裂纹拓展段，如图 11 中“对照”组所示，当微裂纹不断扩展形成宏观裂缝后，聚丙烯纤维断裂并退出工作，钢纤维开始限制裂缝在混凝土中向某些方向发展，避免了混凝土的快速崩裂破坏，但仍有部分裂缝绕过弹性模量更大的钢纤维发展延伸。随着钢纤维体积掺量的上升，钢纤维之间相互搭接形成了更加致密的纤维网络，从多个方向抑制裂缝的开展。钢纤维长径比的提高可以增加钢纤维的工作范围，在更大的区域内约束裂缝。因此，在图 2 中低钢纤维体积掺量和低钢纤维长径比的 UHPC 试验组表面产生了多个斜向的宏观裂缝，表现出劈裂破坏模式。随着钢纤维长径比和体积掺量的增加，混凝土表面宏观裂缝数量减少并形成单一斜裂缝，表现为剪切破坏模式。

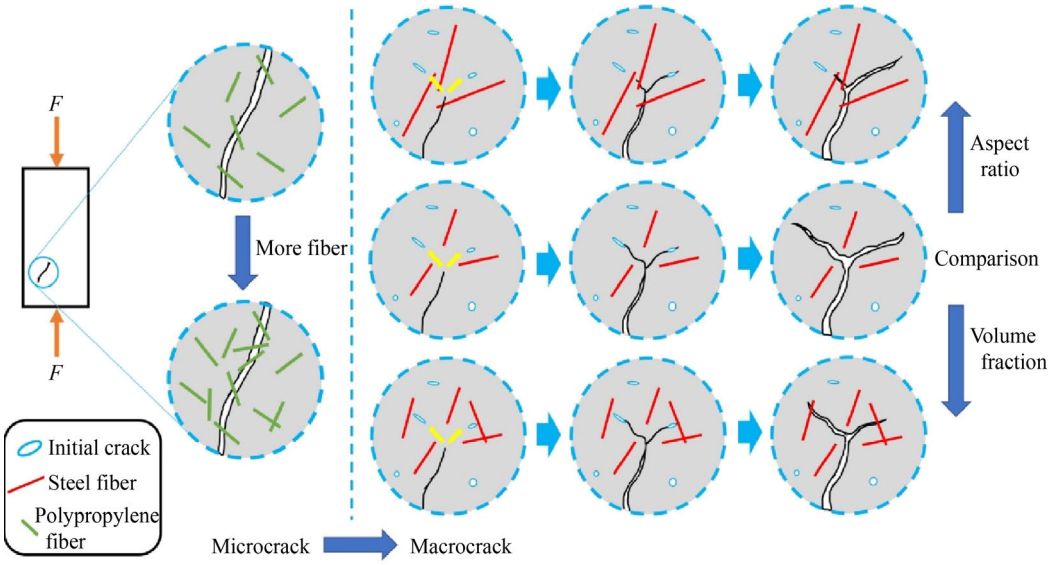



图 11　钢-聚丙烯混杂纤维增强机理

Fig. 11　Enhancing mechanism of steel-polypropylene hybrid fiber

## 3　应力–应变方程

综合各试验组的试验结果，考虑钢纤维和聚丙烯纤维的影响，提出循环受压下 SP-UHPC 的半经验应力–应变关系式。

1) 包络线

根据以上讨论，SP-UHPC 的单调受压应力–应变曲线与循环受压应力–应变曲线的包络线接近，且根据课题组现有关于钢–聚丙烯混杂纤维混凝土的研究成果[20,24,35]，参考过镇海分段式模型[50]提出以下包络线关系式：

$$y=\begin{cases} ax+(3-2a)x^2+(a-2)x^3 & x\leqslant 1 \quad (4)\\ \dfrac{x}{b(x-1)^c+x} & x>1 \quad (5)\end{cases}$$

其中，$a$ 和 $b$ 分别是控制曲线上升段和下降段的参数，$y=\sigma/\sigma_{cu}$，$x=\varepsilon/\varepsilon_{cu}$，$\sigma_{cu}$ 和 $\varepsilon_{cu}$ 分别为应力应变曲线峰值点处的应力和应变值。考虑到纤维混凝土的力学行为主要受掺入纤维的影响，并且大量研究认为这些参数与纤维特征值有关[51–53]，因此对参数 $a$、$b$ 以及钢纤维和聚丙烯纤维的特征参数 $\lambda_{sf}$ 和 $\lambda_{pf}$ 进行回归分析。参数 $c$ 在已有研究中通常取 $c$=2，但考虑到以 UHPC 作为基体的 SP-UHPC 的各项力学性

能相较普通混凝土有明显提高，峰值点后曲线形态更加饱满且下降段更加平缓，因此 SP-UHPC 应力–应变方程中参数 $c$ 应当取另一常数。各试验组的回归分析结果见表 8，回归方程见式(6)~式(8)，其中 $\lambda_{sf}$ 和 $\lambda_{pf}$ 分别为钢纤维(SF)和聚丙烯纤维(PF)的纤维特征值。无纤维 UHPC 以及聚丙烯纤维 UHPC 由于没有检测到峰值点后曲线，表中没有峰后段参数 $b$ 和 $c$。

$$a = 0.123\lambda_{sf} - 0.232\lambda_{pf} + 0.579 \tag{6}$$

$$b = -4.08\lambda_{sf} - 1.96\lambda_{pf} + 11.7 \tag{7}$$

$$c = 1.29 \tag{8}$$

**表 8 参数 *a*、*b*、*c* 试验值及预测值**

**Table 8 Test results and fitting results of *a*, *b* and *c***

| Sample | *a* | | *b* | | *c* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Test result | Prediction | Test result | Prediction | Test result | Prediction |
| S000P00 | 0.581 | 0.579 | | | | |
| S000P15 | 0.493 | 0.482 | | | | |
| SA20P15 | 0.567 | 0.556 | 8.34 | 8.43 | 1.13 | 1.29 |
| SB10P15 | 0.543 | 0.556 | 8.45 | 8.43 | 1.41 | 1.29 |
| SB20P00 | 0.699 | 0.727 | 6.71 | 6.80 | 1.33 | 1.29 |
| SB20P10 | 0.668 | 0.662 | 6.35 | 6.26 | 1.41 | 1.29 |
| SB20P15 | 0.618 | 0.629 | 6.04 | 5.98 | 1.23 | 1.29 |
| SB20P20 | 0.606 | 0.597 | 5.83 | 5.71 | 1.13 | 1.29 |
| SB30P15 | 0.716 | 0.703 | 3.38 | 3.53 | 1.45 | 1.29 |
| SC20P15 | 0.661 | 0.678 | 4.40 | 4.35 | 1.27 | 1.29 |

2) 卸载及再加载曲线

为了便于实际工程应用，参考《混凝土结构设计规范 GB50010—2010》[38]中对受压混凝土卸载及再加载路径的规定，忽略对加卸载路径的非线性的详细计算，采用规范中线性公式进行计算，如式(9)、式(10)所示：

$$\sigma = E_r(\varepsilon - \varepsilon_z) \tag{9}$$

$$E_r = \frac{\sigma_{un}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_z} \tag{10}$$

其中：$E_r$ 为卸载和再加载过程中的弹性模量(GPa)；$\sigma_{un}$ 和 $\varepsilon_{un}$ 为初始卸载点对应的应力(MPa)和应变值；$\varepsilon_z$ 为混凝土卸载至零应力点时的残余应变。以上变量依次对应图 6 中变量 $E_{unl}$、$\sigma_{unl}$、$\varepsilon_{unl}$ 和 $\varepsilon_{pl}$。

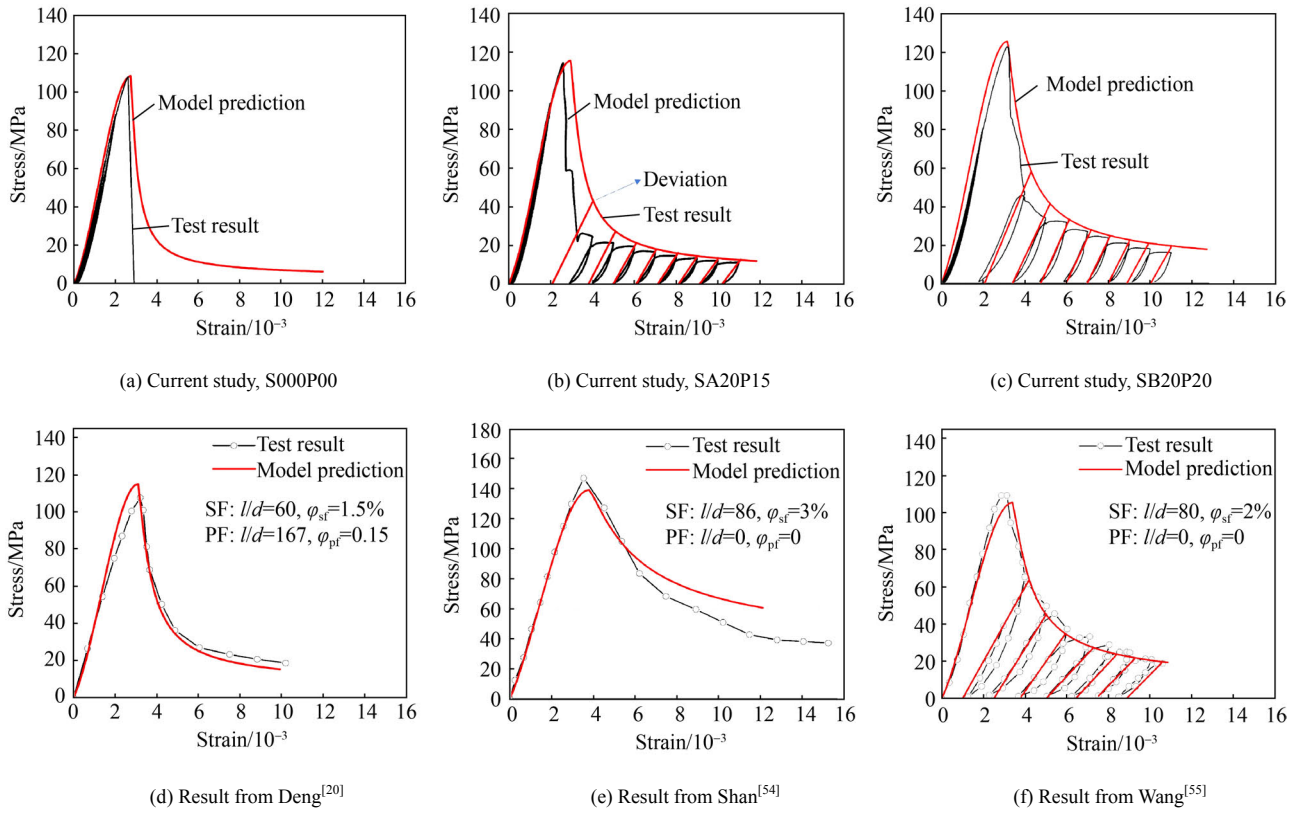
3) 模型验证

结合以上包络线模型和卸载及再加载模型，对各试验组进行模型有效性验证，结果见图 12。可以看出，SA20P15 试验组曲线的第 1 个加卸载循环的拟合结果误差较大，这是由于基体混凝土内纤维的体积掺量和长径比水平较低导致纤维的桥接能力有限，在峰值点附近宏观裂缝快速扩展连结时应力–应变曲线难以按照模型的预测平缓地发展，产生一定程度的曲线陡降。但随着基体内钢–聚丙烯纤维的体积掺量和长径比的提高，模型的预测误差逐渐减小(SB20P20)。当模型中纤维特征参数 $\lambda_{sf}$ 和 $\lambda_{pf}$ 为零时，可以退化得到不掺纤维的 UHPC(S000P00)的应力–应变曲线，表明无纤维 UHPC 在达到峰值点后应力很快衰减至较低水平。此外，参考邓芳茜等[20]研究中 SP-UHPC 单轴受压应力–应变曲线验证当前包络线模型的正确性。参考单波[54]、Wang 等[55]关于 UHPC 单轴、循环受压的研究结果，将 $\lambda_{pf}$=0 代入提出的本构模型中，发现模型预测结果仍然良好，说明提出的本构模型也可用于掺入单一钢纤维的 UHPC 的拓展计算。

综上所述，当前循环受压模型虽然简化了加卸载过程非线性的计算，但可以清晰地展示混凝土的刚度退化过程，较好地预测了循环受压下 SP-UHPC 的应力–应变行为，可以为工程设计和结构非线性分析提供依据。

## 4 结论

1) 掺入钢–聚丙烯混杂纤维可以有效提高 UHPC 力学性能。与单一纤维 UHPC 相比，随着钢-聚丙烯混杂纤维体积掺量和长径比的增加，SP-UHPC 的峰值应力、峰值应变、弹性模量和受压韧性指数最大提高 21.8%、29.9%、21.4%和 398.4%。掺入钢–聚丙烯混杂纤维可以明显改善 UHPC 脆性，随着混杂纤维掺量和长径比的增加，SP-UHPC 破坏模式由劈裂破坏转变为剪切破坏，表现出明显的延性破坏特征。




(a) Current study, S000P00　(b) Current study, SA20P15　(c) Current study, SB20P20

(d) Result from Deng[20]　(e) Result from Shan[54]　(f) Result from Wang[55]

图 12　模型预测结果

Fig. 12　Fitting results of the proposed model

2) 掺入钢–聚丙烯混杂纤维不仅可以改善基体 UHPC 力学性能，而且能够抑制基体 UHPC 的刚度退化。随着钢–聚丙烯混杂纤维的掺量和长径比提高，SP-UHPC 的刚度退化速率明显减缓。其中钢纤维起主要作用，聚丙烯纤维由于对宏观裂缝的抑制作用较小，对刚度退化行为影响有限。此外，钢–聚丙烯混杂纤维的掺入对 SP-UHPC 塑性应变累积过程无明显影响。

3) 与现行规范相衔接，提出了 SP-UHPC 单轴循环受压下的应力–应变关系数学模型。该模型可以很好地预测 SP-UHPC 循环受压下的应力–应变行为。模型可退化预测单一纤维 UHPC 的应力–应变响应，为 UHPC 实际工程设计和分析提供参考。

**参考文献**:

[1] ZHONG H, ZHANG M. Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres[J]. J Clean Prod, 2020, 259: 120914.

[2] 于泳, 朱涵, 朱学超, 等. 玄武岩纤维混凝土抗冲击性能研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S2): 354–358.
YU Yong, ZHU Han, ZHU Xuechao, et al. J Build Struct (in Chinese), 2015, 36(S2): 354–358.

[3] 连筱钦. 超高韧性混凝土短柱抗震性能研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2019.
LIAN Xiaoqin. Study on Seismic Performance of Ultra-High Toughness Concrete Short Columns (in Chinese, dissertation). Xiamen: Huaqiao University, 2019.

[4] 张文华, 张仔祥, 刘鹏宇, 等. 多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1155–1167.
ZHANG Wenhua, ZHANG Zixiang, LIU Pengyu, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1155–1167.

[5] YOO D, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cem Concr Compos, 2016, 73: 267–280.

[6] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1–24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. J Fuzhou Univ (in Chinese), 2014, 31(3): 1–24.

[7] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way[J]. ACI Mater J, 2011, 108(1): 46–54.

[8] SHEN X, BRÜHWILER E. Influence of local fiber distribution on tensile behavior of strain hardening UHPFRC using NDT and DIC[J]. Cem Concr Res, 2020, 132: 106042.

[9] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S. Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Concr Int, 2011, 33(9): 35–41.

[10] LIU J, JIA Y, WANG J. Experimental study on mechanical and durability properties of glass and polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Fibers Polym, 2019, 20(9): 1900–1908.

[11] AFROUGHSABET V, OZBAKKALOGLU T. Mechanical and

durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers[J]. Constr Build Mater, 2015, 94: 73–82.

[12] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading[J]. Cem Concr Compos, 2014, 48: 53–66.

[13] WU Z, SHI C, WEN H, et al. Uniaxial compression behavior of ultra-high performance concrete with hybrid steel fiber[J]. J Mater Civ Eng, 2016, 28(12): 06016017.

[14] TSIOULOU O, LAMPROPOULOS A, PASCHALIS S. Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)[J]. Constr Build Mater, 2017, 131: 66–77.

[15] 杨兆鹏. 活性粉末混凝土的力学性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2008.
YANG Zhaopeng. Study on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian Jiaotong University, 2008.

[16] 闫光杰. 200 MPa 级活性粉末混凝土(RPC200)的破坏准则与本构关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
YAN Guangjie. Study on the Failure Criterion and Constitutive Relation of 200 MPa Grade Reactive Powder Concrete (RPC200) (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.

[17] 吴有明. 活性粉末混凝土受压应力-应变全曲线研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
WU Youming. Study of the Reactive Powder Concrete (RPC) about Compressive Stress-strain Curve (in Chinese, dissertation). Guangzhou: Guangzhou University, 2012.

[18] 黄政宇, 谭彬. 活性粉末钢纤维混凝土受压应力-应变全曲线的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007(5): 415–420.
HUANG Zhengyu, TAN Bin. J China Three Gorges Univ: Nat Sci (in Chinese), 2007(5): 415–20.

[19] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
MA Yafeng. Study on Constitutive Relationship of 200MPa Reactive Powder Concrete under Uniaxial Compression (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.

[20] DENG F, XU L, CHI Y, et al. Effect of Steel-polypropylene Hybrid Fiber and Coarse Aggregate Inclusion on the Stress-strain Behavior of Ultra-high Performance Concrete under Uniaxial Compression[J]. Compos Struct, 2020, 252: 112685.

[21] LI B, CHI Y, XU L, et al. Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 191: 80–94.

[22] 杨萌, 黄承逵. 钢纤维高强混凝土轴拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006(3): 55–61.
YANG Meng, HUANG Chengkui. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2006(3): 55–61.

[23] 崔涛, 何浩祥, 闫维明, 等. 混杂纤维混凝土单轴受压本构模型[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(10): 967–977.
CUI Tao, HE Haoxiang, YAN Weiming, et al. J Beijing Univ Technol (in Chinese), 2019, 45(10): 967–977.

[24] 李建闯, 池寅, 李彪, 等. 单轴循环受拉条件下 SP-HFRC 力学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报. 2019, 17(6): 137–145.
LI Jianchuang, CHI Yin, LI Biao, et al. J Water Resour Archit Eng (in Chinese), 2019, 17(6): 137–145.

[25] 焦楚杰, 詹镇峰, 彭春元, 等. 混杂纤维混凝土抗压试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2007, 6(4): 70–73.
JIAO Chujie, ZHAN Zhenfeng, PENG Chunyuan, et al. J Guangzhou Univ:Nat Sci Ed (in Chinese), 2007, 6(4): 70–73.

[26] 徐礼华, 梅国栋, 黄乐, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 35–45.
XU Lihua, MEI Guodong, HUANG Le, et al. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2014, 47(7): 35–45.

[27] 梅国栋, 徐礼华, 鲁维妙, 等. 纤维掺量对混杂纤维混凝土轴心抗拉性能的影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(6): 752–758.
MEI Guodong, XU Lihua, LU Weimiao, et al. Eng J Wuhan Univ (in Chinese), 2013, 46(6): 752–758.

[28] LI B, XU L, CHI Y, et al. Experimental investigation on the stress-strain behavior of steel fiber reinforced concrete subjected to uniaxial cyclic compression[J]. Constr Build Mater, 2017, 140: 109–118.

[29] 张元元. 钢—聚丙烯混杂纤维混凝土单轴受压本构关系与受拉性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
ZHANG Yuanyuan. Study on Uniaxial Compressive Constitutive Relationship and Uniaxial Tensile Behavior of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University, 2010.

[30] KANG S, CHOI J, KOH K, et al. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Compos Struct, 2016, 145: 37–42.

[31] SMARZEWSKI P, BARNAT-HUNEK D. Property Assessment of Hybrid Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete[J]. Int J Civ Eng, 2018, 16(6): 593–606.

[32] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1274–1280.
DENG Zongcai. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2016, 33(6): 1274–1280.

[33] 郑七振, 刘阳阳, 龙莉波. 超高性能混凝土连接的装配式 现浇混凝土框架抗震性能[J]. 工业建筑, 2019, 49(10): 85–91.
ZHENG Qizhen, LIU Yangyang, LONG Libo, et al. Ind Constr (in Chinese), 2019, 49(10): 85–91.

[34] 卢秋如, 徐礼华, 池寅. 钢管约束超高性能混凝土受压本构模型[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1201–1211.
LU Qiuru, XU Lihua, CHI Yin, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1201–1211.

[35] 徐礼华, 李彪, 池寅. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土单轴循环受压应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 140–152.
XU Lihua, LI Biao, CHI Yin, et al. J Build Struct(in Chinese),2018, 39(4): 140–152.

[36] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1145–1154.

[37] WANG X, YU R, SONG Q, et al. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density[J]. Cem Concr Res, 2019, 126: 105921.

[38] 中国国家标准化管理委员会. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[39] 胡翱翔, 梁兴文, 于婧. 超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2018, 45(9): 30–37.
HU Aoxiang, LIANG Xingwen, YU Jing, et al. J Hunan Univ (in Chinese), 2018, 45(9): 30–37.

[40] 安明喆, 杨志慧, 余自若. 活性粉末混凝土抗拉性能研究[J]. 铁道

学报, 2010, 32(1): 54–58.
AN Mingzhe, YANG Zhihui, YU Ziruo, et al. J China Railway Soc (in Chinese), 2010, 32(1): 54–58.

[41] 中国国家标准化管理委员会. GBT31387-2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[42] 钟光淳, 周颖, 肖意. 钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土单轴受力应力-应变曲线研究[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 111–120.
ZHONG Guangchun, ZHOU Ying, XIAO Yi, et al. Eng Mech (in Chinese), 2020, 37(S1): 111–120.

[43] 高丹盈, 赵利梅, 王四巍. 塑性混凝土弹性模量的计算方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(4): 15–17.
GAO Danying, ZHAO Limei, WANG Siwei, et al. J Zhengzhou Univ (in Chinese), 2009, 30(4): 15–17.

[44] 崔涛, 何浩祥, 闫维明, 等. 混杂纤维水泥基复合材料受压损伤本构模型及试验验证[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3413–3418.
CUI Tao, HE Haoxiang, YAN Weiming, et al. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(20): 3413–3418.

[45] BRECCOLOTTI M, BONFIGLI M F, D ALESSANDRO A, et al. Constitutive modeling of plain concrete subjected to cyclic uniaxial compressive loading[J]. Constr Build Mater, 2015, 94: 172–180.

[46] DUANE E O A A. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic Loading[J]. ACI Mater J, 1988, 85(4): 64–68.

[47] NEUENSCHWANDER M, KNOBLOCH M, FONTANA M. Suitability of the damage-plasticity modelling concept for concrete at elevated temperatures: Experimental validation with uniaxial cyclic compression tests[J]. Cem Concr Res, 2016, 79: 57–75.

[48] ABBASNIA R, ZIAADINY H. Behavior of concrete prisms confined with FRP composites under axial cyclic compression[J]. Eng Struct, 2010, 32(3): 648–655.

[49] BAHN B Y, THOMAS H C. Stress-Strain Behavior of Concrete under Cyclic Loading[J]. ACI Mater J, 1998, 95: 178–193.

[50] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982(1): 1–12.
GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. J Build Struct (in Chinese), 1982(1): 1–12.

[51] LI B, CHI Y, XU L, et al. Cyclic tensile behavior of SFRC: Experimental research and analytical model[J]. Constr Build Mater, 2018, 190: 1236–1250.

[52] 韩嵘, 赵顺波, 曲福来. 钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006(11): 63–67.
HAN Rong, ZHAO Shunbo, QU Fulai, et al. Chin Civ Eng J(in Chinese), 2006(11): 63–67.

[53] 徐礼华, 黄彪, 李彪, 等. 循环荷载作用下聚丙烯纤维混凝土受压应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 1–12.
XU Lihua, HUANG Biao, LI Biao, et al. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2019, 52(4): 1–12.

[54] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2002.
SHAN Bo. Experiment on Basic Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2002.

[55] WANG S, XU L, YIN C, et al. Experimental investigation on the damage behavior of ultra-high performance concrete subjected to cyclic compression[J]. Compos Struct, 2021(267): 113855.