第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200047

基于能量转化原理的混杂纤维混凝土本构行为

傅 强[1]，赵 旭[1]，何嘉琦[1]，张兆瑞[1]，曾晓辉[2]，牛丽坤[3]，王 艳[4]

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院，西安 710055；2. 中南大学土木工程学院，长沙 410075；3. 中国中铁一局集团有限公司，西安 710055；4. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院，西安 710055)

摘 要：研究了不同基体强度的混杂玄武岩–聚丙烯纤维增强混凝土(HBPRC)的本构行为，分析了玄武岩纤维(BF)、聚丙烯纤维(PF)对混凝土本构行为、能量转化关系的影响，建立了 HBPRC 的本构模型。结果表明：合适掺量的 BF 和 PF 均有利于提高混凝土延性变形和强度，但对混凝土弹性模量的影响较为复杂；BF 和 PF，尤其是两者混杂，显著降低了混凝土的弹性应变能释放速率，增大了混凝土的耗散能，从而提高了混凝土的延性和韧性。与 PF 相比，BF 较有利于提高混凝土的强度，而 PF 主要抑制混凝土宏观裂缝的扩展与贯通。基于统计损伤理论和耗散能，建立了 HBPRC 的本构模型。

关键词：玄武岩纤维；聚丙烯纤维；弹性应变能；耗散能；本构模型
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1670–13
网络出版时间：2021–06–17

Constitutive Response of Hybrid Basalt-polypropylene Fiber-reinforced Concrete Based on Energy Conversion Principle

FU Qiang[1], *ZHAO Xu*[1], *HE Jiaqi*[1], *ZHANG Zhaorui*[1], *ZENG Xiaohui*[2], *NIU Likun*[3], *WANG Yan*[4]

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. China Railway first Group Co., Ltd, Xi'an 710054, China; 4. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The constitutive behavior of hybrid basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete (HBPRC) with different matrix strengths was investigated. The influences of basalt fiber (BF) and polypropylene fiber (PF) on the constitutive behavior and energy conversion relationship of the concrete were analyzed. The results show that the addition of BF and PF with an appropriate content can improve the ductility and strength of the concrete, but the influence of BF and PF on the elastic modulus is more complicated. In addition, the presence of BF and PF, especially their mixtures, significantly reduces the elastic strain energy release rate, increases the dissipation energy and thus improves the ductility and toughness of the concrete. Comparatively, BF is more conducive to improve the strength of the concrete, while PF mainly inhibits the expansion and penetration of macro-cracks in the concrete. Based on the statistical damage theory and dissipation energy, a constitutive model of HBPRC was proposed.

Keywords: basalt fiber; polypropylene fiber; elastic strain energy; dissipation energy; constitutive model

混凝土材料具有较高的脆性、较低的变形性能和抗拉性能，从而导致其在服役过程中易开裂，严重影响混凝土结构的耐久性能。目前，掺加纤维是国际上比较认可的能够有效降低混凝土材料脆性、提高混凝土材料韧性的方法之一。特别是不同类型或不同尺寸纤维的混杂掺加，可在不同结构尺度上抑制混凝土裂缝的萌生和扩展，显著提高混凝土的韧性和抗裂性[1–7]。

玄武岩纤维(BF)是由玄武岩石经高温、熔融拉丝制成。BF 的制备过程消耗的能量较低，其弹性模

收稿日期：2021–01–15。　修订日期：2021–02–08。
基金项目：国家自然科学基金重大项目(51590914)；国家自然科学基金面上项目(51878549，52078414)。
第一作者：傅 强(1984—)，男，博士，副教授。

Received date: 2021–01–15.　**Revised date:** 2021–02–08.
First author: FU Qiang (1984–), male, Ph. D., Associate Professor.
E-mail: fuqiangcsu@163.com

量可达 93~115 GPa、抗拉强度可达 200~5 000 MPa。因此，BF 是一种绿色、高性能纤维，且其与水泥基材料具有较好的粘结性能[8–11]。聚丙烯纤维(PF)是一种柔性纤维，具有较高的变形性能，但其弹性模量和抗拉强度相对较低。当掺入混凝土中时，PF 可有效抑制混凝土宏观裂缝的扩展，提高混凝土的延性[12–15]。因此，当将不同尺寸和不同力学性能的 BF 与 PF 混杂掺入混凝土中时，两者可在不同结构尺度发挥裂缝桥联作用，有效抑制混凝土裂缝的扩展，提高混凝土的韧性。

目前，关于混杂玄武岩–聚丙烯纤维增强混凝土(HBPRC)力学性能的研究主要集中在混杂 BF 与 PF 对混凝土抗压强度、抗折强度、劈拉强度等基本力学指标以及抗冲击性能的影响方面。Li 等[16]研究了混杂 BF 与 PF 对混凝土抗压强度、剪切强度和劈拉强度的影响，发现在合适的掺量条件下，混杂 BF 与 PF 对混凝土抗压强度的影响较小，但却提高了混凝土的剪切强度和劈拉强度。Smarzewski 等[17]研究了混杂 BF 与 PF 增强高性能混凝土的断裂性能，发现合适掺量的混杂 BF 和 PF 可提高高性能混凝土的抗折强度和抗折韧性。Zhang 等[18]研究了混杂 BF 与 PF 对混凝土静态抗压强度和抗冲击性能的影响，发现混杂 BF 与 PF 对混凝土抗压强度的提升作用有限，但却有效提高了混凝土的抗冲击性能，与 Fu 等[19–20]的研究结果一致。在 HBPRC 本构行为的研究方面，Li 等[16]和 Wang 等[21]的研究结果均表明混杂 BF 与 PF 均能提高混凝土的延性变形，但对混凝土抗压强度的影响结果却不一致，这可能与混凝土的基体强度和纤维掺量的不同有关。综上所述，目前对 HBPRC 力学性能的研究成果还不够系统，并未形成较为一致的结论，尤其是关于 HBPRC 本构行为的研究成果还十分有限，且多集中于基体强度较高(大于 C60)的 HBPRC，更是未见从能量转化角度研究 BF 与 PF 对混凝土本构行为影响的成果。另外，HBPRC 本构模型的研究成果也较为匮乏。因此，为有效推动 HBPRC 在工程结构中的应用，需对不同强度等级 HBPRC 的本构行为及本构模型进行系统研究。

系统研究了混杂 BF 与 PF 对不同强度等级混凝土本构行为的影响，分析了 BF 与 PF 单掺及混杂对混凝土抗压强度、弹性模量的影响，然后从能量转化角度探讨了 BF 与 PF 对混凝土受压破坏过程中能量储存与耗散的影响，并进一步揭示了 BF 与 PF 的作用机理。最后基于统计损伤理论建立了 HBPRC 的本构模型。

1　实验

1.1　原材料与配合比

水泥为 P·O 42.5R 硅酸盐水泥，28 d 抗压强度为 48.6 MPa，比表面积为 334 m^2/kg，密度为 3.05 g/cm^3，烧失量为 2.79%。矿物掺合料主要包括硅灰、粉煤灰和矿渣粉，其化学组成和物理性能如表 1 所示。细骨料为河砂，最大颗粒尺寸不超过 4.75 mm，细度模数为 2.8。粗骨料为机械破碎石灰石，颗粒尺寸为 5~20 mm，表观密度为 2.7 g/cm^3。水为可饮用自来水。减水剂为减水率为 30%的聚羧酸高效减水剂。BF 与 PF 均为单丝束装形貌。BF 呈暗铜色，PF 呈银白色，如图 1 所示。BF 的长度、直径、密度、抗拉强度和弹性模量分别为 18 mm、15 μm、2.56 g/cm^3、4 500 MPa 和 75 000 MPa；PF 的对应指标分别为 19 mm、30 μm、0.91 g/cm^3、270 MPa 和 3 000 MPa。

HBPRC 的配合比如表 2 所示。基准组混凝土强度等级分别为 C30 和 C50。为对比单掺纤维和混杂纤维以及不同混杂纤维掺量对混凝土本构行为的影响，在每一基准组混凝土的基础上又设计了 4 种纤维掺加模式。其中，OC、BC、PC、HBPC 分别代表基准组混凝土、单掺 BF 混凝土、单掺 PF 混凝土和掺加混杂 BF 与 PF 混凝土。当 BF 与 PF 混杂掺加时，两者掺量相等。30 和 50 分别代表基准组混凝土强度等级 C30 和 C50；0.1 和 0.2 代表纤维的百分比体积掺量。例如，HBPC-30-0.1 代表基体强度为 C30、混杂纤维体积掺量为混凝土体积 0.1%的 HBPRC。

表 1　矿物掺合料的化学组成与物理性能

Table 1　Chemical composition and physical properties of admixtures

Material	Mass fraction/%									Density/($g\cdot cm^{-3}$)	Specific surface area/($m^2\cdot kg^{-1}$)	28 d active index/%
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Other	Water	Ignition loss			
Silica fume	1.63	85.04	0.97	1.04	0.32		10.00	0.06	5.48	2.10	23 000	131
Fly ash	21.14	35.71	16.57	8.92	1.41	1.94	12.49	0.20	2.85	2.35	340	97
Slag	34.11	34.65	14.21	0.49	11.15	1.00	3.74	0.70	0.30	2.86	410	104



(a) BF (b) PF

图 1 BF 与 PF 的表观形貌

Fig. 1 Morphology of basalt fibre and polypropylene fibre

表 2 HBPRC 的配合比

Table 2 Mixture proportion of HBPRC kg/m^3

Mixture	BF	PF	Cement	Water	Silica fume	Fly ash	Slag	Sand	Coarse aggregate	Water reducer
OC-30			234.2	161	22	73.2	36.6	683.0	1 162.9	3.66
BC-30-0.1	2.56									
PC-30-0.1		0.910								
HBPC-30-0.1	1.28	0.455								
HBPC-30-0.2	2.56	0.910								
OC-50			333.1	140	29	48.3	72.4	774.1	1 026.1	4.83
BC-50-0.1	2.56									
PC-50-0.1		0.910								
HBPC-50-0.1	1.28	0.455								
HBPC-50-0.2	2.56	0.910								

1.2 试件制备

为提高纤维的分散均匀性，需适当延长 HBPRC 混合料的搅拌时间。搅拌时，粗、细骨料首先混合搅拌 30 s。然后将水泥与矿物掺合料加入搅拌机中，并继续搅拌 2 min。掺加纤维时，依次将 PF 和 BF 加入搅拌机中，并分别搅拌 3 min 和 2 min。最后将预先搅拌均匀的水和减水剂加入搅拌机中，并搅拌 2 min。搅拌均匀后，迅速将 HBPRC 混合料加入尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体模具中，并用振动台振捣密实。在常温室内环境中放置 24 h 后，试件拆模，并将试件放入温度为(20±2) ℃、相对湿度大于 95%的标准养护室中养护至 28 d。

1.3 应力–应变关系测试

采用英国英斯特朗公司生产的 Instron 万能材料试验机测试 HBPRC 试件的应力–应变关系。正式加载前，首先在试件两端面撒一层滑石粉，以降低试件端面与加载压盘间的端阻摩擦效应。然后以 0.01 mm/min 的加载速度加载至试件峰值强度的 10%左右，再卸载。加卸载反复 3 次后可使试件与加载压盘接触紧密。正式加载的加载速度为 0.1 mm/min (约为 5.56×10^{-6}/s)。HBPRC 试件的纵向变形采用 LVDT 位移传感器进行采集，荷载由计算机自动采集。每组测试 5 个试件，结果相近的 3 个试件的平均值作为本组试件的最终应力–应变试验结果。

1.4 BF 与 PF 的损伤形貌观测

为观测 HBPRC 试件破坏后 BF 和 PF 的损伤形貌，以分析 BF 与 PF 对混凝土本构行为和能量耗散的不同作用机制。取 HBPRC 试件破坏后、尺寸约为 5 mm、表面较为平整的碎片，用导电胶将碎片粘贴在铜盘上。喷金后，采用 ZEISS Gemine SEM 500 场发射扫描电子显微镜对碎片进行扫描观测。

2 能量转化原理

能量转化是物质物理过程的本质特征[22]。HBPRC 在荷载作用下的变形破坏过程实质上就是 HBPRC 内部能量演化并与外界进行能量交换的过程。随着荷载的持续作用，外界输入的能量逐渐转化为 HBPRC 试件的弹性应变能、耗散能、电磁能、

辐射能等。由于在静力作用下，电磁能与辐射能所占比例极小，因此 HBPRC 试件在荷载作用下的主要能量转化关系为

$$U=U_{\mathrm{e}}+U_{\mathrm{d}} \tag{1}$$

式中：U 为外力输入的单位体积总应变能，MPa；U_{e} 为储存在 HBPRC 试件内的单位体积弹性应变能，MPa；U_{d} 为由 HBPRC 试件的损伤发展产生的单位体积耗散能，MPa。

根据单轴压缩应力–应变关系，单位体积 HBPRC 试件的外力输入总应变能为

$$U=\int \sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{2}$$

式中：σ 为 HBPRC 试件的轴向应力，MPa；ε 为 HBPRC 试件的轴向应变。

通常情况下，混凝土材料在单轴荷载作用下各能量的关系可由循环加卸载试验求得，如图 2 所示。本实验假设 HBPRC 试件的未损伤部分与损伤部分相互独立。由于弹性模量表征材料未损伤部分的抗变形能力，因此 HBPRC 试件的循环加卸载试验得到的平均弹性模量近似等于 HBPRC 试件的初始弹性模量[23]。BPRC 试件的单位体积弹性应变能和单位体积耗散能为

$$U_{\mathrm{e}}=\frac{\sigma^2}{2E} \tag{3}$$

$$U_{\mathrm{d}}=\int \sigma \mathrm{d}\varepsilon-\frac{\sigma^2}{2E} \tag{4}$$

式中：E 为 HBPRC 试件的初始弹性模量，MPa。由于在正式加载前已对 HBPRC 试件进行了反复加卸载预压，HBPRC 试件内部的初始缺陷已发生一定程度的闭合，因此取 E 为 HBPRC 试件应力–应变曲线初始阶段峰值应力的 10%和 30%之间直线的斜率。

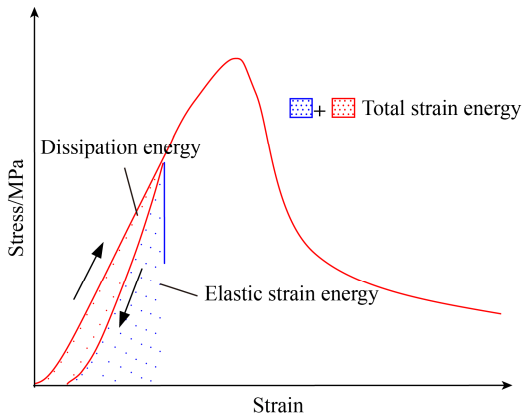


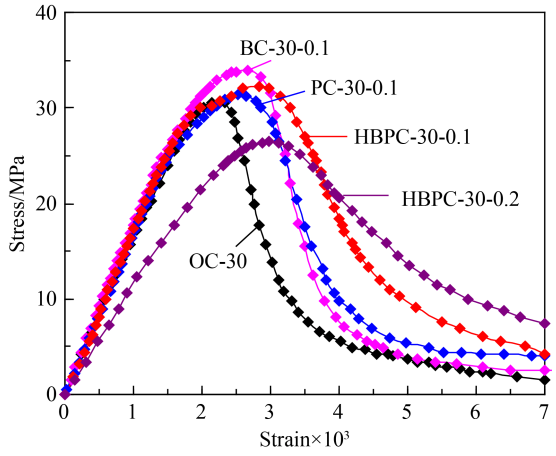
图 2　加载过程的能量转化关系

Fig. 2　Energy conversion relationship in loading process

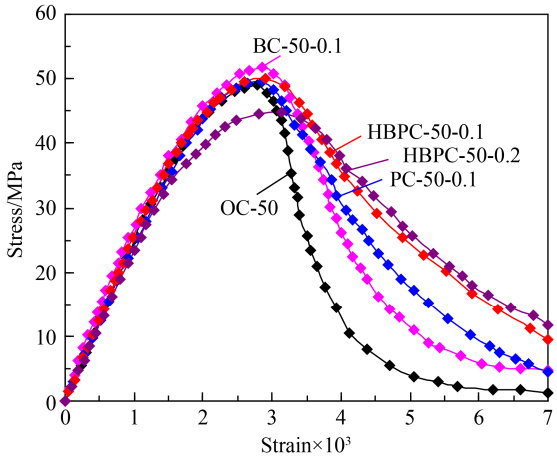
3　结果与讨论

3.1　应力–应变曲线

HBPRC 的应力–应变曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出，当基体强度相同时，随着 BF 和 PF 的掺加，混凝土应力–应变曲线的整体形态发生明显变化。当纤维体积掺量为 0.1%时，纤维掺加对应力–应变曲线峰值应力前线弹性变形阶段的影响较小，但却明显提高了应力–应变曲线峰值应力后应力的降低速率，即提高了混凝土延性变形。通过对比可以发现，当单掺 BF 或 PF 时，虽然 HBPRC 的抗压强度对应的应变差异较小，但 BF 对混凝土强度的提高作用大于 PF。而当达到相同的峰后应变时，单掺 BF 混凝土的强度却略小于单掺 PF 混凝土，表明单掺 PF 混凝土的延性变形性能略大于单掺 BF 混凝土，即 PF 对混凝土延性变形的提高作用略大于 BF，而混杂 BF 与 PF 对混凝土延性变形的提升作用最



(a) C30



(b) C50

图 3　HBPRC 的应力–应变曲线

Fig. 3　Stress–strain curves of HBPRC

大。当混杂纤维体积掺量为 0.2%时，应力–应变曲线峰值应力前线弹性变形阶段的斜率减小，而混凝土的延性变形显著增大。混杂纤维体积掺量过大，纤维在混凝土基体内的分散均匀性降低，容易出现堆叠、聚集，且在搅拌过程中容易引入气泡，导致混凝土内部缺陷增多，抗变形性能降低。

对于不同基体强度的 HBPRC，随着基体强度的增大，纤维对应力–应变曲线峰值应力前线弹性变形阶段的影响减小。对于基准组混凝土，随着基体强度的增大，应力–应变曲线峰值应力后应力降低速率增大，脆性破坏特征增大。但随着纤维的掺加，基体强度对混凝土脆性破坏特征的影响明显减小，进一步表明 BF 和 PF 有利于提高混凝土的延性变形。

图 4 为 HBPRC 的抗压强度随纤维体积掺量、类型和基体强度的变化规律。由图 4 可以看出，对于不同基体强度的混凝土，纤维的类型、体积掺量对混凝土抗压强度的影响规律一致。当纤维体积掺量为 0.1%时，与基准组混凝土相比，BC-30-0.1 和 BC-50-0.1 的抗压强度分别提高了 9.99%和 5.53%，PC-30-0.1 和 PC-50-0.1 的抗压强度分别提高了 1.68%和 1.25%，HBPC-30-0.1 和 HBPC-50-0.1 的抗压强度分别提高了 4.92%和 2.00%。由此可见，与 PF 相比，BF 更有利于提高混凝土的抗压强度，而混杂 BF 与 PF 对混凝土抗压强度的提升作用介于两者之间，并没有呈现出明显的混杂协同效应[24]。

BF 属于亲水性纤维，与混凝土基体间的粘结性能较好。而 PF 属于疏水性纤维，与混凝土基体间的粘结性能相对较弱[25–26]。Cui 等[27]和宣卫红等[28]分别研究了 BF 和 PF 与组分相似的水泥砂浆之间的粘结性能，发现 BF 与水泥砂浆之间的粘结强度大于 3 MPa，而 PF 与水泥砂浆之间的粘结强度只有 0.1~0.2 MPa，充分证明了 BF 与水泥基材料之间具有更好的粘结性能。此外，当体积掺量相同时，由于 BF 的单丝直径远小于 PF，因此 BF 的单丝数量远大于 PF，从而造成 BF 对混凝土抗压强度的提升作用大于 PF。当混杂 BF 与 PF 体积掺量过大时，混凝土内部缺陷增多，抗压强度减小。与基准组混凝土相比，HBPC-30-0.2 和 HBPC-50-0.2 的抗压强度分别降低了 13.92%和 8.66%。

HBPRC 的弹性模量随纤维体积掺量、类型和基体强度的变化规律如图 5 所示。由于弹性模量代表材料初始无损伤阶段的抗变形能力，此时混凝土内部缺陷还未发展，纤维的桥联作用并未得到体现。因此，BF 与 PF 对混凝土弹性模量的影响与对抗压强度的影响并不一致。当纤维体积掺量为 0.1%时，与基准组混凝土相比，BC-30-0.1 和 BC-50-0.1 的弹性模量分别提高了 9.28%和 17.79%，PC-30-0.1 和 PC-50-0.1 的弹性模量却分别降低了 4.36%和 1.44%，HBPC-30-0.1 和 HBPC-50-0.1 的弹性模量分别提高了 1.19%和 3.80%。BF 与 PF 对混凝土在硬化过程中的收缩开裂均有抑制作用[29–30]。因此，BF 的掺加有利于降低混凝土内部的初始缺陷，且 BF 本身刚度较大，混凝土弹性模量增大。PF 与混凝土基体间的粘结性能较弱，且其本身刚度较小，混凝土弹性模量降低。过量的混杂 BF 与 PF 增大了混凝土内部缺陷，降低了混凝土的弹性模量。与基准组混凝土相比，HBPC-30-0.2 和 HBPC-50-0.2 的弹性模量分别降低了 32.80%和 5.35%。

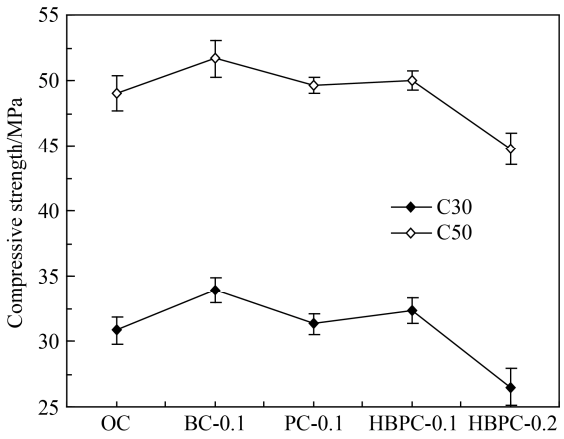


图 4 HBPRC 的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of HBPRC

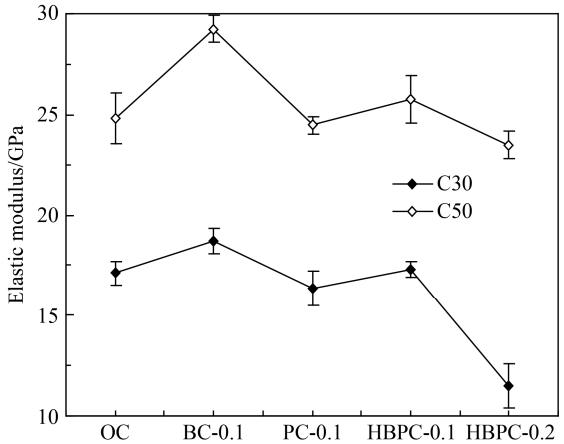


图 5 HBPRC 的弹性模量

Fig. 5 Elastic modulus of HBPRC

3.2 能量演化规律

混凝土、岩石等准脆性材料的应力–应变关系与能量的演化特征如图 6 所示[23]。由图 6 可以看出，

混凝土的能量演化特征曲线总体可分为 4 个阶段。(I) 原生裂隙闭合阶段：混凝土内的原生裂隙在初始荷载作用下发生闭合，总应变能较小。混凝土内并未形成新裂隙，耗散能较小。(II) 线弹性阶段：该阶段混凝土处于弹性变形阶段，混凝土内仍未有新生裂隙形成，所以耗散能仍较小。总应变能以弹性应变能的形式储存在混凝土内部。(III) 裂隙快速扩展阶段：此阶段混凝土内部逐渐产生新生裂隙，部分总应变能转化为耗散能，弹性应变能的增加速率降低。(IV) 裂隙贯通阶段：峰值应力后，混凝土内部的裂隙逐渐贯通，形成宏观贯通裂缝，材料破坏。此时，由于荷载逐渐降低，总应变能增加速度减小。储存在混凝土内部的弹性应变能由于裂隙的贯通以耗散能的形式耗散掉。因此，弹性应变能逐渐减小，耗散能快速增加。

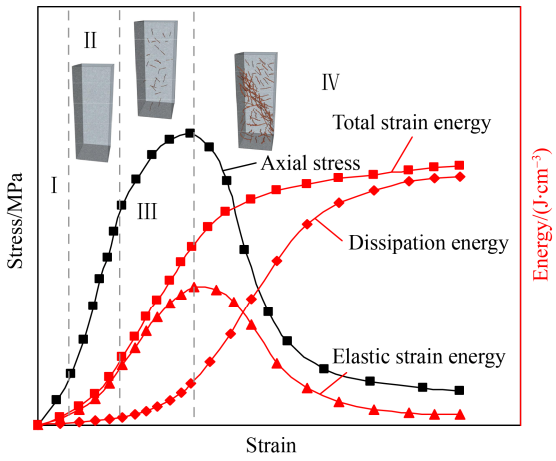
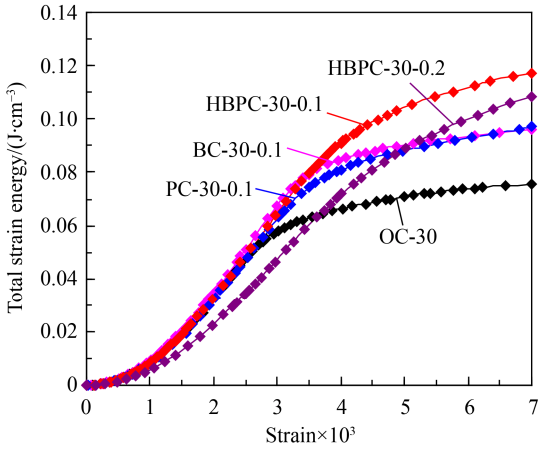


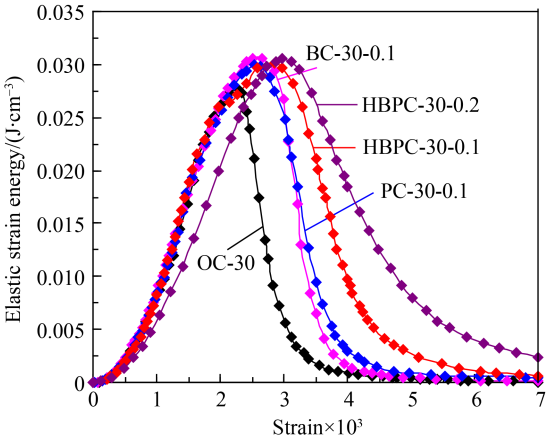
图 6　HBPRC 的能量演化特征

Fig. 6　Energy evolution characteristics of HBPRC

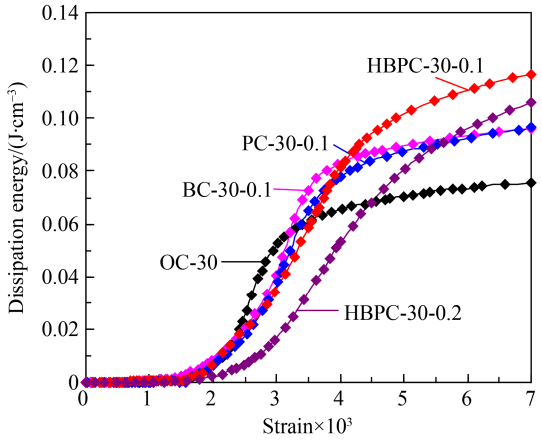
不同基体强度等级的 HBPRC 的能量演化规律如图 7 和图 8 所示(为简化表达，以下单位体积总应变能、单位体积弹性应变能、单位体积耗散能均简称为总应变能、弹性应变能和耗散能)。由图 7 和图 8 可以看出，当基体强度相同时，HBPRC 的总应变能与耗散能的变化规律相似。在初始变形阶段，当纤维体积掺量为 0.1%时，纤维对混凝土总应变能和耗散能的影响较小。但随着变形的增加，纤维的掺加明显增大了混凝土的总应变能和耗散能的增大速率。尤其是当 BF 与 PF 混杂掺加时，混凝土的总应变能和耗散能显著增大。当达到最终变形时，与基准组混凝土相比，BC-30-0.1 和 BC-50-0.1 的总应变能分别提高了 27.03%和 28.22%，耗散能分别提高了 26.93%和 27.96%；PC-30-0.1 和 PC-50-0.1 的总应变能分别提高了 27.98%和 32.84%，耗散能分别提高了 27.43%和 32.58%；HBPC-30-0.1 和 HBPC-50-0.1 的总应变能分别提高了 54.65%和 51.23%，耗散能分别提高了 54.11%和 50%。



(a) Total strain energy



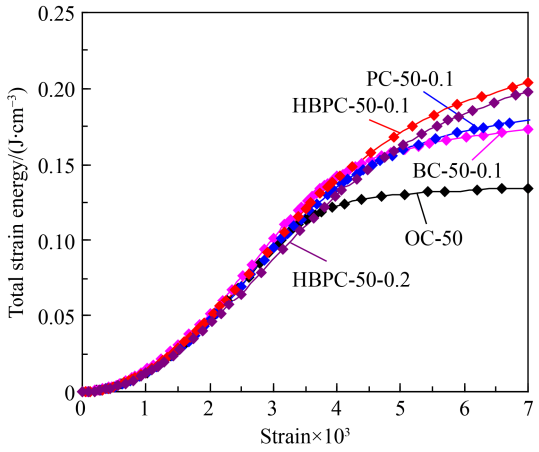
(b) Elastic strain energy



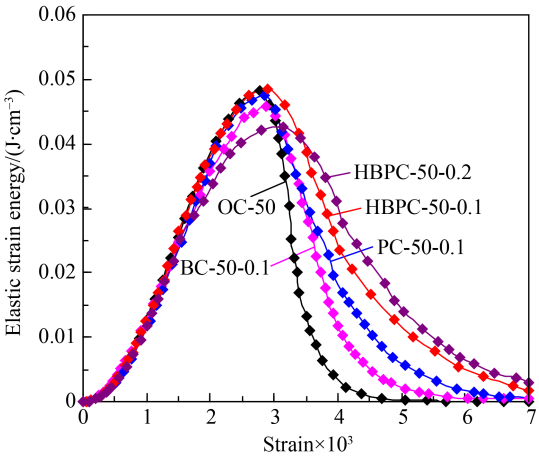
(c) Dissipation energy

图 7　强度等级为 C30 的 HBPRC 的能量演化规律

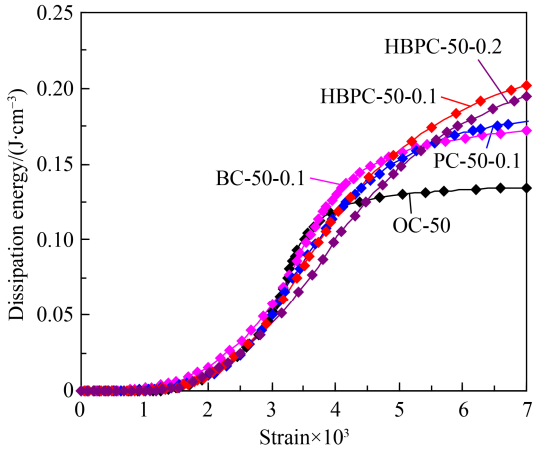
Fig. 7　Energy evolution law of HBPRC with matrix strength grade of C30



(a) Total strain energy



(b) Elastic strain energy



(c) Dissipation energy

图 8 强度等级为 C50 的 HBPRC 的能量演化规律

Fig. 8 Energy evolution law of HBPRC with matrix strength grade of C50

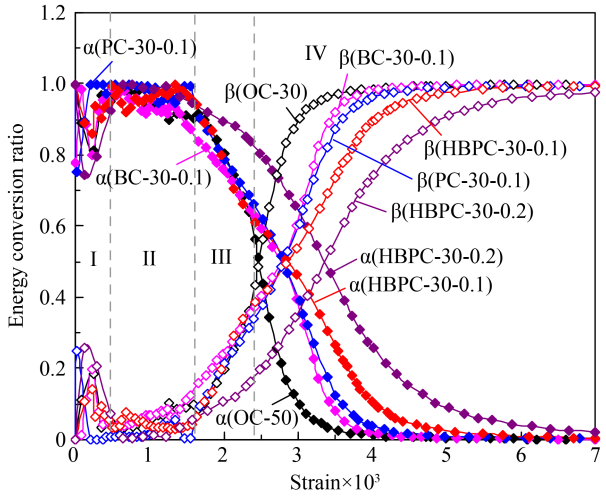
当混杂纤维体积掺量为 0.2%时，在初始变形阶段，混凝土总应变能和耗散能的增大速率相对较小。而随着变形的增大，混杂纤维体积掺量为 0.2%的混凝土总应变能和耗散能的增大速率明显增大，且在最终变形时，与基准组混凝土相比，HBPC-30-0.2 和 HBPC-50-0.2 的总应变能分别提高了 43.14%和 46.92%，耗散能分别提高了 40.13%和 44.83%，已明显大于基准组混凝土和单掺纤维混凝土，仅小于混杂纤维体积掺量为 0.1%的混凝土。

从弹性应变能的变化曲线可以看出，在峰值弹性应变能之前，纤维类型和掺量对混凝土弹性应变能变化规律的影响与对总应变能、耗散能的影响相似。而在峰值弹性应变能之后，基准组混凝土的弹性应变能迅速降低，表明裂缝贯通速度较快，脆性破坏特征明显。随着纤维的掺加，尤其是混杂纤维的掺加，弹性应变能的降低速率逐渐减小，韧性破坏特征增大，且随着混杂纤维体积掺量的增大而增大。BF 与 PF 的裂缝桥联作用抑制了裂缝的扩展速度和贯通速度，提高了混凝土的韧性破坏特征。

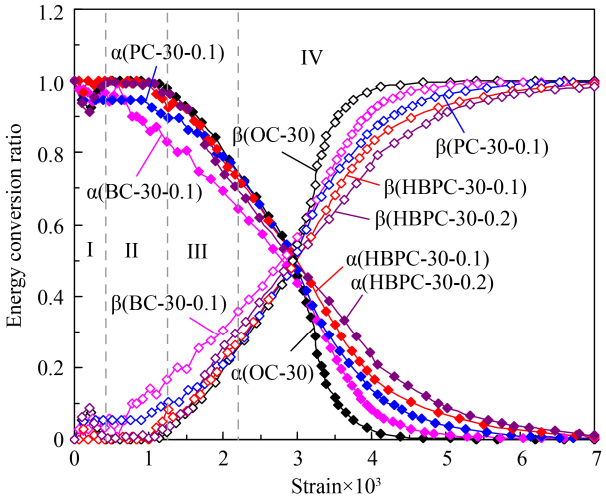
从图 7 和图 8 的对比可以看出，随着基体强度的增大，总应变能、峰值弹性应变能、耗散能逐渐增大，纤维类型与体积掺量对混凝土各能量演化特征的影响逐渐减小，表明基体强度的增加弱化了纤维对混凝土性能的影响。

以 $\alpha=U_e/U$ 代表 HBPRC 的弹性应变能转化率，以 $\beta=U_d/U$ 代表 HBPRC 的耗散能转化率。HBPRC 的能量转化率如图 9 所示。由图 9 可以看出，当基体强度相同时，在原生裂隙闭合阶段，由于裂隙的闭合摩擦消耗一定的能量，因此 HBPRC 的弹性应变能转化率减小，耗散能转化率增加。在弹性变形阶段，由于纤维的掺加增加了混凝土内部的界面。在荷载作用过程中，界面的错动、摩擦消耗一定的能量，因此，纤维的掺加降低了混凝土的弹性应变能转化率，增大了耗散能转化率。在裂隙快速扩展阶段，纤维的裂缝桥联作用，纤维的掺加降低了混凝土弹性应变能转化率的减小速率和耗散能转化率的增大速率。当达到裂隙贯通阶段，裂缝趋于贯通，纤维的限裂作用得到较大程度发挥，降低了混凝土内部的裂缝贯通速率，显著降低了混凝土弹性应变能转化率的减小速率和耗散能转化率的增大速率，增大了混凝土延性变形。

随着基体强度的增大，HBPRC 的弹性应变能转化率和耗散能转化率变化曲线的集中程度增大，进一步表明基体强度的增大弱化了纤维对混凝土性能的影响。



(a) C30



(b) C50

图 9　HBPRC 的能量转化率

Fig. 9　Energy conversion ratio of HBPRC

3.3　BF 与 PF 的作用机理

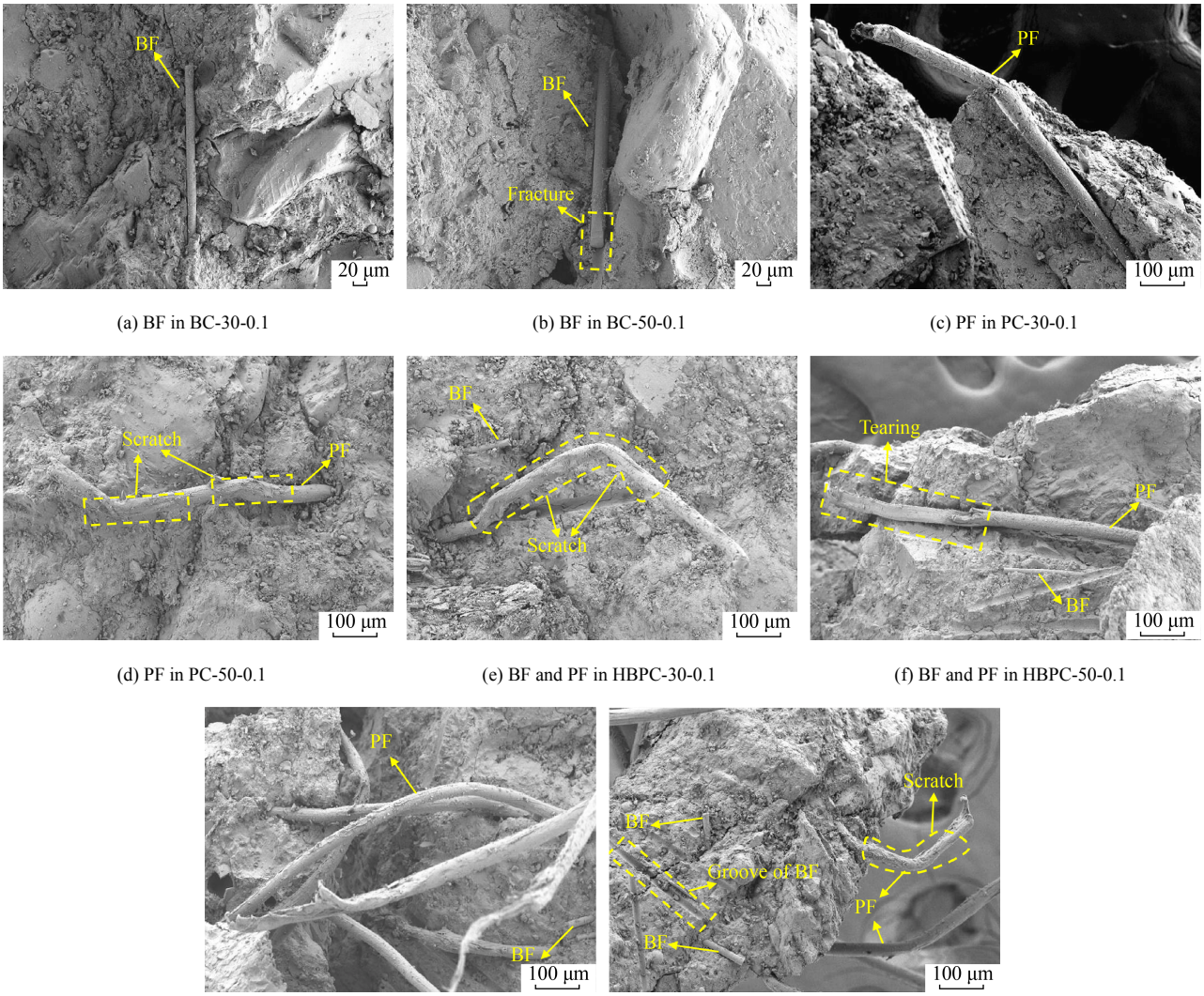
BF 与 PF 的破坏形貌如图 10 所示。当基体强度较低时，BF 的拔出长度较大，表面仅附着少量混凝土基体颗粒。当基体强度较高时，BF 的拔出长度减小，且 BF 端部具有明显的断裂痕迹。表明基体强度的增大提高了 BF 与混凝土基体间的粘结性能。对于 PF，随着基体强度的增大，PF 的拔出长度明显减小，且表面呈现明显的划痕，表明基体强度的增大也显著增大了 PF 与混凝土基体间的粘结性能。但通过对比可以发现，无论基体强度大小，PF 的拔出长度均远大于 BF。BF 属于亲水性纤维，而 PF 属于疏水性纤维，因此 BF 与混凝土基体间的粘结性能远大于 PF，导致 BF 的拔出长度小于 PF。当体积掺量相同时，由于 BF 的单丝直径远小于 PF，因此 BF 的单丝数量远大于 PF，故在峰值应力前较大面积的 BF 与混凝体基体间的界面增大了混凝土的耗散能转化率。但由于 BF 较高的刚度和较好的与混凝土基体间的粘结性能，与 PF 相比，BF 更有利于提高混凝土的强度；PF 的刚度较小，延性较好，且 PF 的拔出长度远大于 BF，其有效降低了混凝土的裂隙贯通速率，从而降低了混凝土的弹性应变能释放速率和耗散能转化率。因此，与 BF 相比，PF 更有利于提高混凝土峰值应力后的延性变形。

由图 10e 和图 10f 可以看出，当合适体积掺量的 BF 与 PF 混杂掺入混凝土中时，无论基体强度大小，BF 的破坏形貌与单掺时相差不大，而 PF 的损伤程度明显大于单掺的情况。当基体强度较低时，PF 表面已呈现明显划痕；当基体强度较高时，PF 呈现撕裂破坏。BF 约束了 PF 周围裂缝的扩展，提高了基体对 PF 的约束作用，加剧了 PF 的损伤。由于较低的刚度及与混凝土基体间较低的粘结性能，PF 对 BF 周围裂缝初始扩展的抑制作用较为有限，BF 的损伤变化不明显。BF 与 PF 的协同作用有效抑制了混凝土内的裂缝扩展与贯通，降低了混凝土弹性应变能的释放速率。同时，纤维的拔出与断裂也增大了混凝土耗散能，从而有效提高了混凝土延性变形特征和韧性破坏特征。

由图 10g 和图 10h 可以看出，当混杂 BF 与 PF 的体积掺量过大时，BF 与 PF 的分散均匀性降低，从而影响了 BF、PF 与混凝土基体间的粘结性能，导致无论基体强度大小，BF 与 PF 均呈现较大的拔出长度。但随着基体强度增大，BF、PF 的损伤程度仍呈增大趋势。过量的 BF 与 PF 仍可较大程度上抑制混凝土裂缝的扩展和贯通，从而有效降低了混凝土的弹性应变能释放速率，增大了混凝土的延性变形性能。

由于 BF 与 PF 物理力学性能的差异，两者可在混凝土的不同裂缝发展阶段发挥抑制作用，从而改变了混凝土的能量转化机制，提高了混凝土的延性和韧性。通常情况，尺寸较小的纤维主要抑制裂缝的萌生和初始扩展，而尺寸较大的纤维主要抑制宏观裂缝的扩展与贯通[31]。如图 11 所示，在线弹性阶段 II，由于 BF 的抑制作用，混凝土内的微细观裂缝处于稳定状态。总应变能主要以弹性应变能的形式储存在混凝土内部。当达到裂缝快速扩展阶段 III，由于较高的刚度和较强的与混凝土基体间的粘结性能，BF 有效抑制了裂缝的扩展，提高了混凝土强度。但随着裂缝的不断扩展，BF 逐渐被拉断，HBPRC 逐渐进入裂缝贯通阶段 IV。此时，未断裂

的 BF 仍可在一定程度上抑制裂缝的扩展，而 PF 较高的延性使其可在较长的裂缝发展阶段内降低裂缝的扩展速度和贯通速度。另外，PF 的逐渐拔出也提高了混凝土耗能。因此，BF 与 PF 的协同作用提高了混凝土强度和延性变形，从而提高了混凝土的韧性。



(a) BF in BC-30-0.1 (b) BF in BC-50-0.1 (c) PF in PC-30-0.1

(d) PF in PC-50-0.1 (e) BF and PF in HBPC-30-0.1 (f) BF and PF in HBPC-50-0.1

(g) BF and PF in HBPC-30-0.2 (h) BF and PF in HBPC-50-0.2

图 10 BF 与 PF 的破坏形貌

Fig. 10 Failure morphologies of BF and PF in HBPRC

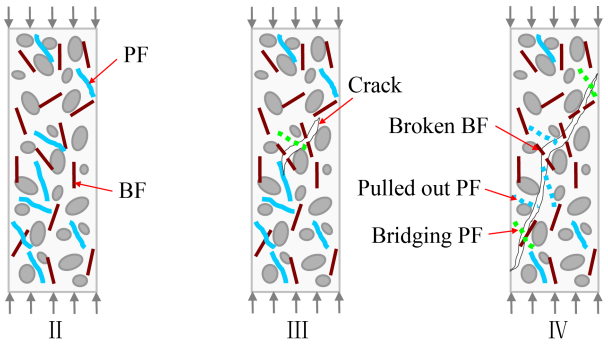


图 11 BF 与 PF 的作用机制示意图

Fig. 11 Schematic action mechanism of BF and PF in HBPRC

4 基于能量耗散的本构模型

4.1 本构模型的建立

在荷载作用下，HBPRC 内的损伤将逐渐萌生并扩展，从而导致 HBPRC 内的有效承载面积不断减小。由损伤力学理论可知，HBPRC 的名义应力与有效应力满足以下关系[32]，

$$\sigma=\frac{F}{A} \tag{5}$$

$$\sigma^{*}=\frac{F}{A^{*}} \tag{6}$$

$$\sigma=\frac{A^*}{A}\sigma^* \tag{7}$$

式中：σ、σ^*分别为 HBPRC 的名义应力与有效应力，MPa；F 为作用于 HBPRC 的荷载，N；A、A^*分别为 HBPRC 的名义承载面积和有效承载面积，mm^2。

对于混凝土材料，通常可用损伤变量表征其内部损伤的发展程度[33]。损伤变量通常定义为混凝土内的损伤面积与总承载面积(名义承载面积)的比值，即

$$D=\frac{A-A^*}{A}=1-\frac{A^*}{A} \tag{8}$$

式中：D 为 HBPRC 的损伤变量，$0\leqslant D\leqslant 1$；D=0 代表 HBPRC 无损伤，D=1 代表 HBPRC 已完全破坏。

由式(7)和式(8)可得

$$\sigma=(1-D)\sigma^* \tag{9}$$

根据应变协调原则，HBPRC 内损伤部分的应变与未损伤部分的应变一致，且与 HBPRC 的总应变保持一致。假设 HBPRC 内未损伤部分仍满足线弹性变形规律，因此式(9 可转化为

$$\sigma=(1-D)E\varepsilon \tag{10}$$

4.2　损伤变量的计算

由统计损伤力学可知，混凝土材料可近似为由无数细小微元组成的系统[34]。混凝土的损伤程度可由破坏微元数量占总微元数量的比值表示，另外 HBPRC 的损伤与能量耗散有关。因此，假设 HBPRC 的微元破坏概率与耗散能之间满足 Weibull 的概率密度关系，即

$$p(U_\mathrm{d})=\frac{n}{m}\left(\frac{U_\mathrm{d}}{m}\right)^{n-1}\exp\left[-\left(\frac{U_\mathrm{d}}{m}\right)^n\right] \tag{11}$$

式中：p 为 Weibull 概率密度函数；m、n 分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。

随能量耗散的增加，HBPRC 内破坏微元的数量为

$$N=\int_0^{U_\mathrm{d}} N_\mathrm{t}p(x)\mathrm{d}U_\mathrm{d}=N_\mathrm{t}\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{U_\mathrm{d}}{m}\right)^n\right]\right\} \tag{12}$$

式中：N 为 HBPRC 内已破坏微元的数量；N_t 为 HBPRC 内总微元数量。

根据统计损伤力学的损伤变量定义可知，HBPRC 的损伤变量也可由破坏微元数量与总微元数量的比值表示，即

$$D=\frac{N}{N_\mathrm{t}}=1-\exp\left[-\left(\frac{U_\mathrm{d}}{m}\right)^n\right] \tag{13}$$

由式(10)和式(13)可得

$$\sigma=E\varepsilon\exp\left[-\left(\frac{U_\mathrm{d}}{m}\right)^n\right] \tag{14}$$

式(14)便是 HBPRC 的基于能量耗散本构模型。采用本构模型对 HBPRC 的应力–应变曲线进行回归计算，便可得到参数 m、n 随纤维体积掺量的变化规律，且 m、n 与纤维体积掺量之间的关系可用下式表示，即

$$\begin{cases} m=a_1+a_2V_\mathrm{BF}+a_3V_\mathrm{PF}+a_4{V_\mathrm{BF}}^2 \\ n=b_1+b_2V_\mathrm{BF}+b_3{V_\mathrm{BF}}^2+b_4(V_\mathrm{BF}+V_\mathrm{PF})^2 \end{cases} \tag{15}$$

式中：V_BF、V_PF 分别为 BF、PF 的体积掺量，%；a_1–a_4 与 b_1–b_4 为相关参数。拟合结果如表 3 所示。

由式(14)和式(15)便可得到 HBPRC 的基于能量耗散的本构模型的最终形式，即

$$\sigma=E\varepsilon\exp\left[-\left(\frac{U_\mathrm{d}}{a_1+a_2V_\mathrm{BF}+a_3V_\mathrm{PF}+a_4{V_\mathrm{BF}}^2}\right)^{b_1+b_2V_\mathrm{BF}+b_3{V_\mathrm{BF}}^2+b_4(V_\mathrm{BF}+V_\mathrm{PF})^2}\right] \tag{16}$$

表 3　a_1–a_4 与 b_1–b_4 的计算结果

Table 3　Calculation results of a_1-a_4 and b_1-b_4

Matrix strength grade	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3	b_4
C30	0.039 7	0.336 9	0.109 3	–2.589 0	1.697 4	–12.545 4	127.310 7	–15.108 6
C50	0.073 2	0.539 9	0.162 9	–4.286 0	1.885 5	–19.400 2	196.574 2	–24.479 2

4.3　本构模型的验证

本构模型的计算结果与 HBPRC 的应力–应变曲线试验结果的对比如图 12 和图 13 所示。由图 12 和图 13 可以看出，本构模型计算结果与 HBPRC 应力–应变曲线试验结果的一致性较好，仅在残余变形阶段，本构模型计算结果高估了 HBPRC 的延性变形特征。总体上，基于能量耗散建立的本构模型能够有效表征 HBPRC 的应力–应变关系。

4.4　HBPRC 的损伤演化特征

根据式(11)和式(13)计算得到的 HBPRC 的损伤演化规律如图 14 所示。由图 14 可以看出，在峰值应力前的混凝土变形过程中，由于纤维的掺加增多了混凝土内的界面，且纤维与混凝土基体间的滑动摩擦增大了耗散能转化率，所以混凝土的损伤发展较快。而在峰值应力后，由于纤维的裂缝桥联作用有效抑制了裂缝的扩展与贯通，降低了混凝土的耗

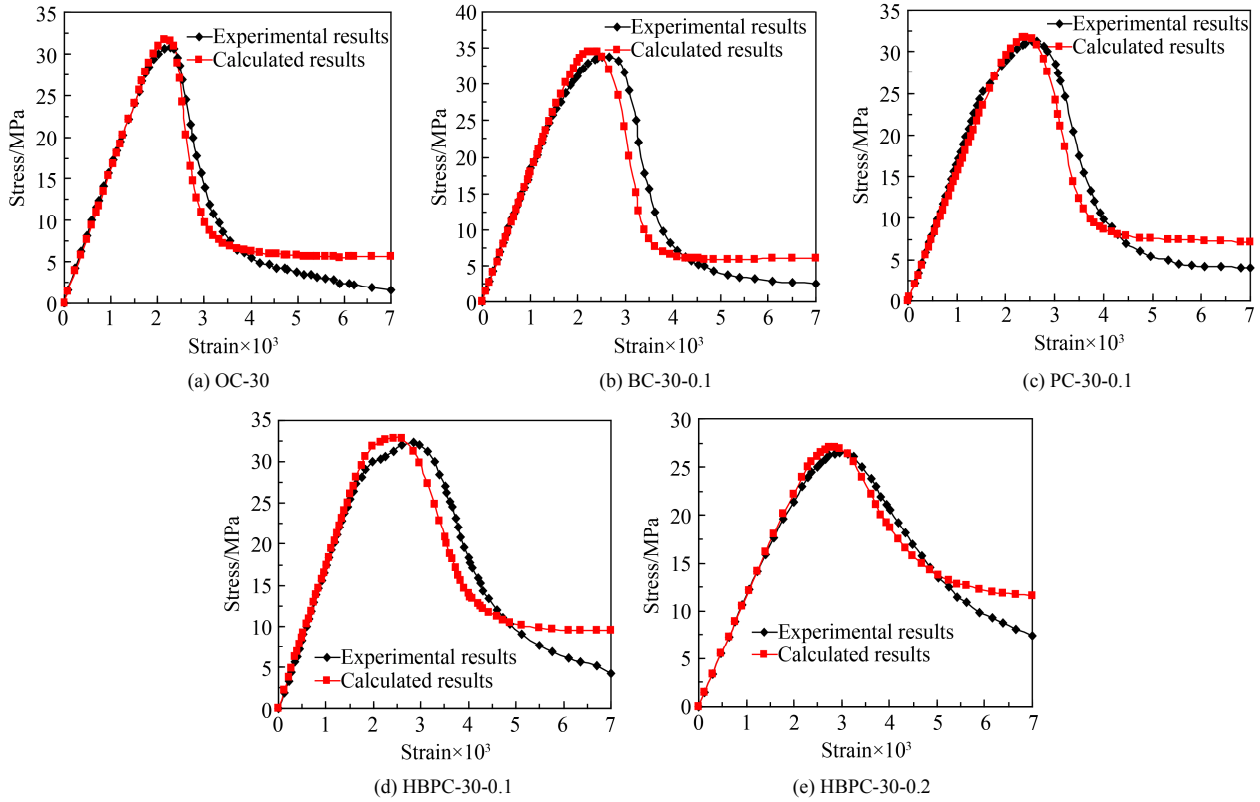


图 12 基体强度 C30 的 HBPRC 试验应力–应变曲线与本构模型计算结果的对比

Fig. 12 Comparison on the calculation results of the proposed consitutive models with the experimental results of stress–strain curves of HBPRC with matrix strength grade of C30

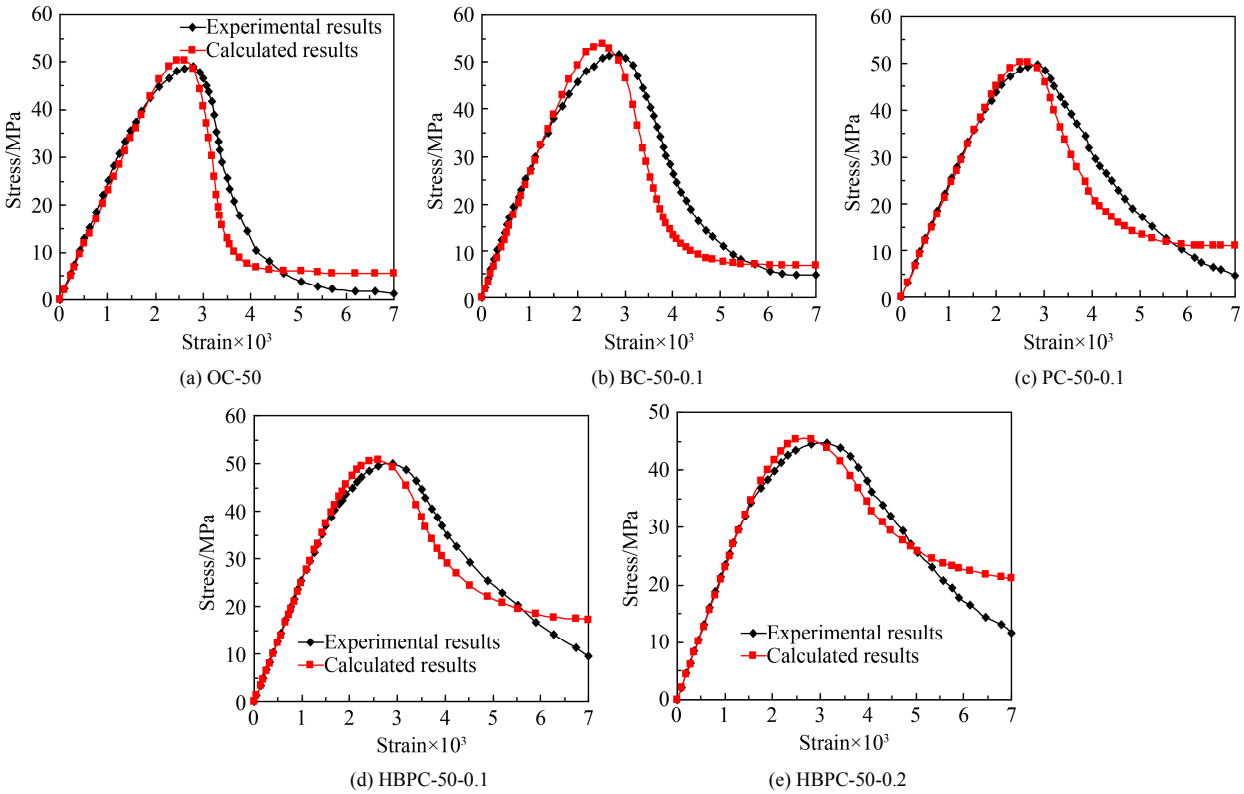
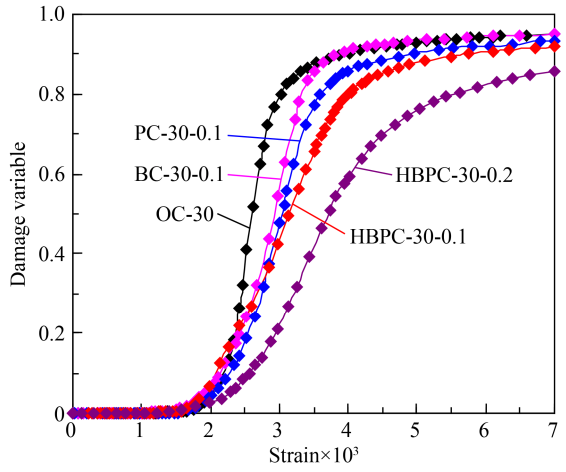
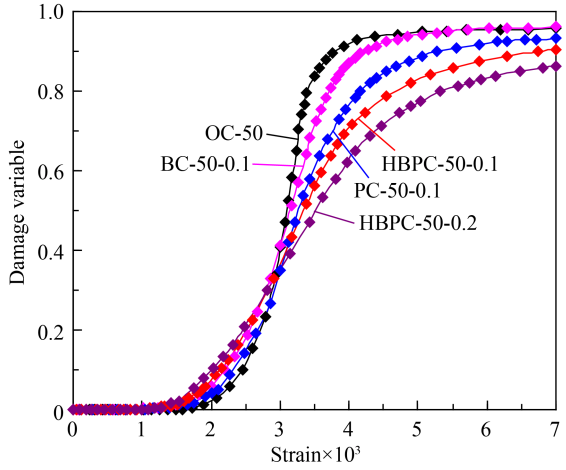


图 13 基体强度 C50 的 HBPRC 试验应力-应变曲线与本构模型计算结果的对比

Fig. 13 Comparison on the calculation results of the proposed consitutive models with the experimental results of stress-strain curves of HBPRC with matrix strength grade of C50



(a) C30



(b) C50

图 14　HBPRC 的损伤演化规律

Fig. 14　Damage evolution characteristics of HBPRC

散能转化率，损伤发展较慢。特别是混杂纤维的掺加，显著降低了混凝土的损伤发展速率。在极限应变时，混杂 BF 与 PF 显著降低了混凝土损伤程度，表明混凝土的延性变形性能增大。

5　结论

1) BF 和 PF 提高了混凝土延性变形，且混杂 BF 与 PF 的提升作用最明显。BF 对混凝土抗压强度的提升作用大于 PF，适量混杂 BF 与 PF 的提升作用介于单掺之间。BF 提高了混凝土的弹性模量，而 PF 却降低了混凝土的弹性模量，适量混杂 BF 与 PF 对混凝土弹性模量的影响较小。过量混杂 BF 与 PF 均降低了混凝土抗压强度与弹性模量。

2) BF 和 PF 降低了混凝土的弹性应变能释放速率，增大了混凝土的耗散能，也即增大了混凝土的总应变能，从而提高了混凝土延性变形和韧性。而混杂 BF 与 PF 对混凝土的增延和增韧作用更加明显。

3) BF 较高的刚度和较好的与混凝土基体间的粘结性能极有利于其提高混凝土的强度，而 PF 较好的延性有利于其抑制宏观裂缝的扩展与贯通，两者的协同作用提高了混凝土的延性和韧性。

4) 采用统计损伤理论建立了 HBPRC 的本构模型，模型计算结果与试验结果的一致性较好，且能有效体现纤维的类型和掺量对 HBPRC 本构行为的影响。

参考文献:

[1] 曹明莉, 许玲, 张聪. 高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 632–642.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(5): 632–642.

[2] 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.

[3] 罗素蓉, 林扬兴, 肖建庄. 钢-PVA 混杂纤维高强再生骨料混凝土断裂性能[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 93–102.
LUO Surong, LIN Yangxing, XIAO Jianzhuang. J Build Struct (in Chinese), 2020, 41(12): 93–102.

[4] 权长青, 焦楚杰, 杨云英, 等. 混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 363–370.
QUAN Changqing, JIAO Chujie, YANG Yunying, et al. J Build Mater (in Chinese), 2019, 22(3): 363–370.

[5] 邓方茜, 徐礼华, 池寅, 等. 基于均匀化理论的混杂纤维混凝土有效弹性模量计算[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 161–170.
DENG Fangqian, XU Lihua, CHI Yin, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 161–170.

[6] CHI Y, XU L H, ZHANG Y Y. Experimental study on hybrid fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial compression[J]. J Mater Civ Eng, 2014, 26(2): 211–218.

[7] 邓宗才, 冯琦. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 14–21.
DENG Zongcai, FENG Qi. J Build Mater (in Chinese), 2016, 19(1): 14–21.

[8] SUN X, GAO Z, CAO P, ZHOU C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 202: 58–72.

[9] RALEGAONKAR R, GAVALI H, ASWATH P, et al. Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review[J]. Constr Build Mater, 2018, 164: 589–602.

[10] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 476–481.
LI Weimin, XU Jinyu. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(4): 476–481.

[11] 叶邦土, 孙伟, 蒋金洋, 等. 玄武岩纤维增强粉煤灰水泥浆体的耐久性及缺陷分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1127–1132.
YE Bangtu, SUN Wei, JIANG Jinyang, et al. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(8): 1127–1132.

[12] QIAN C X, STROEVEN P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete[J]. Cem Concr Res, 2000,

30(1): 63–69.

[13] BUENDÍA A M L, SÁNCHEZ M D R, CLIMENT V, et al. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete[J]. Cem Concr Res, 2013, 54: 29–35.

[14] 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.

[15] 梁宁慧, 胡杨, 钟杨, 等. 多尺度聚丙烯纤维混凝土孔结构及抗冻性[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(11): 38–46.
LIANG Ninghui, HU Yang, ZHONG Yang, et al. J Chongqing Univ (in Chinese), 2019, 42(11): 38–46.

[16] LI Z X, LI C H, SHI Y D, et al. Experimental investigation on mechnaical properties of hybrid fibre reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 157: 930–942.

[17] SMARZEWSKI P. Influence of basalt-polypropylene fibers on fracture properties of high performance concrete[J]. Compos Struct, 2019, 209: 23–33.

[18] ZHANG H, WANG L, BAI L, et al. Research on the impact response and model of hybrid basalt-macro synthetic polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 204: 303–316.

[19] FU Q, XU W, LI D, et al. Dynamic compressive behaviour of hybrid basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete under confining pressure: Experimental characterization and strength criterion[J]. Cem Concr Compos, 2021, 118: 103954.

[20] FU Q, BU M, XU W, et al. Comparative analysis of dynamic constitutive response of hybrid fibre-reinforced concrete with different matrix strengths[J]. Int J Impact Eng, 2021, 148: 103763.

[21] WANG D, JU Y, SHEN H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber[J]. Constr Build Mater, 2019, 197: 464–473.

[22] 谢和平, 鞠扬, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2005, 24(17): 3003–3010.

[23] 刘晓辉, 郝齐钧, 胡安奎, 等. 准静态应变率下单轴煤岩特征应力确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2038–2046.
LIU Xiaohui, HAO Qijun, HU Ankui, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2020, 39(10): 2038–2046.

[24] BANTHIA N, MAJDZADEH F, WU J, et al. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear[J]. Cem Concr Compos, 2014, 48: 91–97.

[25] SIM J S, PARK C W, MOON D Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Compos Part B Eng, 2005, 36(6/7): 504–512.

[26] RANJBAR N, TALEBIAN S, MEHRALI M, et al. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites[J]. Compos Sci Tech, 2016, 122: 73–81.

[27] CUI S, XU X, YAN X, et al. Experimental study on the interfacial bond between short cut basalt fiber bundles and cement matrix[J]. Constr Build Mater, 2020, 256: 119353.

[28] 宣卫红, 刘建忠, 李骁春, 等. 聚丙烯纤维与水泥砂浆粘结性能试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 726–730.
XUAN Weihong, LIU Jianzhong, LI Xiaochun, et al. J Jiangsu Univ (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2010, 31(6): 726–730.

[29] BRANSTON J, DAS S, KENNO S Y, et al. Influence of basalt fibers on free and restrained plastic shrinkage[J]. Cem Concr Compos, 2016, 74: 182–190.

[30] ALRSHOUDI F, MOHAMMADHOSSEINI H, TAHIR M M, et al. Drying shrinkage and creep properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers[J]. J Build Eng, 2020, 26: 101522.

[31] YANG Y, ZHOU Q, DENG Y, et al. Reinforcement effects of multi-scale hybrid fiber on flexural and fracture behaviors of ultra-low-weight foamed cement-based composites[J]. Cem Concr Compos, 2020, 108: 103509.

[32] KACHANOV M, ERIC M. Interaction of a crack with certain microcrack arrays[J]. Eng Fract Mech, 1986, 25(5): 625–636.

[33] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nucl Eng Des, 1984, 80(2): 233–245.

[34] 龙广成, 李宁, 薛逸骅, 等. 冲击荷载作用下掺橡胶颗粒自密实混凝土的力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(8): 1081–1090.
LONG Guangcheng, LI Ning, XUE Yihua, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(8): 1081–1090.