**文章编号**:1007-9629(2023)06-0612-11

# 超高强度橡胶混凝土的力学特性及能量演化

徐　颖[1,2,*]，　刘家兴[1]，　杨荣周[1]，　丁进甫[1]，　顾柯柯[1]

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001;
2.安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽 淮南 232001)

**摘要**:通过降低水胶比,采用钢纤维和硅灰协同调控强度的方法,制备超高强度橡胶混凝土(UHSRC),并利用电液伺服万能试验机对其开展静态压缩试验.结果表明:UHSRC的抗压强度最大可达125.7 MPa,甚至当橡胶取代率高达30%时,抗压强度仍不低于60.0 MPa;UHSRC的抗压强度和应力增长率表现出橡胶取代率弱化效应,然而其破坏程度和韧性指数表现出橡胶取代率增强效应和粒径弱化效应;UHSRC的输入能、弹性能,以及耗散能增长率和最大值均具有橡胶取代率弱化效应;随着橡胶取代率的增加,UHSRC的弹性能比率增大,耗散能比率减小;随着橡胶粒径的增大,UHSRC的弹性能比率先减小后增大,耗散能比率先增大后减小.

**关键词**:超高强度橡胶混凝土;静态压缩;力学特性;破坏特征;韧性;能量演化

**中图分类号**:TU501　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.006

# Mechanical Properties and Energy Evolution of Ultra High Strength Rubber Concrete

*XU Ying*[1,2,*], *LIU Jiaxing*[1], *YANG Rongzhou*[1], *DING Jinfu*[1], *GU Keke*[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technological, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** By reducing the water-binder ratio, using the method of steel fiber and silica fume to adjust the strength, ultra high strength rubber concrete (UHSRC) was prepared, and its static compression test was carried out by electro-hydraulic servo universal testing machine. The results show that the compressive strength of UHSRC can be increased to 125.7 MPa at most, and even when the rubber substitution rate is as high as 30%, the compressive strength is still not less than 60.0 MPa. The compressive strength and stress growth rate of UHSRC show the weakening effect of rubber substitution rate , while failure degree and toughness show rubber substitution rate reinforcement effect and particle size weakening effect. The growth rate and maximum value of input energy, elastic energy and dissipated energy of UHSRC all have the weakening effect of rubber substitution rate. With the increase of rubber substitution rate, the elastic energy ratio of UHSRC increases and the dissipated energy ratio decreases. With the increase of rubber particle size, the elastic energy ratio of UHSRC first decreases and then increases, and the dissipated energy ratio first increases and then decreases.

**Key words:** ultra high strength rubber concrete (UHSRC); static compression; mechanical property; failure characteristic; toughness; energy evolution

橡胶混凝土是胶凝材料、骨料等与橡胶颗粒复合而成的一种新型混凝土材料[1].其不仅具有优异的

收稿日期:2022-07-31; 修订日期:2022-08-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074009,52008003);安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金资助项目(2022yjrc84)
第一作者(通讯作者):徐　颖(1965—),男,安徽泗县人,安徽理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail: yxu@aust.edu.cn

变形和耗能能力[2],还在抗冲击[3]、抗疲劳[4]等方面表现突出.橡胶混凝土现已在混凝土路面、公路防护栏等工程领域得到应用,然而鲜见其在结构方面的应用,究其本质是其强度低[5].

在橡胶物理或化学改性方面,李海龙等[6]和Gupta等[7]研究发现,对于橡胶掺量分别为20%、5%的橡胶混凝土,另外掺加10%硅灰后强度分别增至41、75 MPa;赵秋红等[8]和Wang等[9]采用氢氧化钠溶液预处理橡胶颗粒,同时优化配合比或进行90 ℃高温养护,成功配制出与C30和C80混凝土等强的橡胶混凝土;刘誉贵等[10]发现经尿素改性后的橡胶混凝土黏结强度可提升44%,但抗压强度最大才提高至44 MPa.在纤维增强方面,Dong等[11]通过优化配合比并添加钢纤维,成功配制出橡胶替代率高达20%,抗压强度可达49～56 MPa的橡胶混凝土;贺东青等[12]发现短切玄武岩纤维对橡胶混凝土抗压强度提升不明显,但可提高其抗拉强度;Alshaikh等[13]研究表明,混掺纤维和橡胶颗粒可使普通混凝土抗压强度降低16.7%,抗拉强度提高4.1%.综上所述,无论是对橡胶颗粒进行物理或化学改性,还是利用纤维进行增强,不但工艺复杂,而且改性效果不佳,甚至研究结果还存在差异性.与此同时,近年来地震和泥石流冲磨等灾害频发,人防工程和桥梁墩柱等水工结构不可避免地受到冲击扰动,并随着损伤的积累而最终发生破坏.而常规人防工程和桥梁墩柱混凝土材料抗侵彻和耐磨蚀性能差,在动荷载耦合作用下出现局部剥落和裂缝.

鉴于此,本文通过降低水胶比,同时采用钢纤维和硅灰协同调控强度的方法,制备超高强度橡胶混凝土(UHSRC),并对其开展静态单轴压缩试验;分析了橡胶取代率及其粒径对UHSRC试件强度、变形和韧性等的影响;同时结合细观断裂照片和破坏形态,明确了UHSRC的起裂机制和能量转化关系.

## 1　试验

### 1.1　原材料

水泥为普通硅酸盐水泥P·O 52.5;硅灰,型号为Elkem940;钢纤维为端钩型钢纤维,尺寸为$\phi$0.75×35 mm;减水剂为聚羧酸高性能减水剂,减水率(质量分数,文中涉及的减水率、水胶比等除特别注明外均为质量分数或质量比)大于25%;河砂,最大粒径为5 mm、细度模数为3.11、表观密度为2 600 kg/m$^3$;橡胶颗粒,粒径($n$)分别为0.85、2.00、4.00 mm,四川华益有限公司产;拌和水为实验室自来水.

### 1.2　配合比

鉴于目前超高强度混凝土的配合比还未形成统一标准,本文控制水胶比为0.18,通过调控其他组分来制备UHSRC试件,配合比如表1所示.表中钢纤维采用外掺方式,掺量(体积分数)为3%;橡胶颗粒采用等体积取代河砂的方式掺加,取代率分别为0%、10%、20%和30%.

**表1　UHSRC试件配合比**

**Table 1　Mix proportions of UHSRC specimens**

| Specimen No. | Mix proportion/(kg·m$^{-3}$) | | | | | | | $n$/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cement | Silica fume | Water | Water reducer | Steel fiber | Sand | Rubber particle | |
| R0%-SF0% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0 | 0.962 | 0 | |
| R0%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.962 | 0 | |
| 0.85-R10%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.866 | 0.042 | |
| 0.85-R20%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.770 | 0.085 | 0.85 |
| 0.85-R30%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.674 | 0.127 | |
| 2-R10%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.866 | 0.042 | |
| 2-R20%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.770 | 0.085 | 2.00 |
| 2-R30%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.674 | 0.127 | |
| 4-R10%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.866 | 0.042 | |
| 4-R20%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.770 | 0.085 | 4.00 |
| 4-R30%-SF3% | 1.000 | 0.152 | 0.188 | 0.037 | 0.210 | 0.674 | 0.127 | |

### 1.3　试件制备及试验方案

参照T/CBMF 37—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》,首先,将水泥、硅灰、河砂和橡胶颗粒倒入立式砂浆搅拌机里,边搅拌边利用灰刀沿着搅拌机壁进行辅助搅拌,使其相互包裹且更加均匀;然后,将称量好的拌和水分多次与减水剂混合后倒入搅拌机里;最后,边搅拌边均匀地撒入钢纤维,待水泥浆体与钢纤维彼此包裹良好后,即停止搅拌.

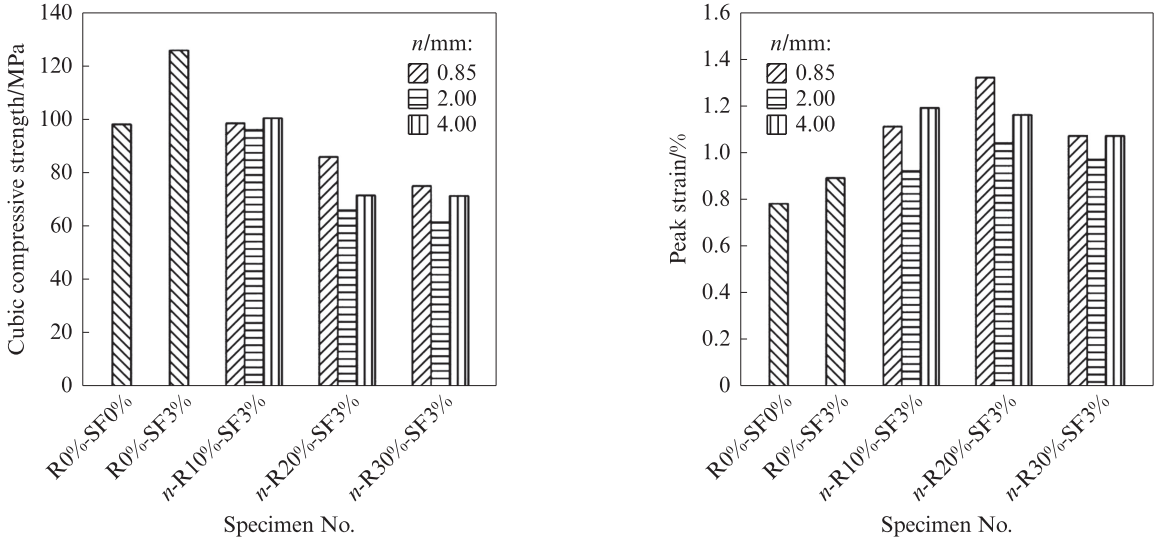
参照GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》开展单轴压缩试验，具体步骤如下：利用电液伺服压力试验机(CSS-YAW 3 000 kN)对养护好的非标准立方体试件(100 mm×100 mm×100 mm)进行静态抗压试验，采用速度控制方式，将试验速率和采样频率分别设置为1 mm/min和10 Hz. 由于本文使用的CSS-YAW 3 000 kN设备具有局限性，只能获得试件的立方体抗压强度，为此，参考ASTM C469/C469M—2014《Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression》，先浇筑高径比为2的圆柱体试件($\phi$50×100 mm)，养护28 d；再采用电液伺服压力试验机(WAW-1 000 kN)对其开展静态压缩试验，采用位移控制方式，加载速率设定为0.5 mm/min.

## 2 结果与分析

### 2.1 基本力学性能

试件的基本力学性能指标如图1所示. 由图1可见：试件的抗压强度总体上呈现明显的橡胶取代率弱化效应和橡胶粒径弱化效应；试件的峰值应变呈现橡胶取代率增强效应和钢纤维增强效应；随着橡胶粒径的增大，试件的峰值应变呈现先减小后增大的现象，仅当橡胶取代率为10%时，橡胶粒径为4.00 mm试件(4-R10%-SF3%)的峰值应变大于橡胶粒径为0.85 mm试件(0.85-R10%-SF3%)，但二者差值仅为0.000 8，总体上仍可认为其具有橡胶粒径弱化效应.

具体表现为：(1)与高强度混凝土(HSC)试件(R0%-SF0%)相比，UHSRC试件(R0%-SF3%)的立方体抗压强度最大可达125.7 MPa，提升了28.3%；当橡胶取代率为10%时，3种橡胶粒径的UHSRC试件均与HSC试件等强，甚至当橡胶取代率高达30%时，这3种UHSRC试件的立方体抗压强度最大才降低37.5%，且仍不低于60.0 MPa. 这是因为硅灰的火山灰效应增强了基质强度，同时钢纤维刚度大，与硬化胶凝浆体(HCS)黏结性能较好，因此试件强度得以提升；反观橡胶颗粒，其不仅与HCS黏结性能差，而且自身模量低，因此试件强度降低.(2)当橡胶粒径为0.85 mm时，UHSRC试件的立方体抗压强度随橡胶取代率增加而降低的幅度最小；橡胶粒径为2.00 mm的UHSRC试件立方体抗压强度降低幅度最大. 这可能是因为0.85 mm橡胶粒径下骨料级配得到了进一步优化，基体变得更加致密. 表明优化骨料级配对于UHSRC的后续研究至关重要.(3)与HSC试件(R0%-SF0%)相比，3种橡胶粒径下UHSRC试件的峰值应变最大提高52.6%、33.3%和69.2%，说明钢纤维和橡胶颗粒混掺可显著提高HSC的变形能力，即呈现正混杂协同效应，这得益于钢纤维的拉结性能和橡胶颗粒的变形性能.(4)若单考虑试件的变形能力，宜选用橡胶粒径为0.85 mm、橡胶取代率为20%的UHSRC.




(a) Cubic compressive strength (b) Peak strain

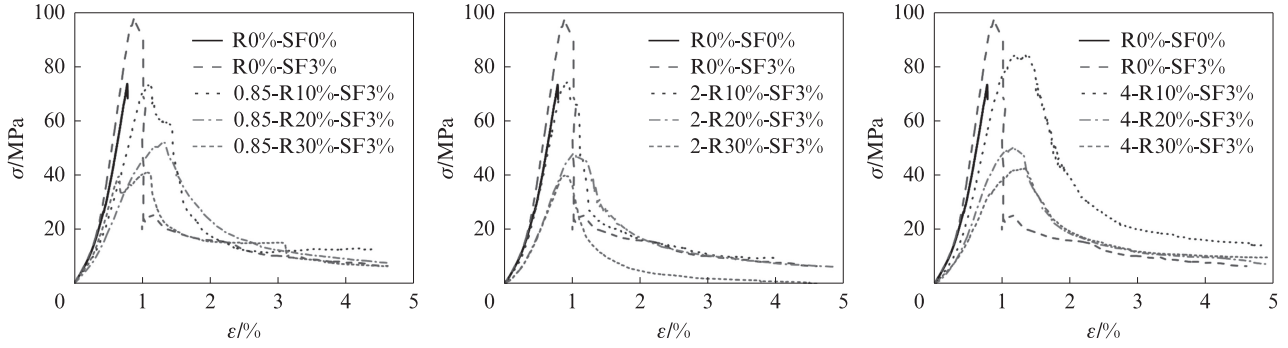
图1 试件的基本力学性能指标

Fig. 1 Basic mechanical property indexes of specimens

### 2.2 应力-应变曲线

图2为3种橡胶粒径下各试件的应力-应变($\sigma$-$\varepsilon$)曲线. 由图2可见：(1)钢纤维和橡胶颗粒混掺后，混凝土试件表现出脆-延转换力学特征——HSC试件

(R0%-SF0%)未出现明显的弹塑性变形,一旦起裂即迅速达到峰值应力,之后应力陡降至0 MPa,无残余承载能力;对于UHSRC试件(除R0%-SF3%),随着橡胶取代率的增加,其弹塑性变形越来越突出,局部塑性变形值逐渐增大,一旦起裂,因柔性橡胶耗能,曲线缓慢达到峰值应力之后,应力舒缓地跌至残余强度,且应力降低速率随橡胶取代率增加而增大,即脆性降低,延性增强.(2)与HSC试件相比,除了R0%-SF3%,其余各UHSRC试件的应力增长率(数值与切线弹性模量相等)均小于HSC试件,且随着橡胶取代率的增加,其应力增长率逐渐减小,说明单掺钢纤维可提高混凝土的抗变形性能,而混掺钢纤维和橡胶颗粒反而降低了混凝土的抗变形性能,即UHSRC试件的应力增长率具有橡胶取代率弱化效应.(3)各UHSRC试件(除R0%-SF3%)的峰前弹塑性变形能力随橡胶粒径的增大而提高,即峰前延性变形增大;而当达到相同的峰后变形时,橡胶取代率为0%的UHSRC试件(R0%-SF3%)应力小于其余各橡胶取代率的UHSRC试件,表明混掺钢纤维和橡胶颗粒对UHSRC试件峰后延性变形的提升作用大于单掺钢纤维.




(a) $n$=0.85 mm　　(b) $n$=2.00 mm　　(c) $n$= 4.00 mm

图2　3种橡胶粒径下各试件的应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of various specimens under three kinds of rubber particle sizes

### 2.3　断裂韧性

韧性指数($\gamma$)是评价混凝土基本力学性能的一个重要指标,通常用来表征材料的延展性[14].$\gamma$可以被定义为$\sigma$-$\varepsilon$曲线下降段某一点的应力所对应的曲线面积与峰值应力所对应的曲线面积之比[15].为了分析本试验制备的UHSRC试件是否具有理想韧性,将$\sigma$-$\varepsilon$曲线下降段的应力定义为峰值应力的30%,并按式(1)计算UHSRC试件的$\gamma$.

$$\gamma = A/B = \int_0^{\varepsilon_A} \sigma(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \Big/ \int_0^{\varepsilon_B} \sigma(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \qquad (1)$$

式中:$A$为曲线下降至30%峰值应力时所对应的曲线面积;$B$为峰值应力所对应的曲线面积;$\varepsilon_A$为30%峰值应力所对应的应变;$\varepsilon_B$为峰值应力所对应的应变.

图3为各试件的韧性指数.由图3可见:与强度变化规律不同的是,$\gamma$表现出橡胶取代率增强效应和橡胶粒径弱化效应——3种橡胶粒径下,UHSRC试件的$\gamma$均随橡胶取代率的增加而增大,其增长率随橡胶粒径的增大而逐渐减小,这说明,与单掺钢纤维相比,混掺钢纤维和橡胶颗粒更有利于提高UHSRC试件的韧性,呈现出正混杂协同效应;3种橡胶取代率下,UHSRC试件的$\gamma$均随橡胶粒径的增大而减小,且减小速率的绝对值随橡胶取代率的增加而增大.以上表明,对于韧性要求高的工程,宜控制橡胶取代率不低于20%,且橡胶粒径不大于2.00 mm.

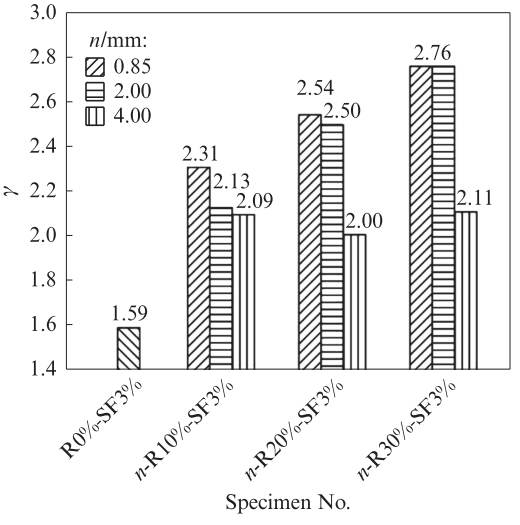



图3　各试件的韧性指数

Fig. 3　Toughness indexes of various specimens

### 2.4　破坏形态及其机理

为明确HSC和UHSRC在受压条件下复杂的变形和破坏过程,有必要先分析橡胶取代率和橡胶粒径对UHSRC试件破坏形态的影响;再结合细观断裂照片,深入研究试件裂隙的起裂机制,以及钢纤维与橡胶颗粒协同作用原理,进而揭示UHSRC和HSC的破坏机理.

**2.4.1** 破坏形态

部分试件的破坏形态如图4所示.由图4可见:(1)随着橡胶取代率的增加或橡胶粒径的减小,UHSRC试件表面的裂纹数量、环向变形量(环向膨胀程度)及剥落的混凝土碎片数量均逐渐减少,即随橡胶取代率增加或粒径减小,UHSRC试件的破坏程度减小,抗裂能力增强.UHSRC试件的破坏程度与断裂韧性的变化规律一致,同样具有橡胶取代率增强效应和橡胶粒径弱化效应.也就是说韧性是破坏程度的内在特性,而破坏程度是韧性的宏观反映,二者互相联系,密不可分.(2)HSC试件(R0%-SF0%)与UHSRC试件展现出完全不同的破坏形态——HSC试件剥落多块类似棱柱状的混凝土块,而UHSRC试件仅剥落些许混凝土碎片,且最大碎片长度约为混凝土块的1/3;HSC试件的残余部分完整性差,近似呈锥形破坏形态,并且表面裂缝的走势较笔直,整体几乎无可视环向膨胀,而UHSRC试件的残余部分虽呈现不同程度的环向膨胀,表面裂纹弯曲而密集,但仍能保持完整.(3)HSC试件与UHSRC试件的破坏模式不同,二者分别表现出典型的张拉破坏模式(脆性断裂)和拉-剪耦合破坏模式(韧性断裂).

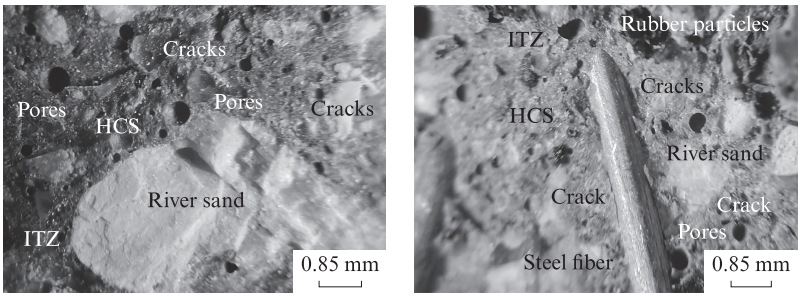
图5为HSC试件和UHSRC试件(以0.85-R20%-SF3%为例)的细观断裂照片.由图5可见:(1)由于硅灰的微填充效应,河砂、橡胶颗粒和钢纤维与HCS之间的界面过渡区(ITZ)均显著改善,即基体致密性提高,但由于橡胶颗粒的引气作用劣化了基体,致使UHSRC试件表面的光滑程度和致密性弱于HSC试件,含孔量高于HSC试件.(2)断裂面上的河砂与HCS之间的ITZ保持稳定,几乎无裂隙萌生;然而断裂面上的橡胶颗粒、钢纤维与HCS之间的ITZ发生了劣化,并有裂隙滋生,这是因为橡胶颗粒的疏水性导致其表面水化不充分,从而弱化了界面性能,即黏结强度最低.无论是HSC试件还是UHSRC试件,其断裂面上的河砂均被拉断或剪断;然而断裂面上的橡胶颗粒和钢纤维分别因柔性缓冲和刚度大均未断裂,仅钢纤维发生了不可恢复变形(弯曲).理论上,易变形的橡胶颗粒受力后形态最易发生变化,但在断裂面上并未见大形变的橡胶颗粒.由此推断,UHSRC试件一经卸载,橡胶颗粒即发生回弹(大形变恢复,小塑性形变滞后),同时还牵扯裂隙两侧的HCS,迫使裂缝有所回缩.以上从细观角度深入解释了UHSRC试件裂隙多而密,且完整性好的破坏形态现象.

(a) R0%-SF0% (b) R0%-SF3% (c) 0.85-R10%-SF3% (d) 0.85-R20%-SF3%

(e) 0.85-R30%-SF3% (f) 4-R20%-SF3% (g) 2-R20%-SF3% (h) 0.85-R20%-SF3%

图4 部分试件的破坏形态

Fig. 4 Failure modes of part specimens




(a) R0%-SF0%　　(b) 0.85-R20%-SF3%

图5　HSC试件和UHSRC试件（0.85-R20%-SF3%）的细观断裂照片

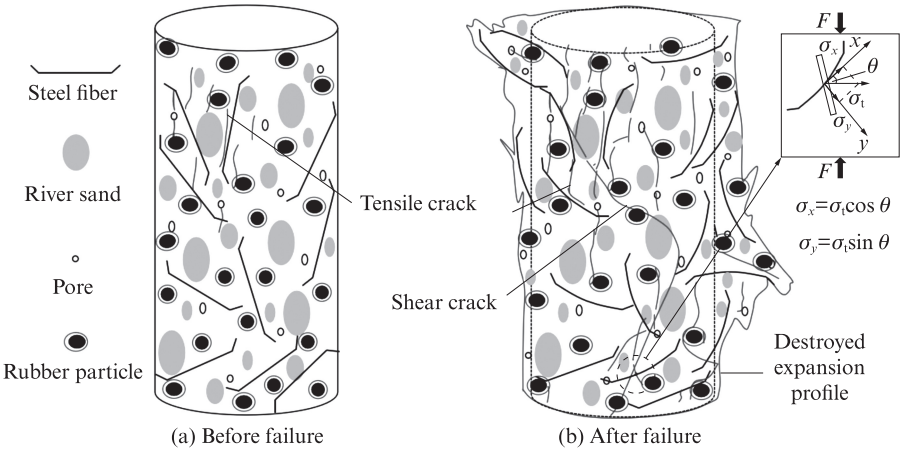
Fig. 5　Mesoscopic fracture images of HSC specimen and UHSRC specimen (0.85-R20%-SF3%)

**2.4.2　破坏机理**

UHSRC试件的起裂—扩展—破坏的示意图如图6所示.基于图6并结合试件破坏形态和细观断裂照片可知：

（1）对于HSC试件，当外力作用时，原始孔洞等缺陷逐渐闭合，薄弱区也因愈合而变得更加致密，从而基体被进一步增强，但原始缺陷并未因微塑性压密而完全消失，依然存在于试件内部，这也是后续裂隙由此萌生的根本原因；随着外部载荷的增大，由于应力集中加剧并临近抗拉极限，内部孔洞和相对薄弱处的HCS开始滋生新裂隙，又因HSC脆性大，裂隙迅速向HCS内部延伸，虽然遇到河砂时会短暂受阻，但最终裂隙还是会贯穿河砂，继续向两端延伸，而非沿河砂表面进行扩展.这是因为河砂抗拉强度低，脆性特征明显，导致裂隙来不及沿河砂表面扩展，就已断裂，此时试件表面产生竖向非贯通裂隙；随着外部载荷的继续增大，裂隙继续向两端延伸直至形成竖向贯通裂缝，且扩展方向单一，未见次生裂纹滋生.整个过程试件断裂非常迅速，并且随着裂隙的持续扩展，可清晰地听见轻微的脆裂声转变为爆裂声.

（2）对于UHSRC试件，基体抵抗变形的能力同样因微塑性压密而得到进一步增强，但基体并未因初始损伤闭合而完全恢复，这也是后续基体内部损伤由此扩大的根源.不同的是，UHSRC试件内部的橡胶颗粒一方面通过变形方式积聚弹性能，削弱外力对试件所做的功，致使用于试件破坏所需的能量减少，从而达到延缓试件破坏的目的；另一方面橡胶颗粒受力后，其轴向产生压缩形变进行让位——为基体提供了发生轴向弹性形变的空间位置，而横向膨胀挤压临近基体，即横向拉伸变形产生的膨胀为基体内部提供了动态变化的小围压环境，从而再次提高临近基体的抗变形能力；然而钢纤维因无裂缝扩展，无法发挥阻裂作用，只能与HCS共同受力发生形变.随着外力的增大，试件内部孔洞和橡胶颗粒的ITZ由于应力集中作用，率先起裂并向HCS内部延伸，同时相对薄弱处的HCS也在环向拉应力的持续作用下达到抗拉极限，开始萌生新裂隙.裂隙交汇形成局部塑性区，宏观体现为试件表面有多条竖向非贯通弯曲裂隙.从破坏形态来看，UHSRC试件的局部塑性区位置具有随机性，这是因为孔洞和橡胶颗粒在基体内部并非均匀分布，从而使HCS的劣化程度具有不确定性.该过程橡胶颗粒一方面继续积聚




(a) Before failure　　(b) After failure

图6　UHSRC试件的起裂—扩展—破坏示意图

Fig. 6　Crack initiation-expansion-failure diagram of UHSRC specimen

弹性能，另一方面横向膨胀，继续挤压临近基体，以此约束裂隙横向扩展变宽，而轴向压缩形变让位塑性变形的同时，也阻碍了裂隙轴向延伸贯通；而钢纤维因无裂缝扩展，依然不能充分发挥阻裂作用．随着外力的继续增大，当剪切应力($\sigma_y$)达到或超过基体极限抗剪强度时，剪切裂缝形成，且延伸方向单一，路径却蜿蜒曲折，并可见次生裂纹萌生．整个过程试件断裂非常缓慢，并且伴有轻微的“崩裂”声(钢纤维拔出)．一旦裂缝形成，钢纤维一方面通过与HCS形成的黏结力、静摩擦力、滑动摩擦力，以及端勾锚固力抵抗拉伸应力($\sigma_t$)的分力($\sigma_x$)，以此阻碍裂缝扩展变宽；另一方面钢纤维利用自身刚度大来抵抗$\sigma_y$，以此阻碍裂缝扩展贯通；橡胶颗粒继续发挥以上相同的作用，在此不再赘述．

综上所述，无论是HSC试件还是UHSRC试件均非单纯的压缩破坏，而是压缩载荷迫使试件局部先达到抗拉极限，产生拉伸裂缝，或继而发展成剪切裂缝，最终因拉伸裂缝贯通或拉-剪裂缝贯通导致承载能力丧失而破坏．究其原因是二者由于组成相不同导致起裂机制不同，橡胶和钢纤维协同阻裂又导致破坏机理不同，从而使得2类试件表现出截然不同的破坏模式．

### 2.5 能量演化规律

根据热力学第一定律，单轴压缩下试件的输入能(外力所做的功)主要转化为弹性能和耗散能[16-17]．试件的能量指标如输入能、弹性能和耗散能可按式(2)～(4)进行计算[18]：

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

$$U_e=\sigma^2/2E \tag{3}$$

$$U_d=U-U_e=\int\sigma\mathrm{d}\varepsilon-\sigma^2/2E \tag{4}$$

式中：$U$、$U_e$和$U_d$分别为输入能、弹性能和耗散能，J/cm$^3$；$E$为切线弹性模量，MPa.

以试件0.85-R20%-SF3%能量演化特征曲线为例，研究UHSRC试件损伤破坏过程中的能量演化规律，如图7所示．根据文献[16]并结合前文分析，图7中的能量曲线大致划分为5个阶段．

(1)$OA$阶段　由微塑性压密引起的初始损伤阶段．UHSRC试件受荷变形后，其内部初始缺陷发生闭合、滑移等[4]，消耗输入能且此时压缩变形小，各能量指标曲线上升颇缓，能量指标增长率由大到小依次为输入能＞耗散能＞弹性能．由此可见，该阶段UHSRC试件的输入能向弹性能转化的占比较小，耗能机制起主导作用．

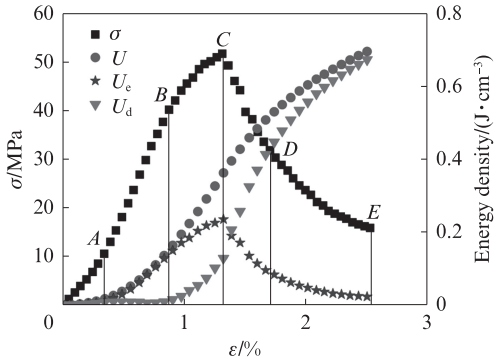



图7　试件0.85-R20%-SF3%的能量演化特征曲线

Fig. 7　Energy evolution characteristic curve of 0.85-R20%-SF3% specimen

(2)$AB$阶段　因初始缺陷被压实而引起的损伤平稳阶段．经初始缺陷压实后，UHSRC试件不仅近似变为无损状态，而且抗变形能力也得到进一步提高，因此，该阶段基本无输入能消耗，耗散能曲线趋于水平；输入能曲线和弹性能曲线演化趋势相同，均突变式快速上升．值得注意的是，该阶段首次出现了弹性能和耗散能交汇点，表明试件开始应变硬化，输入能向耗散能转化的占比较小，储能机制起主导作用．

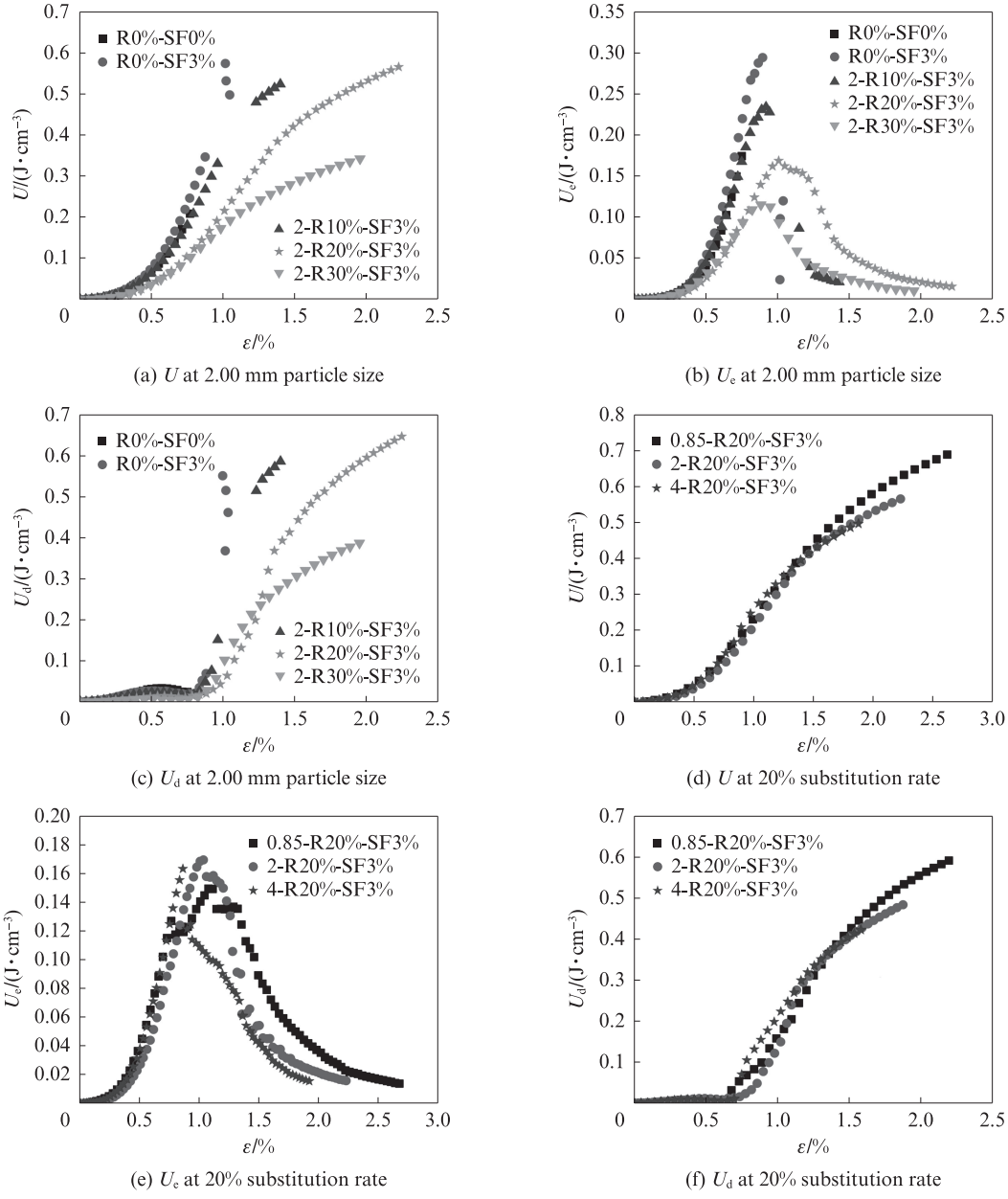
(3)$BC$阶段　由局部塑性变形引起的突变损伤阶段．UHSRC试件内部的相对薄弱处因弹性能逐渐累积，率先发生塑性变形，当累积的弹性能大于裂隙萌生所需的表面能时，多裂隙形成．随着应力集中加剧，裂隙延伸、交汇，耗散能先突增后线性增大，说明萌生裂隙所需的能量大于裂隙延伸所需的能量；弹性能曲线上升因有能量耗散而逐渐放缓，并最终达到最大值(储能极限)；输入能近似线性增大，这是因为局部塑性变形弱化了输入能的增长率．由此可见，该阶段虽有小部分弹性能以局部塑性能、裂隙表面能的形式释放耗散，但输入能还是以弹性能的形式储存于试件内部，储能机制依然起主导作用．

(4)$CD$阶段　因突然破坏而引起的加速损伤阶段．UHSRC试件发生破坏后，前期积聚在其内部的弹性能迅速释放，剪切裂纹形成，因此弹性能开始减小，而耗散能近似线性增大；此时输入能继续增大，但增速逐渐减小，这是因为骨架并未完全破坏，仍可继续承载．

(5)$DE$阶段　由临近残余承载能力引起的损伤趋缓阶段．随着剪切裂缝的贯通及混凝土碎片的剥落，UHSRC试件逐渐临近残余强度，因此输入能增长明显趋缓，且增长率渐趋于0%；因钢纤维逐渐拔出和橡胶颗粒脱落，UHSRC试件逐渐丧失阻裂耗能的能力，因此耗散能开始缓慢增长，且增长率渐趋于

0；而弹性能因骨架逐渐破坏，开始缓慢减小，且减小率渐趋于0%．由此可见，因应变软化（*CD*阶段和*DE*阶段），耗能机制再次起主导作用．

图8为部分试件的能量-应变曲线．由图8(a)～(c)可见，试件输入能、弹性能、耗散能的增长率和最大值均具有橡胶取代率弱化效应和钢纤维增强效应，与强度变化规律相一致，表明能量指标受承载能力控制．由图8(d)～(f)可见，试件输入能和耗散能的最大值均随橡胶粒径的增大而减小，弹性能的最大值却随橡胶粒径的增大而增大．对比图(b)、(e)可见，达到储能极限后，HSC试件的弹性能迅速跌至0 J/cm$^3$，而UHSRC试件的弹性能缓慢下降，且随着橡胶取代率的增加或橡胶粒径的增大，缓慢下降程度均逐渐增大，这充分说明橡胶颗粒和钢纤维混掺后阻裂耗能效果优异，可显著降低弹性能的释放率．对比图8(c)、(f)可见，耗散能突变拐点所对应的应变值随橡胶取代率的增加或橡胶粒径的增大而逐渐增大，究其本质是橡胶颗粒以弹塑性变形的形式消耗输入能，延缓试件的损伤，从而增大了试件的变形能力．




(a) $U$ at 2.00 mm particle size　(b) $U_e$ at 2.00 mm particle size

(c) $U_d$ at 2.00 mm particle size　(d) $U$ at 20% substitution rate

(e) $U_e$ at 20% substitution rate　(f) $U_d$ at 20% substitution rate

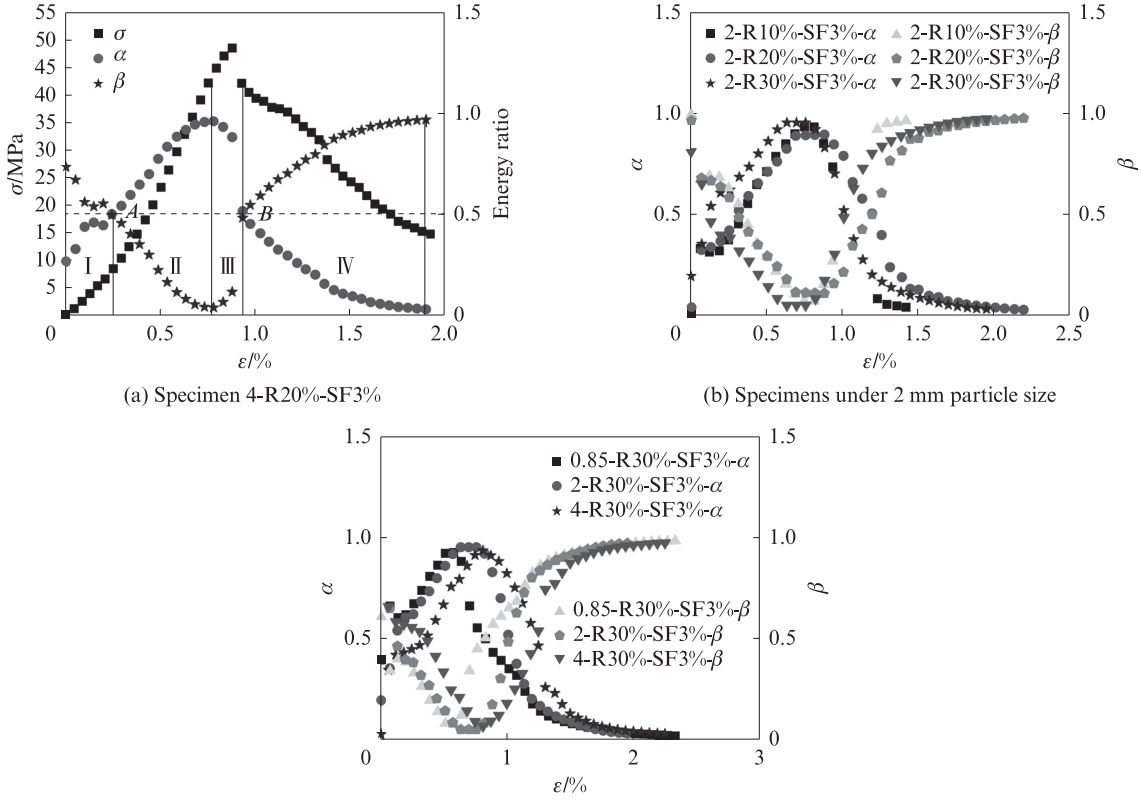
图8　部分试件的能量-应变曲线

Fig. 8　Energy-strain curves of part specimens

定义耗散能最大值所对应的应变值与耗散能拐点所对应的应变值之间的差值为耗散能步长，以此来衡量HSC和UHSRC的耗能效果．由图8(c)、(f)还可见：随着橡胶取代率的增加或橡胶粒径的减小，

耗散能步长均有所增大，这是因为橡胶颗粒和钢纤维在试件持续破坏阶段协同阻裂耗能，且橡胶颗粒取代率及其粒径越大，试件的阻裂耗能效果越好，即变形能力增强；耗散能突变拐点前所对应的耗散能值随橡胶取代率的增加而减小，随橡胶粒径增大几乎无变化（曲线近似重合），表明试件在突变损伤之前，橡胶颗粒是通过轴向压缩让位变形、横向膨胀挤压临近基体的方式，延缓试件过早地发生弹塑性变形，即延缓试件过早的耗能，从而耗散能值随着橡胶取代率的增加而减小.

为进一步明确能量在各阶段相互转化之间的关系，定义弹性能比率$\alpha$（弹性能/总输入能）和耗散能比率$\beta$（耗散能/总输入能），并将部分试件的计算结果转化成能量比率-应变曲线，如图9所示.




(a) Specimen 4-R20%-SF3%

(b) Specimens under 2 mm particle size

(c) Specimens under 30% substitution

图9 部分试件的能量比率-应变曲线

Fig. 9 Energy ratio-strain curves of part specimens

由图9(a)可见，试件4-R20%-SF3%的$\alpha$和$\beta$近似成水平“S”形走势，且关于水平轴“$AB$”（弹性能比率与耗散能比率相等点之间的连线）对称. 具体表现为：(1)第Ⅰ阶段（塑性压密阶段），$\beta$迅速减小并逐渐趋于稳定（斜率近似为0），$\alpha$迅速增大并逐渐趋于稳定，且$\beta$大于$\alpha$.(2)当$\alpha$与$\beta$相等时，试件进入第Ⅱ阶段（线弹性阶段），此时$\beta$继续减小，最终达到最小值0，而$\alpha$继续增大，最终达到最大值1. 值得注意的是，$\alpha$和$\beta$分别出现最大值和最小值时，试件并未发生破坏，而是临近发生局部塑性变形.(3)第Ⅲ阶段（局部塑性变形和突然破坏阶段），由于弹性能开始以局部塑性能、裂隙表面能等形式耗散，因此$\alpha$开始迅速下降，而$\beta$开始迅速上升，最终2条曲线再次交汇.(4)第Ⅳ阶段（持续破坏阶段），$\alpha$开始缓慢下降并逐渐跌至0，而$\beta$开始缓慢上升并逐渐增至1.

由图9(b)、(c)可见：各UHSRC试件具有相同的演化趋势，但由于组成相不同，能量比率-应变曲线略有差异. 在$\alpha$和$\beta$分别达到最大值和最小值之前，当橡胶取代率小于30%时，其对$\alpha$和$\beta$的影响微乎其微，二者转化率近似相等，曲线接近重合；当橡胶取代率为30%时，$\alpha$显著增大，而$\beta$显著减小，表明橡胶含量越多，弹性能转化率越大，耗散能转化率越小. 在$\alpha$和$\beta$分别达到最大值和最小值之后，随橡胶取代率的增加，$\alpha$的减小速率增大，而$\beta$的减小速率减小. 在$\alpha$和$\beta$分别达到最大值和最小值之前，$\alpha$随橡胶粒径的增大而减小，而$\beta$橡胶随粒径的增大而增大. 究其原因是同取代率下，单个橡胶颗粒的总数量随粒径的增大而减少，即粒径增大导致. 橡胶颗粒积聚弹性能的能力减弱，因此粒径增大会劣化弹性能转化率；在$\alpha$和$\beta$分别达到最大值和最小

值之后,$\alpha$随粒径的增大而增大,而$\beta$随粒径的增大而减小.

## 3　结论

(1)通过降低水胶比,同时采用钢纤维和硅灰协同调控强度的方法,成功研制出橡胶取代率高达30%,强度满足高强度混凝土(HSC)要求,且变形、韧性及耗能均远优于HSC的超高强度橡胶混凝土(UHSRC).

(2)钢纤维和橡胶颗粒混掺能够显著提高UHSRC的峰前弹塑性变形和峰后延性变形能力,且随橡胶取代率的增加或橡胶粒径的增大,该能力得到进一步增强,从而使混凝土表现出脆-延转换力学特征.

(3)UHSRC呈现韧性断裂的拉-剪耦合破坏模式,破坏形态"裂而不散",不同于HSC的脆性断裂张拉破坏模式和锥形破坏形态.

(4)钢纤维和橡胶颗粒混掺后,可显著降低UHSRC的弹性能释放率和耗散能突变拐点前所对应的耗散能值,但增大了耗散能突变拐点后的耗散能步长;随着橡胶取代率的增加,UHSRC的弹性能比率增大,耗散能比率减小;随着橡胶粒径的增大,UHSRC的弹性能比率先减小后增大,耗散能比率先增大后减小.

**参考文献:**


[1] 胡艳丽,高培伟,李富荣,等.不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J].建筑材料学报,2020,32(1):85-92.
HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different substitution rates[J]. Journal of Building Materials, 2020, 32(1): 85-92. (in Chinese)

[2] ABDELALEEM B H, HASSAN A A A. Effect of combining steel fibers with crumb rubber on enhancing the behavior of beam-column joints under cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2019, 182:510-527.

[3] FENG W H, LIU F, YANG F, et al. Compressive behaviour and fragment size distribution model for failure mode prediction of rubber concrete under impact loads [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121767.

[4] 杨荣周,徐颖,郑强强,等.分级等荷循环受压下橡胶砂浆的疲劳损伤演化[J].建筑材料学报,2021,24(5):961-969.
YANG Rongzhou, XU Ying, ZHENG Qiangqiang, et al. Fatigue and damage evolution characteristics of rubber cement mortar under graded constant load cyclic compression[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):961-969. (in Chinese)

[5] 韩辰悦,庞建勇.不同应变率下橡胶混凝土抗压性能及能量特性研究[J].硅酸盐通报,2022,41(3):922-930.
HAN Chenyue, PANG Jianyong. Compressive properties and energy characteristics of rubber concrete under different strain rates [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(3): 922-930. (in Chinese)

[6] 李海龙,徐颖,汪海波,等.硅灰对橡胶混凝土与吸能性能影响试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2222-2227.
LI Hailong, XU Ying, WANG Haibo, et al. Experimental study on compressive strength and energy absorption performance of silica fume on rubber concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7):2222-2227. (in Chinese)

[7] GUPTA T, CHAUDHARY S, SHARMA R K. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 702-711.

[8] 赵秋红,王菲,朱涵.结构用橡胶集料混凝土受压全曲线试验及其本构模型[J].复合材料学报,2018,35(8):2222-2234.
ZHAO Qiuhong, WANG Fei, ZHU Han. Compression test on curves and constitutive model of crumb rubber concrete for structural purposes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8):2222-2234. (in Chinese)

[9] WANG X, XIA J, NANAYAKKARA O, et al. Properties of high-performance cementitious composites containing recycled rubber crumb[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156:1127-1136.

[10] 刘誉贵,马育,刘攀.氨化与磺化改性橡胶混凝土机理及强度研究[J].材料导报,2018,32(9):3142-3153.
LIU Yugui, MA Yu, LIU Pan. Study on mechanism and strength of ammoniated modified rubber concrete and sulfonated modified rubber concrete[J]. Materials Reports, 2018, 32(9):3142-3153. (in Chinese)

[11] DONG S, ZHAO Q H, ZHU H. Mechanical properties and constitutive model of steel fiber-reinforced rubberized concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327:126720.

[12] 贺东青,王金歌,王一鸣.橡胶掺量对CBFRC的物理力学性能影响[J].建筑材料学报,2015,18(5):857-860.
HE Dongqing, WANG Jinge, WANG Yiming. Effect of crumb rubber proportion on mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18 (5):857-860. (in Chinese)

[13] ALSHAIKH I M H, BAKAR B H A, ALWESABI E A H, et al. Progressive collapse behavior of steel fiber-reinforced rubberized concrete frames[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57:104920.

[14] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression[J].Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(1):04014111.

[15] 赵顺波,赵明爽,张晓燕,等.钢纤维轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线研究[J].建筑结构学报,2019,40(5):181-190.
ZHAO Shunbo, ZHAO Mingshuang, ZHANG Xiaoyan, et al. Study on complete stress-strain curves of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 181-190. (in

Chinese)

[16] 张亮,王桂林,雷瑞德,等.单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制[J].中国公路学报,2021,34(1):24-34.
ZHANG Liang, WANG Guilin, LEI Ruide, et al. Energy damage evolution mechanism of single jointed rock mass with different lengths under uniaxial compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1):24-34. (in Chinese)

[17] PENG R D, JU Y, WANG J G, et al. Energy dissipation and release during coal failure under conventional triaxial compression [J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2015, 48:509-526.

[18] 傅强,赵旭,何嘉琦,等.基于能量转化原理的混杂纤维混凝土本构行为[J].硅酸盐学报,2021,49(8):1670-1682.
FU Qiang, ZHAO Xu, HE Jiaqi, et al. Constitutive response of hybrid basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete based on energy conversion principle[J].Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(8):1670-1682. (in Chinese)

(上接第603页)

parameter of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):737-743. (in Chinese)

[24] CAI Y X, LIU Q F, MENG Z Z, et al. Influence of coarse aggregate settlement induced by vibration on long-term chloride transport in concrete: A numerical study [J]. Materials and Structures, 2022, 55(9):235.

[25] GRUSKOVNJAK A, LOTHENBACH B, HOLZER L, et al. Hydration of alkali-activated slag: Comparison with ordinary Portland cement[J]. Advances in Cement Research, 2006, 18(3): 119-128.

[26] ZUO Y B, NEDELJKOVIC M, YE G. Pore solution composition of alkali-activated slag/fly ash pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 115:230-250.

[27] WU L J, JU X L, LIU M W, et al. Influences of multiple factors on the chloride diffusivity of the interfacial transition zone in concrete composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2020, 199:108236.

[28] TONG L Y, QING X X, ZHANG M Z, et al. Multi-scale modelling and statistical analysis of heterogeneous characteristics effect on chloride transport properties in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 367:130096.

[29] LIU Q F, HU Z, WANG X E, et al. Numerical study on cracking and its effect on chloride transport in concrete subjected to external load[J]. Construction and Building Materials, 2022, 325:126797.

[30] 杨志辉.碱激发混凝土抗氯离子侵蚀长期性能的研究[D].广州:广州大学,2021.
YANG Zhihui. Study on long-term of chloride resistance of alkali-activated concrete[D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2021. (in Chinese)

[31] LEE N K, LEE H K. Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72:168-179.