

文章编号:1007-9629(2024)07-0580-10

# 海水海砂再生混凝土受压动力本构模型

张青天, 张凯建\*

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:**考虑贝壳含量、龄期等因素,对不同加载应变率下的海水海砂再生混凝土(SSRAC)试件开展了单轴受压应力-应变曲线试验.结果表明:600 d时,与普通混凝土(NAC)相比,SSRAC峰值应力和峰值应变分别提高了10.4%、23.2%,弹性模量降低了29.1%;当掺入贝壳颗粒后,SSRAC应变率敏感性增加;结合试验以及文献数据,基于GB50010模型,考虑不同应变率下特征参数的动态增大系数,提出了适用于中低应变率( $10^{-5}$ ~ $10^{-1}$  s $^{-1}$ )下SSRAC受压动力本构模型,并对其曲线特征进行了机理解释.

**关键词:**再生混凝土;海水海砂;单轴受压应力-应变曲线;应变率;动态增大系数

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.002

## Dynamic Constitutive Model of Seawater and Sea Sand Recycled Aggregate Concrete under Compression

ZHANG Qingtian, ZHANG Kaijian\*

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** A test of the uniaxial compressive stress-strain curve under different strain rates was carried out on seawater and sea sand recycled aggregate concrete(SSRAC) considering different ages and shell contents. The results show that the 600 d peak stress and peak strain of SSRAC increase by 10.4% and 23.2%, respectively, as compared with those of natural aggregate concrete(NAC). However, the elastic modulus of SSRAC decreases by 29.1%. The strain rate sensitivity of SSRAC increases with the increase in shell content. Then, based on the model in GB50010, a dynamic constitutive model is proposed for SSRAC under medium and low strain rates (from  $10^{-5}$  s $^{-1}$  to  $10^{-1}$  s $^{-1}$ ) considering the dynamic increase factor of characteristic parameters. Finally, mechanism analyses of the characteristic of its stress-strain curves are given.

**Key words:** recycled aggregate concrete; seawater and sea sand; uniaxial compressive stress-strain curve; strain rate; dynamic increase factor

海水海砂混凝土(SSC)的研究缓解了河砂资源短缺问题<sup>[1]</sup>,有利于中国建设海洋强国<sup>[2-3]</sup>;同时,再生混凝土(RAC)是目前处理建筑垃圾的关键技术之一<sup>[4]</sup>.然而,受氯盐等侵蚀后的废弃混凝土,其再利用方式受限.基于就地取材思路,学者们<sup>[5-7]</sup>开始研究海水海砂再生混凝土(SSRAC),为同时缓解上述问题

提供了一种新方式.经配合比设计,SSRAC强度以及工作性能可满足实际工程要求<sup>[6]</sup>,而为了应用于结构中<sup>[8]</sup>,对SSRAC本构关系的研究至关重要.

在准静态受压下,SSC与普通混凝土(NAC)的应力-应变曲线相似,而SSC峰值应力和弹性模量更大<sup>[6]</sup>;海砂再生混凝土的强度随着氯离子含量的增加

收稿日期:2023-09-13;修订日期:2023-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008304);福建省自然科学基金资助项目(2023J05021);福建省中青年骨干教师教育科研资助项目(科技类)(JAT210040);福州大学校基金资助项目(GXRC21059, GXRC21060)

第一作者:张青天(1993—),男,湖北武汉人,福州大学助理研究员,硕士生导师,博士.E-mail:zqt@fzu.edu.cn

通讯作者:张凯建(1989—),男,山东昌乐人,福州大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:kaijian.zhang@fzu.edu.cn

而提高,再生粗骨料对裂纹扩展及轴向变形有显著影响<sup>[9]</sup>;SSRAC的应力-应变曲线几何特征与RAC相似<sup>[10]</sup>。值得注意的是,混凝土为应变率敏感性材料,其动力本构关系与准静态本构关系存在差异。与NAC相比,RAC应变率敏感性较大<sup>[11-14]</sup>。张凯建等<sup>[15]</sup>和Xiao等<sup>[16]</sup>发现在中低应变率( $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ )范围内,SSRAC的峰值应力和弹性模量随应变率增大而提高,孔隙率随再生粗骨料取代率增加而增大,而海水海砂的加入会降低其孔隙率,进而影响其应变率敏感性。目前关于SSRAC动力本构模型的研究较少,制约了其结构动力响应分析的准确性。

本文在文献[16]的基础上,进一步考虑龄期,开展了单轴动态受压下SSRAC的应力-应变曲线试验,探讨了中低应变率下的动力本构模型,并对曲线特征进行了机理解释,为其工程应用提供了理论基础。

## 1 试验

### 1.1 原材料与配合比

水泥采用42.5强度等级普通硅酸盐水泥;骨料采用河砂、海砂、天然粗骨料(NCA)及再生粗骨料(RCA),其材料性能见表1<sup>[15-16]</sup>;海水采用模拟海水<sup>[17]</sup>。NAC采用水泥、自来水、河砂及天然粗骨料制备。RAC采用水泥、自来水、河砂及再生粗骨料制备。SSRAC采用水泥、海水、海砂及再生粗骨料制备。另

外,以20%的贝壳颗粒等质量替代海砂,作为高贝壳含量的海砂,所配混凝土记作H-SSRAC。试件尺寸均为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,强度等级均为C30,配合比见表2。附加用水量根据再生粗骨料的含水率和吸水率计算得到。采用聚羧酸高效减水剂,控制混凝土坍落度为 $120 \sim 150 \text{ mm}$ 。SSRAC的28、120、600 d立方体抗压强度分别为36.50、9.32、46.53 MPa。并采用扫描电子显微镜(SEM)观察相同配合比下SSRAC和RAC中界面过渡区的微观形貌。

### 1.2 试验加载方式

参照文献[15-16]采用MTS液压式伺服加载系统测试各混凝土应力-应变( $\sigma_c-\epsilon_c$ )曲线。加载应变率为中低应变率,包括5种: $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,其中 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 为准静态。120 d、5种应变率下SSRAC和H-SSRAC试件各5个;600 d、 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 下NAC试件3个、SSRAC试件10个。

## 2 受压应力-应变曲线特征参数分析

### 2.1 特征参数计算

应力-应变曲线特征参数包括峰值应力 $\sigma_{cp}$ 、峰值应变 $\epsilon_{cp}$ 、极限应变 $\epsilon_{cu}$ 及弹性模量 $E_c$ <sup>[18]</sup>,其中 $\epsilon_{cu}$ 选取曲线下降段中应力下降至 $85\% \sigma_{cp}$ 时所对应的应变。计算所得特征参数的平均值和变异系数(COV),结果如表3所示。

表1 骨料的材料性能

Table 1 Material properties of aggregates<sup>[15-16]</sup>

Aggregate	Apparent density/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Fineness modulus	$w(\text{Cl}^-)/\%$	$w(\text{shell})/\%$	$w(\text{SO}_3)/\%$	Water content (by mass)/%	Water absorption (by mass)/%	Crush index
River sand	2 610	2.1	0.001	1.100	0.109			
Sea sand	2 660	2.7	0.057	2.310	0.123			
NCA	2 660						1.0	5.1
RCA	2 553					3.5	6.9	14.3

表2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of concretes

Reference	Concrete	Fresh water	Sea water	Cement	River sand	Sea sand	Shell	NCA	RCA	Water reducer	Unit: $\text{kg}/\text{m}^3$
This paper	NAC	150.00	0	319.00	829.00	0	0	1 099.00	0	4.79	
This paper	RAC	187.37	0	319.00	829.00	0	0	0	1 099.00	4.79	
This paper	SSRAC	0	187.37	319.00	0	829.00	0	0	1 099.00	4.79	
This paper	H-SSRAC	0	187.37	319.00	0	663.20	165.80	0	1 099.00	4.79	
Ref. [15-16]	SSRAC	0	180.00	319.00	0	829.00	0	0	1 099.00	0	
Ref. [15-16]	H-SSRAC	0	180.00	319.00	0	663.20	165.80	0	1 099.00	0	
Ref. [5]	SSRAC	0	210.74	329.82	0	727.00	0	0	1 137.00	0	

由表3可见:(1)在 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 应变率下,与NAC相比,600 d时SSRAC的峰值应力和峰值应变分别增大了10.4%和23.2%,弹性模量则降低了29.1%,说

明再生粗骨料的加入使压应变有较大提升;与养护120 d的试件SSRAC-5-120 d相比,养护600 d的试件SSRAC-5-600 d峰值应力增大了5.9%,弹性模量

表3 应力-应变曲线特征参数的平均值和变异系数  
Table 3 Mean value and COV of characteristic parameters of stress-strain curve

Specimen	Strain rate/s <sup>-1</sup>	Peak stress		Elastic modulus		Peak strain		Ultimate strain	
		$\sigma_{cp}/\text{MPa}$	COV	$E_c/\text{GPa}$	COV	$\epsilon_{cp} \times 10^3$	COV	$\epsilon_{cu} \times 10^3$	COV
SSRAC-1-120 d	10 <sup>-1</sup>	42.86	0.087	27.54	0.265	2.732	0.152	3.417	0.079
SSRAC-2-120 d	10 <sup>-2</sup>	42.55	0.238	23.46	0.464	2.796	0.111	3.458	0.171
SSRAC-3-120 d	10 <sup>-3</sup>	37.36	0.169	19.18	0.189	2.478	0.092	3.382	0.063
SSRAC-4-120 d	10 <sup>-4</sup>	34.72	0.211	18.83	0.304	2.534	0.058	3.353	0.115
SSRAC-5-120 d	10 <sup>-5</sup>	34.84	0.145	14.88	0.277	2.933	0.134	4.153	0.083
NAC-5-600 d	10 <sup>-5</sup>	33.44	0.068	28.20	0.231	2.433	0.186	3.500	0.149
SSRAC-5-600 d	10 <sup>-5</sup>	36.91	0.078	19.99	0.145	2.998	0.093	4.077	0.121
H-SSRAC-1-120 d	10 <sup>-1</sup>	45.88	0.031	28.41	0.177	2.642	0.027	3.071	0.023
H-SSRAC-2-120 d	10 <sup>-2</sup>	43.15	0.122	24.16	0.535	2.712	0.070	3.419	0.093
H-SSRAC-3-120 d	10 <sup>-3</sup>	38.31	0.117	16.84	0.195	2.480	0.096	3.139	0.036
H-SSRAC-4-120 d	10 <sup>-4</sup>	36.51	0.030	17.25	0.304	2.583	0.100	3.190	0.068
H-SSRAC-5-120 d	10 <sup>-5</sup>	33.87	0.089	12.99	0.095	3.181	0.048	3.974	0.049

增大了34.3%，而峰值应变相差不大；当掺入20%贝壳颗粒时，与试件SSRAC-5-120 d相比，试件H-SSRAC-5-120 d的弹性模量降低了12.7%，峰值应力降低了2.8%，峰值应变增大了8.5%，极限应变下降了4.3%。(2)当应变率从10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>增大到10<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>时，SSRAC的峰值应力和弹性模量分别增长了23.0%、85.1%，H-SSRAC的峰值应力和弹性模量分别增长了35.5%、118.7%。可见应变率的增大对弹性

模量的提高尤为显著，掺入贝壳颗粒后，弹性模量提高幅度增大，而且H-SSRAC力学性能对加载应变率的敏感性更大。

## 2.2 特征参数统计

总结本文及文献[9-10, 16]中10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>应变率下SSRAC曲线的特征参数，以相同条件下、不同混凝土特征参数之间的比值为基准，统计了其平均值和标准差，结果见图1。

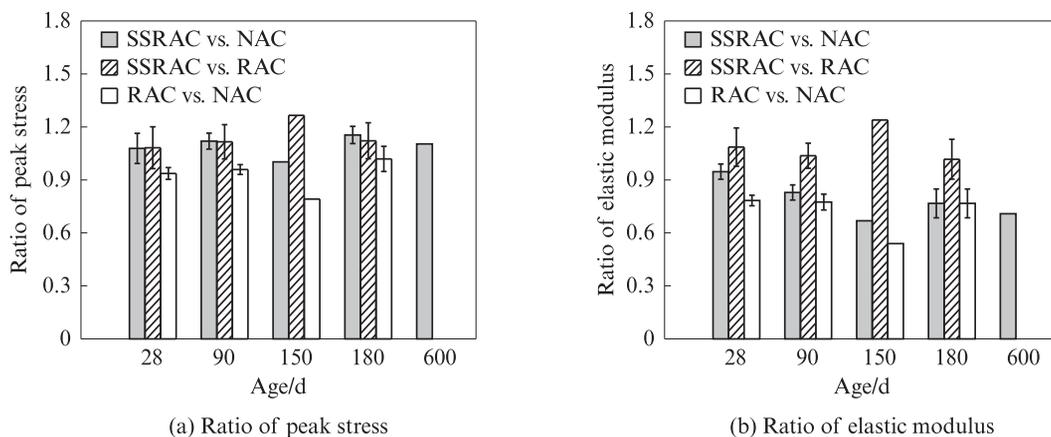


图1 不同混凝土特征参数之间的比值  
Fig. 1 Ratios of characteristic parameters between different concretes

由图1可见：与NAC相比，SSRAC的峰值应力在各龄期下均较大，28~180 d增幅为0.2%~15.4%，600 d增幅为10.4%，而相同条件下RAC的峰值应力较低；与RAC相比，SSRAC的峰值应力在28~180 d龄期增加8.2%~26.6%，表明海水海砂对RAC力学性能具有强化作用。文献[10]研究表明，再生粗骨料取代率对SSRAC的峰值应力影响不大，但会显著降低其弹性模量，且弹性模量降低幅度随再

生粗骨料取代率增加而增大。此外，将海水海砂加入RAC后，可使再生粗骨料取代率对峰值应力和弹性模量的劣化影响减小。

不同应变率下的曲线特征参数采用动态增大系数(D)来描述，D指以准静态下特征参数作为基准值时各应变率下特征参数与该基准值的比值。对本文以及文献[7, 16]中各类混凝土峰值应力、弹性模量、峰值应变和极限应变的动态增大系数 $D_\sigma$ 、 $D_E$ 、 $D_\epsilon$ 、 $D_{\epsilon_{cu}}$

进行对比,结果见图2.由图2可知,各类混凝土峰值应力和弹性模量的动态增大系数均随应变率的增大

呈明显的上升趋势,而峰值应变和极限应变的动态增大系数变化规律不明显.

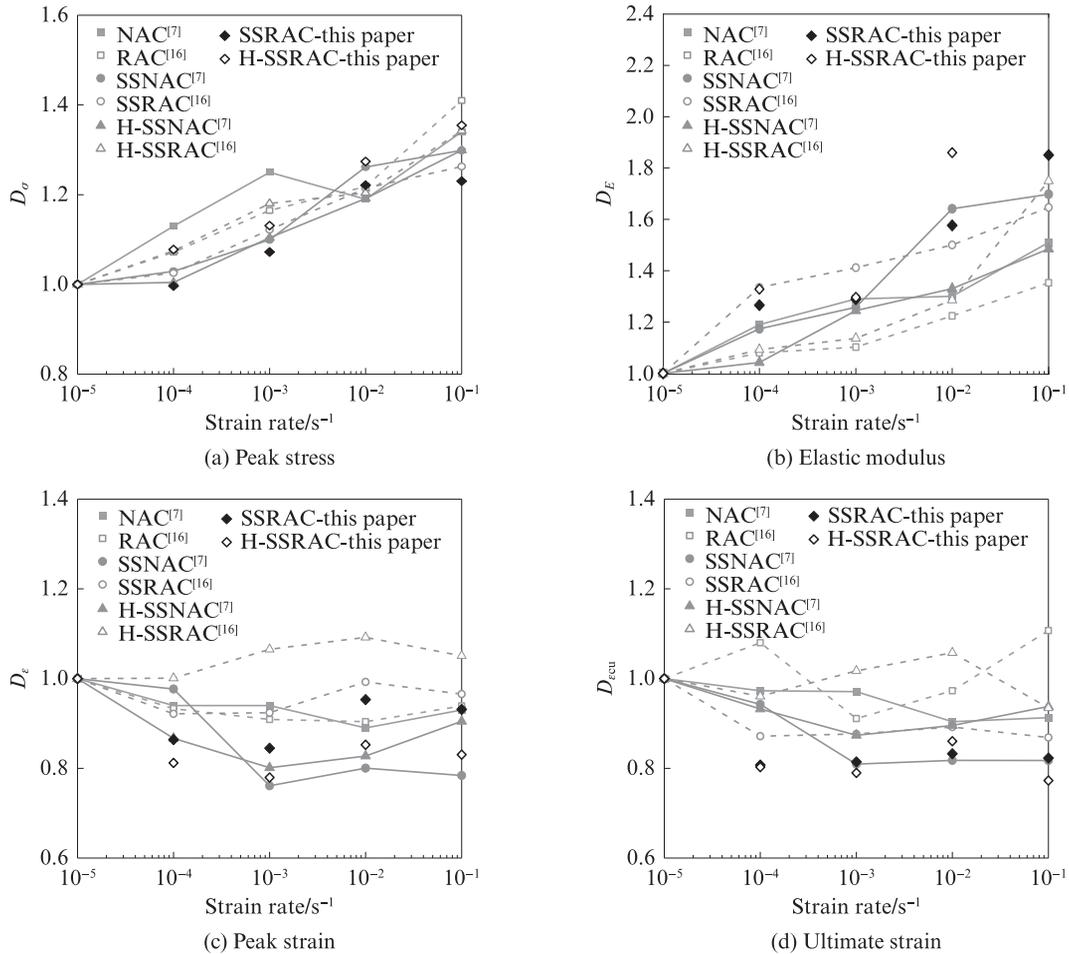


图2 不同混凝土特征参数的动态增大系数  
Fig. 2 Dynamic increase factor of characteristic points of different concretes

### 3 准静态受压本构模型

#### 3.1 现有模型分析

在准静态 ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 情况下,采用 Eurocode 模型<sup>[19]</sup>、GB50010 模型<sup>[20]</sup>和 Xiao 等<sup>[21]</sup>提出的受压本构模型,对试件 SSRAC-5-120 d 和 SSRAC-5-600 d 的归一化应力-应变曲线进行预测,结果如图3所示.由图3可见,GB50010 模型<sup>[20]</sup>预测曲线与实测曲线趋势基本一致.已有研究<sup>[22]</sup>表明,对于100%取代率的RAC,GB50010模型对曲线下降段的预测值偏低.加入海水海砂后,SSRAC的力学性能更接近NAC,对RAC性能具有增强作用.当使用Xiao等<sup>[21]</sup>模型时,需对其参数进行修正.Huang等<sup>[5,9]</sup>对海砂RAC及纤维增强SSRAC的应力-应变关系进行了修正,考虑了氯离子含量、纤维体积分数、贝壳含量等参数.因此,本文以GB50010模型为基础,对其进行修正,进而得出适用于SSRAC的应力-应变曲线本构模型.

#### 3.2 模型参数选取

结合试验和文献数据<sup>[10,16]</sup>讨论GB50010模型中的特征参数.

SSRAC强度按下式计算.

$$f_c = k \cdot f_{cu} \tag{1}$$

式中: $f_c$ 为轴心抗压强度; $f_{cu}$ 为立方体抗压强度;系数 $k$ 可取 $0.7886^{[23]}$ .

汇总文献<sup>[10,16]</sup>中SSRAC立方体抗压强度随龄期变化的数据,本文提出下式来表征不同龄期下SSRAC立方体抗压强度:

$$f_{cu}(t)/f_{cu}(28) = \alpha_n \cdot \lg t / \lg 28 \tag{2}$$

式中: $t$ 为龄期; $\alpha_n$ 为强度调整系数.

不同龄期下SSRAC和RAC的强度调整系数如表4所示.由表4可见:SSRAC的7d抗压强度调整系数显著高于RAC;90、180d龄期时,SSRAC强度调整系数下降为与RAC相近,表明SSRAC水化反应主要集中在早期.

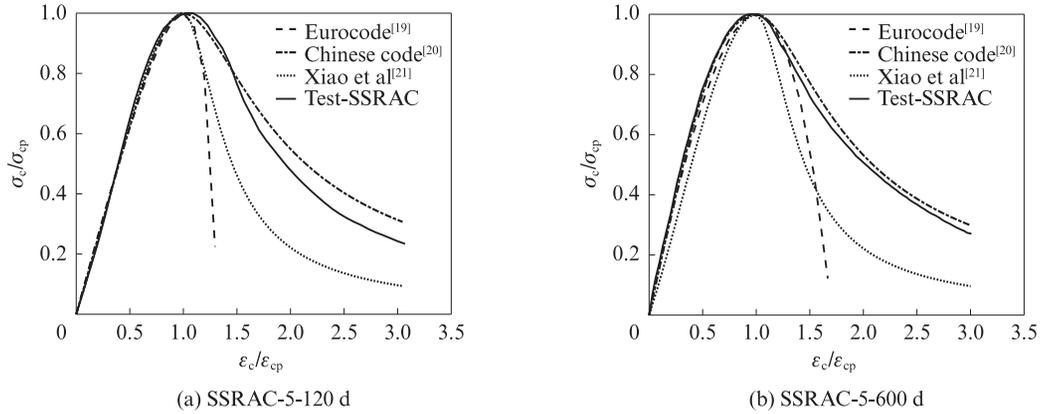


图3 试件 SSRAC-5-120 d 和 SSRAC-5-600 d 的归一化应力-应变曲线模型

Fig. 3 Normalized stress-strain curve models for SSRAC-5-120 d and SSRAC-5-600 d specimens

表4 不同龄期下 SSRAC 和 RAC 的强度调整系数

Table 4 Strength adjustment factor of SSRAC and RAC at different ages

Concrete	7 d		90 d		180 d	
	$\alpha_n$	COV	$\alpha_n$	COV	$\alpha_n$	COV
SSRAC	1.42	0.12	0.83	0.10	0.76	0.15
RAC	0.86	0.24	0.93	0.11	0.78	0.14

对于 NAC, 其弹性模量与立方体抗压强度标准值 ( $f_{cu,k}$ ) 之间有如下关系式<sup>[20]</sup>:

$$E_c = 10^5 / (p + q/f_{cu,k}) \quad (3)$$

式中:  $p, q$  为拟合参数.

考虑轴心抗压强度和立方体抗压强度的线性关系, 以峰值应力  $\sigma_{cp}$  替代  $f_{cu,k}$ , 代入式(3)中进行拟合, 结果如图4所示, 其中未标注图例均为 SSRAC 的数据. 由图4可见, 在相同峰值应力条件下, 采用 28 d 数据拟合时, SSRAC 的弹性模量要小于 NAC; 当龄期增大时, 弹性模量离散性增大, 若以全龄期数据拟合则会产生偏差.

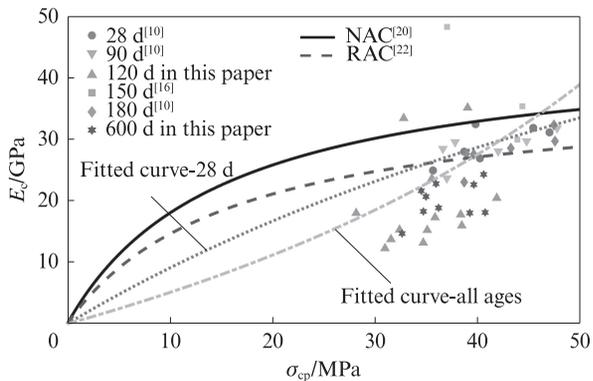


图4 峰值应力和弹性模量的拟合曲线  
Fig. 4 Fitted curve of peak stress versus elastic modulus

NAC 的峰值应力和峰值应变之间关系如式(4)所示<sup>[20]</sup>, 以此形式对数据进行拟合, 如图5所示.

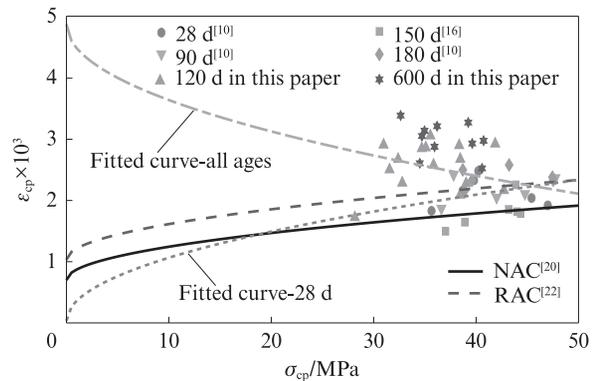


图5 峰值应力和峰值应变的拟合曲线

Fig. 5 Fitted curve of peak stress versus peak strain

$$\epsilon_{cp} = m \cdot \sqrt{\sigma_{cp}} + n \quad (4)$$

式中:  $m, n$  为拟合参数.

由图5可见: 基于 28 d 数据所得曲线和 NAC 曲线趋势基本一致, 当峰值应力大于 20 MPa 时, 峰值应变拟合值介于 NAC 和 RAC 之间; 龄期增加时, SSRAC 峰值应变的预测值逐渐提高.

GB50010 模型中压力-应变曲线下降段的形状参数  $\alpha_c$  和峰值应力之间的关系如式(5)所示<sup>[20]</sup>,  $\alpha_c$  的计算见文献[22], 拟合结果见图6.

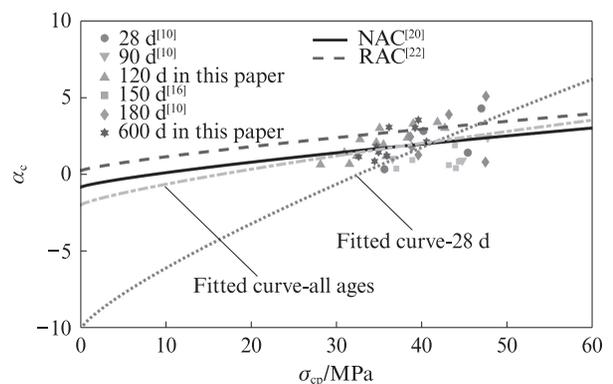


图6 峰值应力和形状参数的拟合曲线

Fig. 6 Fitted curve of peak stress versus  $\alpha_c$

$$\alpha_c = u \cdot \sigma_{cp}^{0.785} - v \quad (5)$$

式中: $u$ 、 $v$ 为拟合参数.

由图6可见,全龄期下SSRAC的数据拟合曲线与NAC关系曲线极为接近,表明两者的下降段形状参数接近,但均低于RAC的形状参数.

由图4~6可得到所有拟合参数,结果见表5.

## 4 考虑应变率的受压动力本构模型

### 4.1 不同应变率下的本构模型

采用GB50010模型计算各应变率下的形状参数,峰值应力直接采用表3数据,同时通过试验曲线

拟合得到 $\alpha_c$ ,结果均列于表6.

表5 拟合参数  
Table 5 Fitted parameters

Fitting parameter	NAC <sup>[20]</sup>	SSRAC	R <sup>2</sup> for SSRAC	RAC <sup>[22]</sup>	R <sup>2</sup> for RAC <sup>[22]</sup>
$p$	2.200 0	0.982 8	0.971 8	2.634 0	0.321 0
$q$	34.700 0	100.191 5		42.186 2	
$m$	0.172 0	0.325 7	0.906 2	0.184 2	0.196 4
$n$	0.700 0	0.034 5		1.031 5	
$u$	0.157 0	0.225 1	0.115 8	0.151 1	0.129 8
$v$	0.905 0	2.081 9		-0.181 8	

表6 各应变率下的形状参数  
Table 6 Shape parameters with different strain rates

Strain rate/ $s^{-1}$	$\alpha_c$ of SSRAC			$\alpha_c$ of H-SSRAC		
	Calculated	Fitted	R <sup>2</sup>	Calculated	Fitted	R <sup>2</sup>
$10^{-1}$	3.51	5.95	0.982 2	7.78	7.23	0.929 3
$10^{-2}$	3.89	2.84	0.986 8	3.27	3.72	0.983 2
$10^{-3}$	1.81	2.45	0.990 6	3.16	2.32	0.997 8
$10^{-4}$	2.24	2.34	0.988 5	3.95	3.19	0.995 0
$10^{-5}$	1.44	2.60	0.998 8	3.55	3.02	0.991 7

将采用2种方式获取的形状参数代入GB50010模型,得出不同应变率下SSRAC和H-SSRAC的预测应力-应变曲线,如图7所示.由图7可见:对于曲线上升段,各应变率下GB50010模型计算曲线与实测曲线均较为吻合;对于曲线下降段,从计算和拟合的形状参数(见表6)来看,当应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-2} s^{-1}$ 时,其值相近,而在 $10^{-1} s^{-1}$ 处会显著增加.由于峰值应变和极限应变的应变率敏感性规律性均不明显,由其计算得到的形状参数也缺乏规律性.因此,曲线上升段可采用GB50010模型,而曲线下降段的形状参数需要进行修正.

### 4.2 模型参数动态增大系数

CEB-FIP规范<sup>[24]</sup>给出了峰值应力、弹性模量、峰值应变的DIF和加载应变率的关系,其与加载应变率的对数成正比.以 $10^{-5} s^{-1}$ 应变率下所得特征参数为基准,得出不同应变率下特征参数的动态增大系数.对峰值应力、弹性模量和峰值应变的动态增大系数均以式(6)形式进行线性拟合.对于形状参数 $\alpha_c$ ,当应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-2} s^{-1}$ 时,形状参数基本保持不变,而应变率为 $10^{-1} s^{-1}$ 时,形状参数显著增大,表现为曲线下降段显著变陡,这是因为高应变率下混凝土试块的破坏模式变化显著,表面剥落现象严重.因此,形状参数的动态增大系数 $D_a$ 可取为分段函数,按式(7)计算.

$$D = 1 + a \cdot \lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) \quad (6)$$

$$D_a = \begin{cases} 1, & \dot{\epsilon} \leq 10^{-2} s^{-1} \\ 1 + a \cdot [\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) - 3], & 10^{-2} s^{-1} < \dot{\epsilon} \leq 10^{-1} s^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为基准应变率,取 $10^{-5} s^{-1}$ ;  $a$ 为计算参数.

动态增大系数计算参数 $a$ 见表7.由表7可见,贝壳颗粒的掺入增加了SSRAC峰值应力和弹性模量的应变率敏感性,降低了峰值应变的应变率敏感性.

## 5 受压应力-应变曲线特征机理分析

### 5.1 准静态受压下应力-应变曲线特征

由表5中的拟合参数,将根据7组间隔相同的 $\sigma_{cp}$ (25~55 MPa)所得特征参数代入GB50010模型中,得到准静态下混凝土的应力-应变关系曲线,如图8所示.由图8可见:与NAC相比,RAC和SSRAC曲线下降段的曲率更大,表明再生粗骨料会增加混凝土的脆性;SSRAC的弹性模量要高于RAC,且RAC的下降段比SSRAC更陡峭,表明海水海砂的加入可改善RAC曲线下降段的形状参数,降低再生粗骨料对混凝土脆性的劣化影响.

RAC内部存在新界面过渡区(新砂浆与老砂浆之间)和老界面过渡区(原始天然粗骨料与老砂浆之间),

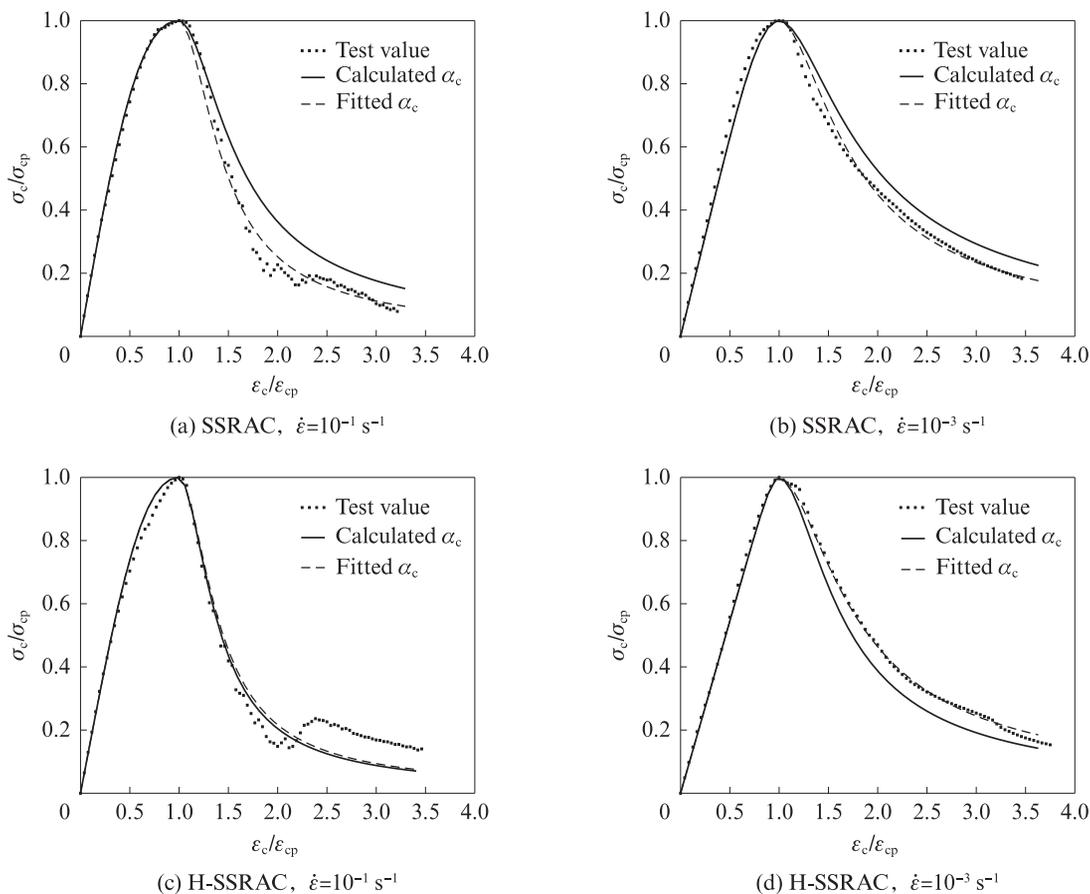


图 7 不同应变率下 SSRAC 和 H-SSRAC 的预测应力-应变曲线  
 Fig. 7 Predicted stress-strain curves of SSRAC and H-SSRAC at different strain rates

表 7 动态增大系数计算参数  $a$

Dynamic increase factor	SSRAC		H-SSRAC	
	$a$	$R^2$	$a$	$R^2$
$D_\sigma$	0.061 5	0.999 0	0.083 3	0.999 6
$D_E$	0.187 0	0.996 6	0.207 9	0.977 5
$D_\epsilon$	-0.020 9	0.995 4	-0.019 0	0.984 4
$D_a$	1.282 8		1.389 9	

这是导致 RAC 力学性能劣化的关键因素之一<sup>[25]</sup>. 因此, RAC 曲线下降段更陡, 脆性增加. 图 9 给出了 120 d 时 RAC 和 SSRAC 的微观形貌. 由图 9 可见, SSRAC 中的界面过渡区结构相对于 RAC 更为致密. 研究<sup>[26-27]</sup>显示, 海水海砂会提升混凝土的早期强度, 缩短初凝时间; 较大的贝壳颗粒含量(大于 20%)会影响其弹性模量; 盐离子加速了水泥的早期水化反应, 而钙矾石等水化产物会影响内部孔隙结构的发展. SSRAC 中的水化

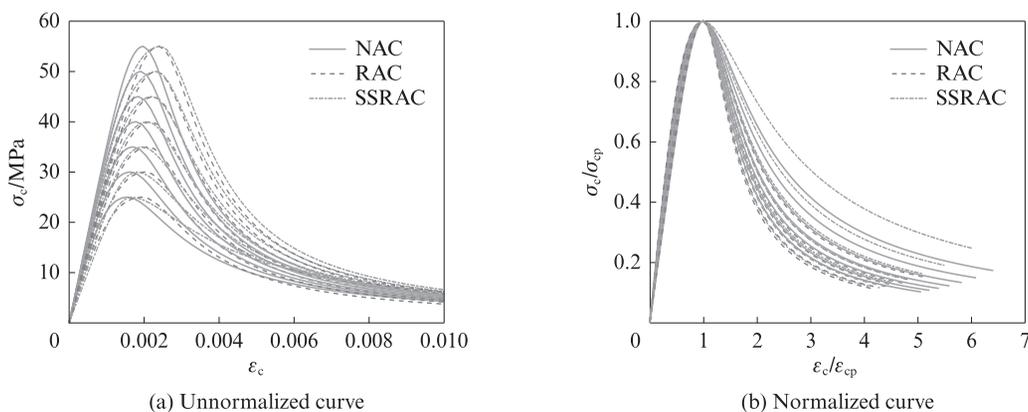


图 8 应力-应变曲线模型平均值曲线  
 Fig. 8 Mean value curves modified by stress-strain model

产物、Friedel盐、钙矾石和石膏等,可对再生粗骨料附着老砂浆及界面过渡区的孔隙进行填充,进而改善其

力学性能,降低曲线下降段的陡峭程度,从而降低再生粗骨料对混凝土脆性的劣化影响。

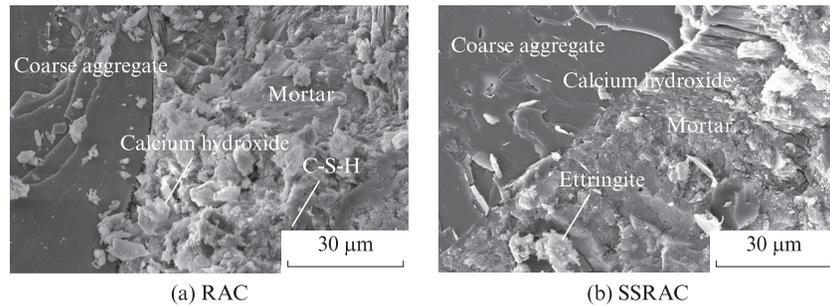


图9 RAC和SSRAC的微观形貌  
Fig. 9 Microstructure of RAC and SSRAC

## 5.2 不同应变率下应力-应变曲线特征

基于表7中参数 $a$ ,在测试所得准静态下的 $\sigma_{cp}$ 基础上,计算5组应变率( $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ )下所得修正后的特征参数,代入GB50010模型,得到不同应变率下SSRAC和H-SSRAC的应力-应变曲线,如图10所示.由图10可见,当掺入贝壳颗粒后,其应力-应变曲线上升段斜率更小,下降段更陡峭。

李龙等<sup>[28]</sup>研究表明,在中、低应变率下,相对于骨料和界面过渡区,砂浆部分对RAC整体应变率敏

感性的影响起主导作用.海水海砂的加入使RAC曲线下下降段更趋近于NAC.向SSRAC中掺入贝壳颗粒后,其新砂浆强度降低.海水海砂对老砂浆及界面过渡区虽存在一定的强化作用,但由于试件中新砂浆含量高于老砂浆,使得新砂浆对整体弹性模量的应变率敏感性的影响程度增大,因此H-SSRAC弹性模量的应变率敏感性增大.同时,贝壳的加入,增加了细观结构的薄弱区域,使得其峰值应力的应变率敏感性增加。

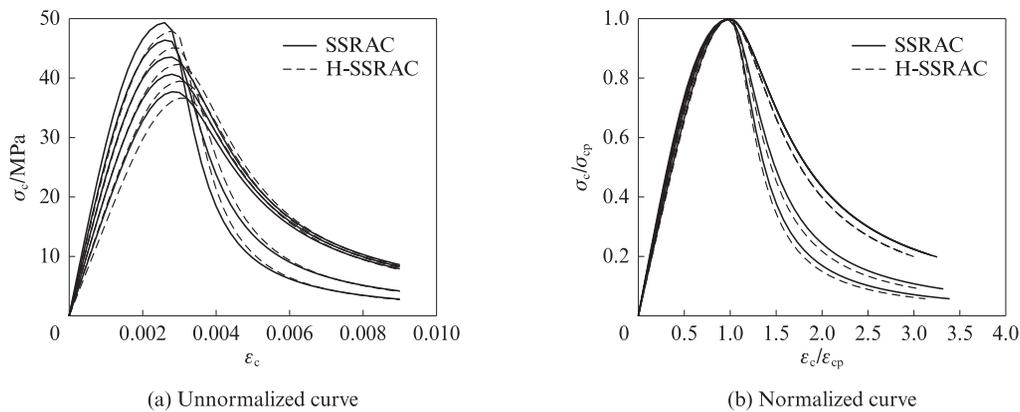


图10 各应变率下应力-应变曲线模型平均值曲线  
Fig. 10 Mean value curves modified by stress-strain model with different strain rates

## 6 结论

(1)加载应变率为 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时,龄期600 d的海水海砂再生混凝土(SSRAC)峰值应力及峰值应变高于普通混凝土(NAC),弹性模量低于NAC;当贝壳含量增大20%时,SSRAC弹性模量降低12.7%,峰值应力降低2.8%。

(2)随着应变率的增加,SSRAC峰值应力和弹性模量的动态增大系数明显增大,而峰值应变和极限应变的动态增大系数变化规律不明显.与再生混凝土(RAC)相比,SSRAC弹性模量的动态增大系数

有较大提升,且随贝壳含量增加,高贝壳含量的海水海砂再生混凝土(H-SSRAC)特征参数的动态增大系数相对于SSRAC有一定程度的提升。

(3)通过修正,GB50010模型可描述准静态下SSRAC受压应力-应变曲线;其特征参数的动态增大系数与加载应变率线性相关;下降段形状参数在 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围变化不大,而在 $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时显著增加.本文提出了适用于中、低应变率,100%粗骨料取代率下SSRAC的动力本构模型,后续需开展更多强度等级混凝土的试验进行验证,并针对粗骨料取代率进行模型优化。

(4)海水海砂的加入能够提升RAC的力学性能;在中、低应变率下,影响SSRAC应变率敏感性的主要因素为新砂浆,当贝壳颗粒含量增加时,新砂浆强度降低,因此SSRAC峰值应力和弹性模量的应变率敏感性增加;后续研究需建立贝壳颗粒含量对模型参数的影响.同时,可掺入再生细骨料,进而探究海水海砂对其力学性能及应变率敏感性的影响.

#### 参考文献:

- [1] BENDIXEN M, BEST J, HACKNEY C, et al. Time is running out for sand[J]. *Nature*, 2019, 571(7763):29-31.
- [2] 冯兴国, 卢潇, 卢向雨, 等. 海水拌制珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的锈蚀速率[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6):1322-1327. FENG Xingguo, LU Xiao, LU Xiangyu, et al. Corrosion rate of stainless steel rebar in coral concrete prepared with seawater[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6):1322-1327. (in Chinese)
- [3] ZHAO Y F, HU X, SHI C J, et al. A review on seawater sea-sand concrete: Mixture proportion, hydration, microstructure and properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 295:123602.
- [4] 高文昌, 张欢, 耿悦, 等. 再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(11):1121-1127. GAO Wenchang, ZHANG Huan, GENG Yue, et al. Model for the relationship between prism and cube compressive strengths of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(11):1121-1127. (in Chinese)
- [5] HUANG Y J, WANG T C, SUN H L, et al. Mechanical properties of fibre reinforced seawater sea-sand recycled aggregate concrete under axial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 331:127338.
- [6] XIAO J Z, ZHANG Q T, ZHANG P, et al. Mechanical behavior of concrete using seawater and sea-sand with recycled coarse aggregates[J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(5):1631-1643.
- [7] ZHANG K J, XIAO J Z, ZHANG Q T, et al. Experimental study on stress-strain curves of seawater sea-sand concrete under uniaxial compression with different strain rates[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(6):1124-1137.
- [8] ZHOU Y W, GAO H, HU Z H, et al. Ductile, durable, and reliable alternative to FRP bars for reinforcing seawater sea-sand recycled concrete beams: Steel/FRP composite bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 269:121264.
- [9] HUANG Y J, HE X J, WANG Q, et al. Mechanical properties of sea sand recycled aggregate concrete under axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175:55-63.
- [10] 周登飞. 海水海砂再生混凝土轴压力学性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. ZHOU Dengfei. Experimental study on axial compressive properties of seawater and sea sand recycled concrete [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020. (in Chinese).
- [11] LI L, XIAO J Z, POON C S. Dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(11):4451-4462.
- [12] XIAO J Z, LI L, SHEN L M, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 71:46-55.
- [13] XIAO J Z, LI L, SHEN L M, et al. Effects of strain rate on mechanical behavior of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93:214-222.
- [14] 肖建庄, 袁俊强, 李龙. 模型再生混凝土单轴受压动态力学特性试验[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(3):201-207. XIAO Jianzhuang, YUAN Junqiang, LI Long. Experimental study on dynamic mechanical behavior of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(3):201-207. (in Chinese).
- [15] 张凯建, 肖建庄, 张青天. 海水海砂再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(12):1738-1745. ZHANG Kaijian, XIAO Jianzhuang, ZHANG Qingtian. Complete stress-strain curves of seawater sea sand recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2021, 49(12):1738-1745. (in Chinese).
- [16] XIAO J Z, ZHANG K J, ZHANG Q T. Strain rate effect on compressive stress-strain curves of recycled aggregate concrete with seawater and sea sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 300:124014.
- [17] Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98(2013)[S].
- [18] Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression: ASTM C469/C469M-2014 [S].
- [19] Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings; EN 1992-1-1/A1-2014[S].
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture Press, 2015. (in Chinese).
- [21] XIAO J Z, LI J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6):1187-1194.
- [22] XIAO J Z, ZHANG K J, AKBARNEZHAD A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 181:753-771.
- [23] 肖建庄, 张鹏, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. *建筑科学与工程学报*, 2018, 35(2):16-22.