doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.010

反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系试验

徐善华,李安邦,崔焕平,刘小微

(西安建筑科技大学 土木工程学院,710055 西安)

摘 要:为研究碳化对混凝土反复受压力学性能的影响,对两种强度等级混凝土棱柱体试件进行了快速碳化与反复加卸载试验.结果表明:随着混凝土碳化深度增大,试件破坏脆性越明显,混凝土初始弹性模量、割线模量以及峰值应力均有不同程度增长,而其峰值应变却明显降低,共同点轨迹线越发偏离包络线,包络线下降段明显变陡,卸载曲线越发凹曲,再加载曲线更为平缓,变形恢复滞后现象越来越明显.在试验研究基础上,提出反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系数学函数模型.

关键词:混凝土;碳化;反复荷载;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**:0367-6234(2015)12-0057-07

Experimental investigation of the stress-strain response of carbonated concrete under repeated loading

XU Shanhua, LI Anbang, CUI Huanping, LIU Xiaowei

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China)

Abstract: The accelerated carbonation tests and repeated loading tests on C20 and C30 concrete specimens were carried out to investigate the effect of carbonation on the mechanical properties of concrete under repeated loading. Test results show that with the increase of carbonation depth, the brittle failure of concrete became more significant, the elastic modulus and the compressive strength increased, the strain at peak compressive stress decreased, respectively. The common point curve deviated farther from the envelop curve, the shape of the descending branch of envelop curve became much steeper, the concave shape of the unload curve became more and more obviously, the shape of reload curve became more and more gentle, the hysteresis of strain recovery for carbonated concrete became more obviously. Based on regression analysis of test result, the analytical stress-strain response of carbonated concrete subjected to repeated loading were established.

Keywords: concrete; carbonation; repeated loading; mechanical property; stress-strain relationship

混凝土碳化是一般大气环境下既有混凝土结构老化最典型的特征之一[1],特别是对于一些建造年代较早的混凝土结构,其混凝土强度等级普遍较低,水灰比偏大,在一般大气环境中更易发生碳化反应.碳化混凝土内部化学成分、微观组织结构改变的同时,势必造成混凝土强度、变形及延性等力学性能指标发生变化.目前国内外学者对于单调荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系的研究较多[2-8],文献[2-5]通过碳化混凝土棱柱体单调加载试验发现随着碳化深度增大,混凝土峰值应力有所提高,混凝土峰值应变则逐渐降低,C30混凝土碳化后抗压强度增大接近60%,而碳化对混凝土峰值应变影响较小,C30混凝土碳化后峰值应变减小5%左右;文献[6]通过试验研究认为混凝土碳化后峰值应变基本保持不变,峰值应力提高16%~26%,并且提高数值与原混凝土强度等级有关,原混凝土强度越高,提高幅度越大;文献[7]研究结果表明,碳化后混凝土峰值应力、弹性模量随碳化深度增加而明显增加,碳化后混凝土峰值应变则基本保持不变;文献[8]研究结果表明,碳化后混凝土峰值应力有所增大,而峰值应变则明显减小,碳化造成混凝土应力-应变曲线下降段逐渐变陡.

已有研究较好地揭示了单调荷载作用下碳化混凝土力学性能的变化规律,然而针对碳化混凝土在反复荷载作用下受力性能的研究则开展较少[7-8],

收稿日期:2014-12-18.

基金项目:国家自然科学基金(51078307);教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13089).

作者简介:徐善华(1963—),男,教授,博士生导师.

通信作者:徐善华,xushanhua@163.com.

碳化混凝土内部化学成分及微观组织结构的改变，同样对其在反复荷载作用下的受力性能造成很大影响.本文以建造年代较早的既有混凝土结构中采用较多的 C20、C30 混凝土作为研究对象，通过试验室快速碳化试验和反复加卸载试验，研究反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系，探讨碳化对棱柱体混凝土试件破坏形态、加卸载曲线形状、外包络线以及共同点轨迹线的影响，建立反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系数学模型，为既有混凝土结构安全评估及其抗震性能分析提供技术依据.

1 试验方案

1.1 试件设计

试验采用秦岭牌普通硅酸盐水泥，粗骨料为连续粒级碎石，最大粒径 20 mm，砂采用连续级配中砂，其含泥量不大于 2%，拌和水为自来水.按 GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》制作和养护试件，试验每立方米混凝土材料用量及混凝土立方体抗压强度指标见表 1.本文主要目的是为既有混凝土结构的耐久性评定提供基础数据，在试验设计之初就考虑到建造年代较早的既有混凝土结构具有混凝土强度普遍偏低、水灰比较大，在一般大气环境下更易于发生碳化反应的特点，因此试验设计的两组试件强度等级均不超过 C30，水灰比不小于 0.6.试验共制作了两批次 48 个试件，其中 24 个 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块用于研究混凝土碳化深度和抗压强度变化规律；8 组 24 个 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件用于研究反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系变化规律.

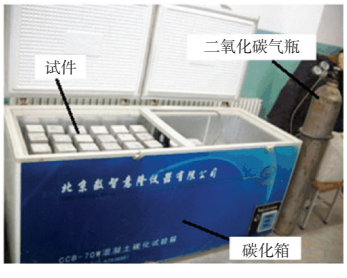
表 1 每立方米混凝土材料用量及性能指标

批次	水泥强度等级	水灰比	坍落度/mm	水/kg	水泥/kg	砂/kg	石子/kg	28 d 抗压强度/MPa
C20	32.5	0.625	30~50	195	312	719	1174	20.4
C30	42.5	0.600	30~50	195	325	714	1166	34.5

1.2 快速碳化试验及反复加、卸载试验

试件养护至规定龄期后，放入温度为 60 ℃的烘箱干燥 48 h，然后用石蜡对试件两个端面进行密封，再将试件放入碳化箱进行快速碳化，见图 1(a).碳化过程按 GB/T50082—2009[9] 执行，环境参数为：温度 20 ℃±3 ℃、相对湿度 70%±5%、CO_2 体积分数 20%±3%.两批次试件的碳化试验均分为 4 个组别，试验过程中定期用切割机劈裂混凝土试块，并使用 1%的酒精酚酞试剂检测试件碳化深度，当碳化到所需碳化深度后，取出相应组试件.

全部试件完成预定程度的快速碳化试验后，同期采用改进的 WAW 系列微机控制电液伺服万能试验机(最大压力 1 000 kN)对试件进行反复加、卸载试验，采用两个固定架以及位移计和应变计并借助 TDS-602 动态数据采集仪记录试件应变，加载装置见图 1(b).采用位移控制加载，采用等应变增量控制的反复加卸载制度，加载速率 0.1 mm/min，初始加载至位移达到预定值后进行卸载，卸载速率 0.1 mm/min；再按等应变增量加载至与包络线相切后卸载至荷载为 0，反复加卸载，直至荷载-位移曲线趋于稳定或者荷载降至峰值荷载 30%以下停止试验.



(a) 碳化试验装置



(b) 加载试验装置

图 1 试验装置

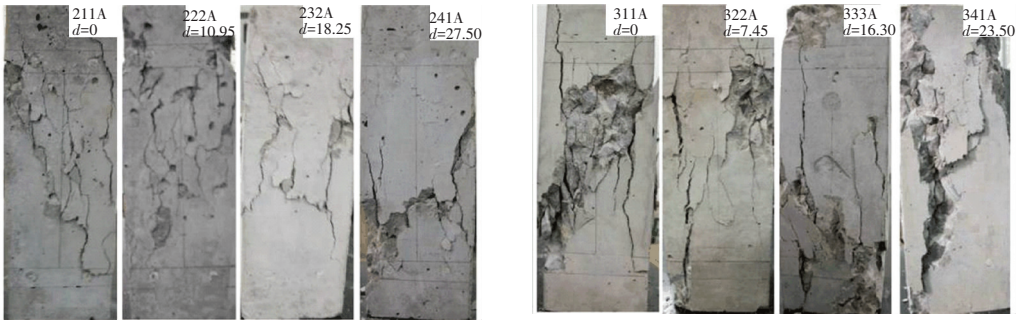
2 试验结果

2.1 破坏形态

图 2 给出了不同碳化深度试件在反复受压后的破坏形态，图中 d 为碳化深度，单位 mm.混凝土棱柱体试件反复受压破坏是混凝土内部微裂缝形成、扩展和贯通崩裂的过程.加载初期，试件处于弹性阶段，应力-应变近似按比例增长.随着荷载增加，试件逐渐进入弹塑性阶段，应力-应变关系曲线由陡变缓，呈上凸趋势.当应变达到第一控制应变时对其进行卸载，试件完成第一个加卸载循环，第一循环期间碳化试件和未碳化试件均未出现明显裂缝.当应变达到第二循环控制应变时，未碳化试件应力往往未达到峰值应力，其表面未出现明显裂缝；而碳化试件应力基本达到或越过峰值点，在其侧面角部出现细而短的竖向裂缝，部分碳化试件表面甚至出现脱落

现象.继续进行加卸载，试件出现多条独立、细而短的纵向裂缝，裂缝间的混凝土小柱体将沿薄弱面发生剪切裂缝，并逐渐形成贯通试件全截面的主斜裂缝，斜裂缝逐渐加宽从而导致试件破坏.

比较碳化试件与未碳化试件加载过程发现：1）随着混凝土碳化深度不断增加，试件的峰值应变不断减小；2）碳化混凝土试件在达到峰值应力前在角部就出现了肉眼可见裂缝，而未碳化试件往往越过峰值应力才产生肉眼可见裂缝；3）对混凝土强度等级相同的试件，试件碳化深度越大，试件破坏时裂缝数量越少且裂缝位置越集中，碳化深度越大的试件破坏前表面越容易出现大块崩裂脱落现象，材料明显变脆（图 2）；4）对于碳化深度接近的 C20 与 C30 试件，C30 试件破坏时脆性更加明显.



(a) C20　　(b) C30

图 2　试件破坏形态

2.2　主要力学性能参数

表 2 给出反复荷载作用下各组试件的主要试验结果.随着碳化深度加大，混凝土峰值应变明显降低，峰值应力、初始弹性模量、峰值点割线模量均有不同程度增长.

表 2　试验结果

批次	组别	d/mm	σ_0/MPa	C.V(σ_0)	$\varepsilon_0/10^{-3}$	C.V(ε_0)	$E_0/10^4$MPa	$E_p/10^4$MPa
C20	1	0	23.17	0.070 5	1.63	0.027 3	1.687 7	1.426 0
	2	11.83	25.44	0.027 0	1.51	0.003 5	2.535 6	1.688 6
	3	17.33	27.08	0.024 0	1.50	0.078 1	2.962 4	1.811 2
	4	26.25	26.06	0.048 0	1.35	0.018 1	1.705 4	1.930 0
C30	1	0	34.67	0.026 7	1.99	0.038 8	2.958 0	2.039 3
	2	8.05	44.09	0.056 2	1.70	0.021 5	3.668 0	2.680 4
	3	15.40	43.52	0.048 4	1.65	0.026 6	3.281 0	2.930 6
	4	23.03	45.34	0.039 4	1.49	0.005 3	3.693 9	2.282 8

注：d 为碳化深度，σ_0为峰值应力，C.V(σ_0)为同组试件峰值应力变异系数，ε_0为峰值应变，C.V(ε_0)为同组试件峰值应变变异系数，E_0为初始弹性模量，E_0为应力值0.4σ_0处对应割线模量，E_p为峰值点割线模量.

2.3　应力-应变全曲线特征

图 3 给出了反复荷载作用下部分棱柱体试件应力-应变全曲线.图 3 试件的应力-应变全曲线存在两条特征曲线，即外包络线及共同点轨迹线.其外包络线是以光滑曲线沿着反复荷载下应力-应变全曲线外轮廓描绘所得，而其共同点轨迹线则是以光滑曲线连接加、卸载曲线交点所得.由图 3 可发现：不同碳化深度、不同强度等级的混凝土外包络线形状相似，再加载曲线的斜率在过了共同点以后会显著减小，表明随着加卸载循环次数的增加，混凝土内部裂缝扩张，损伤积累加大，试件刚度退化加快.碳化混凝土共同点轨迹线与外包络线相似，相似比约0.76～0.94，平均0.85，而未碳化混凝土共同点轨迹线与外包络线的相似比0.85～0.92，平均0.89[10]，可见混凝土碳化后共同点轨迹线更加偏离外包络线，说明碳化后混凝土再加载过程中更易产生新裂缝，损伤积累更严重.

比较未碳化混凝土与碳化后混凝土的反复受压应力-应变全曲线（图 4）可发现：碳化后混凝土峰值应力提高，峰值应变降低，应力-应变全曲线的包络线上升段微微变凸，下降段则明显变陡，应力-应变全曲线与横轴包围的面积显著减小，说明碳化后混凝土破坏前的累积耗散能量降低，混凝土变脆.

图 5 给出不同碳化深度试件的无量纲化反复加载、卸载曲线（ε_0、σ_0 分别表示各试件的峰值应力、峰值应变），由图 5 可发现，混凝土碳化深度对试件加、卸载曲线有很大影响，随着碳化深度增大，卸载曲线越来越凹曲，再加载曲线越来越平缓，反映出卸载过程中试件的变形恢复滞后现象越发明显，再加载过程中刚度恢复越缓慢，说明碳化后试件在加、卸载过程中内部裂缝更易产生并扩展，损伤积累更为严重.

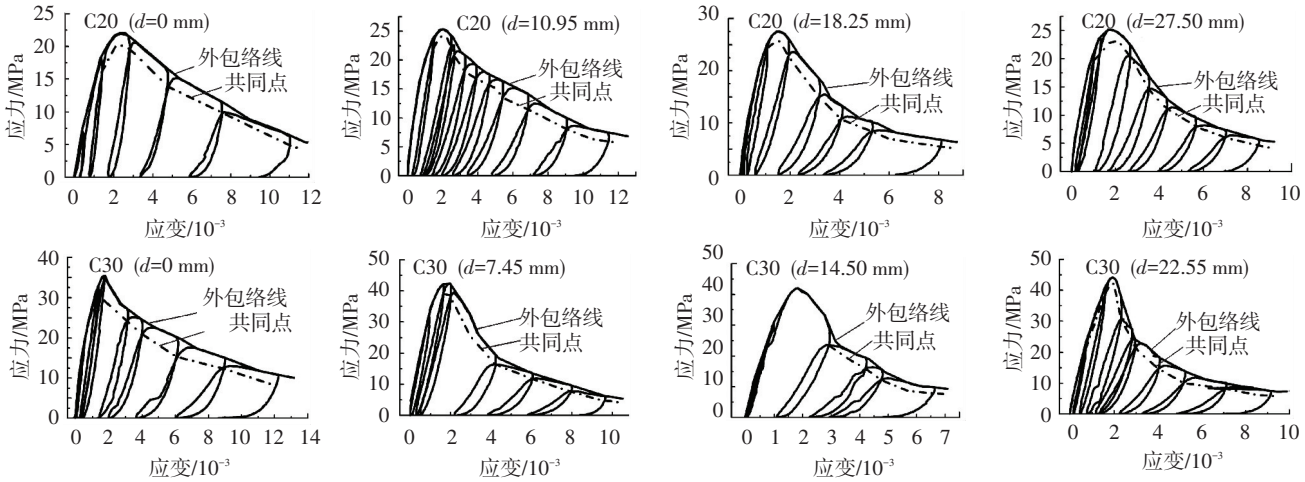
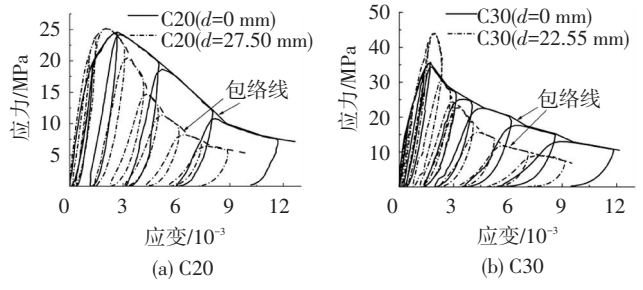
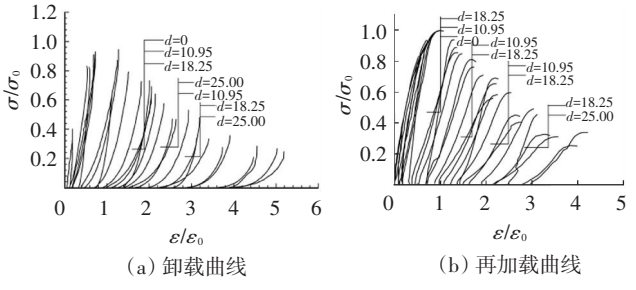


图 3　反复荷载作用下部分试件应力–应变关系全曲线



(a) C20　(b) C30

图 4　不同碳化深度混凝土的应力–应变全曲线对比



(a) 卸载曲线　(b) 再加载曲线

图 5　不同碳化深度混凝土的加、卸载曲线对比

3　反复荷载作用下碳化混凝土应力–应变关系

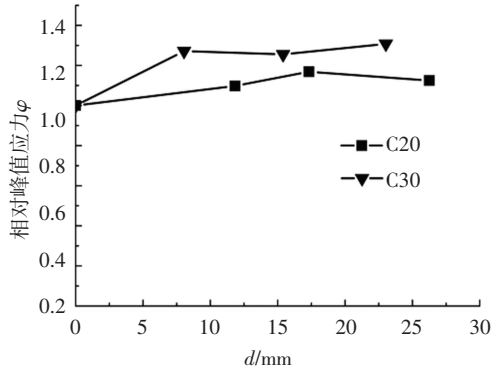
3.1　峰值应力、峰值应变变化规律

图 6(a)给出反复荷载作用下碳化混凝土相对峰值应力 φ(φ 为碳化后混凝土与未碳化混凝土峰值压应力比值)随碳化深度变化规律.碳化后混凝土相对峰值应力有所提高,C20、C30 碳化混凝土峰值应力提高幅度为 15%～30%,且 C30 较 C20 混凝土峰值应力提高更为明显;碳化对于提高混凝土强度作用有限,随着碳化深度继续加大,两组试件峰值应力趋于稳定,其最终将达到完全碳化混凝土的强度.

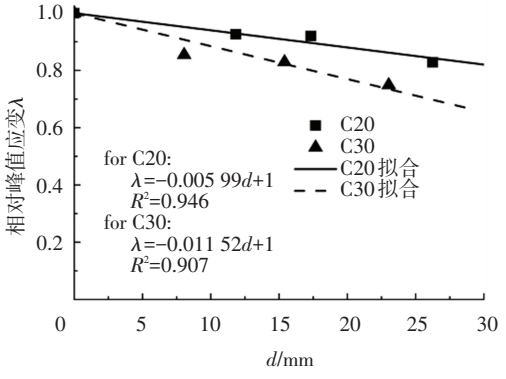
图 6(b)给出了反复荷载作用下碳化混凝土相对峰值应变 λ(λ 为碳化后混凝土与未碳化混凝土峰值应变的比值)随碳化深度变化的规律.随着碳化深度增大,碳化混凝土峰值应变呈降低趋势,且 C30 碳化混凝土峰值应变降低幅度比 C20 碳化混凝土峰值应变降低幅度更大.对 C20 混凝土,当碳化深度为 26 mm 时,其峰值应变较未碳化混凝土降低了 17%;对 C30 混凝土,当其碳化深度为 23 mm 时,其峰值应变较未碳化混凝土降低了 25%.对试验数据回归分析,得到相对峰值应变 λ 随碳化深度 d 变化规律:

$$\text{对 C20:}\lambda = -0.005\,99d + 1, \tag{1}$$

$$\text{对 C30:}\lambda = -0.011\,52d + 1. \tag{2}$$



(a) 相对峰值应力随碳化深度变化规律



(b) 相对峰值应变随碳化深度变化规律

图 6　相对峰值应力、应变随碳化深度变化规律

3.2　外包络线方程

混凝土反复荷载作用下的包络线与单调加载全曲线十分接近，可采用单调加载全曲线表达式近似描述反复荷载作用下包络线的曲线形态[10]，由图 4 可发现碳化前后混凝土的包络线从形式上看最明显的变化在于包络线下降度变陡了，但其仍然可采用与未碳化混凝土包络线相似的数学函数进行描述，只是函数的参数值会发生变化. 文献[11-13]提出过多种形式的普通未碳化混凝土受压本构模型，其中文献[11]分段式本构模型在国内应用较为普遍，这里采用该模型对碳化混凝土包络线进行拟合.

上升段($0 \leqslant x \leqslant 1$)：

$$y = a_c x + (3 - 2a_c) x^2 + (a_c - 2) x^3. \quad (3)$$

下降段($x \geqslant 1$)：

$$y = \frac{x}{b_c (x - 1)^2 + x}. \quad (4)$$

式中：$x = \varepsilon/\varepsilon_0$，$y = \sigma/\sigma_0$，$\varepsilon_0$、$\sigma_0$ 分别为峰值应变、峰值应力，a_c、b_c 为独立试验参数，取决于试件碳化深度以及混凝土强度等级，不同碳化深度混凝土包络线拟合结果见表3.

表 3　包络线拟合结果

批次	组别	碳化深度 d/mm	上升段参数 a_c	a_c/a_0	下降段参数 b_c	b_c/b_0
C20	1	0	2.457	1.000	0.686	1.000
	2	11.83	2.453	0.998	0.980	1.429
	3	17.33	2.281	0.928	1.075	1.567
	4	26.25	2.126	0.865	1.141	1.663
C30	1	0	2.213	1.000	0.857	1.000
	2	8.05	2.122	0.959	1.829	2.134
	3	15.40	1.486	0.671	1.914	2.233
	4	23.03	1.434	0.648	3.093	3.609

注：a_c、b_c 分别为根据试验数据拟合得到的各组试件包络线上升段与下降段参数的平均值，a_0、b_0 分别为 a_c 与 b_c 在混凝土碳化深度为 0 时的特殊情况.

由表 3 可发现：碳化深度较小时，包络线上升段方程参数 a_c 变化不大，碳化深度较大时，a_c 有下降趋势；下降段方程参数 b_c 则变化明显，随着碳化深度增加，b_c 呈明显增大趋势. 对表 3 参数值进行线性回归分析得到包络线参数值随碳化深度变化规律：

对 C20：$a_c/a_0 = -0.004\,25d + 1$，　$R^2 = 0.767$.　(5)

$b_c/b_0 = 0.028\,61d + 1$，　$R^2 = 0.919$.　(6)

对 C30：$a_c/a_0 = -0.016\,22d + 1$，　$R^2 = 0.858$.　(7)

$b_c/b_0 = 0.105\,98d + 1$，　$R^2 = 0.922$.　(8)

式中 a_0、b_0 分别为未碳化混凝土包络线上升段与下降段方程参数，取值可参考表 3 或文献[11].

3.3　卸载曲线方程

从混凝土受压应力-应变全曲线上任一点(ε_u，σ_u)卸载至应力为零，得到完全卸载曲线，完全卸载后的残余应变为 ε_p，恢复应变为 $\varepsilon_u - \varepsilon_p$. 图 7 统计得到未碳化混凝土与碳化混凝土卸载曲线的卸载应变与残余应变值. 卸载时，在相同卸载应变比 $\varepsilon_u/\varepsilon_0$ 下，特别是在较高卸载应变比下，碳化后混凝土的残余应变比 $\varepsilon_p/\varepsilon_0$ 相对较大，说明碳化使得混凝土变形恢复能力减弱. 根据试验数据回归分析，得到碳化前后混凝土卸载应变-残余应变关系(式(9)~(10)).

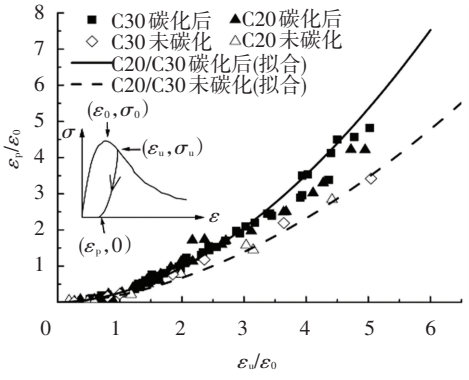


图 7　卸载应变比-残余应变比关系

未碳化 C20、C30：

$$\varepsilon_p/\varepsilon_0 = 0.196(\varepsilon_u/\varepsilon_0)^{1.782\,9}. \quad (9)$$

碳化后 C20、C30：

$$\varepsilon_p/\varepsilon_0 = 0.264(\varepsilon_u/\varepsilon_0)^{1.870\,2}. \quad (10)$$

对碳化混凝土卸载过程以$\left(\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_p}{\varepsilon_u-\varepsilon_p}, \dfrac{\sigma}{\sigma_u}\right)$为坐标点得到一簇无量纲化的卸载曲线，以碳化深度 27.5 mm的 241A 试件为例，见图 8(a)，随着卸载次数增加，卸载点应变比增大，卸载曲线形状上变的越来越凹曲，反映出反复加卸载过程中碳化混凝土内部损伤不断积累，卸载过程中应变恢复滞后现象越来越明显. 采用幂函数模型(式(11))对碳化混凝土的每一次卸载过程进行数值拟合，得到拟合参数 n 值随卸载应变比 $\varepsilon_u/\varepsilon_0$ 变化的规律，见图 8(b)，根据试验数据回归分析，得到碳化混凝土的卸载曲线参数 n 与卸载应变比关系(式(12)~(14)).

$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p}\right)^n, \quad (11)$$

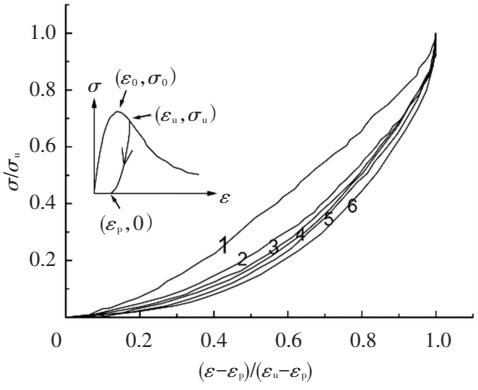
未碳化 C20、C30[10]：$n = 1 + 0.7\varepsilon_u/\varepsilon_0$，　(12)

碳化后 C20：$n = 1 + 0.941\,4(\varepsilon_u/\varepsilon_0)^{0.632\,5}$，　(13)

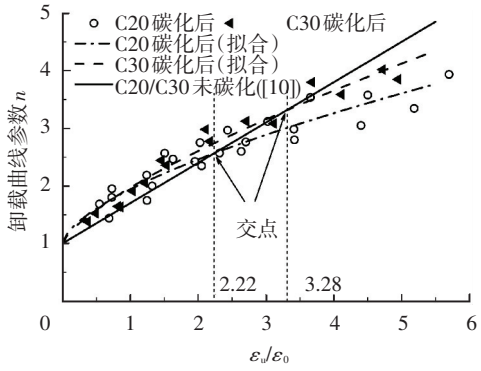
碳化后 C30：$n = 1 + 0.969\,6(\varepsilon_u/\varepsilon_0)^{0.726\,6}$.　(14)

由图 8(b)可发现：当 C20 组碳化混凝土的卸载应变比小于 2.22、C30 组碳化混凝土的卸载应变比小于 3.28 时，对应的碳化混凝土卸载曲线参数 n 值均大于普通未碳化混凝土卸载曲线参数值. 参数 n 越大对应卸载曲线形状越凹，反映出卸载过程中应变恢复滞后现象越突出，混凝土内部裂缝开展越多；而当 C20 组碳化混凝土的卸载应变比大于 2.22、

C30 组碳化混凝土卸载点应变比大于 3.28 以后，对应的碳化混凝土卸载曲线参数 n 增长变缓，且将小于普通未碳化混凝土卸载曲线参数，卸载曲线形状将趋于稳定，反映出此时碳化混凝土内部新的裂缝产生速度较未碳化混凝土减缓.从 n 值的变化趋势可推断出：较之未碳化混凝土，碳化混凝土材性变脆，加载过程中裂缝出现更早，故早期卸载过程的应变滞后效应更加明显，因而卸载曲线参数 n 也更大；材料变脆使得试件内部裂缝发展过程更为迅速，随着卸载点应变增大，碳化混凝土内部裂缝发展很快接近饱和，卸载曲线形状很快就趋于稳定（由图 8（a）可发现类似现象），破坏时碳化混凝土试件表面总的裂缝量更少且更集中（由图 2 可发现类似现象）.



（a）卸载曲线族



（b）卸载参数 n 与卸载应变比关系

图 8 卸载曲线

3.4 再加载曲线方程

从混凝土受压应力–应变全曲线上应力为零的一点（ε_p，0）加载至与包络线相切、重合得到再加载曲线，切点坐标为（ε_r，σ_r），再加载过程的应力增量和应变增量分别为 σ_r 和 $\varepsilon_r-\varepsilon_p$.图 9 统计得到了未碳化混凝土与碳化混凝土再加载曲线的起点应变 ε_p 与终点应变 ε_r.由图 9 可发现：再加载时，相同再加载起点应变比 $\varepsilon_p/\varepsilon_0$ 下，特别是较大的再加载起点应变比下，碳化混凝土表现出较小的再加载终点应变比 $\varepsilon_r/\varepsilon_0$.根据试验数据回归分析，得到碳化前后混凝土的再加载曲线起点–终点应变比关系（式（15）~（16））.

未碳化 C20、C30：$\varepsilon_r/\varepsilon_0=2.628\ 1\ (\varepsilon_p/\varepsilon_0)^{0.652\ 3}$，（15）

碳化后 C20、C30：$\varepsilon_r/\varepsilon_0=2.247\ 5\ (\varepsilon_p/\varepsilon_0)^{0.582\ 1}$.（16）

对碳化混凝土再加载过程以 $\left(\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_p}{\varepsilon_r-\varepsilon_p},\dfrac{\sigma}{\sigma_r}\right)$ 为坐标点得到一簇无量纲化再加载曲线，以碳化深度 27.5 mm的 241A 试件为例，如图 10（a）所示，碳化混凝土再加载曲线以 $\varepsilon_r/\varepsilon_0=1$ 为界限存在两种形式，这一现象同未碳化混凝土基本相同[10]，以式（17）所示分段函数描述再加载曲线，式中 m、w 值根据试验数据拟合确定，碳化混凝土全部再加载曲线拟合结果见图 10（b）.

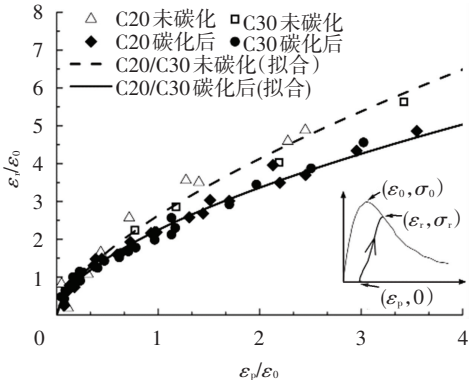
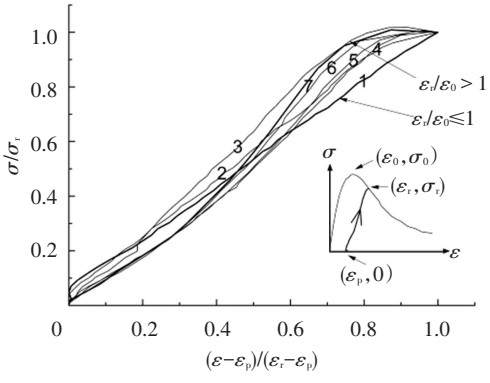
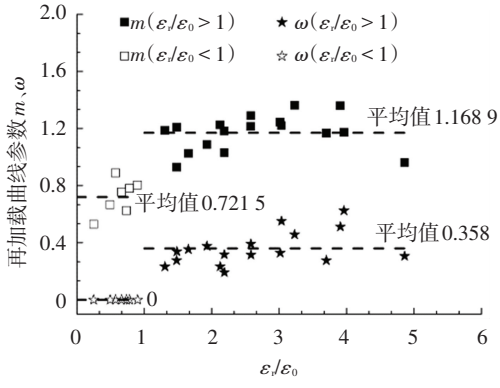


图 9 再加载曲线起点–终点应变比关系



（a）再加载曲线簇



（b）再加载曲线方程参数

图 10 再加载曲线

$$\frac{\sigma}{\sigma_r}=\begin{cases}\left(\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_p}{\varepsilon_r-\varepsilon_p}\right)^m, \varepsilon_r/\varepsilon_0 \leqslant 1;\\ \left(\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_p}{\varepsilon_r-\varepsilon_p}\right)^m\left[1+w\sin\pi\left(\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_p}{\varepsilon_r-\varepsilon_p}\right)\right], \varepsilon_r/\varepsilon_0>1.\end{cases} \tag{17}$$

统计数据拟合得到的参数 m、w 值，随再加载应变比变化并不明显且离散性较大，为方便应用，对 C20、C30 碳化混凝土的再加载曲线拟合参数取统一值：当 $\varepsilon_r/\varepsilon_0 \leqslant 1$ 时，m 平均值为 0.721 5，变异系数为 16.8%，w 为 0；当 $\varepsilon_r/\varepsilon_0>1$ 时，m 平均值为 1.168 9，变异系数为 10.7%，w 平均值为 0.358，变异系数为 33.03%.

3.5　反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变全曲线绘制流程

反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变全曲线绘制过程：首先根据式(3)~(8)得到反复荷载作用下碳化混凝土的外包络线；结合试验加、卸载制度与式(10)、(16)分别计算得到每次加、卸载的再加载终点应变与残余应变值；最后根据式(11)~(14)、式(17)可以得到每一次加、卸载曲线，这样也就得到了反复荷载作用下碳化混凝土应力-应变全曲线. 以试件 241A 为例(图 11)，图中实线为试验实测曲线，虚线为根据上述方法得到的拟合曲线，二者吻合较好.

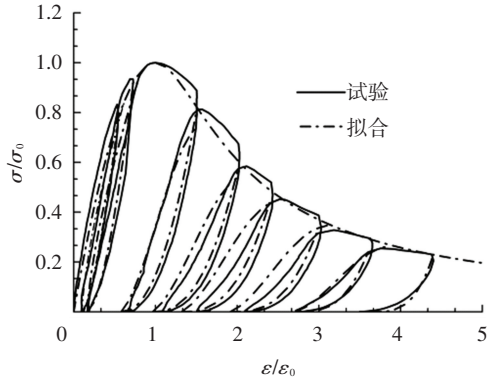


图 11　碳化混凝土应力-应变全曲线

4　结　论

1)对比未碳化混凝土，碳化后混凝土试件达到峰值应力前在角部就出现了肉眼可见裂缝，受荷裂缝出现更早，破坏时裂缝数量更少且位置更集中. 碳化深度越大，试件破坏前越容易出现大块崩裂脱落现象，材料越脆.

2)随着碳化深度不断增加，混凝土峰值压应变不断降低，峰值压应力开始有所提高并最终趋于稳定，提高幅度为 15%~30%.

3)随着混凝土碳化深度增大，共同点轨迹线越发偏离包络线，包络线下降段明显变陡，卸载曲线越发凹曲，再加载曲线更为平缓，变形恢复滞后现象更明显，应力-应变全曲线与横轴包围的面积显著减小，试件破坏前的累积耗散能量降低.

4)卸载时，在相同卸载应变比下碳化后混凝土的残余应变比增大，碳化使得混凝土的变形恢复能力减弱；再加载时，在相同再加载起点应变比下碳化后混凝土的再加载终点应变比减小.

参考文献

[1] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京：科学出版社，2003.

[2] 李检保. 混凝土碳化及其碳化后力学性能试验与分析[D]. 上海：同济大学，1997.

[3] 范子彦. 碳化混凝土的抗压强度[D]. 上海：同济大学，1997.

[4] 朱伯龙，肖建庄. 碳化混凝土的结构性能[J]. 工业建筑，1998，28(9)：41-44.

[5] XIAO J，LI J，ZHU B，et al. Experimental study on strength and ductility of carbonated concrete elements[J]. Construction and Building Materials，2002，16(3)：187-192.

[6] 耿欧，袁广林. 碳化混凝土全应力-应变关系及梁受弯承载性能研究[J]. 工业建筑，2006，36(1)：44-46.

[7] 史艳. 损伤混凝土受压本构关系试验研究[D]. 湖南：中南大学，2013.

[8] 刘小微. 单调与重复荷载作用下碳化混凝土应力-应变关系试验研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2012.

[9] GB/T50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.

[10] 过镇海，张秀琴. 混凝土在反复荷载作用下的全曲线[J]. 工业建筑，1981，9：14-17.

[11] 过镇海，时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京：清华大学出版社，2003.

[12] HOGNESTAD E，HANSON N W，MCHENRY D. Concrete stress distribution in ultimate strength design[J]. Journal of the American Concrete Institute，1955，52(12)：455-479.

[13] SAENZ L P. Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi and Krishnan[J]. Journal of the American Concrete Institute，1964，61(9)：1229-1235.

(**编辑**　赵丽莹)