

# 考虑温度作用的橡胶混凝土动态轴心抗压性能

薛刚,董亚杰,曹美玲,高鹏

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

**摘要** 为了系统掌握橡胶混凝土的动态性能,深化橡胶混凝土的研究。方法在常温和低温两种环境下,对四种橡胶掺量和两种橡胶粒径的橡胶混凝土试样;在不同应力速率下进行轴心抗压性能试验。**结果** 低温下橡胶混凝土应力速率越高,试件最终的破损程度越严重;在不同应力速率下的破坏形态与常温情况相比,延性特征更明显,橡胶混凝土的强度增量与应力速率的对数呈线性关系;橡胶混凝土的动态弹性模量随应力速率的增加而提高;随着橡胶掺量的增加,不同应力速率下的橡胶混凝土峰值应变呈现先增加后减小的趋势,且低温条件下的橡胶混凝土峰值应变高于常温情况。**结论** 从强度提高幅度及峰值应变两方面上看,低温下橡胶混凝土中橡胶掺量宜控制在10%~15%;橡胶集料粒径减小时,动态抗压强度略有降低,而峰值应变略有增大,但变化幅度并不明显。

**关键词** 温度效应;橡胶混凝土;轴压;动态抗压强度

中图分类号 TU528

文献标志码 A

## Dynamic Axial Compressive Properties of Crumb Rubber Concrete Considering Temperature Action

XUE Gang, DONG Yajie, CAO Meiling, GAO Peng

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

**Abstract:** In order to systematically understand the dynamic properties of crumb rubber concrete, four kinds of rubber content and two kinds of rubber particle size crumb rubber concrete specimens were tested under different stress rates at room temperature and low temperature. The results show that the ductility of crumb rubber concrete under different stress rates is more obvious than that under normal temperature. The greater the stress rate is, the more serious the ultimate damage is. There is a linear relationship between the strength increment of crumb rubber concrete and the logarithm of stress rate. The dynamic modulus of elasticity of crumb rubber concrete increases with the increase of stress rate. With the increase of rubber content, the peak strain of crumb rubber concrete increases at first and then decreases at different stress rates, and the peak strain of rubber

收稿日期:2020-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51868063)

作者简介:薛刚(1968—),男,教授,博士,主要从事新型混凝土材料与结构方面研究。

concrete at low temperature is always higher than that at normal temperature. In terms of strength increase and peak strain, the rubber content in crumb rubber concrete should be controlled at 10% - 15% at low temperature. When the particle size of rubber aggregate decreases, the dynamic compressive strength decreases slightly, while the peak strain increases slightly, but the change is not obvious.

**Key words:** temperature effect; rubber concrete; axial compression; dynamic compressive strength

近年来,我国汽车产业迅猛增长,带动了橡胶工业的快速发展,我国已成为世界橡胶消耗第一大国,2017年汽车轮胎年产量已超过9亿条,与此同时产生超过3亿条的废旧轮胎,并且以8%~10%的速度急剧增加<sup>[1]</sup>。废旧轮胎是难以处理的固体废弃物,不仅需要占用大量土地进行堆放,还容易滋生蚊蝇甚至引发火灾,造成环境污染。合理回收、利用废旧橡胶,有助于节约资源,促进环境的可持续发展<sup>[2]</sup>。将橡胶粉掺入混凝土中制成橡胶混凝土(Crumb Rubber Concrete, CRC),不仅可减轻废旧橡胶带来的环保压力,还可改善混凝土材料的抗裂、抗折、抗冲击、减振、降噪等性能,是一种适于承受动力荷载的工程材料<sup>[3-4]</sup>。与普通混凝土相比,橡胶混凝土的抗压强度和抗折强度均有所降低,但折压比提高,混凝土韧性得到改善。将橡胶混凝土用于道路工程,断板率预计比普通混凝土降低30%<sup>[5]</sup>。郭永昌<sup>[6]</sup>对橡胶混凝土在多应变率下的抗冲击压缩性能进行了研究,结果表明,橡胶粉的掺入改变了混凝土的破坏形式,混凝土的抗冲击性能得到提高。袁兵等<sup>[7]</sup>研究了橡胶混凝土在不同应变率下的抗压性能,结果表明,橡胶混凝土抗压强度随应变率增大而提高,当应变率增大一个数量级时,抗压强度最大增幅达28.27%。周金枝等<sup>[8]</sup>研究了橡胶混凝土密度与抗压强度关系,提出橡胶混凝土的抗压强度

和密度可以通过拟合线性方程来有效预测。姚新红等<sup>[9]</sup>研究高温后橡胶混凝土抗压强度变化及孔结构分析,结果表明,温度相对于掺量对橡胶混凝土的强度的影响要更大。季卫娟<sup>[10]</sup>研究了不同改性方法的橡胶混凝土抗压及抗冻性能,结果表明,与基准混凝土相比,橡胶混凝土抗冻性能有所改善。Yang Linhu等<sup>[11]</sup>对+20℃和-25℃的橡胶混凝土的力学性能进行了对比研究,结果表明,低温时,橡胶混凝土仍表现出良好的延性。K. Murat等<sup>[12]</sup>研究了橡胶沥青混凝土的能量损失,为橡胶混凝土的低温性能研究提供了新的思路。E. R. Alan等<sup>[13]</sup>研究了橡胶混凝土的抗冻性能,发现橡胶粒径及含量对橡胶混凝土抗冻性有着显著影响,水的冻胀是导致橡胶混凝土冻融损伤的主要因素<sup>[14]</sup>。目前,有关橡胶混凝土在常温下的力学性能研究较多,考虑温度效应的力学性能,特别是动态力学性能研究不够充分。基于此,笔者对低温-30℃下,橡胶混凝土在不同加载速率下的抗压性能进行试验研究与分析,以期寒冷地区橡胶混凝土在路面工程上的应用提供依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

水泥:采用P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,其物理性能指标如表1所示。

表1 水泥的物理性能指标

Table 1 Physical properties of cement

标准稠度用水量的 质量分数/%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	细度/%	安定性 (沸煮法)	凝结时间/min	
				初凝	终凝
28	2.9	17	合格	125	220

细集料:最大粒径为 5 mm,表观密度为 2 620 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为 1 512 kg/m<sup>3</sup>,含泥率为 2.1%,孔隙率为 34.5%。

砂:细度模数均值为 2.74,属中砂。

粗集料:碎石粒径为 5~25 mm,颗粒级配满足规范要求,表观密度为 2 685 kg/m<sup>3</sup>,

堆积密度为 1 546 kg/m<sup>3</sup>,压碎指标为 9.6%,孔隙率为 44%。

橡胶粉:选用 0.85 mm 和 0.3 mm 两种粒径,表观密度为 1 050 kg/m<sup>3</sup>。具体技术指标见表 2。

表 2 橡胶粉技术指标

Table 2 Technical specifications of rubber crumb

粒径/mm	平均粒度/ $\mu\text{m}$	筛网粒径/ $\mu\text{m}$	过筛率/%	粉煤灰质量分数/%	丙酮抽出物的质量分数/%	拉伸强度/MPa	拉伸伸长率/%
0.85	765	850	$\geq 95$	$\leq 8$	$\leq 8$	$\geq 15$	$\geq 500$
0.30	258	300	$\geq 90$	$\leq 8$	$\leq 8$	$\geq 15$	$\geq 500$

矿物掺合料:粉煤灰为 II 级,矿渣粉等级为 S95 级。

减水剂:聚羧酸系高性能减水剂,减水率  $Q \geq 25\%$ 。

## 1.2 配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》

(JGJ55—2011) 进行配合比设计,普通混凝土设计强度等级为 C30。砂率取 0.42,水胶比取 0.4。采用两种粒径的橡胶粉分别以 5%、10%、15%、20% 等体积替代细骨料掺入混凝土中。普通混凝土及橡胶混凝土的配合比见表 3。

表 3 试样配合比

Table 3 Mix proportions of the rubber concrete specimens

编号	$\rho$ (水泥)	$\rho$ (粉煤灰)	$\rho$ (矿渣)	$\rho$ (橡胶)	$\rho$ (砂)	$\rho$ (石子)	$\rho$ (水)
NC-0.40	290	50	60	0	770.0	1 085	160
CRC-20-5	290	50	60	26.7	731.5	1 085	160
CRC-20-10	290	50	60	53.5	693.1	1 085	160
CRC-20-15	290	50	60	80.2	654.5	1 085	160
CRC-20-20	290	50	60	106.9	615.9	1 085	160
CRC-50-5	290	50	60	26.7	731.5	1 085	160
CRC-50-10	290	50	60	53.5	693.1	1 085	160
CRC-50-15	290	50	60	80.2	654.5	1 085	160
CRC-50-20	290	50	60	106.9	615.9	1 085	160

注:NC-0.4 表示水胶比 0.4,橡胶掺量 0 的普通混凝土;CRC-20-5 表示橡胶粒径为 0.85 mm,橡胶掺量 5% 的橡胶混凝土;CRC-50-5 表示橡胶粒径为 0.3 mm,橡胶掺量 5% 的橡胶混凝土。

## 1.3 试件制作及养护

采用 60 L 强制式搅拌机对混凝土进行搅拌,按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2016) 测试混凝土拌合物的和易性。棱柱体试样长宽高为 150 mm  $\times$  150 mm  $\times$  300 mm,置于振动台上振动两次,每次振动 20 s。在温度为 (20  $\pm$

2)  $^{\circ}\text{C}$  条件下静置 24 h 后拆模,在标准养护条件下养护 28 d。从养护室中取出,放在干燥的 (20  $\pm$  5)  $^{\circ}\text{C}$  环境下放置 48 h,测取试件含水率,在试块侧表面粘贴应变片。试件分为常温 and 低温两组,常温组是在 25  $^{\circ}\text{C}$  下静置 72 h 后进行试验,低温组是将试件放入 -30  $^{\circ}\text{C}$  的冰箱中冷冻 72 h 后立即取出进行

试验。9种配合比,每种配比18个试件,分为用于常温和低温情况下3种速率的动态试验,共162个棱柱体试件。

#### 1.4 试验方法

抵抗动荷载的能力是橡胶混凝土重要的路用性能之一。依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019),混凝土轴心抗压强度为30~60 MPa时,静态强度的加载速率可取30 MPa/min,笔者以静态强度加载速率为基准,并以高于静态强度加载速率2倍和4倍的速率加载,研究橡胶混凝土的动态轴压性能。在每个棱柱体试件的两个对面中心位置各粘贴2个相互垂直的应变片,纵向应变片测量试件开裂前的轴向应变,同时用于检查试件是否对中。动态抗压强度的试验步骤如下:

(1)试件就位后安装量测仪器,并进行几何对中,之后调试动态应变采集设备。

(2)预加载。预加载至极限荷载的15%~20%,检查液压伺服加载设备和动态测试装置是否正常工作。预加载中,观察四个应变片的应变是否相等,相差不应超过10%,否则卸载后,调整试件位置,重新进行

预加载,直至满足要求。

(3)正式加载。加载过程应连续均匀地加荷,用荷载控制,以30 MPa/min,78 MPa/min,126 MPa/min三种应力速率进行单轴压缩试验。

(4)当试件接近破坏开始急剧变形时,应调整试验机油门,直至破坏,记录破坏荷载。试验中,观察该试件的裂缝形态。荷载和位移信号由计算机采集,动态应变仪采集试件应变数据,将测到的应变平均后取值。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏形态

常温25℃下普通混凝土及橡胶混凝土试件在不同应力速率加载情况下的轴压破坏形态如图1所示,图中CRC代表橡胶混凝土(Crumb Rubber Concrete, CRC)。低温-30℃下普通及橡胶混凝土试件在不同应力速率加载情况下的轴压破坏形态如图2所示。图1、图2中NC-126、CRC-78等分别表示普通混凝土和橡胶混凝土试件在126 MPa/min和78 MPa/min等应力速率下的状态。

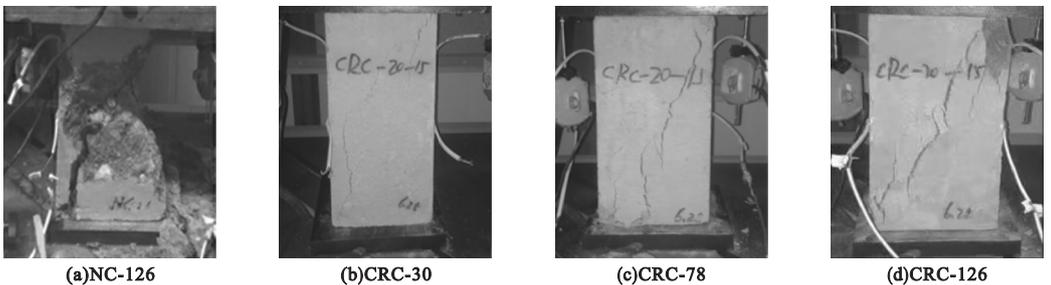


图1 常温25℃下试件受压破坏形态

Fig. 1 Pressure failure mode of the specimens at normal temperatures(25℃)

从图1、图2中可以看出,普通混凝土与橡胶混凝土的破坏模式不同。普通混凝土在常温25℃以及低温-30℃条件下,试件侧面、上下端面和边角损坏严重,破坏面骨料劈裂现象明显,破坏时伴有较大的爆裂声且破坏突然,属于压溃型破坏。

橡胶混凝土在常温25℃以及低温

-30℃下,破坏均呈现出延性特征,破坏前有开裂过程,破坏时试件较为完整,破坏面为斜向的剪切滑移面,属于剪切滑移破坏,试件破坏基本符合库伦破坏准则。不同的是,在常温25℃下,破坏面大致沿试件的对角线方向,其与水平轴之夹角约为60°;而在低温-30℃下,破坏面与水平轴之夹角约为70°,

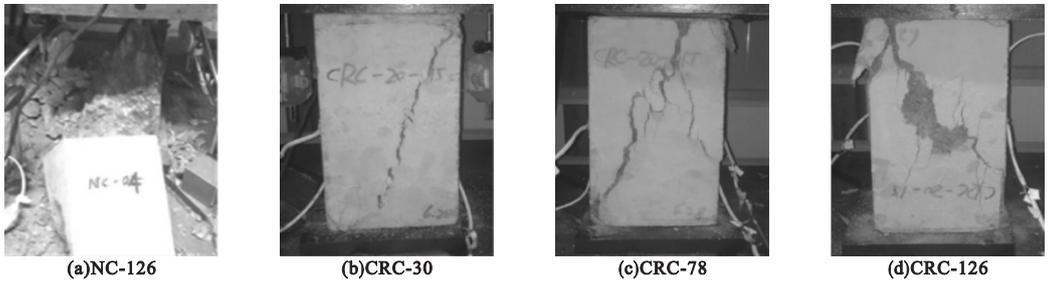


图2 低温-30 °C下试件受压破坏形态

Fig. 2 Pressure failure mode of the specimen at low temperatures(-30 °C)

即破坏面与水平轴之夹角变大。

普通混凝土与橡胶混凝土破坏模式不同的原因在于,橡胶集料弹性模量小并具有一定变形能力<sup>[15]</sup>。在低温环境下,橡胶集料的弹性模量有所提高,橡胶颗粒在混凝土中表现出的弹性变形作用更加突出,比常温吸收的能量更多,因而延性破坏特征更加明显。常温及低温下,橡胶混凝土在不同应力速率

下的破坏规律类似,应力速率越大,试件破坏越严重。同一加载速率情况下,低温情况加载过程比常温情况漫长,试件破损比常温情况严重。

## 2.2 动态抗压强度

动态轴心抗压强度是指材料经受动荷载时抵抗破坏的能力<sup>[16]</sup>,橡胶混凝土的动态轴心抗压强度随应力速率的变化趋势见图3所示。

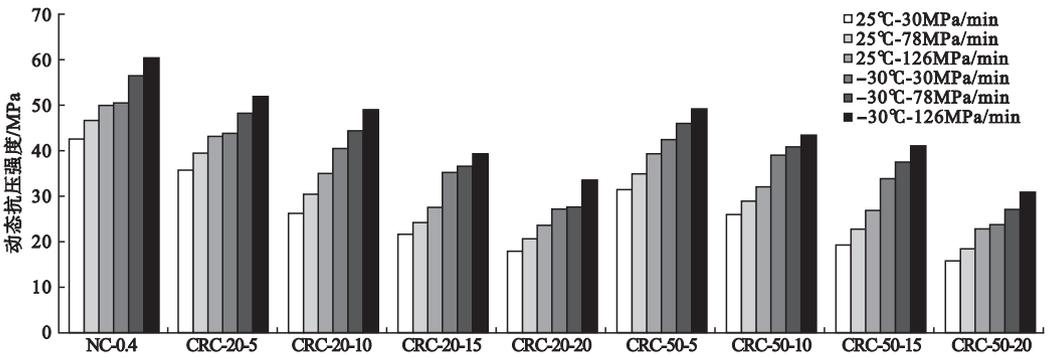


图3 25 °C与-30 °C下橡胶混凝土动态抗压强度值

Fig. 3 Dynamic compressive strengths of the rubber concrete specimens under normal(25 °C) and low(-30 °C) temperature conditions

由图3可知,与常温25 °C相比,低温-30 °C下橡胶混凝土的动态轴心抗压强度增长明显。应力速率为30 MPa/min时,CRC-20-10在-30 °C的动态轴心抗压强度比25 °C时提高了55.32%,应力速率分别为78 MPa/min及126 MPa/min时,提高幅度分别为45.53%和41.29%。

掺入橡胶粉后,混凝土抗压强度有所降低。配比相同的橡胶混凝土,低温抗压强度比常温25 °C强度高。主要原因在于,一方面是随着温度降低,混凝土内部孔隙中水凝结

成冰,孔隙被强度较高的冰填实,导致块体承载能力变强;另一方面,低温时橡胶集料的弹性模量大幅增加,抵抗荷载的能力有所提高<sup>[17-18]</sup>。

由图3还可知,无论常温25 °C还是低温-30 °C,随着应力速率的增大,橡胶混凝土的单轴动态抗压强度有所增强。应力速率为30 MPa/min时得到的混凝土抗压强度为准静态抗压强度,当应力速率由30 MPa/min增加到78 MPa/min、126 MPa/min时,常温25 °C下CRC-50-15的动态抗压强度比准静

态抗压强度分别提高18.71%和40.03%，低温-30℃下CRC-50-15的动态抗压强度分别提高了11.46%和21.55%。动荷载作用增大时，试件逐步产生裂纹直至破坏，应力速率增大后，裂缝扩展的速度加快，直接穿过强度较高的区域(如粗骨料)，试样的破坏荷载得以提高。另外，试样在破坏过程中吸收一定的能量，当应力速率增大后，荷载作用时间

变短，需通过提高峰值应力来积聚试件破坏需要的能量<sup>[19]</sup>。

根据已有文献<sup>[20]</sup>，在常温下，橡胶混凝土的强度增量和应力速率的对数关系接近线性。图4为笔者在常温及低温条件下橡胶混凝土强度增量与应力速率的试验结果，图中应力速率为30 MPa/min时视为准静力 $\dot{\sigma}_s$  (0 MPa/min)。

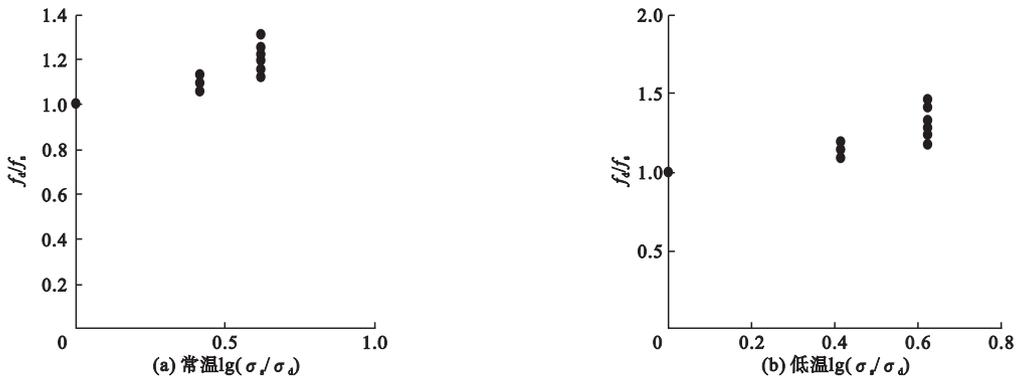


图4 对应力速率比值取的对数与各试验配比的橡胶混凝土强度增量的关系

Fig. 4 Relationship between the logarithm of stress rate ratio and the strength increment of rubber concrete

由图4可知，常温及低温情况下，应力速率比的对数  $\lg(\sigma_d/\sigma_s)$  与各试验配比的橡胶混凝土强度增量  $f_d/f_s$  关系接近线性关系。按式(1)进行拟合，参数A回归结果及拟合

度  $R^2$  见表4所示。

$$\frac{f_d}{f_s} = 1 + A \lg\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right). \quad (1)$$

表4 常温与低温下应力速率与橡胶混凝土动态抗压强度增量函数表达拟合结果

Table 4 Fitting results of stress rate and dynamic compressive strength increment function of rubber concrete under normal and low temperature

编号	常温 25℃		低温 -30℃	
	A	$R^2$	A	$R^2$
NC-0.40	0.258 31	0.999 94	0.309 87	0.999 96
CRC-20-5	0.322 29	0.999 77	0.272 76	0.999 82
CRC-20-10	0.486 33	0.999 49	0.298 66	0.999 55
CRC-20-15	0.410 54	0.999 25	0.349 77	0.999 82
CRC-20-20	0.410 54	0.999 25	0.350 24	0.999 11
CRC-50-5	0.453 88	0.999 27	0.239 86	0.999 93
CRC-50-10	0.346 71	0.999 68	0.165 78	0.999 85
CRC-50-15	0.583 32	0.999 01	0.322 44	0.999 84
CRC-50-20	0.617 73	0.996 91	0.435 81	0.999 19

由表4可知,该式能较好反映不同温度下橡胶混凝土动态抗压强度与应力速率的变化规律。

CRC-20的动态抗压强度与橡胶掺量关系如图5所示。

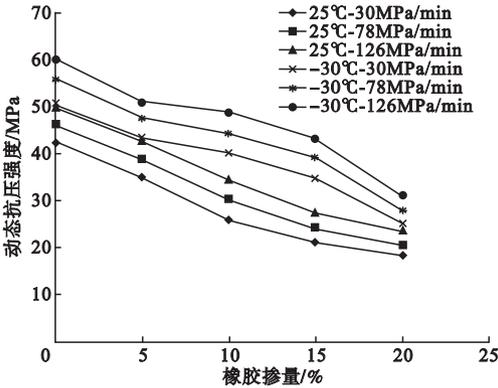


图5 CRC-20橡胶混凝土动态抗压强度与橡胶掺量之间的关系

Fig. 5 Relationship between the dynamic compressive strength and the rubber content

当橡胶掺量较小时,橡胶混凝土动态抗压强度随加载速率提高,增长幅度较大。随着橡胶掺量增加,动态抗压强度随加载速率提高而增幅有所减小。常温25℃下,当应力

速率分别为30 MPa/min和126 MPa/min时,基准混凝土抗压强度分别为42.46 MPa和49.64 MPa。橡胶掺量为5%时,CRC-20橡胶混凝土动态抗压强度较基准混凝土抗压强度的降幅分别为16.75%和57.87%;橡胶掺量为20%时,CRC-20橡胶混凝土动态抗压强度较基准混凝土抗压强度的降幅分别为13.34%和52.68%。在低温-30℃下,当应力速率分别为30 MPa/min和126 MPa/min时,基准混凝土抗压强度分别为50.27 MPa和60.32 MPa。橡胶掺量为5%时,CRC-20橡胶混凝土动态抗压强度较基准混凝土抗压强度的降幅分别为13.25%和50.43%;橡胶掺量为20%时,CRC-20橡胶混凝土动态抗压强度较基准混凝土抗压强度的降幅分别为14.39%和48.34%。

CRC的动态抗压强度随着橡胶掺量的增加而逐渐减小,低温与常温下橡胶混凝土动态抗压强度的降低幅度与静态强度基本一致。

图6为动态抗压强度与橡胶粒径之间的关系。

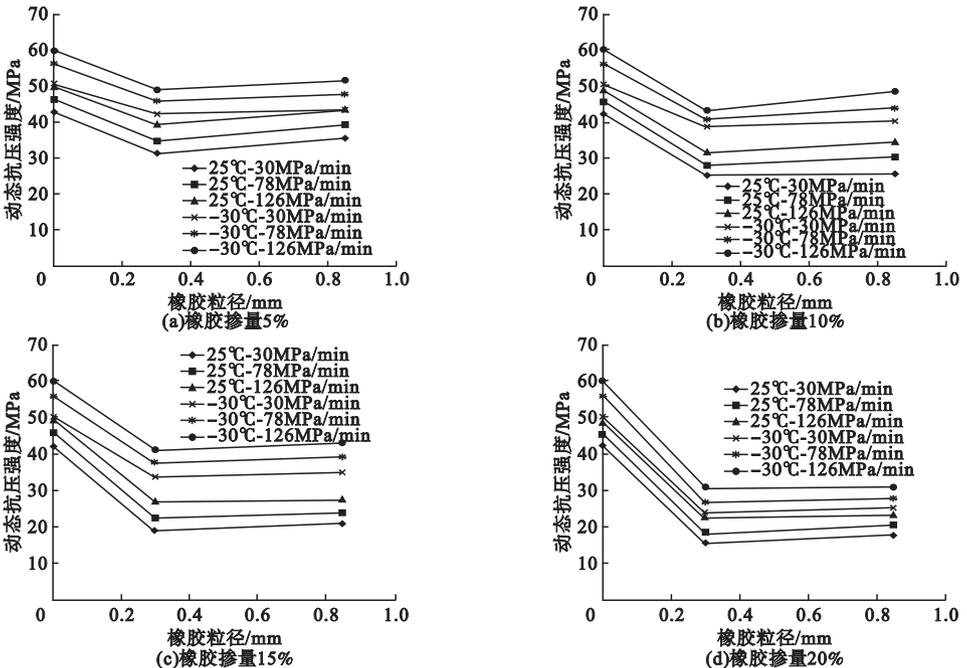


图6 动态抗压强度与橡胶粒径之间的关系

Fig. 6 Relationship between the dynamic compressive strengths and the rubber particle size

由图6可以看出,动态抗压强度随橡胶粒径增大而提高,但提高幅度非常有限。橡胶粉粒径越小填充混凝土内分布的范围越大,界面之间的粘结强度减弱,造成动态抗压强度下降。橡胶掺量为10%~15%、粒径为0.85 mm的橡胶混凝土低温动态抗压强度与常温强度相比,提高幅度最为明显。

### 2.3 不同应力速率下的变形特性

#### 2.3.1 动态弹性模量

橡胶混凝土的变形性能通过动态弹性模量和峰值应变来体现<sup>[21-22]</sup>。将40%峰值应力处所对应的割线模量作为混凝土的弹性模量。峰值应变越大表明变形能力越强。橡胶混凝土在不同温度、不同应力速率下的弹性模量如图7所示。

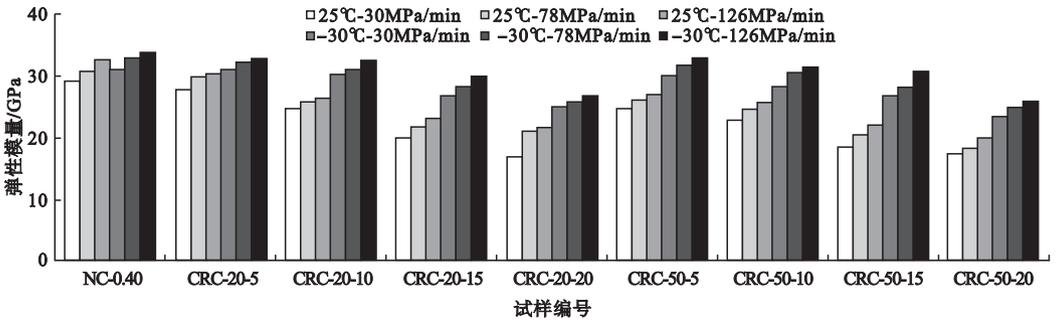


图7 常温及低温下橡胶混凝土在不同应力速率下的弹性模量

Fig. 7 Elastic modulus of the rubber concrete specimens with different loading rates under normal and low temperature conditions

由图7可知,不同温度下橡胶混凝土的动态弹性模量随应力速率的增加而提高。应力速率为30 MPa/min时的弹性模量为准静态弹性模量,当应力速率分别为78 MPa/min和126 MPa/min时,常温25℃下CRC-20-15橡胶混凝土的弹性模量比准静态弹性模量分别提高9.88%和16.88%;低温-30℃下CRC-20-15橡胶混凝土的弹性

模量比准静态弹性模量分别提高4.56%和10.96%。提高的主要原因在于,试件受到冲击荷载作用时,随着应力速率增大,橡胶混凝土内部的微裂缝得不到充分扩展,导致动态弹性模量变大。

#### 2.3.2 峰值应变

图8为常温及低温下橡胶混凝土在不同应力速率下的峰值应变。

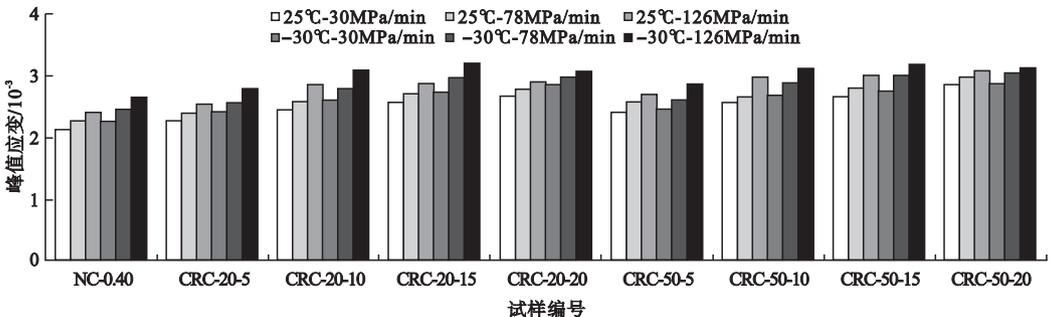


图8 常温及低温下橡胶混凝土在不同应力速率下的峰值应变

Fig. 8 Peak strain of the rubber concrete specimens under normal and low temperature conditions at different loading rates

由图8可知,与30 MPa/min相比,应力速率分别为78 MPa/min、126 MPa/min时,常温25℃下CRC-20-15峰值应变分别增加了5.49%、9.53%;而低温-30℃条件下峰值应变分别增加9.32%、17.72%。当应力速率分别为30 MPa/min、78 MPa/min、126 MPa/min时,CRC-20-15在低温-30℃下的峰值应变较常温25℃分别提高5.92%、9.81%、10.73%。低温下橡胶混凝土的峰值应变增加幅度高于常温,且随着应力速率提高,峰值应变增幅越大。低温下橡胶混凝土仍具有较强的变形能力。图9为CRC-20-15峰值应变与应力速率的变化关系。当橡胶掺量一定时,不同温度下橡胶混凝土峰值应变随着应力速率的增大而增大,基本呈线性关系。

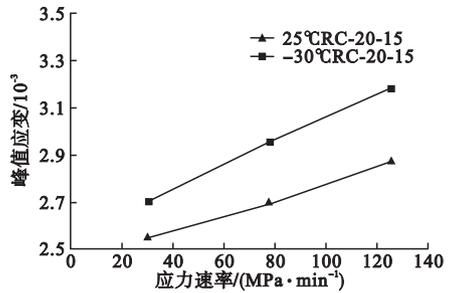
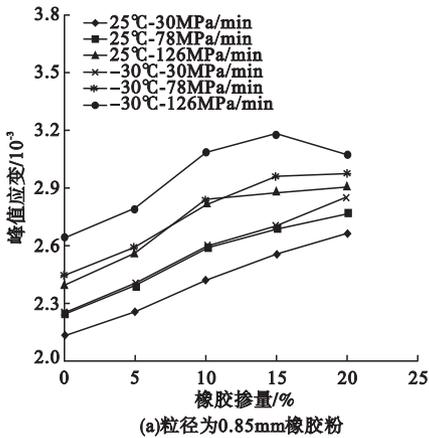


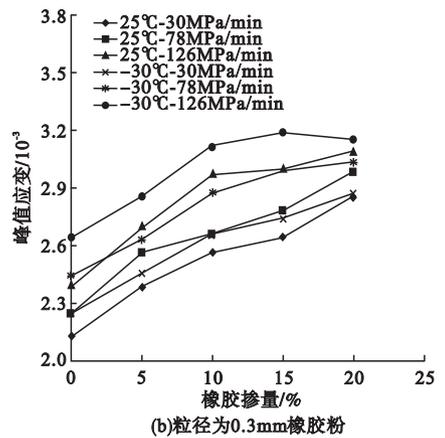
图9 橡胶混凝土CRC-20-15峰值应变与应力速率的变化关系

Fig. 9 Relationship between the peak strains and stress rates of the RC-20-15 rubber concrete

袁兵<sup>[7]</sup>在常温条件下对橡胶混凝土应力速率与峰值应变关系进行了研究,但在低温条件下,应力速率对橡胶混凝土影响规律还鲜有报道。笔者试验得到的常温与低温下的橡胶混凝土在不同应力速率下的峰值应变随橡胶掺量变化如图10所示。



(a)粒径为0.85mm橡胶粉



(b)粒径为0.3mm橡胶粉

图10 橡胶混凝土峰值应变与橡胶掺量之间的关系

Fig. 10 Relationship between the peak strains and amounts of rubber content

由图10可知,当应力速率和温度一定时,峰值应变随橡胶掺量的增加而增大,试样的变形性能提高。橡胶掺量越多,CRC材料受到动荷载发生破坏时,可聚集更多的应变能。主要原因在于,橡胶颗粒为弹性体,在橡胶混凝土试件水化、干燥过程产生的收缩变形时,能吸收部分能量,减小收缩应力和初始裂缝,有助于提高变形能力。随着橡胶掺量的增加,不同应力速率下的橡胶混凝土峰值应变呈现先增加后减小的趋势,且低温下橡

胶混凝土峰值应变总是高于常温。从橡胶混凝土峰值应变上看,低温下橡胶掺量范围宜控制在10%~15%时,此时变形性能最佳。

4种橡胶掺量下峰值应变与橡胶粒径之间的关系如图11所示。

从图11中可以看出,无论粒径为0.85mm还是0.3mm的橡胶粉都明显提高了混凝土的峰值应变,橡胶颗粒粒径越小,峰值应变略有增大,但橡胶粒径对于混凝土的峰值应变的影响并不明显。

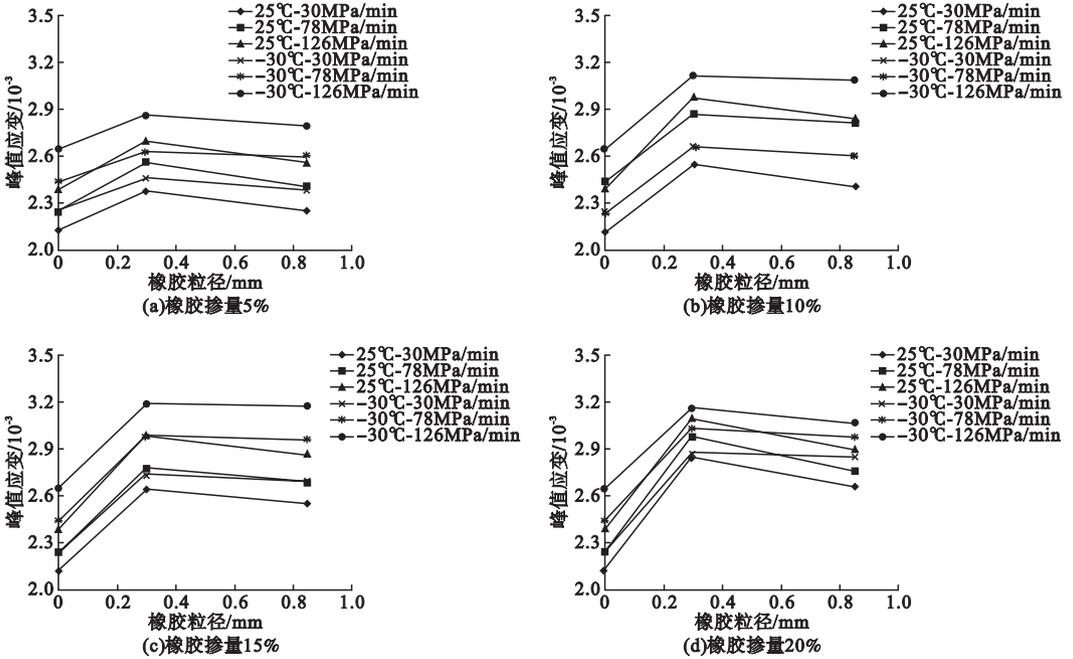


图 11 CRC 峰值应变与橡胶粒径之间的关系

Fig. 11 Relationship between the peak strains and the rubber particle size

### 3 结论

(1) 橡胶混凝土在动态荷载下的破坏过程与静态荷载情况不同, 呈现更明显的延性特征。高应力速率下, 橡胶混凝土试件破坏面骨料劈裂现象明显, 较多的粗骨料被破坏。

(2) 橡胶混凝土的动态抗压强度随着橡胶掺量的增加而逐渐减小, 降低幅度与静态情况类似。不同橡胶掺量的混凝土动态抗压强度均随加载速率的增加而提高, 强度增量与应力速率的对数呈线性关系。橡胶集料粒径减小时, 动态抗压强度略有降低, 但变化幅度并不明显。

(3) 常温与低温下橡胶混凝土的动态弹性模量、峰值应变均随着应力速率的增加而增大。随着橡胶掺量的增加, 不同应力速率下的橡胶混凝土峰值应变呈现先增加后减小的趋势, 且低温下橡胶混凝土峰值应变总是高于常温情况。橡胶集料粒径减小时, 峰值应变略有增大, 但变化幅度并不明显。

### 参考文献

[ 1 ] 王凤池, 丁军胜, 刘凤起, 等. 橡胶混凝土砖砌体力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 50 - 55.  
(WANG Fengchi, DING Junsheng, LIU Fengqi, et al. The experiment of basic mechanical properties of CRB masonry [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2013, 29 ( 1 ): 50 - 55 .)

[ 2 ] 戴洪雁, 陈福林, 岑兰, 等. 废旧橡胶再生的今天与明天[J]. 世界橡胶工业, 2012, 39(5): 48 - 53.  
(DAI Hongyan, CHEN Fulin, CHEN Lan, et al. Progress research in the waste rubber regeneration [J]. The world rubber industry, 2012, 39(5): 48 - 53 .)

[ 3 ] GISRSKAS G, NAGROCKIENE D. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties [ J ]. Construction and building materials, 2017( 140 ): 36 - 42.

[ 4 ] 冯文贤, 刘锋, 郑万虎, 等. 橡胶混凝土疲劳性能的试验研究[J], 建筑材料学报, 2012, 15(4): 469 - 473.  
(FENG Wenxian, LIU Feng, ZHENG Wanhu, et al. Test of fatigue performance of rubberized concrete [ J ], Journal of building materials, 2012, 15(4): 469 - 473 .)

[ 5 ] 王龙, 范璐璐. 橡胶颗粒水泥混凝土与基质混凝土路用性能对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 77 - 81.  
(WANG Long, FAN Lulu. Analysis of road

- performance between rub-concrete and general concrete materials [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2016, 48(3): 77-81.)
- [6] 郭永昌, 刘锋, 陈贵炫, 等. 橡胶混凝土的冲击压缩实验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 139-144.  
(GUO Yongchang, LIU Feng, CHEN Guixuan, et al. Experimental investigation on impact resistance of rubberized concrete[J]. Journal of building materials, 2012, 15(1): 139-144.)
- [7] 袁兵, 刘锋, 丘晓龙, 等. 橡胶混凝土不同应变率下抗压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 12-16.  
(YUAN Bing, LIU Feng, QIU Xiaolong, et al. Experimental study on compressive performances of rubber concrete under different strain rate [J]. Journal of building materials, 2010, 13(1): 12-16.)
- [8] 周金枝, 陈玉良, 戴杰. 橡胶混凝土密度与抗压强度关系的试验研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(1): 122-125.  
(ZHOU Jinzhi, CHEN Yuliang, DAI Jie. Experimental study on density and compressive strength of rubberized concrete [J]. Yellow river, 2016, 38(1): 122-125.)
- [9] 姚新红, 成聪慧, 杜红秀. 高温后橡胶混凝土抗压强度变化及孔结构分析[J]. 混凝土, 2015(12): 28-29.  
(YAO Xinhong, CHENG Conghui, DU Hongxiu. Compressive strength variation and pore structure analysis of rubber concrete after high temperature [J]. Concrete, 2015 (12): 28-29.)
- [10] 季卫娟. 改性橡胶混凝土的抗冻性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.  
(JI Weijuan. Research on frost resistance performance of modified rubber concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.)
- [11] YANG Linhu, HAN Zhu, LI Chengfang. Strengths and flexural strain of CRC specimens at low temperature [J]. Construction and building materials, 2011, 25: 906-910.
- [12] MURAT K, ARZU E, VOLKAN O. Energy efficiency of rubberized asphalt concrete under low-temperature conditions[J]. Procedia-social and behavioral sciences, 2012 (54): 1242-1249.
- [13] ALAN E R, KATHRYN A, GAVIN W. Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content[J]. Journal of cleaner production, 2012(23): 96-103.
- [14] BLESSEN S, RAMESH C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber [J]. Journal of cleaner production, 2016(13): 86-92.
- [15] 袁群, 冯凌云, 曹宏亮, 等. 橡胶混凝土的应力-应变曲线试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 96-100.  
(YUAN Qun, FENG Lingyun, CAO Hongliang, et al. Experiment on stress curve of rubber concrete [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2013, 30(3): 96-100.)
- [16] 程从密, 苏达根, 焦楚杰, 等. 有机轻集料混凝土的单轴受压试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 114-119.  
(CHENG Chongmi, SU Dagen, JIAO Chujie, et al. Experimental investigation into compression property of organic lightweight aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2011, 39(11): 114-119.)
- [17] 朱涵, 刘春生, 张永明, 等. 橡胶集料掺量对混凝土压弯性能的影响[J]. 天津大学学报, 2007(7): 761-765.  
(ZHU Han, LIU Chunsheng, ZHANG Yongming, et al. Effect of crumb rubber proportion on compressive and flexural behavior of concrete [J]. Journal of Tianjin university, 2007 (7): 761-765.)
- [18] 陈克凡, 乔宏霞, 王鹏辉, 等. 温度循环退化模型的橡胶混凝土可靠寿命预估[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 47-51.  
(CHEN Kefan, QIAO Hongxia, WANG Penghui, et al. Reliable life prediction of rubber concrete based on temperature cycle degradation model [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2020, 48(2): 47-51.)
- [19] BOMPA D, ELGHAZOUALI A. Stress - strain response and practical design expressions for FRP-confined recycled tyre rubber concrete [J]. Construction and building materials, 2020, 237: 117633.
- [20] 江伏. 应用 SHPB 试验对橡胶粉混凝土动力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
(JIANG Fu. The research on the dynamic behavior of rubberized concrete by using split Hopkinson pressure bar [D]. Changsha: Hu'nan University, 2007.)
- [21] MANSOUR F, ERSHAD A, ALIHA M. Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber [J]. Engineering fracture mechanics, 2017, 180: 43-59.
- [22] HAN Qinghua, WANG Yihong, XU Jie, et al. Numerical analysis on shear stud in push-out test with crumb rubber concrete [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 130: 148-158.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)