

文章编号:1007-9629(2021)05-1096-09

页岩陶粒轻骨料混凝土高温后蠕变特性

刘雨珊¹, 庞建勇¹, 姚韦靖^{1,2}

(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 土木工程博士后流动站, 安徽 淮南 232001)

摘要:为探究高温对页岩陶粒轻骨料混凝土(SCLAC)蠕变特性的影响,进行了室温至800℃后SCLAC单轴压缩试验、分级压缩蠕变试验和扫描电镜(SEM)试验,分析了SCLAC质量损失、抗压强度损失、蠕变特性及微观结构特征.结果表明:随温度升高,SCLAC的内部微观结构变得疏松,质量、抗压强度逐渐降低,800℃后质量损失率为9.54%,抗压强度损失率为63.88%;随温度升高和应力水平增加,蠕变应变和蠕变速率增大,蠕变历时和蠕变破坏临界应力水平减小;温度高于600℃时蠕变应变明显增大,在相同应力水平下,与室温相比600℃后的蠕变应变增加了82.76%.基于试验结果对Burgers蠕变模型参数进行辨识,所得理论曲线与减速蠕变阶段和等速蠕变阶段的试验数据吻合较好.

关键词:轻骨料混凝土;高温;蠕变;微观结构

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.027

Creep Behavior of Shale Ceramsite Lightweight Aggregate Concrete Exposed to High Temperature

LIU Yushan¹, PANG Jianyong¹, YAO Weijing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology,

Huainan 232001, China; 2. Postdoctoral Station of Civil Engineering, Anhui University of

Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract:To study the influence of high temperature on the creep behavior of shale ceramsite lightweight aggregate concrete (SCLAC), uniaxial compression test, multistage creep test and scanning electron microscope (SEM) test of SCLAC exposed from room temperature to 800 °C were carried out. The loss of mass and compressive strength, creep behavior and microstructure characteristics of SCLAC were analyzed. The results show a decrease in the mass and compressive strength and the internal microstructure becomes more loose, as the temperature rises. After 800 °C, the loss ratio of mass and compressive strength is 9.54% and 63.88%, respectively. With higher target temperature and higher stress level, the creep strain and creep rate increase, while the creep failure threshold stress and creep duration reduce, significantly. Furthermore, the creep strain of SCLAC exhibits a considerable increase above 600 °C and the creep strain under the same loading ratio at 600 °C increases by 82.76%, compared to the creep at room temperature. Based on the test results, the Burgers creep model agrees well with the creep test data at the primary creep stage and stable creep stage.

Key words: lightweight aggregate concrete; high temperature; creep; microstructure

收稿日期:2020-07-03; 修订日期:2020-11-09

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2020M681974);安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2020A0297);安徽理工大学校级资助项目(QN2019115);安徽理工大学研究生创新基金(2020CX1004)

第一作者:刘雨珊(1997—),女,安徽亳州人,安徽理工大学博士生. E-mail:liuyushan1997@126.com;

通讯作者:庞建勇(1964—),男,河北保定人,安徽理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:pangjyong@163.com

轻骨料混凝土因较普通骨料混凝土具有轻质高强、耐火抗冻和保温隔热等优点,被广泛应用于大跨度、高层和超高层建筑结构中^[1-2]。在工程实际中,火灾常引起混凝土结构的高温损伤破坏^[3]。蒋玉川等^[4]进行了高温后不同配合比的页岩陶粒轻骨料混凝土抗压强度试验,得到抗压强度与温度水平的关系。郭荣鑫等^[5]探讨了高温后轻骨料混凝土强度的损伤劣化,分析了高温损伤机理。Yao等^[6]通过对比普通骨料混凝土和轻骨料混凝土从常温升温至1 000 °C后表面现象变化、质量和抗压强度损失,结合微观结构分析了其高温劣化过程,证实了轻骨料混凝土在高温下具有较高的残余抗压强度。

以往的研究主要集中于轻骨料混凝土高温后强度特性方面,较少涉及变形特性。在荷载长期作用下,混凝土结构会出现与时间相关的变形,即蠕变^[7-9]。而高温火灾状态下混凝土结构3 h内的短期蠕变可达其常温下1 a蠕变的32倍^[10],因此混凝土高温下蠕变行为在结构的防火设计中极为重要。Guo等^[11]研究发现普通混凝土蠕变特性主要受骨料类型、荷载水平及其持续时间的影响,当温度高于500 °C时,蠕变显著增加。页岩陶粒的加入使轻骨料混凝土中陶粒与水泥石的界面与普通混凝土有所不同,高温后其界面结构亦存在差异。因此,开展轻骨料混凝土高温后蠕变特性的研究对于轻骨料混凝土

结构的火灾反应分析及灾后损伤评估与修复有重要的意义。

本文以页岩陶粒轻骨料混凝土(SCLAC)为研究对象,进行了室温至800 °C后SCLAC单轴压缩试验、分级压缩蠕变试验和扫描电镜(SEM)试验,分析不同温度作用后试样的质量损失、抗压强度损失、蠕变特性及微观损伤机理,为工程实际提供试验依据。

1 试验

1.1 试验材料与配合比

淮南八公山牌P·C 42.5级普通硅酸盐水泥,其3、28 d抗压强度分别为29.99、49.75 MPa;淮南平圩电厂生产的I级粉煤灰,其化学组成(质量分数)见表1;粗骨料选用粒径5~10 mm连续级配石灰质碎石;细骨料选用细度模数2.8的中砂;轻骨料选用页岩陶粒,粒径5~10 mm,其基本性能见表2;外加剂为陕西秦奋建材有限公司生产的HPWR型高性能减水剂。

表1 粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical composition of fly ash

						w/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	IL
53.26	34.72	4.07	2.47	0.39	1.90	4.07

表2 页岩陶粒的基本性能

Table 2 Basic performance of shale ceramicsite

Particle size/mm	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Cylinder compressive strength/MPa	1 h water absorption(by mass)/%
5-10	415	769	≥2.5	9.5-12.0

依据JGJ51—2002《轻骨料混凝土技术规程》进行SCLAC配合比设计,见表3。为避免轻骨料在拌和过程中过度吸水,影响混凝土的和易性,在试验前对页岩陶粒进行了2 h的吸水处理^[12]。

表3 SCLAC配合比

Table 3 Mix proportions of SCLAC

Binding material		Coarse aggregate		Sand	Water	Water reducer
Cement	Fly ash	Gravel	Shale ceramicsite			
421.00	47.00	635.96	77.92	582.54	168.48	4.68

1.2 试验方法

采用 $\phi 50 \times 100$ mm圆柱体试件,成型24 h后拆模,置于标准养护环境下(温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度RH $\geq 95\%$)养护56 d。高温处理前,将所有试件放入 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干24 h,以排除含水率对试验

的影响,同时避免含湿量过大导致升温过程中发生爆裂。采用箱式电阻炉加热试件,设计目标温度200、400、600、800 °C,加热速率5 °C/min,升至目标温度后恒温3 h以保证炉温和试件内部温度一致,之后关闭电源,待炉内冷却至100 °C左右,打开炉盖继续冷却至室温。将处理后的试件密封保存在聚乙烯袋中,直到试验当天。

采用CLY15016型电子蠕变松弛试验机对不同高温处理后的SCLAC试件进行单轴压缩和分级压缩蠕变试验,测试温度为25 °C。单轴压缩试验以0.5 kN/s的速率加载获得抗压强度 f_c 。分级压缩蠕变试验采用等量分级递增的加载方式,加载速率0.5 MPa/s,设计第1级应力 σ_1 为抗压强度的40%,记为应力水平 $\lambda=0.4$,此后逐级递增,应力水平分别为0.5、0.6、0.7、0.8、0.9,每级载荷保持12 h。试验过程中计算机自动采集应力及应变数据,加载

期间采样间隔为5 s,稳压期间采样间隔为10 min. 加载系统根据数据反馈自动进行应力调整,从而保证蠕变过程中施加的荷载始终恒定. 试验结束后从单轴压缩试验压碎的试块中进行取样,使用日立产S-3400N型扫描电子显微镜进行SEM分析.

2 结果与分析

2.1 质量、抗压强度损失

图1为高温后SCLAC质量及抗压强度损失情况. 从图1可以看出:200℃后试件质量损失率在2.00%以内,抗压强度则略有提高,达到最大值33.92 MPa,较常温时的30.28 MPa提高了12.03%,原因在于SCLAC内部经历“高温养护”,水泥水化反应和火山灰反应相互促进,发生了二次水化作用^[12-13];温度高于200℃后,试件质量及抗压强度不断降低,且下降速率随温度升高而加快;800℃后试件质量损失率为9.54%,抗压强度损失率为63.88%.

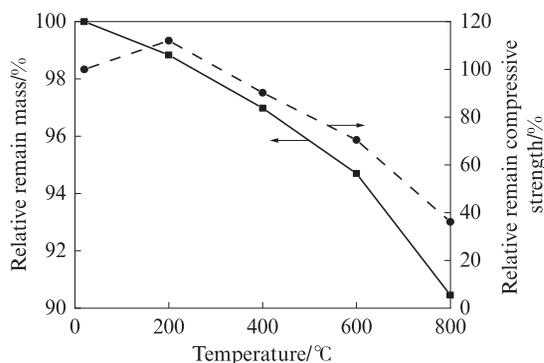


图1 高温后SCLAC质量及抗压强度损失情况
Fig. 1 Loss of mass and compressive strength of SCLAC exposed to high temperature

对SCLAC抗压强度进行变异性分析,计算其平均值 μ 、标准差 δ 和变异系数 c_v :

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{c,i} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{c,i} - \mu)^2} \quad (2)$$

$$c_v = \frac{\delta}{\mu} \quad (3)$$

式中: $f_{c,i}$ 为各试件抗压强度试验值; n 为试验值个数, $n=3$.

SCLAC高温后抗压强度的平均值 μ 、标准差 δ 及变异系数 c_v 见表4.由表4可以看出,随着温度的升高,SCLAC抗压强度变异系数呈递增趋势,因为高温作用引发SCLAC内部损伤,裂缝孔隙发育不稳定,非均匀性增加,从而导致其力学性能的离散

性增大.

表4 SCLAC高温后抗压强度平均值、标准差及变异系数
Table 4 μ , δ and c_v of compressive strength for SCLAC exposed to high temperature

Temperature/°C	μ /MPa	δ /MPa	c_v /%
20	30.28	0.61	2.02
200	33.92	0.80	2.36
400	27.32	0.81	2.95
600	21.34	1.03	4.81
800	10.94	0.82	7.49

2.2 蠕变特性

2.2.1 蠕变曲线

图2为高温后SCLAC分级压缩蠕变曲线.由图2可以看出,不同温度作用后SCLAC蠕变曲线均呈阶梯状上升,在施加应力的瞬间产生瞬时应变,应变曲线发生突变,随后在其应力保持不变的情况下曲线趋于平缓,产生蠕变;在低应力水平下以瞬时应变为主;随轴压不断增加,蠕变逐渐增加,蠕变曲线斜率增大,表现为减速蠕变和等速蠕变;在最后一级加载作用下轴向应变陡然增大并伴随蠕变破坏,表现为减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变这三个阶段^[14].

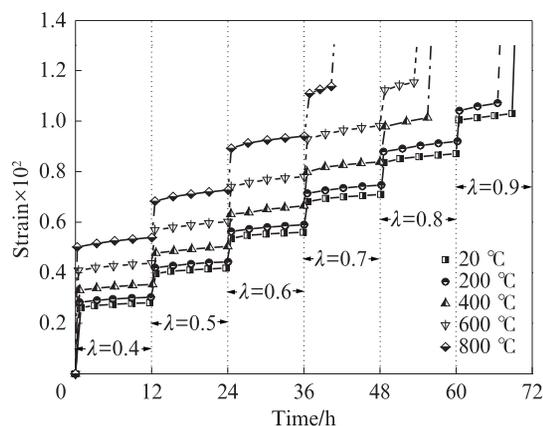


图2 高温后SCLAC分级压缩蠕变曲线

Fig. 2 Multistage compression creep curves of SCLAC exposed to high temperature

由图2可见,当 $\lambda=0.4$ 时,与20℃下蠕变 0.19×10^{-3} 相比,600℃后蠕变为 0.28×10^{-3} ,增幅为47.37%;随着应力水平的增加,当 $\lambda=0.7$ 时,与20℃下蠕变 0.29×10^{-3} 相比,600℃后蠕变为 0.53×10^{-3} ,增幅达82.76%.由此可见,高应力水平下温度效应对SCLAC蠕变的影响更为显著.

高温后SCLAC应力水平与瞬时应变的关系如图3所示.由图3可见:随温度升高,SCLAC在各级应力水平下所产生的瞬时应变呈线性增大;在第1级应力水平($\lambda=0.4$)下,与室温20℃下SCLAC试

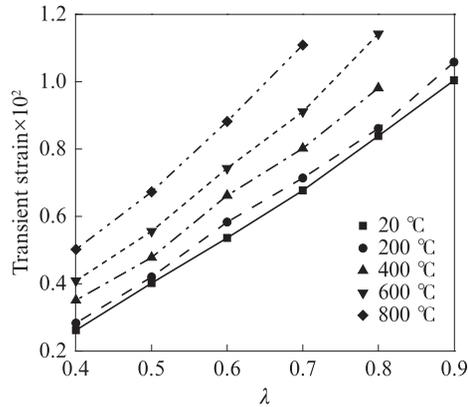


图3 高温后SCLAC应力水平与瞬时应变关系
Fig. 3 Relationship between stress level and transient strain of SCLAC exposed to high temperature

样的初始瞬时应变 2.62×10^{-3} 相比, 200、400、600、800 °C 后的初始瞬时应变分别增加了 8.02%、26.34%、56.11%、91.60%。这反映了受热温度越高,

高温对SCLAC前期损伤越严重,瞬时应变增大。

2.2.2 蠕变速率

图4为20、800 °C后SCLAC在不同应力水平下的蠕变速率。由图4可以看出:对于室温状态下的等速蠕变曲线,当 $\lambda < 0.5$ 时,等速蠕变阶段速率趋于0;而当 $0.6 < \lambda < 0.9$ 时,等速蠕变速率趋于1个非零值;最后一级应力水平下,加载完成后经历较短的等速蠕变阶段,蠕变速率开始急剧增加,随之试件发生破坏。且随着温度的升高,试件等速蠕变速率的波动范围增加:20 °C 时试件在各分级应力水平下的等速蠕变速率变化范围为 $0.22 \times 10^{-5} \sim 0.51 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$; 800 °C 时等速蠕变速率变化范围为 $0.63 \times 10^{-5} \sim 1.79 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 。原因在于高温引发SCLAC内部损伤,较高的应力水平加速了裂纹的发展和内部弱化区的扩展,在长期应力作用下呈现出明显的不均匀性特征。

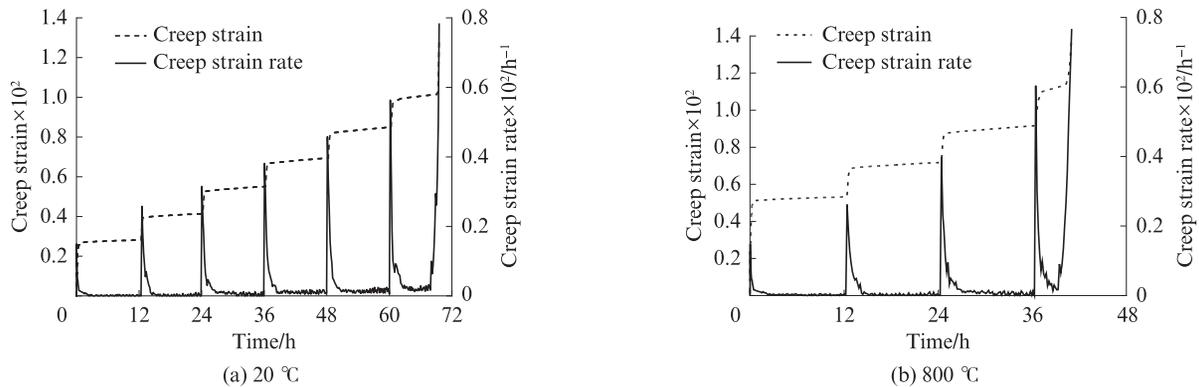


图4 20、800 °C后SCLAC在不同应力水平下的蠕变速率
Fig. 4 Creep stain rate of SCLAC under different stress levels exposed to 20, 800 °C

2.2.3 加速蠕变阶段

在最后一级应力水平下,不同受热温度的试件发生蠕变破坏规律基本一致,试件由减速蠕变阶段经等速蠕变阶段发展到加速蠕变阶段。由试件蠕变曲线可以得出试件发生破坏时的应力水平及蠕变历时,具体

结果见表5。由表5可知:室温下试件在 $\lambda = 0.9$ 时发生蠕变破坏,而800 °C后破坏时的应力水平仅为 $\lambda = 0.7$;在相同应力水平下,随温度升高,蠕变全程历时变短,减速蠕变阶段和加速蠕变阶段历时占全程历时的比例逐渐升高,800 °C后分别达到32.49%、14.04%。

表5 SCLAC破坏时的应力水平及蠕变历时
Table 5 Failure stress level and creep durations for SCLAC

Temperature/°C	Failure λ	Total duration/h	Primary creep stage		Stable creep stage		Accelerated creep stage	
			Duration/h	Proportion /%	Duration/h	Proportion /%	Duration/h	Proportion /%
20	0.9	9.03	1.50	16.66	6.65	73.60	0.88	9.74
200	0.9	6.55	1.56	23.81	4.24	64.75	0.75	11.45
400	0.8	7.73	1.34	17.34	5.60	72.45	0.79	10.22
600	0.8	6.27	1.69	26.94	3.81	60.79	0.77	12.27
800	0.7	4.99	1.62	32.49	2.67	53.47	0.70	14.04

2.2.4 蠕变破坏临界应力水平

为进一步探究高温作用对SCLAC蠕变特性的影响,定义不同温度作用后SCLAC的蠕变 ϵ_c 与总应变 ϵ_t 的比值为 φ ,即

$$\varphi = \epsilon_c / \epsilon_t \times 100\% \quad (4)$$

图5给出了高温后试件 φ 值随应力水平的变化趋势.由图5可以看出:每条曲线均有1个临界点(对应的应力水平为蠕变破坏临界应力水平)将曲线分为递减和递增2个部分;在临界点前,随应力水平递增,蠕变增幅较小,而瞬时应变增幅很大,导致 φ 值呈下降趋势;在临界点之后,蠕变增量显著, φ 值随应力水平呈幂函数增加.在高温后试件 φ 值随应力水平增加的演化规律表现得更加清晰,对于800℃后试件,虽只有4个数据点,但 φ 值先减小后增加,与其他试件变化趋势一致.

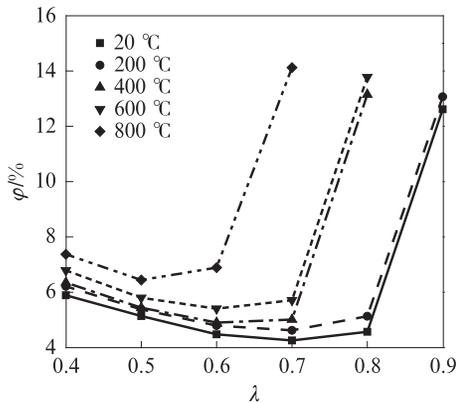


图5 高温后试件 φ 值随应力水平的变化趋势

Fig. 5 Variation of φ value of specimens with stress level

20、200℃后试件的蠕变破坏临界应力水平为 $\lambda=0.7$,随温度升高曲线临界点逐渐前移,800℃后蠕变破坏临界应力水平为 $\lambda=0.5$,这反映了SCLAC高温后更容易失稳.Yu等^[15]研究发现在应力水平低于峰值强度的50%时,红砂岩试件的蠕变可忽略不计,但若应力水平超过该临界点,长期应力作用将会导致试样破坏.然而,大多数关于高温火灾对轻骨料混凝土性能影响的研究都针对高温后其峰值强度的变化,未考虑其在温度应力及荷载作用下的变形,导致混凝土结构设计存在不安全性.因此,可以通过本文方法,采用分级压缩蠕变试验来确定蠕变破坏临界应力水平.图5的结果表明,高温后的SCLAC长期应力低于峰值强度的50%时是安全的.

2.2.5 Burgers蠕变模型

除最后一级应力水平外,其余各级蠕变曲线均由减速蠕变阶段-等速蠕变阶段组成.因此选用

Burgers蠕变模型来描述试件的蠕变特性.Burgers蠕变模型由Kelvin模型和Maxwell模型串联组成,如图6所示.

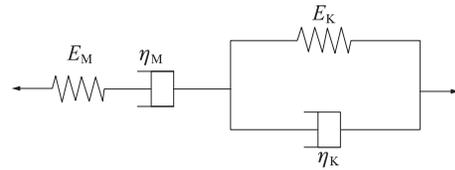


图6 Burgers蠕变模型

Fig. 6 Creep model of Burgers

Burgers蠕变模型方程为:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M} t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) \quad (5)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为 t 时刻的应变; σ 为轴向应力; E_M 为弹性模量; E_K 为黏弹性模量; η_M 为黏弹性系数; η_K 为黏性系数.该模型的第1项表示瞬时应变或与时间无关的弹性应变,第2项表示与时间相关的蠕变,第3项表示蠕变速率递减的减速蠕变^[16].

利用Origin软件,以不同温度后的试件在第1级应力水平下的试验数据分别对 E_M 、 η_M 、 E_K 、 η_K 进行流变参数反演,绘制蠕变试验数据与Burgers蠕变模型曲线,见图7,对应的Burgers蠕变模型参数见表6.由表6可见,各拟合相关系数 R^2 均大于0.98,表明Burgers蠕变模型能较好地反映高温后SCLAC的减速蠕变和等速蠕变特征.

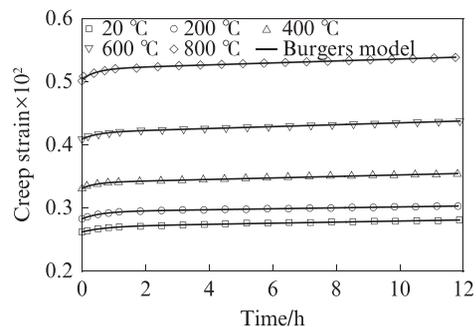


图7 不同温度后SCLAC在第1级应力水平下蠕变试验数据和Burgers蠕变模型曲线

Fig. 7 Creep strain curves of SCLAC after exposure to different temperatures for experimental data and Burgers creep model under the first stress level ($\lambda = 0.4$)

2.3 轻骨料混凝土高温后微观结构特征

图8为高温后水泥基体的SEM图.由图8可见:室温下水泥基体结构完整连续,原因在于经过56d养护,水泥基体内部水化反应基本完成,生成了较多的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石^[17];200℃后内

部自由水和毛细水汽化并逸出,致使水泥基体表面留有细小孔洞,试件相当于经历了“高温养护”^[18],因此其抗压强度略有提高;400 °C后除自由水和毛细水基本蒸发外,C-S-H凝胶中吸附水散失,水泥水化

产物间黏结减弱,有细小裂缝出现;随着水分的大量流失,孔隙开始变得明显,800 °C后C-S-H凝胶完全脱水分解,孔洞扩大发育成连通孔,孔结构严重粗化^[19-20].

表6 Burgers蠕变模型参数
Table 6 Simulated parameters of Burgers creep model ($\lambda=0.4$)

Temperature/°C	σ /MPa	E_M /GPa	η_M /(GPa·h)	E_K /GPa	η_K /(GPa·h)	R^2
20	12.2	43.298	140.00	1398.844	10.73	0.9943
200	13.5	44.478	182.32	1196.130	7.06	0.9877
400	11.2	31.172	90.83	1196.487	5.23	0.9913
600	8.8	19.723	56.67	790.698	3.91	0.9986
800	4.8	8.379	28.66	276.243	1.28	0.9894

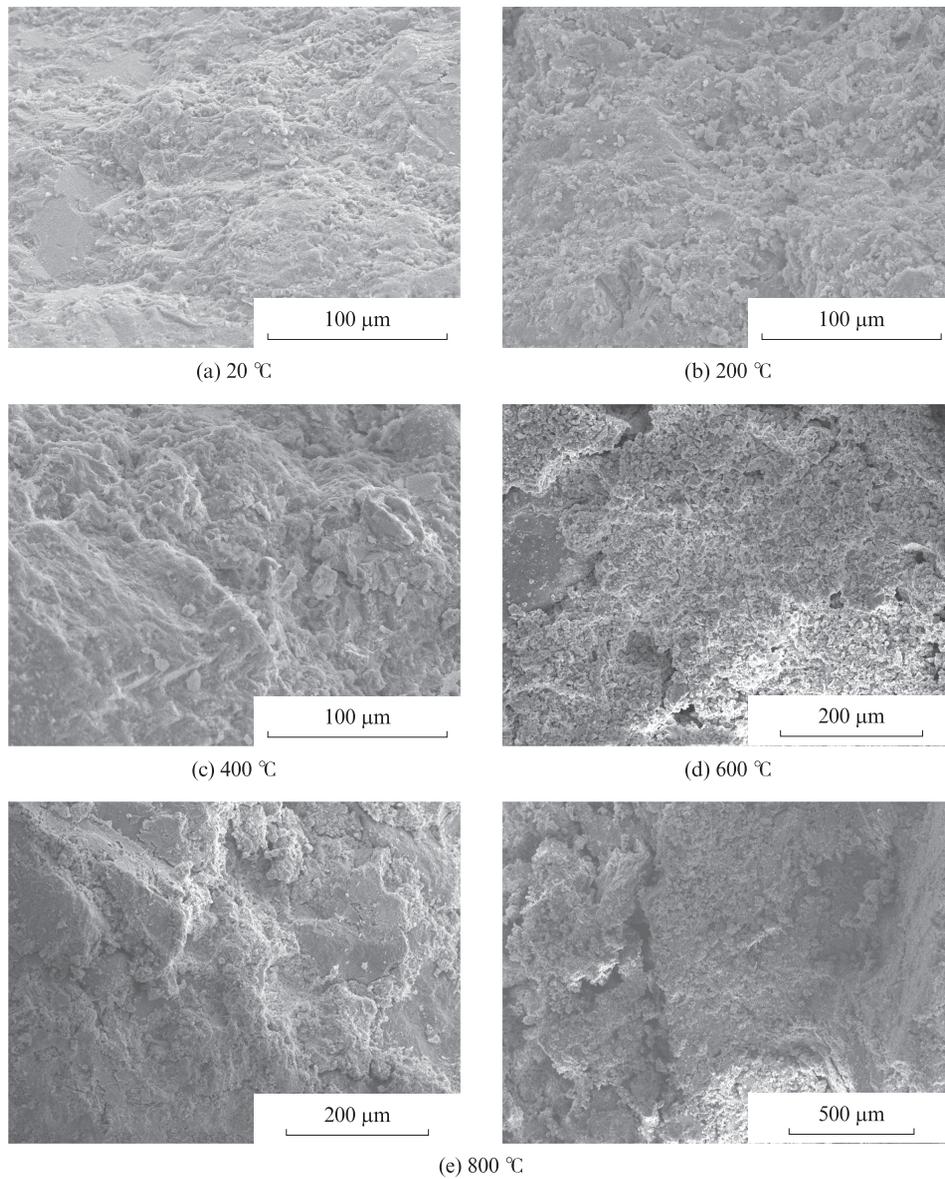


图8 高温后水泥基体的SEM图

Fig. 8 SEM micrographs of cement matrix exposed to high temperature

轻骨料混凝土以其特有的界面过渡区显著区别于普通混凝土,图9为高温后页岩陶粒与水泥基体界面过渡区SEM图.由图9(a)可知:页岩陶粒表面粗糙且开孔较多,室温下其与水泥基体黏结紧密;界面过渡区的孔中发现的C-S-H凝胶说明水泥水化产物可填充到骨料表面孔洞中,提高页岩陶粒外壳密度^[21].与室温下相比,200℃后试件的界面过渡区微观结构并无明显变化,页岩陶粒与水泥基体啮合

完好.

从图9(c)~(e)可以看出:页岩陶粒与水泥基体界面过渡区的裂纹随温度升高逐渐形成;400℃后界面过渡区出现碎状颗粒及细小裂缝,宏观表现为抗压强度减小;600℃后界面过渡区出现明显孔洞互穿现象;800℃后水泥基体分解,与页岩陶粒的黏结力明显减弱,界面过渡区裂纹加宽,出现碎石从水泥基体中脱离的现象,见图9(f).

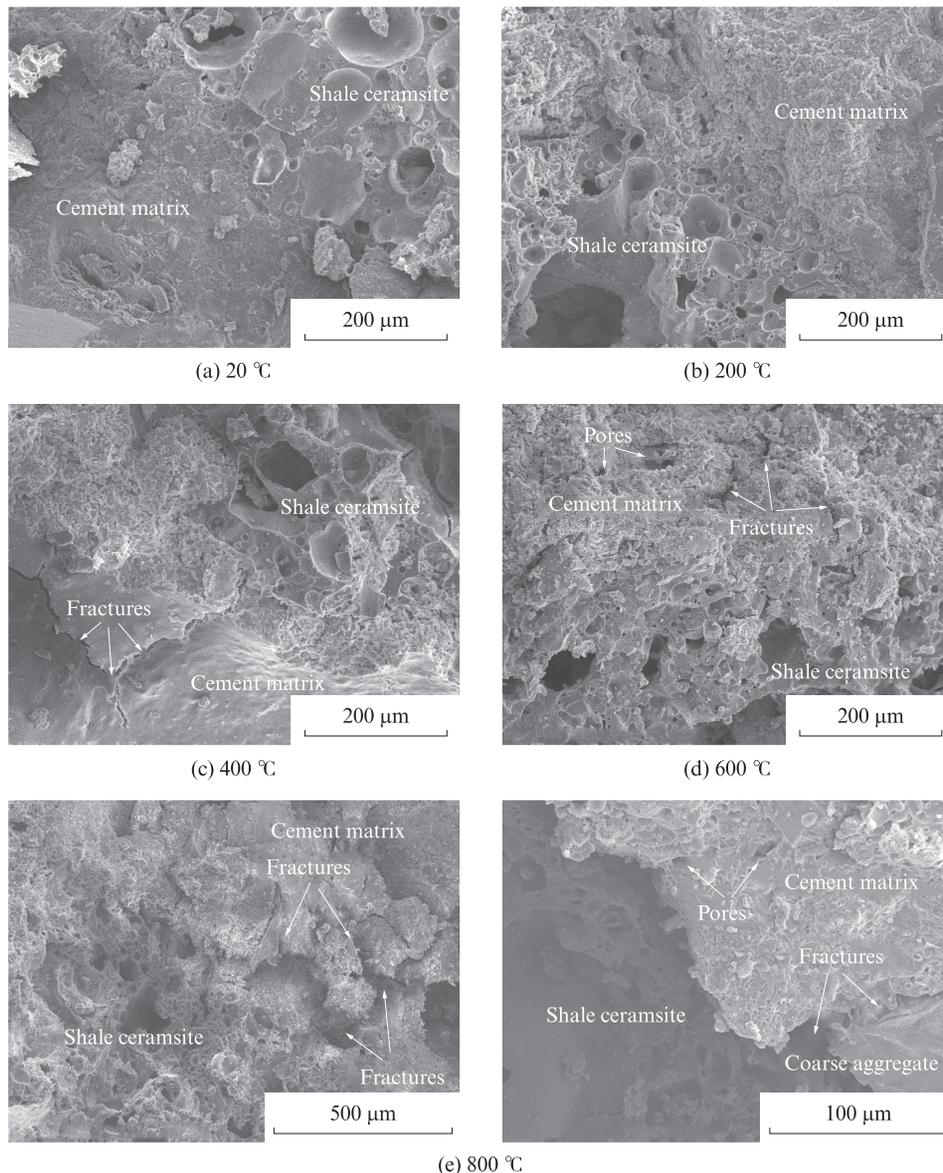


图9 高温后页岩陶粒与水泥基体界面过渡区SEM图

Fig. 9 SEM micrographs of interfacial transition zone between shale ceramsite and cement matrix exposed to high temperature

页岩陶粒是一种优良的耐高温材料,其在20、800℃后的微观形貌如图10所示.由图10可见:800℃后页岩陶粒表面出现一些孔隙,但其内部结构保持完整.因此,页岩陶粒轻骨料混凝土高温后抗压强度损

失的主要原因是水泥基体的弱化和界面黏结力的丧失.相比于石灰质碎石中的 CaCO_3 在750℃左右会受热分解^[13],页岩陶粒高温后相对完整,因此页岩陶粒轻骨料混凝土较普通混凝土高温性能更为优异^[5].

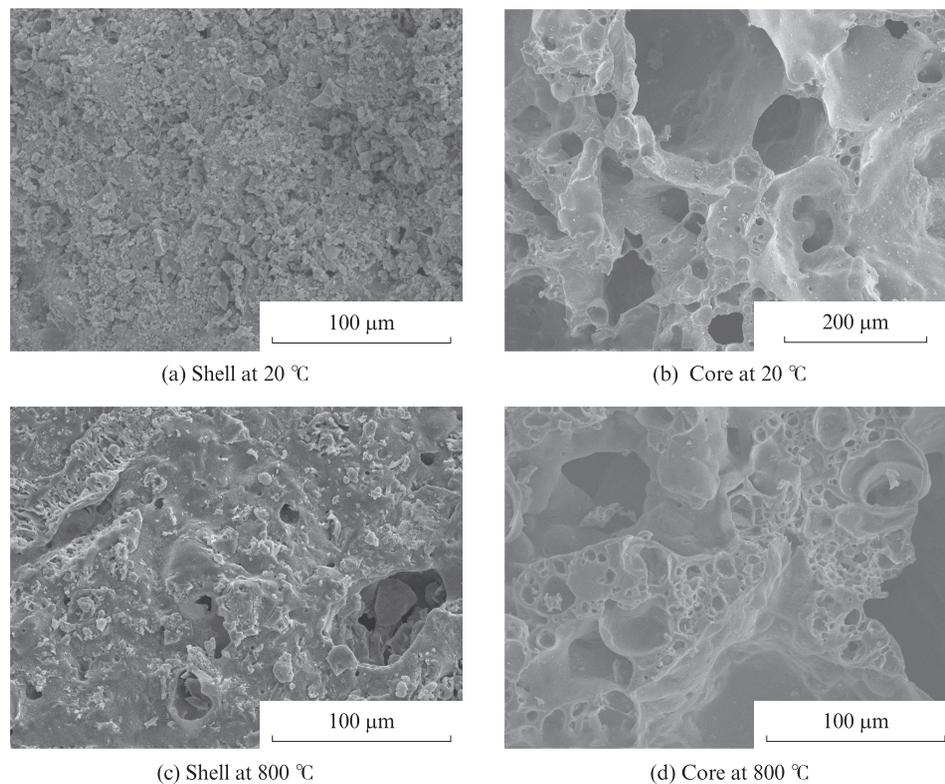


图10 20、800 °C后页岩陶粒的微观形貌

Fig. 10 Micro-structures of shale ceramsite exposed to 20, 800 °C

3 结论

(1) 高温作用显著降低了页岩陶粒轻骨料混凝土的质量及抗压强度, 800 °C后其质量损失率和抗压强度损失率分别达到9.54%和63.88%, 且抗压强度变异系数随温度升高而增大。

(2) 随温度升高和应力水平增加, 页岩陶粒轻骨料混凝土蠕变和蠕变速率增大, 蠕变历时和蠕变破坏临界应力水平减小。温度高于600 °C时蠕变明显增大, 在相同应力水平下, 600 °C后蠕变较室温增加了82.76%。

(3) 高温作用改变了页岩陶粒轻骨料混凝土的内部微观结构, 随温度升高, 内部水泥凝胶由整体逐渐分散、疏松, 页岩陶粒与水泥基体黏结力不断减弱、丧失, 诱发了裂纹和孔隙的扩展、贯通, 导致宏观强度损失和变形增大。

参考文献:

[1] 王萧萧, 申向东, 王海龙, 等. 石粉掺量对轻骨料混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 49-53.
WANG Xiaoxiao, SHEN Xiangdong, WANG Hailong, et al. Impact of use level of limestone powder on performance of lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Mate-

rials, 2015, 18(1): 49-53. (in Chinese)

[2] COSTA H, JULIO E, LOURENCO J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 84-91.

[3] 郑文忠, 侯晓萌, 王英. 混凝土及预应力混凝土结构抗火研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 1-18.
ZHENG Wenzhong, HOU Xiaomeng, WANG Ying. Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 1-18. (in Chinese)

[4] 蒋玉川, 霍达, 滕海文, 等. 页岩陶粒混凝土高温性能特征研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 888-893.
JIANG Yuchuan, HUO Da, TENG Haiwen, et al. Study on performance of shale ceramsite concrete after exposure to high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 888-893. (in Chinese)

[5] 郭荣鑫, 何科成, 马倩敏, 等. 改性轻骨料混凝土高温抗压性能及微观结构[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 333-338, 344.
GUO Rongxin, HE Kecheng, MA Qianmin, et al. Compressive properties and microstructure of modified lightweight aggregate concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 333-338, 344. (in Chinese)

[6] YAO W J, PANG J Y, LIU Y S. Performance degradation and microscopic analysis of lightweight aggregate concrete after exposure to high temperature[J]. Materials, 2020, 13(7): 1566.

[7] 王影冲, 王鼎, 郝圣旺. 混凝土蠕变与应力松弛耦合破坏及临

- 界幂律行为[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊1): 49-55.
- WANG Yingchong, WANG Ding, HAO Shengwang. Creep-stress relaxation coupling failure in concrete and its critical power-law behavior [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33 (Suppl 1): 49-55. (in Chinese)
- [8] WU B, LAM E S S, LIU Q, et al. Creep behavior of high-strength concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures[J]. *ACI Materials Journal*, 2010, 107(2): 176-184.
- [9] GAYARRE F L, GONZÁLEZ J S, PÉREZ C L C, et al. Shrinkage and creep in structural concrete with recycled brick aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228: 116750.
- [10] ABID M, HOU X M, ZHENG W Z, et al. Creep behavior of steel fiber reinforced reactive powder concrete at high temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205: 321-331.
- [11] GUO Z H, SHI X D. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011: 307-311.
- [12] 姚韦靖, 庞建勇. 玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2932-2941.
- YAO Weijing, PANG Jianyong. Performance degradation and microscopic structure of glazed hollow bead insulation normal concrete after exposure to high temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2932-2941. (in Chinese)
- [13] 龚建清, 邓国旗, 单波. 活性粉末混凝土高温后超声研究及微观分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 68-76.
- GONG Jianqing, DENG Guoqi, SHAN Bo. Ultrasonic test and microscopic analysis of reactive powder concrete exposed to high temperature[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(1): 68-76. (in Chinese)
- [14] 杨秀荣, 姜谔男, 王善勇, 等. 冻融循环条件下片麻岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4331-4340.
- YANG Xiurong, JIANG Annan, WANG Shanyong, et al. Experimental study on creep characteristics of gneiss under freeze-thaw cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 (11): 4331-4340. (in Chinese)
- [15] YU C Y, TANG S B, TANG C A, et al. The effect of water on the creep behavior of red sandstone[J]. *Engineering Geology*, 2019, 253: 64-74.
- [16] MANSOURI H, AJALLOEIAN R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 19-27.
- [17] 邓明科, 成媛, 翁世强, 等. 高温后高延性混凝土的抗压性能及微观结构[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 985-996.
- DENG Mingke, CHENG Yuan, WENG Shiqiang, et al. Compressive properties and micro-structure of high ductility concrete exposed to elevated temperature [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 985-996. (in Chinese)
- [18] 金宝, 霍静思. 钙质骨料混凝土抗压强度的高温损伤机理[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 359-363.
- JIN Bao, HUO Jingsi. Damage mechanism of compressive strength of calcareous aggregate concrete after elevated temperature [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19 (2) : 359-363. (in Chinese)
- [19] 王怀亮, 朱建威. 高性能轻骨料混凝土高温后受压本构关系研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 200-209.
- WANG Huailiang, ZHU Jianwei. Compressive behaviour of high performance lightweight concrete after high temperature [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(11) : 200-209. (in Chinese)
- [20] 朋改非, 杨娟, 石云兴. 超高性能混凝土高温后残余力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 73-79.
- PENG Gaifei, YANG Juan, SHI Yunxing. Experimental study on residual mechanical properties of ultra-high performance concrete exposed to high temperature [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(4) : 73-79. (in Chinese)
- [21] 杨淑慧, 高丹盈, 赵军. 高温作用后矿渣微粉纤维混凝土的微观结构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(增刊2): 102-106.
- YANG Shuhui, GAO Danying, ZHAO Jun. Microstructure of fiber reinforced concrete with slag power after effect of high temperatures[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(Suppl 2) : 102-106. (in Chinese)