

文章编号:1673-2049(2019)04-0120-07

# 高温后页岩轻骨料混凝土断裂特性

张云国,陈婷婷,李 敏

(大连交通大学 土木工程学院,辽宁 大连 116028)

**摘要:**为研究页岩轻骨料混凝土Ⅰ型断裂性能随温度的变化规律,对页岩轻骨料混凝土试件进行100,200,300,400℃加热处理,自然冷却至常温。采用三点弯曲梁法对15个缝高比为0.4的轻骨料混凝土小梁进行断裂试验,依据荷载-跨中挠度曲线计算断裂能及断裂韧度。结果表明:起裂韧度与失稳韧度均随温度升高先上升后下降,起裂韧度的转折点在200℃左右,失稳韧度的转折点在300℃左右;黏聚韧度呈现下降—上升—下降的趋势,其随温度变化规律与起裂韧度、失稳韧度存在较大的关联性,当温度为300℃时裂尖端的黏聚力阻止裂缝扩展的能力最为显著;断裂能呈现出基本不变—增大—减小的3个变化阶段,当温度为200℃左右时断裂能达到最大值,断裂能随温度变化规律的拟合曲线上升段为二次抛物线,下降段为直线;在所研究的温度范围内,页岩轻骨料混凝土的断裂性能受高温影响较为显著;所得结论为高温状态下轻骨料混凝土结构裂缝扩展研究和结构设计提供了试验依据。

**关键词:**轻骨料混凝土;高温;三点弯曲梁法;断裂能;断裂韧度

**中图分类号:**TU528.01

**文献标志码:**A

## Fracture Properties of Shale Lightweight Aggregate Concrete After High Temperature

ZHANG Yun-guo, CHEN Ting-ting, LI Min

(School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to study the temperature effect on mode I fracture properties of shale lightweight aggregate concrete, the shale lightweight aggregate concrete specimens were heated at 100, 200, 300, 400℃ and then naturally cooled to room temperature. Three-point bending beam method was used to the fracture test for 15 lightweight aggregate concrete beams with seam-height ratio of 0.4. The fracture energy and fracture toughness were calculated according to the load-midspan deflection curves. The results show that the initiation toughness and the unstable toughness both rise firstly and then drop with the increase of temperature. The turning point of the initiation toughness is at about 200℃, and that of the unstable toughness is at about 300℃. The cohesion toughness shows a decrease-increase-decrease trend with elevated temperatures, and is largely related to the initiation and the unstable toughness. The cohesion force of crack tip significantly prevents crack extension at about 300℃. The fracture energy presents a hold-rise-decline three-stage and reaches the maximum value at about 200℃. The ascending part of the fitting curve of the fracture energy changing with temperature is a quadratic parabola and the descending part is a straight line. Within the temperature range of the study, the fracture

收稿日期:2018-11-09

基金项目:辽宁省教育厅基金项目(JDL2017016)

作者简介:张云国(1978-),男,辽宁瓦房店人,副教授,工学博士,E-mail:zyg-ncwu@163.com。

behavior of shale lightweight aggregate concrete affected by high temperature is notable. It provides experimental basis for the study of crack propagation and structural design of lightweight aggregate concrete under high temperature condition.

**Key words:** lightweight aggregate concrete; high temperature; three-point bending beam method; fracture energy; fracture toughness

0 引 言

轻骨料混凝土(LC)具有自重轻、保温隔热、减震性能好、降低碱集料反应等诸多优点,其工程实用性已经得到认可,将其推广应用到工厂烟囱、电厂冷却塔、核工业中的预应力混凝土压力容器及大型构筑物等经常遭受高温作用的结构中,会有显著的经济技术价值。有关轻骨料混凝土基本性能研究已经很多,但关于其高温作用后断裂性能研究还不多,需要进一步进行研究。

已有学者研究了轻骨料混凝土力学性能随加热温度的变化规律,王建民等<sup>[1]</sup>研究表明,在 200~800 ℃温度范围内,轻骨料混凝土的抗压强度和弹性模量均随温度升高而降低,就下降幅度而言,抗压强度要明显小于弹性模量。吴熙等<sup>[2]</sup>通过研究自密实轻骨料混凝土高温前后的质量、抗压强度及超声波速,发现加热后的残余强度损失和超声波速均小于普通混凝土,质量损失较普通混凝土大。郭荣鑫等<sup>[3]</sup>研究表明改性后的轻骨料混凝土高温抗爆裂性能和残余抗压强度均有较大的提高。文献[4],[5]设计了 6 组不同缝高比自密实轻骨料混凝土试件,通过三点弯曲试验研究了常温状态下自密实轻骨料混凝土的断裂性能,结果表明其断裂能与起裂韧度随缝高比增大而增大,失稳韧度随缝高比增大而保持稳定。文献[6]采用三点弯曲梁法对不同“加热-冷却”循环次数后的普通混凝土进行试验,结果显示断裂韧度随循环次数增加而降低,但降低幅度越来越小。Baker<sup>[7]</sup>研究了普通混凝土高温后的断裂特性,结果表明断裂能在 300 ℃前略有上升,后随温度继续升高而下降,而且发现不同降温速率对断裂性能影响不明显。Nielsen 等<sup>[8-9]</sup>研究了普通混凝土及高性能混凝土高温后的断裂性能,发现 300 ℃时的断裂能较常温增长近 50%,且断裂能随烧失量的变

化趋势为保持—上升—下降,这与断裂能随温度变化的规律相同。Watanabe 等<sup>[10-11]</sup>研究了掺加纤维的混凝土高温冷却后及加热过程中的断裂性能,表明掺加钢纤维能有效改善加热中和冷却后的混凝土断裂韧性,且冷却后较加热中的断裂能大。陆洲导等<sup>[12-14]</sup>采用楔入劈拉试验研究了高温后的普通混凝土断裂参数,结果表明随受火温度升高,起断裂韧度单调下降,断裂能和失稳断裂韧度呈现保持不变—上升—下降的趋势。闫昕等<sup>[15]</sup>研究了不同加热温度及恒温时间对断裂能的影响,表明在 3 个恒温条件下高性能混凝土的断裂能值均在 300 ℃时达到峰值,且恒温 2 h 其值最大。

本文结合已有的研究成果,采用三点弯曲梁法探究高温后页岩轻骨料混凝土的断裂性能,设置 5 组温度,以期得到不同性能参数随温度的变化规律,为轻骨料混凝土结构安全性的评估提供依据。

1 试验概况

1.1 原材料与试件制备

试验原材料包括:大连小野田水泥厂生产的 P.O42.5R 普通硅酸盐水泥,其物理性能及化学成分见表 1,2;大连华能电厂Ⅰ级粉煤灰,其化学成分及物理性能见表 3;轻骨料混凝土的粗骨料为页岩碎石型陶粒,粒径为 5~20 mm,表观密度为 1 448 kg·m<sup>-3</sup>,堆积密度为 782 kg·m<sup>-3</sup>,筒压强度为 6.5 MPa,24 h 吸水率为 8.9%;大连天然河砂,细度模数为 2.73,中砂;自来水。轻骨料混凝土设计强度等级为 LC40,水胶比为 0.41,配合比及 28 d 龄期后立方体抗压强度如表 4 所示。

由于轻骨料吸水性较强,为避免在制备混凝土的过程中因轻骨料吸水导致混凝土的水灰比变小,在混凝土拌合前对其进行了预湿<sup>[16]</sup>,使其饱和,达到饱和面干的状态。搅拌时将粗细骨料及粉煤灰加

表 1 水泥物理性能

Tab. 1 Physical Properties of Cement

标准稠度/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	安定性 (试饼法)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
27.3	336	合格	227	277	27.9	52.0	5.9	9.0

表 2 水泥化学成分  
Tab. 2 Chemical Composition of Cement

化学成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量
质量分数/%	59.80	22.40	5.51	2.94	0.24	2.04	2.64	0.17	0.05	3.50

表 3 粉煤灰化学成分及物理性能  
Tab. 3 Chemical Composition and Physical Properties of Fly-ash %

w(CaO)	w(f-CaO)	w(SO <sub>3</sub> )	w(Cl <sup>-1</sup> )	碱含量	烧失量	细度	需水量比	含水量	强度活性指数
5.8	0.63	1.28	0.01	1.36	1.54	8.7	93	0.1	85

注:w(·)为各化学成分质量分数。

表 4 混凝土配合比  
Tab. 4 Mixing Proportions of Concrete

强度等级	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					28 d 抗压强度/MPa
	水泥	砂	轻骨料	水	I 级粉煤灰	
LC40	371	613	578	190	92	41.65

入搅拌机预拌后加入水泥拌合 0.5 min,加入水搅拌 2.5 min。

试验制备 100 mm×100 mm×400 mm 的小梁试件 15 个(断裂试验),根据温度等级分为 5 组,每组 3 个试件;制作边长为 100 mm 的立方体试件 30 个(立方体抗压强度试验和立方体劈裂抗拉强度试验)。小梁试件初始裂缝采用预埋钢片的方法预制,在混凝土浇筑之前,将 3 mm 厚的钢片用 G 型夹固定在模具上,待混凝土初凝后小心取出,避免对混凝土裂缝的尖端造成损伤,缝高比为 0.4。试件、钢片样式及固定形式见图 1。



图 1 试件制作  
Fig.1 Specimen Making

1.2 加热试验

将在标准条件下养护至 28 d 龄期的混凝土试件放置在干燥、通风的环境下约 7 d,让其自然晾干表面水分。在正式加热试验前将试件放入烘箱中设置 105 ℃持续加热 12 h 进行预热,预热完成后打开烘箱门自然冷却至常温,以免在加热时轻骨料混凝土试件出现高温爆裂现象。加热试验的设备为箱式电阻炉,将小梁试件及对应的立方体试件置于高温炉内分组进行加热,如图 2 所示。加热前对加热炉



图 2 试件加热  
Fig. 2 Specimen Heating

进行编程,使炉内温度实现自动控制。升温降温制度为:以 2 ℃·min<sup>-1</sup> 的速度上升到目标温度 T (100,200,300,400 ℃)后恒温 120 min,自动停止加热,打开炉门使其自然冷却至常温,未加热及冷却后的试件温度为 12 ℃左右。各组温度曲线如图 3 所示。试件在加热过程中注意不同温度时炉内气味及声音变化,加热完成后进行表观特征观察并记录,再进行后续试验。

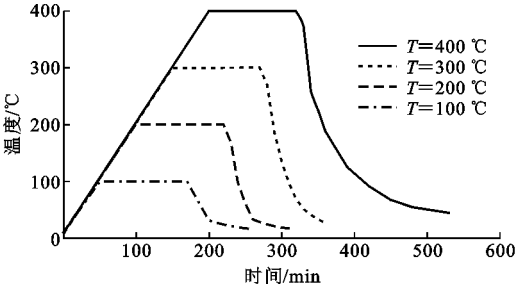


图 3 温度曲线  
Fig.3 Temperature Curves

1.3 三点弯曲断裂试验

三点弯曲梁断裂试验在 300 kN 的电液伺服万

能试验机上进行,试件两支座间的跨度为 300 mm,加载采用位移控制,持续加载速率为  $0.036\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,加载至最大荷载的 5% 时停止试验。采用量程为 50 kN 的荷载传感器测量荷载,夹式引伸计测量试件跨中挠度及裂缝开口位移;采用应变片法<sup>[17]</sup>确定起裂荷载,具体做法是在试件预制缝尖端两侧粘贴电阻应变片,将荷载-应变曲线回缩点对应的荷载作为起裂荷载。采用东华 16 通道 DH3817F 动态数据采集系统对荷载、跨中挠度、裂缝开口位移、应变进行同步采集,采集频率为 50 Hz。图 4 为三点弯曲断裂试验加载。

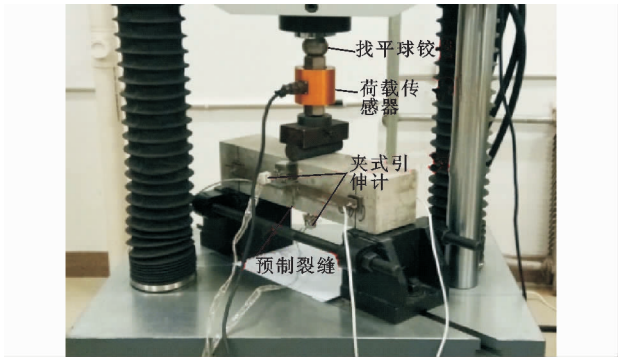


图 4 三点弯曲断裂试验

Fig. 4 Three-point Bending Fracture Test

## 2 试验结果与分析

### 2.1 高温及断裂试验后的表现特征

不同程度加热后轻骨料混凝土试件颜色呈现不同变化,100 ℃ 时表面基本无变化,呈青色;200 ℃ 时颜色变深,偏黄褐色,并且混凝土表面开始有细小裂纹产生;300 ℃ 时表面呈褐色且加热过程中伴有难闻气味;400 ℃ 时混凝土表面转为红褐色,表面裂纹程度加重。加热过程中混凝土试件均未出现爆裂现象,取出后观察试件无缺角。页岩轻骨料混凝土断裂的瞬间能听到清脆断裂的声音,且加热温度越高,声音越明显。通过观察图 5 断面的情况,可以发现 200 ℃ 前,断裂面较平滑,断面处的轻骨料全部断裂;随着温度继续升高到 300 ℃ 和 400 ℃ 时,可清晰看到部分骨料个体的边缘,也就是说砂浆和骨料黏结界面剥离增多,轻骨料自身的断裂减少。

### 2.2 高温后轻骨料混凝土基本性能

加热试验前后对试件进行称重,测量动弹性模量,并进行相应的立方体抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验和三点弯曲断裂试验。

图 6 为质量损失率  $W_T$  随加热温度  $T$  的变化曲线。由图 6 可知,经历不同加热温度后混凝土的质

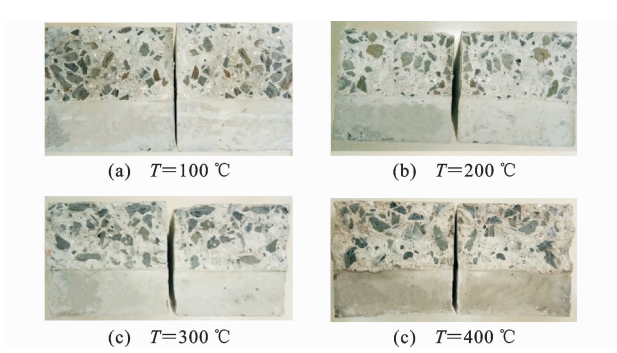


图 5 断裂后的试件断面对比

Fig. 5 Cross Section Comparison of Specimens After Fracture

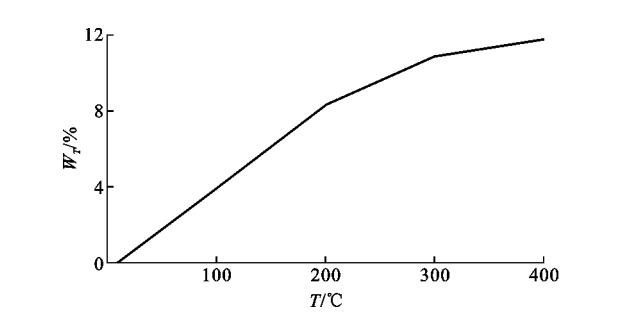


图 6 高温后质量损失率

Fig. 6 Mass Loss Ratio After High Temperature

量损失随温度的升高逐渐增大,温度小于 200 ℃ 时呈线性增加,但到 300 ℃ 时趋势明显变缓,说明经过高温后混凝土试件内部的大部分自由水已经散失。

图 7 为抗压强度  $f_{cu}$  和劈裂抗拉强度  $f_{ts}$  随温度的变化曲线。由图 7 可以看出:在 100 ℃ 时轻骨料混凝土抗压强度  $f_{cu}$  无明显变化,而后随温度升高逐渐增加,到 200 ℃ 时增至 44.02 MPa,较常温时增长 5.7%,其最大值应该出现在 200~300 ℃ 之间,继续加热后抗压强度呈下降趋势,400 ℃ 时降至 32.69 MPa,与常温时相比,降幅为 21.5%;劈裂抗拉强度  $f_{ts}$  随温度变化趋势与抗压强度相似,在 100 ℃ 时略微上升,200 ℃ 时增至 3.58 MPa,增长 29.7%,后随温度升高而下降,400 ℃ 时降至 2.61 MPa,相对常温时降幅为 5.4%,这是因为温度在 200 ℃ 以内时,随着温度的升高,水分的蒸发使结构更加密实,水泥水化程度提高,并未导致内部结构损伤,从而引起强度的提高,而超过 200 ℃ 时,水泥的水化产物开始脱水破坏,碳酸钙的含量增加,高温导致了混凝土内部损伤,出现强度降低现象,400 ℃ 时氢氧化钙开始分解成石灰和水蒸气,混凝土结构变得疏松,强度进一步降低。 $f_{ts}$  变化幅度较  $f_{cu}$  明显,且两者下降段均近似呈线性。

经过不同程度的高温后,立方体相对抗压强度

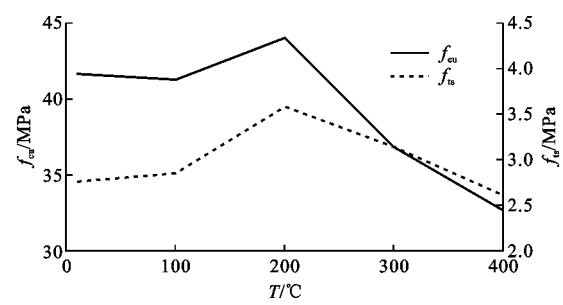


图 7 强度与温度的关系

Fig. 7 Relation Between Strength and Temperature

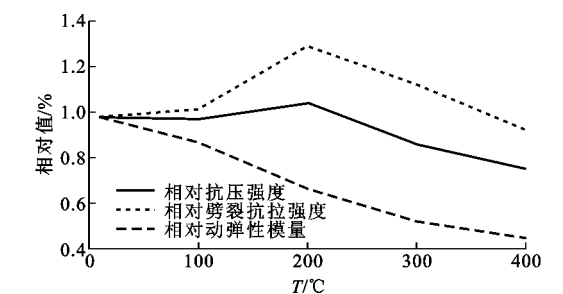


图 8 相对强度、动弹性模量与温度的关系

Fig. 8 Relation Between Relative Strength, Dynamic Elastic Modulus and Temperature

( $f_{cuT}/f_{cu}$ )、相对劈裂抗拉强度( $f_{tsT}/f_{ts}$ )和相对动弹性模量的变化见图 8。由图 8 可以看出,劈裂抗拉强度受温度影响比抗压强度显著,200 °C 时劈裂抗拉强度为常温时的 1.3 倍,300 °C 时抗压强度已明显表现为劣化趋势,而劈裂抗拉强度仍高于常温状态。随着温度升高,相对动弹性模量呈单调下降的趋势,400 °C 时仅为常温时的 49.5%,这是由于温度升高,混凝土内部水分蒸发使该部分变成孔隙,混凝土内部开始有裂隙出现,随之基振频率降低,而混凝土试块质量持续下降,因此动弹性模量呈持续减小的状态。

2.3 断裂性能分析

图 9 为不同温度下典型试件的荷载-跨中位移曲线。随着温度的升高,峰值荷载先增加,200 °C 时峰值荷载为几组试验温度中最高的,而对应的跨中位移向后推移,呈增加趋势,400 °C 时尤为明显;由

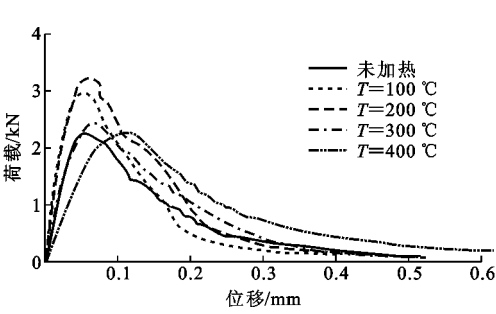


图 9 荷载-跨中位移曲线

Fig. 9 Load-mid-span Deflection Curves

于高温作用,使混凝土脆性降低,300 °C 及 400 °C 后荷载-跨中位移曲线的上升和下降段明显变缓,而且混凝土试件加载过程中下降段的耗时变长。

断裂韧度反映了混凝土阻止裂缝开裂的能力,是判别混凝土起始断裂和失稳断裂的重要参数。本文依据双 K 断裂准则<sup>[18]</sup>,通过《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)中的公式进行计算,确定高温冷却后混凝土的起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$ 、失稳韧度  $K_{IC}^{un}$ 。黏聚韧度  $K_{IC}^C$  是指混凝土内部各相黏聚力在虚拟裂缝内阻止裂缝扩展的能力,可以由起裂韧度和失稳韧度通过式(1)算出。断裂能  $G_F$  是指形成单位裂缝面积所需要的能量,由荷载-跨中位移曲线根据式(2)计算得到。

$$K_{IC}^C = K_{IC}^{un} - K_{IC}^{ini} \tag{1}$$

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_{max}}{(h - a_0)t} \tag{2}$$

式中: $W_0$  为荷载-跨中位移曲线与坐标轴围成的面积; $\delta_{max}$  为试验结束时的跨中峰值位移; $m$  为加热后试件支座中间的质量; $g$  为重力加速度; $a_0$  为初始裂缝高度; $t$  为试件厚度。

取上述断裂参数的有效计算结果,求得的平均值汇总于表 5。

断裂韧度  $K_{IC}$  随温度的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可见:轻骨料混凝土试件的断裂韧度起初随温度升高而增大,之后减小。200 °C 时起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$  比未加热时增加了 80.7%,而后缓慢下降,即使到

表 5 高温后断裂参数

Tab. 5 Fracture Parameters After High Temperature

温度 $T/^\circ\text{C}$	峰值荷载 $F_{\max}/\text{kN}$	开口位移 $S_{\text{CMOD}}/\text{mm}$	峰值荷载位移 $\delta/\text{mm}$	断裂能 $G_F/$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	起裂韧度 $K_{IC}^{ini}/$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	失稳韧度 $K_{IC}^{un}/$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	黏聚韧度 $K_{IC}^C/$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )
12	2.286	0.048	0.053	63.44	0.249	0.724	0.475
100	3.033	0.052	0.050	66.18	0.383	0.810	0.427
200	3.263	0.071	0.062	87.34	0.450	0.824	0.374
300	2.458	0.072	0.064	77.53	0.371	0.868	0.497
400	2.300	0.121	0.112	68.84	0.370	0.763	0.393

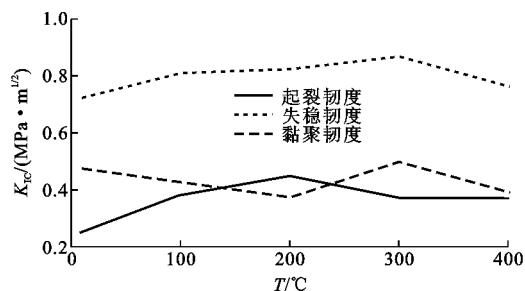


图10 断裂韧度与温度关系

Fig. 10 Relation Between Fracture Toughness and Temperature

400℃高温时,起裂韧度仍比未加热时要高出48.6%;失稳韧度 $K_{IC}^u$ 在300℃时增幅达到最大值19.9%,400℃时 $K_{IC}^u$ 高出未加热时的5.4%,但是失稳韧度的增加趋势明显滞后于起裂韧度。对于黏聚韧度 $K_{IC}^c$ ,由于其本身就是通过失稳韧度和起裂韧度差值得到,随加热温度变化规律与前两者存在关联性,本次试验中,呈现先下降、后上升、再降低的趋势。在试件受荷后,当荷载引起的裂缝尖端应力强度因子与黏聚力引起的裂纹尖端应力强度因子的差值达到起裂的临界曲线时,裂缝就稳定向前扩展,可以看出,300℃左右高温后裂缝尖端的黏聚力阻止裂缝扩展的能力最为显著。

图11为断裂能随温度的变化曲线。由图11可以看出,温度达到100℃前,断裂能略有上升,增幅仅有4%,可视为保持不变。温度在100~200℃时,断裂能迅速增长,增幅达到37.67%,一方面由于该温度使混凝土内部及预制裂缝附近产生大量细小的裂缝,在加载时这些微裂缝扩展路径更为曲折,需要消耗较多能量,因此测得的断裂能有所增大;另一方面,在此温度范围内混凝土强度有较大幅度提高,导致荷载-挠度曲线所包含的面积增加,故而断裂能增加。温度高于200℃后,由于裂缝数量增多、程度加深,且凝胶水和化学结合水开始少量分解,使混凝土阻止裂缝扩展的能力变差;虽然峰值荷载降低,但由于变形能力增加,荷载-位移曲线所包含的面积并未大幅度降低,经历400℃加热后轻骨料混凝土断裂能较未加热时稍高。

Zhang等<sup>[9]</sup>在研究高性能混凝土加热后的断裂特性时,其断裂能随加热温度的变化规律与本文轻骨料混凝土加热后断裂能变化类似,结合文献[9]的方法,对断裂能随温度变化上升段采用二次多项式拟合,下降段采用线性拟合,如式(3)所示

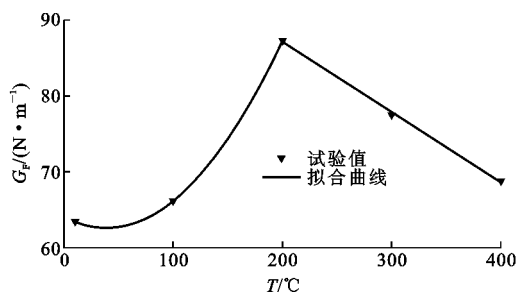


图11 断裂能与温度关系

Fig. 11 Relation Between  $G_F$  and Temperature

$$G_F = \begin{cases} 0.001T^2 - 0.074T + 64.089 & T \leq T_1 \quad R^2 = 0.9997 \\ -0.093T + 105.65 & T > T_1 \quad R^2 = 0.9988 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_1$ 为200℃。

由图11,式(3)可以看出,轻骨料断裂能随加热温度的增加呈现出先增加后下降的趋势,其反转点应该在200~300℃之间,上升段符合二次多项式变化,下降段符合线性变化规律,相关程度良好。

### 3 结 语

(1)页岩轻骨料混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度均随温度升高呈现出先升高后降低的趋势,峰值出现在200~300℃之间;动弹性模量随温度上升单调下降。

(2)页岩轻骨料混凝土荷载-挠度曲线的峰值荷载在200℃前升高,而后迅速下降,峰值荷载对应的挠度滞后,荷载-挠度曲线随温度升高而变缓。

(3)页岩轻骨料混凝土的 $K_{IC}^u$ 与 $K_{IC}^c$ 均表现为随温度升高先增大后减小,温度对 $K_{IC}^u$ 的影响要大于 $K_{IC}^u$ ;  $K_{IC}^c$ 呈现下降—上升—降低的趋势,300℃时裂缝尖端黏聚力阻止裂缝扩展的能力最为显著。

(4)高温后页岩轻骨料混凝土的断裂能随温度升高表现为基本不变—增大—减小3个阶段,400℃仍较常温时稍高,拐点发生在200~300℃之间,上升段为曲线,下降段近似线性。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 王建民,袁丽莉,汪能君,等.高温加热后轻骨料混凝土力学性能实验研究[J].自然灾害学报,2014,23(1):258-263.  
WANG Jian-min, YUAN Li-li, WANG Neng-jun, et al. Experimental Study on Mechanical Performance of Lightweight Aggregate Concrete After High Tem-



- perature Heating[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(1): 258-263.
- [2] 吴 熙, 江佳斐, 范兴朗, 等. 自密实轻骨料混凝土的高温性能[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(3): 313-317.
- WU Xi, JIANG Jia-fei, FAN Xing-lang, et al. Thermal Behavior of Self-compacting Lightweight Concrete Subjected to the Elevated Temperature[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2014, 32(3): 313-317.
- [3] 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 Rong-xin, HE Ke-cheng, MA Qian-min, 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.
- [4] 吴 熙, 付腾飞, 吴智敏. 自密实轻骨料混凝土的双 K 断裂参数和断裂能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(增 2): 249-254.
- WU Xi, FU Teng-fei, WU Zhi-min. Experimental Study on Double-K Fracture Parameters and Fracture Energy of Self-compacting Lightweight Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S2): 249-254.
- [5] 吴 熙, 范兴朗, 吴智敏. 自密实轻骨料混凝土断裂全过程分析[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 36-39, 44.
- WU Xi, FAN Xing-lang, WU Zhi-min. Analysis of Crack Propagation in Self-compacting Lightweight Concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 36-39, 44.
- [6] ABDEL-FATTAH H, HAMOUSH S A. Variation of the Fracture Toughness of Concrete with Temperature[J]. Construction and Building Materials, 1997, 11(2): 105-108.
- [7] BAKER G. The Effect of Exposure to Elevated Temperatures on the Fracture Energy of Plain Concrete[J]. Materials and Structures, 1996, 29(6): 383-388.
- [8] NIELSEN C V, BICANIC N. Residual Fracture Energy of High-performance and Normal Concrete Subject to High Temperatures[J]. Materials and Structures, 2003, 36(8): 515-521.
- [9] ZHANG B, BICANIC N. Fracture Energy of High-performance Concrete at High Temperatures Up to 450 °C: The Effects of Heating Temperatures and Testing Conditions (Hot and Cold)[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(5): 277-288.
- [10] WATANABE K, BANGI M R, HORIGUCHI T. Effect of Elevated Temperatures on Flexural Behaviour of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2010, 1(1): 17-27.
- [11] WATANABE K, BANGI M R, HORIGUCHI T. The Effect of Testing Conditions (Hot and Residual) on Fracture Toughness of Fiber Reinforced High-strength Concrete Subjected to High Temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 51: 6-13.
- [12] 陆洲导, 俞可权, 苏 磊, 等. 高温后混凝土断裂性能研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 836-840, 846.
- LU Zhou-dao, YU Ke-quan, SU Lei, et al. Residual Fracture Behaviors of Concrete Subjected to Elevated Temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 836-840, 846.
- [13] 商兴艳, 俞可权, 陆洲导. 高温后混凝土断裂能的确定[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(2): 589-595.
- SHANG Xing-yan, YU Ke-quan, LU Zhou-dao. Determination of Residual Fracture Energy of Concrete Subjected to Elevated Temperature[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(2): 589-595.
- [14] 俞可权, 陆洲导, 唐安静. 高温后混凝土断裂全过程的裂缝扩展阻力曲线[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(4): 588-594.
- YU Ke-quan, LU Zhou-dao, TANG An-jing. Residual Crack Extension Resistance During Complete Fracture Process of Post-fire Concrete[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(4): 588-594.
- [15] 闫 昕, 杜红秀, 金 鑫. 温度对 C40 高性能混凝土断裂能的影响[J]. 混凝土, 2016(6): 12-14.
- YAN Xin, DU Hong-xiu, JIN Xin. Effect of Temperature on Fracture Energy of C40 High Performance Concrete[J]. Concrete, 2016(6): 12-14.
- [16] JGJ 51—2002, 轻骨料混凝土技术规程[S].
- JGJ 51—2002, Technical Specification for Lightweight Aggregate Concrete[S].
- [17] 黄兴震. 混凝土断裂力学试验研究测量方法的对比分析[J]. 科学技术创新, 2017(26): 92-93.
- HUANG Xing-zhen. Comparison and Analysis on Test Methods for Fracture Mechanics of Concrete[J]. Scientific and Technological Innovation, 2017(26): 92-93.
- [18] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 32-38.
- XU Shi-lang, ZHAO Guo-fan. A Double-K Fracture Criterion for the Crack Propagation in Concrete Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(2): 32-38.