

地质聚合物混凝土动态劈裂拉伸破坏的吸能特性

许金余, 罗鑫, 吴菲, 白二雷, 高志刚

(空军工程大学机场建筑工程系, 陕西西安, 710038)

摘要 以矿渣、粉煤灰为原材料,以 NaOH(NH)、Na₂CO₃(NC)为碱激发剂,制备了 C30 高流态地质聚合物混凝土 GC,并采用经波形整形技术改进后的 Φ100 mm SHPB 试验装置开展了 GC 的动态劈裂拉伸试验,从入射能量平均变化率、能量的吸收、动态破坏形态间的内在关系入手分析了 GC 的吸能特性。结果表明:GC 的入射波、反射波和透射波能量及吸收的能量随入射能量平均变化率的增加而增大,但增大速率逐渐变缓,总体规律可用二次多项式关系来表示;随着入射能量平均变化率的增加,试件的破坏程度也越加严重,加载端的类似三角形的粉碎性区域的面积也越大,且试样与入射杆接触端面的粉碎区域要大于与透射杆接触端面的粉碎区域;GC 与普通硅酸盐水泥混凝土 OPCC 均存在入射能量变化率效应,但 OPCC 吸收的能量的增大速率随入射能量平均变化率的增加几乎保持不变,总体规律可由线性关系来表示。

关键词 地质聚合物;霍普金森压杆;动态劈裂拉伸试验;吸能特性;波形整形技术

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.020

中图分类号 O347; TU528.572 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0085-04

Energy Absorption Capacities of Geopolymer Concrete under Condition of Dynamic Splitting-tensile Damage

XU Jin-yu, LUO Xin, WU Fei, BAI Er-lei, GAO Zhi-gang

(Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Slag and fly ash are used in the fabrication of GC, and NaOH and Na₂CO₃ are used for slag and fly ash activation, then highly fluidized C30 Geopolymer Concrete (GC) is prepared. Φ100 mm SHPB apparatus is improved by using the pulse shaper technique, based on this, dynamic splitting-tensile tests are made, and the energy properties of GC under impact loading are analyzed. The results indicate that the incident pulse, reflected pulse, transmitted pulse energy and the energy absorption are increased with the rising of average incident pulse energy rate, but the increasing rate will gradually decay, the general law can be described as quadratic polynomial relationship. With the rising of average incident pulse energy rate, the damage level of specimen will be more serious and the comminuted area shaped like an triangle on the loading end will become larger, moreover, the comminuted area close to the incident bar is greater than that close to the reflected bar. GC and ordinary Portland cement concrete (OPCC) exhibit incident pulse energy rate dependency, but the increasing rate of energy absorption of OPCC almost keeps constant with the rising of average incident pulse energy rate, and the general law can be described as linear relationship.

Key words: geopolymer concrete (GC); split Hopkins pressure bar; dynamic splitting-tensile test; energy ab-

收稿日期:2012-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208507,51078350);陕西省自然科学基金资助项目(2011GM6014)

作者简介:许金余(1963-),男,吉林靖宇人,教授,博士生导师,主要从事结构工程、防护工程研究.

E-mail: jinyuxu@263.net

sorption capacities ; pulse shaping technique

碱激发胶凝材料^[1-2]由于其具备的优异性能和环保生态等独特特点而激发全球研究者极大的热情,碱矿渣水泥^[3]和粉煤灰地质聚合物^[4]是该新型胶凝材料中的重要分支,这两种材料存在各自的优势和不足,基于优势互补效应理念,有学者开展了矿渣粉煤灰地质聚合物^[5]的研究,实践表明,该复合胶凝材料具有更为优越的性能。目前相关研究主要集中在静态方面^[6],而对其动态力学性能研究较少,主要原因是加载量测设备制造复杂、试件加工困难、试验技术难度大^[7]。动态劈裂拉伸特性研究更少见,主要集中在强度、变形方面^[8]。对脆性材料而言,仅用这些参数来恒量材料的劈裂拉伸性能较单一,提供的有效信息较少。在动态作用下,能量吸收特性综合考虑了各力学参数,有效地反映混凝土类材料的特性。本文采用Φ100 mm SHPB 试验装置开展了地质聚合物混凝土(Geopolymer Concrete, GC)的动态劈裂拉伸试验,并基于此分析了GC的吸能特性。

1 动态劈裂拉伸试验

1.1 试验材料

GC原材料:水淬高炉矿渣:比表面积为491.6 m²/kg,28 d 活性指数≥95%;韩城第二发电厂生产的一级粉煤灰;NH,分析纯,片状,含量≥99.0%;NC,分析纯,粉状,含量≥99.8%;涇阳县石灰岩碎石(5~10 mm,占15%;10~20 mm,占85%);灞河中砂(细度模数为2.8);自来水。

配合比设计:C30高流态GC的配合比如下:水淬高炉矿渣304 kg,粉煤灰183 kg,NH为17 kg,NC为13 kg,石灰岩碎石583 kg,灞河中砂1 037 kg,水199 kg,密度2 335 kg/m³。

试件制备:按照“裹砂石法”的技术要求,将地质聚合物混凝土原材料按流程混合,搅拌均匀后装入试模成型,室温暴露24 h后拆模,立即进行标准养护($T=20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度RH>95%)。混凝土劈裂拉伸实验主要采用巴西方法^[9],试件加工处理为直径95 mm、厚度50 mm、中心角20°的平台巴西圆盘^[10]。

1.2 SHPB 试验技术

SHPB^[7]试验技术现已被广泛应用于混凝土、岩石、软材料及松散材料^[11]等多种材料动态力学性能的测试。冲击荷载试验主要是在空军工程大学建成的一套Φ100 mm SHPB 试验装置上进行的,主体

设备包括:发射装置、发射炮管、射弹、吸能装置、杆件及其调整支架、操纵台等;能源系统包括:空气压缩机、高压容器及管道;测试系统包括:弹速测试系统及动态应变测试系统。具体的试验原理与方法详见文献^[5]。

为保证试验的有效性,提高试验精度,运用波形整形技术^[5],将入射应力脉冲修正为上升段较平缓、波形较光滑的半正弦波,这有利于实现应力均匀和恒应变率加载,确保得到材料真实的响应特性。

2 试验结果及分析

2.1 吸能特性评价指标

为便于研究GC在动态劈裂状态下的吸能特性,定义 $W_i(t)$ 、 $W_r(t)$ 、 $W_t(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波能量:

$$\begin{cases} W_i(t) = EA c \int_0^t \dot{\epsilon}^2(t) dt \\ W_r(t) = EA c \int_0^t \dot{\epsilon}^2(t) dt \\ W_t(t) = EA c \int_0^t \dot{\epsilon}^2(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

定义入射能量平均变化率 $\dot{W}_i(t)$ ^[12], T 为入射波总历时,则有:

$$\dot{W}_i = W_{i\max} / T \quad (2)$$

根据能量守恒,可知动态劈裂试件吸收的能量 $W_s(t)$ 为:

$$W_s(t) = W_i(t) - W_r(t) - W_t(t) \quad (3)$$

分析GC动态劈裂试验的特点可知, $W_s(t)$ 主要与材料的损伤演化,即动态劈裂破坏直接相关。

2.2 能量变化时程曲线

根据定义式(1)~(2),可得到不同冲击状态下的GC典型的 $W_i(t)$ 、 $W_r(t)$ 、 $W_t(t)$ 和 $W_s(t)$ 时程曲线,见图1。

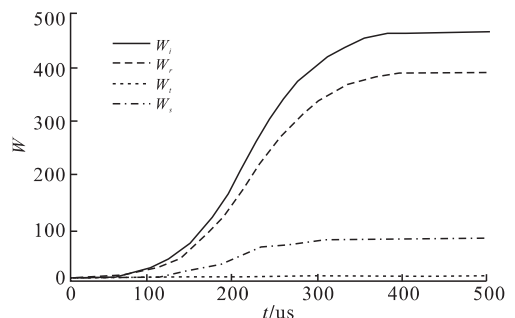


图1 GC的典型能量变化时程曲线

Fig.1 Typical time course curve of energy of GC

GC 试件在高速加载过程中,首先要经历一个压实挤密阶段,对应于作用初期 120 us 左右时间内,由图 1 分析可知,能量吸收量非常少;之后几乎是稳定的弹性阶段,大部分能量吸收发生该阶段,这表明,吸收的能量主要用在最初的裂纹形成,到裂纹的迅速发展,直至最后的断裂之间的损伤演化阶段;最后进入软化阶段,能量吸收量不再增加,表明试件

已完全破坏。

2.3 吸能特性分析

各能量变化时程曲线的最明显的特征为试件完全破坏时刻对应的能量,分别定义为 W_{imax} 、 W_{rmax} 、 W_{tmax} 和 W_{smax} ,分析这些能量参数随 \bar{W}_i 的变化规律,可有效地反映不同入射能量变化率状态下的能量特性。测试得到的相关数据处理结果见表 1。

表 1 测试数据的处理结果

Tab. 1 Processing result of testing date

试件编号	$\bar{W}_i / (\text{MJ} \cdot \text{s}^{-1})$	W_{imax} / J	W_{rmax} / J	W_{tmax} / J	W_{smax} / J
PL-1	0.171	98.13	67.82	2.41	27.90
PL-2	0.737	420.07	364.87	2.98	52.22
PL-3	1.021	628.91	564.74	3.14	61.03
PL-4	1.271	886.26	807.72	3.67	74.87
PL-5	1.514	1001.9	919.45	4.11	78.34
PL-6	1.552	1040.74	952.53	4.21	84.00
PL-7	1.929	1199.84	1104.21	4.85	90.78
PL-8	3.180	1530.27	1410.17	5.91	114.19

图 2 展示了 W_{imax} 、 W_{rmax} 、 W_{tmax} 、 W_{smax} 与 \bar{W}_i 的拟合关系。

由图 2 分析可知,在动态劈裂拉伸状态下,各能量参数均表现出了显著的入射能量变化率效应,即随 \bar{W}_i 的增加而增大,但增加速率逐渐变缓,总体规律可用二次多项式关系来表示。

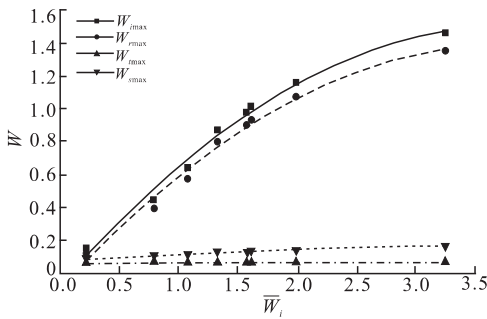


图 2 能量参数随 \bar{W}_i 变化规律

Fig. 2 The law between energy parameter and \bar{W}_i

$$W_{imax} = -121.05 \bar{W}_i^2 + 902.34 \bar{W}_i - 102.93, \quad R^2 = 0.990$$

$$W_{rmax} = -114.73 \bar{W}_i^2 + 851.13 \bar{W}_i - 124.14, \quad R^2 = 0.988$$

$$W_{tmax} = -0.071 \bar{W}_i^2 + 1.477 \bar{W}_i + 2.002, \quad R^2 = 0.976$$

$$W_{smax} = -6.249 \bar{W}_i^2 + 49.727 \bar{W}_i + 19.214, \quad R^2 = 0.995$$

GC 与 OPCC 的 W_{smax} 随 \bar{W}_i 的变化规律见图 3。

由图 3 分析可知,OPCC 与 GC 类似, W_{smax} 随 \bar{W}_i 的增加而增大,这反映了混凝土类材料的通性。但也存在一定的差异,即增加速率几乎保持不变,总体规律可由线性关系来表示。

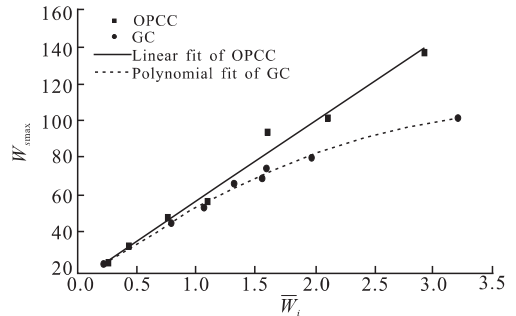


图 3 W_{smax} 随 \bar{W}_i 变化规律

Fig. 3 The law between W_{smax} and \bar{W}_i

图 4 展示了 GC 的动态破坏形态。

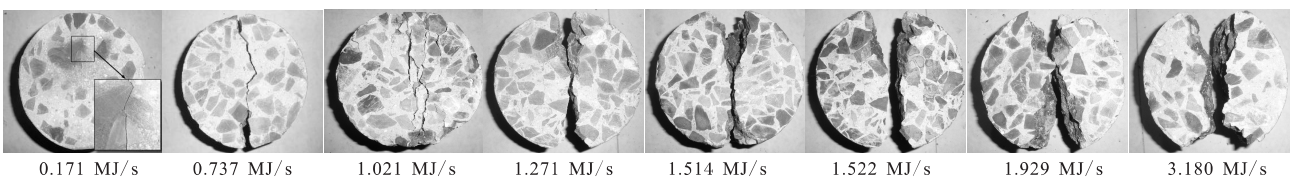


图 4 破坏形态

Fig. 4 Fracture morphology

从破坏程度方面分析可知,随着入射能量平均变化率的增加,试件的破坏程度也越加严重;而从破坏形式上来看,在 \bar{W}_i 很小时,动态拉伸作用达不到

破坏准则,试件未发生断裂,仅沿受压方向出现一条微小的拉伸裂纹;当 \bar{W}_i 较小时,试件断裂为较为完整的两部分,无局部破损,但随着 \bar{W}_i 的增大,试件

在加载端,即平台处出现类似三角形区域的粉碎情况,入射能量平均变化率越大,粉碎性区域的面积也越大,且试样与入射杆接触端面的粉碎区域要大于与透射杆接触端面的粉碎区域。

作用于 GC 试件的外部能量是产生混凝土内部裂纹发展直至宏观破坏的直接原因,裂纹的形成、繁衍、萌生、扩展和贯通与兼并,每一阶段都要从外部吸收能量,而且是不可逆的能量吸收过程。因此,从能量吸收的角度可以很好地解释动态劈裂拉伸破坏形态:在入射波携带的能量较低时,即 W_i 较小时,GC 吸收的能量仅够加载中心上区域的少数微裂缝演化,达不到宏观破碎水平,随着入射波携带的能量的增加,吸收的能量也随之增大,当增大到能使其他微裂缝发展并形成主裂纹时,试件发生径向断裂,并无局部破损,入射波携带的能量继续增加,GC 试件吸收的能量也越来越多,在主裂缝形成的同时,能使周围区域的微裂缝发展并参与到破坏过程中,导致形成类似三角形的粉碎性区域。

3 结语

本文采用经波形整形技术改进后的 $\Phi 100$ mm SHPB 试验装置开展了 GC 的动态劈裂拉伸试验,从入射能量平均变化率、能量的吸收、动态破坏形态间的内在关系入手分析了 GC 的吸能特性,并与 OPCC 进行了对比分析。主要结论如下:

1)在动态劈裂拉伸状态下,入射波、反射波和透射波能量及吸收的能量均表现出了显著的入射能量变化率效应,即随入射能量平均变化率的增加而增大,但增大速率逐渐变缓,总体规律可用二次多项式关系来表示。

2)随着入射能量平均变化率的增加,试件的破坏程度也愈加严重,加载端的类似三角形的粉碎性区域的面积也越大,且试样与入射杆接触端面的粉碎区域要大于与透射杆接触端面的粉碎区域。

3)GC 和 OPCC 均存在入射能量变化率效应,但 OPCC 吸收的能量的增大速率随入射能量平均变化率的增加几乎保持不变,总体规律可由线性关系来表示。

参考文献(References):

[1] Purdon A O. The action of alkalis on blast-furnace slag [J]. Journal of the society of chemical industry,

1940, 59: 191-202.

[2] Peter Duxson. The thermal evolution of metakaolin geopolymers: part 2-phase stability and structural development [J]. Journal of non-crystalline solids, 2007, 353(22-23): 2186-2200.

[3] Bakharev T, Sanjayan J G, Cheng Y B. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 211-216.

[4] Swanepoel J C, Strydom C A. Utilisation of fly ash in geopolymeric materia [J]. Applied geochemistry, 2002, 17: 1143-1148.

[5] 许金余, 李为民, 范飞林, 等. 地质聚合物混凝土的冲击力学性能研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 46-49.

XU Jinyu, LI Weimin, FAN Feilin, et al. Study on mechanical properties of geopolymeric concrete under impact loading [J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(1): 46-49. (in Chinese)

[6] Luo Xin, Xu Jinyu, Li Weimin, et al. Systematic study on the basic characteristics of alkali-activated slag-fly ash cementitious material system [J]. Construction & building materials, 2012, 29: 482-486.

[7] W M Li, J Y Xu. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar [J]. Materials science and engineering A, 2009, 513-514: 145-153.

[8] Malvar L Javier, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. ACI materials journal, 1998, 95(6): 735-739.

[9] Carneiro F. International association of testing and research laboratories for materials and structures [J]. RILEM bull, 1953, 13: 99-125.

[10] Wang Q Z, Xing L. Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disk specimen of rocks [J]. Eng fract mech, 1999, 64: 193-201.

[11] D J Frew, M J Forrestal, W Chen. Pulse Shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental mechanics, 2002, 42(1): 93-106.

[12] 巫绪涛, 代仁强. 钢纤维混凝土动态劈裂试验的能量耗散分析 [J]. 应用力学学报, 2009, 26(1): 151-154.

WU Xutao, DAI Renqiang. Energy dissipation analysis on dynamic splitting-tensile test of steel fiber reinforced concrete [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2009, 26(1): 151-154. (in Chinese)

(编辑:徐敏)