

粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土不同龄期动态力学性能

吕炎¹, 白二雷^{1*}, 王志航¹, 孙慧颖²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 中天西北建设集团有限公司, 西安, 710077)

摘要 为探究冲击荷载条件下粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的动态力学响应特征, 考察不同养护龄期和应变率对粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土动态力学特性的影响, 利用 $\Phi 100$ mm 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置分别对 3 d、7 d、28 d 龄期的粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土进行了不同应变速率下的冲击压缩试验。结果表明: 在各个龄期下, 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土均表现出显著的应变率敏感性, 动态抗压强度和比能量吸收随应变率的增加而增大, 其中动态抗压强度随应变率增加呈现指数函数增长趋势; 随着龄期的增长, 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的动态抗压强度和比能量吸收均增大, 应变率敏感性逐渐增强。在对比了多个应变率增长因子 (DIF) 计算公式之后, 提出了拟合程度更高的地聚物混凝土 DIF 计算模型, 在应变率基础上, 重点考虑养护龄期对动态强度增强效应的影响, 计算结果与试验值吻合效果良好, 可为粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的实际应用提供参考。

关键词 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土; 动态力学性能; 养护龄期; DIF 模型; 分离式霍普金森压杆

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.06.014

中图分类号 TU528.41 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)06-0099-08

Dynamic Mechanical Properties of Fly Ash-Slag Based Geopolymer Concrete at Different Ages

LYU Yan¹, BAI Erlei^{1*}, WANG Zhihang¹, SUN Huiying²

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Zhongtian Northwest Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710077, china)

Abstract In order to explore the dynamic mechanical response characteristics of fly ash-slag based geopolymer concrete under condition of impact loading circumstances, and the impacts of various curing ages and strain rates on the dynamic mechanical properties of fly ash-slag based geopolymer concrete, a $\Phi 100$ mm split Hopkinson pressure bar (SHPB) equipment is utilized for testing the impact compression with different strain rates conducted on fly ash-slag based geopolymer concrete at 3 d, 7 d, and 28 d respectively. The results show that the dynamic compressive strength and specific energy absorption increase with the increase of strain rate, and the dynamic compressive strength shows that an exponential increase with the increase of strain rate; with the increase of curing age, the dynamic compressive strength and specific energy absorption of fly ash-slag based geopolymer concrete increase, and at the same time, the strain rate sensitivity also demonstrates the age effect, i. e., the strain rate sensitivity increases gradually with the in-

收稿日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51908548, 52278287); 国家人民防空办公室立项课题(RF20SC01J-S0)

作者简介: 吕炎(1999—), 男, 陕西汉中, 硕士生, 研究方向为混凝土类材料动力学。E-mail: lvyaleo30@163.com

通信作者: 白二雷(1979—), 男, 河南焦作人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为建筑工程与防护工程。E-mail: bwxkgy@163.com

引用格式: 吕炎, 白二雷, 王志航, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土不同龄期动态力学性能[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(6): 99-106.
LYU Yan, BAI Erlei, WANG Zhihang, et al. Dynamic Mechanical Properties of Fly Ash-Slag Based Geopolymer Concrete at Different Ages[J].
Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(6): 99-106.

crease of age with the increased age improving the strength and impact strain resistance of concrete. After comparing several dynamic increase factor (DIF) calculation formulas, a better-fitting DIF calculation model for geo-polymer concrete is proposed, which focuses on the effect of curing age on the dynamic strength enhancement effect based on strain rate, and the calculated results further meet with the experimental values. The experimental results can provide the practical application of fly ash-slag based geo-polymer concrete for reference only.

Key words fly ash-slag based geo-polymer concrete; dynamic mechanical properties; curing age; DIF model; split Hopkinson pressure bar

地质聚合物(geopolymer,简称地聚物)这一概念最初由法国科学家 Davidovits 于 1978 年提出^[1],它是以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主要成分的硅铝质物质为原材料,在碱性激发剂的作用下,反应生成的一种具有非晶到半晶体的三维硅铝酸盐结构的新型胶凝材料,相比于水泥,具有材料来源广(粉煤灰、矿渣、高岭土等)、能耗低、污染小等优点^[2-4]。地聚物混凝土是以地聚物材料部分或全部替代水泥制成的一种新型混凝土,可以有效利用固体废弃物、减小污染且力学性能优异^[5],是近年来土木工程材料领域的一个研究热点。

由于生产地聚物的原材料种类繁多、矿物组成复杂,导致地聚物材料性能差异较大。单组分矿渣基地聚物是以矿渣为原料制备的胶凝材料,具有硬化快、强度高优点,但其收缩大、易开裂的缺陷限制了工程应用^[6]。而粉煤灰基地聚物活性低、聚合速度较慢,可与矿渣形成互补。针对广泛的应用需求,已有许多学者在粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的力学性能方面开展了研究。范飞林等^[7]以矿渣、粉煤灰为原材料,水玻璃和氢氧化钠作为碱性激发剂,研究室温下水灰比对矿渣-粉煤灰基地聚物的影响。试验结果显示,养护时间为 7 d 的矿渣-粉煤灰基地聚物抗压强度为 36.7 MPa,28 d 抗压强度达到 54.7 MPa,强度随着龄期的增加具有稳定增长的特性,只是增速变慢。Cheah 等^[8]选择两种工业副产物,高炉矿渣和粉煤灰进行混合试验,利用氢氧化钠和硅酸钠溶液作为激发剂,对其抗压强度、抗弯强度及动态弹性模量、超声波脉冲速度等进行分析。试验结果发现,粉煤灰掺量为 40%~80%时,矿渣-粉煤灰基地聚物的动态弹性模量、超声波脉冲速度及强度呈不断增加的趋势。Ismail 等^[9]使用部分粉煤灰替代矿渣,研究粉煤灰-矿渣基地聚物的力学强度、氯化物的渗透率及吸水率等。试验结果发现,使用 25%粉煤灰取代矿渣时,复掺条件下的地聚物强度最佳,强度可达 60 MPa。刘泽等^[10]讨论矿渣对以粉煤灰为主体材料的地聚物强度及孔隙率的影

响。试验结果显示,加入矿渣能降低粉煤灰基地聚物的孔隙率,并能有效提高单组分粉煤灰基地聚物的抗压强度,矿渣掺量为 30%时抗压强度最强、孔隙率最低且气孔均匀。上述研究主要集中于粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土静态力学性能,对于地聚物混凝土动态力学性能的研究相对较少且很少考虑动态作用下混凝土的龄期效应。值得关注的是,在混凝土结构设计时,通常只选用龄期 28 d 的混凝土强度值作为参考值,但在实际工程中,为加快施工进度,早龄期混凝土在养护期间不可避免受到外界冲击荷载影响,例如车辆行驶、矿井爆破、桥梁振动,与此同时,自然灾害(地震)、人为失误或事故(爆炸、撞击),以及近年来的袭击等突发事件,都会对新浇筑混凝土结构产生冲击扰动,影响材料性能,进而影响整个结构强度,所以需要冲击荷载作用下早龄期地聚物混凝土动态力学特性及其随龄期变化规律加以研究。

基于此,本文以粉煤灰-矿渣基地聚物为研究对象,使用 $\Phi 100$ mm 分离式霍普金森压杆装置对地聚物混凝土进行了不同应变速率下的冲击压缩试验,获得各组不同龄期的试件在不同应变率下的应力-应变曲线,并从动态抗压强度、动态增强因子及比能量吸收等指标入手,深入探究应变率与龄期对粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土动态力学性能的影响规律;同时,针对龄期对地聚物混凝土应变率增强效应的影响,构建了考虑龄期的 DIF 计算模型,以期对粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的实际应用提供理论支持和科学依据。

1 试验

1.1 原材料与试件制备

水淬高炉矿渣(比表面积 $491.6 \text{ m}^2/\text{kg}$,28 d 活性指数 $\geq 95\%$),矿渣经烘干、研磨后成为矿渣微粉;I 级粉煤灰,化学组成如表 1 所示;粗骨料:石灰岩碎石,粒径为 5~20 mm;细骨料:洁净中砂,细度模

数为 2.8;碱性激发剂由氢氧化钠、硅酸钠与水按一定比例混合制成,氢氧化钠为分析纯,纯度 $\geq 97\%$;硅酸钠采用液体硅酸钠, SiO_2 含量 $\geq 26.0\%$, Na_2O 含量 $\geq 8.2\%$,模数为 3.1;水为一般自来水。

配合比设计:粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土强度

及其发展,主要由 Si/Al 与碱激发剂决定。通过调整粉煤灰/矿渣、水胶比以及液体硅酸钠/NaOH 这 3 个因素,制备出了 28 d 立方体静态抗压强度为 44.1 MPa 的粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土,配合比如表 2 所示。

表 1 矿渣、粉煤灰的化学成分

氧化物	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	TiO_2	MgO	K_2O	P_2O_5	SO_3	其它	烧失量
矿渣	29.2	19.4	5.8	38.6	0.2	0.6	2.8	0.1	—	2.6	0.4	0.3
粉煤灰	45.8	21.4	12.6	13.7	1.1	0.2	1.3	1.8	0.1	1.9	—	0.1

表 2 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土配合比

单位: kg/m^3

矿渣	粉煤灰	中砂	石灰岩碎石	水	液体硅酸钠	NaOH
300	100	629	968	125	125	30

1.2 试验设备与方法

准静态力学性能试验采用电液伺服抗压试验机进行,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[11]进行。动态冲击压缩试验装置采用 $\Phi 100$ mm SHPB 试验装置,如图 1 所示,主要由发射装置、冲头、入射杆、反射杆、透射杆、能量吸收杆、数据采集系统组成。入射、反射、透射杆与冲头均由同种材料制成,材料参数如表 3 所示,其中:波速 $c \approx \sqrt{E/\rho}$ 。将应变片分别贴于入射、透射杆来测量入射、反射及透射应变。SHPB 试验的应力波传播原理如图 2 所示,高压气体驱动冲头撞击入射杆产生入射波 $\epsilon_i(t)$,当入射波传到混凝土表面时压缩试样,入射波一部分被反射成为反射波 $\epsilon_r(t)$ 传回入射杆,另一部分透过混凝土试样传入透射杆,透射波 $\epsilon_t(t)$ 最终由吸能装置耗尽。入射波和反射波由应变片 1 测得,透射波由应变片 2 测得, S 为应变片距试件端部的距离。

通过调整冲击气压大小,控制冲头的打击速度,获得粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土在 $10 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 范围内不同应变率。试验数据的处理采用三波法^[12],计算出试件的应力 σ_s 、应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 及应变 ϵ_s ,进而绘制动态应力-应变曲线,来研究粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土动态力学性能。



(b) 冲头与试件

图 1 $\Phi 100$ mm SHPB 试验装置

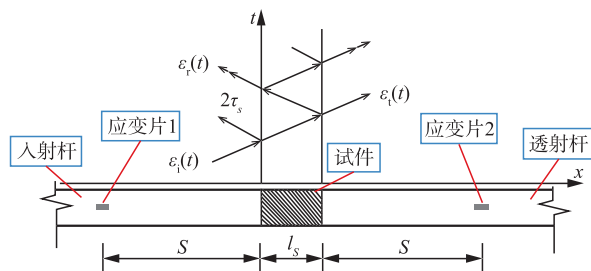


图 2 SHPB 试验过程中试件中的应力波传播

表 3 SHPB 材料参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	波速 $c/(\text{m}/\text{s})$	泊松比 ν
48CrMoA	7 850	210	5 172	0.25~0.30

2 结果与分析

2.1 试验结果

表 4 为龄期为 3 d、7 d、28 d 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的 SHPB 试验结果,其中:动态抗压强度 f_{cd} 为试件在动态压缩荷载作用下达到的峰值应力,反映材料在冲击荷载作用下的强度特性;动态增强因子(dynamic increase factor, DIF)为动态与准静态抗压强度之比,是反映材料在冲击荷载作用下



(a) 全貌

抗压强度提高程度的指标,表达式如下:

$$DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} \quad (1)$$

式中: f_{cd} 为动态抗压强度; f_{cs} 为准静态抗压强度。

比能量吸收(SEA),即单位体积吸收的能量,用来表征材料的能量吸收能力^[13],表示为:

$$SEA = \frac{AEc}{A_s l_s} \int_0^T [\epsilon_i(t)^2 - \epsilon_r(t)^2 - \epsilon_t(t)^2] dt \quad (2)$$

式中: E 为杆的杨氏模量; c 为杆中波速; A 、 A_s 分别为杆、试件的横截面积; l_s 为试件的初始厚度; ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 分别为杆中的入射、反射、透射应变; T 为试件完全破坏时刻。

表 4 SHPB 试验结果

试样编号	准静态抗压强度 f_{cs}/MPa	平均应变率 $\bar{\dot{\epsilon}}_s/s^{-1}$	动态抗压强度 f_{cd}/MPa	DIF	比能量吸收 $SEA/(\text{kJ}/\text{m}^3)$
3-1	14.3	38.6	13.9	0.97	40.7
3-2		41.2	15.2	1.06	30.4
3-3		57.4	17.0	1.19	74.9
3-4		69.3	18.1	1.27	80.9
3-5		76.7	18.4	1.29	103.5
3-6		98.1	20.0	1.40	98.3
3-7		116.0	21.7	1.52	144.0
7-1	22.4	34.0	17.8	0.70	37.7
7-2		44.3	23.2	0.92	36.3
7-3		54.6	24.3	0.96	71.6
7-4		68.3	27.8	1.10	78.9
7-5		79.0	28.3	1.12	91.9
7-6		83.6	30.1	1.19	132.0
7-7		96.1	32.4	1.28	146.8
28-1	44.1	37.7	40.9	0.93	90.0
28-2		42.1	53.7	1.22	135.7
28-3		52.0	54.4	1.23	298.1
28-4		66.5	64.2	1.46	412.7
28-5		77.1	66.3	1.50	530.0
28-6		83.5	71.1	1.61	618.8
28-7		101.6	78.9	1.79	786.9

2.2 应力-应变曲线

应力-应变曲线是显示应力随应变增加而变化的图表,它是混凝土材料在受荷作用下力学行为变化的直接反映。根据“三波法”整理得到如图 3 所示的不同龄期下粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的多应变率应力-应变(σ - ϵ)曲线图,分析可知:①各组试件的应力-应变曲线均由上升段和下降段组成且趋势较为相似,说明试验稳定性较好;在高速加载过程中,试件首先度过压实挤密阶段,然后进入准弹性阶段,直至达到峰值,而后进入软化阶段,残余强度逐

渐下降。②应力-应变曲线中,压实挤密阶段切线斜率逐渐升高,准弹性阶段斜率相近,到达峰值,进入软化阶段后,斜率逐渐降低;曲线下降段应变区间稍大于上升段应变区间,说明混凝土在破坏后仍具有一定的变形能力。③在同一龄期下,随着应变率的增加,地聚物混凝土的峰值应力、峰值应变不断增大,说明粉煤灰-矿渣基地聚物是一种应变率敏感性材料;随着养护龄期增大,试件峰值应力随养护龄期的增大而提高,这也符合混凝土强度随龄期的发展规律。

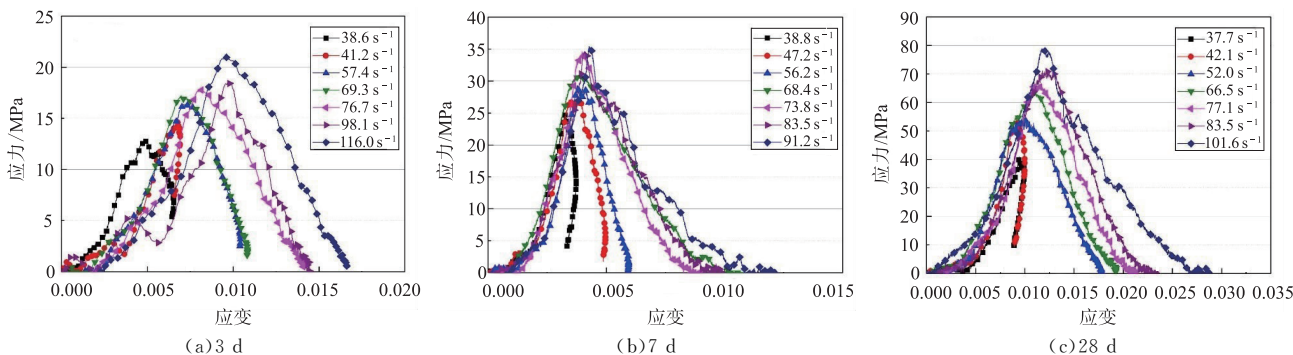


图 3 不同龄期地聚物混凝土的应力-应变曲线

2.3 动态力学性能

2.3.1 动态抗压强度

图 4 为粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土在龄期为 3 d、7 d、28 d 时的动态压缩强度随平均应变率变化规律。分析可知:在不同龄期下,地聚物混凝土的动态抗压强度均随着应变率的增加而增加,体现出良好的应变率效应;在应变率为 $30 \sim 120 \text{ s}^{-1}$ 范围内,随着龄期增大,应变率效应逐渐增强,动压强度随应变率增长幅度逐渐增大并且表现出前期增长缓慢、后期增长迅速的规律。当应变率约为 68 s^{-1} 时,7 d 时的动压强度相对于龄期为 3 d 的动压强度增长了 53.59%,而 28 d 相对于龄期为 7 d 的动压强度增长率为 130.93%。地聚物混凝土的动态抗压强度与应变率之间的变化类似指数增长趋势,所以运用幂指数函数 $\sigma_d = a\dot{\epsilon}^b$ [14] 进行拟合,得到动态抗压强度与平均应变率的关系,拟合效果良好。根据拟合结果可知,龄期为 3 d 的地聚物混凝土应变率指数 b 为 0.36,28 d 混凝土应变率指数 b 增长到 0.55,说明随着龄期的增大,混凝土动态抗压强度对应变率的敏感程度逐渐增大。

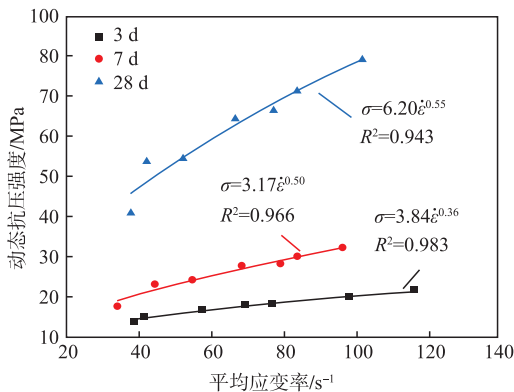


图 4 地聚物混凝土的动压强度

2.3.2 动态增强因子

为进一步分析不同龄期地聚物混凝土的动态强度与应变率之间的关系,采用动态增强因子(DIF)进行分析。图 5 为不同龄期地聚物混凝土动态增强因子随应变率变化的关系,分析可知:①在应变率 $30 \sim 120 \text{ s}^{-1}$ 范围内,每个龄期试件的 DIF 均随着平均应变率的增加而提高,表明材料动态增强效果明显。②应变率对动态抗压强度的提高存在一个阈值,当应变率低于阈值时,动态抗压强度低于准静态抗压强度,即 DIF 值小于 1,说明在低应变率下混凝土内部不能产生足够的微裂缝,无法耗散过多能量;但超过阈值之后,动态抗压强度增长明显,DIF 值增加。龄期为 3 d、28 d 时,试件应变率阈值为 40 s^{-1} 左右;龄期为 7 d 时,阈值为 60 s^{-1} 左右。③随着龄期的增大,地聚物混凝土动态强度增强效应有所变化,从图中可以发现,龄期为 7 d 的地聚物混凝土 DIF 值小于龄期为 3

d 的地聚物混凝土,这是因为在冲击荷载压缩过程中,低强度混凝土的应力波传播速度稍小,使得局部效应更加明显[15]。养护龄期达到 28 d 时,地聚物混凝土的 DIF 增大。当应变率约为 83 s^{-1} 时,龄期为 28 d 的地聚物混凝土的 DIF 为 1.61,约为 7 d 和 3 d 地聚物混凝土的 1.35 倍和 1.24 倍。这说明地聚物混凝土 DIF 较为复杂,需要进一步进行研究。

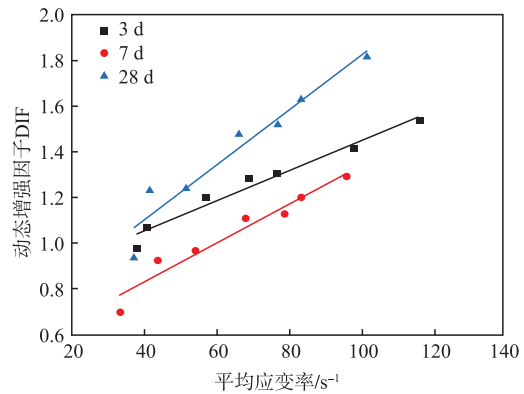


图 5 地聚物混凝土的动态强度增长因子

国内外许多学者及机构通过试验或数值计算方法对混凝土 DIF 进行了研究,并提出了各自的计算模型。欧洲混凝土协会(CEB)[16]考虑混凝土静态抗压强度对 DIF 的影响,提出了 CEB 模型,表达式如式(3)所示:

$$DIF = \begin{cases} 1 & \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_s \\ (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{ka} & \dot{\epsilon}_s < \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ \beta(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\dot{\epsilon} < 300 \text{ s}^{-1}$; $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变率,压缩情况下取 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; k 为常数,取 1.026; α 、 β 为常量, $\lg \beta = 6.16\alpha - 2$, $\alpha = 1 / (5 + 9\sigma_c / \sigma_{co})$; σ_{co} 为参考强度,取 10 MPa。

图 6 为不同龄期下粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土 DIF 按照 CEB 公式拟合结果和试验实测结果,对比后可以发现:CEB 模型拟合结果普遍大于实测值且差距较大,拟合效果较差。

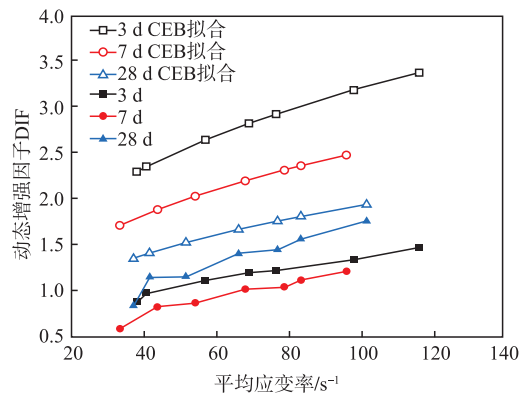


图 6 CEB 的 DIF 模型

此外,许多学者根据动态压缩试验,对 CEB 模型进行了改进,提出了自己的 DIF 计算模型。Ross 等^[17]利用 SHPB 设备进行了应变率为 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 区间内的试验,研究混凝土动态强度应变率强化效应,提出的 DIF 表达式如下:

$$DIF = \begin{cases} 0.009651 \lg \dot{\epsilon} + 1.058, & \dot{\epsilon} \leq 63.1 \text{ s}^{-1} \\ 0.7581 \lg \dot{\epsilon} - 0.289, & \dot{\epsilon} > 63.1 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

Grote 等^[18]学者利用霍普金森压杆,研究了水泥砂浆和类混凝土材料在不同应变率下动态力学性能,结合试验结果提出了以下模型:

$$DIF = \begin{cases} 0.02351 \lg \dot{\epsilon} + 1.07, & \dot{\epsilon} \leq 266.0 \text{ s}^{-1} \\ 0.882(\lg \dot{\epsilon})^3 - 4.4(\lg \dot{\epsilon})^2 - 2.64, & \dot{\epsilon} > 266.0 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

结合 Ross 和 Grote 的计算公式,对粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的 DIF 进行拟合,拟合结果与试验结果见图 7。对比拟合结果和试验实测结果后可以发现:Ross 和 Grote 模型的计算结果与试验实测数据吻合度较差,不符合实测值,曲线趋势较为平缓,未能很好反映应变率效应。通过前文分析可知,养护龄期对于地聚物混凝土动态力学性能影响较大,而以上模型均未考虑龄期对 DIF 的影响,所以导致吻合度较差。

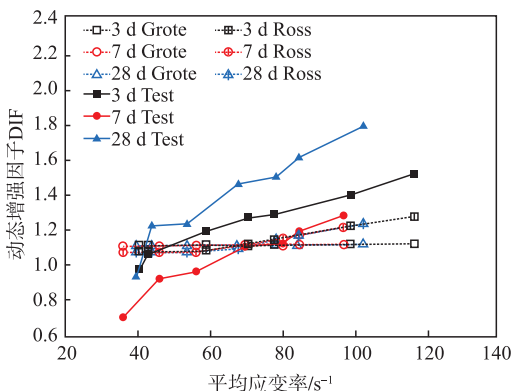


图 7 Ross 和 Grote 的 DIF 模型

试验研究表明,养护龄期对 DIF 的影响较大,为了使 DIF 的预测结果更加贴近试验结果,笔者结合本试验研究成果,构建了考虑养护龄期的 DIF 计算模型,该模型综合了养护龄期和应变率对动态强度增强效应的影响,模型关系式见式(6):

$$DIF = (A + BT)\dot{\epsilon} + T^{-0.2622} \quad (6)$$

式中: T 为混凝土的养护龄期,单位为 d; A 、 B 为参数值,由试验回归所得,见表 5。

表 5 DIF 模型参数值

参数	A	B
回归值	0.005 37	0.000 322

图 8 为考虑龄期 DIF 模型的计算结果与试验

数据值的比较。从图中可以看出,该模型的计算结果与试验结果吻合度较高。拟合程度可用决定系数 R^2 来判断, R^2 正常取值范围为 $0 \sim 1$, 越接近 1, 拟合度越好。一般认为 R^2 超过 0.8 的模型拟合度比较高。本模型 $R^2 = 0.9113$, 说明拟合效果较好, 能反映出应变率效应, 同时也体现出龄期对地聚物混凝土应变率增强效应的影响。

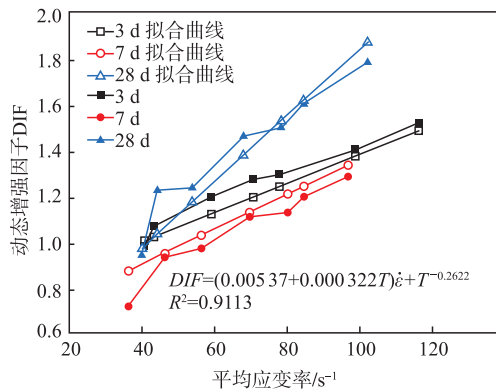


图 8 考虑养护龄期的 DIF 模型

2.3.3 比能量吸收

图 9 是龄期为 3 d、7 d、28 d 地聚物混凝土在动态下平均应变率与单位体积吸收能的关系。分析可知:地聚物混凝土在 $10 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的比能量吸收为 $30.4 \sim 786.9 \text{ kJ/m}^3$, 不同龄期的地聚物混凝土的单位体积吸收表现出显著的应变率效应, 随应变率的增加而提高, 这与大多研究者得到的结论一致^[14,19]。对每一龄期混凝土的比能量吸收进行线性拟合, 线性方程的斜率由龄期 3 d 的 1.287 增长到龄期 28 d 的 10.899, 这表明随着龄期增大, 比能量吸收随应变率增长速度加快, 率敏感性增强。养护龄期为 28 d 的地聚物混凝土比能量吸收增长斜率明显高于养护龄期为 3 d 和 7 d 的试件, 原因主要是龄期的增长提高了混凝土强度和抗冲击性能。

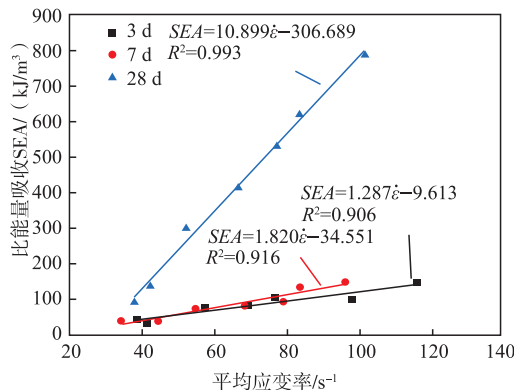


图 9 地聚物混凝土的比能量吸收

2.4 机理分析

整体来看,粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的动态抗压强度、吸能性能随应变率和养护龄期变化的规

律基本相同,均表现出明显的应变率效应,并且应变率效应会随着龄期增大而逐渐增强。本文将对应变率效应与龄期效应的机理进行理论阐述。

应变率效应主要由冲击荷载作用下材料的惯性作用引起^[15,20]。试验中由于地聚物混凝土试件尺寸较大,其受力点主要集中于试件中心部位,而试件边缘部位由于材料惯性作用,限制了中部的横向变形,对试件中部形成类似于围压作用,而材料边缘的约束作用随着应变率的增大而提高,因此进一步提高了材料的抗冲击力学性能,表现出应变率敏感性^[21]。另一方面,混凝土的破坏是裂缝的发育和发展过程,随着冲击速率的增大,冲击荷载作用时间相应缩短,导致试件内部裂缝的扩展存在滞后,因此进一步提高了其动态抗压强度。

地聚物混凝土动态抗压强度应变率敏感性随龄期增加而增大,其原因是:在龄期7d之前,混凝土强度较低且具有一定的粘弹性,受到冲击荷载作用后,进入压实挤密阶段,材料通过自身形变吸收了部分外界作用,宏观表现为动态抗压强度应变率敏感性不高^[21,22];随着养护龄期的增大,水化反应、火山灰反应完成程度更高,反应体系中形成较多的C-S-H凝胶、C-A-S-H凝胶、N-A-S-H凝胶等水化物,填充于孔洞或空隙中,使得地聚物混凝土结构更加密实^[23,24],从而提高了混凝土强度和抗冲击应变性能,进而导致应变率敏感性更加明显^[25]。

3 结论

1)混凝土养护龄期很大程度上影响了混凝土性能,同一龄期下,地聚物混凝土的动态抗压强度随应变率增加而增大,体现出明显的应变率效应;相近应变率下,地聚物混凝土的动态抗压强度随龄期增加而增大,呈现出先慢后快的增长趋势;不同龄期下,地聚物混凝土动态抗压强度对应变率的敏感程度逐渐增大,随着龄期增大,应变率效应逐渐增强。

2)地聚物混凝土强度增强效应受龄期影响较大,通过对比分析其他DIF计算模型,本文构建了考虑龄期的DIF计算模型,吻合程度较高,实现了对不同养护龄期地聚物混凝土DIF的预测分析。

3)在同一龄期下,地聚物混凝土的比能量吸收随着应变速率的增加而增大,表现出明显的率敏感性;在不同龄期下,地聚物混凝土的比能量吸收随着龄期的增加而增大,表现出更高的应变率敏感性。

参考文献

[1] DAVIDOVITS J. Geopolymers and Geopolymeric

Materials[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1989, 35(2): 429-441.

- [2] 郑毅,王爱国,刘开伟,等. 不同地聚物砂浆抗硫酸盐侵蚀性能及其机理分析[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6): 1224-1233.
- [3] SERHAN İ, AHMET Ö. Investigation of Mechanical Properties, High-Temperature Resistance and Microstructural Properties of Diatomite-Containing Geopolymer Mortars[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(6): 1-12.
- [4] LI F P, CHEN D F, LU Y Y, et al. Influence of Mixed Fibers on Fly Ash Based Geopolymer Resistance Against Freeze-Thaw Cycles [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, 584(10): 121517.
- [5] 原元,赵人达,占玉林,等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的抗碳化性能[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(6): 1275-1282.
- [6] 刘庆,臧浩宇,王俊祥,等. 矿渣基地聚物的制备及其性能研究综述 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(3): 43-49.
- [7] 范飞林,许金余,李为民,等. 矿渣-粉煤灰基地聚物混凝土的基本性能研究[J]. *混凝土*, 2008(6): 58-61.
- [8] CHEAH C B, SAMSUDIN M H, RAMLI M, et al. The Use of High Calcium Wood Ash in the Preparation of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Pulverized Fly Ash Geopolymers: A Complete Microstructural and Mechanical Characterization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156(10): 114-123.
- [9] ISMAIL I, BERNAL S A, PROVVIS J L, et al. Influence of Fly Ash on the Water and Chloride Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars and Concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48(11): 1187-1201.
- [10] 刘泽,周瑜,孔凡龙,等. 矿渣-粉煤灰基发泡地聚物的微观结构与性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(12): 12-15.
- [11] 国家质检总局. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [12] 宋力,胡时胜. SHPB数据处理中的二波法与三波法[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 368-373.
- [13] LU G, YU T X. Energy Absorption of Structures and Materials [M]. London: Woodhead Publishing, 2003:20-96.
- [14] 王世鸣,李夕兵,宫凤强,等. 静载和动载下不同龄期混凝土力学特性的试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 143-149.
- [15] 高光发. 混凝土材料动态压缩强度的应变率强化规律[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 261-270.

- [16] CEB. Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loading[R]. CEB Bulletin d'Information, vol. 187. Lausanne, France, Committee Euro-International du Beton, 1998.
- [17] TEDESCO J W, ROSS C A. Strain-Rate-Dependent Constitutive Equations for Concrete[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1998, 120(4): 398-405.
- [18] GROTE D L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic Behavior of Concrete at High Strain Rates and Pressures: I. Experimental Characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(9):869-886.
- [19] 黄仕超,彭刚,邹三兵,等. 不同龄期混凝土动态力学性能研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 129-133, 143.
- [20] 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): 46-50, 194.
- [21] 王世鸣. 冲击荷载下早龄期混凝土力学和损伤特性的试验研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [22] 刘鹏,余志武,陈令坤. 养护龄期对水泥混凝土性能和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 717-723.
- [23] 杨立荣,王春梅,封孝信,等. 粉煤灰/矿渣基地聚合物的制备及固化机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(7): 115-119.
- [24] 黄华,郭梦雪,张伟,等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土力学性能与微观结构[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3):74-84.
- [25] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates[J]. Materials and Structures, 1991, 24(6):425-450.

(编辑:杜娟)

(上接第 63 页)

- [22] DANELLJAN M, HAGER G, SHAHBAZ K F. Learning Spatially Regularized Correlation Filters for Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Santiago, Chile; IEEE, 2015: 4310-4318.
- [23] KIANI G H, FAGG A, LUCEY S. Learning Background-Aware Correlation Filters for Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, Italy; IEEE, 2017: 1135-1143.
- [24] DANELLJAN M, HAGER G, SHAHBAZ K F. Adaptive Decontamination of the Training Set: A Unified Formulation for Discriminative Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA; IEEE, 2016: 1430-1438.
- [25] LI B, YAN J, WU W. High Performance Visual Tracking with Siamese Region Proposal Network[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA; IEEE, 2018: 8971-8980.
- [26] DANELLJAN M, HAGER G, SHAHBAZ K F. Convolutional Features for Correlation Filter Based Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, [S.l.]; IEEE, 2015: 58-66.
- [27] DAI K, WANG D, LU H. Visual Tracking via Adaptive Spatially-Regularized Correlation Filters[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, USA; IEEE, 2019: 4670-4679.
- [28] LI F, TIAN C, ZUO W. Learning Spatial-Temporal Regularized Correlation Filters for Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA; IEEE, 2018: 4904-4913.
- [29] HUANG Z, FU C, LI Y. Learning Aberrance Repressed Correlation Filters for Real-Time UAV Tracking[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Seoul, Korea (South); IEEE, 2019: 2891-2900.

(编辑:徐楠楠)