

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



静动组合荷载下混凝土高温后的双轴动态力学性能

王志航¹, 许金余^{1,2}, 王腾蛟¹, 孟博旭¹, 刘高杰¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘要: 由于试验的复杂性, 高温后混凝土在复杂应力状态下的动态力学性能研究一直较少, 但在建筑物火灾和国防军事防护工程中, 混凝土结构多处于多轴应力和冲击荷载的共同作用下。为研究静动组合荷载下混凝土高温后双轴动态力学性能, 采用真三轴静、动力综合加载试验系统, 使用真三轴试验机预先施加双轴轴压, 再利用 SHPB 试验装置, 分别对常温(25 °C)和 200、400、600、800 °C 高温后混凝土试件施加冲击动载, 发现了双轴应力状态下混凝土在高温后的动态力学性能规律性。结果表明: 温度变化是影响高温后混凝土双轴动态力学性能的主要因素, 应变率变化是次要因素; 当温度大于 400 °C 时, 应力-应变关系曲线出现屈服平台, 混凝土韧性比低温时有显著提高。200 °C 是高温后混凝土双轴动态抗压强度的转折温度, 当温度继续升高时, 双轴动态抗压强度明显下降。

关键词: 混凝土; 高温; 静动组合荷载; 力学特性; 应变率

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)02-0094-08

Research on biaxial dynamic mechanical properties of concrete after high temperature under combined static and dynamic loads

WANG Zhihang¹, XU Jinyu^{1,2}, WANG Tengjiao¹, MENG Boxu¹, LIU Gaojie¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, P. R. China; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

Abstract: Due to the complexity of the experiment, the research on the dynamic mechanical properties of concrete under complex stress conditions after high temperature has been less, but in building fires and defense and military protection projects, concrete structures are mostly under the combined action of multiaxial stress and impact loads. In order to study the biaxial dynamic mechanical properties of concrete after high temperature under combined static and dynamic loads, a true triaxial static and dynamic comprehensive loading experimental system is used. A true triaxial test machine is used to apply biaxial axial pressure in advance, and the SHPB test device is used to apply dynamic load to concrete specimens after atmospheric temperature (25 °C) and 200, 400, 600, 800 °C high-temperature, respectively, finding the regularity of the dynamic mechanical properties of concrete under the biaxial stress state after high

收稿日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51208507, 51378497)

作者简介: 王志航(1996-), 男, 主要从事混凝土防护结构研究, E-mail: wangzhihangafeu@163.com.

许金余(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xujinyuafeu@163.com.

Received: 2019-12-23

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51208507, 51378497)

Author brief: WANG Zhihang (1996-), main research interest: concrete protective structure, E-mail: wangzhihangafeu@163.com.

XU Jinyu(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xujinyuafeu@163.com.

temperature. The test results show that: temperature change is the main influencing factor of the biaxial dynamic mechanical properties of concrete after high temperature, and strain rate change is the secondary factor; when the temperature is higher than 400 °C, the stress-strain relationship curve shows a yielding platform, and the concrete toughness is significantly improved than under low temperature. 200 °C is the transition temperature of biaxial dynamic compressive strength of concrete after high temperature. When the temperature continues to increase, the biaxial dynamic compressive strength decreases significantly.

Keywords: concrete; high temperature; combined static and dynamic loads; mechanical characteristics; strain rate

随着混凝土在工业与民用建筑、国防军事防护工程中的广泛使用,其在高温环境下由于力学性能和耐久性劣化,造成的工程结构安全性降低问题逐渐突出。在实际的建筑物火灾和核电站事故中,往往存在建筑内部的化学爆炸、建筑上部构件坍塌和喷水灭火等产生的冲击载荷,同时,很多混凝土结构处于多轴应力状态。另外,在国防工程防护中,混凝土结构也应考虑多轴应力和炸弹爆炸高温冲击的共同作用。在这些环境中,都必须考虑高温、多轴应力状态和冲击荷载耦合作用对混凝土的影响。

对混凝土在高温下的力学性能研究起步较早,从20世纪五六十年代就开始了大量研究^[1-3]。但从现有的资料来看,有关高温下混凝土力学性能的研究多为静态力学性能,动态力学性能研究较少,且主要集中在高温与动荷载耦合作用下的力学性能研究^[4-9],很少考虑初始静荷载的存在。复杂应力状态下混凝土动态力学性能的研究较多^[10-13],但相关高温与复杂应力状态共同作用下混凝土动态力学性能研究才刚刚起步。

鉴于此,笔者采用真三轴静、动力综合加载试验系统,对处于双轴压应力状态下的高温后混凝土进行冲击荷载试验,通过分析应力-应变关系曲线、双轴动态抗压强度、平均应变率、峰值应变与温度的关系,研究温度对混凝土双轴动态力学性能的影响,从而为建筑物火灾和核电站事故后的安全性分析、国防军事防护工程的设计提供理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

试验采用的P.O 42.5R级水泥由秦岭水泥有限公司生产,表1为其基本参数。粗骨料选用粒径5~20 mm的泾阳县石灰岩碎石,密度2.70 g/m³,堆积密度1 500 kg/m³,含泥量0.2%。细骨料采用灞河中砂,级配良好,细度模数2.78,密度2.63 g/m³,堆积密度1 620 kg/m³,含泥量1.1%。采用符合检测标准的自来水。减水剂选用FDN高效减水剂。表2为每立方米混凝土的配合比及性能指标。

表1 水泥的基本参数

Table 1 Basic parameters of cement

品牌	烧失量/%	三氧化硫含量/%	氧化镁含量/%	初凝时间/min	终凝时间/h	抗压强度/MPa
秦岭水泥	≤3.5	≤1.9~3.5	≤3.0	60	5	≥42.5

表2 混凝土配合比及性能指标

Table 2 Concrete mix ratio and performance index

水灰比	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	水/kg	减水剂/kg	抗压强度 f_k /MPa
0.43	318	677.17	1314.52	136.5	3.81	54.34

1.2 试验设备

加热设备采用BLMT型箱式高温电炉,如图1所示,加热原理为热传递方式,炉膛尺寸500 mm×

500 mm×500 mm,发热原件为硅碳棒,共8根,均匀安装在炉膛左右两面,最高升温1 000 °C,额定电压380 V,额定功率20 kW。采用真三轴静、动力综

合加载试验系统(如图 2 所示)对混凝土试件施加静动组合荷载,通过静力加载系统对高温后的混凝土试件施加双轴静荷载,然后通过动力加载系统对混凝土试件主轴方向施加冲击荷载。



图 1 高温加热系统

Fig. 1 High-temperature heating system

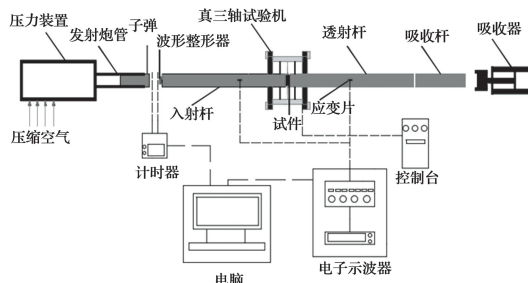


图 2 真三轴静、动力综合加载试验系统

Fig. 2 True triaxial static and dynamic comprehensive loading experimental system

真三轴静、动综合加载试验由洛阳腾阳机械科技有限公司与西安航空大学联合开发,主要由静力加载系统和动力加载系统两部分组成。静力加载系统为真三轴试验机,可以进行 3 个垂直方向的独立加载、卸载以及复杂路径的试验。动力加载系统基于 SHPB 理论^[14-16]设计,主体试验设备包括压力装置、撞击杆、入射杆、透射杆、吸收杆、操作台等部分。

在实际的军事防护工程建筑和工业民用建筑中,混凝土结构中梁、柱、板等基本构件相互连接、相互约

束,大多处于双轴或三轴应力状态。如简支梁的截面受到弯矩和剪力的作用,处于双轴应力状态。考虑冲击荷载的作用,试验采用的静动组合荷载的施加如图 3 所示, σ_1 、 σ_2 为双轴静荷载, $\sigma_{动}$ 为冲击荷载。

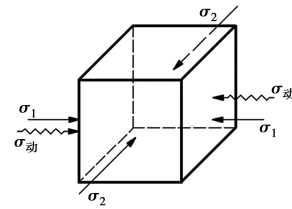


图 3 静动组合荷载的施加

Fig. 3 Application of combined static and dynamic loads

1.3 试件的制备

先将立方体钢模刷油以防止粘模具,再将根据表 2 配合比拌和的混凝土置入钢模中,然后在振动台上振动成型。试件室内放置 24 h 后拆模,对制备的试件进行标准养护,养护 28 d。试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 和 70 mm×70 mm×70 mm 的立方体。

试验采用 5 组温度,分别为常温(25 °C)、200、400、600、800 °C。每组 6 个混凝土试件,3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试件用于测量高温后的强度,3 个 70 mm×70 mm×70 mm 的立方体试件用于测量高温后双轴动态力学性能,试验结果取平均值。在对试件进行高温加热过程中,采取了降低含水率和温度梯度两个措施来降低混凝土产生爆裂的可能性。通过将试件放入 100 °C 的电炉箱内恒温 15 min 来降低含水率;通过调节电炉电压至 70 V(升温速率为 0.5 °C/s)来减小温度梯度。

将电炉箱清理干净后,关闭箱门,打开电源,调节温控器至 100 °C。加热完毕后,将标准试件置于电炉箱内,恒温 15 min 进行除湿。调节温控器,将试件加热到相对应的温度后,恒温 6 h,使试件物理化学反应更充分和达到稳定温度场。然后打开箱门,将试件取出,自然冷却,制成不同高温后的混凝土试件。试件加热过程中,有少量蒸汽从电阻炉内冒出,混凝土失水。高温后,试件整体性保持较好,800 °C 后有个别边角骨料脱落,可以看出存在许多小裂缝,但没有严重开裂。试件在高温前后的状态如图 4 所示。

1.4 试验方法

通过 HYY 型电液伺服加载试验系统测得混凝

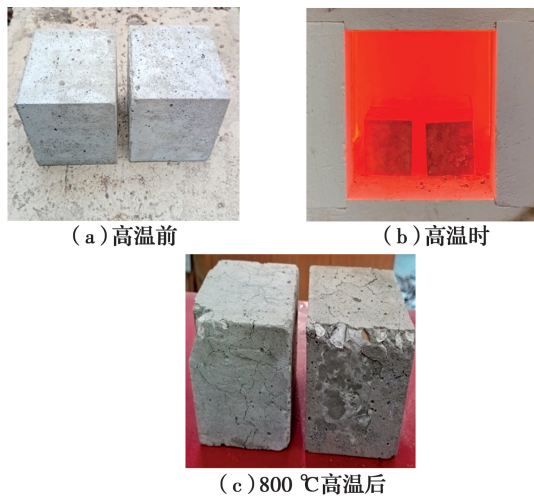


图 4 高温前后混凝土试件

Fig. 4 Concrete specimen before and after high temperature
 土高温后的强度,不同高温后的混凝土试件,其抗压强度明显下降。为防止试件未经历动荷载就破坏,对试件施加的双轴静载不能过大,定义轴压比与侧压比为轴向和侧向压力与对应高温后混凝土强度的比值。试验采用的轴压比:侧压比为0.4:0.4,将不同温度后的试件安装在真三轴试验机的加载板间,试件加载面与加载板之间增设减摩垫层。按 0.3~0.5 MPa/s 的加载速率在水平方向的 X 轴和 Y 轴

施加压荷载,直至预定荷载。再通过动力加载系统中的空气压缩机以 0.3 MPa 的压缩空气推动子弹,子弹以一定速率撞击入射杆,从而对试件水平方向的 X 轴施加动荷载,如图 5 所示。试验测得的数据如表 3 所示。试件高温后静态单轴抗压强度通过 $\sigma = \frac{F}{S}$ 计算得到。试件高温后双轴动态抗压强度 σ 通过三波法计算得到

$$\sigma(t) = \frac{E[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t + \tau_1) + \epsilon_t(t + \tau_2)]A}{2 A_s} \quad (1)$$

式中: E 为杆的杨氏弹性模量; A 、 A_s 分别为杆、试件的横截面积; ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 分别为杆中入射、反射、透射应变; τ_1 、 τ_2 分别为反射波、透射波相对于入射波的时间延迟。

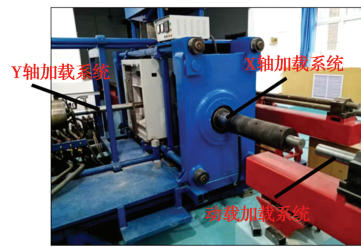


图 5 静动组合荷载的加载方法

Fig. 5 Loading method for combined static and dynamic loads

表 3 高温后静动组合荷载下混凝土试验结果

Table 3 Test results of concrete under combined static and dynamic loads after high temperature

温度/°C	试件	平均应变率/s ⁻¹	高温后双轴动态抗压强度/MPa	峰值应变/10 ⁻³	均值应变/10 ⁻³	高温后静态单轴抗压强度/MPa
25	1#	42.33	215.79	2.70	4.26	50.56
	2#	41.29	214.36	2.71	4.29	56.57
	3#	38.82	200.99	2.67	4.27	55.89
	平均值	40.81	210.38	2.69	4.27	54.34
200	1#	44.67	237.20	3.30	4.89	45.63
	2#	48.35	240.75	3.31	4.84	49.26
	3#	44.77	247.27	3.35	4.82	51.81
	平均值	45.93	241.74	3.32	4.85	48.90
400	1#	50.19	171.24	4.18	6.86	38.82
	2#	53.26	176.24	4.16	6.79	39.62
	3#	53.49	163.31	4.11	6.81	42.16
	平均值	52.31	170.26	4.15	6.82	40.20

续表 3

温度/℃	试件	平均应变率/s ⁻¹	高温后双轴动态抗压强度/MPa	峰值应变/10 ⁻³	均值应变/10 ⁻³	高温后静态单轴抗压强度/MPa
600	1#	59.87	98.64	4.92	8.04	34.83
	2#	55.36	101.68	4.92	8.02	32.25
	3#	58.26	100.58	4.93	7.98	22.59
	平均值	57.83	100.30	4.92	8.01	29.89
800	1#	82.86	70.82	5.60	9.93	17.24
	2#	80.63	74.56	5.64	9.94	15.93
	3#	74.84	70.72	5.66	9.99	15.73
	平均值	79.44	72.03	5.63	9.95	16.30

2 试验结果与分析

2.1 温度对混凝土应力-应变关系曲线的影响

利用“三波法”对采集到的数据进行处理,图 6 为相同轴压比:侧压比的静动组合荷载下混凝土高温后双轴动态抗压应力-应变关系曲线,为平均值曲线;图 7 为 200、800 °C 高温后混凝土试件双轴动态抗压应力-应变关系曲线。从图 6 可以看出,不同温度后,混凝土应力-应变关系曲线的形状大致相同,与常温下曲线相似。在 25 ~ 200 °C 范围内,曲线为单峰曲线,有明显的峰值,没有平台;但当温度在 400 ~ 800 °C 范围内,曲线出现明显的平台,而且峰后阶段较为平缓,没有发生迅速跌落,混凝土在较大的应变范围内保持强度。高温后静动组合荷载下,曲线的线性段比常温时有所下降,线性段下降的幅度与温度的大小直接相关,温度越大,线性段下降的幅度越大;经历高温作用后,混凝土的内部结构遭到破坏,混凝土变脆,弹性模量减小,温度软化作用明显。随着温度的升高,峰部先抬高后下降;当温度为 200 °C 时,峰部最高,峰值应力提高。

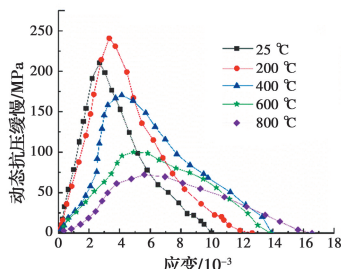


图 6 高温后混凝土的双轴动态抗压应力-应变关系曲线

Fig. 6 Biaxial dynamic compressive stress-strain curve of concrete after high temperature

混凝土是一种多相混合材料,且随外界环境条

件的变化而变化。温度作用下混凝土各种物理、化学变化等共同影响混凝土的双轴动态强度及变形特性。由图 6 可知,在一定条件下表现为温度的强化效应,在另外一些条件下表现为温度的弱化作用。温度作用下混凝土各种微缺陷的孕育、扩展和汇合,各种水分的转移、蒸发,各种矿物成分的分解、转化,共同影响着高温后混凝土的双轴动态力学性能。

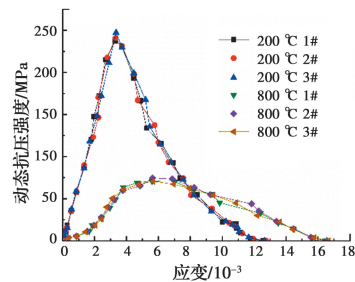


图 7 部分高温后混凝土试件的双轴动态抗压应力-应变关系曲线

Fig. 7 Biaxial dynamic compressive stress-strain curve of concrete specimens after partial high temperature

同时,混凝土材料在静动组合荷载下的动态行为与静力作用下的力学行为最显著的区别是混凝土力学特性的应变率敏感性。当温度升高时,峰值应力和峰值应变时的应变率敏感性增强,在图 6 应力-应变关系曲线上表现为峰部出现平台,峰后曲线下降变缓。

2.2 温度对混凝土双轴动态抗压强度的影响

高温后混凝土的抗压强度、双轴动态抗压强度随温度的变化规律如图 8 所示,图 8 为平均值曲线。由图 8 可见,随温度的升高,混凝土抗压强度呈现逐渐降低的趋势。当温度为 200、400、600、800 °C 时,强度普遍低于常温时的强度,与常温相比,降幅分别为 10.01%、26.02%、44.99%、70.00%。在经历 800 °C 高温后,混凝土的抗压强度仅为 16.3 MPa。

从混凝土抗压强度与温度的拟合曲线可以看出,两者之间有良好的线性关系。对于混凝土的双轴动态抗压强度而言,在 25~400 °C 存在其抗压强度变化的转折点。当温度在 200 °C 时,增幅为 14.91%,双轴动态抗压强度达到 210.38 MPa;在温度为 400~600 °C 时,双轴动态抗压强度迅速下降。当温度为 400、600 °C 时,与常温相比,双轴动态抗压强度降幅分别为 19.07%、52.32%。在经历 800 °C 高温后,双轴动态抗压强度为 72.03 MPa,与 25 °C 相比,强度下降 65.76% 左右。温度对混凝土的双轴动态抗压强度既有强化作用,又有弱化作用,存在一个界限值。

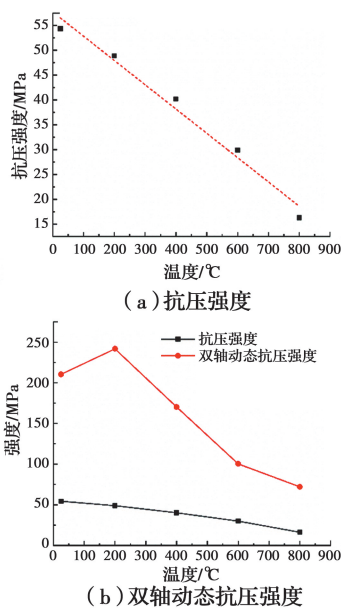


图8 高温后混凝土抗压强度、双轴动态抗压强度与温度的变化曲线

Fig. 8 Curves of concrete compressive strength, biaxial dynamic compressive strength and temperature after high temperature

混凝土在高温前后的双轴动态抗压强度差异是由于各个高温等级所导致的微观结构不同而引起。当温度不是很高时,由于粗骨料和水泥石的热工性能差异,温度升高,粗骨料和水泥石受热膨胀,会填充一部分原生裂缝,使得裂缝数量减少,同时,双轴静载的轴压作用也在一定程度上限制了裂缝的发育,从而使得混凝土内部结构孔隙率下降。除此之外,混凝土内部吸附的水分发生迁移,水泥凝胶体颗粒间表面张力增大,这在一定程度上会导致混凝土的承载力增强,从而使其双轴动态抗压强度变大。但当温度继续升高时,水泥凝胶体开始脱水,C—S—H的层间水蒸发以及C—S—H、氢氧化钙分解而失水,粗骨料和水泥石等脆性材料性质弱化,过渡

区性能进一步降低,导致混凝土结构损伤加重。同时,由于粗骨料和水泥石的线膨胀系数差异,温度升高,差异变大,导致新裂缝的产生和原生裂缝的发育,从而使混凝土的双轴动态抗压强度等发生显著的劣化。

从混凝土材料应变率敏感性考虑,混凝土双轴动态抗压强度的提高可以从两方面分析:一方面,在冲击荷载作用下,混凝土材料在中高应变率状态下发生显著改变,但由于试件尺寸较大,中心部位因为惯性效应的作用,侧向发生变形受到约束,产生了环箍效应,类似围压作用的存在,在一定程度上提高了混凝土的双轴动态抗压强度。另一方面,混凝土微裂缝的产生与发展过程本质上都是一个消耗能量的过程,新裂缝产生与原生裂缝的发展度需要从外部吸收能量;但由于冲击荷载应变率较高,作用时间极短,混凝土没有足够的时间去集聚能量,根据冲量定理,只有通过提高应力的方式来抵消外部的冲量,这在一定的程度上也提高了混凝土的双轴动态抗压强度,表现为图8中曲线先上升。

就双轴动态抗压强度随温度的整体变化趋势来看,温度变化对高温后混凝土的双轴动态抗压强度起主导作用,应变率变化只起部分作用。

2.3 温度对混凝土平均应变率的影响

试件破坏前应变率时程曲线上应变率值上下振荡相对较稳定,即近似恒应变加载阶段,取该阶段的均值为平均应变率。如图9所示,取22 ms后较稳定的阶段平均值为平均应变率。平均应变率是表征混凝土应变速率的一种度量,是反映混凝土变形性能的重要指标。高温后混凝土在静动组合荷载下平均应变率的变化规律如图10所示,图10为平均值曲线。由图10可以看出,在高温和静动组合荷载耦合作用下,混凝土的平均应变率都达到了中高应变率区($10^1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$)。整体上,在同一冲击速率下,混凝土的平均应变率表现出显著的温度效应,常温时平均应变率最小,随着温度升高,平均应变率有逐渐增大的趋势,说明高温环境下混凝土抵抗变形的能力减弱。平均应变率随着温度的升高,增加得越来越快,当温度达到800 °C时,平均应变率为 79.44 s^{-1} ,与25 °C相比,增幅达到94.66%。高温作用后混凝土内部裂缝增多,混凝土发生劣化,性能降低。通过建立平均应变率与温度的定量关系,发现温度会对平均应变率产生直接的影响。当温度升高时,在图10上表现为平均应变率增大。温度升高,混凝土劣化变脆,平均应变率增大。

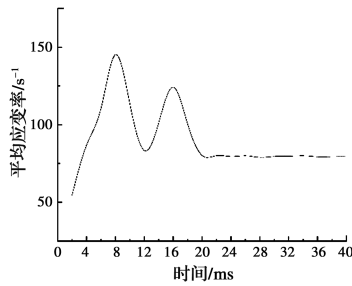


图 9 800 °C 高温后混凝土应变率时程曲线

Fig. 9 Time history curve of concrete strain rate after 800 °C high temperature

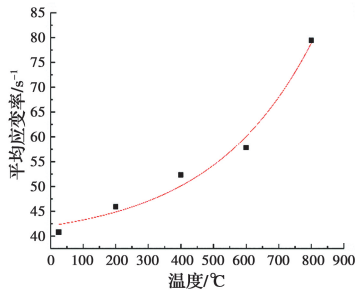


图 10 高温后混凝土平均应变率与温度的变化曲线

Fig. 10 Curve of average strain rate and temperature of concrete after high temperature

2.4 温度对混凝土应变的影响

峰值应变是峰值应力对应的应变。均值应变取的是应力-应变关系曲线所围面积与峰值应力的比值。峰值应变相对值是高温后混凝土的峰值应变与 25 °C 时峰值应变的比值。高温后混凝土的峰值应变、峰值应变的相对值以及均值应变随温度的变化规律如图 11 所示,图 11 为平均值曲线。从图中可以看出,高温加热处理对混凝土在静动组合荷载下的峰值应变有明显影响,随着温度的升高,峰值应变近似线性增大。经历 200、400、600 °C 高温处理后,峰值应变的增幅达到 23.43%、54.28%、82.90%;且在经历 800 °C 高温处理后,峰值应变达到 0.56%,增幅一倍多,为 109.29%。均值应变也随温度的升高而增大,且在经历 800 °C 高温处理后,增幅达到 133.21%。高温加热处理会导致混凝土试件中部分水分的丢失以及颗粒之间间距增大,进而引起材料形变的增加。高温后混凝土材料的峰值应变和均值应变都表现出应变率敏感性。反映在图 11 上为峰值应变和均值应变增大。

3 结论

利用真三轴静、动力综合加载试验系统对常温 (25 °C) 和 200、400、600、800 °C 高温后混凝土试件

预先施加双轴静荷载,然后再对 X 轴施加动荷载,从应力-应变关系曲线、双轴动态抗压强度、平均应变率以及应变等 4 个方面综合分析了温度对混凝土双轴动态力学性能的影响。

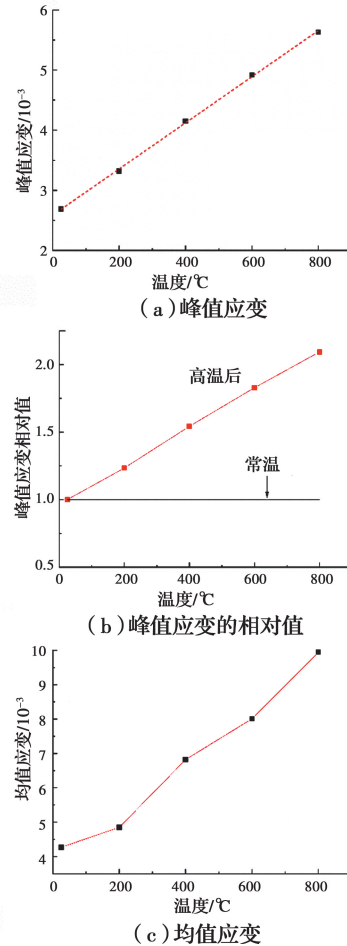


图 11 高温后混凝土峰值应变、峰值应变的相对值以及均值应变与温度的变化曲线

Fig. 11 Curve of peak strain, relative value of peak strain, and mean strain and temperature after high temperature

1) 温度变化是影响高温后混凝土双轴动态力学性能的主要因素,应变率变化是次要因素。温度对混凝土双轴动态抗压强度的影响较为复杂,强化和弱化交织在一起;在 25~200 °C 之间,温度主要表现出强化效应;随着温度的继续升高,300 °C 之后,温度弱化效应明显,占主导地位。

2) 温度作用下,物理、化学变化共同影响混凝土的强度和变形性能。混凝土在经历 400 °C 高温后,仍表现出良好的抗冲击韧性。

3) 与常温相比,静动组合荷载下,混凝土高温后的峰值应力和均值应变依然表现出了应变率敏感性。

参考文献:

- [1] 陈宗平,王欢欢,陈宇良. 高温后混凝土的力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2015(1): 13-17.
CHEN Z P, WANG H H, CHEN Y L. Test study on mechanical properties of concrete after a fire high temperature [J]. Concrete, 2015 (1): 13-17. (in Chinese)
- [2] 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 G F, YANG J, SHI Y X. 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)
- [3] KHOURY G A. Effect of fire on concrete and concrete structures [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000, 2(4): 429-447.
- [4] 李志武,许金余,戴双田,等. 高温下混凝土冲击加载试验研究[J]. 高压物理学报, 2013, 27(3): 417-422.
LI Z W, XU J Y, DAI S T, et al. Experimental study on concrete exposed to high temperature under impact loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(3): 417-422. (in Chinese)
- [5] JIA B, LI Z L, YAO H C, et al. SHPB test on dynamical mechanical behavior of concrete with high temperature [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 760-763.
- [6] 刘传雄,李玉龙,吴子燕,等. 混凝土材料的动态压缩破坏机理及本构关系[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 1-5.
LIU C X, LI Y L, WU Z Y, et al. Failure mechanism and constitutive model of a concrete material under dynamic compressive loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 1-5. (in Chinese)
- [7] 余江滔. 火灾后混凝土构件损伤评估的试验及理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
YU J T. Experimental and theoretical research on damage assessment of reinforced concrete member after fire [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [8] 李波,葛宇,张研,等. 高温作用后混凝土动态性能研究进展[J]. 混凝土, 2015(1): 35-37, 44.
LI B, GE Y, ZHANG Y, et al. Research progress on high temperature dynamic performance of concrete [J]. Concrete, 2015(1): 35-37, 44. (in Chinese)
- [9] 李海波,赵坚,李俊如,等. 三轴情况下花岗岩动力学特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 470-474.
LI H B, ZHAO J, LI J R, et al. Triaxial compression tests of a granite [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 470-474. (in Chinese)
- [10] 胡时胜,王礼立,宋力,等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(6): 641-657.
HU S S, WANG L L, SONG L, et al. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(6): 641-657. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 李萌. 静动组合荷载下混凝土多轴动态强度研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
LI M. Dynamic multiaxial strength of concrete under static-dynamic coupled loading [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 徐松林,王鹏飞,赵坚,等. 基于三维 Hopkinson 杆的混凝土动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 180-185.
XU S L, WANG P F, ZHAO J, et al. Dynamic behavior of concrete under static triaxial loading using 3D-Hopkinson bar [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2): 180-185. (in Chinese)
- [14] 郭瑞奇,任辉启,张磊,等. 分离式大直径 Hopkinson 杆实验技术研究进展[J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1518-1536.
GUO R Q, REN H Q, ZHANG L, et al. Research progress of large-diameter split Hopkinson bar experimental technique [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(7): 1518-1536. (in Chinese)
- [15] 方秦,洪建,张锦华,等. 混凝土类材料 SHPB 实验若干问题探讨[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 1-14, 26.
FANG Q, HONG J, ZHANG J H, et al. Issues of SHPB test on concrete-like material [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 1-14, 26. (in Chinese)
- [16] 宫凤强,李夕兵,叶洲元. 三轴 SHPB 岩石材料动力学特性试验研究的现状和发展趋势[J]. 科技导报, 2009, 27(18): 106-111.
GONG F Q, LI X B, YE Z Y. Experimental research progress of dynamic characteristics for rock materials on triaxial SHPB apparatus [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(18): 106-111. (in Chinese)