

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0401

混凝土高温动态劈拉行为细观数值分析*

金 浏, 郝慧敏, 张仁波, 杜修力

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为研究高温作用下混凝土的动态劈裂拉伸破坏行为, 考虑了力学性能的高温退化与应变率增强效应的联合作用, 结合混凝土材料内部非均质性, 建立了细观尺度数值分析模型与方法。将该数值方法分为两个步骤: 首先对混凝土进行热传导行为模拟, 进而将输出结果作为初始条件对混凝土动态劈裂拉伸行为进行细观模拟。在模拟结果与已有试验现象良好吻合的基础上, 分析了高温下混凝土动态劈裂拉伸行为及其细观破坏机制, 对比了不同应变率及加热温度下混凝土的劈裂拉伸应力-应变关系, 揭示了混凝土应变率效应与温度退化效应的相互影响规律。研究结果表明: (1) 高温作用后, 试件损伤区域较常温下更集中; (2) 名义应变率较大时, 破坏过程急促, 常温下骨料发生破坏, 而经历高温后骨料基本没有破坏; (3) 由于混凝土试件细观结构的非均质性, 其内部应力呈枣核状不连续分布; (4) 相比于应变率效应, 混凝土劈裂拉伸强度受温度退化作用的影响更显著。

关键词: 混凝土; 高温; 动态劈拉; 应变率效应; 细观尺度

中图分类号: O383; TU528.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Meso-scale simulations on dynamic splitting tensile behaviors of concrete at elevated temperatures

JIN Liu, HAO Huimin, ZHANG Renbo, DU Xiuli

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the dynamic splitting tensile fracture behaviors of concrete at elevated temperatures, the numerical meso-scale model and method are established by considering the coupling effects of the high temperature degradation and strain rate enhancement of the mechanical properties, and combining with the internal heterogeneities of concrete materials. The simulation method is divided into two steps: the heat conduction behavior is first simulated, then the output results are used as the initial conditions to simulate the dynamic splitting tensile behaviors of the concrete. Based on the good agreement between the numerical simulation results and the experimental phenomenon, the dynamic splitting tensile behaviors and meso-scale failure mechanism of the concrete at elevated temperature are analyzed, the splitting tensile stress-strain relations of the concrete at different strain rates and high temperatures are compared, and the interacting regulation between the temperature degradation and the strain rate effect of concrete is revealed. The results prove that: (1) after high temperature, the damage area in the concrete is more concentrated; (2) the destructed process becomes more rapid as the nominal strain rate is higher, the aggregation is destroyed at room temperature; (3) the internal stress appears date-shaped distributions due to the heterogeneities of the concrete microstructures; (4) the temperature degradation effects on the splitting tensile strength of the concrete is more dramatic comparing with the strain rate effects.

Keywords: concrete; high temperature; dynamic splitting tensile; strain rate effect; meso-scale

* 收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2019-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(51822801); 国家重点研发项目(2018YFC1504302)

第一作者: 金 浏(1985—), 男, 博士, 教授, kinglew2007@163.com

通信作者: 杜修力(1962—), 男, 博士, 教授, duxili@bjut.edu.cn

混凝土作为土木工程结构中最常用的建筑材料,其复杂的受力形式及力学性能对结构安全有着决定性作用。在城市环境内,火灾通常伴随偶然性爆炸同时发生,从而对建筑结构造成更严重的损伤和破坏^[1]。经历高温后的混凝土承载能力缓慢下降,发生不同程度的损伤劣化;在爆炸冲击等高应变率荷载作用下混凝土材料内部发生一系列变化,甚至可能发生脆性破坏,与静态荷载作用下相比,其应力-应变关系更为复杂,强度等随应变率升高明显增大。实际工程中,结构破坏往往与混凝土抗拉性能有关,已有研究表明,混凝土单轴受压破坏过程在本质上是由垂直于压力作用方向的受拉损伤所控制^[2]。因此,对火灾(温度效应)和冲击荷载(率效应)联合作用下混凝土拉伸力学性能的研究具有重要的工程和科学意义。

常温下关于混凝土材料动态破坏行为的应变率效应及机制,国内研究者开展了丰硕的试验及模拟工作。王政等^[3]从极限面、状态方程以及损伤的定义及其演化等方面深入分析了用于数值模拟冲击问题的几个混凝土本构模型;Zhou等^[4]采用细观尺度模型考虑不同的骨料粒径、骨料分布和材料性能分析了混凝土在高应变率下的动态拉伸行为;刘海峰等^[5]运用细观力学方法推导了微裂纹对材料弹性模量的弱化作用以及微裂纹的损伤演化方程,建立了混凝土材料在冲击荷载作用下的一维动态本构模型;Lu等^[6]研究了应变率为 10^{-4} s^{-1} 到 10^2 s^{-1} 范围内混凝土材料的抗拉强度的试验方法,对直接动态拉伸试验、动态劈裂试验和剥落试验进行了数值分析;秦川等^[7]进行了混凝土 SHPB 劈拉试验并对其进行了细观数值模拟,观察了高应变率作用下混凝土的动态劈拉破坏模式;宋来忠等^[8]进行了干燥与饱和混凝土的动态劈拉试验,研究了加载速率、湿度对混凝土劈拉强度的影响,结果表明:混凝土的劈拉强度随应变率的增大而提高,饱和混凝土的劈拉强度对应变率更敏感;王孝政等^[9]对直径为 150 mm 的圆柱体混凝土试件在不同加载方式下进行劈拉试验,分析了混凝土力学性能随应变率的变化规律。

对于高温混凝土材料静态拉伸破坏行为,研究者亦做了大量卓有成效的工作。Ma等^[10]统计了部分文献中无应力立方体试件高温后剩余抗压强度、抗弯强度、劈拉强度和弹性模量的试验结果;郭金纯等^[11]通过对混凝土在不同温度及不同恒温时间下的劈拉试验,得到了温度、恒温时间、劈拉强度的耦合关系,建立了高温后混凝土劈拉强度的计算公式;金鑫等^[12]对 C40 高性能混凝土立方体试件的劈拉强度进行试验研究,分析讨论了不同高温作用后混凝土材料劣化的机理以及对劈拉强度的影响,探讨了劈拉强度随温度变化的规律,结果表明:高温后对混凝土的劈拉强度影响最大的因素是最高作用温度。

目前,国内外的研究工作集中于火灾(高温)和爆炸、冲击荷载等独立作用,对于高温混凝土材料的动态力学行为研究极少,对二者联合作用下的“热-力”耦合作用内在机制的认识尚不清晰,缺乏深入探讨。鉴于此,Jin等^[13]对高温下混凝土的动态压缩破坏行为及其细观损伤机制进行了分析探讨。本文中,针对混凝土的动态拉伸特性,考虑混凝土内部非均质性,从细观尺度出发,综合考虑高温下各细观组分力学性能的退化行为及动态加载的应变率效应,研究高温与应变率耦合作用下混凝土的劈拉性能及其细观损伤演化规律。

1 混凝土细观尺度计算模型

为揭示高温下混凝土的动态劈裂拉伸破坏机理,从细观角度出发,考虑混凝土内部非均质性,将混凝土看作由骨料、砂浆基质及两者间界面过渡区组成的三相复合材料,建立细观尺度分析模型,对高温下混凝土动态劈裂拉伸行为进行数值模拟。模拟过程可分为两个步骤:(1)温度场模拟,模拟非均质混凝土的热传导行为,确定温度场空间分布;(2)力学反应模拟,将温度场模拟的输出结果作为动态力学反应的初始条件,根据混凝土的温度场分布,确定不同温度下有效力学参数,分析其在动态加载下的力学行为。数值计算中,关于高温与高应变率(力学作用)实际上是一种单向耦合。先高温,后高应变率作用,也即是,高温对材料的应变率效应存在影响,而应变率效应对温度场不存在影响。

1.1 细观几何模型

假定骨料为圆形颗粒, 采用 Monte-Carlo 方法投选骨料, 生成如图 1 所示的尺寸为 150 mm×150 mm 的二维随机骨料混凝土试件。其中, 绿色区域代表骨料颗粒, 包含两种等效粒径: 中石 (粒径 $d=30$ mm) 颗粒数为 6, 小石 (粒径 $d=12$ mm) 颗粒数为 56; 红色区域表示界面过渡区 (interfacial transition zone, ITZ), 考虑到计算量的影响, 界面厚度设为 1 mm; 灰色区域代表砂浆基质。在热传导模拟中, 采用热传导单元来划分网格; 力学模拟中, 采用四边形等参单元来划分网格, 网格划分尺寸为 1 mm。

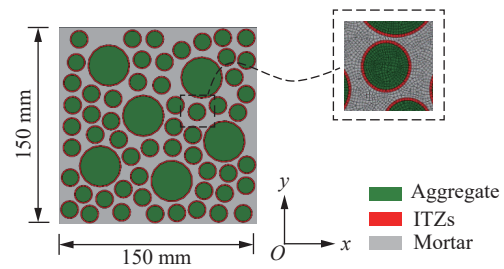


图 1 混凝土细观力学模型及网格划分

Fig. 1 Meso-scope models of concrete specimens and meshing

1.2 本构模型与力学参数

1.2.1 热传导行为及热工参数

经典的热传导方程为:

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: κ 为导热系数; T 为温度, q_v 为体积热源强度; ρ 为介质密度, c 为比热容, x_i 为空间坐标, t 为时间。

混凝土的配合比、水分含量及骨料类型等影响着混凝土材料的比热容、导热系数、介质密度等热工性能^[14]。这里, 参考文献 [15-16], 考虑热工参数的温度相关性, 以温度相关的表达式来确定材料在不同温度下的热工参数:

$$\frac{\kappa_T}{\kappa_0} = 1.026 + 0.013 \left(\frac{T}{100} \right) + 0.0043 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (2)$$

$$\kappa_{aT} = \frac{770}{0.84(350 + T)} + 0.7 \quad (3)$$

$$c_T = 790 + 0.9T \quad (4)$$

$$c_{aT} = (1 + T)^{0.075} \quad (5)$$

$$\frac{\rho_T}{\rho_0} = \begin{cases} 1 - \frac{0.02(T - 115)}{85} & 115^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.98 - \frac{0.03(T - 200)}{200} & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 0.95 - \frac{0.07(T - 400)}{800} & 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 为温度; κ_T 、 c_T 、 ρ_T 分别为高温下砂浆及界面的导热系数、比热容及介质密度; κ_{aT} 、 c_{aT} 分别为高温下骨料的导热系数、比热容; κ_0 、 ρ_0 为室温下砂浆及界面的导热系数、介质密度。根据已有研究^[17-19] 及参数假定, 室温下 (即 20 °C) 混凝土各细观组分热工参数取值详见表 1。

1.2.2 力学本构关系及参数

(1) 温度退化效应

相关试验研究^[20] 表明: 高温下混凝土强度受强度等级、骨料类型及温升速度等因素的影响, 高温下混凝土的抗压强度、抗拉强度及弹性

表 1 室温下混凝土各细观组分热工参数

Table 1 Thermal parameters for the meso-constituents of concrete at room temperature (20 °C)

细观组分	导热系数 $\kappa/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容 $c/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
骨料	3.15 ^[17]	798 ^[18]	2 750
界面	0.7	906	2 450
砂浆	1.9	813 ^[19]	2 750

模量等力学性能均随温度升高而显著下降。

砂浆基质与界面过渡区在高温下关于力学性能的试验研究缺乏,没有直接的计算公式,暂假定高温下砂浆基质和界面相力学性能退化规律与混凝土相同,采用图2中所示的文献中给出的规范^[16]给出的混凝土力学性能随温度退化关系,式(7)为拟合公式:

$$f_{cT}/f_c = 1.037 + 2 \times 10^{-3}T - 8 \times 10^{-7}T^2 \quad (7)$$

$$f_{tT}/f_t = 1 - (T - 100)/500 \quad (8)$$

$$E_T/E = 1.084 + 1.384 \times 10^{-3}T \quad (9)$$

式中: T 为温度; f_{cT} 、 f_{tT} 、 E_T 分别为高温下混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量; f_c 、 f_t 、 E 为室温下混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量。

(2) 应变率效应

关于高温下混凝土的应变率效应还没有形成较一致的结论,公认的是存在应变率效应,但试验数据量非常有限。近来,Chen等^[21]结合其试验结果,提出了普通混凝土在高温作用下动态强度增大因子的表达式。尽管如此,关于混凝土中各细观组分高温时率效应的相关研究则更为少见,目前尚不能给出一个充分完善的关系式。这里为简便起见,粗糙的处理方式为:暂不考虑高温对混凝土细观组分率效应的影响。

弹性模量、泊松比等力学参数相比于抗压强度和抗拉强度,应变率敏感性较弱。因而本文数值模拟中,仅考虑强度的放大效应,通过强度放大系数 δ (动态强度/准静态强度) 来表示。CEB规范^[16]中用来表征混凝土动态抗压强度提高因子 (δ_c) 及修正的拉伸强度增大因子 (δ_t) 公式为:

$$\delta_c = f_{c,imp,k}/f_{cm} = (\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{c0})^{0.014} \quad \dot{\epsilon}_c \leq 30 \text{ s}^{-1} \quad (10)$$

$$\delta_c = f_{c,imp,k}/f_{cm} = 0.012(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{c0})^{1/3} \quad \dot{\epsilon}_c > 30 \text{ s}^{-1} \quad (11)$$

$$\delta_t = f_{t,imp,k}/f_{tm} = (\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_{t0})^{0.018} \quad \dot{\epsilon}_t \leq 10 \text{ s}^{-1} \quad (12)$$

$$\delta_t = f_{t,imp,k}/f_{tm} = 0.0062(\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_{t0})^{1/3} \quad \dot{\epsilon}_t > 10 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

式中: $f_{c,imp,k}$ 为应变率等于 $\dot{\epsilon}_c$ 时的混凝土动态抗压强度, f_{cm} 为应变率 $\dot{\epsilon}_{c0} = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时的准静态抗压强度; $f_{t,imp,k}$ 为应变率等于 $\dot{\epsilon}_t$ 时的混凝土动态抗拉强度, f_{tm} 为应变率 $\dot{\epsilon}_{t0} = 1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时的准静态抗拉强度。

(3) 本构关系模型

试验研究表明^[22]: 常温静载下,骨料一般不会发生破坏;而高温下,骨料强度、峰值应力、弹性模量均会发生不同程度的降低,经历温度越高,降低幅度越大。同时,在高应变率荷载作用下,骨料很可能破坏。鉴于此,本文中暂采用理想弹塑性模型来描述骨料的力学行为,采用文献^[23]中不同温度下的骨料材料参数。Lee等^[24]提出了可描述混凝土塑性永久变形及损伤特征的塑性损伤本构模型,适用于单调加载、周期性往复加载及低围压动力加载等多种受力形式,得到了众多学者的广泛应用。由于砂浆基质、界面过渡区与混凝土力学行为类似,同文献^[13],本文中采用该塑性损伤本构模型来描述其力学行为,该损伤模型的核心是假定混凝土的破坏形式为拉伸断裂与压缩破坏,由各向同性损伤变量来表征其刚度退化:

$$\sigma = (1 - d) D_0^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) \quad (14)$$

式中: D_0^{el} 为各向同性的初始无损弹性张量; ϵ^{pl} 为塑性应变张量; d 为刚度退化变量,其值介于

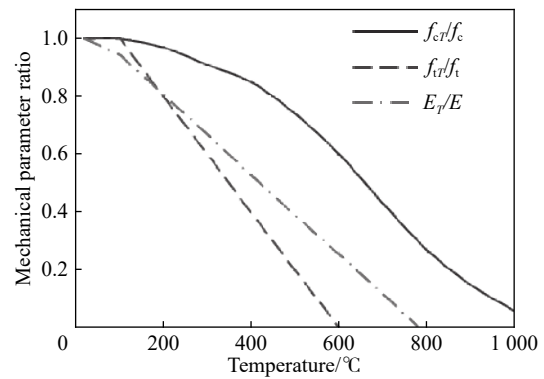


图2 高温下混凝土力学性能退化

Fig. 2 Mechanical property degradation of concrete at elevated temperature

0~1 之间, 其中 0 表示无任何损伤, 1 则表示完全失效, 而混凝土材料的弹性刚度退化由两个独立的损伤变量来描述, 即拉伸损伤因子 d_t 和压缩损伤因子 d_c 。材料在单轴拉伸和压缩条件下的应力-应变关系分别为:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (15)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (16)$$

对于高温下混凝土材料动态劈裂拉伸行为的数值模拟, 这里采用温度退化效应与应变率效应同时耦合的塑性损伤本构模型来描述砂浆基质与界面过渡区的力学行为。数值模拟中采用的室温下 (即 20 °C) 混凝土各细观组分的压缩/拉伸强度、弹性模量及泊松比等主要力学参数, 详见表 2。

1.2.3 热传导分析

本文采用图 3 所示的国际标准化组织 (ISO834)^[25] 推荐的抗火试验及火灾模拟曲线作为环境温度对混凝土试件进行四面受火分析:

$$T = T_0 + 345 \lg(8t + 1) \quad (17)$$

式中: T_0 表示初始环境温度, °C; t 表示加热时间, min; T 表示 t 时刻的温度幅值, °C。

1.2.4 动态加载

《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[26] 规定, 劈裂拉伸试验时采用钢制弧形垫块施加集中荷载。为防止混凝土发生局部受压破坏, 弧形垫块下部可加设胶合板垫条。高温下, 混凝土动态劈裂破坏行为模拟的加载和边界条件为: 试件底边与垫条等宽度处采用竖向固定约束; 底边中点处采用水平向与竖向约束; 两侧为自由边界; 试件顶部与垫条等宽度处为荷载输入边界, 采用速度 v 加载控制。试件的名义应变率为 $\dot{\varepsilon} = v/h$ (其中, h 为混凝土试件高度)。

2 数值计算结果及分析

2.1 温度场分布

图 4 为混凝土试件在四面受火时不同加热时刻的温度场分布, 初始温度为室温, 即 0 min (20 °C), 加热时间分别为 15 min (739 °C)、30 min (842 °C) 和 60 min (945 °C)。总体来讲, 随加热时间的延长混凝土试件靠近加热边界处升温明显, 并向内部传递。由于考虑了混凝土的非均质性以及骨料的随机分布, 不同时刻下, 试件内部温度场分布是不均匀的, 将对混凝土材料内部的力学性能产生不同的影响。

2.2 模拟方法验证

杜敏^[27] 采用液压式万能试验机对不同尺寸

表 2 室温下混凝土各细观组分力学参数

Table 2 Mechanical parameters for the meso-constituents of concrete at room temperature (20 °C)

细观组分	压缩强度 f_c /MPa	拉伸强度 f_t /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
骨料	152.0 ^[23]	—	35 ^[23]	0.2
界面	32.5	3.25	30	0.2
砂浆	40.0	4.00	25	0.2

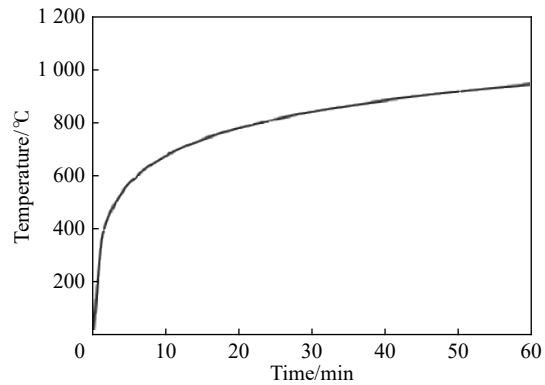


图 3 标准升温曲线

Fig. 3 Standard temperature curve

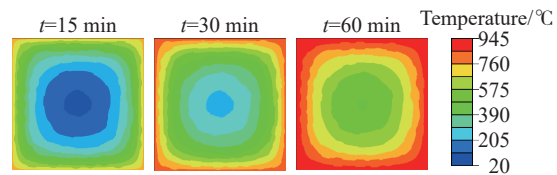


图 4 四面受火混凝土试件不同时刻温度场分布

Fig. 4 Temperature field within concrete specimen subjected to four-side fire

的混凝土立方体试件开展了劈裂拉伸试验。为验证本文混凝土劈裂拉伸行为模拟工作的可靠性,与文献[27]中标准立方体试件的试验结果进行对比分析。这里,对室温下的标准立方体混凝土试件进行准静态劈裂拉伸破坏模拟,模拟及试验获得的劈裂拉伸破坏模式如图5所示。由图5可知,本文中数值模拟获得的拉伸损伤模式与试验结果吻合良好,说明细观数值模型能够很好地模拟混凝土在静态加载、常温作用下劈裂拉伸力学破坏行为。

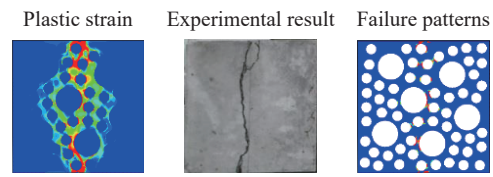


图5 模拟的破坏模式与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of failure modes between the simulated and experimental results

此外, Jin 等^[13]采用上述细观数值模拟方法,对混凝土在高温下的动态压缩破坏行为进行了细观尺度数值研究,模拟得到的动态压缩破坏模式及压缩应力-应力关系与已有试验结果吻合良好。综上,本文细观数值分析方法可以用来研究高温作用下混凝土材料的动态劈拉破坏行为。

2.3 高温下混凝土动态劈裂拉伸破坏形态

基于上述已验证的细观数值分析方法,对混凝土试件在高温下的劈裂拉伸破坏行为进行模拟分析,工况为:加热 60 min,名义应变率为 1 s^{-1} 。图6(a)和(b)分别表征了混凝土试件细观结构高温下的竖向应力(σ_2)和等效塑性应变(ε_{pe})变化过程,给出了时间 $t=0.5, 1.5, 2.5, 4.0 \text{ ms}$ 时刻的应力和应变分布。图6(a)中,正值(红色)代表拉应力,负值(蓝色)代表压应力,可以看出,加载点附近区域处于受压状态,加载点连线两侧区域处于均匀的受拉状态;图6(b)中,由于局部受压以及高温后非均质混凝土的力学损伤分布不均匀,微裂纹首先出现在试件的约束和加载处,随加载时间增大,沿着试件顶部、底部相向延伸并向中心线两侧扩展,损伤越来越明显。综合比较应力、应变分布变化过程,当 $t=1.5 \text{ ms}$ 时,达到峰值应力,混凝土试件沿界面过渡区及砂浆产生贯通的劈拉裂缝,随后应力逐渐降低,塑性应变持续增大。

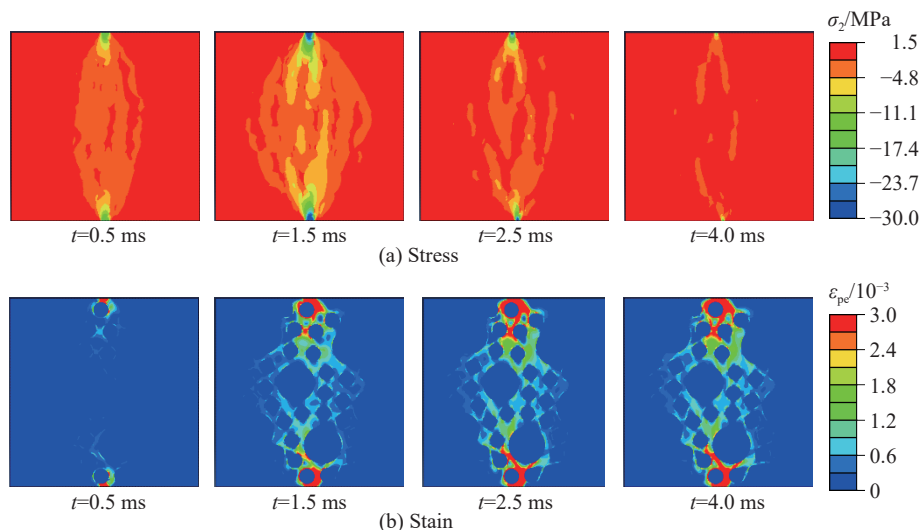


图6 加热 60 min 后混凝土试件应变率为 1 s^{-1} 时的劈裂拉伸损伤过程

Fig. 6 Damage process of the concrete specimen at the strain rate of 1 s^{-1} exposed to fire for 60 minutes

对不同加热时间(0, 15, 30, 60 min)后,名义应变率为 10^{-6} (准静态)、 10^{-4} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、1、10 和 100 s^{-1} 的混凝土试件分别进行劈裂拉伸加载模拟,获得相应的峰值应力处的等效塑性应变如图7所示。从图7可以看出,混凝土试件连接加载及约束处产生贯通的劈拉裂缝。常温下,试件沿破坏面损伤分布均匀连续,随名义应变率升高,裂纹向两侧扩展;高温下,由于不均匀的温度场,试件周边温度损伤尤为严重,主要集中在加载点及约束处附近区域,随名义应变率升高,裂纹变宽并向内部延伸。

随加热时间增大, 损伤由边界向混凝土试件内部传递扩散, 裂纹由细长形延伸至带状。常温下及高温下试件损伤都主要出现在砂浆及界面区域, 骨料几乎不受影响, 图 8 给出了高温下高应变率下混凝土各细观组分的损伤分布情况。值得注意的是, 名义应变率较高时($\dot{\epsilon}=100 \text{ s}^{-1}$), 由于冲击速度较大, 混凝土试件破坏过程急促, 出现局部损伤。常温下, 塑性变形较小, 属脆性破坏, 骨料本身发生破坏(图 7 中圈记处)。而经历高温后, 由于骨料变得松软, 塑性变形非常大, 破坏荷载低, 骨料基本没有破坏, 裂缝沿着界面延伸开来, 此现象与项凯等^[28]、郭金纯等^[11]的试验结果较为一致。

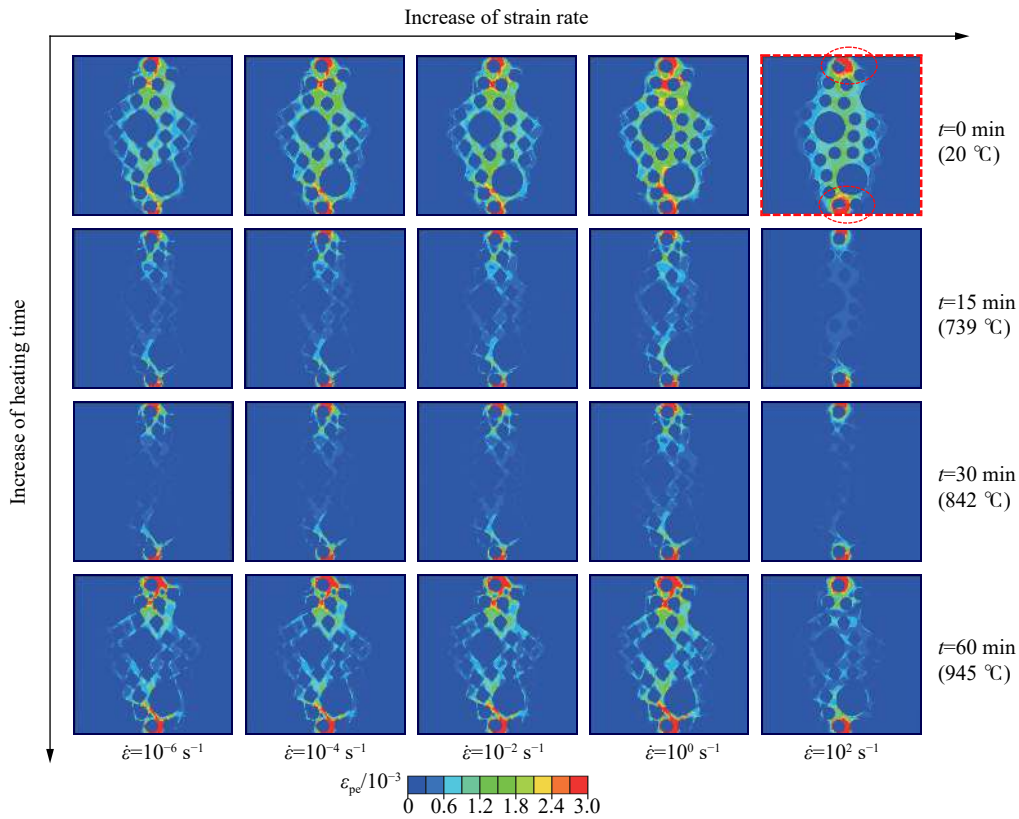


图 7 高温下不同应变率下峰值应力处混凝土试件等效塑性应变

Fig. 7 Equivalent plastic strain of the concrete specimen at peak stress under different strain rates and elevated temperatures

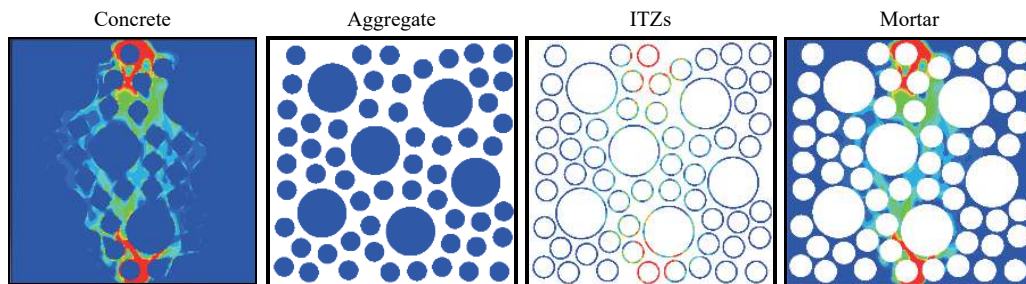


图 8 不同细观组分的损伤分布情况

Fig. 8 Damage distribution in different microscopic components

2.4 峰值应力处竖直应力分布

图 9 给出了经历不同加热时间后的混凝土试件在不同应变率下达到峰值应力时的竖直应力(σ_2)分布。可以看出, 由于混凝土试件细观结构的非均质性, 其内部应力分布是不连续的, 并且呈枣核状由加载点与约束处中心连线向两侧传播扩散。横向观察图 9 可知, 同一温度下, 应力随名义应变率升高而逐

渐增大,混凝土试件内部的竖直应力分布趋向集中均匀连续;同时,随着名义应变率的升高,由于冲击速度增大,局部受压现象也趋于明显。纵向观察图9,同一名义应变率下,由于混凝土材料温度损伤退化严重,竖直应力较常温下大幅降低,且随加热时间呈明显递减趋势;高温下,由于混凝土试件内部温度场分布不均匀,周边温度较高,塑性损伤显著,应力传播受到抑制,随加热时间增长向试件内部及加载点与约束连线两侧延伸扩散。与高温下混凝土试件相比,常温下混凝土试件的应力分布更加均匀连续。

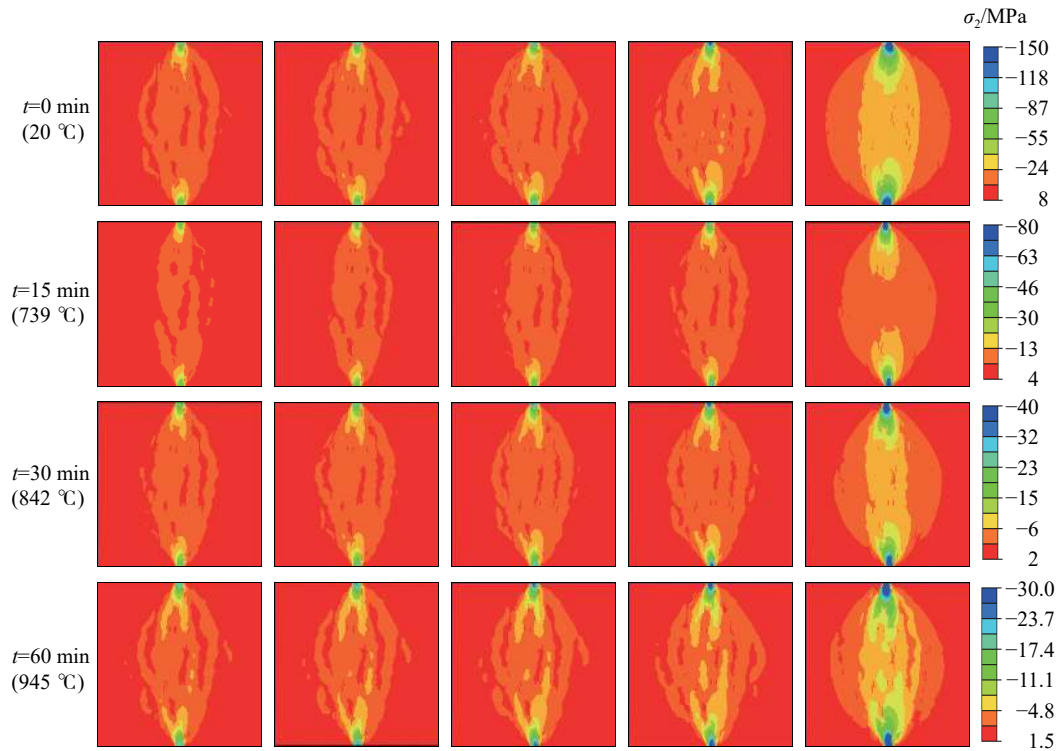


图9 高温下不同应变率下峰值应力处混凝土试件竖直应力

Fig. 9 Longitudinal stress in the concrete specimen at peak stress under different strain rates and elevated temperatures

2.5 拉伸应力-应变关系

图10为不同应变率及不同高温加热下混凝土试件的动态劈裂拉伸应力-应变关系,与压缩曲线相比,受拉曲线更陡,脆性更加明显。由图可知,高温对混凝土有明显的劣化作用,相比于常温下,高温下混凝土材料的劈拉应力显著降低,应力-应变曲线趋于平缓,出现塑性流动现象。同一温度下,随名义应变率增大,峰值应力及峰值应变增大,应力-应变曲线形状不变。在高应变率($\dot{\epsilon} \geq 1 \text{ s}^{-1}$)下,由于惯性效应占主导作用,峰值应力增大幅度明显提升,当应变率为 100 s^{-1} 时,峰值应力突增,应力-应变曲线出现跳跃现象。不难发现,无论常温下还是高温下混凝土试件均表现出显著的应变率效应。除此之外,相比于应变率效应,混凝土强度受温度退化效应影响更为显著,此现象与众多研究者所得结果^[29-32]一致。

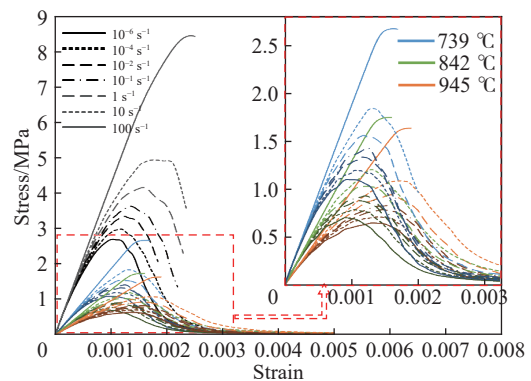


图10 不同应变率下混凝土试件应力-应变关系

Fig. 10 Stress-strain curves of the concrete specimen at different strain rates and elevated temperatures

2.6 温度损伤残余因子

通过温度损伤残余因子(即高温下拉伸强度与室温下拉伸强度之比)来反应随温度升高混凝土材料性能的退化程度。图 11 对比了不同应变率下混凝土试件的温度损伤程度。由图可知,不同应变率下的温度损伤曲线斜率接近,随应变率增大至上而下平行排列,说明应变率对混凝土试件的温度退化规律几乎没有影响。但是同一温度下,逐渐增大的冲击速度加剧了其温度损伤程度,尤其在应变率 $\dot{\epsilon}=100 \text{ s}^{-1}$ 时,局部损伤明显(详见 2.3、2.4 节),致使其温度损伤残余因子大幅降低,具体数值可参见表 3。

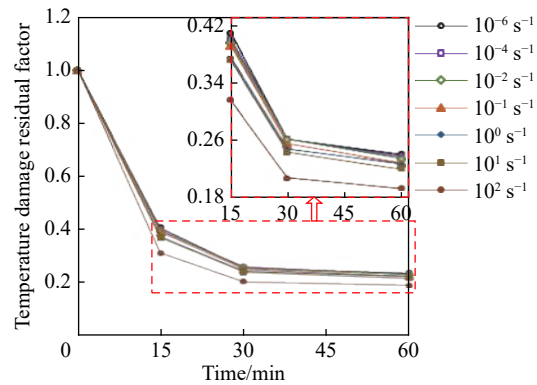


图 11 不同应变率下的温度损伤程度

Fig. 11 Temperature damage factors at different strain rates

表 3 不同应变率下的混凝土温度损伤残余因子

Table 3 Temperature damage residual factors of concrete at different strain rates and different heating times

应变率/ s^{-1}	温度损伤残余因子			
	0 min	15 min	30 min	60 min
1×10^{-6}	1	0.410	0.262	0.242
1×10^{-4}	1	0.401	0.263	0.238
1×10^{-2}	1	0.397	0.262	0.235
1×10^{-1}	1	0.392	0.256	0.229
1×10^0	1	0.376	0.249	0.228
1×10^1	1	0.372	0.244	0.221
1×10^2	1	0.317	0.208	0.194

2.7 动态拉伸强度放大系数

采用同一温度下动态拉伸强度与其准静态拉伸强度(本文中取 $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时强度)之比,即动态拉伸强度增大系数(δ_t)来描述材料强度随应变率升高而增大的现象。图 12 给出了在不同加热时间(温度)下混凝土 δ_t 与应变率间的散点及其进行拟合关系,比较了常温与高温下 δ_t 随应变率的变化关系。由图可知,常温下混凝土较高温下混凝土有更强的应变率敏感性,也进一步说明高温和冲击荷载联合作用下,温度退化效应占主导控制,对应变率效应存在抑制作用。高温作用后,同一应变率下, δ_t 随加热时间增大尚未发现明显变化规律。相比动态压缩强度增大系数(δ_c), δ_t 增长更为迅速,率敏感性更明显,可参见表 4 具体数值。

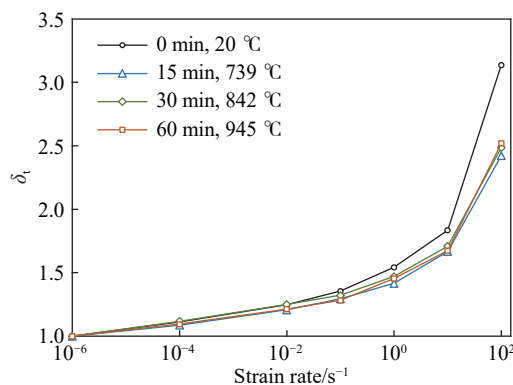


图 12 不同温度下动态拉伸强度增大系数与应变率的关系

Fig. 12 Relations of dynamic increase factors of tensile strength to strain rates at different elevated temperatures

表4 高温时不同应变率下的混凝土动态拉伸强度增大系数

Table 4 Dynamic increase factors of tensile strength of concrete under different strain rates and different heating times

应变率/s ⁻¹	δ_t					CEB规范 ^[16]	δ_c
	0 min	15 min	30 min	60 min			
1×10 ⁻⁶	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1×10 ⁻⁴	1.113	1.087	1.118	1.095	1.086	1.086	1.017
1×10 ⁻²	1.249	1.207	1.250	1.214	1.180	1.180	1.085
1×10 ⁻¹	1.355	1.295	1.322	1.283	1.230	1.230	1.120
1×10 ⁰	1.544	1.416	1.470	1.455	1.282	1.282	1.157
1×10 ¹	1.836	1.667	1.709	1.674	1.337	1.337	1.195
1×10 ²	3.137	2.423	2.487	2.519	2.878	2.878	1.793

3 结论

考虑混凝土材料的非均质性,将混凝土视为由骨料、砂浆与界面组成的三相复合材料,综合考虑各细观组分的温度退化效应和应变率增强效应,对高温下混凝土动态劈裂拉伸行为进行了细观数值模拟,获得了高温下混凝土动态劈裂破坏过程及破坏模式、竖直应力分布形态、应力-应变关系等响应结果,总结了应变率对混凝土宏观力学行为温度退化作用的影响,分析了高温下宏观动态拉伸强度增大系数(δ_t)随温度变化规律,得到以下结论:

(1)本文细观数值方法与试验结果吻合良好,能够很好地模拟混凝土的劈裂拉伸行为。

(2)常温下,试件沿破坏面损伤分布均匀连续;高温下,试件损伤集中在加载点及约束处;随名义应变率升高,裂纹变宽并向内部延伸;随加热时间增长,损伤由边界向混凝土试件内部传递扩散,裂纹由细长形延伸至带状。

(3)名义应变率较高时,混凝土试件破坏过程急促,出现局部损伤;常温下脆性破坏,骨料本身发生破坏;经历高温后,塑性变形非常大,骨料基本没有破坏,裂缝沿着界面延伸开来。

(4)由于混凝土试件细观结构的非均质性,其内部应力分布不连续,呈枣核状由加载点与约束处连线向两侧传播扩散;随名义应变率升高,局部受压现象明显。

(5)常温下混凝土较高温下混凝土有更强的应变率敏感性,温度退化效应对应变率效应存在抑制作用。

(6)需要说明的是,由于缺乏相关试验数据,本文对高温后混凝土的应变率效应暂时进行粗糙处理,今后应对其修正和完善。

参考文献:

- [1] 赵建魁, 方秦, 陈力, 等. 爆炸与火荷载联合作用下 RC 梁耐火极限的数值分析 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 10(48): 873-880.
ZHAO J K, FANG Q, CHEN L, et al. Numerical analysis of fire resistance of RC beams subjected to explosion and fire load [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 10(48): 873-880.
- [2] 李杰, 卢朝辉, 张其云. 混凝土随机损伤本构关系-单轴受压分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 505-509. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2003.05.001.
LI J, LU Z H, ZHANG Q Y. Study on stochastic damage constitutive law for concrete material subjected to uniaxial compressive stress [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(5): 505-509. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2003.05.001.
- [3] 王政, 倪玉山, 曹菊珍, 等. 冲击载荷下混凝土动态力学性能研究进展 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 519-527. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0519-09.

- WANG Z, NI Y S, CAO J Z, et al. Recent advances of dynamic mechanical behavior of concrete under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 519–527. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0519-09.
- [4] ZHOU X, HAO H. Mesoscale modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates [J]. *Computers and Structures*, 2008, 86(21): 2013–2026.
- [5] 刘海峰, 宁建国. 冲击荷载作用下混凝土材料的细观本构模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(3): 261–267. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)03-0261-07.
- LIU H F, NING J G. A meso-mechanical constitutive model of concrete subjected to impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(3): 261–267. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)03-0261-07.
- [6] LU Y, LI Q. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(4): 171–180. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.028.
- [7] 秦川, 武明鑫, 张楚汉. 混凝土冲击劈拉实验与细观离散元数值仿真 [J]. *水力发电学报*, 2013, 32(1): 196–205.
- QIN C, WU M X, ZHANG C H. Impact splitting tensile experiments of concrete and numerical modeling by meso-scale discrete elements [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(1): 196–205.
- [8] 宋来忠, 张伟朋, 周斌, 等. 混凝土动态劈拉特性及损伤机理研究 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(6): 10–14.
- SONG L Z, ZHANG P W, ZHOU B, et al. Dynamic splitting tensile behavior and damage mechanism of concrete [J]. *Journal of China Gorges University (Natural Science)*, 2015, 37(6): 10–14.
- [9] 王孝政, 彭刚, 刘博文, 等. 不同应变速率下混凝土劈拉性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 2017, 47(5): 107–110.
- WANG X Z, PENG G, LIU B W, et al. Experimental research on splitting tensile performance of concrete under different strain rate [J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(5): 107–110.
- [10] MA Q, GUO R, ZHAO Z, et al. Mechanical properties of concrete at high temperature: a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 371–383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131.
- [11] 郭金纯, 余江滔, 陆洲导. 不同温-时影响下混凝土劈拉强度的试验研究 [J]. *工业建筑*, 2008, 38(9): 74–76.
- GUO J C, YU J T, LU Z D. Experimental research on the splitting tensile strength of concrete at different temperature and time [J]. *Industrial Construction*, 2008, 38(9): 74–76.
- [12] 金鑫, 杜红秀, 阎蕊珍. 高性能混凝土高温后劈裂抗拉强度试验研究 [J]. *太原理工大学学报*, 2013, 44(5): 637–640. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9432.2013.05.019.
- JIN X, DU X H, YAN R Z. Experimental research on the splitting tensile strength of high-performance concrete after elevated temperature [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013, 44(5): 637–640. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9432.2013.05.019.
- [13] JIN L, HAO H M, ZHANG R B, et al. Determination of the effect of elevated temperatures on dynamic compressive properties of heterogeneous concrete: a meso-scale numerical study [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 685–694. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.090.
- [14] 漆雅庆. 火灾下钢筋混凝土构件的非线性有限元分析研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [15] JIN L, ZHANG R B, DU X L. Characterization of the temperature-dependent heat conduction in heterogeneous concretes [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2018, 70(7): 325–339. DOI: 10.1680/jmacr.17.00174.
- [16] Euro-International Committee for Concrete. CEB-FIP model code 1990 [S]. Trowbridge, Wiltshire, UK: Redwood Books, 1993.
- [17] KHAN M I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models [J]. *Building and Environment*, 2002, 37(6): 607–614.
- [18] VOSTEEN H D, SCHELLSCHMIDT R. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(9): 499–509.
- [19] ČERNÝ R, MADĚRA J, PODĚBRADSKÁ J, et al. The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(8): 1267–1276.
- [20] 李凌志. 火灾后混凝土材料力学性能与温度、时间的关系 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [21] CHEN L, FANG Q, JIANG X, et al. Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 40–56. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.07.002.
- [22] 朱合华, 闫治国, 邓涛, 等. 3种岩石高温后力学性质的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 1945–1950. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.10.001.

- ZHU H H, YAN Z G, DENG T, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 1945–1950. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.10.001.
- [23] 邱一平, 林卓英. 花岗岩样品高温后损伤的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(6): 1005–1010. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2006.06.032.
- QIU Y P, LIN Z Y. Testing study on damage of granite samples after high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 1005–1010. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2006.06.032.
- [24] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892–900. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- [25] International Organization for Standardization. Fire resistance tests: elements of building construction[S]. Geneva: International Standards Organization, 1999.
- [26] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [27] 杜敏. 混凝土与约束混凝土柱尺寸效应研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [28] 项凯, 余江滔, 陆洲导. 多因素影响下高温后混凝土劈裂抗拉强度试验 [J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(10): 51–55.
- XIANG K, YU J T, LU Z D. Experimental study on splitting tension strength of fire-damaged concrete with different influencing factors [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(10): 51–55.
- [29] 陶俊林, 秦李波, 李奎, 等. 混凝土高温动态压缩力学性能实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(1): 101–106. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)03-0268-06.
- TAO J L, QIN L B, LI K, et al. Experimental investigation on dynamic compression mechanical performance of concrete at high temperature [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(1): 101–106. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)03-0268-06.
- [30] 何远明, 霍静思, 陈柏生, 等. 高温下混凝土 SHPB 动态力学性能试验研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(9): 200–208.
- HE Y M, HUO J S, CHEN B S, et al. Impact tests on dynamic behavior of concrete at elevated temperatures [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 200–208.
- [31] 许金余, 刘健, 李志武, 等. 高温中与高温后混凝土的冲击力学特性 [J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2013.01.001.
- XU J Y, LIU J, LI Z W, et al. Impact mechanical properties of concrete at and after exposure to high temperature [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2013.01.001.
- [32] 王宇涛, 刘殿书, 李胜林, 等. 高温后混凝土静动态力学性能试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(20): 16–19.
- WANG Y T, LIU D S, LI S L, et al. Static and dynamic mechanical properties of concrete after high temperature treatment [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(20): 16–19.

(责任编辑 王易难)