

文章编号:1001-4888(2018)02-0307-11

高温后水泥砂浆试件抗压性能 与变形场演化实验研究^{*}

王来贵¹, 陈强¹, 杨建林^{1,2}, 刘向峰¹, 刘国², 赵月²

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 阜新 123000)

摘要: 为研究不同温度作用后水泥砂浆试件的抗压性能及变形破坏规律, 对不同温度作用后的试件进行单轴压缩实验, 同时采用数字散斑相关方法(DSCM)观测试件局部变形, 利用标准差统计分析应变场的变化规律。结果表明: (1) 在 200℃~800℃ 温度作用后, 高龄期的试件更易发生破坏, 试件单轴抗压强度的降低主要是由于水化反应形成的骨架结构在高温作用后发生分解; (2) 20℃、200℃ 和 400℃ 作用后的水泥砂浆试件具有明显的脆性特征, 相对而言, 600℃ 和 800℃ 作用后的试件塑性特征明显; (3) 局部应变场演化过程分为四个阶段: 应变均匀分布阶段、应变成核阶段、应变局部化阶段和破坏阶段; (4) 利用标准差统计应变场表征试件变形的不均匀程度, 与试件整体应力—应变曲线对比, 在接近峰值应力时, 应变场标准差急剧增大, 表明试件即将发生破坏。上述结果可为预测高温作用后水泥基材料的变形破坏提供参考。

关键词: 高温; 水泥砂浆试件; 数字散斑; 变形破坏; 标准差统计

中图分类号: O34 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-247

0 引言

随着城市人口居住的密集化和高层建筑的迅速发展, 虽然预防火灾发生和消防的手段越来越先进, 但火灾发生仍日益频繁^[1]。一旦建筑物发生火灾, 建筑材料性能严重恶化, 建筑结构整体安全性迅速下降, 甚至倒塌, 将造成巨大的生命财产损失。水泥基材料作为最广泛的建筑材料, 在火灾中直接与热源接触, 经过高温作用, 水泥基材料发生不同程度的变形破坏。因此研究高温作用后水泥砂浆试件抗压性能与变形场演化规律对于提高建筑抗火性能具有重要意义。

国内外学者对高温作用后水泥基材料的力学特性进行了深入研究, 李清海等^[2]通过对高温作用后的水泥砂浆试件进行抗压强度测定, 将不同温度作用后的抗压强度变化分为三个阶段, 认为水泥和集料的热膨胀性差异造成了水泥砂浆强度变化规律。陶俊林等^[3]对高温作用后水泥砂浆试件进行了冲击实验, 提出一个水泥砂浆的热粘弹性率损伤本构模型, 描述水泥砂浆在高温和冲击载荷同时作用下的动态特性。刘威等^[4]对经高温循环作用后的水泥砂浆试件进行了单轴压缩变形实验, 得到了水泥砂浆试件抗压强度、峰值应变和弹性模量随高温循环次数的变化规律。何振军等^[5]通过高温作用后高性能混凝土的双轴压强度实验, 分析了温度和应力比对单轴、双轴压强度的影响规律以及试件的破坏形态, 提出了高性能混凝土带有温度和应力比参数的 Kupfer-Gerstle 破坏准则公式。何远明等^[6]研究了高温作用后普通混凝土的抗冲击性能, 通过比较实测动态强度和应力—应变曲线, 得出高温作用后混凝土具有显

^{*} 收稿日期: 2016-11-16; 修回日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51474121、51404136)资助

通讯作者: 王来贵(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学系统稳定性方面的研究工作。Email: 619219426@qq.com

著的应变率效应,低温区混凝土无明显动态效应并且存在静力强度衰减现象。Ergün 等^[7]通过拉拔实验研究了高温后混凝土的粘结强度对材料性能的影响,结果表明混凝土的残余强度随温度的升高而降低,并得到了粘结强度损失最大的混凝土等级范围。Tamrazyan 等^[8]对高温作用后混凝土柱进行偏心受压实验,同时进行动态计算,相对于静态强度,混凝土柱的动态强度明显降低。Janotka 等^[9]从微观结构和孔隙结构角度研究了高温对混凝土孔隙结构和渗透率的影响,为核电站现场施工提供了技术参考。

国内外学者大多以混凝土为对象,研究高温后混凝土的静态、动态强度和弹性模量,而高温后水泥砂浆的变形破坏规律方面的研究还较少。混凝土与水泥砂浆同属水泥基材料,水泥砂浆以砂为骨料,与混凝土相比缺少石子,是广义上的混凝土^[10],在火灾中水泥砂浆最先受到高温作用影响,另外不同龄期的水泥砂浆抗压性能与变形性能相差较大,对工程建筑整体结构的稳定有重要影响,因此为了研究高温作用后水泥砂浆的变形破坏规律,本文对 20℃、200℃、400℃、600℃、800℃作用后,7d、14d、21d、28d 养护龄期的水泥砂浆试件进行单轴压缩实验,同时利用数字散斑相关方法(DSCM)观测试件局部应变场,分析局部应变场演化规律,为了表征试件变形过程中的不均匀程度,利用标准差统计应变场应变信息得到应变离散程度的统计指标,分析试件局部侧面应变标准差与试件整体应力—应变曲线的关系,预测高温作用后水泥基材料的变形破坏。

1 实验

1.1 实验原材料

水泥为阜矿集团天夏水泥厂生产的 P·II 42.5R 级硅酸盐水泥,其成分含量见表 1 所示;集料为干燥的河砂(粒径大于 20 目略去),经过筛分,其颗粒级配指标见表 2;实验用水为蒸馏水。

表 1 水泥成分含量

Tab. 1 Composition of the cement

成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
含量/%	23.42	64.26	5.22	2.08	1.79	0.54	0.34	2.35

表 2 河沙级配表

Tab. 2 River sand grading table

筛孔/目数	20	30	60	70	80	90	110	120	130	140
含量/%	59.2	0.3	0.7	0.1	0.9	2	6.5	1.2	11.9	13.7

1.2 试件的制备

实验变量为养护龄期和温度,龄期为 7d、14d、21d、28d 四个等级,每个等级中温度梯度为 20℃、200℃、400℃、600℃、800℃,共有 20 组,每组制作 5 个试件,共 100 个试件。

参考 GB/JGJ55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,选取水泥:砂:水的质量配合比为 1:2:0.3。参考肖建庄等^[11]的水泥砂浆制作方法,首先按照水泥砂浆的配合比将原料放入搅拌机中搅拌 1min,再加入水搅拌 3min 至混合均匀,测定水泥砂浆的坍落度为(23~28mm)。将搅拌均匀的混合物注入 70.1mm×70.1mm×70.1mm 模具中捣密实成型,上表面抹平。放在干燥处静置 24h 后脱模,用保鲜膜包裹,避免试件表面水分蒸发过快导致水泥水化反应不均匀,参考 GB/T50081《普通混凝土力学性能试验方法标准》的方法将水泥砂浆试件在养护室中进行养护。

1.3 实验方案

1.3.1 高温实验

将养护好的水泥砂浆试件放入箱式电阻炉(型号为 SX2-S-8-10)中加热至 200℃、400℃、600℃、800℃(升温速率为 4~6℃/min^[2]),每升高 100℃,保温 20min,达到预设温度后保温 4h^[12]。然后取出试件自然冷却至常温,记录各组试件外观变化。

1.3.2 单轴压缩实验

将水泥砂浆试件放在压力试验机(型号为YAW-2000)上进行单轴压缩实验,采用位移控制加载方式,设置加载速率为0.005mm/s,由试验机加载系统得到应力—应变曲线。利用CCD相机同步观测水泥砂浆试件的局部侧面变形,观测系统如图1。CCD相机分辨率为1630pixel×1224pixel,设定图像采集速率为15帧/s,在图像上选择视场70mm×70mm,标定得到系统物面分辨率为0.050mm/pixel,对比文献[13]和[14]物面分辨率,该标定结果符合精度要求,由DSCM系统软件处理得到试件局部侧面应变云图。

单轴压缩实验开始前,将试件置于加载平台中心位置,观测散斑面平行于CCD相机,调整相机焦距使采集的图像清晰。由于试验机加载系统与DSCM观测系统相互独立,实验开始前统一时间,同步进行观测。

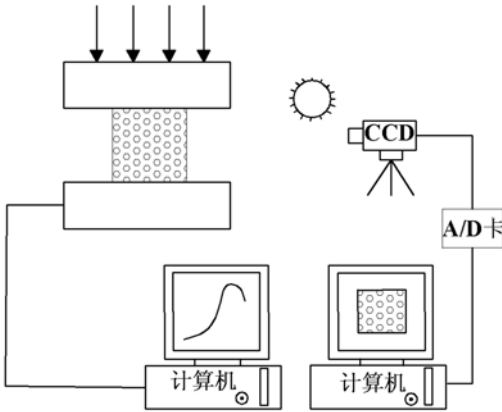


图1 变形场观测系统示意图

Fig.1 The schematic diagram of deformation field observation system

2 实验结果与分析

2.1 水泥砂浆表观、质量变化

表3 不同温度后水泥砂浆试件的表观特征

Tab.3 Appearance characteristic of cement mortar samples after different temperature action

表观特征	20℃	200℃	400℃	600℃	800℃
颜色变化	青灰色	浅青灰色	泛黄	泛白	灰白色
裂纹情况	无	无	细微裂纹	微裂纹数目增多	明显裂纹
疏松状况	无	无	无	尖角轻微脱落	表面轻微脱落

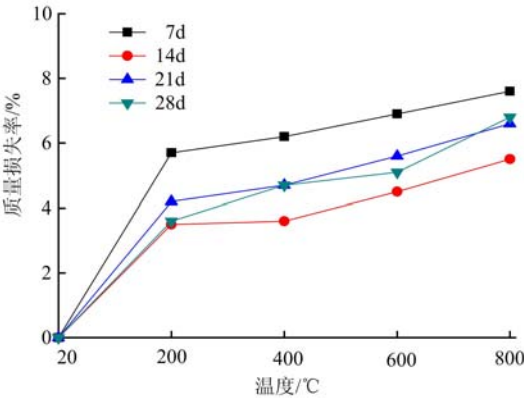


图2 不同温度后试件质量损失率变化曲线

Fig.2 Mass loss rate curve of samples after different temperature action

屑掉落,试件较为疏松,不均匀性最大^[15]。

图2为不同温度后水泥砂浆试件质量损失率变化曲线,同一养护龄期下,温度越高,水泥砂浆试件的质量损失率越大,温度在20℃~200℃之间,试件质量损失较快,这是由于试件中的自由水蒸发所致,该分析结果与文献[16]结果一致。相同的温度条件下,7d的质量损失率最大,因为7d的试件水化反应程度较低,试件内部含有较多自由水。随着养护龄期的增加,水化反应程度加深,水化产物中结合水含

表3为不同温度作用后水泥砂浆试件的表观特征,常温下的水泥砂浆试件颜色为青灰色,自由水含量较多。当温度为200℃时由于自由水分蒸发,试件表面颜色变浅,处于物理脱水阶段。当温度为400℃时,试件表面开始泛黄,这主要是由于水泥砂浆试件内部的自由水完全蒸发,凝胶(C-S-H)和钙矾石(Aft)中的结晶水开始脱水,砂砾间出现细微裂纹,试件的不均匀性增加^[2]。当温度达到600℃时,水泥砂浆试件中的Ca(OH)₂脱水形成氧化物,试件表面开始泛白,砂砾间的微裂纹数目增多,尖角有轻微脱落,不均匀性进一步增大。当温度达到800℃时,Ca(OH)₂脱水形成的氧化物增多,试件表面变为灰白色,轻微触碰有碎

量逐渐增加,在高温作用下自由水相对结合水容易脱去,所以低龄期的试件质量损失较大。

2.2 数据离散性分析

表 4 为不同水泥砂浆试件单轴抗压强度测试结果,为了反映试件强度测量值受龄期与温度影响的变化规律,计算单轴抗压强度数据的离散系数 C_v 用以表征相同龄期与相同温度后试件单轴抗压强度,计算公式为

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}}$$

式中, s 为样本的标准差; $\bar{x}$ 为样本的均值。从离散系数可以看出,其值都小于 0.1,表明同一龄期和经历同一温度作用后的不同水泥砂浆试件单轴抗压强度实验数据较为集中,离散程度较低。

表 4 水泥砂浆试件单轴抗压强度测试结果

Tab. 4 Test results of compressive strength of cement mortar specimens

周期	温度 /℃	试件单轴抗压强度/MPa					标准差 /MPa	离散系数
		1	2	3	4	5		
7d	20	19.22	18.24	19.40	18.68	18.91	0.46	0.024
	200	18.45	17.16	18.02	15.42	17.69	1.18	0.068
	400	16.71	14.98	15.10	15.25	14.66	0.80	0.052
	600	11.79	10.20	11.10	10.56	11.35	0.63	0.057
	800	9.12	7.98	8.45	8.53	8.42	0.41	0.048
14d	20	21.41	23.02	21.94	22.19	21.74	0.61	0.028
	200	21.88	20.12	20.71	20.41	21.08	0.68	0.033
	400	18.43	16.31	17.29	17.88	16.49	0.90	0.052
	600	14.14	12.53	13.00	13.38	13.95	0.66	0.049
	800	11.20	10.16	10.63	10.68	10.53	0.37	0.035
21d	20	25.00	24.14	25.5	24.61	24.85	0.50	0.020
	200	24.02	22.37	22.47	23.18	22.41	0.71	0.031
	400	20.98	19.86	19.04	20.04	19.53	0.71	0.036
	600	13.02	12.22	11.39	11.85	12.42	0.61	0.050
	800	8.51	9.45	7.88	8.49	8.77	0.57	0.066
28d	20	28.02	29.04	28.37	28.39	28.03	0.41	0.015
	200	27.08	28.12	26.33	26.83	27.09	0.65	0.024
	400	21.18	21.76	20.65	20.76	21.35	0.45	0.021
	600	11.14	9.59	11.41	10.64	10.67	0.69	0.065
	800	8.45	7.29	9.16	8.53	7.92	0.70	0.085

图 3 为水泥砂浆单轴抗压强度离散系数曲线图,对比不同龄期和不同温度对于水泥砂浆试件单轴抗压强度的离散性的影响,随着温度的升高,7d 和 14d 低龄期单轴抗压强度离散系数先增加后减小,但总体呈增加趋势,21d 和 28d 试件测试数据离散系数单调增加,在温度低于 400℃时,随着龄期的增加,单轴抗压强度离散系数逐渐降低。综合以上分析,龄期增长可明显降低水泥砂浆试件单轴抗压强度的离散性,该结论与文献[17]结果一致,而温度作用则会显著增加水泥砂浆试件单轴抗压强度的离散性。

2.3 单轴压缩实验结果分析

图 4 为不同养护龄期水泥砂浆试件的单轴抗压强度随温度变化的曲线,在 7d、14d、21d、28d 龄期下,水泥砂浆试件单轴抗压强度都随温度的升高而降低。由常温至预设温度过程中,水泥砂浆试件内部

颗粒组分发生热膨胀,对试件孔隙的生成和裂缝的发育都有促进作用,不同温度作用引起水泥砂浆试件内部的反应不同。图4中养护龄期28d的试件,抗压性能的衰减主要发生在200℃~600℃,在200℃作用后的试件单轴抗压强度衰减量为4.5%,主要原因是自由水的蒸发。温度在200℃~400℃间,水化硅酸钙和水化铝酸钙开始脱水,由于水分蒸发生成较多孔隙,试件原有的稳定结构被破坏,单轴抗压强度降低较大为21.2%。400℃~600℃间,试件内部大量孔隙相互连通形成微观裂缝并逐渐扩展至宏观水平,单轴抗压强度降低量最大,这与文献[18]的结果一致,降低量为36.8%。当温度在600℃~800℃时,作为试件的骨架结构 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体脱水分解生成 CaO ,微观裂缝逐步发展为宏观裂缝,试件单轴抗压强度进一步降低,降低量为8.2%。

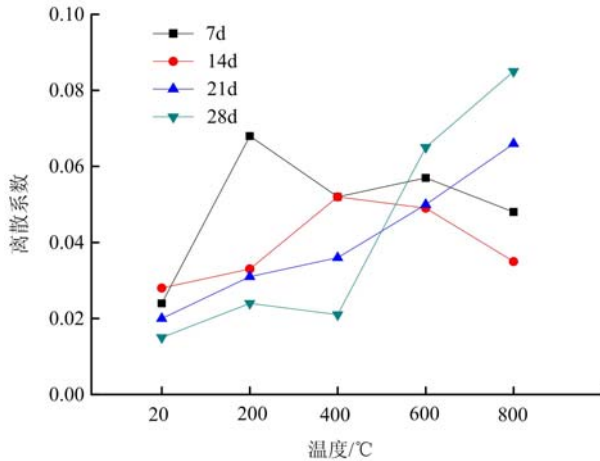


图3 水泥砂浆试件单轴抗压强度离散系数曲线图

Fig. 3 Discrete coefficient curve of compressive strength of cement mortar

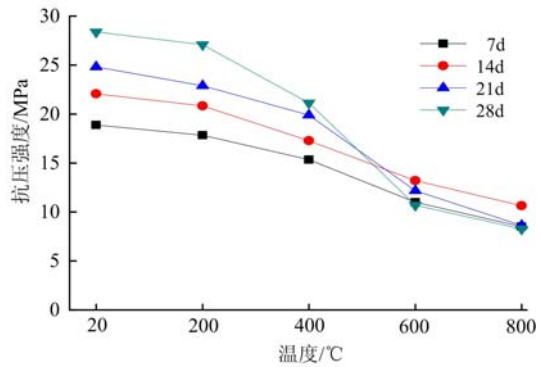


图4 不同龄期试件的抗压强度随温度变化曲线

Fig. 4 The relationship curve of compressive and temperature under different curing age

由20℃到800℃,养护龄期7d试件单轴抗压强度降低54.8%,14d试件单轴抗压强度降低51.6%,21d试件单轴抗压强度降低65.2%,28d的试件单轴抗压强度降低70.6%。可以看出养护龄期越大,单轴抗压强度降低量越大,高龄期的水泥砂浆试件在高温作用下更易发生破坏,根据文献[19]的分析结果,由于养护龄期与水化反应程度正相关,水化产物填充在孔隙中构成了试件的骨架结构,在高温作用下水化产物失水分解,原有的稳定结构被破坏,造成单轴抗压强度的降低,所以高龄期试件,单轴抗压强度降低较大。

由于不同养护龄期的应力—应变曲线变化规律相同,所以以养护龄期14d的试件为例研究高温作用对试件的力学性能影响。图5为14d不同温度作用后水泥砂浆试件应力—应变曲线,在20℃~800℃作用下,试件的弹性模量分别为1742.1MPa、1673.7MPa、1405.8MPa、821.3MPa、540.1MPa,随着温度的增加,弹性模量逐渐降低,低于400℃的试件弹性模量接近,当温度超过400℃,弹性模量急剧下降,该结果与文献[20]结果一致,800℃作用后的水泥砂浆试件弹性模量比常温下降低69.0%,相比而言,由于文献[20]以混凝土为研究对象,500℃作用后弹性模量降低量为77.0%。

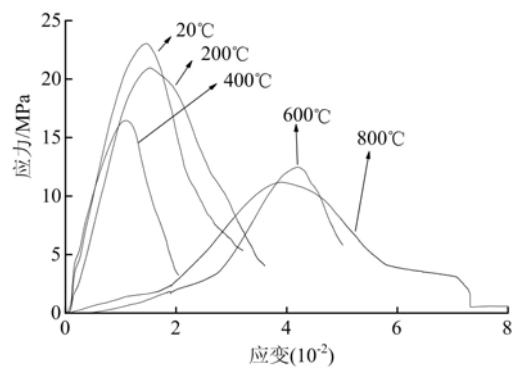


图5 14d不同温度后水泥砂浆试件应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of 14d cement mortar samples after different temperature

定义峰后广义刚度系数 $K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$,试件的 K 值为应力—应变曲线的斜率, K 值越大表明试件峰后阶段脆性越强。从图5可以看出,温度低于600℃的 K 值较大,试件表现出明显的脆性特征,800℃的应力

一应变曲线 K 值相对较小,试件塑性特征相对明显。图 6 为不同温度后水泥砂浆试件峰值应变曲线,可以看出温度小于等于 400°C 的试件峰值应变较小并且相差不大, 400°C 的试件峰值应变为 1.1,温度高于 400°C 的试件峰值应变有较大提高,该结果与文献[5]和文献[20]的研究结果一致。峰值应变表征了试件达到峰值应力时的变形程度,当温度高于 400°C 时,试件内部的水化产物脱水分解,抗压性能降低导致变形程度明显增大。综合上述分析,水泥砂浆的主要力学特性对 400°C 较为敏感,其单轴抗压强度、弹性模量和峰值应变经过 400°C 作用后都大幅下降。

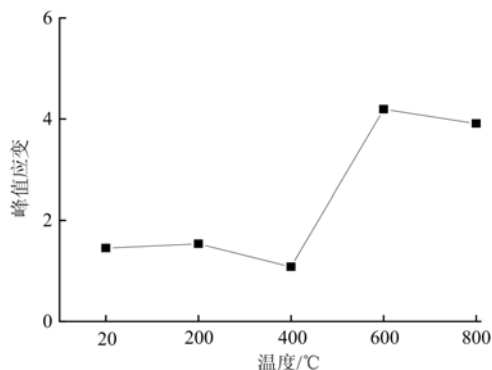


图 6 不同温度后水泥砂浆试件峰值应变曲线

Fig. 6 Peak strain curve of cement mortar samples after different temperature

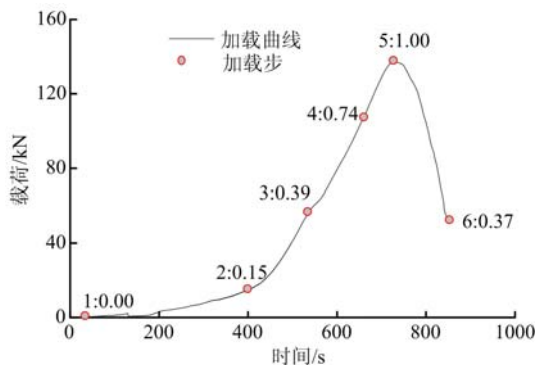


图 7 28d 常温下水泥砂浆试件时间—载荷曲线

Fig. 7 Time-load curve of 28d cement mortar samples after 20°C

2.4 变形场演化特征分析

图 7 为养护龄期 28d 常温下水泥砂浆试件时间—载荷曲线,对曲线图每一点的观测图像进行处理分析得到局部应变场演化规律:应变场演化过程可分为四个阶段。为了直观的表现出每个阶段的特征,取每个阶段较有代表性的应变云图共 6 张,对应时间—载荷曲线上的 6 个载荷步点,计算每个加载步相对峰值载荷的百分比,即每个加载步的载荷值与峰值载荷的比值。根据局部应变场演化规律和选取的载荷步点得到水泥砂浆试件局部侧面应变场演化如图 8 所示。

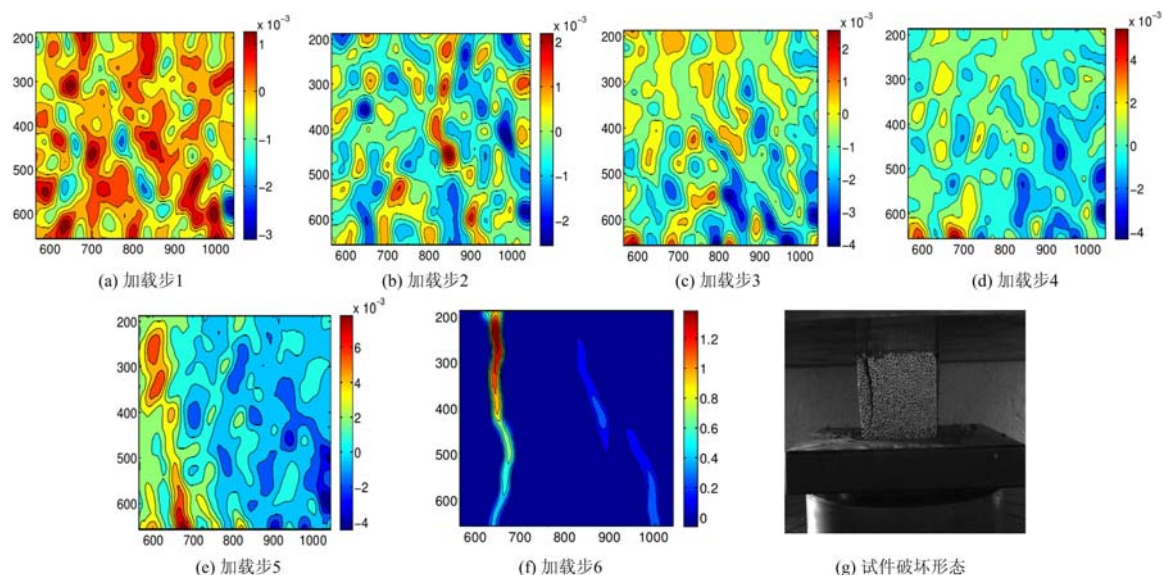


图 8 龄期 28d 常温下水泥砂浆试件局部侧面应变场演化图

(a)加载步 1;(b)加载步 2;(c)加载步 3;(d)加载步 4;(e)加载步 5;(f)加载步 6;(g)试件破坏形态

Fig. 8 The lateral strain field evolution pattern of age 28d cement mortar samples

水泥砂浆试件局部应变场演化过程分为四个阶段:应变均匀分布阶段、应变成核阶段、应变局部化阶段和破坏阶段。应变均匀分布阶段位于位移—载荷曲线的压密阶段,压应力水平较低,由图 8(a)加

载步1可以看出,局部侧面应变值较小,并且分布均匀,反映出试件整体在加载初期的非均匀程度较低。应变成核阶段,位于位移-载荷曲线的线性阶段,随着压力水平的增加,应变场出现多个较宽的变形集中区,简称为“核”,如图8(b)(c)(d)所示,“核”内应变值相对较大,反映出试件的不均匀程度提高,内部微观裂纹不断产生。应变局部化阶段处于软化阶段并靠近峰值载荷点,随着加载进行,多个变形集中区相互合并形成少数几条不稳定的局部化带,图8(e)中应变场左侧和右侧出现两条明显的应变局部化带,虽未形成宏观裂纹,但其力学性质上相当于一个或多个弱化带^[21],试件不均匀程度的峰值决定于这些弱化带的活动,而此时的不均匀程度接近峰值。破坏阶段位于峰值应变后,图8(f)为试件发生破坏的侧面应变场,两条局部化带进一步集中,在左侧形成一条明显的宏观裂纹,右侧有两条相对较小的裂纹,此时试件不均匀性达到最大,对比相应的试件破坏图8(g)可以发现,试件破坏形式与观测的应变云图具有较好的一致性。

水泥砂浆试件从开始受压到破坏的过程,实质是内部微观裂纹不断发展直至形成宏观裂纹并贯通的过程,微观裂纹的产生是试件整体不均匀性增加的主要原因,试件整体的不均匀性在侧面变形场演化过程中以应变局部化带反映出来,从而出现应变场的不均匀性。

通过对比经历不同温度作用后水泥砂浆试件的局部侧面应变场最终分布及对应破坏形态图(图9),得到数字图像观测结果与试件破坏形态具有较好的一致性,随着温度的升高,稳定的应变局部化带的数量不断增加,由局部应变场演化过程分析得到应变局部化带在力学性质上相当于弱化带。温度升高时,弱化带的数量增多,试件整体力学性能随之降低。由对应的侧面破坏形态图也可以看出宏观裂纹数量随温度的增加而增加,水泥砂浆试件受到温度作用的影响,整体结构变得疏松,在单轴受压状态下,温度越高宏观表现出的裂纹数量越多。

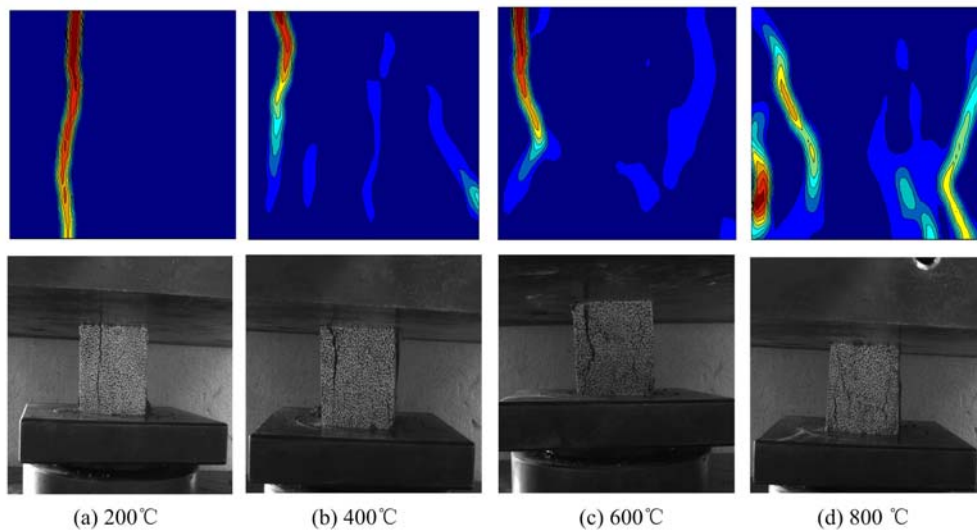


图9 龄期28d不同温度作用后水泥砂浆试件局部侧面应变场最终分布图及对应破坏形态图

Fig. 9 The final distribution of local strain field of 28d cement mortar specimen after different temperature and corresponding failure patterns

2.5 应变场统计分析

为了研究高温后水泥砂浆的变形破坏规律,对局部侧面应变场进行统计分析,利用应变统计指标 V_x 表示某一时刻侧面应变场所有应变值的标准差,如式(1):

$$V_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_i - E_x)^2} \quad (1)$$

式中, x_i 为每个特征点的应变值; E_x 为某一时刻应变场内所有特征点应变值的平均数; n 为特征点总数目。标准差能够反映一个数据集的离散程度。采用网格特征点法对侧面应变场云图均匀划分网格,每个网格交点为一个应变特征点。统计每个特征点的应变值,建立局部侧面应变离散程度的统计指标 V_x 。 V_x 值越小,表示特征点应变值趋于平均水平,应变离散程度越小,该时刻侧面应变场分布越均匀,

相当于应变均匀分布阶段; V_x 值越大,表示某些特征点应变值远离平均水平,应变离散程度越大,该时刻侧面应变场局部变形越集中,相当于应变场局部化阶段。

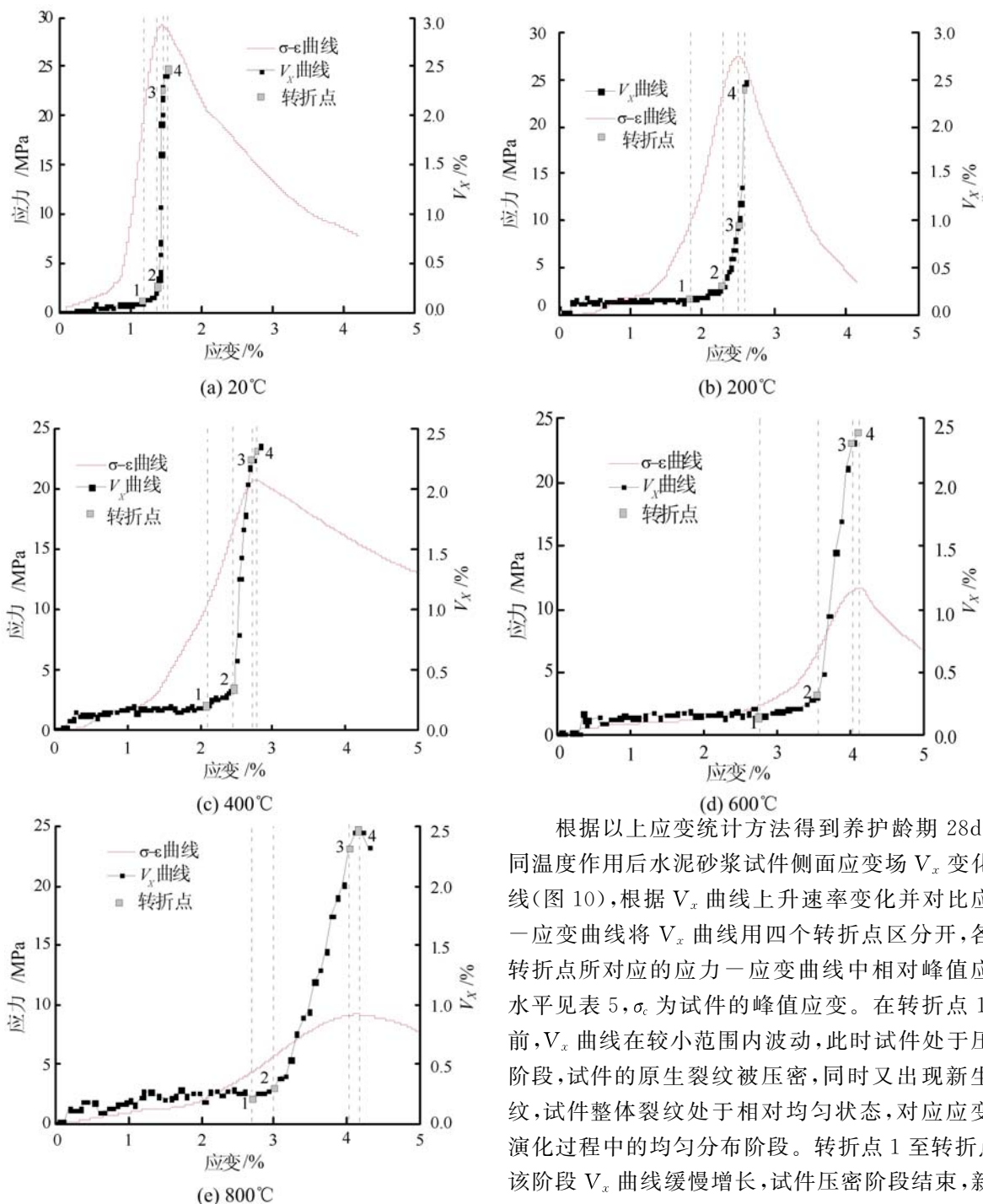


图 10 龄期 28d 不同温度作用后水泥砂浆试件侧面应变场 V_x 变化曲线
Fig. 10 The lateral strain field V_x curve of 28d cement mortar samples after different temperature

根据以上应变统计方法得到养护龄期 28d、不同温度作用后水泥砂浆试件侧面应变场 V_x 变化曲线(图 10),根据 V_x 曲线上升速率变化并对比应力—应变曲线将 V_x 曲线用四个转折点区分开,各个转折点所对应的应力—应变曲线中相对峰值应力水平见表 5, σ_c 为试件的峰值应变。在转折点 1 之前, V_x 曲线在较小范围内波动,此时试件处于压密阶段,试件的原生裂纹被压密,同时又出现新生裂纹,试件整体裂纹处于相对均匀状态,对应应变场演化过程中的均匀分布阶段。转折点 1 至转折点 2 该阶段 V_x 曲线缓慢增长,试件压密阶段结束,新生裂纹数目不断增加,导致试件非均匀程度逐渐上升,此阶段对应应变成核阶段。转折点 2 与转折点 3 之间的 V_x 曲线急剧上升,转折点 2 对应于应力—应变曲线的软化阶段开始点,该阶段的试件裂纹扩展至宏观水平,侧面应变场观测到局部化现象,试件的非均匀程度急剧增大。20°C、200°C 的转折点 3 与 400°C、600°C、800°C 的转折点 4 对应应力—应变曲线的峰值点,经过峰值点的试件承载能力逐渐下降,试件裂纹贯通,整体结构被破坏。转折点 4 之后,试件观测面有碎屑掉落,局部侧面散斑场被破

坏。

坏,DSCM 停止观测。

表 5 不同温度作用后 V_x 曲线各转折点相对峰值应力水平

Tab. 5 Relative peak stress of turning points on V_x curve after different temperature

温度/℃	转折点 1	转折点 2	转折点 3	转折点 4
20	68.2% σ_c	97.2% σ_c	100.0% σ_c	97.8% σ_c
200	37.4% σ_c	88.5% σ_c	100.0% σ_c	96.7% σ_c
400	49.5% σ_c	80.4% σ_c	99.3% σ_c	100% σ_c
600	20.7% σ_c	56.8% σ_c	12.0% σ_c	100% σ_c
800	46.8% σ_c	61.1% σ_c	99.3% σ_c	100% σ_c

对比不同温度作用后水泥砂浆试件侧面应变场 V_x 变化曲线,其变化趋势均为首先在较小范围波动然后急剧增加,达到峰值后有减小的趋势,但随着温度的升高, V_x 变化曲线中转折点 1 和 2 也不断提前出现,由 V_x 曲线各转折点相对峰值应力水平(表 5),可以看出作为 V_x 曲线开始增加的转折点 1,在常温作用后相对峰值应力水平为 68.2% σ_c ,而高温作用后相对峰值应力水平明显降低。对于 V_x 曲线急剧增加的转折点 2,常温作用后相对峰值应力水平为 97.2% σ_c ,随着温度的升高,转折点 2 相对峰值应力水平逐渐降低。温度作用对试件不均匀程度的指标 V_x 有重要影响,温度作用使水泥砂浆试件内部孔隙增大,温度越高塑性特征越明显,由于塑性较强的试件在受压过程中不均匀程度缓慢增加,相较于脆性特征明显的试件,相同应力作用下温度越高试件不均匀程度越大,所以在初始受压状态塑性特征明显的试件 V_x 曲线提前出现变化。

在转折点 2 前后, V_x 曲线有急剧上升的现象,试件发生变形破坏,这与文献[21]的研究结果相似。但转折点相对峰值应力水平有较大差距,文献[19]中无孔岩石试件的方差曲线急剧增大时,相对峰值应力水平为 99.2% σ_c ,而不同温度作用后的转折点 2 相对峰值应力水平最大为 97.2% σ_c ,相对而言,水泥砂浆试件侧面统计指标较早出现变化,这是因为岩石材料比水泥基材料具有较强的脆性特征。

高温后水泥砂浆的力学特性都有不同程度的下降,试件内部水化产物构成的骨架结构在高温作用下脱水分解,使试件表面颜色逐渐变浅,甚至有碎屑掉落,同时质量随温度升高不断降低,内部孔隙不断增多,以上表观现象说明在高温作用后,试件的不均匀程度明显增加。当温度高于 400℃,水泥砂浆试件的单轴抗压强度、弹性模量和峰值应变都有大幅下降,其主要原因是构成试件骨架结构的水化产物脱水分解,造成整体力学性能降低,另外试件的脆性与塑性特征的临界温度为 600℃,脆性较强的试件破坏具有突然性,而塑性特征明显的试件破坏虽然具有渐变性的,但是变形相对较大。为了更好地揭示高温作用后试件的变形规律,对试件局部侧面变形进行观测分析,局部侧面应变场演化过程分为四个阶段。在应变均匀分布阶段,压应力水平较低,侧面应变场分布均匀;在应变成核阶段,应变场出现多个较宽的变形集中区;在应变局部化阶段,多个变形集中区相互合并形成几条不稳定的局部化带,试件的不均匀程度的峰值决定于这些弱化带的活动;在破坏阶段,形成稳定的局部化带,与试件宏观裂纹具有较好的一致性。为了预测局部侧面应变场演化规律,采用标准差统计应变场信息,得到表征试件不均匀程度的指标 V_x ,通过分析不同温度作用后水泥砂浆试件侧面应变场 V_x 变化曲线图 10,发现温度作用对试件不均匀程度的指标 V_x 有重要影响,高温作用使得转折点 2 相对峰值应力水平逐渐降低,转折点 2 作为 V_x 曲线由缓慢波动到急剧增加的临界点,对于高温后材料变形破坏的预测具有重要参考价值。

3 结论

(1) 在 200℃~800℃温度作用后,高龄期的水泥砂浆试件在高温作用下更易发生破坏,水化反应形成的结构骨架在高温作用下失水分解,造成单轴抗压强度的降低。

(2) 随着温度的升高,试件表面颜色经历青灰色、泛黄、泛白、灰白色,裂纹数目不断增多,试件整体疏松程度逐渐增加,20℃、200℃和 400℃作用后的水泥砂浆试件具有明显的脆性特征,相对而言,600℃和 800℃作用后的试件塑性特征明显。

(3) 侧面应变场演化过程分为四个阶段:应变均匀分布阶段、应变成核阶段、应变局部化阶段、破坏阶段,分别对应于应力—应变曲线的初始压密阶段、线弹性阶段、软化阶段、峰后阶段。

(4) 利用标准差统计侧面应变场应变表征试件不均匀程度,在试件应力—应变曲线接近峰值应力时,应变场标准差急剧增大,表明试件即将发生破坏,水泥砂浆试件破坏前侧面应变场统计指标的变化规律特征可为高温作用后水泥基材料变形破坏的预测提供参考。

参考文献:

- [1] 贾彬,陶俊林,王汝恒,等. 混凝土高温动态力学特性与本构方程[J]. 实验力学, 2013, 28(6):723—731 (JIA Bin, TAO Junlin, WANG Ruheng, et al. On the dynamic mechanical properties and dynamic constitutive equation of concrete at high temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(6):723—731 (in Chinese))
- [2] 李清海,姚燕,孙蓓,等. 高温对水泥砂浆强度的影响及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6):699—703 (LI Qinghai, YAO Yan, SUN Bei, et al. Mechanism of effect of elevated temperature on compressive strength of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6):699—703 (in Chinese))
- [3] 陶俊林,李奎. 水泥砂浆的一个热粘弹性率型损伤本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3):268—273 (TAO Junlin, LI Kui. A thermo-viscoelastic rate-dependent constitutive equation for cement mortar with damage[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(3):268—273 (in Chinese))
- [4] 刘威,熊良宵,潘海峰. 高温循环作用下水泥砂浆的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7):2314—2317 (LIU Wei, XIONG Liangxiao, PAN Haifeng. Mechanical properties of cement mortar under high temperature cycles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(7):2314—2317 (in Chinese))
- [5] 何振军,宋玉普. 高温后高强高性能混凝土双轴压强度规律与破坏准则[J]. 工程力学, 2009, 26(2):124—130 (HE Zhenjun, SONG Yupu. Strength and failure criterion of plain high-strength high-performance concrete under biaxial compression surviving high temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2):124—130 (in Chinese))
- [6] 何远明,霍静思,陈柏生,等. 高温后混凝土 SHPB 动态力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9):200—208 (HE Yuanming, HUO Jingsi, CHEN Baisheng, et al. Impact tests on dynamic behavior of concrete elevated temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9):200—208 (in Chinese))
- [7] Ergün A, Kürklü G, Băpünar M S. The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112:691—698.
- [8] Tamrazyan A G, Avetisyan L A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures[J]. Procedia Engineering, 2016, 153:721—725.
- [9] Janotka I, Mojumdar S C. Thermal analysis at the evaluation of concrete damage by high temperatures[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2005, 81(1):197—203.
- [10] 杨建林,王来贵,潘纪伟,等. 玄武岩纤维增强水泥砂浆的拉破坏试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2):536—542 (YANG Jianlin, WANG Laigui, PAN Jiwei, et al. Experimental research on tensile failure of cement mortar reinforced by basalt fiber[J]. Bulletin of Chinese Ceramic Society, 2016, 35(2):536—542 (in Chinese))
- [11] 肖建庄,黄运标. 高温后再生混凝土残余抗压强度[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3):255—259 (XIAO Jianzhuang, HUANG Yunbiao. Residual compressive strength of recycled concrete after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3):255—259 (in Chinese))
- [12] 李卫,过镇海. 高温下混凝土的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1):8—16 (LI Wei, GUO Zhenhai. Experimental investigation of strength and deformation of concrete at elevated temperature[J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(1):8—16 (in Chinese))
- [13] 宋义敏,马少鹏,杨小彬,等. 断层黏滑动态变形过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1):171—179 (SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, et al. Experimental study on the dynamic displacement evolution of fault in stick-slip process[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1):171—179 (in Chinese))
- [14] 潘一山,杨小彬,马少鹏,等. 岩土材料变形局部化的实验研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3):281—284 (PAN Yishan, YANG Xiaobin, MA Shaopeng, et al. Experimental study on the deformation localization of rock-soil material[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3):281—284 (in Chinese))
- [15] 李敏,钱春香,王珩,等. 高强混凝土受火后力学性能变化规律的研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 11(31):1116—

- 1120 (LI Min, QIAN Chunxiang, WANG Heng, et al. Mechanical properties of high-strength concrete after fire [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 11(31):1116—1120 (in Chinese))
- [16] 王峥. 混凝土高温后力学性能的试验研究[D]. 大连理工大学, 2010 (WANG Zheng. Experimental study on mechanics properties of concrete after high temperature[D]. Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese))
- [17] 何渐渐, 郑学成, 林社勇. 粉煤灰混凝土强度统计特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1):59—65 (HE Xixi, ZHENG Xuecheng, LIN Sheyong. The experimental studies on the statistical characteristics of fly ash concrete strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1):59—65 (in Chinese))
- [18] 许小燕, 袁广林, 成林燕, 等. 高温对高强度水泥砂浆强度影响的试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(5):35—38, 48 (XU Xiaoyan, YUAN Guanglin, CHENG Linyan, et al. Experimental study on the effect of high temperature on the strength of high-strength cement mortar[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 28(5):35—38, 48 (in Chinese))
- [19] 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 (LIU Peng, YU Zhiwu, CHEN Lingkun. Influence of curing age on properties and micro structure of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(5):717—723 (in Chinese))
- [20] 吴波, 袁杰, 王光远. 高温后高强混凝土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2):8—12, 34 (WU Bo, YUAN Jie, WANG Guangyuan. Experimental research on the mechanical properties of HSC after high temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(2):8—12, 34 (in Chinese))
- [21] 马少鹏, 周辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8):1667—1673 (MA Shaopeng, ZHOU Hui. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8):1667—1673 (in Chinese))

Experimental study of compressive behavior and deformation field evolution of cement mortar sample subjected to elevated temperature

WANG Lai-gui¹, CHEN Qiang¹, YANG Jian-lin^{1,2}, LIU Xiang-feng¹, LIU Jian², ZHAO Yue²

(1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the compression behavior and deformation failure pattern of cement mortar sample subjected to different high temperatures, uniaxial compression experiment was carried out. In experiment, digital speckle correlation method (DSCM) was adopted to observe sample's local deformation; the evolution of strain field was analyzed by standard deviation statistics. Experimental results show that (1) At the temperatures of 200℃ to 800℃, cement mortar samples with high curing age are more prone to failure, the reduction of cement mortar sample uniaxial compressive strength is mainly due to the decomposition of skeleton structure formed by hydration reaction after high temperature action; (2) Cement mortar samples have obvious brittle feature when temperature is 20℃, 200℃ and 400℃ respectively, in contrast, plastic characteristics of cement mortar sample are obvious when temperature is 600℃ and 800℃ respectively; (3) Evolution process of local strain field can be divided into four stages: strain uniform distribution stage, strain nucleation stage, strain localization stage and failure stage; (4) Standard deviation statistics is used to characterize the uneven degree of sample deformation. Compared with sample's overall stress-strain curve, the standard deviation of strain field increases sharply, when stress is approaching peak value, which indicates that the sample is close to damage. Above results can provide a reference for predicting the deformation and failure of cement-based materials after high temperature action.

Keywords: high temperature; cement mortar sample; digital speckle; deformation and failure; standard deviation statistics