

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.017

# 水泥基材料瞬时高温作用下的爆裂与力学性能

马保国, 王耀城, 穆松, 金磊

(武汉理工大学硅酸盐材料工程教育部重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:**水泥基材料经瞬时高温作用后,随受火温度不同,表现出不同的爆裂与力学性能。研究了掺加不同矿物掺和料的水泥基材料在不同的瞬时高温作用后爆裂与力学性能的影响。结果表明:在100℃和300℃瞬时高温作用下,所有试样外观完整,未发生爆裂;600℃时,所有试件发生粉碎性爆裂。与室温下水泥基材料的物理力学性能相比,在经历瞬时100℃作用后,试样的抗压、抗折强度损失率分别达到15%和30%以上;经受300℃作用后,强度恢复至室温时强度水平;温度高于300℃时,随温度的升高,强度逐渐降低;当温度高于600℃时,强度急剧衰减。其中,复掺20%矿粉和10%硅灰的试样经历的低温( $\leq 300$ ℃)作用后,抗压、抗折强度均随温度的增加而提高。SEM分析表明,经600℃高温作用2h后,硬化水泥浆体C-S-H整体结构疏松,水化产物连续相被分割为非连续相。

**关键词:**水泥基材料;爆裂;瞬时高温;物理化学变化;微观结构

**中图分类号:**TQ172 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0109-05

## Spalling and Physical Properties of Cement-Based Material Under Instantaneous High Temperature

Ma Baoguo, Wang Yaocheng, Mu Song, Jin Lei

(Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education,  
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

**Abstract:** Cement-based material has different spalling and physical properties after exposing to different high temperatures. The spalling and physical properties of cement-based material with different additives after exposing to instantaneous high temperature were analyzed. The results show that: all samples have no spalling both at 100℃ and 300℃, but spalling completely at 600℃. The compressive strength and flexural strength of the cement-based material at 100℃ decrease by the rate of 15% and 30%, and the value at 300℃ is close to that at room temperature and decreases rapidly after exposing to 600℃. Both the compressive and the flexural strength of samples with 20% slag powder and 10% silica fume increase with the increase of the temperature when the temperature is below 300℃. SEM reflects that after exposing to 600℃ for 2 hours, C-S-H has changed into a looser structure, and the continuously cement paste is separated into segments.

**Key words:** cement-based material; spalling; instantaneous high temperature; physical chemistry change; microstructure

随着地下空间的开发,越来越多的地铁隧道建成并投入使用。隧道长度、交通密度、车辆载重、使

用频率的增加,都使得发生火灾的可能性逐渐增大。混凝土作为地下交通工程的主要建筑材料,其高温

收稿日期:2013-03-11

基金项目:国家“863”资助项目(2005AA332010)

作者简介:马保国(1957-),男,博士生导师,主要从事先进水泥基复合材料研究,(E-mail)mbgjob@163.com。

性能直接与建筑物的稳定性密切相关<sup>[1-2]</sup>,因此对混凝土高温性能进行研究具有重要意义。

Hertz<sup>[3]</sup>提出混凝土高温下的爆裂和性能劣化趋势与其水灰比及掺合料种类、掺量等因素有关。Papayianni 等<sup>[4]</sup>的研究表明:随着温度从室温增加至 800 °C,硬化水泥石表现出先膨胀后收缩再膨胀的过程,而粗骨料则逐渐膨胀。傅宇方等<sup>[5]</sup>和肖建庄等<sup>[6]</sup>提出混凝土高温后性能的劣化与硬化水泥石与骨料之间的界面过渡区的存在密切相关。Conso-lazio 等<sup>[7]</sup>的研究表明:混凝土中的界面过渡区可有效降低水泥基材料中的蒸汽压。综上所述,由于硬化水泥石与骨料之间热致变形的差异,混凝土中存在尺寸与数量较大的界面薄弱区,有利于高温下混凝土内部水分的脱逸。因此,混凝土试件对水泥基材料的高温爆裂现象不敏感。为了有效反映不同水泥基材料高温爆裂的敏感性,应细化界面薄弱区,提高结构均匀密实性。因此,本文采用水泥胶砂试件来研究不同矿物掺合料(粉煤灰、矿粉和硅灰)对水泥基材料高温爆裂的影响<sup>[4]</sup>,分析了不同掺合料对高温下水泥基材料性能的作用,探讨了高温对硬化水泥石微观结构的破坏。

## 1 试验

### 1.1 原材料

武汉亚东水泥有限公司生产 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,3 d 抗压强度为 27.3 MPa,3 d 抗折强度 6.0 MPa,28 d 抗压强度为 52.7 MPa,28 d 抗折强度为 9.1 MPa;武钢矿粉,比表面积为 450 m<sup>2</sup>/kg;武汉阳逻辉虹牌 II 级粉煤灰;武汉硅灰;武钢浩源 FDN“ZG” 萘系高效减水剂;巴河河砂。

### 1.2 水泥基材料试件制备

按照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》进行试件的成型,养护和强度试验,养护龄期为 60 d,达到龄期后静置 72 h,以 3 个 40 mm×40 mm×160 mm 试件为 1 组进行高温爆裂试验。试件配比见表 1。

表 1 不同掺合料制备水泥基材料配比

编号	配比/g						
	PO42·5	砂	水	减水剂	粉煤灰	矿粉	硅灰
b-0	450	1 350	205	4.5			
b-1	360	1 350	205	4.5	90		
b-2	360	1 350	205	4.5		90	
b-3	360	1 350	205	4.5			90
b-4	315	1 350	205	4.5	90		45
b-5	315	1 350	205	4.5		90	45

### 1.3 试验方法

爆裂试验研究了不同掺合料制备试件在不同温度作用下的爆裂程度,其中温度为 100、300、600 °C,保温时间 2 h。爆裂试验模拟火灾作用时,掺加不同掺合料的试件在温度场急剧升温过程中的爆裂程度与力学性能,将不同掺合料制备的试件置于达到了预定温度的高温炉中,保温时间从试件置于预定温度场中开始计时。在保温过程中,根据爆裂声记录试件发生第 1 次爆裂的时间,受热 30 min 后,打开炉门观察试件的损伤情况;保温 2 h 后取出试件冷却至 25 °C,进行物理力学性能的测试。

XRD 分析采用日本 Rigaku(理学)公司 D/Max-RB 转靶 X 射线衍射仪析进行物相分析,试验衍射角为 5~60°,扫描速率为 10°/min。

SEM 采用日本 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜进行微观形貌分析。

## 2 结果及讨论

### 2.1 细骨料水泥基材料高温爆裂现象及机理

在室温至 300 °C 的温度阶段,不同配比的试件瞬时暴露在 100 和 300 °C 的 2 个目标温度场中,试件承受了内外温差 75 及 275 °C 的温度梯度的作用。所有配合比试件在保温 2 h 后,外观依然完整,均未发生爆裂现象(图 1、图 2 举例了不同组试件在 100 和 300 °C 作用后的外观)。试件在 100 °C 作用下,水化产物内部的自由水受热挥发脱附;在 300 °C 作用下,试件内部凝胶水挥发脱逸<sup>[8]</sup>。

将试件瞬时暴露于 600 °C 的温度中时,试件表面经历约 575 °C 的温度梯度作用,所有试件在受火后 5 min 内均发生了爆裂,并伴随剧烈的爆炸声,保温 30 min 后,发现试件均为粉碎性爆裂(见图 3)。在 300~600 °C 的过程中,水泥基材料的变化可能为结构水的脱逸和 SiO<sub>2</sub> 的同质多相转化。其中,占水泥石质量 6%~12% 的 Ca(OH)<sub>2</sub> 在 450 °C 左右发生脱水,使不同掺合料制备试件承受反应生成气体造成的体积膨胀,与此同时,C-S-H 凝胶也发生了脱水分解,水泥石体积收缩,细骨料受热发生膨胀,导致材料内部孔结构承受较大的张应力;当温度升高至 573 °C 时,β-SiO<sub>2</sub> 转变为 α-SiO<sub>2</sub>,又伴随了 0.82% 的体积膨胀,试件内部结构所承受的张应力进一步增加。当应力达到或超过试件的屈服强度时,试件发生爆裂<sup>[9]</sup>;此外,温度梯度产生的温度应力加剧了爆裂的发生<sup>[10]</sup>。

对比同组试件在 3 个不同温度作用下的颜色发现:随着试件受到的温度作用的升高,试件的颜色逐渐变浅。

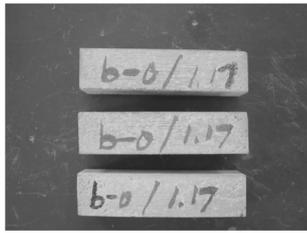


图1 100 °C时试件外观



图2 300 °C时试件外观



图3 600 °C作用后爆裂试件

## 2.2 高温后胶砂试件物理力学性能

2.2.1 抗压强度 对掺加不同矿物掺合料的水泥基材料,常温下及经过100、300 °C高温损伤后进行抗压强度测试。b-0~b-4试件经历100 °C后的强度,低于室温下及经历300 °C后强度;b-5试件在300 °C之前,强度随温度的升高而升高。结果如图4所示,强度损失率见表2。

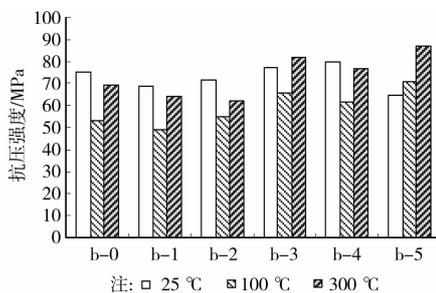


图4 高温作用后不同掺合料制备试件的抗压强度

表2 高温作用后试件的抗压强度损失率

试件编号	25 °C试件抗压强度	100 °C抗压强度损失率/%	300 °C抗压强度损失率/%
b-0	75.06	-29.31	-7.90
b-1	68.81	-28.60	-6.44
b-2	71.59	-23.24	-12.99

续表2

试件编号	25 °C试件抗压强度	100 °C抗压强度损失率/%	300 °C抗压强度损失率/%
b-3	77.33	-14.90	5.68
b-4	79.75	-22.67	-3.69
b-5	64.50	9.30	35.01

注:强度损失率=(某温度时强度-25 °C时强度)/25 °C时强度。

从温度场对不同掺合料制备试件抗压强度的影响中,可概括出如下规律<sup>[11-12]</sup>:

100 °C时试件抗压强度发生损失,可能与钙矾石分解和砂浆试件内部吸附水蒸发后孔隙率的增加有关<sup>[14]</sup>。随着矿物掺合料的加入,不同活性的矿物掺合料对试件的微观结构造成了影响,硅灰的加入有效提高了试件的密实度,改善了试件的孔结构,使孔径变小,从而使试件中水分多分布于毛细孔或凝胶孔中<sup>[13]</sup>。因此,100 °C时,b-3试件由于自由水蒸发而导致强度降低的程度低于b-0~b-2。

300 °C时,不同掺合料制备的试件抗压强度都明显比100 °C时的强度高,相对25 °C的抗压强度损失率也明显降低。原因可能在于300 °C时,由于高温的蒸汽养护,水泥颗粒进一步水化,提高了试件的强度;水泥石中毛细孔或凝胶孔中大量水分的丧失和矿物中结晶水的失去,产生了收缩变化,使得整个试件内部处于一种预应力状态,从而提高了承受外界荷载的能力。b-3与b-5试件300 °C的抗压强度超过了25 °C时的强度,这与硅灰和矿粉的较高活性相关,高活性的掺合料将有助于水泥石体系的密实,从而增加微孔的比重,在受热大量脱水后,孔结构的收缩作用将明显得到体现。

2.2.2 抗折强度 水泥基材料的抗折强度表现出的规律与抗压强度一致:b-0~b-4试件经历100 °C后的抗折强度,低于25 °C及经历300 °C后的强度;b-5试件在低于300 °C时,随温度的升高而升高。

b-0经历300 °C的高温作用后,与100 °C时的抗折强度相比,强度增加了约2.3 MPa,强度增长率达到33%。b-1试样抗折强度增加了约3.0 MPa,强度增长率达到41%。b-2的抗折强度增加了1.9 MPa,强度增长率达到27%。b-3增加了约4.0 MPa,强度增长率达到61%。b-4增加了约5.0 MPa,强度增长率达到84%。b-5增加了约3.3 MPa,强度增长率达到43%(见图5)。

强度结果存在如下规律:目标温度场从100 °C增加至300 °C时,不同掺合料制备的试件抗折强度存在明显的增长趋势,这与抗压强度的结果一致。其中,粉煤灰与硅灰的掺入能有效的改善经历高温作用后试件的抗折强度,特别是b-3与b-4的增长率

分别达到 61% 与 84%；矿粉的掺入会减少试件经历高温作用后的强度增加百分比。

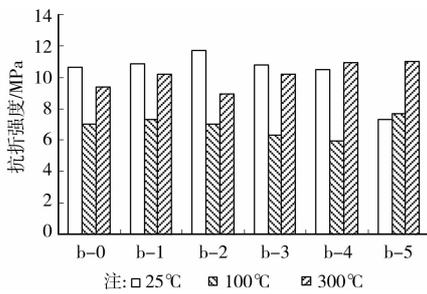


图 5 高温作用后不同掺合料制备试件的抗折强度

### 3 微观测试分析

#### 3.1 高温后 XRD 分析

b-0 与 b-2 试样在 25°C 下的矿物组成主要为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。随着温度的增加,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的 XRD 特征峰 ( $d=2.6292$ ) 强度值随着温度增加而逐步减少; 而且从 25°C 到 600°C 的不同阶段,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的 XRD 特征峰峰形经历了独立峰宽化变为非晶态隆起包的过程, 这表明温度的增加导致了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体结构发生了破坏, 结晶程度下降(见图 6、图 7)<sup>[14]</sup>。

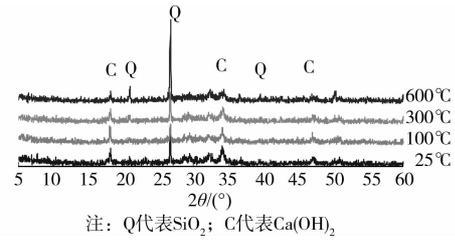


图 6 b-0 不同温度下 XRD 分析

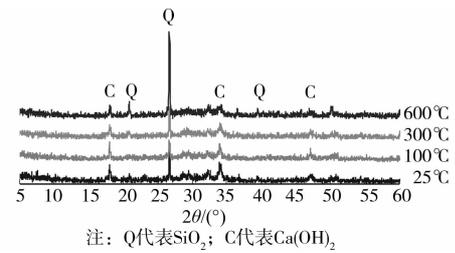


图 7 b-2 不同温度下 XRD 分析

#### 3.2 高温后 SEM 分析

图 8(a)、(b)、(c) 分别为 b-0 在 100、300、600 °C 下的 SEM 图片; 图 9(a)、(b)、(c) 分别为 b-2 在 100、300、600 °C 下放大 5 000 倍的 SEM 图片。

从 b-0、b-2 试件 SEM 图片中可以看出: 随温度的升高水泥石逐渐被破坏, 100 °C 时  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体呈规则的六方片状结构, C-S-H 凝胶排布紧密;

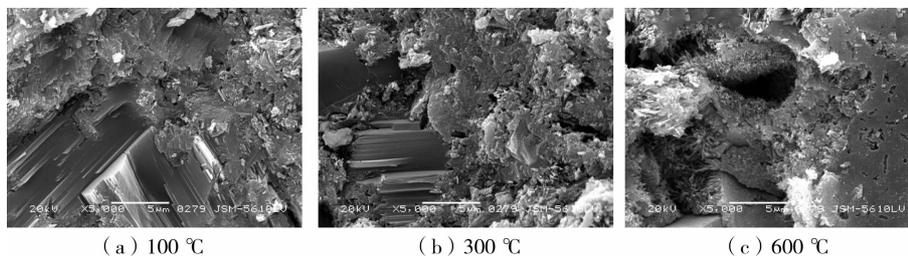


图 8 b-0 不同温度下 SEM( $\times 5\ 000$ )

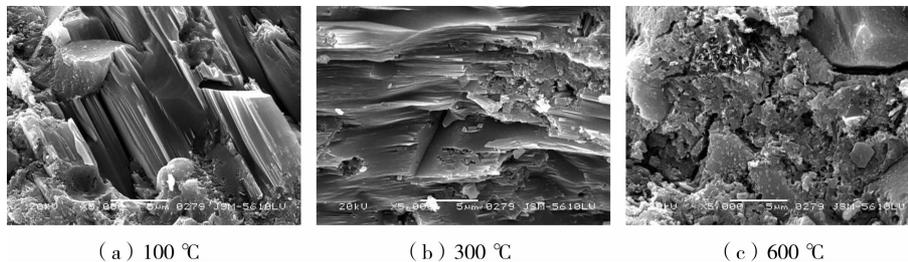


图 9 b-2 不同温度下 SEM( $\times 5\ 000$ )

300 °C 时  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体存在缺陷, 发生了破坏, C-S-H 凝胶存在微小孔洞。600 °C 时  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体形貌已经不存在, C-S-H 凝胶破坏严重, 凝胶颗粒间孔洞较大, 水化产物连续相被分割为非连续相<sup>[15]</sup>。

## 4 结 论

1) 粉煤灰、矿粉、硅灰分别掺入 20% 替代水泥的试件和掺入 20% 粉煤灰、10% 硅灰与掺入 20% 矿粉、10% 硅灰的试件, 在 100 和 300 °C 的瞬时高温作

用2h后,试件外观完整,未发生缺损;在600℃高温作用后,所有试件粉碎性爆裂。

2)水泥基材料在经受100℃温度作用后,由于钙矾石分解和砂浆试件内部吸附水蒸发后孔隙率的增加,抗压、抗折强度相比室温时下降15%与30%以上;经受300℃温度作用后的试件,水泥颗粒受高温蒸养进一步水化,而且水泥石微孔中水分散失产生的收缩,使试件内部处于预应力状态,而使强度恢复至室温时水平;温度高于300℃时,强度逐渐降低,当温度升高至高于600℃时,水泥石结构破坏,裂缝增大,强度急剧衰减。温度低于300℃时,复合掺加20%矿粉和10%硅灰的试件抗压、抗折强度均随温度的升高而升高。

3)300℃时,水泥基材料试件的抗折强度高于100℃时的强度,增幅达到27%~84%。粉煤灰、硅灰对300℃至100℃水泥基材料抗折强度增加的现象有促进作用,矿粉降低了这一过程抗折强度增加的幅度。

4)XRD、SEM测试表明:温度的升高导致了Ca(OH)<sub>2</sub>晶体结构发生了破坏,结晶程度下降至消失;C—S—H凝胶在温度升高的过程中也发生了明显的破坏,25℃时连续相凝胶团,在高温时被裂缝及孔隙洞分割为非连续相,且随温度的升高裂缝逐渐增大。

#### 参考文献:

- [1] 吕天启. 高温后混凝土静置性能的试验研究及已有建筑物的防火安全评估[D]. 大连:大连理工大学,2002.
- [2] Saafi M. Effect of fire on FRP reinforced concrete members [J]. *Composite Structures*,2002,58:11-20.
- [3] Hertz K D. Limits of spalling of fire-exposed concrete [J]. *Fire Safety Journal*,2003,38:103-116.
- [4] Papayianni I, Valliasis T H. Heat deformations of fly ash concrete [J]. *Cement & Concrete Composites*,2005,27:249-254.
- [5] 傅宇方,黄玉龙,潘智生,等. 高温条件下混凝土爆裂机理研究进展[J]. *建筑材料学报*,2006,9(3):323-329.  
Fu Y F, Huang Y L, Pan Z S, et al. Literature review of study on mechanism of explosive spalling in concrete at elevated Temperatures [J]. *Journal of Building Materials*,2006,9(3):323-329.
- [6] 肖建庄,李杰,孙振平. 高性能混凝土结构抗火研究最新进展[J]. *工业建筑*,2001,31(6):53-56.
- Xiao J Z, Li J, Sun Z P. Review of studies on the fire-resistance behavior of HPC structures [J]. *Industrial Construction*,2001,31(6):53-56.
- [7] Consolazio G R, Mcvay M C, Rish J W. Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating [J]. *ACI Materials Journal*,1998,95(5):525-536.
- [8] Hertz K D. Limits of spalling of fire-exposed concrete [J]. *Fire Safety Journal*,2003,38:103-116.
- [9] 柳献,袁勇,叶光,等. 高性能混凝土高温爆裂的机理探讨[J]. *土木工程学报*,2008,41(6):61-68.  
Liu X, Yuan Y, Ye G, et al. Investigation on the mechanism of explosive spalling of high performance concrete at elevated temperatures [J]. *China Civil Engineering Journal*,2008,41(6):61-68.
- [10] 朋改非,陈延年,冯乃谦,等. 高强混凝土遭受高温的性能衰减特征[J]. *混凝土*,1999,24(1):16-19  
Peng G F, Chen Y N, Feng N Q, et al. Performance degradation characteristics of HSC after suffering high temperature [J]. *Concrete*,1999,24(1):16-19.
- [11] Han C G, Han M C, Heo Y S. Improvement of residual compressive strength and spalling resistance of high-strength RC columns subjected to fire [J]. *Construction and Building Materials*,2009,23:107-116.
- [12] Chan S Y N, Luo X, Sun W. Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*,2000,14:261-266.
- [13] 阎慧群,雷兵,王清远,等. 隧道火灾高温后混凝土的力学性能研究[J]. *四川大学学报*,2008,40(5):74-78  
Yan H Q, Lei B, Wang Q Y. Influence of elevated temperature on mechanical properties of concrete in tunnel fire [J]. *Journal of Sichuan University*,2008,40(5):74-78.
- [14] 吴波,袁杰,杨成山. 高温后高强混凝土的微观结构分析[J]. *哈尔滨建筑大学学报*,1999,32(3):8-13.  
Wu B, Yuan J, Yang C S. Analysis of the microstructure of HSC after high temperature [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*,1999,32(3):8-13.
- [15] 穆松. 长江隧道管片混凝土高温特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.

(编辑 王秀玲)