

文章编号: 1000-5013(2012)03-0304-06

# 带粉刷层混凝土试块高温后 抗压性能试验及数值模拟

刘阳<sup>1</sup>, 郭子雄<sup>1</sup>, 杜耀峰<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门市建筑科学研究院集团股份有限公司, 福建 厦门 361004)

**摘要:** 以过火温度和粉刷层厚度等参数为主要研究对象,通过 27 个带混合砂浆粉刷层的混凝土立方体试块高温作用后的抗压性能试验,并与其热-结构耦合数值计算分析的结果进行对比. 研究结果表明:高温作用后混凝土的损伤程度与过火温度、粉刷条件、恒温持时和静置时间等有关;过火温度越高,损伤越严重,抗压强度越低;粉刷层对遭受火灾作用的混凝土结构有较好的保护作用,能有效减少外部能量输入结构;四面受火混凝土试块的温度分布呈环形分布由表面向内部温度逐渐降低,且试块截面 4 个角部温度最高.

**关键词:** 混凝土; 抗压性能; 粉刷层; 热-结构耦合分析; 高温

**中图分类号:** TU 528; TB 302

**文献标志码:** A

国内外学者对混凝土的高温力学性能进行了大量的试验研究,并取得了较为丰富的试验成果. 这些试验研究主要是以各种无粉刷层的混凝土<sup>[1-4]</sup>作为研究对象,而对带粉刷层混凝土的高温性能研究尚少见报导. 根据本课题组大量火灾现场踏勘和灾损鉴定发现,导热系数相对更低的粉刷层往往能够有效地减少火灾时结构的热量输入,从而延缓和减轻结构的损伤. 因此,在构件温度场计算和火灾损伤鉴定中,不宜直接套用无粉刷层混凝土高温力学性能的研究结果. 基于以上考虑,本课题组开展了一批带粉刷层混凝土试块的高温后抗压性能试验<sup>[5]</sup>,并采用红外热像技术对高温后混凝土试块的损伤进行了探测<sup>[6]</sup>,基于试验结果,提出了带粉刷层混凝土试块高温后抗压强度的计算公式. 利用有限元软件进行结构或构件的热-结构耦合数值模拟是混凝土结构火灾后抗震性能评估的主要手段之一,而材料本构的合理设置是数值模拟是否可信的关键. 国内外关于混凝土火灾后的本构关系有很多研究成果<sup>[7-10]</sup>,但关于带粉刷层的混凝土高温后材料本构的研究尚未见公开报道. 本文以过火温度和粉刷层厚度等参数为主要研究对象,进行带混合砂浆粉刷层的混凝土立方体试块高温作用后的抗压性能试验和数值模拟的对比.

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作与试验参数

试件尺寸为边长 150 mm 的标准混凝土立方体试块,共 27 个. 其中 15 个试块表面粉刷有 15 mm 厚的混合砂浆层. 为模拟工程中混凝土构件纵向热输入很少的实际受热状态,在所有试块的顶面和底面采用陶瓷纤维隔热纸(180 mm×180 mm×3 mm)加以封闭.

试验温度有 3 个等级,分别是 800,1 000 和 1 200 °C,而试验组别分为 A~F 组,9 种工况,每个实验工况下有 3 个试块用于高温后轴压试验. 其中:编号 A8,C8,C12,E10 为无粉刷层试块;编号 B8,B12,D8,D12,F10 为带粉刷层试块. 另外,对应 9 种工况制作 3 组(T1,T2,T3)共 9 个试块作为无粉刷层未过火对比试块,T1,T2,T3 的实测抗压强度分别为 35.7,37.0,33.1 MPa.

**收稿日期:** 2011-09-26

**通信作者:** 刘阳(1982-),男,讲师,博士,主要从事工程结构抗震与减灾的研究. E-mail:lyliuyang@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51006133, 50978107);福建省自然科学基金资助项目(2010J01298);福建省厦门市科技计划项目(350Z20103030);华侨大学科研基金资助项目(09BS620)

1.2 试验升降温制度与监测

采用 SX2-10-13 型高温箱式电炉进行加热以模拟火灾温度作用. 电炉的炉膛尺寸为 400 mm×200 mm×160 mm, 额定功率为 10 kW, 额定工作温度 1 300 ℃. 炉内温度由 KSY15-16 型温度控制器控制, 达到预定温度后自动保持恒温 25 min. 恒温到预定时间后, 打开炉门让试块在炉内冷却到 300 ℃后取出, 置于空气中继续冷却到室温并静置至少 7 d, 再进行后续的试验工作.

基于设备条件限制, 试验升降温过程通过人工采集 KSY15-16 型温度控制器上显示的炉腔温度建立实测升降温曲线, 如图 1 所示.

1.3 主要试验结果

1.3.1 试验现象 混凝土立方体试块的破坏形态与历史遭受温度作用水平有关, 随着温度作用水平的增加, 破坏形态由常温下正倒相接的四角锥体破坏形态逐渐向整体压碎破坏形态过渡. 相同温度水平作用下, 对比破坏形态图(图 2)可以发现, 无粉刷层的混凝土试块的破坏形态更接近整体压碎破坏, 历史遭受损伤更严重.

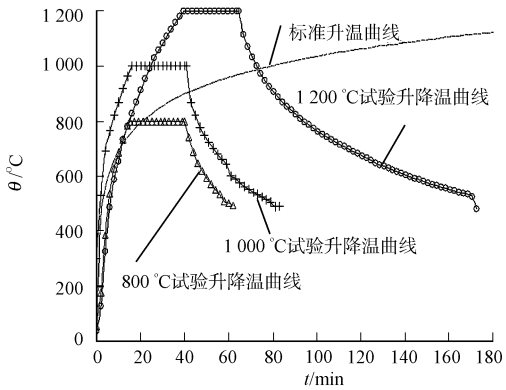


图 1 炉内实测升降温曲线  
Fig. 1 Temperature-time curve in furnace



图 2 试块的破坏形态

Fig. 2 Failure modes of specimens

1.3.2 试块抗压强度分析 高温后, 各混凝土试块的抗压强度试验结果, 如表 1 所示. 表 1 中:  $\theta$  为历史过火温度;  $f_{cu}(\theta)$  和  $f_{cu,k}(\theta)$  分别是遭受温度  $\theta$  作用后的抗压强度值和不同试验工况下的抗压强度代表值;  $\beta$  为抗压强度比,  $\beta = \frac{f_{cu,k}(\theta)}{f_{cu}(\theta)}$ .

表 1 混凝土试块抗压强度试验结果

Tab. 1 Axial compressive strength of specimens

编号	$\theta/^\circ\text{C}$	$f_{cu}(\theta)/\text{MPa}$	$f_{cu,k}(\theta)/\text{MPa}$	$\beta$	编号	$\theta/^\circ\text{C}$	$f_{cu}(\theta)/\text{MPa}$	$f_{cu,k}(\theta)/\text{MPa}$	$\beta$
A8-1	800	28.92		0.79	B8-1	800	33.43		0.91
A8-2	800	26.51	28.36	0.79	B8-2	800	30.78	32.6	0.91
A8-3	800	29.65		0.79	B8-3	800	33.60		0.91

续表

Continue table

编号	$\theta/^\circ\text{C}$	$f_{\text{cu}}(\theta)/\text{MPa}$	$f_{\text{cu,k}}(\theta)/\text{MPa}$	$\beta$	编号	$\theta/^\circ\text{C}$	$f_{\text{cu}}(\theta)/\text{MPa}$	$f_{\text{cu,k}}(\theta)/\text{MPa}$	$\beta$
C8-1	800	35.54		0.75	D8-1	800	39.44		1.04
C8-2	800	26.89	27.62	0.75	D8-2	800	35.15	38.31	1.04
C8-3	800	27.62		0.75	D8-3	800	40.34		1.04
E10-1	1 000	14.73		0.38	D12-1	1 200	11.84		0.32
E10-2	1 000	12.47	12.47	0.38	D12-2	1 200	9.90	11.84	0.32
E10-3	1 000	10.82		0.38	D12-3	1 200	12.16		0.32
C12-1	1 200	5.93		0.16	B12-1	1 200	9.27	9.27	0.26
C12-2	1 200	—	5.81	—	F10-3	1 000	18.44	18.44	0.56
C12-3	1 200	5.68		0.16					

由表 1 可知:混凝土强度等级对抗压强度比的影响不明显;与无粉刷层混凝土试块相比,带粉刷层混凝土试块抗压强度比较高,说明砂浆粉刷层在建筑火灾时,能有效地限制高温热量的输入,对结构构件有较好的保护作用.

2 热-结构耦合有限元分析

2.1 分析步骤

利用 ANSYS 间接耦合法进行热-结构耦合分析,步骤如下:1) 建立几何模型,选择适当的热单元进行网格划分并转换为有限元模型;2) 定义热分析类型,包括传导、对流、辐射和表面效应单元等,并选择稳态或瞬态热分析完成热分析求解过程;3) 重回到前处理(/PREP 7)进行单元转换,将热单元转换成结构单元,并设置单元属性,添加材料属性,设定边界条件;4) 从热分析结果文件(\*.rth)中读入节点温度,并作为体荷载施加到有限元模型上,同时将结构其他荷载施加到模型上;5) 设置参考温度;6) 求解运算,进行后处理及查看结果.

2.2 材料热工性能定义

2.2.1 混凝土 混凝土的密度随温度的变化不是很剧烈. 所采用恒定的混凝土密度  $\rho_c$  为  $2.40\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而热工性能参数的定义<sup>[5,11]</sup>为

$$\begin{aligned}\alpha_c &= (0.008\theta + 6) \times 10^{-6}, \\ c_c &= 900 + 80(\theta/120) - 4(\theta/120)^2, \quad 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1\,200\text{ }^\circ\text{C}, \\ \lambda_c &= \begin{cases} -0.000\,85\theta + 109, & 0\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 800\text{ }^\circ\text{C}, \\ 1.22, & \theta > 800\text{ }^\circ\text{C}. \end{cases}\end{aligned}$$

其中: $\alpha_c$  为混凝土热膨胀系数; $c_c$  为混凝土质量热容; $\lambda_c$  为混凝土导热系数; $\theta$  为历史过火温度.

2.2.2 粉刷层 试块受热过程中,混合砂浆与混凝土表面之间会脱开形成空腔层,对外部能量输入可能形成接触热阻. 由于空腔层主要由空气和水蒸气构成,其热容会随着温度的升高而不断变化. 为简化,将二者考虑成一种复合材料,则空腔层的混合砂浆复合材料热容  $c_m$  随温度变化规律<sup>[12]</sup>为

$$c_m = \begin{cases} 836, & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400\text{ }^\circ\text{C}, \\ 73.541\,7\theta - 28\,580.67, & 400\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 410\text{ }^\circ\text{C}, \\ -21.012\,5\theta + 10\,186.292\,5, & 410\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 445\text{ }^\circ\text{C}, \\ 836, & 445\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 500\text{ }^\circ\text{C}, \\ 6.679\,2\theta - 2\,503.507\,5, & 500\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 635\text{ }^\circ\text{C}, \\ 69.312\,5\theta - 42\,275.774\,2, & 635\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 715\text{ }^\circ\text{C}, \\ -92.095\,8\theta + 73\,130.759\,2, & 715\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 785\text{ }^\circ\text{C}, \\ 836, & \theta > 785\text{ }^\circ\text{C}. \end{cases}$$

2.3 高温后混凝土材料本构

1) 高温后,混凝土棱柱体抗压强度  $f_{cr}(\theta)$  随过火温度的变化规律<sup>[7]</sup>为

$$f_{cr}(\theta) = \begin{cases} f_c, & 0\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 200\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ [1.0 - 0.001\ 5(\theta - 200)]f_c, & 200\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 500\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ [0.25 + 0.003(600 - \theta)]f_c, & 500\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 600\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ [0.25 - 0.000\ 75(\theta - 600)]f_c, & 600\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 800\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

式中: $f_c$  为未过火混凝土棱柱体抗压强度.

2) 高温后,混凝土抗拉强度  $f_{tr}(\theta)$  随过火温度的变化规律<sup>[9]</sup> 为

$$f_{tr}(\theta) = \begin{cases} [0.58 \times (1 - \theta/300) + 0.42]f_t, & 0^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 300\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ [0.42 \times (1.6 - \theta/500)]f_t, & 300^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 800\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ 0, & \theta > 800\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

式中: $f_t$  为未过火混凝土抗拉强度.

3) 高温后,混凝土峰值应变  $\epsilon_{0,r}(\theta)$  为

$$\frac{\epsilon_{0,r}(\theta)}{\epsilon_0} = 1 + 0.002\ 5\theta.$$

式中: $\epsilon_0$  为未过火混凝土的峰值应变,实验取 0.002.

4) 高温后,混凝土初始弹性模量  $E_{0,r}(\theta)$ <sup>[10]</sup> 为

$$\frac{E_{0,r}(\theta)}{E_0} = \begin{cases} 1.027 - 1.335(\theta/1\ 000), & 0^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 200\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ 1.335 - 3.371(\theta/1\ 000) + 2.382(\theta/1\ 000)^2, & 200^{\circ}\text{C} < \theta \leqslant 600\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

式中: $E_0$  为未过火混凝土初始弹性模量.

5) 高温后,混凝土的应力-应变关系为

$$\frac{\sigma}{f_{cr}(\theta)} = \begin{cases} 2(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0,r}(\theta)}) - (\frac{\epsilon}{\epsilon_{0,r}(\theta)})^2, & \frac{\epsilon}{\epsilon_{0,r}(\theta)} \leqslant 1, \\ 1 - \frac{115(\epsilon - \epsilon_{0,r}(\theta))}{1 + 5.04 \times 10^{-3}\theta}, & \frac{\epsilon}{\epsilon_{0,r}(\theta)} > 1. \end{cases}$$

式中: $\sigma$  和  $\epsilon$  分别为高温后混凝土的应力和应变,其他符号意义同前.

2.4 有限元模型及温度场计算假定

2.4.1 模型的建立和求解 混凝土及复合粉刷层热分析单元均采用 8 节点单元 Solid 70 模拟,混凝土网格密度以 15 mm 进行划分,并以粉刷层厚度方向划分两层.将试验实测的升温曲线(图 1)输入程序进行瞬态计算.试块与加热炉内环境处于复杂的热交换状态,参照文献[13]给出的综合换热系数;然后,采用插值方法确定各时刻下的换热系数.最后,选用适合瞬态求解的雅可比共轭求解器进行求解.

对试块底面施加轴向约束,在一个底面中心节点处施加两个水平方向的约束以消除刚体位移,耦合顶部截面所有节点的加压方向的位移,使其轴向位移保持一致,并采用位移控制加载.粉刷层只参与热分析过程,不参与抗压强度加载过程.

2.4.2 温度场计算基本假定 1) 温度场与材料的应力、应变和是否开裂无关,不计混凝土开裂或表层脱落后的截面局部变化引起的温度重分布;2) 构件内没有热生成,水分流动及蒸发的影响忽略不计;3) 混凝土是均匀的各向同性材料;4) 不考虑混粉刷层开裂或剥落后的局部变化引起的温度重分布.

3 有限元主要计算结果

3.1 温度场模拟结果

图 3 为典型试块温度场计算结果,图 4 为试块中部截面上距离侧面不同深度处的数值模拟结果比较.图 4 中:曲线 1~3 分别为无粉刷层试块侧边中点处距表面深度 0,30,75 mm 的测点温度;曲线 6~8 分别为带粉刷层试块侧边中点处距表面

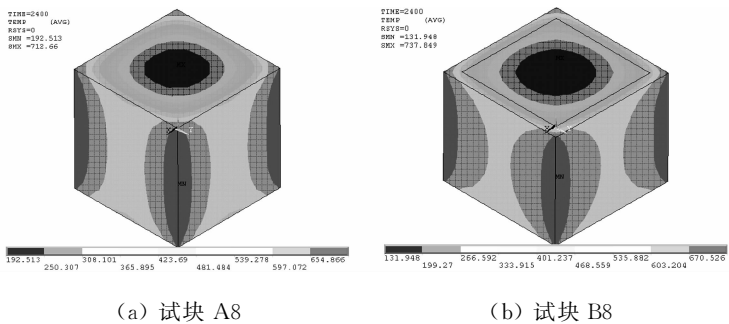
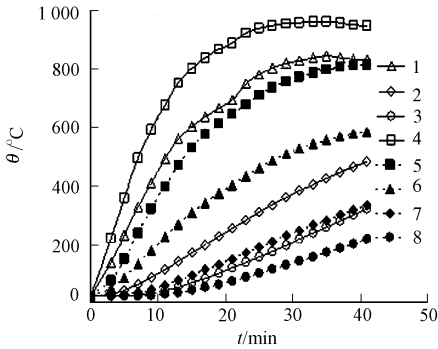


图 3 试块温度场分布  
Fig. 3 Temperature distribution of specimens

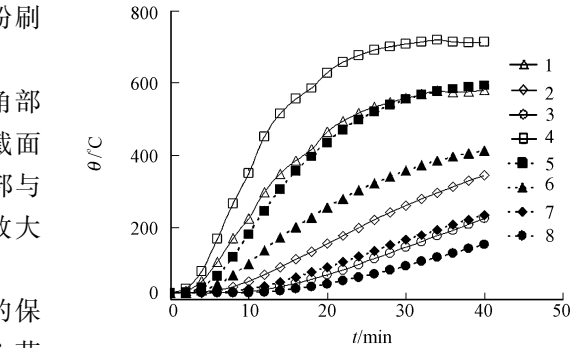
深度 0,30,75 mm 的测点温度;曲线 4,5 分别为无粉刷层试块和带粉刷层试块角部测点温度.

由图 3,4 可以看出:无粉刷层试块 A8 的截面角部温度均高出表面约 100 ℃,而带粉刷层试块 B8 的截面角部温度均高出表面约 200 ℃. 说明了粉刷层对角部与表面之间的温差值存在一定的影响,在一定程度上放大了二者间的差值.

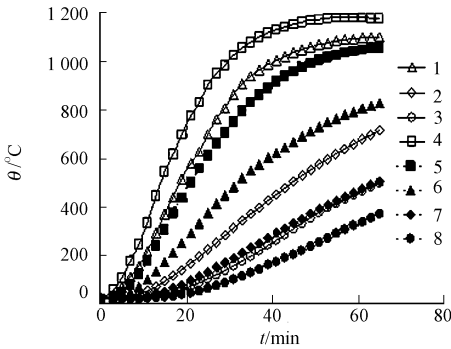
由图 3,4 还可以看出:粉刷层对靠近表面节点的保护作用尤为明显,约能降温 200 ℃左右;而对于核心节点,粉刷层对其约能降温 50 ℃.



(b) 1 000 ℃



(a) 800 ℃



(c) 1 200 ℃

图 4 试块在不同计算点的升温曲线

Fig. 4 Temperature-time curve of different calculation points

3.2 轴压性能计算结果

试块的抗压强度试验结果( $f_{cu,m}$ )与有限元计算结果( $f_{cu,c}$ )对比,如表 2 所示. 表 2 中: $e_{rel}$ 为相对误差. 由表 2 可见:有限元计算结果与试验结果吻合较好,说明建立的有限元模型及考虑空腔层的混合砂浆复合材料的热分析相关热工性能的假定是合理的.

表 2 试块抗压强度的试验与数值计算结果对比

Tab. 2 Comparison between test results and numerical simulation results

编号	$f_{cu,m}/\text{kN}$	$f_{cu,c}/\text{kN}$	$e_{rel}/\%$	编号	$f_{cu,m}/\text{kN}$	$f_{cu,c}/\text{kN}$	$e_{rel}/\%$
A8	638.10	568.78	-10.86	B8	733.50	675.58	-7.90
C8	621.45	590.20	-5.02	D8	861.97	700.87	-18.69
E10	280.58	254.36	-9.34	F10	414.90	394.18	-4.99
C12	130.73	107.28	-17.94	D12	266.40	267.09	0.03
				B12	208.57	257.82	23.60

4 结论

- 1) 高温作用后混凝土的损伤程度与过火温度、粉刷条件、恒温持时和静置时间等有关. 过火温度越高,损伤越严重,抗压强度越低,即使在相对较短的恒温持时(25 min)下,800 ℃以上的高温对混凝土仍有较严重的损伤.
- 2) 粉刷层对遭受火灾作用的混凝土结构有较好的保护作用,能有效减少外部能量输入结构,截面温度增长相对缓慢,可有效改善温度场的分布并减轻混凝土结构的火灾损伤.
- 3) 四面受火混凝土试块的温度分布呈环形分布由表面向内部温度逐渐降低,试块截面 4 个角部温度最高;粉刷层对角部与表面之间的温差值存在一定的影响,在一定程度上放大了二者间的差值.
- 4) 研究表明:文中所建议的有限元模型及考虑空腔层的混合砂浆复合材料的热工性能参数合理可靠,可用于带粉刷层钢筋混凝土结构构件的热-结构耦合数值模拟,能为钢筋混凝土结构火灾损伤鉴定及相关研究提供参考.

## 参考文献:

- [1] SAWA A, MANITA P, SIDERIS K K. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 239-248.
- [2] ZHANG Bin-sheng, BICANIC N, PEARCE C J, et al. Relationship between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3): 363-371.
- [3] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12): 2215-2222.
- [4] KHANDAKER M, HOSSAIN A. High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(6): 535-545.
- [5] 杜耀峰, 郭子雄, 吴毅彬. 粉刷层对混凝土遭受高温作用后抗压性能的影响[J]. 建筑技术, 2009, 40(1): 20-23.
- [6] 杜耀峰, 郭子雄, 吴毅彬. 红外热像技术在高温后混凝土损伤探测中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(2): 65-69.
- [7] 朱伯龙, 陆洲导. 工程结构抗火性能研究报告[R]. 上海: 同济大学工程结构研究所, 1990.
- [8] LIE T T, CELIKKOL B. Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns[J]. ACI Material Journal, 1991, 88(1): 84-91.
- [9] 谢狄敏, 钱在兹. 高温作用后混凝土抗拉强度与粘结强度的试验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 1998, 32(5): 597-602.
- [10] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] LIE T T, DENHAM E M A. Factors affecting the fire resistance of circular hollow steel columns filled with bar-reinforced concrete[R]. Ottawa: NRC-CNRC Internal Report (No. 651), 1993.
- [12] 路春森, 屈立军, 薛武平, 等. 建筑结构耐火设计[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- [13] 段文玺. 建筑结构的火灾分析和处理(二): 火灾温度场计算之二[J]. 工业建筑, 1985, 5(8): 51-54.

## Experimental Study and Numerical Simulation on the Compressive Behavior of Concrete Cubes with Mortar Cover after Exposure to Fire

LIU Yang<sup>1</sup>, GUO Zi-xiong<sup>1</sup>, DU Yao-feng<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 362021, China;

2. Xiamen Academy of Building Research (Group) Co. Ltd., Xiamen 361004, China)

**Abstract:** Twenty-seven concrete cubes with mortar cover after exposure to fire were tested under axial loading to investigate the axial compressive behavior of specimens. The main parameters are temperature in the furnace and thickness of the mortar cover. Thermal-structure coupling analysis of these concrete cubes using ANSYS was carried out, the calculation results was compared with test results. It is indicated that the damage of the concrete cube due to fire is influenced by the fire temperature, mortar cover, duration of fire and time for cooling down; the increase of the fire temperature deteriorates the damage, and lowers the compressive strength; the mortar cover can effectively protect the concrete members from the damage of fire. The temperature distribution of concrete cubes exposed to four-side fire is of circle shape, and the temperature of concrete cubes decreases from the outside to the inside of the concrete cubes. The temperature at the corner of the cubes is the highest.

**Keywords:** concrete; compressive behavior; mortar cover; thermal-structural coupling analysis; high temperature

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)