

防火涂层对高温后混凝土抗压强度的影响

侯 炜，贺拴海，张 岗

(长安大学公路学院，陕西 西安 710064)

摘要：对 126 个涂有防火层的 C50 混凝土试件进行高温作用，自然冷却后对其进行抗压强度试验。通过对有、无防火涂层试件的损伤形态对比分析及对高温后损伤试件的抗压强度试验，探讨了防火涂层对混凝土高温作用后抗压性能的影响程度，得到了高温作用后试件抗压强度与防火涂层厚度、强度折减系数与防火涂层厚度的回归计算公式。试验研究表明，防火涂层对混凝土构件遭受高温作用有较好的保护作用。因此对于特殊区域采用防火涂层的混凝土结构，在遭受高温作用后的灾损性能进行研究是很有必要的，对混凝土结构抗火设计及规范制定提供一定参考。

关键词：防火涂层；混凝土；高温；抗压强度

中图分类号：X932 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-7930(2014)02-0241-06

目前，国、内外学者对高温下混凝土抗压性能、高温后混凝土抗压性能进行了大量的试验研究，也取得了较多的试验成果。这些试验研究主要是以无防火涂层的普通混凝土^[1-2]或高强混凝土^[3-4]作为研究对象，而对有防火涂层混凝土的高温性能研究较少。根据作者大量火灾现场勘察和灾损鉴定发现，如果混凝土结构外涂有防火涂层，能够有效降低火灾热量传入结构，从而延缓和减轻混凝土结构的火灾损伤。由于防火涂层的存在，有防火涂层和无防火涂层混凝土构件高温后的力学性能会有很大不同。因此，本文进行了有防火涂层及无防火涂层试件的高温作用后抗压强度试验研究，以期对混凝土结构在特殊区域的耐火设计及火灾后的损伤评估、鉴定及加固提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计与制作

本试验中，试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 标准混凝土立方体试件，共 126 个。试件采用 C50 混凝土强度等级（抗压强度标准值为 32.4 MPa），配合比为：水泥：砂：碎石：水=1：1.42：2.64：0.35。试件分为有防火图层和无防火涂层两种形式。有防火涂层的试件共 90 个，分为 5 组；无防火涂层的试件共 36 个，分为 2 组，具体见表 1、图 1~2 所示。采用 B60-2 膨胀型水性防火涂料，防火等级为一级。通过对防火涂料彻底搅拌均匀，清除试件表面尘土，并均匀涂刷防火涂料与其表面，以模拟实际工程中的混凝土构件受火状态。防火涂层厚度控制采用美国 Phase II PTG-3500 涂层测厚仪测定。防火涂料主要性能指标见表 2。

表 1 混凝土试件高温试验分组(混凝土强度 C50)
Tab.1 High temperature test of concrete cubes (concrete stress C50)

试件分组		对比因素	试件数量/个	防火涂层		升温时间/min	最高温度/℃
				型号及参数	厚度/mm		
对比组	CP0	未受火，无防火涂层	18	/	0	/	/
第一组	CP1	受火，无防火涂层	18	/	0	180	800
第二组	CP2	受火，有防火涂层	18	B60-2 膨胀型 水性防火涂料 防火等级：一级	0.2	180	800
第三组	CP3		18		0.4	180	800
第四组	CP4		18		0.6	180	800
第五组	CP5		18		0.8	180	800
第六组	CP6		18		1.0	180	800

收稿日期：2013-12-16 修改稿日期：2014-04-08
基金项目：国家青年自然科学基金项目(51308056)
作者简介：侯炜(1983-)，男，博士研究生，主要研究桥梁结构理论分析。E-mail: houwei831012@163.com



图 1 试件制作

Fig.1 Concrete cubes production



图 2 涂刷防火涂料

Fig.2 Fire-resistant layer brushing

表 2 防火涂料主要性能指标

Tab.2 The main performance index of fire retardant coating

序号	检验项目	技术指标	实测结果
1	耐火时间/min	一级≥20	25
2	火焰传播比值	一级≤25	10
3	质量损失/g	一级≤5.0	2.2
4	炭化体积/cm ³	一级≤25	0
5	在容器中的状态	无结块、搅拌后呈均匀状态	无结块、白色稠体
6	干燥时间/h	表干 ≤5.0	1
		实干 ≤24.0	2
7	细度/μm	≤90	90
8	附着力/级	≤3.0	1
9	柔韧性/mm	≤3.0	1
10	耐冲击性/cm	≥20	50
11	耐水性/h	24 h 涂层应无起层、剥落现象	符合要求
12	耐湿热型/h	48 h 涂层应无脱落、起泡现象	符合要求

1.2 试验装置

本次试验采用 RX3-65-12 节能箱式电阻炉进行加热以模拟火灾温度场. 该电炉的额定功率为 65 kW, 电压为 50~360 V, 最高工作温度为 1 200℃, 炉膛尺寸为 1 200 mm×600 mm×400 mm (长×宽×高), 炉内温度由温度控制器控制, 达到设定温度后自动保持恒温. 炉内温度波动范围±5℃左右, 满足试验精度要求, 炉内试件如图 3~4. 火灾升温按照国际标准化组织 ISO834 建议的建筑构件火灾试验曲线进行, 即

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

式中: T_0 为试验炉内的初始温度 (℃); T 为燃烧 t min 后试验炉内空气的平均温度 (℃).

高温作用后的混凝土试件采用 TYE-2000B 型液压式压力试验机进行抗压强度试验.



图 3 炉内试件一

Fig.3 Concrete cubes in furnace



图 4 炉内试件二

Fig.4 Concrete cubes in furnace

1.3 试验步骤

高温炉火场温度达 600℃左右时, 混凝土达到热平衡状态一般需要 45 min^[5]; 对于普通混凝土, 当高温炉温度达到设定温度后恒温 3 h, 混凝土冷却后的残余强度比较稳定, 恒温 3 h 后即认为受热后试件满足

截面无温度梯度的假设^[6]. 混凝土试件恒温受火时间为6 h, 这样可以使试件内外温度保持一致^[7]; 为获得有防火涂层和无防火涂层混凝土试件高温后较稳定的残余强度, 本文采取恒温时间为30 min.

试验温度为800℃, 试验组别分为CP0~CP6共7组, 7种工况, 每个试验工况加热18个试件. 试件参数及数量如表1所示. 温升速率控制为25 kW, 加温至设定温度后恒温30 min. 恒温到设定时间后, 打开炉门使试件在炉内冷却至160℃取出, 并继续冷却至室温, 再静置至少3 d后, 对其进行抗压强度试验.

标准升温曲线与试验升温曲线如图5. 由图可以看出800℃试验升温曲线由室温开始升温, 但从升温速率来看, 800℃的升温速率与标准升温速率是一致的. 炉内降温曲线则为自然降温曲线.

在混凝土立方体抗压强度试验中, 采用连续而稳定地加载方式, 加载速度控制为0.3~0.5 MPa/s.

2 试验现象

2.1 试件升温现象

试件由室温加热至800℃, 其材料内部逐渐发生变化. 升温过程中, 对于无防火涂层混凝土试件, 常温下材料C-S-H凝胶结构密实, Ca(OH)₂结晶体完整. 当温度上升至240℃时气体开始逸出, 主要是自由水从混凝土内部蒸发, 这对试件外观没有大的影响. 当温度达到500~600℃时, 气体大量逸出, 随后逐渐减弱, 达到700℃时基本无气体逸出; 对于带防火涂层的混凝土试件, 其气体逸出规律与无防火涂层的混凝土试件类似, 区别在于气体逸出稍有推迟(推迟时间与试件防火涂层厚度有关), 并伴有防火涂层受高温所产生的化学气味. 在整个试件升温过程中, 无防火涂层混凝土试件产生4次“砰砰”的爆裂声, 但声响较微弱, 而涂有防火涂料的混凝土试件所产生的“爆裂”现象仅有微弱的2声.

2.2 试件颜色及表面状况描述

高温作用后, 无防火涂层和带防火涂层的混凝土试件的外表颜色及表面状况有较大不同, 如图6~9所示. 遭受800℃高温后, 无防火涂层的混凝土试件呈浅红色, 试件表面布满裂纹, 且有部分试件棱角处的混凝土爆裂剥落. 有防火涂料混凝土试件, 其表面布满蓬松白色泡沫状物质, 除去该物质后, 试件表面有黑色物质(含碳化学物质)附着, 且有细小裂纹, 但试件棱角处的混凝土无爆裂剥落现象.

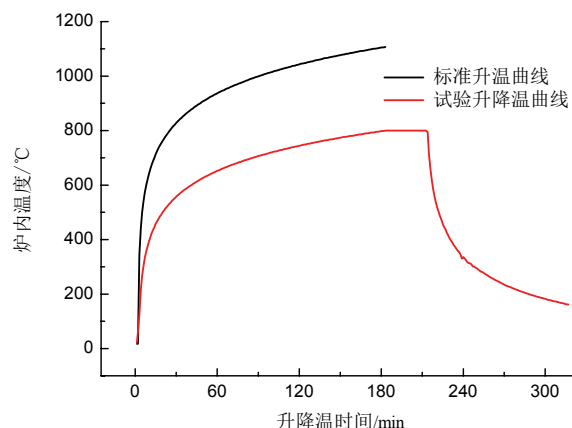


图5 试验升降温曲线及标准升温曲线
Fig.5 Heating curve and cooling curve of test heating and standard



图6 外表状况对比一
Fig.6 Appearance contrast 1



图7 外表状况对比二
Fig.7 Appearance contrast 2



图 8 无防火涂料试件表面状况
Fig.8 Appearance of cubes without fire-resistance



图 9 有防火涂料试件表面状况
Fig.9 Appearance of cubes with fire-resistance

2.3 试件加载现象

混凝土立方体试件的破坏形态与其经受高温作用水平有关，随着高温作用水平的增加，其常温下破坏形态为正倒相接的四角锥体，而高温作用后的破坏形态则为整体压碎。相同高温作用水平下，对比有防火涂层（薄至厚）的混凝土试件与无防火涂层的混凝土试件，其破坏形态由轻到重，如图 10~15。



图 10 有防火涂料试件加载
Fig.10 Load test of cubes with fire-resistance



图 11 无防火涂料试件加载
Fig.11 Load test of cubes without fire-resistance



图 12 有防火涂料试件加载
Fig.12 Load test of cubes with fire-resistance



图 13 无防火涂料试件加载
Fig.13 Load test of cubes without fire-resistance



图 14 试件破坏形态
Fig.14 Damage mode of cubes



图 15 有防火涂料试件破坏形态
Fig.15 Damage mode of cube with fire-resistance

3 试验分析

混凝土强度与受火温度、受火时长及防火涂层厚度有关. 对高温作用后混凝土强度的试验数据进行分析, 则混凝土抗压强度折减系数 R_c :

$$R_c = f_{cu,t} / f_{cu}$$
 (2)

式中: $f_{cu,t}$ 为 800 °C 后混凝土的实际抗压强度, MPa; f_{cu} 为常温下混凝土的原始抗压强度, MPa.

未受高温作用的混凝土试件实际抗压强度 f_{cu} 、受高温作用的混凝土试件实际抗压强度 $f_{cu,t}$ 和抗压强度折减系数 R_c 见表 3. 由表 3 可知, 经受 800 °C 高温作用后, 未涂防火涂层试件的抗压强度折减系数 R_c 为 0.52, 涂 0.2 mm 防火涂层试件的抗压强度折减系数 R_c 为 0.58, 涂 0.4 mm 防火涂层试件的抗压强度折减系数 R_c 为 0.63, 涂 0.6 mm 防火涂层试件的抗压强度折减系数 R_c 为 0.68, 涂 0.8 mm 防火涂层试件的抗压强度折减系数 R_c 为 0.74, 涂 1.0 mm 防火涂层试件的抗压强度折减系数 R_c 为 0.78. 由此可知, 防火涂层厚度对抗压强度折减系数 R_c 的影响明显. 带防火涂层混凝土试件抗压强度折减系数 R_c 比无防火涂层混凝土试件高, 说明防火涂层在混凝土结构受火时, 能有效抑制高温热量的输入, 降低高温对混凝土结构的损伤.

表 3 混凝土试件抗压强度试验结果
Tab.3 Results of concrete cubes compressive strength

试件分组		对比因素	涂层厚度/mm	$f_{cu,t}$ /MPa	f_{cu} /MPa	R_c
对比组	CB0	未受火, 无防火涂层	0	/	32.8	/
第一组	CB1	受火, 有防火涂层	0	16.6		0.51
第二组	CB2		0.2	18.7		0.57
第三组	CB3		0.4	20.3		0.62
第四组	CB4		0.6	21.8		0.66
第五组	CB5		0.8	23.8		0.73
第六组	CB6		1.0	25.0		0.76

由试验结果分析, 并根据数理统计原理, 对经受高温作用后的混凝土强度与防火涂层厚度的关系进行线性回归分析, 可得出如下 2 个回归公式.

(1) 混凝土试件强度与防火涂层厚度的关系:

$$f_{cu}(T) = 8.422\,8h + 16.831 \qquad T = 800^{\circ}\text{C}$$
 (3)

(2) 强度折减系数与防火涂层厚度的关系:

$$R_c = 0.524\,2h + 0.2614$$
 (4)

其中, 式 (3) 与式 (4) 的相关系数分别为 0.994 和 0.991. 高温后混凝土试件抗压强度与防火涂层关系、强度折减系数与防护涂层关系的线性回归结果如图 16~17 所示. 通过比较有不同厚度防火涂层的试件高温作用后的强度, 从回归曲线可以看出, 在相同温度水平作用下无防火涂层试件的抗压强度折减系数比带防火涂层的试件高, 且成线性关系. 防火涂层对混凝土结构提供了有效的保护作用.

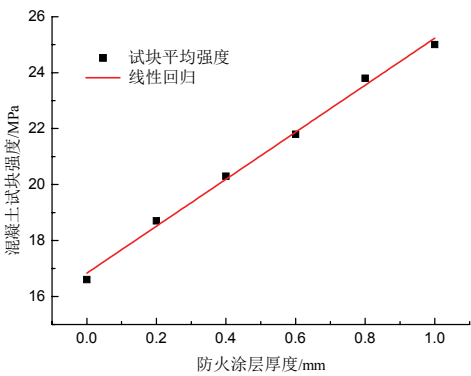


图 16 混凝土试件强度与防火涂层厚度的线性回归
Fig.16 Concrete cubes strength vs fire-resistant layer thickness regression formula

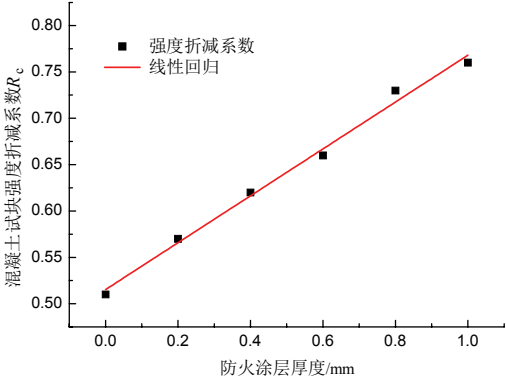


图 17 强度折减系数与防火涂层厚度的线性回归
Fig.17 Strength reduction factor vs fire-resistant layer thickness regression formula

4 结论

(1) 混凝土的抗压强度是衡量火灾后混凝土结构损伤程度的一个重要指标,是灾后混凝土结构安全性评价及确定合理加固方案的前提^[8]。

(2) 混凝土高温损伤程度与受火温度、受火时长及防火涂层厚度有关。不同厚度防火涂层的混凝土试件高温作用后的抗压强度基本成线性变化。

(3) 有防火涂层的混凝土试件较无防火涂层的混凝土试件抗压强度折减系数低,说明防火涂层有较好的保护作用,可有效降低结构高温损伤。

(4) 到目前为止,有关防火涂层对混凝土结构高温损伤影响的研究很少,也鲜有报导。因此,对抗火有特殊要求的混凝土结构或为今后制定混凝土抗火规范提供参考,开展此项研究是很有意义,也是很必要的。

参考文献 References

- [1] SAVVA 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 Binsheng, NENAD Bicanic, PEARCE Christopher 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. 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, ANWAR Hossain. High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: performance at high temperatures[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(6): 535-545.
- [5] 贾锋. 受高温后混凝土抗压强度的试验研究[J]. 青岛建筑工程学院学报, 1997, 18(1): 10-14.
JIA Feng. An experimental research on the compressive strength of the heated concrete[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering. 1997, 18(1): 10-14.
- [6] 余志武, 丁发兴, 罗建平. 高温后不同类型混凝土力学性能试验研究[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(5): 1-6.
YU Zhiwu, DING Faxing, LUO Jianping. Experimental research on mechanical properties of different type of concrete after high temperature[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(5): 1-6.
- [7] 吕天启, 赵国藩, 林志伸. 高温后静置混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 63-70.
LÜ Tianqi, ZHAO Guofan, LIN Zhishen. Experimental study on mechanical properties of long standing concrete after exposure to high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 63-70.
- [8] 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.
DU Yaofeng, GUO Zixiong, WU Yibin. Study on compressive properties of concrete with mortar cover after subjected to high temperatures[J]. Architecture Technology, 2009, 40(1): 20-23.

Effects of fire protection layer on compressive strength of concrete after high temperature

HOU Wei, HE Shuanhai, ZHANG Gang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: High temperature is imposed on 126 concrete cubes (C50) with fire-resistant layer from 0.2mm to 1.0mm and the compressive strength is tested after nature cooling. Through analysis on the damage morphology of cubes with and without fire-resistant layer and the test of compressive performance, the influence of fire-resistant layer coating on the strength of concrete after high temperature is discussed, and concrete cubes compressive intensity after high temperature with fire-resistant layer thickness, and concrete intensity reduction factor with fire-resistant layer thickness regression formula are both obtained. Experimental research shows that the concrete structures with fire-resistant layer subject to high temperature produce better protection. For the concrete structures in special region, it's very necessary to study on the disaster loss performance after high temperature. Some basis of the design and draft code for fire resistance of concrete structures are provided.

Key words: fire-resistant layer; concrete; high-temperature; compressive strength

(本文编辑 桂智刚)