

DOI:10.11918/201907084

高温对黏土砖砌体抗压强度影响研究进展

郑文忠,黄文宣,王 英,焦贞贞

(结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要: 为给出黏土砖、砂浆和砖砌体高温力学性能的量化表达,论述了黏土砖、水泥砂浆、砖砌体等高温力学性能的研究进展,总结了现有研究存在的问题.分析表明,高温下黏土砖抗压强度随温度的升高而线性减小,历经温度为1 000 ℃时,高温下黏土砖抗压强度折减系数为0.53.历经温度不高于600 ℃时,高温后黏土砖抗压强度随历经温度的升高而线性降低,600 ℃时黏土砖抗压强度约为常温下的56.2%.高温后水泥砂浆抗压强度随历经温度升高而降低,历经温度介于300~800 ℃且水灰比不大于0.45时,高温后水泥砂浆抗压强度折减系数随水灰比增大而增大;若水灰比大于0.45,高温后水泥砂浆抗压强度折减系数随水灰比增大而减小.黏土砖砌体抗压强度随历经温度升高而降低.建立了高温后黏土砖、砂浆及黏土砖砌体抗压强度计算公式.

关键词: 黏土砖;水泥砂浆;砖砌体;抗压强度;水灰比

中图分类号: TU362 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)11-0192-09

Influence of high temperature on compressive strength of clay brick masonry: A literature review

ZHENG Wenzhong, HUANG Wenxuan, WANG Ying, JIAO Zhenzhen

(Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology),
Ministry of Education, Harbin 150090, China)

Abstract: On the basis of the results obtained by relevant literature at home and abroad, the quantified expressions for clay brick, mortar, and brick masonry were established, and some existing problems were summarized. Analysis shows that at high temperature, the compressive strength of clay brick decreased linearly with the increase of temperature, and the reduction coefficient of the compressive strength of clay brick was 0.53 at 1 000 ℃. When the temperature was lower than 600 ℃, the compressive strength of clay brick after high temperature decreased linearly with increasing temperature, and the compressive strength at 600 ℃ was about 56.2% of that at room temperature. The compressive strength of cement mortar after high temperature decreased with rising temperature. With temperature between 300 and 800 ℃, the reduction coefficient of the compressive strength of cement mortar after high temperature increased with the increase of water cement ratio when it was lower than 0.45, and it decreased when the water cement ratio was over 0.45. The compressive strength of clay brick masonry decreased with increasing temperature. Finally, formulas for calculating the compressive strength of clay brick, mortar, and clay brick masonry after high temperature were established.

Keywords: clay brick; cement mortar; brick masonry; compressive strength; water cement ratio

火灾是高频灾种^[1-3],建筑火灾是最常见的火灾,2014—2016年中国共发生火灾104.5万起,火灾直接财产损失120亿元^[4-6].砌体主要是由块材和砌筑浆体砌筑而成的受力构件.块材主要有黏土砖、石材、混凝土砌块等.砌筑浆体主要为砂浆,也有用土坯做块材用泥巴做砌筑浆体的情况.

用混凝土砌块和砂浆砌筑而成砌体的耐高温性能可借鉴混凝土结构高温性能研究的成果进行考

察.用土坯和泥巴砌筑而成的砌体目前已很少应用,不做讨论.本文在阅读相关文献的基础上,着力对砖砌体的抗火性能研究进展进行论述,包括黏土砖高温下和高温后的力学性能、砂浆高温后的力学性能和砖砌体高温后的力学性能.基于相关试验结果,建立了高温下和高温后黏土砖抗压强度折减系数计算公式、水泥砂浆高温后的抗压强度折减系数计算公式以及高温后水泥砂浆和混合砂浆砖砌体抗压强度折减系数计算公式.对用具有良好耐高温性能的碱矿渣胶凝材料做砌块和砌筑浆体的新型砌体的应用前景进行了展望.

收稿日期: 2019-07-12
基金项目: 国家自然科学基金(51478142)
作者简介: 郑文忠(1965—),男,教授,博士生导师
通信作者: 郑文忠, hitwz Zheng@163.com

1 材料的高温力学性能

1.1 黏土砖高温力学性能

1.1.1 资料收集

文献[7]对普通黏土实心砖和 KP1 型黏土空心砖进行了高温下抗压强度试验,实心砖和空心砖常温下抗压强度分别为 37.9 和 38.3 MPa,升温速度为 6~8 ℃/min,恒温 40 min 后进行高温下抗压试验,结果如表 1 所示.

表 1 文献[7]高温下黏土砖抗压强度试验数据
Tab.1 Test data of compressive strength of clay brick at high temperature in Ref. [7]

实心砖			空心砖		
$T/$ ℃	$f_{bm}^T/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	f_{bm}^T/f_{bm}	$T/$ ℃	$f_{bm}^T/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	f_{bm}^T/f_{bm}
20	37.9	1.00	20	38.3	1.00
500	35.6	0.94	500	36.4	0.95
600	33.4	0.88	600	33.7	0.88
700	32.2	0.85	700	31.1	0.82
800	23.5	0.62	800	24.3	0.63
900	22.4	0.59	900	22.5	0.59
1 000	20.5	0.54	1 000	20.4	0.53

注: T 为温度; f_{bm}^T 为高温下黏土砖抗压强度; f_{bm} 为常温下黏土砖抗压强度; f_{bm}^T/f_{bm} 为高温下黏土砖抗压强度折减系数.

分析力学性能变化的微观原因.500 ℃时,高岭石变成了煅烧高岭石,孔洞增加,降低了抗压强度.800 ℃时微结构几乎没有变化,但在此温度下孔结构和玻璃体微结构更易破碎,导致强度大幅下降^[11-13].

文献[8]采用的试件尺寸为 112.5 mm×112.5 mm×75 mm,常温强度为 5 MPa.以 2 ℃/min 的速度加热到目标温度恒温 1 h 后,进行了高温下试验,发现历经温度在 800 ℃时,抗压强度是常温强度的 71%.试验结果如表 2 所示.

表 2 文献[8]高温下黏土砖抗压强度试验数据
Tab.2 Test data of compressive strength of clay brick at high temperature in Ref. [8]

$T/$ ℃	$f_{bm}^T/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	f_{bm}^T/f_{bm}
20	5.00	1.00
200	4.75	0.95
400	4.35	0.87
600	3.95	0.79
800	3.55	0.71

文献[9]进行了黏土砖的高温后抗压强度试验,常温强度为 19.17 MPa.为了模拟实际火灾情况,升温时间和恒温时间都尽可能短,并在空气中自然冷却,300 和 600 ℃后黏土砖的残余强度分别为常温的 80% 和 60% 左右.试验结果如表 3 所示.

表 3 文献[9]高温后黏土砖抗压强度试验数据
Tab.3 Test data of compressive strength of clay brick after high temperature in Ref. [9]

$T/$ ℃	$f_{bm}^{T,a}/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	$f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$
20	19.17	1.000
300	16.73	0.873
300	18.32	0.956
300	18.44	0.962
300	16.84	0.878
300	16.64	0.868
600	13.76	0.718
600	12.48	0.651
600	12.02	0.627
600	11.87	0.619
600	9.67	0.504

注: T 为温度; $f_{bm}^{T,a}$ 为高温后黏土砖抗压强度; f_{bm} 为常温下黏土砖抗压强度; $f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$ 为高温后黏土砖抗压强度折减系数.

文献[10]对强度等级为 MU20 的黏土砖进行高温后力学性能研究,试验只选用了 800 ℃以上的 3 个温度,在空气中冷却后进行抗压强度试验.结果表明,875 ℃时抗压强度只下降 5%,898 ℃时下降 16%.试验数据如表 4 所示.

表 4 文献[10]高温后黏土砖抗压强度试验数据
Tab.4 Test data of compressive strength of clay brick after high temperature in Ref. [10]

$T/$ ℃	$f_{bm}^{T,a}/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	$f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$
20	18.00	1.000
822	18.25	1.014
875	17.04	0.947
898	15.13	0.841

1.1.2 黏土砖高温力学性能计算

因数据样本很少,不能得到高温下和高温后黏土砖抗压强度随历经温度的准确规律,本文只拟合了高温下和高温后具有 95% 保证率的黏土砖抗压强度折减系数的下包曲线.图 1 为高温下黏土砖抗压强度折减系数 f_{bm}^T/f_{bm} 与 T 的下包曲线,高温下黏土砖抗压强度折减系数公式为

$$f_{bm}^T/f_{bm} = 1.000 - 4.796 \times 10^{-4} (T - 20),$$

20 ℃≤ T ≤1 000 ℃, T <20 ℃时取 $T=20$ ℃.

(1)

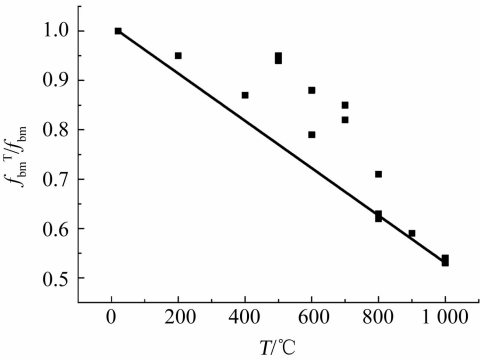


图 1 高温下黏土砖抗压强度折减系数 f_{bm}^T/f_{bm} 与 T 的下包曲线

Fig. 1 Envelope curve of f_{bm}^T/f_{bm} and T

图 2 为高温后具有 95% 保证率的黏土砖抗压强度折减系数 $f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$ 与 T 的下包曲线,因历经温度高于 600 ℃ 后的黏土砖高温后抗压强度数据较少,且离散性较大,所拟合的下包线只适用于 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温后黏土砖抗压强度公式为

$$f_{bm}^{T,a}/f_{bm} = 1.000 - 7.552 \times 10^{-4} (T - 20),$$
$$20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600\text{ }^{\circ}\text{C}, T < 20\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 时取 } T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

(2)

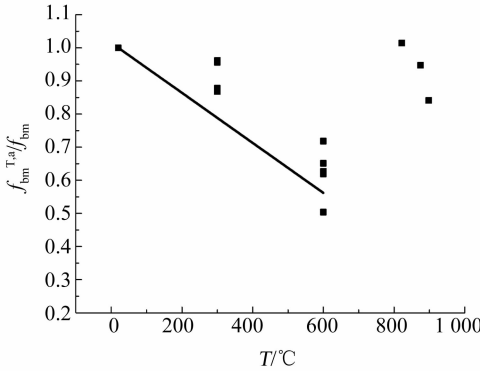


图 2 高温后黏土砖抗压强度折减系数 $f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$ 与 T 的下包曲线

Fig. 2 Envelope curve of $f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$ and T

在 CECS252—2009《火灾后建筑结构鉴定标准》^[14]中给出了高温后黏土砖抗压强度折减系数.根据式(2)计算的高温后黏土砖抗压强度折减系数与文献[14]给出的折减系数如表 5 所示.文献[14]认为黏土砖高温后抗压强度在经历温度不高于 700 ℃ 时不降低.式(2)计算结果表明,黏土砖抗压强度在 100 ℃ 高温后就下降,600 ℃ 高温后的抗压强度折减系数为 0.562.

1.2 砌筑砂浆高温力学性能

1.2.1 资料收集

文献[15]通过对强度等级为 M10 和 M20 的水泥砂浆在不同温度后的抗压强度进行试验研究,得

到历经温度对其高温后抗压强度的影响规律.强度等级为 M10 和 M20 的水泥砂浆实测常温强度分别为 11.91 和 23.25 MPa,水灰比 w/c 分别为 1.03 和 0.79,采用的升温速率为 10 ℃/min,达到目标温度后,恒温 90 min.结果表明,若历经温度不高于 300 ℃,高温后抗压强度下降较小;若历经温度超过 450 ℃,高温后抗压强度下降明显,结合水的脱出使得砂浆结构疏松.试验结果见表 6.

表 5 高温后黏土砖抗压强度计算值与规范值对比

Tab. 5 Comparison between calculated and code values of compressive strength of clay brick after high temperature

CECS252 折减系数		式(2)计算结果	
$T/^{\circ}\text{C}$	$f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$f_{bm}^{T,a}/f_{bm}$
20	1.0	20	1.000
100	1.0	100	0.939
200	1.0	200	0.864
300	1.0	300	0.788
400	1.0	400	0.713
500	1.0	500	0.637
600	1.0	600	0.562
700	1.0	700	—
900	0	900	—

表 6 文献[15]高温后水泥砂浆抗压强度试验数据

Tab. 6 Test data of compressive strength of cement mortar after high temperature in Ref. [15]

$T/^{\circ}\text{C}$	$w/c = 1.03$		$w/c = 0.79$	
	$f_{mm}^{T,a}/\text{MPa}$	$f_{mm}^{T,a}/f_{mm}$	$f_{mm}^{T,a}/\text{MPa}$	$f_{mm}^{T,a}/f_{mm}$
20	11.91	1.00	23.25	1.00
150	11.66	0.98	22.55	0.97
300	11.07	0.93	22.08	0.95
450	9.28	0.78	17.43	0.75
600	8.21	0.69	14.88	0.64

注: w/c 为水灰比; T 为温度; f_{mm} 为常温下水泥砂浆抗压强度; $f_{mm}^{T,a}$ 为高温后水泥砂浆抗压强度.

文献[17]研究了强度等级为 M30 的水泥砂浆高温后抗压强度变化规律.水泥砂浆的实测常温强度为 39.0 MPa,水灰比为 0.44,采用的升温速率为 3~5 ℃/min,达到目标温度后恒温 4 h.自然冷却后进行抗压强度试验,结果见表 7.

文献[18]研究了高温后水泥砂浆抗压强度的变化规律.水灰比为 0.4,砂采用河砂.试验前先将试件放入烘干箱烘干至恒重,再放入高温炉内加热,加热至目标温度后恒温 2 h,再自然冷却至室温后进行抗压强度试验.试验结果见表 8.

表 7 文献[17] 高温后水泥砂浆抗压强度试验数据

Tab. 7 Test data of compressive strength of cement mortar after high temperature in Ref. [17]

w/c	$T/^\circ\text{C}$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/\text{MPa}$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$
0.44	20	39.0	1.00
0.44	100	36.5	0.94
0.44	300	37.0	0.95
0.44	500	34.9	0.89
0.44	700	30.2	0.77
0.44	900	7.4	0.19

表 8 文献[18] 高温后水泥砂浆抗压强度试验数据

Tab. 8 Test data of compressive strength of cement mortar after high temperature in Ref. [18]

w/c	$T/^\circ\text{C}$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/\text{MPa}$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$
0.4	20	56.3	1.000
0.4	300	54.6	0.970
0.4	500	41.4	0.735
0.4	800	12.4	0.220
0.4	1 000	7.8	0.139

文献[19]进行了强度等级为 M30 的水泥砂浆高温后的力学性能试验,水灰比为 0.38. 升温速率为 2 ℃/min,恒温 1 h. 自然冷却后进行抗压强度试验,试验结果见表 9.

表 9 文献[19] 高温后水泥砂浆抗压强度试验数据

Tab. 9 Test data of compressive strength of cement mortar after high temperature in Ref. [19]

w/c	$T/^\circ\text{C}$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/\text{MPa}$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$
0.38	20	62.9	1.000
0.38	300	48.8	0.776
0.38	600	23.8	0.378
0.38	900	8.0	0.127

文献[20]中研究了高温后水泥砂浆抗压强度随温度的变化规律. 加热时以 20 ℃/min 的升温速率升到目标温度恒温 2 h,自然冷却至室温后再进行抗压强度试验. 研究表明,温度为 200 ℃时,抗压强度小幅下降,300 ℃时抗压强度高于常温强度,400 ℃时再次下降. 试验数据见表 10.

1.2.2 水泥砂浆高温力学性能计算

以文献[15-20]的数据为基础,分析高温后水泥砂浆抗压强度折减系数 $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ 随水灰比 w/c 和历经温度 T 的变化关系. 当 $T > 800$ ℃时,不同文献

的数据偏差很大,故只拟合 $T \leq 800$ ℃时高温后水泥砂浆抗压强度折减系数公式. $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ 随水灰比 w/c 先增大后减小. 经历温度不超过 300 ℃时,自由水和少部分结合水脱出,影响砂浆的孔隙形态,但由于钙矾石的分解,水泥熟料重新暴露在空气中,与空气中的水进行水化. 历经温度超过 300 ℃时,结合水进一步脱出,并随温度升高,水化硅酸钙分解,强度大幅下降. 水灰比很小时,自由水含量很低,结合水很快开始脱出,强度下降较快;水灰比过大时,自由水含量很高,大量自由水会造成孔隙增大产生裂缝^[16].

表 10 文献[20] 高温后水泥砂浆抗压强度试验数据

Tab. 10 Test data of compressive strength of cement mortar after high temperature in Ref. [20]

$T/^\circ\text{C}$	$w/c = 0.45$		$w/c = 0.55$		$w/c = 0.65$	
	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/$	$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/$
	MPa	f_{mm}	MPa	f_{mm}	MPa	f_{mm}
20	42.8	1.000	37.5	1.000	27.2	1.000
200	38.6	0.902	32.9	0.877	23.8	0.875
300	47.1	1.100	40.3	1.075	28.8	1.059
400	34.8	0.813	35.5	0.947	21.4	0.787

以文献[15-20]的数据为基础,通过线性插值获取不同温度时水泥砂浆抗压强度折减系数数据,分别以水灰比 w/c 为水平坐标轴,以 $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ 为竖轴,建立二维坐标系,绘制如图 3 所示的不同温度时 $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ 与 w/c 的拟合曲线,得不同温度时高温后水泥砂浆抗压强度折减系数计算公式:

$T = 100$ ℃时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = 0.929 + 0.053(w/c), 0.38 \leq w/c \leq 1.03. \tag{3}$$

$T = 200$ ℃时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = 0.876 + 0.075(w/c), 0.38 \leq w/c \leq 1.03. \tag{4}$$

$T = 300$ ℃时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = \begin{cases} -0.97 + 4.6(w/c), & 0.38 \leq w/c < 0.45; \\ 1.248 - 0.328(w/c), & 0.45 \leq w/c \leq 1.03. \end{cases} \tag{5}$$

$T = 400$ ℃时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = \begin{cases} -0.861 + 3.957(w/c), & 0.38 \leq w/c < 0.45; \\ 1.037 - 0.259(w/c), & 0.45 \leq w/c \leq 1.03. \end{cases} \tag{6}$$

$T = 500$ ℃时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = \begin{cases} -1.434 + 5.143(w/c), & 0.38 \leq w/c < 0.45; \\ 1.010 - 0.288(w/c), & 0.45 \leq w/c \leq 1.03. \end{cases} \tag{7}$$

$T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = \begin{cases} -2.009 + 6.286(w/c), 0.38 \leq w/c < 0.45; \\ 0.959 - 0.310(w/c), 0.45 \leq w/c \leq 1.03. \end{cases} \quad (8)$$

$T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = -2.829 + 8.15(w/c), 0.38 \leq w/c \leq 0.44. \quad (9)$$

$T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

$$f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}} = -1.637 + 4.771(w/c), 0.38 \leq w/c \leq 0.44. \quad (10)$$

式中: $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ 为高温后水泥砂浆抗压强度折减系数; f_{mm} 为常温下水泥砂浆抗压强度,MPa; T 为历经温度, $^{\circ}\text{C}$; w/c 为水灰比.

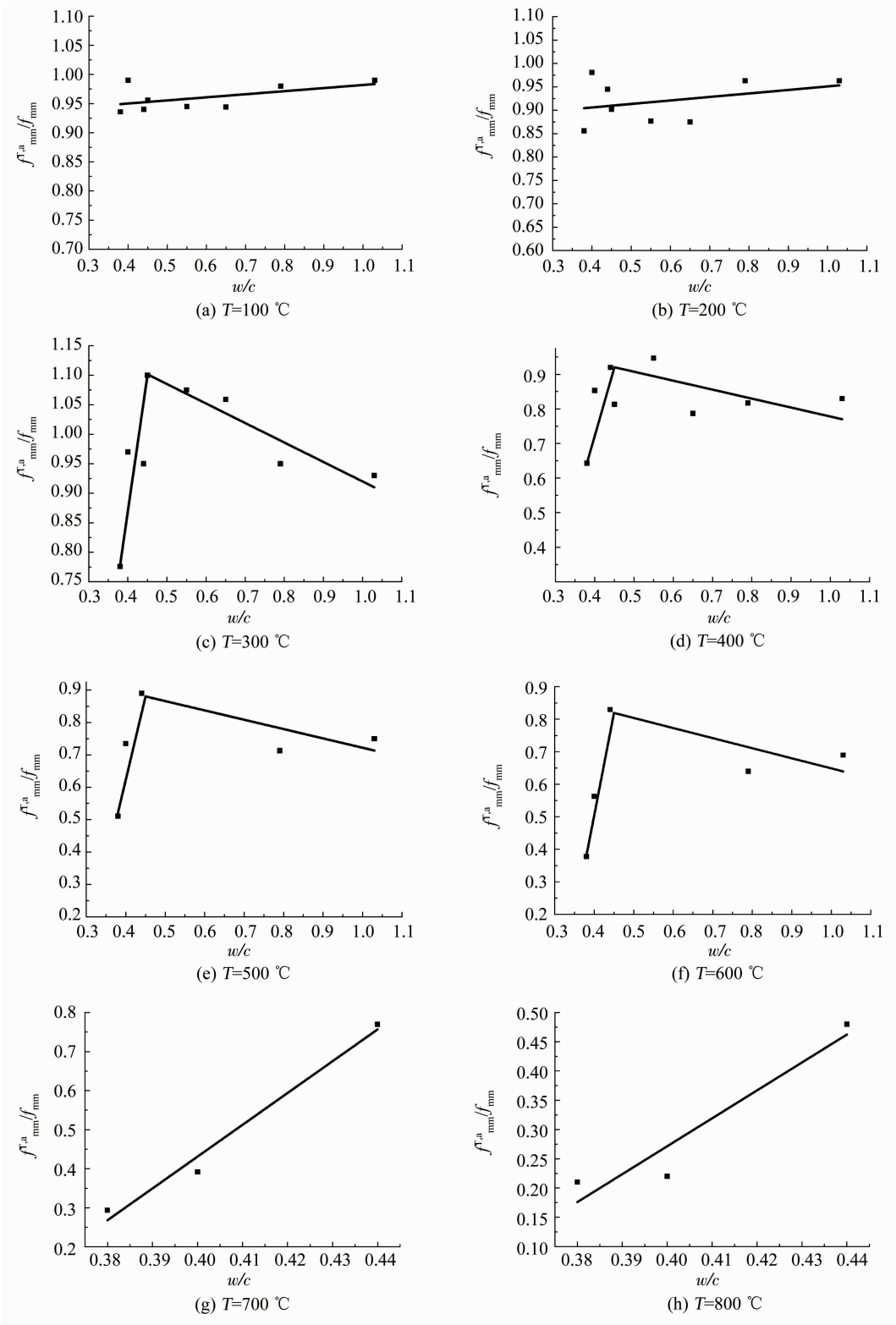


图 3 $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ 随 w/c 的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of $f_{\text{mm}}^{\text{T,a}}/f_{\text{mm}}$ with w/c

采用的试验数据与相应的计算结果对比见表 11. 经统计分析, $\frac{f_{mm,t}^{T,a}/f_{mm}}{f_{mm,t}^{T,a}/f_{mm}}$ 的平均值为 1.001, 标准差为 0.104, 变异系数为 0.104.

表 11 高温后水泥砂浆抗压强度折减系数计算值与实测值对比

Tab. 11 Comparison between calculated and test values of reduction coefficient of compressive strength of cement mortar after high temperature

$T/^{\circ}\text{C}$	w/c	$f_{mm,t}^{T,a}/$	$f_{mm,t}^{T,a}/$	$f_{mm,t}^{T,a}/f_{mm}$
		f_{mm}	f_{mm}	$f_{mm,t}^{T,a}/f_{mm}$
100	0.44	0.936	0.952	1.017
200	0.45	0.902	0.910	1.009
200	0.55	0.877	0.917	1.046
200	0.65	0.875	0.925	1.057
300	0.38	0.776	0.778	1.003
300	0.40	0.970	0.870	0.897
300	0.44	0.949	1.054	1.111
300	0.45	1.100	1.100	1.000
300	0.55	1.075	0.895	0.833
300	0.65	1.059	0.901	0.850
300	0.79	0.950	0.936	0.986
300	1.03	0.929	0.943	1.015
400	0.45	0.813	0.920	1.131
400	0.55	0.947	0.895	0.945
400	0.65	0.787	0.869	1.104
500	0.40	0.735	0.707	0.961
500	0.44	0.895	0.709	0.793
600	0.38	0.378	0.380	1.004
600	0.79	0.640	0.714	1.116
600	1.03	0.690	0.640	0.927
700	0.44	0.770	0.757	0.983
800	0.40	0.220	0.271	1.234

注: w/c 为水灰比; T 为历经温度; $f_{mm,t}^{T,a}/f_{mm}$ 为高温后水泥砂浆抗压强度折减系数实测值; $f_{mm,t}^{T,a}/f_{mm}$ 为高温后水泥砂浆抗压强度折减系数预估值.

2 砖砌体的高温力学性能

2.1 数据收集

文献[9]对黏土实心砖墙进行高温后抗压试验研究,得到抗压强度随温度的变化规律.墙厚 250 mm,墙高和墙宽为 510 mm.采用 M10 水泥砂浆砌筑,黏土砖和水泥砂浆常温强度分别为 19.17 MPa 和 13.0 MPa.升温速率为 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,达到目标温度后恒温 1 h.结果表明,高温后抗压强度在 300 $^{\circ}\text{C}$ 时略有增加,600 $^{\circ}\text{C}$ 时平均下降了 13%.试验数据见表 12.

表 12 文献[9]高温后砖砌体抗压强度试验数据
Tab. 12 Test data of compressive strength of brick masonry after high temperature in Ref. [9]

$T/^{\circ}\text{C}$	$f_m^{T,a}/\text{MPa}$	$f_m^{T,a}/f_m$
20	9.58	1.000
300	8.94	0.933
300	10.46	1.092
300	9.79	1.022
300	10.21	1.066
300	10.31	1.076
600	5.73	0.598
600	9.13	0.953
600	9.84	1.027
600	8.14	0.850
600	8.75	0.913

注: $f_m^{T,a}$ 为高温后砖砌体抗压强度; f_m 为常温下砖砌体抗压强度.

文献[10]研究高温后砖和砂浆的强度变化,砖的强度等级为 MU20,砂浆强度等级为 M5 和 M10,给出高温后强度折减系数,并参考 GB50003—2011《砌体结构设计规范》给出砖砌体抗压强度平均值的计算公式,给出了高温后砖砌体抗压强度平均值的计算公式:

$$f_m = K_1 (C_{t1}f_1)^{\alpha}(1 + 0.07C_{t2}f_2)K_2.$$

(11)

式中: f_m 为高温后无筋砖砌体的抗压强度平均值; f_1 为常温下黏土砖的抗压强度平均值; f_2 为常温砂浆的抗压强度平均值; α 为参数,等于 0.5; K_1 为无筋砖砌体受压安全系数,等于 0.78; K_2 为砂浆强度抗压计算系数.当 $f_2 < 1$ 时, $K_2 = 0.6 + 0.4f_2$;当 $f_2 > 1$ 时, $K_2 = 1$; C_{t1} 为火灾后砖抗压强度折减系数; C_{t2} 为火灾后砂浆抗压强度折减系数.根据式(11)计算的结果见表 13 所示.

表 13 文献[10]高温后砖砌体抗压强度计算值
Tab. 13 Calculated values of compressive strength of brick masonry after high temperature in Ref. [10]

$T/^{\circ}\text{C}$	M10		M5	
	$f_m^{T,a}/\text{MPa}$	$f_m^{T,a}/f_m$	$f_m^{T,a}/\text{MPa}$	$f_m^{T,a}/f_m$
20	5.88	1.000	4.56	1.000
500	5.88	1.000	4.56	1.000
800	5.73	0.974	4.44	0.974
870	5.37	0.913	4.21	0.923
950	5.07	0.862	4.04	0.886

文献[21]等对经历不同温度后的黏土砖墙试件进行抗压强度试验,得到砖墙抗压强度随温度的变化规律.试件尺寸为 746 mm $\times$ 365 mm $\times$ 115 mm,采用强度等级为 M10 的混合砂浆.升温速率为

5 ℃/min,达到目标温度后恒温 1 h. 结果表明,砖墙在经历 800 ℃ 高温后,强度降低 44%. 文献[21]的砖墙高温后抗压强度数据见表 14.

表 14 文献[21]高温后砖砌体抗压强度试验数据
Tab. 14 Test data of compressive strength of brick masonry after high temperature in Ref. [21]

$T/^\circ\text{C}$	$f_m^{T,a}/\text{MPa}$	$f_m^{T,a}/f_m$
20	8.8	1.000
200	8.9	1.011
200	9.8	1.114
200	7.1	0.807
200	7.5	0.852
400	6.3	0.716
400	7.6	0.864
400	6.1	0.693
400	6.4	0.727
600	5.0	0.568
600	6.1	0.693
600	6.2	0.705
600	5.2	0.591
800	4.9	0.557
800	5.1	0.580
800	5.5	0.625
800	4.2	0.477

文献[22]等研究了砖墙高温后的抗压强度变化规律,试件尺寸为 189 mm×120 mm×115 mm,采用强度等级为 M10 的混合砂浆. 发现砖墙抗压强度随温度升高不断下降,在 800 ℃ 高温后,抗压强度为常温的 65% 左右. 试验数据见表 15.

表 15 文献[22]高温后砖砌体抗压强度试验数据
Tab. 15 Test data of compressive strength of brick masonry after high temperature in Ref. [22]

$T/^\circ\text{C}$	$f_m^{T,a}/\text{MPa}$	$f_m^{T,a}/f_m$
20	10.20	1.000
400	6.37	0.625
800	3.53	0.346

2.2 砖砌体高温力学性能计算

文献[9-10]中采用的砂浆为水泥砂浆,文献[21-22]中采用的砂浆为混合砂浆,本文拟合了砂浆分别为水泥砂浆和混合砂浆的高温后砖砌体抗压强度折减系数的下包曲线和拟合曲线. 图 4 为高温后用水泥砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数 $f_{m,c}^{T,a}/f_m$ 与 T 具有 95% 保证率的下包曲线和拟合曲线,得到高温后用水泥砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数标准值和平均值公式:

$$f_{m,c}^{T,a}/f_m = 1.000 - 2.204 \times 10^{-4} (T - 20),$$
$$20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 950\text{ }^\circ\text{C}, T < 20\text{ }^\circ\text{C} \text{ 时取 } T = 20\text{ }^\circ\text{C},$$

$$f_{m,c}^{T,a}/f_m = 1.000 - 1.226 \times 10^{-4} (T - 20),$$
$$20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 950\text{ }^\circ\text{C}, T < 20\text{ }^\circ\text{C} \text{ 时取 } T = 20\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$(12)$$

$$(13)$$

式中: $f_{m,c}^{T,a}/f_m$ 为高温后用水泥砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数; f_m 为常温砖砌体抗压强度,MPa; T 为历经温度,℃.

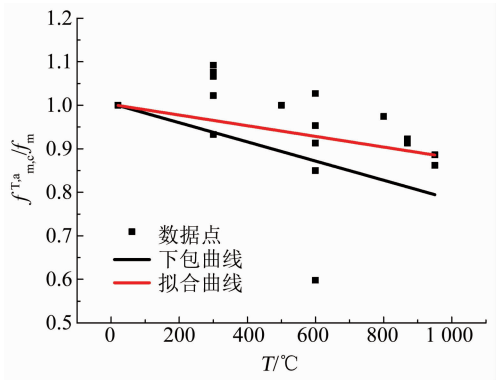


图 4 高温后用水泥砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数 $f_{m,c}^{T,a}/f_m$ 与 T 的下包曲线和拟合曲线

Fig. 4 Envelope curve and fitting curve of $f_{m,c}^{T,a}/f_m$ and T

图 5 为高温后用混合砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数 $f_{m,m}^{T,a}/f_m$ 与 T 具有 95% 保证率的下包曲线和拟合曲线,得到高温后用混合砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数标准值和平均值公式分别为

$$f_{m,m}^{T,a}/f_m = 1.000 - 8.641 \times 10^{-4} (T - 20),$$
$$20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^\circ\text{C}, T < 20\text{ }^\circ\text{C} \text{ 时取 } T = 20\text{ }^\circ\text{C},$$

$$f_{m,m}^{T,a}/f_m = 1.000 - 6.026 \times 10^{-4} (T - 20),$$
$$20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^\circ\text{C}, T < 20\text{ }^\circ\text{C} \text{ 时取 } T = 20\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$(14)$$

$$(15)$$

式中: $f_{m,m}^{T,a}/f_m$ 为高温后砖砌体抗压强度折减系数; f_m 为常温下砖砌体抗压强度,MPa; T 为历经温度,℃.

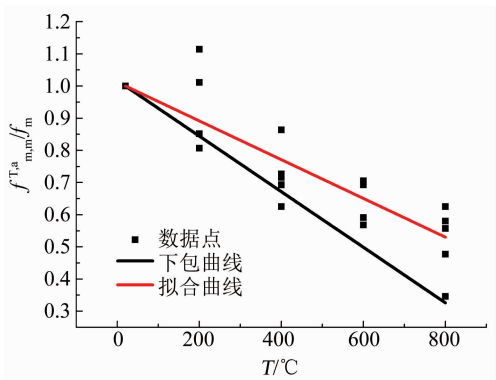


图 5 高温后用混合砂浆砌筑的砖砌体抗压强度折减系数 $f_{m,m}^{T,a}/f_m$ 与 T 的下包曲线和拟合曲线

Fig. 5 Envelope curve and fitting curve of $f_{m,m}^{T,a}/f_m$ and T

根据式(12)和(13)计算的高温后砖砌体抗压强度折减系数与 CECS252—2009《火灾后建筑结构鉴定标准》给出的折减系数如表 16 所示. 可以看出,CECS252—2009《火灾后建筑结构鉴定标准》中,若历经温度不高于 100 ℃,高温后抗压强度与常温下相同,而式(12)和(13)中,经历 100 ℃高温后抗压强度略低于常温下抗压强度;历经 200 ~ 700 ℃,基于式(12)所得高温后水泥砂浆砖砌体抗压强度折减系数高于 CECS252 规定,基于式(13)所得的高温后混合砂浆砖砌体抗压强度折减系数与 CECS252 规定相近. 拟合所得的高温后黏土砖抗压强度折减系数在历经温度为 500 ℃时为 0.637,高温后水泥砂浆抗压强度折减系数在历经温度为 500 ℃时为 0.520,而高温后水泥砂浆砖砌体抗压强度折减系数在历经温度为 500 ℃时为 0.885,对这一结论的内因有待进一步研究.

表 16 高温后砖砌体抗压强度计算值与规范值对比
Tab. 16 Comparison between calculated and test values of reduction coefficient of compressive strength of brick masonry after high temperature

《火灾后建筑结构鉴定标准》折减系数		式(12)计算结果		式(13)计算结果	
$T/$ $^{\circ}\text{C}$	$f_m^{T,a}/$ f_m	$T/$ $^{\circ}\text{C}$	$f_m^{T,a}/$ f_m	$T/$ $^{\circ}\text{C}$	$f_m^{T,a}/$ f_m
20	1.00	20	1.000	20	1.000
100	1.00	100	0.981	100	0.931
200	0.80	200	0.957	200	0.844
300	0.65	300	0.933	300	0.758
500	0.45	500	0.885	500	0.585
700	0.38	700	0.855	700	0.412

3 结论与展望

1)高温下和高温后黏土砖抗压强度均随温度的升高而降低,CECS252—2009《火灾后建筑结构鉴定标准》认为高温后黏土砖抗压强度在历经温度 700 ℃以前不降低,而收集到的数据表明,历经温度 300 ℃后的高温后抗压强度为常温下抗压强度的 86.8% ~ 96.2%,600 ℃时其高温后抗压强度为常温下的 50.4% ~ 71.8%. 给出了高温后黏土砖抗压强度随历经温度变化的下包线.

2)高温后水泥砂浆抗压强度总体上随历经温度的升高而降低. CECS252—2009《火灾后建筑结构鉴定标准》未考虑水灰比对高温后水泥砂浆抗压强度的影响. 收集到的试验数据分析结果表明,若历经温度介于 300 ~ 800 ℃,水灰比不大于 0.45 时,高温

后水泥砂浆抗压强度随水灰比增大而增大;若水灰比大于 0.45,高温后水泥砂浆抗压强度随水灰比增大而减小.

3)用水泥砂浆或混合砂浆砌筑的黏土砖砌体高温后抗压强度都随历经温度的升高而降低. 历经 200 ~ 700 ℃,用水泥砂浆砌筑的黏土砖砌体高温后抗压强度折减系数高于 CECS252 规定,用混合砂浆砌筑的黏土砖砌体高温后抗压强度折减系数与 CECS252 规定相近.

4)黏土砖砌体高温试验研究多以块体和砂浆的强度以及温度作为参数,但实际上同样的砂浆强度可能水灰比等参数也不同,高温试验研究应细化参数,获得多参数影响下的强度退化规律.

5)现有研究成果较多涉及黏土砖、砂浆及黏土砖砌体的高温下和高温后抗压强度,对影响结构安全的弹性模量、刚度等因素研究很少,且研究对象只针对新砌体,对既有建筑中旧砌体的抗火性能鲜有涉及.

参考文献

[1]郑文忠, 闫凯, 王英. 预应力混凝土结构抗火研究进展[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 52
ZHENG Wenzhong, YAN Kai, WANG Ying. Progress of research on fire resistance of prestressed concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 52. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.12.008

[2]吴波, 唐贵和. 近年来混凝土结构抗火研究进展[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 110
WU Bo, TANG Guihe. State of the art of fire resistance study on concrete structures in recent years [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 110. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.06.002

[3]郭铁男. 我国火灾形势与消防科学技术的发展[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(6): 663
GUO Tienan. Fire situation of China and the development of fire science and technology [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(6): 663

[4]甄浩艺. 我国火灾风险评估研究可视化分析(2007—2016)[J]. 武警学院学报, 2017, 33(8): 67
ZHEN Haoyi. Visual analysis of fire risk assessment in China (2007—2016) [J]. Journal of the Armed Police Academy, 2017, 33(8): 67

[5]高云, 张浩, 刁俊楠. 高层建筑火灾致因因素分析与防火安全对策[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(6): 149
GAO Yun, ZHANG Hao, YI Junnan. Analysis on fire causes of high-rise building and fire safety counter measures [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(6): 149. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2009.06.022

[6]陈健. 金龙商厦火损评价与加固方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1
CHEN Jian. Jinlong department store fire damage evaluation and reinforcement method research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 1

- [7] 邹中奇. 粘土空心砖和实心砖的高温力学性能对比试验研究[J]. 科技资讯, 2012, 10(12): 79
ZOU Zhongqi. Experimental research on mechanical performance of clay hollow brick and solid brick at high temperature[J]. Science & Technology Information, 2012, 10(12): 79
- [8] KHALIQ W, BASHIR M F. High temperature mechanical and material properties of burnt masonry bricks [J]. Materials and Structures, 2016, 49(12): 5195. DOI: 10.1617/s11527-016-0854-0
- [9] RUSSO S, SCIARRETTA F. Experimental and theoretical investigation on masonry after high temperature exposure [J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(4): 341. DOI: 10.1617/s11527-016-0854-0
- [10] 闵明保, 李延和, 高本立. 火灾后砖砌体抗压强度变化研究和残余承载力计算[J]. 建筑结构, 1994, 24(2): 44
MIN Mingbao, LI Yanhe, GAO Benli. Study on the change of compressive strength and residual bearing capacity of brick masonry after fire[J]. Building Structure, 1994, 24(2): 44. DOI: 10.19701/j.jzjg.1994.02.012
- [11] MEZENCEVOVA A, YEBOAH N N, BURNS S E, et al. Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 113: 128. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.08.030
- [12] BROWNELL W E. Structural clay products [M]. New York: Springer-Verlag Wien, 2012
- [13] BELLOTTO M, GUALTIERI A, ARTIOLI G, et al. Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I: Kaolinite dehydroxylation[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 1995, 22(4): 207. DOI: 10.1007/BF00202253
- [14] 中国工程建设标准化协会. 火灾后建筑结构鉴定标准: CECS252[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for building structural assessment after fire: CECS252 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009
- [15] 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
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. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2009.05.014
- [16] 顾轶颀. 火灾及灭火过程对水泥砌筑砂浆的抗压性能的影响研究[D]. 西安: 西南交通大学, 2011
GU Yiting. Residual strength of cement mortar exposed to the high temperature and rushed by cooling water [D]. Xi'an: Southwest Jiaotong University, 2011
- [17] 颜军, 尚守平, 聂旭. 高性能复合砂浆高温后的抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程, 2006, 3(4): 59
YAN Jun, SHANG Shouping, NIE Xu. Experimental investigation of compressive strength of high performance composite mortar after elevated temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 59. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2006.04.012
- [18] 刘赞群, 邓德华. 胶凝材料对水泥砂浆耐高温性能的影响[J]. 混凝土, 2003(12): 19
LIU Zhanqun, DENG Dehua. Influence of cementitious materials on the high temperature properties of mortars [J]. Concrete, 2003(12): 19
- [19] CULFIK M S, ÖZTURAN T. Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(5): 809. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00709-3
- [20] 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
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. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2016.07.058
- [21] 苗生龙, 舒前进, 袁广林. 高温后黏土砖砌体的抗压承载力[J]. 江南大学学报, 2011, 10(2): 201
MIAO Shenglong, SHU Qianjin, YUAN Guanglin. On bearing capacity of brick masonry after high temperature [J]. Journal of Jiangnan University, 2011, 10(2): 201
- [22] 谭巍, 胡克旭. 高温及冷却后砖砌体的力学性能[J]. 住宅科技, 1998, 19(10): 38
TAN Wei, HU Kexu. The mechanical properties of the brick masonry after high temperature and cooling [J]. Housing Science, 1998, 19(10): 38. DOI: 10.13626/j.cnki.hs.1998.10.012

(编辑 刘 彤)