

高温作用后混凝土抗拉强度的影响分析

胡翠平<sup>1</sup>, 徐玉野<sup>1</sup>, 罗漪<sup>1</sup>, 郑涌林<sup>1</sup>, 林碧兰<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 对 62 组混凝土标准立方体试块进行劈裂抗拉强度试验,考察受火温度、冷却方式、养护龄期及静置时间对高温作用后混凝土劈裂断面形态和抗拉强度的影响规律,并针对不同情况建议了高温作用后混凝土抗拉强度的计算式.结果表明:受火温度对高温作用后混凝土劈裂断面的破坏形态和抗拉强度影响很大.当受火温度在 300 ℃ 以内时,劈裂断面较为平整;随着受火温度的提高,劈裂断面越来越粗糙,当受火温度超过 600 ℃ 时,劈裂断面主要经过硬化水泥浆,断面处粗骨料未发生破坏.喷水冷却后,高温作用后混凝土的抗拉强度总体上比自然冷却后的低.养护龄期越短,高温作用后混凝土的抗拉强度越低.高温作用后混凝土的抗拉强度总体上随静置时间呈先下降后上升的发展趋势,且当静置时间为 28 d 时,混凝土的抗拉强度最低.

**关键词:** 混凝土; 抗拉强度; 劈裂断面; 高温; 冷却方式

**中图分类号:** TU 528                      **文献标志码:** A

高温作用后钢筋和混凝土材料的力学性能研究是火灾后混凝土结构损伤评定与加固设计的基础<sup>[1-4]</sup>.钢筋混凝土梁柱构件和节点的承载力、裂缝宽度、混凝土的碳化等均需用到混凝土材料的抗拉强度<sup>[5]</sup>.因此,高温作用后混凝土的抗拉强度研究具有重要意义.目前,火灾后混凝土的抗拉强度研究已取得了一定的进展<sup>[6-12]</sup>.混凝土结构在施工过程中由于脚手架和木模板较多,施工过程中的电焊易产生火星,以及灭火难度大等原因发生不少损失严重的火灾事故实例.施工阶段发生火灾时混凝土的龄期可能少于 28 d,此类少龄期的混凝土火灾后的抗拉强度研究尚未见文献报道.另外,火灾后混凝土的静置时间对灾后混凝土抗压强度的影响规律已有文献报道<sup>[10]</sup>,但尚未见到其对火灾后混凝土抗拉强度影响规律方面的研究报道.通过查阅相关文献可知,目前火灾后混凝土抗拉强度的试验研究中存在着恒温时间不够导致试块内各点最高过火温度不一致<sup>[7-8]</sup>、未按标准试件和方法进行劈裂试验<sup>[9-10]</sup>,未考虑受火前混凝土的龄期影响和火灾后静置时间的影响等问题.因此,本文进行了 62 组混凝土标准立方体试块的劈裂抗拉强度试验,分析了冷却方式、养护龄期及静置时间等对不同温度作用后混凝土劈裂断面形态和抗拉强度的影响规律,并针对不同情况建议了高温作用后混凝土抗拉强度的计算式.

1 试验概况

1.1 试验设计与制作

试验进行 7 个系列的劈裂抗拉强度试验,共制作了 62 组 186 个(每组 3 个)尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试块,其中 3 组用于 28 d 混凝土立方体抗压强度的测试.表 1 为 7 个试验系列的基本参数.表 1 中:τ,t 分别表示龄期和静置时间.对于每个试验系列,试验考虑的温度均分常

表 1 试验的基本参数

Tab.1 Main parameters of experiment

试验系列	冷却方式	τ/d	t/d
1	自然冷却	40	7
2	喷水冷却	40	7
3	自然冷却	40	14
4	自然冷却	40	28
5	自然冷却	40	56
6	自然冷却	21	7
7	自然冷却	14	7

**收稿日期:** 2013-09-09

**通信作者:** 徐玉野(1978-),男,副教授,主要从事结构抗火的研究. E-mail:yuyexu@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50908091);中央高校基本科研业务费专项基金资助(JB-SJ1011);福建省自然科学基金面上资助项目(2012J01221, 2012J05099);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(11FJRC03);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20133022)

温,100,200,300,400,500,600,700,800 ℃共 9 个温度等级. 其中系列 1~5 的常温下工况条件相同,故作为同一批制作. 混凝土强度按 C30 设计,水泥采用 32.5 级的普通硅酸盐水泥,砂为中砂,碎石粒径为 10~30 mm. 每立方米混凝土的试验配合比为水泥 425 kg,砂 605 kg,石子 1 215 kg,水 195 kg,材料均为干燥状态下的质量,水灰比为 0.46.

试块分 3 批浇筑,第一批为系列 1~5,第二批为系列 6,第三批为系列 7. 试块浇注完成后浇水养护 7 d,接着放在实验室内自然养护至设定的龄期. 3 批混凝土 28 d 的标准立方体抗压强度分别为 24.9,23.9,22.2 MPa,且 3 批混凝土在各自设定龄期时的劈裂抗拉强度分别为 2.87,2.65,2.29 MPa.

1.2 试验步骤及装置

各批混凝土试块养护至预定龄期后,运至福建省泉州市某热处理厂进行高温加热试验,具体装置如图 1 所示. 高温加热试验时,为使试块内外温度保持一致,试块在达到设定温度后恒温 9 h. 高温加热处理后,将试块吊出,按表 1 中参数进行自然冷却和喷水冷却;待试块冷却后,运回华侨大学工程结构实验室进行劈拉试验.

劈裂抗拉试验按 GB 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》的规定<sup>[13]</sup>执行,在微机控制电液伺服万能试验机(附劈裂夹具)上进行. 图 2 为试验加载装置. 试块摆放时,应注意劈裂承压面和劈裂面与试块成型时的顶面垂直,加载速度取 0.05 MPa·s<sup>-1</sup>. 混凝土的劈裂抗拉强度  $f_{ts}$  的计算式为

$$f_{ts} = 0.637F/A. \tag{1}$$

式(1)中: $F$  为试块的破坏荷载; $A$  为试块劈裂面面积.



(a) 电热炉



(b) 温控仪

图 1 热处理装置

Fig. 1 Device of heat treatment



图 2 劈裂抗拉试验装置

Fig. 2 Device of splitting tensile test

2 试验结果分析

2.1 试块外观特征及破坏形态

龄期 40 d 的混凝土受高温作用和自然冷却后的外观特征:100,200 ℃时混凝土表面颜色和常温下相似;300 ℃时表面颜色暗灰、出现少量细微裂缝,且随着温度升高,裂缝数量变多、宽度变大;400,500 ℃时混凝土表面略带红色,混凝土开始变得疏松;600 ℃时混凝土表面颜色发白,开始出现少量掉皮现象;700 ℃时混凝土表面颜色为灰白色,有个别角脱落;800 ℃时混凝土表面变为淡黄色,裂缝宽而多,且试块非常疏松,搬试块时需轻拿轻放,否则易被磕碎.

喷水冷却后,混凝土的表面颜色随着温度升高的具体变化:100 ℃下混凝土的表面颜色与自然冷却颜色相近;200,300 ℃时混凝土试块表面颜色开始泛有黄色斑点;400 ℃时混凝土的表面颜色呈淡红色;500 ℃时混凝土的表面颜色呈砖红色;600,700 ℃时混凝土表面颜色较自然冷却后的白;但在 800 ℃时,混凝土的表面颜色反而转为淡黄色. 同一温度下裂缝相对于自然冷却下数量更多、宽度更大. 少龄期(龄期为 14,21 d)混凝土经高温作用和自然冷却后试块表面均呈现淡红色,且随着温度升高,颜色加深;同一温度下养护龄期越短,颜色也越深,且裂缝宽度越大,数量越多. 高温作用后,静置时间对混凝土的外观特征无明显影响.

劈裂抗拉试验后,试块劈裂断面处的典型形态如图 3 所示. 混凝土试块的破坏形态随过火温度的变化可分为如下 3 种情况. 1) 300 ℃及以下的高温作用后试块的破坏过程急促,并伴随有声响,破坏断面

直接穿过骨料,断面比较平整。

2) 300~600 ℃高温作用后,随着过火温度的升高,水泥凝胶材料逐渐被分解,强度降低,从而导致粗骨料破坏率变小,破坏断面变得粗糙。

3) 经历 600 ℃及以上的高温作用后,混凝土试块变得极为疏松,加载后为松散状态,劈裂断面不完整,且该处粗骨料基本上未发生破坏。

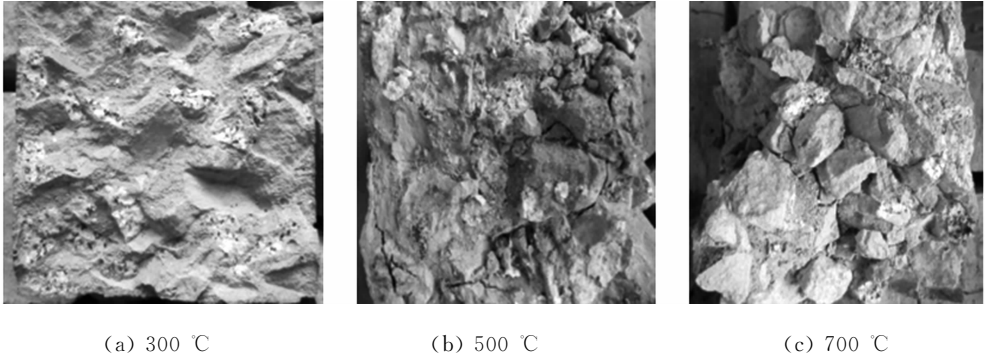


图 3 混凝土试块的破坏形态随过火温度的变化

Fig. 3 Variation of failure modes of concrete cubes with the fire temperature

2.2 冷却方式对高温作用后混凝土抗拉强度的影响

不同冷却方式后静置 7 d 的混凝土抗拉强度与受高温作用前抗拉强度的相对比值( $f_t(\theta)/f_t$ )随过火温度  $\theta$  的变化,如图 4 所示. 从图 4 的实验结果可以得出以下两点结论。

1) 随着过火温度的升高,高温作用后混凝土材料的抗拉强度降低. 其机理是,高温作用会使混凝土的组成材料发生变化,在 200 ℃以内时,混凝土内部主要是发生自由水蒸发;到 300 ℃时混凝土内部自由水已全部蒸发完毕,开始失去结晶水,水泥的水化产物开始脱水破坏,碳酸钙的含量增加,混凝土开始碳化;400 ℃时,氢氧化钙分解成石灰和水蒸气,混凝土结构变得疏松,卵石骨料开始爆裂;500 ℃时混凝土中结晶水及水泥水化物大多丧失,浆体体积收缩;575 ℃时,粗骨料中  $\alpha$  型石英发生相变蜕变成  $\beta$  型石英,使粗骨料体积增大,混凝土内部裂缝增多<sup>[14]</sup>;在 700 ℃及以后时,结晶水已完全丧失,氢氧化钙已不存在,而碳酸钙有少量分解成 CaO 和 CO<sub>2</sub>,此时混凝土更加疏松。

2) 除 600,700 ℃的高温作用外,喷水冷却后混凝土抗拉强度比自然冷却后的高. 这可能是因为 在 500 ℃前,喷水冷却时热胀冷缩产生的应力使混凝土的裂缝和损伤进一步发展,使混凝土的抗拉强度降低;但在 600~700 ℃的高温作用后,混凝土内部结晶水和水化物几乎全部丧失,致使浆体收缩产生许多较宽的裂缝,结构疏松,喷淋的水分较容易进入其中,水化较充分,生成新的水泥凝胶体,从而使抗拉强度得到一定的提升;而 800 ℃的高温作用后,进行喷淋冷却时,发出劈啪的爆裂声,内部骨料破碎,因此其抗拉强度较自然冷却的低。

对图 4 折线进行回归拟合,可以得到养护龄期为 40 d,不同冷却方式后,混凝土高温作用后静置 7 d 时抗拉强度相对值与过火温度的相关计算式。

1) 自然冷却方式下,抗拉强度相对值与过火温度的相关计算式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 0.976 + [1.56 \times (\frac{\theta}{100}) - 4.35 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.345 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \tag{2}$$

2) 喷淋冷却方式下,抗拉强度相对值与过火温度的相关计算式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 1.02 - [9.85 \times (\frac{\theta}{100}) + 1.42 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.146 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \tag{3}$$

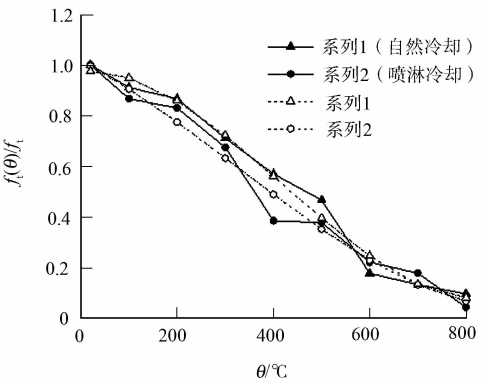


图 4 冷却方式对高温作用后混凝土抗拉强度的影响情况

Fig. 4 Effect of cooling mode on tensile strength of concrete after high temperature

式(3)中:过火温度  $\theta$  的取值范围为  $20\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 式(2), (3)的统计参数  $\gamma, \chi, \sigma$  值分别为 0.989 9, 1.015 4, 0.096 8 与 0.982 5, 0.934 0, 0.081 1. 其中  $\gamma$  指计算值与试验值的相关系数,  $\chi$  和  $\sigma$  分别指计算值与试验值比值的均值与方差. 根据图 4 及各公式的统计参数可知:式(2), (3)与试验结果吻合较好.

将式(2), (3)与文献[6, 9-10, 15]的结果对比, 如图 5 所示. 图 5 中:文献[6, 9-10, 15]的试块尺寸均为 100 mm 的标准立方体试块, 恒温时间分别为 1, 1, 6, 6 h, 混凝土强度分别为 C50, C50, C30, C30. 从图 5 及各文献的试验参数可知:在自然冷却及喷淋冷却下, 混凝土的抗拉强度均随受火温度的发展规

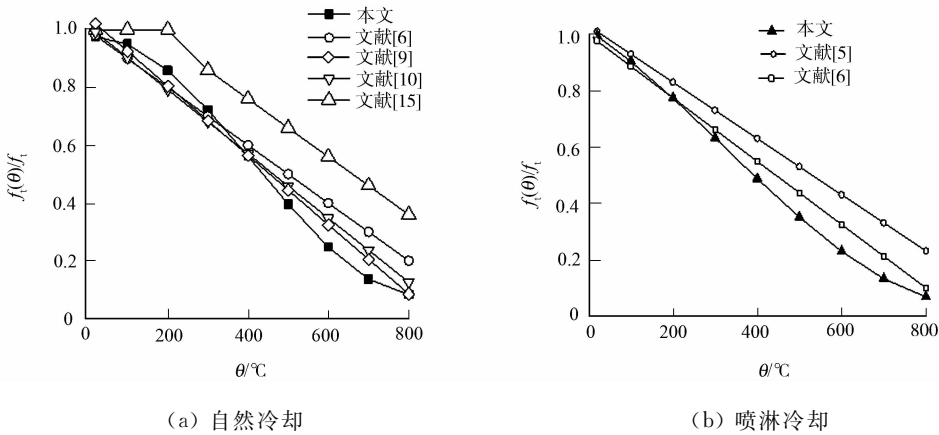


图 5 不同文献下抗拉强度随过火温度的变化关系

Fig. 5 Relationship between splitting tensile strength and after high temperature on different references

律, 与各文献拟合结果大致吻合, 但仍存在一定差异. 这可能是因为试块尺寸、混凝土强度及恒温时间不同而导致的.

2.3 养护龄期对高温作用后混凝土抗拉强度的影响

不同龄期的混凝土高温作用后静置 7 d, 其抗拉强度与受高温作用前抗拉强度的相对比值 ( $f_t(\theta)/f_t$ ) 随过火温度  $\theta$  的变化情况, 如图 6 所示. 从图 6 可知:养护龄期越短, 高温作用后混凝土的抗拉强度总体上越低. 这可能是由于养护龄期越短, 混凝土的水化程度越不完全, 内部自由水的含量越高, 高温作用后混凝土中水分丧失越多, 内部孔隙率越大, 导致其高温作用后强度较低. 通过回归拟合, 可以得到不同龄期的混凝土高温作用后静置 7 d 时抗拉强度相对值与过火温度的关系式.

1) 混凝土养护龄期为 21 d 的抗拉强度相对值与过火温度的关系式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 0.986 + [1.70 \times (\frac{\theta}{100}) - 5.17 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.442 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \quad (4)$$

2) 混凝土养护龄期为 14 d 的抗拉强度相对值与过火温度的关系式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 0.984 - [1.24 \times (\frac{\theta}{100}) + 4.96 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.450 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \quad (5)$$

式(5)中:过火温度  $\theta$  的取值范围为  $20\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而养护龄期 40 d 时的回归结果参见式(2). 式(4)与(5)的统计参数  $\gamma, \chi, \sigma$  值分别为 0.989 9, 0.775 4, 0.110 7 与 0.982 5, 1.0511, 0.076 7. 其中:  $\gamma, \chi, \sigma$  具体意义与上述相同. 从图 6 及各公式的统计参数可知:式(4), (5)的拟合结果与试验结果吻合较好.

2.4 静置时间对高温作用后混凝土抗拉强度的影响

高温作用后混凝土静置不同时间的抗拉强度与受高温作用前抗拉强度的相对比值 ( $f_t(\theta)/f_t$ ) 随过火温度  $\theta$  的变化情况, 如图 7 所示. 从图 7 可以得出如下两个结论.

1) 高温作用后混凝土的抗拉强度比值随静置时间总体呈先降低后上升的趋势, 静置 28 d 时达到最低; 但到静置 56 d 时, 不同温度下混凝土抗拉强度均得到回升, 且温度  $\theta \geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 静置 56 d 的混凝土

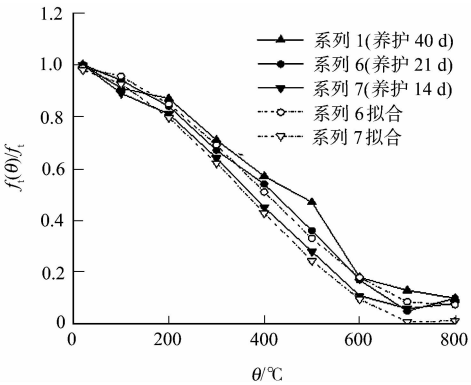


图 6 养护龄期对高温作用后混凝土抗拉强度的影响情况

Fig. 6 Effect of curing age on tensile strength of concrete after high temperature

土抗拉强度值大于静置 7 d 时的值. 这可能是因为这可能是由于高温作用下,混凝土内自由水蒸发、部分结合水丧失及化合物发生变化,从而致其孔隙率增大、出现细微裂缝,以及升降温全过程作用后试块内部会产生一定的残余应力等造成. 当静置时间较短时,在残余应力的释放过程中原试块内部的细微裂缝会继续发展,残余应力本身的释放也会对混凝土的抗拉强度造成进一步的损伤;随着静置时间的推移,空气中水分的渗入,促使混凝土发生二次水化反应,对其强度恢复又有一定的作用.

2) 不同静置时间影响下,高温作用后混凝土的抗拉强度随温度总体呈降低的趋势,但受火温度为 300~400 ℃ 时,静置 14,28,56 d 高温作用后混凝土的抗拉强度值出现近平台段现象. 这可能是因为 300~400 ℃ 高温作用导致混凝土内部水泥水化产物脱水破坏引起强度降低,与高温作用后静置时间较长混凝土发生二次水化反应引起的强度恢复,大致处于一个相对平衡的阶段. 通过回归拟合,可得到高温作用后混凝土静置不同时间抗拉强度相对值与过火温度的关系式.

1) 静置 14 d 抗拉强度相对值与过火温度的关系式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 1.00 - [9.60 \times (\frac{\theta}{100}) + 1.37 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.142 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \tag{6}$$

2) 静置 28 d 抗拉强度相对值与过火温度的关系式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 1.06 - [28.3 \times (\frac{\theta}{100}) + 3.56 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.196 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \tag{7}$$

3) 静置 56 d 抗拉强度相对值与过火温度的关系式为

$$\frac{f_t(\theta)}{f_t} = 1.02 - [15.3 \times (\frac{\theta}{100}) + 0.996 \times (\frac{\theta}{100})^2 + 0.0566 \times (\frac{\theta}{100})^3] \times 10^{-2}. \tag{8}$$

式(8)中:过火温度  $\theta$  的取值范围为  $20\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而静置 7 d 时的回归结果见式(2). 式(6),(7),(8)的统计参数  $\gamma, \bar{\chi}, \sigma$  值分别为 0.978 1, 1.030 0, 0.038 0 和 0.987 4, 1.022 7, 0.060 8, 以及 0.963 2, 1.015 5, 0.028 9. 其中:  $\gamma, \bar{\chi}, \sigma$  具体意义与上述相同. 为了简化和统一计算表达式,回归公式中未考虑个别接近平台的情况,但从图 7 及各公式的统计参数可以看出:计算结果与试验数据总体上吻合较好.

鉴于影响火灾后混凝土抗拉强度的因素众多,且实际工程中还有很多工况无法一一考虑. 对于本试验未包括的其他工况,火灾后混凝土的抗拉强度建议按下述方法近似计算:喷水冷却后混凝土的抗拉强度按式(3)计算;低龄期混凝土(大于 14 d,小于 28 d)自然冷却后的抗拉强度,可利用式(2)、式(4)和式(5)的结果进行插值计算;对于高温作用后自然冷却混凝土的抗拉强度取偏保守的式(7)进行计算.

3 结 论

1) 受火温度对高温作用后混凝土劈裂断面的破坏形态和抗拉强度影响很大. 当受火温度在 300 ℃ 以内,劈裂断面较为平整;随着受火温度的提高,劈裂断面越来越粗糙,当受火温度超过 600 ℃ 时,劈裂断面主要经过硬化水泥浆,断面处粗骨料未发生破坏. 喷水冷却混凝土和高温作用后低龄期混凝土的混凝土表面颜色与自然冷却的略有不同. 高温作用后静置时间对混凝土的表观特征无明显影响.

2) 各种影响因素下,混凝土的抗拉强度均随着温度的升高而降低,喷水冷却后混凝土的抗拉强度总体比自然冷却后的低. 养护龄期越短,高温作用后混凝土的抗拉强度越低. 高温作用后混凝土的抗拉强度总体上随静置时间呈先下降后上升的发展趋势,且当静置时间为 28 d 时,混凝土的抗拉强度最低.

3) 建立不同冷却方式、养护龄期及静置时间下混凝土抗拉强度比随过火温度的表达式,研究表明,计算结果与试验结果吻合较好,可供火灾后承载力评定参考使用.

4) 借鉴已有文献对试验现象进行了适当的机理分析,但各因素对高温作用后混凝土抗拉强度影响

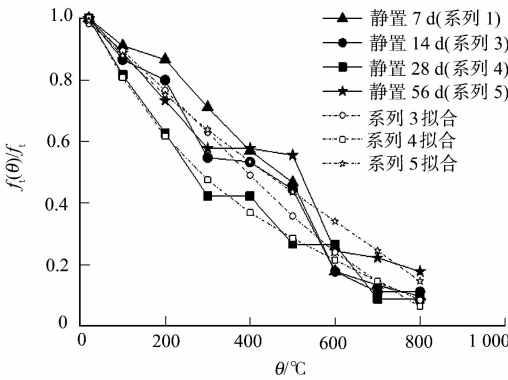


图 7 静置时间对高温作用后混凝土抗拉强度的影响情况  
Fig. 7 Effect of standing time on tensile strength of concrete after high temperature

规律的微观机理还需进一步深入研究.

参考文献:

[1] 林燕卿,徐玉野,杨清文,等. 火灾后混凝土短柱的滞回性能和损伤评定[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2013,34(5):563-569.

[2] CHANG Y F,CHEN Y H,SHEU M S,et al. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures[J]. Cement and Concrete Research,2006,36(10):1999-2005.

[3] DIMIA M S,GUENFOUD M,GERNAY T,et al. Collapse of concrete columns during and after the cooling phase of a fire[J]. Journal of Fire Protection Engineering,2011,21(4):245-263.

[4] 吴红翠,王全凤,徐玉野. HRB500 级高强钢筋高温后的力学性能试验[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(4):432-435.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:34-97.

[6] 徐彧,徐志胜. 高温作用后混凝土强度试验研究[J]. 混凝土,2000(2):44-45,53.

[7] 项凯,余江滔,陆洲导. 多因素影响下高温后混凝土劈裂抗拉强度试验[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(10):51-55.

[8] 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:自然科学版,1998,32(5):598-602.

[9] 王峥,宋玉普. 高温对混凝土抗拉强度与黏结强度影响的试验研究[J]. 混凝土,2010(8):51-53.

[10] 覃丽坤,宋玉普,王玉杰,等. 高温对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土,2004(5):9-11.

[11] 余江滔,夏敏,陆洲导. 受火(高温)后混凝土的随机损伤本构关系[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(2):158-165.

[12] 吕天启,赵国藩,林志仲. 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.

[13] 中华人民共和国建设部. GB 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:19-20.

[14] 吕天启,赵国藩,林志仲,等. 高温后静置混凝土的微观分析[J]. 建筑材料学报,2003,6(2):135-141.

[15] 朱玛,徐志胜,徐彧. 高温后混凝土强度试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2000,15(2):70-72.

Experimental Study on the Tensile Strength of  
Concrete after High Temperature

HU Cui-ping<sup>1</sup>, XU Yu-ye<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>1</sup>,  
ZHENG Yong-lin<sup>1</sup>, LIN Bi-lan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. School of Material Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** The splitting tensile strength of 62 groups of concrete standard cubic specimens was investigated. The effects of temperature, cooling mode, curing age and standing time on the failure pattern of splitting section and the tensile strength of concrete were discussed, and the related calculation formula of the tensile strength was proposed in different conditions. The results show that there is a great influence of temperature on splitting sectional failure pattern and tensile strength of concrete. The splitting section is smooth at the temperature <300℃, and becomes rougher at higher temperature. When the temperature exceeds 600℃, the splitting occurs at the edge of coarse aggregates which are nearly undamaged. The tensile strength of the concrete after fire with spray cooling is smaller than that with natural cooling. The shorter the curing age is, the lower the tensile strength of the concrete after fire. With an increase in standing time, the tensile strength of the concrete after fire decreases initially and then increases, the minimum strength locates at 28 days standing time.

**Keywords:** concrete; tensile strength; splitting section; high temperature; cooling mode