·综述·

文章编号:1006-7329(2003)03-0110-05

高温下及高温后钢筋混凝土结构性能评述*

阎慧群[1], 王清远[1], 闫 宁[2]
(1.四川大学 建筑工程与环境学院,成都 610065;2.乐山市建设工程质量检验测试中心,乐山 614000)

摘要:随着钢筋混凝土在现代建筑中越来越广泛的使用和近年来建筑物火灾发生的增长,人们有必要对混凝土结构的火损伤行为有更系统和量化的理解。在高温(火灾)条件下,钢筋混凝土的结构性能将发生重要的变化,比如抗压、抗拉强度,粘结锚固性能损失等等。本文就从高温(火条件)下及高温后普通钢筋、预应力钢筋及混凝土等结构材料在材料性能退化规律的研究成果方面进行简要的介绍,为进一步研究新型钢筋混凝土结构的抗高温(火灾)性能及其损伤评估提供参考。

主题词:钢筋;混凝土;高温(火)损伤;退化规律
中图分类号:TU378.8 **文献标识码**:A

Behavior of Reinforced Concrete Structure under and after High Temperature: A Review

YAN Hui-qun[1], WANG Qing-yuan[1], YAN Ning[2]
(1. Department of Civil Engineering and Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China; 2. Leshan Quality Test Verification Center of Construction Engineering, Leshan 614000, P.R.China)

Abstract: With the extensive use of reinforced concrete in modern buildings and the rise in fire occurrences in recent years, a more thorough and quantitative understanding of fire damage to concrete is needed. When exposed to high temperatures, such as in a fire, reinforced concrete undergoes a series of changes in its mechanical properties such as compressive strength, tensile strength and bond strength between the steel and concrete. In this paper, a review is presented concerning the deterioration law of behavior of structural materials, such as reinforcements, pre-stressing tendons, concrete, etc., under and after high temperature. It provides a reference for further study of fire resistance behavior and the damage assessment of high performance concrete structure.

Keywords: reinforcement; concrete; high temperature damage; deterioration law

2001年"9.11"恐怖袭击事件中,纽约世界贸易中心南北主楼先后经历了两架客机对其猛烈冲撞、爆炸、燃烧,造成了严重的人员伤亡和经济损失。事后,美国联邦紧急事务管理局和美国民用工程师协会联合发表了研究报告[1]。报告指出,由于设计和建筑特征上的独到之处,这两栋大楼在遭

* 收稿日期:2003-03-03
作者简介:阎慧群(1976-),女,河北秦皇岛人,硕士生,主要从事组合材料结构工程研究。

到客机的撞击后并未立即倒塌；大楼的最终倒塌是飞机冲撞和随后引发的大火共同作用的后果。两栋大楼在飞机冲撞后的一段时间内曾顶住了冲击力的影响。世贸中心北楼遭袭后支撑了 122 min 才倒塌，南楼则支撑了 57 min。在这段时间里，尽管大楼外部的支撑部件遭到破坏，但是主体结构成功地将力量分散到其它支撑点上。如果没有大火因素，这两栋大楼的“遗体”或许可以长久存留，除非遇到地震和严重风暴侵袭。由此可见，高温火损伤是造成倒塌的直接原因。

在这次恐怖事件发生后，全世界的工程设计与研究人员更加重视大型工程结构的高温（火）损伤破坏研究。但由于火灾时温度变化与分布的复杂，理论上获得不同结构及其各种材料在多变的高温环境下的力学性能与本构关系的巨大困难，以及实验研究的昂贵费用和复杂技术等都极大地影响了研究的进展。目前，国外的很多设计人员在抗高温（火灾）性能和火灾下结构的设计等方面进行了许多研究[2-6,16-17]。而对我国来说，钢筋混凝土结构房屋仍是建筑工程的主体，即使是其他结构形式的房屋，楼屋盖的材料也多为钢筋混凝土。因此了解和总结火灾下及火灾后钢筋混凝土材料性能的退化规律，为深入开展新型钢筋混凝土结构抗高温（火灾）性能及其损伤评估的研究奠定基础，是很有必要的。

本文以钢筋混凝土结构为研究对象，主要从高温下和高温后钢筋和混凝土材料性能的变化上进行了评述和讨论。

1　高温下钢筋混凝土结构的性能

1.1　钢筋[7-20]

在一般的钢筋混凝土构件中，常用的钢筋主要分为预应力筋和非预应力筋。高温（火条件）下，钢筋的强度和变形性能的变化必然影响钢筋混凝土结构的受力性能。特别是预应力混凝土结构，一旦发生火灾，就会因为钢筋在高温下的短期徐变比常温下要大得多，而且在较高温度和较高应力水平下的钢筋短期徐变将趋向于不稳定状态，致使结构的变形量增大等原因，而将引起预应力高强钢筋（丝）的预应力丧失，钢筋（丝）的强度显著降低，结构的承载能力严重受损。因此，研究高温（火条件）下钢筋的受力性能是十分必要的。目前，吕彤光，时旭东，过镇海[7]、李明，朱永江，王正霖[8]、郑文忠，许名鑫，王英[10]、同济大学的陈荣毅，沈祖炎[11]和朱伯龙、苏小卒、陆洲导、姚亚雄、胡克旭[12-15]等都提出了有关这方面的研究结果。

文献[8]中指出对于普通钢筋，当温度不高于 200℃时，钢筋的屈服强度和极限强度随温度升高而降低的速率较慢；当温度升至 200 ℃～400 ℃时，钢筋强度随温度升高而降低的速率加快；温度上升超过 400 ℃后，钢筋强度随温度升高而下降的速率明显加快。这三个阶段的钢筋屈服强度的退化曲线（图 1）可用下式表述：（下式中：φ_y 为强度系数且 $\varphi_y = f_y^T/f_y$，其中：f_y 设为钢筋在常温下的屈服强度，f_y^T 设为钢筋在 T 温度时的屈服强度。）

$$
\begin{aligned}
&T = 0\ ℃ \sim 200\ ℃\ 时 && \varphi_y = 1.0 \\
&T = 200\ ℃ \sim 400\ ℃\ 时 && \varphi_y = -0.0011T + 1.22 \\
&T = 400\ ℃ \sim 600\ ℃\ 时 && \varphi_y = -0.0021T + 1.62
\end{aligned}
\tag{1}
$$

而对于预应力钢筋，其强度在高温下的降低速率较普通钢筋的快。另外，在高温下其还易产生预应力损失。当温度变化时，预应力钢筋会因热胀冷缩现象而随之发生应变变化。处于高温环境（温度大于 100 ℃）中的预应力钢筋，随温度升高而产生的伸长应变与温差之间不再符合线性关系，这是因为高温作用同时会使预应力钢筋的弹性模量也发生改变，并且预应力钢筋在处于比一般温度下的应力状态更高的高应力状态时，就必将会引起高温下钢材的蠕变和松弛急增，从而导致预应力混凝土构件中预应力钢筋的预应力产生进一步的损失而减少。在文献[18]中表明了当预应力筋的受热温度达到 200 ℃时，其预加应力值将减少 45%～55%；受热达到 300 ℃时，几乎将失去全部预加应力。

1.2 混凝土[10-12,19-22]

由于混凝土是一种热惰性材料，混凝土的强度等级、骨料类型、配合比和升温速度等都对其高温强度有一定的影响。文献[21]中指出由于混凝土的导热性能很差，因此适当增加混凝土保护层的厚度可大大延缓其内钢筋的升温进程，降低钢筋强度下降的速度，以满足钢筋混凝土结构构件的抗火要求。高温(火灾)下，混凝土因自身材料的性能恶化，比如：随温度升高体积膨胀、强度下降等，从而会产生结构构件局部破坏，出现结构构件刚度降低、挠度加大、表面龟裂、甚至酥松、保护层脱落、钢筋外露及蜕皮、截面变细等现象。文献[19]给出了高温下混凝土棱柱体抗压强度的退化规律(图2a)：

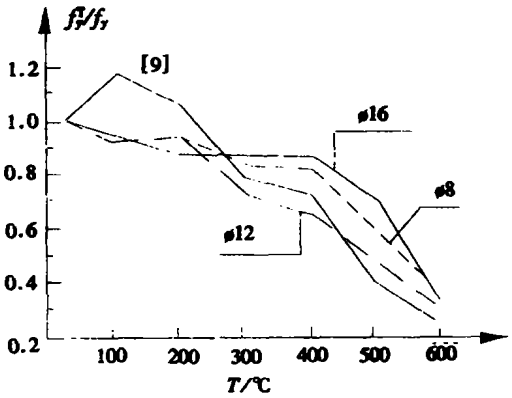
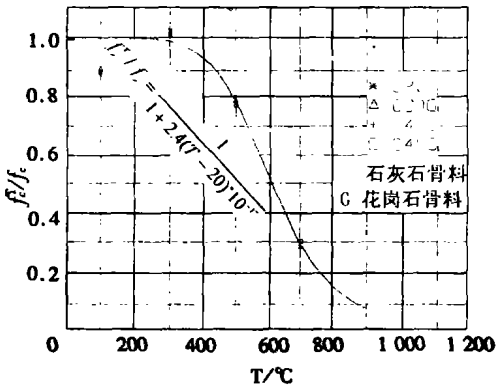
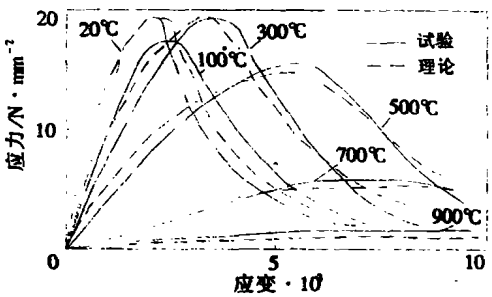


图1 $\varphi_y - T$ 曲线[3]

$$\frac{f_c^T}{f_c} = \frac{1}{1 + 2.4(T - 20)^6 \times 10^{-17}} \qquad 20\ ℃ \leqslant T \leqslant 700\ ℃ \tag{2}$$



a) 棱柱体抗压强度



b)应力－应变曲线

图2 混凝土的高温强度和变形[20]

随着温度的升高，以混凝土棱柱体为例[20]，其抗压应力－应变曲线逐渐趋于扁平(如图2b)，曲线的峰点(抗压强度 f_c^T)逐渐下降、相应的应变(ε_p^T)有很大增长。混凝土的骨料种类、养护条件以及实验方式等都对其应力－应变曲线有所影响。试验表明混凝土在高温下的应力－应变曲线和常温下的相似，可采用同一方程。把实验数据拟合参数值之后得到了比较常用的高温下的混凝土轴心受压的应力－应变全曲线方程[20]：

$$y = \begin{cases} 2.2x - 1.4x^2 + 0.2x^3 & x \leqslant 1.0 \\ \dfrac{x}{0.8(x-1)^2 + x} & x \geqslant 1.0 \end{cases} \tag{3}$$

其中：$x = \varepsilon/\varepsilon_p^T$，$y = \sigma/f_c^T$；$\sigma$，$\varepsilon$——混凝土的应力和应变；$f_c^T$，$\varepsilon_p^T$——$T$ 温度时混凝土棱柱体抗压强度和峰值应变，$\varepsilon_p^T = (1 + 0.001\,5T + 5 \times 10^{-6}T^2)\varepsilon_p$，$\varepsilon_p$——常温下混凝土的受压峰值应变。

遭受高温作用的钢筋混凝土结构，其钢筋和混凝土除了材料本身性能要发生恶化外，还由于混凝土传热性能差，结构构件截面将产生不均匀的温度场而引起截面的温度应力和构件的弯曲变形。另外，在混凝土受热膨胀时，沿结构构件轴向还将产生伸长变形。文献[22]以钢筋混凝土框架为研究对象，通过试验表明高温作用下，框架试件的破坏过程明显地比简支梁和连续梁都要缓慢，破坏时的相对挠度和裂缝开展宽度也大。

在文献[4,15]中都提到了瞬时徐变(Transient creep)的概念，瞬时徐变发生在受荷状态下的第一次受热阶段[15]。高温下钢筋与混凝土的瞬时徐变对火灾中的结构反应起着重要的作用，与应

力、温度和受热时间等都有密切而复杂的关系。这些都有待于日后的进一步工作和研究。

2 高温后钢筋混凝土结构的性能

2.1 钢筋[10,11,23]

高温后，冷却钢材使其温度下降，其材料性能得到适当恢复，此时其强度比高温下的强度要高出许多。比如：当遭受的最高温度低于 600 ℃时，普通钢筋性能基本上可完全恢复，本构关系也可与灾前取为相同[10]。由此可见，高温后的普通钢筋的强度要比高温下的强度高。普通钢筋高温后的强度降低主要是由于遭受的温度 > 600 ℃时钢筋表面的脱碳现象等引起的。钢筋的冷却方式主要有炉内冷却、空气冷却、喷水冷却三种，但目前一般在火灾下常用的冷却方式是喷水冷却。在对试验结果进行分析、比较后发现冷却方式对高温后普通钢筋强度影响不大，可不予考虑。

文献[23]中给出了高温后热轧钢筋屈服强度的退化规律：

$$\frac{f_y^T}{f_y} = \begin{cases} 1.0 & T \leqslant 330\ ℃ \\ 1.1 - 3.0 \times 10^{-4} T & T > 330\ ℃ \end{cases} \tag{4}$$

2.2 混凝土[10,11,24~27]

随着火烧所达到的最高温度的提高，自然冷却后的混凝土强度逐渐下降，其抗压强度与混凝土内部结构的物理化学变化有关。常温下 C－S－H 凝胶结构完整、密实，$Ca(OH)_2$ 结晶得非常整齐完整。在 200 ℃以内，主要是混凝土内自由水的蒸发，这对整个结构外貌没有大的影响。400 ℃以后，C－S－H 凝胶体开始脱水分解，此时排出的主要是层间水和化学结合水，$Ca(OH)_2$ 也少量分解，使得原本结晶完整的片层结构破坏，强度显著下降，裂缝产生。当温度超过 400 ℃以后，$Ca(OH)_2$ 大量分解，生成游离氧化钙，冷却后又与水结合生成 $Ca(OH)_2$，导致体积膨胀，裂缝增多，此时混凝土内部结构松散，再加上灭火时浇水骤冷，致使混凝土内部结构进一步破坏，强度持续下降。当温度达到 1 000 ℃时，混凝土水泥浆体中已没有水泥的水化物，结构破碎[24,25]。

文献[24]中通过试验及理论分析，得出以下结论：(1)混凝土抗压强度在 300 ℃内变化不大，400 ℃以后持续下降；抗拉强度随温度的升高而下降，400 ℃后下降剧烈。(2)高温作用后，混凝土抗压强度和抗拉强度的下降规律不同，抗拉强度损失高于抗压强度。随着温度的升高，拉压强度比减小，在 400 ℃～700 ℃间达到最小，故常温下拉压比的关系不再适合于高温情形。(3)冷却方式对混凝土的强度有很大的影响，浇水冷却比自然冷却混凝土强度有所降低。从下面的高温后混凝土的抗压和抗拉强度的介绍中可看出上述结论。

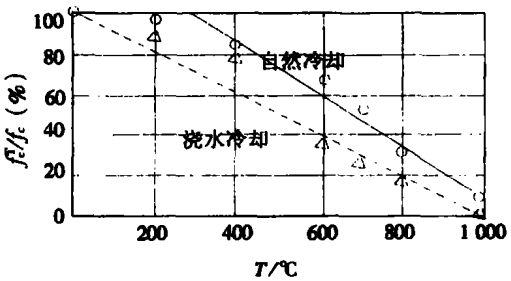


图 3　高温后抗压强度与温度的关系[24]

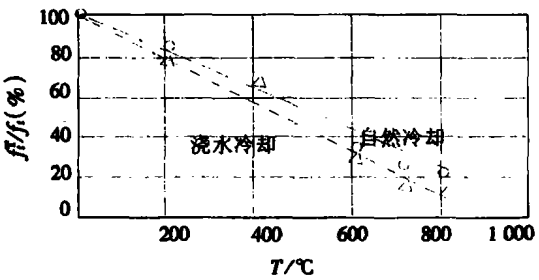


图 4　高温后抗拉强度与温度的关系[24]

2.2.1 混凝土抗压强度

对边长为 100 mm 的立方体试块来说，比较图 3 中两条曲线可知：浇水冷却比自然冷却混凝土强度有所降低，特别是在 200 ℃以上温度作用后。这是因为高温混凝土遇水骤然冷却，内外温度的极不均匀导致混凝土内部结构的损伤和裂缝。另外，200 ℃以上温度作用后，混凝土中如氧化钙等分解成分在高温状态下极易与水发生反应(类似于自然状态下静置长时间的吸水反应)而造成伤害。所以，可根据混凝土强度的变化规律，得出混凝土抗压强度的表达式如下[24]：

浇水冷却：
$$\frac{f_c^T}{f_c}=1.00-9.21\times10^{-4}T \qquad 0\ ℃<T<1\ 000\ ℃ \tag{5}$$

自然冷却：
$$f_c^T=\begin{cases} f_c & 0\ ℃<T<300\ ℃ \\ 1.378\ 6-1.262\times10^{-3}T & 300\ ℃<T\leqslant1\ 000\ ℃ \end{cases} \tag{6}$$

2.2.2 混凝土抗拉强度

高温作用后，混凝土构件裂缝增多增大，特别是在主拉应力作用区。所以对于混凝土构件，尤其是对于控制拉应力的预应力混凝土构件，混凝土高温后的抗拉强度对其在高温作用后能否保持良好的工作性能起决定作用。随着温度的升高，抗拉强度持续下降，特别是400 ℃以后下降剧烈。这是由于400 ℃后混凝土内产生大量裂缝，在单轴拉力下，裂缝横切于拉应力作用方向，裂缝的存在减少了截面的有效面积，从而使结构更易破坏。比较图4中两条曲线可知：在同等温度条件下，浇水冷却比自然冷却混凝土抗拉强度要低。混凝土的抗拉强度计算式可表示为[24]：

浇水冷却：
$$\frac{f_t^T}{f_t}=1.0-1.125\times10^{-3}T \tag{7}$$

自然冷却：
$$\frac{f_t^T}{f_t}=1.0-1.0\times10^{-3}T \tag{8}$$

由此可见，高温后的混凝土的抗拉和抗压强度都有损失但规律不同，并且抗拉强度损失高于抗压强度。

文献[27]中给出了高温后高强混凝土峰值应力、峰值应变和弹性模量随温度的变化规律，及经回归分析得到的高温后高强混凝土应力－应变曲线的表达式。

3 小结

研究钢筋混凝土结构的抗火性能对我国建筑业的蓬勃发展有很重要的意义。本文通过对钢筋混凝土构件的两个主要组成部分：钢筋和混凝土，分别在高温下和高温后材料性能的分析、归纳，给出了普通钢筋、预应力钢筋及混凝土等结构材料在高温下及高温后力学性能的退化规律，为深入研究混凝土及预应力混凝土结构的抗火性能及其损伤评估提供了一些参考资料，是很有必要的。

参考文献：

[1] 高铁军.美国官方认定世贸双塔被大火摧毁[N].人民日报,2002－03－30(国际版).

[2] Jkruppa. Rencent developments in fire design[J]. Prog. Struct. Engng Mater,2000,(2):6－15.

[3] RJ Plank. The performance of composite－steel－framed building structure in fire[J]. Prog. Struct. Engng Mater,2000,(2):179－186.

[4] Gabriel Alexander Khoury. Effect of fire on concrete and concrete structures[J]. Prog. Struct. Engng Mater,2000,(2):429－447.

[5] Kenneth R. Diller, W.Michael Capt. Analysis of High Temperature Burns[J]. Proceedings of The First Joint BMES/EMBS, IEEE,1999,10:1 279.

[6] Sullivan & Associates. Performance of concrete at elevated temperatures as measured by the reduction in compressive strength[J].Fire Technology,1992,(8): 240－250.

[7] 吕彤光,时旭东,过镇海.高温下Ⅰ～Ⅴ级钢筋的强度和变形试验研究[J].福州大学学报,1996,(S1):11－17.

[8] 李明,朱永江,王正霖.高温下预应力筋和非预应力筋的力学性能[J].重庆建筑大学学报,1998,(4):73－77.

[9] Pratique du Calcul de la rèsistance an feu des Sruetures en bèlon Pares,1993.

(下转第119页)

管理的能力,达到预想的要求。

参考文献:

[1] JOHNSON:Metasys 设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
[2] 刘宝林.智能建筑技术资料集[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
[3] 涂序彦.智能管理[M].北京:清华大学出版社,1995.
[4] 李桂祥.基于 SAN 结构的 PACS 系统设计研究[J].重庆建筑大学学报,2002,24(6):96-99.

(上接第 114 页)

[10] 郑文忠,许名鑫,王英,等.钢筋混凝土及预应力混凝土材料抗火性能[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,(4):6-10.
[11] 陈荣毅,沈祖炎.钢筋混凝土结构抗火设计述评[J].工业建筑,1999,29(8):13-16.
[12] 朱伯龙,陆洲导,胡克旭.高温(火灾)下混凝土与钢筋的本构关系[J].四川建筑科学研究,1990,(1):37-43.
[13] 陆洲导,朱伯龙.钢筋混凝土梁在火侵袭下的反应分析[J].火灾科学,1996,5(2):35-43.
[14] 苏小卒,朱伯龙.框架大位移时无粘结预应力筋的耗能效应[J].结构工程师,1995,(1):43-47.
[15] 姚亚雄,朱伯龙.钢筋混凝土框架结构火灾反应分析[J].同济大学学报,1997,25(3):255-261.
[16] R.M.LAWSON. Fire engineering design of steel and composite buildings[J]. JOURNAL OF CONSTRUCTIONAL STEEL RESEARCH, 2001,(57):1 233-1 247.
[17] Long T.Phan, Nicholas J.Carino..Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature[J].JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING,1998,(2):59-64.
[18] 陈涛.预应力构件的耐火性能[J].消防科技,1997,(1):16-17.
[19] 李卫,过镇海.高温下混凝土的强度和变形性能实验研究[J].建筑结构学报,1993,(1):8-16.
[20] 时旭东,过镇海.高温下钢筋混凝土受力性能的试验研究[J].土木工程学报,2000,(6):6-16.
[21] 时旭东,过镇海.不同混凝土保护层厚度钢筋混凝土梁的耐火性能[J].工业建筑,1996,(9):12-14.
[22] 时旭东,过镇海.高温下钢筋混凝土框架的受力性能试验研究[J].土木工程学报,2000,(1):36-45.
[23] 董毓利,范维澄,王清安,等.火灾后钢筋混凝土板的承载力计算与可靠指标分析[J].火灾科学,1996,(2):7-11.
[24] 徐[illegible],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.
[25] 徐[illegible],徐志胜,朱玛.高温作用后混凝土强度与变形试验研究[J].长沙铁道学院学报,2000,(2):13-16.
[26] 胡倍雷,宋玉普,赵国藩.高温后混凝土在复杂应力状态下的变形和强度特性的实验研究[J].四川建筑科学研究,1994,(1):47-50.
[27] 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,(3):8-12.