

文章编号: 1000-5013(2012)01-0089-05

# 含钢率对混凝土截面温度场分布的影响

杨清文, 徐玉野, 郑涌林, 罗漪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 将钢筋的圆形截面等效为面积相等的方形截面,采用四边形单元建立配置钢筋、型钢的混凝土截面的二维温度场分析模型,分析纵筋配筋率、型钢含钢率对混凝土截面温度场分布的影响.算例计算结果表明:钢筋对截面温度场分布计算结果影响较小,钢筋的存在使保护层内混凝土的温度降低,核心混凝土的温度升高,忽略钢筋对截面温度场分布的影响是合理的.型钢对截面温度场分布的计算结果影响较大,受火 180 min 内混凝土截面内型钢翼缘中心处和截面形心处温度计算结果最大分别相差 17.1 ℃ 和 98.7 ℃;高温下型钢混凝土构件的抗火性能研究中,需要考虑型钢对截面温度场分布的影响;型钢混凝土构件火灾灾后性能评定中,核心型钢的力学性能可基本恢复.

**关键词:** 混凝土; 温度场; 含钢率; 影响规律; 抗火性能

**中图分类号:** TU 375.3                      **文献标志码:** A

建筑火灾是建筑结构面临的主要灾害之一,其可能导致结构倒塌,造成巨额损失和灾难性后果.因此,开展建筑结构抗火和灾后评定方面的研究工作十分必要.高温下结构构件的温度场分析,是进行结构抗火和灾后评定研究的基础.目前,研究人员在进行钢筋混凝土构件的温度场分析时,通常认为钢筋对截面温度场分布影响很小,可以忽略,从而将整个截面当作混凝土材料进行计算<sup>[1-3]</sup>.王振清等<sup>[4]</sup>利用弹塑性理论,分别给出钢筋和混凝土材料考虑温度变形和徐变变形热弹塑性问题的增量本构方程.在进行型钢混凝土构件的温度场计算分析时,文献<sup>[5-7]</sup>认为型钢的存在会加快截面内热传导,因此在温度场计算分析时考虑了型钢的影响.含钢率对混凝土截面温度场分布存在一定影响,但是钢筋和型钢对温度场计算结果的影响程度尚未见文献做专门论述.本文将钢筋圆形截面等效为面积相等的方形截面,采用四边形单元建立钢筋混凝土截面、型钢混凝土截面的二维温度场分析模型,通过数值计算,研究含钢率对混凝土截面温度场计算结果的影响程度.

## 1 温度场分析模型及其试验验证

高温下混凝土截面温度场分析的控制方程是一个非线性抛物线型偏微分方程,可用有限单元法求解.为简化分析,在计算过程中做如下 3 点假定: 1) 温度场分析独立于构件的内力和变形分析; 2) 忽略钢材和混凝土之间的接触热阻; 3) 将钢筋的圆形截面等效为面积相等的方形截面,钢筋的形心位置不变,且不考虑箍筋的影响.

钢材的热工参数随温度变化规律,采用文献<sup>[8]</sup>给出的相关公式确定;混凝土的热工参数随温度变化规律,采用文献<sup>[9]</sup>给出的相关公式确定.假定钢材的密度不随温度变化,保持为 7 850 kg · m<sup>-3</sup>.采用欧洲规范建议的方法来考虑混凝土中含水量对温度场的影响,质量含水率取 2%<sup>[9]</sup>.利用国际上较著名的抗火分析软件 SAFIR 进行分析计算<sup>[10]</sup>,网格划分采用四节点单元.

**收稿日期:** 2011-07-07

**通信作者:** 徐玉野(1978-),男,副教授,主要从事结构防灾减灾的研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50908091);中国博士后科研基金面上项目(20100480756);福建省自然科学基金资助项目(2009J01256);亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题(2009KB18);福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA10005);国务院侨办科研基金资助项目(10QZR09);华侨大学基本科研业务费专项基金资助项目(JB-SJ1011)

采用该程序的温度场计算结果与文献[11]中的试验结果的对比,如图 1 所示. 图 1 中: $\theta$  为温度; $t$  为时间;计算过程中考虑了钢筋布置的影响,柱的编号对应其在文献[11]中的编号.

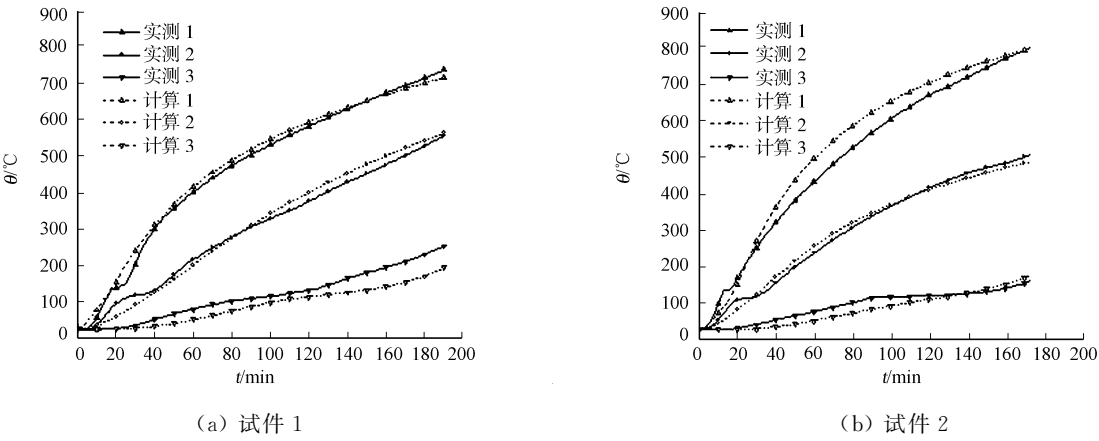


图 1 温度场计算结果与试验结果的比较

Fig. 1 Comparison between calculation and experiment temperatures

图 2 为图 1 中各温度测点的具体位置. 从图 2 可以看出:温度场计算结果总体上与试验结果吻合较好,表明分析方法是有效的. 计算值与试验值存在一定偏差主要有如下 2 个原因:

- 1) 热电偶的埋设位置存在一定误差,即由于热电偶是在混凝土浇注之前埋设的,混凝土浇注过程中的振捣有可能使热电偶位置产生一定的偏离;
- 2) 混凝土的热工性能本身离散性较大,但是在数值模拟中,又只能选定某种模型进行计算,由此可能导致温度场计算结果与试验结果之间产生一定的系统误差.

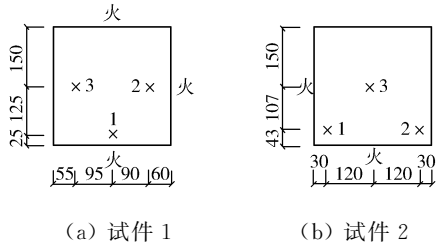


图 2 热电偶布置(mm)

Fig. 2 Positions of thermocouples (mm)

2 钢筋对混凝土截面温度场分布的影响分析

选取截面尺寸为 300 mm×300 mm 的钢筋混凝土截面作为温度场分析的对象,截面配筋和网格划分如图 3 所示. 图 3 中:A 点为相应角部位置处钢筋的形心;C 点为截面形心;E 点为截面的角点. 对于不同的配筋率,B,D 点始终取为  $\rho$  为 2.88% 时线段 AC,AE 的中点. 显然,当配筋率变化时,A 点的位置是变化的,B 点,C 点和 D 点的位置是不变的. 保护层厚度  $c$  为 30 mm,四面受火. 由于对称性,分析时仅用截面左下角的 1/4 建模,模型共有 784 个单元,841 个节点.

柱截面纵筋配筋率( $\rho$ )对截面内温度时间( $t$ )发展曲线的影响,如图 4 所示. 图 4 中:当  $\rho$  为 0 时,A 点和 D 点的位置与  $\rho$  为 2.88% 时 A 点和 D 点的位置一致.

由图 4 可知:纵筋对截面温度场分布计算结果影响很小,忽略钢筋对截面温度场分布的影响是合理的. 在 180 min 的受火时间内,A 点最大相差 26.4 °C,B 点最大相差 15.6 °C,C 点最大相差 19.7 °C,D 点最大相差 35.6 °C.

由图 4 还可知:在温度场分析过程中,考虑钢筋存在的影响会导致 A 点和 D 点的温度降低,B 点和 C 点的温度升高,且这一趋势随配筋率的加大而愈加明显. A 点和 D 点的温度降低可能是由于截面核心区的混凝土温度较低,钢筋的存在加大了温度较低的核心区混凝土对 A 点和 D 点的吸热作用,从而使 A 点和 D 点温度较低. B 点和 C 点的温度升高可能是由于钢筋的存在加快了外围高温区域向核心区混凝土的热传导,从而使其温度升高.

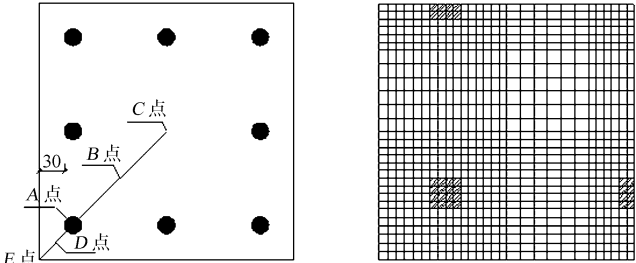


图 3 钢筋混凝土截面及网格划分

Fig. 3 Reinforced concrete section and its networks

此外,当保护层不变时,纵筋中心点的温度随配筋率的增大而逐渐减小.这是由于随着配筋率的增大,纵筋中心点离柱表面的距离越远的缘故.

在受火 90,135,180 min 时,截面内连线 CE 上各点的温度如图 5 所示.从图 5 可以看出:钢筋存在使保护层内混凝土的温度降低,核心混凝土的温度升高;考虑钢筋存在对温度场的影响时,钢筋直径范围内出现接近水平的温度平台段,这是由于该区段材料的热传导系数较大的缘故.是否考虑钢筋,对钢筋与混凝土交界处温度计算结果影响较大,对钢筋直径中心点处温度计算结果影响较小.因此,取钢筋直径中心点位置处温度作为高温下与高温后力学性能分析过程中钢筋受火温度的代表值是合理的.

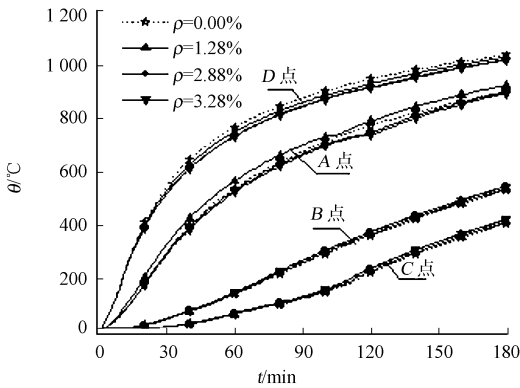


图 4 配筋率对截面内温度时间发展曲线的影响

Fig. 4 Influence of steel ratio on sectional temperature-time curves

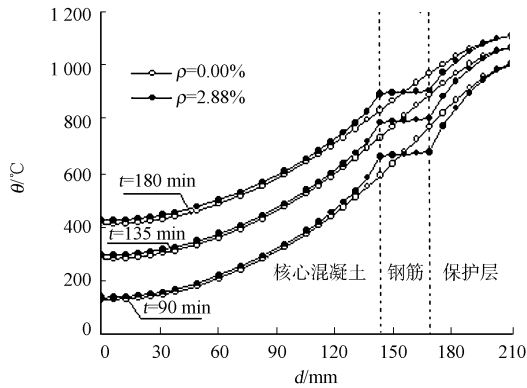


图 5 不同时刻截面内线段 CE 上各点的温度

Fig. 5 Temperatures of different points along line CE at different times

### 3 型钢对混凝土截面温度场分布的影响分析

选取截面尺寸为 300 mm×300 mm 的型钢混凝土截面作为温度场分析的对象,截面配钢及其网格划分如图 6 所示.图 6 中:A 点,B 点和 C 点分别为角部钢筋、翼缘和腹板的中心点;D 点为截面角点;翼缘的宽度及翼缘的外边缘至截面形心的距离参见图中标注.

型钢混凝土截面内各点计算的温度时间发展曲线,如图 7 所示.图 7 中算例的条件:配筋率  $\rho$  为 3.56%;含钢率  $\alpha$  为 4.5%;腹板和翼缘的厚度均为 10 mm.

从图 7 可知:截面内钢筋和型钢对截面温度场分布计算结果影响较大,影响程度先随着受火时间的增加而增大,112 min 时达到最大,之后又减小.这可能是由于升温初期外部温升发展比较快,截面内温度梯度比较大;而后期外部温升发展比较慢,截面内温度梯度减小.受火 180 min 内,混凝土截面内型钢翼缘中心处和截面形心处的温度比素混凝土截面相应位置的计算结果分别升高了 17.1,98.7 °C.这与文献[12]提到的型钢腹板温度应力远大于型钢翼缘温度应力是一致的.可见,截面内的钢筋和型钢能加速截面内热传导,促使核心区域的温度显著升高.鉴于高温下钢材的力学性能总体上会随受火温度的升高而显著降低,因此,高温下型钢混凝土构件的抗火性能研究中最好考虑型钢对截面温度场分布的影响.

从图 7 还可知:角部钢筋中心(A 点)在 45,90,135,180 min 时的温度比素混凝土截面相应位置处的温度分别降低 8.2,13.8,30.0 和 11.1 °C.这可能是由于型钢和钢筋会加大核心区较低温度的混凝土对角部钢筋的吸热作用.型钢混凝土截面内型钢翼缘中心处与截面形心处之间的温差比素混凝土截面相应位置处的温差少很多.这是由于钢材具有较好的导热性,从而降低两点之间的温差.

此外,受火 180 min 后型钢翼缘中心处的温度仍比较低,其最高温度为 512.9 °C.这是由于核心型钢受到外围混凝土的保护,且外围混凝土的热传导系数较低引起.当过火温度不超过 600 °C 时,高温后

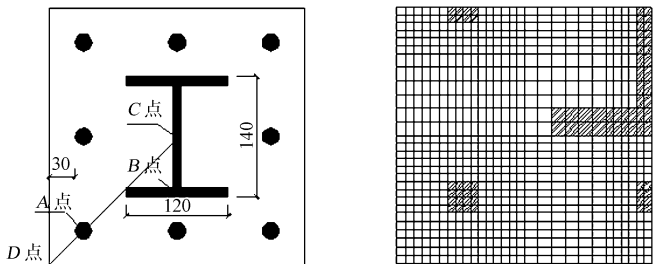


图 6 型钢混凝土截面及网格划分

Fig. 6 Steel reinforced concrete section and its networks

钢材的力学性能基本上可以恢复. 因此, 型钢混凝土构件火灾灾后性能评定中可认为核心型钢的力学性能基本恢复至常温下情况.

含钢率( $\alpha$ )变化对型钢混凝土截面温度场( $\theta$ )的影响情况, 如图 8 所示. 从图 8 中可以看出: 截面含钢率的变化对角部钢筋中心点的温度发展历程几乎无影响; 而同一时刻截面形心处的温度随着含钢率的增大而升高.

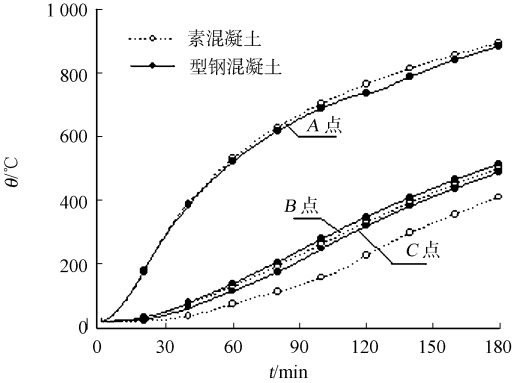


图 7 型钢混凝土截面内各点的温度时间发展曲线  
Fig. 7 Calculation temperature-time curves in the steel reinforced section

受火 90, 135, 180 min 时, 截面内连线 CD 上各点的温度如图 9 所示. 图 9 算例的条件与图 7 相同. 从图 9 中可以看出: 钢筋和型钢使保护层内混凝土的温度降低, 在保护层范围内, 越靠近表面, 素混凝土和型钢混凝土的温差越小; 纵筋所在位置都有一个温度平台.

此外, 对核心区而言, 只是靠近截面形心附近的区域范围(0~77.77 mm)内, 型钢混凝土的温度比素混凝土的温度来得高, 且越靠近形心处, 温差越多. 在核心区的其他区域, 型钢混凝土截面和素混凝土截面的温度计算结果相差不大.

4 结论

利用有限元方法分析了纵筋配筋率对钢筋混凝土截面温度场分布的影响规律, 以及含钢率对核心型钢混凝土截面温度场分布的影响规律, 得到以下 3 点主要结论.

1) 钢筋对截面温度场分布的计算结果影响很小, 忽略钢筋对截面温度场分布的影响是合理的. 钢筋的存在加快了温度较低的核心区混凝土对外围保护层混凝土的吸热作用, 使保护层内混凝土温度降低; 钢筋的存在会加快外围高温区域对核心区混凝土的热传导, 使核心混凝土的温度升高. 取钢筋直径中心点位置处温度作为高温下与高温后力学性能分析过程中钢筋受火温度的代表值是合理的.

2) 若计算过程中考虑型钢对温度场分布的影响, 则受火 180 min 时混凝土截面内型钢翼缘中心处和截面形心处的温度比未考虑时分别提高了 17.1 °C 和 98.7 °C. 可见, 型钢的配置对截面形心处的温度计算结果影响较大. 鉴于高温下钢材的力学性能总体上会随受火温度的升高而降低, 故型钢混凝土构件高温下抗火性能研究中建议考虑型钢对截面温度场分布的影响. 对文中的算例而言, 若将型钢混凝土截面温度场简化按素混凝土截面进行计算, 可按下述方法近似考虑型钢的影响, 即将型钢形心处的温度计算结果升高 100 °C, 翼缘的温度升高 20 °C, 腹板的温度提高数按 20 °C 和 100 °C 之间线性插值确定.

3) 核心型钢受到外围混凝土的保护, 受火 180 min 后型钢翼缘中心处的温度较低, 未超过 512.9 °C. 型钢混凝土构件火灾灾后性能评定中, 可认为核心型钢的力学性能基本恢复至常温下情况.

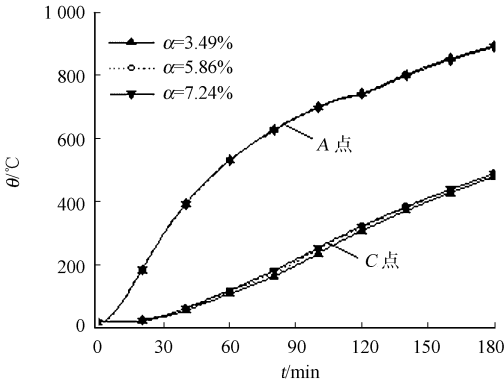


图 8 含钢率对混凝土截面内温度时间发展曲线的影响  
Fig. 8 Influence of steel ratio on concrete sectional temperature-time curves

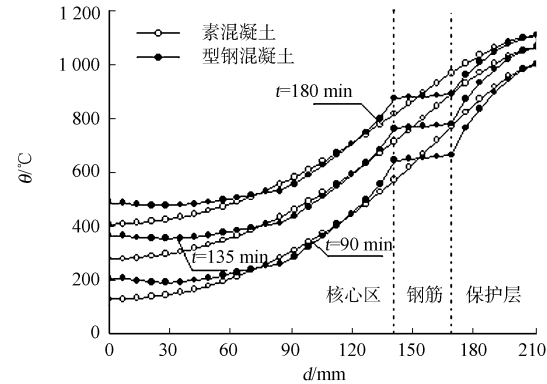


图 9 不同时刻截面内线段 CD 上各点的温度  
Fig. 9 Temperatures of different points along line CD at different times

参考文献:

[1] 吴波,徐玉野. 高温下钢筋混凝土异形柱的数值分析方法[J]. 土木工程学报,2008,25(6):94-99,106.

[2] 徐玉野,王全凤,柴振岭. 钢筋混凝土柱火灾试验数值模拟的关键技术[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(4):588-592.

[3] 徐玉野,王全凤,邱政和. 典型受火方式下等肢 T 形柱的耐火性能[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(2):218-223.

[4] 王振清,朱大雷,韩玉来,等. 火灾下钢筋混凝土结构热弹塑性变形分析[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(1):78-83.

[5] 郑永乾,韩林海. 钢骨混凝土柱的耐火性能和抗火设计方法(I)[J]. 建筑钢结构进展,2006,8(2):22-29.

[6] 陆洲导,徐朝晖. 火灾下钢骨混凝土柱温度场分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(9):1121-1125.

[7] 杜二峰,毛小勇. 火灾下型钢混凝土柱三维温度场计算[J]. 苏州科技学院学报:工程技术版,2009,22(1):15-18.

[8] European Committee for Standardisation. Eurocode 3: Design of steel structures[S]. London:British Standards Institution,1995.

[9] European Committee for Standardisation. Eurocode 2: Design of concrete structures[S]. London:British Standards Institution,1995.

[10] 李毅海. 约束钢筋混凝土柱的抗火性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2009.

[11] 王超. 不同受火方式下普通混凝土柱的耐火性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2006.

[12] 张宏仁,于飞. 火灾高温下轴心受压型钢混凝土柱的应力分析[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2010,11(1):9-12.

Influence of Steel Ratio on the Temperature Field  
Distribution of Concrete Section

YANG Qing-wen, XU Yu-ye, ZHENG Yong-lin, LUO Yi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The circular section of steel bar is equivalent to a square section with the same area, and the analytical model for two-dimensional temperature field of concrete section with steel bar or shaped steel was established using quadrangular element. Then the influence of the steel ratio of longitudinal reinforcement and shaped steel on the temperature field distribution was investigated. The results of numerical examples show that: the influence of reinforcement ratio on the temperature field distribution of concrete section is little and is neglectable. The temperature of cover concrete is decreased by reinforcement while that of core concrete is increased. The shaped steel ratio has great influence on the temperature field distribution of concrete section. When the fire exposure time is 112 min, the temperate differences at the center of flange and the centroid of cross section are 17.1 ℃ and 98.7 ℃, respectively. It is necessary to consider the influence of shaped steel on the temperature field distribution in the fire resistance analysis of steel reinforced concrete (SRC) members under elevated temperature. The mechanical behaviour of core shaped steel can mostly be recovered in the residual strength evaluation of SRC members.

**Keywords:** concrete; temperature field; steel ratio; influence law; fire behavior

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)