火灾高温下混凝土结构内部热传导与蒸汽压变化机制研究

侯昌明[1] 苏 波[1] 何旭亮[1] 刘乃桓[1] 罗志刚[1] 张永兴[2,*]
（1.广东电网有限责任公司佛山供电局，佛山 528010；2.广东天信电力工程检测有限公司，广州 510000）

摘 要 为准确揭示火灾高温下混凝土结构裂损破坏机理，采用考虑内部热传导与蒸汽压作用的混凝土结构火灾高温数值模拟方法研究火灾作用下混凝土结构内部温度与蒸汽压变化规律。此外，上述混凝土结构火灾高温数值模拟方法采用随机生成的多边形刚体单元对混凝土结构进行离散化处理，利用刚体单元特征点构成的杆单元网络反映混凝土内部热传导和蒸汽压移动。研究表明：火灾高温下混凝土结构在加热区域表面附近因内部温度与蒸汽压集中存在裂损风险，所采用的考虑内部热传导与蒸汽压作用的混凝土结构火灾高温数值模拟方法可用于火灾高温下混凝土结构性能及内部温度与蒸汽压变化规律分析，为混凝土结构火灾高温性能研究提供了可行方法。

关键词 混凝土结构，火灾高温，变化机制，热传导，蒸汽压
中图分类号：TU528 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0006

Research on Variation Mechanism of Internal Thermal Conductivity and Vapor Pressure in Concrete Structures under High Temperature in a Fire

HOU Changming[1] SU Bo[1] HE Xuliang[1] LIU Naihuan[1] LUO Zhigang[1] ZHANG Yongxing[2,*]
（1.Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528010, China;
2.Guangdong Tianxin Electric Power Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou 510000, China）

Abstract To accurately reveal the mechanisms of concrete structure cracking and damage under fire, an analytical method for high-temperature concrete structures under fire is employed. This method investigates structural performance alongside variations in internal temperature and vapor pressure, accounting for internal heat conduction and vapor pressure dynamics within the concrete. Furthermore, the method utilizes randomly generated polygonal rigid-body elements to discretize the concrete structure. A truss element network, formed by connecting characteristic points of these rigid-body elements, simulates internal heat conduction and vapor pressure migration. Results indicate a significant risk of cracking and damage near heated surface zones due to concentrated internal temperature and vapor pressure under high temperatures. By incorporating internal heat conduction and vapor pressure effects, this approach effectively analyzes both structural performance and internal field variations during fire exposure, offering a robust framework for studying the high-temperature behavior of concrete structures under such conditions.

收稿日期：2024-12-09
基金项目：广东电网有限责任公司基建技术创新专题
作者简介：侯昌明（1970-），男，学士，高级工程师，主要从事电力基础设施研究。E-mail：foshanhcm@163.com
[*] **联系作者**：张永兴（1981-），男，博士，正高级工程师，主要从事混凝土及地下工程结构研究。E-mail：zhanguongxing81@ aliyun.com

Keywords　concrete structure, high temperature in fire, variation mechanism, heat conduction, vapor pressure

0　引　言

电力基础设施防火墙等部位多采用混凝土建造，火灾等异常荷载作用下混凝土结构易于开裂甚至出现爆裂等严重灾害[1]，影响电力基础设施安全运营。火灾作用下混凝土结构物耐火性及安全性主要取决于混凝土表层是否发生爆裂[2-3]，且火灾下高性能混凝土相较于普通混凝土更易爆裂[4]，该爆裂行为受火灾时混凝土结构内部热传导及蒸汽压移动等物质移动共同影响[5-6]。

此外，火灾高温作用下混凝土结构内部热传导影响蒸汽压移动，蒸汽压移动改变混凝土结构内部温度分布[7-8]。因而，火灾下混凝土结构内部表现出热传导与蒸汽压移动共同作用特征[9-10]，合理地阐释火灾高温下混凝土结构裂损机理需要考虑上述特征[11-12]。然而，现有的模型试验、理论与数值分析较少考虑火灾下混凝土结构内部蒸汽压对其受力特性影响，严重制约混凝土结构耐火技术的发展。有鉴于此，本文采用考虑内部热传导与蒸汽压作用的混凝土结构火灾高温数值模拟方法，以混凝土试件高温破坏试验为解析实例，研究火灾作用下混凝土结构内部温度与蒸汽压变化规律。

1　混凝土结构火灾高温数值模拟方法

1.1　基于刚体单元离散处理混凝土结构的杆单元网络

所采用的数值模拟方法假设火灾高温下混凝土内部热传导和蒸汽压移动为扩散现象，采用扩散方程进行表征并程序化。该方法采用多边形刚体单元对混凝土试件进行离散化处理，利用刚体单元特征点（刚体单元质心、边界面重心）构成的3维杆单元网络反映混凝土内部热传导和蒸汽压移动（图1）。为减小刚体单元网格划分对数值计算结果影响，采用Voronoi分割随机生成多边形刚体单元[13]。其中，三维杆单元网络中的单向杆单元具有与Voronoi刚体单元界面面积对应的截面面积，并将一维的扩散方程赋予上述单向杆单元，进而实现在三维空间表征上述混凝土试件内部热传导和蒸汽压移动。此外，火灾高温下开裂混凝土内部裂缝即为相邻刚体单元之间裂缝，采用相邻刚体单元边界面重心距离反映混凝土裂缝宽度及发展。

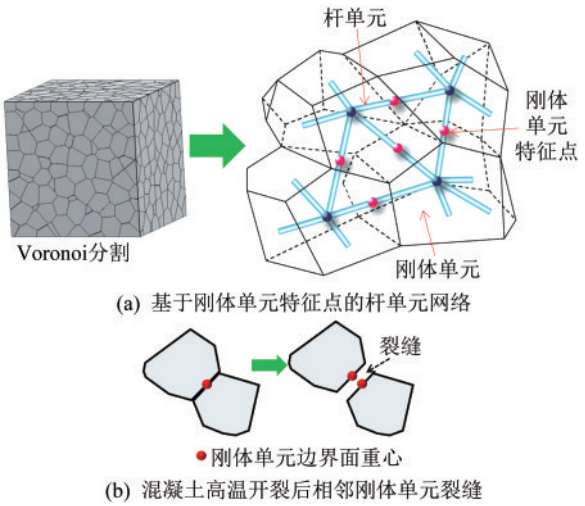


图1　杆单元网络-刚体单元体系

Fig.1　Truss element network in rigid body element system

1.2　刚体单元间切向与法向作用本构关系

采用弹簧单元响应反映相邻刚体单元间切向与法向作用，其本构关系如图2所示。其中，法向弹簧本构关系采用混凝土轴向拉伸与压缩特性，切向弹簧本构关系采用混凝土剪切特性[14]。

1.3　杆单元模拟混凝土结构内部单向蒸汽压力传递与热传导的扩散方程

采用扩散方程（1）、（2）分别表征杆单元模拟混凝土结构内部单向热传导与蒸汽压力传递，方程（3）、（4）分别为扩散方程（1）、（2）的边界条件。

$$\rho c(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] \tag{1}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}P}\right)_{\mathrm{p}}\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{\mathrm{p}}\frac{\partial P}{\partial x}\right)+Q \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial n}+h_{\mathrm{c}}\left(T-T_0\right)=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial P}{\partial n}+\alpha\left(P-P_0\right)=0 \tag{4}$$

式中：T 与 T_0 分别为温度与周围环境温度（K或℃）；ρ 为混凝土密度（kg/m³）；$c(T)$ 为比热

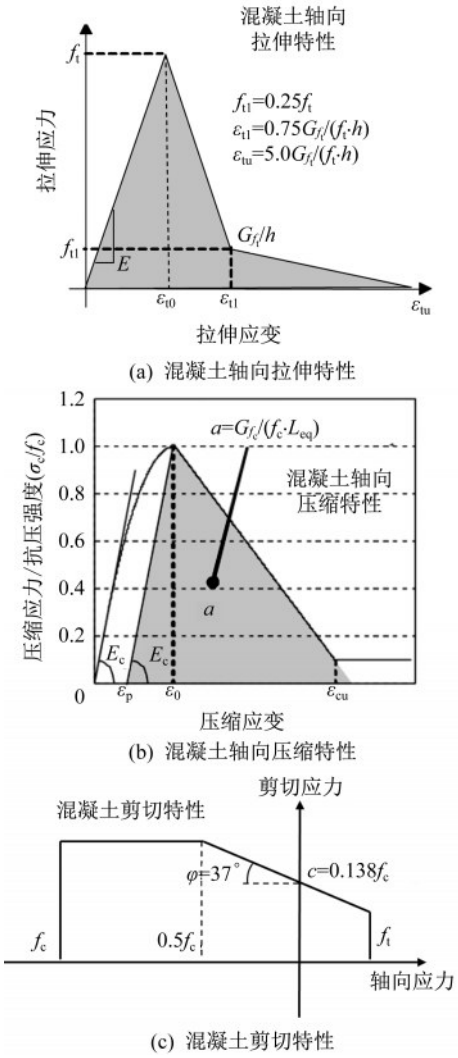


图2 混凝土材料本构关系

Fig.2 Concrete constitutive law

[kJ/(kg·K)]；$\lambda(T)$为热传导率[W/(m·K)]；h_c为热传递系数[W/(m²·K)]；n为加热面法线方向；t为时间(s)；Q为内部生成蒸汽压(mmHg)；P^*为饱和蒸汽压(mmHg)；RH为相对湿度(%)；$\left(\mathrm{d}q/\mathrm{d}P\right)_p$为湿气容量[g/(m³·mmHg)]；$P$为压强(mmHg)；$Q$为内部生成蒸汽压(mmHg)；$\lambda_p$为透湿率[g/(m·h·mmHg)]；$P_0$为周围环境压强(mmHg)；$\alpha$为蒸发率[g/(m²·h·mmHg)]。

2 混凝土试件高温性能实例解析

2.1 混凝土试件数值模型

图3为用于数值解析的混凝土试件数值模型(以混凝土试件高温破坏试验为解析实例)。其中，试件尺寸为400 mm×100 mm×400 mm，数值试验的试件加热面位于试件底面(面积为350 mm×350 mm)。试件加热面采用对流边界，试件其余表面(含试件底面非加热面部分)均采用绝热边界。如图3所示，混凝土试件标记1个监测点(深度为8 mm，距离绝热侧边界75 mm)。此外，数值模型假设对流边界处温度为实测炉内温度，数值解析通过热传导分析评价混凝土试件内部温度分布。此外，混凝土压缩与拉伸强度分别为83.5 MPa与8.4 MPa，混凝土热膨胀系数为1×10^{-5}。

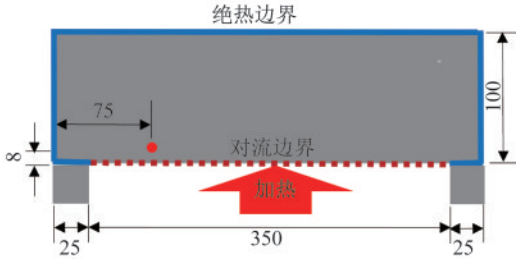


图3 混凝土试件数值试验模型(单位：mm)

Fig.3 Numerical model of concrete specimen (Unit: mm)

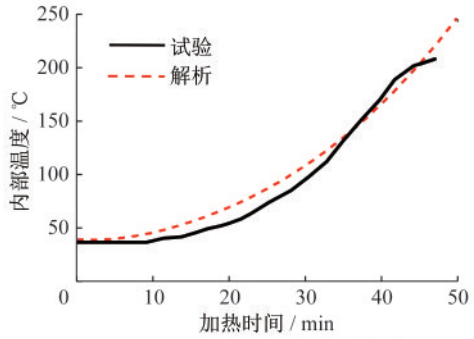
2.2 解析结果

2.2.1 内部监测点温度及蒸汽压与加热时间变化曲线

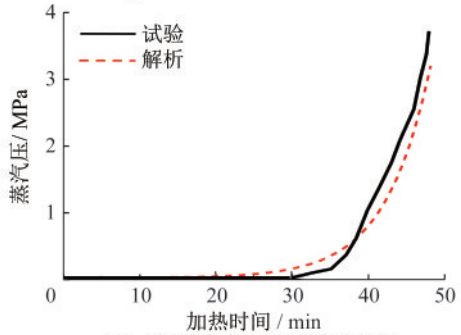
图4为解析与试验所得内部监测点温度及蒸汽压随时间变化曲线。从图中可见，解析所得结果与试验结果一致，表明解析结果精度较高。内部监测点在加热30 min、40 min及50 min的温度分别为100 ℃、180 ℃及250 ℃，可见内部监测点表现出前慢后快的升温速度。此外，内部监测点温度达到100 ℃(加热时间30 min)之前，内部监测点蒸汽压均为0 MPa，其后内部监测点随着温度增加出现蒸汽压急剧上升现象。

2.2.2 混凝土试件内部温度与蒸汽压分布

图5为解析所得混凝土试件内部温度与蒸汽压分布(加热时间50 min)，混凝土试件加热至50 min时加热区域表面附近内部温度可达250 ℃，该区域蒸汽压最大值为3.5 MPa。从图中可见，混凝土试件在加热区域表面附近内部温度与蒸汽压分布均远大于其余区域(试件表面附近出现蒸汽压集中现象)，表明混凝土试件在加热区域表面附近存在裂损风险。图6为解析所得混凝土试件高温爆裂形态，可见所采用的数值模拟方法可以反映混凝土结构高温爆裂行为。



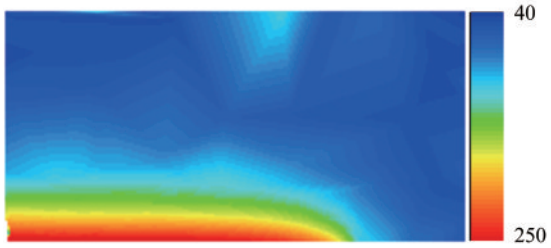
(a) 温度与加热时间变化曲线



(b) 蒸汽压与加热时间变化曲线

图4　内部监测点温度及蒸汽压与加热时间关系

Fig.4　Temperature and vapor pressure versus heating time of monitoring point



(a) 温度 / ℃



(b) 蒸汽压 / MPa

图5　混凝土试件内部温度与蒸汽压

Fig.5　Internal temperature and vapor pressure of concrete specimen

3　结　论

（1）解析所得内部监测点温度及蒸汽压随时间变化曲线与试验结果一致，表明所采用的考虑内部热传导与蒸汽压作用的混凝土结构火灾高温数值模拟方法可用于火灾下混凝土结构性能及内部温度与蒸汽压变化规律分析，为混凝土结构火灾高温性能研究提供了可行方法。

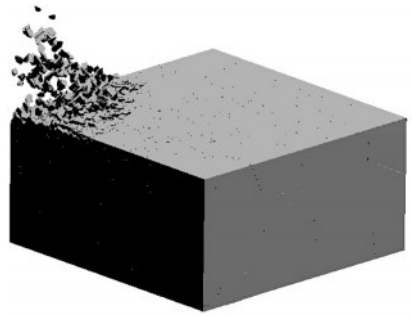


图6　混凝土试件高温爆裂形态

Fig.6　Spalling of concrete specimen under high temperature

（2）火灾高温下混凝土结构在加热区域表面附近的内部温度表现出前慢后快的升温速度，内部温度达到 100 ℃后加热区域表面附近的蒸汽压随着温度增加出现急剧上升现象。

（3）火灾高温下混凝土结构在加热区域表面附近的内部温度与蒸汽压分布均远大于其余区域，致使混凝土结构表面附近出现蒸汽压集中现象，表明混凝土结构在加热区域表面附近存在裂损风险。

参　考　文　献

[1] 朋改非，牛旭婧，成锴.超高性能混凝土的火灾高温性能研究综述[J].材料导报，2017，31(23)：17-23.
Peng Gaifei，Niu Xujing，Cheng Kai.Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete：a review [J].Journal of Building Materials，2017，31(23)：17-23.(in Chinese)

[2] Song C J，Zhang G，Lu Z L，et al.Fire resistance tests on polypropylene-fiber-reinforced prestressed concrete box bridge girders [J]. Engineering Structures，2023 (282)：115800.

[3] 马建秦.火灾中衬砌混凝土的爆裂损伤特征[J].混凝土，2007(2)：22-25.
Ma Jianqin. Explosive spalling damage features of lining concrete under conflagration[J].Concrete，2007 (2)：22-25.(in Chinese)

[4] Xiao J Z，Xie Q H，Xie W G. Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004—2016) -an updated overview [J]. Fire Safety Journal，2018，95：11-24.

[5] 肖建庄，王平，朱伯龙.我国钢筋混凝土材料抗火性能研究回顾与分析[J].建筑材料学报，2003，6(2)：

182-189.
Xiao Jianzhuang, Wang Ping, Zhu Bolong. Review on fire-resistance behavior of reinforced concrete in China [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(2): 182-189.(in Chinese)

[6] 崔志强,余红霞,谢宝超,等.火灾下水分汽化和迁移对圆形截面钢管混凝土柱温度场分布影响的试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(10):56-64.
Cui Zhiqiang, Yu Hongxia, Xie Baochao, et al. Experimental research on influence of water vaporization and migration on temperature field of circular concrete filled steel tubular columns in fire [J].Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 56-64.(in Chinese)

[7] 郑文忠,许名鑫,杨杰,等.预应力混凝土简支板抗火性能试验与分析[J].建筑结构学报,2006,27(6):48-59.
Zheng Wenzhong, Xu Mingxin, Yang Jie, et al. Experimental analysis of anti-fire capacity of simply supported prestressed concrete slabs [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(6): 48-59.(in Chinese)

[8] 吴波.火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M].北京:科学出版社,2003.
Wu Bo. Mechanical performance of reinforced concrete structures after fire[M]. Beijing: Science Press, 2003.(in Chinese)

[9] Alhawat H, Hamid R, Baharom S, et al. Thermal behaviour of unloaded concrete tunnel lining through an innovative large-scale tunnel fire experimental testing setup[J]. Construction and Building Materials, 2021(283): 122718.

[10] 叶继红,李俊杰.盾构隧道管片及接头耐火试验[J].中国公路学报,2022,35(9):331-339.
Ye Jihong, Li Junjie. Fire experiments of shield tunnel segments and joints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 331-339.(in Chinese)

[11] 张永兴.考虑热传导-蒸汽压耦合作用的混凝土高温破坏行为解析方法研究[J].土木工程学报,2022,55(8):77-81.
Zhang Yongxing. Study of analytical approach on failure behavior of concrete at high temperature considering coupled heat conduction and vapor pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(8): 77-81.(in Chinese)

[12] Dwaikat M B, Kodur V K R. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems[J]. Fire Safety Journal, 2009(44): 425-434.

[13] Bolander J E, Saito S. Fracture analysis using spring networks with random geometry [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998(61): 569-591.

[14] 张永兴.基于离散模型的混凝土构件破坏过程研究[J].固体力学学报,2015,36(1):35-41.
Zhang Yongxing. Study on discrete model for evaluating failure process of concrete member [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(1): 35-41.(in Chinese)