

## 高温下钢筋混凝土简支梁的抗火性能

丁发兴, 姚飞, 李喆, 余志武  
(中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 对2根钢筋混凝土梁开展高温试验研究,采用合理的材料热工性能和热-力耦合本构关系,应用ABAQUS有限元软件对其温度场和结构变形性能进行三维实体有限元分析,温度场和结构变形性能计算结果与试验结果符合较好.在试验验证的基础上,开展有限元参数分析,探讨保护层厚度及荷载水平对钢筋混凝土简支梁抗火性能的影响.结果表明,钢筋混凝土简支梁的保护层越厚,受拉主筋升温越慢,构件变形延缓,耐火极限增大;荷载水平越大,耐火极限越小.

**关键词:** 钢筋混凝土;有限元;非线性分析;耐火极限;简支梁

**中图分类号:** TU 375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)10-1476-06

## Fire Resistance of Simple Supported Reinforced Concrete Beams Under High Temperature

DING Fa-xing, YAO Fei, LI Zhe, YU Zhi-wu

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China. Corresponding author: LI Zhe, Email: 09lizhe@163.com)

**Abstract:** The experiment of two reinforced concrete beams under high temperatures were conducted. A reasonable material thermal performance and thermal-mechanical coupled constitutive relation were adopted in the 3D finite element model by ABAQUS to analyze the performance of reinforced concrete beams. Temperature field and deformation results agree well with the test results. Based on experiment verifications, the effects of protective layer thickness and the load level on the fire resistance of concrete beams were studied by using finite element parametric analysis. Results showed that the thicker the concrete cover is, the slower the temperature rise of tensile reinforcement is, and the smaller the deflection of specimen is, which means that the fire resistance of reinforced concrete beam is longer. Correspondingly, the fire resistance gets shorter when load level is increased.

**Key words:** reinforced concrete; finite element; nonlinear analysis; fire resistance; simple supported beam

研究钢筋混凝土梁的抗火性能具有重要的意义.目前国外已进行了一定数量的钢筋混凝土梁的耐火试验,取得了较多的研究成果.如文献[1]在20世纪90年代对火灾下钢筋混凝土梁的抗弯和抗剪性能开展了一定数量的试验研究.

对钢筋混凝土结构的抗火分析一般采用有限元方法.文献[2]采用简化考虑水泥剥落的有限元程序,分析钢筋混凝土梁的抗火性能;文献[3]

建立了着重考虑钢筋和混凝土之间的黏结滑移行为的自编有限元程序,可以更准确地模拟高温下钢筋混凝土梁的性能;文献[4]建立了考虑材料应力-应变滞回关系的有限元程序 NARCLF,可合理反映火灾下钢筋混凝土结构的变形特性和耐火性能.由于火灾中构件截面温度分布不均及受火构件升温膨胀将引起截面应力重分布,为考虑这些影响因素,需引入钢材和混凝土不同的加载、

收稿日期: 2014-04-20

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51578548); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助项目(2014KB30).

作者简介: 丁发兴(1979-),男(回族),浙江瑞安人,中南大学教授,博士生导师.

卸载和再加载路径,并在热-力耦合本构关系中考虑钢材的高温蠕变、混凝土的高温蠕变和瞬态热应变的影响.为进一步研究火灾下钢筋混凝土梁的抗火性能,本课题组采用 ABAQUS 软件,在试验验证的基础上,对钢筋混凝土梁的抗火性能进行非线性有限元分析,主要工作如下.

1) 选取合理的材料热工参数及考虑钢材高温蠕变、混凝土瞬态热应变与短期高温蠕变的材料热力耦合本构关系,利用火灾下钢筋混凝土梁的温度场和抗火性能试验结果对采用 ABAQUS 软件建立的相关模型进行验证.

2) 利用 ABAQUS 软件建立钢筋混凝土梁温度场计算模型和抗火性能分析有限元模型,探讨保护层厚度与荷载水平对钢筋混凝土梁抗火性能的影响.

## 1 结构抗火理论分析

### 1.1 温度场计算模型

1) 混凝土热工性能:高温下混凝土热传导系数表达式见文献[5];高温下混凝土比热表达式见欧洲规范<sup>[6]</sup>;混凝土密度  $\rho_c = 2\,500\text{ kg/m}^3$ .

2) 钢材热工性能:钢材导热系数表达式见文献[5];钢材比热表达式见文献[7];钢材密度  $\rho_s = 7\,850\text{ kg/m}^3$ .

3) 单元类型与界面参数选取:钢筋采用传热连接单元(DC1D2),混凝土采用实体热分析单元(DC3D8),网格采用结构化技术划分;钢筋与混凝土间采用绑定(tie);构件表面热辐射系数  $\varepsilon = 0.5$ ,综合换热系数  $h = 25\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ,初始温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 1.2 结构抗火计算模型

1) 高温下混凝土热-力耦合本构关系:高温

下混凝土应力-应变本构关系表达式见文献[8];混凝土热膨胀系数与温度关系式见文献[9];混凝土瞬态热应变计算公式及混凝土短期高温徐变计算公式见文献[10].

2) 高温下钢材热-力耦合本构关系:高温下钢材热-力耦合本构关系见文献[8];钢材热膨胀系数与温度的关系式见文献[9];钢材高温蠕变的计算公式见文献[7].

钢筋采用桁架单元(T3D2),混凝土采用实体单元(C3D8R),网格划分使用结构化技术.

图 1 为采用 ABAQUS 进行钢筋混凝土梁温度场计算和结构抗火计算模型的网格划分结果.

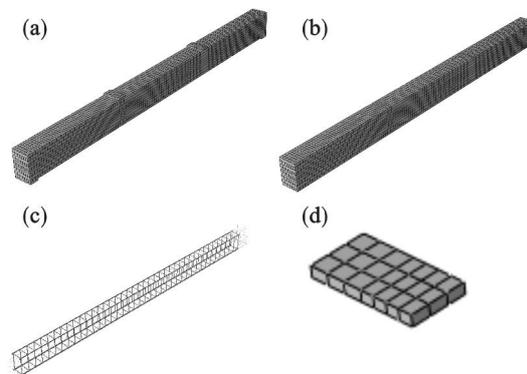


图 1 模型网格划分

Fig. 1 Mesh generation of model

(a) — 整体有限元模型; (b) — 混凝土单元; (c) — 钢筋有限元模型; (d) — 加载板单元.

## 2 钢筋混凝土梁试验

### 2.1 试验概况

本次试验共设计了 3 根钢筋混凝土梁,梁的截面尺寸均为  $200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,梁长  $4\text{ m}$ ,采用单筋矩形截面,构件截面尺寸和配筋如图 2 所示.其中 1 根进行常温加载试验,2 根进行高温下静载试验,构件设计参数见表 1.

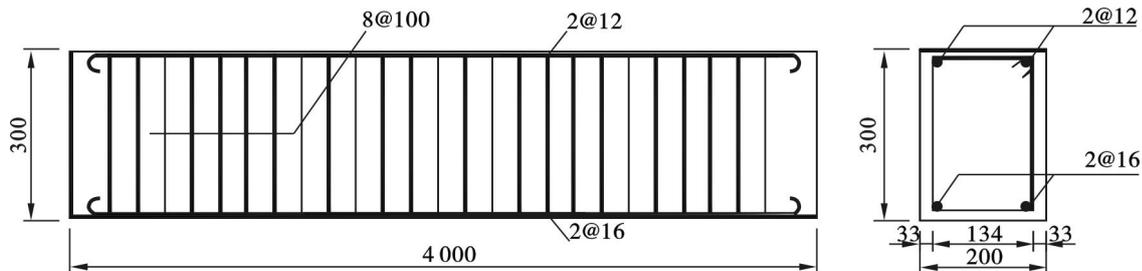


图 2 构件截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 2 Geometrical details of specimens

纵向受力钢筋采用 2 根直径为  $16\text{ mm}$  的 HRB400 级的热轧带肋钢筋;架立钢筋采用 2 根

直径为  $12\text{ mm}$  的 HRB400 级热轧钢筋;箍筋采用直径为  $8\text{ mm}$  的 HPB300 级热轧钢筋,间距为

100 mm;混凝土净保护层厚度为 25 mm. 钢筋的性能见表 2. 本试验采用的混凝土设计强度等级为 C30. 试验时 L1, L2 与 L3 梁的 150 mm 立方体试块抗压强度平均值分别为 37.7, 36.3 和 33.2 MPa.

表 1 构件设计参数  
Table 1 Parameters of tested specimens

试件分组	初始荷载	试验工况	受火时间 $t_f$ /min
L1	0	常温静载	0
L2	$0.2 N_u$	恒载升温	60
L3	$0.2 N_u$	恒载升温	120

表 2 钢筋性能  
Table 2 Properties of steel MPa

种类	$f_s$	$f_u$	$E_s$
HPB300	353	494	$2.10 \times 10^5$
HRB400	492	648	$1.99 \times 10^5$

2.2 试验方法

1) 常温下钢筋混凝土梁静载试验. 常温静载采用三分点加载. 梁 L1 进行常温下静载试验, 试验采用分级加载, 开裂荷载为 24 kN, 最后三分点处受压混凝土出现起皮现象, 混凝土被压碎, 裂缝延伸至梁顶, 梁达到极限荷载, 进入破坏状态, 极限荷载为 69.7 kN. 图 3 为梁 L1 破坏图.

2) 高温下钢筋混凝土梁三面受火试验. 火灾试验采用 ISO834 标准升温曲线, 因实际功率偏小, 电炉实际升温曲线与标准升温曲线之间存在偏差. 炉腔的实际升温曲线可以拟合为

$$\theta = \theta_0 + 1\,230 - \frac{1\,230}{1 + t/30} \quad (1)$$



图 3 L1 梁破坏图  
Fig. 3 Typical failure mode of L1

式中:  $\theta_0$  为试验炉内初始温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta$  为升温  $t$  时刻试验炉内空气的平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

高温试验采用构件上堆放砝码的方法施加竖向荷载, 同样采用三分点加载, 见图 4. 高温试验构件采用 3 面受火, 构件内部的温度场采用沿截面不同宽度和高度布置热电偶进行测量, 见图 5. 采用百分表对构件在高温下的跨中挠度和梁端轴向膨胀进行测量.



图 4 高温试验加载示意图  
Fig. 4 Layout of loaded specimens under high temperature

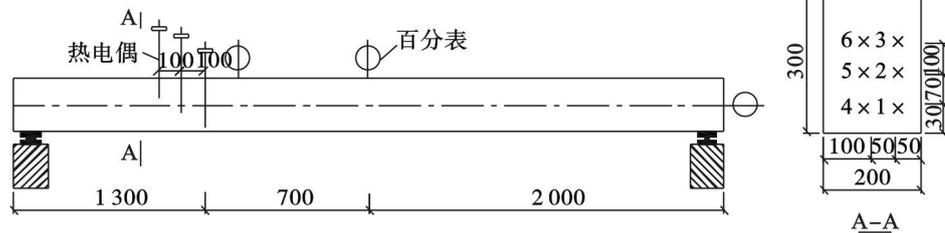


图 5 高温试验温度和变形测量示意图  
Fig. 5 Sketch of experimental instruments

抗火试验测试结果显示: 在升温过程中, 跨中挠度增长呈现出快 - 慢 - 快 - 慢的变化趋势; 升温 60 min 时, 构件挠度都在 40 mm 以上.

在试验过程中, 升温时间至 15 min 左右, 构件均有渗水现象, 梁侧面开始渗水, 同时有劈啪声; 至 20 min 后, 梁顶有水蒸气冒出; 至 45 min

时, 水蒸气达到最多, 整个梁的上表面都被水覆盖, 部分位置还有水泡冒出. 受火时间在 30 ~ 70 min 时间段内, 跨中变形曲线呈现一个较平缓的 S 型变化, 之后挠度增长明显加快; 120 min 时, 构件 L3 挠度接近 100 mm. 高温试验构件破坏形态见图 6.



图 6 高温试验构件破坏图  
Fig. 6 Typical failure mode of tested beams under high temperature

### 3 计算结果分析

#### 3.1 有限元法的验证

图 7 为常温下钢筋混凝土梁跨中挠度与荷载的关系曲线. 由图可知, ABAQUS 有限元模拟的结果和试验结果吻合较好, 可见本文有限元建模中的材料本构关系在常温下是合理的.

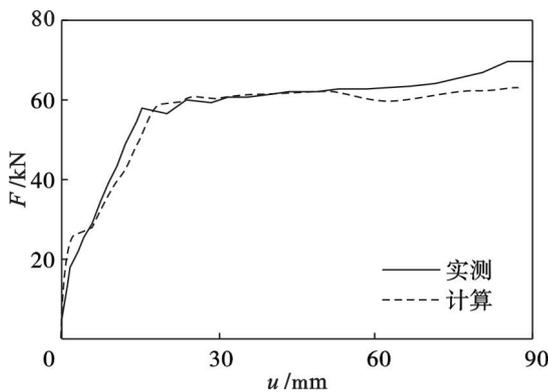


图 7 梁跨中挠度与荷载的关系曲线  
Fig. 7 Relationship between deflection and load

图 8 为采用 ABAQUS 非线性有限元法计算得到的梁各测点温度与受火时间的关系曲线, 可见实测值与计算值吻合较好. 图 9 为梁跨中挠度 ( $u$ ) 与轴向膨胀 ( $v$ ) 的计算曲线与实测曲线比较, 可见总体吻合良好. 但计算值较实测值略小, 可能是由于温度场计算结果较小的缘故.

#### 3.2 抗火性能影响因素分析

利用 ABAQUS 非线性有限元软件, 对在标准升温曲线 ISO - 834 下的不同净保护层厚度、荷载水平等参数下三面受火钢筋混凝土梁的耐火性能进行参数分析. 受拉钢筋、架立钢筋  $f_s = 345$  MPa, 箍筋  $f_s = 235$  MPa, 受拉钢筋、架立钢筋取  $\phi 16$  mm, 箍筋取  $\phi 12$  mm; 混凝土抗压强度  $f_{cu} = 30$  MPa, 荷载水平为  $0.3N_u$ . 对净保护层厚度  $c$  分别取 20, 30, 40 mm 的钢筋混凝土梁进行有限

元分析时, 采用增加梁两侧面和底面的方法来增大保护层厚度. 定义  $p$  为梁荷载水平, 取值为  $0.2 \sim 0.6$ .

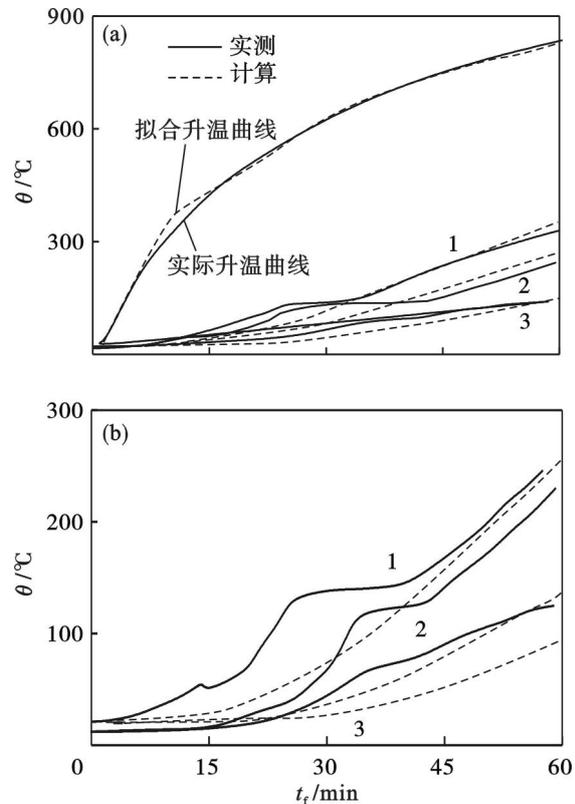


图 8 测点温度与受火时间的关系曲线  
Fig. 8 Relationship between temperature and time  
(a) — L2 梁; (b) — L3 梁.

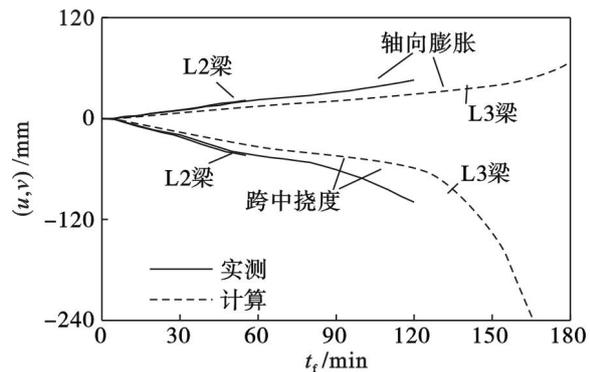


图 9  $u, v$  与  $t_f$  的关系  
Fig. 9 Relationship between  $u, v$  and  $t_f$

图 10 为  $t_f$  对钢筋混凝土梁抗火性能的影响, 由图 10a 可知, 承受一定荷载水平的钢筋混凝土梁在高温作用下, 保护层越小, 其跨中挠度增长速度越快, 梁的耐火极限越小; 保护层厚度由 20 mm 提高到 30 mm 时, 耐火极限增加 13 min, 提高 19.4%; 保护层厚度为 40 mm 时, 比保护层厚度为 30 mm 时耐火极限大 28 min, 提高 35%, 耐火极限增加明显. 由图 10b 可知, 保护层厚度为 20

和 30 mm 时,梁轴向膨胀量相差不大;保护层厚度为 40 mm 时,梁轴向膨胀增长速率明显降低. 由图 10c 可以看出,不同保护层厚度的受拉主筋的温度有差别,保护层小的梁,其受拉主筋升温较快,保护层为 20 mm 及 30 mm 时,钢筋混凝土梁受拉主筋温度( $\theta$ )与时间( $t_f$ )关系曲线较为接近;保护层厚度为 40 mm 时,受拉主筋温度明显较低.

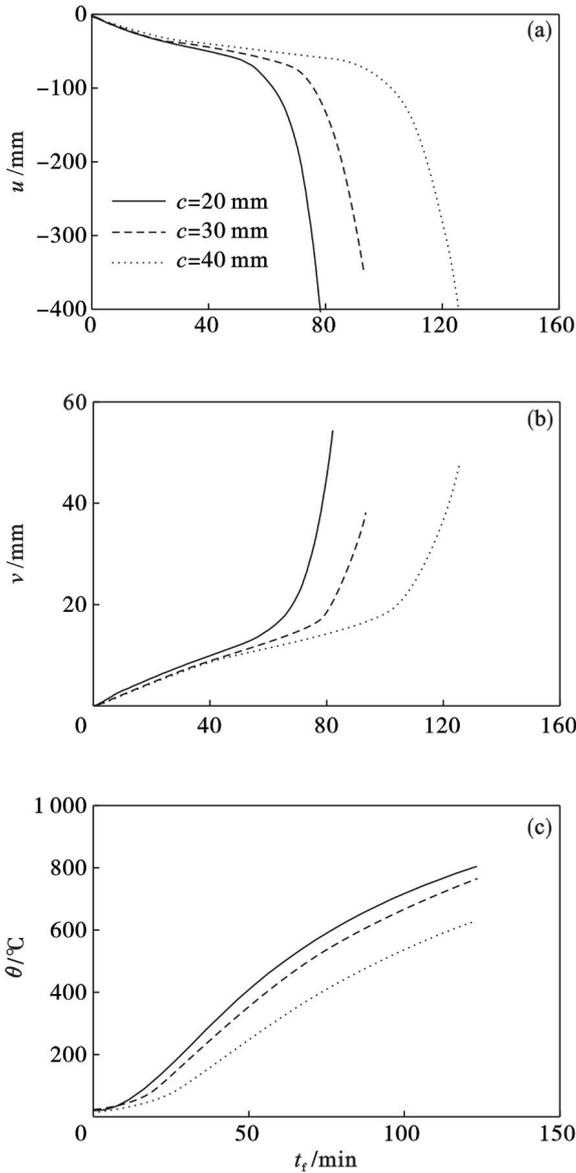


图 10  $t_f$  对梁抗火性能的影响  
Fig. 10 Effect of  $t_f$  on fire resistance of beams

由图 11 可知,荷载水平对钢筋混凝土梁的耐火极限影响较大,荷载越大,高温下梁的跨中挠度发展越快,耐火极限越小.

由图 12 可知,我国目前的 RC 梁在环境类别为一、二时的最小保护层厚度不能满足防火规范对 RC 梁一级耐火极限的要求. 建议当采用一级耐火极限标准时 RC 梁保护层厚度为 40 mm.

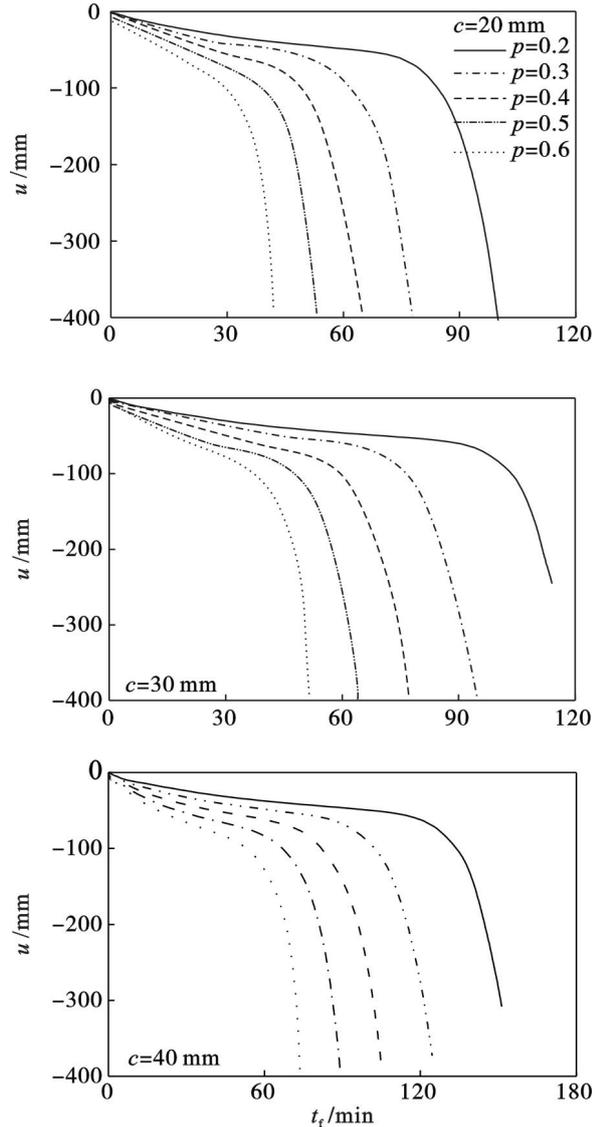


图 11  $t_f$  对  $u$  的影响  
Fig. 11 Effect of  $t_f$  on  $u$

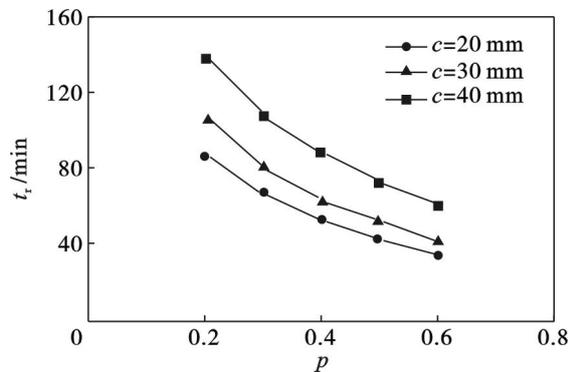


图 12  $p$  对钢筋混凝土梁耐火极限的影响  
Fig. 12 Effect of  $p$  on fire resistance of concrete beams

### 4 结 论

1) 选用合理的材料热工参数及本构关系,利用

ABAQUS 有限元软件计算得到的钢筋混凝土梁温度场和变形性能的计算结果与试验结果吻合良好。

2) 钢筋混凝土筒支梁的保护层越厚, 受拉主筋升温越慢, 使构件的变形得到延缓, 耐火极限增大; 荷载水平越大, 耐火极限越小。

3) 我国目前的 RC 梁在环境类别为一、二时的最小保护层厚度不能满足防火规范对 RC 梁一级耐火极限的要求。建议当采用一级耐火极限标准时 RC 梁保护层厚度为 40 mm。

#### 参考文献:

- [1] Ellingwood B, Lin T D. Flexure and shear behavior of concrete beams during fire [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(2): 440-457.
- [2] Kodur V K R, Dwaikat M. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 30(5): 431-443.
- [3] Gao W Y, Dai J G, Teng J G, et al. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire [J]. *Engineering Structures*, 2013, 52(9): 488-501.
- [4] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 火灾下钢筋混凝土柱非线性有限元分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(3): 608-614.

(Ding Fa-xing, Yu Zhi-wu, Ou Jin-ping. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete column under fire [J]. *Journal of Central South University: Natural Sciences*, 2008, 39(3): 608-614.)

- [5] Lie T T. A method to predict the fire resistance of circular concrete filled hollow steel columns [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1990, 2(4): 111-126.
- [6] Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1.2: structural fire design. British, EN1992-1-2[S]. European Committee for Standardization, 2004.
- [7] 李引擎, 马道贞, 徐坚. 建筑结构防火设计计算和构造原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991: 10-35. (Li Yin-qing, Ma Dao-zhen, Xu Jian. Fire design calculation and construction principle of building structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991: 10-35.)
- [8] Ding F X, Yu Z W. The behavior of concrete and circular concrete-filled steel tube stub columns at high temperatures [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2006, 13(6): 726-732.
- [9] Lie T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. *Journal of the Structural Engineering*, 1994, 120(5): 489-1509.
- [10] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (Guo Zhen-hai, Shi Xu-dong. High temperature performance and calculation of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)

(上接第 1470 页)

## 5 结 论

1) 基于引射原理, 设计出一种自吸式磨料射流割缝喷嘴, 可以有效吸入割缝产生的煤粒形成磨料射流, 提高了割缝能力。煤粒在喷嘴内经历 3 个加速阶段: 吸入口加速段、混合腔加速段和后喷嘴加速段。

2) 自吸式磨料喷嘴最优结构: 前喷嘴直径为 3 mm, 后喷嘴直径为 5 mm, 混合腔长度为 3.5 mm, 后喷嘴长度根据割缝器尺寸取最大值。

3) 实验室割缝实验结果表明: 相比原纯水射流割缝技术, 自吸式磨料射流割缝器切割软煤时, 割缝深度增加约 40%, 平均宽度增加约 20%; 切割硬煤时, 割缝深度增加约 80%, 平均宽度增加约 40%。

#### 参考文献:

- [1] Lu Y Y, Liu Y, Li X H, et al. A new method of drilling long boreholes in low permeability coal by improving its permeability [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 84(2): 94-102.
- [2] Wei G Y, Shan Z Y, Zhang Z M, et al. Research on hydraulic slotting technology controlling coal-gas outbursts [J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2008, 14(1):

67-72.

- [3] 林柏泉, 吕有厂, 李宝玉, 等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 959-963. (Lin Bai-quan, Lyu You-chang, Li Bao-yu, et al. High pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 959-963.)
- [4] Liu L H, Cao H, Zou C Q, et al. Supply abrasive system of premixed abrasive jet and derusting application [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217(1/2/3): 2033-2037.
- [5] Hiavac L M, Hiavacova I M, Gembalova L, et al. Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(20): 6190-6195.
- [6] 左伟芹, 卢义玉, 夏彬伟, 等. 前混合磨料射流新型连续加砂系统设计与实验 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 328-335. (Zuo Wei-qin, Lu Yi-yu, Xia Bin-wei, et al. System design of continuous feeding abrasive for pre-mixed abrasive jet and its experiment [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(2): 328-335.)
- [7] Gagan J, Smierciew K, Butrymowicz D, et al. Comparative study of turbulence models in application to gas ejectors [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 78(11): 9-15.
- [8] Jafar R H M, Spelt J K, Papini M. Numerical simulation of surface roughness and erosion rate of abrasive jet micro-machined channels [J]. *Wear*, 2013, 303(1/2): 302-312.
- [9] Oh T M, Cho G C. Characterization of effective parameters in abrasive water jet rock cutting [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 745-756.