

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.07.029

# 长期荷载作用下 SFRC 梁承载能力极限状态 可靠性分析

李 艺<sup>1</sup>, 董金霞<sup>1</sup>, TAN Kiang Hwee<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 新加坡国立大学, 新加坡 119260)

**摘 要:** 为分析长期荷载作用下 SFRC 梁承载能力极限状态可靠性的时变规律, 基于持荷 10 年的 SFRC 梁抗弯试验结果, 建立了 SFRC 梁承载能力极限状态时变可靠性分析模型. 对于 I 系列梁(持荷水平不变、钢纤维掺量改变)和 II 系列梁(持荷水平改变、钢纤维掺量不变), 将等效抗力法和一次二阶矩法相结合, 求得其时变可靠指标, 并预测了 100 年长期荷载作用下可靠性的时变规律. 结果表明: 对于 I 系列梁, 钢纤维体积分数为 0.5% 是最佳掺量; 对于 II 系列梁, 外荷载越小, 可靠指标越大, 抗弯承载力越大, 外加荷载越接近, 可靠指标越接近; 在服役期内 SFRC 梁可靠指标先上升后下降, 当钢筋开始锈蚀, 可靠指标曲线出现拐点, 导致梁正截面抗弯承载力下降明显.

**关键词:** 钢筋纤维混凝土梁; 长期荷载; 承载能力; 时变; 可靠性

中图分类号: TG 335.58 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)07-1055-05

## Reliability Analysis of SFRC Beams Under Ultimate Limit States of Long-Term Load

LI Yi<sup>1</sup>, DONG Jin-xia<sup>1</sup>, TAN Kiang Hwee<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. National University of Singapore, Singapore 119260, Singapore. Corresponding author: LI Yi, E-mail: liyi@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Time-dependent reliability model for the ultimate load-carrying capacity of steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams subjected to long-term load is established based on the results obtained from the beams under sustained load ten years. Two series of tested beams are considered: Series I with constantly applied load but varying steel fiber content, and Series II with the same steel fiber content but subjected to different applied loads. The time-dependent reliability indexes are determined and the reliability pattern for 100 years of long-term load is forecasted using the equivalent resistance method and the first-order-second-moment method. The results show that the optimum content of steel fibers is 0.5% in Series I beams; however, for Series II beams with the same steel fiber content, the smaller the applied load is, the larger the reliability index and the flexural capacity are. Also, the reliability indexes are almost the same for similar applied loads. Under service conditions, the reliability indexes increase at first and then decrease with time. An inflection point is observed in the reliability index curves when the steel reinforcement starts to corrosion, leading to an obvious decrease in the flexural capacity.

**Key words:** SFRC beam; long-term load; load-carrying capacity; time-dependent; reliability

众所周知, 将纤维掺入混凝土基材内可有效阻裂和增韧, 但是, 目前关于纤维混凝土构件在长

期荷载作用下的服役行为研究还不多见, 文献 [1] 研究了持荷 70 天钢筋混凝土梁在 5% 的氯化

收稿日期: 2016-04-29

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0107); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130401009); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2015024).

作者简介: 李 艺(1972-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学教授.

钠溶液浸泡下弯矩、曲率和中性轴高度的时变规律;文献[2]研究了钢筋混凝土梁受到 0.2 和 1 Hz 持续交变载荷 80 天的跨中位移、截面刚度、应力和应变值;文献[3]考虑徐变对大跨度钢管混凝土拱桥力学性能、结构形式和内力的影响,采用时变有效系数法对其进行随机地震可靠性分析;文献[4]基于徐变和收缩的影响研究了工字钢-混凝土组合梁在不同环境温度、湿度下服役 300 天的挠度和力学行为;文献[5]通过持荷 17 个月钢-聚酯纤维梁受弯试验得到其裂缝、位移的变化规律;文献[6]中应用抽样法以及神经网络分析了在服役期内的预应力混凝土桥梁的可靠性;文献[7]中应用 Monte Carlo 方法研究了荷载持续时间为 2 年的预应力轨枕的时变可靠性. 本文基于持荷 10 年的 SFRC 梁抗弯试验结果,建立了 SFRC 梁承载能力极限状态时变可靠性分析模型. 对于 I 系列梁(持荷水平不变、钢纤维掺量改变)和 II 系列梁(持荷水平改变、钢纤维掺量不变),将等效抗力法和一次二阶矩法相结合,求得其时变可靠指标,并预测了 100 年长期荷载作用下可靠性的时变规律.

## 1 抗力影响因素

### 1.1 混凝土时变抗拉强度

混凝土时变抗拉强度的平均值和标准差的表达式为<sup>[8]</sup>

$$\mu_{f_t(t)} = 0.24\mu_{f_{cu}^{2/3}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{f_t(t)} = 0.24\sigma_{f_{cu}^{2/3}}. \quad (2)$$

### 1.2 钢筋截面积

文献[9]给出  $t$  时刻由于钢筋锈蚀导致钢筋截面积减小的表达式为

$$A_s(t) = \begin{cases} A_{s0}, & t \leq t_1; \\ A_{s0} \left[ 1 - \frac{\lambda}{r_0}(t - t_1) \right]^2, & t > t_1. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A_{s0}$ 为钢筋初始面积; $t_1$ 为锈蚀开始时刻,按文献[10]计算; $\lambda$ 为钢筋锈蚀速度; $r_0$ 为钢筋初始半径.

### 1.3 钢筋与混凝土的黏结

钢筋与混凝土的黏结力的衰减系数  $\varphi(t)$ ,在钢筋未锈蚀前取 1.0;钢筋锈蚀后取 0.95.

### 1.4 计算模式不定性

计算模式不定性系数  $P$ :

$$P = \frac{K_s}{K_j}. \quad (4)$$

式中: $K_s$ 为真实抗力值; $K_j$ 为计算抗力值.

## 2 正截面抗弯承载力时变可靠性

### 2.1 SFRC 梁正截面抗弯承载力

SFRC 梁正截面抗弯承载力  $M_{tu}$  的表达式为

$$M_{tu} = f_{ic}bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_yA'_s(h_0 - a'_s) - f_{tu}bx_t\left(\frac{x_t}{2} - a\right). \quad (5)$$

钢纤维混凝土受压区高度  $x$  的表达式为

$$f_{ic}bx = f_yA_s - f'_yA'_s + f_{tu}bx_t. \quad (6)$$

式中: $f_{ic}$ 为钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值; $b$ 为截面宽度; $h_0$ 为截面有效高度; $f_y, f'_y$ 为纵筋抗拉、抗压强度设计值; $A_s, A'_s$ 为纵向拉筋、压筋截面积; $a'_s$ 为压区纵筋合力点至截面受压边缘的距离; $f_{tu}$ 为抗拉区钢纤维混凝土等效应力图的抗拉强度; $x_t$ 为抗拉区等效应力图图形高度; $a$ 为纵向受拉钢筋合力点到主截面受拉边缘的距离.

梁抗拉区等效矩形应力图高度的表达式为

$$x_t = h - \frac{x}{\beta_1}. \quad (7)$$

式中: $x$ 为受压区等效矩形应力图的高度;当混凝土低于 C50 时, $\beta_1$ 取 0.80,当混凝土为 C80 时, $\beta_1$ 取 0.74,其间按线性内插法确定.

抗拉区等效矩形应力图的抗拉强度的表达式为

$$f_{tu} = f_t\beta_{tu}\lambda_f. \quad (8)$$

式中: $\beta_{tu}$ 为钢纤维对钢筋钢纤维混凝土梁正截面抗拉区抗拉作用的影响系数<sup>[11]</sup>; $\lambda_f$ 为钢纤维含量的特征值.

联立式(1)~式(8),则钢筋钢纤维混凝土梁正截面抗弯承载力表达式为

$$R = p \cdot \varphi(t) \{ f_{ic}bx(h_0 - x/2) + f'_yA'_s(h_0 - a'_s) - f_t\beta_{tu}\lambda_f b(h - x/\beta_1)[(h - x/\beta_1)/2 - a] \}. \quad (9)$$

其中,

$$x = \frac{f_yA_s - f'_yA'_s + f_t\beta_{tu}\lambda_f bh}{f_{ic}b + \frac{1}{\beta_1}f_t\beta_{tu}\lambda_f b}. \quad (10)$$

### 2.2 SFRC 梁正截面时变抗弯承载力

随持荷时间增长,材料强度衰减和混凝土、钢筋有效截面减小,则 SFRC 梁正截面时变抗弯承载力表达式为

$$R(t) = p \cdot \varphi(t) \{ f_{ic}(t)bx(t)(h_0 - x(t)/2) + f'_yA'_s(t)(h_0 - a'_s) - f_t(t)\beta_{tu}\lambda_f b(h - x(t)/\beta_1) \times [(h - x(t)/\beta_1)/2 - a] \}. \quad (11)$$

其中,

$$x(t) = \frac{f_y A_s(t) - f'_y A'_s(t) + f_t(t) \beta_w \lambda_f b h}{f_{ic}(t) b + \frac{1}{\beta_1} f_t(t) \beta_w \lambda_f b} \quad (12)$$

式中:  $f_{ic}(t)$  为钢筋钢纤维混凝土时变轴心抗压强度值;  $A_s(t)$ ,  $A'_s(t)$  为拉筋、压筋的时变截面积;  $f_t(t)$  为钢筋钢纤维混凝土时变抗拉强度值。

### 2.3 极限状态方程的建立

用  $S(t)$  表示时变荷载效应, 则钢筋钢纤维混凝土梁的时变极限状态功能函数为

$$Z(t) = p \cdot \varphi(t) \{ f_{ic}(t) b x(t) (h_0 - x(t)/2) + f'_y A'_s(t) (h_0 - a'_s) - f_t(t) \beta_w \lambda_f b (h - x(t)/\beta_1) \times [(h - x(t)/\beta_1)/2 - a] \} - S(t) \quad (13)$$

## 3 实例计算

### 3.1 试件设计

对持荷 10 年的 10 根简支 SFRC 梁试件的抗弯承载力进行测试<sup>[12]</sup>, 其中, I 系列试件持荷水平(施加荷载与极限设计荷载的比值)均为 0.5, 设计极限荷载  $P_u$  为 23.3 kN, 钢纤维体积分数分别为 0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%; II 系列试件持荷水平分别为 0.35, 0.50, 0.59, 0.65, 0.80, 钢纤维体积分数为 1.0%, 见表 1。梁截面尺寸为 100 mm × 125 mm × 2 000 mm, 有效长度 1 800 mm。选用长度 30 mm, 直径 0.5 mm 的端部弯钩形钢纤维; 纵向拉筋选用 HRB335 钢筋, 直径为 10 mm; 纵向压筋选用 HRB335 钢筋, 直径 6 mm; 箍筋为  $\phi 6@75$ , 详见图 1。使用钢板和混凝土块在试件梁跨四分点处加载, 详见图 2, 混凝土抗压强度等级为 C40。

表 1 简支梁编号  
Table 1 Beam designation

类别	序号	钢纤维体积分数/%	持荷水平
I 系列	A-50	0	0.50
	B-50	0.5	0.50
	C-50	1.0	0.50
	D-50	1.5	0.50
	E-50	2.0	0.50
II 系列	C-35	1.0	0.35
	C-50	1.0	0.50
	C-59	1.0	0.59
	C-65	1.0	0.65
	C-80	1.0	0.80

### 3.2 测点布置

在梁跨中布置两个测量挠度的测量表。梁跨中挠度为支撑调整后两个测表测得数据的平均

值。挠度和裂缝的测定时间分别为 1, 50, 138, 230, 370, 2 284 d (6.25 a), 和 3 678 d (10 a)。

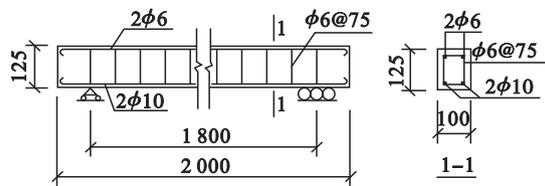


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Specimen dimension and details of reinforcement

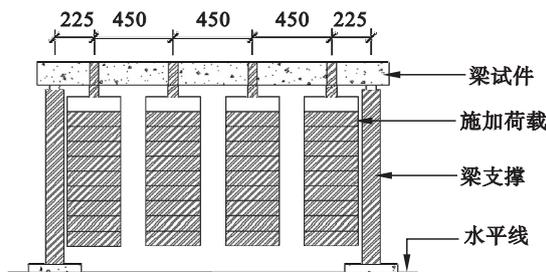


图 2 长期荷载加载装置

Fig. 2 Test setup for sustained load

### 3.3 时变可靠指标

依据式(11)~式(13)和一次二阶矩法, 得到 10 年长期荷载作用下梁正截面抗弯承载力时变可靠指标如图 3a, 图 4a 所示。预测了 100 年长期荷载作用下梁正截面抗弯承载力时变可靠指标如图 3b, 图 4b 所示, 从结果可知:

1) 如图 3a 所示, 在任意相同时刻, 当外荷载相同 ( $0.50P_u$ ), 纤维掺量体积分数不同 (0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%) 时, 掺入钢纤维梁的可靠指标均明显高于未掺钢纤维梁 (A-50)。I 系列梁可靠指标的顺序为

$$\beta(B-50) > \beta(C-50) > \beta(D-50) > (E-50) > \beta(A-50).$$

因此, 在本次试验条件下, 钢纤维的掺入可显著提高梁正截面抗弯承载力; B-50 的钢纤维体积分数为 0.5% 时为最佳掺量。

2) 如图 4 所示, 当钢纤维掺量相同 (1.0%), 外荷载不同 ( $0.35P_u$ ,  $0.50P_u$ ,  $0.59P_u$ ,  $0.80P_u$ ) 时, II 系列梁可靠指标的顺序为

$$\beta(C-35) > \beta(C-50) > \beta(C-59) > \beta(C-65) > \beta(C-80).$$

说明外加荷载越大, 可靠指标越小。且  $\beta(C-59)$ ,  $\beta(C-65)$  的数值最接近, 即荷载水平接近, 可靠指标也接近。

3) 如图 3, 图 4 所示, 在服役期内钢筋钢纤维混凝土梁的可靠指标先上升后下降,  $t=2$  a 时, 试件可靠指标达最大值, 出现这一现象的原因可能

是由于梁在使用初期强度有所上升. 随服役时间推移,混凝土、钢筋性能逐渐劣化,黏结力削弱,可靠指标逐渐降低. 根据可靠指标与可靠性鉴定评级标准的对应关系可知,  $t = 50$  a 时, I 系列梁: E-50 不满足承载力要求; II 系列梁: C-59, C-65, C-80 不满足承载力要求.  $t = 100$  a 时, I 系列梁: C-50, D-50, E-50 不满足承载力要求;

II 系列梁: C-50, C-59, C-65, C-80 不满足承载力要求.

4) 根据文献[10]计算得  $t_1 = 37.8$  a 时,为钢筋锈蚀开始时刻. 如图 3b,图 4b 所示,当  $t = 37.8$  a 时,可靠指标曲线均出现拐点,这是因为此时刻钢筋开始锈蚀,其屈服拉力明显下降,使得混凝土梁正截面抗弯承载力明显降低.

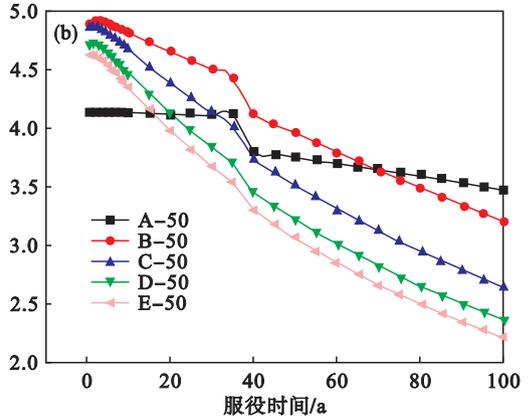
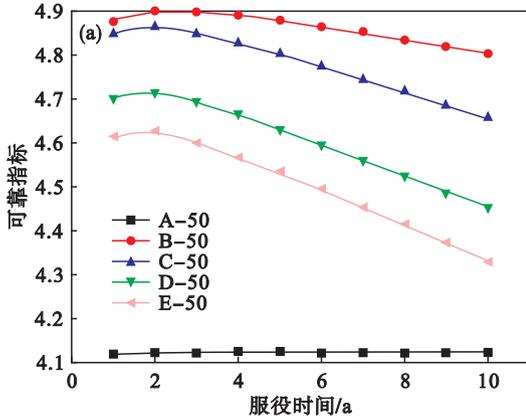


图 3 I 系列梁时变可靠指标  
Fig. 3 Time-dependent reliability of series I  
(a)—10 年; (b)—100 年.

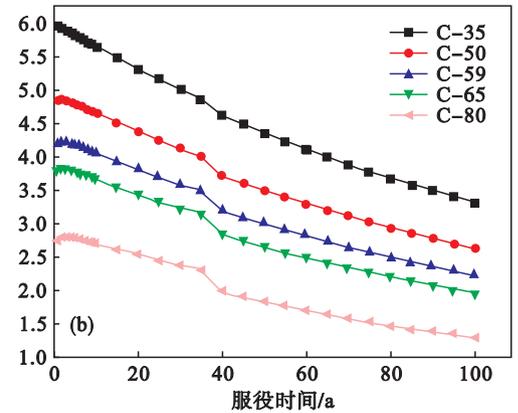
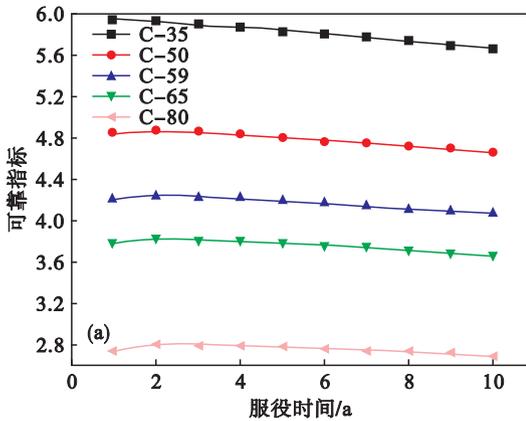


图 4 II 系列梁时变可靠指标  
Fig. 4 Time-dependent reliability of series II  
(a)—10 年; (b)—100 年.

## 4 结 论

1) 基于承载能力极限状态建立了长期荷载作用下 SFRC 梁可靠性分析模型.

2) 钢纤维的掺入可显著提高梁正截面抗弯承载力;对于 I 系列梁,钢纤维体积分数 0.5% 为最佳掺量. 对于 II 系列梁,外荷载越小,可靠指标越大,抗弯承载力越大;外加荷载越接近,可靠指标越接近.

3) 在服役期内钢筋钢纤维混凝土梁可靠指

标先上升后下降,当钢筋开始锈蚀,可靠指标曲线出现拐点,导致梁正截面抗弯承载力下降明显.

## 参考文献:

[1] Goitseone M, Pilate M, Mark A. Behaviour of RC beams corroded under sustained service loads[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(4): 3346 - 3351.

[2] Lee H, Forth J P, Neville A, et al. Behaviour of cracked reinforced concrete beams under repeated and sustained load types[J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(3): 457 - 465.

[3] Ma Y S, Wang Y F. Creep influence on structural dynamic reliability[J]. *Engineering Structures*, 2015, 99(5): 1 - 8.

[4] Hui Y B, Brian U, Sameera W P, et al. Time-dependent behaviour of composite beams with blind bolts under

- sustained loads [ J ]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 112 ( 3 ): 196 - 207.
- [ 5 ] Emilia V, Francesco M, Maria A A, et al. Long term behavior of FRC flexural beams under sustained load [ J ]. *Engineering Structures*, 2013, 56 ( 6 ): 1858 - 1867.
- [ 6 ] Jin C. Serviceability reliability analysis of prestressed concrete bridges [ J ]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013, 17 ( 2 ): 415 - 425.
- [ 7 ] Mohammadzadeh S, Vahabi E. Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration [ J ]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18 ( 1 ): 421 - 432.
- [ 8 ] 丁发兴, 余志武. 混凝土受拉力学性能统一计算方法 [ J ]. 华中科技大学学报 ( 城市科学版 ), 2004, 21 ( 3 ): 29 - 35. ( Ding Fa-xing, Yu Zhi-wu. Unified calculation method for tensile properties of concrete [ J ]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology ( City Science Edition )*, 2004, 21 ( 3 ): 29 - 35. )
- [ 9 ] 董振平, 牛荪涛, 刘西芳, 等. 一般大气环境下钢筋开始锈蚀时间的计算方法 [ J ]. 西安建筑科技大学学报 ( 自然科学版 ), 2006, 38 ( 2 ): 204 - 209. ( Dong Zhen-ping, Niu Di-tao, Liu Xi-fang, et al. Method for calculating the time of initiation of reinforcement in the general atmosphere [ J ]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology ( Natural Science Edition )*, 2006, 38 ( 2 ): 204 - 209. )
- [ 10 ] 郑怡, 刘明, 沈小俊. 既有钢筋混凝土梁时变可靠度计算模型 [ J ]. 交通运输工程学报, 2009, 9 ( 2 ): 45 - 49. ( Zheng Yi, Liu Ming, Shen Xiao-jun. Calculating models of time-dependent reliability for existing reinforced concrete beam [ J ]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9 ( 2 ): 45 - 49. )
- [ 11 ] 大连理工大学. 纤维混凝土结构技术规程: CECS38—2004 [ S ]. 北京: 中国计划出版社, 2004. ( Dalian University of Technology. Technical specification for fiber reinforced concrete structures; CECS38—2004 [ S ]. Beijing: China Planning Press, 2004. )
- [ 12 ] Hwee T K, Kumar S M. Ten-year study on steel fiber-reinforced concrete beams under sustained loads [ J ]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102 ( 3 ): 472 - 480.

( 上接第 1025 页 )

2) 对于尺寸为 250 mm × 200 mm、同样柴油层厚度和不同油水体积比的柴油池火而言, 机械通风对池火燃烧特性的影响规律是相同的, 即存在一个临界的风速值, 当风速超过该临界值时, 通风对燃烧产生的负面影响越来越显著。

3) 机械通风使得柴油池火初起阶段火灾发展更为迅速, 成长阶段变缓, 火焰热辐射强度降低. 在柴油池火的旺盛阶段, 当风速由 0.12 m/s 增加至 1.0 m/s 时, 通风对池火燃烧的促进作用占主导地位, 油池火在旺盛阶段的持续时间因通风而延长. 当风速进一步增加到 1.5 m/s 时, 通风对燃烧产生的负面影响占据了主导地位, 没有发生连续的喷溅现象, 池火旺盛阶段的持续时间随风速的持续增大而缩短。

#### 参考文献:

- [ 1 ] National Fire Protection Association. NFPA 30—flammable and combustible liquids code [ S ]. Quincy: National Fire Protection Association, 2015.
- [ 2 ] Garo J P, Vantelon J P, Koseki H. Thin layer boilover: prediction of its on set and intensity [ J ]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178 ( 7 ): 1217 - 1235.
- [ 3 ] Ferrero F, Munoz M, Kozanoglu B, et al. Experimental study of thin-layer boilover in large-scale pool fires [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137 ( 3 ): 1293 - 1302.
- [ 4 ] Kozanoglu B, Ferrero F, Munoz M, et al. Thermal analysis of thin layer boilover [ J ]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 44: 1549 - 1555.
- [ 5 ] Yang D W, Chen B Z. Boilover of tanks-cases, causes, characteristics, and control [ J ]. 东北大学学报 ( 自然科学版 ), 2013, 34 ( S1 ): 67 - 71. ( Yang Da-wei, Chen Bao-zhi. Boilover of tanks-cases, causes, characteristics, and control [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2013, 34 ( S1 ): 67 - 71. )
- [ 6 ] 康泉胜. 小尺度油池火非稳态燃烧特性 [ D ]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. ( Kang Quan-sheng. Instable combustion characteristics of small scale pool fire [ D ]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. )
- [ 7 ] Woods J A R, Fleck B A, Kostiuk L W. Effects of transverse air flow on burning rates of rectangular methanol pool fires [ J ]. *Combustion and Flame*, 2006, 146 ( 1/2 ): 379 - 390.
- [ 8 ] Hu L H, Liu S, Peng W, et al. Experimental study on burning rates of square/rectangular gasoline and methanol pool fires under longitudinal air flow in a wind tunnel [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169 ( 1/2/3 ): 972 - 979.
- [ 9 ] 童琳. 通风条件航空煤油池火燃烧特性的研究 [ D ]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010. ( Tong Lin. Study on kerosene pool fire characteristics under ventilation surroundings [ D ]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. )
- [ 10 ] Carvel R O, Beard A N, Jowitt P W. The influence of longitudinal ventilation systems on fires in tunnels [ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, 16 ( 1 ): 3 - 21.