

环境湿度影响受限空间池火的实验

张培红, 郝宇军, 李子建

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了分析高湿环境下火灾发展和烟气蔓延的复杂性和不确定性, 本文搭建了 3.6 m × 1.2 m × 1.4 m 的受限空间实验模型, 以直径 600 mm 的酒精作为火源, 在室温 (20 ± 2) °C 和相对湿度 [(30% ~ 90%) ± 5%] 范围内调整受限空间环境条件, 测试模型空间内燃料的质量损失速率、池火火焰温度、上部热烟气层平均温度、火焰对周围环境的热辐射、地面接收到的热辐射、火焰根部 O₂ 浓度、烟气中 CO₂ 浓度等参数, 分析不同环境湿度条件下受限空间池火的发展规律. 实验结果表明, 常温条件下, 环境湿度达到 90% 左右时, 燃料的质量损失速率、火焰对周围环境的热辐射、火焰温度和上部热烟气层平均温度均显著下降, 火灾旺盛阶段持续时间延长, 熄灭阶段温降梯度减小. 因此, 常温环境中, 相对湿度 90% 的高湿条件下池火的发展和蔓延会受到显著抑制.

关 键 词: 酒精池火; 相对湿度; 辐射热流; 火焰; 烟气

中图分类号: X 924.4; TK 124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)09-1355-05

Experiment on the Effect of Environmental Humidity on the Pool Fire in Confined Space

ZHANG Pei-hong, HAO Yu-jun, LI Zi-jian

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Pei-hong, E-mail: zhangpeihong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to analyze the complexity and uncertainty of fire development and smoke spreading in highly humid confined space, a 3.6 m × 1.2 m × 1.4 m experimental model was set up, using a 600 mm diameter alcohol pool as the fire source. Experimental ambient temperature was (20 ± 2) °C, while the relative humidity was changed from 30% to 90% with 5% error. Several parameters were measured to analyze the pool fire development under different environmental humidity conditions, including the mass loss rate of fuel, the maximum flame temperature, the average temperature of upper hot smoke layer, the radiant heat from the flame, the radiant heat received by the ground, the O₂ concentration near the flame root and the CO₂ concentration in the smoke. The results showed that when the relative humidity reached about 90%, the mass loss rate of fuel, the maximum flame temperature, the average temperature of the upper hot smoke layer, the radiant heat from the flame and the radiant heat received by the ground decrease significantly. Also, the duration of the developing stage of fire was prolonged, and the temperature dropping gradient in the extinction stage decreases. In conclusion, with a normal temperature and high relative humidity of 90%, the development and spread of pool fire is significantly inhibited.

Key words: alcohol pool fire; relative humidity; radiant heat; flame; smoke

在矿井巷道、湿热地区公路隧道等高湿环境中, 环境相对湿度可以达到 90% 左右, 高湿环境会加剧火灾发展和烟气蔓延的复杂性和不确定性;

一方面, 高湿环境会促进火灾烟气中炭黑粒子的生成, 进而增强烟气层对燃料表面和火焰的热辐射^[1]; 另一方面, 高湿空气同时会削弱火焰

对周围环境的热辐射、抑制燃料的热解和引燃^[2-5]. 国内外学者围绕常压常温环境条件下火灾发展动力学规律进行了一定的研究: Fay^[6]考虑不同环境温度条件下火对周围空气的卷吸作用, 建立和发展了火灾热辐射模型. Fuss 等^[7]采用窄带统计模型预测由大气中 H_2O 与 CO_2 衰减引起的火灾辐射热的不确定性, 结果表明, 高湿空气能够降低火焰对环境的辐射热值. Tamanini^[8]分析温度和相对湿度对大规模火灾的初始增长过程的影响, 结果表明, 空气中水蒸气不仅影响空气中氧气浓度, 也会影响碳质固体的平均含水率, 从而影响火势发展. Keshavarz 等^[9]对 Fay 的池火模型^[6]进行了改进, 以北极为例, 分析了寒冷地区环境温度、地表反射率和水滴冰粒对池火发展和热辐射强度的影响. Zhang 等^[10]利用实验和数值分析, 研究了水雾与狭长空间火灾相互作用的传热学和动力学过程.

目前, 针对环境湿度对受限空间池火影响的实验研究相对不足. 本文搭建湿度控制环境条件下油池火灾实验平台, 通过实验研究, 分析不同环境湿度条件下燃料质量损失速率、池火火焰温度、上部热烟气层平均温度、火焰对周围环境的辐射热通量和地面接收到的热辐射、烟气浓度等的变化规律.

1 受限空间池火热传递机制

燃料燃烧所释放的热量, 一部分被受限空间内干烟气(包括空气)和围护结构所吸收, 一部分通过开口向外部环境散失, 一部分反馈给燃料表面, 还有一部分用于加热和蒸发环境空气中的水蒸气以及燃料燃烧生成的水蒸气. 在火焰燃烧区的水蒸气将以显热和潜热的方式吸收热量, 显热指水蒸气加热升温吸收热量, 潜热指水蒸气加热至沸点后继续吸收热量并汽化. 火源与周围环境之间的热平衡方程如下^[11-12]:

$$Q_{\text{fire}} = Q_g + Q_b + Q_v + Q_s + Q_d. \quad (1)$$

式中: Q_{fire} 是燃料燃烧所释放的热量, kW; Q_g 指受限空间内干烟气所接收到的热量, kW; Q_b 指池火通过热辐射、热对流的方式向受限空间围护结构的散热量, kW; Q_v 指通过受限空间开口散失的热量, kW; Q_s 指燃料表面接收到的热反馈, kW; Q_d 指水蒸气升温与蒸发过程所吸收的热量, kW, 其中包括加热燃料燃烧生成的水蒸气、卷吸的湿空气中水蒸气升温汽化以及水蒸气温度升高所吸收的热量, 具体见式(2)~式(7).

$$Q_{\text{fire}} = \chi A_f \left(\frac{q''}{h_{\text{vap}}} \right) h_c, \quad (2)$$

$$Q_g = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_g c_p (T_g - T_0) dV, \quad (3)$$

$$Q_b = \int_s h_l (T_g - T_b) ds + \alpha_g \sigma A_u (T_{\text{fire}}^4 - T_b^4), \quad (4)$$

$$Q_v = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{out}} \rho_g u_g c_p T_g dS_{\text{out}} - \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{in}} \rho_0 u_0 c_p T_0 dS_{\text{in}}, \quad (5)$$

$$Q_s = h_2 A_f (T_{\text{fire}} - T_s) + \sigma F A_f (T_{\text{fire}}^4 - T_s^4) (1 - e^{-\Gamma D}), \quad (6)$$

$$Q_d = (V_{e, \text{vap}} + V_{g, \text{vap}}) \times [c_{p, d} (T_p - T_0) + L_w] + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_d c_{p, d} (T_d - T_0) dV. \quad (7)$$

式中: χ 指燃烧热效率; A_f 指油池面积, m^2 ; q'' 指燃料表面接受到的辐射热反馈, kW; h_{vap} 指燃料蒸发的汽化潜热, kJ/kg; h_c 指燃料的热值, kJ/kg; ρ_g 指空气密度, kg/m^3 ; c_p 指空气的比定压热容, $kJ/(kg \cdot K)$; T_g 指烟气温度, K; T_0 指空气初始温度, K; h_l 指烟气与围护结构表面对流传热系数, $kW/(m^2 \cdot K)$; T_b 指受限空间围护结构温度, K; α_g 指发射率; σ 指斯特藩玻尔兹曼常数; A_u 指围护结构表面积, m^2 ; T_{fire} 指火焰温度, K; u_g 与 u_0 分别指开口处烟气流出与卷吸空气流入的速率, m/s; T_s 指燃料表面温度, K; h_2 指火焰与燃料表面对流传热系数, $kW/(m^2 \cdot K)$; F 指火焰与燃料表面的无量纲热辐射视角因子; Γ 指辐射消光系数; $V_{e, \text{vap}}$ 与 $V_{g, \text{vap}}$ 分别指环境与烟气中水蒸气汽化速率, kg/s ; $c_{p, d}$ 指水蒸气的比定压热容, $kJ/(kg \cdot K)$; T_p 指水的沸点, K; L_w 指水的汽化潜热, kJ/kg; ρ_d 指空气中水蒸气密度, kg/m^3 ; T_d 指水蒸气升高后的温度, K.

由以上方程分析可知, 受环境湿度影响最显著的分别为湿度对通过受限空间开口散失的热量 Q_v 、燃料表面接收到的热反馈 Q_s 与水蒸气升温与蒸发过程所吸收的热量 Q_d 三个部分. 因此, 本文着重分析以上三者.

2 实验设计

2.1 实验装置

本实验以东北大学地下工程火灾实验室单孔巷道为原型, 按照 1:2 的比例尺搭建主体尺寸长宽高为 $3.6 m \times 1.2 m \times 1.4 m$ 的受限空间实验模型, 壁面和顶板材料为 1 mm 厚镀锌钢板 + 30 mm

厚岩棉保温层 + 1 mm 厚镀锌钢板. 模型左、右两端均开口, 开口尺寸为 1.2 m × 1.4 m. 具体实验布置见图 1. 实验模型自空间顶部 100 mm 以下, 共布置了 10 层(L-1 ~ L-10)、5 束直径 1 mm 的 K 型铠装热电偶(T-1 ~ T-5). L-1 ~ L-10 层热电偶垂直间距为 120 mm, L-1 层热电偶距离顶棚最近; 热电偶树 T-3 位于火源油盆正上方, 用于测量火焰温度, 通过预实验本文采用 L-9 测点记录火焰最高温度. T-1 至 T-5 热电偶树两两间距均为 500 mm. 模型中心点处放置直径为 600 mm 的铸铁燃料盘作为火源油盘. 在距离火源中心 0.6 m 的两侧布置总热流计与辐射热流计, 距地面高度为 0.4 m. 在距离油盘中心 0.6 m 的左右两侧地板上安装了 Garden 热通量传感器以测量地面上接收到的总热流与辐射热流, 并配备水循环冷却系统用以提供恒定温度. 在油盘下方布置量程为 31 kg 的日本 AND 公司的 GX-30K 精密工业天平, 测量精度为 0.1 g, 用以监测燃烧过程中燃料的质量损失速率. 采用 2 台 VARIO PLUS 增强型烟气分析仪, 分别测量距离模型底部 0.5 m 以及 1.0 m 处两个测点处的 O₂ 和 CO₂ 含量.

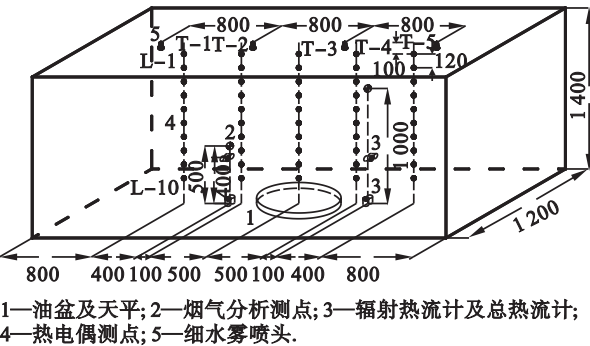


图 1 实验布置图 (mm)
Fig. 1 Experimental layout (mm)

2.2 实验要求

根据实验工况要求, 在室温条件下利用顶部 4 个流量为 1.4 L/min、雾滴直径为 50 μm 的细水雾喷头调整模型内湿度, 在天平校准后向直径 600 mm, 深度 25 mm 的铸铁燃烧盘中加入 4 L 体积分数 98% 的工业酒精作为燃料, 用点火器将其引燃. 本实验使用 TSI7545 空气质量检测仪测试模型内温度与湿度, 该仪器测试环境相对湿度时, 精度是 ±3.0%, 分辨率是 0.1% RH; 该仪器测试温度时, 误差是 ±0.6 °C, 分辨率 0.1 °C. 本实验具体工况见表 1. 由于实验模型内环境温度与湿度随时间和空间动态变化, 因此本文将环境温度控制在 ±2 °C, 相对湿度控制在 ±5% 内, 属于误

差允许范围内.

表 1 实验工况
Table 1 Test cases

序号	温度(±2 °C)/°C	相对湿度(±5%)/%	V _{酒精} /L
01	20	30	4
02	20	50	4
03	20	70	4
04	20	90	4

3 实验结果分析与讨论

3.1 环境湿度对燃烧速率的影响

不同环境湿度条件下酒精池火燃料的质量损失速率见图 2. 根据图 2, 在环境空气相对湿度为 30%, 50% 与 70% 工况下, 燃料的质量损失速率在 60 s 内均迅速升高并进入燃烧旺盛阶段; 环境湿度达到 90% 时, 进入旺盛燃烧阶段所需的时长显著增加至约 240 s. 环境相对湿度由 30% 逐渐提升至 70% 时, 旺盛阶段质量损失速率无明显变化. 环境湿度达到 90% 时, 湿度对酒精燃烧的质量损失速率影响明显, 旺盛燃烧阶段燃料的质量损失速率相较湿度 50% 的工况降低 7% 左右, 旺盛阶段持续时间延长 9% 左右. 结合图 3 不同环境湿度下地面接收到的总热流的分析可见, 这是由于随着环境湿度的增加, 空气中水蒸气与火焰传热机制增强, 使得式(1)中 Q_d 增加, 从而造成燃料表面接收到的热反馈 Q_s 明显减少, 根据式(2)分析可知, 燃料接收到的热反馈降低, 使得燃料汽化率减小, 从而降低质量损失速率.

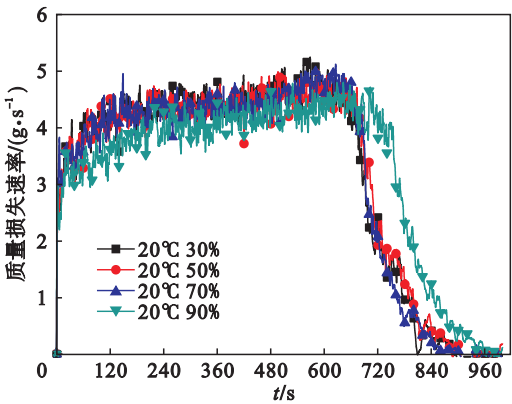


图 2 不同环境湿度下质量损失速率
Fig. 2 Mass loss rate under different environmental humidities

3.2 环境湿度对火焰温度的影响

不同环境湿度条件下酒精池火火焰的最高温度随时间的变化见图 4. 根据图 4 可知, 随着湿度的提高, 火焰最高温度相差不大; 当环境湿度达到

90% 时,火灾旺盛阶段持续时间增长明显,衰减阶段火焰最高温度下降梯度变缓. 结合图 5 不同环境湿度下火焰根部附近氧气体积分数的分析可见,其中原因可以归结为湿度较高情况下燃料燃烧速率下降,受限空间内耗氧量小.

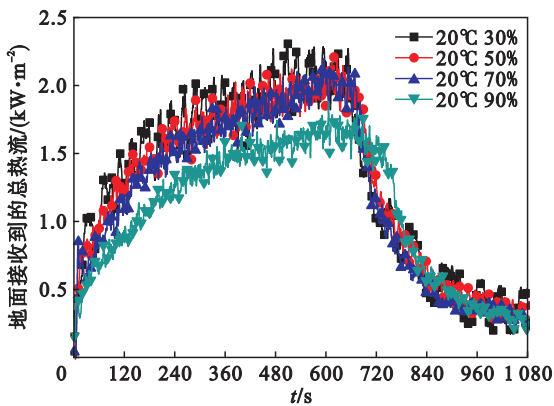


图 3 不同环境湿度下地面接收到的总热流
Fig. 3 Total heat flux received by the ground under different environmental humidities

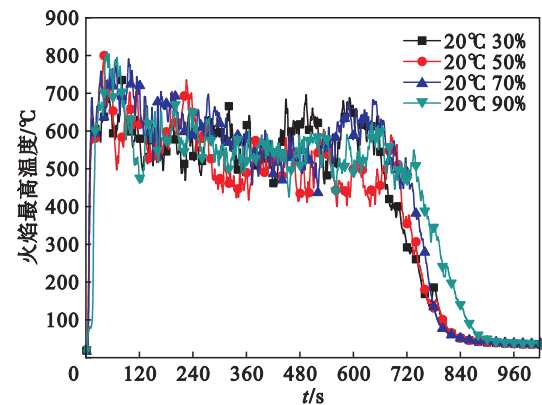


图 4 不同环境湿度下火焰最高温度
Fig. 4 Maximum flame temperature under different environmental humidities

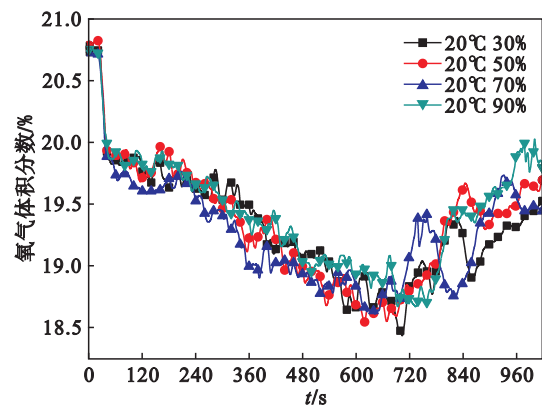


图 5 不同环境湿度下氧气体积分数
Fig. 5 Oxygen concentration under different environmental humidities

3.3 环境湿度对上部热烟气层平均温度的影响

本文采用状态平均法求烟气层平均温度^[13],

不同环境湿度条件下池火上部热烟气层的平均温度随时间的变化见图 6. 根据图 6,相对湿度由 30% 上升至 70% 时,燃烧旺盛阶段烟气层平均温度变化不明显,此时水蒸气对烟气层的冷却作用不显著. 当湿度达到 90% 时,空气中水蒸气对上部热烟气层有明显抑制降温作用,与工况 2 相比,在燃烧旺盛阶段上部热烟气层平均温度下降了 9% 左右. 这是因为环境湿度高时,受限空间内水蒸气升温汽化吸收的热量 Q_d 增加,从而降低了热烟气层温度.

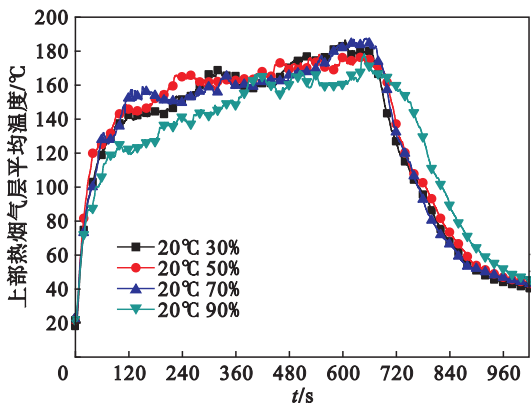


图 6 不同环境湿度下上部热烟气层平均温度
Fig. 6 Average temperature of the upper hot smoke layer under different environmental humidities

3.4 环境湿度对热辐射的影响

图 7 与图 8 分别是不同湿度条件下,火焰的热辐射与地面接收到的热辐射.

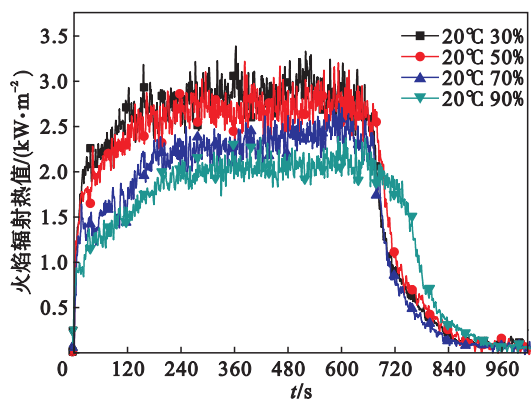


图 7 不同环境湿度下火焰热辐射
Fig. 7 Radiation heat of flame under different environmental humidities

对比两图可知,湿度对于火焰热辐射值影响显著,环境湿度 70% 时火焰热辐射明显小于相对湿度 50% 的工况 2 下降 20%. 90% 时火焰热辐射相比较相对湿度 50% 的工况 2 下降约 25%.

湿度对于地面接收到的热辐射的影响与对火焰热辐射影响不同. 当湿度低于 70% 时,地面接

收到的热辐射区别不大,湿度达到 90% 时地面接收到的热辐射相比较湿度 50% 的工况 2 下降约 20% . 这可能是由于火焰的卷吸作用,湿度较高情况下,卷吸更多的冷空气(见图 5),削弱了高湿度条件下火焰的热辐射;高湿度条件下火焰卷吸冷空气的同时,造成燃烧的不充分及烟气中 CO_2 下降(见图 9),以及火焰向地面的倾斜,使得地面附近接收到的热辐射的下降变缓. 需要注意的是,随着湿度的增加,烟气中 CO 体积分数的增加,会造成烟气毒性的增大,加剧对火灾中疏散人员生命安全的威胁.

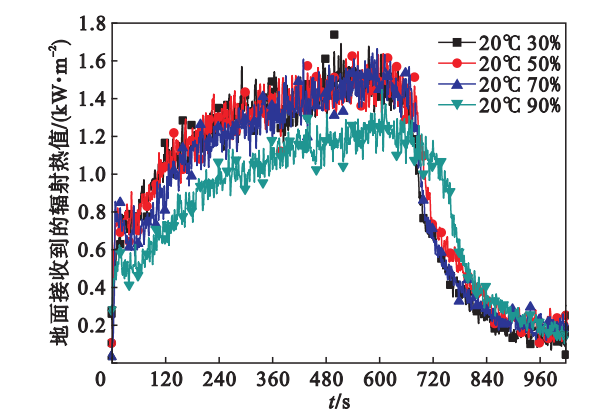


图 8 不同环境湿度下地面接收到的热辐射
Fig. 8 Radiation heat received from the ground under different environmental humidities

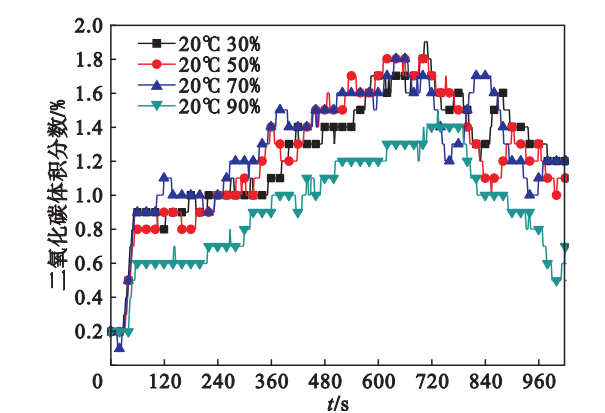


图 9 不同环境湿度下二氧化碳体积分数
Fig. 9 Carbon dioxide concentration at different environmental humidities

4 结 论

1) 环境湿度小于 70% 时,湿度对于受限空

间池火灾温度场以及地面接受到的热辐射的影响不显著.

2) 当环境湿度达到 90% 左右时,高湿空气会削弱火焰对周围环境的热辐射、抑制燃料的热解,造成质量损失速率、火焰最高温度、火焰热辐射峰值均大幅下降,但燃烧旺盛阶段持续时间增长,火灾持续时间也随之增长. 常温环境中湿度削弱了火灾的辐射热效应. 但高湿条件下烟气中 CO 浓度增加,使得烟气的毒性作用增强.

参考文献:

[1] Howell J R, Mengüç M P, Robert S S D. Thermal radiation heat transfer [M]. 5th ed. Boca Raton Florida; CRC Press Incorporation, 2010.

[2] Khan M M, Ris J L D, Ogden S D. Effect of moisture on ignition time of cellulosic materials [J]. *Fire Safety Science*, 2008, 9 (9) : 167 – 178.

[3] Yang W, Parker T, Ladouceur H D, et al. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression [J]. *Fire Safety Journal*, 2004, 39 (1) : 41 – 66.

[4] Suo-Anttila J M, Blanchat T K, Ricks A J, et al. Characterization of thermal radiation spectra in 2m pool fires [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32 (2) : 2567 – 2574.

[5] Modak A T. The burning of large pool fires [J]. *Fire Safety Journal*, 1981, 3 (3) : 177 – 184.

[6] Fay J A. Model of large pool fires [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136 (2) : 219.

[7] Fuss S P, Hamins A. An estimate of the correction applied to radiant flame measurements due to attenuation by atmospheric CO_2 , and H_2O [J]. *Fire Safety Journal*, 2002, 37 (2) : 181 – 190.

[8] Tamanini F. Defining the effects of ambient conditions in large-scale fire tests [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2010, 34 (3) : 404 – 411.

[9] Keshavarz G, Khan F, Hawboldt K. Modeling of pool fires in cold regions [J]. *Fire Safety Journal*, 2012, 48 (48) : 1 – 10.

[10] Zhang P H, Tang X, Tian X L, et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94 : 706 – 714.

[11] Biçer F G, Yeldan E. Experimental and numerical study of the interaction between water mist and fire in an intermediate test tunnel [J]. *Fire Technology*, 2014, 50 (3) : 565 – 587.

[12] Zhu P, Wang X, Tao C. Experiment study on the burning rates of ethanol square pool fires affected by wall insulation and oblique air flow [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2015, 61 : 259 – 268.

[13] He Y. On experimental data reduction for zone model validation [J]. *Journal of Fire Sciences*, 1997, 15 (2) : 144 – 161.