



建筑外壁面开口火溢流行为研究 进展及前沿问题

胡隆华

中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室





- ❖ 研究背景
- ❖ 关键科学问题和研究内容
- ❖ 国内外研究进展
- ❖ 前沿科学问题及展望

一、研究背景



建筑外立面火灾



2009.2.9 央视新址北配楼



2010.11.15 上海教师公寓

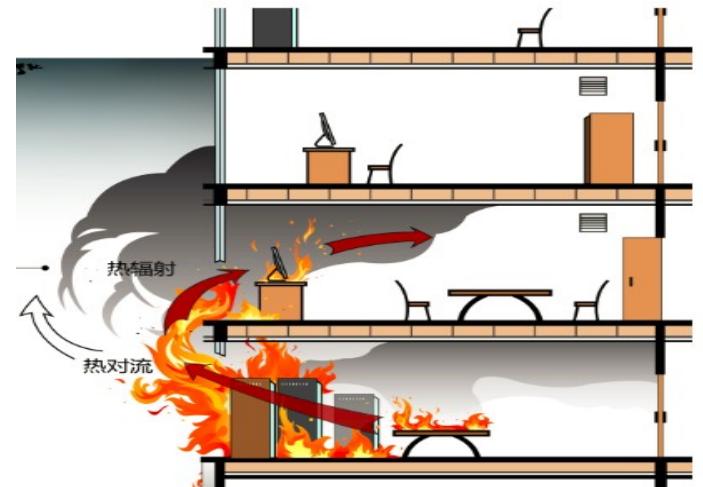
一、研究背景



开口火溢流



2012.3.22 广州光复大厦



建筑外壁面开口火溢流物理现象



2012.11.19 印度新德里Himalaya大厦



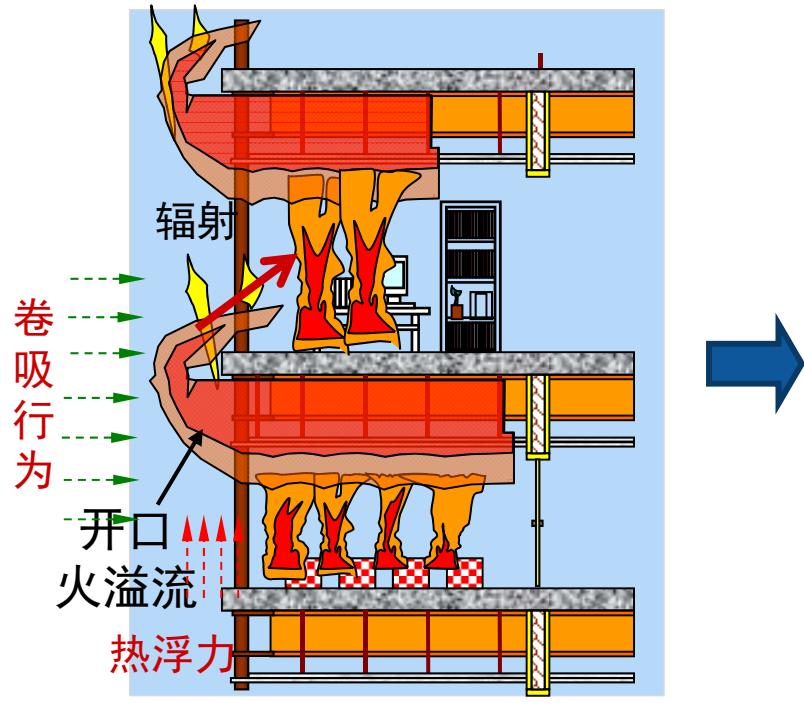
2012.12.22 延安国贸大厦

二、关键科学问题和研究内容



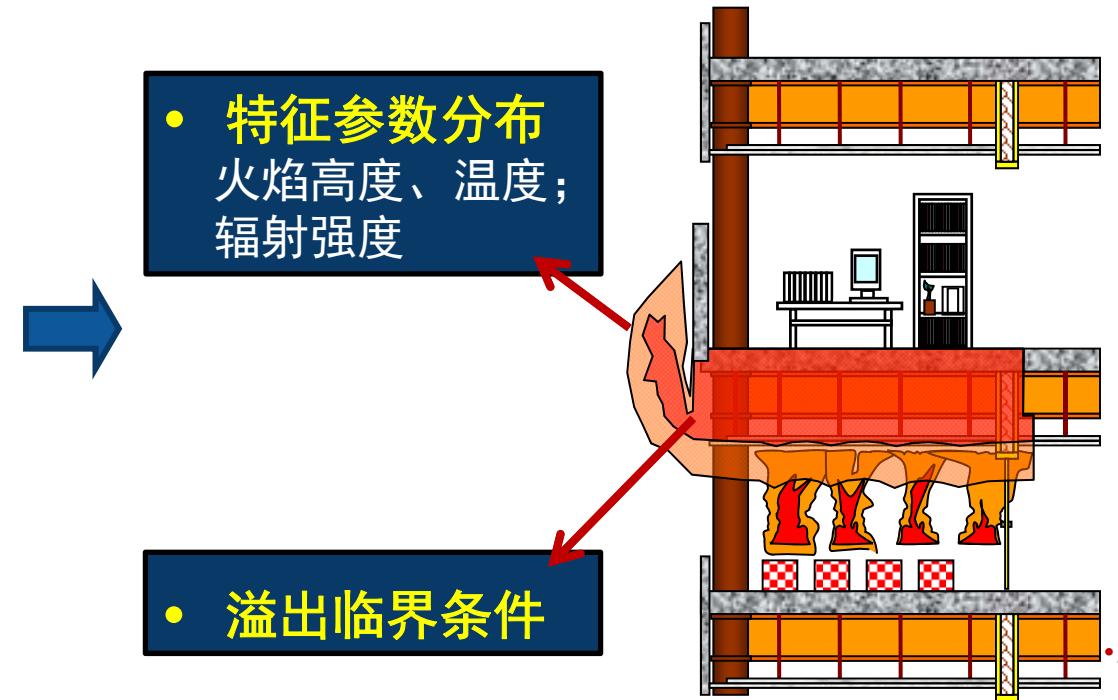
❖ 开口火溢流中的关键科学问题

- 火焰溢出条件？
- 关键参数及其分布规律？
- 外部边界条件的影响？



• 特征参数分布
火焰高度、温度；
辐射强度

• 溢出临界条件

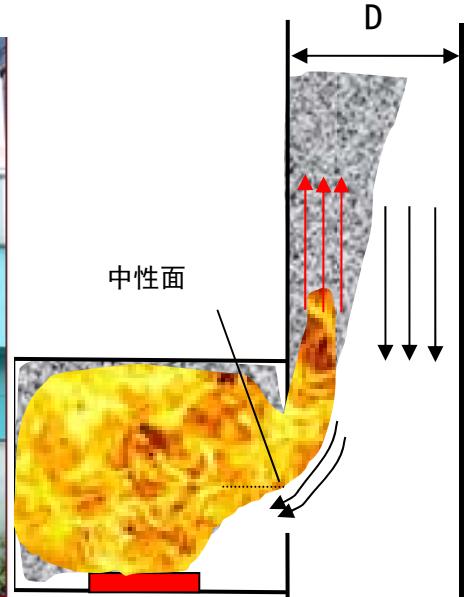


二、关键科学问题和研究内容



❖ 开口火溢流中的关键科学问题

- 火焰溢出条件？
- 关键参数及其分布规律？
- 外部边界条件的影响？



竖直挡墙限制边界

竖直挡墙



高原特殊低压、低氧环境条件



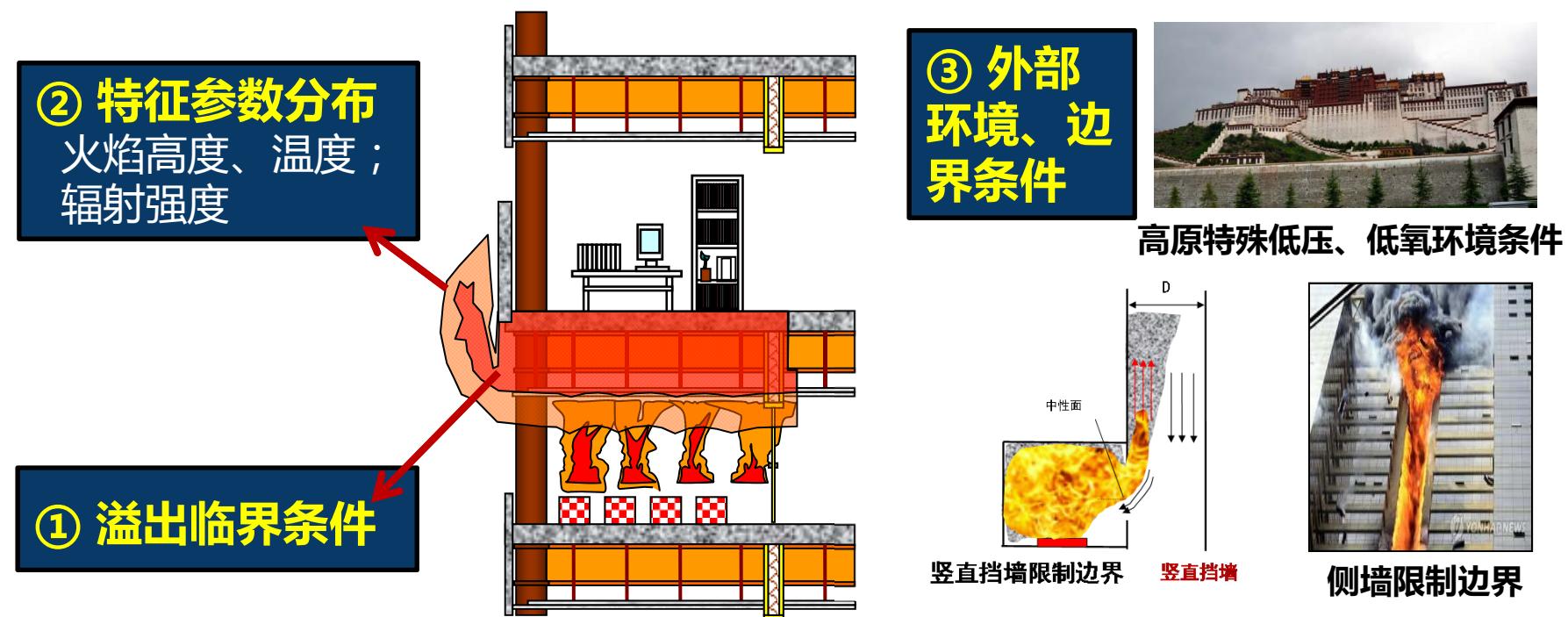
侧墙限制边界

二、关键科学问题和研究内容



◆研究内容

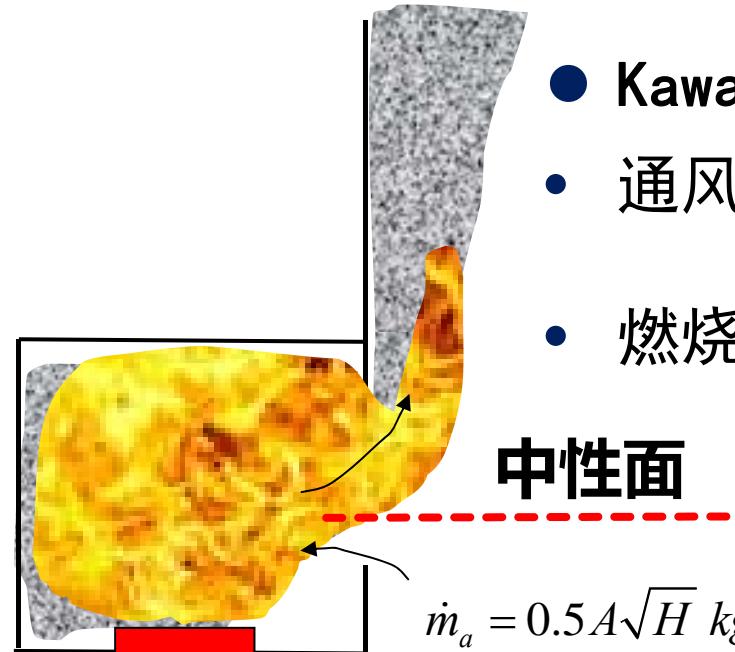
- (1) 开口火溢流火焰溢出临界条件及与通风因子的耦合关系
- (2) 开口火溢流的卷吸行为；火焰高度、温度、辐射等特征参数分布规律与演化模型。
- (3) 外部环境、边界条件对火溢流的影响机制与表征模型。



三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



起源：受限空间火灾



- Kawagoe (1958)

- 通风因子 $A\sqrt{H}$

- 燃烧速率 $\dot{m} = 5.5A\sqrt{H} \text{ kg/min}$



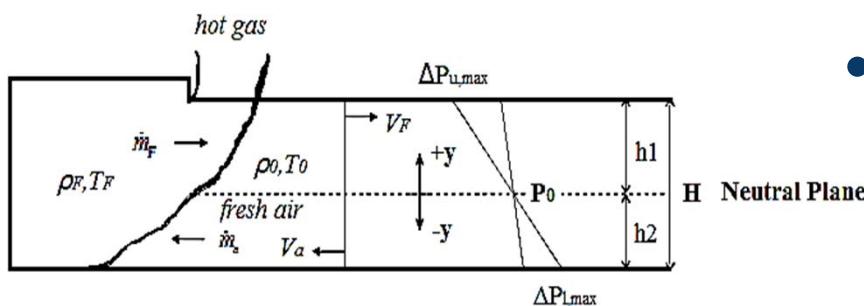
川越邦雄 Kawagoe

- Babrauskas (1980)

- 空气流入速率: $\dot{m}_a = 0.5A\sqrt{H} \text{ kg/s}$

- 中性面高度: $\frac{h_1}{H} = \frac{1}{1 + (\rho_0 / \rho_F)^{1/3}}$

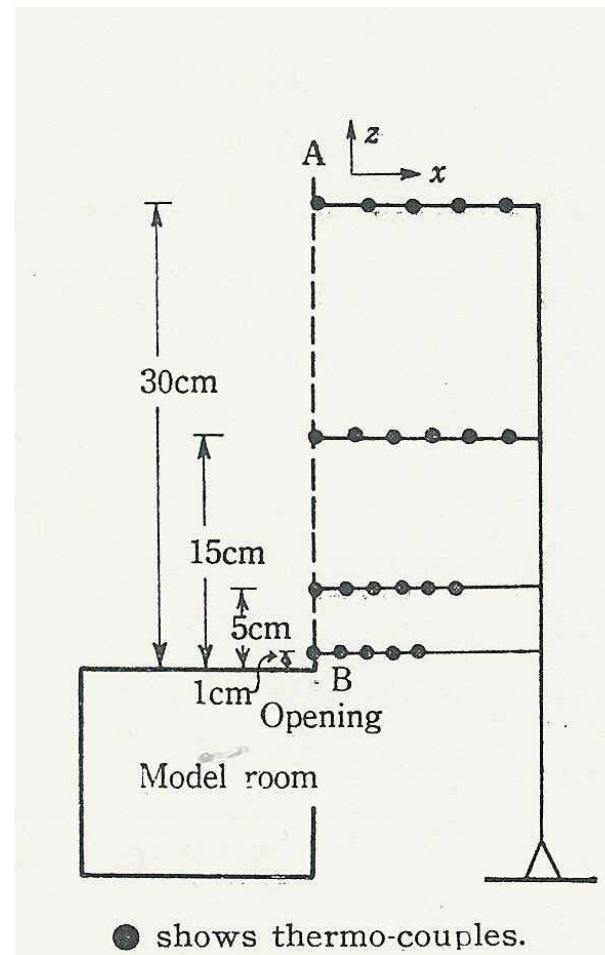
$$\dot{Q}_{inside} = \dot{m}_a \cdot \Delta H_{ox} = 1500A\sqrt{H} \text{ kW}$$



三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



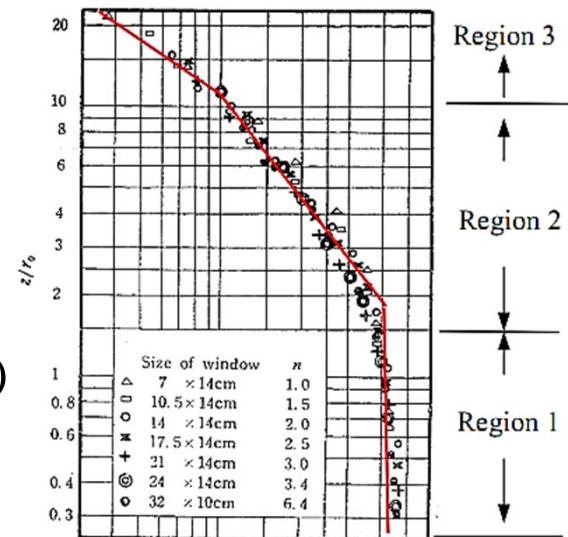
❖ Yokoi (1960): 窗户溢出火羽流温度分布



提出特征尺度 r_o 表征溢出热羽流温度分布特性。

$$W \cdot \frac{H}{2} = \pi r_o^2, \quad r_o = \sqrt{\frac{HW}{2\pi}}$$

$$\Theta = \frac{\Delta T_z r_o^{5/3}}{\sqrt[3]{\dot{Q}^2 T_\infty}} = \text{function}\left(\frac{z}{r_o}\right)$$



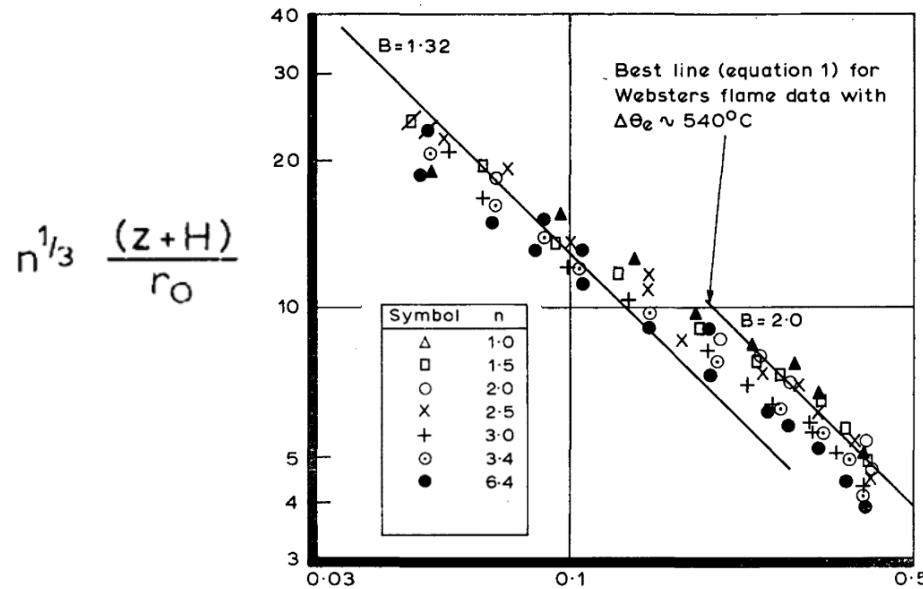
$$\Theta = \frac{\Delta T_z r_o^{5/3}}{\sqrt[3]{\dot{Q}^2 T_\infty}} = \text{function}\left(\frac{z}{r_o}\right)$$

Yokoi实验装置 1960

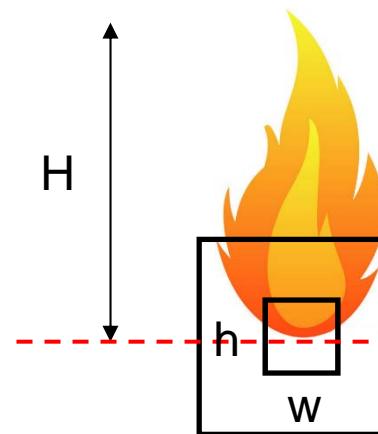
三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



❖ Thomas和Law (1972) : 引入开口形状因子 $n=2w/h$ 。



Yokoi温度数据



Thomas
溢出火焰根部

火焰高度 H

$$H = 12.8 \left(\frac{R}{W} \right)^{2/3} - h$$

火焰尖端到窗口所在壁面水平距离x:

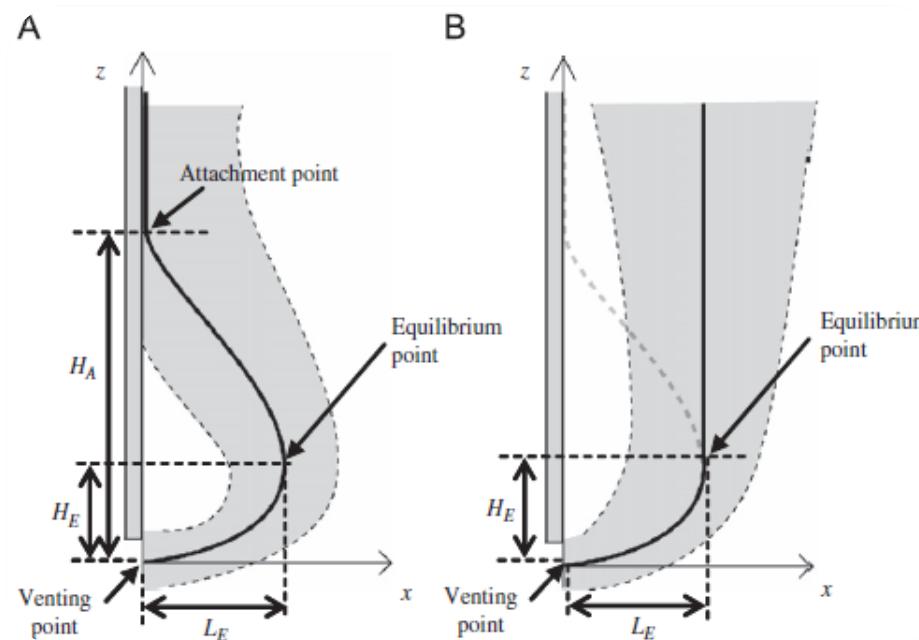
$$\frac{n^{1/3} (z + H)}{r_0} = \left(\frac{z + H}{H} \right) \frac{2\sqrt{\pi}}{n^{1/6}} = \frac{B}{H}$$

$$\frac{x}{h} = \frac{0.454}{n^{0.53}}$$

三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流

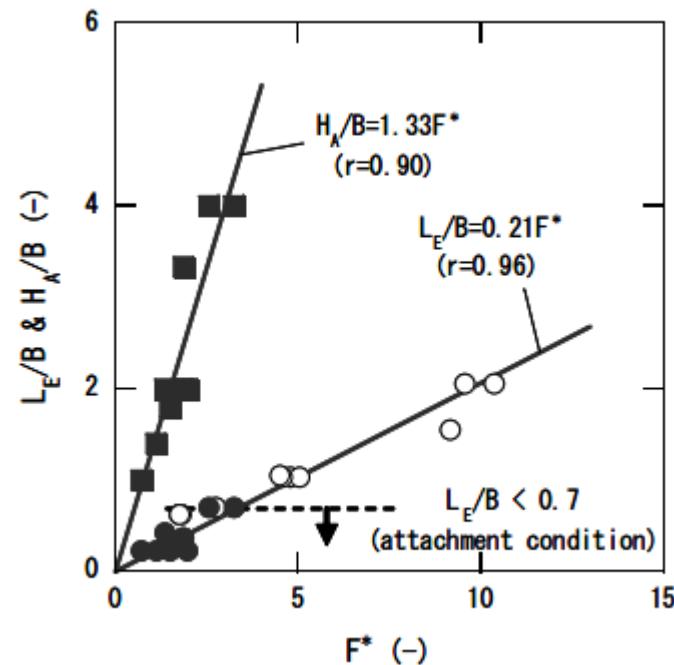


❖ Himoto (2009) : 提出动态平衡点和附壁点与初始水
平动量及开口的耦合定量关系。



动量平衡点

附壁点



$$\frac{L_E}{B} = 0.21F^*$$

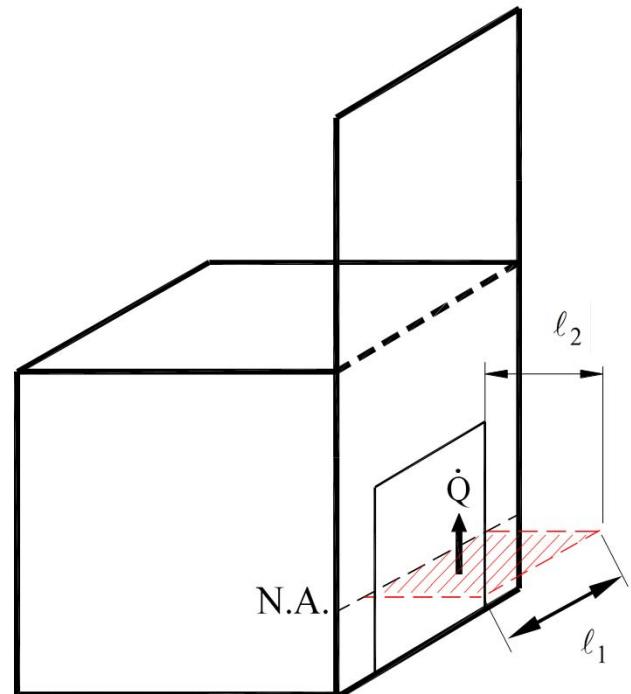
$$\frac{H_A}{B} = 1.33F^*$$

三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



Delichatsios(2007) : 矩形火源近似模型

处于中性面上的矩形火源，边长分别为 ℓ_1 和 ℓ_2 ，
其热释放速率为 \dot{Q}_{ex} 。



$$\ell_1 = \left(A\sqrt{H} \right)^{2/5}$$

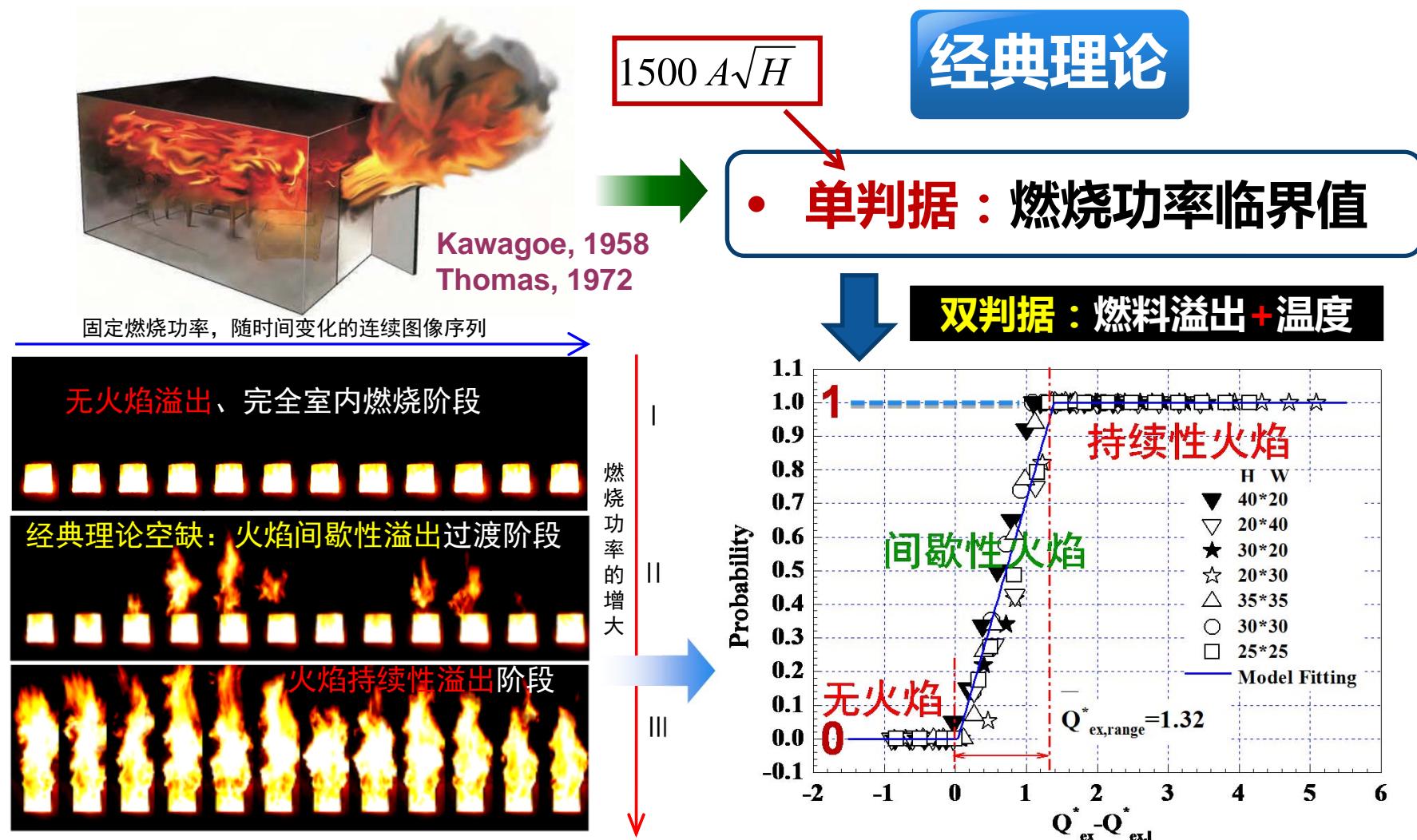
$$\ell_2 \sim \left(AH^2 \right)^{1/4}$$

$$\frac{Z_f}{\ell_1} = f(\dot{Q}_{ex}^*) = f\left(\frac{\dot{Q}_{ex}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g} \ell_1^{5/2}} \right)$$

三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



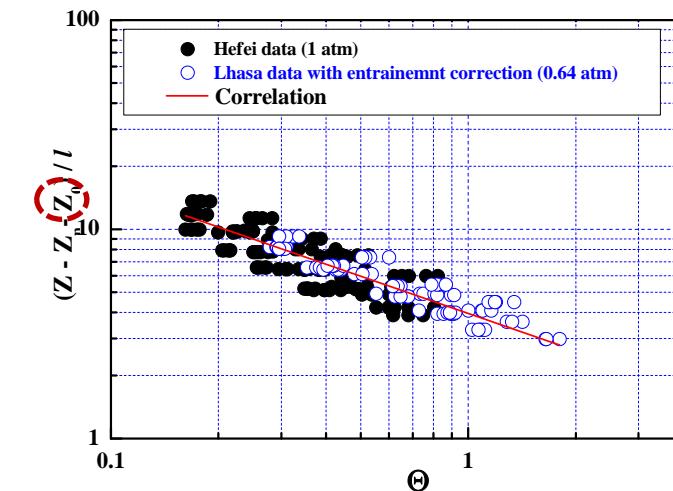
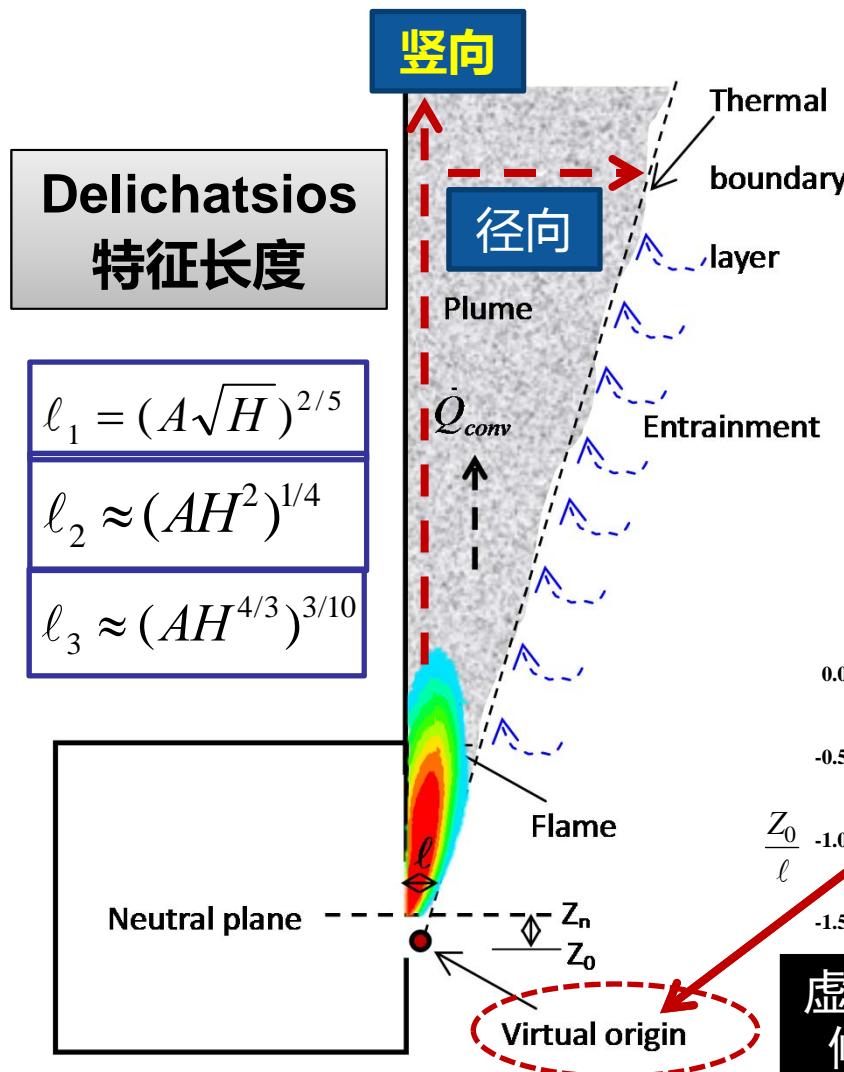
❖我们的工作：火焰间歇性溢出模型



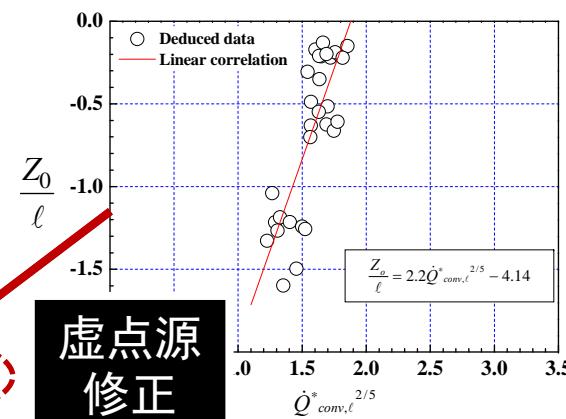
三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



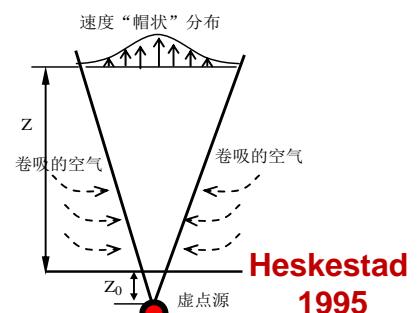
◆ 开口火溢流虚点源与竖向温度分布模型



考虑虚点源修正后的拟合效果



虚点源
修正

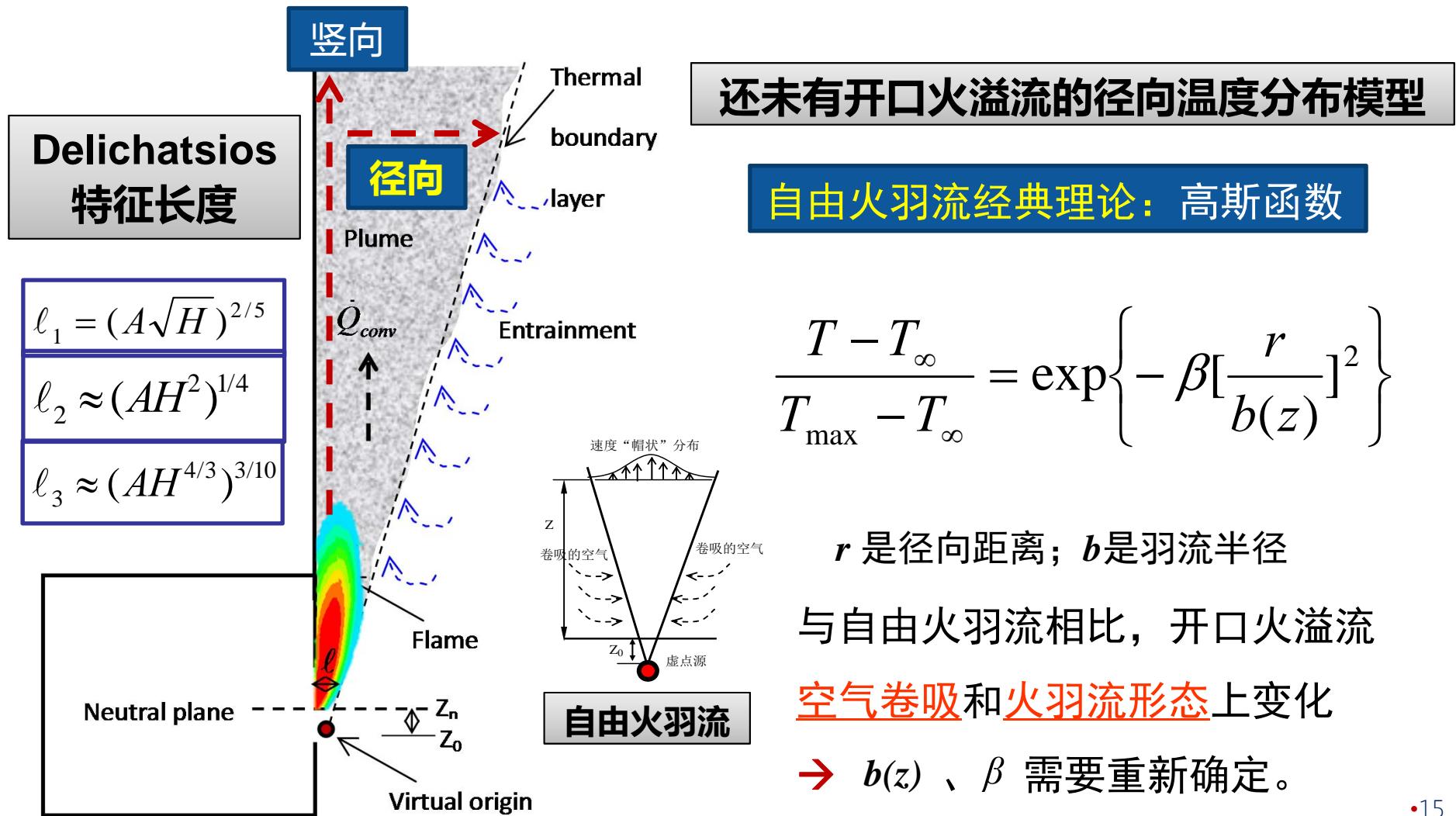


经典火羽流理论

三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



❖ 基于高斯函数的径向分布模型

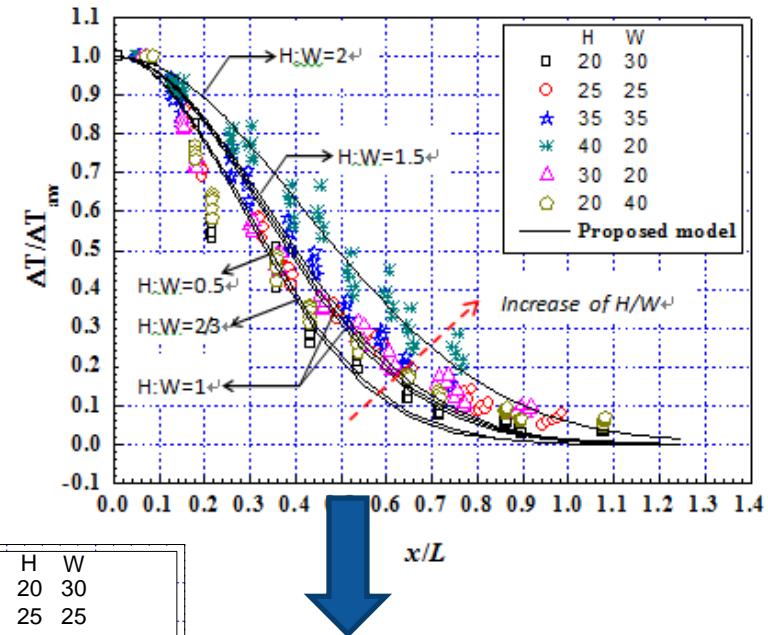
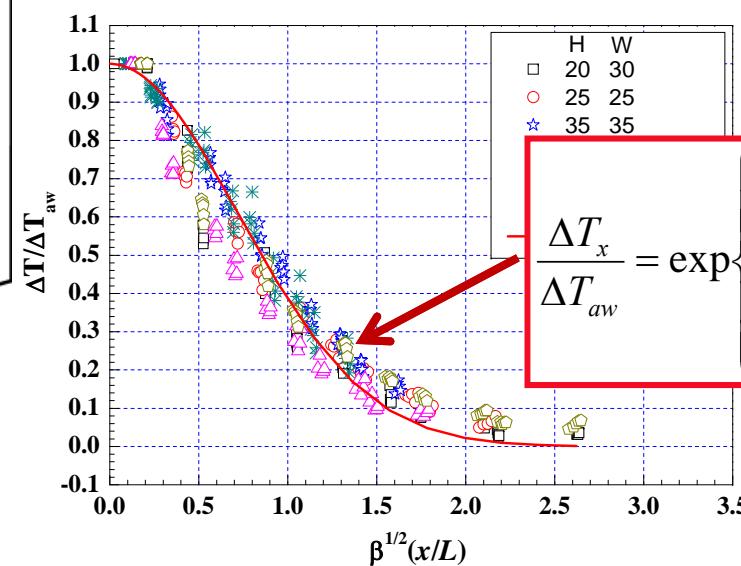
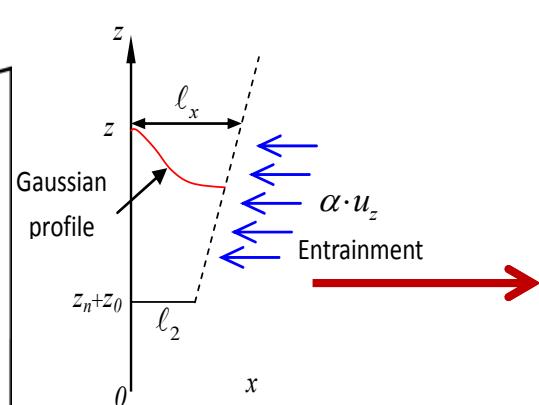
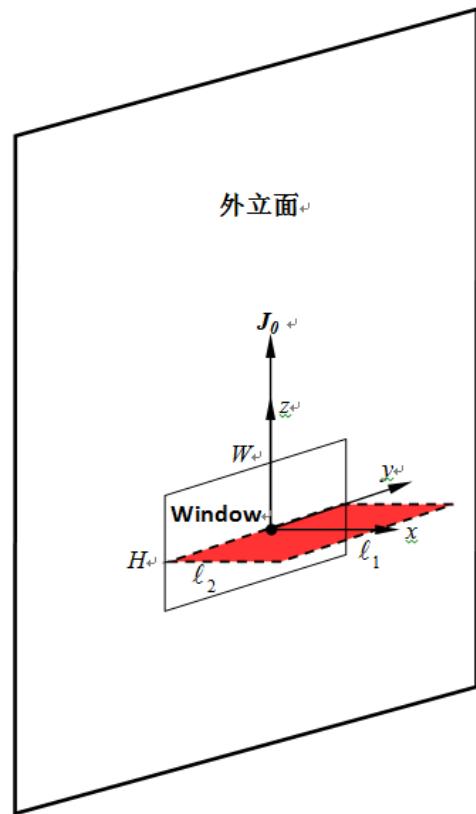


三、国内外研究进展-- ①自由边界火溢流



❖建立了基于高斯函数的径向分布模型

实验验证

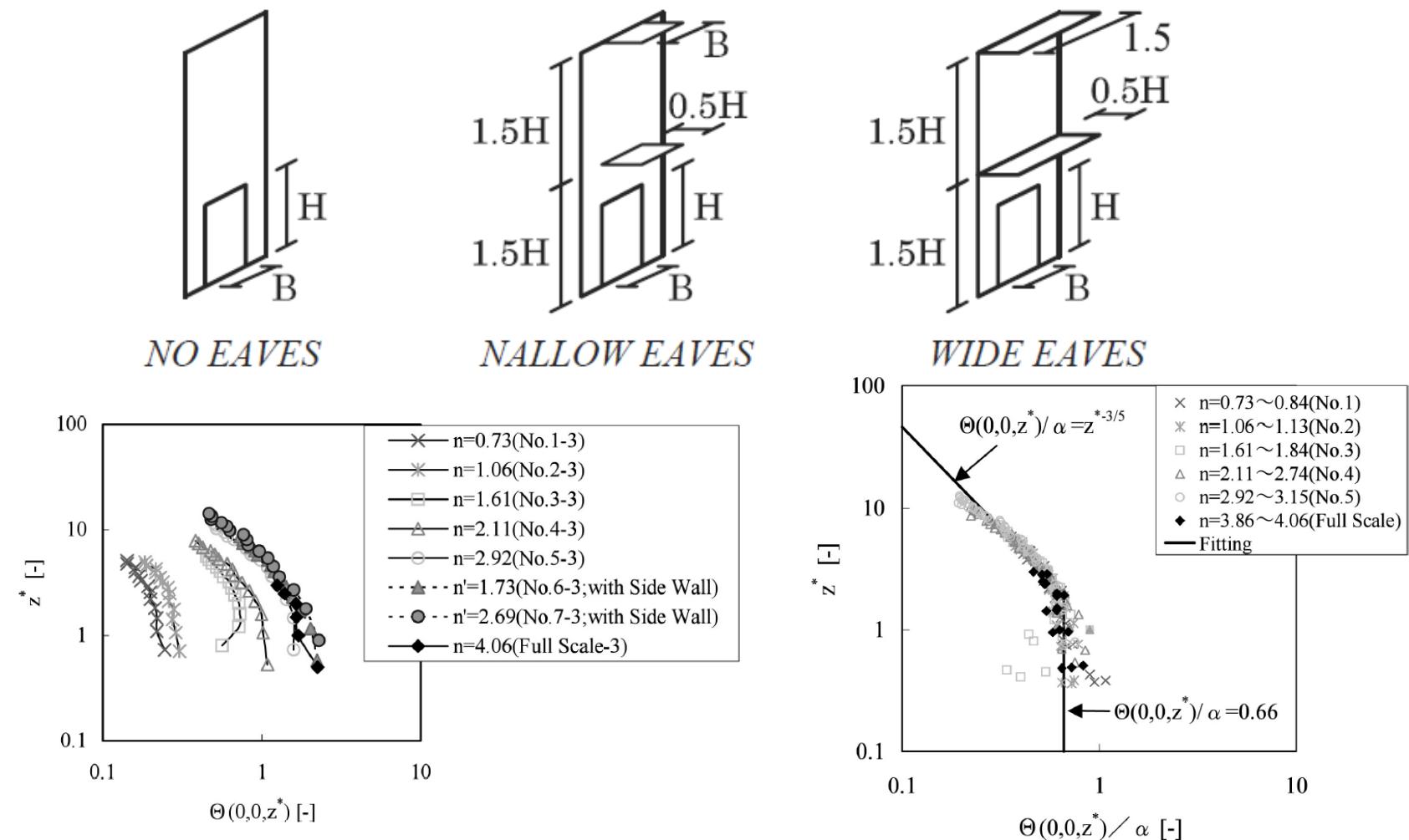


$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_{aw}} = \exp \left\{ - \left[\frac{x / (1 - 0.7e^{-0.25(H/W)})}{\ell_2 + \alpha \left(\frac{2K+1}{2} \right) (z - z_n - z_0)} \right]^2 \right\}$$

三、国内外研究进展--②外部限制火溢流



❖ Tanaka (2005) : 防火挑檐作用



三、国内外研究进展--②外部限制火溢流

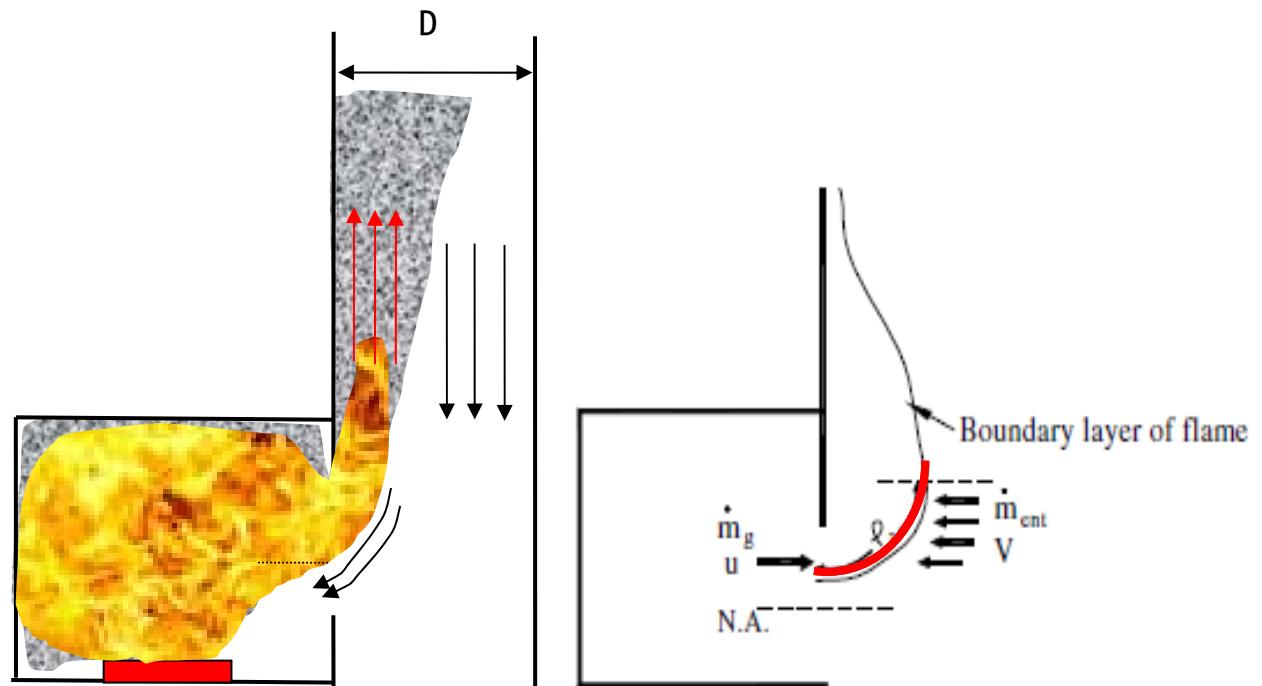


❖ Delichatsios (2009) : 竖直挡墙边界

特征长度（距离）



$$\ell_3 \propto \left(\frac{\Delta T_g}{\Delta T_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_g}{\rho_\infty} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_\infty}{\rho_g} \right)^{1/3}} \right) (AH^{4/3})^{3/10}$$



竖直挡墙

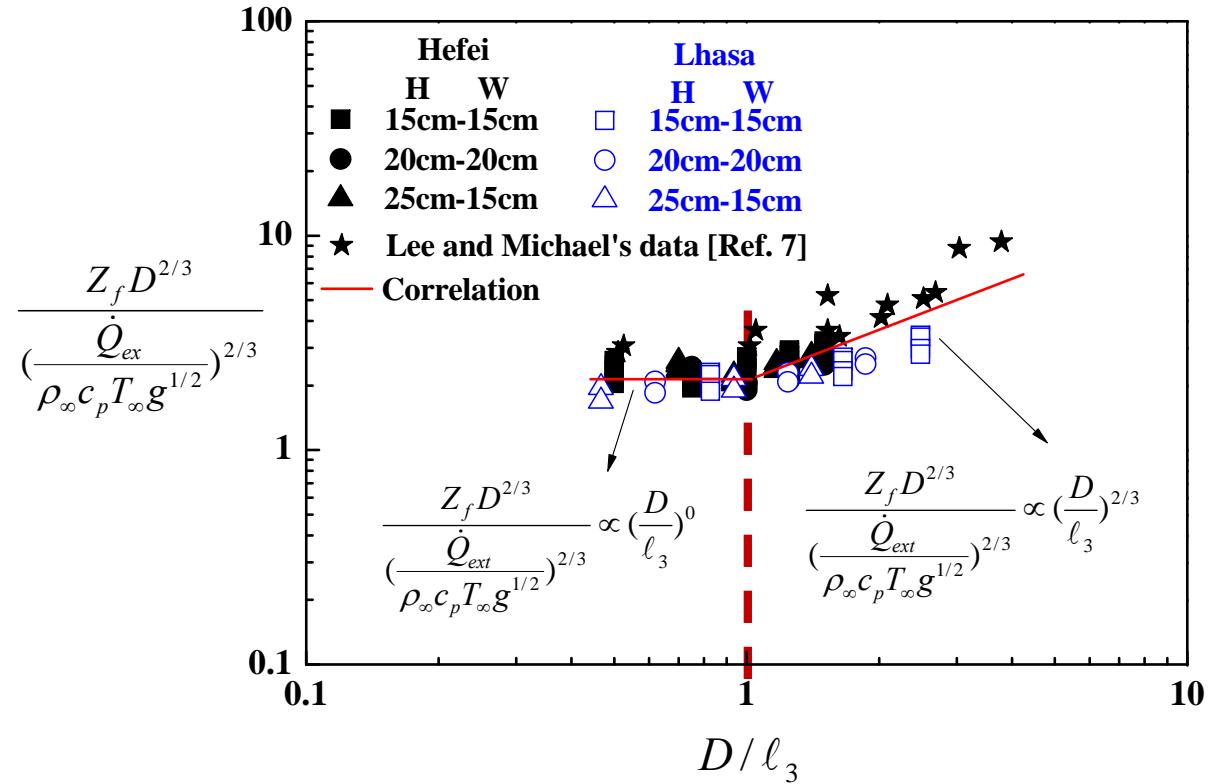
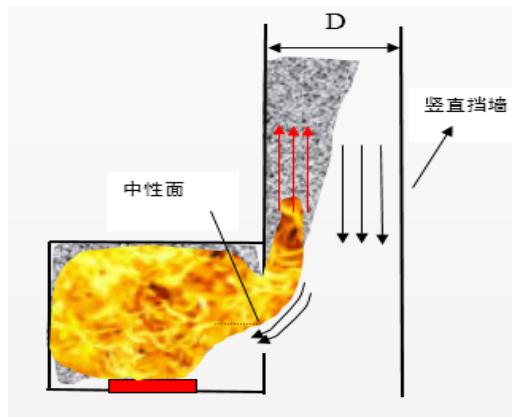
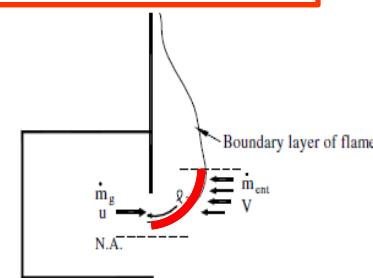
三、国内外研究进展--②外部限制火溢流



❖ 竖直及倾斜挡墙边界下开口火溢流特性

**Delichatsios
特征长度（距离）**

$$\ell_3 \approx (AH^{4/3})^{3/10}$$

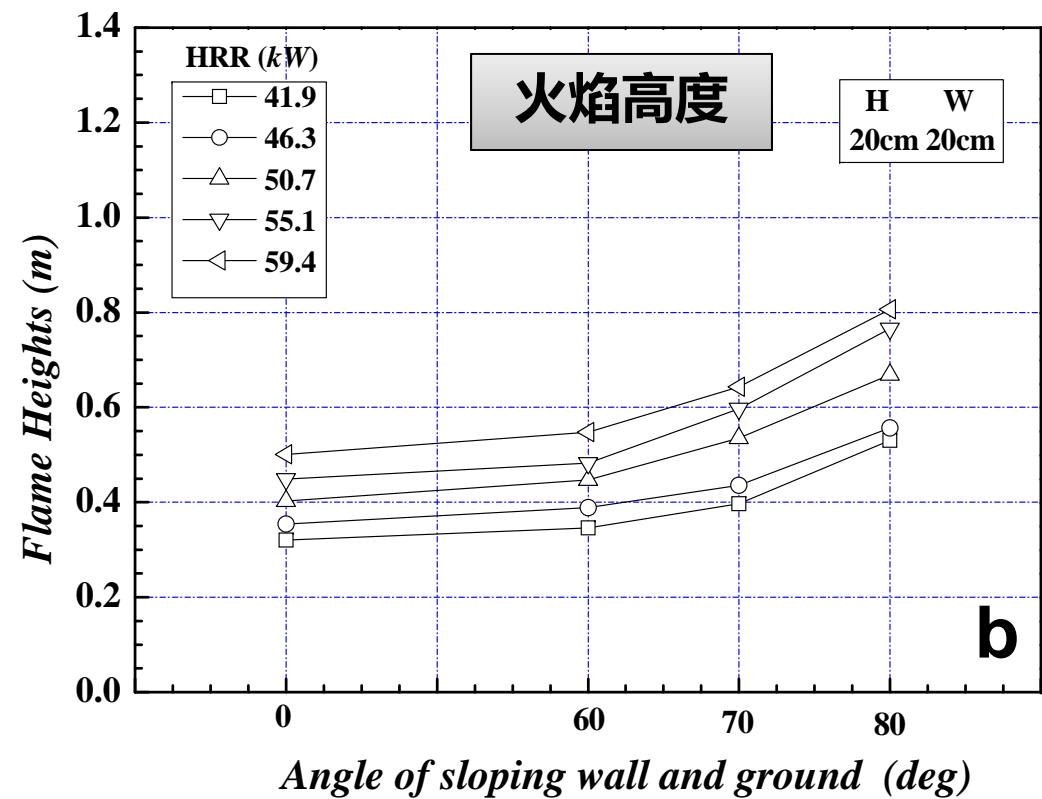
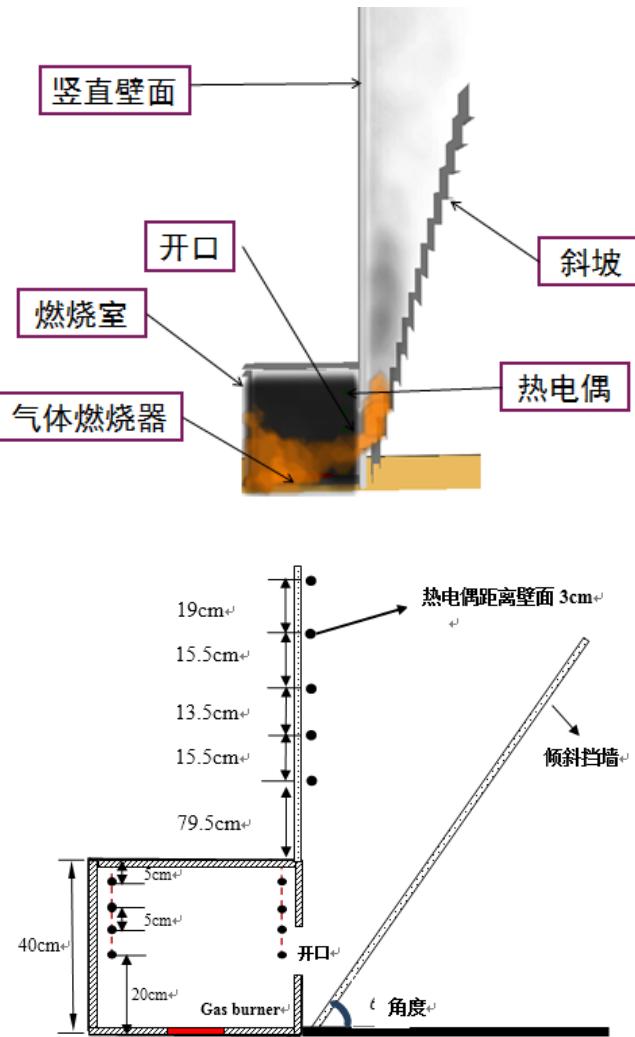


火焰高度模型-竖直挡墙限制

三、国内外研究进展--②外部限制火溢流



❖ 竖直及倾斜挡墙边界下开口火溢流特性

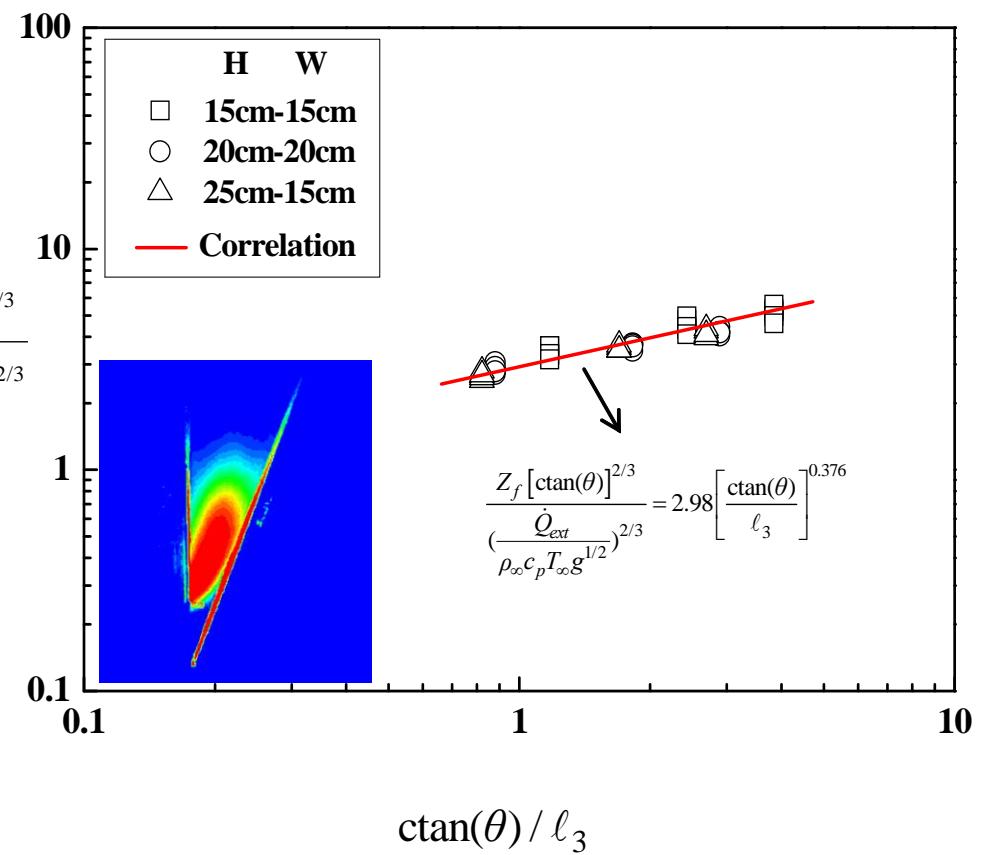
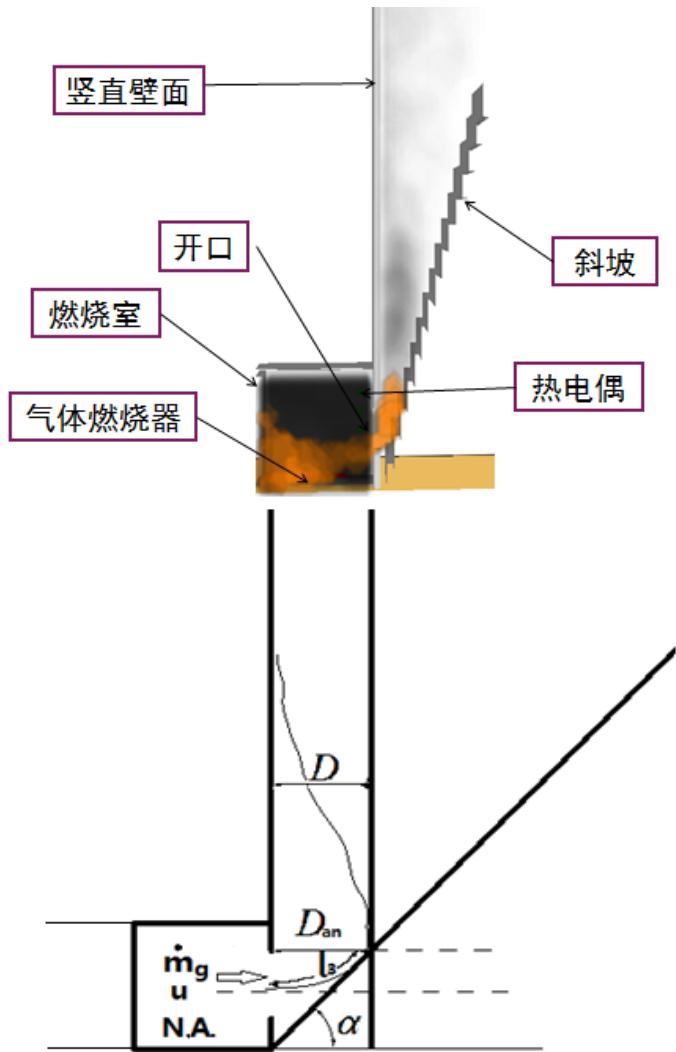


火焰高度随角度的增大而增大：卷吸受限

三、国内外研究进展--②外部限制火溢流



❖ 竖直及倾斜挡墙边界下开口火溢流特性



考虑斜坡角度的特征长度

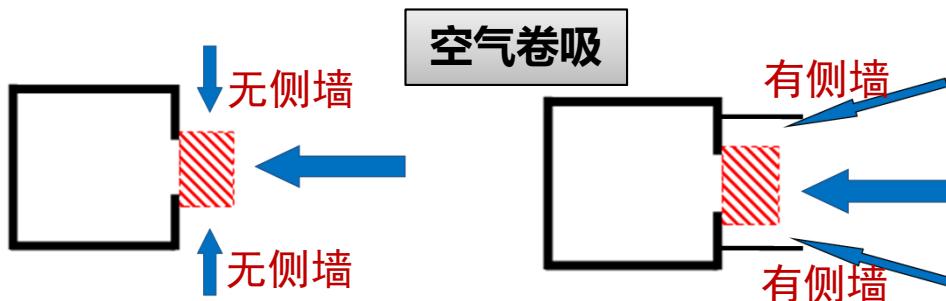
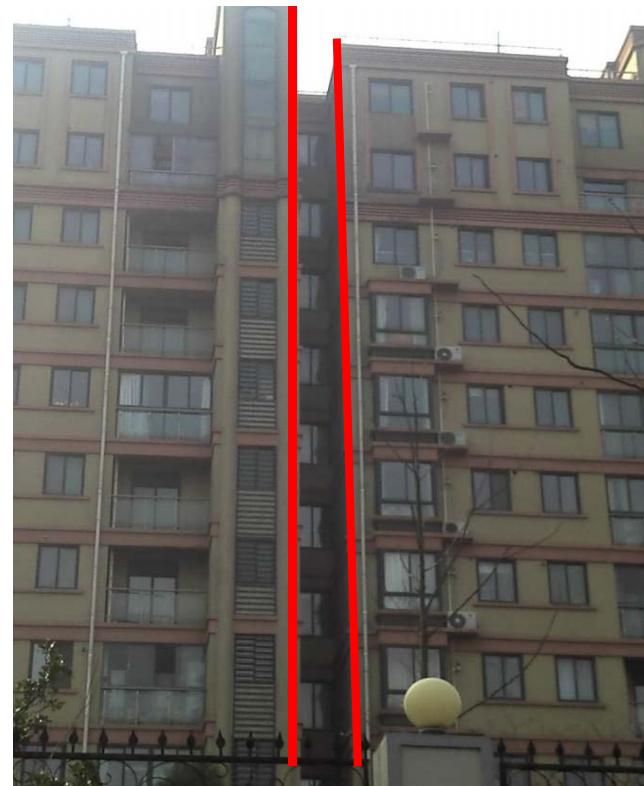
三、国内外研究进展--②外部限制火溢流



❖ 侧墙限制边界下开口火溢流特性



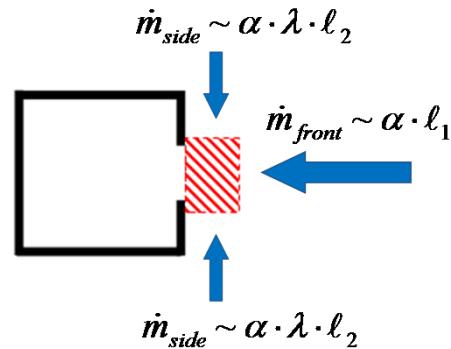
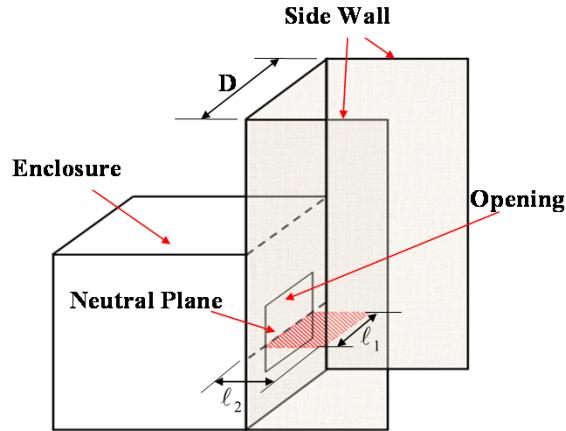
2010, 韩国·釜山



三、国内外研究进展--②外部限制火溢流

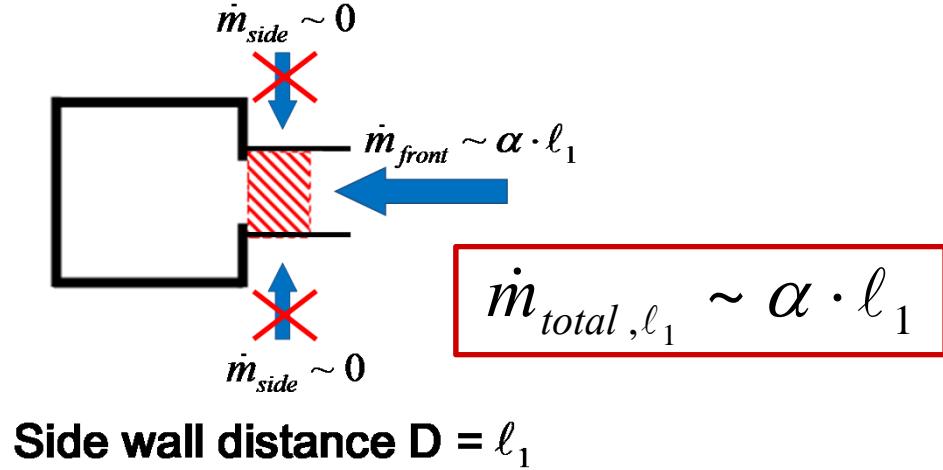


❖ 侧墙限制边界下开口火溢流特性

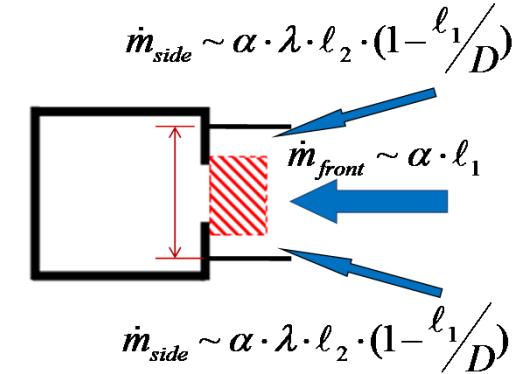


No side walls ($D \rightarrow \infty$)

$$\dot{m}_{total,inf} \sim \alpha \cdot (\ell_1 + 2\lambda \cdot \ell_2)$$



Side wall distance $D = \ell_1$



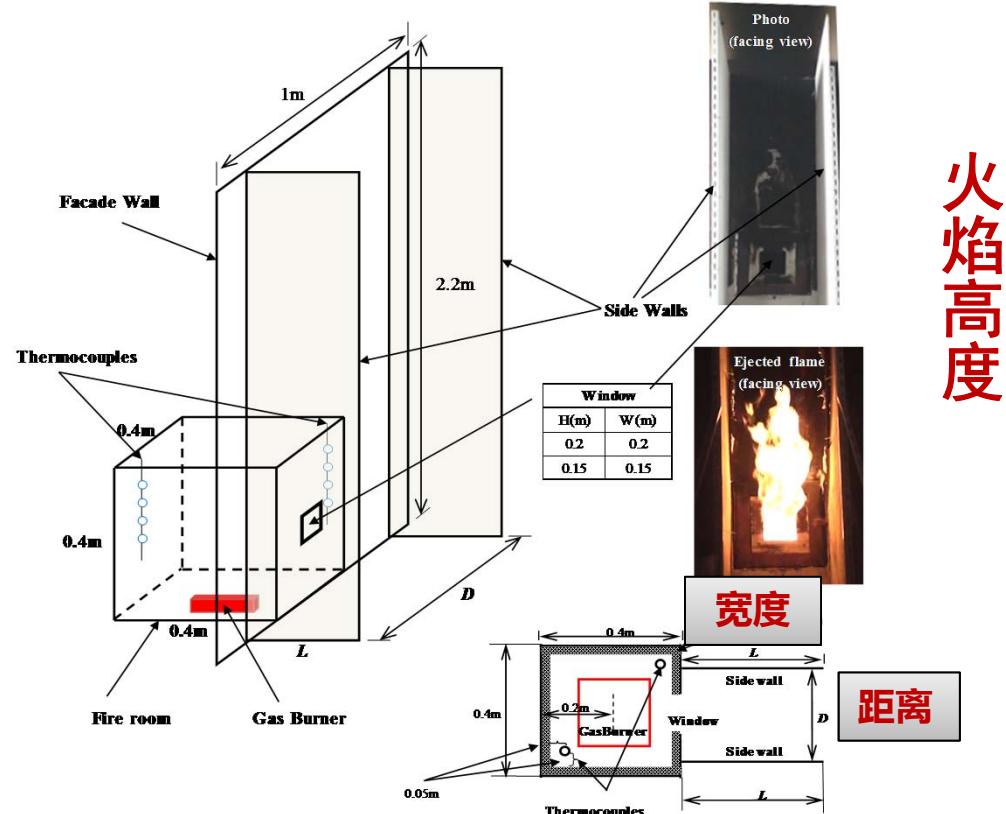
$\ell_1 < \text{Side walls distance } D < \infty$

$$\dot{m}_{total,D} \sim \alpha \cdot [\ell_1 + 2\lambda \cdot \ell_2 \cdot (1 - \ell_1/D)]$$

三、国内外研究进展--②外部限制火溢流



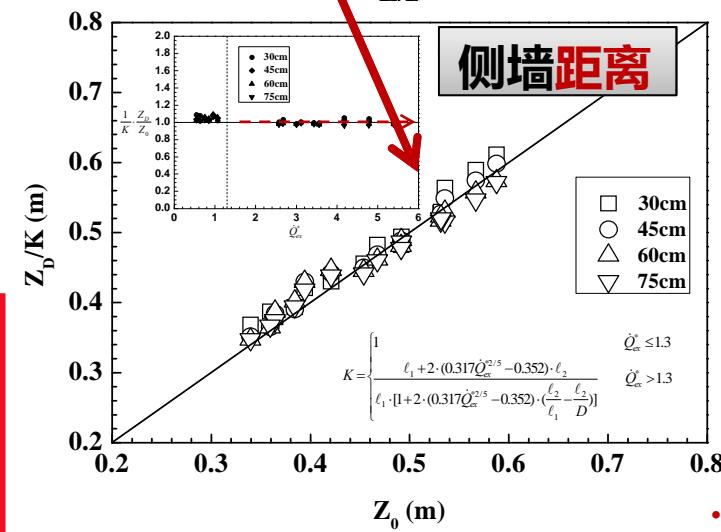
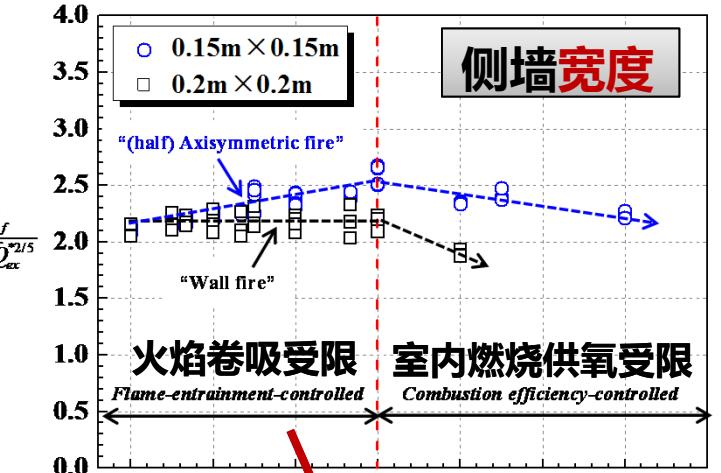
❖ 侧墙限制边界下开口火溢流特性



火焰高度

$$\lambda = f(\dot{Q}_{ex}^*) = 0.317 \dot{Q}_{ex}^{*2/5} - 0.352$$

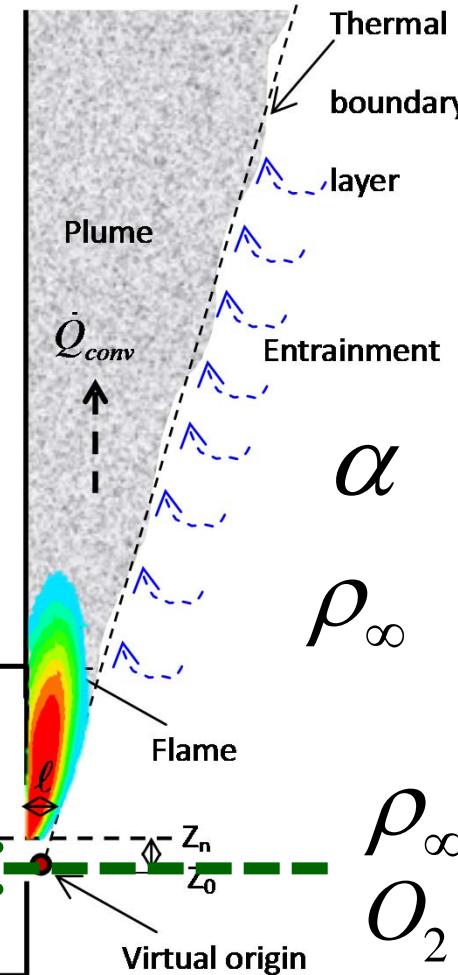
$$K = f(D/\ell_1, \ell_1/\ell_2, \dot{Q}_{ex}^*) = \begin{cases} 1 & \dot{Q}_{ex}^* \leq 1.3 \\ \frac{\ell_1 + 2 \cdot (0.317 \dot{Q}_{ex}^{*2/5} - 0.352) \cdot \ell_2}{\ell_1 \cdot [1 + 2 \cdot (0.317 \dot{Q}_{ex}^{*2/5} - 0.352) \cdot (\frac{\ell_2}{\ell_1} - \frac{\ell_2}{D})]} & \dot{Q}_{ex}^* > 1.3 \end{cases}$$



三、国内外研究进展--③高原低氧低压火溢流

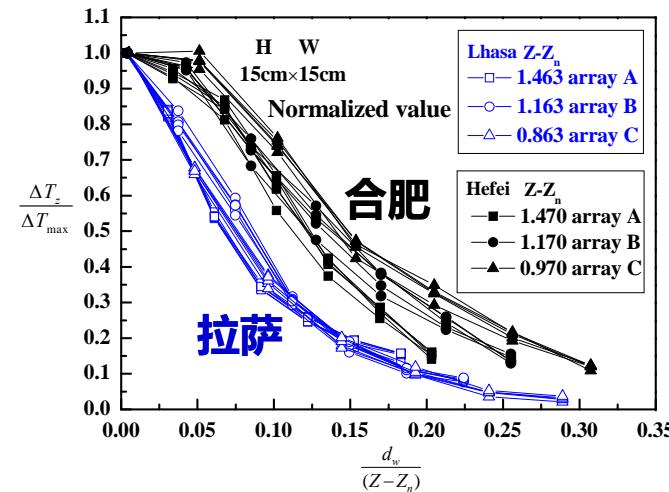


❖ 低气压环境下的卷吸差异与特征参数



地点	海拔 (m)	环境气压 (kPa)	空气密度 (kg/m³)
合肥	50	100.8	1.293
拉萨	3650	64.3	0.829

还未有高原低压下的开口火溢流研究

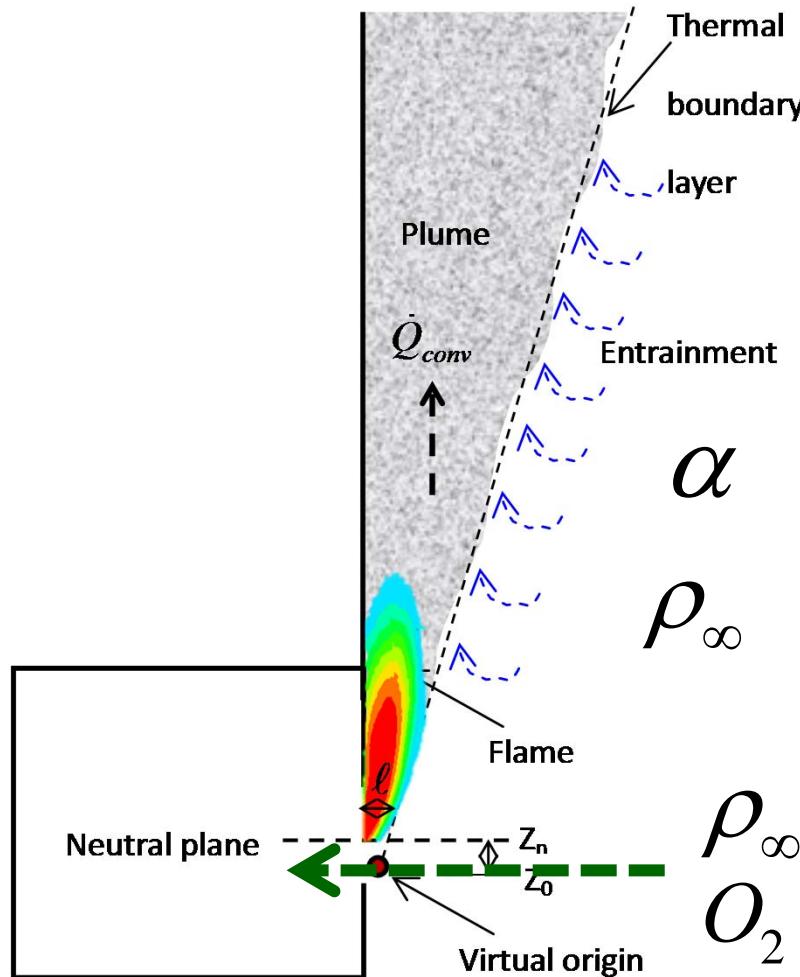


径向温度分布

三、国内外研究进展--③高原低氧低压火溢流



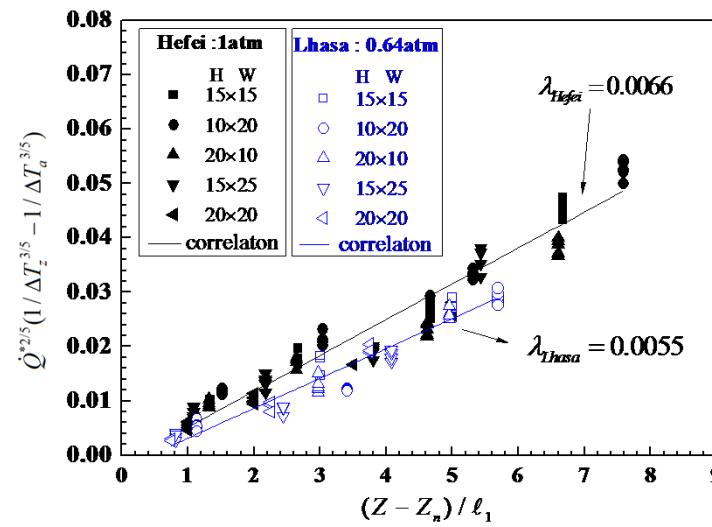
❖ 低气压环境下的卷吸差异与特征参数



两地卷吸强度差异的推导

$$\alpha^{4/5} \Pi''(z - z_1) / \ell_1 = \dot{Q}^{*2/5} (1/\Delta T_z^{3/5} - 1/\Delta T_a^{3/5})$$

$$\frac{\alpha_{Lhasa}}{\alpha_{Hefei}} = \left(\frac{\lambda_{Lhasa}}{\lambda_{Hefei}} \right)^{5/4} \approx 0.8$$



两地卷吸系数的差异



三、国内外研究进展--小结

- 近年来，国际学者在燃烧、传热传质及火灾领域顶级期刊发表了一系列高水平论文；
- 成为火灾燃烧方向的重要研究热点问题之一。
 - 腔室内部火灾动力学特性；
 - 外部边界作用下开口火溢流特征参数表征。
 - ✓ **PCI**：3篇； **CNF**：2篇； **FSJ**：6篇； **IJHMT**：6篇。
 - ✓ **Delichatsios (2007,2009; PCI)**：矩形火源理论、竖直挡墙；
 - ✓ **Himoto (2009 , FSJ)**：火溢流贴壁点模型；
 - ✓ **Huang (2009 , FSJ)**：贯穿风作用；
 - ✓ **Cecilia (2010 , FSJ)**：热流密度；
 - ✓ **Hu (2011-2015, PCI、CNF)**：火溢流临界、特征参数。

四、前沿科学问题及展望

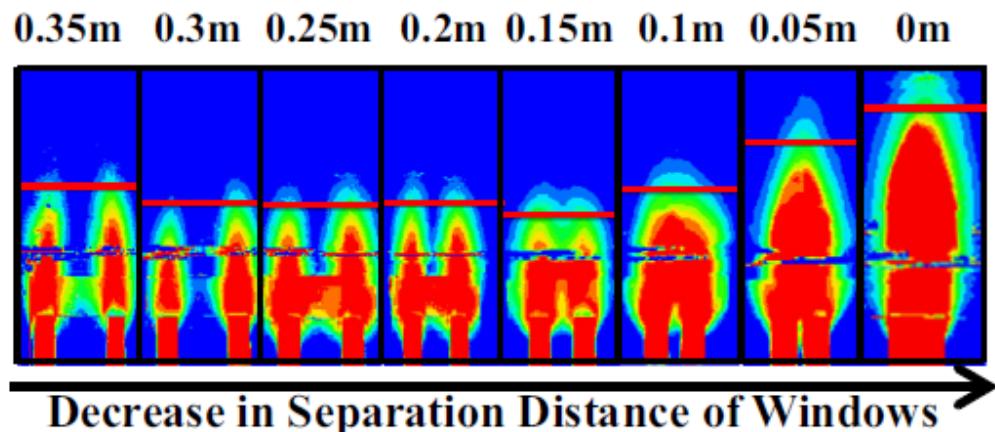


❖ 复杂燃料及边界条件下的腔室火灾动力学

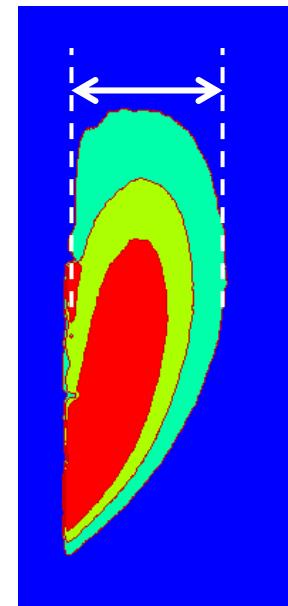
- 燃料：固体燃料；
- 环境风、双开口。

❖ 开口火溢流的结构参数

- 溢出火焰厚度
- 溢出火焰宽度

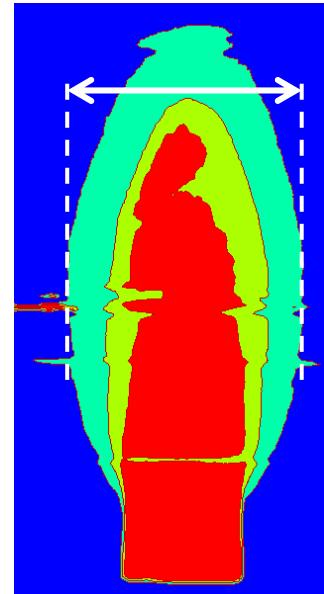


火焰厚度



侧视图

火焰宽度



正视图

五、结束语



- ❖ 建筑外壁面开口火溢流行为是火灾科学的重要经典科学问题之一。
- ❖ 近年来，成为建筑火灾的最新研究热点。
- ❖ 未来研究热点：环境风、多开口等复杂边界。
- ❖ 涉及燃烧学、流力力学、传热学的交叉合作。

敬请批评指正！

胡隆华

中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室

Tel.: 0551-63606446

Email: hlh@ustc.edu.cn