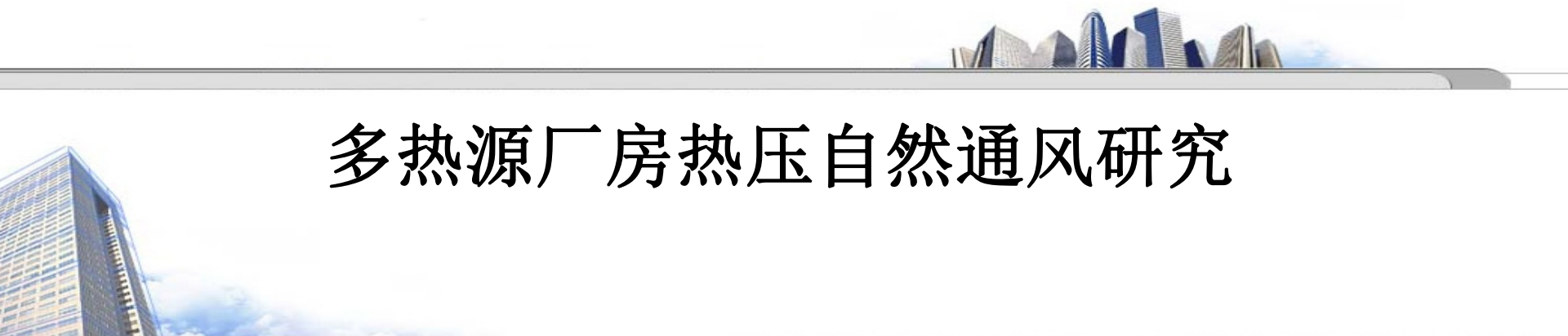




多热源厂房热压自然通风研究

汇报人：杨长青 博士后

单 位：西安建筑科技大学

时 间：2021年4月8日

汇报提纲



1.研究背景及意义

2.研究思路及问题

3.研究内容及结果

4.工业厂房热压通风设计



汇报提纲



1.研究背景及意义

2.研究思路及问题

3.研究内容及结果

4.工业厂房热压通风设计



1. 研究背景及意义

- 2019年我国工业建筑竣工面积40.2亿平方米，占房屋建筑总面积的16.2%。统计表明工业能耗占社会总能耗70%，而工业建筑能耗占工业能耗10%以上。



热车间井式炉（多面热源）



水电站发电机层(多体热源)

1. 研究背景及意义

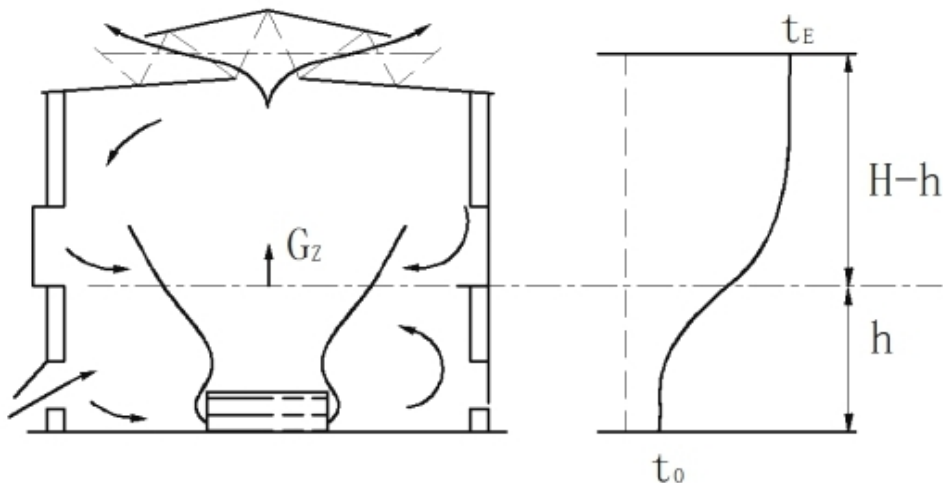


- 相对于民用及低热工业建筑，电解加工等高余热厂房建筑具有生产设备多、体量大等特点，生产过程中会大量散热，其热强度可达 $50\sim 300\text{W}/\text{m}^3$ ，通风空调能耗巨大。
- **此类高余热厂房通风存在的问题：**
 - （1）热源密布，通过机械通风及空调手段降温“杯水车薪”，影响工艺品质及生产效率。
 - （2）电解槽周围还存在强电、磁场，对含金属原件通风设备损伤严重，投资及运行成本高昂。



1. 研究背景及意义

- 对于此类工业厂房、热车间，如何因势利导地利用热源羽流效应，诱导实现高效热压自然通风，创造合理的生产与工作环境，避免生产事故的发生，保障从业者身体健康、提高劳动生产效率，具有重要的安全意义、社会意义和经济意义。



热分层：自然状态下的厂房内部近似不可压缩空气的密度随温度而变化，总是使得密度小的热空气在上、密度大的冷空气在下。这是建筑内热分层形成的根源。

热压驱动下的自然通风原理示意图

汇报提纲



1.研究背景及意义

2.研究思路及问题

3.研究内容及结果

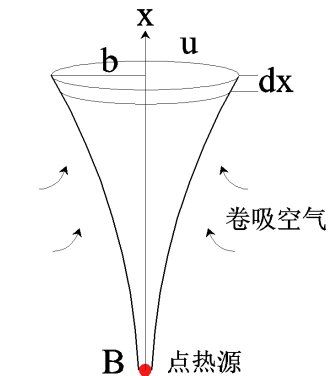
4.工业厂房热压通风设计





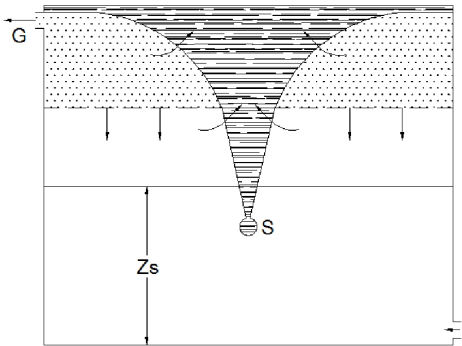
2. 研究思路及问题

经典点源热分层计算模型



点热源羽流流动规律

$$b = \frac{6\alpha}{5}x$$
$$u = \frac{5}{6\alpha} \left(\frac{9}{10} \alpha B \right)^{1/3} x^{-1/3}$$
$$g \frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} = \frac{5B}{6\alpha} \left(\frac{9}{10} \alpha B \right)^{-1/3} x^{-5/3}$$



点热源房间热分层模式

分界面高度可以由通风换气量 G 等于分层界面高度断面上浮力羽流的流量 G_Z 来确定:

$$G = G_Z$$

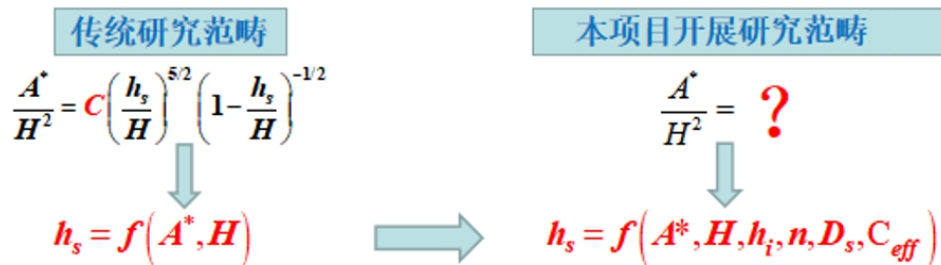
点热源热分层高度计算式

自然通风建筑无因次的通风孔口当量有效面积是无量纲热分层高度的函数:

$$\frac{A^*}{H^2} = C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\xi^5}{1-\xi} \right)^{\frac{1}{2}}$$



2. 研究思路及问题

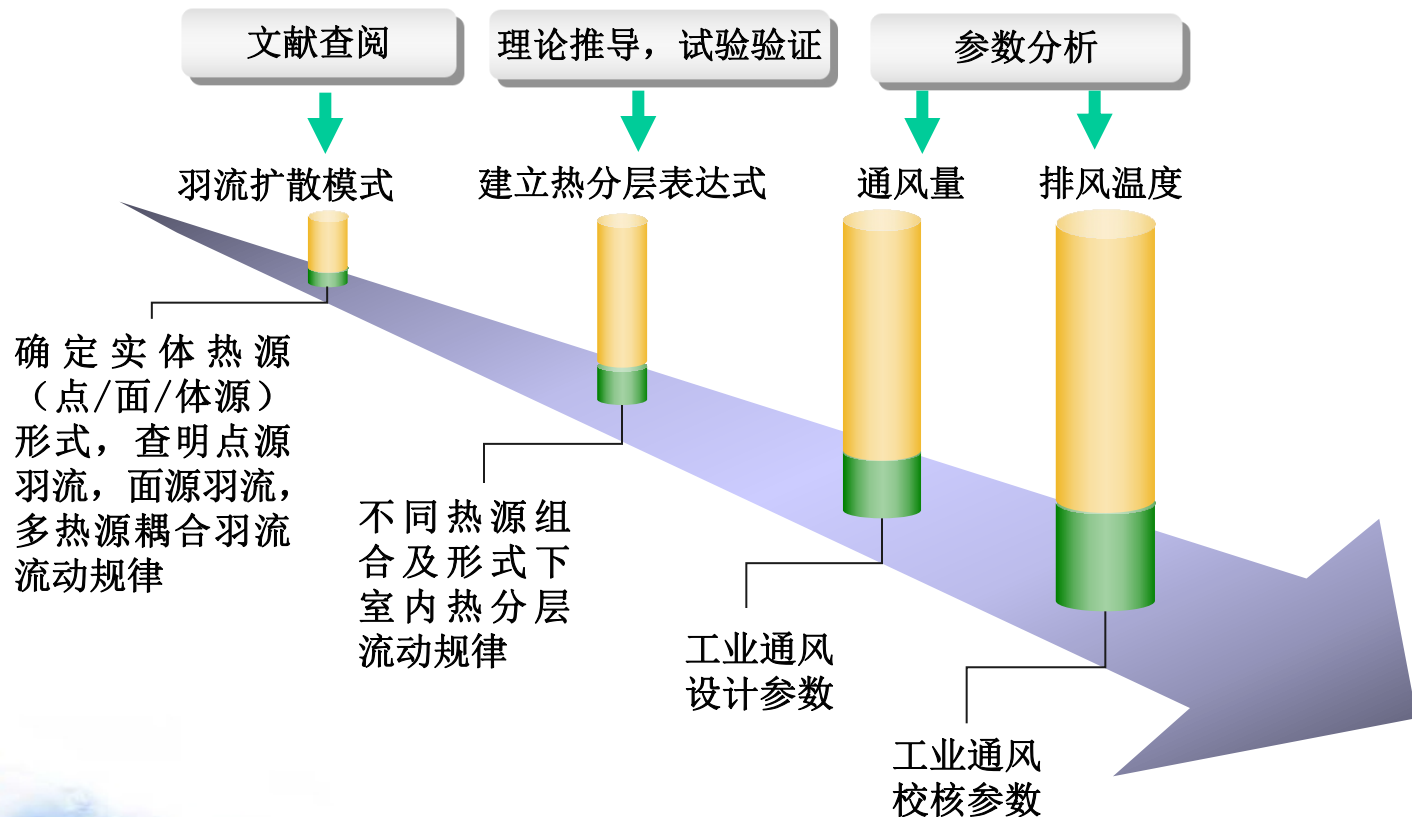


热压通风研究向工程应用的过渡，需要解决以下问题：

- 工程常见的组合热源问题而非单一热源问题；
- 有效的实体热源上羽流分析方法，需着重解决羽流近源区段的流量分析问题；
- 实际热源的高度、位置也是影响自然通风效果的重要因素。



2. 研究思路及问题



汇报提纲



1.研究背景及意义

2.研究思路及问题

3.研究内容及结果

4.工业厂房热压通风设计

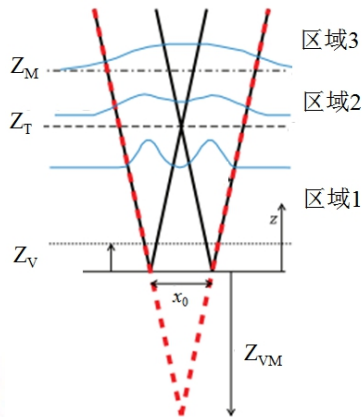




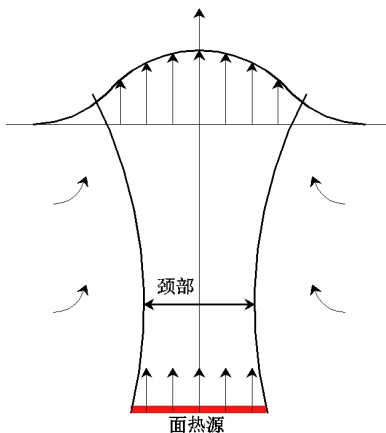
3. 研究内容及结果

主要研究内容:

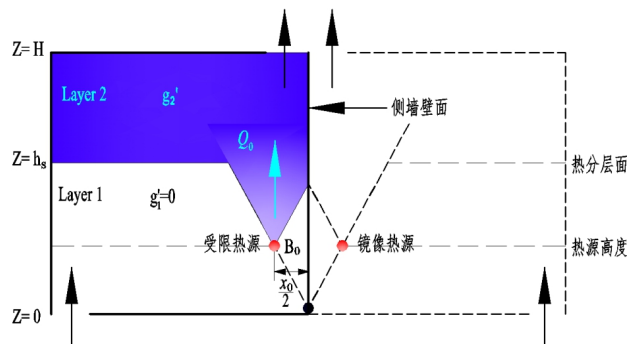
① 等强度相近热源羽流流动规律及房间热压通风:



② 圆形面热源近源区段羽流流动规律及房间热压通风:



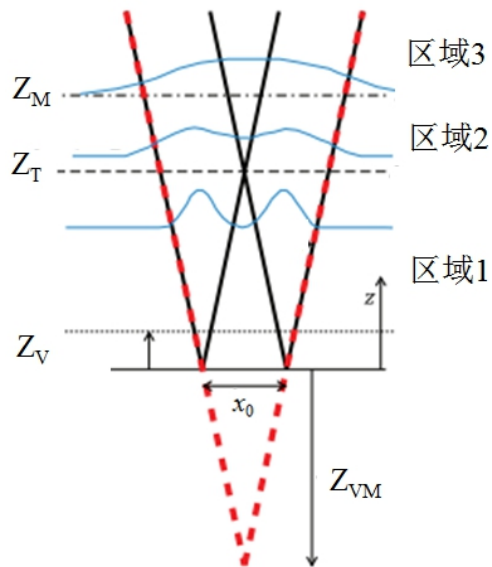
③ 热源高度、位置对热压通风的影响:





3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究



相近点源浮力羽流

耦合的三个阶段内羽流卷吸系数及流量发生变化

$$Q = 2\left(\frac{9}{10}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{6}{5} \pi^{\frac{2}{3}} \alpha_{eff}^{\frac{4}{3}} B_0^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}$$

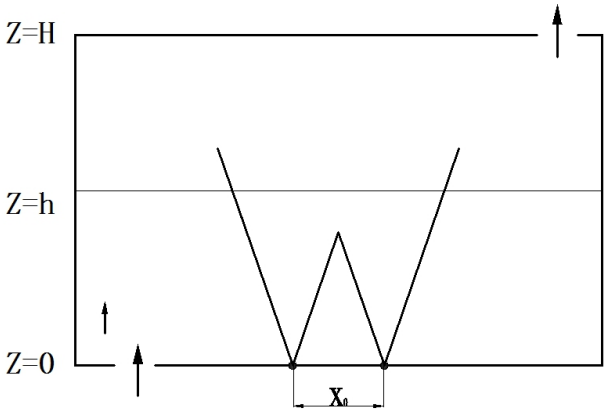
- 阶段1：独立；
- 阶段2：接触。 $\frac{\alpha_{eff}}{\alpha} = \begin{cases} 1 & Z^* < 0.35 \\ Z^{*- \frac{5}{4}} (0.73Z^* - 0.082)^{\frac{3}{4}} & 0.35 < Z^* < 0.44 \\ \frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} \left(1 + \frac{0.12}{Z^*}\right)^{\frac{5}{4}} & 0.44 < Z^* \end{cases}$
- 阶段3：融合。





3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究

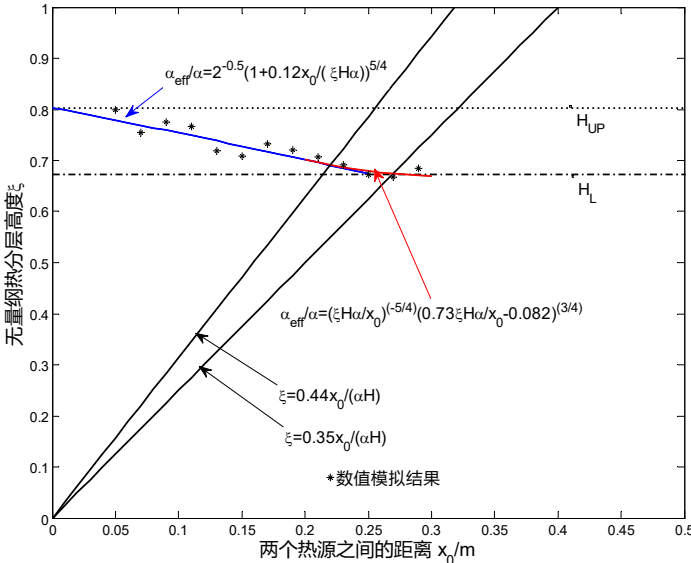


相近热源耦合热羽流房间



$$\frac{A^*}{H^2} = 2C_{eff}^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\xi^5}{1-\xi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\xi = \frac{h}{H})$$

热分层计算模型及验证

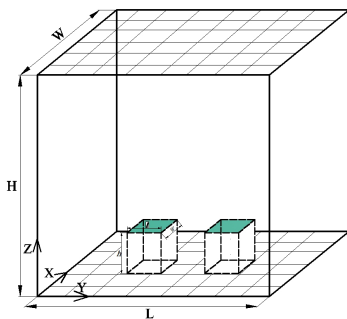




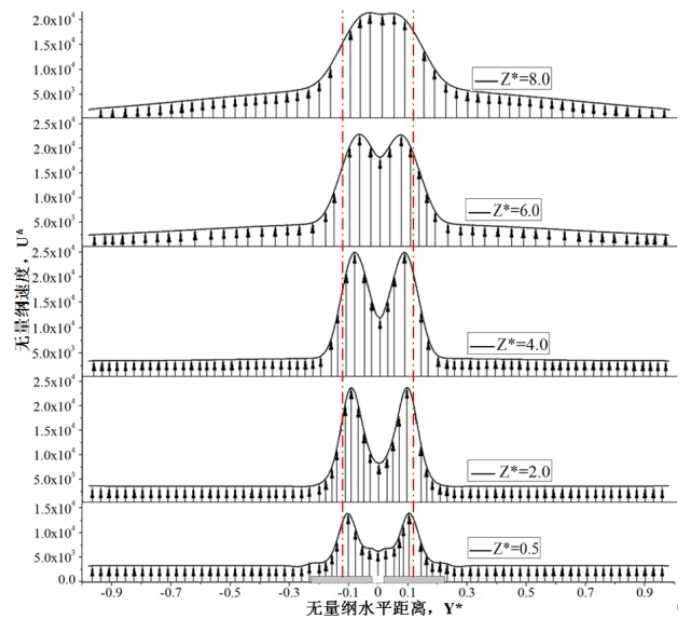
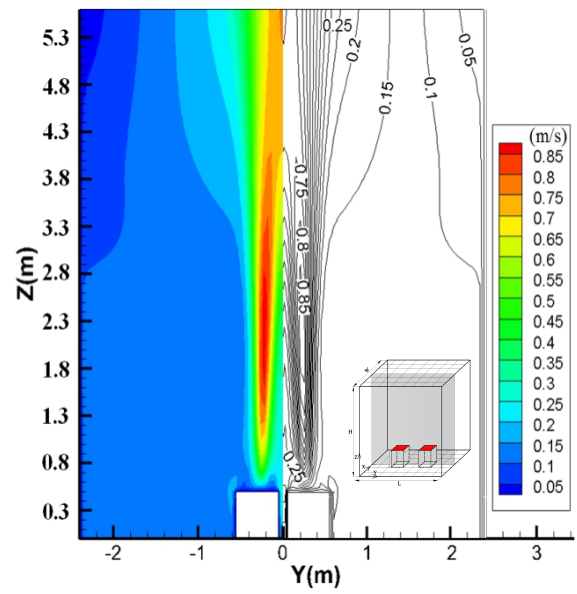
3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究

相互作用羽流
的速度分布



间距比为 $S/\sqrt{A_0} = 1.2$

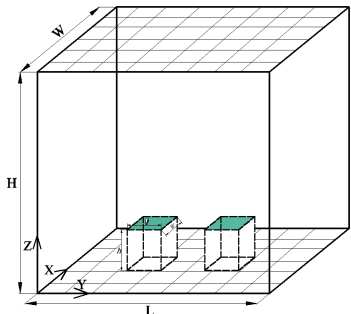




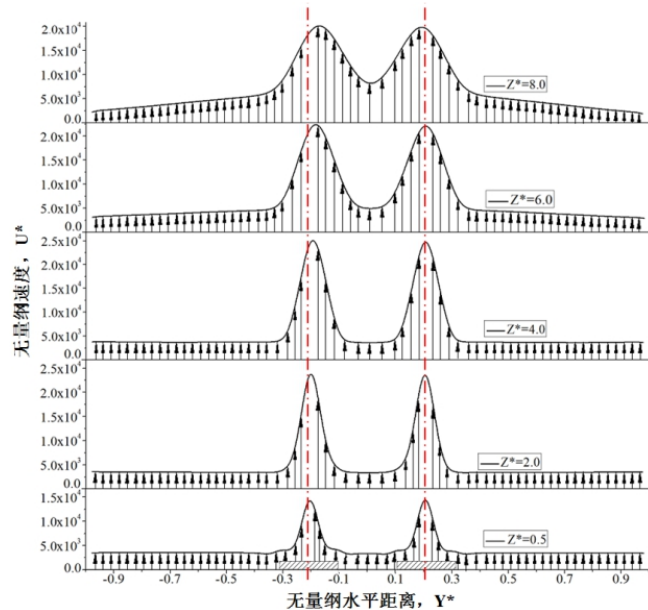
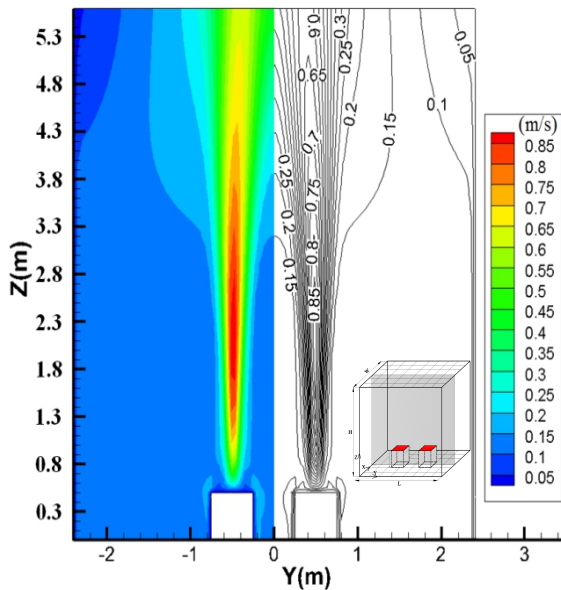
3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究

相互作用羽流
的速度分布



间距比为 $S / \sqrt{A_0} = 2.0$

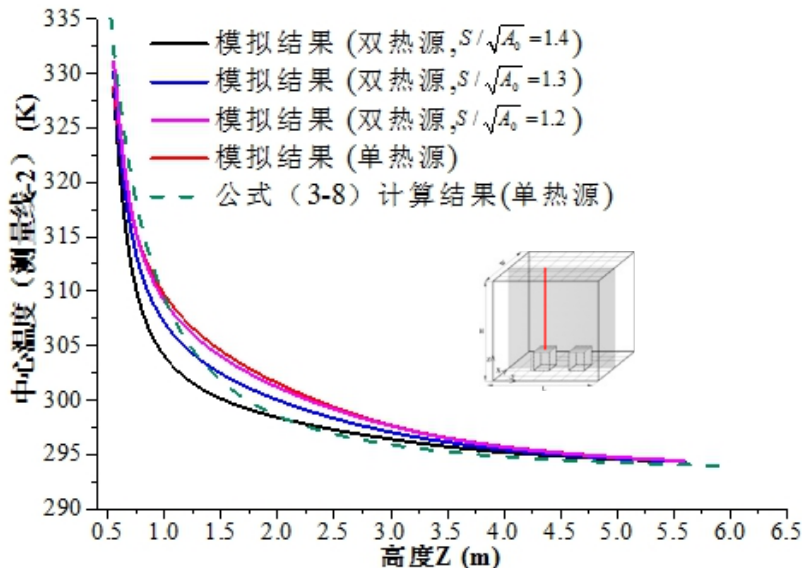
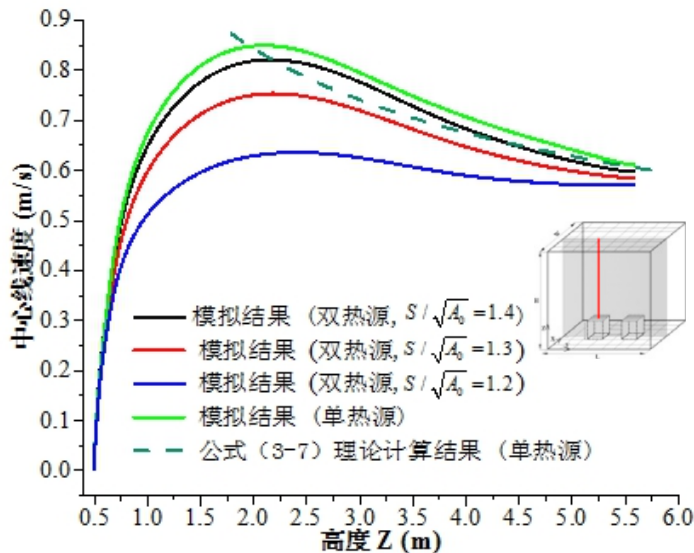




3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究

相近羽流的
左边热源上方
轴线速度和
温度分布



随着热源间距比的增大，单羽流轴线速度与相互作用羽流轴线速度越来越接近。轴线温度分布具有相同的变化规律。产生这种现象的主要原因是羽流相互吸引产生偏转，使速度和温度值发生变化，类似于“康达效应”。

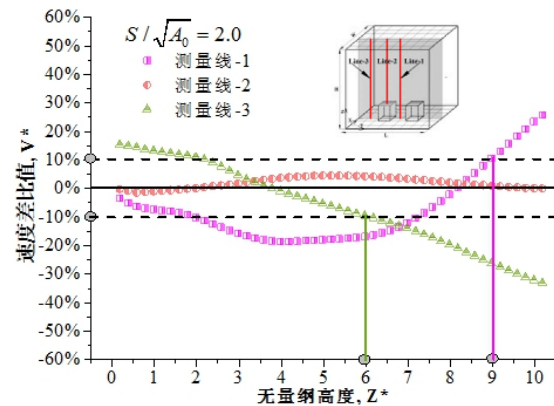
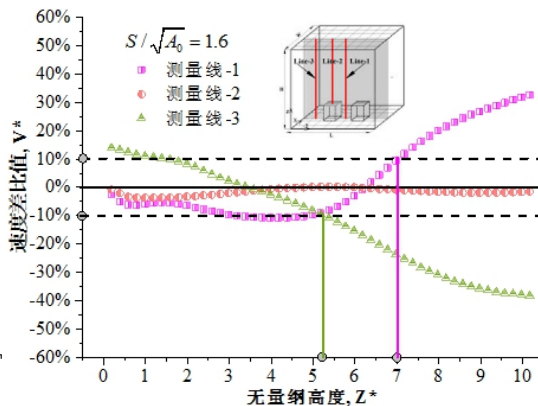
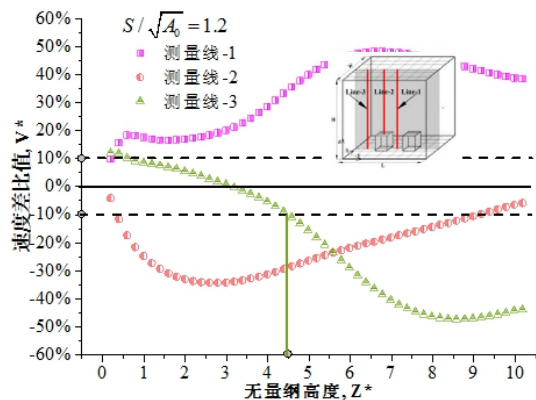




3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究

不同热源
间距比工
况下两热
羽流不同
相互作用
区域分析



速度差比:

$$V^* = \frac{(V_c - V_{c,a}) - (V_s - V_{s,a})}{V_{c,max}}$$

- 当 V^* 值的范围在-10%到10%之间时, 单羽流和双羽流在影响区域同一点处速度差 ($V_c - V_s$) 相当小, 在所有工况中变化范围在0.022-0.1m/s。此范围内, 羽流速度变化不明显。
- 当两热源中间速度差比 V^* 高于10%, 两个羽流开始相互作用。速度差比 V^* 值越大, 双羽流相互作用强度变化越明显。

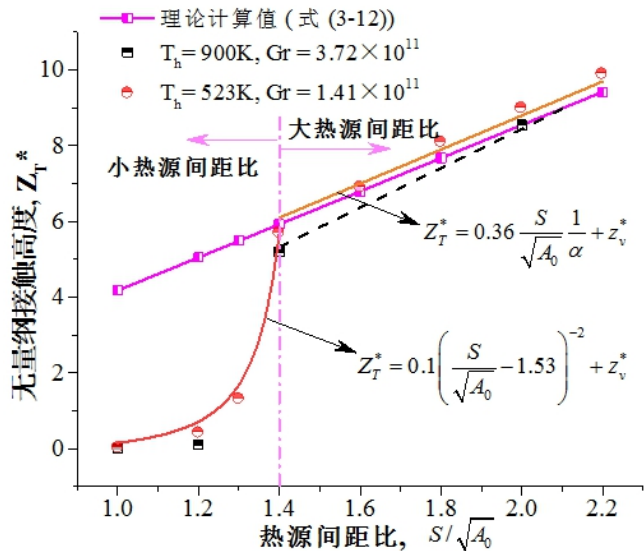




3. 研究内容及结果

① 相近热源羽流流动规律及房间热压通风研究

等羽流相互作用高度拟合公式验证与分析



不同热源间距比下热羽流接触高度

Cenedese等提出一个预测点热源羽流接触高度的计算式, 通过虚拟极点修正扩展到实体热源上部羽流:

$$Z_r^* = 0.35 \frac{S}{\sqrt{A_0}} \frac{1}{\alpha} + z_v^*$$

本文按照上式形式拟合得到:

● 热源间距比较小时, 称为“指数偏转区”:

$$Z_r^* = C_0 \left(\frac{S}{\sqrt{A_0}} - C_1 \right)^n + z_v^*, \quad 1.0 \leq \frac{S}{\sqrt{A_0}} \leq 1.4$$

● 热源间距比较大时

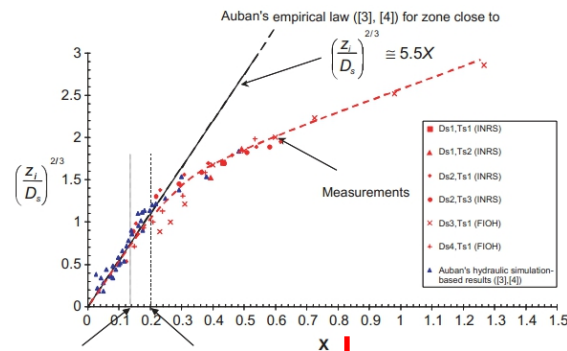
$$Z_r^* = C_2 \frac{S}{\sqrt{A_0}} \frac{1}{\alpha} + z_v^*, \quad 1.4 \leq \frac{S}{\sqrt{A_0}} \leq 2.2$$





3. 研究内容及结果

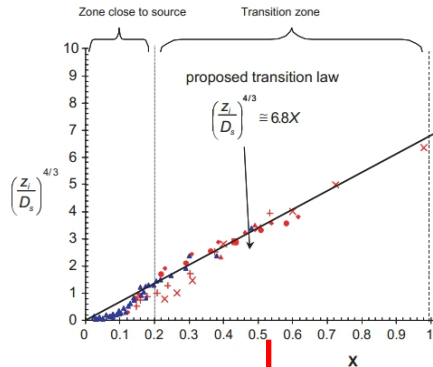
②圆形面热源近源区羽流流动规律及房间热压通风研究



近源区段羽流流量:

$$Q_1 = 0.364 B_0^{1/3} z^{2/3} D_s$$

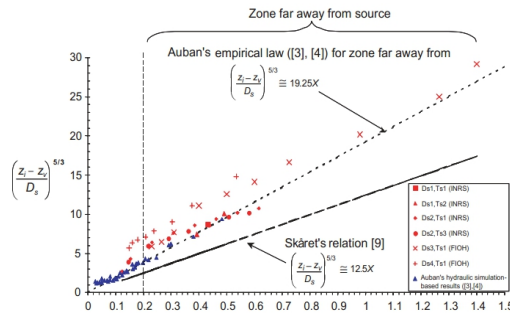
+



过渡段羽流流量:

$$Q_1 = 0.294 B_0^{1/3} z^{4/3} D_s^{1/3}$$

+



远源段羽流流量:

$$Q_1 = 0.104 B_0^{1/3} (z - z_v)^{5/3}$$



$$C = \left(\frac{9}{10}\right)^{1/3} \frac{6}{5} \pi^{2/3} \alpha^{4/3} = \frac{6}{5} \alpha \left(\frac{9}{10} \alpha\right)^{1/3} \pi^{2/3} = 0.1046$$

面热源热羽流流量统一表达式:

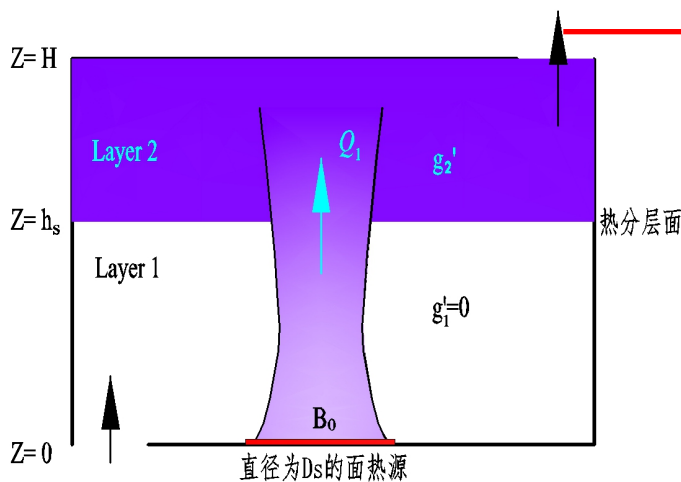
$$Q_1 = (KC) B_0^{1/3} (z - z_v)^m D_s^{5/3-m}$$





3. 研究内容及结果

②圆形面热源近源区羽流流动规律及房间热压通风研究



$$\left\{ \begin{aligned} g_2' &= \frac{B_0}{KCB_0^{1/3} (h_s - z_v)^m D_s^{5/3-m}} \\ Q &= A^* \sqrt{g_2' (H - h_s)} \end{aligned} \right.$$

||

面热源热羽流流量统一表达式:

$$Q_1 = (KC) B_0^{1/3} (z - z_v)^m D_s^{5/3-m}$$

无量纲化

$$\xi = \frac{h_s}{H} \quad \xi_v = \frac{z_v}{H} \quad \xi_s = \frac{D_s}{H}$$

多个面热源热压自然通风特性方程:

$$\frac{1}{n} \frac{A^*}{H^2} = (KC)^{3/2} \frac{(\xi - \xi_v)^{3m/2} \xi_s^{5/2-3m/2}}{(1 - \xi)^{1/2}}$$

面热源热压自然通风特性方程:

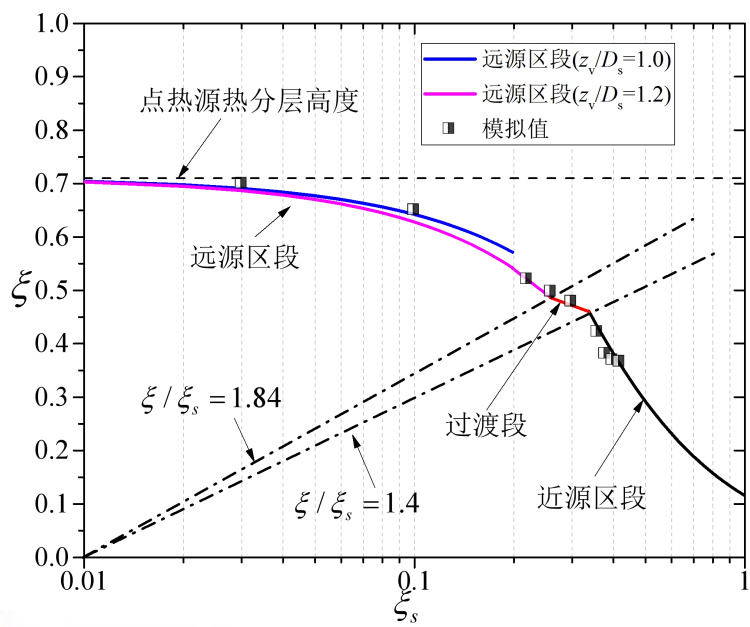
$$\frac{A^*}{H^2} = (KC)^{3/2} \frac{(\xi - \xi_v)^{3m/2} \xi_s^{5/2-3m/2}}{(1 - \xi)^{1/2}}$$



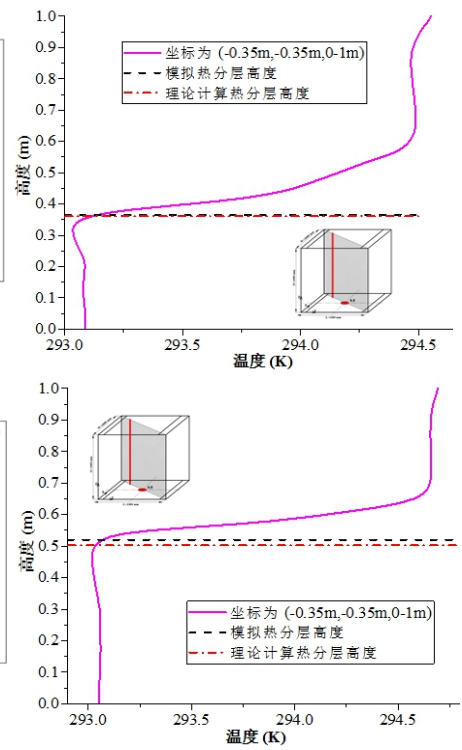
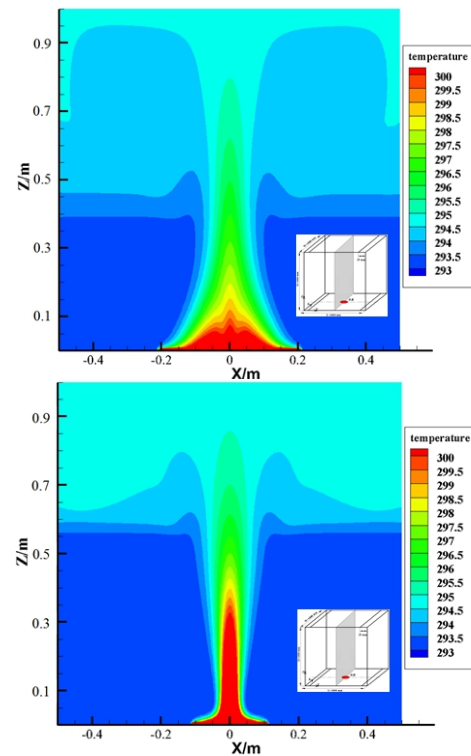


3. 研究内容及结果

②圆形面热源近源区羽流流动规律及房间热压通风研究



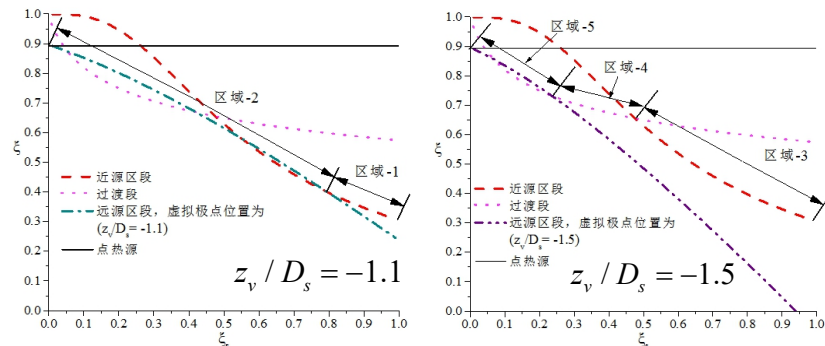
理论计算模型的对比分析



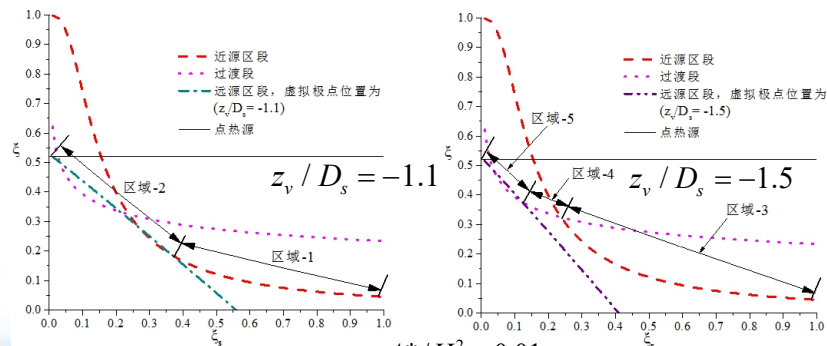


3. 研究内容及结果

②圆形面热源近源区羽流流动规律及房间热压通风研究



$$A^*/H^2 = 0.08$$



$$A^*/H^2 = 0.01$$

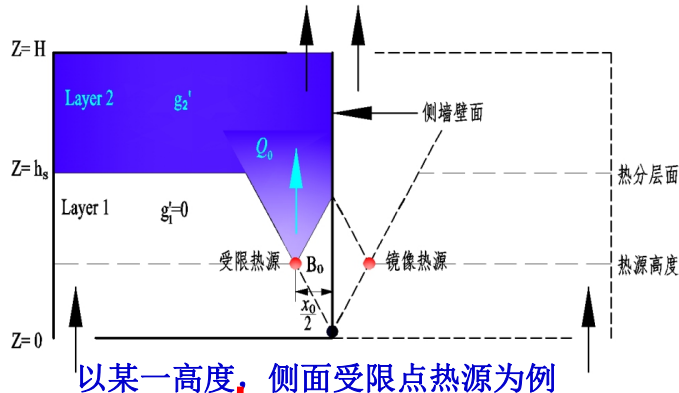
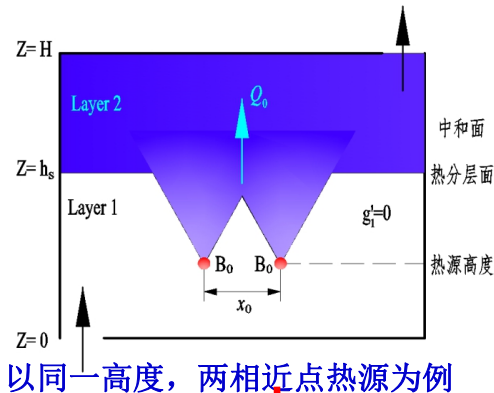
- 随着热源直径减小，热分层高度逐渐升高，而且远源区段的热分层高度计算值在热源直径为0的时候，与点热源热分层计算值相同。
- A^*/H^2 相同时，由于虚拟极点位置的变化，实际计算区域也由2个变化为3个；
- 随着 A^*/H^2 从0.08降低到0.01，从图中看出近源区段公式（区域-1和区域-3）控制的区域变得更大。





3. 研究内容及结果

③热源高度、位置对热压通风的影响



与前述热源羽流计算的不同在于两个方面：

- 羽流流量需要考虑高度影响：

$$Q_0 = 2C \left(\alpha_{eff} / \alpha \right)^{\frac{4}{3}} B_0^{\frac{1}{3}} (h_s - h_0)^{\frac{5}{3}}$$

- 折算加速度需要考虑高度影响：

$$g_2' = \frac{B_0}{C \left(\alpha_{eff} / \alpha \right)^{\frac{4}{3}} (h_s - h_0)^{\frac{5}{3}}}$$

- 羽流流量需要考虑相近热源距离影响：

$$\frac{\alpha_{eff}}{\alpha} = \begin{cases} 1 & Z^* < 0.35 \quad \text{相互独立} \\ Z^{*- \frac{5}{4}} (0.73 Z^* - 0.082)^{\frac{3}{4}} & 0.35 < Z^* < 0.44 \quad \text{相互接触 } Z^* = \frac{(h_s - h_0) \alpha}{x_0} \\ \frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} \left(1 + \frac{0.12}{Z^*} \right)^{\frac{5}{4}} & 0.44 < Z^* \quad \text{相互融合} \end{cases}$$



3. 研究内容及结果



③热源高度、位置对热压通风的影响

同一高度、相近点热源热压自然通风方程：

$$\frac{A^*}{H^2} = 2C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\alpha_{eff}}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{(\xi - \xi_0)^5}{1 - \xi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

验证：

- 两点热源重合且置于地板处时：

$$x_0 = 0, h_0 = 0, \alpha_{eff} / \alpha = 1 / 2^2 = 2^{-2}$$

上式可化为：

$$\frac{A^*}{H^2} = C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\xi^5}{1 - \xi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- 当两热源位于地面且互不影响的情况：

$$\alpha_{eff} / \alpha = 1$$

上式可化为：

$$\frac{A^*}{H^2} = 2C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\xi^5}{1 - \xi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

某一高度、侧面受限点热源热压自然通风特性方程：

$$\frac{A^*}{H^2} = C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\alpha_{eff}}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{(\xi - \xi_0)^5}{1 - \xi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

验证：

- 热源距墙较远，为单热源位于地面情况：

$$\alpha_{eff} / \alpha = 1$$

上式可以化为：

$$\frac{A^*}{H^2} = C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\xi^5}{1 - \xi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

与Linden 单点热源结果完全相同。

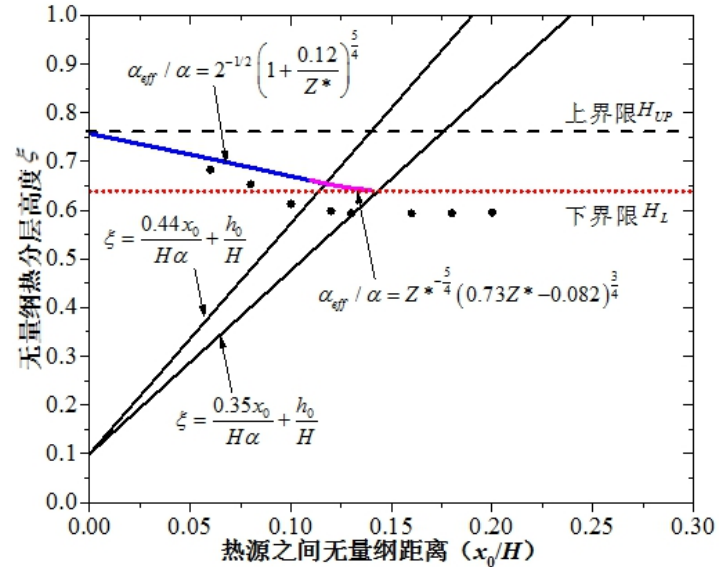




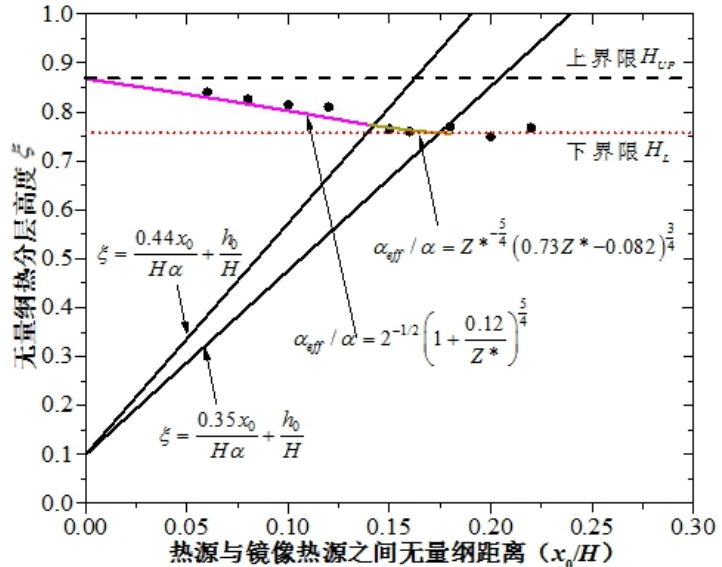
3. 研究内容及结果

③热源高度、位置对热压通风的影响

相近热源空间热分层模型验证



受限热源空间热分层模型验证



体可以看出公式计算与试验结果吻合良好，可见推导得出的不同高度点热源房间的热分层计算公式可以准确的预测房间的热分层高度。

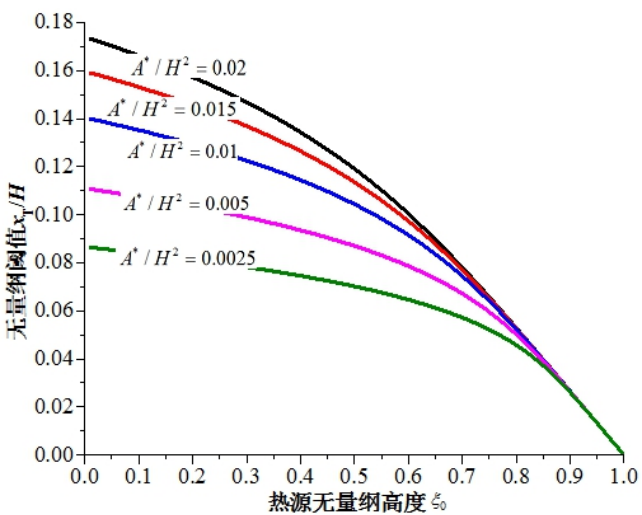
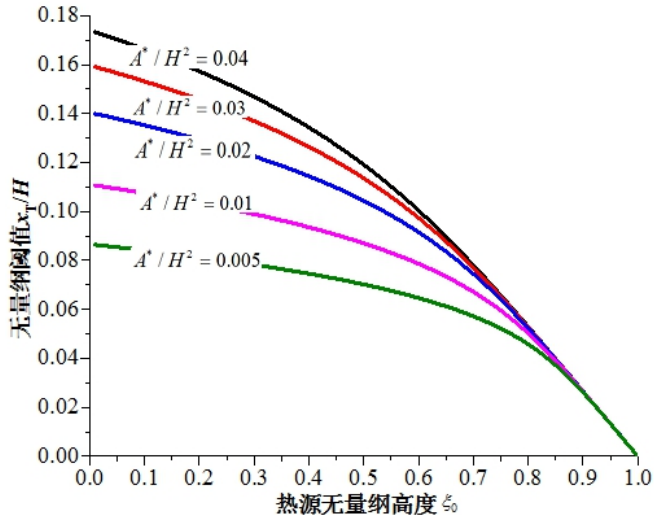




3. 研究内容及结果

③热源高度、位置对热压通风的影响

相近热源无量纲阈值随
热源无量纲
高度变化



受限热源无量纲阈值随
热源无量纲
高度变化

● 相近热源无量纲阈值计算公式如下：

$$\frac{A^*}{H^2} = 2C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\alpha_{eff}}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{(H_L - \xi_0)^5}{1 - H_L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{(H_L - \xi_0)\alpha}{x_T / H} = 0.35 \quad (2)$$

● 受限热源无量纲阈值计算公式如下：

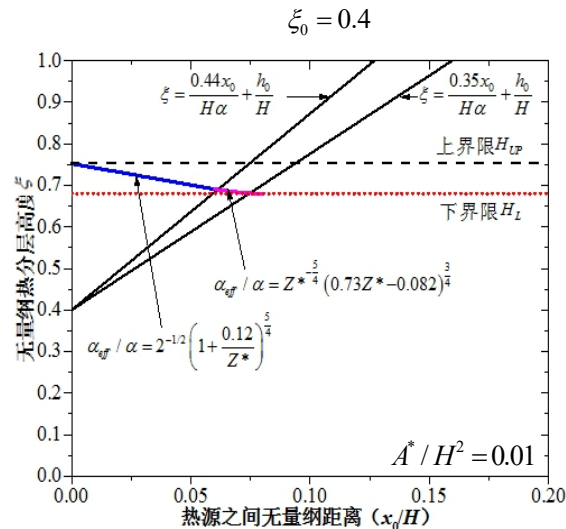
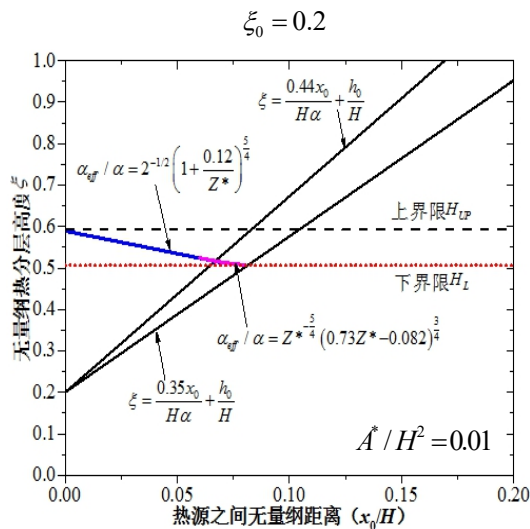
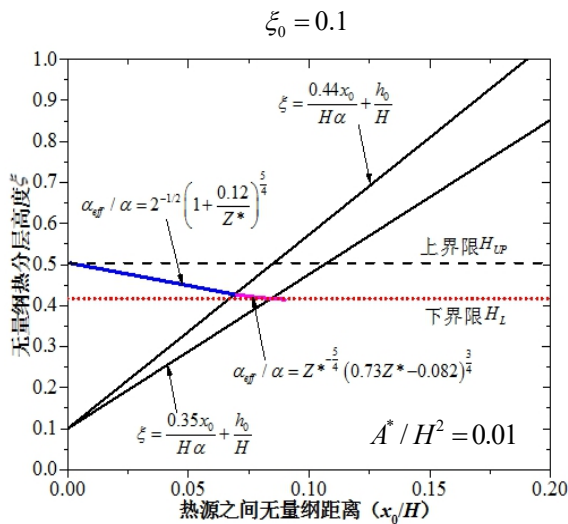
$$\frac{A^*}{H^2} = C^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\alpha_{eff}}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{(H_L - \xi_0)^5}{1 - H_L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{(H_L - \xi_0)\alpha}{x_T / H} = 0.35 \quad (4)$$



3. 研究内容及结果

③热源高度、位置对热压通风的影响—热分层高度



- 随着热源离地面高度的升高，热分层高度相继升高，这与单热源工况对热分层高度影响类似。
- 三个区域的分界线也由：

$$Z^* = \frac{(h_s - h_0)\alpha}{x_0}$$

$$\xi = \frac{0.35x_0}{H\alpha} \rightarrow \xi = \frac{0.35x_0}{H\alpha} + \xi_0$$

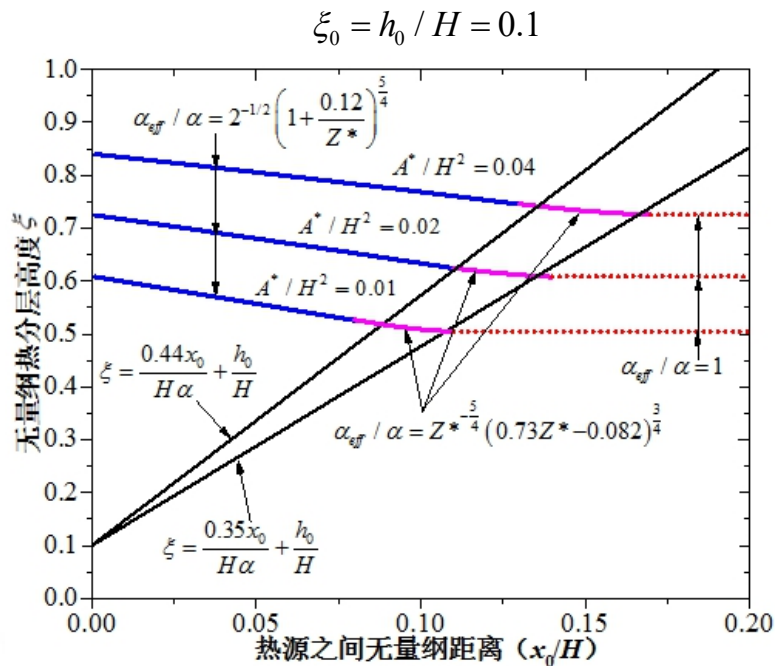
$$\xi = \frac{0.44x_0}{H\alpha} \rightarrow \xi = \frac{0.44x_0}{H\alpha} + \xi_0$$





3. 研究内容及结果

③热源高度、位置对热压通风的影响—热分层高度



- 从图和式 $\xi = \frac{0.35x_0}{H\alpha} + \xi_0$ 中可以发现，当热源距地面无量纲高度不变化时，三种情况下的热源独立的交点分界线为同一条线。
- 随着 A^*/H^2 值增大，无量纲热分层高度也相继升高。



汇报提纲



1.研究背景及意义

2.研究思路及问题

3.研究内容及结果

4.工业厂房热压通风设计





4. 工业厂房热压通风设计

设计步骤示意图

计算车间热源散发的总余热量[↙]

既有建筑内热源热量计算用牛顿冷却公式：[↙]

$$Q_v = h_v(t_w - t_f)A$$

自然对流换热准则关联式通常用下列幂函数形式，用来计算热源壁面换热系数：[↙]

$$Nu = C(Gr * Pr)^{\nu}$$

$$Nu = \frac{h_v l}{\lambda}$$

地下廊道换热计算公式：[↙]

$$t_{x,\tau} = \left(\frac{Q}{qU} + t_r - t_0 \right) \left(1 - e^{-\frac{qU}{cG}x} \right) + t_0$$

给定热分层高度，计算有效开口面积 A^* 及厂房自然通风量[↙]

确定厂房中各种热源的形式与个数，运用自然通风特性方程计算有效开口面积 A^* ：[↙]

$$N^{1/2} \frac{A^*}{H^2} = C^{3/2} \left[\frac{\sum_{i=1}^N K_i (\xi - \xi_{vi} - \xi_i)^{m_i} \xi_z^{5/3-m_i}}{(1-\xi)^{1/2}} \right]^{3/2}$$

代入热分层高度计算通风量：[↙]

$$Q_E = CB_0^{\frac{1}{3}} \sum_{i=1}^N K_i (h_z - z_{vi} - h_i)^{m_i} D_z^{5/3-m_i}$$

计算排风温度，校核厂房下部工作区空气温度[↙]

代入热分层高度，进风温度，热源浮力通量，计算排风温度：[↙]

$$T_i = \frac{C^2 B_0^{2/3} \left[\sum_{i=1}^N K_i (h_z - z_{vi} - h_i)^{m_i} D_z^{5/3-m_i} \right]^2}{A^* g (H - h_i) T_0^{-1}} + T_0$$

检验室内空气温度分布：[↙]

$$t = T_0 + 0.5(1 + erfH^*)(T_i - T_0)$$

其中：[↙]

$$H^* = \left(\frac{kx^2}{2a} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad x = z - h_z, \quad k = \left(\frac{du}{dx} \right)_{x=0}$$

不满足要求：[↙]

重新选取热分层高度 h_z 或者进、排风口高差 H ，返回步骤 2。[↙]

以有效开口面积 A^* 确定进、排风口面积[↙]

进、排风口面积与有效开口面积 A^* 的关系如下，代入 A^* 确定进、排风口面积：[↙]

$$A^* = \frac{c_i a_i a_b}{\left(\frac{1}{2} \left(\frac{c_i^2}{c_b^2} a_b^2 + a_i^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}}}$$

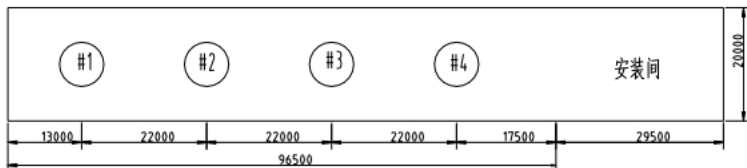
进、排风口面积取值范围：[↙]

$$a_i \geq \frac{\sqrt{2} A^*}{c_i}, \quad a_b \geq \frac{\sqrt{2} A^*}{c_i}$$


4. 工业厂房热压通风设计



工业厂房热压自然通风工程案例



水电站厂房平面示意图

- 计算可知，此时进、排风口的面积均应大于

$$a_i, a_b \geq \frac{A^*}{\sqrt{2}c_i} = 28.49m^2$$

- 例如取排风面积 $a_i = 30m^2$ 时，进风面积可求出为 $a_i = 90.94m^2$ 。当进、排风口面积相等时取得**最大串联效益比**，此时排风面积 $a_i = a_b = A^* / c_i = 40.29m^2$ ，进、排风口面积和为**80.6m²**即与前述进、排风口面积为**120.9m²**时效果相同。
- 由于地下工程开挖困难，土方开挖耗费巨大，且不受风压影响，本研究成果对于地下水电站等地下工业建筑自然通风设计具有积极影响。





谢谢大家！

单 位： 西安建筑科技大学

汇 报 人： 杨长青

电 子 邮 箱： yangcq@xauat.edu.cn

2021年4月8日

