

自然通风地道最佳长度的确定^{*}

冉茂宇

(华侨大学建筑系, 泉州 362011)

摘要 从获得最大自然通风的角度, 分析地道最佳长度存在的必然性. 通过建立空气出口温度、热压大小、流动阻力损失等随地道长度变化的关系, 提出简单而有效的确定方法. 同时考察各种因素如进出口高差、地道等效直径、局部阻力系数、室外空气相对于年平均温度的剩余温度等, 对最佳长度和最大流速的影响. 通过算例进一步阐明该方法的实施过程, 所得结果有利于地下自然通风系统的设计建造及经济利用.

关键词 地道, 自然通风, 最佳长度

分类号 TU 83

利用地层深处的蓄热或蓄冷性能, 对空气进行自动加热或冷却处理, 既可以形成自然通风, 获得足够的新风量, 又能解决空调耗能问题. 因此, 这一专项技术在国内外地面建筑的降温及地下工程的通风除湿中, 都获得了广泛的应用. 文献[1]从冷却效率的角度, 探讨了深埋冷却风道最佳长度的范围, 文献[2]从土建、设备运行费的角度, 研究了风道经济断面的形式. 本文从获得最大自然通风的角度, 研究地道最佳长度的确定问题.

1 自然通风地道最佳长度存在的必然性

图1是地道自然通风系统简图. 在夏季, 由于地道内空气温度低于地道外空气温度, 室外空气从上洞口流入, 受地道壁冷却后从下洞口流出, 形成热压作用下的自然通风; 在冬季, 室外空气从下洞口流入, 受地道壁加热后从上洞口流出, 形成热压作用下的反向自然通风. 该系统的自然通风量与地道内外形成的热压大小有关, 即热压越大, 自然通风越强; 反之亦然. 考虑夏季的热压作用, 有热压头为

$$\frac{\Delta p}{\rho_i g} = \frac{H(t_e - t_i)}{273.15 + t_e}, \quad (1)$$

其中 H 为进出口中心高差(m), g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), t_e, t_i 分别为进、出口空气温度(°C). 从式(1)可知, 热压头随 t_i 的降低而增加. 显然, 随着地道深的增加, 室外空气受洞壁冷却时间延长, t_i 降低且降低的速率减小, 系统的自然

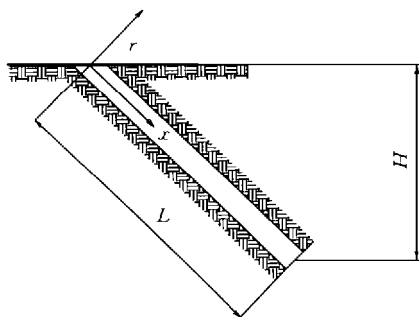


图1 地道自然通风系统简图

通风量有增加的趋势. 另一方面, 地道深的增加必然增加该系统的沿程阻力, 又有使其自然通风量减小的趋势. 因此, 一定存在一最佳长度, 使得该系统的自然通风量最大.

2 出口空气温度的确定

为了确定出口空气温度(t_i), 建立如图 1 所示的坐标, 并假设地道断面上空气温度分布均匀, 只沿地道深方向变化. 用 t 表示地道中空气温度, t_o 表示地道壁体无限远处温度(可取当地年平均温度), G 表示地道中的空气质量流量, x 为地道长度(m). 取微元 dx 进行能量平衡分析, 对地道中空气有方程为

$$-GC_p \frac{dt}{dx} = SK(t - t_o), \quad (2)$$

式中 S 为地道湿周(m), K 为地道壁不稳定传热系数($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$), 边界条件为 $x = 0, t = t_o$. K 值的确定^[6], 由 $K = 1/[(1/\alpha + 1.13 \sqrt{a\tau/\beta\lambda})]$ 得出, 其中 α 为地道表面放热系数, 当流速较小时, 取 $5.8 \sim 8.0 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$; a 为地道壁体导温系数($m^2 \cdot s^{-1}$); τ 为换热时间, 对于间歇或周期变化通风, 可取 $6.912 \times 10^5 s$; λ 为地道壁体导热系数($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$); β 为地道的形状修正系数, $\beta = 1 + 0.67\pi \sqrt{a\tau/S}$. 将式(2)积分代入边界条件, 得

$$t_i = t_o + (t_e - t_o) \exp(-SKx/GC_p). \quad (3)$$

3 最佳长度的确定

将式(3)代入式(1), 得

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{H(t_e - t_o)}{(273.15 + t_e)} [1 - \exp(-\frac{SKx}{GC_p})]. \quad (4)$$

空气流过该系统的阻力损失为 h_w , $h_w = (fx/d + \xi) \cdot u^2/2g$, 其中 ξ 为局部阻力损失系数, u 为地道断面流速($m \cdot s^{-1}$), d 为地道等效直径(m), f 为沿程阻力损失系数(与地道中的流动状况有关). 由于地道内的自然通风流速常随外界温度波动而不断变化, 且其雷诺数 Re 常大于 4 000, 故由紊流状态下热量、动量的普朗特比拟^[6]得 $f = 0.308Re^{-0.25} = 0.01933d^{-0.25}u^{-0.25}$, 则

$$h_w = (0.01933d^{-1.25}xu^{-0.25} + \xi) \cdot u^2/2g. \quad (5)$$

由 $\Delta p/(\rho g) = h_w$, $G = Sdu\rho_e/4$ 得关系式

$$\frac{2Hg(t_e - t_o)}{273.15 + t_e} [1 - \exp(-\frac{4K(273.15 + t_e)}{353dC_p} \frac{x}{u})] = 0.01933d^{-1.25}xu^{1.75} + \xi u^2. \quad (6)$$

令 $C_1 = 2Hg(t_e - t_o)/(273.15 + t_e)$, $C_2 = 4K(273.15 + t_e)/353dC_p$, $C_3 = 0.01933d^{-1.25}$, 则式(6)变为

$$C_1[1 - \exp(-C_2x/u)] = C_3xu^{1.75} + \xi u^2. \quad (7)$$

将式(7)对 x 求导, 并令 $du/dx = 0$, 整理得地道最佳长度 $L = -[u \ln(C_3u^{2.75}/C_1C_2)]/C_2$. 代入式(7), 整理得关于 u 的方程有

$$1 - \frac{C_3}{C_1C_2}u^{2.75} = -\frac{C_3}{C_1C_2}u^{2.75} \ln(\frac{C_3}{C_1C_2}u^{2.75}) + \frac{\xi}{C_1}u^2. \quad (8)$$

若以 $u^{2.75}$ 代替 u , 并令 $C_3u^{2.75}/C_1C_2 = X$, 则式(8)可进一步简化为

$$1 + C_2 \xi / C_3 - 1/X = \ln X.$$

(9)

通过式(8)或式(9)解出 u 后,即可求出最佳长度(L)之值.值得一提的是,利用式(9)求解 u 与 L 值,会有一定误差.对不同条件进行计算表明, u 通常偏大,而 L 却偏小,但其相对误差一般不会超过10%.因此,式(9)可用于工程的初步概算.

4 各种因素对最佳长度的影响及算例

从上述分析可知,地道进出口高差、地道等效直径、地道外空气温度、当地年平均温度,以及局部阻力系数是影响地道最佳长度的主要因素.为了考察各种影响因素,取圆形断面地道 $\lambda = 1.6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, $\alpha = 8.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, $a = 9.222 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\tau = 6.912 \times 10^5 \text{ s}$,以不同工况进行计算,结果列于表1.表中 u 是对应最佳长度(L)的最大流速.从表1中可清

表1 各种因素对最佳长度的影响

| | | | $\xi = 1.5$ | | | | | | $\xi = 2.0$ | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
| $t_o / (^\circ\text{C})$ | $t_e / (^\circ\text{C})$ | d / m | $H = 14 \text{ m}$ | | $H = 12 \text{ m}$ | | $H = 20 \text{ m}$ | | $H = 14 \text{ m}$ | | $H = 12 \text{ m}$ | | $H = 20 \text{ m}$ | |
| | | | u / m | L / m | u / m | L / m | u / m | L / m | u / m | L / m | u / m | L / m | u / m | L / m |
| 10 | 25 | 1.0 | 0.78 | 114 | 1.22 | 154 | 1.50 | 177 | 0.74 | 124 | 1.17 | 170 | 1.44 | 196 |
| | | 3.0 | 0.80 | 436 | 1.25 | 590 | 1.54 | 678 | 0.76 | 475 | 1.20 | 648 | 1.47 | 746 |
| | | 5.0 | 0.82 | 799 | 1.28 | 1 083 | 1.57 | 1 244 | 0.78 | 869 | 1.22 | 1 187 | 1.50 | 1 368 |
| | 30 | 1.0 | 0.88 | 122 | 1.37 | 165 | 1.68 | 189 | 0.84 | 134 | 1.31 | 182 | 1.62 | 209 |
| | | 3.0 | 0.90 | 467 | 1.40 | 631 | 1.72 | 724 | 0.86 | 510 | 1.34 | 694 | 1.65 | 799 |
| | | 5.0 | 0.92 | 856 | 1.43 | 1 158 | 1.76 | 1 330 | 0.87 | 932 | 1.37 | 1 271 | 1.68 | 1 464 |
| 20 | 30 | 1.0 | 0.66 | 101 | 1.04 | 137 | 1.27 | 157 | 0.63 | 110 | 0.99 | 150 | 1.22 | 173 |
| | | 3.0 | 0.68 | 385 | 1.06 | 522 | 1.30 | 601 | 0.64 | 418 | 1.01 | 572 | 1.25 | 659 |
| | | 5.0 | 0.69 | 704 | 1.08 | 957 | 1.33 | 1 102 | 0.65 | 763 | 1.03 | 1 047 | 1.27 | 1 208 |
| | 35 | 1.0 | 0.78 | 112 | 1.22 | 151 | 1.49 | 174 | 0.74 | 122 | 1.17 | 166 | 1.43 | 191 |
| | | 3.0 | 0.80 | 426 | 1.24 | 577 | 1.52 | 663 | 0.76 | 464 | 1.19 | 633 | 1.47 | 730 |
| | | 5.0 | 0.81 | 780 | 1.27 | 1 059 | 1.56 | 1 217 | 0.77 | 484 | 1.21 | 1 159 | 1.50 | 1 337 |

楚地看到各种因素对最佳长度的影响.最佳长度和流速随着地道进出口高差提高而增加,且增加的速率较大.随着地道外空气温度的增加和当地年平均温度的降低,也即随着温差($t_e - t_o$)的增加而增加,最佳长度和流速都增加,其影响程度几乎与地道进出口高差的影响相同,这也可从式(6)中得到说明.随地道等效直径(d)的增大,最佳长度增加很多,但最大流速却增加很小;局部阻力系数 ξ 增加,使最佳长度增加,但最大流速却减小.因此,利用地道产生自然通风,最适于温度波动较大的地区,设计修建时应尽量避免局部阻力的产生和增大.在满足新风量的条件下,尽量采用等效直径小的断面,这样可以在得到最大流速的同时,减少地道的修建长度.

另外,按文献[6]对地道冷却效率 η 的定义有

$$\eta = (t_i - t_o) / (t_e - t_o) = 1 - \exp(-C_2 L / u),$$

(10)

将式(10)代入表1中各工况进行计算,可得到对应条件下最佳长度处的 η 值.计算结果表明,冷却效率(η)随着 H 的增加而减小,随着 d 的增加而增加,随着 t_e 的增加而减小,随着 ξ 的增

加而增加。

算例 图2所示为重庆某一靠山房屋, 想要在其后部砂岩壁体中修建一等效直径为2 m ($H = 15$ m) 的自然通风直地道, 以便在夏季形成自然凉房, 获得最大通风量, 试确定地道进风口的位置。从图2可知, 求得最佳长度(L)后, 就可得到地道走向和所要确定的距离(B)。由文献[5]的 t_e , t_o , λ 和 α 值代入, 求得 $C_1 = 10.035$, $C_2 = 3.579 \times 10^{-3}$, $C_3 = 8.127 \times 10^{-3}$ 。然后, 取 $\xi = 1.5$ 代入式(8)迭代求解, 得最大流速 $u = 1.236 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和最佳长度 $L = 312 \text{ m}$, $B = \sqrt{L^2 - H^2} = \sqrt{312^2 - 15^2} = 312 \text{ m}$ 。这样就确定了进风口的位置, 避免盲目修建。

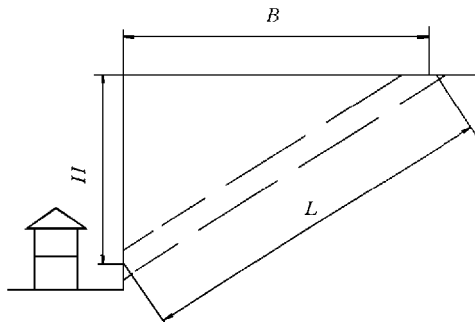


图2 重庆自然通风凉房系统

5 结论

本文从最大自然通风的角度, 对地道长度进行研究, 获得最佳长度的确定方法。并以下几点主要结论: (1) 自然通风地道存在一最佳长度, 使其具有最大的通风能力。(2) 最大通风速度用式(8)进行计算, 对应的最佳长度也可确定。(3) 采用地道自然通风, 温度年较差或温度波动越大的地区, 其效果越好。(4) 设计建造自然通风地道时, 宜尽量提高其进出口高差、减小其等效半径, 竭力消除局部阻力损失。

参 考 文 献

- 1 王 瑞. 深埋冷却风道最佳长度范围的探讨. 地下空间, 1990, 10(3): 214 ~ 219
- 2 王 瑞. 冷却风道经济断面的选择. 地下空间, 1985, 20(3): 30 ~ 37
- 3 牟灵泉. 地道风降温计算与应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. 41 ~ 45
- 4 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1980. 133 ~ 138
- 5 中华人民共和国建设部. GBJ 19-87 采暖通风与空气调节设计规范. 北京: 中国计划出版社, 1991. 144 ~ 148

Deciding the Optimum Length of Tunnel with Natural Ventilation

Ran Maoyu

(Dept. of Arch., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract From the angle of obtaining maximal natural ventilation for a tunnel, the author analyses the necessity of the existence of an optimal length; and advances corresponding method for its determination. Moreover, the author inspects the effects of factors difference in height of inlet and outlet, equivalent diameter of the tunnel, local drag coefficient, and residual temperature of outdoor air relative to annual mean temperature on the optimal length. These are of practical significance for the design, the construction and the economical utilization of an underground system with natural ventilation.

Keywords tunnel, natural ventilation, optimal length