

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-233-06

夏季土壤-空气换热器新风预冷换热性能研究

邱大学¹ 陈 胜¹ 曾 理¹ 赵文静² 王 亮²

(1. 中国华西企业股份有限公司第十二建筑工程公司 成都 610081;

2. 西南科技大学土木工程与建筑学院 绵阳 621010)

【摘 要】 夏季利用土壤-空气换热器新风预冷能有效解决新风负荷大等问题, 构建了土壤空气换热器理论模型, 用于计算地埋管出口空气温度, 通过正交模拟分析了地埋管管径、长度以及新风量对地埋管出口空气温度的影响。结果表明: 地埋管管径极差值最大, 可达 12.43, 是地埋管是土壤空气换热器的主要影响因素, 地埋管长度和新风量为次要因素; 当新风量增大时, 出口温度随之上升; 随着地埋管的管径与长度增大, 出口温度逐渐减小; 在工程设计中, 建议控制管径在 0.2~1.0m、管道长度在 10.0~20.0m。

【关键词】 土壤空气换热器; 地埋管; 新风预处理; 节能

中图分类号 TU834.1 文献标志码 A

Study on Heat Transfer Performance of Fresh Air Precooling of Soil-air Heat Exchanger in Summer

Qiu Daxue¹ Chen Sheng¹ Zeng Li¹ Zhao Wenjing² Wang Liang²

(1. China Huaxi Enterprises Company Limited, 12th Construction Engineering Company, Chengdu, 610081;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

【Abstract】 The fresh air precooling of soil-air heat exchanger can effectively solve the problem of large fresh air load in summer. In this paper, a theoretical model of soil air heat exchanger is constructed to calculate the outlet air temperature of buried pipe. The influence of pipe diameter, length and fresh air volume on the outlet air temperature of buried pipe is analyzed by orthogonal simulation. The results show that the diameter range of the buried pipe is the largest, up to 12.43 m, which is the main influencing factor of the soil air heat exchanger, and the length of the buried pipe and the amount of fresh air are the secondary factors. When the fresh air volume increases, the outlet temperature increases; with the increase of the diameter and length of the buried pipe, the outlet temperature decreases gradually. In the engineering design, it is recommended to control the diameter of the pipe in 0.2 ~ 1.0 m and the length of the pipe in 10.0 ~ 20.0 m.

【Keywords】 EAHE; Buried pipe; Fresh air pretreatment; Energy efficiency

0 引言

随着我国经济建设的快速发展, 人们的生活水平提高, 我国的建筑能耗消耗比例将会提高到 27%, 其中空调能耗占据建筑能耗的 50%~70%, 而其中新风负荷占空调总负荷的 20%~30%^[1]。这种高负荷的空调能耗会造成环境破坏, 不符合节能减排的发展趋势。地道风新风预处理技术是直接利

用浅层地温降温的暖通空调技术之一, 以浅层岩土作为自然冷热源, 利用地道-空气换热器形式对空气进行预处理, 从而降低建筑的空调能耗, 同时也是实现建筑节能的有效手段。因此研究地道风系统对新风预处理的影响具有重要意义。

Ali S^[2]等利用响应面法 (RSM) 统计优化技术, 对土壤-空气换热器进行优化, 通过对管道

作者 (通讯作者) 简介: 邱大学 (1992.08-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 525475425@qq.com

收稿日期: 2024-10-12

长度、管径、风速三个影响变量进行参数化分析得出管道长度、直径以及风速的最佳范围,对实际工程有一定指导作用。岳英俊^[3]等建立了地道风系统换热理论模型,研究了通风时间、空气流速、地道当量直径、地道长度、土壤类型和地道埋深对地道风系统换热性能的影响,并找出试验条件下系统换热性能的最优水平组合,为地道风降升温的设计和工程应用提供了理论基础。为了优化土壤-空气换热器模型,Peñaloza Peña S A^[4]等利用瞬态系统仿真工具,构建了一个数学模型,通过管道长度、直径、材料、厚度和空气质量流量的数学函数对整个系统进行计算。张锡虎^[5]采用的解析方式是设定一种比较稳定的土壤温度来代替地道壁面的温度,将这种概念称之为“热传递厚度”概念。刘希臣^[6]等以数值计算为基础,通过采用单元分割方法对控制方程组进行离散,对气候与地下风道的动态热湿传热进行计算与分析,发现针对不同气候区新风地道均有较好的节能潜力。

然而,目前大部分的研究侧重点都是通过不同的研究方法、模型和运行方式对地道风进行换热性能影响因素的研究,并未涉及到地道风新风预处理影响因素的研究。因此,本文在已有研究的基础上,构建土壤空气换热器理论模型,运用正交模拟试验的方法找出土壤空气换热器系统的主要影响因素,并通过理论计算寻找其对应变化规律,从而为工程设计提供参考。

1 土壤空气换热器理论模型

土壤空气换热器的预冷机制能有效利用土壤温度与外界空气温度之间的差异。根据不同工况引导空气进入地道,并使其与地道壁面进行热交换过程,实现了对出口空气的降温预冷效果。这一机制不仅显著降低了新风系统的负荷,还进一步促进了能源的高效利用,展现了出色的节能潜力。本理论模型系统是通过地道热流边界条件建立圆筒壁地道的热工计算公式,再根据当地地理数据得出出口空气温度与管径的关系式。地道热流的边界条件可根据地道的热工计算公式来确定,其具体表达式为:

$$cm(t_1 - t_2) = K_z A \Delta t \quad (1)$$

式中: c 为空气的比热取值, $1.0 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m 为地道内空气流量, kg/h ; t_1 为室外空气干球温度,

即室外空气初温, $^\circ\text{C}$; t_2 为空气冷却终点温度,即室外空气的终温, $^\circ\text{C}$; A 为地道表面积, m^2 ; K_z 为不稳定传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; Δt 为空气温度和土壤自然温度的差值, $^\circ\text{C}$ 。

根据圆筒壁传热计算方法,可得到地道内壁传热系数表达式:

$$K_z = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{d}{2\lambda} \ln\left(1 + \frac{2\delta_x}{d}\right)} \quad (2)$$

式中: h 为空气与地道壁面的对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ^[5]。当空气流速 $v < 1 \text{ m/s}$ 时,风速较小, h 可取 $5.81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,而当空气流速 $v \geq 1 \text{ m/s}$ 时, h 的计算式为 $h = 6.7 \frac{v^{0.8}}{d^{0.2}}$; d 为地道当量直径, m ; λ 为土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; δ_x 为当量热传递层厚度, m 。

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}\right)} \quad (3)$$

式中: t_0 为土壤的自然温度, $^\circ\text{C}$, 此温度一般比地面气温的全年平均值高 $1.00 \sim 3.00 ^\circ\text{C}$, 所选绵阳地区地面年平均温度为 $16.30 ^\circ\text{C}$, 因此,可取 $t_0 = 18.10 ^\circ\text{C}$ 。

通过计算得出,出口空气温度与管径之间的关系式为^[7]:

$$t_2 = t_0 + (t_1 - t_0) e^{-\frac{4K_z L}{c\rho d v}} \quad (4)$$

新风在地道中进行预处理过程会由于含湿量的变化而产生凝结现象,但是同土壤自身也会存在析水的现象^[8]。为了简化计算,新风在地道中含湿量的变化视为恒定,即新风在地道内只发生了温度变化而湿度未变的等湿冷却过程。因此节能效果与地埋管出口温度的大小有关,即出口温度与室外温度相差越大则预冷效果好,节能效果明显。

2 出口空气温度计算结果

2.1 正交模拟试验

2.1.1 确定正交模拟试验水平值

正交试验设计 (Orthogonal experimental design) 是研究多因素多水平的又一种设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀

分散, 齐整可比”的特点, 正交试验设计是分式析因设计的主要方法。在上述理论模型的基础上, 为验证地埋管长度、新风量和管道直径等因素对地道风预处理效果的影响程度, 本文采取正交模拟试验的方法来确定各因子的影响程度。根据地埋管长度、新风量和管道直径等 3 个因子对地道风预处理效果的影响, 各因子等水平数取 3, 忽略因子间的互相作用, 各因子间进行随机组合, 得到各因子的正交实验水平值, 水平值取值根据工程实际案例的数值进行合理拓展^[9], 如表 1 所示。

表 1 正交模拟试验水平值

Table 1 Orthogonal simulation test level value

水平值	A	B	C
	地道长度/m	新风量/m ³	地道管径/m
水平 1	10	90	0.2
水平 2	15	150	0.4
水平 3	20	210	0.6

2.1.2 正交模拟试验参数表

地埋管长度、新风量和管道直径为本次试验的 3 个影响因子, 分别记为 A、B、C。根据正交模拟试验, 在保证任一因子在任一水平与其他因子的任一水平有且仅相碰一次的前提下, 得到出口空气温度正交模拟试验的试验参数如表 2 所示。

表 2 出口空气温度正交模拟试验参数表

Table 2 Outlet air temperature orthogonal simulation test parameter table

编号	A	B	C	温度
1	10	90	0.2	23.4
2	10	150	0.6	20.7
3	10	210	0.4	24.1
4	15	90	0.6	18.3
5	15	150	0.4	20.7
6	15	210	0.2	25.2
7	20	90	0.4	18.4
8	20	150	0.2	22.3
9	20	210	0.6	19.4

2.1.3 结果分析

各因子的正交模拟试验极差计算结果如表 3 所示, $K1$ 为水平 1 各因子试验结果之和, $K2$ 为水平 2 各因子试验结果之和, $K3$ 为水平 3 各因子试验结果之和, R 为出口空气温度正交模拟试验各因

子的极差值, 可以反映出各影响因子对出口空气温度的影响程度。

表 3 出口空气温度正交模拟试验计算结果

Table 3 Calculation results of outlet air temperature orthogonal simulation test

编号	A	B	C
	地道长度	新风量	地道直径
$K1$	68.28	60.17	70.93
$K2$	64.31	63.71	63.29
$K3$	60.13	68.84	58.5
R	8.15	8.67	12.43

根据表 3 可知: (1) $R_C > R_B > R_A$, 说明管道直径是出口空气温度的主要影响因素, 新风量和地埋管长度和是次要影响因素, 因此设计实际工程时应优先考虑管径对预处理效果的影响, 再考虑新风量, 最后考虑地埋管长度的大小; (2) 对于地埋管管径, 由 $d_{tK1} > d_{tK2} > d_{tK3}$ 得出, 当地埋管管径逐渐增大时, 地埋管出口空气温度随之降低。在保持所需风量恒定的条件下, 地埋管管径的大小影响着地埋管内通风速度。随着管径的增大, 通风流速相应减小, 这一变化促进了空气与地道管壁之间更为充分的热交换过程, 空气能够吸收并带走更多的冷量, 进而导致出口空气的温度进一步降低; (3) 由 $S_{tK1} < S_{tK2} < S_{tK3}$ 可以得出, 随着新风量的逐步增加, 出口空气的温度呈现出逐渐上升的趋势, 说明新风需求的提升直接关联于新风量的增大。单位时间内流经地埋管的风速显著加快, 导致空气与地道内壁面的接触时长大幅缩减, 空气与地道壁进行有效热交换的机会减少, 进而使得出口空气的温度随着新风量的增加而上升; (4) 地埋管长度不同会导致出口温度不同, 由 $L_{tK1} > L_{tK2} > L_{tK3}$ 可知, 地埋管长度逐渐增加, 出口温度逐渐降低。说明埋管长度的增加能进一步加强埋管内气流与管壁之间的换热时间, 进一步促进出口温度的下降。

2.2 理论分析各因素对新风预冷效果的影响

通过正交模拟试验得出, 管道直径是出口空气温度的主要影响因素, 新风量和地埋管长度和是次要影响因素。为进一步探究各因素对新风预冷效果的影响, 设置不同计算参数, 得出相应的结论。

2.2.1 地埋管管径与新风量

在不改变地埋管长度的前提下, 设置计算参数: 地埋管长度为 15m, 夏季室外空气平均温度为

31.8℃, 土壤自然温度设为 18.1℃, 地埋管管径从 0.2~1.4m, 新风量 90~390m³, 计算结果如图 1 所示。

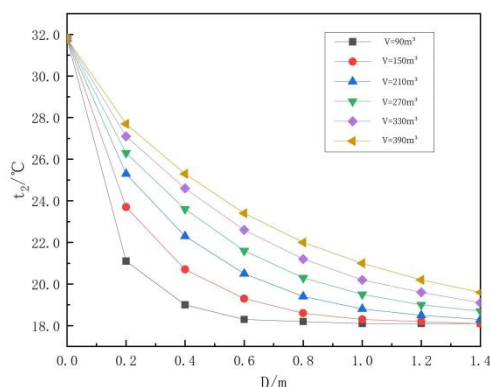
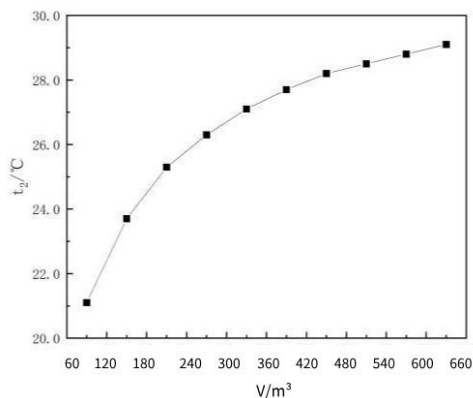


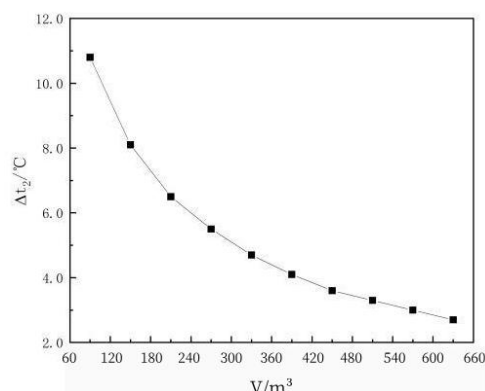
图 1 不同管道管径以及新风量的出口空气温度
Fig.1 The outlet air temperature of different pipe diameters and fresh air volume

从图 1 可以得出, 对于连接同一新风量的地埋管, 随着地埋管管径的增加, 地埋管出口空气温度也随之降低, 当地埋管管径为 0.2~0.6m 时, 出口空气温度降温幅度最大; 地埋管管径为 0.6~1.0m 时, 温度降幅增大程度逐渐减小; 地埋管管径大于 1.0m 后, 出口空气温度降幅变化很小, 出口空气温度基本趋于稳定值。对于不同的新风量来说, 当其风量逐渐增大时, 室外新风通过地道预处理, 出口温度降幅呈现逐渐减小的规律。当新风量为 90~150m³ 时, 出口空气温度降幅最大; 新风量大于 150m³ 时, 出口温度降幅逐渐减小, 若新风量无限增大, 则出口空气温度无限接近于室外空气平均温度。

当管道直径为 0.2m、0.8m 时, 不同新风量对应的出口空气温度及降幅如图 2、图 3 所示。



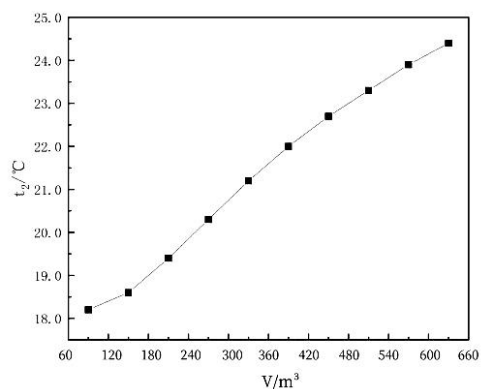
(a) 温度



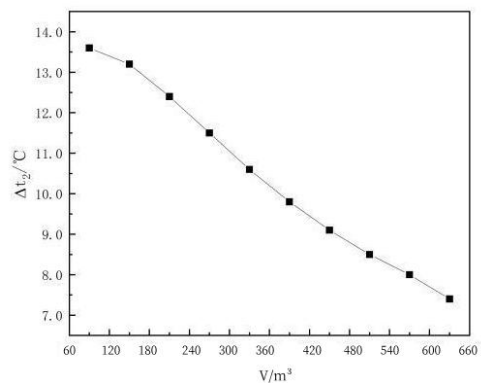
(b) 降幅

图 2 地埋管管径 0.2m 时不同新风量出口空气温度实际值以及降幅

Fig.2 When the diameter of the buried pipe is 0.2 meters, the actual value and the decrease of the air temperature at the outlet of different fresh air volume are different



(a) 温度



(b) 降幅

图 3 地埋管管径 0.8m 时不同新风量出口空气温度实际值以及降幅

Fig.3 When the diameter of the buried pipe is 0.8 meters, the actual value and the decrease of the air temperature at the outlet of different fresh air volume are different

从图 2 中可以得出, 管道直径为 0.2m 时, 新风

量为 90m^3 对应的出口空气温度为 21.1°C , 温度降幅最大, 可以达到 10.8°C ; 新风量为 $90\sim 390\text{m}^3$ 时, 温度降幅减小; 新风量为 390m^3 对应的出口空气温度为 27.7°C , 对应的温度降幅为 4.1°C , 若将新风量继续增大, 出口空气温度降幅变化基本趋于稳定。

从图 3 中可以得出, 管道直径为 0.8m 时, 新风量为 90m^3 对应的温度降幅最大, 可达到 13.6°C ; 随着新风量的增大, 温度降幅逐渐减小; 但无论新风量如何变化, 直径为 0.8m 的温度降幅大于直径为 0.2m 的降幅。

由此可知, 随着新风量的增大, 其出口空气温度会根据不同直径的埋管而发生变化。出口空气温度降温幅度总的来说会随着新风量的增大而减小, 但对于相同新风量来说, 大管径的埋管其降温幅度会比小管径的降温幅度大, 从而得出大管径的埋管预处理效果比小管径的埋管好。这是因为地道的管径越大, 通气速度越小, 空气就能和埋管管壁充分换热, 最终使得空气的降温效果更好。

2.2.2 埋管长度与新风量

在不改变埋管管径的前提下, 设置计算参数: 埋管直径为 0.2m , 夏季室外空气平均温度为 31.8°C , 土壤自然温度设为 18.1°C , 埋管长度从 $5.0\sim 30.0\text{m}$, 新风量 $90\sim 330\text{m}^3$, 计算结果如图 4 所示。

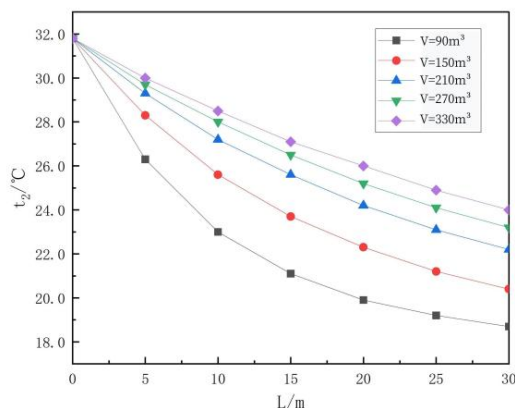


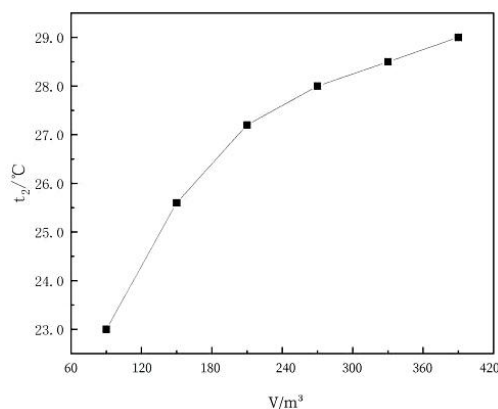
图 4 不同埋管长度以及新风量的出口空气温度

Fig.4 The outlet air temperature of different buried pipe length and fresh air volume

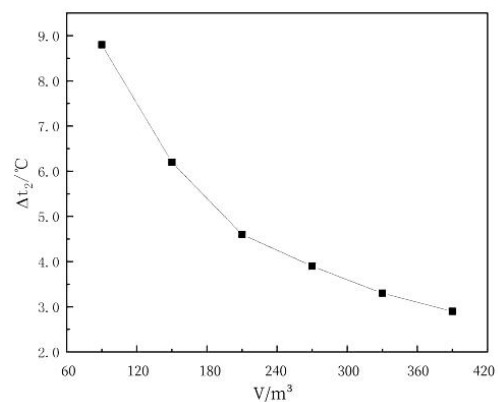
从图 4 可以得出, 若新风量不变时, 出口空气温度随着埋管长度的增加而减小。当地埋管长度为 $0\sim 10\text{m}$ 时, 出口空气温度降幅大; 当长度大于 10m 时, 出口空气温度逐渐趋于稳定。若埋管长度不变时, 出口空气温度随着新风量的增加而增

加。当新风量为 $90\sim 150\text{m}^3$ 时, 出口空气温度降幅最大; 当新风量大于 150m^3 时, 出口空气温度降幅逐渐减小。

当管道长度为 10m 、 20m 时, 不同新风量对应的出口空气温度及降幅如图 5、图 6 所示。



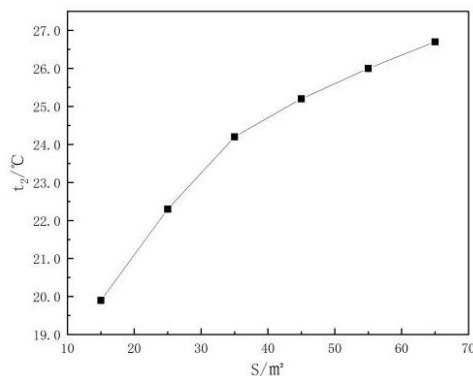
(a) 温度



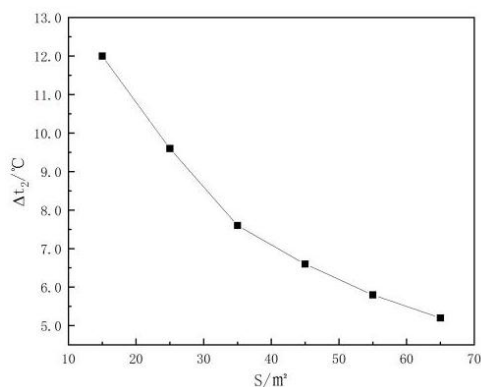
(b) 降幅

图 5 埋管长度为 10m 时不同新风量出口空气温度实际值、降幅

Fig.5 When the length of the buried pipe is 10 meters, the actual value and the decrease of the air temperature at the outlet of different fresh air volume are different



(a) 温度



(b) 降幅

图6 地埋管长度为20m时不同新风量出口空气温度实际值、降幅

Fig.6 When the length of the buried pipe is 20 meters, the actual value and the decrease of the air temperature at the outlet of different fresh air volume are different

从图5中可以得出,地埋管长度为10m时,新风量为 $90.0m^3$ 对应的出口空气温度为 $23.0^\circ C$,温度降幅最大,可以达到 $8.8^\circ C$;新风量为 $90\sim 330m^3$ 时,温度降幅逐渐减小;新风量为 $390m^3$ 对应的出口空气温度为 $29.0^\circ C$,对应的温度降幅为 $2.9^\circ C$,若新风量继续增大,出口空气温度降幅变化基本趋于稳定。

从图6中可以得出,地埋管长度为20m时,同样也是新风量为 $90m^3$ 对应的温度降幅最大,为 $12.0^\circ C$;新风量增加,温度降幅逐渐减小,新风量为 $330m^3$ 时出口空气温度基本趋于稳定;但无论新风量如何变化,长度为20m的温度降幅大于10m的降幅。

由此可知,新风量的增大,其出口空气温度会根据地埋管长度的变化而变化。随着新风量增大,长的地埋管管道出口空气温度降幅大于短的地埋管管道。这是因为,当新风量一定时,随着管道长度的增大,空气与地埋管内壁换热面积增大了,换热量增加,使得空气的降温效果更好。

3 结论

(1) 管径极差值最大,可达 $12.43m$,是地埋管出口空气温度的主要影响因素,也是地道风新风预处理的主要影响因素;新风量和管道长度为次要因素。

(2) 当管径为 $0.2m$ 时,出口空气温度降幅最大,当管径逐渐增大时温度降幅逐渐减小,大于 $1.0m$ 后基本趋于稳定值;管道长度为10m的地埋管对温度影响很大,随着地埋管长度的增加,温度降幅逐渐减小;连接新风量为 $90\sim 150m^3$ 的地埋管对出口温度影响很大,随着新风量的不断增大,地道所需换气量也不断增加,管道出口温度降幅会有所上升温度,但温度仍然比室外温度低。

(3) 在工程设计中,随着新风量不断变化,地道所需换气量也发生改变,地埋管管径与长度都并不是越大越好,为了能够得到舒适的室内环境温度,应使地埋管管径保持在 $0.2\sim 1.0m$ 、管道长度为 $10.0\sim 20.0m$,此时新风预处理降温效果最好,能有效降低能耗。

参考文献:

- [1] 杨艳芳.土壤新风换热系统应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [2] Ali S, Muhammad N, Amin A, et al. Parametric optimization of earth to air heat exchanger using response surface method[J]. Sustainability, 2019,11(11): 3186.
- [3] 岳英俊,闫增峰,倪平安,等.基于正交试验的地道风系统换热性能优化研究[J].暖通空调,2024,54(3):78-85.
- [4] Peñaloza Peña S A, Jaramillo Ibarra J E. Potential applicability of earth to air heat exchanger for cooling in a colombian tropical weather[J]. Buildings, 2021,11(6): 219.
- [5] 张锡虎.地道风降温的热工计算[J].建筑技术通讯(暖通空调),1981,(4):5-11.16
- [6] 刘希臣,王景昱.不同气候区新风地道预处理节能潜力分析[J].制冷,2020,39(3):12-17.
- [7] 宋美艳,王亮.地道风系统地埋管管径对出口空气温度的影响研究[J].热科学与技术,2021,20(1):98-104.
- [8] 周海霞.基于地道风的新风系统节能研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [9] 赵田,庄智,王建军.夏热冬冷地区农村住宅适应性表皮设计策略与热性能提升实证研究[J].建筑科学,2024,40(2):189-197.