

地源热泵系统地中集热器强化传热初步研究

魏加项¹, 唐志伟¹, 丁万磊², 马重芳¹

(1.北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022; 2.山东省鲁商冰轮建筑设计有限公司, 济南 250014)

摘要: 为了增强地中集热器的换热效果,从强化传热的角度对不同的集热器进行了计算说明并与数值模拟结果进行了比较,结果表明,减小管径可以增强地中集热器的换热效果;从地中集热器的结构、载冷剂的种类与性质、回填材料的选择等几方面进行了理论探讨,进而提出了提高地源热泵系统地中集热器换热效果的措施。

关键词: 地源热泵; 地中集热器; 强化传热

中图分类号: TK 523

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2004)01-0055-04

1 地中集热器传热分析

地源热泵系统利用地中集热器冬季从周围土壤中提取热量满足室内供暖要求,夏季把热量排入周围土壤中满足室内制冷要求,因此增强地中集热器的换热效果就显得极为重要。地中集热器的热阻包括管内流体与管壁的对流换热热阻、管壁的导热热阻、管道与土壤的接触热阻以及土壤的导热热阻等。对于管壁导热热阻,由于地中集热器中流体逆流流动,为了能很好的与集热器周围土壤换热并防止两管间产生严重的热短路,现时一般采用导热系数不是很大的塑料管。作者主要从管内对流以及土壤导热方面分析。

一般情况下,对于套管式埋管建立柱热源数学模型,将套管内流体看作热源;对于U型管式地中集热器,将管内流体看作2个异轴热源(见图1)。对2种不同的集热器模型,一般在数学模型中假定:集热器周围土壤均匀分布,物理性质稳定;集热器内同一截面上流体热力性质及物理状态相同;忽略集热器管壁与周围土壤的接触热阻;集热器内流体流态稳定,沿轴向只考虑导热,不考虑对流换热及传质。



图1 竖埋管式地中集热器截面积

Fig.1 The section of energy collector pipe

2 地中集热器结构对换热效果的影响

对光滑管内紊流,迪图斯-贝尔特(Dittus-Boelter)推荐的关联式为^[1]

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} (t_w > t_f) \quad (1)$$

收稿日期: 2003-04-02.

基金项目: 北京市科委基金资助项目(H021820041120).

作者简介: 魏加项(1978-),男,山东潍坊人,博士生.

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3} (t_w < t_f) \quad (2)$$

由于 $Nu = \alpha d / \lambda$, $Re = u_m d / \nu$, $Pr_f = \nu / a$, 其中: α 为对流换热系数; a 为导热系数, $a = \lambda / \rho c$; λ 为流体导热系数; c 为比热; u_m 为管内流速; d 为当量直径; ν 为运动粘度, $\nu = \mu / \rho$. 将各变量带入式(1)可得到

$$\alpha = 0.023 (m_m^{0.8} \rho^{0.8} \lambda^{0.6} c^{0.4} / \mu^{0.4} d^{0.2}) \quad (3)$$

由式(3)知,在不改变流速及温度的条件下,采用小直径的管子能够提高换热系数,考虑到相同周长的圆管与椭圆管相比,椭圆管的断面积和当量直径小,为提高换热效果,可考虑用椭圆管制作地中集热器.

下面就圆管与椭圆管的换热性能作一下比较:假定椭圆形管道内管长半轴 $a = 0.025$ m,短半轴 $b = 0.015$ m,管内流体流量及物性条件相同.

椭圆管内壁周长 U 按下近似式计算

$$U = \pi [1.5(a+b) - \sqrt{ab}] = 3.142 \times [1.5 \times (0.025 + 0.015) - \sqrt{0.025 \times 0.015}] = 0.128 \text{ m}$$

$$\text{椭圆管断面积 } f = \pi ab = 3.142 \times 0.025 \times 0.015 = 1.178 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{椭圆当量直径 } d_c = 4f / U = (4 \times 1.178 \times 10^{-3}) / 0.128 = 0.0368 \text{ m}$$

与椭圆管内壁相同周长的圆管内径 d_0 及断面积 f_0

$$d_0 = U / \pi = 0.128 / 3.142 = 0.0407 \text{ m} \approx 40 \text{ mm}$$

$$f_0 = (\pi / 4) d_0^2 = (3.142 / 4) \times 0.0407^2 = 1.300 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

椭圆管与圆管各项参数比较(圆管用“0”下标):直径比为 $d_c / d_0 = 0.0368 / 0.0407 = 0.9041$,椭圆管缩小近 10%;断面比为 $f / f_0 = 1.178 / 1.300 = 0.9062$;流速比为 $u_m / u_{m0} = d_0^2 / d_c^2 = 0.0407^2 / 0.0368^2 = 1.22$,椭圆管提高 22%; Re 比为 $Re / Re_0 = u_m d_c / u_{m0} d_0 = 1.22 \times 0.9041 = 1.1$; Nu 比为 $Nu / Nu_0 = Re^{0.8} / Re_0^{0.8} = 1.08$; α 比为 $\alpha / \alpha_0 = Nu d_0 / Nu_0 d = 1.08 \times (1 / 0.9041) = 1.19$,椭圆管换热系数提高了 19%;压降比为 $\Delta p / \Delta p_0 = d_0 u_m / d_c u_{m0} = (0.0407 / 0.0368) \times 1.22 = 1.35$,增加了近 35%,这就意味着消耗泵功率将极大的提高.

由上述计算可以看出,采用减小管径的方式可以增强地中集热器的换热效果,作者采用数值计算的方式进行计算也验证了这一结论.由图2可以看出,在环境温度相同的情况下,选取外径 50 mm 的地中集热器,系统运行达到稳定时,内径 d 越小,地中集热器中流体温度变化越快,流体与土壤温度也越接近.但由此带来的将是泵功率也会增加.换热增强可以适当的减少埋管长度,打井费用与管材投资都会减少,但是运行费用会有所增加,在工程实际中应当综合考虑这两方面的因素.

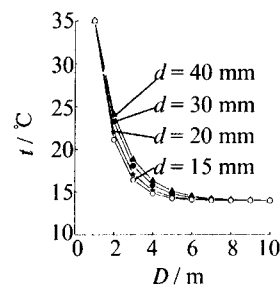


图2 套管式地中集热器不同管径稳定温度比较

Fig.2 The stand temperature in cannula collector

3 热流体性质对地中集热器换热效果的影响

流体与地中集热器管壁的对流传热热阻与流体的流态、物性、壁面的物理性质等有关.其中流体物性包括流体的比热、导热系数、密度、粘度等.导热系数越大的流体,流体内及流体与壁面之间的导热热阻越小,换热就越强;比热与密度越大的流体,单位体积的流体能够携带越多的热量,从而以对流作用传递热量的能力也越高;粘度小的流体,则流体流动性好,换热效果也好.

由式(3)可以看出,流体密度以 0.8 次幂影响换热系数,因此它对管内流体对流换热效果的影响显著,采用密度较大的流体作为工作介质可以增强换热效果.在实际施工过程中,考虑到冬季地中集热器的防冻问题,在工作流体中需要添加防冻剂,用混合溶液作为工作介质,不同的防冻剂溶液由于其物性不同,在相同的地中集热器中将会产生不同的换热效果.

表1列出了一些常用工作介质的换热性能^[21].其中: w 为凝固点为 -10 °C 时防冻液质量分数; C 为相同流量时热泵换热器的传热能力(%); P 为水泵的耗功量(%).

研究表明,同种防冻剂随着浓度的增加,传热效果减弱^[21].在具体施工过程中,应当结合当地防冻剂

市场情况,适当考虑其对换热效果的影响,合理选取防冻剂。

4 冬季结冰对地中集热器换热效果的影响

土壤结冰从直观上来看好像会使地中集热器换热效果减弱,但具体分析结果却并不尽然。因为水结冰时会放出凝结热,不仅会使周围土壤中所含能量增加,并且水结冰后土壤密度变大,土壤换热系数也会增大。研究表明,土壤中水分越多,则在其他条件相同的情况下,结冰后地下埋管周围土壤温度分布越高^[3],这样反而会使地中集热器换热效果加强。并且土壤冻结融化后也会发生一系列的物理性质变化^[4],如天然含水量增加,孔隙比增大,液性指数增大等,这些都会使得水分渗透能力加大,从而增强传质换热。

表2列出了未冻土与冻融土物理性质指标的比较^[5]。由表中各项指标值可以看出,冻融土比未冻土具有更好的传质换热性能。

表1 不同工作介质的换热性能
Tab.1 Heat exchanging characters of different medium

防冻液	w	C/%	P/%
氯化钙	0.15	100	100
氯化钠	0.15	104	83
乙醇	0.19	79	76
乙二醇	0.20	94	84
甲醇	0.17	81	66
醋酸钾	0.18	82	76
碳酸钾	0.20	93	93

表2 未冻土与冻融土物理性质指标比较

Tab.2 The physics character of original state soil and thawing soil

土壤类型	$\varphi(H_2O)/\%$		孔隙比/%	
	未冻土	冻融土	未冻土	冻融土
粘土	42.7	41.9	99	106
亚粘土	38.1	38.5	104	104
粉细砂	26.6	30.3	61	79
粉细砂夹薄层亚粘土	26.7	27.3	60	69

5 回填介质对地中集热器换热效果的影响

现在的回填材料普遍使用水泥砂浆,这样能够防止井洞塌陷,并且不会造成不同层地下水相互串流,不影响地下水水脉,但有可能造成水泥凝固后与周边土壤接触不好,在水泥砂浆凝固后与周围土壤间会有空隙存在,不仅增大了接触热阻,并且空隙内可能会有空气存在,成为隔热层,恶化换热效果,所以回填材料需要适当选择。不仅要求它具有良好的导热性能,并且要求它能够与周围土壤良好地粘结,以减少接触热阻。为防止井洞回填后在井壁处形成过大的接触热阻,在回填材料中添加膨润土。膨润土能吸附8~15倍于本体的水量,吸水后体积膨胀,增大为原体积的几倍到十几倍^[6],膨润土还有蓄热性能^[7]。回填材料中加入膨润土后,能够很好地与周围土壤接触,减少了增加接触热阻的可能性,并且膨润土保持了大量的水分,增加了传质换热,能够强化换热效果。国外有些学者对于可流动回填料做了研究,结果表明,回填料选用可流动介质可以增强换热效果^[8]。

6 结论

为增强地中集热器换热效果,可以采取如下措施:1) 在流量与流速允许的情况下,尽可能选用小管径地中集热器,但是这样会增加泵功率;2) 在满足温度使用要求的前提下,尽可能选择密度较大的流体作为工作介质,并选用浓度较小的防冻剂;3) 施工过程中,建议在回填料中加入膨润土;4) 在回填完成后,装设地下补水系统,给能源井定期补水,可增强传质换热。

地源热泵的地中集热器部分换热情况复杂,不仅与集热器构造和集热器材质有关,还受到当地气候条件、地质条件等的影响。在实际工程中,在合理选材的基础上,还要因地制宜,适当选取能源井深度、集热器管径、载冷剂等,以达到充分利用资源的目的。

参考文献:

- [1] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学 [M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 142.
ZHANG Xi-min, REN Ze-pei, MEI fei-ming. Heat Transfer[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Architecture and Industry Publishing Company, 1993. 142. (in Chinese)
- [2] 曲云霞, 方肇洪, 张林华, 等. 地源热泵系统中防冻液的传热能力分析 [J]. 流体机械, 2002, 30(10): 47-50.
QU Yun-xia, FANG Zhao-hong, ZHANG Lin-hua. The analysis of heat transfer efficiency of antifreeze in GSHP system[J]. Fluid Mechanism, 2002, 30(10): 47-50. (in Chinese)
- [3] 于明志, 方肇洪, 李明钧. 土壤冻结对地热换热器传热的影响 [J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 16(1):42-46.
YU Ming-zhi, FANG Zhao-hong, LI Ming-jun. The effect of the soil freezing to underground heat exchanger[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2001, 16(1): 42-46. (in Chinese)
- [4] 雷汉忠. 冻融土的工程性质及利用 [J]. 煤矿设计, 1994(6): 39-44.
LEI Han-zhong. The engineering character and usage of thawing soil[J]. Colliery Design, 1994(6): 39-44. (in Chinese)
- [5] 杨平. 原状土与冻融土物理力学性能差异性研究 [J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(2): 68-70.
YANG Ping. The physics and dynam otherness study of original state soil with frozen soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2001, 25(2): 68-70. (in Chinese)
- [6] 崔学奇, 吕宪俊, 周国华, 等. 膨润土的性能及其应用 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2002(2): 6-9.
CUI Xue-qi, Lü Xian-jun, ZHOU Guo-hua, et al. The performance and appliance of dilating soil[J]. The China Supplement of Non-metallic Mines, 2000(2): 6-9. (in Chinese)
- [7] 武克忠, 张建玲, 刘晓地. 贮热用膨润土复合材料研究 [J]. 非金属矿, 2000, 23(1): 24-25.
WU Ke-zhong, ZHANG Jian-ling, LIU Xiao-di. The dilating soil compound material study used in heat storing[J]. Non-metallic Mines, 2000, 23(1): 24-25. (in Chinese)
- [8] JONES W V, BEARD J T, RIBANDO R J. Thermal performance of horizontal closed-loop ground-coupled heat pump systems using flowable-fill[J]. Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1996, 2: 748-754.

Preparatory Study of Heat Transfer Enhancement of Energy Collector Pipe in GSHP System

WEI Jia-xiang¹, TANG Zhi-wei¹, DING Wan-lei², MA Chong-fang¹

(1.College of Environment and energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2.Shandong Lushang Moon Architecture Designing Limited Company, Jinan 250014, China)

Abstract: In order to improve the heat transfer efficiency of energy collector pipe, the authors calculate the different energy collectors from the angle of increasing heat transfer efficiency, and compare the calculations with the numeric simulation results. The comparison shows that reducing the pipe radius can improve the heat transfer efficiency of energy collector. The authors also theoretically analyze the structure of energy collector, types and characteristics of secondary refrigerant and selection of backfilled stuff, and put forward the measures to enhance heat transfer efficiency in GSHP system.

Key words: ground source heat pump; energy collector pipe; heat transfer enhancement