

地源热泵的套管式地下换热器研究

3
13-17

王勇 付祥钊
(重庆建筑大学城市建设学院 400045)

TK172

摘要 地源热泵是一种新型的取暖降温技术,可能成为下一世纪冷暖技术的核心,在线热源模型基础上提出了新的传热评价标准平均传热系数的概念,理论上对比分析了套管式和U型管式地下换热器的传热热阻,然后通过二者的对比实验研究,推荐使用套管式换热器。并进一步对套管式地下换热器进行分析研究,找到了影响传热系数的各种因素,提出了需研究的强化地下换热的措施,拟合出了套管式地下换热器的平均传热系数的经验公式。对工程实践有一定的指导作用。

关键词 地源热泵, 地下换热器, 套管式, U型管式
中图分类号 TU111.1

地源热泵以大地作为热源和热汇,热泵的换热器埋入地下,与大地进行冷热交换。由于地源热泵具有可持续发展性,国内外近年来正在加强对它的系统研究^[1]。

地源热泵原理如图1所示,埋入地下孔洞中的换热管一进一回形成回路与大地进行换热。长江流域大部分地区年平均温度维持在十几度,通常冷凝器的夏季出水温度在35~45℃之间,与岩土换热温差可达20~30℃。有利于提高制冷系数,而且不会把热量、水蒸汽及细菌等排入大气环境,造成对环境的损害。冬季运行时,冷凝器变为蒸发器,进行地下换热后蒸发器进水温度远高于室外气温,可显著提高供热系数,不存在气源热泵随气温下降而显著减少及冲霜等问题。地源热泵在冬季从岩土中吸热,夏季向岩土放热,这样冬夏季循环使用,形成了绿色空调。

1 线热源模型

地源热泵研究核心之一是要解决地源——地下换热器的换热问题。地下换热器可模拟为线热源,线热源模型对于解决地下换热器的换热问题是一种比较实用且简化的方法。

将地下换热器模拟为线热源后,地下换热器的换热简化为以换热器中心轴为热源,以该轴为中心呈辐射状向周围传热。如图2所示,由于线热源只有长度量,无面积量,而距线热源不同距离的各个传热面的面积在变化,因此通常以单位传热面积为基础定义的传热系数分析使用不方便。另一方面,在实际运用过程中,总换热量主要取决于换热器的长度。在造价

收稿日期:1997-08-05

王勇 男,1971年生,硕士生

国家自然科学基金资助项目

上,地下换热器部分的成本也主要在于钻孔深度,而换热器本身的成本仅占很少一部分。为了对不同形式的换热器进行比较,引入一个新的概念——平均传热系数,定义为换热器内介质与大地初始温度每相差 1°C 时,通过长度 1 米的孔洞,每秒钟可传递的热量。

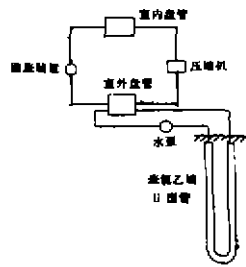


图 1 地源热泵原理图

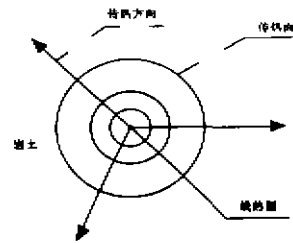


图 2 线热源模型

平均传热系数计算方法如下:

根据下式计算 1 个孔的换热量 $Q = c \cdot m(t_j - t_c)$ (W)

其中: t_j —地下换热器进水温度 $^{\circ}\text{C}$; t_c —地下换热器出水温度 $^{\circ}\text{C}$; c —水的比热 = 4 180 J/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$; m —进入地下换热器水流量 kg/s

每米长孔洞的换热量由下式计算 $q = Q/l$

其中: q —每米长孔洞热量, W/m; l —设置地下换热器孔洞深度, m

又 $q = K(t_p - t_d)$ $t_p = (t_j + t_c)/2$

其中: t_p —换热器中水的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t_d —大地初始温度, $^{\circ}\text{C}$; K —平均换热系数, W/m $\cdot^{\circ}\text{C}$

根据实验数据就可得到一系列 K 值,通过 K 值进行数据分析。

2 实验系统

实验系统如图 3 所示。从加热水箱出来的水经过玻璃转子流量计后,进入地下换热器,经过换热器换热后,直接排放。换热器进出口水温由水银温度计测量,加热水箱的水由加热器加热,水温控制由温控器执行。地温和换热器管壁温度由 7V08 数字采集仪获得,空气温度由水银温度计和 7V08 数字采集仪共同取得。三个孔洞的实验共用一个系统,一号孔和二号孔分别为埋设 U 型换热器,孔洞回灌介质不同,三号孔埋设套管式地下换热器,即在大管中套一小管,进水从大管的一侧进入,主要通过大管管壁与大地换热,换热后的水在大管底部经过小管引出地面。在套管式换热器中同时还安装有一个 U 型换热器。在系统运行前,我们对大地原始温度即初始温度进行了 2 个多月的长期监测,根据监测结果,在以后的实验数据分析中取大地初始温度为 16°C 。

3 套管与 U 型管式地下换热器的对比实验

对比不同换热器换热能力时是以同一孔径作为前提的。其对比的热工参数主要为热阻,在地下换热器的传热地程中存在 6 个阶段对应 6 个热阻。

换热过程的 6 个阶段如下:第一阶段,换热器管内的对流换热过程;第二阶段,换热器管

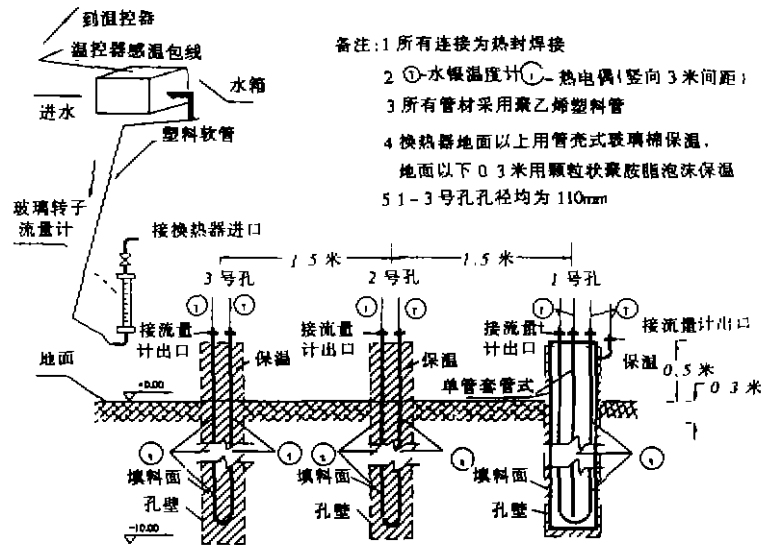


图 3 实验系统图

壁的导热过程；第三阶段，换热器外管壁与回填物之间的传热过程；第四阶段，回填物内部的导热过程；第五阶段，回填物与管孔洞壁之间的传热过程；第六阶段，孔洞周围即大地的不稳定导热过程。对应六个热阻为： R_1 —对流换热热阻； R_2 —导热热阻； R_3 —接触热阻； R_4 —导热热阻； R_5 —接触热阻； R_6 —导热热阻；注意：这里的热阻对应于前面定义的平均传热系数，几何参数不是面积，而是每米孔洞。

根据设定换热条件可计算得 U 型管内水速为接近 0.04 m/s ，套管过流断面为 U 型管的 20 倍，流速更小，在这种小流速下，我们可认为其对流换热系数近似相同。因此，两者热阻的差异主要在于 R_1 、 R_3 、 R_4 ，而 R_1 、 R_3 大小决定于面积，显然，U 型管的 R_1 、 R_3 大于套管，而 R_4 主要决定于回填物的断面积，由于套管式换热器管径比 U 型管换热器大，在相同孔洞中的情况下，显然，U 型管的回填物的热阻大，因此，理论上 U 型管总热阻大于套管式。U 型和套管式换热器的热阻对比如表 1。

在本实验中孔洞直径为 110 mm ；U 型管直径为 25 mm ；套管的大管直径为 90 mm 。我们进行了 U 型管和套管式换热器的对比实验，实验结果与理论结果一致。平均传热系数曲线见图 4。

由图 4 可看出，平均传热系数开始随运行时间下降，经过一段时间后到达一个稳定值。

下降过程可分为两个阶段：第一阶段是进水与实验前换热器中温度与地温一致的水混合，这使出水温度偏低；第二阶段是换热使管外岩土温度逐渐升高，经过一段时间后趋于稳定。对于 U 型管换热器，约 25 小

表 1 热阻对比表

名称	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
U 型管	大	近似为 0	大	大	相同	相同
套管	小	近似为 0	小	小	相同	相同

时后趋于稳定，稳定后的 K 值为 $2.4 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ ，而套管式换热器 6 小时后趋于稳定，稳定后的 K 值为 $2.8 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ ，可见套管式换热器的换热性能高于 U 型管换热器。因此，推荐套管式地下换热器。

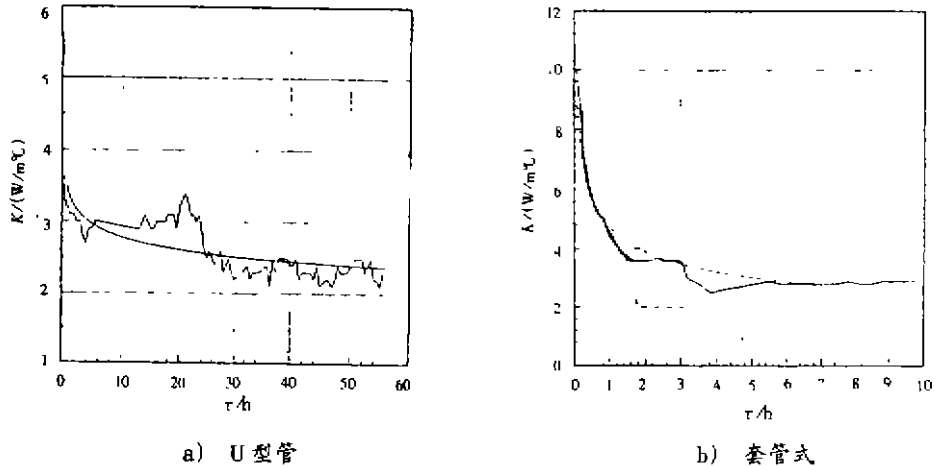


图 4 平均传热系数与运行时间曲线图

4 运行时间和流量对平均传热系数的影响

根据我们的前期研究工作,住宅空调的最长连续运行时间为 18 天。为此进行 18 天的连续试验。控制地下换热器进水温度即冷凝器出水温度在 37℃ 左右。从连续 18 天的运行情况看,运行 6 小时后趋于稳定。实验数据整理为回归方程。

套管式换热器平均传热系数回归方程如下(流量 100 L/h):

$$K = 2.8 + 1.82 \tau^{-0.64} \quad (\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C})$$

U 型管换热器平均传热系数回归方程如下(流量 100 L/h):

$$K = 2.4 + 0.95 \tau^{-0.32} \quad (\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C})$$

式中, τ - 运行时间, h

另外作了实验研究流量变化对平均传热系数的影响。流量变化范围为 40~100 L/h。不同流量下的平均传热系数的稳定值见表 2。

表 2 流量与传热系数对照表

流量 (L/h)	40	50	60	70	80	90	100
传热系数(W/m·°C)	2.14	2.31	2.52	2.68	2.60	2.59	2.78

平均传热系数稳定值随流量变化的回归方程如下: $K = 0.85 l^{0.26}$ (l —流量, L/h)。

5 结 论

本文根据线热源模型,提出了平均传热系数的概念,理论上对比分析了 U 型管式与套管式地下换热器的传热热阻。揭示出套管式热阻比 U 型管式小,然后通过套管式与 U 型管式地下换热器的对比实验,验证了上述结论。对套管式换热器进行了连续 18 天的运行实验。实验结果表明换热器在最初 6 小时内明显属于不稳定换热状况,平均传热系数 K 随运

行时间下降,6小时后趋于稳定,此段时间内可以近似为稳定传热,在实际工程运用中,可以利用这一规律。 K 的稳定值是 $2.8 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。流量变化对 K 有一定影响。另外,由于在不稳定换热状况中平均传热系数 K 较大,那么,对于初始负荷较大的情况下,地下换热器有良好的适应性。

U型管与套管式换热器换热过程均存在“热短路”,即进水的热量传给出水。进出口附近温度相差最大,热短路最严重。如何降低热短路,是以后研究的重点之一。另一方面,在热阻分析过程中我们看到,降低接触热阻,增加回填物的传热性能,也都是需要研究的强化传热的措施。

参 考 文 献

- 1 王勇,付祥钊.地源热泵.国外建筑科学,1997

Research on Thermal Well Type of Heat Exchangers for Ground-Source Heat Pump

Wang Yong Fu Xiangzhao

(Faculty of Urban Construction Engineering, Chongqing Jianzhu University 400045)

Abstract Ground-Source heat pump(GSHP) will be the main form of HVAC's heat source in the next century and the core of the cooling and heating technique being developable continually. On the basis of the model of linear heat source, this paper presents a new evaluation standard of heat-transfer—the average heat-transfer coefficient. Theoretically, heat-transfer resistance of thermal well type is compared with that of vertical U-tube type. Through a comparative analysis of both tests, the use of thermal well type is recommended. Then the factors which influence the heat-transfer coefficient are found by further studying into thermal well type of underground heat-exchanger. Lastly, this paper proposes the measures to better heat transfer under ground and derives the empirical formula about average heat-transfer coefficient which can be used in practice.

Key Words ground-source heat pump, underground heat exchanger

(编辑:袁江)