

武汉地区地源热泵系统的运行测试与分析

武汉市建筑设计院 陈焰华[★] 於仲义

华中科技大学 胡平放 雷 飞 孙启明 江章宁

摘要 对武汉地区典型住宅小区地下水地源热泵系统和地埋管地源热泵系统的运行测试数据进行了分析,获得了地源热泵系统夏、冬季工况下用户侧和地下侧的供回水温度变化规律、机组与系统的 COP 及运行费用。

关键词 地下水地源热泵 地埋管地源热泵 系统测试 性能系数

Operation testing and analysis of ground-source heat pump systems in Wuhan area

By Chen Yanhua[★], Yu Zhongyi, Hu Pingfang, Lei Fei, Sun Qiming and Jiang Zhangning

Abstract Analyses operation testing data of groundwater heat pump system and ground heat pump system served for representative quarters in this area. Obtains the variation patterns of supply and return water temperature in user-side and underground-side, coefficient of performance (COP) for heat pump units and systems as well as working costs in summer and winter conditions.

Keywords groundwater heat pump, ground heat pump, system testing, coefficient of performance (COP)

① ★ Wuhan Architectural Design Institute, Wuhan, China



陈焰华

主要设计业绩

- ▶ 武汉东湖宾馆
- ▶ 武汉瑞通广场
- ▶ 武汉群光广场
- ▶ 武汉销品茂商城
- ▶ 武汉塔子湖全民健身中心

0 引言

虽然地源热泵空调系统凭借其节能、环保等优点受到人们愈来愈多的关注,但由于缺少长时间使用情况下的运行监测数据,导致设计上存在某些误区,影响了该技术优势的发挥。本文通过对武汉地区典型住宅小区的地下水和地埋管地源热泵空调系统运行测试及运行工况分析,为地源热泵空调系统的优化设计和可靠运行提供基础数据和设计参考。

1 工程概况

1.1 香榭里花园地下水地源热泵系统

武汉香榭里花园位于汉口香港路,总建筑面积为 40 856 m²,空调设计总冷负荷为 3 687 kW,热负荷为 2 950 kW。场地内赋存丰富的地下承压水,开发利用条件极好^[1]。场地地层为第四系全新统冲积层,含水层总厚度为 29 m,其中主要含水层厚度为 11 m,分布在中下部,自上而下分布为:细砂,深度 35.0~40.0 m,主要含水层;含砾中粗砂,深度 40.0~43.0 m,砾径一般为 0.5~1.0 cm,主要含水层;砂砾石,深度 43.0~46.0 m,以砾石为主,砾径一般为 1.0~5.0 cm,最大达 12 cm,磨圆度好,主要含水层。该工程利用地下水作为地源热

①☆ 陈焰华,男,1963 年 11 月生,大学,工学学士,教授级高级工程师,设备所所长,暖通总工程师

430014 武汉市汉口四唯路 8 号武汉市建筑设计院
(027) 82739230

E-mail: chenyl918@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-03-25

修回日期:2009-05-07

泵空调系统的热源、热汇,采用直接取水、间接利用的方案。设计取水井 3 口,每口井取水量 1 000 m³/d,呈三角形布设,井深 47.0 m,间距 80~120 m;设计回灌井 5 口,每口井回灌水量 600 m³/d,总回灌水量 3 000 m³/d,呈梅花形布置,井深 47.0 m,井间距均大于 40 m。该工程于 2002 年 11 月竣工投入使用,几年来使用效果良好,回灌率为 100%,通过水位观测井监测到的抽水井与回灌井水位正常,水质无明显异常,建筑物沉降观测也均无异常。

1.2 清江花园地埋管地源热泵系统

清江花园小区位于武昌中南路,总建筑面积为 38 000 m²,空调最大设计冷负荷 1 560 kW,热负荷 1 000 kW,并提供生活热水。鉴于小区内埋管可用面积限制,采用竖直地埋管地源热泵系统。在小区中心花园地下车库底部共埋设单 U 形 HDPE 地埋管换热器 32 000 m,布设 200 多个钻井,井深在 65~80 m 之间,埋管与周围岩土体间的空隙部分充实回填材料^[2]。该工程于 2004 年 5 月正式竣工,调试验收并交付使用。

2 测试内容及数据处理

2.1 测试内容

测试系统包括监测部分与数据采集部分。监测部分主要包括温度、流量、压力传感元件等,数据采集包括工控机及数据处理软件。在用户侧和地下侧管路上共设置 4 个测温点,采用 Pt1000 铂热电阻作为测温元件;流量测量采用了超声波流量计并利用频率变送器将流量信号转变为电信号;地埋管管壁附近的岩土体温度变化采用 Pt100 铂电阻测量。压缩机、循环水泵、风机盘管等的电耗采用电表测定。测试仪器、仪表在测试之前进行了标定。

测试工作于 2007 年 5~8 月、2007 年 12 月至 2008 年 3 月进行,包括了一整年的冬、夏两季。实时采集地埋管进出水温度、流量;系统末端进出水温度、流量;室内温度,室外气温等。另外通过计量主机、水泵用电量和用户末端的用电量得到整个系统的总用电量。测试过程参考了地源热泵有关规范的要求^[3]。

2.2 数据处理方法

根据能量守恒,热泵机组的制冷量、制热量通过测量热泵机组用户侧进、出口水温和相应的流量

得到。地下侧排热量、取热量通过地下侧进、出口水温差及流量得到。通过测试数据处理可获得地源热泵系统的能效比、供热量,选用地源热泵空调系统运行有效数据进行计算。

2.2.1 用户侧供冷量、供热量

$$Q_1 = \rho_1 V_1 c_{p1} (t_{out1} - t_{in1}) \quad (1)$$

式中 Q_1 ——用户侧供冷(热)量,正值为供热,负值为供冷, kW;

ρ_1 ——用户侧水的密度, kg/m³;

V_1 ——用户侧水的体积流量, m³/s;

c_{p1} ——用户侧水的比热容, kJ/(kg·°C);

t_{in1}, t_{out1} ——机组末端侧进、出口水温, °C。

2.2.2 地下侧排热量、取热量

$$Q_2 = \rho_2 V_2 c_{p2} (t_{out2} - t_{in2}) \quad (2)$$

式中 Q_2 ——地下侧排(取)热量,正值为取热,负值为排热, kW;

ρ_2 ——地下侧水的密度, kg/m³;

V_2 ——地下侧水的体积流量, m³/s;

c_{p2} ——地下侧水的比热容, kJ/(kg·°C);

t_{in2}, t_{out2} ——埋管的进、出口水温, °C。

2.2.3 机组的性能系数

$$COP_1 = \frac{Q_1}{P_1} \quad (3)$$

式中 COP_1 ——机组的性能系数;

P_1 ——热泵机组的输入功率, kW。

2.2.4 地源热泵系统的性能系数

$$COP_2 = \frac{Q_1}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (4)$$

式中 COP_2 ——地源热泵系统的性能系数;

$P_1 + P_2 + P_3$ ——系统总耗功率,包括热泵主机 P_1 、水泵 P_2 、空调末端 P_3 。

3 测试结果与分析

3.1 香榭里花园

3.1.1 地下水侧供回水温度变化

从图 1, 2 可以看出,相对于温度变化较大的夏、冬季室外空气,地下水夏季温度较低,冬季温度较高,作为热源具有较高的“品位”,更适宜作为热泵的冷源。

在夏、冬季运行测试阶段,地下水侧的供回水温度均在正常范围内波动。在一定的地下水流量条件下,冬季进入热泵机组蒸发器的温度基本为 13.7 °C 左右,夏季冷凝器的进水温度基本为 25 °C

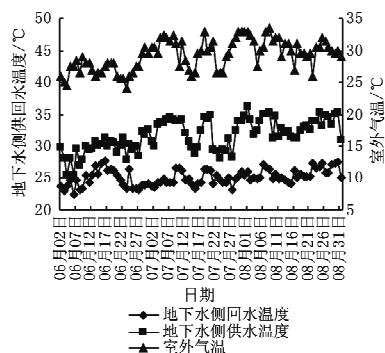


图 1 香榭里花园小区夏季地下水侧供回水温度变化

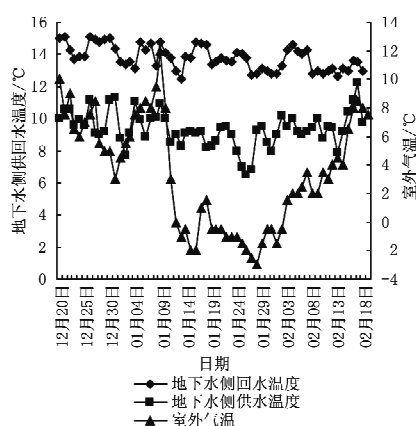


图 2 香榭里花园小区冬季地下水侧供回水温度变化

左右,而相应的出水温度由于受室内负荷动态变化的影响出现一定的波动。对应于香榭里花园小区冬季负荷小于夏季负荷的特征,在相同流量的条件下,冬季地下水的进出口平均温差为 4.6°C ,夏季地下水的进出口平均温差为 6.6°C ,建筑物在冬季的取热量小于夏季排热量 30%。

3.1.2 用户侧供回水温度变化

图 3,4 为香榭里花园小区用户侧供回水温度变化情况。在室外气温动态变化的影响下,室内空调供热负荷随之变化,用户侧供回水温度均发生一

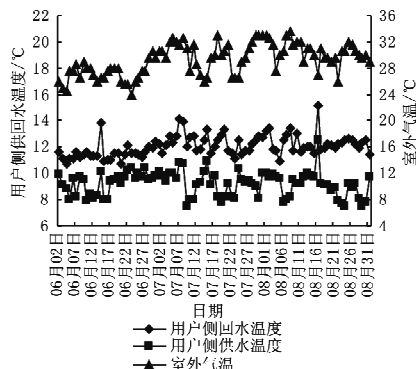


图 3 香榭里花园小区夏季用户侧供回水温度变化

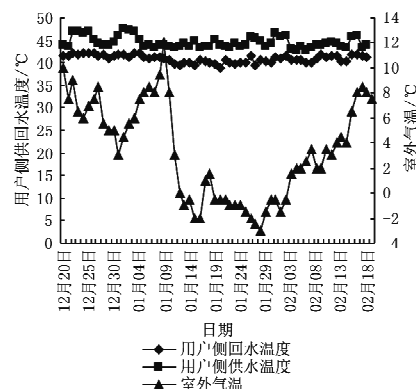


图 4 香榭里花园小区冬季用户侧供回水温度变化

定程度的波动。夏季用户侧的供水温度基本在 9.2°C 左右,冬季用户侧的供水温度在 45.6°C 左右;而冬季用户侧的进出口水温平均温差为 4.4°C ,夏季用户侧的进出口水温平均温差为 2.87°C ,且波动范围较小。夏季工况用户侧进出口平均温差小于冬季工况,主要是由于空调冷负荷大于热负荷,过度调节管道水流量导致的。

3.1.3 机组及系统性能系数

地源热泵系统的最大理论优势在于其节能特性,为定量研究地源热泵系统的这一特性,下面将根据地源热泵系统 COP_2 和热泵机组 COP_1 两个不同指标进行分析比较。

图 5,6 为香榭里花园小区夏、冬两季机组及系统的性能系数变化图。

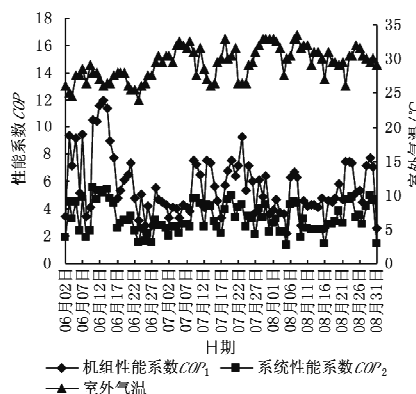


图 5 香榭里花园小区夏季机组及系统的性能系数变化

从图 5,6 的实测结果来看,采用地源热泵技术能使空调系统的热泵主机处于更好的工作压力范围内(高的蒸发温度和低的冷凝温度),因而压缩机的 COP 值远远大于传统空气源热泵机组;虽然地源热泵系统的 COP 值并不很大,但还是要大于空气源热泵机组的 COP 值,具有较好的节能效果。

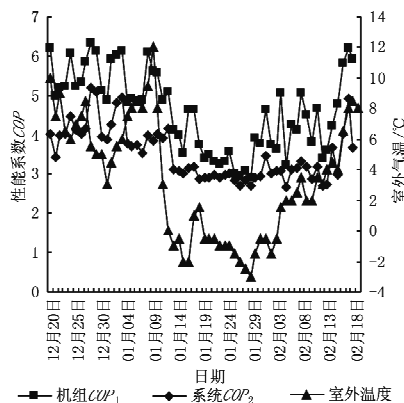


图6 香榭里花园小区冬季机组及系统的性能系数变化

综合计算地源热泵系统正常运行期间的性能系数测试值,冬季机组平均COP值为4.59,系统平均COP值为3.52;而夏季机组平均COP值为4.90,系统平均COP值为3.70。

3.1.4 室内热环境与运行费用分析

通过对香榭里花园小区的室内温度和热环境进行调查和分析,发现建筑物内的热舒适状况普遍良好,基本满足设计要求。

夏季:取6月2日至8月31日数据分析,91天内,耗电553 180 kWh,按平均0.75元/(kWh)计,电费414 885元,折合0.112元/(m²·d)。

冬季:取12月20日至2月18日数据分析,61天内,共耗电332 740 kWh,按平均0.75元/(kWh)计,电费249 555元,折合0.100元/(m²·d)。

可见地下水地源热泵系统比一般集中空调系统供暖、供冷费用均低^[4]。

3.2 清江花园

3.2.1 清江花园岩土体温度

地下岩土体的初始温度及热泵运行过程中温度场变化会对地源热泵系统的运行性能产生极大影响。因此对地下岩土体温度变化的观测研究也极其重要。由预埋设在埋管周围的热电阻记录得到的夏、冬两季地下岩土体的平均温度及由气象资料获得的室外气温(日均值)见图7,8。

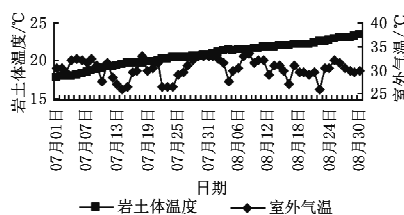


图7 夏季地下岩土体温度和室外气温

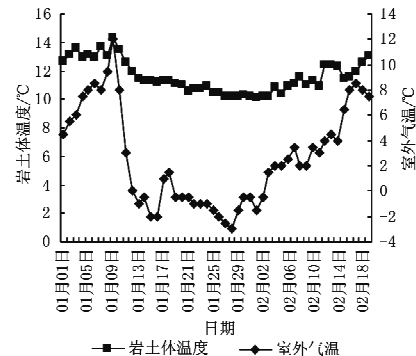


图8 冬季地下岩土体温度和室外气温

由图7可知,在夏季测试期间地下岩土体温度随运行时间呈上升趋势,最高值和最低值分别为23.4℃和17.9℃,均在正常范围内,地下岩土体温度变化幅度和趋势同室外气温(日均值)关联不大,在岩土体表面一定深度范围内的岩土体温度已不再受室外气温的干扰。岩土体温度主要受排入到地下岩土体的热量影响,空调系统运行时间越长,累积热量越多,岩土体温度也随之逐步上升。在图8中的冬季测试时间内,岩土体的温度大致呈现逐步下降的趋势,其原因为气温越低,所需供热量越大,从地下岩土体取得的热量也就越大,岩土体温度也随之下降。最高值和最低值分别为14.3℃和10.1℃,并未出现急剧变化,均在正常范围内。在测试后期,岩土体温度表现出小幅度上升现象,主要是因为这一时间段内室外气温相对于之前时间有了较大幅度的回升,大部分空调处于间歇开启或关闭状态,岩土体具备了一定的恢复时间,岩土体温度开始逐步升高。

3.2.2 用户侧供回水温度变化

图9,10为清江花园用户侧供回水温度变化情况。在室外气温动态变化的影响下,用户侧供回水

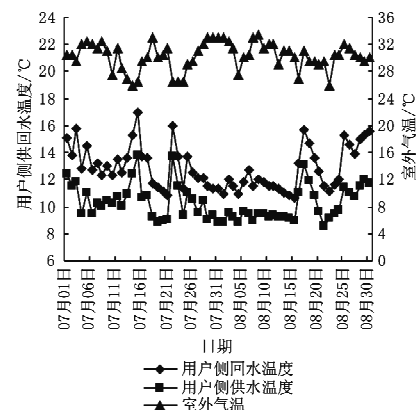


图9 清江花园夏季用户侧供回水温度变化

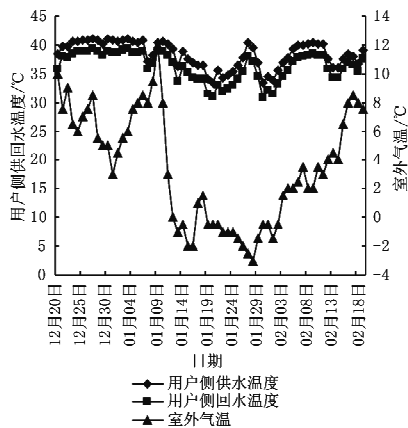


图 10 清江花园冬季用户侧供回水温度变化

温度也随之波动。夏季用户侧的供水温度基本处在 10.3°C 左右,冬季用户侧的供水温度在 40.0°C 左右;而冬季用户侧的进出口水平均温差为 2.08°C ,夏季用户侧的进出口水平均温差为 2.57°C ,且温差波动范围较小。

3.2.3 地埋管侧供回水温度变化

由图 11,12 可知,在地埋管地源热泵系统运行测试阶段,埋管侧的供回水温度均在正常范围内波

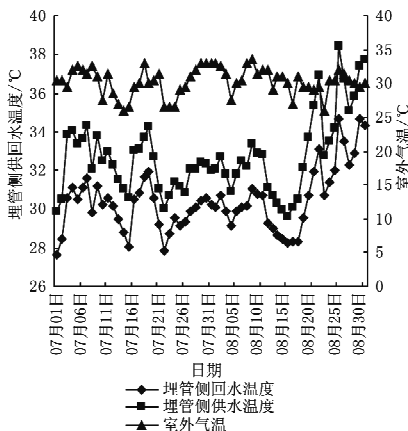


图 11 清江花园夏季埋管侧供回水温度变化

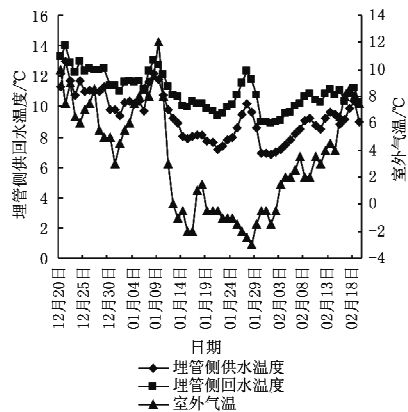


图 12 清江花园冬季埋管侧供回水温度变化

动。夏季工况下地埋管的供水温度在 30.4°C 左右,回水温度在 33°C 左右。地埋管侧的进出口水平均温差为 2.31°C 。采用式(2)计算可知,夏季室外气温越高,单位井深的排热量越大,供给用户侧的冷量也就越大,最大值和最小值分别为 82.9 W 和 29.6 W ,均值为 49.5 W 。冬季工况下地埋管供水温度基本上在 11°C 左右,回水温度基本上在 9.3°C 左右,进出口水平均温差为 1.67°C 。同样采用式(2)计算可知,单位井深取热量最大值和最小值分别为 69.2 W 和 36.6 W ,均值为 48.6 W 。

3.2.4 机组及系统性能系数

由图 13 可以看出,机组和系统的性能系数波动较大。原因可能是因为 COP 与室外温度、用户的入住率以及末端的使用率有一定的关系。经过计算,夏季整个地源热泵正常运行测试期间的机组平均 COP 值为 5.00 ,系统平均 COP 值为 3.54 。

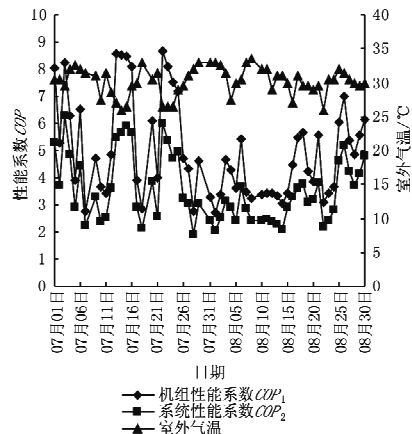


图 13 清江花园夏季机组及系统的性能系数变化

由于 2007—2008 年冬季武汉出现罕见冰雪灾害,严寒气候期间,机组多次检修及临时加装加热器,致使机组冬季 COP 出现较大波动,选取大雪前正常运行某时间段(2007 年 12 月 20 日~2008 年 1 月 12 日)进行分析,由图 14 可以看出,此期间的机组平均 COP 值为 4.03 ,系统平均 COP 值为 3.15 。

3.2.5 室内热环境与运行费用分析

对清江花园小区住宅室内热环境进行了抽样调查和测试。一般情况下均能满足设计要求,但在少数极端天气(偏热、偏冷)时出现了室内温度偏高或偏低现象。经过分析,认为主要原因为地埋管数量略有不足,而根源在于供埋管的空地不够。

夏季:取 7 月 1 日至 8 月 30 日数据分析,61

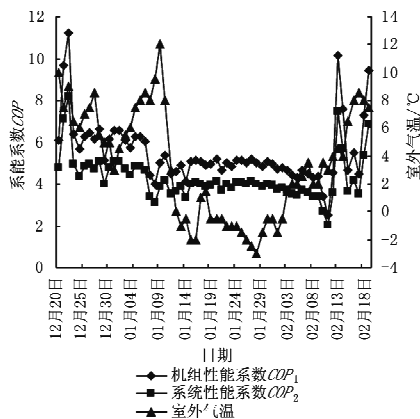


图 14 清江花园冬季机组及系统的性能系数变化

天内,耗电 368 680 kWh,按平均 0.75 元/(kWh)计,电费 276 510 元,折合 0.12 元/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)。

冬季:取 12 月 20 日至 2 月 18 日数据分析,61 天内,共耗电 418 160 kWh,按平均 0.75 元/(kWh)计,电费 313 620 元,折合 0.135 元/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)。

可见,地埋管地源热泵系统比一般集中空调系统供暖、供冷费用均低^[4]。

4 结论

4.1 从冬、夏两季末端供热水、冷水温度,地下埋管侧供水、回水温度等参数看,地源热泵系统总体运行平稳正常。

4.2 地下水供水温度变化同室外气温变化趋势关联不大,回水温度受室内负荷影响而发生变化。地下岩土体温度受室外气温变化的影响较明显,且夏季呈升高趋势,冬季呈降低趋势。

4.3 对于地下水地源热泵系统而言,夏季地下水侧供水温度为 25 °C 左右,用户侧供水温度为 9.2 °C 左右,冬季分别为 13.7 °C 和 45.6 °C 左右,对应的进出口水平均温差夏季分别为 6.6 °C 和 2.87

°C,冬季分别为 4.6 °C 和 4.4 °C;对于地埋管地源热泵系统而言,地埋管的冬季供水温度为 11 °C 左右,用户侧的供水温度为 40.0 °C 左右,对应的进出口水平均温差分别为 1.67 °C 和 2.08 °C,夏季地埋管的供水温度为 30.4 °C 左右,回水温度为 33 °C 左右。用户侧的供水温度为 10.3 °C 左右,回水温度为 13 °C 左右。地埋管和用户侧的进出口水平均温差分别为 2.31 °C 和 2.57 °C。可见,地源热泵系统的换热情况比较稳定,比一般的空气源热泵要好。

4.4 地埋管地源热泵系统平均 COP 值夏季为 3.54,冬季为 3.15,比空气源热泵(2.3~2.6)高出近 40%。而地下水地源热泵系统平均 COP 值夏季为 3.7 左右,冬季为 3.52 左右,不仅高于常规空调系统的 COP,而且高于地埋管地源热泵空调系统的 COP 值,这也说明了地下水地源热泵系统较地埋管地源热泵空调系统具有更好的技术性能。香榭里花园小区为单位职工住宅,入住率较高,且有 8 500 m^2 的办公建筑,其负荷强度和使用时间均大于作为商品住宅的清江花园。若剔除以上影响因素,地下水地源热泵系统的能效比将更高于地埋管地源热泵系统。

参考文献:

- [1] 陈焰华,祁传斌. 武汉香榭里花园水源热泵空调系统设计[J]. 暖通空调,2006,36(3):82-85
- [2] 陈焰华. 高层建筑空调设计实例[M]. 北京:机械工业出版社,2005:274-278
- [3] 中国建筑科学研究院. GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [4] 张信树,刘泽华,陈北领,等. 某写字楼地源热泵冬季供暖性能测试及节能分析[J]. 制冷空调与电力机械,2007,28(3):30-33

(上接第 105 页)

O_2 经风机盘管处理至 K_2 送出。这种处理过程中新风机负担新风冷负荷、湿负荷及室内湿负荷和部分室内冷负荷,风机盘管则只负担部分室内冷负荷。使风机盘管处于干工况运行,这样强化新风的除湿处理做法,是一种减少室内病菌滋生的有效措施。

比较方案 1、2 可知,在防菌方面方案 2 优于方案 1,但方案 2 也有许多局限性。首先,这种新风处理方式会大大加重新风机的负担;其次,为满足冬、夏工况转换需配备两套盘管。使得新风机的选

型较大,导致新风机布置不灵活,并会占用较大的新风机房空间。综合考虑各种因素,设计最终采用了方案 2。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. 传染病医院建筑设计规范(讨论稿)[S], 2004
- [2] 胡吉士. 医院洁净空调设计与运行管理[M]. 北京:机械工业出版社,2004
- [3] 梅自力. 医疗建筑空调设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991
- [4] 陆耀庆. 供热通风设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987