

利用地热资源发展低温热泵技术

苑中显 姜明健

北京工业大学环境与能源工程学院 (北京 100022)

摘要 针对北京市的“能源结构调整及清洁燃烧技术产业化工程”，在分析北京地区地热资源的基础上，讨论了在北京地区利用地热能发展热泵供热技术的可能性。指出了发展地热热泵所必须解决的几个技术难题及其解决对策。

关键词 北京 地热 热泵

1 引言

能源生产与消费在国民经济中占有举足轻重的地位，新中国成立后我国的能源工业取得了长足进展，但是，由于受自然资源客观条件的限制，我国的能源生产与消费结构极不合理，污染严重的煤炭占有很大比重。据统计，1993年世界能源消费结构是：石油占40%，煤炭占27%，天然气占23%，而我国的煤炭消费在总能源中占到75%^[1]，成为环境污染的主要因素。

由于上述同样原因，北京市已成为世界上受污染严重的首都之一。为改善北京市的环境状况，政府斥资36亿元建设了“陕甘宁气田天然气进京工程。”该工程建成后，所供应的天然气折合150万吨标煤，在北京市4200万吨标煤的总能量消耗中占3.6%左右，而煤炭消费为2800万吨标煤，占67%。与世界能源消费结构相比，较清洁的天然气消费量所占比例仍存在巨大差距。为进一步改善北京市的能源消费结构，北京市科学技术委员会在1999年12月公布的《北京市高新技术发展规划》中提出了包括“能源结构调整及清洁燃烧技术产业化工程”的“首都二四八重大创新工程”，力图利用新能源与新技术达到使北京环境状况改善的目的。

根据近几十年来对北京市地热资源的普查与勘探结果，北京市具有丰富的地热资源，是世界上少数几个拥有可利用的地热资源的首都之一^[2]，具备利用清洁的地热能源的客观条件。另一方面，北京市的地热水温度一般不超过65℃，属于低温地热能，除用于洗浴外，用于采暖或工业生产供热品位嫌低。如果能够利用热泵技术将地热能的品位提高

的话，则北京地区地热能的应用范围将大大增加，从而为实现“首都二四八重大创新工程”作出贡献。

2 北京市地热资源简介

北京地区的地热田包括四部分：位于延庆县的胡家营地热田、位于昌平区的小汤山地热田、首都机场地热田和东南城区地热田，总面积为300平方公里左右。其中以东南城区地热田面积最大，约100平方公里，因此它对北京市清洁能源的开发利用具有重要意义。东南城区地温分布见图1所示^[2]。

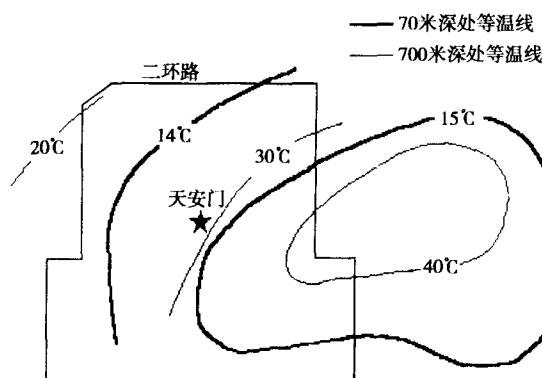


图1 北京东南城区地热田的地温分布

图1所示深70米处温度大于15℃圈定的地热异常区域面积约为30平方公里（地温受气候影响的深度约为50米左右）。但从可开采利用的角度界定，西北方向以热储埋深2000米、温度70℃为界，东南方向以热储埋深500米、温度40℃为界，则地热田面积为100平方公里左右。

北京东南城区地热田是上、中元古界基岩的凸起部位，埋深一般在600~1500米左右。地热田的

《化工设备与防腐蚀》2000年第5期(总第17期)

导水系数和渗透系数较大，透水性强，而储水系数和孔隙度较小，属典型的裂隙渗透热储类型地热田。根据中国科学院地质研究所地热室的测定评估，北京城区地热田热储中每年可开采的热能为 2.4×10^{12} 大卡，折合标煤 34 万吨。技术经济性比较表明，与锅炉供热系统相比，在北京城区采用 65°C 的地热水供热每平方米采暖面积耗资低 22%^[2]。如果进一步将环保效益考虑在内，则地热水采暖的优势将会更加明显，因此，在北京市利用地下热水供热具有广阔的开发前景。

3 水源热泵技术

如前所述，北京地区的地热水温度较低，限制了它的应用范围。以我国现行的热水采暖为例，供、回水温度一般为 $95/70^\circ\text{C}$ ，以 60°C 左右的地热水直接送入采暖系统显然不能满足要求。其他一些工业应用，如食品、纺织、造纸等工艺过程也要求 70°C 以上的热水供应，因此，如何合理地将地热水的品位提高是地热能利用中的一个关键技术问题。当然，将地热水送入锅炉进一步加热后使用未尝不可，但这样在利用地热能的同时也引入了锅炉燃烧污染。从节能与环保的综合角度来考虑，采用水源热泵技术来有效利用地热能可以说是一条最佳途径。

热泵按其消耗能量的形式分为压缩式热泵和吸收式热泵两种。压缩式热泵需要压缩机消耗电能，吸收式热泵不需要耗电，但需要一个高温热源（温度要高于热泵供热温度）供热。吸收式热泵的制热系数与高温热源的温度 T_g 有关，当 T_g 不高时，吸收式热泵的制热系数会比压缩式热泵差很多。分析表明，当 $T_g < 150^\circ\text{C}$ 时吸收式热泵在能量利用上并不经济^[3]，这时如果目的是为了供热，不如把高温热源通过简单的换热器直接向用户供热。究其原因，是因为低温热源是做功能力太差。

在低温地热能利用中可考虑采用压缩式水—水热泵，其工作原理见图 2。呈低压蒸汽状态的热泵工质，经压缩机压缩后成为高温高压汽态介质，被送入冷凝器冷凝，在平均温度 T_H 下放出凝结热 Q_H 后成为低温高压液体，再经过节流阀节流成为低温低压液体，从而具备了吸热汽化的能力，将其送入蒸发器在平均温度 T_L 下从地热水中吸取 Q_L 的热量。吸热汽化后的低压蒸汽重新被送入压缩机压缩，开始新的循环。在忽略各种损失的条件下，热泵工质放给供热热水的热量 Q_H 等于它从地热水中

吸取的热量 Q_L 与压缩机输入功率 W 之和：

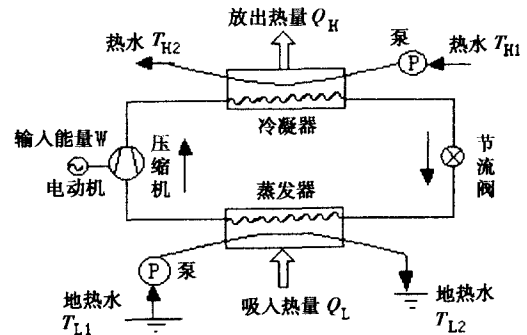


图 2 压缩式水—水热泵工作原理示意图

$$Q_H = W + Q_L \quad (1)$$

定义热泵的制热系数为：

$$\eta = \frac{Q_H}{W} \quad (2)$$

可见热泵的制热系数永远大于 1。 η 愈大，说明热泵的工作性能愈好。从物理意义上说，在热泵系统中输入一定的机械功 W 后，它就可以把 Q_L 的热量从低温热源（此处为地热水）送到高温热源，同时机械功 W 也变为热能进入高温热源，其结果是热能的品位由低变高了。

根据热力学分析可知，工作在温度为 T_H 的高温热源和温度为 T_L 的低温热源之间的热泵，在可逆条件下达到最大制热效果，这时 η 为：

$$\eta_{\max} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (3)$$

实际的热泵不可能工作在可逆条件下，冷凝器和蒸发器中传热温差的存在，以及节流过程，均会造成巨大的不可逆损失，从而大大降低热泵的制热系数。据保守的估计，单是传热温差一项，就可使 η 减小达 50%^[4]。实际热泵对理想可逆热泵的偏离，主要就发生在冷凝器和蒸发器中。采用有效制热系数 ϕ 来表征实际热泵的制热性能， ϕ 与 η 的关系为：

$$\phi = k \cdot \eta \quad (4)$$

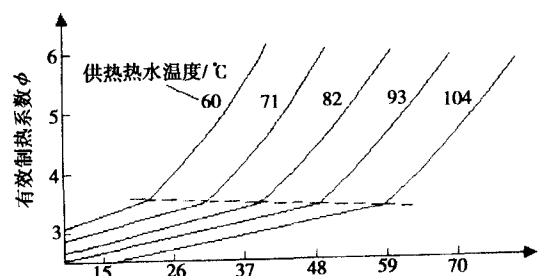


图 3 水—水型热泵的有效制热系数

式中 k 为热泵有效系数, 它与冷凝器和蒸发器中传热温差、载热工质及机械损失等有关, 其中传热温差是主要影响因素。按现代技术水平, k 值大致在 0.40~0.75 之间。水—水型热泵的有效制热系数见图 3。

4 地热热泵应用的技术关键

按传统划分, 地热利用分为发电和直接利用两大类。一般地热流体温度高于 150℃ 时可用于发电, 低于 150℃ 时直接利用。目前全世界地热发电的总装机容量大概在 2000 万千瓦左右, 排在前面两位的是美国和菲律宾^[2]。我国自 1970 年以来, 先后在广东顺丰、河北怀来、江西宜春、湖南灰汤、辽宁营口、山东招远和西藏羊八井等地建成了地热实验电站。其中拉萨附近的羊八井地热电站装机容量已达数万千瓦, 成为拉萨市的主要供电来源。

但是, 由于地热发电的热转换效率只有 10% 左右, 大部分地热能发电后损失掉, 许多国家开始重视热效率较高的直接利用。如日本 98% 的地热能用于洗浴, 匈牙利 51% 用于农业、42% 用于洗浴, 而冰岛把 86% 的地热能用于区域供热。冰岛气候寒冷, 一年中有 300 多天需要采暖, 全国 24 万居民中 75% 用地热采暖, 首都雷克雅未克城 11.4 万居民全部用地热供热, 是世界上最大的地热供热系统。

采用热泵系统提高低温地热水的品位, 是有效利用低温地热资源的合理方法。但应用过程中存在几个必须解决的技术难题。

1. 高效换热器 包括高效冷凝器和高效蒸发器。前已述及, 实际热泵制热系数偏离理论热泵的主要影响因素, 是冷凝器和蒸发器中存在温差传热的不可逆损失。要提高热泵性能, 就必须尽可能地减小传热温差。对于气—气式热泵, 分析表明最佳传热温差为 3~4℃^[5]。减小传热温差的途径是采用高效紧凑换热器, 如热管式换热器、板翅式换热器等。

2. 防腐防垢与污染控制 地热能通常被称为清洁能源, 但它的清洁不是绝对的, 因为地下热水中常含有硫化氢、氟、砷及氡、镭等有害物质。北京市的地热水即为高含氟、弱放射性氡镭水^[2]。热水中含有的硫化氢等成分, 对金属的腐蚀比一般冷水要大, 特别是系统在间歇条件下工作时由于氧气的侵入腐蚀会加快。据测定, 工作在间歇条件下的北京城区地热水系统中的碳钢和低合金钢的腐蚀

速度与全浸在水中时相比可增加 10 倍^[6]。去除硫化氢的方法有: 用三价铁盐类和过氧化氢 (H_2O_2) 的组合物, 或采用硫酸铜水溶液^[2]。

3. 热泵工质 对热泵工质的要求与对制冷工质的要求大致上一致, 如要求无毒、稳定、价格便宜等。所不同的是热泵冷凝器要在高温下工作, 有时蒸发器也要求在较高温度下工作 (对地热水来说蒸发温度 > 40℃), 故选用工质时必须考虑其相应的饱和压力、汽化潜热等热力学性质。按目前的技术水平, 热泵运行的低温限 (蒸发器内温度) 不能高过 50~60℃。另一方面, 根据《国际布鲁塞尔议定书》的约定, 目前占据制冷剂市场主导地位的氟里昂类制冷剂, 到 2006 年必须全部淘汰。所以, 寻求既能满足热泵本身性能要求、又不对环境造成危害的热泵工质, 是保证地热能利用中水—水型热泵技术推广应用的关键问题之一。

5 结论

针对北京市提出的“能源结构调整及清洁燃烧技术产业化工程”, 在分析北京地区地热资源的基础上, 讨论了在北京地区发展地热能热泵供热技术的可能性。如果能充分利用, 单是东南城区地热田, 每年就可提供合 34 万吨标煤的能量, 再加上首都机场地热田、小汤山地热田, 则可达到上百万吨标煤能量, 这可以对北京市的能源结构调整和环境改善起很大作用。热泵技术在某些领域已成功应用, 但将其用于提高低温地热水的品位, 则必须解决一些关键技术问题, 包括减小换热器中的传热温差、防腐防垢及热泵工质问题。如果这些问题得到解决, 则地热能的利用效率将会大大提高, 使地热这种清洁能源在国民经济中起更大作用。

参考文献

- 1 王海建, 近年来我国能源生产和消费若干现状分析, 新能源, 1999, 21 (11): 42~46
- 2 杨期隆, 地热资源, 北京能源学会, 1985
- 3 R. D. Heep 著, 张在明译, 热泵, 化学工业出版社, 1984, 北京
- 4 宋之平, 王加璇, 节能原理, 水利电力出版社, 1985, 北京
- 5 H. L. 冯·库伯, F. 斯泰姆莱著, 王子介译, 热泵的理论与实践, 中国建筑工业出版社, 1986
- 6 肖衍, 杨德钧, 徐国福, 李久青, 北京地热资源利用中的腐蚀与防护, 北京钢铁学院学报, 1984 年, 第 4 期