

浅论陕西省水文地质构造及其适合的地源热泵形式

张道¹⁾ 曹琦²⁾

¹⁾ (陕西亚特安装工程有限公司) ²⁾ (西安交通大学)

摘 要 地源热泵空调系统的结构、性能与当地水文地质构造密切相关。本文根据水文地质构造及其适合的地源热泵形式以及陕西省地下水径流模数分区图,分析陕西3个地形分区的水文地质构造及其适合的地源热泵形式,以供同仁在陕西推广地源热泵技术时参考。

关键词 地源热泵;地质构造;系统思考理念;空调

Discussion of hydrogeological structures of Shanxi province and the applicable forms of GSHP

Zhang Dao¹⁾ Cao Qi²⁾

¹⁾ (Shanxi Yate Installation Engineering Co., Ltd.) ²⁾ (Xi'an Jiaotong University)

ABSTRACT Structures and performance of air-conditioning system using GSHP (ground source heat pump) are closely related to local hydrogeological structures. According to the basic information of the relationship between the two and zoning of the ground water runoff modules of Shanxi province, analyzes hydrogeological structures in three zone of Shanxi province and the forms of GSHP which are applicable. This study may be the reference for GSHP promoted in Shanxi province.

KEY WORDS ground source heat pump (GSHP); geological structure; system thinking conception; air-conditioning

地源热泵空调系统的共同结构特点是:地上的基本相同,地下的一律不可见,而关键的在地下。地下部分实际上是地源热泵空调系统的热源(冬季采暖工况)或热汇(夏季供冷工况),是空调系统的蓄能体。从空调系统整体层面上看,空调实际上是通过能量传递链从房间取热到外面(夏季供冷工况)或从外面取热到房间(冬季采暖工况),以创造房间热舒适环境的过程。地下部分处于空调能量传递链的链首环节(冬季采暖工况)或链尾环节(夏季供冷工况),地下环节部分的性能强烈地制约着空调系统整体的结构、性能、造价,而地下水井或埋管换热器的结构、性能主要取决于当地的水文地质构造,同时地下部分有一旦建成就不可再更改的显著特点,这决定了地下部分

在地源热泵空调系统中具有重要地位。因此在推广地源热泵空调工程之前,必须深入了解当地水文地质构造,才能将地源热泵空调工程落到实处。否则,地源热泵空调工程将成为“空中楼阁”,贸然进入,存在着非常大的成败、利益风险。“事,先谋而后行者成,后谋先行者败”,“谋”就是弄清楚地源热泵系统整体的构造,同仁对此一定要有深刻的理解!

1 地源热泵空调系统适用水文地质场合

根据工程实践和许多水文地质专家的意见,以及考虑到施工难度、系统造价等因素,系统思考并进行整理,地质构造及其适合的地源热泵形式如表1所示,含水层地质构造和水井系统性能关系如表2所示^[1]。在确定地源热泵工程之前,根据

当地水文地质部门提供的资料初步确定工程地区水文地质情况后,可以对照表 1 和表 2,初步选定适合当地水文地质特性的地源热泵空调系统的结构模式。待现场按国家标准规定打出试探井或作

出单元孔 U 形管换热器,并测试其性能后,经过系统构造计算,最终确定具体的地源热泵系统整体结构形式。

粉土、黏性土的水文地质构造地区,打孔下管

表 1 岩土热物性参数及其适合的地源热泵形式^[1]

序号	岩土名称	天然含水量 质量分数 /%	密度 / (kg/m ³)	导热系数 / (W / (m · K))	热扩散率 / (m ² /h)	定压比热容 / (kJ / (kg · K))	定容比热容 / (kJ / (m ³ · K))
1	粉土	16. 3	1 590	0. 63	0. 001 9	1. 11	1 764. 9
2	粉土	22. 9	1 920	1. 26	0. 001 58	1. 50	2 880. 0
3	粉土	26. 9	2 130	1. 79	0. 002 64	1. 15	2 449. 5
4	粉土	25. 3	1 850	1. 45	0. 001 78	1. 59	2 941. 5
5	粉土	26. 0	1 930	1. 61	0. 002 22	1. 35	2 605. 5
6	黏性土	26. 3	1 990	1. 41	0. 001 64	1. 56	3 104. 4
7	黏性土	19. 0	2 000	1. 20	0. 001 52	1. 42	2 840. 0
8	黏性土	29. 8	2 050	1. 66	0. 001 71	1. 71	3 505. 5
9	黏性土	30. 1	2 110	1. 63	0. 001 97	1. 41	2 975. 1
10	黏性土	27. 0	2 170	1. 55	0. 001 83	1. 41	3 059. 7
11	黏性土	29. 0	2 020	1. 69	0. 001 84	1. 64	3 312. 8
12	黏性土	31. 4	2 140	1. 85	0. 002 23	1. 40	2 996. 0
13	黏性土	20. 0	2 090	1. 19	0. 001 36	1. 51	3 155. 9
14	细砂	22. 1	1 800	1. 60	0. 002 09	1. 53	2 754. 0
15	细砂	11. 1	1 570	0. 73	0. 001 65	1. 02	1 601. 4
16	细砂	5. 5	1 310	0. 64	0. 001 76	1. 00	1 310. 0
17	细砂	8. 0	1 420	0. 65	0. 001 96	0. 84	1 192. 8
18	细砂	16. 1	1 460	0. 86	0. 002 10	1. 01	1 474. 6
19	中砂	7. 0	1 490	0. 79	0. 002 01	0. 95	1 415. 5
20	中砂	13. 8	1 510	1. 06	0. 002 55	0. 99	1 494. 9
21	粗砂	12. 4	1 260	1. 06	0. 002 85	1. 06	1 335. 6
22	砾砂	8. 9	1 950	1. 41	0. 002 81	0. 93	1 813. 5
23	砾砂	5. 3	1 600	1. 04	0. 002 80	0. 84	1 344. 0
24	粗砾砂	23. 3	2 130	1. 88	0. 002 28	1. 39	2 960. 7
25	粗砾砂	21. 9	2 200	1. 75	0. 001 88	1. 52	3 344. 0
26	园砾	9. 5	1 860	1. 44	0. 003 18	0. 88	1 636. 8
27	园砾	10. 5	1 830	0. 94	0. 001 98	0. 93	1 701. 9
28	卵石 +砂	9. 8	1 840	1. 62	0. 003 58	0. 89	1 637. 6
29	砂岩	—	2 250	1. 84	0. 003 50	0. 84	1 890. 0
30	石灰岩	—	2 700	3. 14	0. 004 60	0. 91	2 457. 0
31	石灰岩	—	2 250	1. 28	0. 002 45	0. 84	1 890. 0
32	石灰岩	—	2 000	1. 16	0. 002 27	0. 92	1 840. 0
33	石灰岩	—	1 700	0. 93	0. 002 14	0. 92	1 564. 0
34	大理石 +花岗岩	—	3 000	3. 60	0. 005 17	0. 84	2 520. 0
35	大理石 +花岗岩	—	2 800	3. 45	0. 004 87	0. 91	2 548. 0
36	花岗岩	—	2 700	3. 14	0. 004 60	0. 91	2 457. 0
37	石灰质凝灰岩	—	1 300	0. 52	0. 001 57	0. 92	1 196. 0
38	灰质页岩	—	1 760	0. 83	0. 001 66	1. 02	1 795. 2

注:序号 1~13 的土壤地区适合做土壤源热泵系统;序号 19~28 的土壤地区适合做水源热泵系统;序号 29~38 的土壤地区不太适合做地源热泵系统。

表 2 含水层地质构造和水井系统性能关系

含水层地质结构	渗透系数 / (m/d)	出水量 100 m ³ / h 水位降 / m	单位厚度含水层供水能力 / (m ³ / (h · m))	抽灌井数比 (约数)
细砂	5 ~ 10	12.0 ~ 23.8	4.2 ~ 8.3	1:3 以上
中砂	10 ~ 25	12.0 ~ 8.0	8.3 ~ 12.5	1:3
粗砂	25 ~ 50	8.0 ~ 7.1	12.5 ~ 14	1:2
极粗的砂	50 ~ 100	7.1 ~ 6.0	14 ~ 16.5	1:1 加压
砾石夹砂	75 ~ 150	6.0 ~ 5.4	16.5 ~ 18.5	1:1 自然

容易,导热系数在 $1.16 \sim 1.85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,比较高,对于漂浮在岩土上层、聚集在埋管外面的冷(热)容易扩散;定容比热容在 $1\,700 \sim 3\,500 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 之间,地下岩土层蓄热体蓄存同样的冷(热)量需要的体积比较小,故适合于土壤源热泵工程;但此类地质构造地区透水性能特别差,单井出水量很小,系统打井数量太多,造价太高,不适合水源热泵工程。

中砂、粗砂和砾石加砂一类的水文地质构造地区,渗透系数在 $10 \sim 150 \text{ m/d}$ 之间,透水性能比较好,水井抽灌比小,系统打井数量比较少,打井费用比较低,比较适合水源热泵工程。

对于岩石类水文地质构造地区,虽然导热系数比较大,但由于要用专门的金刚石牙钻来打孔,打孔难度大、费用很高,因此不适合大面积推广地源热泵工程。

对于细砂流砂型水文地质构造地区,打孔、下管时流砂成孔容易塌方,施工性能差;导热系数特别是含水量比较小的细砂地质构造地区的岩土层的导热系数比较小,不利于蓄冷(热)的扩散;定容比热容较小,蓄存同样冷(热)量需要的岩土层体积比较大,不适合土壤源热泵模式。细砂地质构造地区渗透系数小,单井出水量少,抽灌比大,系统打井数量太多,工程总成井费用太高,故也不适合于水源热泵工程。

以西安地区为例,西安地处渭河平原,渭河平原西起宝鸡,东到潼关,位于渭河北山与秦岭之间,它属于黄土高原(Loess Plateau)地貌。渭河平原的黄土高原土壤松软、厚度达 $200 \sim 300 \text{ m}$,水位 $20 \sim 40 \text{ m}$,平均导热系数约 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,平均定容比热容约 $2\,200 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,利于热扩散,蓄存同样冷(热)量需要岩土层体积小,打孔、埋管容易,非常适合做土壤源热泵空调系统,是待开发地源热泵市场的地区。

2 陕西省水文地质构造描述

陕西省位于黄河中游,地处中国内陆腹地,是中国大西北的门户,是连接中国东、中部地区和西

北、西南的交通枢纽。与山西、河南、湖北、四川、甘肃、宁夏、内蒙古七省自治区相邻。总面积 20.56 万平方公里。省境南北长 $1\,000$ 多公里,东西宽约 360 公里。

陕西省境内山原起伏,地形复杂。基本特征是:南北高,中间低。由北向南形成 3 个各具特色的自然区:北部是陕北黄土高原,中部是关中平原,南部是秦巴山区。陕北黄土高原海拔 $800 \sim 1\,300 \text{ m}$,约占全省总面积的 45% 。关中平原西起宝鸡,东至潼关,平均海拔 520 m ,约占全省总面积的 19% 。陕南秦巴山地区,包括秦岭、巴山和汉江谷地,约占全省土地总面积的 36% 。秦岭海拔 $1\,000 \sim 3\,000 \text{ m}$,巴山位于本省最南部,海拔 $1\,500 \sim 2\,000 \text{ m}$ 。

径流模数的定义是,单位流域面积上的平均流量 ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$)。雨降水而从流域内地面与地下汇集到河沟,并沿河槽下泄的水流统称径流,可分地面径流和地下径流 2 种。径流引起江河、湖泊水情的变化,是水文循环和水量平衡的基本要素。在所有计算径流的常用量中,径流模数消除了流域面积大小的影响,最能说明与自然地理条件相联系的径流特征。通常用径流模数对不同流域的径流进行比较。地下水径流模数在一定程度上表示地下水的丰富程度,因此可以用当地地下水径流模数作为判断该地水文地质情况适于采用哪种地源热泵形式的判据之一。

3 陕西 3 个区域适合的地源热泵模式分析

根据地质构造及其适合的地源热泵形式(表 1)以及含水层地质构造和水井系统性能关系(表 2)给出水源、地源热泵适用原则,结合当地水文地质情况对全省 3 大区域地源热泵适用情况分析如下。

3.1 陕南汉中盆地、秦巴山地区

在陕西省的陕南汉中盆地湖积平原地区,地下水径流模数为 $76.10 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,汉中盆地地下水埋深只有 $5 \sim 6 \text{ m}$,渗透系数在 $50 \sim 70 \text{ m/d}$ 范围内,单井安全涌水量在 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上,非常适合做水源热泵空调工程;在秦岭、巴山地区,多属于岩石结构,打井十分困难,不适于采用地源热泵模

式;在不适于采用地源热泵模式的汉中地区,属于夏热冬冷长江流域气候带,可以用空气源热泵方案。空气源热泵的主要问题是,冬季结霜融霜和随室外空气温度下降制热量锐减,建议采用融霜性能较好的蓄能融霜型空气源热泵系统。

3.2 关中平原地区

在陕西省关中平原渭河流域的西安等地,大荔华县一带的地下水径流模数在 $25.0 \sim 33 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 之间,地下水比较丰富。对于渗透系数 10 m/d 的地区,也比较适合采用水源热泵空调。陕西省各处供水水文地质情况汇总表 3。不适合水源热泵模式的关中平原地区黄土覆盖层比较厚,埋管打孔容易,地下 U 形管换热器造价比较低,比较适合做地源热泵系统;在关中地区也可以推广使用融霜性能较好的蓄能融霜型空气源热泵。

3.3 陕北黄土高原地区

陕北黄土高原地下水径流模数仅在 $1.5 \sim 2.0$

$\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 之间,干旱少雨,地下水贫乏,不适合做地下水水源热泵空调工程。榆林西北地区的地下水径流模数为 $9.5 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。对于缺少地下水的地区,如榆林新机场地区,就不适合做水源热泵模式的系统了。陕北非流砂地区的黄土高原适合做地源热泵,但系统冬夏负荷严重不均,要考虑冬夏季地下取热、放热平衡的问题。对于这类地区,地源热泵要做成复合系统,如地源热泵加太阳能热水系统,用夏天的太阳能热水向地下充热蓄存冬天用,大概是 1 m^2 太阳能集热器全年的集热总量,可以供 25 m^2 居住面积冬季采暖用。也可以采用地源热泵加燃气或燃油锅炉系统,埋管换热器间距适当放大(要计算在地源热泵生命周期 25 年内,地下岩土层蓄热体总的累积温度下降不要超过 3 $^{\circ}\text{C}$),同时安装小的调峰燃气或燃油热水锅炉,在冬季最冷的大寒日即 1 月 20 日前后使用,使打孔数量大大减少,降低系统整体造价。

表 3 陕西省各处供水水文地质情况汇总

序号	地区	地下水类型	含水层类型	主要含水层(组、段)特征	水质
1	延安市	潜水 + 承压水	孔隙、裂隙含水层	潜水广泛分布于河谷漫滩地。为第 4 系冲积砂砾石。水位埋深 4 ~ 6 m,涌水量小于 2 L/s,侏罗系延安粗砂岩孔隙、裂隙潜水 承压水,分布于岩风化壳,含水不均。	冲积地潜水质良好,水质为重碳酸钙镁型,矿化度小于 1 g/L。基岩裂隙水下部水质变坏,一般 25 ~ 40 m 水质较好。
2	宝鸡市	承压水	孔隙含水层	含水层为上第 3 系砂砾石夹少量砂,含水层埋深 40 ~ 80 m, 100 ~ 130 m, 水位埋深 20 ~ 45 m, 单井涌水量 1 120 ~ 2 940 m^3 / d , 导水系数 220 ~ 940 m^2 / d 。	多为硫酸重碳酸钙型水。矿化度 0.3 ~ 0.6 g/L。沿构造线附近水质较差,为高氟硫酸重碳酸钠型水。
3	宝鸡市	承压水	孔隙含水层	含水层为上第 3 系砂砾石层,厚度 45 ~ 92 m, 含水层厚度大,层数多,富水性强。	重碳酸钙型水。矿化度 0.3 ~ 0.6 g/L。
4	咸阳市	潜水 + 承压水	孔隙含水层	潜水位为全新统、上更新统上部冲积砂含砾石组成。厚 42 ~ 50 m, 降深 5 m。单井涌水量 3 500 ~ 4 500 m^3 / d 。浅层承压水中更新统冲、湖积砂砾石组成。厚 60 ~ 70 m, 水位埋深 9 ~ 15 m, 单井涌水量 1 800 ~ 2 500 m^3 / d 。深层承压水由中更新统冲、湖积砂组成,厚 60 ~ 100 m, 水位埋深 13 ~ 14.5 m, 单井涌水量 2 170 ~ 2 260 m^3 / d 。	潜水为硫酸重碳酸、钙型水。矿化度小于 1 g/L。浅层承压水为重碳酸、硫酸钠或重碳酸、硫酸氯化物钠型水,矿化度 0.51 ~ 0.55 g/L。深层承压水为重碳酸、氯化物、硫酸钠型水,矿化度 0.46 ~ 0.48 g/L。
5	西安市	潜水 + 承压水	孔隙含水层	含水层为第 4 系冲、洪、湖积砂砾石层。潜水位 1.5 ~ 2.5 m, 含水层厚度 26 ~ 50 m, 降深 1.88 ~ 4.99 m。单井涌水量 1.8 ~ 9.6 L/s。第一承压含水层组水位埋深 0.4 ~ 4.5 m, 含水层厚度 72 ~ 76 m, 降深 11.58 m。单井涌水量 7.33 L/s。第二承压含水层组水位埋深 0.5 ~ 40 m, 含水层厚度 63 ~ 86 m, 降深 12.78 m。单位涌水量 6.51 L/s。	潜水为硫酸重碳酸、硫酸或重碳酸氯化型水。第一承压水为重碳酸、硫酸钙/钠型水,矿化度 0.44 ~ 0.532 g/L。
6	长安县	潜水 + 承压水	孔隙含水层	潜水位为第 4 系全新统、上更新统冲积、湖积砂卵石与黄土状亚粘土互层。含水层埋深一般 30 m, 渗透系数 10 ~ 15 m/d, 水量较丰富。承压水为中、下更新统,洪、湖积砂砾石与砂质粘土互层,埋深 30 ~ 50 m, 最大涌水量可达 10 ~ 50 L/s。	潜水与承压水均为重碳酸钙、镁型水。潜水质矿化度小于 1.0 g/L。承压水矿化度均小于 0.5 g/L。

(上转第 6 页)

换热器的质量和体积在空调系统中几乎占了一半,因而开发研究性能优化的紧凑式换热器,对发展 CO₂ 跨临界循环制冷技术至关重要。

2) 微通道蒸发器面临的挑战是两相流流动均匀地分配到平行的各管路中,因此在设计集管时应使流动不均和压降最小化。

3) 微通道式内部换热器由于较小的当量直径,比采用套管式及板式内部换热器换热效果都好,也是今后换热器的发展方向。

4) 超临界 CO₂ 系统中,微通道气体冷却器的制冷剂流程布置和风道布置对换热效果影响较大,因此研究气体冷却器时要注意制冷剂和风道布置。

参 考 文 献

- [1] Boewe D, Bullard C, Yin J, et al. Contribution of internal heat exchanger to trans-critical R-744 cycle performance. *International Journal HVAC&R Research*, 2001, 7 (2): 155-168.

- [2] 林高平, 顾兆林. 跨临界 CO₂ 制冷循环性能的研究. *西安交通大学学报*, 1998, 32 (8): 35-38.
- [3] 丁国良, 黄冬平. 二氧化碳制冷技术. 北京: 化工出版社, 2007.
- [4] Pettersen J, Hafner A, Skaugen G. Development of compact heat exchangers for CO₂ air conditioning systems. *International Journal of Refrigeration*, 1998, 21 (3): 180-193.
- [5] 丁国良, 汤志远. 圆管平行流换热器: 中国, 200710038598. 3. 2007-9-5.
- [6] Kim M H, Bullard C W. Development of a micro-channel evaporator model for a CO₂ air-conditioning system. *Energy*, 2001, 26 (10): 931-948.
- [7] 韩吉田, 曹先齐. 二氧化碳制冷系统内部换热器设计. 山东省制冷空调学术年会. 2006.
- [8] 管海清, 马一太, 杨俊兰, 等. 集成管箱型管壳式换热器的设计分析. *压力容器*, 2003, 20 (9): 17-21.
- [9] 邓建强, 姜培学, 李建明. 用于跨临界 CO₂ 汽车空调系统的板翅式内部换热器设计. *流体机械*, 2005, 33 (12): 57-60.

(下接第 17 页)

4 结 论

1) 陕西陕北、关中和陕南 3 个不同水文地质区域适合不同的地源热泵模式。

2) 陕南汉中盆地和关中渭河流域地下水丰富, 且渗透系数 10 m/d 的地区适于采用水源热泵空调系统; 关中黄土覆盖层厚度大的地区, 适合土壤源热泵系统; 陕北黄土高原、非流沙地区, 适合复合型土壤源热泵空调系统; 在秦巴山区岩

石地区和关中不适合地源热泵模式的地区, 可以采用融霜性能较好的蓄能融霜型空气源热泵。

参 考 文 献

- [1] 曹琦. 地源热泵空调系统和水文地质构造之间的关系. 地温资源与地源热泵技术应用论文集 (第一集). 北京: 地质出版社, 2007: 46-53.

第四届中国制冷空调行业大学生科技竞赛京津冀地区竞赛通知

本竞赛由中国制冷空调工业协会主办, 是一项面向大学生和研究生的科技活动, 目的在于推动热能动力工程、建筑环境与装备、机械工程类学科面向二十一世纪课程体系和课程内容的改革, 有助于高等学校实施素质教育, 培养学生的创新能力, 有助于学生工程实践素质的培养, 有助于吸引广大青年学生踊跃参加课外科技活动, 为优秀人才的脱颖而出创造条件。本竞赛分初赛和决赛 2 个阶段, 初赛将于 2010 年 6 月 4 日之前完成, 决赛将于 2010 年 7 月 2~3 日举行!

敬请关注!

二 一 年三月十一日