

浅源异层采灌井群循环开发利用技术

—以天津市海河商贸区古文化街供热制冷项目为例

曾梅香,高宝珠,黎雪梅,李会娟

(天津地热勘查开发设计院,天津 300250)

摘要:天津市古文化街利用不同地热成井深度的浅源异层采灌对井的温度差异,通过热泵技术,采取夏灌冬用、冬灌夏用的循环利用方式,为建筑物供热制冷。二个供暖制冷期的运行工况表明冷热源井在采灌前后水质、水位基本稳定,流体回灌率达到100%。其环保节能、维持储水层压力、提高资源利用率的综合效应非常明显。

关键词:循环经济;异层采灌;地下储能;精密过滤器

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2007)02-0128-06

人们对室内舒适程度要求的提高使建筑用能占全社会能源需求的比例由原来的1/6增长到1/4,其中供暖、制冷、供生活热水的能耗占了相当大的比重。传统的制冷空调在带来凉爽的同时,也形成了城市的“热岛效应”;而常规的地热单井供暖方式使得大量温度尚高的地热尾水直接排放,不仅给城市环境带来热污染,还极大地浪费了宝贵的能源。近年,循环经济理论已受到重视,在能源方面,逐渐由高开采、低利用、高排放向低开采、高利用、低排放转化。夏灌冬用、冬灌夏用的地下储能循环利用技术不仅能够降低大气的热(冷)污染,而且也大大提高了能源的利用效率,具有明显的社会价值和经济价值^[1~3],是循环经济实施的重要举措。本文以天津市海河商贸区古文化街供热制冷项目为例,介绍一种通过异层采、灌井群达到既储热又储冷的技术工艺。

1 项目简介

天津市古文化街位于市中心城区狮子林桥与金汤桥之间的海河西岸,南北长580 m、东西宽500 m,总建筑面积 $8 \times 10^4 \text{ m}^2$,是流动人口密集的商业步行街。该街始建于1986年,1989年被评为津门十景之一的故里寻踪,其整体建筑为仿清民间式建筑风格,店堂近百家,以经营文房四宝、古玩字画、玉石瓷器、刺绣、泥塑等鲜明的“天津味、文化味、复古味”而闻名遐迩,每年吸引了大批的中外游客。但传统的空

调制冷所造成的热岛效应和燃煤锅炉供热所排放的废气废渣严重影响了街区的购物环境。为改变这一状况,2005年由市科委提供经济支持,与中欧国际科研部门技术合作,对旧系统进行改造,拟通过浅源异层采灌井群、利用水源热泵技术对古文化街的部分建筑进行供热制冷,不足部分由燃气机组提供补充热源。

2 工程概况

根据天津市多年平均气象资料和经验数据,商场的夏季室温要求在 26°C 左右,冷负荷指标为 110 W/m^2 ,每年制冷期100天;冬季的室温要求在 22°C 左右,热负荷指标为 80 W/m^2 ,供热期135天。整个系统通过6台GSHP-1108热泵采用三级串联运行,末端为“三速开关”控制的风机盘管。为满足街区夜市要求,供热制冷期间24小时连续运行。拟采用明化镇组(Nm)井做为热源,第四系(Q)井做为冷源:冬季开采Nm热水,提热后回灌到Q井;夏季开采Q冷水,提冷后回灌到Nm井。循环后的尾水经过4台单体过滤量为 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 、精度为 $70 \mu\text{m}$ 的HJM系列粗效过滤器和4台单体滤量 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 、精度达 $3 \mu\text{m}$ 的精密过滤器净化处理后,全部回灌。

3 井群设计

综合分析当地的地层分布情况及其水文地质条

收稿日期:2007-04-03

责任编辑:林晓辉

基金项目:天津市科学技术委员会国家财政补贴攻关项目

作者简介:曾梅香(1965-),女,高级工程师,从事地热地质研究工作。E-mail:tjzmx@sohu.com。

件,并结合工况要求,共开凿了 7 眼水源井,其中海 1-海 2、海 3-海 4、海 5-海 6 组成三对对井(各井基本情况见表 1),每组对井之间的组间距为 270 m,对井井间距均为 5 m(图 1)。各井的地质剖面见图 2。

4 冷热源的负荷情况

4.1 设计负荷能力

4.1.1 最大制冷面积

三眼 Q 井最大出水量总计约为 300 m³/h,出水

温度 t_1 在 20 ℃ 左右,经热泵循环后的尾水温度 t_2 平均为 32 ℃,利用温差为 $(32-20)=12\text{ ℃}$,则可制冷面积为:

$$S = [1\ 163 \times Q \times (t_2 - t_1)] / [(q \times (1 + 1/EER))]$$
..... ①

其中:

- S- 制冷面积(m²);
- Q- 冷源井的出水量(m³/h);
- t_1 - 冷源井的出水温度(℃);
- t_2 - 循环后的尾水温度(℃);

表 1 水源井基础数据表
Table1 The basic data of the drills

水源井编号	井深(m)	出水温度(℃)	储水层位	含水层厚度(m)	静水位埋深(m)	出水量(m³/h)	降深(m)	单位涌水量(m³/h·h)
冷源井	海1	441	20					
	海4	440	20	Q	48-62	78-82	96-110	
	海6	400	19					
热源井	海2	904.8	42		60.1	86	100.48	10.7
	海3	869.4	41	Nm1	47	86.5	100	17.5
	海5	1067.1	44		45	86.2	90	21.7
	海9	1081	44.5		42	91	76	40.2
								1.88

注：分析单位为天津市地质矿产测试中心

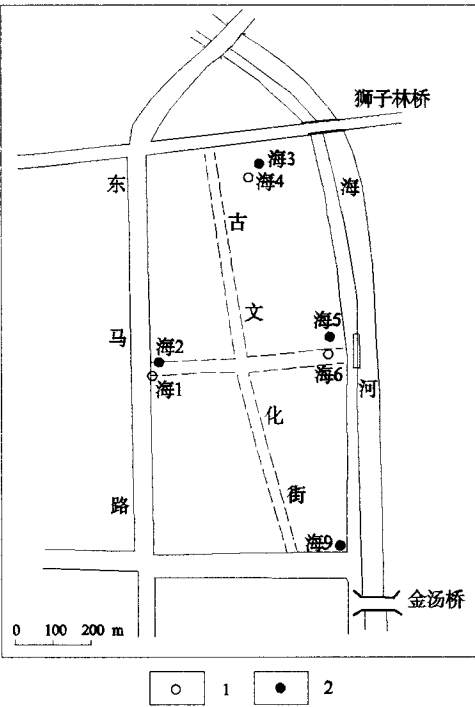


图 1 井群位置分布图
Fig.1 Distribution map of the well group
1.冷源井; 2.热源井

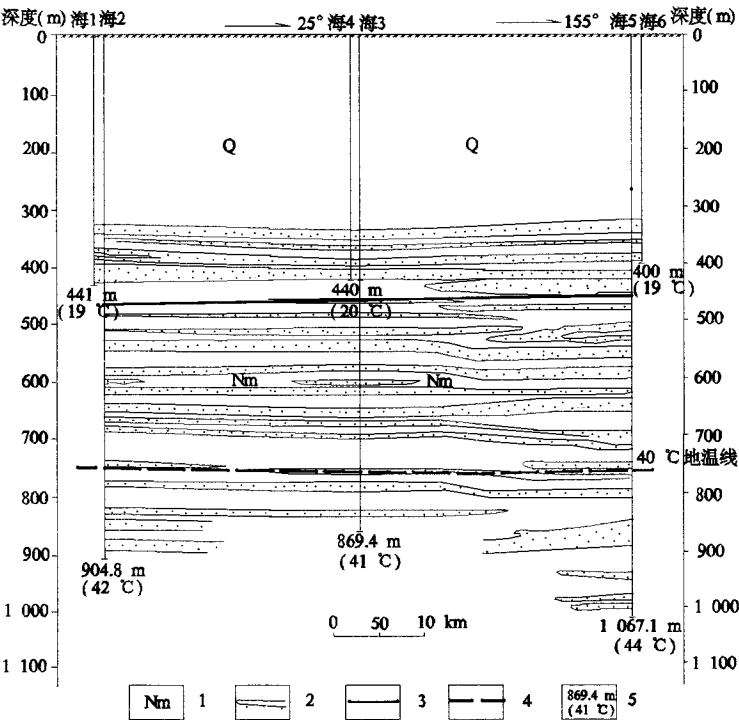


图 2 井群地质剖面图
Fig.2 Geological section of well group
1.地层代号;2.含水层;3.地层界线;4.40℃地温线;5.井深及井口水温

q —单位面积冷负荷(W/m^2),取 110;

EER—热泵机组的能效比,其值在 4.1 左右^[4]。

据此,三眼冷源井的最大出水量可满足约 $4.7 \times 10^4 m^3$ 的制冷需求。

4.1.2 最大供暖面积

三眼 Nm 井最大出水量总计为 $290 m^3/h$,出水温度 t_1 在 $42^\circ C$ 左右,经热泵循环后的尾水温度 t_2 平均为 $12^\circ C$,利用温差为 $(42 - 12) = 30^\circ C$,则可供暖面积为:

$$S = [1163 \times Q \times (t_1 - t_2)] / [q \times (1 - 1/COP)] \cdots \cdots (2)$$

其中:

S —供暖面积(m^2);

Q —热源井出水量(m^3/h);

t_1 —热源井出水温度($^\circ C$);

t_2 —供暖后尾水温度($^\circ C$);

q —单位面积热负荷(W/m^2),取 80;

COP—热泵机组的供热系数,其值在 4.5 左右^[4]。

据此,三眼热源井的最大出水量可满足约 $15.46 \times 10^4 m^3$ 的供暖需求。

4.2 系统实际运行情况

因为古文化街是逐渐改扩建的,所以需提供暖、冷气的面积是逐渐增加的。经过两年多运行,目前冷、热井源达到了新的平衡,供暖制冷面积约为 $4 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4 m^2$ 。2005 ~ 2006 年二个供热制冷期的运行情况分别如下:

4.2.1 制冷概况

夏季制冷时采取二抽三灌。开采海 1 和海 6 井,合计开采量 $160 \sim 200 m^3/h$,回灌到三眼 Nm 井。目前 Q 开采井的出水温度在 $9 \sim 13^\circ C$ 左右(按 $12^\circ C$ 计),循环尾水 $30^\circ C$ 左右,利用温差 $18^\circ C$,根据公式①计算可制冷面积为 $3.8 \times 10^4 \sim 4.7 \times 10^4 m^2$,与实际相符。

4.2.2 供暖概况

冬季供暖时采取二抽四灌。开采海 2 和海 5,合计开采量 $100 \sim 120 m^3/h$,回灌到海 3 井和三眼 Q 井。目前 Nm 开采井的出水温度在 $32^\circ C$ 左右,经混水罐循环利用后,循环尾水 $9^\circ C$ 左右,利用温差 $23^\circ C$,根据公式②计算可供暖面积为 $4.7 \times 10^4 \sim 5.2 \times 10^4 m^2$,与实际相符。

因为温度越低,流体的粘滞系数越大^[5],所以冬季供暖后 $9^\circ C$ 左右的循环尾水回灌到 Q 井,不如夏季制冷后 $30^\circ C$ 左右的循环尾水回灌至 Nm 的反向

效果,但是冬季通过增加回灌井数的措施,可以增加整体回灌量。两年多的实际运行工况情况表明:异层采灌井群整体回灌率基本都达到了 100%。夏季制冷时二抽三灌,单井回灌量为则达 $50 \sim 70 m^3/h$;冬季供暖时二抽四灌,单井回灌量大约为 $30 \sim 40 m^3/h$ 。

4.2.3 回灌井的防堵措施

为了防止滤水管堵塞、保持回灌顺畅,除对尾水采取粗滤—精滤处理外,还定期对回灌井采取回扬洗井措施。根据两年多的实践总结,认为采取轮换回扬的方式较为适合此系统:每天有一眼回灌井回扬,回扬水量 $100 m^3/h$ 、回扬时间 30 min/次左右,通过井下观测镜观察,流体基本可达到水清要求。

5 异层采灌系统水质变化情况

5.1 回灌水水质要求

异层采灌对水质要求严格,要求水型一致,矿化度相近,防止回灌水源与储层水质相差过大使含水层受到污染,回灌水质应遵循中华人民共和国石油天然气行业标准《碎屑岩油藏注水水质指标》(SY/T5329-94)的推荐标准^[6]。

根据水质分析报告(表 2),三眼 Nm 井的水质类型均为 HCO_3-Na 型,矿化度均小于 $1000 mg/l$,Q 井的水质优于 Nm,亦为 HCO_3-Na 型。参照回灌水的推荐标准,6 眼井的大部分离子含量都符合要求,但三眼 Q 井的 TFe 含量(为 $0.64 \sim 0.96 mg/l$)和海 3 井的 TFe 含量超标,需采用除铁装置或过滤系统,防止 Fe_2O_3 堵塞滤水管。

5.2 异层回灌后水质变化情况

本系统运行期间,通过跟踪检测水质(表 3)可知,接受 Q 井水回灌后的 Nm 井水的矿化度降低、接受 Nm 井水回灌后的 Q 井水的矿化度增高,水质向着回灌水方向演化。但各离子的变化幅度有所差异,说明整个系统运行过程中对各离子的影响程度不同:其中 $K^+ + Na^+ + Ca^{2+} + SiO_2$ 可以看成是简单的水质混合作用,并没有发生异常的增高或降低;回灌后 Q 井水和 Nm 井水的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量双双下降则与回灌水来源的除锈、过滤处理有关,这从过滤棒沉渣中检出大量的 Fe、Zn 氧化物和硫化物的沉淀可以得到佐证; Mg^{2+} 含量的双双下降可能是因为对回灌水的过滤有关,致使部分 $MgCO_3$ 沉淀析出,但因含量甚微,在滤棒上未检测出。

表 2 冷热源井原始水质分析报告(mg/l)

Table 2 Water quality report of the cold-resource and thermal-resource wells

检测项目	水温	K ⁺ Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	F ⁻	矿化度	pH	TFe	R·I
含水层	(℃)												
Q 海4	22.00	212.00	6.00	3.00	396.00	88.00	36.00	12.00		802.00	8.36		
海2	40.50	224.30	3.00	1.20	518.70	46.10	4.80	21.60	3.95	825.70	8.48	0.24	6.70
Nm 海3	38.00	244.80	4.00	1.20	573.80	28.80	7.20	23.60		897.00	8.67	1.20	6.72
海5	41.00	224.10	3.00	1.20	518.70	39.00	3.00	19.30	4.85	824.30	8.71	0.48	6.47

注：分析单位为天津市地质矿产测试中心

表 3 接受异层回灌后的冷热源井分析报告

Table 3 Water quality report of cold and thermal-resource wells after accepting reinjection from different aquifer

检测项目	水温	K ⁺ Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	矿化度	pH
含水层	(℃)									
Q 海4	16.00	220.90	4.00	0.70	562.00	23.00	12.50	20.20	813.00	8.61
Nm 海3	36.00	215.60	4.90	0.60	570.00	21.00	1.08	21.00	814.00	8.36

注：分析单位为天津市地质矿产测试中心

采灌前后各井的水质虽然发生了变化,但多项指标与回灌水源相比,并没有产生质的改变,证明 Q 和 Nm 异层采灌、反季节储能运行,只要过滤净化措施得当,在水质方面是有安全保证的。

6 水位及水温变化情况

两年多的运行结果显示,Q 井和 Nm 井的出水温度都比成井时的温度下降,而略高于回灌水的温度。目前 Q 井的出水温度为 9 ~ 14 ℃,制冷期开始时温度为 9℃左右,随后缓慢上升至 12 ~ 14 ℃;Nm 井的出水温度基本在 32 ℃左右。

目前,Q 井的水位埋深比原始水位略有上升,Nm 井的水位埋深与原始静水位基本持平,说明了回灌对区域水位的维持和抬升作用。

7 经济效益分析

7.1 初投资情况

项目的初投资主要包括凿井费和设备投资费用。由于古文化街是分期交付使用,目前只是一期 4.5 × 10⁴ m² 工程投入使用,井群和设备并未全部启用,因此其投资效益并未完全显现。

根据近两年的实际运行情况,支持 4.5 × 10⁴ m² 左右的供暖制冷面积,只启动了部分设备(表 4),以现阶段利用情况计算:实际使用的设备初投资费用为 1 075.06 万元,折合初投资单价约为 238.9 元 /

m²,稍低于传统的商场供暖制冷体系—如燃气(油)锅炉 + 制冷(初投资一般为 290 ~ 310 元 /m²)、电热锅炉 + 制冷(初投资一般为 265 元 /m²)。

7.2 运行费用估算

热泵机组的运行费用^[7]主要包括电费、水费。以本项目二个供热制冷期的实际运行费用估算:全年机组实际耗电量约为 342.86 kW·h,所需电费为 240 万元(电价按照实际峰谷均价 0.7 元 /kW·h 计);实际水费大约为 5 万元。折合每年每平方米的实际运行费用大约为 54 元,与燃气(油)锅炉 + 制冷(运行成本一般为 51 ~ 65 元 /m²)、电热锅炉 + 制冷(运行成本一般为 87.6 元 /m²)等供热制冷系统相比,具有一定优势。

7.3 综合效应分析

该项目自 2005 年夏季以来已连续安全运行二年,工况良好。在北方冬夏季室外温度变化幅度较大的情况下,能使所供建筑物的室内温度在冬季控制在 20 ℃左右、在夏季控制在 26 ℃左右,满足了用户要求,其舒适程度和环境效应均达到了预期目的。

这种浅源异层采灌井群循环开发利用方式,其节能意义更为效果明显,通过计算仅三眼 Nm 井夏灌冬用一个周期的热资源量就能达 4.14 × 10⁷ MJ^①。通过地下水作为载体,采用地面换能设备(板式换热器、水源热泵),使第四系浅层冷水与新近系地热

① 李明郎,李强. 天津市古文化街供热站地热井组资源评价报告. 天津市规国地热工程技术有限公司,2006,3,9-10.

表 4 本项目设备投资预算
Table 4 Initial investment budget of this item

项 目	单 价	已投入情况	费用（万元）	一期实际利用情况	一期实际使用费用(万元)
凿井费	700元/m	7眼水源井总进尺5203.3 m	364.23	6 眼 进尺4 122.3 m	288.56
热泵机组	60万元/台		360	2台	120
潜水泵变频柜	5万元/台	4台	20	2台	10
除砂器	2万元/个	1个	2	1个	2
混水罐	10万元/台	1台	10	1台	10
分、集水器	1.5万元/个	2个	3	2个	3
补水系统	5万元/套	1套	5	1套	5
水处理仪	2.5万元/个	1个	2.5	1个	2.5
控制柜	20万元/套	1套	20	1套	20
粗过滤器	1.5万元/台	4台	6	3台	4.5
精过滤器	3.5万元/台	4台	14	3台	10.5
潜水泵	5.0万元/台	7台	3.5	6台	30
热工仪表	15万元/套	1套	15	1套	15
监测设备					
循环泵变频柜	4万元/台	4台	16	2台	8
循环泵	3万元/台	6台	18	2台	6
外管网	20元/m ²	-	-	4.5万m ²	90
风机盘管	100元/m ²	-	-	4.5万m ²	450
总 计					1 075.06

注：分析单位为天津市地质矿产测试中心

流体进行能量转换,地层即储热又储冷,冷、热能反季节循环利用,回灌率达到 100%,地下水量基本实现采、灌平衡^[9],避免大量开采地下水而引起的地表不均匀沉降,达到供热制冷、减少热水(气)废气废渣的直接排放的目的,实现了资源的可持续开发和利用,其潜在的环境、社会效益是无法用具体数据来衡量的。

8 结语

天津市海河商贸区古文化街供热制冷项目经过两年多的运行,储层温度渐趋稳定(Q井的井口出水温度为 9 ~ 14℃、Nm井的井口出水温度在 32℃左右)、水位与原始静水位基本持平、水质类型没有发生改变。与传统的商场供暖制冷系统相比,水源热泵的初投资稍低,运行成本和环境效益的优势明显。目前,该项目尚处于一期工程试运行阶段,随着后期工程陆续投入市场运营,在设备完全正常运转及满负荷运行后,其经济效益将逐步显现。

这种夏季储热、夏季储冷的循环异层采灌技术有效地解决了热泵的冷热源供给、超量开采引起的水位下降等问题,真正实现了零排放零污染,具有明显的环保节能效果,是循环经济的真正体现。但在具体实施异层采灌地下储能循环利用中,工程配套设计、井群层位的选择及孔位的布置必须科学合理,以保证系统运行的经济性、安全性、稳定性。

参考文献:

[1] 李春华.创建可再生、可循环、可持续的地热新能源开发利用模式[A].刘时彬,李宝山,郑克桢主编.全国地热产业可持续发展学术研讨会论文集[C].北京:化学工业出版社,2005,6-9.
[2] 刘时彬.科技引领我国地热产业可持续发展[A].刘时彬,李宝山,郑克桢主编.全国地热产业可持续发展学术研讨会论文集[C].北京:化学工业出版社,2005,19-24.
[3] 王荣光,张于峰,杨巍等.地热水作为低温辐射供暖热源的特点及节能效果[J].太阳能学报,2002,23(4):455-456.
[4] 美国制冷空调工程师协会.徐伟等译.地源热泵工程技术

- 指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001,19 – 26.
- [5] 薛禹群主编.地下水动力学[M].北京:地质出版社,2001,198 – 201.
- [6] 碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法[S].中国石油天然气总公司发布.1995,1 – 3.
- [7] 刘雪玲,李宁.低温地热水源热泵供暖技术[J].煤气与热力, 2004,24(10):567 – 569.
- [8] 曾梅香,高宝珠等.天津地区浅层地热能开发利用前景浅析[A].国土资源部地质环境司组织编写.浅层地热能 – 全国地热(浅层地热能)开发利用现场经验交流会论文集[C].北京:地质出版社,2007,55 – 58.

The Recycling Utilization Example of Exploitation-Reinjection Well Group of Different Aquifers

ZENG Mei-xiang, GAO Bao-zhu, LI Xue-mei, LI Hui-juan

(Tianjin Geothermal Exploitation and Development Designing Institute, Tianjin, 300250 China)

Abstract: Tianjin Old-Culture Street's heating-aircondition system utilizes the temperature difference of the shallow source exploitation-reinjection couple wells in different depth of the completed wells to provide heating or airconditioning for buildings with heat-pump technology and recycling methods through reinjecting in summer and drawing out in winter, or reinjection in winter and drawing out in summer. After two recycle running, the water quality and the water level of wells are stable, the reinjection rate is 100%. The running system has good effect on protecting environment, saving energy, keeping aquifer pressure and providing resource utilization rate.

Key words: recycling economy; exploitation and reinjection of different aquifers; underground energy storing; fine-filter

学术论文的引言内容要求

刘新秒

引言(又名前言、序言、概述)经常作为论文的起始段落,主要回答“为什么做该项研究”这个问题,细分起来又可包括两个方面的内容,一是问题从何说起,即问题的出处,二是问题为何提出,即提出的必要性。总的来说,其目的是阐述问题的由来。具体要简明介绍论文的研究背景,通过文献综述所研究领域的研究现状,找到存在问题,给出本次研究的起点,研究方法,追求的目标和取得的主要成果,以此来表明本篇论文的创新性,体现文章的价值,使读者明了文章主题的性质和分量,引起他们的重视和兴趣。可以归纳为 5 个基本要素:总结和分析相关研究成果,找出研究中未解决的问题,提出论文要解决的问题,阐明研究问题的思路,简述研究问题的方法,

引言应言简意赅,不要等同于论文的摘要,或成为摘要的注释。引言中不要详述同行熟知的定义,包括教科书上已有陈述的基本理论、实验方法和基本方程的推导等。如果在正文中采用比较专业化的术语、缩写词,或引入新概念,最好先在引言中定义说明或加以解释。一般情况下,文章的这一部分都比较简短。