



浅层地热能开发的 地质环境问题及关键技术研究

吴烨 卢予北 李义连 张林霞 李艺 陈莹 著

QIANCEG DIRENENG KAIFA DE
DIZHI HUANJING WENTI JI GUANJIAN JISHU YANJIU



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

浅层地热能开发的地质 环境问题及关键技术研究

吴 烨 卢予北 李义连 著
张林霞 李 艺 陈 莹



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

浅层地热能开发的地质环境问题及关键技术研究/吴烨等著. —武汉:中国地质大学出版社,2015.6

ISBN 978-7-5625-3655-0

I. ①浅…

II. ①吴…

III. ①地热能-浅层开采-地质环境-研究

IV. ①TK529

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 111472 号

浅层地热能开发的
地质环境问题及关键技术研究

吴 烨 卢予北 李义连 著
张林霞 李 艺 陈 莹

责任编辑:阎 娟 陈 琪

责任校对:代 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511 传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×960 毫米 1/16

字数:167 千字 印张:8.5

版次:2015 年 6 月第 1 版

印次:2015 年 6 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

ISBN 978-7-5625-3655-0

定价:50.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言



目前,国内浅层地热能开发利用的主要方式有水源热泵和土壤源地埋管热泵两种。其中,地下能源采集系统工程设计的合理性和工程质量直接影响着周边地质环境和热交换效率的稳定性。为此,针对存在的突出问题,通过大量的调研、资料收集分析,研究了浅层地热能开发过程中由于工程问题导致的热贯通、地下水位下降、地面塌陷、水质恶化等地质环境问题;结合工程实践和专题试验从成井管材、施工工艺、材料选择提出了具体的解决措施和技术方案。特别是针对传统的“一井抽多井回”模式存在的占地面积大、回灌困难问题,提出了“单井抽回两用系统”和“PVC-U 塑料管成井技术”设计思路,并结合生产实际进行了室内和生产性的试验。

浅层地热能是一种可再生绿色能源,其能量相当于 9.4×10^{20} kJ 的热能或 3.2×10^5 亿 t 标准煤的热量。具有埋藏浅、分布广泛、开发成本低等特点,在目前技术经济条件下,浅层地热能通过热泵机组进行能量的提取和交换,可以替代煤炭、石油、天然气实现建筑物供暖制冷。

我国在浅层地热能开发领域虽然起步较晚,但发展速度较快,尤其是在近 10 年,我国的华北平原、东北、西北等地区逐步大面积地开发利用浅层地热能。同时,国家及相关部委也相继出台了一系列鼓励政策和优惠措施。从目前实际开发利用的情况来看:许多地区存在着前期适宜性勘查评价滞后、管理混乱、盲目建设、从业人员技术参差不齐等问题,从而因为工程技术问题导致了一系列地质环境和热交换效率稳定性问题。如地下水回灌困难、能量交换系统热贯通等,由此造成地下水浪费、区域地下水位下降、地面沉降塌陷、水质污染恶化和生态环境的破坏。针对存在的突出问题,通过大量调研和试验,以地质环境问题、工程技术问题为切入点进行课题研究,并提出了合

理的解决措施,对今后浅层地热能科学、合理、可持续开发利用,国家能源结构优化和节能减排具有积极的意义。

浅层地热能开发涉及水工环地质(水文地质、工程地质和环境地质的简称)、腐蚀科学、钻探、暖通和机电安装等专业领域。其中,地下能源采集系统是整个供暖制冷系统的关键。开发利用的合理性直接影响着生态环境和地质环境。通过 TRT-9 型车载式岩土热响应测试仪对现场实际土壤温度的测试、地层冷热平衡的分析研究和地源热泵运行监测可知:在供暖制冷两个工况下,其运行时间大致相同时,地层基本可以达到冷热平衡;在北方或南方地区,仅用于供暖与制冷或者供暖制冷两个工况运行时间相差较大时,地层冷热平衡会随时间而发生变化,最终导致地层冷热平衡的破坏。由此可直接影响土壤中微生物种群数量、植被的生长速度、地下 N_2O 和 CH_4 集中释放、地层孔隙度变化、水质变化等;当回灌率低时,将造成地下水资源浪费、水位下降、地面沉降塌陷等地质环境问题。

地下水源热泵还是土壤源地埋管热泵系统,在开发浅层地热能时都存在着系统腐蚀结垢问题。地下水源热泵系统是开式系统,地下水在整个管网和设备系统腐蚀结垢更加严重。许多地区的地下水源热泵系统,由于水源井工程和管材选择问题导致系列的腐蚀结垢,而出现水量逐年下降、回灌困难、水质恶化、地面管道堵塞等。腐蚀结垢问题严重影响着整个换热系统的使用寿命、运行效果和地质环境。

目前,我国多数地下水源热泵水井成井的管材有水泥管、铸铁管、普通钢管,最常用的是普通钢管和镀锌桥式过滤管组合的成井管柱。通过常用成井材料的腐蚀结垢试验证明:所有的金属管材都存在着腐蚀结垢现象,特别是镀锌桥式过滤管腐蚀速度最快,在第 7d 时开始腐蚀结垢,150d 时其过水缝隙几乎全部堵塞。而 PVC-U 塑料管无论是在什么水质中或经过较长时间均不存在腐蚀结垢和溶解析出问题,是成井的最佳材料。

研究与实际检测发现:地下水源热泵成井管材选择与成井工艺决定着水井和回灌井的使用寿命和运行质量。其中,在成井工艺中,钻井方法与钻进速度、钻井液选择、洗井方法选择及成井质量与水源井的抽水和回灌量及效果有着直接关系。目前的成井管材和工艺使其使用寿命在 2~8 年,主要

表现:由于腐蚀结垢堵塞使单井出水量和回灌量逐年减小,管材腐蚀破裂后出浑水、出砂,井内坍塌等。

在土壤源地埋管设计和施工中,通过热阻、雷诺数、傅力叶方程等计算公式和分析研究可以看出:地埋管热交换效率和效果与地埋管材料、直径、管壁厚度、钻孔口径有着密切关系;不同的围填材料具有不同的导热系数,其换热效率及效果不同。砂、黏土均具有良好的导热性,是地埋管围填最经济适用的材料,可以就地取材,并且利用泥浆+钻屑混合物作为围填材料,可减少废渣和废浆处理费用。在泥浆+钻屑混合物中,砂或者岩石碎屑作为骨料,其粒径大小和均匀性对回填材料的性质有一定的影响,回填时骨料应选择粒径0.5~2mm的中粗砂为主。采用现场泥浆+钻屑混合物作为围填材料时,尽可能选择均匀的中粗砂(岩屑)和0.8%左右的膨润土混合材料,以便达到最佳的换热效果。

影响浅层地热能开发的问题及因素很多,特别是地下水源热泵系统的地下能源采集系统质量的好坏将直接影响着整个换热效率和运行情况,是技术的核心和关键。研究发现:传统的正循环泥浆钻进工艺存在着效率低、泥浆污染地层严重、洗井困难、成井质量较差、对单井抽水量和回灌量影响较大等问题;而泵吸反循环和气举反循环等“欠平衡钻井”钻进方法具有井底干净、无重复破碎、钻井效率高、地层无污染、洗井容易等优点,成井质量好,能够真实反映单井的出水量和回灌量。所以,在设计和施工中对于松散地层推荐泵吸反循环和气举反循环工艺;对于基岩地层则推荐空气潜孔锤钻进工艺。

PVC-U塑料管在成井过程中存在下入困难和井管爆裂两个问题,从而影响着塑料管的推广应用。PVC-U塑料管作为地下水源抽水井或回灌井管材使用,与金属管材相比具有不腐蚀结垢、成井速度快、使用寿命长等诸多优点。针对PVC-U塑料管物理力学性能指标和特点,采用“井内压力平衡法”下管工艺,解决了下管困难和爆裂问题。最大成井深度已达437m,填补了国内外空白。通过分析研究总结了井管内外压力差和动载荷(冲击载荷)是导致塑料管体爆裂事故的两个主要原因。井内的泥浆密度过大和过滤缝隙堵塞是塑料管下入困难的主要原因。所以,在实际工程中必须采取必要的技术措施,尽可能地减少井管内外的压力差和动载荷(冲击载荷)。

目前国内外的“同井回灌”技术在水文地质条件好的地区得到了一定程度的推广,其效果较好。但是,局限性较大,存在着不同程度的热贯通问题。作者在此基础上提出了“单井抽回两用系统”,利用单口井(并列抽水井管和回灌井管)通过地下水垂向距离的缓慢上升过程来实现能量交换和提取。根据不同的水文地质条件确定了3种设计方案,即中部抽水—上部和下部回灌、下部抽水—上部回灌、上部抽水—下部回灌方案。结合工程在郑州荥阳鑫苑小区进行了两口井的设计和回灌试验,最终以2号井的设计和施工方案取得了成功,使回灌量达到了100%,并使小区16 500m²建筑物得到了供暖制冷。经过4年的运行证明:系统运行稳定可靠、抽水回灌正常(70m³/h),取得了显著的经济效益、社会效益和环境效益。

总而言之,本书以实际工程试验和大量的调查数据为依托,利用环境地质学、地下水科学和腐蚀科学理论系统对浅层地热能开发造成的地质环境问题进行了全面分析研究,以钻探和腐蚀科学理论系统研究浅层地热能开发中水源热泵系统的关键技术,即:成井质量和地下水及时回灌,并提出了具体解决措施;通过试验与实际工程,自主创新提出了“单井抽回两用系统”技术方案和成井工艺方法,在实际应用中取得了显著的效益。该研究成果为今后浅层地热能合理、科学开发利用提供了依据和技术支撑,对节能减排、可持续发展具有一定的推动作用。

著 者

2015年2月

目 录



第一章 绪 论	(1)
第一节 课题来源及研究目的和意义	(1)
一、课题来源	(1)
二、研究目的和意义	(2)
第二节 国内外研究现状及趋势	(5)
一、国内外研究现状及问题	(5)
二、浅层地热清洁能源开发趋势	(10)
第三节 课题研究内容和技术路线	(13)
一、课题研究内容	(13)
二、课题研究技术路线	(13)
第四节 本章小结	(14)
第二章 浅层地热能计算评价与地源热泵	(15)
第一节 浅层地热能资源与政策	(15)
一、浅层地热能概念及资源量	(15)
二、浅层地热能开发政策	(16)
第二节 浅层地热能潜力计算与节能减排评价	(16)
一、国家节能减排目标	(16)
二、浅层地热能潜力与经济价值计算	(17)
三、供暖制冷面积计算	(18)
四、标准煤替代量和温室气体减排量计算	(19)
五、节能减排效益分析与评价	(20)

第三节 地源热泵开发浅层地热能方式及特点	(20)
一、地源热泵概念	(21)
二、工作原理	(21)
三、浅层地热能主要开发方式	(21)
四、地源热泵主要特点	(24)
第四节 本章小结	(26)
第三章 浅层地热能开发地质环境问题研究	(28)
第一节 地源热泵开发浅层地热能热污染问题	(28)
一、土壤温度测试及变化规律	(28)
二、地层冷热平衡分析研究	(36)
三、热污染造成的环境问题	(42)
第二节 地下水位下降与地面沉降问题	(47)
一、地下水位降深计算	(47)
二、区域地下水位下降与漏斗的形成	(49)
三、地面沉降与塌陷	(51)
第三节 地下水水质污染问题	(55)
一、地下水污染现状	(55)
二、工程导致地下水污染原因及危害	(55)
第四节 本章小结	(59)
第四章 浅层地热能开发工程问题研究	(61)
第一节 热泵系统腐蚀结垢问题与试验研究	(61)
一、热泵系统中腐蚀结垢形式及危害	(61)
二、地下管井腐蚀机理与类型	(63)
三、常用过滤管腐蚀与结垢试验	(66)
第二节 地下水源井工程现状及问题研究	(73)
一、地下水源井工程现状	(73)
二、地下水源井工程问题	(74)
第三节 地下埋管工程现状及问题研究	(81)

一、地下埋管工程现状	(81)
二、埋管及回填材料问题研究	(81)
三、钻孔口径及工艺问题研究	(86)
第四节 本章小结	(87)
第五章 浅层地热能开发关键技术研究应用	(89)
第一节 地下水源井工程关键技术	(89)
一、地下水源热泵井管材选择	(89)
二、地下水源钻井技术	(90)
第二节 PVC-U 塑料管成井技术	(92)
一、PVC-U 塑料管特性	(93)
二、PVC-U 塑料管主要规格	(93)
三、PVC-U 塑料管成井关键技术	(95)
四、PVC-U 塑料管应用实例及研究成果	(96)
第三节 新型地下水源单井抽回两用系统应用研究	(98)
一、地下水源热泵系统回灌主要类型与问题	(98)
二、新型地下水源单井抽回两用系统设计与试验	(102)
三、单井抽回两用系统技术应用情况	(110)
四、单井抽回两用系统的特点	(112)
五、效益分析	(112)
第四节 本章小结	(113)
第六章 结论与建议	(116)
第一节 主要结论与创新点	(116)
一、主要结论	(116)
二、主要创新点	(117)
第二节 建 议	(118)
主要参考文献	(119)

第一章 绪 论

第一节 课题来源及研究目的和意义

一、课题来源

随着经济、信息全球化,全球人类和社会已经进入了一个能源与资源的时代。世界各国为了未来的主导地位,在经济和社会发展战略方面重视能源与资源的勘查及开发。进入 21 世纪后,面对环境和能源资源的严峻形势,各国政府不仅高度关注与重视气候变化问题、环境保护以及经济安全,同时对可再生能源的开发利用更为重视(王建林,2008),因为国家安全战略、国家经济和发展战略以及国际政治经济秩序与能源、能源结构、能源战略、温室气体排放、环境生态存在着密切的关系(陈廷辉,2012)。

传统不可再生化石类能源资源(石油、煤炭、天然气)大量燃烧排放不仅加速了资源的枯竭,还诱发气候环境恶化,从而对人类的生存环境质量、经济社会可持续发展及美丽中国建设造成了严重的影响和威胁。特别是我国人口众多,能源的需求和消费将远远超过世界其他国家。由于长期以来传统化石类能源资源生产和消费结构的不合理,导致了我国的资源和环境矛盾突出及形势严峻等问题。所以,大力勘查开发新的地质清洁能源资源,科学合理调整和优化能源资源生产及消耗结构,保障当前国际形势下的国家能源和资源安全,保护生态环境,应对气候变化,促进美丽中国建设,是当前一项重要的课题和战略任务。

正因如此,国家相继颁布和出台了一系列的优惠政策及措施,鼓励和发展地热清洁能源的开发利用。

针对国家政策和浅层地热能开发中存在的突出问题,课题组于 2010 年

开始,结合笔者主持的河南省科技发展计划科技攻关项目(项目编号:102102310360)——河南省浅层地热能开发利用关键技术研究,经过4年多的资料收集、调研、分析研究、设计、室内试验、生产试验和应用、资料完善,最终形成《浅层地热能开发的地质环境问题及关键技术研究》研究成果,其中的技术创新成果在实际中取得了显著成效。

二、研究目的和意义

(一)研究目的

1. 能源形势与生态环境危机

迄今为止,占全球能源资源消耗总量90%以上的仍然是煤炭、石油、天然气化石类能源资源,而地热能、太阳能、风能、生物质能和水能等可再生能源资源仅占总消耗量的10%左右(张芳,2013)。全球的能源消耗增长幅度,到2020年预计可达19%左右(Det Norske Veritas,2011),由于形势所迫,全球的能源消耗将向低碳可再生清洁能源转变,但是世界能源结构目前主要以煤、油和气为主。据预计,到2020年左右,我国的能源需求量将超过约36亿t标准煤,同时中国的能源需求将在世界能源总量预期增长中占到36%(International Energy Agency,2010),且会逐年递增。

煤炭、石油和天然气等化石燃料的大量消耗,严重影响了全球的生态环境和气候变化,将会带来一系列的能源安全问题(Guanyi Chen et al,2010)。传统能源资源的消耗所形成的碳排放量占全球所有碳排放总量的60%以上,传统的化石类能源燃烧产生“温室效应”,使气候变暖,产生大量的酸雨,并导致臭氧层破坏。

统计资料显示:中国是煤炭资源高消耗的国家,在一次能源消费结构中,煤炭资源的消费高达67.9%,比世界平均水平和经济合作与发展组织国家分别高41.5和46.5个百分点。从整个传统能源的资源量来看,我国人均能源资源量远远低于全球的平均水平,2020年我国石油产量预计为1.8~2.0亿t,并呈逐年下降的趋势。目前,我国煤炭资源的可开采储量约为1886亿t,未开发利用的资源储量约为618亿t,其中90%的煤炭资源分布在中、西部地区,其环境、交通等自然条件恶劣,将会造成开发利用难度大等一系列问题。同样,我国能源消费主要依赖煤炭、石油等,从而使城市大气中颗粒物

(66%)和 SO_2 (22%)含量超过国家空气质量二级标准。

当前,资源开发利用与生态环境保护之间的矛盾是全球面临的一个共性问题。近一个世纪以来,化石燃料(煤、石油、天然气)的使用量几乎增加了30倍,当今世界能源资源消费仍然以传统化石类为主,约占总能源资源消费的74.6%,由此导致全球大气中 CO_2 呈逐年上升态势,目前全球排放的 CO_2 总量约210亿t/a,2007年和1990年相比,全球 CO_2 排放量增加了16%左右。

从《京都议定书》对全球各国 CO_2 减排指标规定来看,在减排方面我国将面临着严峻的形势和减排压力(Zhang Zhongxiang,2004)。从20世纪70年代末始,中国进入了经济发展的快车道,由于能源资源量需求的不断增加,中国逐渐成为全球第二能源资源消费大国(Houcade J C,2002)。目前中国的 CO_2 排放量仅次于美国。与此同时,根据相关预测:中国在2015—2025年将超过美国,成为世界 CO_2 排放第一大国(Sinton J et al,2001),也有一些学者认为目前中国的 CO_2 排放已经进入世界第一(秦大河等,2007;Yoichi Kaya,1989)。

全球性“温室效应”和气候变暖问题就是由于资源掠夺性开采、生态环境的严重破坏及 CO_2 等温室气体的大量排放而产生的。据科学家预测,如果“温室效应”不能得到有效的控制,地球的表面温度将提高 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$,海水在地球表面温度的升高和气候变暖条件下造成体积热膨胀,全球海平面将抬升 $25\sim 100\text{cm}$,许多地势较低的沿海城市将会被淹没,如纽约、伦敦、北京、天津、上海、广州等海拔较低的城市将遭此厄运,将会有大量移民和动物迁移。同时,由于气候变暖将造成一些国家和地区干旱少雨、病毒蔓延、虫害剧增、种植养殖业锐减、社会动荡。过去几十年,全球平均气候温度大约每10年抬升 0.13°C ,中国则每10年温度升高 0.22°C 。据统计:中国在50年时间内平均温度提升幅度高达 1.1°C 。

此外,大气中排放的 SO_2 、氮氧化物等有害气体的逐年递增,使酸雨频现。据我国23个省市监测结果,21个城市均出现酸雨,比例高达90%以上。我国的华北平原、松辽平原和西北地区以往出现酸雨频率较低,而今酸雨问题也在频发。从中国环境容量来看,若想使大部分城市的空气质量达到国家二级标准,到2020年前必须严控 SO_2 及氮氧化物排放量。但是,目前我国实际已存在着环境透支现象。

由此可见,一次能源资源消费结构的改善对 CO₂ 减排起着积极的作用。所以发展清洁能源、优化能源结构,加快可再生新型能源的开发利用是未来中国减排 CO₂ 的重要战略选择(周大地,2004)。

2. 浅层地热能资源量巨大、前景广阔

随着美丽中国、新型工业城镇化建设的积极推进和能源结构的调整优化,必将加大对清洁能源资源的勘查开发利用力度。作为能源供应的重要补充,利用地热或浅层地热能作为公共建筑物、城镇和农村居民提供制冷、供暖和生活热水,不仅可以提高城镇居民和农民生活质量及品位,重要的是可以改善环境质量和优化能源消耗结构。无论是从国家政策方面,还是需求方面,浅层地热能开发利用都有巨大的市场,其应用前景广阔。

浅层地热能是可再生清洁能源和资源,具有埋藏浅、分布广、资源量大、便于开发、运行成本低等特点。通过热泵机组消耗 1kW 的电能,形成 3~4kW 热能,效率高达 300%~400%(卢予北,2008)。蔺文静等(2013)提出:经过浅层地热能勘查评价(200m 以内)的 287 个地级以上城市能源资源量高达 7.71×10^{13} kWh/a,其热能相当于 94.86 亿 t 标准煤的燃烧能量,可开发利用的能源达 2.89×10^{12} kWh,相当于 3.56 亿 t 标准煤。浅层地热能开发利用过程仅使用少量的电能,其运行过程无 CO₂ 和其他污染物排放,基本是零污染。自 1995 年以来世界各国开始注重浅层地热能开发,并以每年 20% 的递增速度大面积推广应用,中国自 2000 年以来则以 50% 的递增速度发展地下水热泵和土壤源地埋管热泵技术。

在可再生能源开发方面地热能(含浅层地热能)的开发潜力很大,并且其开发成本很低。所以,在生态环境和能源需求矛盾日益突出的严峻形势下,加大力度勘查开发利用浅层地热清洁能源,积极调整和优化能源资源结构,对节能减排和国家能源安全保证具有重大意义。

(二)研究意义

传统的供暖、制冷和热水供应主要依赖于煤炭、石油或天然气,它们燃烧到 1000 多度的高温时,才能把水的温度提升到 70~80℃ 来进行循环,并实现正常的供暖,此时化石类燃料的排烟温度高达 200℃ 以上。另外,按照目前常规的计算方法,燃烧 1t 煤炭将会产生 2.2~2.3t 的 CO₂、1.7% 的 SO₂ 和 0.8% 的粉尘。这也是目前全球气候变化和环境恶化的主要原因,同时也

大大增加了空气环境治理的难度和费用。

为此,结合市场需求和该技术领域存在的突出问题,研究浅层地热能开发,对大面积推广新型清洁可再生能源——浅层地热能具有重要的现实意义。

第二节 国内外研究现状及趋势

一、国内外研究现状及问题

(一)国内外研究现状

1912年瑞士最先开始了热泵技术的研究,随后美国、瑞士等国家也相继进行了试验和研发。而真正意义上通过热泵机组开发浅层地热能也仅仅只有20年的历史。

我国则是从20世纪中期以吕灿仁教授(天津大学热能研究所)为代表的学者和专家开始研究的,近20年来清华大学、天津大学、重庆建筑大学、天津商学院、中国科学院广州能源研究所等多家大学和研究机构都成立了专门机构和项目组织,加大地源热泵中央空调系统的研究和试验。从2000年开始国内部分城市先后利用地源热泵技术开发浅层地热能,并以每年50%左右的速度递增,已经排名世界第三(陶庆法等,2007;郝爱兵等,2010)。

美国等国外许多国家为了节约地下水资源,在地源热泵开发浅层地热能时,多采用了闭式系统,目的是减少地下水资源浪费和污染。由于地下水源热泵与地埋管闭式系统相比,具有地下工程工作量少、施工方便、建设投资少、热交换效率高、占地面积少等优点。采用地下水源热泵技术时主要采用一井抽水多井回灌模式,一般情况下在卵砾石等高渗透地层中,抽回比例为1:1~1:2;在粉砂、细砂、粉细砂、中砂等细颗粒松散地层中抽水井和回灌井设计比例一般为1:3~1:6。特别是在细颗粒地层且水位较浅的地层中,即便采用多井回灌也会经常出现回灌率低或回灌不下去的现象,国内许多地区目前多采用该方法,如图1-1所示。若供暖制冷面积较小,场区面积较大时,采用此方法基本可行。

若建筑面积过大,场地空间较小时,采用上述方法则会出现抽水井十几

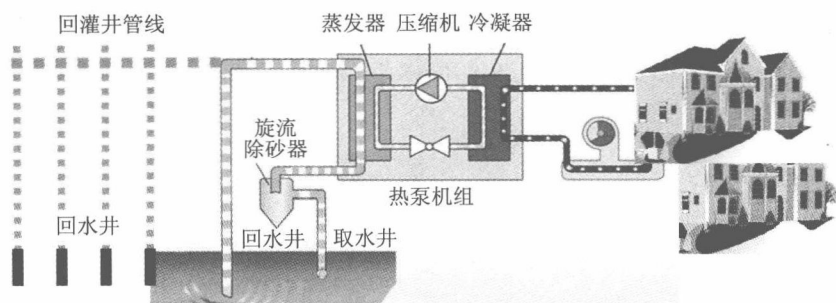


图 1-1 水源热泵系统一井抽水多井回灌原理示意图

口,回灌井几十口,总共打井几十到上百口,显然在空间利用方面和管理方面等都不合理。为此,国内外部分工程技术人员为了改变回灌困难、占地面积大、管理不便等问题,采用单井抽水和回灌的地下水源热泵系统模式,实现在同一口井中抽取地下水和回灌系统循环水。

由于水文地质条件不同和地下热交换过程的复杂性,国内外工程技术人员自 20 世纪 80 年代开始,就单井抽回系统热交换模型进行了大量的试验和研究工作。Tan 和 Kush 于 1986 年根据线热源理论求得一个解析解,通过模型可以近似计算出地源热泵系统长期运行过程中井(孔)周围土壤(岩石)的温度;Mikler 和 Yuill 于 1993—1995 年期间,利用数值方法分析研究了单井回灌的渗流及热交换过程,并取得了大量的试验数据;Orio 于 1999 年在 Kelvin 的线热源理论研究和试验的基础上,进一步分析研究了单井抽回灌系统的热交换过程,并提出了自己的观点;Rees 等于 2004 年建立了系统二维、非稳态的数值模型,并利用一维的简化数值模型应用于实际工程计算;李旻等(2007)在前人研究的基础上,进一步简化和假设地质、地层条件,得出了单井抽回系统在地下承压水中的井外渗流解析模型。

图 1-2 是国内外常见的 3 种单井抽回系统原理示意图。

图 1-2(a)单井循环系统在抽水区段和回灌区段没有隔板,回灌水直接快速进入抽水段;而图 1-2(b)和图 1-2(c)的隔板分离了抽水区段和回水区段,避免了抽水和回水的快速混合。虽然上述回灌技术均存在一定的问题,但是,在一些地区也取得了较好的应用效果。如 2001 年首次在北京某工

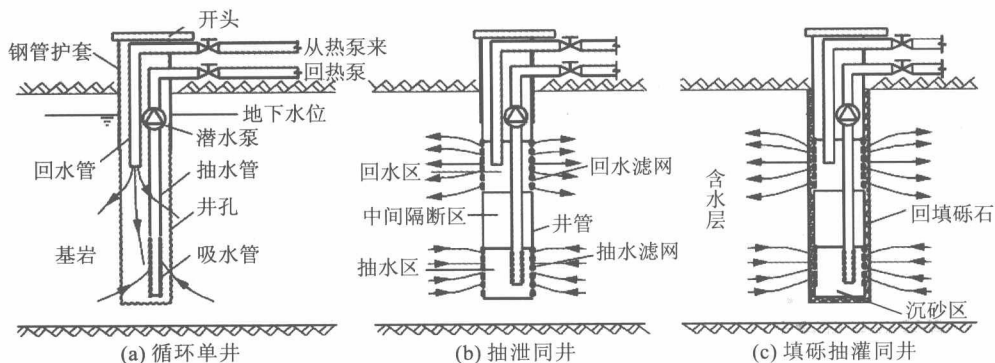


图 1-2 国内外常见的 3 种单井抽回系统原理

程中采用该方法效果显著、运行正常。据资料介绍,目前在北京采用地源热泵技术已安装和运行的 1800 万 m^2 供暖制冷建筑中,有 610 万 m^2 建筑物采用了上述单井抽回技术(倪龙,2007)。

上述的单井回灌技术主要问题是出现“热贯通”风险。“热贯通”就是地下水回灌过程没有与井(孔)周边土壤(岩石)进行充分的热量交换,地下水回灌温度尚未恢复到初始温度或接近初始温度时就被抽取。从图 1-2(b)和图 1-2(c)可以看出,地下管井内的隔板正好与黏土层对应,并且黏土层较厚时,就可以防止地下水抽回连通现象。但是,在实际中由于地下含水层的孔隙度、导水性以及地质构造不同,在垂向各层的抽水量和回灌量差别很大。所以,管井内隔板位置不能随意确定,再者,黏土层的位置、厚度、连续性(构造影响)的不确定性,滤料投放和止水的可靠性,都不能做到准确无误。另外,当地层主要由砂、砂质黏土、卵砾石组成时,根本不可能避免地下水的上下水力联系和“热贯通”问题。

当“热贯通”问题出现时,可能会导致冬天区域地下水温度越来越低,夏天区域地下水温度越来越高,并造成地源热泵机组不能正常运行和热交换效率大幅降低,以及引发一系列的地质环境问题。

总之,浅层地热能开发目前主要以空调厂家和中介公司为市场主体,由于没有水文地质、钻探、地热地质等相关专业技术人员,所以,注重了开发和热泵产品的研发。但是,对于浅层地热能开发诱发的地面沉降、地下水恶化等地质环境问题及解决措施,目前还未见全面、系统的研究。