**中国煤炭学会团体标准**

**中深层地热能开发利用**

**项目建设规范**

**编**

**制**

**说**

**明**

**陕西小保当矿业有限公司**

二〇二四年三月

**目 录**

[1工作简况 1](#_Toc162787896)

[1.1任务来源 1](#_Toc162787897)

[1.2协作单位 1](#_Toc162787898)

[2主要技术内容的论据及主要内容说明 1](#_Toc162787899)

[2.1地热地质调查与评价 1](#_Toc162787900)

[2.1.1地热地质条件论证 1](#_Toc162787901)

[2.2地热换热井施工 2](#_Toc162787902)

[2.2.1一般规定 2](#_Toc162787903)

[2.2.2钻完井技术要求 3](#_Toc162787904)

[2.2.3固井技术要求 5](#_Toc162787905)

[2.2.4下套管技术要求 5](#_Toc162787906)

[2.3地热换热系统 5](#_Toc162787907)

[2.3.1一般规定 5](#_Toc162787908)

[2.3.2地热换热系统取热能力评价 5](#_Toc162787909)

[2.3.3地热换热系统设计 6](#_Toc162787910)

[2.3.4地热换热系统管材与循环介质要求 6](#_Toc162787911)

[2.4机房供热系统 7](#_Toc162787912)

[2.4.1一般规定 7](#_Toc162787913)

[2.4.2设备选型和安装要求 7](#_Toc162787914)

[2.5监测与控制系统 8](#_Toc162787915)

[2.5.1一般规定 8](#_Toc162787916)

[2.5.2运行控制系统 8](#_Toc162787917)

[2.5.3主要设备运行状态监控 9](#_Toc162787918)

[2.5.4能耗能效监测评估系统 10](#_Toc162787919)

[2.6系统调试、质量验收及运行维护 10](#_Toc162787920)

[2.6.1一般规定 10](#_Toc162787921)

[3主要试验的分析和综述报告 11](#_Toc162787922)

[3.1技术综述报告 11](#_Toc162787923)

[3.2中深层地埋管换热器技术分析 18](#_Toc162787924)

[3.2.1分析方法与评价指标 18](#_Toc162787925)

[3.2.2中深层地埋管换热器能量传递分析 20](#_Toc162787926)

[3.3中深层地埋管换热器取热性能分析 35](#_Toc162787927)

[3.3.1取热能力 35](#_Toc162787928)

[3.3.2取热损失 42](#_Toc162787929)

[3.3.3影响因素综合作用 49](#_Toc162787930)

[3.4技术分析小结 56](#_Toc162787931)

[3.5中深层地热供热项目实验分析 58](#_Toc162787932)

[3.5.1项目基本信息 58](#_Toc162787933)

[3.5.2主要参数监测结果 58](#_Toc162787934)

[3.5.3具体项目测试情况分析 63](#_Toc162787935)

[3.6实验测试小结 69](#_Toc162787936)

[4技术经济论证 70](#_Toc162787937)

[4.1传统供热方式 70](#_Toc162787938)

[4.2中深层地埋管地热供热与其它供热方式对比 70](#_Toc162787939)

[5采用国际标准的程度及水平的简要说明 73](#_Toc162787940)

[6重大分歧意见的处理经过和依据 73](#_Toc162787941)

[7标准的要求和措施建议 73](#_Toc162787942)

[8其他应予说明的事项 73](#_Toc162787943)

# 1工作简况

## 1.1任务来源

本标准按照GB/T 1.1—2009《标准化工作导则第1 部分：标准的结构和编写》给出的规定起草，规范编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关标准，并在广泛征求意见的基础上，制订本规范，归口管理单位中国煤炭学会。

## 1.2协作单位

本标准协作单位包括陕西小保当矿业有限公司、陕西省煤层气开发利用有限公司、西安交通大学、陕西韩城天久注浆勘探公司、中国科学院地质与地球物理研究所等。

# 2主要技术内容的论据及主要内容说明

## 2.1地热地质调查与评价

### 2.1.1地热地质条件论证

地质条件调查宜包括以下内容：

一、地形地貌调查：以现场调查为主，并结合遥感影像解译，实地核查拟开发地段地形地貌特征，查明拟开发地段地面高程和地表形态，所处的地貌单元和微地貌类型，以及已有和规划的地面与地下建（构）筑物、树木植被、池塘等分布状况。

二、地层岩性调查：以资料收集为主，分析和补充调查拟开发地段地层层序、地质时代、成因类型、岩性与岩相特征、产状、厚度和接触关系，并划分热储层系统结构。其中，碎屑岩和碳酸盐岩类宜划分至统或亚统（组），变质岩划分至界或群，岩浆岩宜按岩类结合构造运动期划分，第四纪松散堆积层地层划分至统。

三、地质构造调查：以资料收集为主，结合遥感解译、人工地震、氡气测量等手段，分析拟开发地段大地构造单元部位、区域构造和新构造运动特征，基本查明地质构造类型、性质、产状、规模、分布、形成时代、活动性及其对地热传导的控制作用。

四、不良工程地质问题调查：以现场调查为主，实地核查拟开发地段是否存在地面沉降、地裂缝、湿陷性黄土、砂土液化、滑坡、崩塌、泥石流等不良工程地质问题。

五、水文地质条件调查：以资料收集为主，调查当地具有供水意义的地下水含水层（包括浅层地下水含水层和深层地热水取水层段）的分布特征以及供水水源地分布及保护区划分情况，在地热孔设计时应对其采取相应的保护措施。

地热状况调查宜包括以下内容：

一、资料搜集与分析：全面搜集区域地热地质研究报告、相邻地段和相近条件的中深层地埋管钻孔、地热水井或其它类型中深层钻孔资料，并进行综合分析；

二、热储结构调查：以资料收集为主，结合地质条件调查结果，分析拟开发地段热储地质结构，查明恒温带深度、热储盖层分布以及各热储的岩性、厚度、埋深、分布、相互关系及其边界条件；

三、地温梯度调查：以资料收集为主，分析拟开发地段地温梯度及地温场特征，查明采热（换热）深度热储层的温度；

四、热储参数调查：以资料收集为主，结合地质条件调查结果，分析拟开发地段各热储的储层参数，依据相邻地段和相近条件的地热孔参数，参照附录A，确定各热储的导热系数、热扩散系数、比热容等参数；

五、地热地质勘探：在地热地质资料匮乏和地热地质条件不清楚的空白区，应开展地热地质勘探。勘探包括地面物探、钻探和物探测井。

## 2.2地热换热井施工

### 2.2.1一般规定

钻井设计的基本内容应包括：基本地质数据、工程设计、施工进度计划、材料计划和费用预算，钻井液设计、固井设计、定向井设计和套管柱组合等。

地热钻井的基础条件包括比较详细的岩芯剪接、裂缝等方法，利用采集地岩磨片样和生物化学分析样等手段，通过地层、岩体、生物结构及重要的地貌界线等变化现象，确定前期地热成矿类型，不同的岩层类型对钻井工艺有不同的需求。

一、钻井设计应贯彻和执行有关健康、安全、环境管理标准和规范，应有明确的健康、安全、环境保护要求。

二、钻井设计应结合地质特征优选钻井方式，保证钻井质量，提高地热井产量，满足地热田高效开发要求。

三、钻井设计应体现安全第一的原则。大到井身结构，小到每一项作业程序，都要重视安全，既要重视井下安全，也要重视地面安全，把安全第一原则贯穿到整个设计中。对于重大的作业和风险大的作业，还应制定相应的安全应急程序。

四、井身结构设计，是钻井设计的关键内容，必须遵循下述几点：

1.保证井眼系统压力平衡，不出现喷漏同在一裸眼中，即钻下部高压地层时用的较高密度的钻井液产生的液柱压力，不会压漏上部裸露的地层。

2.井内钻井液液柱压力和地层压力之间的压差不宜过大，以免发生压差卡钻。

3.为保证安全钻进，必须套管封住复杂地层井段，如易漏、易垮塌、易缩径和易卡钻等井段。

4.对钻探多套压力系统的井，应采用多层套管程序，以保护热储层不受钻井液污染和损害。

五、钻井设计要体现低成本的原则。为此，设计应注意三点：一要充分了解各种资料，在安全的前提下，简化井身结构；二要选用先进的工具、设备和技术；三要在满足要求的前提下，优先使用国产材料。其目的在于提高钻井速度，降低钻井成本。

### 2.2.2钻完井技术要求

中深井以深地热井，宜采用石油（API标准）管材，其机械性能符合钢级J-55及以上，管材壁厚应大于6mm。地热井常用井壁管可参照GB/T9808-2008选择。

中深层地热地埋管在钻探开钻前应根据钻井设计书的要求，制定出该井的施工技术措施。根据钻井设计书，准备好各类工具、仪器、器材，其规格应符合设计要求。并检查钻具规格，丈量钻具和表层套管长度。检查各种配合接头的规格，其中包括长度、内径、螺纹类型，并做好原始记录。 准备好各种符合标准的井口工具。准备好井场各种生产用报表。按技术规定调校好指重表及各种仪表。

一、钻井结构

设计钻井结构时，应依据地热井类型、地热储类型、地层特点、水文地质条件、水量、钻井深度、终孔直径、开采设备、钻井工艺方法等因素综合确定。

地热井钻井结构，宜按二至三级口径设计，各级与其相应深度构成相应井段。口径应满足测井及热交换的要求，终孔口径不宜小于124mm。

二、钻井方法

取心钻进应根据地层特性参照DZ/T0227选择相应的钻进方法。

全面钻进应根据不同热储类型地层特性参照DZ/T0148选择相应的钻进方法。

孔隙型地热井宜采用牙轮、金刚石复合片等钻进方法。

裂隙型、裂隙岩溶型地热井宜采用牙轮、潜孔锤、金刚石复合片等钻进方法和气举反循环钻进技术。

三、钻井工艺

地热钻探取心钻进工艺应参照DZ/T0227的规定执行。

全面钻进工艺应根据不同热储类型地层特性采用相应的钻进工艺。

1.孔隙型地热井钻进工艺

第四系宜采用牙轮钻头、刮刀钻头、金刚石复合片钻头泥浆钻进，穿过砂层、钻遇稳定黏土层下入表管，并进行水泥固井。

新近系、古近系（含热储段）宜采用牙轮钻头或金刚石复合片钻头泥浆钻进。

2.裂隙型地热井钻进工艺

第四系等，宜采用牙轮、合金、金刚石复合片钻进，泥浆作钻井液，钻遇完整基岩下入表层管，并进行水泥固井。

深孔段可采用牙轮钻进，泥浆、泡沫作为钻井液，条件允许时可采用气举反循环钻进工艺。

3.裂隙岩溶型地热井钻进工艺

第四系、新近系、古近系等沉积岩，宜采用铣齿牙轮、金刚石复合片、刮刀钻头泥浆钻进，钻遇完整基岩下入表层管，并进行水泥固井。

石炭-二叠系等沉积岩，宜采用镶齿牙轮钻头等进行低固相泥浆钻进，钻遇稳定热储顶板下入井壁管（技术套管）完井。

四、成井工艺

成井结构要求：

中深层地热地埋管应全孔段下入井管。井管长度依据热储层换热深度确定。

要严格按照要求进行钻孔，如果实施过程中遇到与要求不合或不利于工程进行的情形，应及时调整方案。

### 2.2.3固井技术要求

表层套管固井时，水泥浆应返至地面；技术套管固井时，水泥浆应返至套管重叠段顶部，技术套管较长时，水泥浆全返具有难度，广泛采用固井作法是在管串底部，井壁与套管的环状间隙内注入一定高度的水泥浆，在管串顶部，井壁与套管的环状间隙内再挤入一定高度的水泥浆。

表层套管固井选用普通水泥，井深2000m以浅且温度不高于75℃时选用普通水泥，其他情况选用油井水泥。

水泥浆要求按GB/T 19139执行。

采用标号以上水泥固井，凝固时间不应小于72h；采用油井水泥固井，凝固时间不应小于48h；

固井质量检测：应进行试压检测，压力不小于3MPa，压力稳定时间不少于10min。

尽量对天花管裸孔或以上段全孔加以固井

### 2.2.4下套管技术要求

为保证安全钻进，必须套管封住复杂地层井段，如易漏、易垮塌、易缩径和易卡钻等井段。对钻探多套压力系统的井，应采用多层套管程序，以保护热储层不受钻井液污染和损害。

## 2.3地热换热系统

### 2.3.1一般规定

中深层地热地埋管供热系统应以地热地质调查与评价结果为依据进行地热换热系统设计与施工。地热换热系统施工前，应预留未来地下管线所需埋管空间及埋管区域进出重型设备的车道位置，严禁损坏地下既有管线和构筑物。地热换热系统施工后，应在埋管区域标明管线的定位带。

### 2.3.2地热换热系统取热能力评价

单个同轴套管形式的中深层地热换热器取热量可依据地温梯度与中深层地热换热器安装深度进行估算。

### 2.3.3地热换热系统设计

地热换热系统应根据建筑物冬季用热负荷和中深层地热地埋管供热系统的供热量进行设计，合理配置蓄能装置、削峰热源形式等。

中深层地热地埋管供热系统的供热量应满足建筑物冬季用热负荷，用热负荷的具体计算方法应符合《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB-50736、《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50019的有关规定。

地热换热系统的中深层地热换热器安装至中深层取热层，埋深宜为2000m~3000m。

地热换热系统的水平连接管深度应满足地下交通、景观、绿化、人防等及地面荷载的要求，在湿陷性黄土地区敷设管线还应采取措施防止黄土湿陷对管线可能产生的影响。

地热换热系统的安装位置应靠近供热用户，与附近水井间的距离应满足《陕西省地下水条例》的相关要求。

地热孔一般选用水泥作为回填材料的基料。当地热换热系统需穿透含水层时，应选用符合环保要求的回填材料。

地热换热系统的管道水力计算应根据实际要求的流量和实际选用的传热介质的水力特性进行管道水力计算。地热换热系统循环阻力，应结合地热换热器构造、流通截面、地热换热器内、外管道材质及粗糙度、以及地热热泵机组热源侧水阻等因素计算确定，并作为地热换热系统循环水泵的选型依据。

地热换热系统各单井应独立设置温度、流量、压力等测量仪器。

### 2.3.4地热换热系统管材与循环介质要求

地热换热系统的管材及管件应采用相同材料，且应具有化学稳定性好、耐腐蚀、导热系数大、流动阻力小等特性。中深层地热换热器的管材一般采用可耐压的特制钢管，管材宜符合《无干扰地热供热系统工程技术规范》DB61/T的要求；同轴套管换热器的内管应采用高热阻管材，且其强度、耐温性及耐久性应满足设计和使用要求。

循环介质的材料要求：循环介质应选用环保、性能稳定、导热率高的换热介质，宜符合《蒸气压缩循环冷水（热泵）机组第1部分：工业或商业用及类似用途的冷水（热泵）机组》GB/T18430.1附录D的要求，也可选用符合下列要求的其他介质：

1.安全，腐蚀性弱，与中深层地埋管管材无化学反应；

2.较低的冰点；

3.良好的传热特性，较低的摩擦阻力；

4.易于购买、运输和储藏。

为防止因泄露等原因对地层造成污染，循环介质中不得加注乙二醇等添加剂。

## 2.4机房供热系统

### 2.4.1一般规定

机房供热系统由输配管网、换热器或热泵机组、末端用户组成。

一、机房供热系统设计应按如下要求进行：

1.机房供热系统设计前期应开展必要的可行性研究或初步设计，中深层地热换热器取热量可通过估算确定；

2.施工图设计或实施阶段，宜按实际测试对地埋管取热量进行修正；

二、机房供热系统设计要求：

1.中深层地热换热器与供热末端用户宜分系统设置，当合用系统时应有相应的防护措施；

2.机房供热系统应按末端形式合理选择供回水温度和温差，供回水温差宜取5℃~10℃；

3.当条件允许时，机房供热系统应优先选用中深层地热换热器直接供热的形式与运行模式。

### 2.4.2设备选型和安装要求

用于中深层地热地埋管供热系统的热泵机组，热源侧进水温度应按20℃~55℃设置，进出水温差可按10℃~20℃选取，设备容量与参数应根据项目设计工况适时选用。

一、设备与辅助配件选用选型依照如下要求：

1.设备与辅助配件的材料与承压选用，应按地热换热系统与供热末端系统要求选用；

2.热泵应按设计（非测试）工况进行选取；水泵应配合地热换热系统或供热末端系统及要求分别选用，系统宜优先选用具有变频调节功能的水泵；

3.为保障产品整机质量、节省机房占地，热泵、水泵宜采用一体化装配式装置。

二、系统及设备安装依照如下要求：

1.供热末端系统依据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736要求，进行安装与调试；

2.热泵与水泵的安装应根据周围环境要求，设置相应的隔振与消音装置；

3.为保证系统整体质量、节省工期以及减少设备用地，设备机房内系统安装宜采用装配式机房。

## 2.5监测与控制系统

### 2.5.1一般规定

中深层地热地埋管供热系统应在便于观察到的位置设置现场监测仪表，以监测重要参数。

中深层地热地埋管供热系统除设置现场监测仪表外，宜采用集中监控系统。

流量、温度、压力传感器的测量范围和精度应与二次仪表匹配。

### 2.5.2运行控制系统

中深层地热地埋管供热系统应采用智能控制系统，实现对中深层地热地埋管供热系统中的地热热泵机组、换热设备、输配水泵、供热系统主要末端等设备的监测与控制，以及对设备仪表的信息采集和处理。

现场控制器宜在脱离主控或分控计算机控制后仍能维持掉线前的控制状态，并独立完成各种控制及监测工作。

热源侧水泵和用户侧水泵应采用变频控制装置。

宜设置视频监控系统，将主要设备参数及水位信号等远传至控制中心。

一、控制系统宜具备以下基本功能：

1.控制系统可根据运行状态预设，并根据系统实际制热量、温度、水量等需要对中深层地热地埋管供热系统进行调节，实现与运营区域相关设备的控制和管理；

2.所有受控设备在启动时，凡可能危及到设备和操作人员安全时，应设有手动/自动转换开关，在中央控制器上显示上述设备的运行状态和手动/自动状态及故障报警显示；

3.控制系统宜具备多级操作权限的级别设置和用户口令，只有经过授权的操作人员才能完成系统有关程序和运行参数的增删和修改；

4.控制系统软件宜包括但不限于：运行系统、数据库管理、通信控制、操作人员接口、程序调度、时间与联锁程序等部分。工作站提供彩色动态图像显示，实时显示设备的运行状态，一旦发生故障，会立即报警，便与运营人员日常管理维护；

5.控制系统宜提供实时24小时在线帮助功能，以便操作人员及时获得处理疑难状况所需资源。系统应集中监控和管理机电设备的工作状态，及时诊断、显示设备的故障，对所有监视、控制点位的状态、运行数据、故障报警等历史记录进行存储、统计和打印。

中深层地热地埋管供热系统各种机电设备控制柜应给自动控制系统预留硬连接接口，并提供电气二次回路需预留的监视和控制接点。地热热泵机组应在厂家成套控制柜内预留RS485硬连接通信接口，通信协议可采用市场主流的MODBUS RTU或BACnet MSTP通信协议；各种水泵控制柜电气二次回路预留水泵运行状态、故障状态、手自动状态和远程启停干接点接口，如果是变频泵，还需要提供变频控制及频率反馈接口。

各系统分级控器宜采用冗余设计。

### 2.5.3主要设备运行状态监控

一、地热热泵机组应监控的内容宜包括：

1.运行状态，开启或停止；

2.故障报警；

3.用户侧热水供回水温度以及供热量；

4.地热换热系统进出口温度以及取热量；

5.机组运行电流、电功率、累计耗电量以及机组能效比；

6.机组蒸发器饱和温度、压力，冷凝器饱和温度、压力。

二、热源侧系统和设备应监控的内容宜包括：

1.热源侧水泵耗电量；

2.地热换热系统设备流量，进出口温度，进出口压力或压降。

三、用户侧输配系统和设备应监控的内容宜包括：

1.用户侧水泵耗电量；

2.用户侧干管及主要支路的流量、回水温度、压力、供热量；

3.用户侧末端换热器、热源侧和用户侧的流量、进入口温度、压力以及热源侧供热量和用户侧换热量，换热器热损失及换热器效能；

4.用户侧输配管网供水温度沿程降低量，从供热站出口到最远端供热末端换热器或建筑物入口。

四、其他需监控的系统和设备运行基本状态：

1.水泵工作状态，启动或停止；

2.水泵变频器工作状态，手动或自动，变频器控制频率和反馈频率；

3.电动阀门工作状态，阀门开度控制值和反馈值；

4.软水器、除氧器等供热水处理设备工作状态。

### 2.5.4能耗能效监测评估系统

能耗能效监测评估系统的目标是使管理者对中深层地热地埋管供热系统的能源供应量、能源效率、能源成本的现状、历史及未来发展趋势有准确的掌握；通过设备运行效率数据，使得管理者充分了解中深层地热地埋管供热系统和设备实际运行效率，保证系统和设备的始终运行在有条不紊、协调一致的绿色节能、清洁供热状态。

## 2.6系统调试、质量验收及运行维护

### 2.6.1一般规定

中深层地热地埋管供热系统交付使用前应进行完整的系统调试、试运行与验收，其中供热系统部分的机房和设备验收流程参照相关国家标准或行业标准。

一、中深层地热地埋管供热系统试运行期间的测试与调整应符合下列规定：

1.中深层地热换热系统的换热介质压力、温度、流量等技术参数应符合设计要求；

2.地面供热系统末端的介质压力、温度、流量等技术参数应符合设计要求；

3.中深层地热换热系统和地面供热系统实现连续运行平稳，水管阻力、阀门阻力和水泵效率、电机功率应符合设计要求，消除不合理的管道阻力；

4.控制与监测系统的计量和检测传感器、执行器的工作正常、通讯正常，满足对中深层地热供热系统进行监测和控制的设计要求，能正确显示监测结果，实现设备连锁、自动调节、自动保护等功能；

5.控制和监测系统检测的数据、设备状态，应按一定时间间隔（不长于15分钟一次）进行记录，并将记录结果自动存储于控制和监测系统的服务器存储器或云端存储器中，以备随时查验；

6.中深层地热地埋管供热系统验收调试后应形成调试报告，包括调试前的准备记录、水力平衡、机组及系统试运转的全部测试数据和现场图像记录。

中深层地热地埋管供热系统的验收应填写系统验收记录表，存档备案。

中深层地热地埋管供热系统工程质量由区县以上建设行政主管部门委托的建设工程质量监督机构（如区、县建设工程质量监督站）实施监督管理及工程备案。

中深层地热地埋管供热系统调试、试运行与验收除应符合本规范规定外，还应符合现行国家标准《通风与空调工程施工质量验收规范》GB50243和《建筑节能工程质量验收规范》GB50411的相关规定。

# 3主要试验的分析和综述报告

## 3.1技术综述报告

近年来，我国大气环境污染状况日益严峻，许多地区出现了大范围、持久性的雾霾天气。2014年1月4日，国家减灾办、民政部通报2013年自然灾情，首次将雾霾天气纳入。雾霾不仅严重威胁了公众的生活和健康，而且还对社会经济产生诸多负面影响，雾霾污染已成为中国现阶段急需解决的问题之一。以西安市为例，2013年，西安市空气受不同程度污染天数达227天，在全年污染天数中，以PM2.5为首要污染物138天，占60.8%[1]。2016年12月份的雾霾使得我国多地罕见地启动了红色预警，给人民健康造成了严重危害，极大影响了市民的生活和日常工作。

冬季燃煤取暖是造成雾霾的重要原因，由美国麻省理工学院、北京的清华大学和北京大学，以及耶路撒冷希伯来大学的多名教授联名发表在美国国家科学院会刊（PNAS）上的论文指出，中国北方由于集中供热导致大气中总悬浮颗粒物（简称TSP）的浓度比南方高55%，导致寿命预期降低5.52年[2]。因此，如何有效地利用清洁能源替代煤炭在北方进行供暖，是解决雾霾的重点问题之一。在城市用清洁能源中，地热能具有稳定、储量丰富及高效性等多种特点，正日益得到国内外学者的关注[3]。据全国地热资源调查评价数据可知，我国的地热能储量非常丰富，可开采量是已知煤炭可开采量的2.5倍，尤其在地表以下2000m内，地热能的存储量约为2500亿吨标准煤，每年可开采量约为68亿立方米，其蕴含的热量约为973万亿千焦[4]。正由于地热能储量丰富、可开发潜力大、分布广泛、热源稳定、无污染且不受时间、季节、地域限制等优点，

地源热泵技术是利用地热解决北方冬季室内供暖问题的重要途径，也是目前地热资源的主要利用方式。目前的地源热泵技术主要利用地下浅层岩土的蓄热作用，冬季从较室外空气温度高的地下（常年维持在十多度）取热，通过热泵的方式供室内供暖使用，而夏季则将通过热泵从室内取出的热充入地下。通过近年的发展，在部分地方地源热泵较好地解决了冬季取暖的问题，但冬夏冷热不均、地埋管占地面积广以及冬季取热量不足等问题仍制约着其在全国范围内大范围推广[5-7]。

为解决这些问题，一种利用中深层地热能的供暖形式应运而生。中深层地埋管地热供热技术是一种新型供热技术，即通过钻机向地下一定深度（2000~3000m）高温岩体钻孔，在钻孔中安装一种密闭的金属套管换热器，通过传热介质在套管换热器不断的循环来提取地下中深层热能，并结合高温热泵技术向建筑供热，其技术原理图如图1所示。这种热泵供热技术采用中深层地热换热器间接提取地下热能，具有以下特点：

一、高效节能、运行稳定。地下深层岩体温度全年稳定，且较浅层温度高，系统供热效率更高，运行更为稳定；二、占地面积小。该技术提取深层品味较高的地热能，单井换热量大，占地面积少，适宜在我国北方城市地区作为供热热源；三、保护地下水和地热水资源。该技术通过在钻井中布置密闭换热器与岩体实现间接换热，不抽取地下水，没有尾水及尾水回灌的问题； 四、无冷热平衡问题。该技术是一种以地下数千米地热能为热源的新型供热技术，所利用的热能是由地球内部放射性元素发生衰变时产生的热量，具有可持续性，不需要考虑冬夏季的冷热平衡问题，系统在夏季增加冷却塔装置后可作为空调冷源。

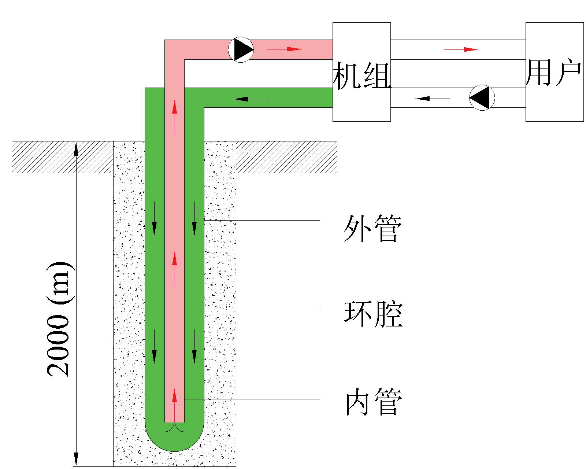


图1 中深层地埋管地热供热技术原理图

中深层地埋管地热供热系统出水温度比传统地源热泵的出水温度高数十度[8]，因此其热泵的性能系数（COP）则非常高，因此这类系统可以较少电能从地下取得更多能量供热使用。如能较好地利用中深层地热资源进行冬季采暖，部分替代目前北方的煤炭采暖的现状，将对于我国治污减霾具有重要意义，也有利于目前的节能减排工作。

在国外发展方面，欧洲利用地热供热发展较为迅速，截至2012年底，欧洲地热直接利用装机容量达到24.3GW，主要包括地源热泵（16.5GW）、地热区域供暖（3.9GW）、地热工农业应用（1.4GW）以及地热洗浴等（2.6GW）[9]。目前，中深层地热能由于具有稳定、连续、利用效率高、蕴含能量较浅层地热多、温度也更高等优点，越来越受到广泛关注。国外学者最开始是在干热岩深层地热能方面的利用，在干热岩（Hot Dry Rock）技术基础上，提出了一种新型的地热系统即增强型地热系统（EGS—Enhanced Geothermal Systems）。增强型地热系统是通过注入井注水在地下热岩处实现循环，通过人工技术产生的张开的连通裂隙带，从而使水和岩体接触被加热，最后通过生产井返回地面形成一个闭式回路[10]。因此，这一技术的成功与否，主要取决于井间压裂作业的质量，即地下人工热储层的构造问题[11]。然而，随着此技术的利用，发现在压裂过程中会造成地质构造的破坏，甚至出现微地震的发生，且传热介质与高温岩土直接接触换热，需要对传热介质进行净化处理。而中深层地埋管地热供热技术很好地解决了上述问题，通过中深层地热换热器提取中深层地热能为建筑供热，传热介质与中深层岩土进行间接换热，一方面避免了破坏地质结构，另一方面有利于保护传热介质不受污染。

在德国普伦茨劳（1996年），亚琛（2013年），波兰别斯基茨卡（2000年），瑞士韦斯巴德（2000年），韦吉斯（1998年），美国夏威夷（1991年）等城市地区均开始了中深层地埋管地热供热技术应用的探索[12-14]。许多国外学者也对此技术展开了更为深入的研究。Kohl[15]针对中深层地埋管地热供热系统换热器的换热性能进行了研究，其钻井是由废弃的石油井改造而成，钻井深2302m，位于瑞士的Weggis，研究结果表明中深层地热换热器换热量可以达到200kW以上，其换热量远远超过了传统的浅层地埋管换热系统。Kujawa[16]研究了利用现存的深层钻井改造为中深层中深层地埋管地热供热系统来提取地热能资源，并发现循环流体流量和中深层地热换热器内管绝热性能对换热性能有显著影响。Huchtemann[17]等分析了中深层地埋管地热供热系统应用于某办公建筑采暖的情况，其中系统承担了该办公建筑大约50%的负荷，得出为增加系统的换热量而不断增加传热介质流量是不合理的。Bär(2015)[18]讨论了传热介质的流向对中深层地热换热器换热性能的影响，认为在取热模式下载体应从外管流入，内管流出；而在蓄热模式下，载体应从内管流入，外管流出。

近年来，我国学者在中深层地热供热方面也开展了大量研究。山东建筑大学李宜程等[18]通过结合北方某实际供暖项目应用实例，给出深层地热能梯级利用的设计方法、钻孔施工过程、尾水处理方法以及回灌技术等关键问题，为我国深层地热能示范工程的推广应用，提供指导和优化建议。李力[19]利用深层和浅层地源热泵系统相结合的天津某项供热工程，对该地热供热系统做了初投资及运行费用分析，得出地热能作为清洁可再生能源，若合理利用，将有助于节能减排且具有较好的社会效益与经济效益的结论。姜培学等[20]对中深层干热型采暖技术进行了初步的数值模拟和理论分析，认为在注入井和产出井保温设计良好，地上供热体系管理完善的情况下，该技术具有一定的经济性。张铭[21]主要从优化理论的角度出发，对深层地热高温水供热系统的几种关键技术设备，如高温热泵、换热器和风机盘管等关键技术进行了研究。李瑞霞等[22]以某办公楼中央空调系统为实例，介绍了综合开发利用深层和浅层地热能相结合的水源热泵系统的设计方式，结果表明，采用此系统具有较好的经济性和明显的节能减排效果。

以上介绍的均是直接抽取深层地热水来进行供暖，这样很容易造成地热水的浪费。山东建筑大学、西安交通大学、清华大学等高校在中深层地埋管地热供热系统的推广及应用做了大量的研究工作。山东建筑大学方肇洪等[23]利用有限差分的方法预测了中深层地热换热器的换热能力，其算法有效地提高了计算速度，可以快速地预测出连续运行多年的换热能力的变化规律。西安交通大学王沣浩等[24]开展了中深层地埋管地热供热系统换热能力的实验研究，实测结果表明系统的COP在4.2-5.1，体现了系统良好的换热效率，并对中深层地热换热器的换热能力进行了敏感性分析，为优化地热换热器运行工况具有重要的指导意义。清华大学魏庆芃[25]实测了中深层地埋管地热供热系统的实际运行情况，计算出中深层地热换热器单位长度取热量可以达到常规地源热泵系统的2.0~3.6倍，并得到中深层地埋管地热供热系统适合为居住建筑供暖的结论。此外，沈阳建筑大学赵俭斌等[26]研究了提取干热岩资源为地面建筑物供热的可行性，提出岩石和水的直接接触热交换、保温技术的应用、井管材料的选择、高温高压下岩石的导热性能以及地下热储层的构造等关键技术得以解决，将对干热岩资源用于辽沈地区供暖带来技术上的突破。阚长宾等[27]从中深层地埋管地热供热系统这一系统工程着手，对油田废弃油井稍加改造，探索将废弃油井改造为地热井用于开发中深层地热能的可行性。Bu[28]利用数值模拟的方法研究了中深层地热换热器提取地热能，模拟结果表明循环流体的流量和地温梯度是影响换热量的两个最主要因素。对于确定的地温梯度，总存在最优的流速使换热量最大，并且地热换热器换热性能长期稳定性良好。

总体来看，中深层地埋管地热供热系统已在世界范围展开了相关的研究工作，并且由于其换热量大、适宜性强、占地面积小的特点受到了供热行业的青睐。国内的诸多企业例如陕西四季春清洁热源股份有限公司、山东海利丰清洁能源股份有限公司等也在积极投入中深层地埋管地热供热系统的实际项目中，打造了良好的示范工程典范；许多高校例如清华大学、西安交通大学、西北大学等也为中深层地埋管地热供热系统应用于建筑供热方面做出大量的理论和实验工作，为中深层地埋管地热供热系统的设计、运维、监测等工作的进行奠定了坚实的基础。在国家和各级人民政府的支持下，中深层地埋管地热供热技术正迎来了自己的春天。

**参考文献**

[1] 中国新闻网, 2013年西安227个污染天PM2.5成祸首. <http://www.chinanews.com/df/ 2014/ 03-05/5914982.shtml>, 2014-3-5).

[2] Y. Chen, A. Ebenstein, M. Greenstone, H. Li, Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China’s Huai River policy, Proceedings of the National Academy of Sciences 110(32) (2013) 12936-12941.

[3] 刘柏谦, 洪慧, 王立刚, 能源工程概论, 化学工业出版社, 北京, 2009.

[4] 王小毅, 李汉明, 地热能的利用与发展前景, 能源研究与利用 (3) (2013) 44-48.

[5]徐伟，张时聪．中国地源热泵技术现状及发展趋势[J]．太阳能，2007，(3)：11-14．

[6]Sarbu I, Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 70(1): 441-454.

[7]Yuan Y, Cao X, Sun L, et al. Ground source heat pump system: A review of simulation in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6814-6822.

[8] A. Sapinska-Sliwa, M.A. Rosen, A. Gonet, T. Sliwa, Deep Borehole Heat Exchangers: A Conceptual Review, Proceedings of the World Geothermal Congress, 2015, pp. 1-11.

[9] M. Antics, R. Bertani, B. Sanner, Summary of EGC 2013 country update reports on geothermal energy in Europe, Proceeding of the EGC (2013) 3-6.

[10] J. Chen, F. Jiang, Designing multi-well layout for enhanced geothermal system to better exploit hot dry rock geothermal energy, Renewable Energy 74 (2015) 37-48.

[11] 廖志杰, 万天丰, 张振国, 增强型地热系统: 潜力大, 开发难, 地热能 (2) (2015) 3-12.

[12] Sapinskasliwa A, Rosen MA, Gonet A, et al. Deep Borehole Heat Exchangers — A Conceptual and Comparative Review. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 2016; 24.

[13] Śliwa T, Kotyza J. Application of existing wells as ground heat source for heat pumps in Poland. Appl Energy 2003; 74: 3-8.

[14] Kujawa T, Nowak W, Stachel AA. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy. Energy 2006; 31: 650-664.

[15] Kohl T, Brenni R, Eugster W. System performance of a deep borehole heat exchanger. Geothermics 2002; 31: 687-708.

[16] Kujawa T, Nowak W, Stachel AA. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy[J]. Energy, 2006, 31 (5): 650-664.

[17] K.Huchtemann, D.Muller. Combined simulation of a deep ground source heat exchanger and an office building.Building and Environment. 2014;73:97-172.

[18] Kristian Bär, Wolfram Rühaak, Bastian Welsch, Daniel Schulte, Sebastian Homuth, Ingo Sass, Seasonal High Temperature Heat Storage with Medium Deep Borehole Heat Exchangers, Energy Procedia, Volume 76, 2015, Pages 351-360.

[18] 李宜程, 刁乃仁, 深层地热能梯级利用供暖方法, 节能 34(7) (2015) 62-64.

[19] 李力, 实现梯级利用的地热供热系统节能经济性分析, 资源节约与环保 (8) (2013) 3-4.

[20] 姜培学, 张富珍, 胥蕊娜, 王振川, 赵陈儒, 以 CO2 为工质的热泵系统与中深层地热采暖技术, 建设科技 (2) (2016) 27-33.

[21] 张铭, 高温地热水供热系统关键技术研究, 应用能源技术 (7) (2013) 48-50. [22] 李瑞霞, 王培浩, 深浅结合地热能开发利用工程实例, 建筑科学 4 (2013) 021.

[23] Fang L, Diao N, Shao Z, et al. A Computationally Efficient Numerical Model for Heat Transfer Simulation of Deep Borehole Heat Exchangers[J]. Energy & Buildings, 2018, 167.

[24] Wang Z, Wang F, Liu J, et al. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 153.

[25] 邓杰文, 魏庆芃, 张辉,等. 中深层地热源热泵供暖系统能耗和能效实测分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(8):150-154.

[26] 冯晓燕, 沈阳地区利用干热岩资源供暖技术研究, 沈阳建筑大学, 2012.

[27] 阚长宾, 亓发庆, 于晓聪, 魏宏伟, 利用废弃油井开发地热能, 可再生能源 (1) (2008) 90-92.

[28] Bu XB, Ma WB, Li HS. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells[J]. Renewable Energy, 2012, 41: 80-85.

## 3.2中深层地埋管换热器技术分析

中深层地埋管换热器的换热长度达上千米，其与具有温度梯度的岩土体形成复杂的换热过程。对于同轴套管换热器来说，流体在环腔部分与岩土体发生热交换，进行热提取，而流体在内管中的流动则是被输送至地表的过程。由于内管材料不具备完全隔热的能力，内管中流体势必存在一定的能量损失。换热器在地表的取热量只是流体在换热器中不断进行能量交换后的结果，为充分了解中深层地埋管换热器的取热特性，需要探明流体在换热器中的能量交换过程，进而挖掘中深层地埋管换热器的取热潜力。

因此，本章对中深层地埋管换热器在换热过程中的能量传递规律展开分析，阐明取热能力的变化机制，进而明晰众多因素对其取热能力的影响程度。同时，针对流体在环腔中取热、内管中释热的换热特点，对中深层地埋管换热器的取热损失程度进行评价，综上充分揭示中深层地埋管换热器的取热特性。

### 3.2.1分析方法与评价指标

中深层地埋管换热器的取热特性研究从能量传递与取热性能两方面展开。在能量传递研究中，基于中深层地埋管换热器换热沿程长的特点，对换热器内的流体温度分布进行分析，探明流体在流动过程中的能量变化特点。此外，对钻井壁和内管壁上热流密度的沿程分布特性进行分析，进而揭示流体在换热过程中的能量传递规律。对于取热性能的研究，分别对换热器的取热能力以及取热损失进行分析，明确众多因素对取热能力的影响程度，探明换热器存在的取热潜力，具体如下：

1）沿程流体温度与沿程热流密度分布

沿程流体温度分布根据中深层地埋管换热器的组成结构分为环腔与内管的沿程流体温度分布，其反映了流体在换热器中不同空间位置上的温度情况。沿程热流密度分为钻井壁热流密度与内管壁热流密度，其分别反映钻井与岩土体之间、内管中流体与环腔中流体之间热量传递的大小与方向。其中，钻井壁热流密度由下式表达：

 （1-1）

式中：—— 钻井壁热流密度/ W·m-1；—— 钻井壁所在深度/m。

内管壁的延米换热速率反映了在取热过程中内管中流体向外传热的强度，由下式表达：

 （1-2）

式中：—— 内管壁热流密度/ W·m-1；—— 钻井壁所在深度/m。

2）取热性能

中深层地埋管换热器的取热能力一般以其换热量作为指标进行评价。然而，由于中深层地埋管换热器的换热长度较大，导致其换热量明显高于浅层地埋管换热器的换热量，故应以平均每延米换热量进一步评价中深层地埋管换热器的取热能力，其由下式进行计算：

 （1-3）

式中： —— 平均每延米换热量/W·m-1。

此外，较深处的岩土体温度在换热过程中不断下降，表明该区域的岩土体始终向换热器中的环腔中流体传热。因此，环腔中流体不断被加热，直至环腔底部，此时流体温度达到最高，所提取的热量达到最大。而流体在内管被输送至地表的过程中存在热损失，且由于输送距离大，流体温度存在一定程度的下降。据此，本文提出取热损失比来评价中深层地埋管换热器的取热损失程度，其为内管中损失的热量与在换热器底部所提取热量之比，具体表达式如下：

 （1-4）

式中： —— 取热损失比； —— 换热器底部位置的取热量/kW，此处流体的取热量达到了最大值； —— 流体到达环腔底部时的温度/°C。

根据本节的分析方法与评价指标，以单个供暖季（共计120天）为研究时长，对中深层地埋管换热器的能量传递与取热性能展开分析。本章研究的是中深层地埋管换热器的取热特性，故设定换热器在取热过程中的入口水温保持一定，其基准入口水温选取为17°C。此外，中深层地埋管换热器在实际取热过程中受多种因素的影响，导致取热量存在差异。本章将进一步揭示在不同影响因素作用下的取热特性，包括运行参数、地热特征参数以及设计参数的影响。

### 3.2.2中深层地埋管换热器能量传递分析

3.2.2.1沿程流体温度分布

图2所示为在基准参数下沿程流体温度的分布情况。选取了在供暖季中不同取热时间下的流体温度分布进行对比。环腔中流体温度沿着流动方向逐渐增加，表明流体处于取热的状态，其能量不断增加。而内管中流体的温度沿着流动的方向逐渐下降，流体发生了损失。以第120天的流体温度分布为例，流体到达换热器底部时的温度为32.2 °C，与入口水温相比增加了15.2 °C。当流体流至换热器出口时，温度减小至25.7 °C，流体在内管流动的过程中温度降低了6.5 °C。热提取进行至第5、10、20、30、60、90天时，流体在内管流动的过程中的温度分别降低9.2、8.4、7.8、7.4、6.9、6.7 °C，表明在取热前期内管中流体的能量损失更多。这是由于在取热前期的岩土体温度较高，环腔中流体与岩土体发生热交换时，其到达换热器底部时的温度就更高，完成热提取的流体在内管输送至地表的过程中与环腔部分形成较大的温差，导致内管中流体产生更多的热损失。

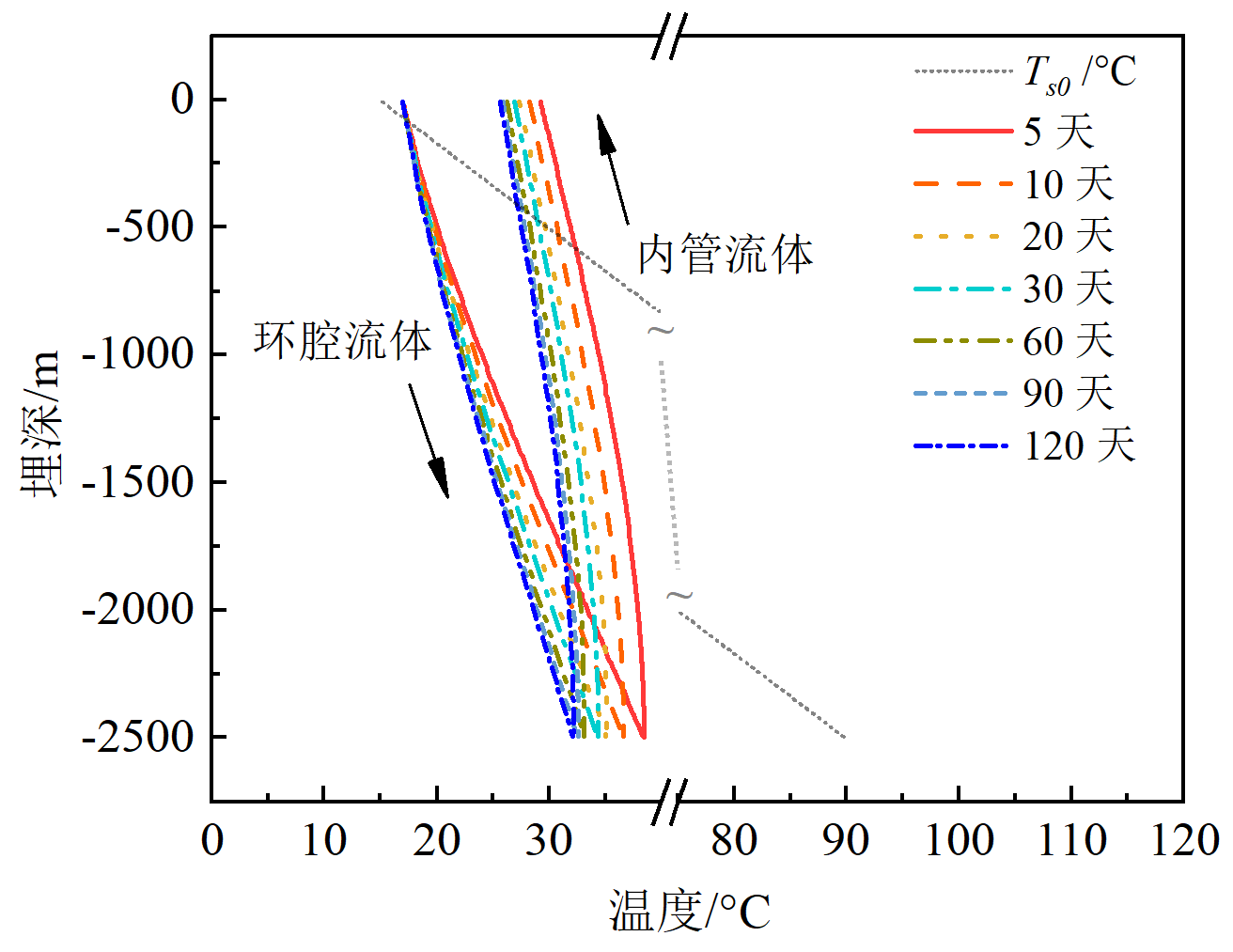


图2不同取热时间下沿程流体温度分布

由基准参数下的分析仍可见，沿程流体温度分布随着取热时间逐渐趋于一致，表明热提取进入较为稳定的阶段。本节以在热提取较为稳定阶段的沿程流体温度分布探究在不同影响因素作用下的取热特性，选取第120天的情况进行分析。

1）运行参数

影响中深层地埋管换热器取热特性的运行参数包括入口水温与循环流量。选取入口水温在15-21 °C下的沿程流体温度分布进行分析，其随着入口温度的增加而增加。在环腔中，入口温度在15、17、19、21 °C的条件下，流体从环腔入口流至换热器底部后的温度分别提高15.9、15.1、14.4、13.7 °C，表明入口温度越低越有利于热提取。然而，由换热器底部流至出口时的温度分别下降6.7、6.5、6.2、6.0 °C，表明在入口温度较低的条件下，流体在内管的换热过程中其温度的下降值略大。总体来看，随着入口水温的降低，流体温度在环腔中的增加程度要高于其在内管中的降低程度，导致换热器的进口与出口水温逐渐增大。

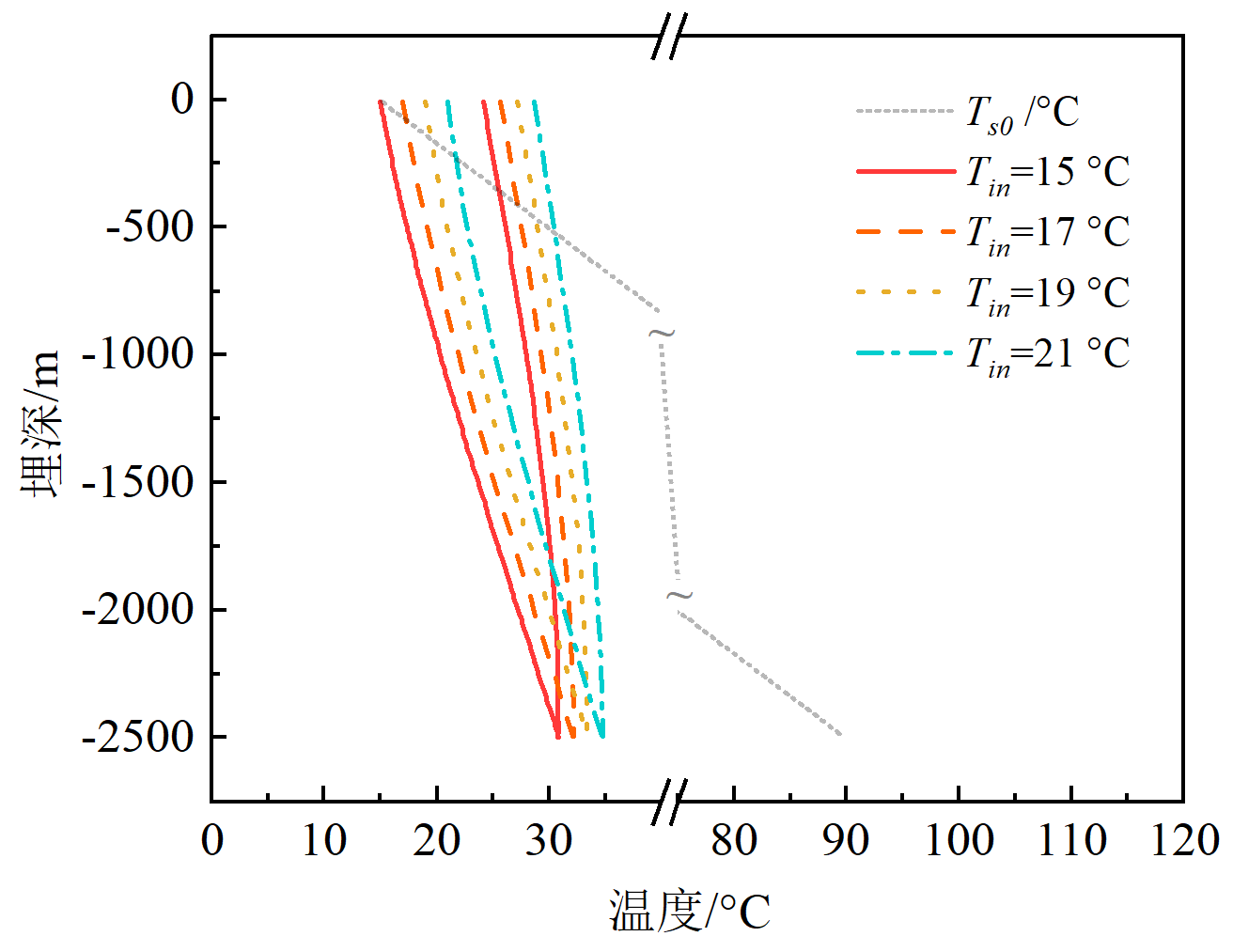


图3不同入口温度下的沿程流体温度分布

目前研究对于循环流量选择的差异较大，基于实验研究结果以及流体的流态特征（选取紊流，在本文基准工况下的环腔流速应大于0.1 m·s-1），选取环腔流速在0.3-0.7 m·s-1下的沿程流体温度分布进行分析（图4）。在不同流速下，换热器底部流体温度的差异与换热器出口处相比较为明显。流速在0.3 m·s-1下的换热器底部流体温度比在0.7 m·s-1下的温度高19.4 °C，而换热器出口的流体温度仅比0.7 m·s-1下的温度高4.0 °C。由此可知，随着流速的减小，换热器底部流体温度的增加程度较为明显，但在内管中流体温度的下降程度也较大，导致在换热器出口时的温度优势并不明显。

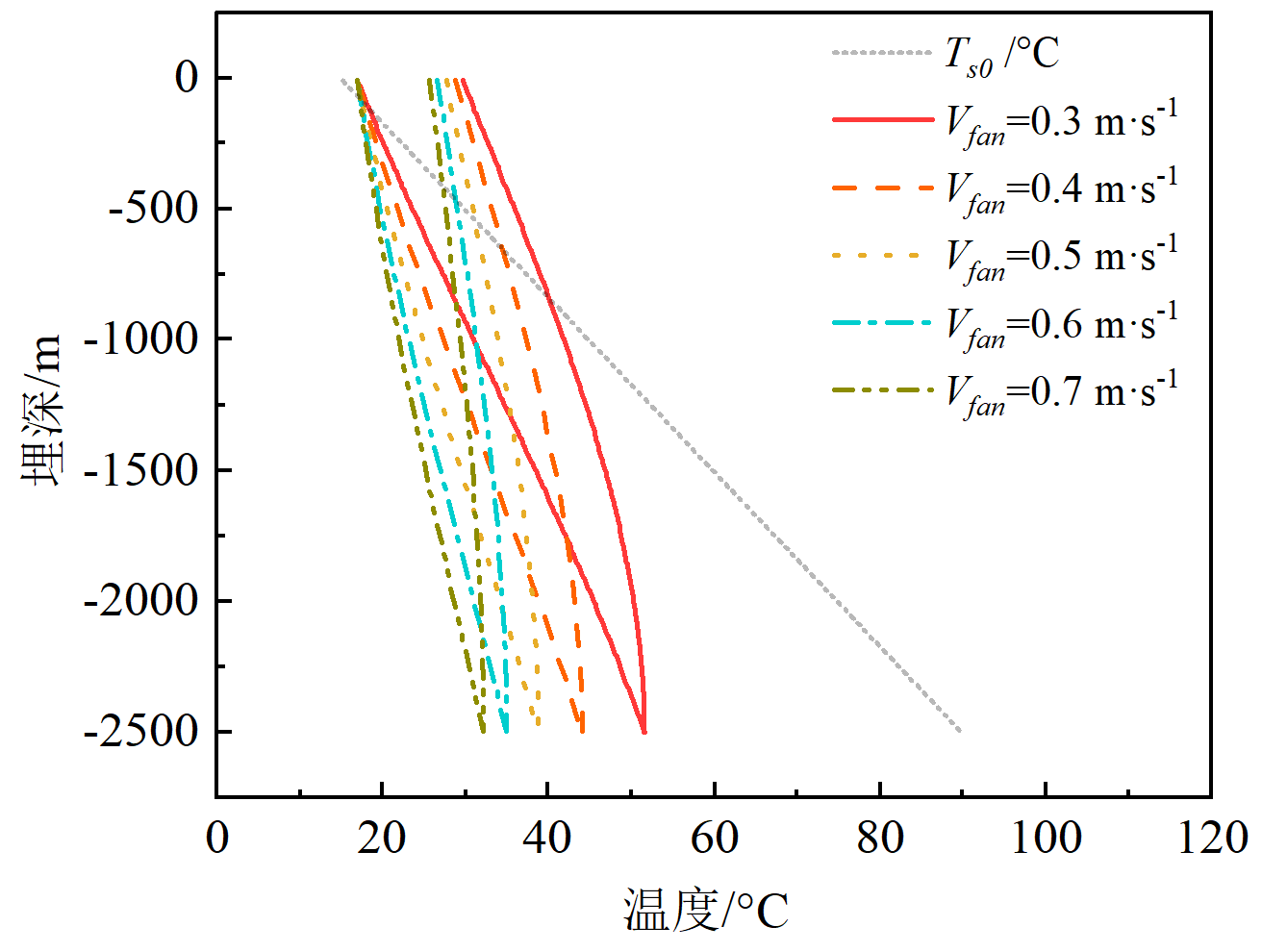


图4不同入口流速下的沿程流体温度分布

2）地热特征参数

地热特征参数主要包括岩土体热物性参数和地温参数，其大小决定了中深层地埋管换热器的取热条件。

在岩土体热物性参数方面，探究了岩土体导热系数与岩土体比热容的影响。基于目前相关研究，选取岩土体导热系数在1.5-3.0 W·m-1·K-1（图5）、岩土体比热容在1500-3000 kJ·m-3·K-1（图6）条件下的沿程流体温度分布展开分析。从图中可见，温度分布随着以上两个地热特征参数的增加而增加，但经对比发现岩土体导热系数比岩土体比热容的作用更为明显。此外，内管中流体温度在1.5、2.0、2.5、3.0 W·m-1·K-1下分别下降4.6、5.7、6.5、7.2 °C，表明随着岩土体导热系数的增加，内管中流体温度的下降程度也增大。

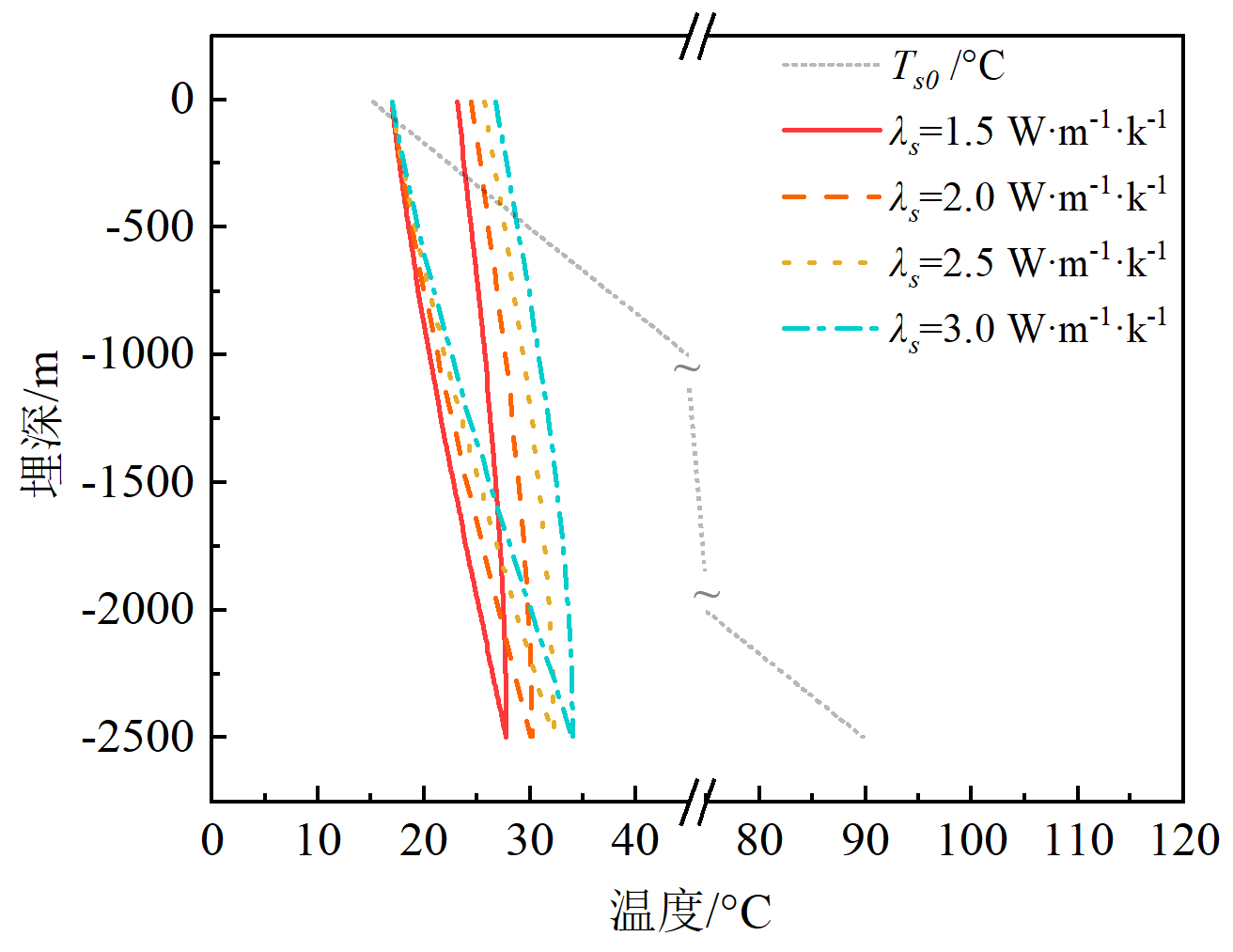


图5不同岩土体导热系数下的沿程流体温度分布

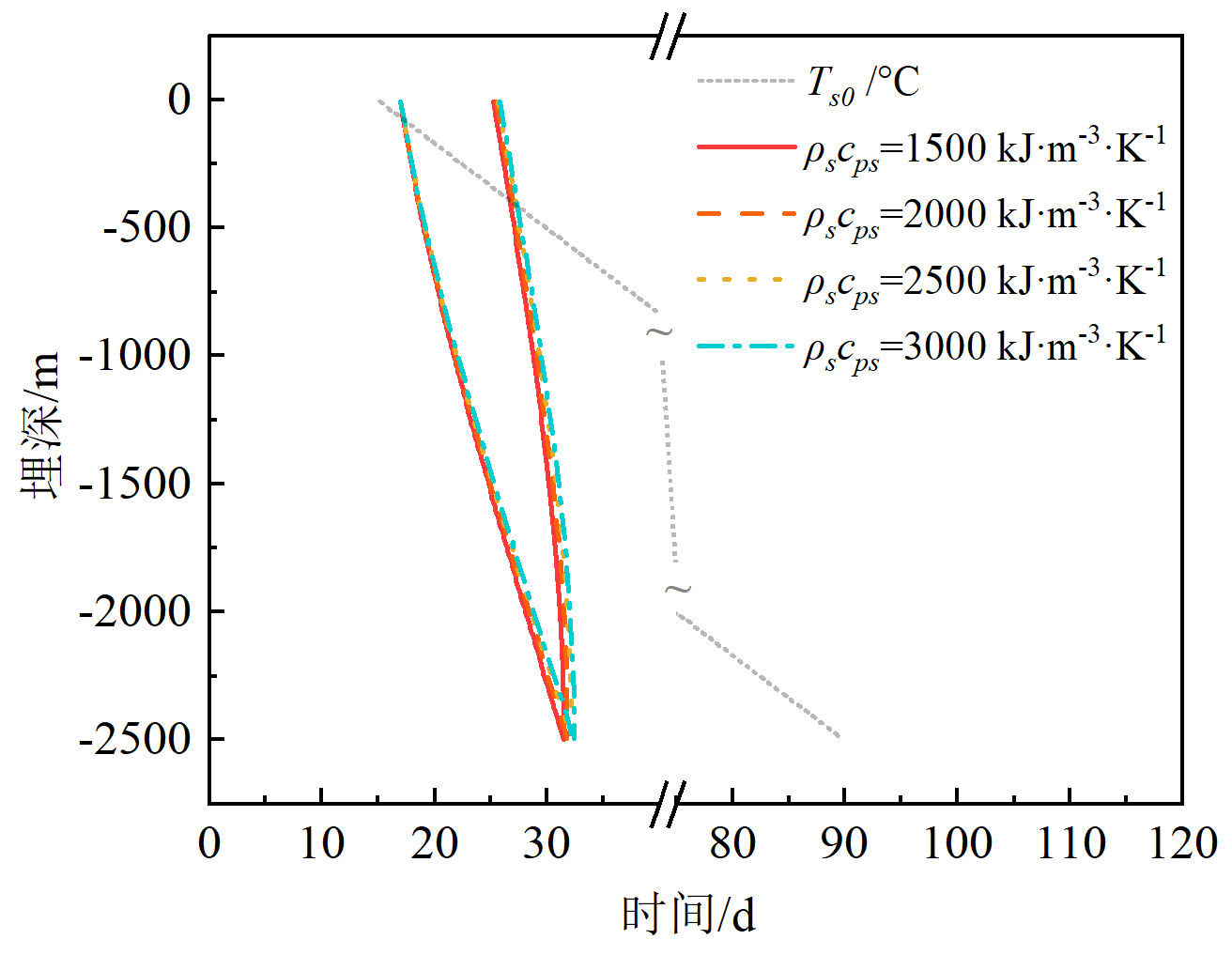


图6不同岩土体比热容下的沿程流体温度分布

地温参数由地表温度与地温梯度共同决定。在当前研究中，30 °C·km-1是最为常见的地温梯度值。随着地勘工作的不断深入，可以发现不同地区的地温梯度是存在差别的[44]。本节选取了地温梯度在25-40 °C·km-1的情况进行分析（图7），地表温度依据我国不同地区的年平均气温[[[1]](#endnote-1)]选取5-20 °C进行分析（图8），图中也给出了岩土体在未被干扰状态下的温度分布情况。在地温梯度较大时，岩土体的未被干扰温度沿着深度方向的增加程度也越大。而对于地表温度的影响，不同深度下的岩土体温度随着地表温度的上升均匀增加。尽管地温梯度与地表温度作用于岩土体温度场的规律存在差别，但随着以上两个因素的增大，环腔中流体温度均被提高，但内管中流体温度下降的程度也较大。此外，由图中可见换热器底部的流体温度与对应深度下未被干扰的岩土体温度相差较大，地温梯度为25、30、35、40 °C·km-1下的上述两者温度之差分别为-47.9、-57.7、-67.5、-77.3 °C（图7），地表温度为5、10、15、20 °C下的温度之差分别为-51.3、-54.5、-57.7、-60.9 °C（图8）。由此表明尽管中深层岩土体的能量品位较高，但换热器中流体所能达到的温度与其相比仍存在一定的差距。这是因为在换热器的热提取期间，周围岩土体的温度不断下降；此外，受运行工况的影响，流体在换热过程中无法与深处较高温度的岩土体实现充分换热。

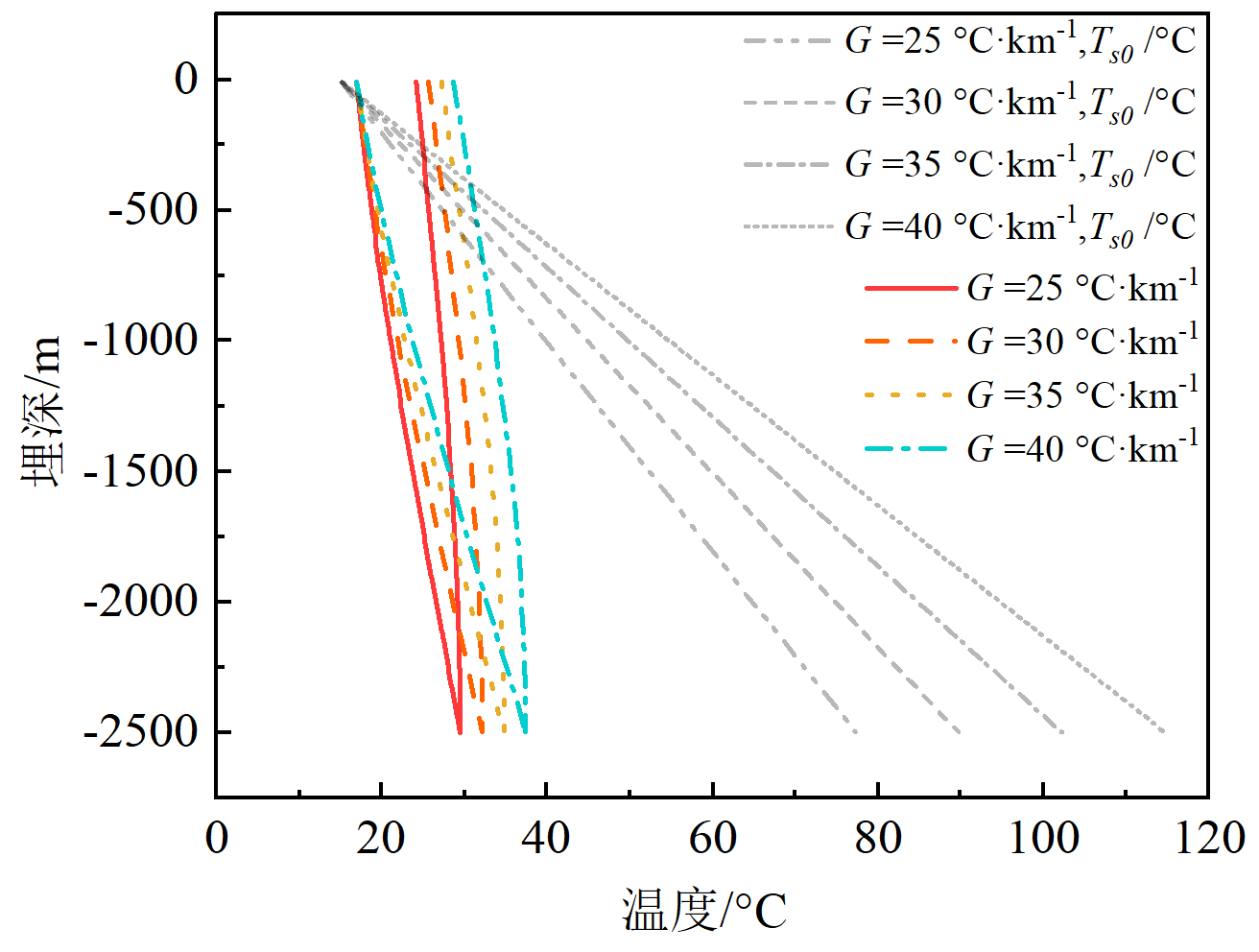


图7不同地温梯度下的沿程流体温度分布

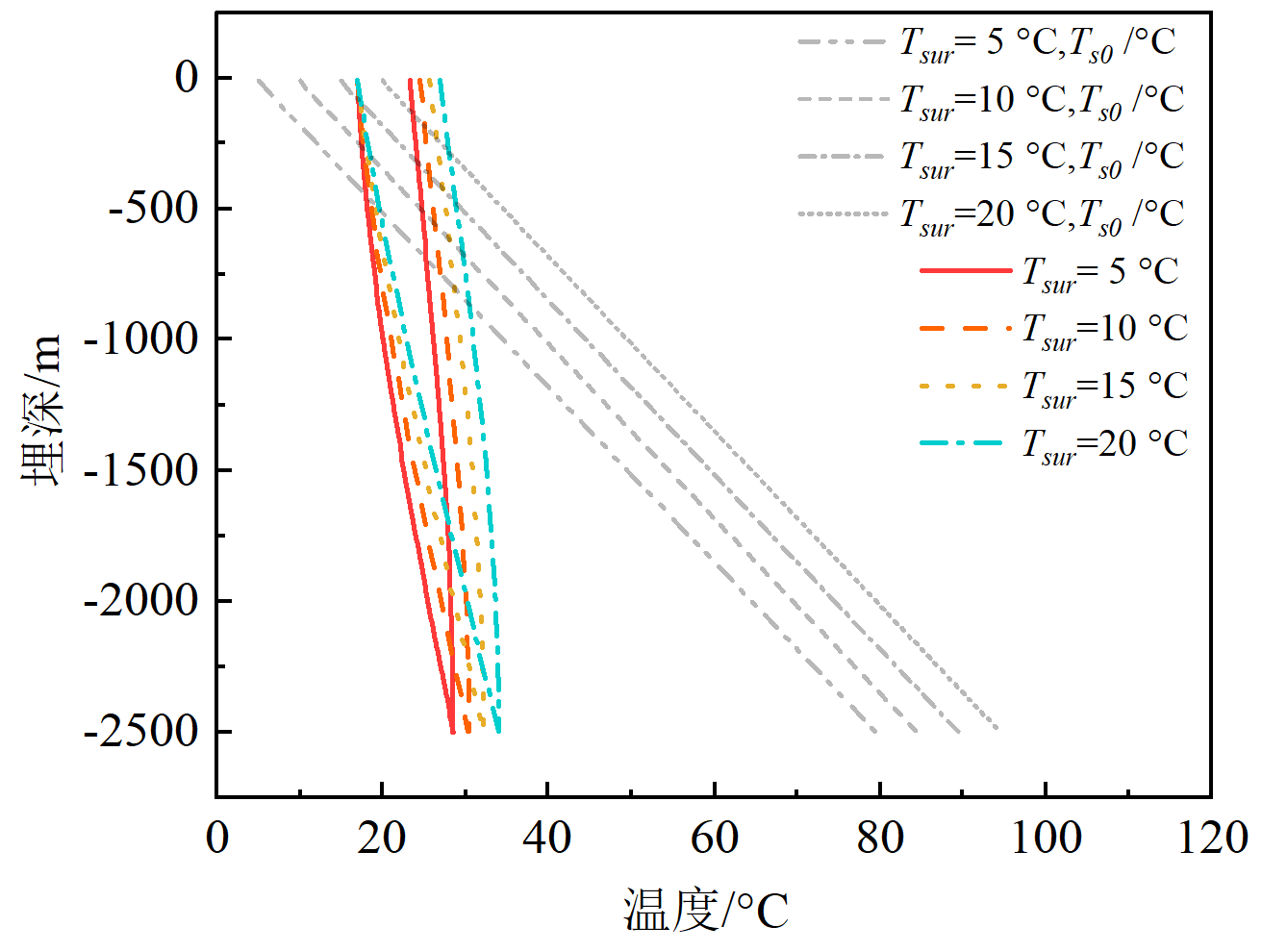


图8不同地表温度下的沿程流体温度分布

3）设计参数

设计参数所涉及的因素较多，本节探究了管井尺寸、管材以及回填材料热物性参数对中深层地埋管换热器沿程流体温度的影响。基于对中深层地埋管换热器在应用深度范围的定义以及目前实际工程中的应用，换热器长度选取1500-3000 m进行分析。外管管径与内管管径分别依据石油套管以及加强型聚氨酯管的规格选取半径为0.0842、0.0889、0.1096、0.1223、0.1365 m和0.0375、0.0450、0.0550、0.0625 m展开分析。外管导热系数与内管导热系数依据目前相关研究分别选取0.45、40、45、50 W·m-1·K-1和0、0.2、0.45 W·m-1·K-1进行分析。回填材料导热系数选取0.73、1.50、1.73、和2.77 W·m-1·K-1进行分析。

图9所示为不同长度换热器沿程流体温度的分布情况。长度越大的换热器，其可以提取较深处岩土体中能量品位更高的中深层地热资源。从图中可见，换热器长度由1500 m增加至3000 m，换热器环腔中流体的温度随着深度的增加显著提高。但流体在内管的输送过程中，对于长度为1500、2000、2500、3000 m的换热器，流体由换热器底部流至出口的温度分别下降1.5、3.5、6.5、10.7 °C，长度较大的换热器其内管中流体的温降也越大。

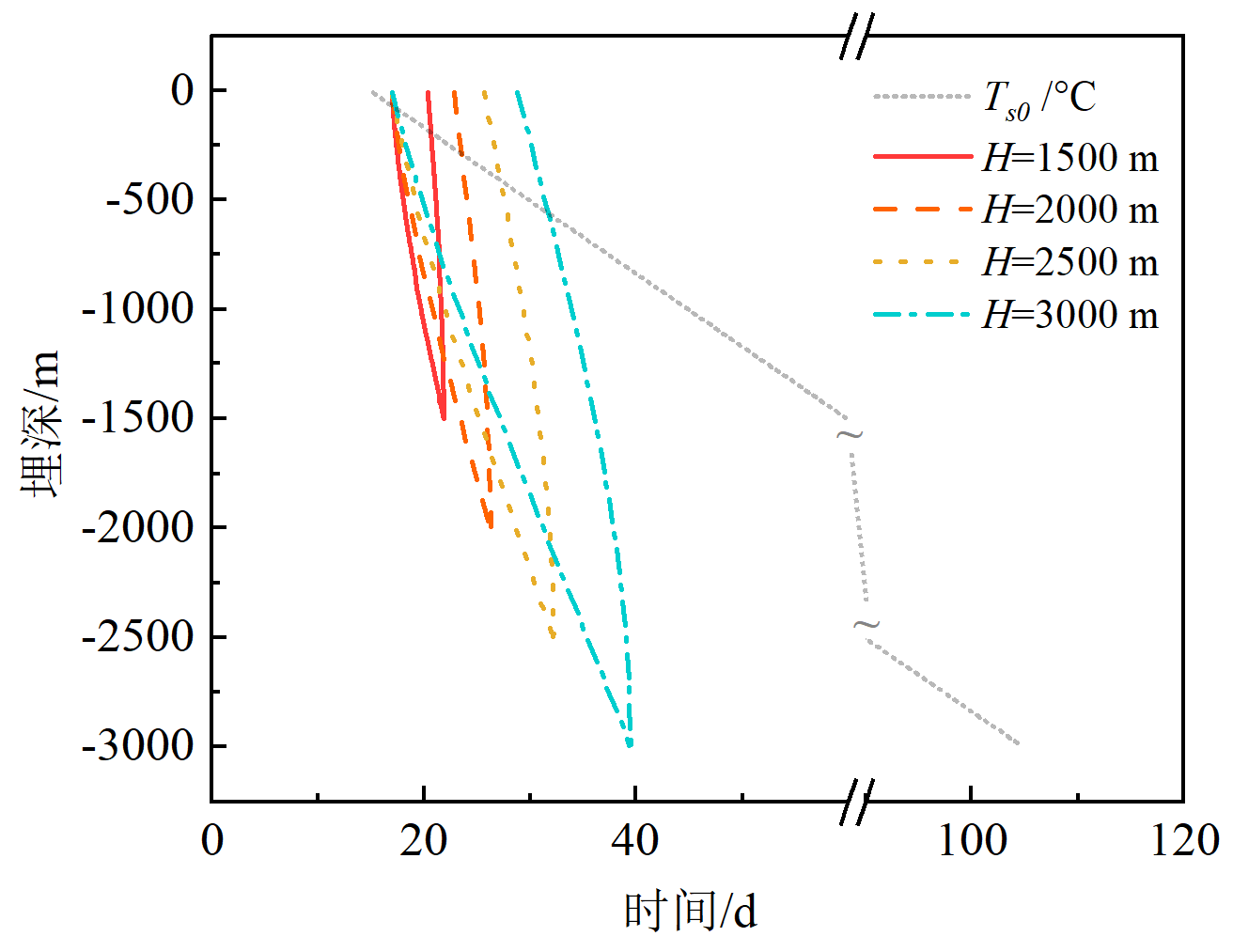


图9不同长度换热器的沿程流体温度分布

图10对比了不同外管管径的换热器其沿程流体温度的分布情况。增大外管管径可以提高换热器环腔中流体的温度分布，有利于换热器的热提取。同时，不同外管管径的换热器其内管中流体的温度损失较为接近。内管管径对换热器沿程流体温度分布的影响如图11所示。在内管较小的条件下，环腔中流体的温度也相对较低，但流体在内管流动的过程中温度下降的程度较小，导致其流至出口时的温度反而较高。相反，当内管管径较大时，内管中流体温度的下降程度较为明显。

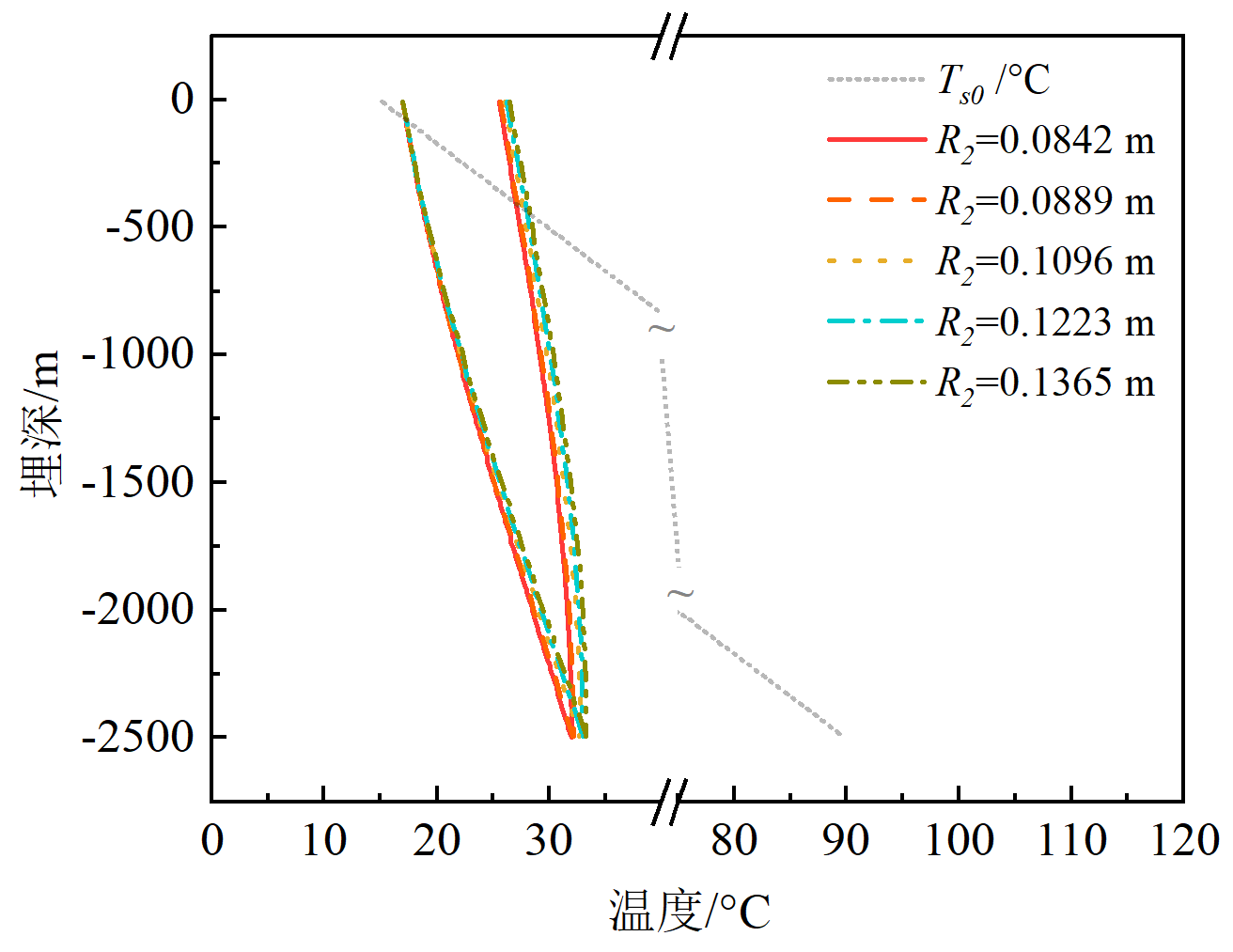


图10不同外管管径下的沿程流体温度分布

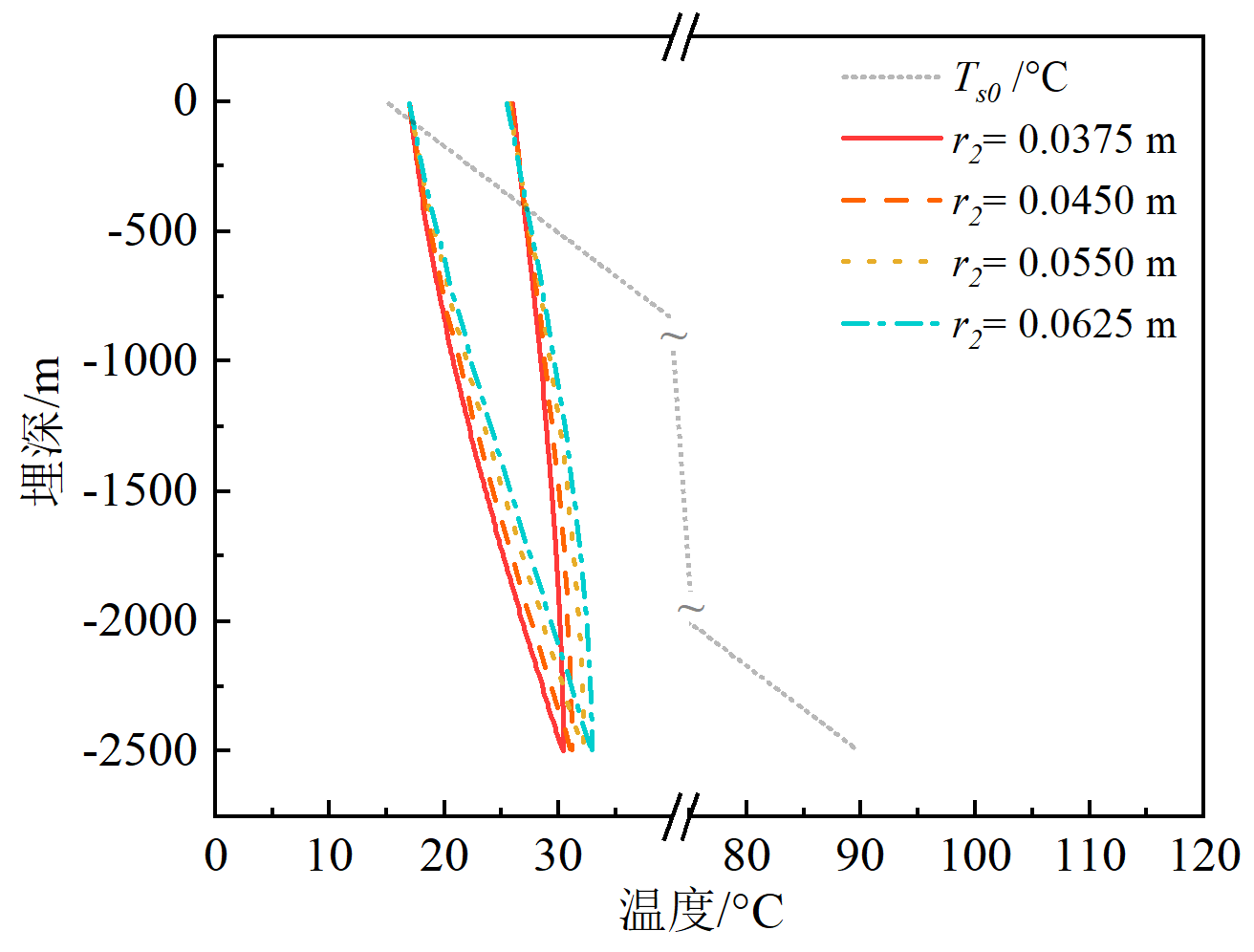


图11不同内管管径下的沿程流体温度分布

外管与内管导热系数对沿程流体温度分布的影响分别如图12和13所示。在外管导热系数较高的情况下，沿程温度分布较高。但外管导热系数大于40 W·m-1·K-1时，温度分布基本不发生变化，表明外管导热系数过大对流体的取热作用影响不大。减小内管的导热系数可以降低内管中流体的热损失。由图13可见，当内管导热系数为0 W·m-1·K-1时，内管中流体的沿程温度均匀一致，有效避免了热损失。随着内管导热系数的增加，内管中流体温度的下降程度也逐渐增大。从图中仍可以发现，在内管导热系数较小的情况下，其环腔中流体的温度较低。这是因为降低内管导热系数更大程度的保证从岩土体中提取的能量被输送至地表，在该条件下，岩土体温度的下降程度更大，而环腔中流体与岩土体进行热交换，由此导致其温度也较低。

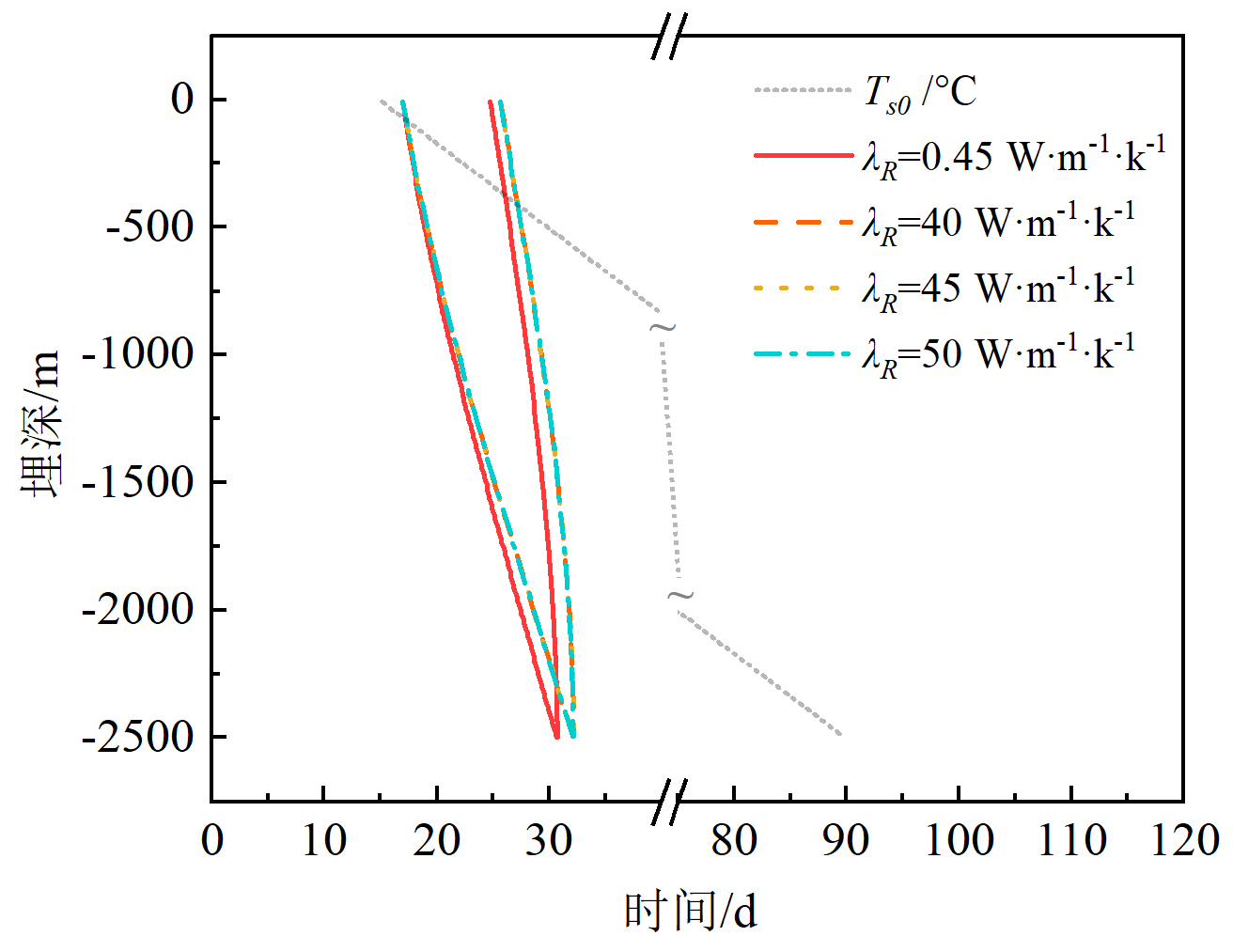


图12不同外管导热系数下的沿程流体温度分布

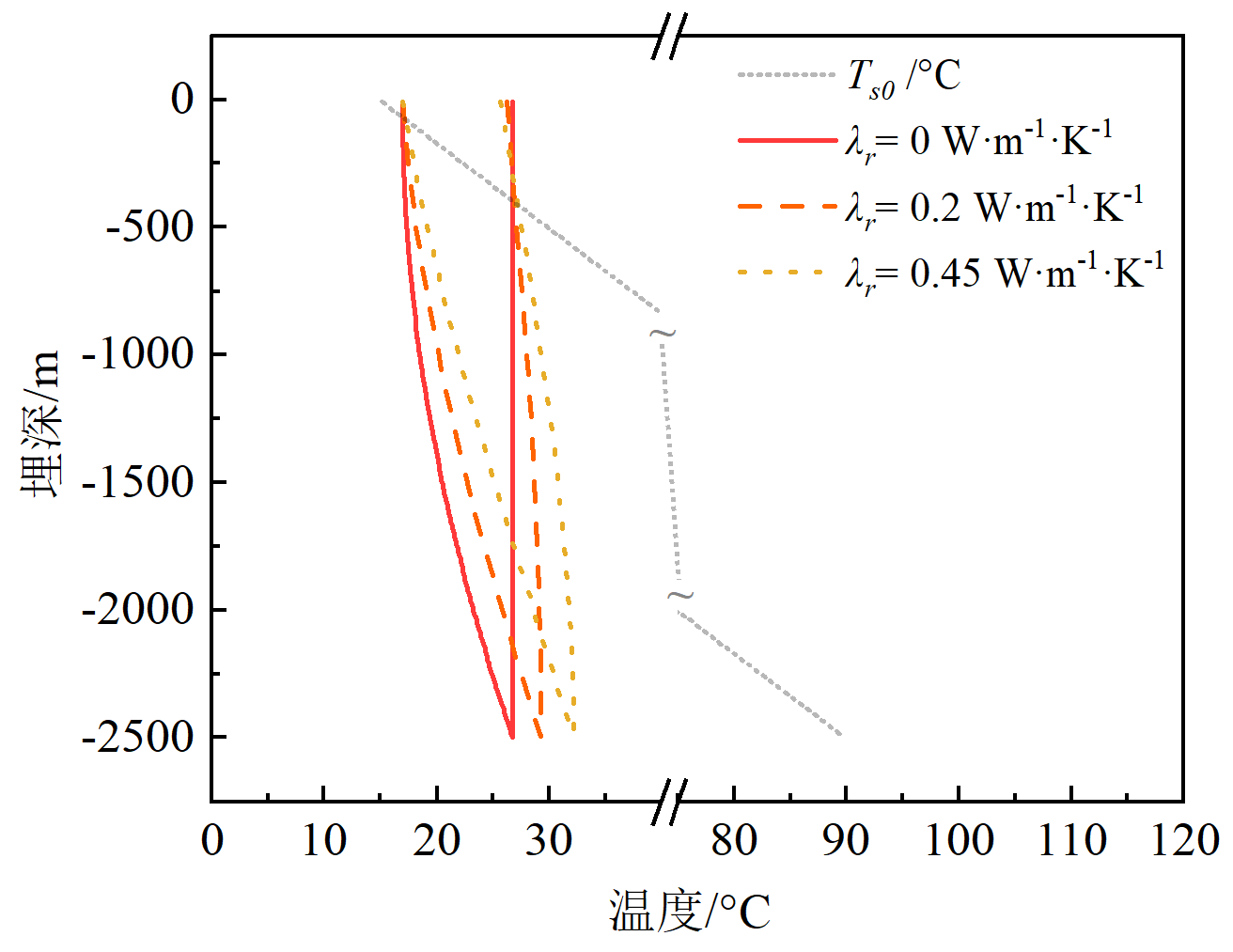


图13不同内管导热系数下的沿程流体温度分布

图14所示为在不同回填材料导热系数下沿程流体温度的分布情况。随着回填材料导热系数的增大，环腔中流体的温度也不断增大。但仍可以发现，在导热系数增加的过程中，环腔中流体的增加幅度逐渐减小。此外，在不同的回填材料导热系数下，流体在内管中的流动过程中温度的下降程度趋于一致。

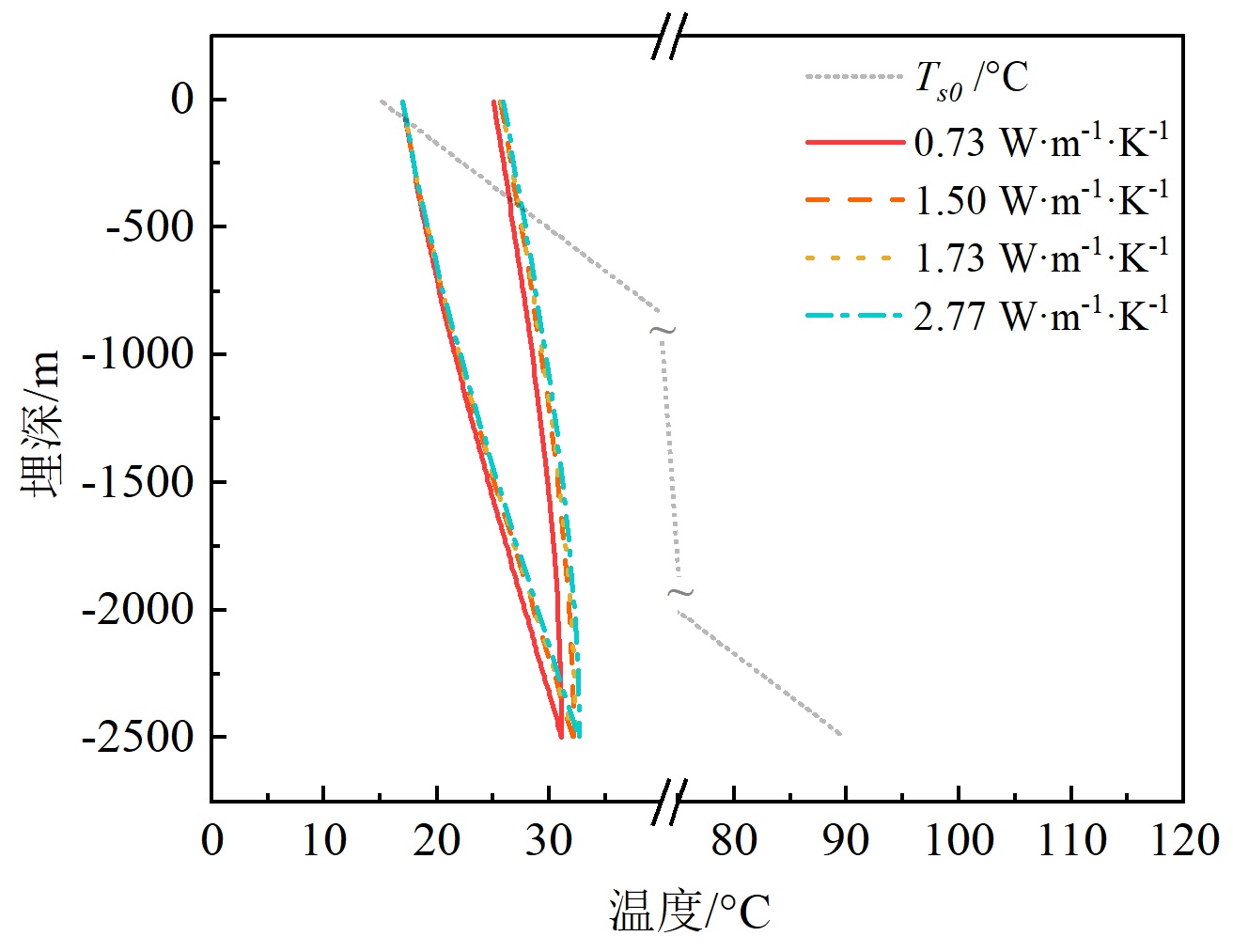
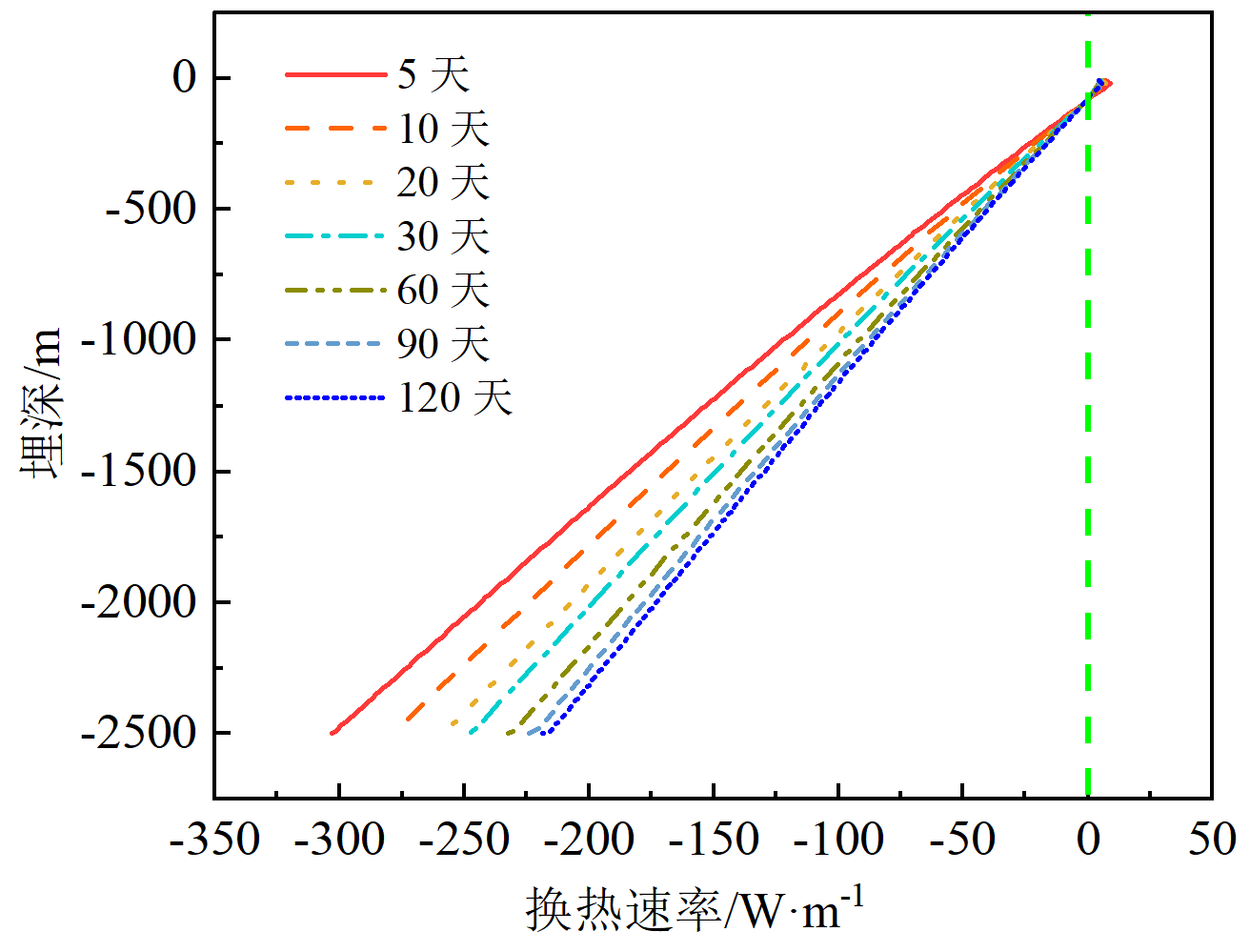
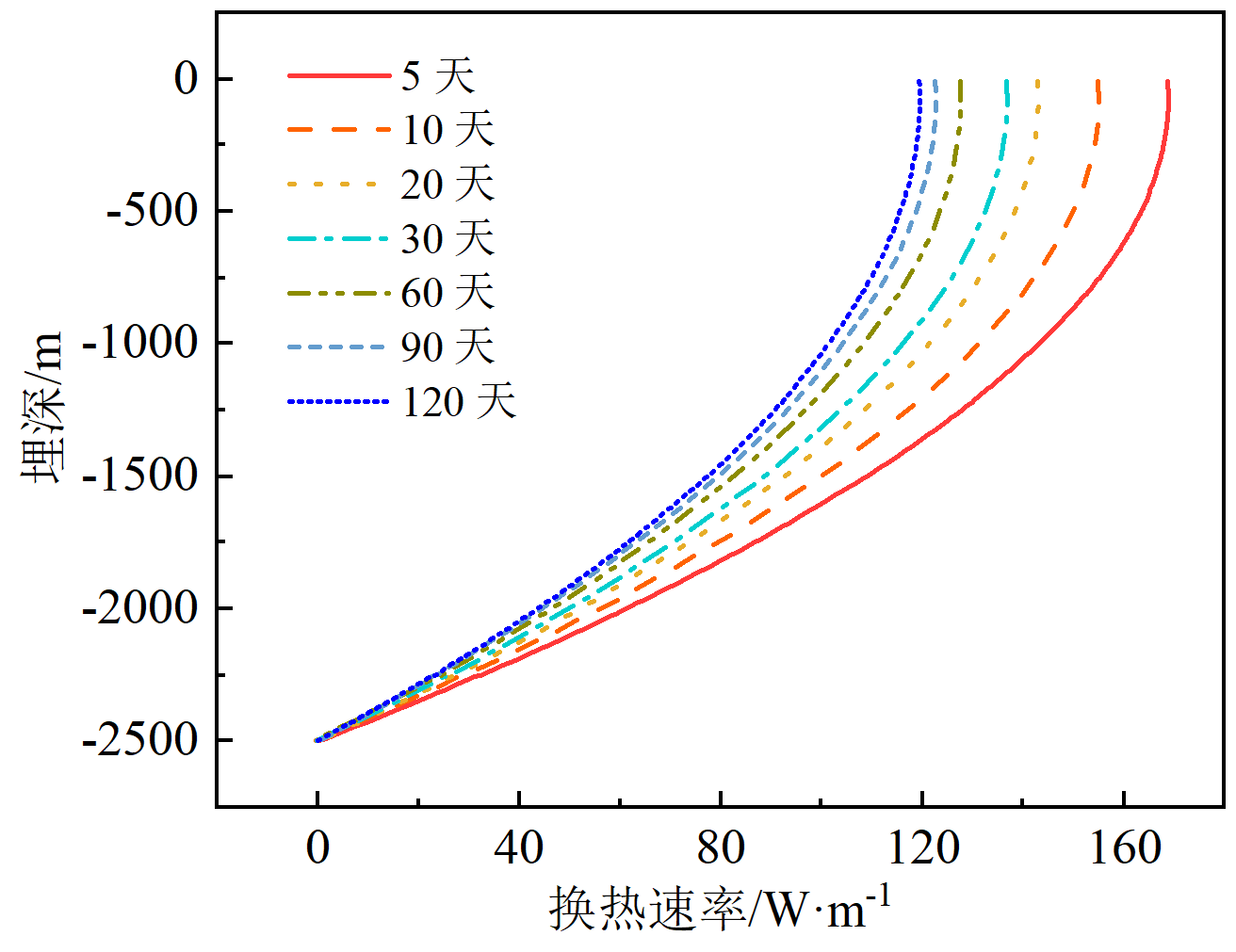


图14不同回填材料导热系数下的沿程流体温度分布

3.2.2.2沿程热流密度分布

图15所示为在基准参数下沿程热流密度的分布情况，图中对供暖季中不同取热时间下的沿程热流密度分布进行分析。钻井壁的热流密度由式（1-1）得到，当热流密度为正值时，表示钻井向岩土体传热；当热流密度为负值时，则表示钻井从岩土体中取热。内管壁上的热流密度由式（1-2）得到，其值越大表明内管中流体向环腔中流体的传热作用越明显。

由于中深层地埋管换热器的非稳态传热特性，钻井壁上的热流密度在取热过程中不断发生变化，其随着取热时间逐渐减小并趋于稳定（图15（a））。以供暖季结束时（第120天）的钻井壁热流密度进行分析，其沿着深度方向呈近似线性增加的趋势，由此也解释了环腔中流体温度沿着深度方向不断增加的原因。位于500、1000、2000 m的热流密度分别为-40.0、-85.7、-173.1 W·m-1，2000 m处的热流密度为500 m处热流密度的4倍之多，可见中深层地埋管换热器的取热强度随着深度显著增加。同样地，内管壁上的热流密度在供暖季初期也较高，表明内管中流体向环腔中流体的传热作用较大。随着取热的进行，内管壁上的热流密度逐渐趋于稳定（图15（b））。内管壁上的热流密度沿着地表方向逐渐增加，表明内管中流体由换热器底部向地表流动的过程中，散热的强度不断增大，由此导致内管中流体的温度不断降低。同时，可以发现内管上部的散热作用明显高于其底部的散热作用。

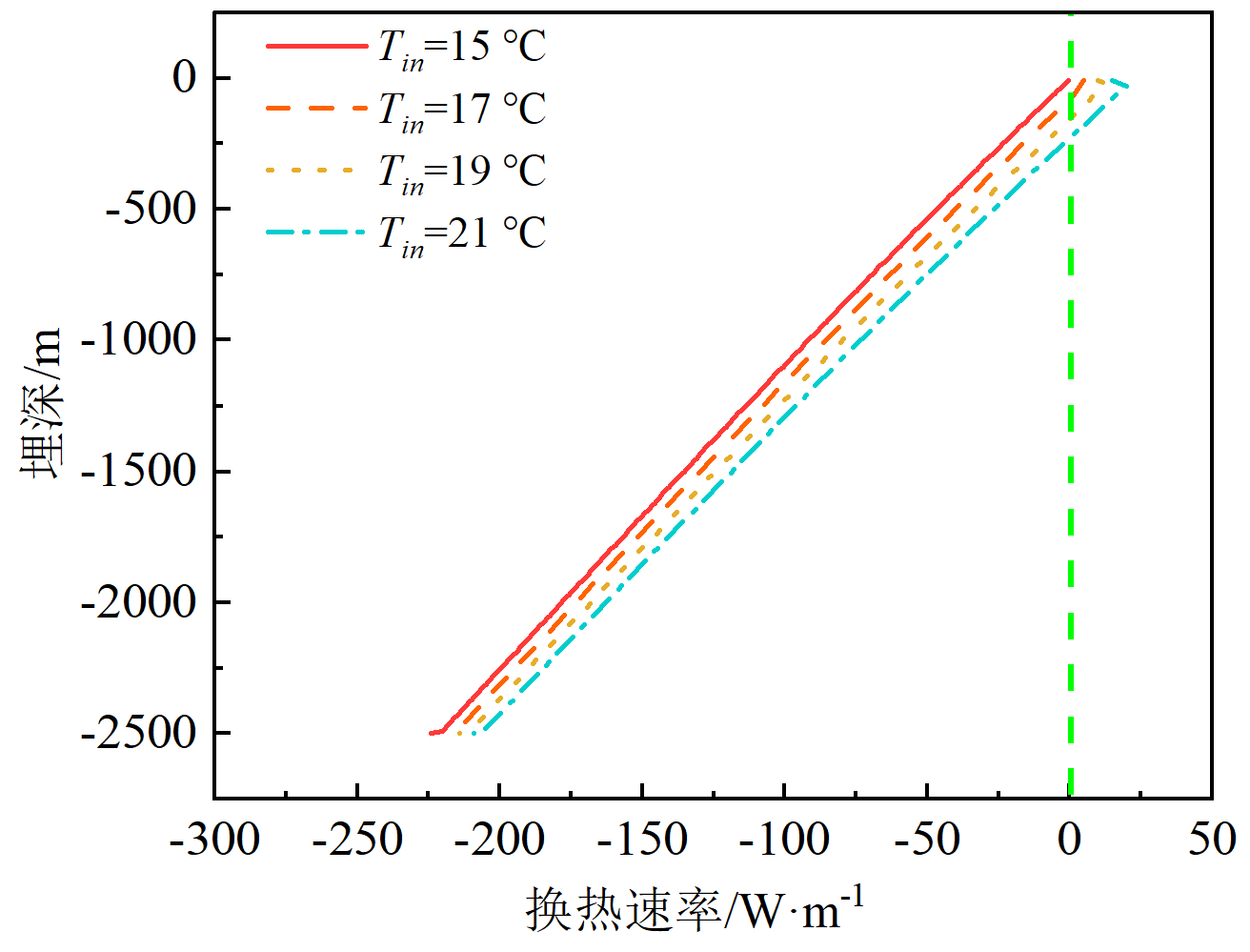
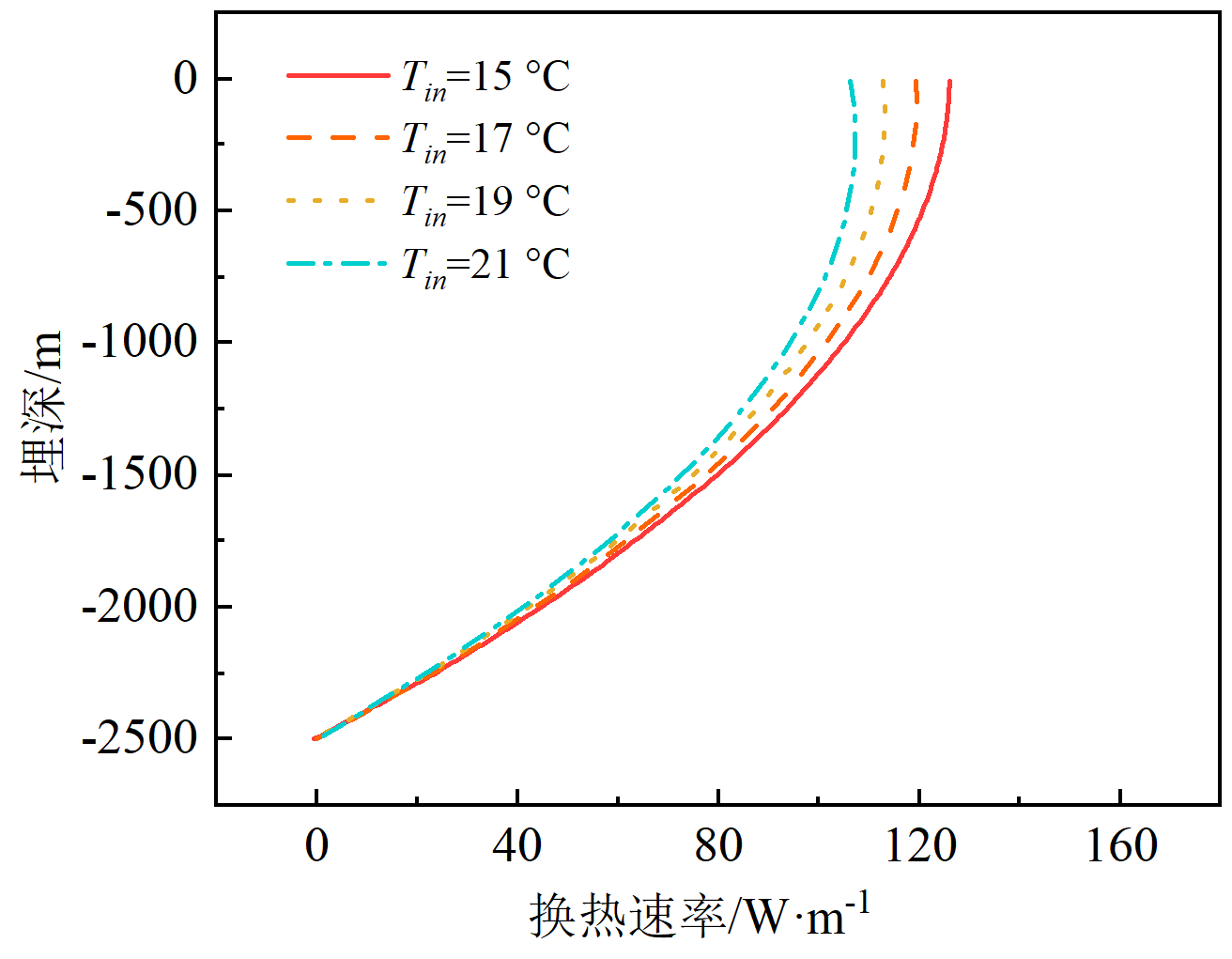
 

（a） 钻井壁热流密度 （b） 内管壁热流密度

图15不同取热时间下的沿程热流密度分布

1）运行参数

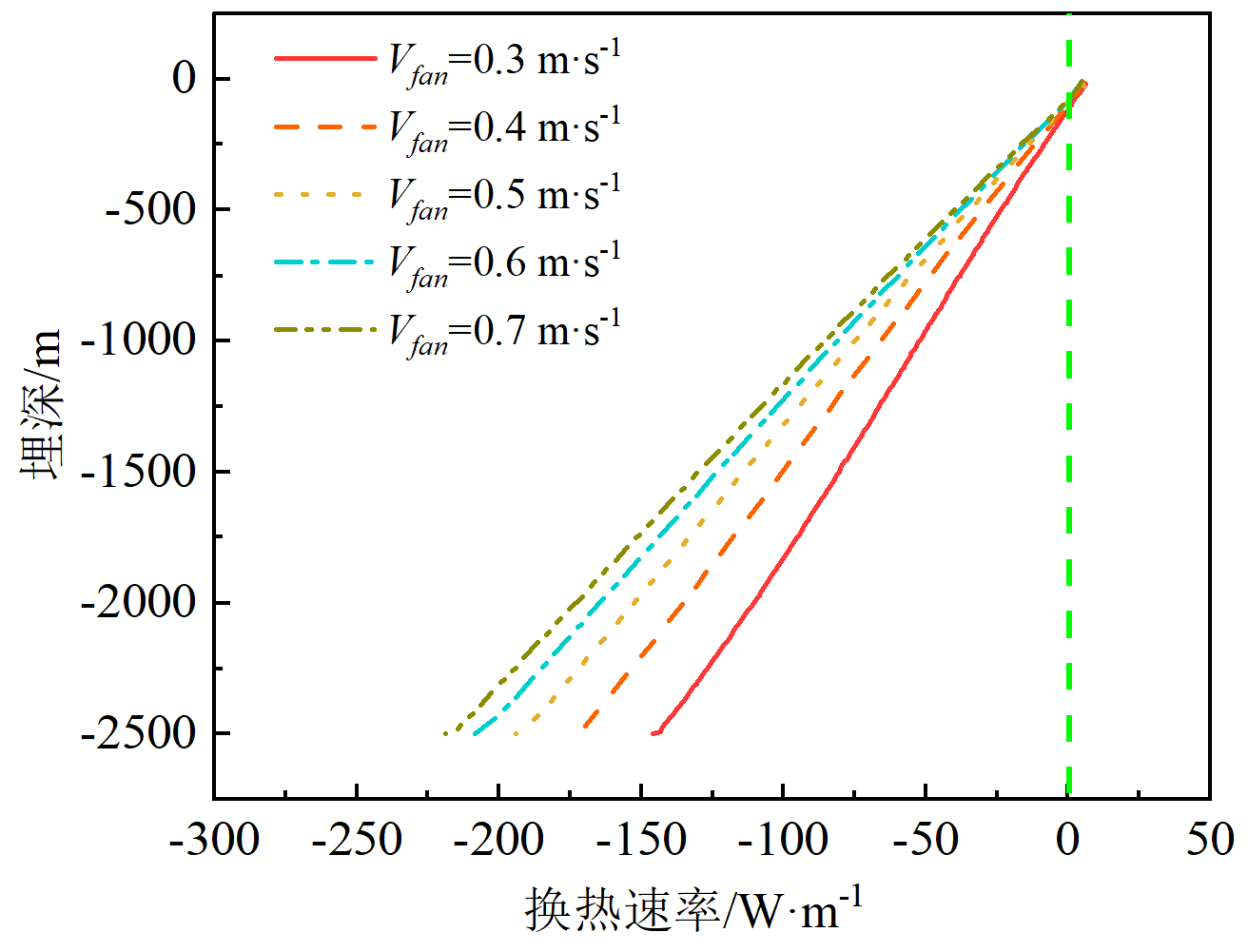
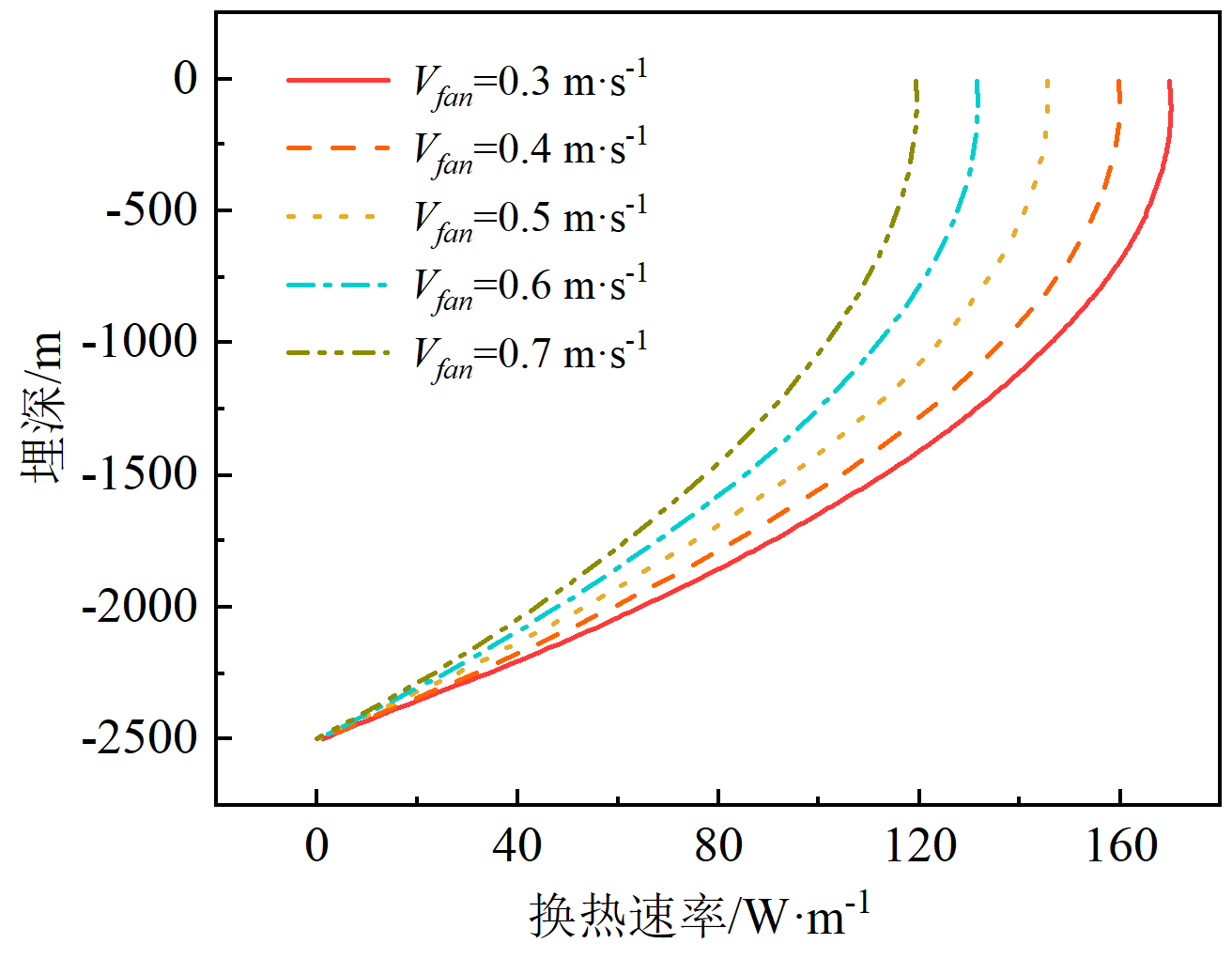
图16对比了不同入口温度下沿程热流密度的分布情况。随着入口温度的降低，钻井壁上的热流密度不断增大。这是因为在较低的入口水温下，环腔中流体与岩土体之间的温差增大，促进了两者之间的换热作用。在不同深度位置上，钻井壁热流密度的变化幅度近似相等。此外，可以发现当入口温度较高时，钻井会出现向岩土体散热的情况，造成热量的损失（图16（a））。内管壁上的热流密度随着入口温度的降低呈现增加的趋势，使得内管中的能量损失增加（图16（b）），这是由于在该条件下内管中流体与环腔中流体之间的温差增加所导致的。

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

图16不同入口温度下沿程热流密度分布

图17为不同环腔流速下沿程热流密度的分布情况。钻井壁的热流密度随着环腔流速的增加而增大，促进了环腔中流体与岩土体之间的热交换，且沿着深度方向的增加程度越明显（图17（a））。但流速较大时，钻井壁热流密度的增加程度逐渐减小，表明增加流速对促进钻井与岩土体之间的热交换作用是存在限度的。内管壁的热流密度随着流速的增大而减小，且在内管上部区域的减小程度更为明显（图17（b）），由此表明增加流速可以降低内管的热损失程度。此外，在较高流速下，尽管内管中流体与外管流体之间的传热热阻较小，但在取热过程中，两者之间的温差也较小，导致其传热作用也较小。然而，在较低流速下，两者之间的温差增大，导致传热作用也增大，故产生了较大的热损失。对于内管保温不佳的情况，增大循环流速有利于中深层地埋管换热器的热提取。

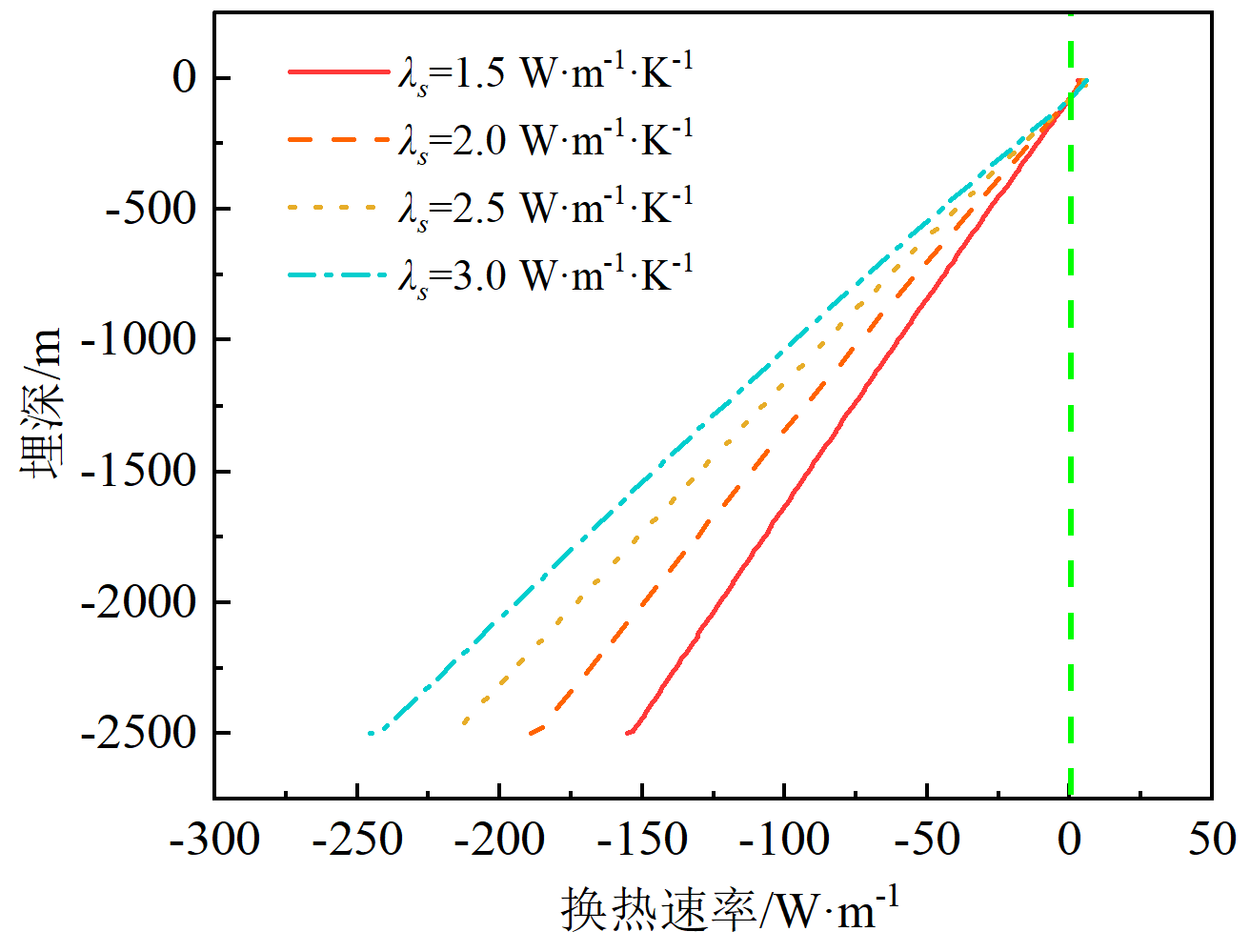
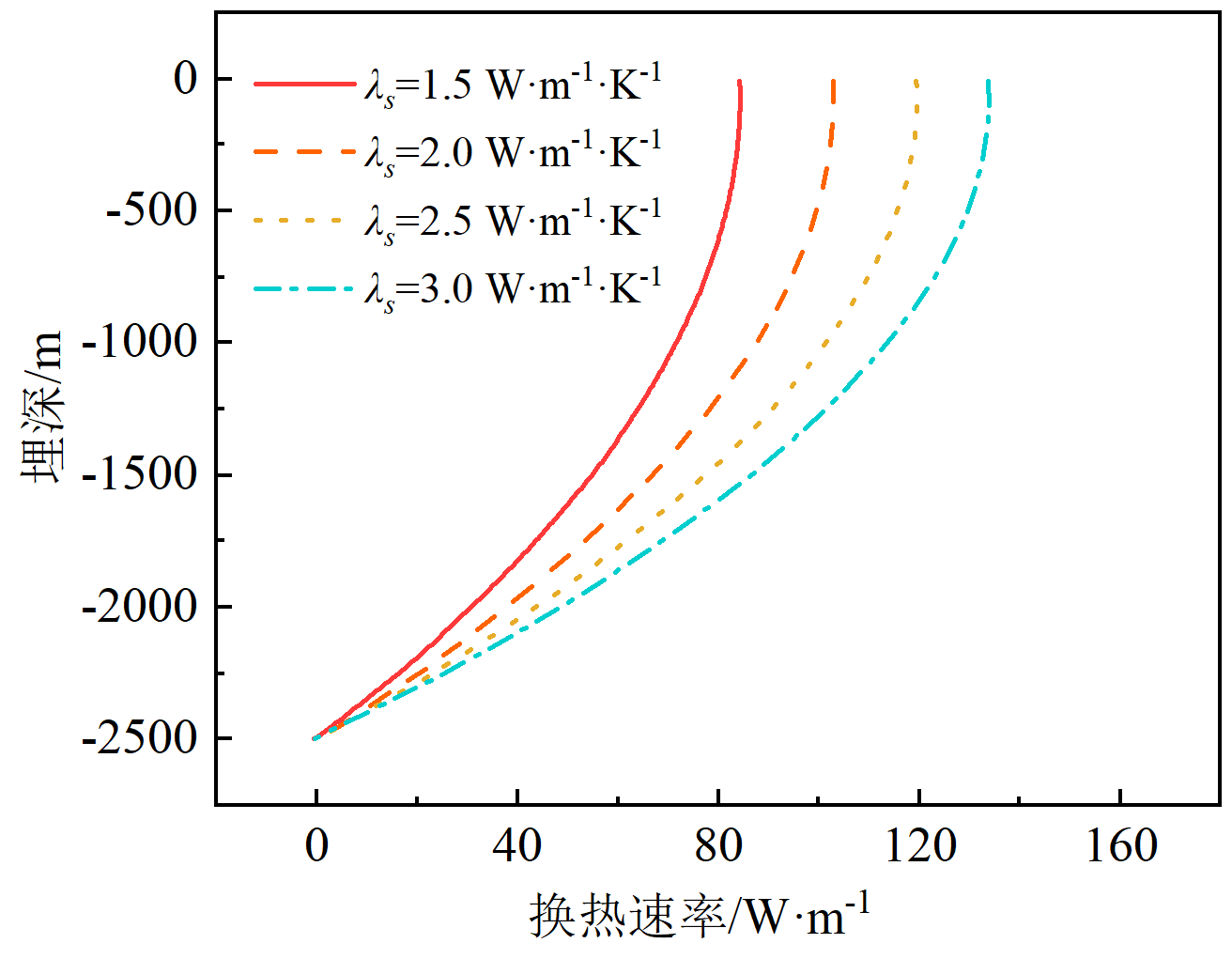
（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

图17不同入口流速下沿程热流密度分布

2）地热特征参数

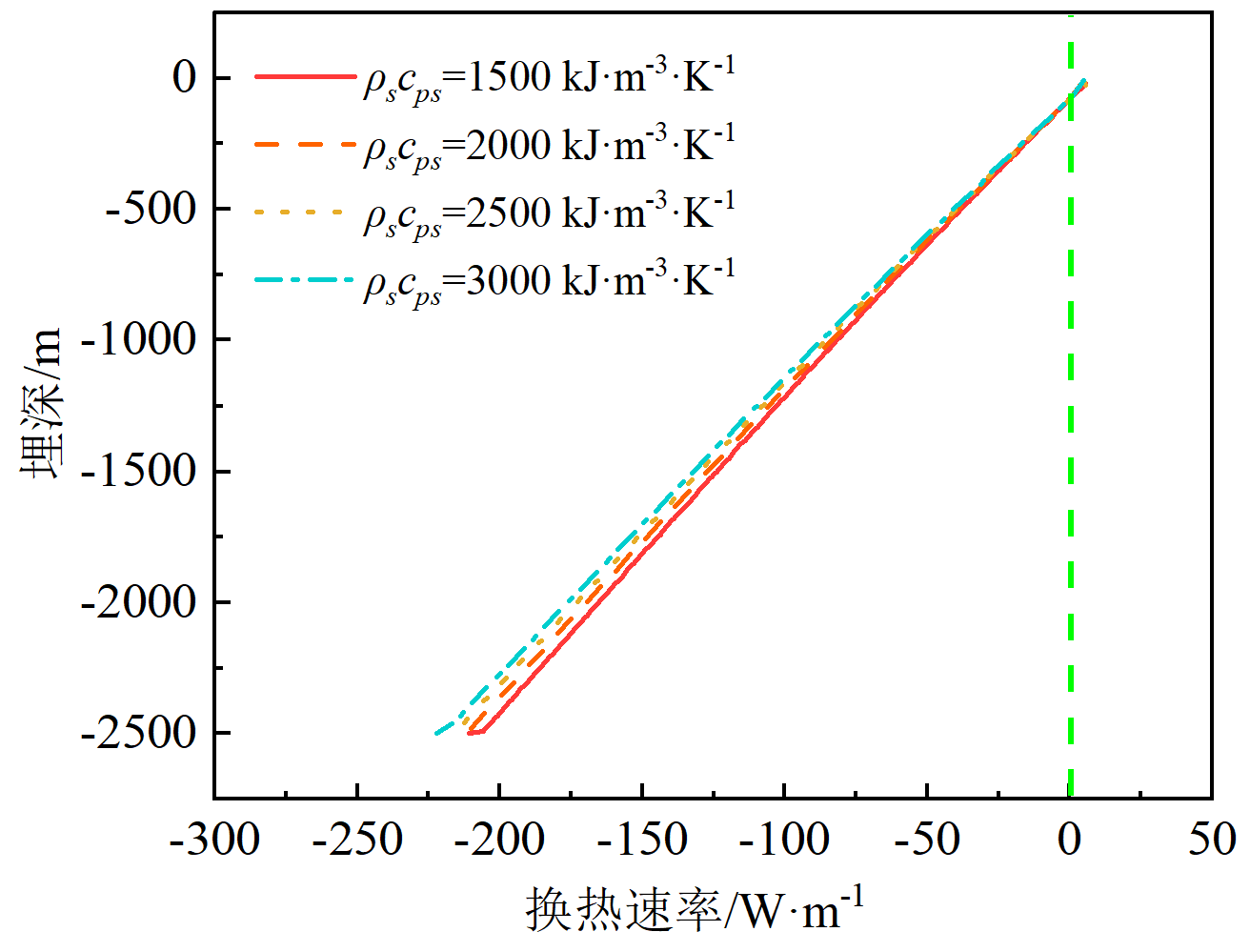
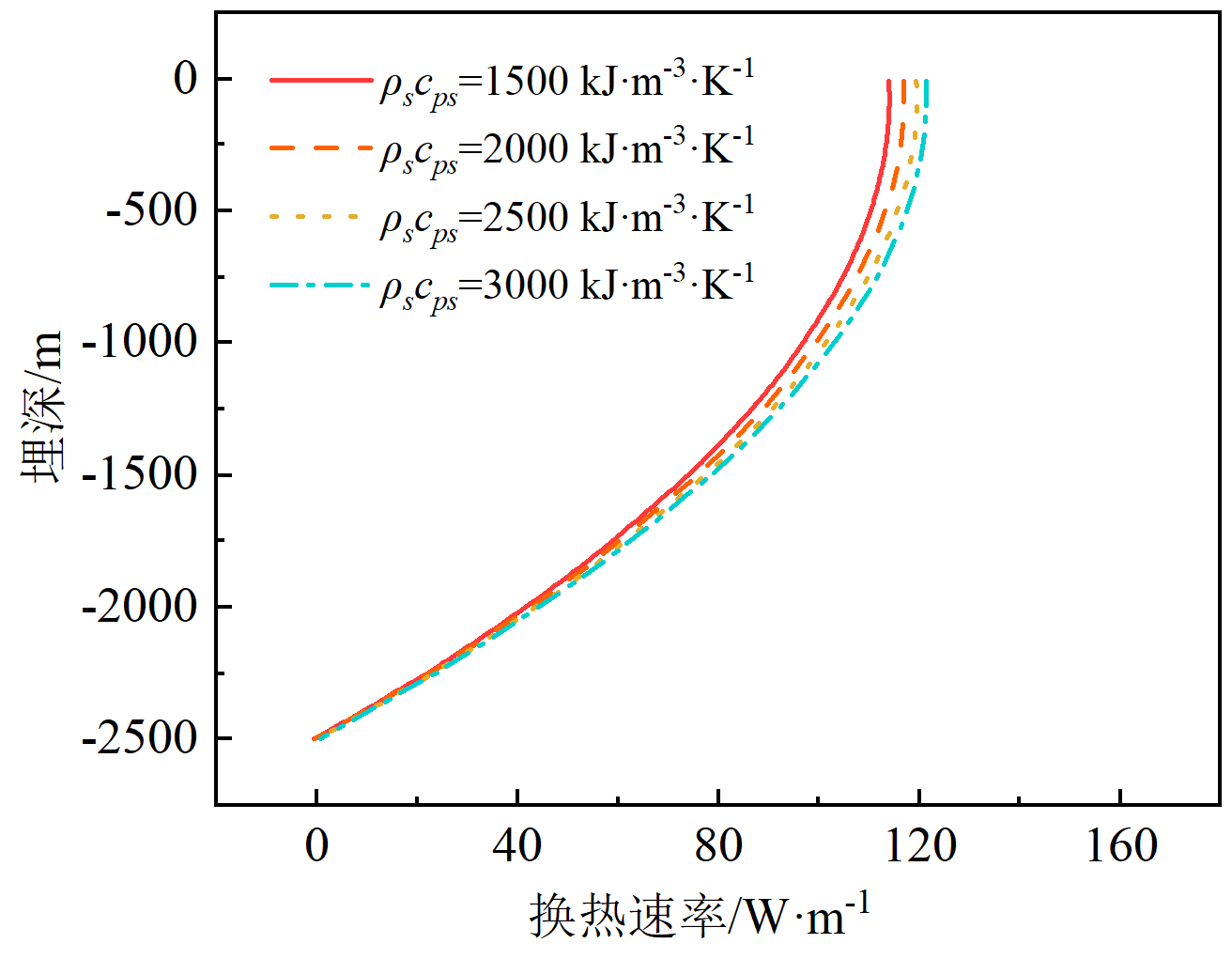
地热特征参数对钻井壁的沿程热流密度影响更大。在地热特征参数较高的条件下，可以促进岩土体与环腔中流体之间的换热作用。

在岩土体热物性参数分析方面，图18与图19分别所示为在不同岩土体导热系数与不同岩土体比热容下的沿程热流密度分布情况。由沿程热流密度的变化情况来看，岩土体导热系数对其影响作用更为明显。在岩土体导热系数较高的条件下，钻井壁的热流密度也较大，表明岩土体与钻井之间的换热作用较好，且热流密度沿着深度方向的增加程度更为明显（图18（a））。然而，内管壁的热流密度也随着岩土体导热系数的增大而增加，且沿着内管中流体流动方向的增加程度更为显著（图18（b））。这是因为在该条件下，环腔中流体到达底部时的温度较高，随后，当流体在内管中自下而上流动时，其与环腔中流体之间的温差不断增大。在该条件下，增加内管的热阻可以有效提高中深层地埋管换热器的取热能力。

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

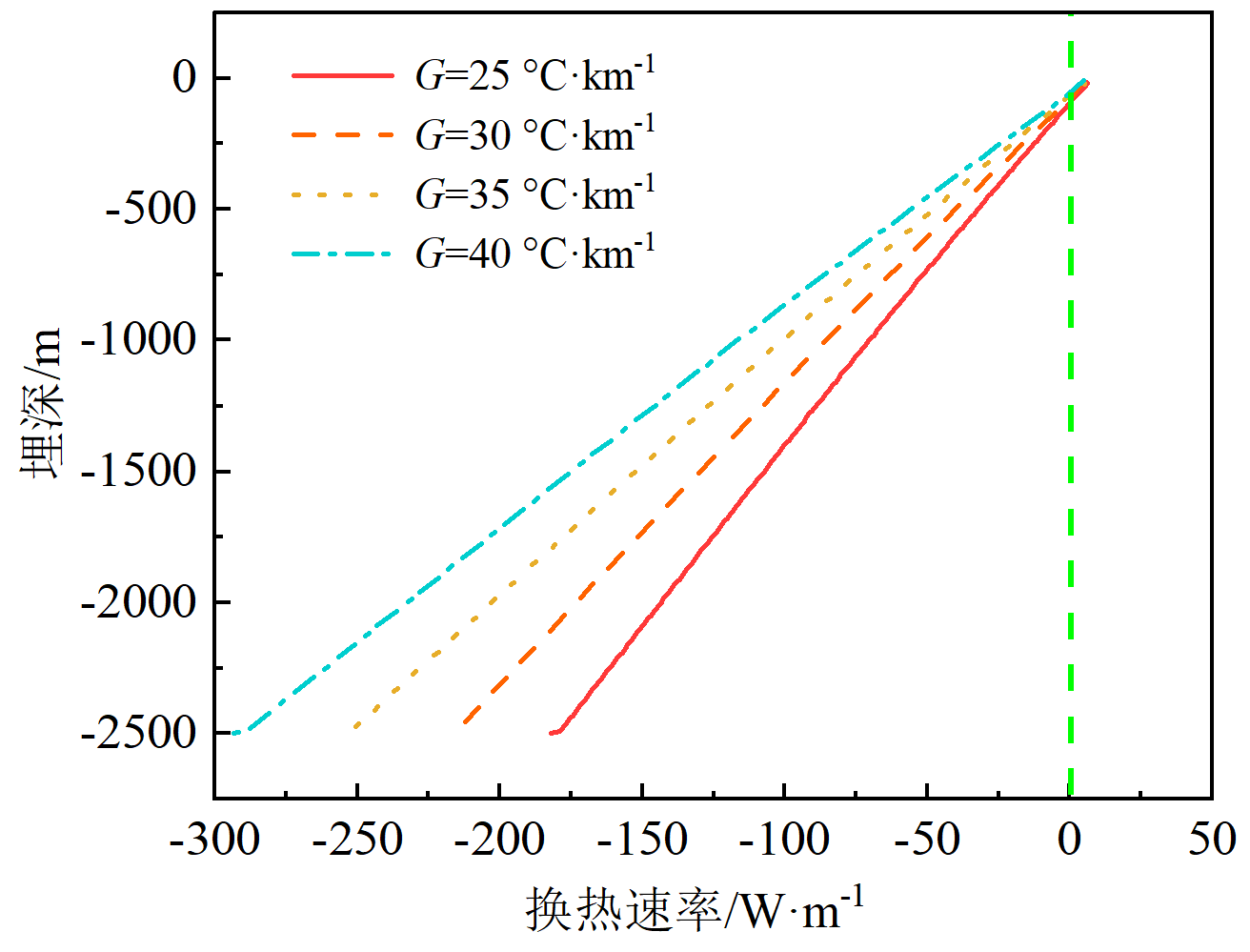
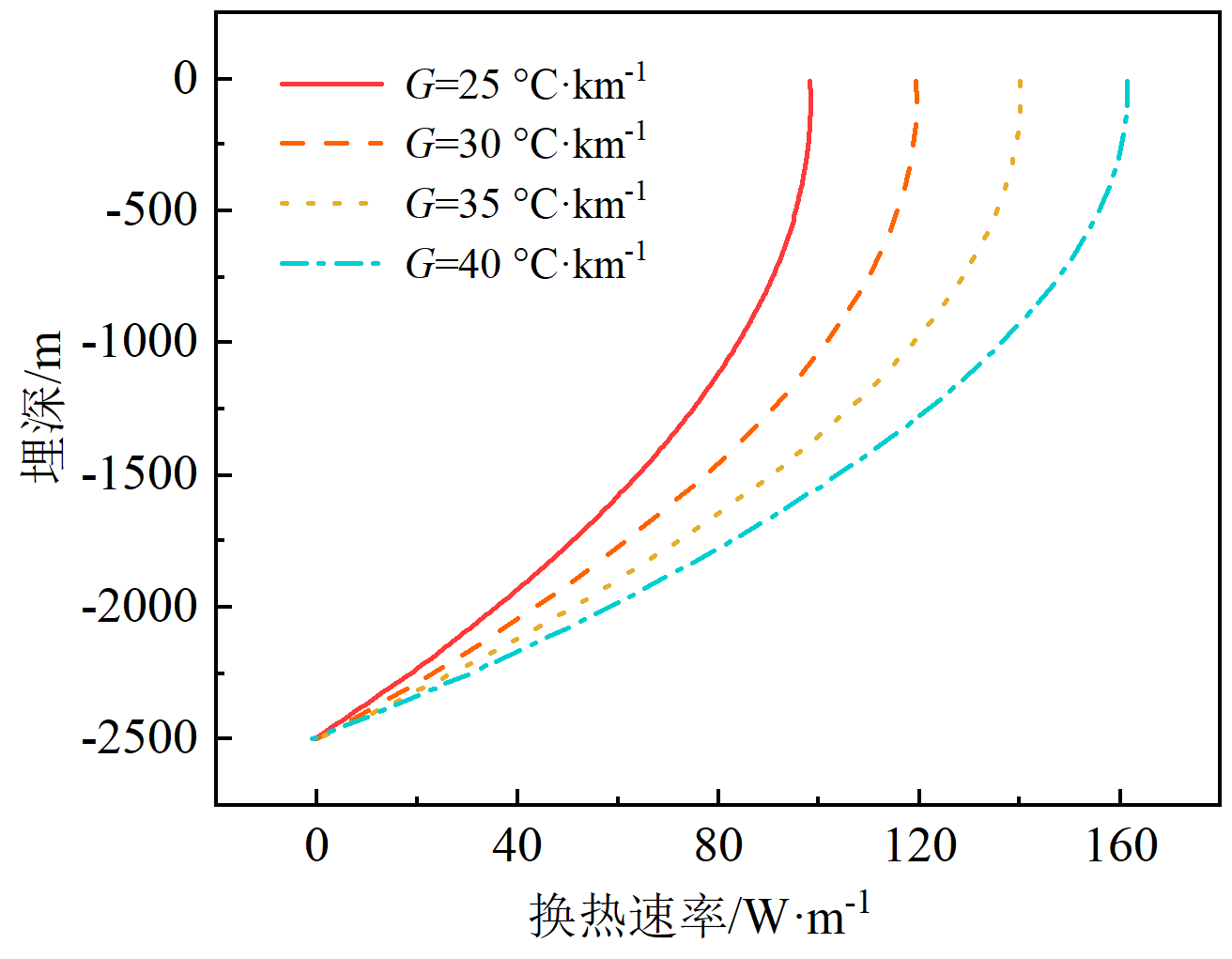
图18不同岩土体导热系数下沿程热流密度分布

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

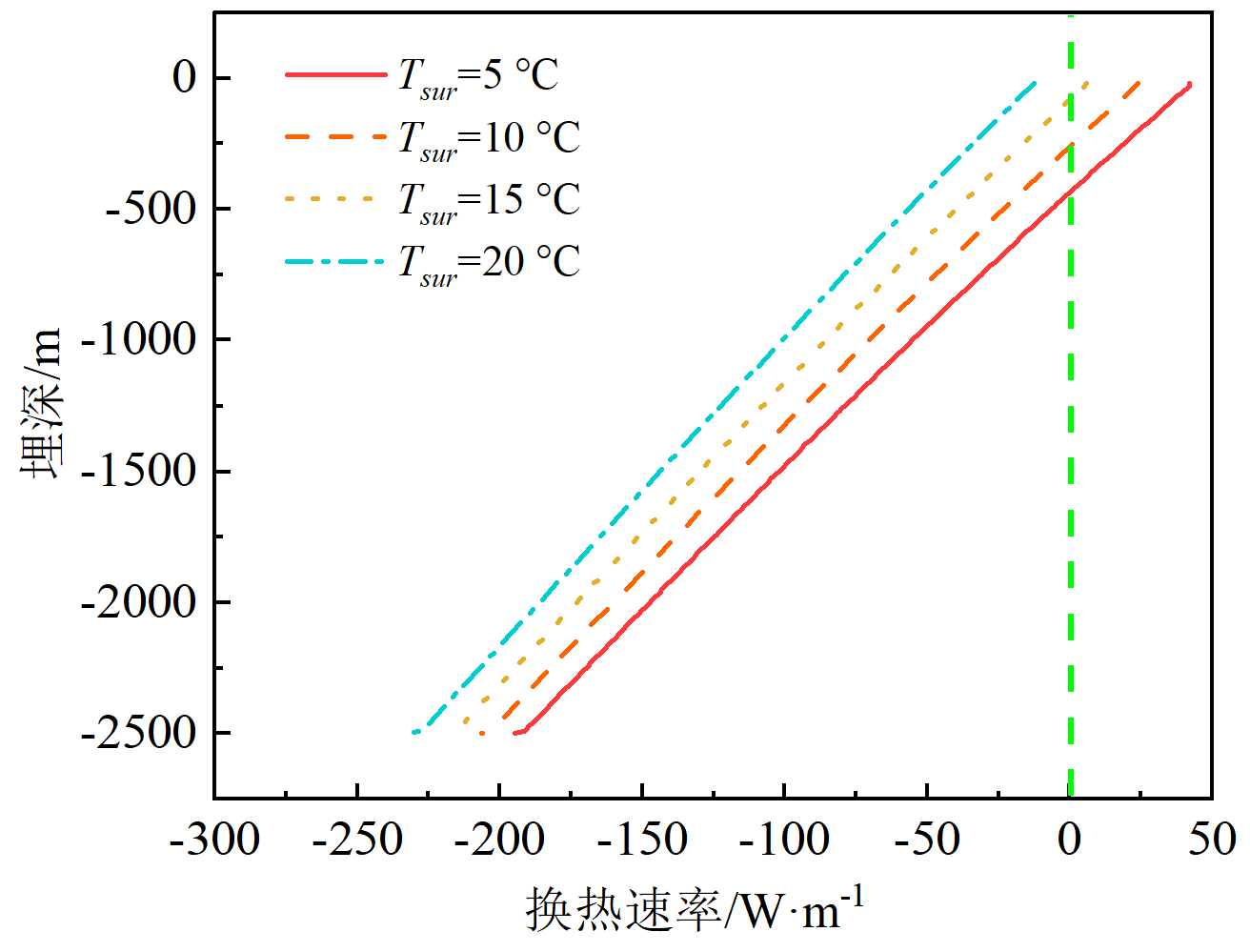
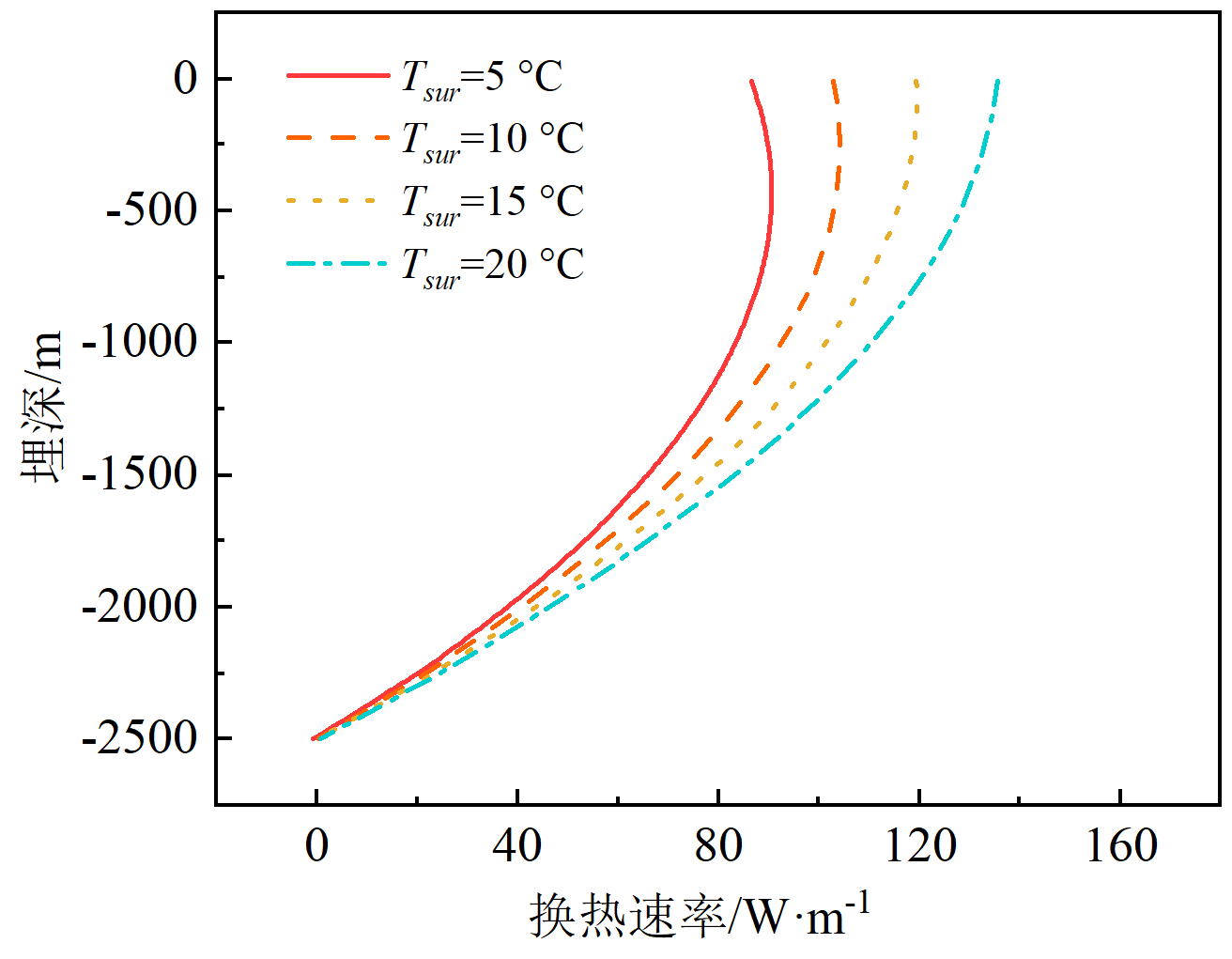
图19不同岩土体比热容下沿程热流密度分布

在地温参数分析方面，图20与图21分别所示为在不同地温梯度与地表温度下沿程热流密度的分布情况。在以上两个因素较高的条件下，钻井壁的热流密度也越大，表明钻井与岩土体之间的换热作用较大。地温梯度与地表温度对钻井壁热流密度的作用规律存在差异。地温梯度的增加使得钻井壁热流密度沿深度方向增大的程度更加明显（图20（a）），而地表温度的增加则使得钻井壁热流密度呈近似线性增加的趋势（图21（a））。经对比发现，在相同的基准参数下，地温梯度和地表温度提高相同的温度时，前者对钻井壁热流密度增加的程度更为明显。内管壁的热流密度也随着地温梯度（图20（b））或地表温度（图21（b））的增加而增大，且在内管上部区域更为明显，其与上述在较高岩土体导热系数下的原因相同。在地温梯度或地表温度较高的条件下，降低内管热阻对提升中深层地埋管换热器取热能力同样具有重要作用。

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

图20不同地温梯度下沿程热流密度分布

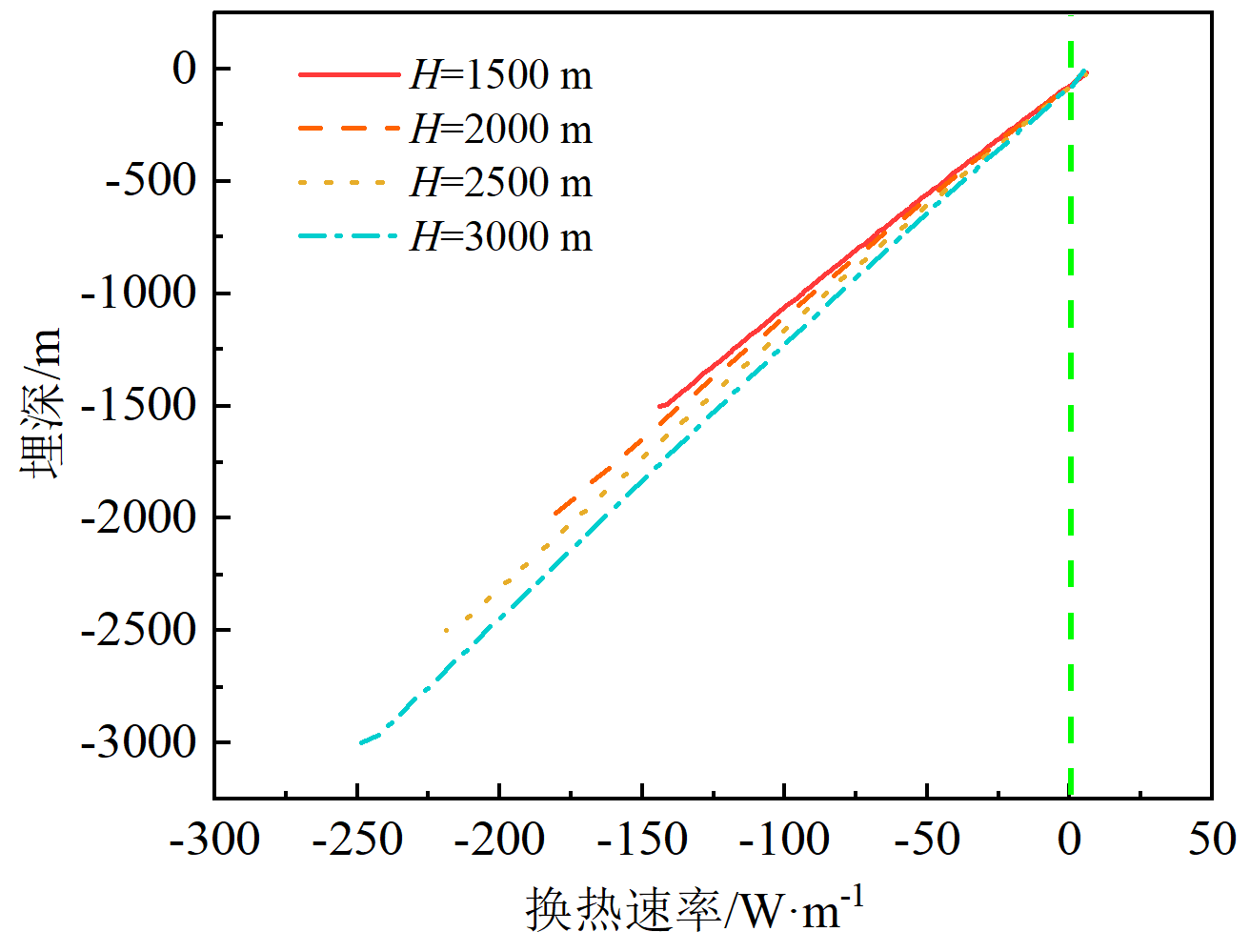
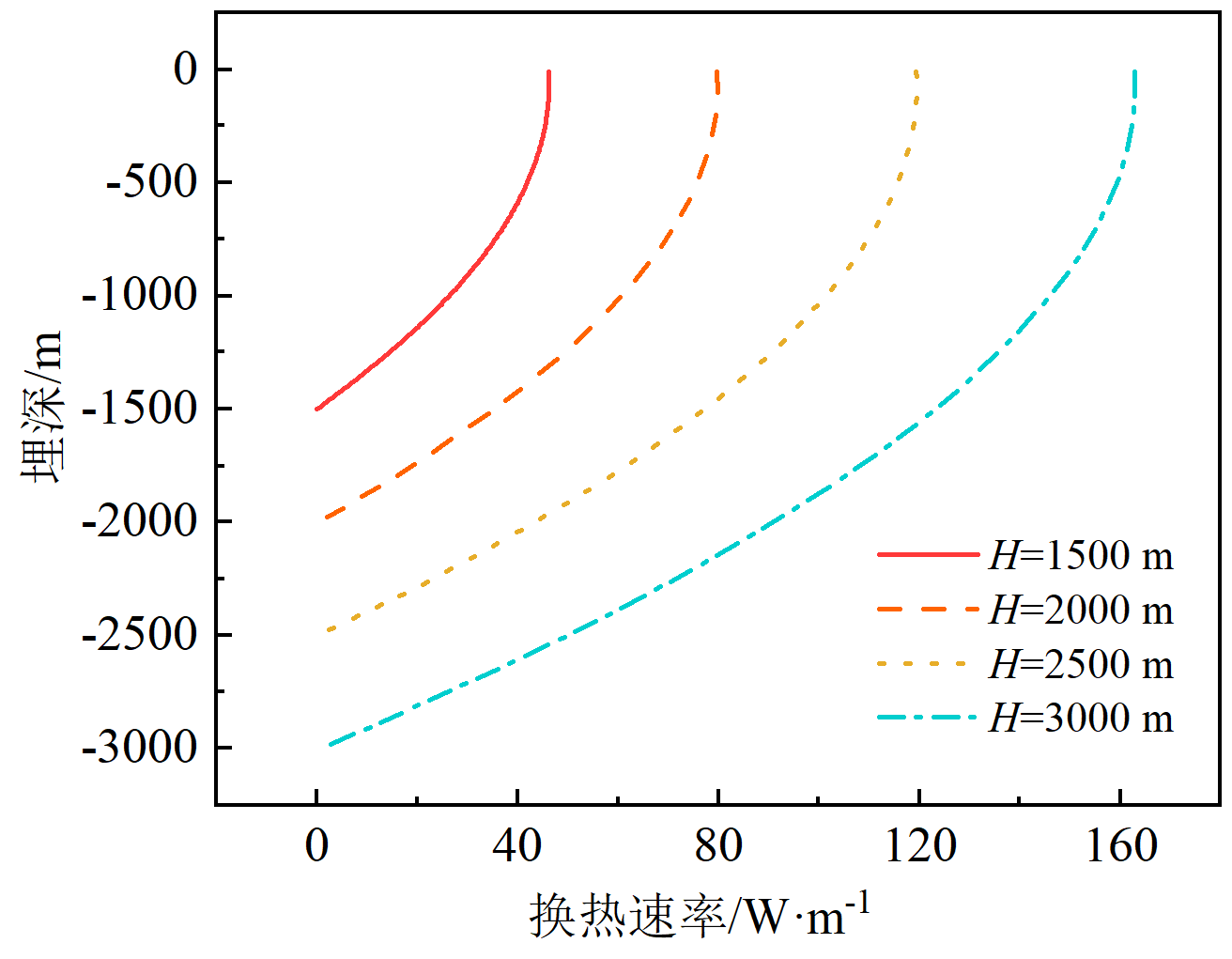
 

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

图21不同地表温度下沿程热流密度分布

3）设计参数

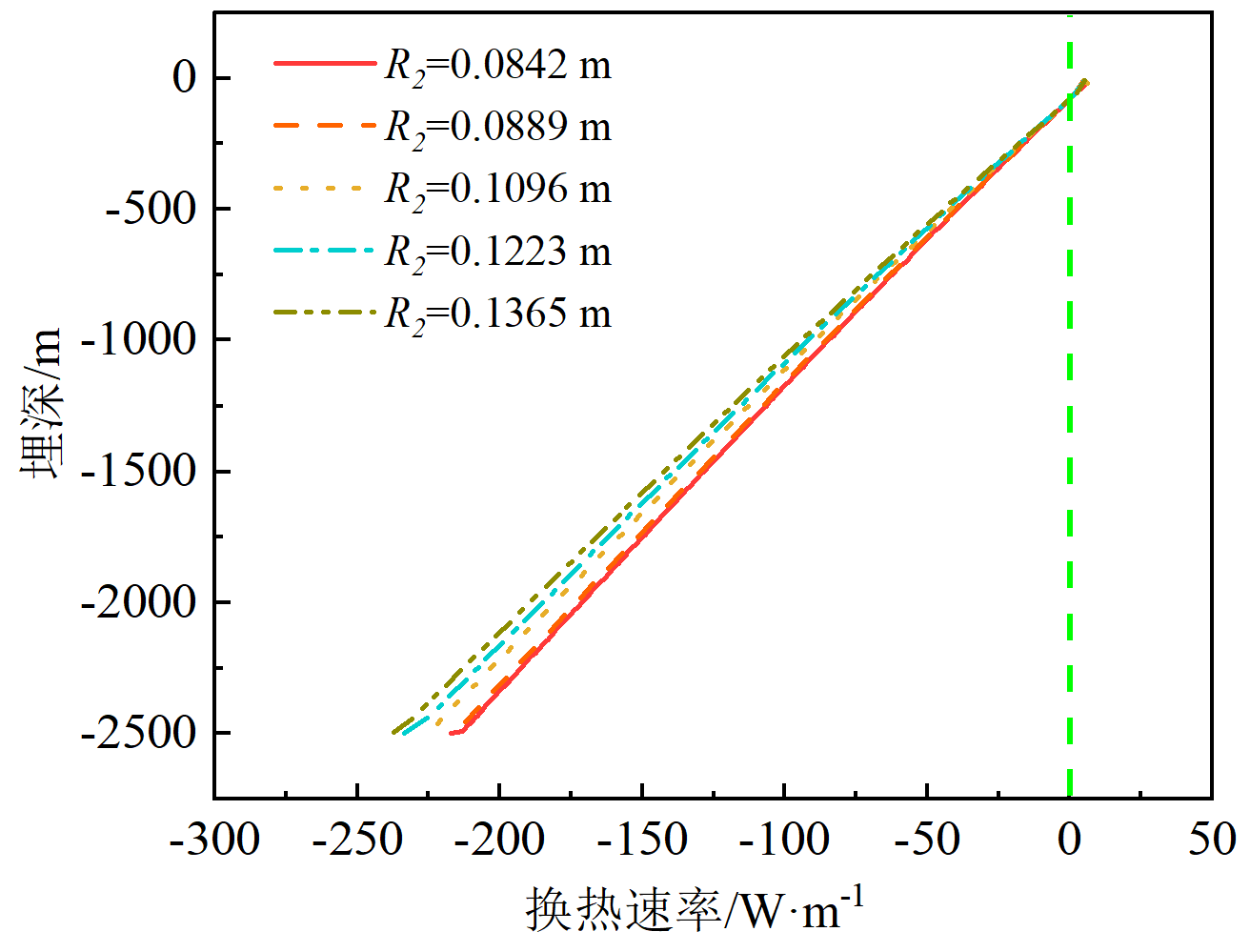
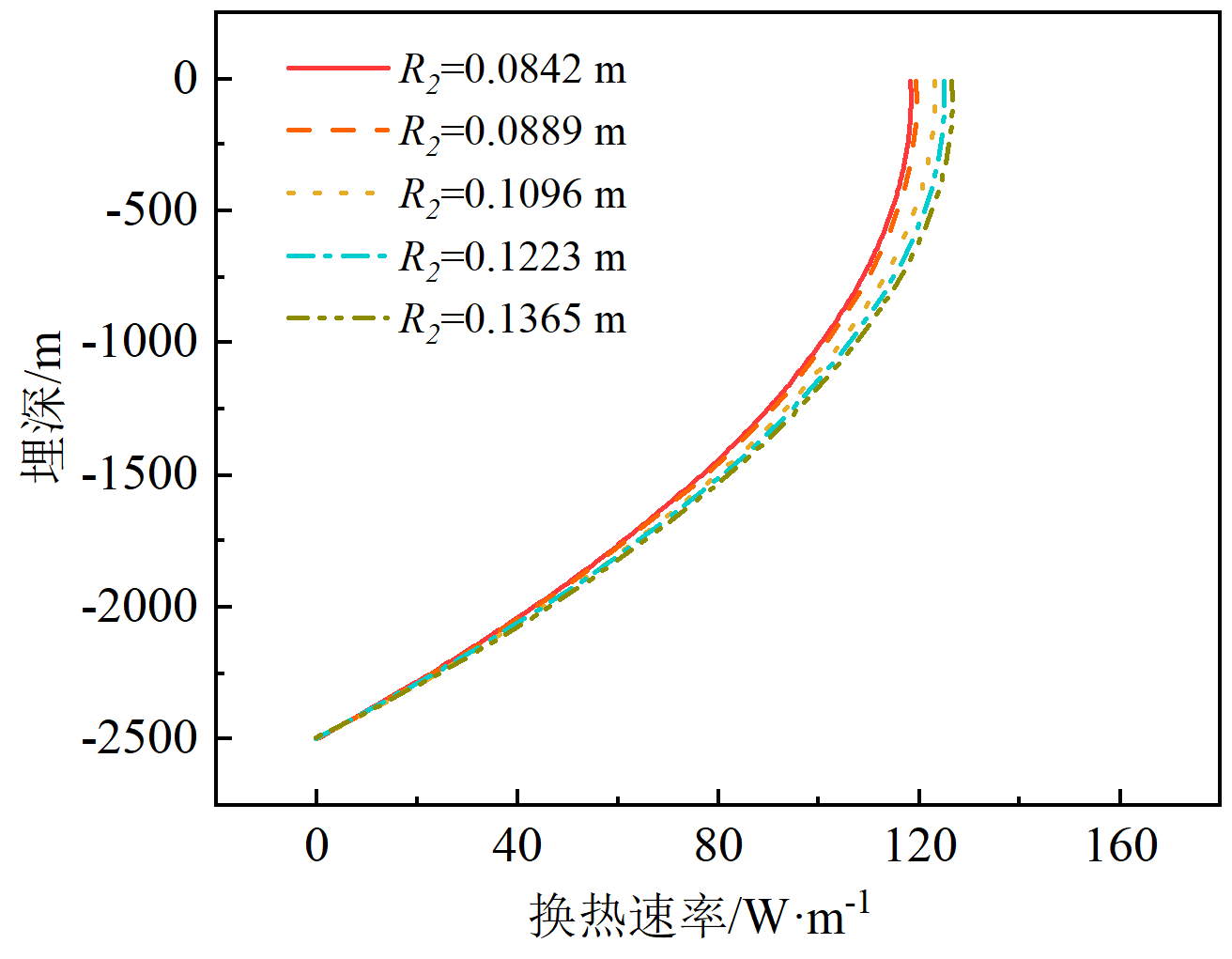
图22对比了不同长度换热器的沿程热流密度。在相同深度下，长度较小换热器的钻井壁热流密度略大于长度较大换热器的钻井壁热流密度。但由于其换热长度的限制，无法提取更深处能量品位较高的地热能，使得整体的取热强度要明显低于长度较大换热器的情况（图22（a））。而对于内管壁的热流密度（图22（b）），长度较大换热器的热流密度明显较大，且沿地表方向显著增加。对于中深层地埋管换热器来说，增加其换热长度虽然可以提取能量品位更高的地热能，但内管输送距离的增加也会导致热损失的增加，应考虑对内管进行保温处理。

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

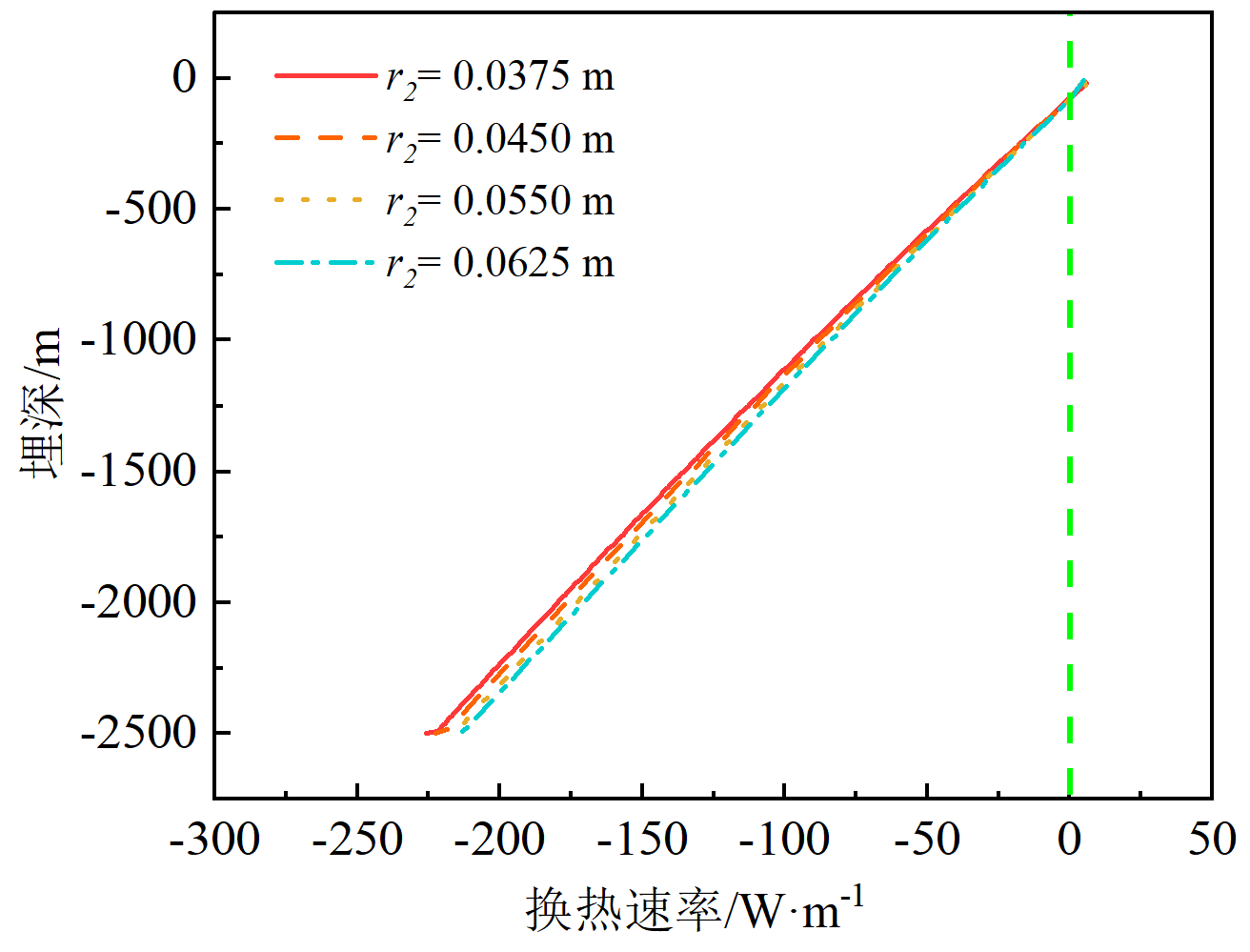
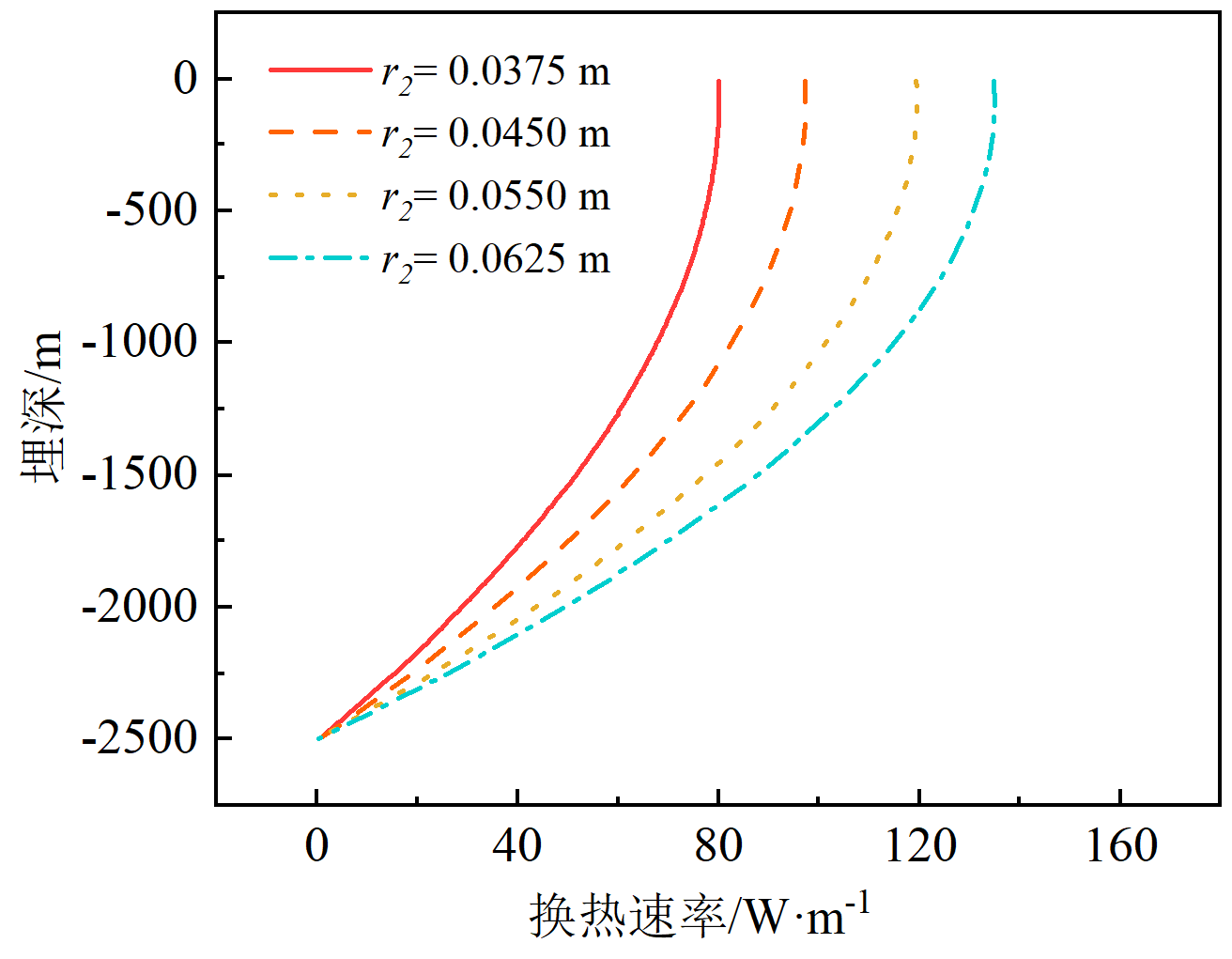
图22不同换热器长度下沿程热流密度分布

图23与图24分别所示为换热器的外管管径与内管管径对沿程热流密度的影响。在外管管径较大的情况下，钻井壁的热流密度较大，表明增大换热器的外管管径有利于促进钻井与岩土体之间的换热（图23（a）），但该条件下的内管壁热流密度也较大（图23（b））。在选择较大外管管径的同时，为保证在环腔中所提取的热量可以有效地输送至地表，应对内管进行保温处理。内管管径的变化对钻井壁热流密度的影响程度较小（图24（a）），然而对内管壁热流密度的具有较为明显的影响（图24（b））。选用较小的内管管径可以显著降低内管壁的热流密度，有效保证在环腔所提取的热量被输送至地表。但需要注意的是，较小的内管管径会导致流体的流动阻力增大，从而引起水泵功耗的增加，这不利于提升热源侧的能量效率。因此，在选用较小的内管管径时，应综合考虑其对热源侧能量效率的影响。

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

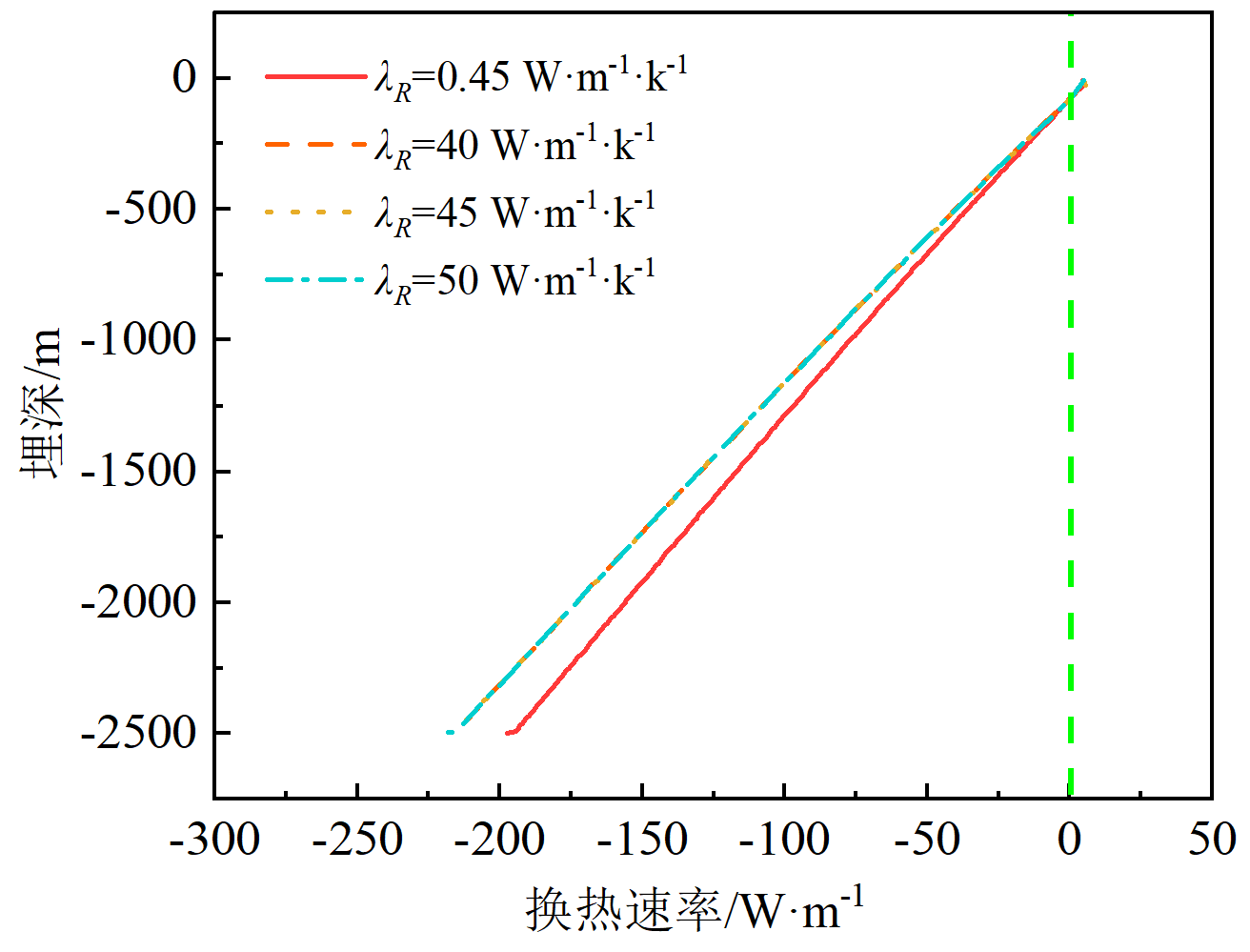
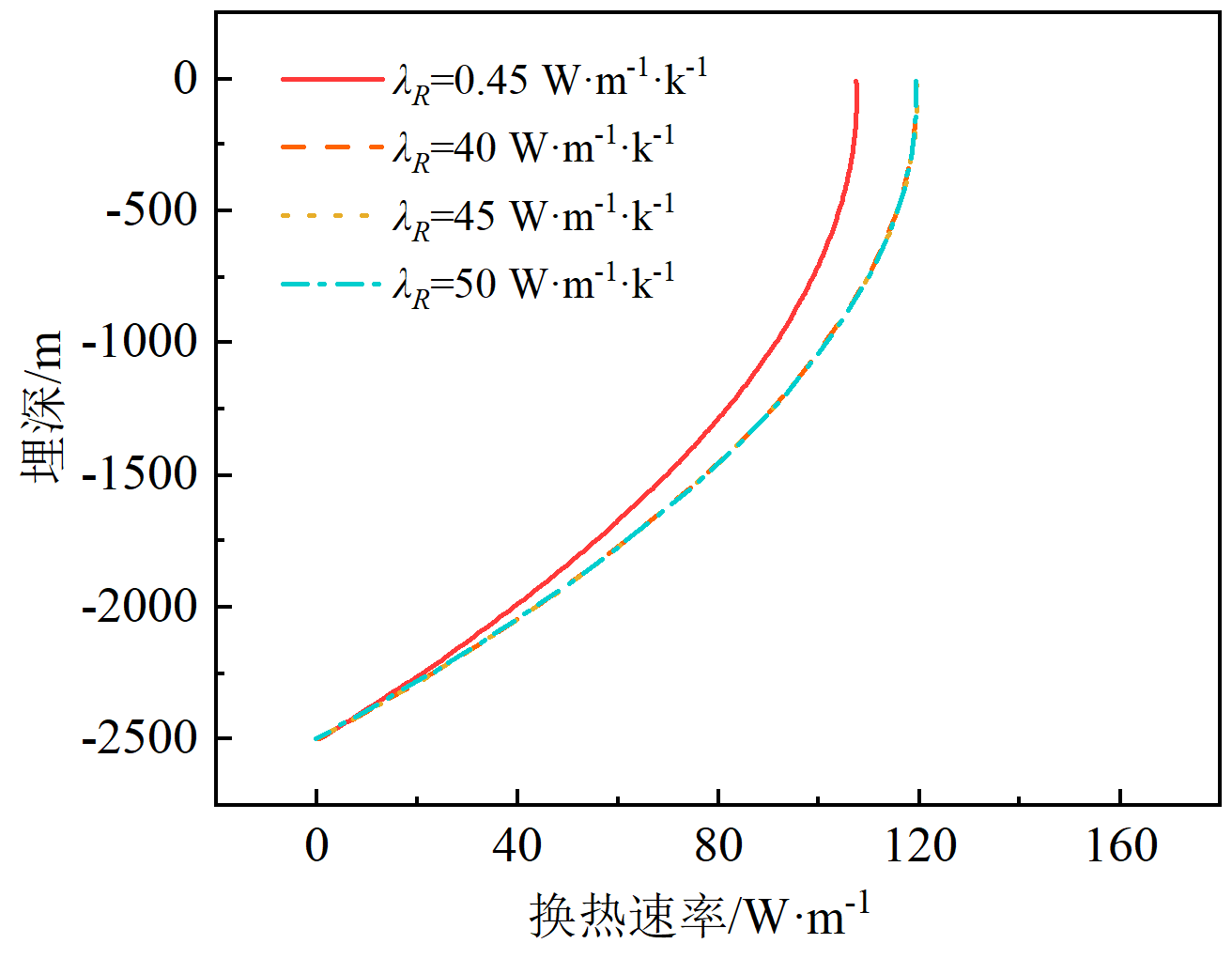
图23不同外管管径下沿程热流密度分布

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

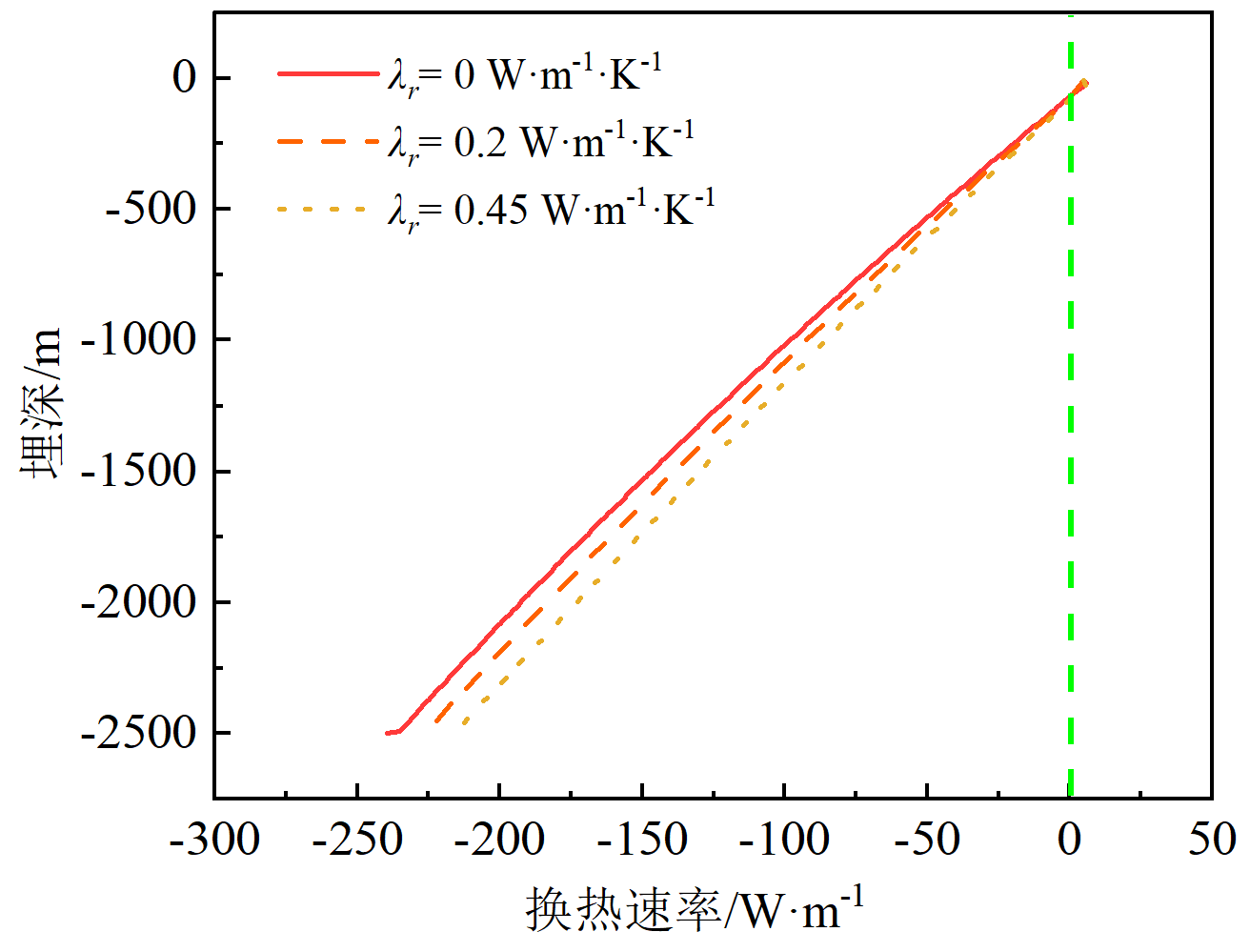
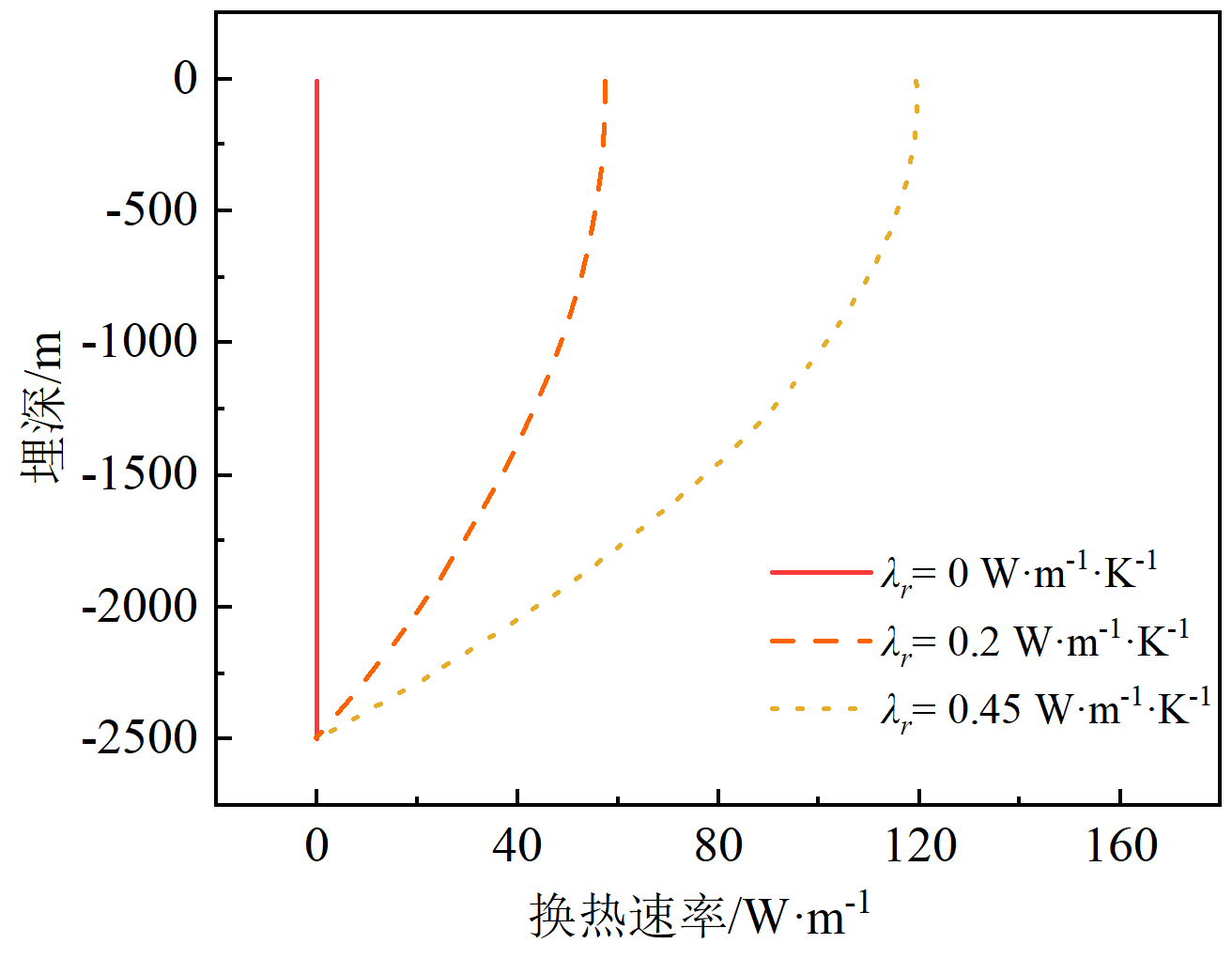
图24不同内管管径下沿程热流密度分布

图25与图26分别所示为中深层地埋管换热器的外管导热系数与内管导热系数对沿程热流密度的影响。增大外管导热系数可以提高钻井壁的热流密度（图25（a）），但随着外管导热系数的增加，钻井壁热流密度基本不发生变化，表明增大外管导热系数对环腔中流体与岩土体之间换热的促进作用是有限的。同时，仍需要注意选用较大导热系数的外管也会导致内管壁热流密度的增加（图25（b）），这主要是由于内管中流体与环腔中流体之间温差增大导致的。内管导热系数对环腔中流体与内管中流体之间的换热具有直接影响，其变化对内管壁的热流密度具有显著的影响（图26（b））。目前实际工程中常用的内管材料为加强型聚氨酯，导热系数为0.45 W·m-1·K-1。当内管的导热系数减小至0.2 W·m-1·K-1时，内管壁的沿程热流密度可减小约50%，有效降低了内管的热损失。在理想状态下即内管的导热系数减小为0 W·m-1·K-1时，内管不再发生热损失。此时，环腔底部的流体将不产生任何热损失的被输送至地表。同时，选用较低导热系数的内管时，钻井壁上的热流密度略高（图26（a）），一定程度上也促进了钻井与岩土体之间的传热，有利于换热器的热提取。

（a） 钻井壁热流密度 （b）内管壁热流密度

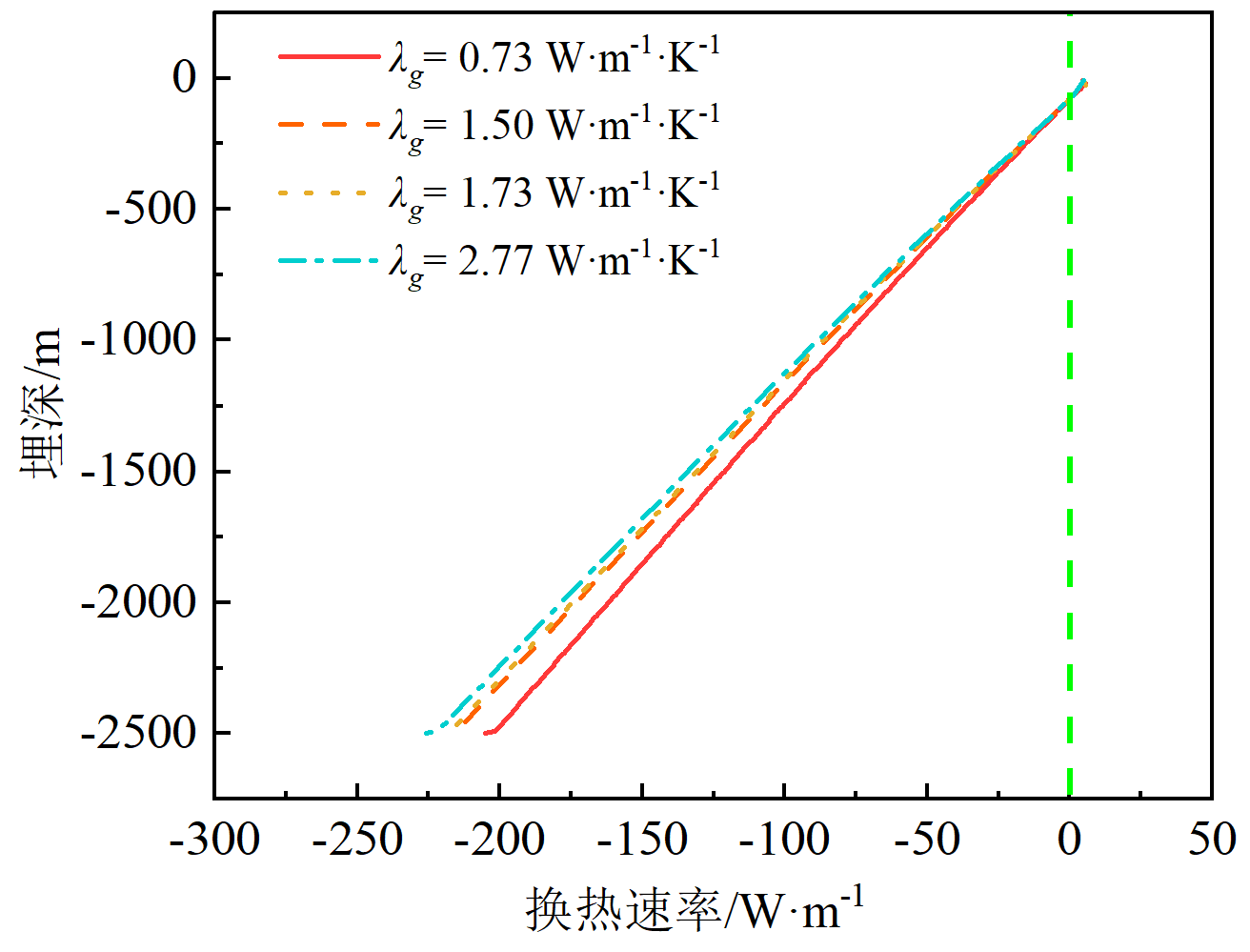
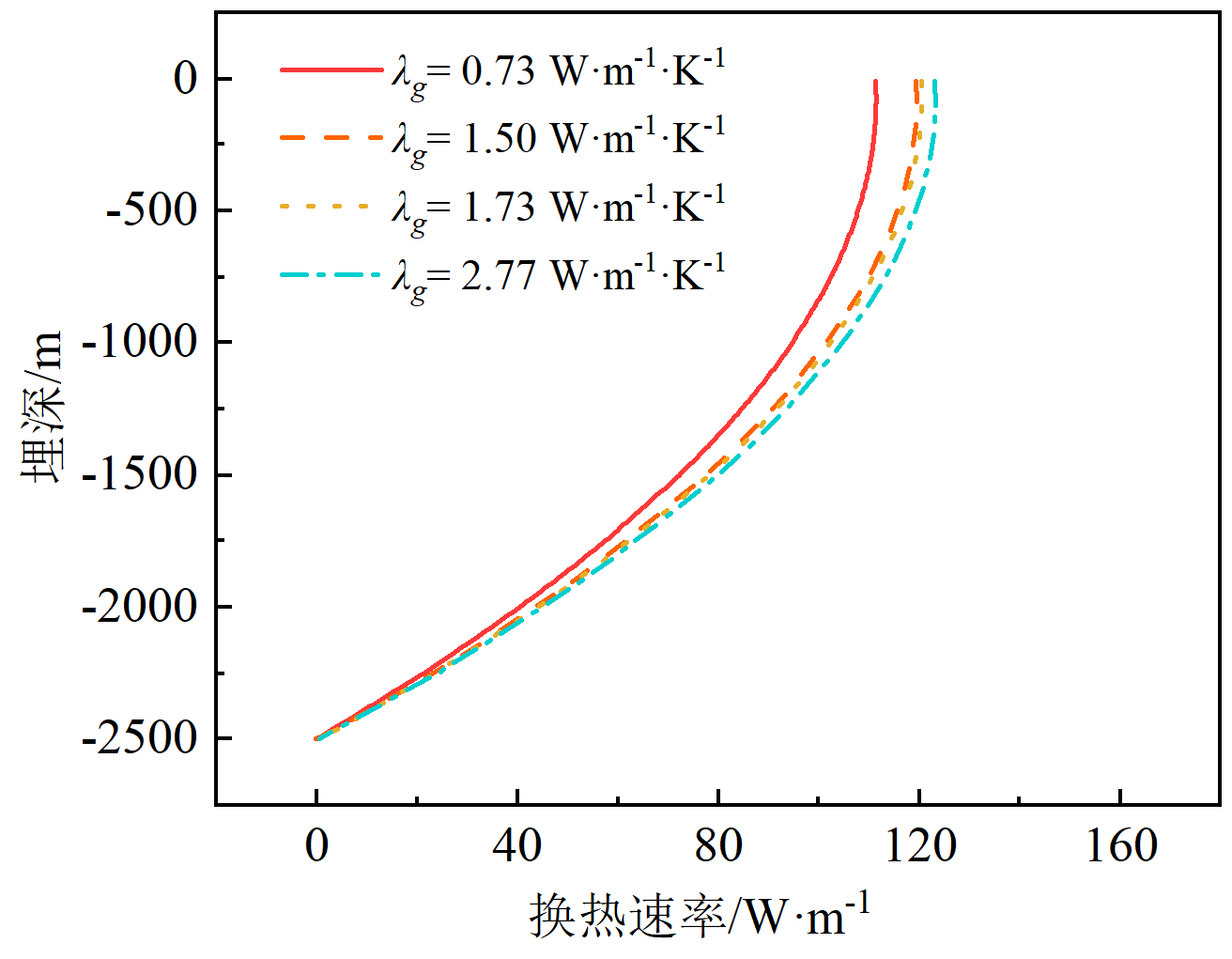
图25不同外管导热系数下沿程热流密度分布

（a） 钻井壁上热流密度 （b）内管壁上热流密度

图26不同内管导热系数下沿程热流密度分布

图27所示为不同回填材料导热系数下沿程热流密度的分布情况。从图中可见，选用较大导热系数的回填材料，钻井壁上的热流密度也较大，表明钻井与岩土体之间的换热作用增强。但需要注意的是，回填材料导热系数的增加对岩土体与钻井之间的换热作用是有限的（图27（a））。同时，选用较大导热系数的回填材料也会导致内管壁的热流密度增加（图27（b）），这是由于内管中流体温度与环腔中流体温度之差增大所导致的结果。

（a） 钻井壁上热流密度 （b）内管壁上热流密度

图27不同回填材料导热系数下沿程热流密度分布

## 3.3中深层地埋管换热器取热性能分析

### 3.3.1取热能力

本节对中深层地埋管换热器的取热能力进行分析，图28所示为在基准参数下单个供暖季中的取热量随运行时间的变化情况。从图中可见，在换热初期时的取热量较大，随着取热的进行取热量逐渐趋于平稳。经计算，整个供热季的平均取热量为298 kW，对应的平均每延米换热量为119 W·m-1，与浅层地埋管换热器相比具有明显的取热优势。

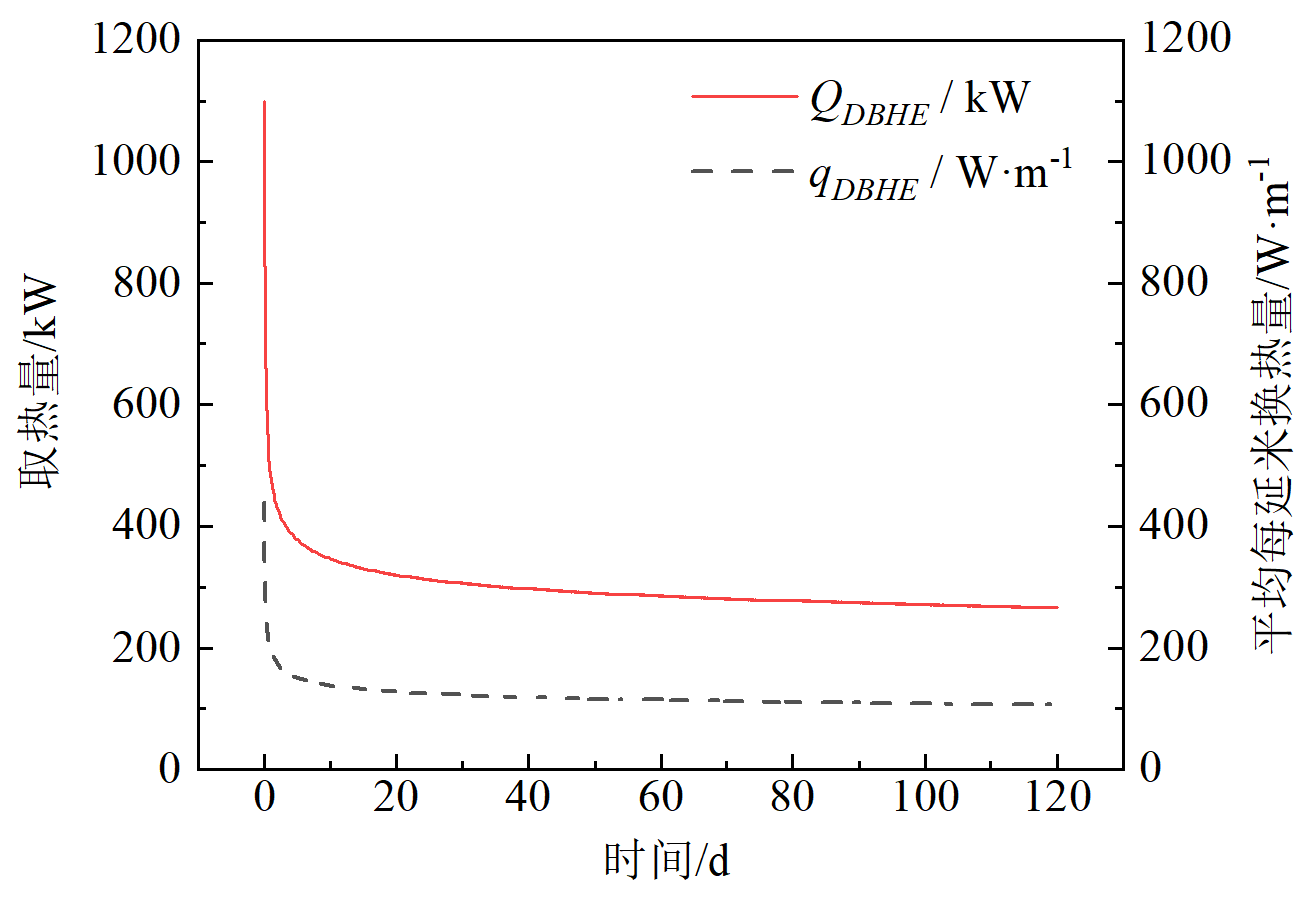


图28取热能力随取热时间的变化情况

影响中深层地埋管换热器取热能力的因素众多，由于选取的基准参数不同、考虑因素有限，仍无法充分探明众多因素对换热器取热量的影响程度。本节以实际工程中的应用条件为基准参数，探究运行参数、地热特征参数以及设计参数对取热能力的作用规律。

1）运行参数

在运行参数方面，对入口温度与循环流速的影响进行分析。图29所示为不同入口温度下的取热量。取热量随着入口水温的增加而降低，且呈线性变化的关系。入口温度每升高2 °C，取热量降低16.3 kW。可见，在入口温度较高的情况下，中深层地埋管换热器的取热能力会受到限制。

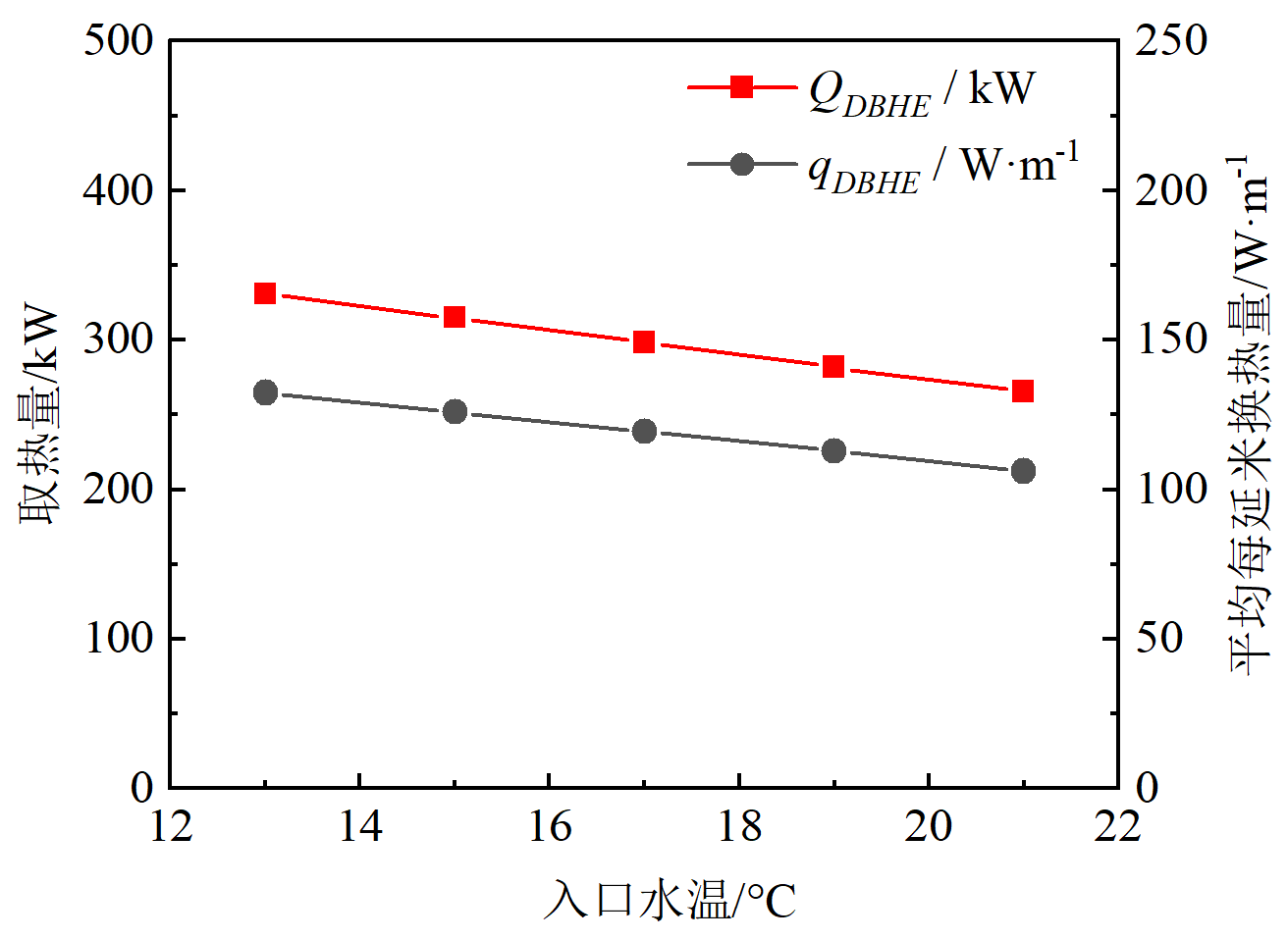


图29入口温度对取热能力的影响

图30所示为不同循环流速下的取热量分布情况。当环腔流速为0.3 m·s-1时，换热器的取热量为178.2 kW。尽管其取热量与浅层地埋管换热器相比具有优势，但对应的平均每延米换热量仅为71.27 W·m-1，与浅层地埋管换热器相比优势并不明显。为充分挖掘中深层地埋管换热器的取热潜力，应采用更大的循环流速进行热提取。但不断增大运行流速时，取热量增加的幅度却逐渐减小。而增大流速又会导致水泵功耗的增加，对热源侧的能量效率造成不利影响。因此，在运行流速的选择方面，需要综合考虑其对热源侧能量效率的影响。

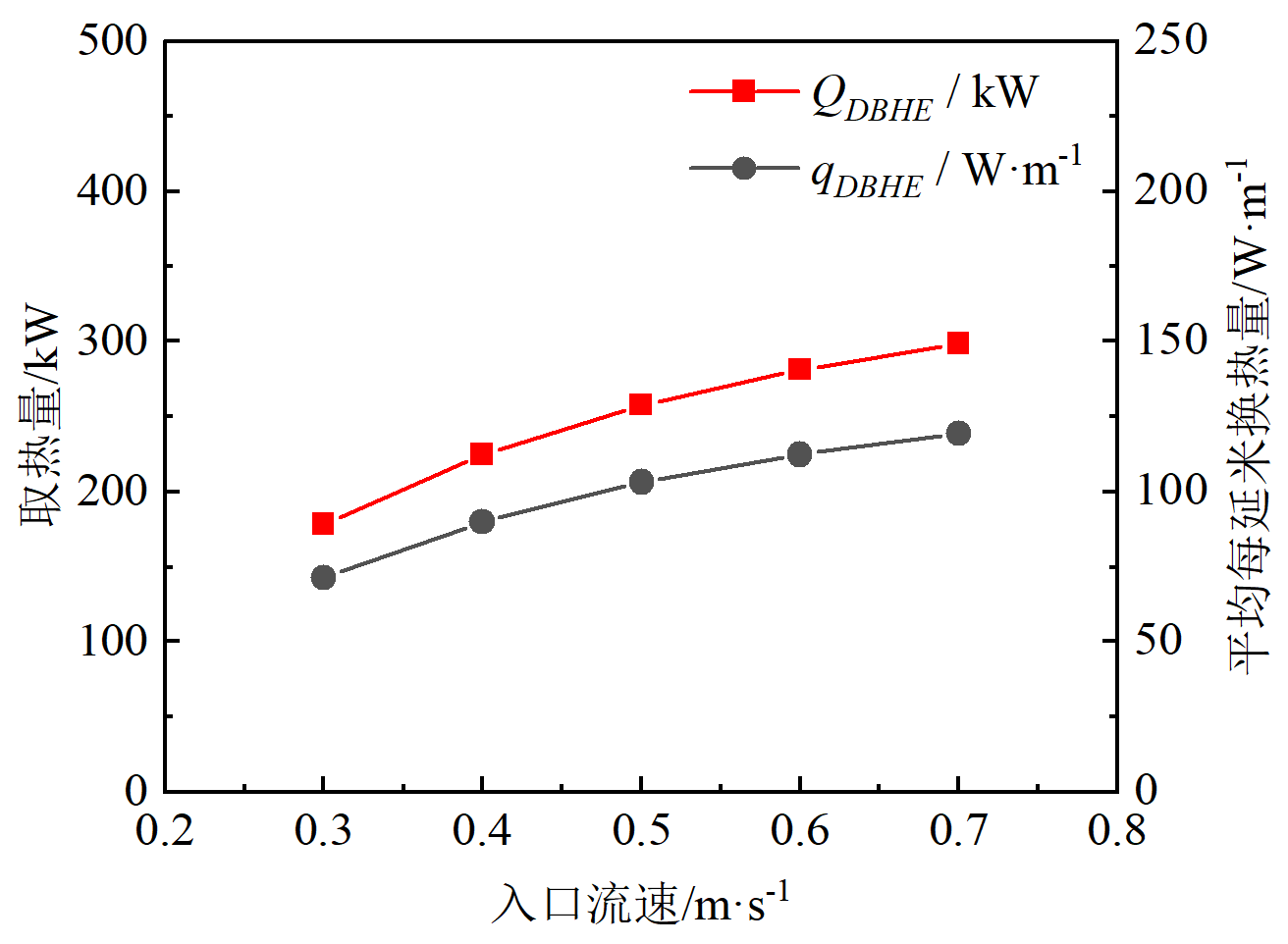


图30入口流速对取热能力的影响

2）地热特征参数

在岩土体热物性参数方面，图31所示为在不同岩土体导热系数下换热器取热量的分布情况。可见，岩土体的导热系数由1.5 W·m-1·K-1增加至3.0 W·m-1·K-1时，取热量提高116.2 kW。在3.0 W·m-1·K-1的条件下，平均每延米换热量达132.8 W·m-1。由此表明，在导热系数较高的地热条件下，换热器的取热量得到了有效地提升。

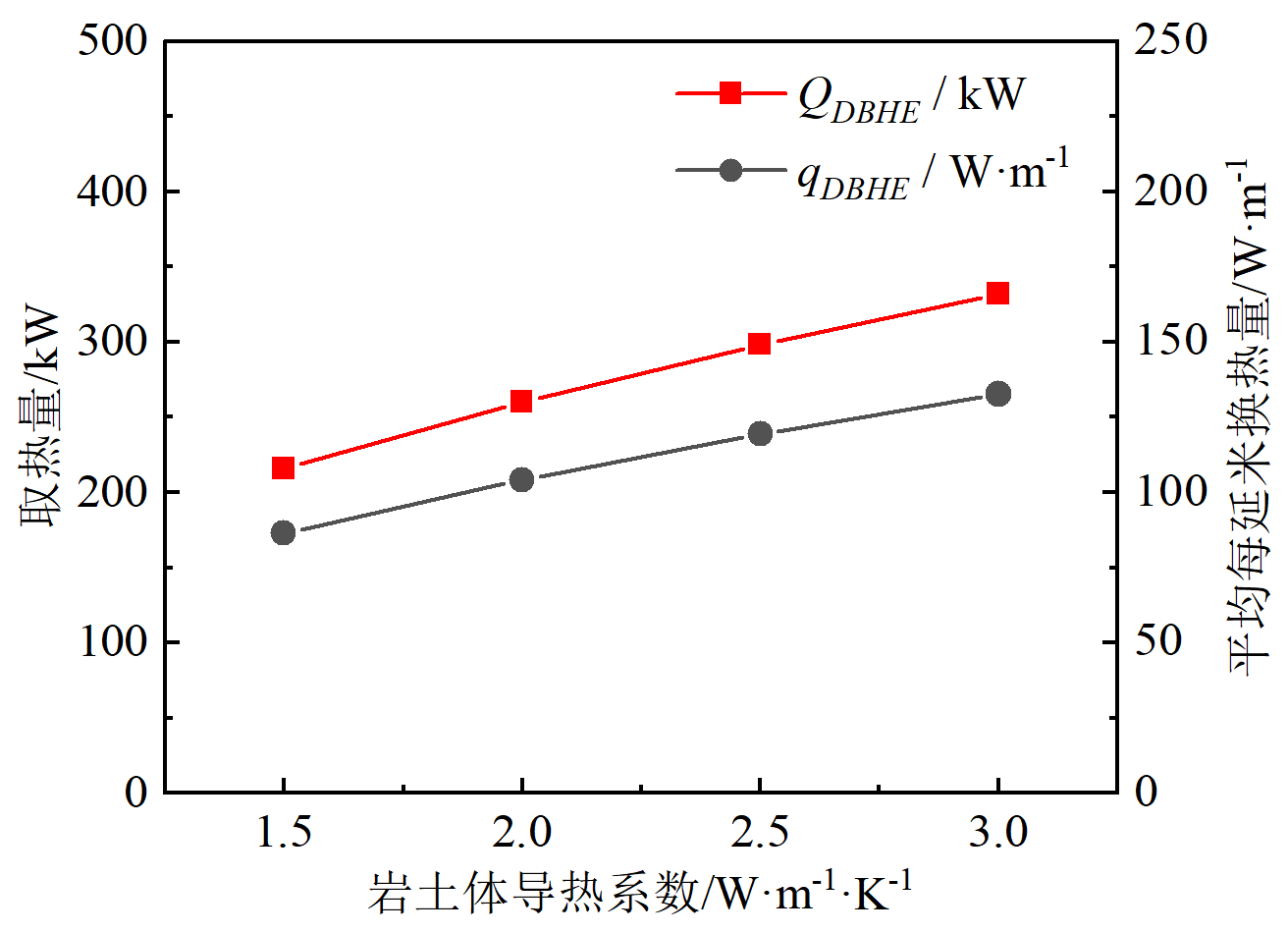


图31岩土体导热系数对取热能力的影响

图32所示为在不同岩土体比热容下换热器取热量的分布情况。可见，换热器的取热量也随着岩土体比热容的增加呈现上升的趋势，但其变化程度较小。岩土体比热容由1500 kJ·m-3·K-1增大至3000 kJ·m-3·K-1时，取热量仅提高20.6 kW。综上可以初步判断，在岩土体热物性参数的影响方面，相较于岩土体比热容来说，岩土体导热系数对中深层地埋管换热器取热能力的作用程度更加明显。

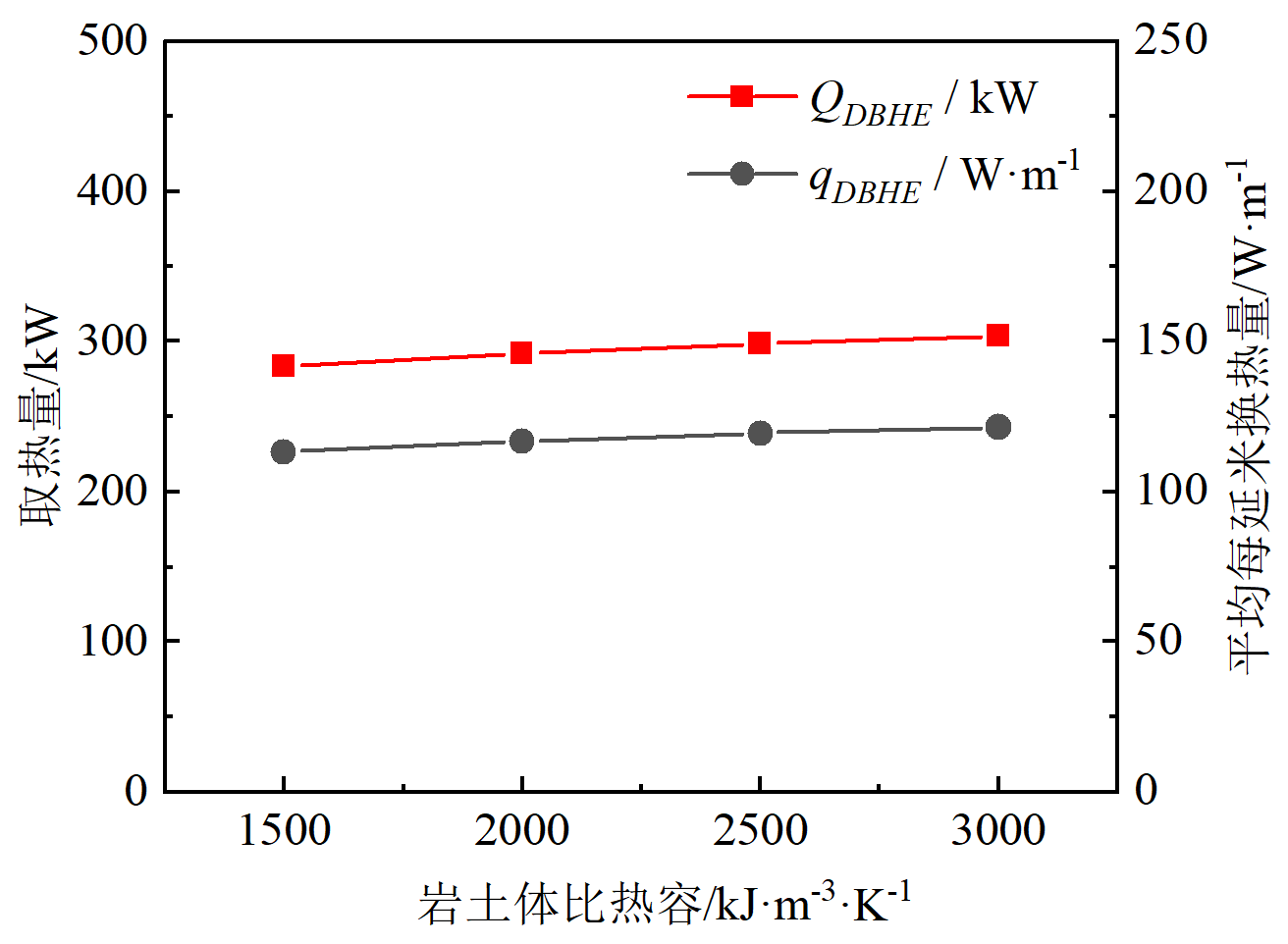


图32岩土体比热容对取热能力的影响

岩土体温度的大小决定了其所蕴含地热能的能量品位，由地温梯度与地表温度共同决定。不同地温梯度和地表温度下的取热量分布情况如图33和34所示。

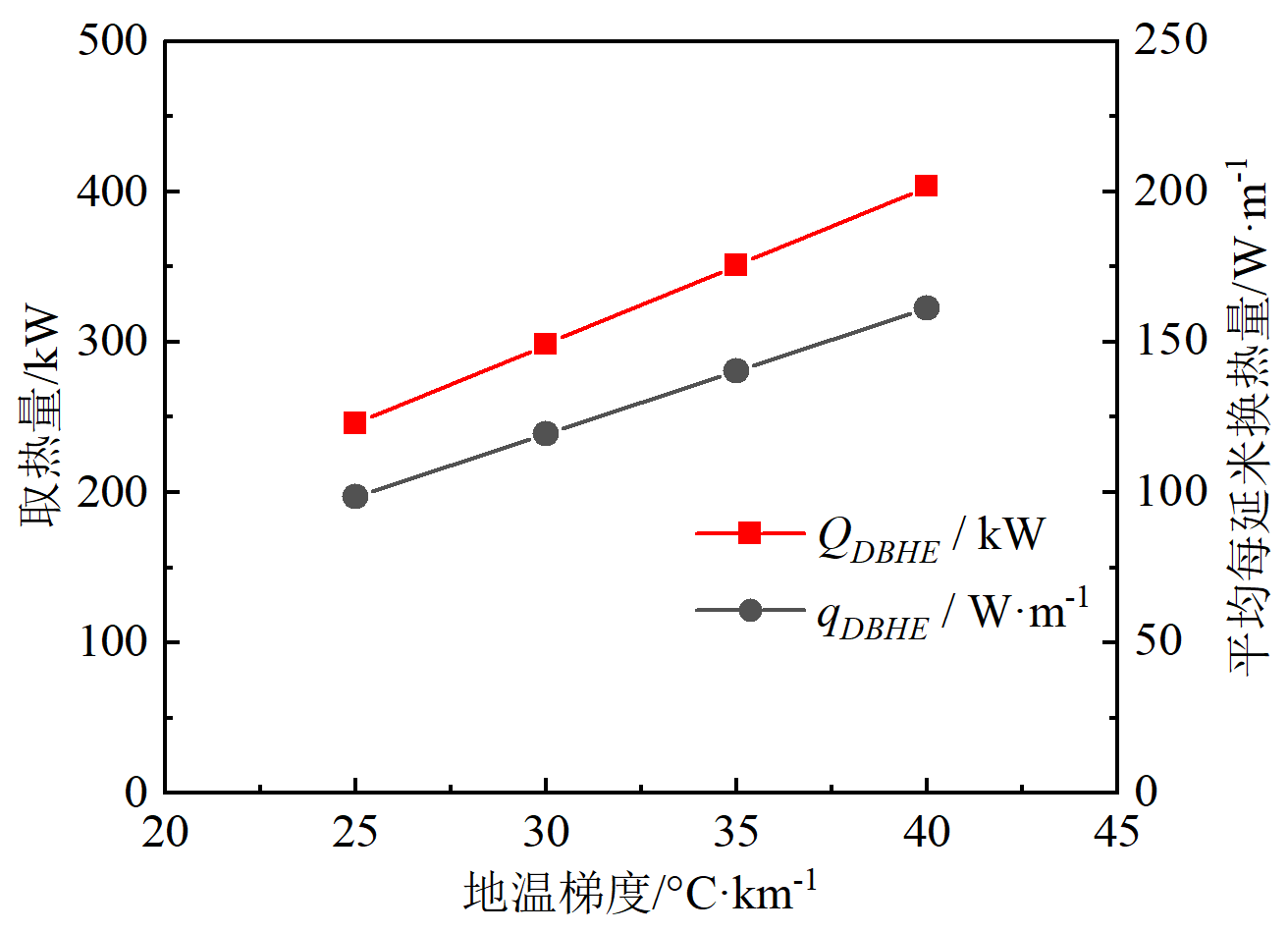


图33地温梯度对取热能力的影响

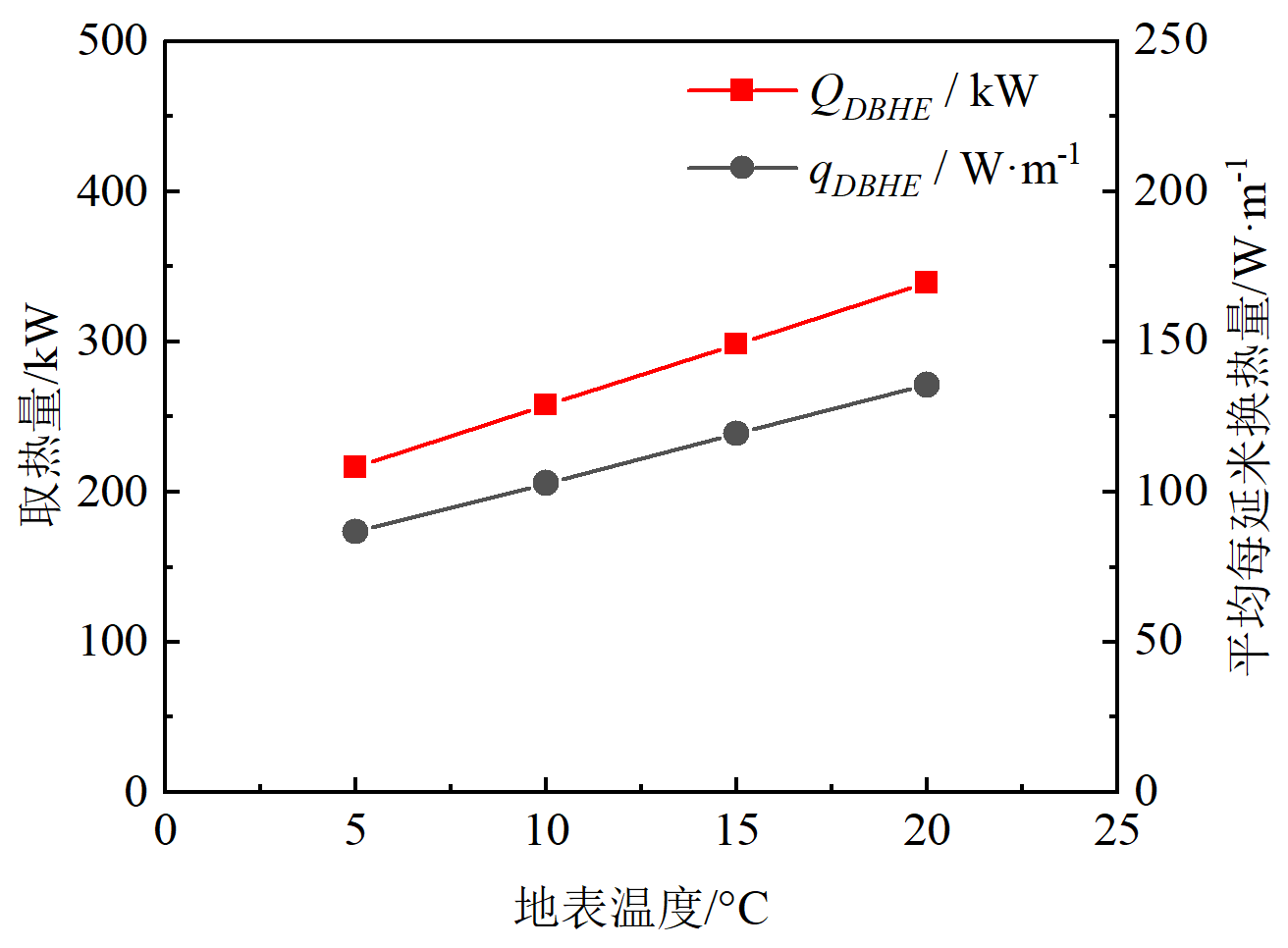


图34地表温度对取热能力的影响

可见，在地温梯度或地表温度较高的条件下，中深层地埋管换热器的取热能力可以得到有效地提升。当地温梯度由25 °C·km-1增加至40 °C·km-1时，换热器的取热量提高157.3 kW，且地温梯度每升高5 °C·km-1，取热量增加52.4 kW（图33）；当地表温度由5 °C增加至20 °C，取热量提高122.4 kW，且地表温度每升高5 °C，取热量增加40.8 kW（图34）。可以发现，中深层地埋管换热器的取热量与地温梯度、地表温度均呈现线性变化的关系。

应用中深层地埋管换热器就是要充分提取蕴藏在地下更深处的能量品位更高的地热能为建筑供热。从对地热特征参数的分析中可以看出，在岩土体热物性参数与地温场较高的条件下，可以充分发挥中深层地埋管换热器的取热优势。相反，对于地热特征参数较低的情况下，例如当岩土体导热系数为1.5 W·m-1·K-1、地温梯度为25 °C·km-1时，长度为2500 m的中深层地埋管换热器的平均每延米换热量仅为50.8 W·m-1，其与浅层地埋管换热器的平均每延米换热量趋于一致，在该种地质条件下将无法发挥中深层地埋管换热器的应用价值。

3）设计参数

图35所示为不同长度换热器取热量的分布情况。换热器长度由1500 m 增加至 3000 m时，换热器的取热量提升286.1 kW，是长度为1500 m换热器取热量的2倍之多。由此可见，增加换热器的长度可以有效提升其取热量。但在实际应用中，钻井成本往往随着钻井深度的增加而显著提升。在增加换热器长度的同时，也需要考虑其对项目经济性的影响。此外，长度为1500 m换热器的取热量为117.1 kW，对应的平均每延米换热量为78.1 W·m-1，与浅层地埋管换热器的平均每延米换热量相比较为接近。我们进一步计算了长度为1000 m换热器的平均每延米换热量，仅为52.4 W·m-1，其与浅层地埋管换热器相比趋于一致。由此可见，长度较小的中深层地埋管换热器的取热能力不再具有优势。

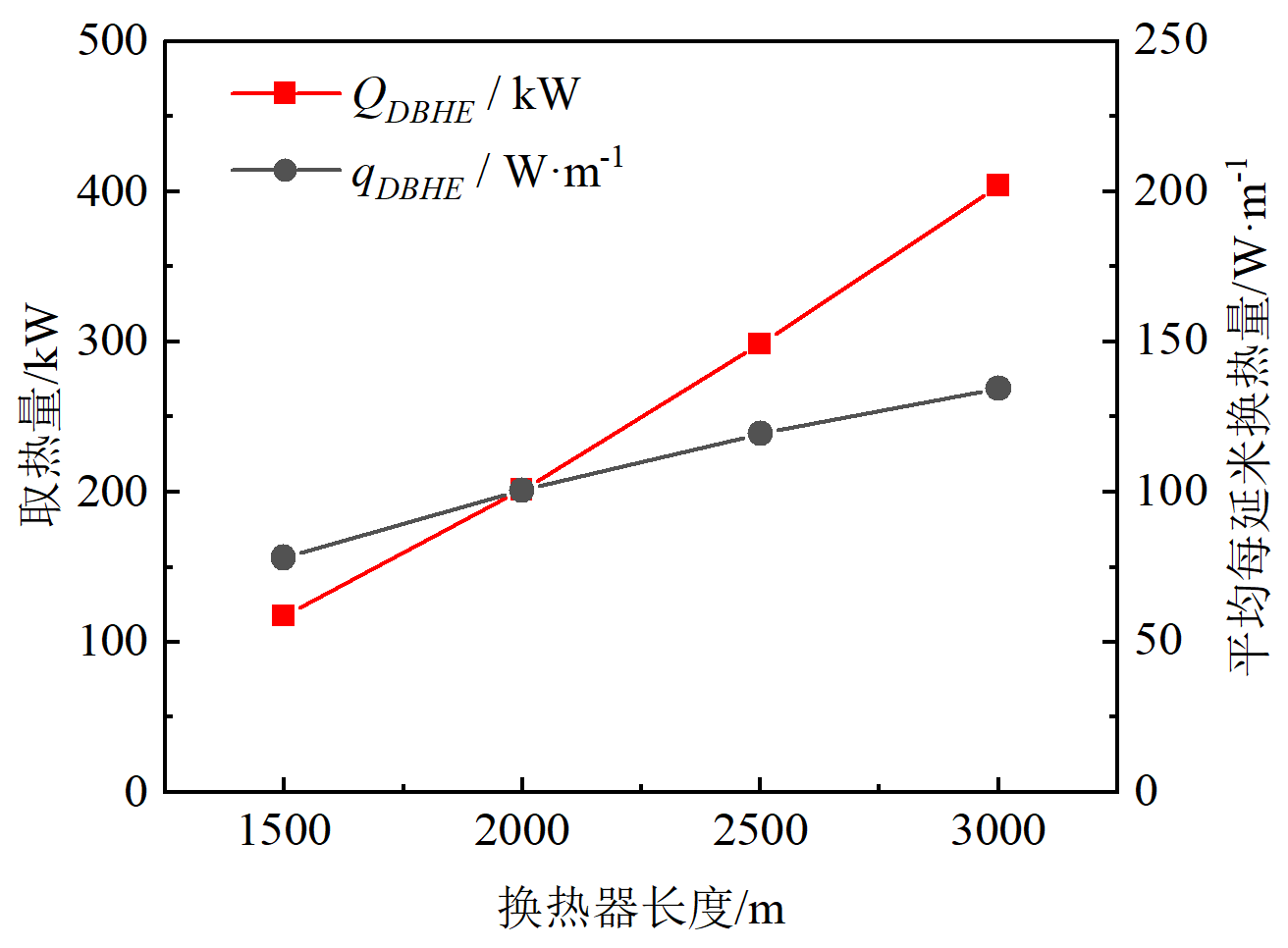


图35换热器长度对取热能力的影响

图36和图37所示为不同外管管径与不同内管管径下的取热量分布情况，其随着以上两个因素的变化呈近似线性的变化关系。在目前的管井规格中，当外管管径由0.0842 m增加至0.1365 m时，换热器的平均每延米换热量由117.8 W·m-1 提高至132.6 W·m-1，提高比例为12.6%。当内管管径由0.0625 m减小至0.0375 m时，换热器的平均每延米换热量由117.1 W·m-1提高至125.1 W·m-1，提高比例为6.8%，可见选取较大的外管管径或选取较小的内管管径有利于热提取。但选取较大的外管管径时，应考虑其对项目初始投资的影响。而选取较小的内管管径时，需要综合考虑水泵功耗的增加对热源侧能量效率的影响。

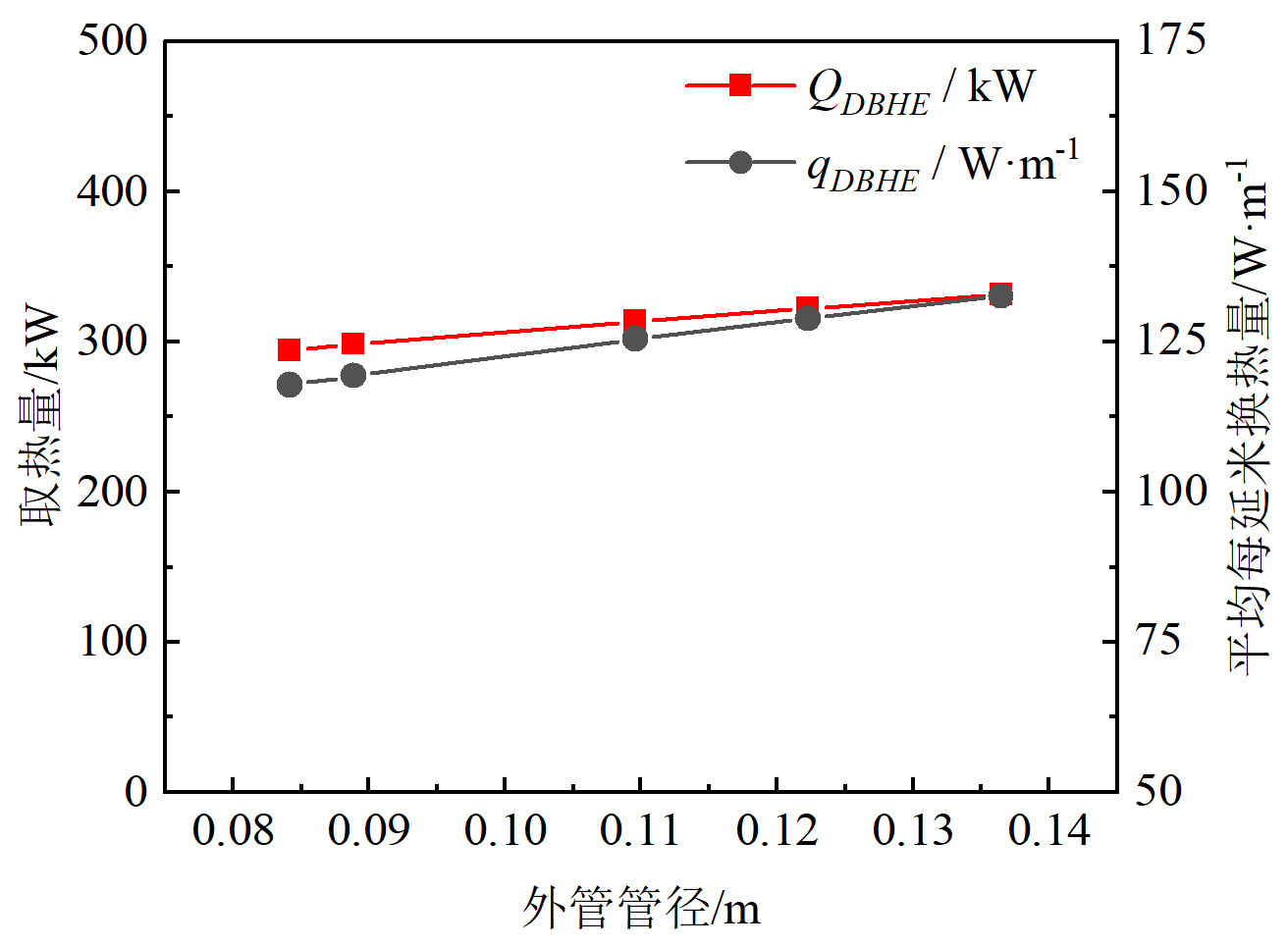


图36外管管径对取热能力的影响

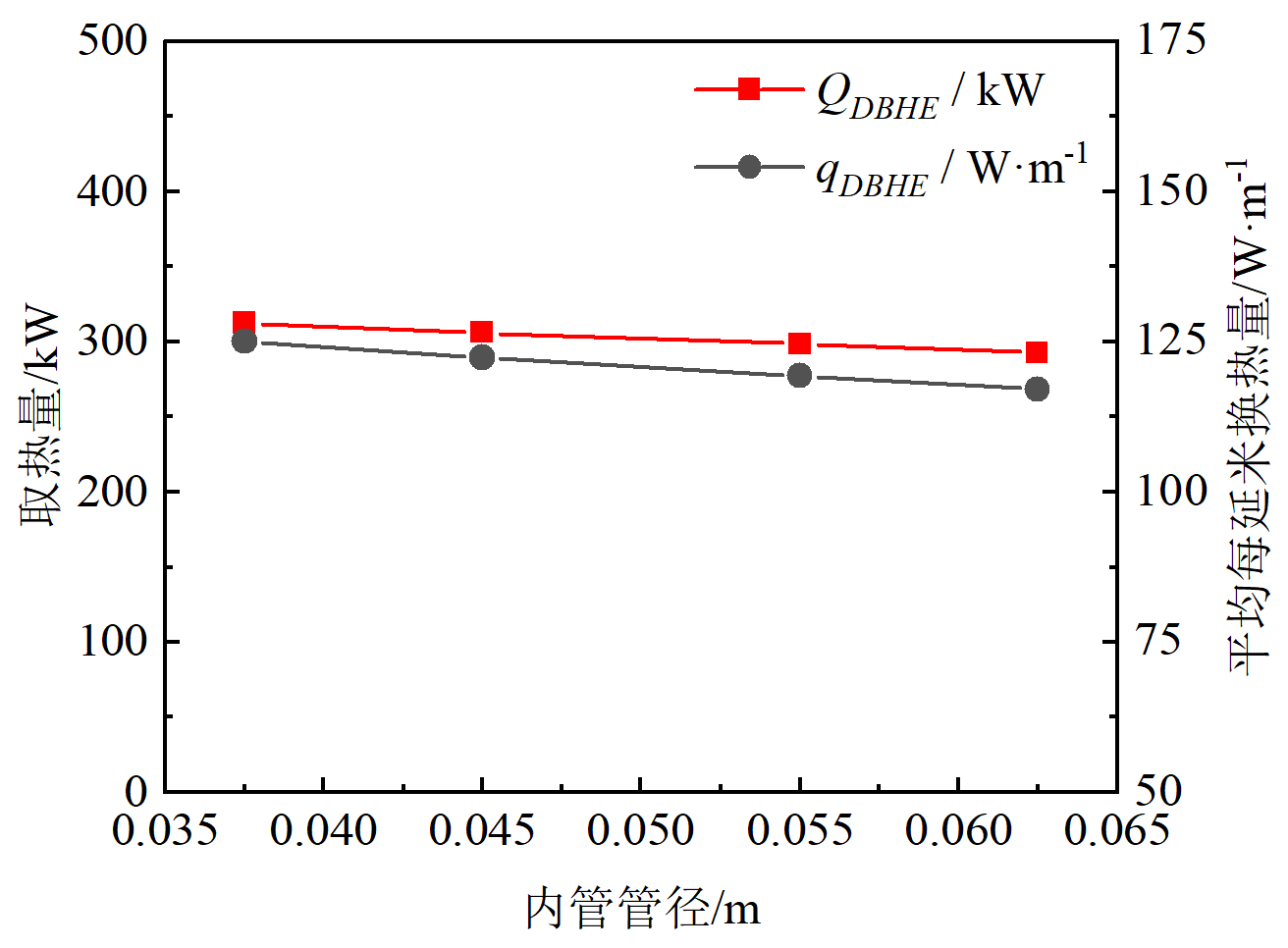


图37内管管径对取热能力的影响

图38和图39分别所示为外管导热系数和内管导热系数对换热器取热量的影响。外管所用的石油套管的导热系数在40-45 W·m-1·K-1之间，内管常用管材加强型聚氨酯的导热系数为0.45 W·m-1·K-1。由图38可见，当外管导热系数为40 W·m-1·K-1时，继续增加导热系数对取热量基本没有影响。而对于内管导热系数来说，降低其导热系数有助于提高换热器的取热量（图39）。将目前常用的加强型聚氨酯内管替换为完全绝热材料，取热量可提高14.7%，平均每延米换热量可达136.9 W·m-1，取热能力显著。

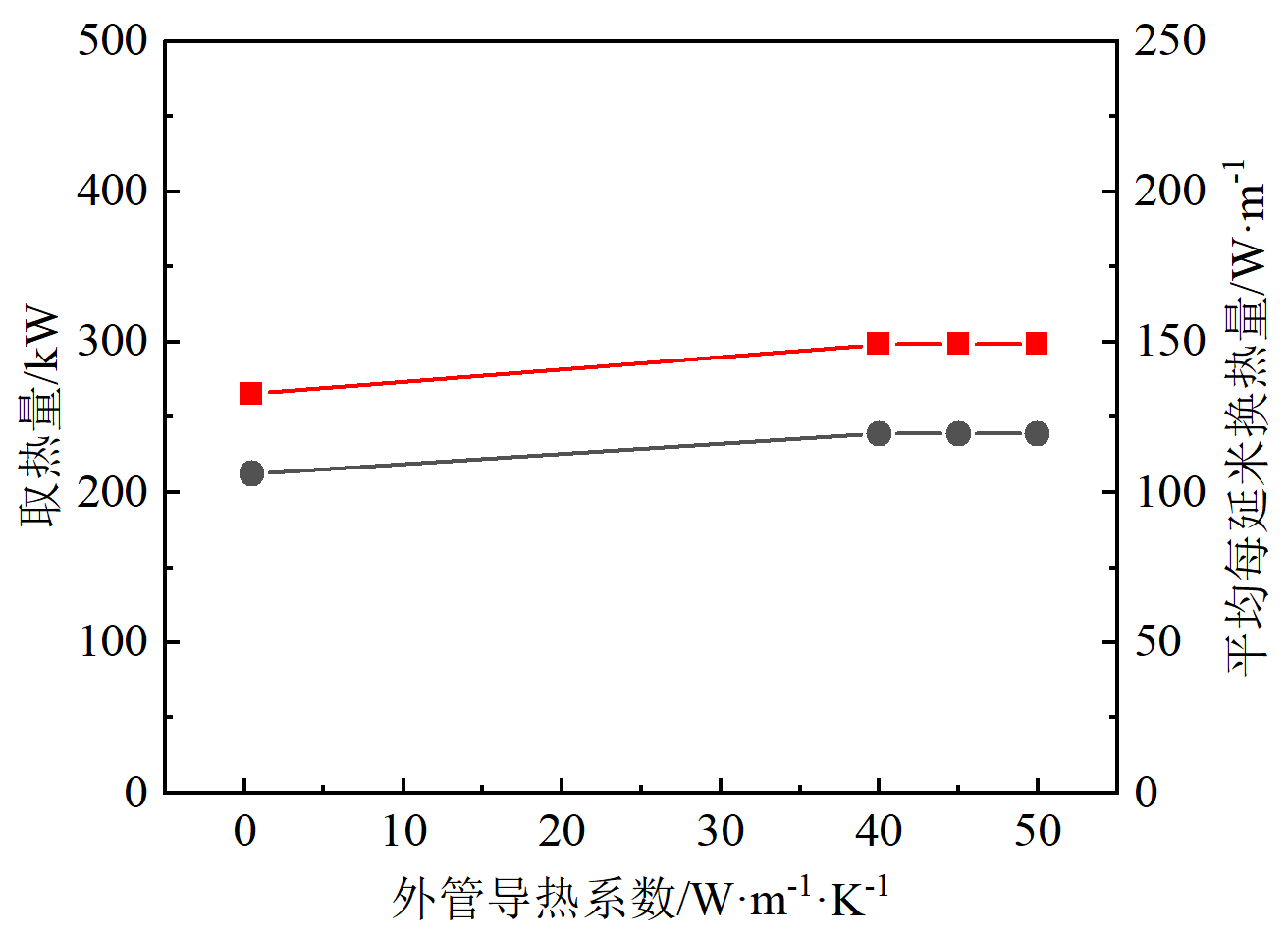


图38外管导热系数对取热能力的影响

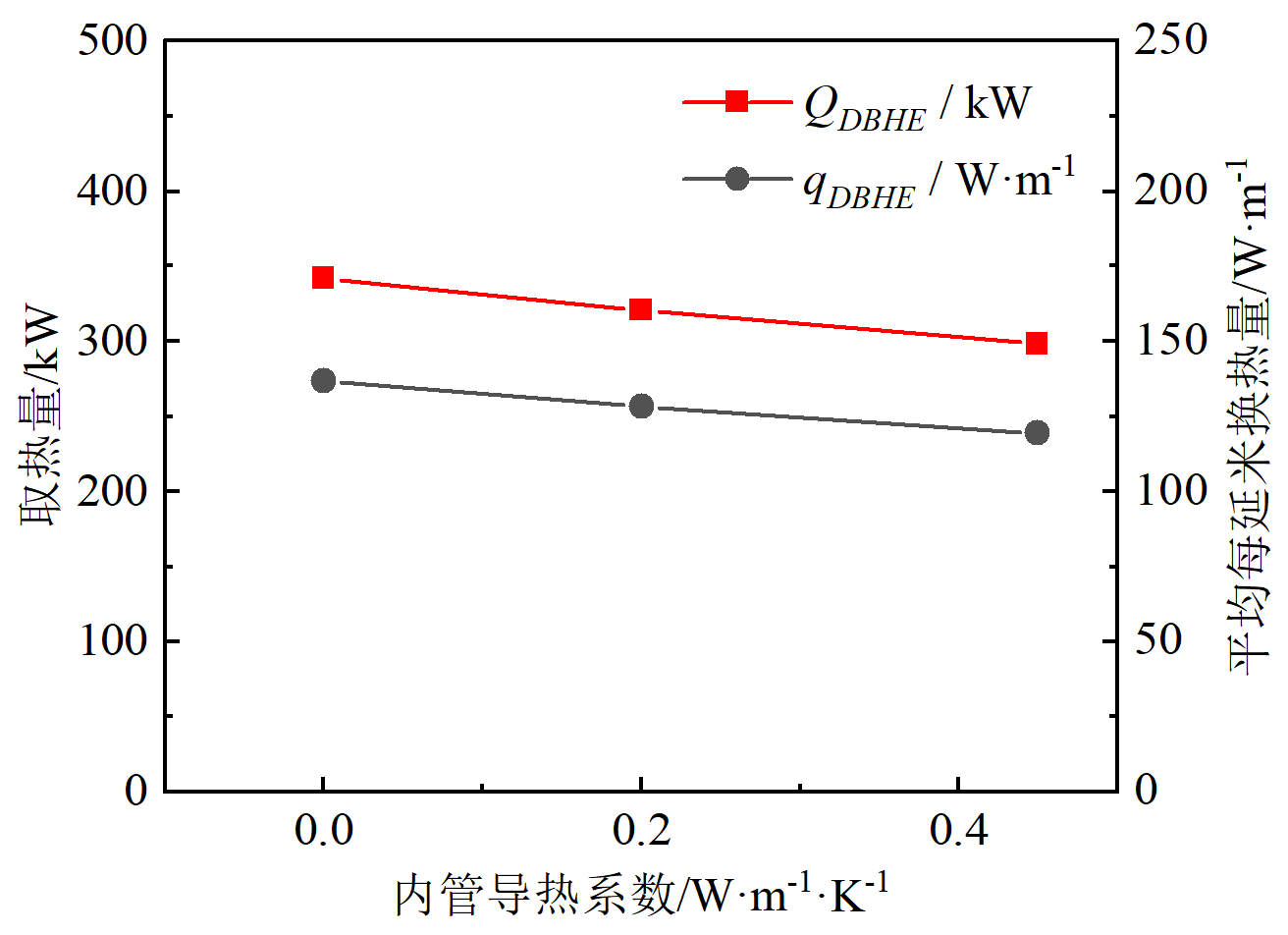


图39内管导热系数对取热能力的影响

图40所示为不同回填材料导热系数下的取热量。选用较高导热系数的回填材料有助于提高换热器的取热量，但其增大至一定程度时，对取热量的作用不再明显。

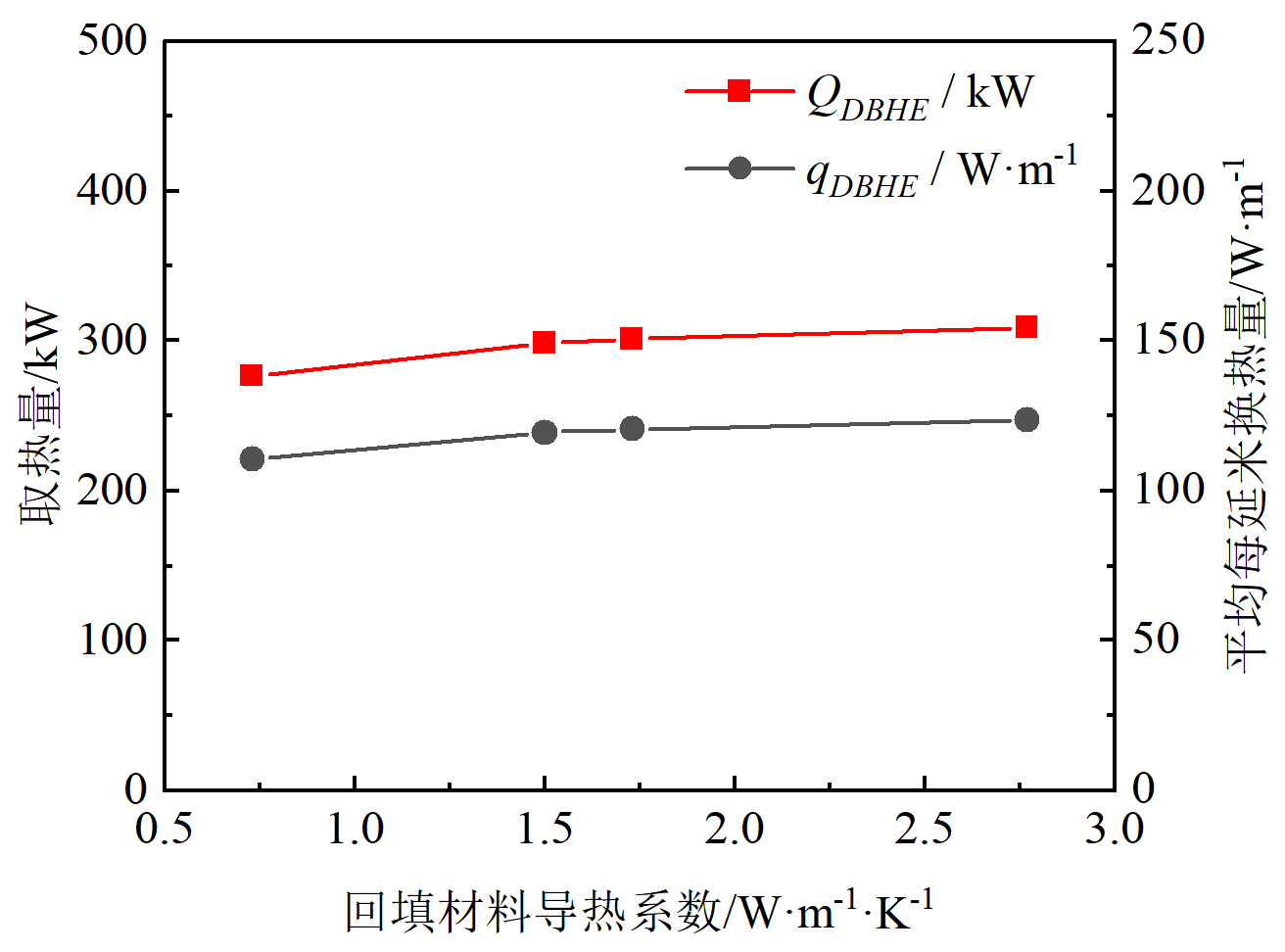


图40回填材料导热系数对取热能力的影响

以膨润土作（导热系数0.73 W·m-1·K-1）作为回填材料时，平均每延米换热量为110.5 W·m-1；以20%膨润土、80%SiO2沙子的混合物（导热系数1.5 W·m-1·K-1）作为回填材料时，平均每延米换热量为119.3 W·m-1，与膨润土作为回填材料时相比提高了8.0%。而回填材料增大至2.77 W·m-1·K-1时，平均每延米换热量为123.57 W·m-1，与导热系数1.5 W·m-1·K-1时相比只提高了3.6%。

### 3.3.2取热损失

中深层同轴套管地埋管换热器的单向沿程达上千米，而在内管中的流动则发生热损失。本节主要探究换热器在取热过程中的热损失程度。

图41所示为在基准参数下中深层地埋管换热器的取热量以及取热损失比随着运行时间的分布情况。可见，换热器底部的取热量要明显高于实际的取热量。从开始取热至供暖季结束，取热损失比保持在42.6-43.0%之间，热损失程度较高且基本不随取热时间发生变化。后续探究众多因素对取热损失比的影响时，选取第120天的取热情况进行分析。

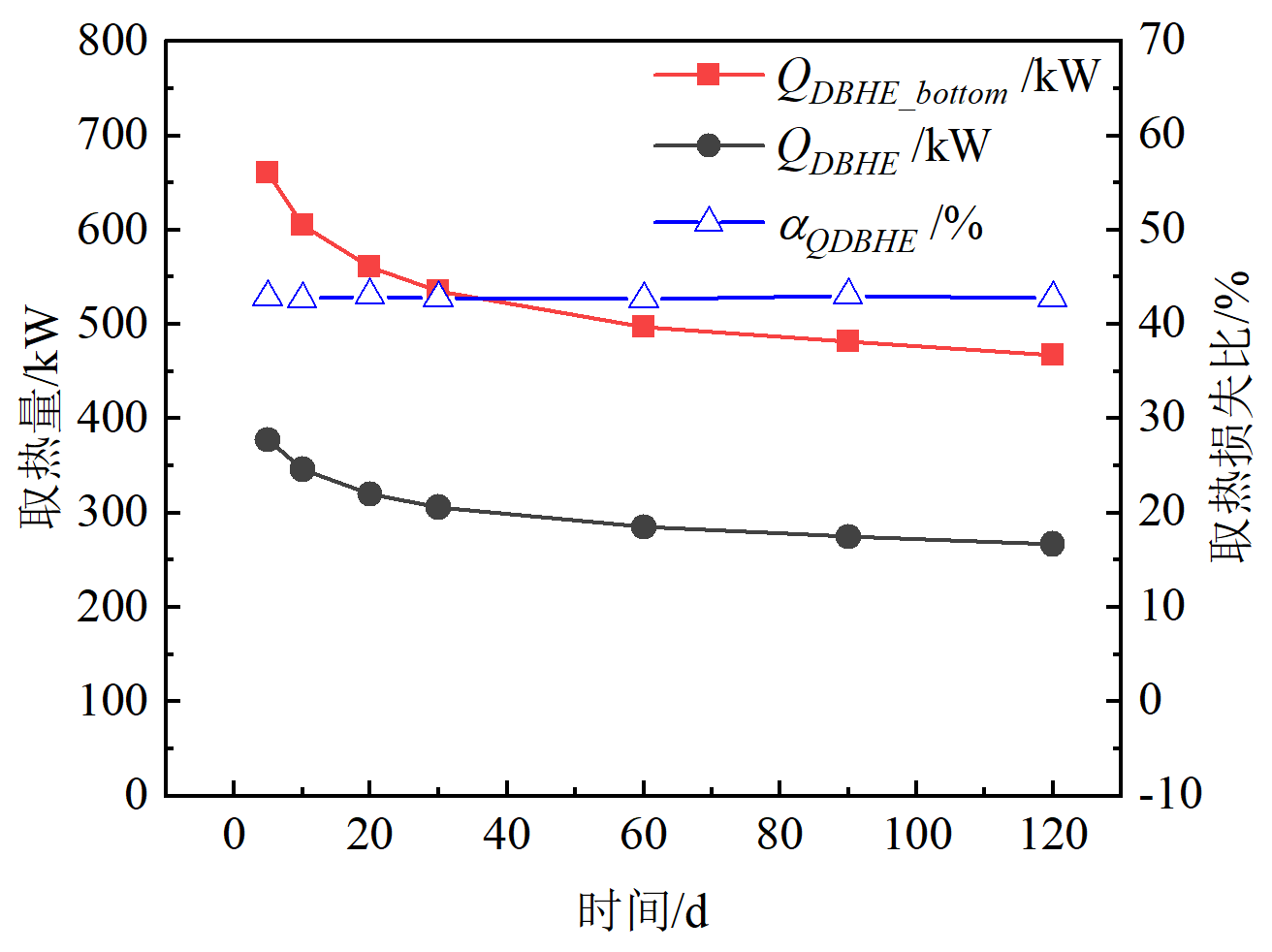


图41不同取热时间下的取热量与取热损失比

1）运行参数

图42所示为不同入口水温下取热损失比的分布情况，其随着入口水温的降低而减小。入口水温从21 °C减小至13 °C，取热损失比降低1.9%，其影响程度不是十分明显。图43所示为不同环腔流速下取热损失比的分布情况。当环腔流速由0.7 m·s-1 减小至0.3 m·s-1时，取热损失比由42.8%增加至63.5%，由此表明取热损失比随着流速的降低显著增加。同时，可以发现在不同流速下，换热器底部的取热量十分接近。在0.3 m·s-1的条件下，换热器底部取热量与实际取热量之间的差距十分显著，表明在内管中产生了大量的热损失。因此，中深层地埋管换热器在以较小的流速进行换热时，可以采取内管保温的措施降低热损失程度，进而发挥其存在的取热潜力。

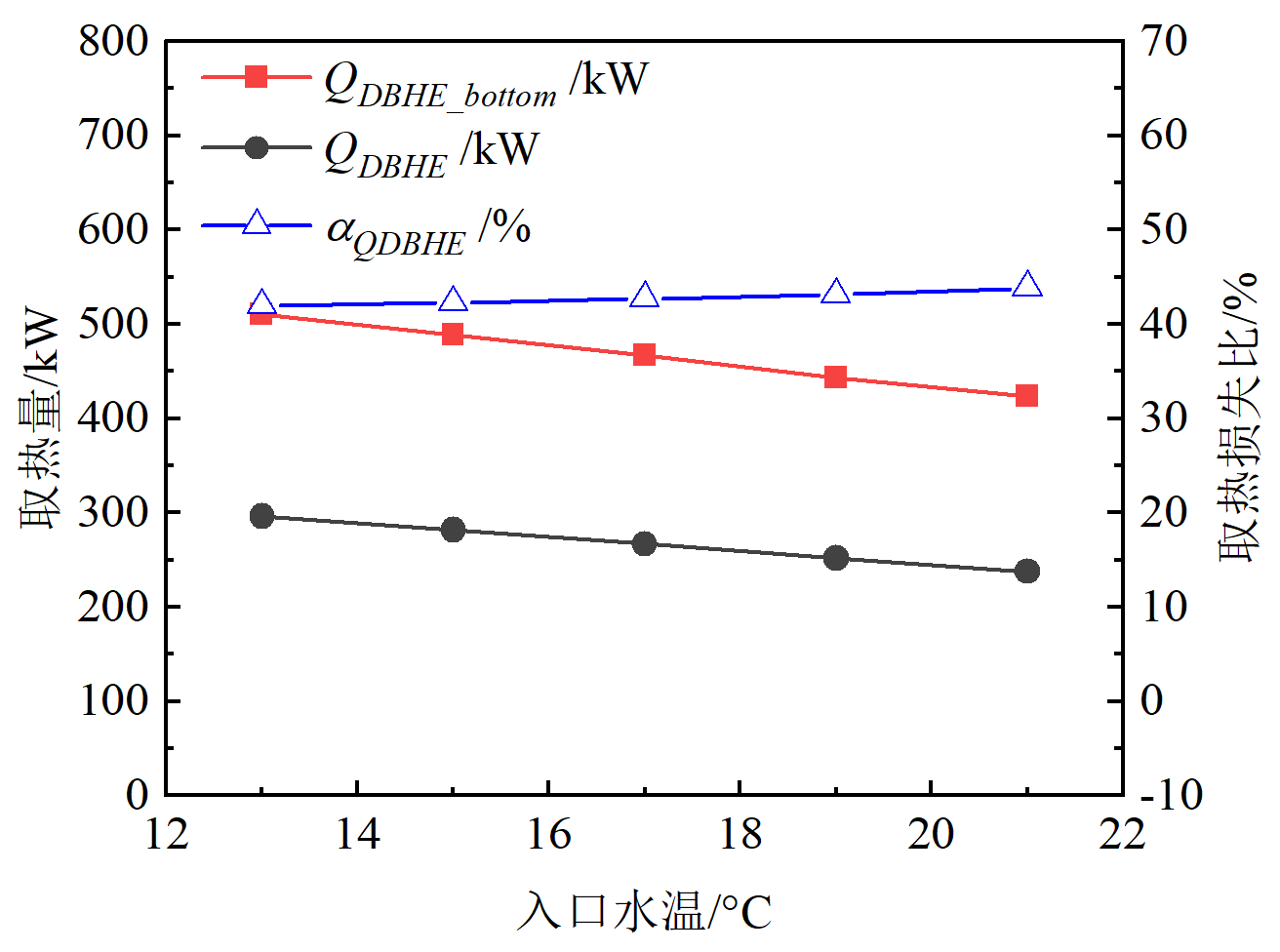


图42入口温度对取热量与取热损失比的影响

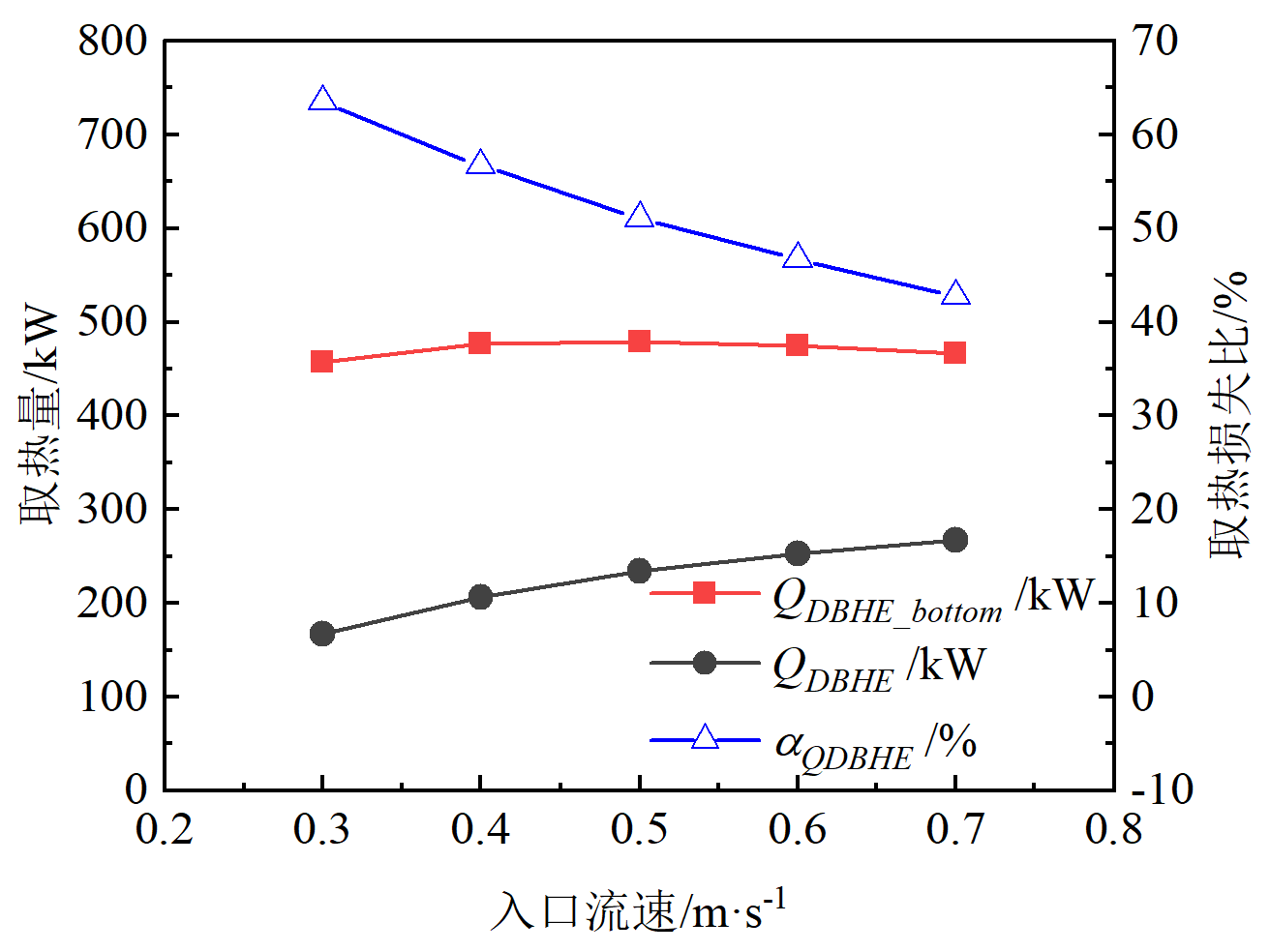


图43入口流速对取热量与取热损失比的影响

2）地热特征参数

在较高的岩土体热物性参数和地温场下，中深层地埋管换热器可提取更多的地热能。本节进一步分析在不同地热特征参数下换热器存在的取热损失。图44、45、46分别所示在不同岩土体导热系数、岩土体比热容以及地温梯度下取热量与取热损失比的分布情况。可见，以上地热特征参数下的取热损失比近似一致，保持在42.5%-43.1%，且与基准参数下的取热损失比十分接近，由此表明其对换热器的取热损失比基本没有影响。不同地表温度下的取热损失比存在一定程度的变化，其由5 °C增加20 °C时，取热损失比降低3.2%（图47）。由此表明在地表温度较高的条件下，换热器的取热损失程度越小。此外，可以看出在地热特征参数较高的条件下，换热器底部的取热量与实际取热量之间的差值也越大，表明在该条件下的换热器存在较大的取热损失，也间接说明该条件下的换热器在取热能力方面是具有提升潜力的。

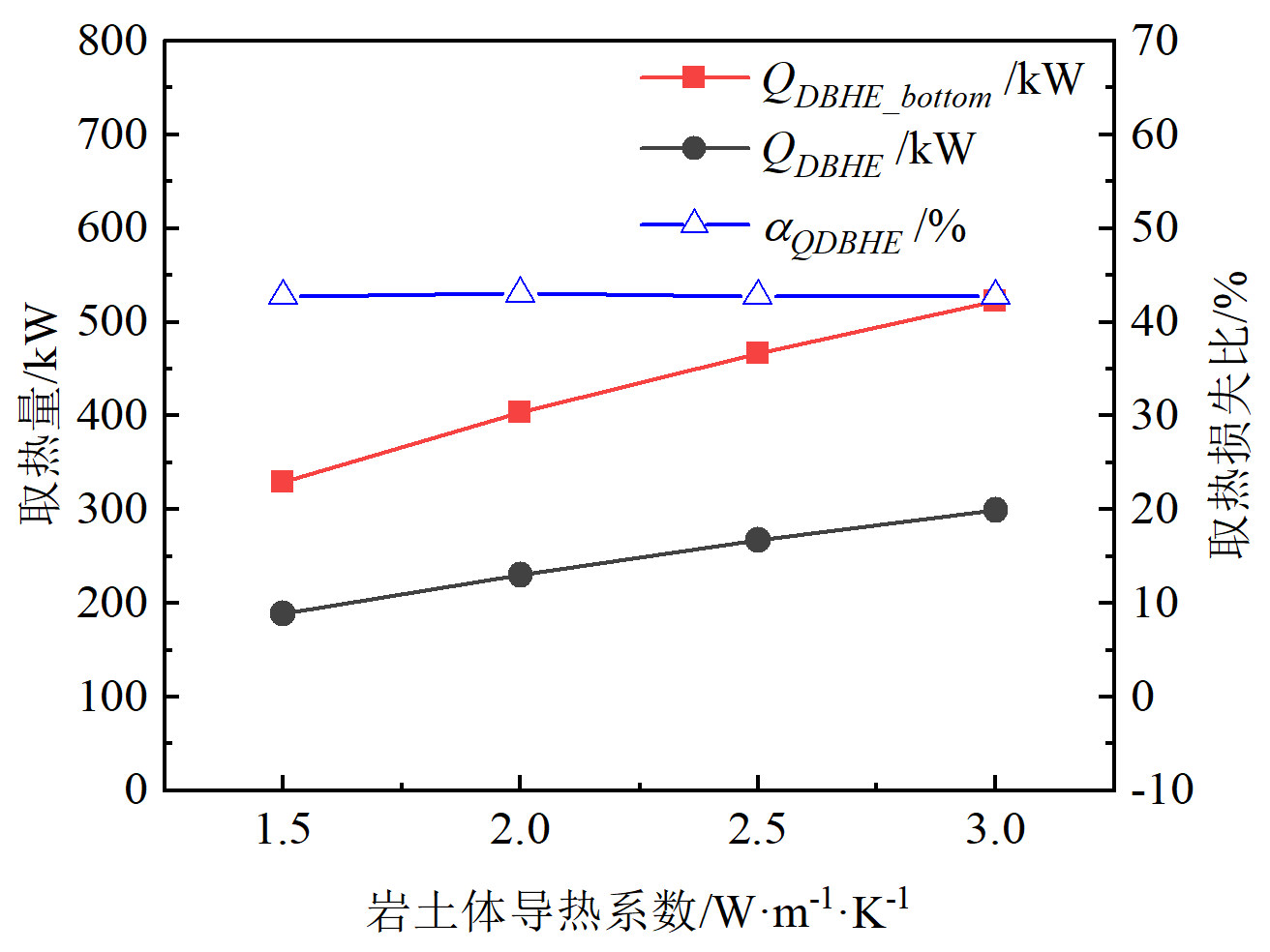


图44岩土体导热系数对取热量与取热损失比的影响

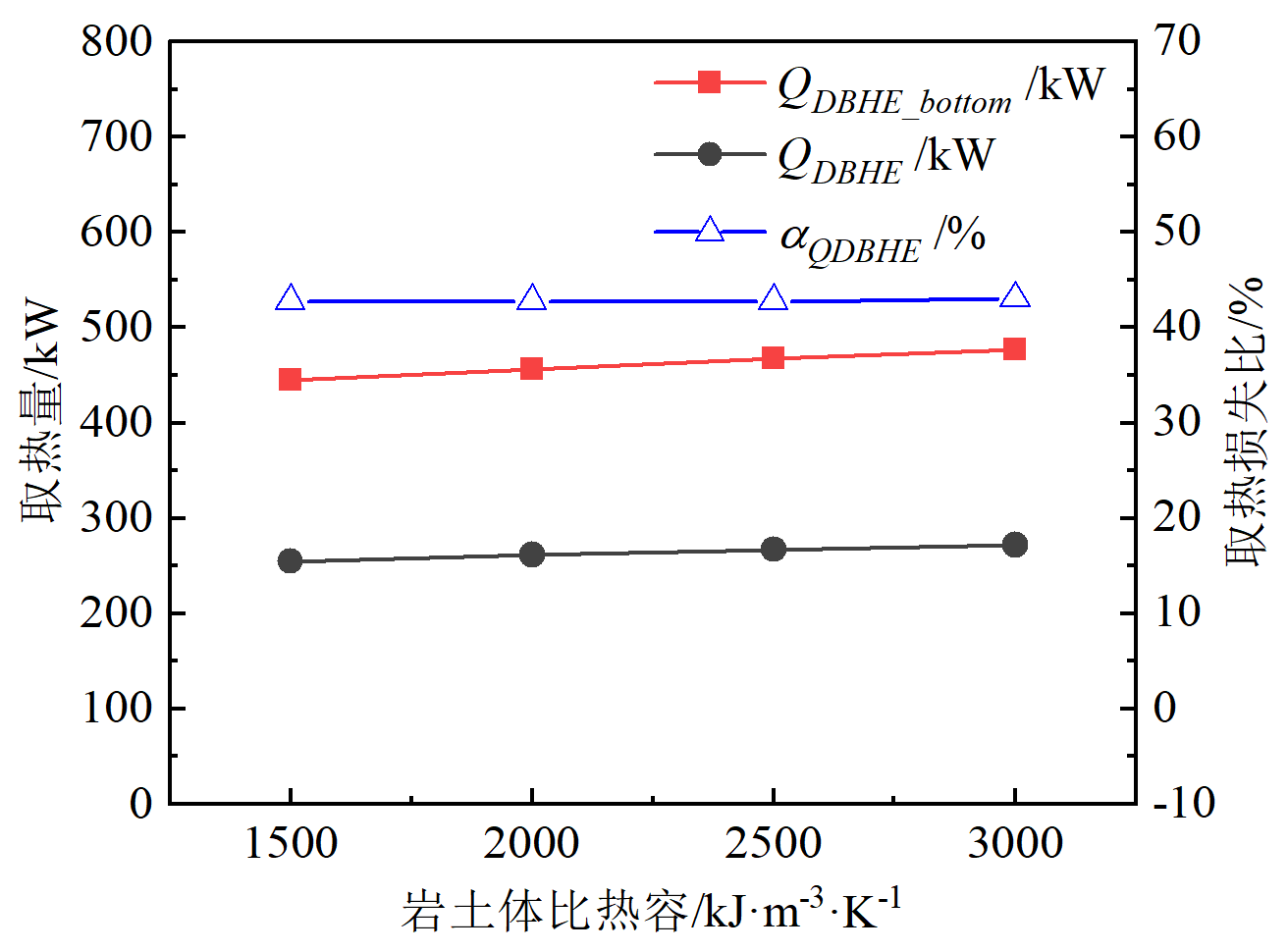


图45岩土体比热容对取热量与取热损失比的影响

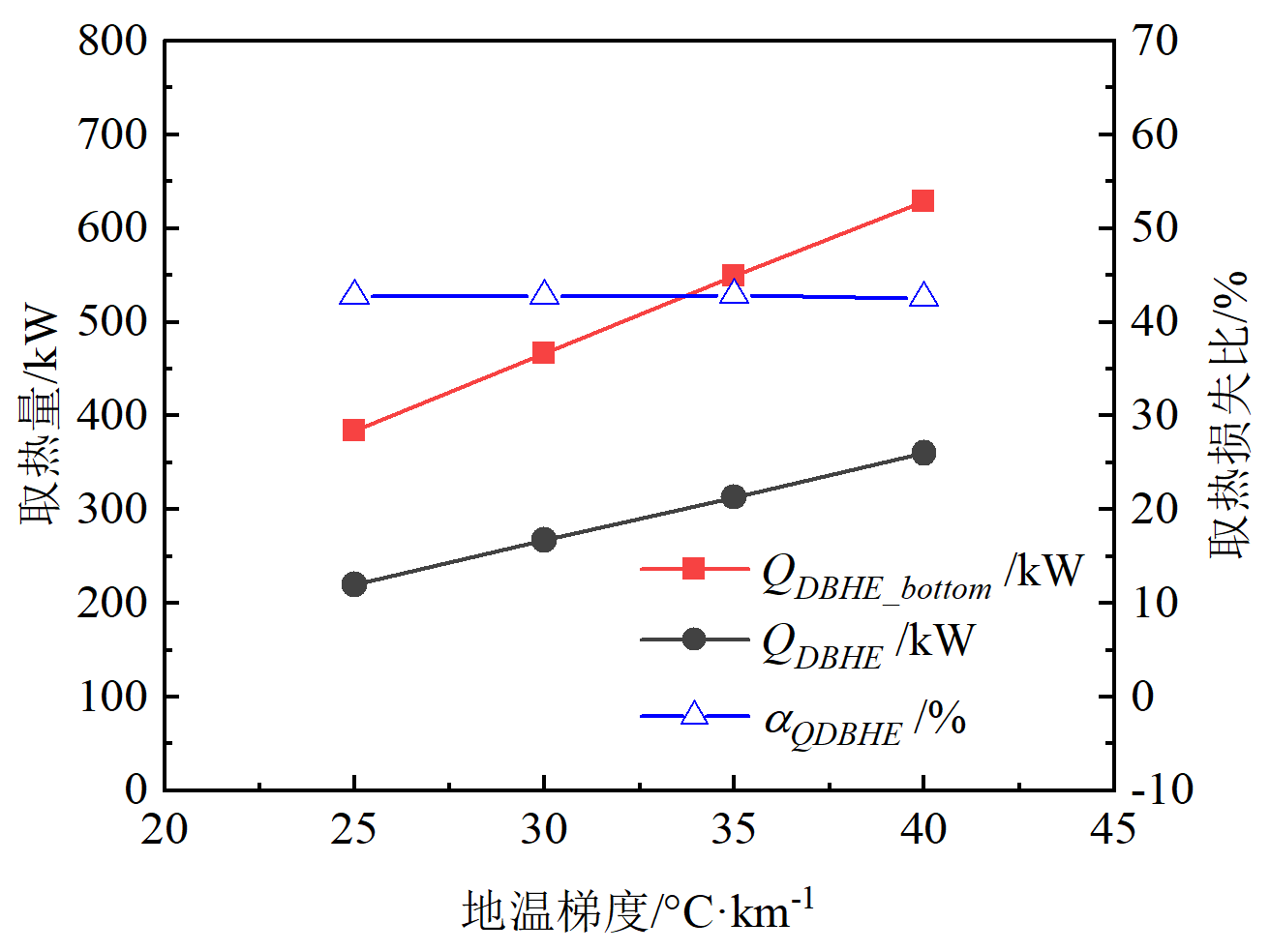


图46地温梯度对取热量与取热损失比的影响

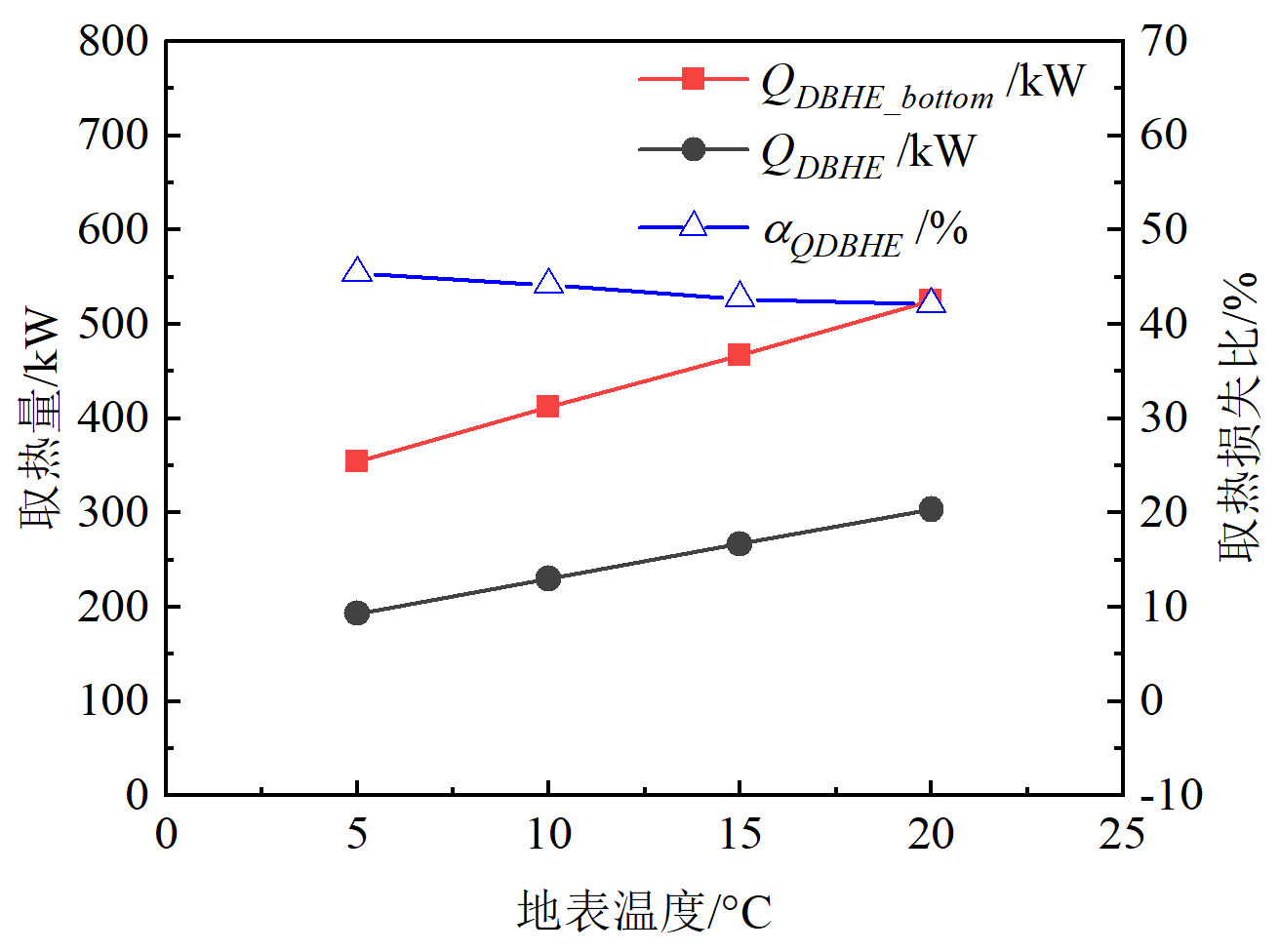


图47地表温度对取热量与取热损失比的影响

3）设计参数

不同长度换热器的取热量与取热损失比的分布情况如图48所示，可见长度较大的换热器具有更高的取热损失比。当换热器由1500 m增加至3000 m时，取热损失比增加14.9%。换热器底部取热量与实际取热量的差值随着换热器长度的增加而显著增加。长度为1500 m的换热器，其两者之间的差值为47.1 kW，而长度为3000 m的换热器其两者之差达313.4 kW，可见内管中具有明显的热损失。因此，对于长度较大的换热器来说，为保证将提取的地热能输送至地表，内管有必要采取保温措施。

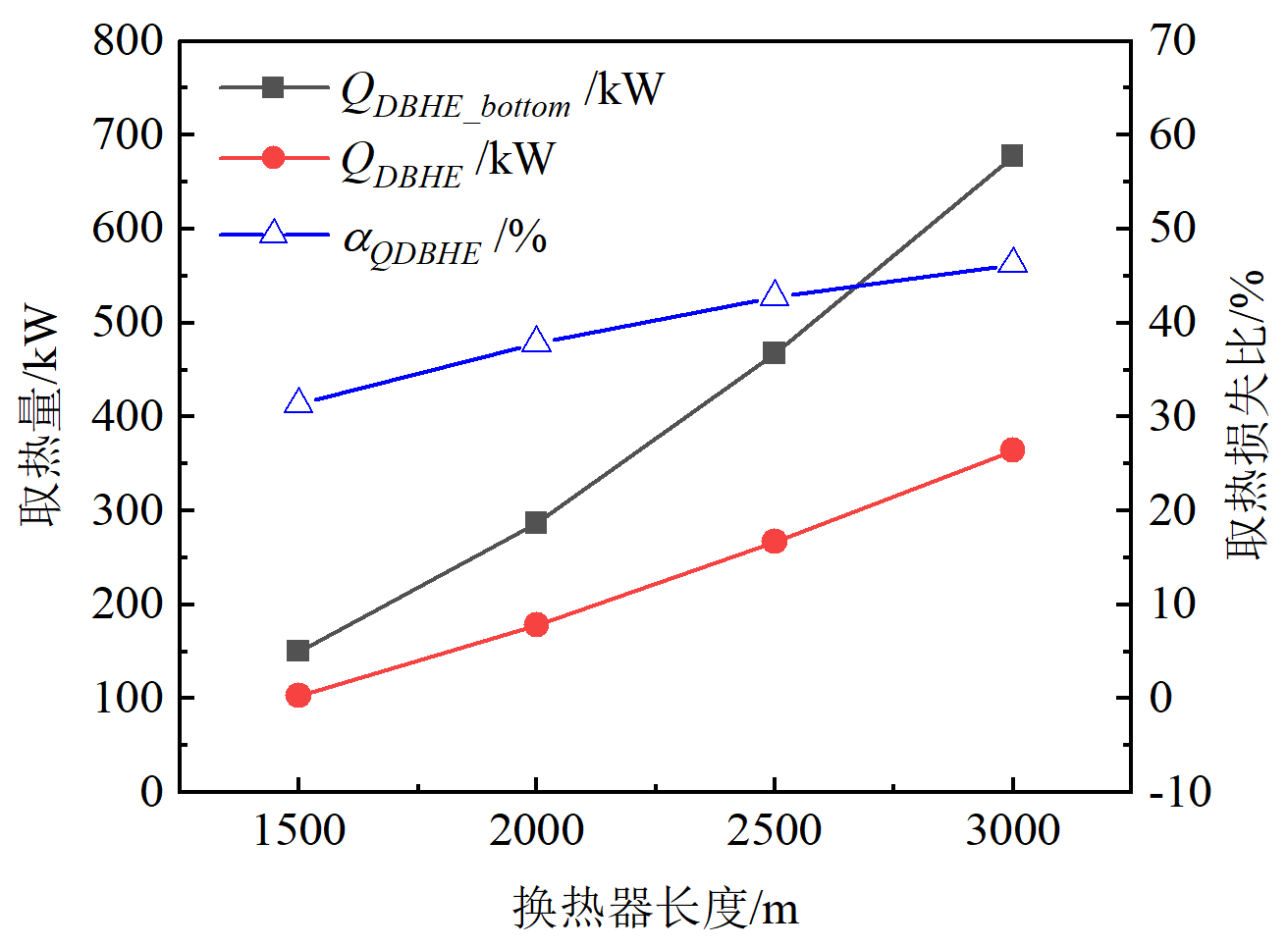


图48换热器长度对取热量与取热损失比的影响

外管管径的变化对于取热损失比的影响不大（图49）。在现有的管径规格中，外管管径由0.0842 m增加至0.1365 m时，取热损失比保持在41.8%-43.0%。而内管管径的变化对取热损失比的影响程度较为明显（图50）。现有规格的内管管径由0.0625 m减小至0.0375 m时，取热损失比由46.4%减小至33.2%，表明减小内管管径对降低内管热损失的作用较为明显。但过小的内管管径会引起水泵功耗过高，不利于提高热源侧的能效系数。在选取较大的内管管径时，可以考虑对内管进行保温来降低热损失。

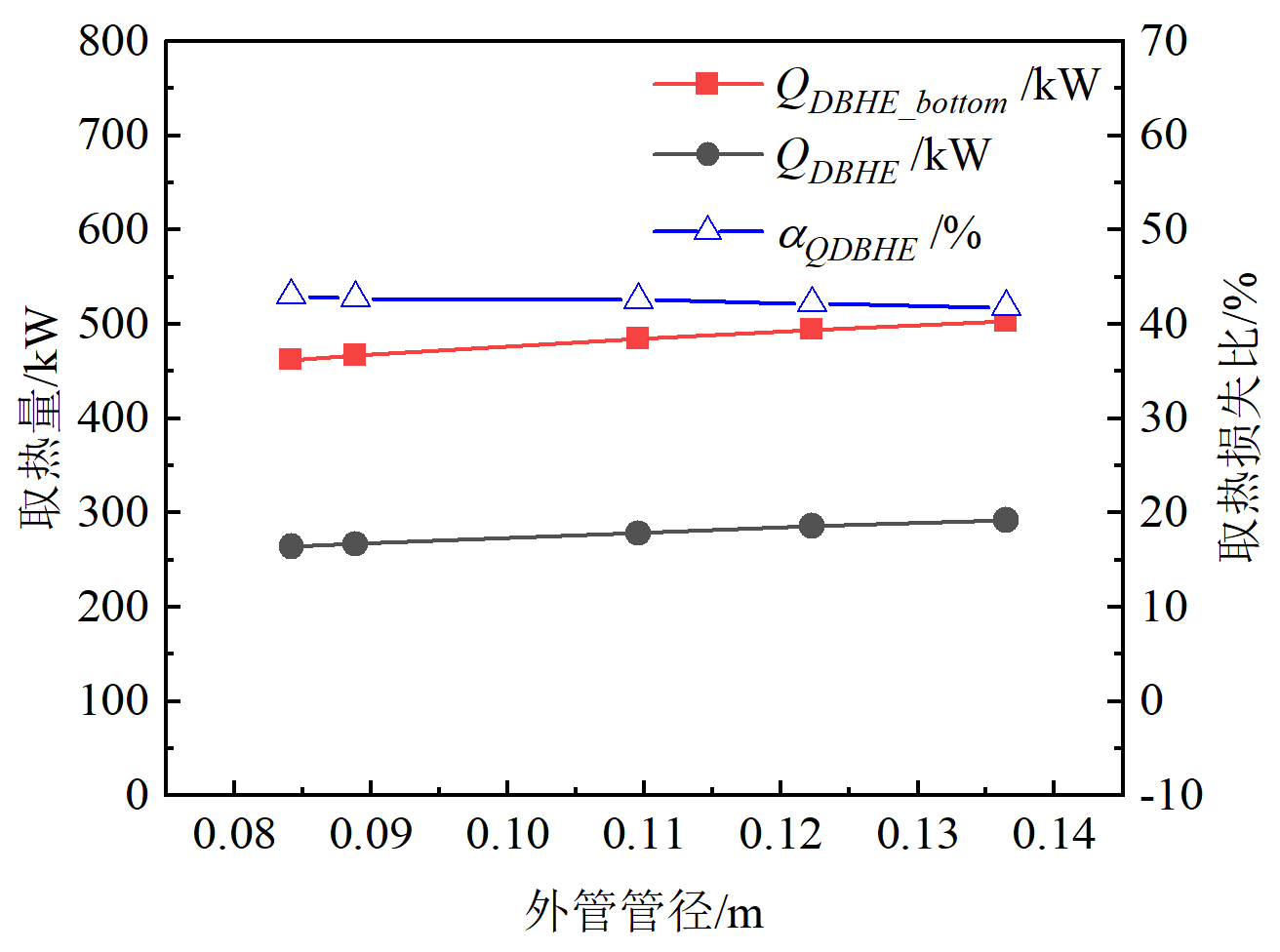


图49外管管径对取热量与取热损失比的影响

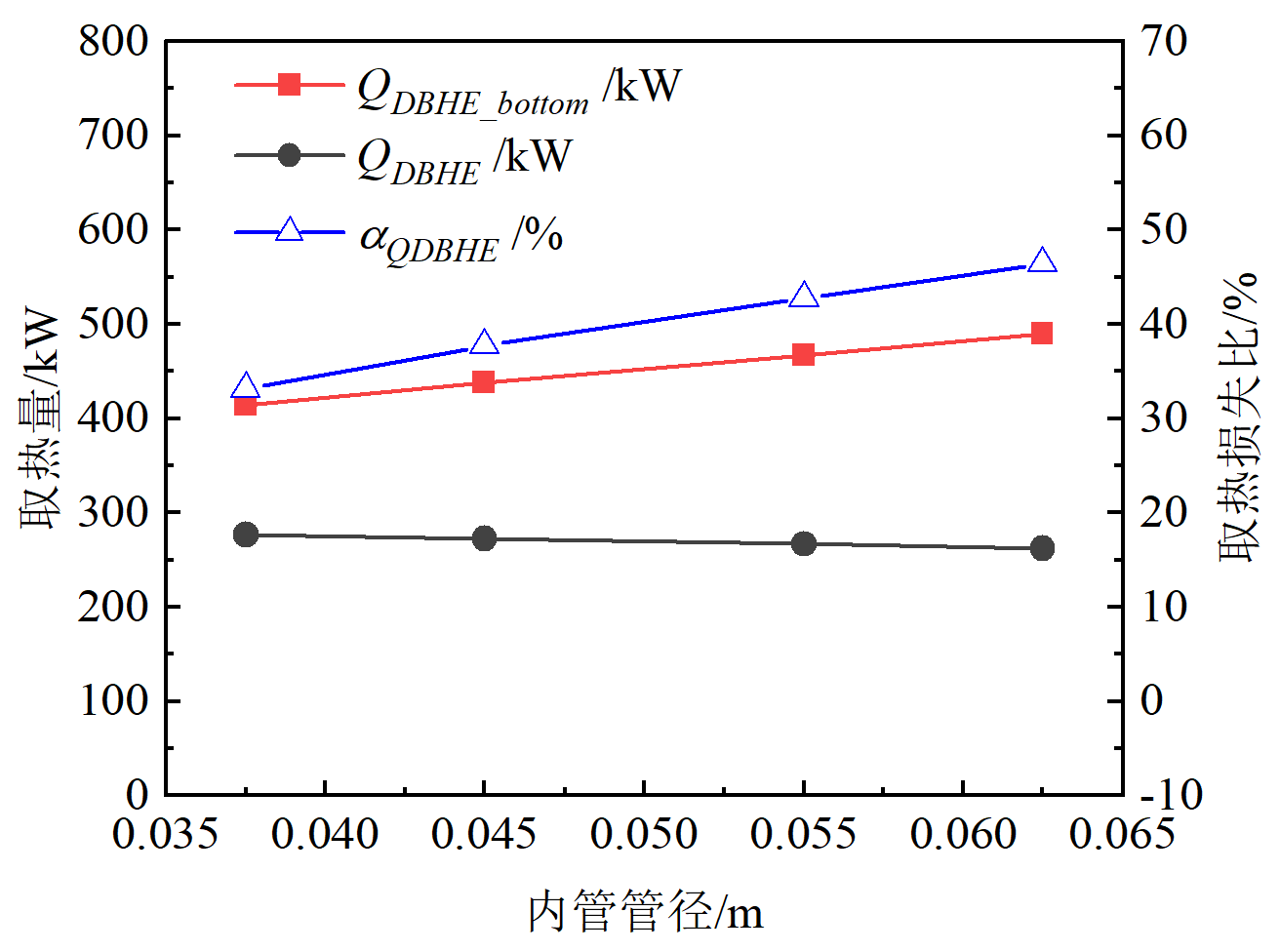


图50内管管径对取热量与取热损失比的影响

外管导热系数由0.45 W·m-1·K-1增大至50 W·m-1·K-1时，取热损失比保持在42.8%-43.1%（图51）。换热器的底部取热量与实际取热量之间的差值基本没有发生变化，外管导热系数的变化对换热器的取热损失基本没有影响。

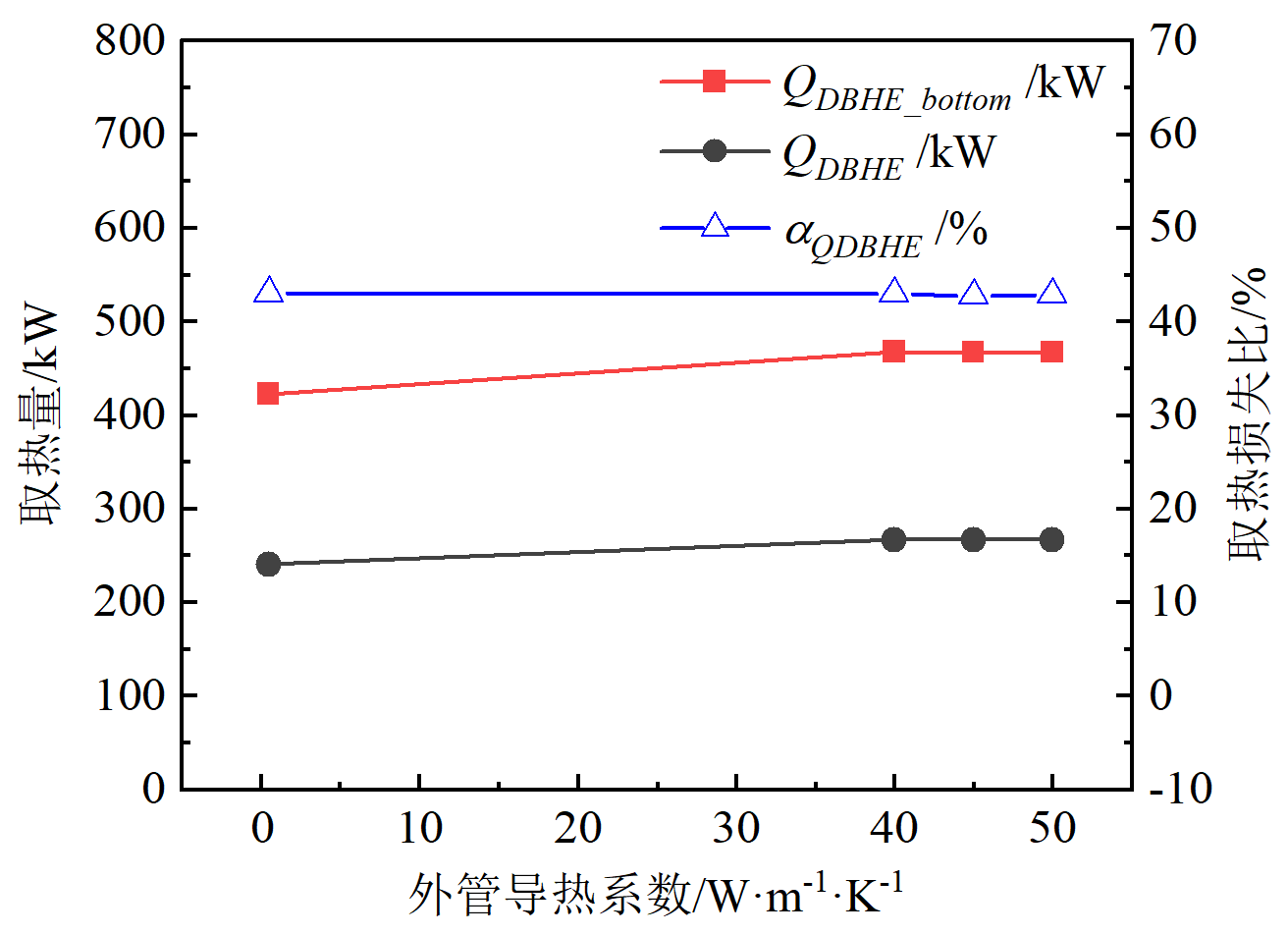


图 4‑50外管导热系数对取热量与取热损失比的影响

随着内管导热系数的减小，换热器的取热损失比显著降低（图52）。当内管的导热系数为0 W·m-1·K-1时，换热器的底部取热量与实际取热量相等，换热器所提取的热量最大程度地被输送至地表。

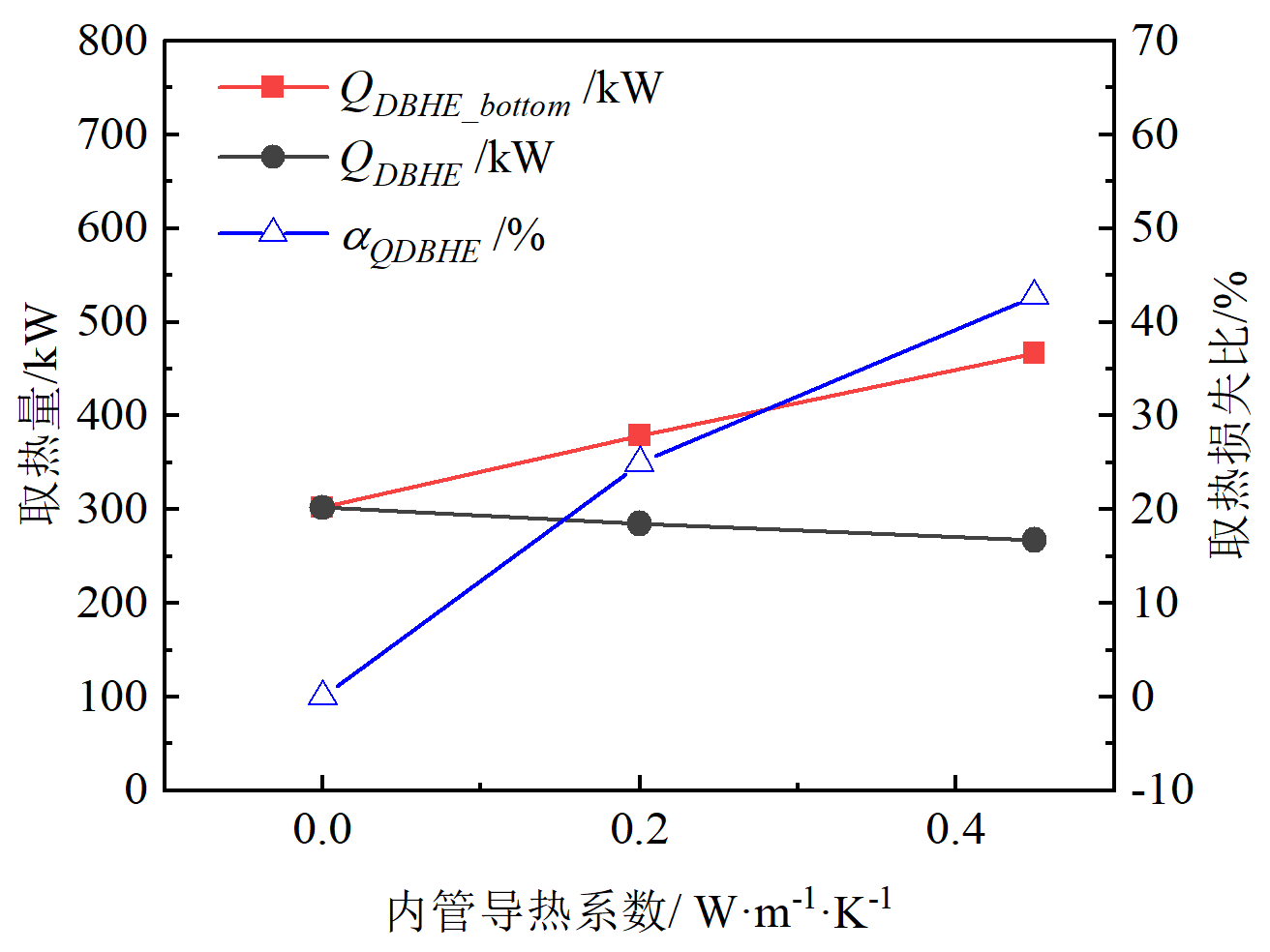


图52内管导热系数对取热量与取热损失比的影响

回填材料导热系数的变化对取热损失比的影响也较小（图53）。在所分析的回填材料导热系数中，其由0.73 W·m-1·K-1增大至2.77 W·m-1·K-1时，换热器取热损失比的变化范围为42.8%-43.0%。

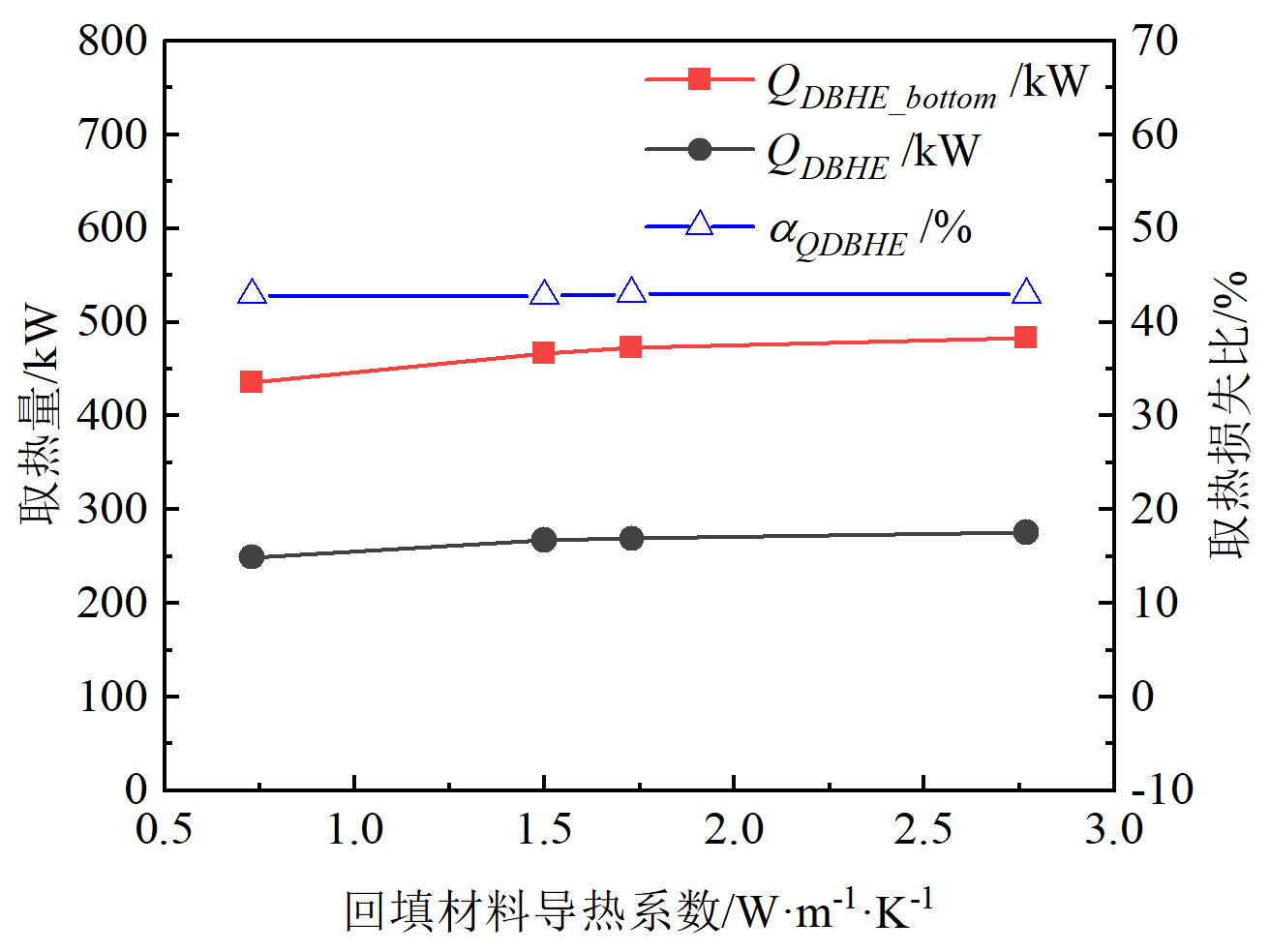


图53回填材料导热系数对取热量与取热损失比的影响

### 3.3.3影响因素综合作用

由上述研究可以看出，中深层地埋管换热器的传热过程较为复杂，不同影响因素作用下的能量传递和取热性能的差异较大。在取热性能分析中可以清楚看到，部分运行参数与设计参数对取热能力的影响程度较大，且存在耦合作用；地热特征参数的变化对中深层地埋管换热器热提取的影响也不同，使得换热器存在不同程度的取热潜力，本节将基于正交设计方法对众多因素的影响进行综合分析。

1）正交设计方法

正交设计方法的最大特点是通过开展较少次数的试验，实现对众多因素影响的显著性分析，可以全面、系统的对实验结果进行综合分析、明确各因素对所选取指标影响程度的大小，判断其影响程度的主次。

在正交设计中，首要环节是要明确试验指标、选择影响因素以及确定因素水平。通过对以上要素的确定，进而选用正交表，排表头，列出试验方案。最后，对正交表中的实验结果进行方差分析，判别因素的影响程度。

多因素实验结果的差异主要来源于两个方面，分别是各因素水平变化引起的差异以及实验误差。对于采用数值模拟方法来说，由于所建立的模型稳定性得到验证，故由计算引起的误差是可以忽略的。因此，在本文研究中实验结果的差异均是由各因素水平的变化引起，其由两个指标进行计算，因素水平变动的平方和以及平均变动平方和，由下式计算：

 （1-5）

式中， —— 因素水平变动的平方和， —— 不同水平下的模拟结果， —— 各水平下数据的平均值， —— 数据总个数。

由于因素水平变动的平方和受到水平个数的影响，故还需要平均变动平方和来进行评价，由下式计算：

 （1-6）

式中，—— 平均变动平方和，—— 因素的自由度（，为因素的水平数）。

因素的显著性由F值进行检验，由下式表达：

 （1-7）

式中， —— 因素x的F值， —— 因素x水平变动的平方和， —— 因素x的自由度， —— 误差的偏差平方和， —— 误差的自由度， —— 因素x的平均变动平方和， —— 误差的平均偏差平方和。根据的大小判断因素x的改变是否对实验结果造成显著差异。

2）运行参数与设计参数综合影响分析

在中深层地埋管换热器的实际应用中，项目所在地区的地热特征参数是一定的，运行参数与设计参数决定了换热器的取热能力。部分运行参数与设计参数对换热器取热能力存在耦合作用，分别体现在流速、换热器长度、内管管径三个参数与内管导热系数对内管中流体传热的影响，故对其综合影响进行分析。

图54为流速与内管导热系数耦合作用下的取热量分布情况。在流速为0.3 m·s-1的条件下，当内管的导热系数由0.45 W·m-1·K-1减小至0 W·m-1·K-1时，取热量提高119.6 kW，提高比例达67.1%；而流速在0.7 m·s-1条件下的取热量仅提高43.9 kW，其提高比例仅为14.7%。可见在较低的运行流速下，对内管进行保温可以显著提高换热器的取热能力。相反，当运行流速较高时，内管保温对取热量增加的作用程度较小。

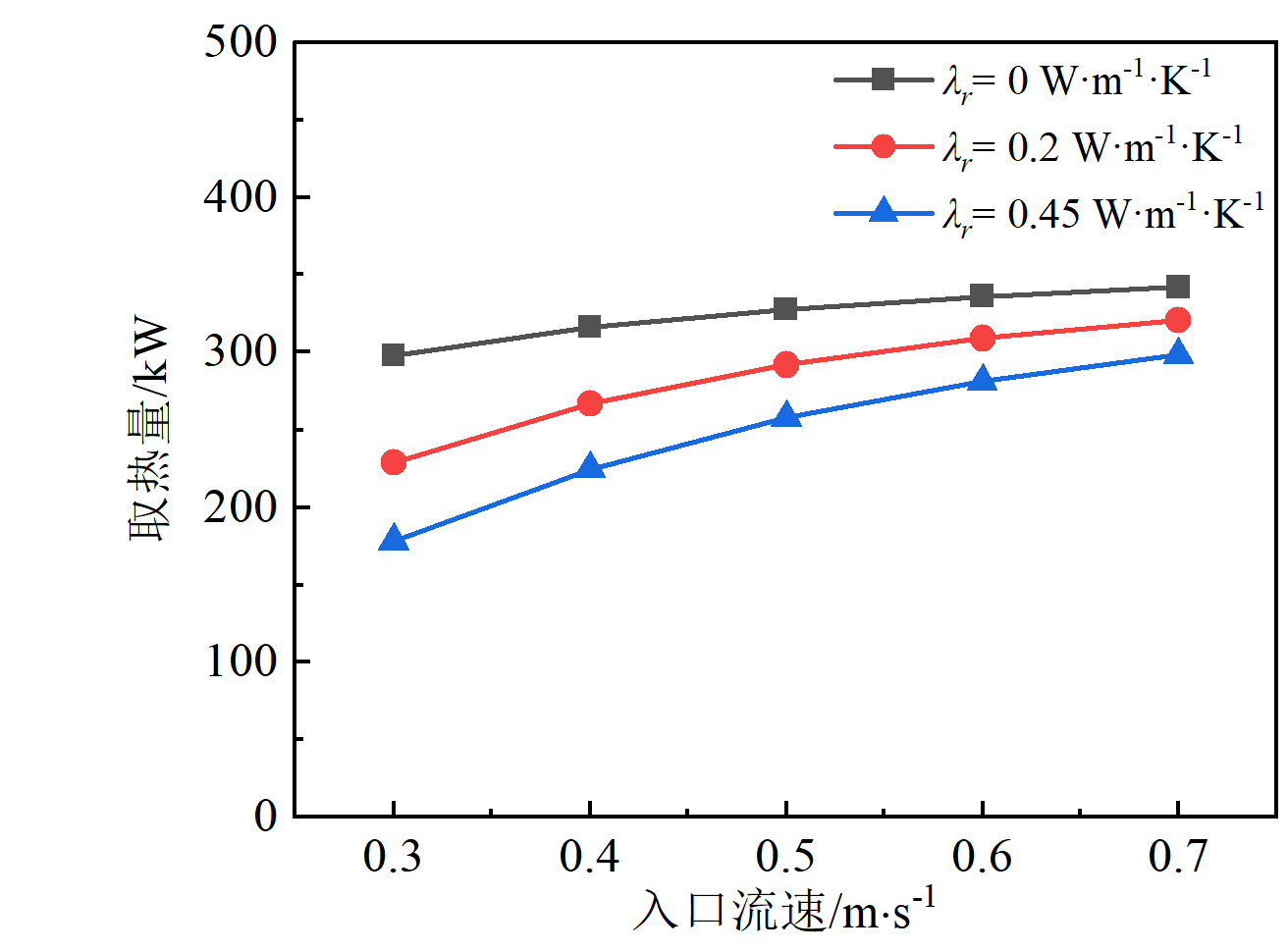


图54入口流速与内管导热系数对取热能力的耦合作用分析

图55为换热器长度与内管导热系数耦合作用下的取热量的分布情况。当内管导热系数由0.45 W·m-1·K-1减小至0 W·m-1·K-1时，长度为2000、2500、3000 m换热器的取热量分别增加19.7、43.9、82.9 kW，增加比例分别为9.8%、14.7%、20.5%。由此表明，对于长度较大的换热器来说，降低内管导热系数对提高取热能力的作用更为明显。

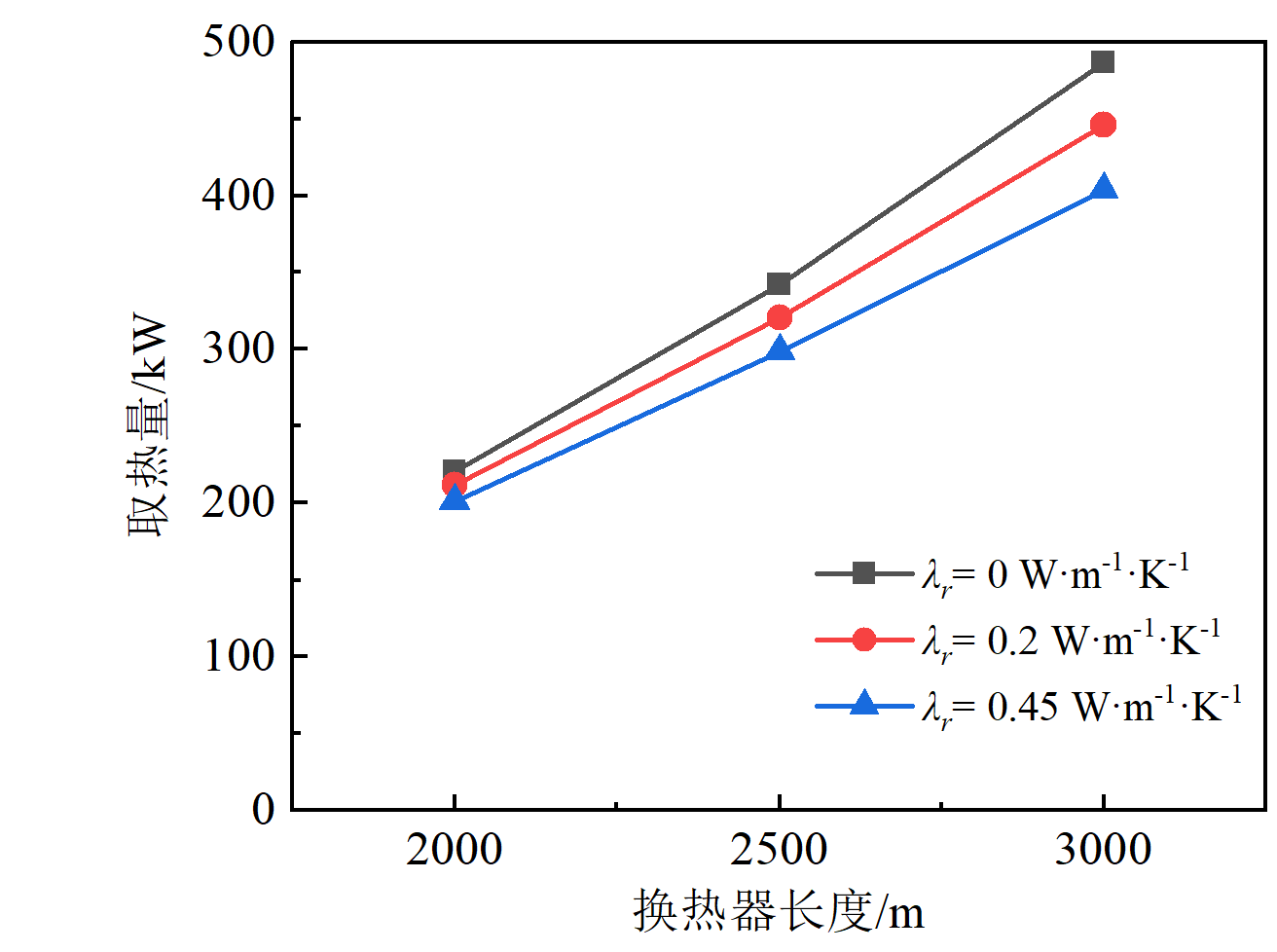


图55换热器长度与内管导热系数对取热能力的耦合作用分析

图56为内管管径与内管导热系数耦合作用下的取热量分布情况。内管管径较小的条件下有利于降低内管中流体的能量损失。内管管径分别为0.0375、0.0450、0.0550 m时，内管导热系数由0.45 W·m-1·K-1减小至0 W·m-1·K-1，取热量分别提高9.1%、11.7%、14.7%，其提高的程度较为接近。此外，在内管导热系数为0.45 W·m-1·K-1时，内管管径由0.055 m减小至0.0375 m时，取热量提高4.81%，取热量随着内管管径的变化程度较小。当内管导热系数为0 W·m-1·K-1时，不同内管管径下的取热量近似一致，可见在内管保温情况较好的情况下，内管管径的变化对取热量基本没有影响。总体来说，内管导热系数与内管管径对换热器取热量存在交互作用，但作用的变化程度不大。

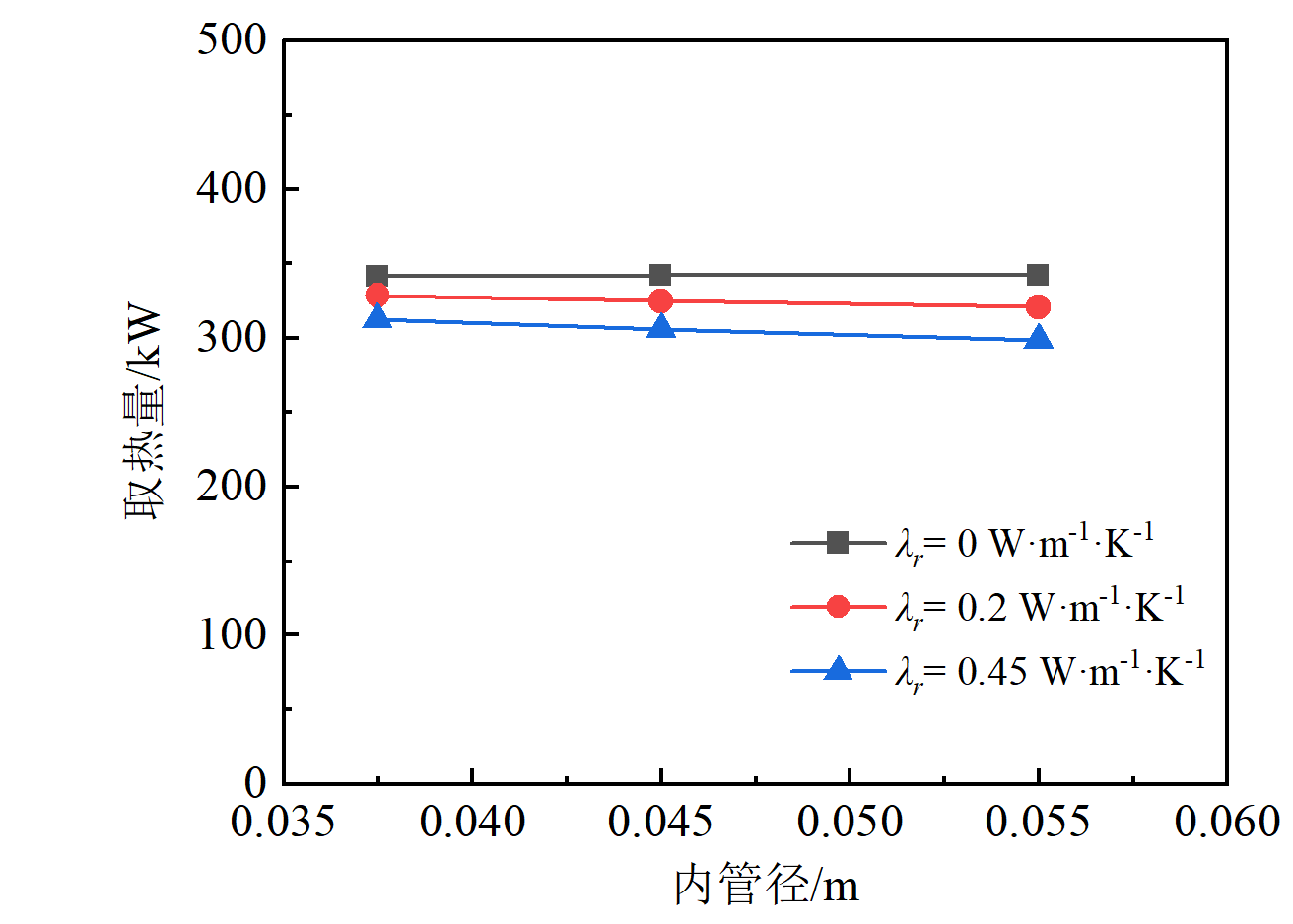


图56内管管径与内管导热系数对取热能力的耦合作用分析

综上分析，内管导热系数与流速和换热器长度之间存在较为明显的交互作用。因此，在因素的综合影响分析中应予以考虑。其正交设计中的水平选取见表1。此外，正交设计中考虑了内管导热系数与流速、内管导热系数与换热器长度的交互作用，故选用*L*27（313）正交表。表2所示为实验安排以及对应取热量的计算结果，方差分析结果见表3。

表1设计参数与管井参数正交试验的因素和水平

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 因素 | 水平 | | |
| 1 | 2 | 3 |
| （a） | 内管导热系数/W·m-1·K-1 | 0 | 0.2 | 0.4 |
| （b） | 循环流量/m3·h-1 | 15 | 30 | 45 |
| （c） | 换热器长度/m | 2000 | 2500 | 3000 |
| （d） | 入口水温/°C | 13 | 17 | 21 |
| （e） | 外管管径/mm | 169 | 194 | 219 |
| （f） | 内管管径/mm | 70 | 90 | 110 |
| （g） | 回填材料导热系数/W·m-1·K-1 | 0.75 | 1.5 | 2.25 |

表2正交试验结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验  序号 | 因素序号 | | | | | | | | | | | | | 指标 |
| （a） | （b） | （a）×（b） | | （c） | （a）×（c） | | （d） | （e） | （f） | （g） | 空白1 | 空白2 | 取热量kW |
| 1 | 0 | 15 | 1 | 1 | 2000 | 1 | 1 | 13 | 169 | 70 | 0.75 | 1 | 1 | 208.3 |
| 2 | 0 | 15 | 1 | 1 | 2500 | 2 | 2 | 17 | 194 | 90 | 1.5 | 2 | 2 | 325.0 |
| 3 | 0 | 15 | 1 | 1 | 3000 | 3 | 3 | 21 | 219 | 110 | 2.25 | 3 | 3 | 437.2 |
| 4 | 0 | 30 | 2 | 2 | 2000 | 1 | 1 | 17 | 194 | 90 | 2.25 | 3 | 3 | 235.1 |
| 5 | 0 | 30 | 2 | 2 | 2500 | 2 | 2 | 21 | 219 | 110 | 0.75 | 1 | 1 | 337.3 |
|  | 表2（续） | | | | | | | | | | | | |  |
| 试验  序号 | 因素序号 | | | | | | | | | | | | | 指标 |
| （a） | （b） | （a）×（b） | | （c） | （a）×（c） | | （d） | （e） | （f） | （g） | 空白1 | 空白2 | 取热量kW |
| 6 | 0 | 30 | 2 | 2 | 3000 | 3 | 3 | 13 | 169 | 70 | 1.5 | 2 | 2 | 525.9 |
| 7 | 0 | 45 | 3 | 3 | 2000 | 1 | 1 | 21 | 219 | 110 | 1.5 | 2 | 2 | 216.9 |
| 8 | 0 | 45 | 3 | 3 | 2500 | 2 | 2 | 13 | 169 | 70 | 2.25 | 3 | 3 | 403.7 |
| 9 | 0 | 45 | 3 | 3 | 3000 | 3 | 3 | 17 | 194 | 90 | 0.75 | 1 | 1 | 504.9 |
| 10 | 0.2 | 15 | 2 | 3 | 2000 | 2 | 3 | 13 | 194 | 110 | 0.75 | 2 | 3 | 205.3 |
| 11 | 0.2 | 15 | 2 | 3 | 2500 | 3 | 1 | 17 | 219 | 70 | 1.5 | 3 | 1 | 304.0 |
| 12 | 0.2 | 15 | 2 | 3 | 3000 | 1 | 2 | 21 | 169 | 90 | 2.25 | 1 | 2 | 337.9 |
| 13 | 0.2 | 30 | 3 | 1 | 2000 | 2 | 3 | 17 | 219 | 70 | 2.25 | 1 | 2 | 238.6 |
| 14 | 0.2 | 30 | 3 | 1 | 2500 | 3 | 1 | 21 | 169 | 90 | 0.75 | 2 | 3 | 263.7 |
| 15 | 0.2 | 30 | 3 | 1 | 3000 | 1 | 2 | 13 | 194 | 110 | 1.5 | 3 | 1 | 517.0 |
| 16 | 0.2 | 45 | 1 | 2 | 2000 | 2 | 3 | 21 | 169 | 90 | 1.5 | 3 | 1 | 190.4 |
| 17 | 0.2 | 45 | 1 | 2 | 2500 | 3 | 1 | 13 | 194 | 110 | 2.25 | 1 | 2 | 408.7 |
| 18 | 0.2 | 45 | 1 | 2 | 3000 | 1 | 2 | 17 | 219 | 70 | 0.75 | 2 | 3 | 549.6 |
| 19 | 0.4 | 15 | 3 | 2 | 2000 | 3 | 2 | 13 | 219 | 90 | 0.75 | 3 | 2 | 209.8 |
| 20 | 0.4 | 15 | 3 | 2 | 2500 | 1 | 3 | 17 | 169 | 110 | 1.5 | 1 | 3 | 226.5 |
| 21 | 0.4 | 15 | 3 | 2 | 3000 | 2 | 1 | 21 | 194 | 70 | 2.25 | 2 | 1 | 320.0 |
| 22 | 0.4 | 30 | 1 | 3 | 2000 | 3 | 2 | 17 | 169 | 110 | 2.25 | 2 | 1 | 211.3 |
| 23 | 0.4 | 30 | 1 | 3 | 2500 | 1 | 3 | 21 | 194 | 70 | 0.75 | 3 | 2 | 287.2 |
| 24 | 0.4 | 30 | 1 | 3 | 3000 | 2 | 1 | 13 | 219 | 90 | 1.5 | 1 | 3 | 520.1 |
| 25 | 0.4 | 45 | 2 | 1 | 2000 | 3 | 2 | 21 | 194 | 70 | 1.5 | 1 | 3 | 202.4 |
| 26 | 0.4 | 45 | 2 | 1 | 2500 | 1 | 3 | 13 | 219 | 90 | 2.25 | 2 | 1 | 417.6 |
| 27 | 0.4 | 45 | 2 | 1 | 3000 | 2 | 1 | 17 | 169 | 110 | 0.75 | 3 | 2 | 427.4 |

表3方差分析结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标 | （a） | （b） | （a）×（b） | （c） | （a）×（c） | （d） | （e） | （f） | （g） | 空白1 | 空白2 |
| S | 7699.3 | 33668.6 | 3297.0 | 274517.2 | 2676.8 | 37697.0 | 10564.0 | 156.1 | 66.9 | 142.9 | 244.0 |
| f | 2 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

表3中的空白列为误差的偏差平方和及其自由度。由方差分析发现（f）内管管径与（g）回填材料导热系数的水平变动平方和与空白列的偏差平方和相近，故可将其合并进入误差估计。经计算，误差的偏差平方和为609.9。根据式1-8计算（a）内管导热系数的F值：

 （1-8）

同样地，（b）循环流量、（a）×（b）内管导热系数与循环流量的交互作用、（c）换热器长度、（a）×（c）内管导热系数与换热器长度的交互作用、（d）入口水温、（e）外管管径的F值也可由式1-8计算得到，分别为220.82、10.81、1800.48、8.78、247.24、69.29，可见（c）换热器长度的F值最大，表明其影响最为显著。根据*F*0.01（2，8）=8.65，*F*0.01（4，8）=7.01可知，在所分析的因素中，除去内管管径与回填材料导热系数，其他因素的F值均高于所对应的*F*0.01，表明其对取热能力具有高度显著的影响。其中，内管导热系数与循环流量、内管导热系数与换热器长度的交互作用也具有高度显著的作用。

3）地热特征参数综合影响分析

不同地热特征参数对中深层地埋管换热器热提取的影响存在差异。在四个地热特征参数中，岩土体导热系数、地温梯度与地表温度对换热器取热能力的影响是较为明显的，而岩土体比热容的变化对取热能力基本没有影响。因此，对岩土体导热系数、地温梯度、地表温度的影响程度展开分析。

地热特征参数正交设计试验的因素和水平见表4。选用*L*9（34）正交表，试验设计安排以及计算的取热量见表5，方差分析结果见表6。

表4影响换热器取热能力试验的因素和水平

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 因素 | 水平 | | |
| 1 | 2 | 3 |
| （a） | 岩土体导热系数/W·m-1·K-1 | 2 | 2.5 | 3 |
| （b） | 地温梯度/°C·km-1 | 30 | 35 | 40 |
| （c） | 地表温度/°C | 10 | 15 | 20 |

表5正交试验结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验序号 | 因素序号 | | | | 指标 |
| （a） | （b） | （c） | 空白 | 取热量/kW |
| 1 | 2 | 30 | 10 | 1 | 224.3 |
| 2 | 2 | 35 | 15 | 2 | 305.7 |
| 3 | 2 | 40 | 20 | 3 | 387.1 |
| 4 | 2.5 | 30 | 15 | 3 | 298.3 |
| 5 | 2.5 | 35 | 20 | 1 | 391.5 |
| 6 | 2.5 | 40 | 10 | 2 | 362.3 |
| 7 | 3 | 30 | 20 | 2 | 377.3 |
| 8 | 3 | 35 | 10 | 3 | 345.1 |
| 9 | 3 | 40 | 15 | 1 | 448.7 |

表6方差分析结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标 | （a） | （b） | （c） | 空白 |
| S | 10766.9 | 14830.5 | 8395.2 | 193.7 |
| f | 2 | 2 | 2 | 2 |

同样的，表6中的空白列为误差的偏差平方和以及误差的自由度，分别为193.7和2。由式4-7可以计算得到（a）岩土体导热系数、（b）地温梯度、（c）地表温度的F值，分别为55.57、76.55、43.33。根据*F*0.01（2，2）=99.0，*F*0.05（2，2）=19.0可知以上三个地热特征参数下的F值介于*F*0.01（2，2）与*F*0.05（2，2）之间，由此表明岩土体导热系数、地温梯度、地表温度均对取热能力具有显著的影响，且影响程度的大小分别为（b）地温梯度、（a）岩土体导热系数、（c）地表温度。此外，本文研究表明在不同地热特征参数下，换热器的热损失程度存在差异，故对内管保温后的取热量需要进一步探究。常用的内管导热系数为0.45 W·m-1·K-1，本节探讨了导热系数减小为0.2 W·m-1·K-1和0 W·m-1·K-1后换热器取热能力的变化情况。

图57为在不同岩土体导热系数下，内管保温前后取热量的分布情况。在岩土体导热系数为2.0 W·m-1·K-1的条件下，内管导热系数减小至0.2与0 W·m-1·K-1时的换热器取热量分别提高6.6%和12.7%。岩土体导热系数为2.5 W·m-1·K-1时，换热量分别提高7.6%、14.7%；岩土体导热系数为3.0 W·m-1·K-1时，换热量分别提高8.5%、16.6%。可见，在岩土体导热系数较大的地热条件下，对换热器的内管进行保温，可明显提升换热器的取热量。图58所示为在不同地温梯度下，内管保温前后取热量的分布情况。可见，内管保温之后取热量的提升程度趋于一致。经计算，内管导热系数减小至0 W·m-1·K-1时，地温梯度在30、35、40 °C·km-1条件下取热量的增加比例均为14.7%。表明仅地温梯度存在差异的地热条件下，对内管进行保温，换热器取热能力提升的程度相同。图4-58所示为在不同地表温度下内管保温前后取热量的分布情况。在地表温度分别为10、15、20 °C的条件下，内管保温至0 W·m-1·K-1时，换热器的取热量分别提高15.3%、14.7%、14.3%，可见取热量提升的程度较为接近。

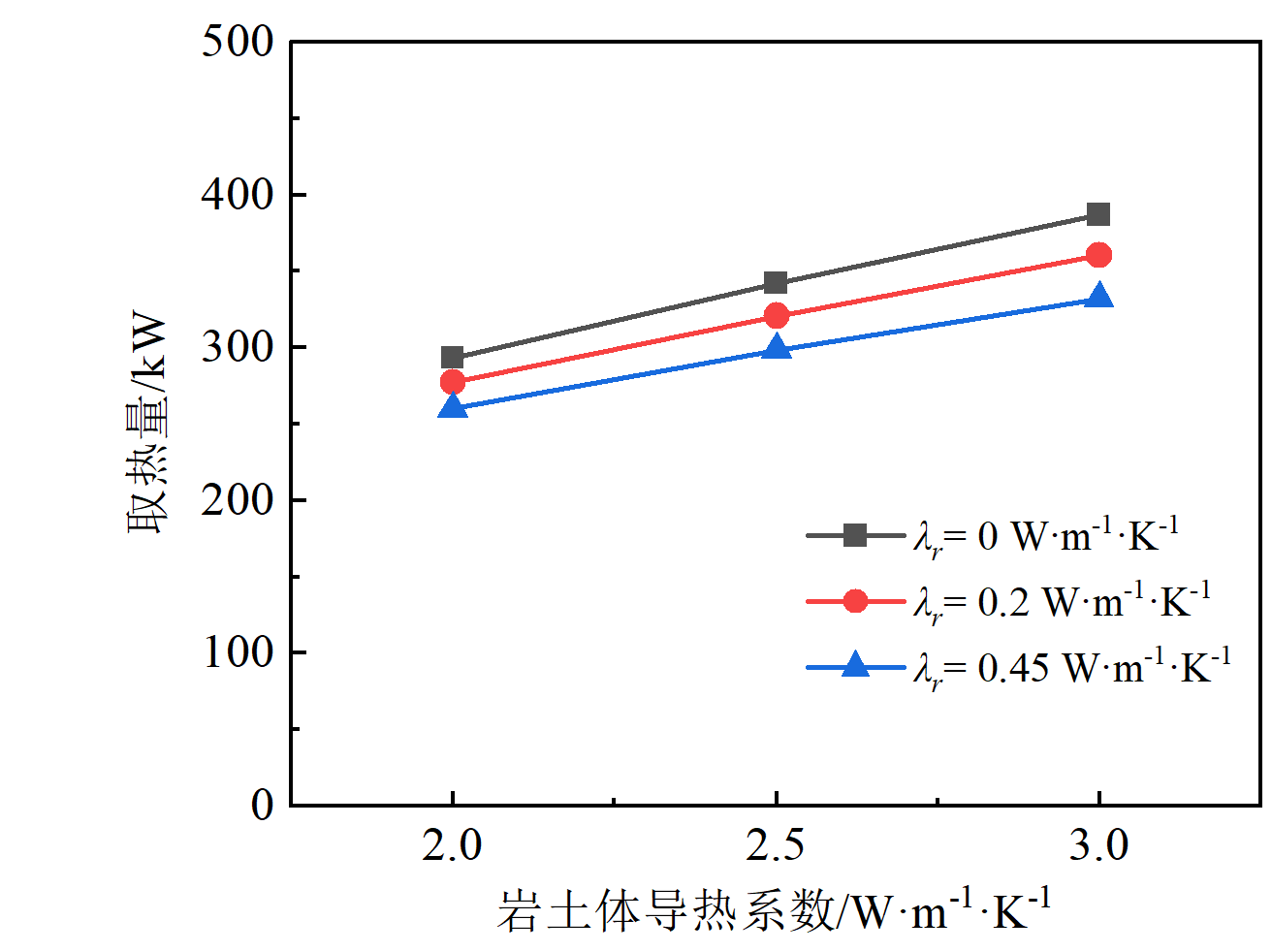


图57不同岩土体导热系数下的取热能力分布情况

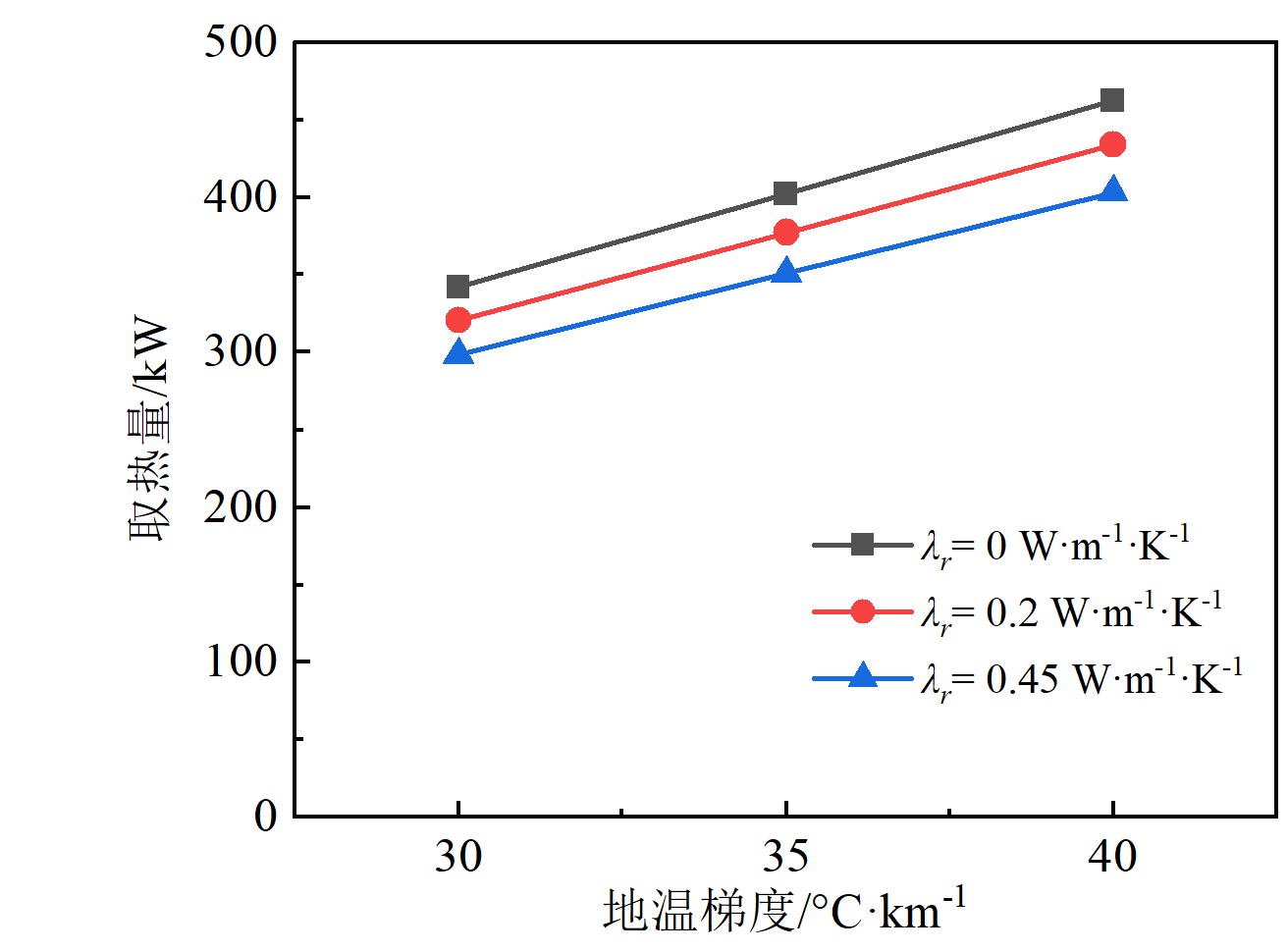


图58不同地温梯度下的取热能力分布情况

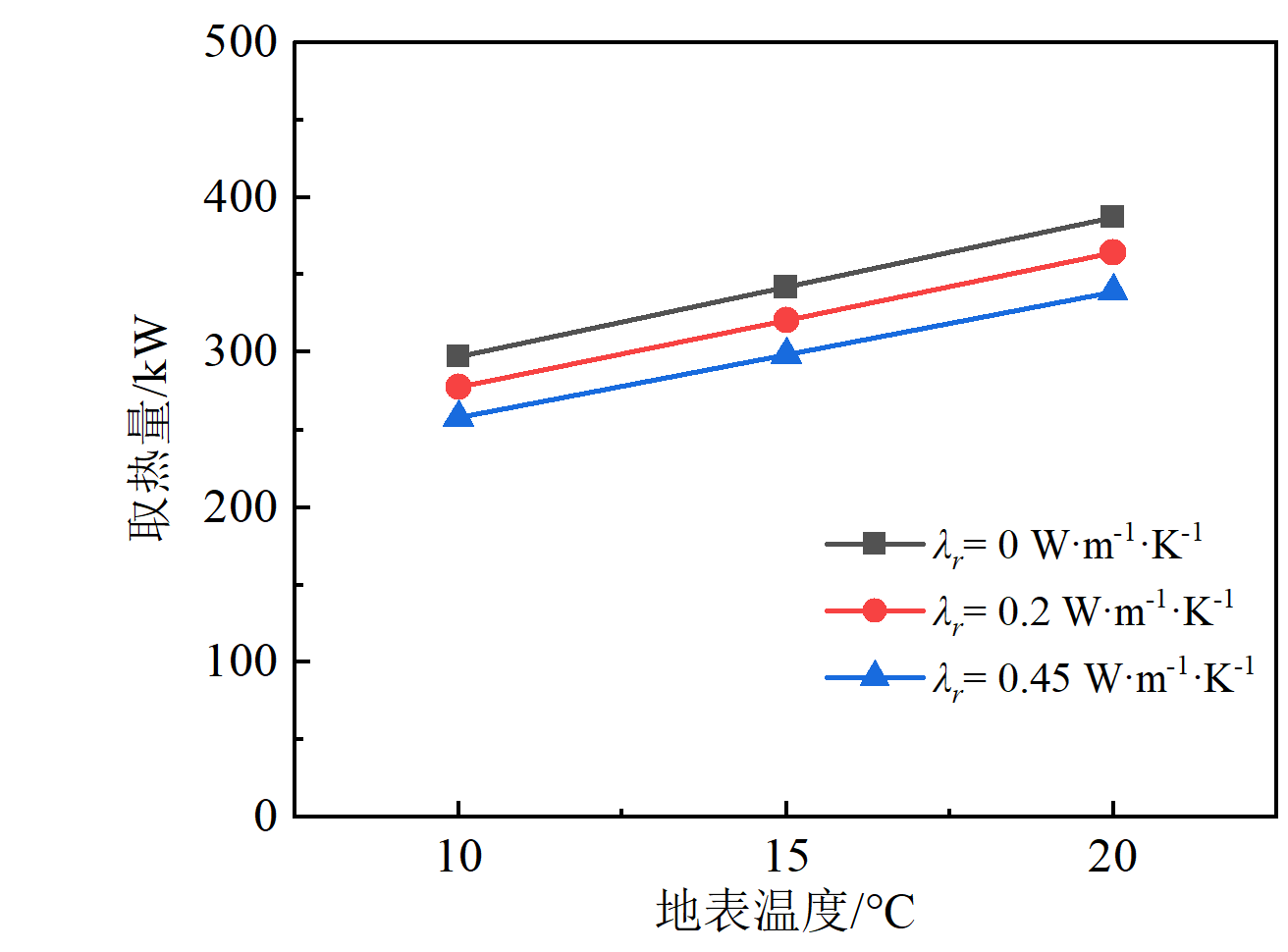


图59不同地表温度下的取热提升潜力情况

## 3.4技术分析小结

本章主要对中深层地埋管换热器的取热特性展开研究，针对换热器在热提取过程中的能量传递与取热性能展开分析，揭示了换热器的能量传递规律，明晰了换热器取热能力与取热损失的变化特点，主要结论如下：

（1）流体在环腔自上而下流动的过程中温度不断上升，到达换热器底部时的温度达到最大；在内管向上流动的过程中，流体温度则不断下降。其中，在运行流速较低或换热器长度较大的条件下，流体到达换热器底部时的温度显著增加，但此时流体温度在内管中的下降程度也较大。

（2）换热器的出口温度与较深处中深层岩土体未被干扰时的温度相比明显偏低，主要由于在热提取期间换热器周围的岩土体温度不断下降，影响了流体的热提取；受运行工况的影响，流体无法与较深处的高温岩土体实现充分换热；同时，流体在内管中被输送至地表的过程中，产生热损失。

（3）换热器从岩土体中的取热强度沿着深度方向显著增加，其更多地提取了较深处岩土体中的能量。而内管的散热强度沿着地表方向不断增加，其热损失更多的位于内管上部。增大循环流速、减小内管管径以及降低内管导热系数可以降低内管的热损失，但减小内管管径的方式对于提高换热器取热能力的程度有限。

（4）换热器的取热量与入口水温、地温梯度、地表温度之间呈线性变化关系。增大循环流速有利于提高取热能力，但随着循环流速的增加，取热量增加的幅度减小。与浅层地埋管换热器相比，中深层地埋管换热器在单管取热量方面具有明显的优势。然而，在地热特征参数不佳或换热器长度较小的条件下，其平均每延米换热量较低，取热优势不明显。

（5）提出“取热损失比”评价换热器的取热损失程度，其基本不随热提取的时间而发生改变。运行流速较低时，取热损失比较高。在该条件下，地表的实际取热量较低，但在换热器底部的取热量与较高流速下相比十分接近，存在较大的取热潜力。长度较大的换热器，其取热损失比也较高，换热器底部取热量与实际取热量之间相差较大，也具有较大的取热潜力。

（6）对换热器取热能力具有显著影响的运行参数与设计参数，根据其影响程度从大到小依次为换热器长度、入口水温、循环流速、外管径与内管导热系数。对换热器取热能力具有显著影响的地热特征参数，依据其影响程度从大到小依次为地温梯度、岩土体导热系数、地表温度。

（7）降低内管导热系数有利于换热器的热提取。而内管导热系数与流速、换热器长度对取热能力存在交互作用，且具有显著影响。在运行流速较低或换热器长度较大的条件下，降低内管导热系数可以明显提升取热能力。在岩土体导热系数较大的条件下，降低内管导热系数对提高换热器取热能力的作用程度较大。

## 3.5中深层地热供热项目实验分析

编制团队针对多个中深层地埋管地热供热系统实际项目开展了实地测试与数据分析。本章主要对陕西西安及西咸新区地区多个中深层地埋管地热供热工程开展性能测试并进行结果分析，以期为规范编制提供参考。

### 3.5.1项目基本信息

2015年12月至2016年1月，编制团队对多个中深层地埋管地热供热实际项目进行了性能测试。项目基本信息如下：

表7测试项目基本信息

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目名称 | 项目A | 项目B | 项目C | 项目D |
| 建筑面积 m2 | 20600 | 43500 | 56000 | 37800 |
| 实际供暖面积 m2 | 6000 | 18700 | 38000 | 7560 |
| 入住率 | 0.29 | 0.43 | 0.68 | 0.20 |
| 装机容量kW | 1040 | 1986 | 2600 | 2160 |
| 取热孔个数  （使用/开发） | 1/2 | 3/3 | 5/5 | 1/3 |

上表展示了测试项目建筑面积和实际供暖面积，可以看到四个项目的入住率高低不同，前三个项目入住率都偏低，仅项目C入住率达到了0.68。

### 3.5.2主要参数监测结果

测试过程中对渭水华庭小区、滨河明珠西区以及同德佳苑小区热泵机组的实际供热量进行了监测，测试结果如下：

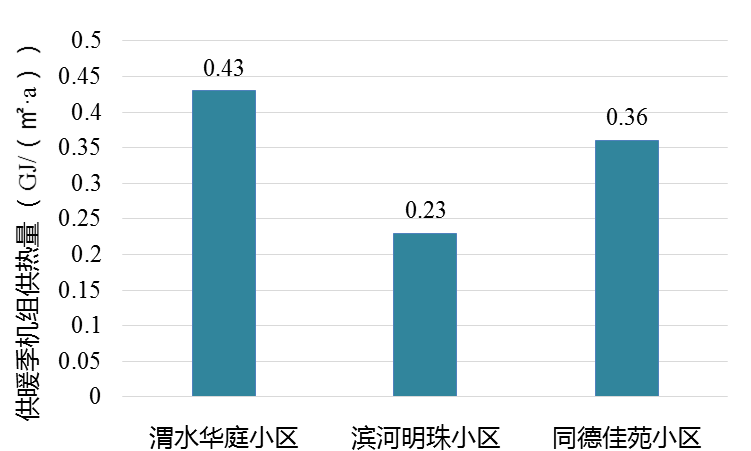


图60 供暖季机组实际供热量监测情况

监测结果显示，供暖季（由于测试时间所限，本报告中供暖季指2015年11月15日至2016年2月21日）热泵机组实际供热量差别较大，其中渭水华庭小区热泵机组供热量最大，为0.43 GJ/(a·m2)，其次为同德佳苑小区，热泵机组供热量为0.36 GJ/(a·m2)，最小的为滨河明珠小区，热泵机组供热量为0.23 GJ/(a·m2)。

测试典型日单位面积供热负荷如下所示：

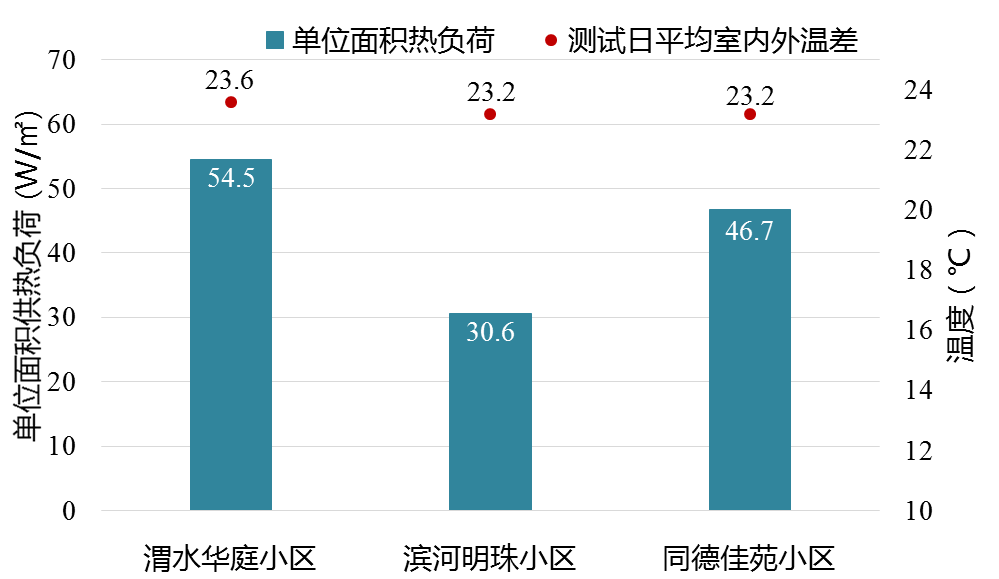


图61 测试典型日单位面积供热负荷

上图显示，测试阶段三个小区室内外温差相近，但三者的单位面积供热负荷相差较大，说明热泵机组的供热量和用户实际的耗热量存在一定差距，造成这一现象的主要原因是输配管网存在一定的漏热损失。

对于热源侧，我们对四个项目取热孔的进出水温度进行了监测，并将延安管委会的测试结果纳入比较，结果如下图所示：

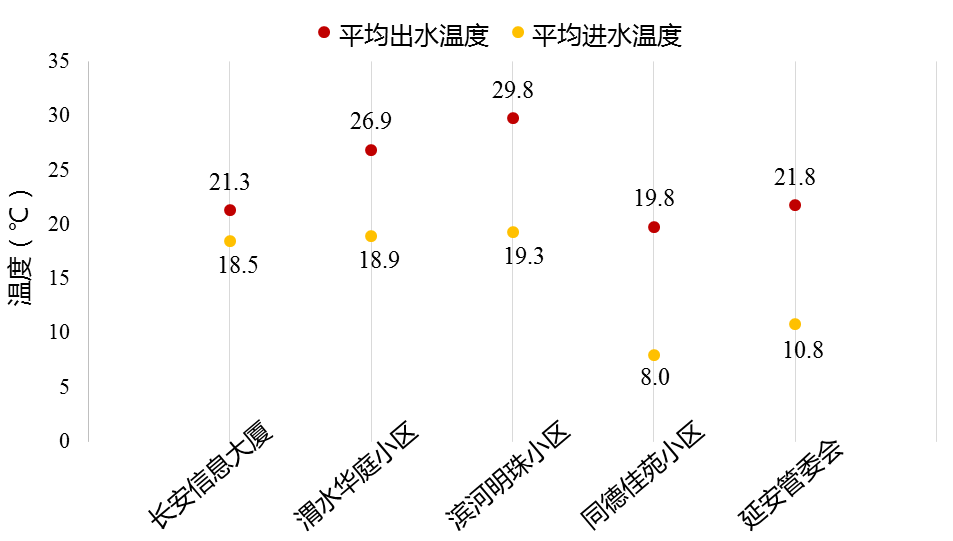


图62 取热孔进出水温度对比

通过测试可知，项目取热孔出水温度均较高，但相互之间差异较大，其中最高的是滨河明珠小区（三口取热孔全开），平均出水温度达到了29.8℃，最低的是同德佳苑小区（五口取热孔全开），平均出水温度为19.8℃，两者相差10℃。随后，我们对取热孔理论取热量进行了计算，结果如下：

表8取热孔实际与理论换热情况对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 渭水华庭小区 | 滨河明珠小区 | 同德佳苑小区 |
| 实际单位长度取热量（W/m） | 120 | 93 | 144 |
| 理论单位长度取热量（W/m） | 170 | 149 | 236 |
| 实际/理论 | 67.7% | 62.4% | 60.4% |
| 理论换热效率 | 20.3% | 36.0% | 32.1% |

另一方面，我们对三个项目的理论换热效率进行了计算，换热效率计算公式为：换热效率=目标换热温差/最大换热温差。可以看到，三个项目的理论换热效率均具有很大的提升空间。如果改善换热器效能，加强供回水管的保温，有望将出水温度提升至40℃直接供给末端用户。

热泵机组的运行情况方面，在测试过程中，我们不仅对主机COP进行了监测，还通过读取面板所示蒸发温度、冷凝温度对理论逆卡诺循环能实现的最大COP（下文简称ICOP）进行了计算分析。结果如下图所示：

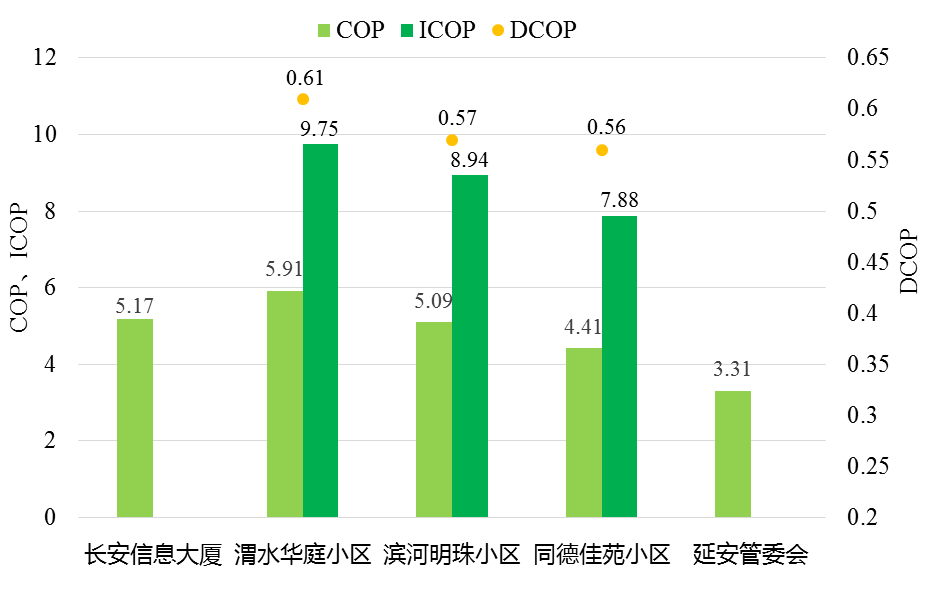


图63 热泵机组能效对比图

从上图可以看出，几个小区热泵主机运行能效差别较大，最好的是渭水华庭小区，热泵COP可达到5.91，较差的是同德佳苑小区，热泵COP仅为4.41。

同时可以看到，渭水华庭小区、滨河明珠小区以及同德佳苑小区ICOP并不高，而且差距较大。随后我们对这三个小区机组蒸发器、冷凝器趋近温度（换热端差）进行了计算，结果如下：

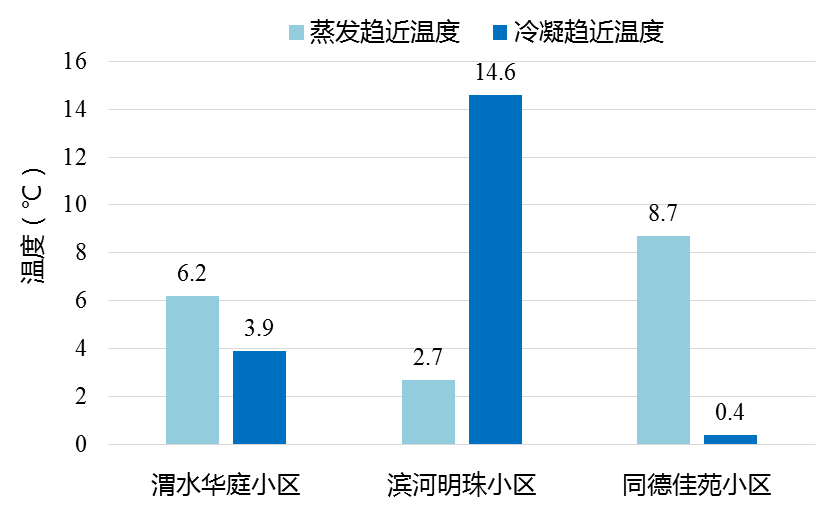


图64 热泵机组趋近温度分析图

可以看到，三个项目机组的蒸发器和冷凝器趋近温度偏高，没有充分利用热源侧的高温优势。通过传热优化降低趋近温度，机组ICOP能大于12，COP能超过7，能效提升潜力大。

另一方面，由于热源侧出水温度较高，机组处于小压比工况，此时可以考虑使用磁悬浮变频离心机，充分利用热源侧高温优势，提高系统能效。

最后，我们对用户侧、热源侧水泵功耗进行了监测，并计算了系统各部分耗能情况、计算了系统EER，其结果如下图所示：

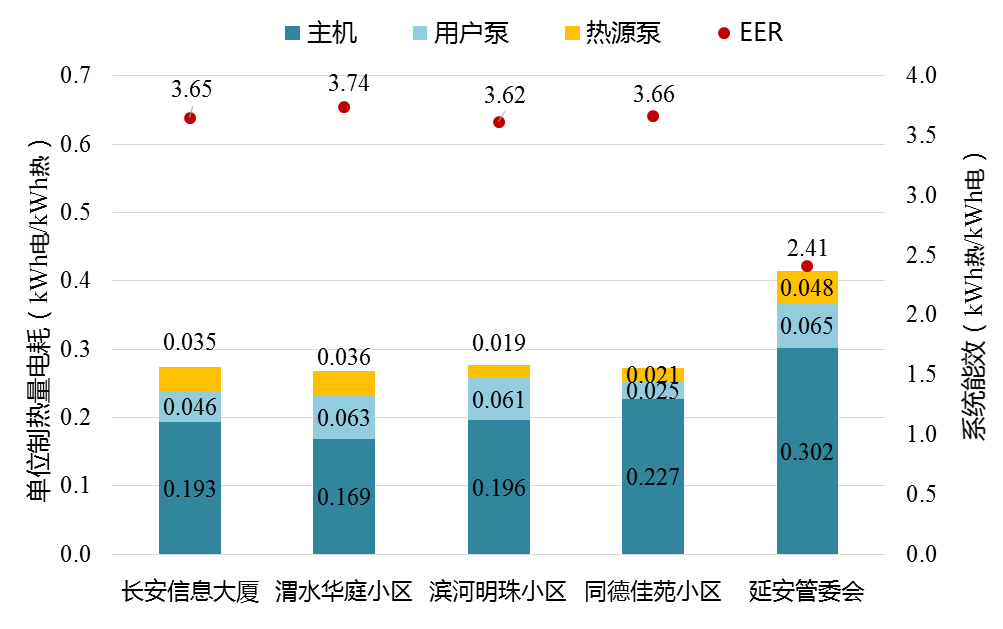


图65 系统能效分析图

其中，同德佳苑小区输配能耗占总能耗17%，较为合理。而其他四个项目输配能耗所占比例均偏高 ，这导致系统EER偏低，因此仍具有节能潜力。

造成输配能耗偏大的主要原因是管网压降偏大。随后，我们搭建模型计算了项目A、B、C的管网1/S值用于衡量管网的脏堵情况，项目D由于未测量水系统压降，此处不做阻力分析。1/S计算公式为：，所得值越小表征管网脏堵越严重。模拟计算结果如下表所示：

表9热源侧、用户侧1/S值计算表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 渭水华庭小区 | 滨河明珠小区 | | 同德佳苑小区 |
| 高区 | 低区 |
| 热源侧 | 理论1/S（m5/h2） | 10.5 | 97.1 | | 270.3 |
| 实测1/S（m5/h2） | 9.8 | 232.6 | | 263.2 |
| 用户侧 | 理论1/S（m5/h2） | 294.1 | 208.1 | 291.4 | 3731.3 |
| 实测1/S（m5/h2） | 163.9 | 168.4 | 223.9 | 3698.5 |

对热源侧，对于渭水华庭和同德佳苑小区，取热孔的实测1/S值小于理论值，说明存在一定程度的脏堵。对于滨河小区，实测值远大于理论值，说明取热孔可能存在泄漏短路的情况

对用户侧，渭水华庭和滨河小区实测1/S值远小于理论值，说明用户侧脏堵严重。对于同德佳苑小区，实测值与理论值接近，管网内压降正常。

通过四个项目的实测与分析，可以看到中深层地埋管地热供热系统总体效率较传统地源热泵系统高。但还可以从管网漏热与平衡、取热孔换热效果、热泵主机能效以及水泵输配效率四个关键环节入手，进一步降低系统能耗。

### 3.5.3具体项目测试情况分析

3.5.3.1长安信息大厦测试情况



图66 长安信息大厦外景图

长安信息大厦是一商业住宅结合项目，总建筑面积为43047.7 m2。地下两层是停车场和设备机房，总面积有5268.9 m2。地上建筑分为三个分区，1至6层为商业区，总面积12429.9 m2，目前还未投入使用。7到17层是低区住宅，18到28层是高区住宅。住宅总面积25348.9 m2，入住率约为20%。热源采用的是中深层地埋管地热供热，总装机容量为2160 kW，分别为高区和低区进行供暖。住宅区冬季采用辐射地板进行供暖，夏季使用分体空调。商业区冬夏采用风机盘管。

长安信息大厦测试时间为2015年12月19日至2015年12月22日。本次只对高区系统进行了测试分析。

实测高区热泵机组性能如下：

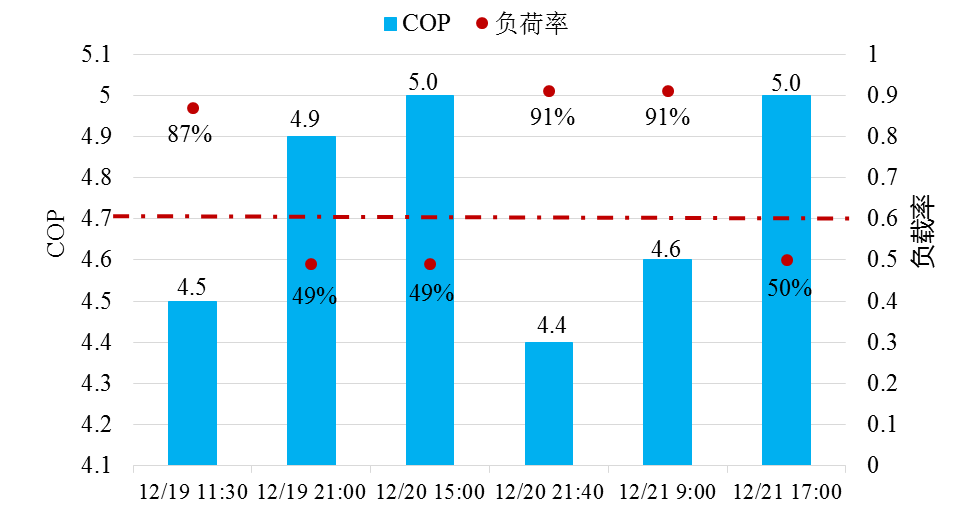


图67 高区热泵机组COP与负荷率关系

可以看到，在高负载率下，机组的COP低于额定值，仅为4.5左右，而在50%负载率下，机组的COP较高，可达到5.0。

3.5.3.2渭水华庭小区测试情况



图68 渭水华庭小区外景图

渭水华庭小区是一个住宅小区项目，该项目用户侧共用四栋楼，分别为7号、9号、12号楼以及一栋综合办公室。设计供暖面积为20584.6 m2，实际供暖面积为5000~6000 m2，入住率20%~30%，供暖户数为46户。热源采用的是中深层地埋管地热供热，总装机容量为1040 kW，设计有两个取热孔，目前使用一个。住宅区冬季采用辐射地板进行供暖，收费标准为5.4元/( m2·月)，机房用电缴费标准为0.498元/kWh。夏季使用的是分体空调，用户自行承担费用。渭水华庭小区测试时间为2016年1月18日至2016年1月20日。测试结果如下：

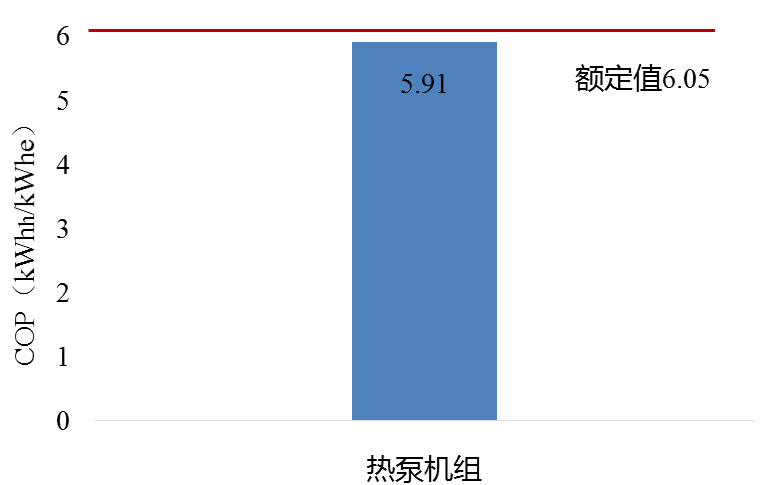


图69渭水华庭小区热泵机组COP

可以看到，渭水华庭小区热泵机组的COP较高，为5.91，与额定值相近。

3.5.3.3滨河明珠小区测试情况



图70 滨河明珠小区外景图

滨河明珠小区是一个住宅小区项目，该项目用户侧共有两栋住宅楼。其中1号楼共25层，一层为商业区，尚未投入使用，2~13层为低区住宅，14~25层为高区住宅。2号楼供24层，1~12层为低区住宅，13~24层为高区住宅。设计供暖面积和实际供暖面积如下表所示：

表10项目面积信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 机组 | 区域 | 设计供暖面积(m2) | 实际供暖面积(m2) |
| 1# | 低区 | 22320 | 11452 |
| 2# | 高区 | 21168 | 7240 |

热源采用中深层地埋管地热供热，机组和用户侧水系统分高、低区分别供暖，总装机容量为1988kW，设计有三个取热孔，目前全部投入使用。住宅区冬季采用辐射地板进行供暖，收费标准为6.8元/( m2·月)，机房用电缴费标准为0.498元/kWh。夏季使用的是分体空调，用户自行承担费用。测试结果如下：

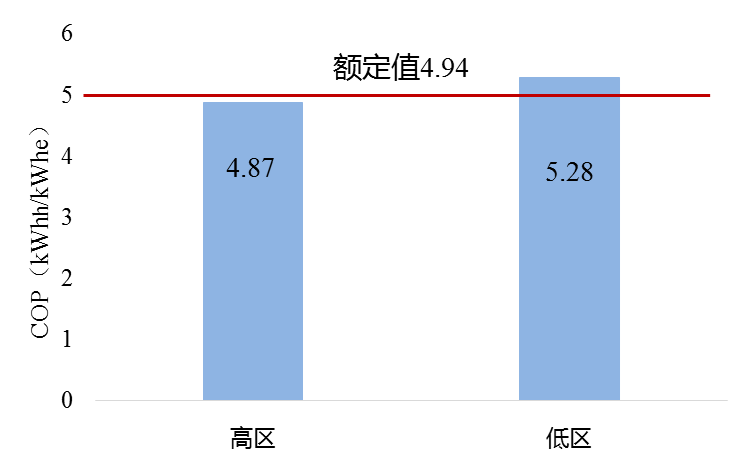


图71滨河明珠小区热泵机组COP

滨河明珠小区高区热泵机组的COP为4.87，低区热泵机组COP为5.28，略高于额定值，呈现出较高的能效水平。

3.5.3.4同德佳苑小区测试情况



图72 滨河明珠小区外景图

同德佳苑小区是一个住宅小区项目，该项目用户侧共有20栋住宅楼。设计供暖面积为56000 m2，实际供暖面积为38000 m2。热源采用中深层地埋管地热供热，总装机容量为2600kW，设计有五个取热孔，目前全部投入使用。住宅区冬季采用辐射地板进行供暖，夏季使用的是分体空调，由于目前处于调试阶段，尚未向用户收取采暖费。

对1#热泵机组能效进行了监测，结果如下：

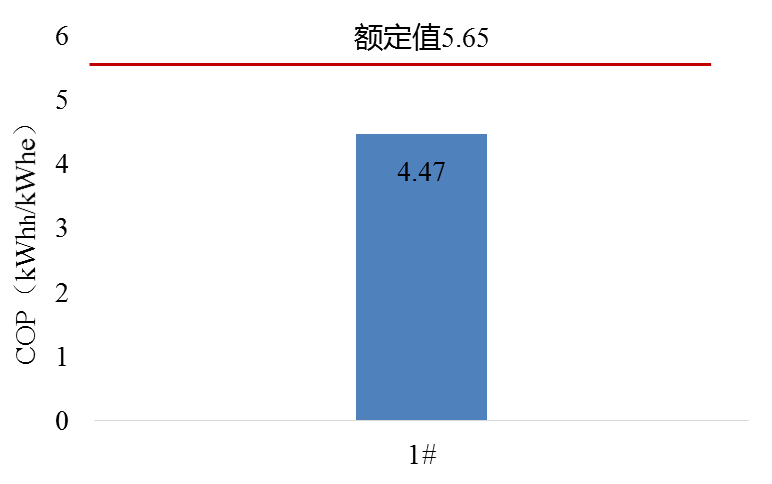


图73 同德佳苑小区1#热泵机组COP

可以看到，1#热泵机组的COP偏低，为4.87，略低于额定值。通过主机调试，将蒸发侧趋近温度降至1.5K，并结合其它调适内容，实现主机性能优化，此时主机循环温差由现在的43.0K降至33.9K，主机ICOP由现在的7.32提升至9.26，主机能耗可降低29.4%。

## 3.6实验测试小结

通过现场实测，我们对已有中深层地埋管地热供热系统的系统形式、运行策略以及能耗情况进行了深入的了解和分析。相比于普通形式的土壤源热泵系统，由于中深层地埋管地热供热系统热源侧出水温度高，提升了系统能效，使用效果较好。但仍然存在很大的提升空间，通过对系统存在的运行问题进行调适改善，可让系统运行得更加高效。

# 4技术经济论证

## 4.1传统供热方式

我国幅员辽阔，约有一半地区需要冬季供暖，主要的供暖热源形式为燃煤锅炉、燃（油）气锅炉、地源热泵、电热锅炉4种：

（1）燃煤锅炉

目前使用较为普遍，承载着城市大部分供暖任务。

缺点：使用煤炭量巨大，能效比相对较低，排放废气、废渣较多，是重要的大气污染源。

（2）燃（油）气锅炉

近年来主要提倡的方式，能效比相对较高，不产生废渣。

缺点：有大量二氧化碳排放，同时受天然气供应量影响较大，气量不足时温度起伏较大，使用成本高于煤炭。

（3）地源热泵

优点：节能环保，不使用煤炭、天然气，不产生废气、废渣；安装使用相对灵活，不受市政管网辐射的限制；可以提供供暖、制冷、解决部分生活热水，可一机多用。

缺点：换热孔施工需要较大的空地，在建筑密度高的区域无法较好推广使用；从浅层低品位热源吸热，需要消耗一定电力。

（4）电热锅炉

电热锅炉运行费用高，配电容量大，电力需求大，能源利用效率低，不符合“能源梯级利用”理念。一般该种利用技术只有在电力峰谷价差较大的地区结合蓄热技术采用才有一定的优势。

## 4.2中深层地埋管地热供热与其它供热方式对比

（1）技术特点比较

中深层地埋管地热能供热技术与地源热泵供热技术是都是利用地热能对建筑供暖，清洁、可再生的地热能资源特性决定了这两种技术较传统中央空调具有节能减排的特性，不产生污染物排放，能源消耗小、运行效率高，但前者相对地源热泵拥有更多技术优势。中深层地埋管地热供热技术系统、地源热泵系统与其他传统的中央空调系统相比的特点，具体如表11所示。

表11中深层地埋管地热供热技术与常规空调技术特点比较

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 中深层地埋管地热供热 | 地源热泵供热技术 | 区域燃煤锅炉 | 燃油(气)热水锅炉 | 电热锅炉 |
|  |
| 能源 | 中深层地热能 | 浅层地热能 | 煤炭 | 石油、天然气 | 电力 |  |
| 能效比 | 最高达到7.1 | 利用系数为3.8-4.5 | 约60% | 90%左右 | 90%以上 |  |
| 环境保护 | 无排放无污染，只钻孔不取水 | 无燃烧污染，地下水回灌等问题难以根治 | 燃煤有较强污染 | 有燃烧污染 | 无燃烧污染 |  |
|  |
| 占地面积 | 施工及机房对占地面积要求极小 | 地埋管换热部分对占地面积有一定要求 | 市政锅炉及储煤占地面积较大 | 须建设锅炉房，储油设备需要占地面积 | 须建设和锅炉房，需要较大的电负荷 |  |
| 设备寿命 | 地下换热器寿命与建筑寿命相当，维护成本极小 | 20年，维修成本相对较小 | 15~20年，需定期维修，维修成本 | 10年左右，维护成本高 | 15年左右，维护成本一般 |  |
| 水资源消耗量 | 换热管壁与岩土体接触换热，无需消耗任何地下水 | 除地埋管地源热泵外，其他地源热泵，都可能消耗水资源，且回灌问题无法根治 | 冬季供热的排污补水 | 冬季锅炉的排污补水 | 冬季锅炉的排污补水 |  |
| 备注 | 封闭式换热介质为水或其他物质 | 需要一定量的水资源 | 运行维护投入大 | 运行维护复杂锅炉房需要安全报警装置 | 运行维护复杂 |  |

注：以1万m2建筑，负荷为100W/ m2为比较基准

（2）系统经济性比较

和其它常规中央空调系统比较，设计安装良好的地源热泵系统、中深层地埋管地热供热系统等地热能利用系统可为用户节省大量的投资及运行费用。随着地热能直接利用系统的广泛应用，系统技术、运营模式不断发展，地源热泵系统平均投资成本已由过去的400-450元/㎡降至目前的220-320元/㎡，中深层地埋管地热供热系统在此基础上，进一步降低了投资费用，可降至200-300元/㎡。以中深层地埋管地热供热系统为代表的地热能直接利用系统已成为用户建筑供暖制冷系统的重要选择之一。中深层地埋管地热供热系统、地源热泵系统与常规空调系统初始投资费用对比具体如表12所示。

表12中深层地埋管地热供热系统、地源热泵、常规空调系统初始投资费用比较

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 中深层地埋管地热供热系统 | 地源热泵系统 | 冷水机组+燃煤锅炉 | 冷水机组+燃油锅炉 | 直燃机 | 风冷热泵 |
| 单位建筑面积造价（元/㎡） | 240-300 | 220-320 | 240-340 | 240-340 | 260-360 | 280-380 |
| 单位建筑面积运行费用（元/㎡） | 8-18 | 15-28 | 15-30 | 30-55 | 40-75 | 20-35 |

地热能资源按照深度不同可分为浅表地热资源、中层地热资源和深层地热资源，浅表层地热比大气稳定，冬季比环境空气温度高，夏季比环境空气温度低，是很好的热泵热源和空调冷源，这种温度特性使得使用浅表地温层为热源的地源热泵比传统空调系统运行效率要高30%，因此要节能和节省运行费用30%左右。中深层地热温度较高，更加适应于供暖，中深层地埋管地热供热系统使用中层地热热源供暖能效比最高可以达到7.1，由于热源稳定可靠，极大地降低了供暖运行成本。据实际供暖项目经验，相比地源热泵供暖、传统燃煤锅炉费用可降低35—50%，虽然该系统在夏天制冷的能效比、运行费用和一般水冷机组相当，但总体来说，中深层地埋管地热供热系统凭借着极高的能源效率利用率，全年系统运行费用较其他供暖制冷系统更经济。与此同时，由于中层地热温度相对浅层地温、大气温度更加恒定的特性，使得中深层地埋管地热供热系统运行更可靠、稳定，保证了系统的高效性和经济性。因此，设计安装良好的中深层地埋管地热供热系统，平均来说可以节约用户50%左右的的采暖运行费用。因此，中深层地埋管地热供热系统在供热领域具有较强的适用性。具有较高的技术经济先进性。

# 5采用国际标准的程度及水平的简要说明

无。

# 6重大分歧意见的处理经过和依据

无。

# 7标准的要求和措施建议

本规范适用于中深层地热能开发利用项目的建设过程，共分9章，主要技术内容为：总则、范围、规范性引用文件、术语和定义、地热地质调查与评价、地热换热井施工、地热换热系统及机房设计、监测与控制系统与系统调试、质量验收及运行维护。

# 8其他应予说明的事项

无。

1. [↑](#endnote-ref-1)