

## 中深层地热井换热性能模拟研究

袁安冬, 唐文龙, 汪丽娟, 王海涛

(安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 结合北方邯郸地区, 通过 Fluent 软件建立中深层地热能井下同轴套管式换热器换热模型, 模拟研究了岩土导热系数、内管导热系数、循环流体流量、循环流体入口温度变化对井下同轴套管式换热器换热性能的影响。结果表明: 岩土的导热系数从  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  增加到  $9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 换热器换热量增长约 324.53%; 内管导热系数从  $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  增加到  $4.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 换热器换热量减少约 40.37%; 循环流体流量从  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  增加到  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 换热器换热量增长约 103.92%; 循环流体入口温度从  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  增加到  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , 换热器换热量减少约 23.14%。所以在实际工程中, 应在岩土导热系数相对较大的地域开发中深层地热能, 选择导热系数较小的内管以及循环流量较大的井下换热器, 并保持外管循环流体入口温度较低。

**关键词:** Fluent; 中深层地热能; 换热性能; 换热量

中图分类号: F323.22

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)04-061-05

## Study on Performance Simulation of Heat Exchanger in Middle and Deep Geothermal Well

YUAN Andong, TANG Wenlong, WANG Lijuan, WANG Haitao

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Taking Handan area in northern China as an example, a downhole coaxial heat exchanger (DCHE) model was established by Fluent software for the mid-deep geothermal energy wells, and the effects of thermal conductivities of soil and inner pipes, the flow rate and inlet temperature of circulating fluid on the heat transfer performance of DCHE were simulated. The results show that as the thermal conductivity of soils and rocks increases from  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  to  $9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , the heat transfer volume of the heat exchanger increases about 324.53%; as the thermal conductivity of inner pipes increases from  $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  to  $4.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , the heat transfer volume of the heat exchanger decreases about 40.37%; as the circulating fluid flow increases from  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  to  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , the heat transfer volume of the heat exchanger increases about 103.92%; and as the circulating fluid inlet temperature increases from  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , the heat transfer volume of the heat exchanger decreases about 23.14%. Therefore, middle-deep geothermal energy should be developed in areas with relatively large geotechnical thermal conductivity, choosing inner pipe with small thermal conductivity and downhole heat exchangers with large circulating flow, and keeping the circulating fluid inlet temperature in outer pipes low.

**Keywords:** fluent; middle and deep geothermal energy; heat transfer performance; heat exchange volume

传统使用的浅层地源热泵系统存在土壤热失衡问题,会导致众多不良效果,而中深层地热具

有温度高、稳定性好等特点<sup>[1-3]</sup>,较好地解决了这一问题。中深层地热井换热系统工作时,能够在不污

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004a07020019, 202004a07020049)

作者简介: 袁安冬(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为中深层地热能利用。

染或浪费地下水的情况下合理开发地热能,且取得的热能更高,在大多数天气情况下正常运作,为机组持续提供热源<sup>[4-5]</sup>。同时该系统也可以由原用于天然气或石油开采的废弃井改造成<sup>[6-7]</sup>。从形式角度来看,中深层地热井换热系统在提取热能时也与传统方式存在一定差异,使用的是同轴套管式换热器<sup>[8]</sup>。换热时两边流体循环流动,且全过程基本在地下完成,因此不过多占用地面空间,降低了环境污染<sup>[9]</sup>。

国内外学者已对中深层地热井换热器换热性能做了相关研究。Huchtemann K 等<sup>[10]</sup>通过一维传热模型,以某动态负荷下的办公室为实例,研究中深层地热井换热器换热特性。Morita 等<sup>[11]</sup>通过深井换热器换热实验,证明了闭式深井换热的可行性。瑞士的威吉斯地区将该技术应用于某废弃钻井,成功实现热能提取,同时对该换热器进行周期性检查,实时记录其工作情况<sup>[12]</sup>。鲍玲玲等<sup>[13]</sup>建立相关数值模型,利用交替方向隐式法等多种方法,研究管径比和井深对换热器换热性能的影响。Holmberg H 等<sup>[14]</sup>通过建立 Matlab 二维模型,对有关该技术的影响因素,如水流方向等进行研究,讨论其对换热器换热性能的影响。王硕等<sup>[15]</sup>以青岛某 2605 m 深地热井的供热系统为实例,分析取热量以及连续工作时间对换热器换热性能可能产生的影响。综上所述,换热器性能的影响因素有很多。

本文利用 Fluent 建立了中深层地热井同轴套管式换热器模型,在此基础上模拟其换热性能,研究岩土导热系数、内管导热系数、循环流体流量、循环流体入口温度四种因素变化对深井换热器换热性能的影响。

## 1 换热原理与基本假设

### 1.1 地热井换热原理

中深层地热井换热又称同轴套管式换热,可以开采 200~3000 m 深的地热能,通过井下换热器内部流体循环流动,达到“取热不取水”的目的,因此忽略了回灌问题。地热井换热原理如图 1 所示,包括:1-内管,2-外管,3-回填材料,4-岩土。循环流体由环腔流入,最后通过内管流出,整个换热过程全封闭运行,流体在流动过程中与周围岩土基于

热传导的方式换热,最后将热量通过内管带出。

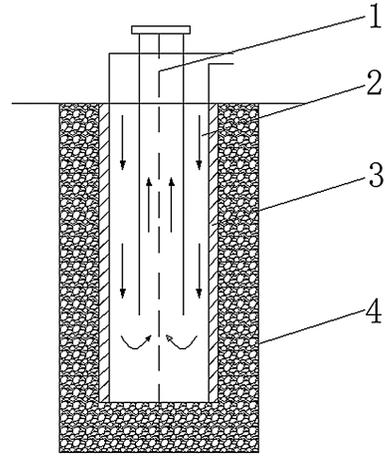


图 1 同轴套管换热器换热原理图

### 1.2 换热问题与基本假设

中深层地下井换热过程非常复杂,主要包含套管内流体与管壁的对流换热、管壁之间的导热以及岩土自身的导热。由于传热介质为地下岩土,且岩土范围无限大,地下温度随着深度不同而改变,地球表面散热情况又是可变的,所以实际换热过程的边界条件也异常复杂。针对该换热问题,为了便于讨论分析,做出以下合理假设:

- (1) 地下换热器四周岩土介质均匀,各向同性,热物理性质恒定;
- (2) 本文取地层的平均地温梯度为  $0.026\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ;
- (3) 不考虑地下水流情况的影响,仅考虑岩土导热;
- (4) 井内的传热为稳态过程;
- (5) 不考虑地球表面散热情况的影响。

## 2 数值模型

### 2.1 建立几何模型

该模型的实验地点设于中国北方邯郸地区,邯郸地区地势平坦,地形西高东低,地处暖温带、半干旱大陆性气候区,冬季平均温度  $4\text{--}14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该地区地热资源丰富,具有储量大、易开采等优势。由于中深层地热井的套管式热交换器为旋转轴对称结构,为了便于分析,将三维传热问题简化为二维传热问题。通过 SolidWorks 软件构建二维几何模型,并导入 ICEMCFD 软件进行结构化网格划分,后使用 Fluent 软件模拟计算。SolidWorks 软件构建的

几何模型,内管尺寸为 60 mm × 10 mm,外管尺寸为 139.7 mm × 10 mm,回填材料尺寸 216 mm × 38.2 mm,外管底部深 2250 m,内管底部比外管底部高 5 m。为了满足中深层地热井取热半径和数值分析网格生成,岩土的计算半径为 30 m,计算域底部深 2280 m。地热井几何模型简图如图 2 所示。

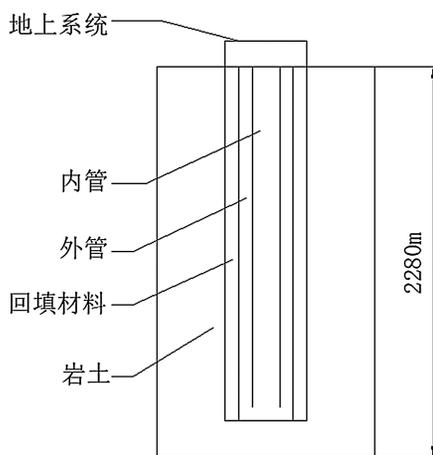


图 2 几何模型简图

## 2.2 Fluent 数值模型

中深层地热井换热模型计算区域为矩形,且网格划分对模拟的准确性影响较大。因此,本文对其进行结构化网格划分,靠近地热井壁附近采用尽可能小的网格尺寸,在相对较远的边界处采用尽可能大的网格尺寸,地热井整体模型(a)和网格在入口处的划分(b)如图 3 所示。

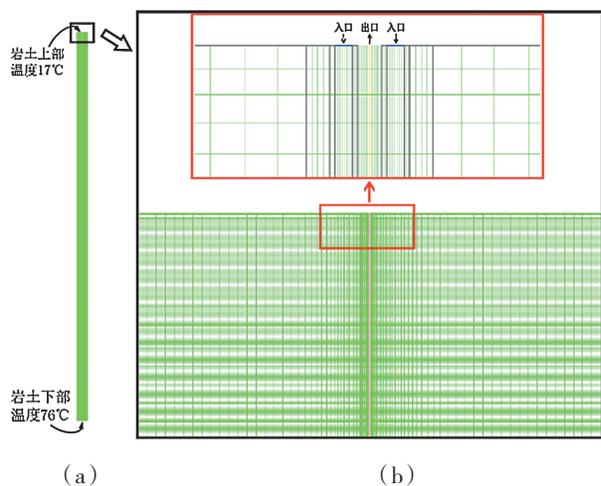


图 3 地热井模型(a)和入口处网格划分(b)

### 2.2.1 边界条件及初始化设置

设置边界条件和初始化条件以保证模拟计算的合理性和可靠性。岩土顶部和底部为绝热边界

条件,岩土径向边界最上部温度为 17 ℃,最下部温度为 76 ℃,平均地温梯度 0.026 ℃ /m。外管进口循环流体流量为边界条件,内管出口为压力出口边界条件,初始化设置为标准初始化。

### 2.2.2 建立数学模型

为了计算中深层同轴套管式换热器内管出口温度,需要合理设置 Fluent 的算法等数学模型,以达到计算的准确性,具体计算模型如表 1 所示。

表 1 Fluent 数学模型设置

种类	选择模型
材料	固体 - 水
时间	稳态模型
湍流	标准模型
求解器设定	压力速度采用 SIMPLE 算法,空间离散选用二阶迎风格式
求解格式	一阶隐式求解

## 2.3 模型物理参数设置

本文将纯净水作为中深层地热井下换热器的循环工质,地温梯度为 0.026 ℃ /m,关键参数见表 2。

## 2.4 模型验证

本文基于文献 [15] 相似案例试验数据,采用文献中地热井的相关物理参数进行模拟验证,模型地表温度为 15 ℃、井底温度 83.2 ℃、试验入口温度为 7 ℃、循环流量为 29.4 m<sup>3</sup>/h 进行模拟,稳定时出口温度为 20.03 ℃,与实测的出口温度 21.4 ℃ 相比,误差为 6.4%,在一定程度上说明模型是可靠的。

## 3 影响因素分析

井下同轴套管式换热器换热性能的影响因素有很多:不同地区岩土导热系数不同,换热器工作期间,土壤热物性会影响传热性能;内管导热能力的大小也表征着流体在内管向上流动过程中热量损失大小;而循环流体流量和循环流体入口温度直接影响着内管流体出口温度,流体出口温度大小影响着热泵的性能高低,因此模拟研究岩土导热系数、内管导热系数、循环流体流量、循环流体入口温度变化。

### 3.1 岩土导热系数

查询相关岩土导热系数数值范围<sup>[16]</sup>,使用

表 2 关键参数设置

参数	数值	单位	参数	数值	单位
井深	2 250	m	内管导热系数	0.4	W/(m·K)
井孔半径	0.108	m	岩土导热系数	2.5	W/(m·K)
外管外半径	0.069 8	m	回填材料导热系数	1.5	W/(m·K)
外管内半径	0.059 8	m	水流量	43.2	m <sup>3</sup> /h
内管外半径	0.03	m	水比热容	4 180	J/(kg·K)
内管内半径	0.02	m	水导热系数	0.618	W/(m·K)
外管导热系数	41	W/(m·K)	进口温度	15	℃

Fluent 软件模拟时其他参数不变,将岩土导热系数依次设置成 1 W/(m·K)、3 W/(m·K)、5 W/(m·K)、7 W/(m·K)、9 W/(m·K),分析其对中深层地热井换热器换热性能的影响,结果如图 4 所示。

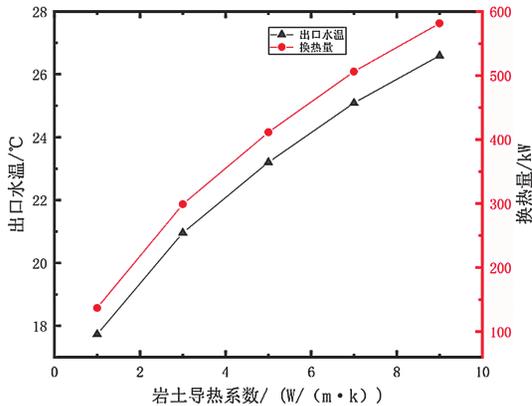


图 4 出口水温和换热量随岩土导热系数的变化

由图 4 可知,当岩土导热系数从 1 W/(m·K) 增加到 9 W/(m·K) 时,内管出口处的水温从 17.73 ℃ 增加到 26.59 ℃,换热器换热量从 136.94 kW 增加到 581.35 kW,换热量约增长 324.53%。可知由于地质条件随着地域条件变化,岩土导热系数相对较大的地域,土壤热物性较好,可以更好地取热,更有利于提高换热量。因此,有必要通过热响应实验掌握不同区域地下岩土导热系数和热物性。

### 3.2 内管导热系数

查询 PE 管导热系数资料及文献 [13],使用 Fluent 软件模拟时其他参数不变,将内管导热系数依次设置成 0.5 W/(m·K)、1.5 W/(m·K)、2.5 W/(m·K)、3.5 W/(m·K)、4.5 W/(m·K),分析其对中深层地热井换热器换热性能的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,当内管的导热系数从 0.5 W/(m·K) 增加到 4.5 W/(m·K) 时,内管出口处的水温从 19.83 ℃ 降低到 17.88 ℃,换热器换热量从 242.27 kW 减少到 144.46 kW,换热量约减少

40.37%。原因主要为内管导热系数越小、内管热阻越大,循环流体在流动过程中热量损失越小,越有利于提高换热量。因此,为了保证高效换热,在实际工程中选择内管时要尽可能选择导热系数越小的材料。

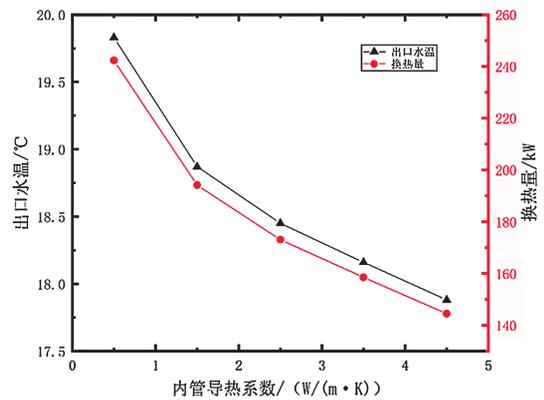


图 5 出口水温和换热量随内管导热系数的变化

### 3.3 循环流体流量

通过文献 [17] 计算地热水的循环流量,使用 Fluent 软件模拟时其他参数不变,将循环流体流量依次设置成 10 m<sup>3</sup>/h、20 m<sup>3</sup>/h、30 m<sup>3</sup>/h、40 m<sup>3</sup>/h、50 m<sup>3</sup>/h,分析其对中深层地热井换热器换热性能的影响,结果如图 6 所示。

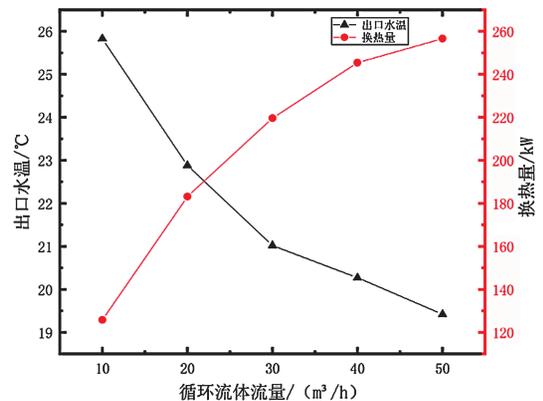


图 6 出口水温和换热量随循环流体流量的变化

由图6可知,当循环流体体积流量从 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 时,内管出口处的温度从 $25.83\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $19.42\text{ }^\circ\text{C}$ ,换热器换热量从 $125.85\text{ kW}$ 增加到 $256.63\text{ kW}$ ,换热量约增长 $103.92\%$ 。换热器中流量不断增大,出口温度在不断降低,但由于流量增大,换热量仍处于上升趋势。对于热泵系统来说,循环水泵的功耗大致与流体流量的立方成正比,伴随着功耗提高,出口水温在很大程度上影响到该系统运行性能。所以,在实际工程中应充分考虑热泵机组的流量性能和换热因素,权衡换热量与循环水泵功耗之间的关系,在满足其他参数的前提下确定系统运行过程中的最佳容积流量。

### 3.4 循环流体入口温度

结合邯郸地区冬季平均温度,使用Fluent软件模拟时其他参数不变,将循环流体入口温度依次设置成 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $11\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $13\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15\text{ }^\circ\text{C}$ ,分析其对中深层地热井换热器换热性能的影响,结果如图7所示。

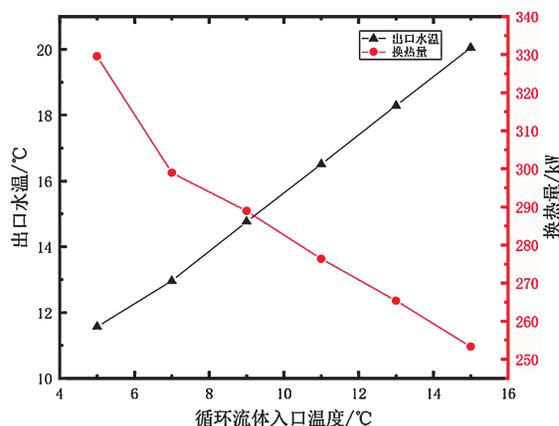


图7 出口水温和换热量随循环流体入口温度的变化

由图7可知,当循环流体入口温度从 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,内管出口处的水温从 $11.57\text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $20.05\text{ }^\circ\text{C}$ ,换热器换热量从 $329.55\text{ kW}$ 减少到 $253.31\text{ kW}$ ,换热量约减少 $23.14\%$ 。循环流体入口温度不断升高,内管出水温度虽然也不断升高,但由于进出水温差减小,换热量呈下降趋势。出口温度对热泵系统的性能影响较大,所以在实际工程中,控制入口温度时应考虑多方面因素,包括机组的性能等,确定最佳循环流体入口温度,使整体运作效果达到最佳。

## 4 结论

利用Fluent软件,结合邯郸地区实际情况,建立中深层地热能井下同轴套管式换热器模型进行模拟研究,可得出以下结论:

(1) 不同区域岩土地质特征不同,土壤物性越好、岩土导热系数越大的地区获得的换热量越高。模拟中岩土导热系数从 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $9\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,换热量约增长 $324.53\%$ ,增长幅度较大。

(2) 内管应尽可能选用导热系数越小的材料,增大内管热阻,减少内管循环流体在流动过程中热量损失,以获得更高的出口水温和换热量。

(3) 在条件允许的情况下,应取较大循环流体流量,并保持外管入口循环流体温度较低以获得更高的换热量。同时也要考虑水泵、热泵机组性能等方面的影响,使得系统整体运行效果达到最佳。

### 参考文献:

- [1] Spittler J D, Gehlin S E A. Thermal response testing for ground source heat pump systems: An historical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 1125-1137.
- [2] 孙方田,程丽娇,付林,等.基于吸收式换热的深层地热集中供热系统能效分析[J].太阳能学报,2018,39(5): 1173-1178.
- [3] Aliyu M D, Chen H P. Sensitivity analysis of deep geothermal reservoir: effect of reservoir parameters on production temperature[J]. Energy, 2017, 129: 101-113.
- [4] 赵西蓉.渭河断陷盆地地热资源赋存特征与热储分析[J].煤田地质与勘探,2006,34(2): 51-54.
- [5] 尚宏波,赵春虎,靳德武,等.中深层地热单井换热数值计算[J].煤田地质与勘探,2019,47(6): 159-166.
- [6] Cheng W L, Li T T, Nian Y L, et al. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells[J]. Energy, 2013, 59: 248-254.
- [7] Davis A P, Michaelides E E. Geothermal power production from abandoned oil wells[J]. Energy, 2009, 34(7): 866-872.
- [8] Bär K, Rühaak W, Welsch B, et al. Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers[J]. Energy Procedia, 2015, 76: 351-360.

(下转第78页)

- succinate) (PBS)/functionalized chitosan-based nanobiocomposite for packaging: a reactive extrusion study[J].ACS Omega, 2018, 3 (10): 13298–13312.
- [5] Iuliano A, Nowacka M, Rybak K, et al. The effects of electron beam radiation on material properties and degradation of commercial PBAT/PLA blend[J].Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137 (11): 48462.
- [6] Vamegh M, Ameri M, Chavoshian Naeni S F. Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS[J].Construction and Building Materials, 2019, 209: 202–214.
- [7] Xu W B, Liang G D, Zhai H B, et al. Preparation and crystallization behaviour of PP/PP-g-MAH/org-MMT nanocomposite[J].European Polymer Journal, 2003, 39 (7): 1467–1474.
- [8] Yin Z H, Zhang Y J, Zhang X M, et al. Effects of the compatibilizer PP-g-GMA on morphology and mechanical properties of PP/PC blends[J].Polymer, 1998, 39 (3): 547–551.
- [9] Quan H, Zhang B Q, Zhao Q, et al. Facile preparation and thermal degradation studies of graphite nanoplatelets (GNPs) filled thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites[J].Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40 (9): 1506–1513.
- [10] Bai Z F, Dou Q. Rheology, morphology, crystallization behaviors, mechanical and thermal properties of poly (lactic acid)/polypropylene/maleic anhydride-grafted polypropylene blends[J].Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26 (3): 959–969.
- [11] Chaudry U M, Hamad K. Fabrication and characterization of PLA/PP/ABS ternary blend[J].Polymer Engineering & Science, 2019, 59 (11): 2273–2278.
- [12] Chopra D, Kontopoulou M, Vlassopoulos D, et al. Effect of maleic anhydride content on the rheology and phase behavior of poly (styrene-co-maleic anhydride)/poly (methyl methacrylate) blends[J].Rheologica Acta, 2002, 41 (1/2): 10–24.
- [13] Dil E J, Carreau P, Favis B D. Morphology, miscibility and continuity development in poly (lactic acid)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends[J].Polymer, 2015, 68: 202–212.

(上接第 65 页)

- [9] Morchio S, Fossa M. Thermal modeling of deep borehole heat exchangers for geothermal applications in densely populated urban areas[J].Thermal Science and Engineering Progress, 2019, 13: 100363.
- [10] Huchtemann K, Müller D. Combined simulation of a deep ground source heat exchanger and an office building[J].Building and Environment, 2014, 73: 97–105.
- [11] Morita K, Bollmeier W S, Mizogami H. An experiment to prove the concept of the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) in Hawaii.[J].Geothermal resources council trans, 1992, 16: 9–16.
- [12] Kohl T, Brenni R, Eugster W. System performance of a deep borehole heat exchanger[J].Geothermics, 2002, 31 (6): 687–708.
- [13] 鲍玲玲, 徐豹, 王子勇, 等. 中深层同轴套管式地理管换热器传热性能分析 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35 (4): 1217–1222.
- [14] Holmberg H, Acuña J, Næss E, et al. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers[J].Renewable Energy, 2016, 97: 65–76.
- [15] 王硕, 黄可钦, 王胜蓝, 等. 同轴套管式深埋管换热器换热性能研究 [J]. 制冷与空调, 2019, 19 (4): 23–28, 34.
- [16] 肖衡林, 吴雪洁, 周锦华. 岩土材料导热系数计算研究 [J]. 路基工程, 2007 (3): 54–56.
- [17] 李宜程, 刁乃仁. 深层地热能梯级利用供暖方法 [J]. 节能, 2015, 34 (7): 62–64.