

地热井固井水泥石传热性能研究现状及展望

张丰琰^{1,2}, 李立鑫^{1,2}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037)

摘要: 固井水泥石传热性能是影响井筒热传递能力的重要因素。本文主要介绍了目前固井水泥石导热系数的主要研究手段, 以及在此基础上取得的一些认识, 例如外加高导热材料、水泥石微观结构和含水率与导热系数之间的关系。同时还指出了现有研究手段的统一和拓展, 研究内容的系统化还有待进一步加强和改善。在分析建筑保温水泥和岩石等多孔材料研究经验的基础上, 提出水泥石导热系数的研究不仅需要统一实验手段和推广使用数值模拟的方法, 还要考虑水泥石养护条件、内部水分的动态变化和外加保温材料等因素对水泥石导热系数的影响。系统规范的研究手段和内容可有效提高研究的准确性、高效性和全面性, 显著增加对水泥石热传导性能的认识, 以为后续的研究提供一定的借鉴。

关键词: 地热井; 固井水泥石; 导热系数

中图分类号: P634; TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)12-0054-11

Research status and prospect of thermal transfer performance of cement in geothermal wells

ZHANG Fengyan^{1,2}, LI Lixin^{1,2}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Deep Earth Science and Exploration Technology Laboratory, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China)

Abstract: The heat transfer performance of cement is an important factor that affects the heat transfer capacity of the wellbore. This article mainly introduces the current main research methods of cement thermal conductivity, and some understandings obtained from the research, such as the relationship between the addition of high thermal conductivity materials, the cement microstructure and water content, and thermal conductivity. At the same time, it points out that the unification and expansion of the existing research methods and the systematization of research content need to be further strengthened and improved. Based on the analysis of the research experience on porous materials such as building thermal insulation cement and rock, it is proposed that the research on the thermal conductivity of cement not only needs to unify the experimental methods and promote the use of numerical simulation methods, but also consider the curing conditions, the dynamic changes of internal moisture and the influence of external thermal insulation materials, and other factors on cement thermal conductivity. The systematic and standardized research methods and content can effectively improve the accuracy, efficiency and comprehensiveness of the research, and significantly increase the understanding of the thermal conductivity of cement so as to provide a certain reference for subsequent research.

Key words: geothermal well; cement paste; thermal conductivity

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-10-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.12.009

基金项目: 国家重点研发计划项目“深部碳酸盐岩热储层水力喷射压裂起裂机理及裂缝形态研究”(编号: 2019YFB1504102); 中国地质科学院基本科研业务费项目“低密度保温地热固井水泥技术和科学钻探工程经费测算研究”(编号: JKY202008); 中国地质调查局地质调查项目“雄安新区地热清洁能源调查评价项目”(编号: DD20189114)

作者简介: 张丰琰, 男, 汉族, 1992年生, 助理研究员, 钻探工程专业, 硕士, 长期从事钻完井技术和工艺研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, zhangfy18@cags.ac.cn。

引用格式: 张丰琰, 李立鑫. 地热井固井水泥石传热性能研究现状及展望[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 54-64.

ZHANG Fengyan, LI Lixin. Research status and prospect of thermal transfer performance of cement in geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 54-64.

0 引言

流体在井筒内流动过程中与等深地层存在温度差,热量会以固井水泥石和套管组成的井筒为传递介质,持续在井筒内热水和地层间传递,从而影响热水出井温度和地热能利用效率。为提高热水出井温度和地热能利用效率,许多学者从提高日产水量、增强抽水管保温性能、优化抽水泵下深等方面^[1-3]进行了技术研究和应用,并取得了一定成果,同时,数千米井筒中套管和水泥环的传热性能也逐渐得到关注^[2,4-5]。在针对套管的研究中,有些学者提出使用填充隔热材料的双层套管或在套管内壁涂隔热涂料^[6]以降低热量在套管上的传递效率,但该类方法虽具一定保温效果,成本却居高不下。相对而言,固井水泥石导热系数易于调节,成本相对较低,可操作性强,且其变化范围广(0.2~3.63 W/(m·K)^[7-8]),也是传热系统传热性能的主要影响因素。

现阶段,固井水泥石导热系数的研究内容主要集中于使用大量实验分析骨架成分、外加材料种类及加量、孔隙率和含水量、测试条件等单因素对导热系数的影响^[4,9-10]。此外,也有少量学者探索使用数值模拟的方法研究水泥石导热系数^[7,11],并将其运用于井筒内流体温度场的计算中,也取得了一定的理论和实践成果^[12-13]。尽管如此,在开展相关研究的过程中依然存在固井水泥石导热系数的测试手段和基础数据互异、影响因素的研究程度低以及研究方法单一等问题。本文根据生产实际,结合文献调研,总结了地热井固井水泥石传热性能研究现状,并针对存在的问题,提出了相应的解决方法。研究认为水泥石导热系数的测试手段和基础数据的统一、Fluent、Ansys 和 COMSOL 等软件进行数值模拟研究的推广,以及水泥石养护条件、内部湿分的变化和保温材料的加入等因素对导热系数的影响规律和机理研究有助于构建一个测试标准统一、研究内容完善和深入、研究方法丰富的固井水泥石导热系数研究体系,为固井水泥石导热系数后续的理论研究及生产实践提供一定的理论支撑。

1 固井水泥石传热性能的作用和在地热生产井中的应用

1.1 固井水泥传热性能的作用

固井水泥石和套管的厚度远小于其直径,此两者组成的井筒传热系统的基本物理模型可简化为两

块平板,因此,其导热系数可利用多层平壁稳定传热模型(见图1)计算。

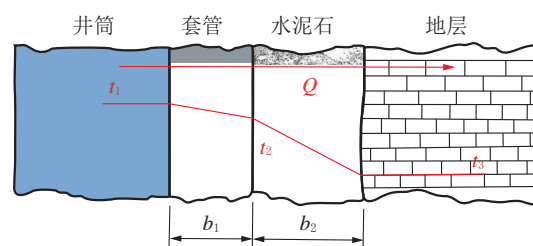


图1 热量在水泥石和套管中传递示意

Fig.1 Schematic diagram of heat transfer in cement paste and casing

多层平壁稳定传热模型中,达到稳态传热时,单位时间内传递的总热量计算公式^[6]为:

$$Q = \lambda_1 A \frac{t_1 - t_2}{b_1} = \lambda_2 A \frac{t_2 - t_3}{b_2} = \lambda A \frac{t_1 - t_3}{b} \quad (1)$$

计算可得井筒传热系统总导热系数为:

$$\lambda = \frac{b \lambda_1 \lambda_2}{b_1 \lambda_2 + b_2 \lambda_1} \quad (2)$$

式中: A ——传热截面积, m^2 ; λ ——套管和水泥总导热系数, $W/(m \cdot K)$; λ_1 ——套管导热系数, $W/(m \cdot K)$; λ_2 ——固井水泥石导热系数, $W/(m \cdot K)$; t_1 ——第一胶结面温度, $^{\circ}C$; t_2 ——第二胶结面温度, $^{\circ}C$; t_3 ——地层温度, $^{\circ}C$; b_1 ——套管壁厚, m ; b_2 ——水泥石壁厚, m ; b ——固井水泥石和套管总厚度, m 。

基于应用实际,取表1中数据用于总导热系数的计算。其中,水泥石导热系数分别取0.5、1.0、1.5和2.0 W/(m·K),水泥石厚度分别取0.02、0.035和0.05 m,套管导热系数分别取10、25和43.5 W/(m·K)^[6,12],结果见图2。

表1 传热系统导热系数计算数据

Table 1 Calculation data of the thermal conductivity of the heat transfer system

$\lambda_1 /$ [W·(m·K) ⁻¹]	$\lambda_2 /$ [W·(m·K) ⁻¹]	b_1 / m	b_2 / m
10~43.5	0.5~2.0	10×10^{-3}	$(20 \sim 50) \times 10^{-3}$

由图2可知,水泥石导热系数与总导热系数均呈线性正相关。水泥石厚度越大,总导热系数越小,且总导热系数受水泥石导热系数影响越小(图2a),同时,套管导热系数的变化对总导热系数的影响可忽略(图2b)。且当水泥石导热系数为0.5 W/(m·

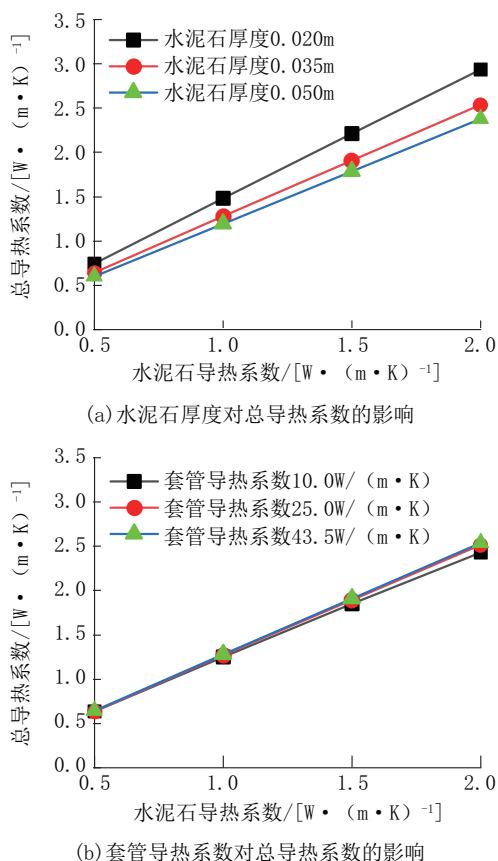


图2 不同水泥导热系数下的总导热系数

Fig.2 Total thermal conductivity at different thermal conductivity of cement

K)、厚度为 0.05 m 或导热系数为 $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、厚度为 0.02 m 时,总导热系数分别为 $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。因此,相较于套管导热系数,水泥导热系数的变化更能显著改变井筒传热系统的总导热系数,说明水泥导热系数是井筒传热系统传热能力的主要影响因素。

1.2 在地热生产井中的应用

对于热水抽采型地热井,当地层中的流体进入地热抽采井井筒后,在抽采泵的抽吸力和地层压力双重作用下流体沿套管向上流动。由于井筒内热水与等深地层间温差的存在,热量会以水泥石和套管为介质从高温热水向低温地层传递,导致热水热量损失,同时温度降低^[2-3]。随着地热流体流经几千米井筒,热水热量损失越来越大,最终导致井口温度较井底显著降低^[14],使用效率也受到一定影响^[15-18]。因此,若能降低整个井筒内水泥石导热系数,则能有效减少井筒内热水的热量损失,提高热水出井温度,

达到显著增加地热能利用效率的目的。

对于地热同轴型换热系统,当流体从环空注入,井筒上部热水温度高于地层温度,热水向地层传递热量^[19];在井筒下部,热水温度低于地层温度,热量持续由高温地层传递到低温热水;当热水在抽水管中向上流动时,其温度高于环空中流体温度,热量由抽水管内热水向环空中流体传递,降低抽水管内热水出井温度^[20]。因此,若能降低井筒上部水泥石导热系数,同时提高井筒下部水泥石导热系数,则能有效降低热水在井筒上部的热损失和提高在井筒下部地层向井筒热水传递热量的效率,降低抽水管内热水的热量损失,实现提高热水出井温度和地热能利用效率的目标^[21-22]。因此,根据生产实际需求,选择性地调整地热井固井水泥石的导热系数可有效提高热水出井温度,增加地热能开发利用效率^[23]。

2 地热井固井水泥石导热系数研究现状

2.1 测试手段

固井水泥石导热系数的研究尚处于初级阶段,并无统一、规范和适合该行业的测试手段。目前,出于为科研创造便利条件的初衷,学者们在解决水泥石导热系数的测试难题时,多参考建筑水泥导热系数测试标准,并依据实际需求,利用所持设备来实现固井水泥石导热系数的测量。现阶段固井水泥石的测试方法主要为瞬态法,具体为采用瞬态平面热源法和瞬态热线法实现导热系数的测量(表2),然而,不同学者在使用该方法时选择的样品尺寸相差较大,导致纯水泥石的导热系数也不尽相同。

地热井成井后,由井筒内流体与地层间温差作用导致的热量传递现象也会改变水泥石内水分分布^[4]。瞬态法虽能有效提高导热系数测试效率和节省制样时间,但无法真实模拟热量在水泥石内流动导致的湿分布变化,因而测试的导热系数并非水泥石内湿分布再次平衡后的真实导热系数^[24]。此外,瞬态法的测试结果也存在易受测试条件和样品均质程度等因素的影响的事实,同时,该方法更适合测试中高导热系数材料的优势也与固井水泥石导热系数相对较低的实际情况不匹配。所以,该方法不完全适用于固井水泥石导热系数的测量。

2.2 影响因素

水泥石组构是影响其导热系数的直接因素,包括水泥石骨架成分、外加材料、微观结构、含水量等,

表2 现有水泥石导热系数测试方法

Table 2 Existing test methods for thermal conductivity of cement paste

序号	测试方法	水泥石尺寸 (长×宽×高)/ mm	纯水泥石导 热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]
1	瞬态平面热源法 ^[9]	50×50×50	1.10
2	瞬态平面热源法 ^[4]	70×70×20	0.86
3	瞬态热线法 ^[25]	25×50	0.82
4	稳态保护热板法 ^[26]	300×300×40	0.54
5	瞬态热线法 ^[27]	50×100×50	0.70
6	瞬态平面热源法 ^[28]	50×50×50	0.86
7	瞬态热线法 ^[29]		
8	瞬态热线法 ^[30]		0.81
9	瞬态平面热源法 ^[31]		1.41(含湿)

此外,各因素之间还会互相影响^[32]。其中,水泥石骨架是导热系数的首要影响因素^[33]。另外,水泥石导热系数还会因测试条件的变化呈现不同程度的差异^[34-35]。

2.2.1 水泥石骨架

固体是热的良导体,水泥石骨架为其体积的最重要组成部分,是热量的主要传递介质,是影响固井水泥石导热系数的首要因素^[36-37]。

目前,关于水泥石骨架成分^[38]对其导热系数影响的研究相对较少。QOMI等^[39]研究了确定组分的随机排列、不同组分的导热能力差异对导热系数的影响。在此基础上,方姚等^[4]用实验证明了随着水泥石养护龄期的增加,越来越多的水泥颗粒和自由水反应生成导热系数相对较小的水化硅酸钙和氢氧化钙,导致水泥石组分发生变化,水泥石整体导热系数减小。此外,陈驰等^[40]确定了热量在水泥石内的传递路径具有复杂多样的特性,且热量在各区域传递效率参差不齐,而此2种因素均会导致导热系数的较大变化。同时,ICHIM等^[23]研究发现不同水泥石类型、外加材料(硅粉、膨润土等)和水灰比都会对水泥石骨架成分和传热规律产生影响,导致其导热系数发生变化。

2.2.2 外加材料

外加材料的引入是改变固井水泥石导热系数最常见的方法,也是水泥石导热系数研究最多的内容。

外加材料对固井水泥石导热系数的影响研究是在借鉴建筑水泥、岩石等多种多孔材料导热系数的

研究经验上开展的,大量实验证明了高效导热材料,例如石墨^[29]、金属粉(铁粉、铜粉、球形氧化铝粉、氧化硼^[9,41])、石英^[42-43]、碳基填料^[44]等,能明显加快热量在水泥石内传递速度,等效缩短热量传递路径,增加单位时间内水泥石传递的总热量,实现提高水泥石导热系数的目标^[28](图3)。SONG等^[25]研究了石墨、铁和铜的加入对水泥石导热系数和抗压强度的影响规律和机理,并优选出各种材料的最优加量。WANG等^[26]研究发现,金属类和石英等外加材料对水泥浆体水灰比影响相对较小,在一定范围内,水泥石导热系数和抗压强度均随该类材料加量增加而得到提高。在上述研究基础上,方姚等^[4]在优化导热材料粒径和形状的过程中,发现等体积下球体材料比正方体差,外加材料粒径的减小有助于提高水泥石传热能力,最终将水泥石导热系数提高至1.87 W/(m·K),远高于纯水泥浆的导热系数[0.9 W/(m·K)]。目前,导热材料的使用虽能有效提高水泥石导热系数,为提高井筒内流体与地层的热交换量和同轴型换热系统取热效率提供了技术支撑,但已取得的成绩与水泥石导热系数上限[3.0 W/(m·K)以上^[8]]依然有很大距离。因此,高导热水泥仍具有广阔的发展前景。

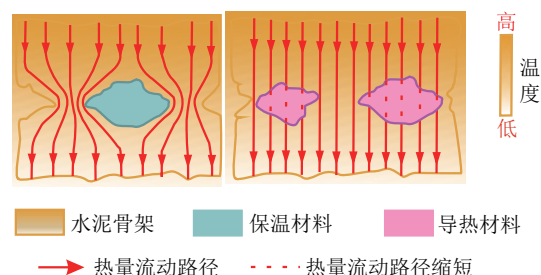


图3 外加材料对热量传递路径的影响

Fig.3 Effect of additives on the heat transfer path

低导热水泥(保温水泥)的保温机理与高导热水泥相反,保温材料的加入能有效延长热量在水泥石内传递路径,减小单位时间内水泥石传递的总热量,达到降低水泥石导热系数的目的(图3)。然而,其研究程度远不及高导热水泥。现阶段,保温水泥仍处于概念阶段^[2,23,45],仅停留在一些理论上的分析与建议,例如提高水泥浆的水灰比、增加气体占比能有效降低水泥石导热系数等。

2.2.3 微观结构

一般而言,孔隙分布和孔隙形状决定水分和空

气的细观分布、联通情况以及对流传递路径,是影响水泥石导热系数的重要因素之一^[46-47]。

MIDTTOMME等^[48]研究了孔隙度大小与导热系数的关系。基于此,TAVMAN^[49]和FUCHS等^[50]探究了一定孔隙度下孔隙尺寸对导热系数的影响,并发现平均孔隙越小,孔隙表面积越大,热量传递路径越长,水泥石导热系数越小。此外,WU等^[51]和MIAO等^[52]通过模拟计算和实验数据验证了热量在双重孔隙介质中的传递机制,证明了孔隙的弯曲和细长程度越高,水泥石导热系数越难改变。

目前关于水泥石微观结构的研究仍主要集中于对其机械性能的影响,涉及水泥石传热性能的研究还相对较少,孔隙尺寸、分布、形态以及连通情况与导热系数的定性和定量关系等都需要开展深入研究。

2.2.4 含水量

水泥石内水分(湿分)对导热系数的影响包括3个方面,即决定最大含湿量的水泥浆水灰比、水泥石含湿饱和度和湿分布,但目前研究主要集中于不同水灰比条件下导热系数的变化对比。研究发现,随着水灰比的增加,水泥石单位体积内湿分占据的体积增加,骨架体积减小,水泥石导热系数降低^[53]。

然而,水灰比只是决定水泥石最大含湿量的因素。水泥浆在环空中完成固结后,决定其导热系数的是水泥石内含湿饱和度和湿分布。目前,固井水泥石的绝大部分测试均为水泥石在完全干燥条件下测量,并不能真实反应水泥石在潮湿地层环境下的含湿导热系数。此外,一定含湿状态下,湿分在水泥石内分布受热量传递的影响^[54]。因此,水泥石含湿饱和度和湿分布也应是水泥石导热系数影响因素的研究重点^[55-57]。

2.2.5 测试条件

温度是影响固井水泥石导热系数最重要的测试条件。一般情况下,不同井深处井筒内外温度绝对值和差值变化较大(图4),易导致不同井深处固井水泥石孔隙内分压力和湿分相变、传递速率等参数相差明显,从而造成水泥石湿分再分布和导热系数的变化。

目前,针对测试温度对水泥石导热系数影响的研究已有一定基础。对于高导水泥,测试温度的升高在促进分子不规则的热运动的同时,热运动也会发生变化消耗热量,会导致水泥浆体在高温下的导热系数低于低温下的导热系数^[25];对于保温水泥,

水泥石骨架主要成分(C-S-H凝胶)是结晶度差的无定形结构,且非晶体导热系数随着温度的升高而升高,而孔隙内液相和气相的导热系数也随着温度的升高而升高,故水泥石的导热系数与测试温度呈正相关性^[58]。

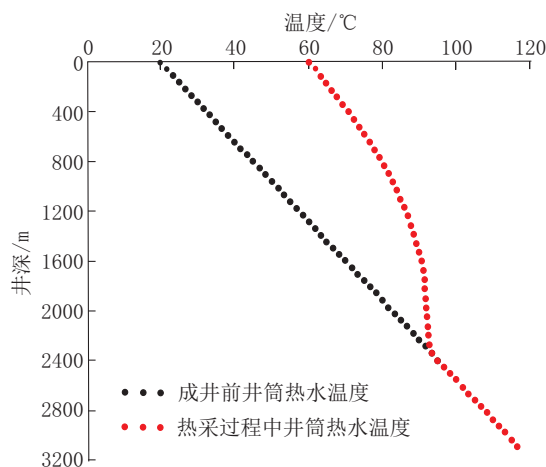


图4 成井前和热采过程中井筒内流体温度剖面^[3]

Fig.4 Fluid temperature profile in the wellbore before well completion and in the pumping process

2.3 数值模拟研究

现阶段,水泥石导热系数的研究仍主要借助实验测试手段,工作量大且可控性相对较差。数值模拟方法虽使用较少但已显现可喜优势。数值模拟方法不仅能定量计算不同含水率、孔隙度和骨架成分下水泥石导热系数^[23],还能模拟不同外加材料比例、颗粒形状和尺寸等因素下固井水泥石的导热系数,研究复合材料对导热系数的影响规律、计算饱和含湿下各水泥石上限导热系数^[4]。数值模拟方法的使用能有效提高研究效率、拓展研究内容、刻画热传递过程,但其使用频率还相对较低,可加大使用程度。

3 固井水泥石传热性能研究展望

3.1 测试方法和基础数据的统一

地热井固井段长度大多为2000 m以上,井筒内流体不断地与地层发生热交换,而水泥石的导热系数是决定井筒内流体热量吸收或损失总量的首要因素^[59],其测量的准确性是研究的首要条件。现阶段,面对固井水泥石导热系数测试手段较多、样品尺寸多样和基础数据差异较大的实际情况,为了高效、

准确研究固井水泥石导热性能,有必要建立一套统一的固井水泥石导热系数测试方法^[60-63]。

稳态法是在水泥石内部温度分布达到稳定后、湿分分布和热流传递达到平衡时测试穿过试样的热流来计算导热系数的测试方法。该方法能真实模拟热量流过固井水泥石后湿分布变化过程,准确测量一定含湿饱和度下固井水泥石内湿分布再次达到平衡时的真实导热系数^[24],主要适用于中等温度下中—低导热系数水泥石的测量,笔者认为其应成为固井水泥石导热系数测试的主要方法。

综上,根据固井水泥石模拟测试条件需求,结合稳态法和瞬态法测试实际,得出以下认识:

(1)当测试水泥石在中低温下的导热系数时,首选稳态法,高温条件下($T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)则需使用瞬态法。

(2)中低温条件下,测试干燥水泥导热系数时,若研究的水泥石导热系数较大,选择稳态法或瞬态法测试均可,若研究的水泥石导热系数相对较小,则选择稳态法测试较为可靠。此2种测试方法皆须统一样品尺寸^[64]。

(3)测试一定含湿饱和度下水泥石导热系数时,选择稳态法。

在使用稳态法测试固井水泥石导热系数的过程中,需尽量参考标准《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》(GB/T 10294—2008)^[65]和《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法》(GB/T 10295—2008)^[66]中对测试环境和样品规格提出的要求。

3.2 湿相变和湿传递

水泥浆在井筒中固化后,基体成分和骨架结构基本确定,此时,湿分是影响其导热系数的最关键要素,主要包括湿分布和湿传递。热量在水泥石内传递时,首先改变水泥石内温度梯度,同时近热面区域液体湿分因温度升高而发生相变,导致孔隙内水蒸气分压力和浓度升高,液相和汽相湿含量发生变化,并在湿分浓度、蒸气分压和温度梯度等驱动势作用下发生热湿传递。湿传递过程中,湿分运动路径受孔缝量、形状、温度等因素影响,但总体遵循扩散理论、毛细流动理论和蒸发冷凝理论等^[67]。传递的湿分受温度影响,逐渐在低温区聚集,水泥石内湿分达到平衡,最终形成低温区含湿量高于高温区含湿量的状态(图5),水泥石导热系数发生改变。因此,井

筒内外一旦有温差的存在,在发生热量传递的同时,还会导致水泥石内湿分布和导热系数发生变化,因此湿相变和湿传递是研究水泥石实时导热系数的重要因素。

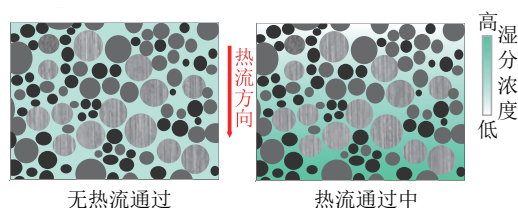


图5 热流通过前后水泥石内湿分布

Fig.5 Moisture distribution in cement paste before and after heat flow

目前,热湿传递理论和实验模拟测试的发展较为完善,在多孔材料内静态湿分布、湿相变和湿传递对导热系数的影响的模拟和评价方面有诸多解决办法。其中,湿分布的模拟可通过浸泡法和恒温恒湿箱法实现^[64,68],湿相变和湿传递的动态过程,以及相关影响因素变动时的导热系数定量预测可借助热湿耦合数值模拟等手段开展^[69]。

3.3 外加材料

3.3.1 高导水泥

水泥浆中高导材料的加入导致的水泥石强度降低是目前高导水泥研究容易被忽略的问题,也是高导水泥研究亟需解决的难题。为了应对此问题,认为可借助大量实验继续筛选高强度、高热导的经济导热材料,并借助数值模拟和实验测试方法进一步优化高导材料体积分数、粒径级配、润湿性和与水泥石结合的紧密程度,达到在保证必须强度的前提下最大程度加快热量传递效率的目的。同时,还可使用固井水泥浆配制时常用的分散剂、消泡剂等提高水泥石强度,增加高导材料的加量。

3.3.2 保温水泥

保温水泥的研究方法和高导水泥类似,主要通过向水泥中添加保温材料或气体,例如中空玻璃微珠、漂珠、膨胀珍珠岩、空气/惰性气体等,或在保证强度前提下提高水灰比,达到有效延长水泥石内热量传递路径的目的,从而降低导热系数,如图2所示。

与高导材料添加后水泥石强度先增加后降低不同,保温材料的加入会明显降低水泥石导热系数,因

为保温材料的抗压强度普遍不高,且材料的加入降低了水化硅酸钙间的有效连接。在应对这个难题时,有如下几种解决方法:(1)选择高性价比高强度和高保温效果的保温材料(如高强度微珠)^[70];(2)尽可能降低保温材料粒径,同时提高水泥石抗压强度和保温性能^[71-73];(3)增强保温材料在水泥浆内的分散能力(使用分散剂或改善其表面润湿性)或降低水灰比,提高水泥石强度和保温性能。

3.4 养护条件

一般情况下,地热井为三开井或四开井结构,每个开次的地层温差跨度均较大,因而同一开次内水泥浆的硬化温度也差异较大。与此同时,水泥石水化产物是养护温度和养护时间共同作用的结果,且养护温度决定水化产物的类型,水化时间决定产物的数量。鉴于水泥石固体骨架是热传递的主要介质,因此不同深度水泥石在硬化后的一定时间内其水化产物也有所差别。

到目前为止,前人在养护条件对水泥石的影响方面的研究内容主要集中在强度性能上,涉及导热系数的研究相对较少,且研究深度也较浅。基于研究结果,普遍认为养护时间的延长会提高水泥石内水化硅酸钙的含量,从而降低其导热系数^[4,74],养护温度的增大也会提高水泥石内水化硅酸钙的含量,但尚缺少养护条件和水泥石导热系数的定量关系的进一步探索,以及高温养护条件下水泥石导热系数的变化规律。

3.5 数值模拟研究方法

受浆体配方、固化条件等因素差异的影响,水泥石组构呈现的复杂性和随机性易导致其多孔结构和孔隙填充难以评估,这是制约水泥石热导率研究进展的最主要因素之一^[47]。数值模拟具有效率高、成本低、精度高等特点,已被广泛应用于建筑水泥导热系数计算、井筒—地层热损量计算等领域。该方法的引入能为固井水泥石导热系数的定性、定量计算和预测提供可靠方法,大大提高研究效率和丰富研究内容。

与此同时,多孔介质热传递理论与模拟计算经验证明,现有的商业软件(Fluent、Ansys和COMSOL等)能提供丰富的物理模型搭建平台和介质热交换计算模型,全面、准确模拟热量在水泥石内传递特征和规律,以获得水泥石的稳态导热系数。其中,Fluent软件在模拟孔隙率、平均孔径、外

加材料加量等方面对导热系数的影响具有独特优势^[75-76],此外,其在模拟水泥石内湿分流动和湿分与固体间热量传递方面也具有优势;模拟无湿相变情况下热量在水泥石内传递运动过程和规律^[77-79]、揭示水泥石保温/导热机理等方面是Ansys软件的强项;COMSOL软件的多场双向直接耦合分析能力能较好实现水泥石内热湿耦合传递的传输过程模拟,计算热湿耦合下湿相变和湿迁移引起的附加导热系数,探究环境温度、时间等因素对水泥石样品中湿迁移影响^[34,69,80],实现精确计算和高效研究水泥石导热系数的目的。此外,上述软件还能高效模拟井筒中热水流动与液固传热,从工程角度指导水泥石传热性能的优化。

鉴于数值模拟方法的优势,认为在开展相关研究内容的过程中可依据研究需求选择合适模拟软件,全面、准确模拟热量在水泥石内传递特征和规律,定性和定量计算不同水泥石骨架成分、孔隙特征、外加材料、湿分特征以及测试条件下水泥石导热系数,实现精准预测导热系数变化的目的。除此之外,数值模拟方法还能解决实验手段存在的样品特征不可控、测试量繁重的弊端和测试范围有限等难题,达到有效提高研究范围(内容和测试条件)和研究效率的目标。

4 结论

本文通过总结前人研究,借鉴交叉学科研究经验,得到如下结论:

(1)固井水泥石导热系数变化范围广,能有效改变井筒传热效率。可根据生产实际需求,分段改善地热井水泥石导热系数,可有效提高热水出井温度,增加地热能开发利用效率。

(2)固井水泥石导热系数影响因素较多,应进一步确定稳态法测试导热系数的主体地位,考虑养护条件、湿分布的变化和保温材料的加入对导热系数的影响,并加快高导水泥技术的优化。

(3)数值模拟方法在扩展固井水泥石研究的内容、评价条件和效率方面具有独特优势,有助于提高水泥石导热系数研究的全面性和深入程度,建议推广使用。

参考文献(References):

- [1] DAVIS A P, MICHAELIDES E E. Geothermal power produc-

- tion from abandoned oil wells [J]. *Energy*, 2009, 34 (7) : 866-872.
- [2] 李晓益,何汉平,段友智,等.砂岩孔隙型地热井提高热效工艺分析[J].*石油钻采工艺*,2017,39(4):484-490.
LI Xiaoyi, HE Hanping, DUAN Youzhi, et al. Analysis on the thermal efficiency improvement process for geothermal well in porous sandstone [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(4):484-490.
- [3] 朱明,段友智,高小荣,等.地热井热损失影响因素敏感性分析[J].*科技导报*,2015,33(22):32-36.
ZHU Ming, DUAN Youzhi, GAO Xiaorong, et al. Heat preservation suggestion and heat loss analysis of geothermal well [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(22):32-36.
- [4] 方姚,张勇,冉真真.中深层地热井固井导热水泥导热系数研究[J].*材料导报*,2020,34(20):20028-20033,20052.
FANG Yao, ZHANG Yong, RAN Zhenzhen. Thermal conductivity of cementing conductive cement in medium and deep geothermal well [J]. *Materials Review*, 2020, 34 (20) : 20028-20033,20052.
- [5] 杨书港.隔热套管完井工艺设计与现场实践[J].*石油工业技术监督*,2019,35(1):1-4.
YANG Shugang. Thermal insulation casing completion technology design and field practice [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2019, 35(1):1-4.
- [6] 庄纯才.地热井筒热损失工程计算方法研究与应用[D].大庆:东北石油大学,2016.
ZHUANG Chuncai. Research and application of engineering calculation method for geothermal wellbore heat loss [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [7] BAGHBAN M H, HOVDE P J, JACOBSEN S. Analytical and experimental study on thermal conductivity of hardened cement pastes [J]. *Materials and Structures*, 2012, 46, 1537-1546.
- [8] NEVILLE A M. *Properties of Concrete* [M]. Pearson: London, UK, 2011.
- [9] 张浩,徐拴海,杨雨,等.地热井固井材料导热性能影响因素[J].*煤田地质与勘探*,2020,48(2):195-201.
ZHANG Hao, XU Shuanhai, YANG Yu, et al. Influencing factors of thermal conductivity of cementing materials for geothermal wells [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48 (2) : 195-201.
- [10] ICHIM A, TEODORIU C, FALCONE G. Influence of cement thermal properties on wellbore heat exchange [C]//41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, California: 2016.
- [11] KRAUSE P. Thermal conductivity of the curing concrete [J]. *Archit. Civ. Eng. Environment. Journal*, 2008, 1: 67-74.
- [12] 李瑞霞,王高升,宋先知,等.固井水泥对同轴型换热系统取热效果影响数值分析[J].*建筑科学*,2018,34(4):36-40.
LI Ruixia, WANG Gaosheng, SONG Xianzhi, et al. Numerical analysis of the effect of cement sheath on the heat extraction performance of coaxial borehole heat exchangers geothermal system [J]. *Building Science*, 2018, 34(4):36-40.
- [13] AKTHAR F K, EVANS J R G. High porosity (90%) cementitious foams [J]. *Cement Concrete Research*, 2010, 40 (2):352-358.
- [14] HASAN A R, KABIR C S. Fluid flow and heat transfer in wellbores [J]. *Society of Petroleum Engineers, Texas*, 2002: 64-73.
- [15] 宋绵,龚磊,王新峰,等.阜平县地热水化学特征及结垢腐蚀性研究[J].*地质论评*,2020,66(S1):146-148.
SONG Mian, GONG Lei, WANG Xinfeng, et al. Study on chemical characteristics and scale corrosion of geothermal water in fuping county [J]. *Geological Review*, 2020, 66 (S1) : 146-148.
- [16] AKPAN A E. Estimation of subsurface temperatures in the Tattapani Geothermal Field, Central India, from limited volume of magnetotelluric data and borehole thermograms using a constructive back-propagation neural network [J]. *Earth Interactions*, 2014, 18:1-26.
- [17] GORMAN J M, ABRAHAM J P, SPARROW E M. A novel, comprehensive numerical simulation for predicting temperatures within boreholes and the adjoining rock bed [J]. *Geothermics*, 2014, 50:213-219.
- [18] WU B, ZHANG X, JEFFREY R G. A model for downhole fluid and rock temperature prediction during circulation [J]. *Geothermics*, 2104, 50:202-212.
- [19] 齐迪.井筒换热型地热井产出温度影响因素及预测研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.
QI Di. Study on influencing factors and prediction of output temperature in wellbore heat-exchange geothermal well [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [20] EBRAHIMI, MAHYAR, TORSHIZI, et al. Optimization of power generation from a set of low-temperature abandoned gas wells, using organic Rankine cycle [J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2012, 4(6):866-872.
- [21] SONG Xianzhi, WANG Gaosheng, SHI Yu, et al. Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole heat exchanger geothermal system [J]. *Energy*, 2018, 64, 1298-1310.
- [22] SONG Xianzhi, ZHENG Rui, LI Gensheng, et al. Heat extraction performance of a downhole coaxial heat exchanger geothermal system by considering fluid flow in the reservoir [J]. *Geothermics*, 2018, 76:190-200.
- [23] ICHIM A, TEODORIU C, FALCONE G. Estimation of cement thermal properties through the three-phase model with application to geothermal wells [J]. *Energies*, 2018, 11 (10) : 2839.
- [24] 马超.多孔建筑材料内部湿分布及湿传递对导热系数影响研

- 究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- MA Chao. Research on effect of moisture distribution and transfer on thermal conductivity of porous building materials[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [25] SONG Xianzhi, ZHENG Rui, LI Ruixia, et al. Study on thermal conductivity of cement with thermal conductive materials in geothermal well[J]. *Geothermics*, 2019,81:1-11.
- [26] WANG Sheng, JIAN Liming, SHU Zhihong, et al. A high thermal conductivity cement for geothermal exploitation application[J]. *Natural Resources Research*, 2020,29:3675-3687
- [27] WON J, LEE D, NA K, et al. Physical properties of G-class cement for geothermal well cementing in South Korea[J]. *Renewable Energy*, 2015,80:123-131.
- [28] 杨雨,徐拴海,张浩,等.填料对地热井固井材料导热性能的影响[J].*煤田地质与勘探*,2020,48(5):182-189.
- YANG Yu, XU Shuanhai, ZHANG Hao, et al. Effect of thermally conductive filler on thermal conductivity of cementing materials in geothermal wells[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020,48(5):182-189.
- [29] PASCUAL-MUÑOZ P, INDACOECHEA-Vega I, ZAMORA-BARRAZA D, et al. Experimental analysis of enhanced cement-sand-based geothermal grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018,185(10):481-488.
- [30] 段云星,杨浩.固井界面接触热阻对井筒温度场预测的影响[J].*科学技术与工程*,2020,20(28):11539-11547.
- DUAN Yunxing, YANG Hao. Influence of thermal contact resistance of cementing interface on prediction of wellbore temperature field[J]. *Science technology and engineering*, 2020,20(28):11539-11547.
- [31] 贾子龙,郑佳,郭艳春,等.岩石地层条件下回填料对地埋孔换热能力的影响[J].*城市地质*,2020,15(4):410-414.
- JIA Zilong, ZHENG Jia, GUO Yanchun, et al. Influence of backfilling materials on the heat transfer capacity of buried hole under the lithostratigraphic condition [J]. *Urban Geology*, 2020,15(4):410-414.
- [32] MIDTTOMME K, ROALDSET E. The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts[J]. *Petroleum Geoscience*, 1998,4(2):165-172.
- [33] 杨淑贞,张文仁,李国桦,等.柴达木盆地岩石热导率的饱水试验研究及热流校正[J].*岩石学报*,1993(2):199-204.
- YANG Shuzhen, ZHANG Wenren, LI Guohua, et al. Experimental research on the thermal conductivity of water-saturated rocks and correction to the heat flow observed in Caidam Basin [J]. *Acta Petrological Sinica*, 1993(2):199-204.
- [34] 王祥.基于水泥基的保温隔热墙体材料研究与应用[D].合肥:安徽理工大学,2010.
- WANG Xiang. Research and application of thermal insulation wall material based on cement[D]. Hefei: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [35] WIKTORSKI E, COBBAH C, SUI Dan. Experimental study of temperature effects on wellbore material properties to enhance temperature profile modeling for production wells [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 176: 689-701.
- [36] ABDULAGATOVA Z, ABDULAGATOV I M, EMIROV V N. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009,46(6):1055-1071.
- [37] 王世芳,吴涛.多孔介质有效热导率的一种新模型[J].*工程热物理学报*,2016,37(12):2626-2630.
- WANG Shifang, WU Tao. A new fractal model for the effective thermal conductivity of porous media[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016,37(12):2626-2630.
- [38] 王成文,王瑞和,步玉环,等.深水固井水泥性能及水化机理[J].*石油学报*,2009,30(2):280-284.
- WANG Chengwen, WANG Ruihe, BU Yuhuan, et al. Properties and hydration mechanism of deepwater cementing system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009,30(2):280-284.
- [39] QOMI M J A, PELLENQ R. Physical origins of thermal properties of cement paste[J]. *Phys. Rev. Applied*, 2015.
- [40] 陈驰,朱传庆,唐博宁,等.岩石热导率影响因素研究进展[J].*地球物理学进展*,2020,35(6):2047-2057.
- CHEN Chi, ZHU Chuanqing, TANG Boning, et al. Progress in the study of the influencing factors of rock thermal conductivity[J]. *Progress in Geophysics*, 2020,35(6):2047-2057.
- [41] BLÁZQUEZ C S, MARTÍN A F, NIETO I M, et al. Analysis and study of different grouting materials in vertical geothermal closedloop systems [J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 1189-1200.
- [42] 蒋国盛,郑少军,代天,等.纳米二氧化硅在固井水泥浆中的应用研究进展[J].*钻探工程*,2021,48(1):68-74.
- JIANG Guosheng, ZHENG Shaojun, DAI Tian, et al. Research status of nano-silica application in well cementing slurry [J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(1):68-74.
- [43] BORINAGA-TREVINO R, PASCUAL-MUNOZ P, CALZADA-PEREZ M A, et al. Freeze-thaw durability of cement-based geothermal grouting materials[J]. *Construction & Building Materials*, 2014,55(3):390-397.
- [44] GARNIER B, BOUDENNE A. Use of hollow metallic particles for the thermal conductivity enhancement and lightening of filled polymer [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, 127:113-118.
- [45] 赵进.江苏油田保温水泥浆技术可行性探讨[J].*内蒙古石油化工*,2020,46(11):86-88.
- ZHAO Jin. Discussion on feasibility of thermal insulation cement slurry technology in Jiangsu Oilfield[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2020,46(11):86-88.
- [46] BRIGAUD F, VASSEUR G. Mineralogy. ntary rocks [J].

- Geophysical Journal International, 1989, 98(3): 525-542.
- [47] BUNTEBARTH G. Thermal properties of KTB—Oberpfalz VB core samples at elevated temperature and pressure; Buntebarth, G Sci Drilling V2, N2-3, P73-80[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 29(4): 219.
- [48] MIDTTOMME K, ROALDSET E. The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts[J]. Petroleum Geoscience, 1998, 4(2): 165-172.
- [49] TAVMAN I H. Effective thermal conductivity of granular porous materials [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1996, 23(2): 169-176.
- [50] FUCHS S, FÖRSTER A. Rock thermal conductivity of Mesozoic geothermal aquifers in the Northeast German Basin [J]. Geochemistry, 2010, 70: 13-22.
- [51] WU Rui, LIAO Qiang, ZHU Xun, et al. A fractal model for determining oxygen effective diffusivity of gas diffusion layer under the dry and wet conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 4341-4348.
- [52] MIAO Tongjun, CHENG Sujun, CHEN Aimin, et al. Analysis of axial thermal conductivity of dual-porosity fractal porous media with random fractures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 884-890.
- [53] 方姚. 面向中深层地热井的固井复合材料性能研究与井下换热过程模拟[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- FANG Yao. Well cementation composites performance research and numerical simulation of underground heat exchange process for mid-deep geothermal well [D]. Nanchang: Southeast University, 2019.
- [54] BECKER R, KATZ A. Effect of moisture movement on tested thermal conductivity of moist materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1990, 2(2): 72-83.
- [55] CHO W J, KWON S, CHOI J W. The thermal conductivity for granite with various water contents[J]. Engineering Geology, 2009, 107(3-4): 167-171.
- [56] QIN Menghao, BELARBI R, AIET-MOKHTAR A, et al. Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings [J]. Automation in Construction, 2009, 18(5): 624-631.
- [57] TAOUKIL D, BOUARDI A E, SICK F, et al. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite [J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(11): 104-115.
- [58] 曹国举, 宫经伟, 蔺元, 等. 水泥石导热系数影响因素研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 94-98, 116.
- CAO Guojun, GONG Jingwei, LIN Yuan, et al. Research on influence factor of thermal conductivity of cement stone[J]. Yellow River, 2020, 42(2): 94-98, 116.
- [59] WON J, CHOI H J, LEE H, et al. Numerical investigation on the effect of cementing properties on the thermal and mechanical stability of geothermal wells [J]. Energies, 2017, 9(12): 1016.
- [60] 易灿, 闫振来, 郭磊. 井下循环温度及其影响因素的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2007(6): 47-49.
- YI Can, YAN Zhenlai, GUO Lei. Numerical simulation of circulating temperature and its impacting parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007(6): 47-49.
- [61] 宋戈. 气井井筒瞬态温度压力耦合模型研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- SONG Ge. Study on coupling model of transient temperature and pressure in gas well bore [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [62] 庞伟, 段友智, 高小荣, 等. 水热型地热井局部完井井段生产研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2015, 30(4): 446-451.
- PANG Wei, DUAN Youzhi, GAO Xiaorong, et al. Research on partial producing of hydrothermal wells [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(4): 446-451.
- [63] 马振喜. 钻井井筒温度场的分析研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- MA Zhenxi. Analysis and research on temperature field of drilling wellbore [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [64] 黄津津. 含湿量对轻质保温混凝土导热系数影响的实验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- HUANG Jinjin. Experimental study on the influence of moisture content on thermal conductivity of lightweight insulating concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [65] GB/T 10294—2008, 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法[S].
- GB/T 10294—2008, Thermal insulation—Determination of steady-state thermal resistance and related properties—Guarded hot plate apparatus[S].
- [66] GB/T 10295—2008, 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法[S].
- GB/T 10295—2008, Thermal insulation—Determination of steady-state thermal resistance and related properties—Heat flow meter apparatus[S].
- [67] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- LIU Wei, FAN Aiwu, HUANG Xiaoming. Theory and Application of Heat and Mass Transfer in Porous Media [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [68] 郭平业, 卜墨华, 李清波, 等. 岩石有效导热率精准测量及表征模型研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1983-2013.
- GUO Pingye, BU Mohua, LI Qingbo, et al. Research progress of accurate measurement and characterization model of ef-

- fective thermal conductivity of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1983-2013.
- [69] 韩晓峰. 多孔建筑材料热湿耦合传递特性的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 中国计量大学, 2017.
- HAN Xiaofeng. Numerical simulation and experimental study on coupled heat and moisture transfer characteristics of porous building materials[D]. Beijing: China Jiliang University, 2017.
- [70] 申娜娜. 空心玻璃微珠轻质高强材料的制备与性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- SHEN Nana. Study on preparation and properties of hollow glass bead light weight and high strength material[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [71] 周建伟, 杨文, 程宝军, 等. 超细粉煤灰和偏高岭土对高强混凝土耐热性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1784-1790.
- ZHOU Jianwei, YANG Wen, CHENG Baojun, et al. Effect of ultra-fine fly ash and metakaolin on heat resistance of high strength concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(6): 1784-1790.
- [72] 王瑞. 超细粉煤灰高强混凝土性能研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2018.
- WANG Rui. Study on properties of ultra fine fly ash high strength concrete[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [73] 刘静静, 李远兵, 李亚伟, 等. 隔热材料的热导率与孔径分布的相关性研究[J]. 耐火材料, 2016, 50(5): 335-339.
- LIU Jingjing, LI Yuanbing, LI Yawei, et al. Correlation of thermal conductivity and pore size distribution of insulating refractories[J]. Refractories, 2016, 50(5): 335-339.
- [74] 习雨同. 泡沫混凝土气孔结构与性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- XI Yutong. Research on pore structure and properties of foam concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [75] 崔玉理, 贺鸿珠. 温度对泡沫混凝土性能影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 120-123, 130.
- CUI Yuli, HE Hongzhu. Effect of temperature on performance of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 120-123, 130.
- [76] 朱静. 中深层地热井底部液固流动与传热强化研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- ZHU Jing. Study on liquid-solid flow and heat transfer enhancement at the bottom of medium-deep geothermal wells[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [77] 石司琴. 钢渣泡沫混凝土保温性能研究[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2016.
- SHI Siqin. Research on thermal insulation performance of steel slag foamed concrete[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2016.
- [78] 张婵韬. 玻化微珠保温砂浆导热系数模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- ZHANG Chantao. Study on thermal conductivity model of hollow beads insulating mortar[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [79] 代丹丹. 超轻发泡水泥保温板孔结构与性能关系的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- DAI Dandan. Study on the relationship between pore structure and property of super light foam cement insulation board[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [80] 李康宗. 混凝土中热湿耦合传输试验及数值模拟研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- LI Kangzong. Study on thermal and wet coupling transmission test and numerical simulation in concrete [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019.

(编辑 李艺)