文章编号：0559-9350(2026)02-0245-10

基于人工温度场的土体渗流速度监测理论模型与试验验证

喻葭临[1,2]，宫　浩[3]，程正飞[1,2]，吴永康[3,4]，周剑夫[5]，于玉贞[6]
（1. 中国水利水电建设工程咨询有限公司，北京　100120；2. 水电水利规划设计总院，北京　100120；
3. 北京交通大学 土木建筑工程学院，北京　100044；4. 清华四川能源互联网研究院，四川 成都　610213；
5. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌　443002；6. 清华大学 水利水电工程系，北京　100084）

摘要：土石坝工程中，利用温度实施渗流安全监测的可行性已得到验证。然而，如何基于温度场来定量评估土中流速仍是一个有待解决的问题。鉴于此，本文构建了考虑热-流耦合作用的人工温度场渗流分析模型，采用有限元方法研究不同渗流速度下的降温规律，并结合室内试验进行验证。结果表明：(1)当渗流速度低于 1×10^{-4} cm/s 时，传热过程以热传导方式为主，热对流的影响可忽略；此时，进一步降低渗流速度，对传热过程几无影响。(2)初始温度的选取并不影响其降温规律，后者仅与周围土体中的渗流速度相关。因此，实际工程中应用人工温度场技术开展流速分析时，可不必严格控制其初始温度。(3)降温系数 λ 与渗流速度 v 之间具备单调性，所提指数衰减函数的拟合曲线与孔内水温下降过程吻合良好，可根据人工温度场的降温曲线准确预测土中渗流状态。本研究验证了通过人工温度场确定土中流速的技术可行性，可为土中流速测量提供理论支撑。

关键词：人工温度场；渗流监测；热-流耦合；数值模拟；降温过程；渗流速度
中图分类号：TU411.4　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.3724/j.slxb.20240645

1　研究背景

有效的渗流监测是土石坝安全性态评估的重要手段。在土石坝渗流监测中，通常涉及渗压、水头、水力梯度、渗漏量和渗流速度等主要指标[1-2]。这些指标共同表征了渗流场的分布特征，其中渗压和水头反映渗流场的势能状态，水力梯度驱动孔隙水流动，渗漏量表征总体渗流量，而渗流速度则直接体现局部流体运动的速度和方向。特别是在深厚覆盖层坝基渗流场中，由于地质条件复杂、渗流路径隐蔽，渗流速度对于判断渗流异常(如集中渗漏或管涌)的发生和发展具有关键作用，其能够直观反映土体内部的动态变化和潜在风险。然而，传统监测手段往往难以准确判断深厚覆盖层坝基中的渗流速度，导致对渗流场的全面评估存在不足。传统的土石坝渗流监测手段通常包括测压管、渗压计、水位监测孔、量水堰等[3]。其中，量水堰可实现坝体渗漏量的定量观测，被广泛应用于工程中。该方法对地质条件良好的土石坝渗漏监测效果较好，但对于深厚覆盖层上的土石坝工程，由于坝基渗流的存在，其有效性受到影响。对于测压管、渗压计等渗流监测手段，通常是作为点式仪器在坝体填筑过程中被埋设于坝体内部，具有施工难度高、生存率低、后期维护困难等不足，并且这类监测仪器依赖孔压的测量，难以直观准确地判断土体内部的渗流状况。总体而言，传统的土石坝渗流监测手段在深厚覆盖层土石坝渗流(特别是坝基渗流)监测中仍存在一些挑战。

温度作为流体的天然示踪剂，在裂隙岩体地下水渗流监测、混凝土坝渗流监测、堤坝渗漏监测、渠道渗漏监测等以强透水带渗流为主的工程场景中广泛应用[4-7]。随着测温技术的发展，尤其是分布

收稿日期：2024-10-08；网络首发日期：2026-02-25
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260225.1043.002
作者简介：喻葭临(1980—)，正高级工程师，主要从事高土石坝智能安全评价方法研究。E-mail：yujialin_creei@163.com
通信作者：吴永康(1988—)，教授，博士生导师，主要从事岩土工程数值计算方法研究。E-mail：ykwu@bjtu.edu.cn

式光纤温度传感技术的进步，基于温度场的渗流监测技术表现出明显优势。近年来，诸多研究工作验证了温度场反馈土石坝渗流场的可行性[8-10]。谷艳昌等[11]通过分析土坝温度场与水力梯度、渗流水温、导热系数以及时间等因素的关系，建立了表征土坝渗流场和温度场时空分布的解析模型，并通过室内试验验证了温度场反馈渗流场的可行性。肖衡林等[12]对基于分布式光纤测温的渗流监测技术进行了理论和试验研究，认为利用温度来监测渗流场具有可行性，并定性研究了温升与流速的关系。何宁等[13]利用原位试验验证了分布式光纤测温监测堤坝渗流的可行性，并指出采用加热法能提高监测的敏感性。Chen等[14]提出了一种基于渗流场与温度场耦合效应的原位加热式点热源渗流监测方法，并对渗流识别效果进行了评估。Radzicki等[15]提出了一种多点原位加热式渗流监测方法，并在波兰某土石坝工程中进行了应用。Ghafoori等[16]将分布式光纤测温技术应用于评估大坝首次蓄水时的浸润线变化。Bekele等[17]通过物理和数值实验证实了利用分布式光纤监测温度滞后时间变化来检测土中渗流异常的可行性。

从技术应用角度来看，将分布式光纤测温技术用于土石坝渗漏探测，主要有“非加热式”和“加热式”两种类型[18]。前者[11,19]通过分布式光纤来监测土体温度的变化，进而根据温度波动来定性判断渗流状态是否发生变化(如发生异常渗流)。其主要弊端在于难以实现对土体中渗流速度的定量分析。后者[12,20-21]则使用电热源(如电加热式光纤或辅助加热装置)在坝体内产生定量的热扰动，并通过建立加热功率、温度变化速率、渗流流速等指标间的关联关系实现对渗流状态的估计，但其实际应用效果不甚理想。此外，这类监测技术需在大坝填筑过程中埋设相关线缆，工后布设和维护难度较大，且成本高，难以应用于既有结构；加热模块对供电系统的功率及线缆承载力有较高要求。总体而言，近年来利用温度对土石坝中的渗流实施监测的相关技术有了较快的发展，但仍集中于可行性及定性研究。

近年来，我国西南部地区有越来越多的高土石坝修建于深厚覆盖层地基上，如阿尔塔什水电站(覆盖层深164.8 m)、泸定水电站(覆盖层深148.6 m)、苏洼龙水电站(覆盖层深91.2 m)等。相较一般工程，这类工程中坝基异常渗流的隐蔽性更高，监测难度也更大，现有渗流监测技术距可靠实用化仍有一定距离。其中，泸定水电站曾在建成运行后发生坝基异常渗漏问题，下游河道涌水量达到200 L/s以上。但受限于当前的渗流监测手段，工程的早期渗流安全预警和后期渗漏治理均面临很大挑战。如何实现精准有效的渗流安全监测目前仍然是这类工程所面临的关键技术难题。

鉴于此，本文对土体渗流-传热耦合作用下的渗流速度监测方法进行研究，提出了一种基于人工温度场的渗流监测理论模型，即在土体(如坝体下游侧覆盖层)中布置半封闭竖直监测管，通过将管内水置换为与周围环境具有一定温差的水，并监测其温度变化过程，实现对土体渗流速度的定量分析。为揭示渗流速度与温度场之间内在关系，构建了考虑热-流耦合作用的渗流分析模型，进而采用有限元方法研究不同渗流速度下的监测孔降温规律，并通过室内试验进行了验证，为土中流速的定量分析提供了理论支撑。该技术可克服现有监测方法的不足，具有布设灵活、易于维护、结构简单、理论清晰等特点。与现有研究相比，本文的特色在于：(1)提出一种非原位加热式渗流监测技术，通过单孔降温曲线实现渗流速度的定量分析，避免了传统加热法对复杂供电系统的依赖，且适用于既有结构、易于维护；(2)构建热-流耦合模型并推导指数衰减函数，建立降温系数与渗流速度的单调映射关系；(3)通过归一化处理证明初始温度不影响降温规律，大幅降低现场操作难度。上述成果可为深厚覆盖层土石坝的隐蔽渗流监测提供初步理论支撑，并为未来实用化解决方案奠定基础。

2　渗流监测模型与数值模拟方法

2.1　基于人工温度场的渗流监测模型介绍　深厚覆盖层上的土石坝工程中，利用温度对渗流实施监测的相关技术，其可行性已经得到了有效的验证。然而，如何通过温度监测来快速的定量评估覆盖层土

体中的渗流状况(特别是流速)，仍是一个有待深入研究的问题。

为实现上述目标，本文构建了如图1(a)所示的考虑热-流耦合作用的基于人工温度场的渗流分析模型，即在土层中设置一温度测量孔(管)，通过向孔内注入与周围土体温度不同的水，来获取不同渗流速度下的孔内温度降温曲线，进而建立降温过程与土中渗流速度的定量关系。该模型可用于近似模拟实际工程中在坝体下游侧覆盖层中布置竖直测温孔后的渗流-传热过程。

图1(b)给出了该分析模型的俯视图。如图中所示，拟采用的计算域尺寸为1 m×1 m，中心位置为竖直测温管，其内径d=8 cm，材质为标准镀锌薄壁钢管。对于该尺寸的计算域，模型边界效应的影响可忽略。测管的材质和尺寸与泸定、苏洼龙等实际工程中布设的竖直测管一致。

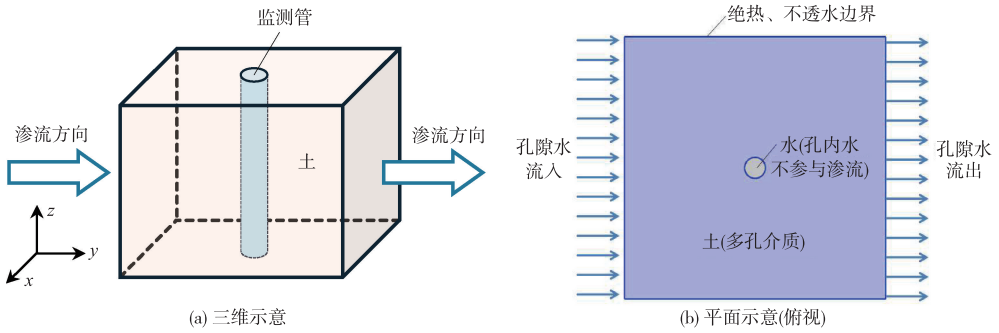


图1　基于人工温度场的渗流监测模型

Fig. 1　Seepage analysis model based on artificial thermal field

2.2　热-流耦合分析理论　基于上述分析模型，采用有限元方法进行热-流耦合分析，研究渗流场影响下土体温度场的演化规律。渗流场和温度场的控制方程分别如下文所述。

2.2.1　*渗流控制方程*　考虑饱和土中的渗流，根据质量守恒条件，可得到孔隙水的连续性方程[22-23]：

$$\frac{\partial(n\cdot\rho)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u)=Q_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中：ρ为孔隙水的密度；n为土体的孔隙率；u为渗流速度；Q_{m}为单位时间内单元体内净流入的水量；∇为微分算子。本研究中，可忽略孔隙水密度和土体孔隙率的变化。渗流速度u可按达西定律确定。

2.2.2　*温度场控制方程*　热量的传递包括三种基本形式，即热传导、热对流和热辐射[24]。在土石坝工程中，渗流通常发生于坝体和坝基内部，因此可认为渗流作用下的多孔介质热传递过程仅包括热传导和热对流两部分，而忽略热辐射对内部温度场的影响是可以接受的[18]。

对于多孔介质中的传热过程，在微观层面上，液相与固相之间的相互作用对于理解热量如何在多孔介质中传递至关重要，这一过程不仅涉及固体骨架与流体(即孔隙水)之间的热交换，还包括流体内部及流体与固体骨架之间的对流换热。在建立多孔介质中热量传递的基本方程时，目前通常有两种假设[25]：局部热平衡假设和局部非热平衡假设。局部热平衡假设认为，在多孔介质的每一个局部体积单元中，固体骨架和流体之间能够瞬时达到热平衡，即它们具有相同的温度；而局部非热平衡假设认为，在多孔介质的每一个局部体积单元中，固体骨架和流体之间可能存在温度差，即它们的温度不一定相同。二者的适用范围不尽相同，此处不再赘述。对于渗流作用下的土体传热过程，由于土体骨架及孔隙水的导热率均相对较高，且渗流速度较慢，两相易达到热平衡状态。因此，在这些条件下，固体骨架和流体之间的温度差可以忽略不计，从而简化计算模型。

在假设局部热平衡条件下，只需一个方程即可描述整个(固体和流体)多孔结构的平均温度。根据傅里叶定律和能量守恒定律，热传导控制方程为[26]：

$$(\rho c_{\mathrm{p}})_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_{\mathrm{f}}C_{\mathrm{p,f}}u\nabla\cdot T=\nabla\cdot(k_{\mathrm{eff}}\cdot\Delta T)+Q \tag{2}$$

式中：T为土体瞬态温度；t为时间；k_{eff}和$(\rho c_{\mathrm{p}})_{\mathrm{eff}}$为土体的有效导热系数和有效体积热容，可取固体和流体两相的体积平均值；Q为内热源的发热量；ρ_{f}为流体密度；$c_{\mathrm{p,f}}$为液相的恒压热容；u为渗流场的流速。公式左侧第一项为微元体温度变化对应的热能增量；第二项为流体渗流传热量；右侧第一项为傅里叶导热的热流；第二项为微元体内部热源。

2.3　数值模型及试验方案　基于上述渗流场和温度场的控制方程，本文采用有限元方法开展考虑渗流作用的多孔介质热-流耦合分析，以揭示不同流速下土体传热规律。有限元计算模型和试验方案如下所述。

2.3.1　*模型概况*　上述渗流监测模型属于平面问题，将图1(b)所示计算域进行离散，得到图2所示的有限元网格。为保证计算精度，有限元网格均使用四边形单元，单元数为10 866、结点数为11 067。网格中，圆孔外矩形区域的材料为土，圆孔内的区域为水。表1给出了计算时所采用的液相(即水)和固相(即土骨架)的材料参数。其中，土的参数值参照粉土的常见取值范围确定。

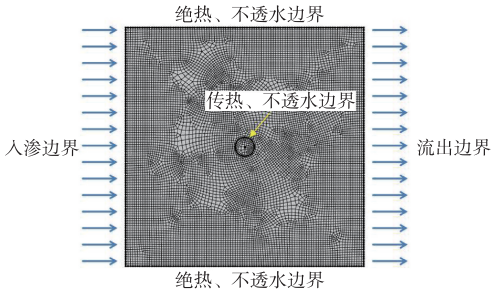


图2　热-流耦合分析中使用的有限元网格

Fig. 2　Finite element mesh used in the thermal-flow coupling analysis

表1　模型中使用的计算参数

Table 1　Parameters used in the model

参数	土	水	管壁
渗透系数k/(cm/s)	1×10^{-4}		
密度ρ/(kg/m^3)	1300	1000	7850
孔隙率n	0.4		
导热系数k_{f}/(W/(m·K))	1.2	0.6	60
定压比热容c_{p}/(J/(kg·K))	1000	4180	450

如图2所示，在矩形计算域的外边界设置了相应的边界条件：左侧为水流入渗边界，右侧为水流出渗边界，上下侧均为不透水、绝热边界。此外，圆孔边界设置为不透水、仅传热的边界，用于模拟实际工况中温度测量孔与周围土体的传热过程。

2.3.2　*计算方案*　使用有限元方法对土体在渗流影响下的传热过程进行数值模拟，主要包含两个计算步。

步骤1：土体初始温度为20 ℃，使温度为10 ℃的水由左侧边界入渗，由右侧边界出渗。在渗流场作用下，土体将逐渐达到热平衡状态。这一过程模拟了实际工况下土体在上游库水的渗流作用下，逐渐降温并达到稳定(即10 ℃)的过程。

步骤2：在步骤1所得到的稳态渗流场和温度场基础上，将孔内水置换为60 ℃的热水，并分析土体和孔内水的温度演化过程。这一过程模拟了实际工况中通过置换监测孔内水，并观测其温度变化规律来反映土体渗流场特征的技术方案。

为了研究不同渗流场流速条件下温度场的变化情况，本文共开展了8个不同流速水平下的热-流耦合分析，渗流速度涵盖多个数量级，分别为：1×10^{-5}、1×10^{-4}、1×10^{-3}、1×10^{-2}、5×10^{-2}、1×10^{-1}、5×10^{-1}和1 cm/s。

3　热-流耦合计算结果分析与讨论

3.1　温度场分布特征　图3绘出了典型渗流速度(即1×10^{-2} cm/s)下温度场随时间的变化过程。图中t=0对应于完成60 ℃水置换的时刻，此时除孔内水的温度较高外，其他区域的温度均处于10 ℃。随着时间的推进，孔内水温逐渐降低，孔内热量向周围土体传递，但受到自左向右的渗流作用，孔内热量并非均匀地向四周传递，而是以沿渗流方向为主，沿其他方向的热量扩散并不显著。上述结果表明，在此渗流条件下，传热过程受“热对流”的影响比较显著。

图4绘出了另一典型渗流速度(即1×10^{-5} cm/s)下温度场随时间的变化过程。如图所示，其温度场

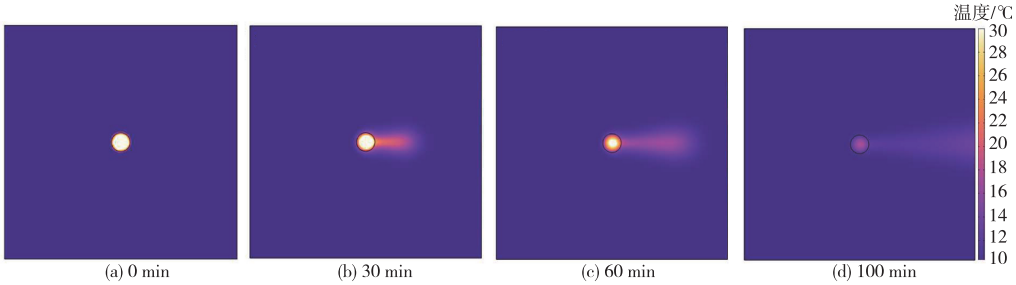


图3　渗流速度为1×10^{-2} cm/s情况下不同时刻的温度场分布

Fig. 3　Temperature distribution at different times under a seepage velocity of 1×10^{-2} cm/s

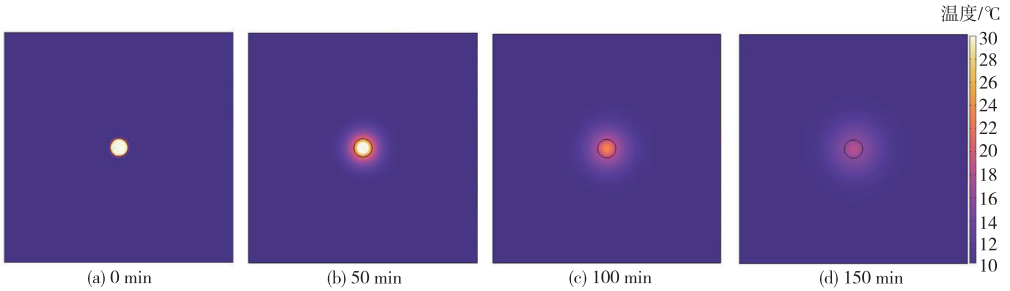


图4　渗流速度为1×10^{-5} cm/s情况下不同时刻的温度场分布

Fig. 4　Temperature distribution at different times under a seepage velocity of 1×10^{-5} cm/s

变化过程与图3具有明显的差别。此时，土体温度变化受渗流影响较小，孔内热量大致均匀地向四周土体传递，随着时间推进，土体温度和孔内水温逐渐降低，最终将稳定到10 ℃。该结果表明，由于渗流速度较小，热对流可忽略，此传热过程由“热传导”所主导。随着时间的推进，土体温度与孔内水温逐渐下降，最终稳定到10 ℃。

3.2　降温曲线的基本规律　如前文所述，随着时间的推进，孔内热量向周围土体传递，孔内水温逐渐降低。在此传热过程中，孔内的热水并不参与周围土体的渗流，二者之间界面仅可传热。实际上，传热过程中孔内水的温度并不是均匀分布的，必然存在一定的梯度，因此如何定量描述孔内温度是首先要解决的问题。在本研究中，为了使温度的表述更具简洁性和代表性，选取了孔内平均温度而非某一点的温度值来作为孔内温度的评价指标，这样能更好的反映孔内热量的整体消散过程。

图5绘出了不同流速条件下孔内水温随时间的变化过程。由于曲线较多，为了更清晰的展示计算结果，并未绘出全部流速下的降温曲线。从图中可以看出，随着时间的推移，孔内温度逐渐降低，并且降温速率逐渐减慢。另外，对比不同流速下的降温曲线可知，流速对降温过程会产生比较明显的影响：当流速较高时，降温曲线初段更陡，降温过程更快；反之亦然。显然，在更高的渗流速度下，孔隙水可以更快将孔中热量带走。

孔内水温初始为60 ℃，最终温度为10 ℃。为进一步对比不同流速下的降温过程，分别总结不同流速条件下，孔内水温降低90%、70%和50%所需的时间，并绘于图6中。如图所示，3条曲线中降温所需时间均与流速成反比。以降温90%(即将至15 ℃)的曲线为例，当流速为1×10^{-4} cm/s时，所需时间为180 min，而当流速为0.1 cm/s，降温所需时间仅约为50 min。另一方面，当流速大于5×10^{-1} cm/s时，冷却速度趋于极限，当流速进一步加大时，孔内水降温时间无明显变化。当流速小于1×10^{-4} cm/s时渗流对降温过程影响较小，此时传热过程主要为热传导，热对流可以忽略。

3.3　孔内初始水温对降温过程的影响规律　在前文的计算中，孔内水的初始温度均为60 ℃。考虑到实际工况中孔内初始水温的精确控制问题，为保证该测量技术对于不同初始温度条件的可实施性，有必要研究初始温度对降温过程的影响规律。

除前文所述初始水温为60 ℃的降温过程外，本文进一步计算了初始水温为40和25 ℃的传热过程，

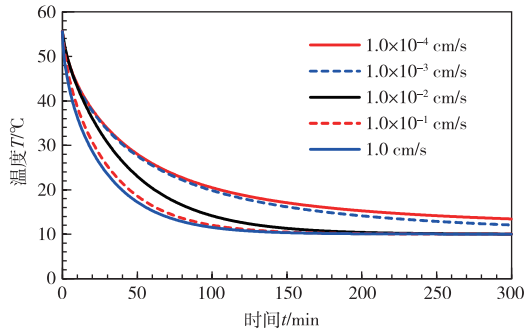


图5　不同流速作用下孔内温度的降温过程

Fig. 5 In-hole cooling process at varying seepage velocities

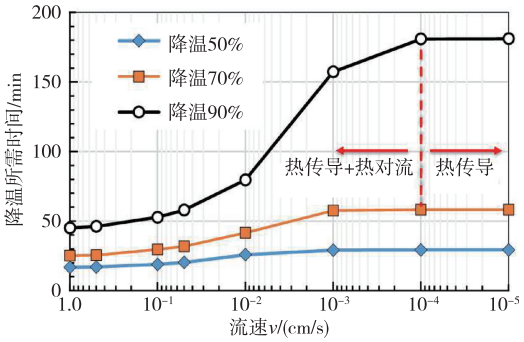
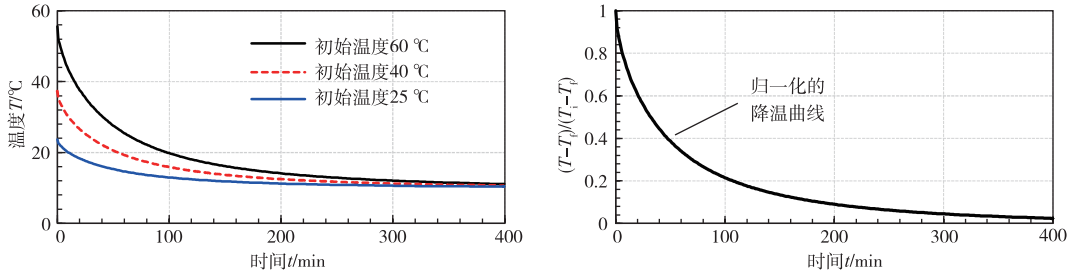


图6　不同流速作用下孔内降温所需时间比较

Fig. 6　Comparison of in-hole cooling times under different seepage velocities

计算结果如图7(a)所示。该算例中，渗流均采用了1×10^{-3} cm/s的流速。从图中可以看出，在不同的初始温度下，降温曲线存在明显的不同。显然，更高的初始温度下，其初始温度梯度也更大，降温曲线也更陡。如图7(b)所示，进一步对各降温曲线进行归一化处理，即采用降温比$(T-T_f)/(T_i-T_f)$对降温曲线进行描述，其中T_i和T_f分别为孔内初始和最终温度。结果发现，同一渗流速度下，不同初始温度的归一化的降温曲线保持一致，如图中的黑色实线所示。换而言之，初始温度的选取并不影响其降温规律，后者与渗流速度保持唯一性关系。



(a) 不同初始温度下的降温曲线　　(b) 归一化后的降温曲线

图7　孔内初始水温对降温过程的影响

Fig. 7　Influence of initial in-hole water temperature on the cooling process

因此，在实际工况中，不管所用的初始水温是多少，均可根据其降温过程确定唯一的归一化降温曲线，进而分析确定相应的渗流速度。换言之，热水注入过程以及监测管内水的初始温度对渗流速度判断并无明显影响，这为其实际应用提供了很大的便利。

3.4　降温速率与渗流速度的关系　根据第3.3节的分析，本文提出指数衰减模型用于拟合水温随时间以指数形式递减的过程，如下所示：

$$T = (T_i - T_f)e^{-\lambda t} + T_f \tag{3}$$

式中：T为圆孔内水温；t为时间；T_i、T_f分别为初始状态和最终状态的水温；e为自然常数；λ为降温系数，决定了降温的速率。需要指出的是，该公式并非本研究中降温过程的理论解。尽管渗流作用下的圆孔传热问题相较实际工程中已大大简化，但目前尚未给出其理论解。

使用式(3)对不同流速下的降温曲线进行拟合，可以得到各曲线的降温系数λ。图8给出了两个典型不同流速下的拟合结果，图中红色实线和蓝色实线分别为1×10^{-5}和1×10^{-2} cm/s流速条件下的数值模拟结果，圆形标记点为式(3)的拟合结果。整体来看，数值模拟结果与公式拟合值吻合良好，表明该指数衰减函数可以描述不同流速下的孔内水温的降温过程。因此，降温系数λ可用于描述该降温过程。当流速为1×10^{-5} cm/s时，λ=0.016；当流速为5×10^{-2} cm/s时，λ=0.030。显然，流速越大，降温越快，λ越大。

图9给出不同流速条件下的降温系数。二者之间在较大的流速范围内均具备单调性，进一步表明：通过人工温度场测量孔的降温过程来确定土体中的渗流速度具备可行性。基于降温曲线进行流速分析，可有效克服实际工程中渗流状态测量难题。

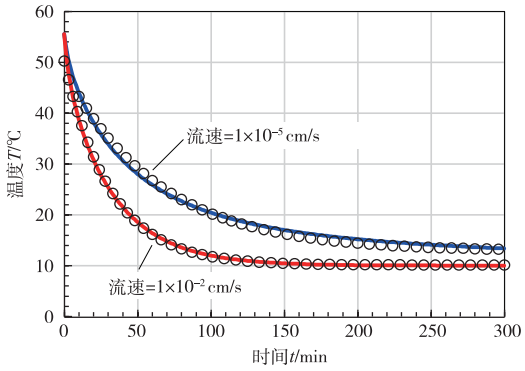


图8　孔内降温曲线及公式拟合值

Fig. 8　In-hole cooling curve and fitted values

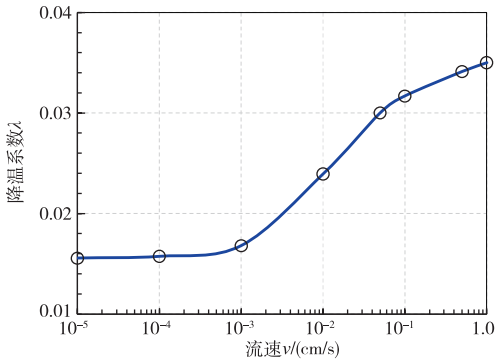


图9　渗流速度 v 与降温系数 λ 的关系

Fig. 9　Relationship between seepage velocity (v) and cooling coefficient (λ)

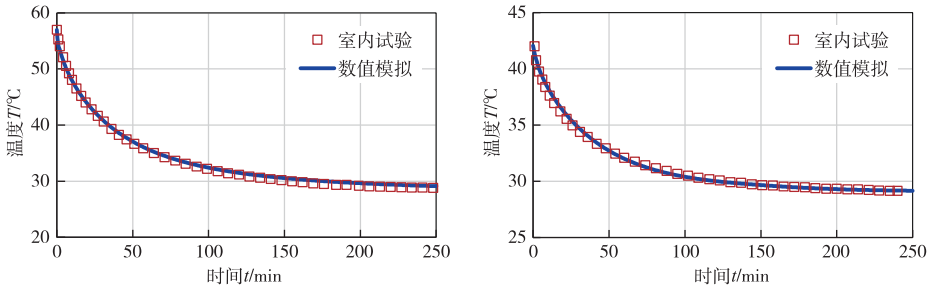
4　基于室内试验的降温规律验证

4.1　试验装置介绍　基于图1中所示渗流监测模型，制作了相应的室内试验装置，用于进一步验证上述理论和方法在实际应用中的可行性。该装置主要包括渗流控制模块、模型箱和温度监测模块。其中，渗流控制模块采用可调节支架控制水头，可施加的水头差范围为0.25 ~ 2.5 m；温度监测模块包含光纤和测温主机；模型箱外侧设置了保温绝热层，模型箱内部中心位置设置了测量管。

本文使用该装置，共开展了两组不同水力梯度(亦即不同渗流速度)条件下的验证试验，水头差分别设置为1.0和1.5 m，监测管内的初始水温分别为57和42 ℃。渗流水温约为28 ℃，试验土料的饱和渗透系数约为 4×10^{-3} cm/s。试验流程与前文数值模拟的流程基本相同，即：在土样达到稳态渗流状态后，将监测管内水置换为热水，并测量孔内水温的降温过程。

需要说明的是，本文仅采用该装置开展了少量的验证性试验研究，基于该装置的系统试验研究将在后续工作中陆续开展。

4.2　渗流监测模型的验证分析　图10给出两组室内模型试验的降温曲线及相应的热-流耦合数值模拟结果。在两组试验中，孔内水温均随着时间的推移逐渐降低，并且降温速率逐渐减慢。在此过程中，孔内热量逐渐向周围土体传递，热量被渗透水流逐渐带走。



(a) 水头差1.0 m，初始水温57 ℃　　(b) 水头差1.5 m，初始水温42 ℃

图10　通过室内试验获取的降温曲线及相应的数值模拟结果

Fig. 10　Cooling curve obtained from laboratory tests and its numerical simulation results

两组试验的实测数据与数值模拟曲线均表现出高度一致性。通过对试验值和模拟值之间的偏差进行定量评价可知，第1组试验(水头差1.0 m，初始水温57 ℃)的均方根误差 $RMSE$ 为0.36 ℃(拟合优度

R^2=0.996)，第2组试验的*RMSE*为0.22 ℃(R^2=0.993)。这表明前文所建立的热-流耦合模型可以有效揭示渗流作用下监测孔的降温过程与基本规律，使用指数衰减模型描述孔内水温的时空演化规律是可行的。因此，室内模型试验和数值模拟两方面均验证了本文所提出的渗流监测理论模型在实际应用中的有效性。

需要说明的是，本节数值模拟所采用的初始和边界条件均与模型试验一致，但土体的部分物理参数(如导热系数)是通过反分析确定的。

4.3 讨论 本文为清晰地揭示监测孔降温规律与土中流速的关系，使用了相对简化的分析模型，即假定土中流速方向接近水平，并与竖直监测管垂直，进而将渗流监测模型简化为平面问题。这种简化处理方式主要从两方面来考虑：一方面，在理论研究中若使用复杂模型将显著提升发现规律的难度；另一方面，对于本文所关注的深厚覆盖层上土石坝工程，坝体下游侧地基中的渗流方向通常以水平向为主导，而平面模型可以近似模拟该情况下覆盖层中所布置竖直测温孔的渗流-传热过程。然而，实际土石坝工程中渗流场更为复杂，可能难以用本文所述的简化模型进行表征。例如，当土中流速存在较大的竖直分量时，监测管降温过程不仅与流速的大小有关，还受到流速方向的影响。在这种情况下则需使用三维分析模型，对此本文暂不做讨论，在后续工作中将开展专门研究。

此外，本文基于单一的土体参数进行研究，在理论层面上揭示了降温过程与流速的唯一性关系，并验证了通过获取监测孔降温过程来确定土体中渗流速度的技术可行性。然而，在实际应用中，坝基覆盖层土体参数与本文中参数不尽相同。干密度、定压比热容和导热系数等土体参数的差异均会对测管降温过程产生影响。初步计算结果表明，随着土体干密度或定压比热容的增大，监测孔降温速率将减慢；随着土体导热系数的增大，监测孔降温速率将提高。因此，实际应用时需针对不同种类的土体分别建立与之相应的“降温系数λ-渗流速度v”关系。

最后，本文基于渗流监测模型重点分析了渗透流速的确定方法，但并未对渗压水头等常规监测指标进行专门讨论。实际上，渗压水头无法与测管降温过程建立直接的关联；降温过程受土中流速(或水力梯度)的显著影响，而与水头绝对值无关。在渗流监测中，水头值仍可借助其他常规监测手段进行确定。另外，本文也未针对渗流量作深入讨论，其可通过断面多测点的流速积分进行估算。

5 结论

本文针对土体渗流-传热耦合作用下的渗流监测技术进行研究，通过构建考虑热-流耦合的人工温度场分析模型，分析了不同渗流速度下的监测孔降温规律，进而建立了监测孔降温过程与渗流速度的关系，并通过室内试验进行了验证，为渗流监测提供了理论支撑。通过本文的研究，主要得到如下结论：

(1)人工温度场模型中的传热过程主要包含热传导和热对流。当渗流速度高于1×10^{-4} cm/s时，传热过程受热对流的影响比较显著，即该传热过程由热传导和热对流两种传热方式共同主导。当渗流速度低于1×10^{-4} cm/s时，热对流的影响较小，传热过程主要以热传导的方式进行；此时，渗流速度的进一步降低对传热过程的影响可以忽略。

(2)同一渗流速度下，不同初始温度条件下的降温过程具有相同的归一化降温曲线，表明初始温度的选取并不影响其降温规律，降温速率仅与周围土体的渗流速度具有相关性。因此，在实际工程中应用人工温度场技术进行流速分析时，可不必严格控制孔内水的初始温度。

(3)研究发现降温系数λ与渗流速度v之间具备单调性，验证了通过获取监测孔降温过程来确定土体中渗流速度的技术可行性。提出的指数衰减函数的拟合曲线与监测孔内水温下降过程吻合良好。降温系数λ越大，表明降温速率越快。换言之，基于人工温度场的降温曲线，可准确预测土体的渗流状态，为流速测量提供了理论支撑。

参 考 文 献：

[1] 黄昊冉，谷艳昌，陈斯煜，等. 机理-数据融合与残差修正的土石坝渗压预测模型研究[J]. 水利学报，

2025，56(3)：398-410.（HUANG H R，GU Y C，CHEN S Y，et al. Study on the seepage prediction model of earth-rock dams based on mechanism-data fusion and residual correction[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2025，56(3)：398-410.（in Chinese））

[2] 王鹏全，吴元梅，刘得俊，等. 深厚砂砾石覆盖层坝基渗控方案与瞬态坝坡稳定研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2022，20(3)：262-269.（WANG P Q，WU Y M，LIU D J，et al. Dam foundation seepage control scheme and transient dam slope stability on deep gravel overburden[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2022，20(3)：262-269.（in Chinese））

[3] 余红玲，王晓玲，程正飞，等. 大坝渗流安全监测数据异常检测的改进DSAE模型[J]. 水力发电学报，2023，42(10)：128-138.（YU H L，WANG X L，CHENG Z F，et al. Improved DSAE model for anomaly detection of dam seepage safety monitoring data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2023，42(10)：128-138.（in Chinese））

[4] 符韵梅，董艳辉，徐志方，等. 分布式光纤温度示踪识别裂隙地下水流动研究进展[J]. 水利水电科技进展，2020，40(3)：86-94.（FU Y M，DONG Y H，XU Z F，et al. Advances of DTS-based heat tracer tests in characterization of groundwater flow in fractured media[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2020，40(3)：86-94.（in Chinese））

[5] MALDANER C H，MUNN J D，COLEMAN T I，et al. Groundwater flow quantification in fractured rock boreholes using active distributed temperature sensing under natural gradient conditions[J]. Water Resources Research，2019，55(4)：3285-3306.

[6] 李登华，张桂荣，丁勇，等. 高寒区长距离输水渠道光纤渗漏监测新技术研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(S2)：83-87.（LI D H，ZHANG G R，DING Y，et al. New technology of fiber leakage monitoring in long-distance water transfer channels in Alpine and cold regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2020，42(S2)：83-87.（in Chinese））

[7] 周仁练，苏怀智，刘明凯，等. 基于被动红外热成像的土石堤坝渗漏探测试验研究[J]. 水利学报，2022，53(1)：54-67.（ZHOU R L，SU H Z，LIU M K，et al. Experimental study on leakage detection of earth rockfill dams using passive infrared thermography[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2022，53(1)：54-67.（in Chinese））

[8] 林成锋，蔡德所，郑天翱，等. 基于加热弱光纤阵列分布式测量技术的大坝渗流监测新方法[J]. 水电能源科学，2021，39(4)：87-91.（LIN C F，CAI D S，ZHENG T A，et al. A new method of dam seepage monitoring based on heating weak fiber array distributed measurement technology[J]. Water Resources and Power，2021，39(4)：87-91.（in Chinese））

[9] LIU R Y，CHEN L，YAN S F，et al. Study on active heating method of seepage micro-velocity monitoring[J]. Alexandria Engineering Journal，2025，124：565-572.

[10] FANG X，ZENG Y J，XIONG F，et al. A review of previous studies on dam leakage based on distributed optical fiber thermal monitoring technology[J]. Sensor Review，2021，41(4)：350-360.

[11] 谷艳昌，王士军，庞琼，等. 土坝温度场反馈渗流场可行性研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(9)：1721-1726.（GU Y C，WANG S J，PANG Q，et al. Feasibility of temperature field feeding back seepage field for earth dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(9)：1721-1726.（in Chinese））

[12] 肖衡林，张晋锋，何俊. 基于分布式光纤传感技术的流速测量方法研究[J]. 岩土力学，2009，30(11)：3543-3547.（XIAO H L，ZHANG J F，HE J. Research on measuring method of flow velocity based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(11)：3543-3547.（in Chinese））

[13] 何宁，丁勇，吴玉龙，等. 基于分布式光纤测温技术的堤坝渗漏监测[J]. 水利水运工程学报，2015(1)：20-27.（HE N，DING Y，WU Y L，et al. Experimental study of distributed optical fiber temperature measurement technology for measuring leakage in embankment dam[J]. Hydro-Science and Engineering，2015(1)：20-27.（in Chinese））

[14] CHEN J，FANG X，CHENG F，et al. Sensitivity analysis and seepage/leakage monitoring using point heat source[J]. Géotechnique，2021，71(10)：911-924.

[15] RADZICKI K，STOLIŃSKI M. Seepage monitoring and leaks detection along an earth dam with a multi-sensor thermal-active system[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2024，83(9)：362.

[16] GHAFOORI Y，LENART S，BOHINC U，et al. Investigating transient seepage flow and heat transfer using optical fiber distributed temperature sensors and hydrothermal modeling[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer，2025，165：108999.

[17] BEKELE B，SONG C，KIM S，et al. Seepage anomaly detection via fiber optic distributed temperature sensing: Insights from physical and numerical modeling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，

2024，150(6)：04024039.
[18] 李端有，熊健，於三大，等．土石坝渗流热监测技术研究[J]．长江科学院院报，2005，22(6)：29-33.（LI D Y，XIONG J，YU S D，et al. Study on seepage monitoring technology with temperature in embankment dam [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，2005，22(6)：29-33.（in Chinese））
[19] 寇玉冬，刘春．基于高精度光纤测温的水热耦合试验[J]．河南理工大学学报：自然科学版，2023，42(3)：88-94.（KOU Y D，LIU C. Water-heat coupling test based on optical fiber temperature measurement with high-precious[J]. Journal of Henan Polytechnic University：Natural Science，2023，42(3)：88-94.（in Chinese））
[20] 肖衡林，鲍华，王翠英，等．基于分布式光纤传感技术的渗流监测理论研究[J]．岩土力学，2008，29(10)：2794-2798.（XIAO H L，BAO H，WANG C Y，et al. Research on theory of seepage monitoring based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Rock and Soil Mechanics，2008，29(10)：2794-2798.（in Chinese））
[21] 朱永国，袁宏才．光纤光栅渗漏监测技术在猴子岩混凝土面板堆石坝的应用[J]．水力发电，2018，44(11)：75-79.（ZHU Y G，YUAN H C. Application of fiber Bragg grating seepage monitoring technology in Houziyan CFRD[J]. Water Power，2018，44(11)：75-79.（in Chinese））
[22] BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York：American Elsevier Publishing Company，1972.
[23] 李广信．高等土力学[M]．2版．北京：清华大学出版社，2016.（LI G X. Advanced Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing：Tsinghua University Press，2016.（in Chinese））
[24] 陶文铨．传热学[M]．5版．北京：高等教育出版社，2019.（TAO W Q. Heat Transfer[M]. 5th ed. Beijing：Higher Education Press，2019.（in Chinese））
[25] AL-SUMAILY G F，AL EZZI A，DHAHAD H A，et al. Legitimacy of the local thermal equilibrium hypothesis in porous media：a comprehensive review[J]. Energies. 2021，14(23)：8114.
[26] NIELD D A，BEJAN A. Convection in Porous Media[M]. Cham：Springer International Publishing，2017.

Theoretical model and its experimental validation of soil seepage velocity monitoring based on artificial thermal field

YU Jialin[1,2]，GONG Hao[3]，CHENG Zhengfei[1,2]，WU Yongkang[3,4]，ZHOU Jianfu[5]，YU Yuzhen[6]

（1. *China Water Resources and Hydropower Engineering Consulting Co.，Ltd.，Beijing* 100120，*China*；2. *China Renewable Energy Engineering Institute，Beijing* 100120，*China*；3. *School of Civil Engineering，Beijing Jiaotong University，Beijing* 100044，*China*；4. *Sichuan Energy Internet Research Institute，Tsinghua University，Chengdu* 610213，*China*；5. *College of Hydraulic & Environmental Engineering，China Three Gorges University，Yichang* 443002，*China*；6. *Department of Hydraulic Engineering，Tsinghua University，Beijing* 100084，*China*）

Abstract：In earth-rock dam engineering，the feasibility of using temperature for seepage safety monitoring has been verified. However，quantitatively assessing the flow velocity in soil based on the temperature field remains an unresolved issue. In this regard，this paper constructs an artificial thermal field seepage analysis model that considers the thermal-seepage flow coupling effect，using the finite element method to study the cooling patterns of monitoring wells under different seepage velocities，and validates the findings through laboratory experiments. The results indicate that：(1) When the seepage velocity is lower than 1×10^{-4} cm/s，the heat transfer process is primarily governed by heat conduction，with the influence of heat convection being negligible；further reducing the seepage velocity has little effect on the heat transfer process. (2) The selection of the initial temperature does not affect the cooling pattern，which is solely related to the seepage velocity in the surrounding soil. Therefore，when applying the artificial temperature field technique for flow velocity analysis in practical engineering，it is unnecessary to strictly control the initial temperature. (3) There is a monotonic relationship between the cooling constant λ and the seepage velocity v，and the proposed exponential decay function fits well with the water temperature decline process inside the monitoring well，enabling accurate prediction of the seepage state in soil based on the cooling curve of the artificial temperature field. In summary，this study validates the feasibility of determining flow velocity in soil using an artificial thermal field and provides theoretical support for flow velocity measurement.

Keywords：artificial thermal field；seepage monitoring；thermal-flow coupling；numerical simulation；cooling process；seepage velocity

（责任编辑：韩　昆）