

分布式光纤温度示踪识别裂隙地下水流动研究进展

符韵梅^{1,2,3},董艳辉^{1,2,3},徐志方^{2,3,4},王礼恒^{1,2},段瑞琪^{1,2,3},赵少桦^{1,2,3}

- (1. 中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室,北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院,北京 100029; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室,北京 100029)

摘要:识别地下水渗流通道和流动状态,是预测裂隙介质中地下水流动行为的基本前提,也是目前裂隙地下水研究的热点问题之一。由于具备较强时空连续性、高分辨率、监测便捷、成本低廉等优点,基于分布式光纤测温(DTS)的温度示踪正逐渐成为裂隙地下水流动特征识别的重要手段,在识别地下水流动状态、钻孔间连通裂隙分布甚至裂隙水力性质等方面取得了许多新的进展。在阐述DTS原理的基础上,综述了基于DTS的温度示踪试验方法及其在裂隙地下水特征识别研究中的应用进展,重点归纳了该方法的各种试验手段、应用方式与适用范围,并指出了钻孔中的垂向流动是研究人员应用温度示踪试验时需重点关注的因素。将基于DTS温度示踪的多种试验手段结合运用及其与其他示踪方法协同运用,是未来需要进一步研究的重点方向。基于DTS的温度示踪方法有助于提升对裂隙介质中地下水渗流及热运移机理的认识,在涉及裂隙地下水的深部地质工程如高放核废物地质处置选址评价、增强型地热资源开发等研究中具有广阔的应用前景。

关键词:分布式光纤测温;温度示踪;裂隙介质;地下水流动特征

中图分类号:P641.6 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2020)03-0086-09

Advances of DTS-based heat tracer tests in characterization of groundwater flow in fractured media// FU Yunmei^{1,2,3}, DONG Yanhui^{1,2,3}, XU Zhifang^{2,3,4}, WANG Liheng^{1,2}, DUAN Ruiqi^{1,2,3}, ZHAO Shaohua^{1,2,3}
(1. Key laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Characterizing groundwater flow patterns and preferential pathways is basic premise and hot issue for prediction of groundwater flow behavior in fractured media. With the advantage of strong space-time continuity, high spatial and temporal resolution, simple measurements as well as low cost, Distributed Temperature Sensors (DTS) has been applied in heat tracer tests to study groundwater flow and heat transport in fractured media recently. DTS based heat tracer tests have gradually become an important method to identify hydraulically active fractures and to estimate their hydraulic properties, and have provided new insights in characterizing groundwater flow in fractured media. The principles of DTS, the methods of heat tracer tests based on DTS and their applications in the characterization of groundwater flow in fractured media were introduced and summarized. Various experimental methods, application modes and range of application involving DTS were reviewed. Special attention should be paid to the vertical flow in boreholes, which is a key factor for researchers to focus in the application of DTS. Integration of various DTS based heat test methods and the combination with other tracer methods can be regarded as the research interests in the future. In addition, DTS-based heat tracer test has great potential in understanding of groundwater flow and heat transport process in fractured media, making it a promising application prospect in deep geological engineering activities including high-level radioactive waste geological disposal, exploitation of hot fractured rocks.

Key word: distributed temperature sensors; heat tracer; fractured media; groundwater flow characteristics

识别地下水渗流通道和流动状态,是预测裂隙介质中地下水流动行为的基本前提,也是目前裂隙地下水研究的热点问题之一。温度作为地下水的天然示踪剂,具有环境无污染,测量精度高及监测方便等优点,早已被研究人员引入水文地质领域,并在地下水流动识别研究中得到应用^[1-2]。就裂隙岩体而言,裂隙或周边围岩的温度场分布可能会受到地下水流的扰动,使钻孔中的垂向温度剖面出现异常,这些异常可用于识别裂隙的分布及地下水的流动状态。研究人员使用温度探头监测获取钻孔垂向温度剖面的异常变化,可定位钻孔中连通裂隙的位置,并对地下水的流动状态(水头、流速等)进行识别,甚至可据此进一步推测连通裂隙的水力性质(水头、传导系数等)^[3-5]。但利用温度探头进行监测时,通常需要将探头在钻孔中进行上下拖拽,即使探头的移动速度非常缓慢(<1.5 m/min),也往往会扰动钻孔中水柱的温度。此外,温度探头一次测量只能获取单点的温度,通常需要几小时才能获取整个钻孔的垂向温度分布,测量数据的时空连续性较差。因此,受测温技术的限制,温度示踪并未在裂隙地下水的流动特征识别研究中得到广泛应用。

随着光纤技术的发展,温度测量技术由温度探头的点式测量发展到分布式光纤测温(distributed

temperature sensors, DTS)的连续测量^[6],极大地扩展了温度监测的空间和时间连续性。分布式光纤测温技术基于 Raman 散射原理,通过测量后向散射光强得到沿光纤分布的温度,实现了高精度、高分辨率、强连续性的温度监测,且测量方便,成本经济,在火灾探测、电网监测、管线监测、石油天然气开发等领域得到了广泛的应用^[7-8],在水文地质领域的应用则主要集中于地表水-地下水相互作用研究^[6,9-13]。目前,基于 DTS 的温度示踪正逐渐成为裂隙地下水流动特征识别研究的重要手段^[14],在识别地下水流动状态、钻孔间连通裂隙分布甚至裂隙水力性质等方面取得了许多新的进展。

尽管 2000—2017 年涉及分布式光纤测温技术在水文学领域应用的论文有上百篇^[15],证明了该技术逐渐成为水文学主流工具的趋势,但国内关于分布式光纤测温应用的研究却相对缺乏,涉及裂隙地下水流动特征识别的更是少之又少(表 1)。因此,本文在阐述分布式光纤测温原理的基础上,对该技术在场尺度裂隙岩体地下水流动特征识别中的应用现状进行了梳理,并对其应用方式及范围进行了归纳,最后总结分析实际应用中需要重点关注的因素,并展望了基于 DTS 的温度示踪方法在裂隙地下水研究中的发展趋势。

表 1 基于 DTS 的温度示踪试验研究一览

文献	试验方式						最大应用深度/m	采样间隔		试验场地/地层条件
	被动		主动(A-DTS)					空间/m	时间	
	背景监测	抽水试验	点加热		裸孔	封闭孔				
			注流体	点电源						
Hurtig 等 ^[16]	✓		✓			✓	40			Grimsel, 瑞士
Yamano 等 ^[17]	✓		✓				1460	1		Awaji Island, 日本
Leaf 等 ^[18]	✓		✓			✓	200	2	1 min	威斯康辛, 美国/砂岩
Read 等 ^[19]	✓	✓	✓				100	1.01	2 min	Ploemeur, 法国/花岗岩
Read 等 ^[20]	✓				✓	✓	100	0.29	10 s	Ploemeur, 法国/花岗岩
Banks 等 ^[21]	✓	✓			✓	✓	85	1.02	1 min	Adelaid, 澳大利亚
Cloeman 等 ^[22]	✓					✓	100	0.29	3 min	Guelph, 加拿大/白云岩
Read 等 ^[23]	✓			✓		✓	100	0.12	5 s	Ploemeur, 法国/花岗岩
Sellwood 等 ^[24]	✓			✓		✓	305	1.01	40 s	威斯康辛, 美国/砂岩
Sellwood 等 ^[25]	✓			✓		✓	305	1.01	40 s	威斯康辛, 美国/砂岩
Bernardie 等 ^[26]	✓	✓	✓			✓	43	0.29	1 min	Ploemeur, 法国/花岗岩
Maldaner 等 ^[27]	✓					✓	73	0.29	2 s	Guelph, 加拿大/白云岩

1 分布式光纤测温技术

1.1 分布式光纤测温技术的发展历程

在过去的30年中,分布式光纤传感(distributed optical-fiber sensor, DOFS)技术在多个研究领域得到了广泛的应用。20世纪80年代后期,随着为通讯行业开发的实用性强、损耗低的单模光纤出现,DOFS及其相应的仪器开发开始作为一门独立学科出现。该技术以光纤为传输媒介,以光波为信息载体,对沿光纤路径上的外界信号进行感知,从而得到被测量场的时空连续分布信息,实现分布式测量。DOFS的传感物理机制基于光在光线中的散射或相互作用,包括瑞利(Rayleigh)散射、光纤干涉仪、偏振模式耦合、拉曼(Raman)散射和布里渊(Brillouin)散射等^[28]。它的第一个主流应用是光纤陀螺仪,随后出现了光时域反射仪。光时域反射仪发射短激光脉冲,利用光在光纤中传播产生的后向散射光传输时间实现对测量点的定位,利用后向散射光的强度变化实现对外界环境参量变化的测量,传感参量包括振动、应变、温度等^[29]。基于拉曼散射和光时域反射原理对沿光纤方向的温度空间分布进行监测的技术,被称为DTS。DTS不仅可实现连续、分布式且实时的温度监测,还同时具有抗电磁干扰、耐腐蚀、远程监控、高灵敏度、安装简便、长寿命等特点,在管道、隧道、电缆、石油石化、煤矿、水文等领域具有极大的应用潜力。

早在20世纪80年代,DTS就被引入市场,首先在石油天然气行业得到应用,随后很快开始进入水文学领域。Hurtig等^[16]基于DTS,开展携带热源的注水试验,对裂隙岩体中的地下水流动进行了探测。但直至Selker等^[30]对DTS在水文领域的应用进行全面综述之后,才真正开始了该技术在水文领域的广泛传播应用。发展至今,DTS测温精度可达到 0.01°C ,监测距离最长可达35 km,可在0.29 m的空间分辨率下以2 s为采样间隔对钻孔中的温度分布进行监测^[31]。

1.2 分布式光纤测温的基本原理

分布式光纤主要基于拉曼散射原理进行测温。激光器发出的激光脉冲在光纤中传输,与光纤内分子发生相互作用,发生光的散射。散射光向四周传输,但有一部分散射光会沿光纤向相反方向(即背向)传输,这些背向散射光中除了保持原有入射光波长(λ_0)的瑞利散射光,也包括了具有新的频率和波长的拉曼散射光。拉曼散射光包括斯托克斯光(Stokes)和反斯托克斯光(anti-Stokes)。斯托克斯光波长大于原入射光($\lambda_s = \lambda_0 + \Delta\lambda$),与温度无关,而

反斯托克斯光波长小于原入射光($\lambda_{as} = \lambda_0 - \Delta\lambda'$),光强随温度变化。因此反斯托克斯光强与斯托克斯光强的比值即可反映散射点温度的高低。此外,基于入射光与返回散射光之间的时间差可对温度采样点的位置进行定位,实现沿光纤的分布式测温^[12,30,32]。

2 基于DTS的温度示踪在裂隙地下水流动特征识别中的应用

依据试验方式的不同,目前基于DTS开展的温度示踪试验主要分为被动温度示踪(passive mode)与主动温度示踪(active distributed temperature sensing, A-DTS)。两种试验方式的区别主要在于温度监测过程中是否有人为热源(或冷源)的进入。被动温度示踪可在不同的水力条件下开展,分析不同水力条件下钻孔中温度随深度的变化;主动温度示踪可通过点源加热或线源加热改变钻孔中的热量分布,分析钻孔温度-深度剖面的响应。此外,取决于研究目的,DTS可直接在裸孔(open borehole)中监测,也可测量封闭钻孔(sealed borehole)中的垂向温度分布,试验手段丰富多样(表1)。基于测量的温度剖面,研究人员可通过解析或数值方法获取钻孔中地下水的流速、流向,并对钻孔中连通裂隙进行定位,甚至进一步推测裂隙的渗透性质。另外,基于DTS开展的温度示踪也可以与其他示踪方法联合运用,互相验证补充,对场地中的地下水渗流通道及流动状态进行识别(图1)。

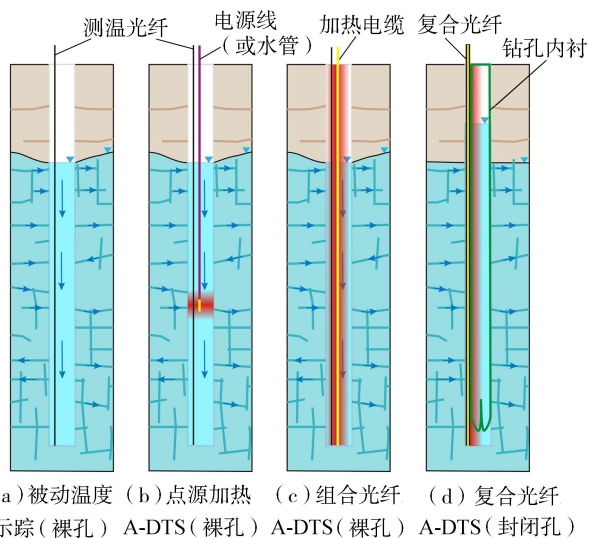


图1 基于分布式光纤的温度示踪试验方法

(改自Maldaner等^[27])

2.1 基于DTS的被动温度示踪(passive mode)

基于DTS的被动温度示踪是指在不引入人为热源(冷源)的情况下,对钻孔温度-深度剖面进行监测,如图1(a)所示。

由于裂隙中地下水温度与围岩温度存在明显差异,当地下水在裂隙中的流动较为强烈时,可能会引起钻孔的背景温度剖面(即无其他人为水力干扰下测得的钻孔温度随深度的变化曲线)的突变(陡降或陡升)。根据这种突变,可以对钻孔中的连通裂隙进行定位^[33-34]。若地下水在裂隙中的流动较弱难以观测到温度剖面的突变时,也可通过改变钻孔中水力条件使温度异常更加明显,例如在多个钻孔中开展协同抽注水试验。这不仅能定位连通裂隙,还能使用解析方法或数值模型进一步估算钻孔中的流速分布,分析钻孔之间的水力联系^[35-37]。但是,若裂隙中地下水与围岩的温度没有明显的差异或差异较小,仅采用被动温度示踪很难得到连通裂隙的位置分布。此时,也可以考虑再开展主动示踪试验,将被动温度示踪测得的背景温度剖面作为对照组进一步识别分析。

2.2 基于 DTS 的主动温度示踪 (A-DTS)

若裂隙中地下水与围岩的温度差异较小,可考虑向钻孔中引入人为热源(或冷源),对钻孔中的地下水进行主动加热(或加冷),即采取主动模式开展温度示踪试验(即 A-DTS)。主动加热的方式分为点源加热与线源加热。点源加热是指采用注水试验或电阻加热器对钻孔中某一特定深度点的地下水进行加热(图 1(b));线源加热是指在钻孔中安装线性的热源,对某一深度段或整个钻孔中的地下水柱进行加热(图 1(c)(d))。

主动热源的引入方式也可分为流体注入及电力加热。前者指向钻孔中注入与背景流体温差较大的流体引起热异常;后者主要指使用电阻加热器或金属导线等电力加热元件对钻孔中地下水进行加热。以流体注入方式开展 A-DTS 对设备的安装要求相对较低,但容易扰动钻孔中原始的流动状态,改变地下水的流速或流向;电力加热方式虽然安装和监测相对复杂,但比直接注入流体的扰动小,且更容易量化输入热量的多少。

2.2.1 点源加热方式

以点热源形式在钻孔中引入热异常,并利用 DTS 进行温度剖面监测的工作最早于 1994 年在瑞士试验场地 Grimsel 开展。Hurtig 等^[16]在 40 m 深的钻孔中注入了热水及冷水,基于监测温度剖面上出现的温度异常骤降,探测出连通裂隙位置,证明了 DTS 在浅孔中的应用潜力。

随后,Yamano 等^[17]在深孔中应用 DTS 对钻孔中的渗流通道进行了定位。他们分别于 1997 年、2000 年及 2003 年对日本 Nojima 断层附近一深达 1 800 m 的钻孔进行了 3 次冷水注入试验(注入持续

时间为 2~9 d 不等),利用 DTS 对钻孔中热恢复过程开展了长达 6 a 的监测。试验获取的多条温度-深度曲线显示,钻孔中 540 m 深度以下的地下水未发生明显的温度降低,这表明绝大部分注入冷源流体在 540 m 深度附近发生了渗漏;停止注入后的热恢复过程的温度-深度剖面也证实了钻孔中 540 m 处存在地下水渗流通道。这一研究证实了 DTS 具有定位钻孔中地下水渗流通道的能力。

在探测钻孔中连通裂隙的基础上,研究人员借助于 DTS 的高分辨率及高连续性,进一步以点热源方式探究识别裂隙岩体钻孔中地下水的流动状态以及流动模式。

Leaf 等^[18]将在地表加热后的流体注入到钻孔中的特定深度,分析温度剖面随时间的变化。与 Yamono 等^[17]不同的是,该试验的流体注入持续时间较短,在 10~160 min 之间。短时间的热流体注入会在钻孔中形成热异常。基于高时空分辨率 DTS 获得的钻孔温度-深度-时间连续分布场中,清晰地显示出了热羽(thermal plume)的运移方向、运移速度,据此可对地下水流向、流速进行计算;此外,热羽运移过程中温度的异常陡变表明了流体的流入或流出,据此推测出的裂隙分布位置也在此前同个钻孔的地球物理测井结果中得到证实。

Read 等^[19]在法国 Ploemeur 的两个裸孔中开展了跨孔温度示踪:结合钻孔栓塞向其中一个钻孔注入热流体,同时以恒定速率在另一个钻孔中抽水,并利用 DTS 实时监测两个钻孔的温度变化。他们基于获取的温度-深度-时间连续剖面,对两个钻孔之间的连通裂隙进行了研究,同时利用解析公式计算了连通裂隙处地下水的流速。

如果钻孔中的垂向流动比较显著,向钻孔中注入流体不会明显干扰钻孔中地下水的原始流动状态,此时以流体注入方式引入点热源是可接受的。但如果钻孔的背景流动微弱,流速较低,采用注入流体的方法会对钻孔中地下水的原始流动模式造成显著扰动。在这种情况下,以点电源形式开展 A-DTS 更有利。

Sellwood 等^[24]采用电阻加热器,分别在 4 个钻孔特定深度的地下水中产生热扰动,并在无人水力干扰的情况下利用 DTS 对热异常的稀释过程进行了监测。与 Leaf 等^[18]类似,Sellwood 等^[24]在热示踪试验中的加热时间很短(1~12 min),主要目的在于监测热羽的运移方向及速度,从而判别钻孔中垂向流动的方向(上升流或下降流)、连通裂隙中地下水的流动方向(入流或出流),以及估算垂向流动的流速。在此基础上,进一步将上述温度示踪方法

测得的流速与同一钻孔中流速仪测得的流速进行对比,两者显示出良好的一致性,说明基于 DTS 测量温度剖面推算地下水流速是可靠的,用该方法推算出的地下水流速最低可达 0.06 cm/s ^[25]。

2.2.2 线源加热方式

线源加热的 A-DTS 通常基于线状加热元件与测温光纤组合成的加热测温系统开展温度示踪试验。线状加热元件与测温光纤之间有多种组合方式:可以直接将加热电缆与测温光纤组合固定,在钻孔中进行加热测温^[21,38];由于测温光纤中往往使用钢丝对光导纤维进行加固,钢丝只要直接接入电流,也可以作为 A-DTS 中的线热源对钻孔地下水进行加热^[20];此外在光缆中加入多条其他金属导线(如铜导线)可以组成“复合光纤”进行加热测温^[22,27](图 1(d))。

Banks 等^[21]在试验过程中将两条测温光纤固定一条加热电缆上,保持光纤与电缆之间的距离不变形成加热测温系统。基于此系统对整个钻孔中地下水进行加热,同时监测钻孔加热前后的温度剖面。在加热过程中同步开始进行抽水,发现受抽水试验的影响,外界较低温度的地下水会通过连通裂隙向钻孔中流入,从而导致钻孔中裂隙处地下水温度的骤降,据此对连通裂隙的位置进行了定位。

为了识别钻孔中的垂向流动,Read 等^[20]将两条测温光纤固定组合,保持光纤之间水平距离不变,将其中一条光纤作为线源进行加热,并以另一条光纤作为参考进行测温。在加热光纤功率恒定不变的情况下,同一深度上加热光纤与参考光纤之间的温度差是该点流体平行于钻孔轴方向流速的函数。基于该原理,利用解析公式将 DTS 测量的温度-深度剖面转化为流速-深度剖面,其中流速的陡升往往代表着连通裂隙的出现。

复合光纤同时包含了用于测温的光导纤维以及用于加热的金属导线,目前主要在安装了钻孔内衬的封闭孔中使用。使用时应将复合光纤安装在钻孔内衬与钻孔壁之间,尽量使光纤贴住孔壁以保证光纤所测温度剖面不受钻孔内部垂向流动的影响。由于忽视了垂向流动,当钻孔中存在连通裂隙时,裂隙处的地下水流会在温度剖面中表现出明显的异常信号;若无连通裂隙,温度随深度的分布则主要由钻孔中围岩的热传导过程控制。

Cloeman 等^[22]使用复合光纤在加拿大圭尔夫附近的试验场地开展了温度示踪试验,对整个钻孔中的地下水进行加热后,监测热恢复过程。结果表明,当加热停止后,连通裂隙中的地下水流动会导致所在位置的热耗散率局部加快,增加的热耗散率是热

对过程造成的。因此如果已知围岩的热传导性质,就有可能将对流导致的热耗散率从总热耗散率中识别出来,定量计算出该流动的流速。

基于 Cloeman 等^[22]的研究认识,Maldaner 等^[27]在确定了围岩热传导性质的前提下,采用数值模拟方法获取了增加的热耗散率与裂隙中地下水流动速率之间的经验关系,并将该经验关系应用实际场地数据,对 A-DTS 获取的钻孔温度剖面进行了解译,推算出的钻孔流速与前人在同一钻孔中利用栓塞示踪试验测得的流速结果显示良好的一致性,说明钻孔内衬与复合光纤结合的 A-DTS 不仅能定位连通裂隙位置,也可以定量识别连通裂隙中的地下水流动。

人为热源的引入虽然有助于示踪钻孔中的地下水流动,但也可能会造成流体温度和密度的改变,从而引起钻孔地下水内部的自由对流。Read 等^[23]通过瑞利数(Rayleigh number)来判别流动系统中的自由对流是否发生,分析对流强度,从而决定在后续温度数据的解译过程中是否考虑自由对流的影响。

3 讨论与展望

3.1 钻孔垂向流动对基于 DTS 的温度示踪的影响

基于 DTS 的温度示踪在裂隙地下水流动特征识别研究领域的应用越来越广泛,试验手段也越来越丰富多样。想要基于 DTS 的温度示踪试验获取可靠可用的监测数据,关键在于依据研究目的、场地及钻孔的实际情况设置合理的试验方案,决定是否封闭钻孔、是否引入人为热源、以线源还是点源加热、DTS 的监测时空分辨率设置等。在此过程中,钻孔的垂向流动是研究人员最需要重点关注的因素之一。

垂向流动指的是钻孔内部地下水的上下流动,常出现在以裂隙为主渗流通道的基岩裸孔^[40]。对于无其他水力干扰的钻孔,是否存在垂向流动主要取决于 3 个因素:地层的渗透性质、是否裸孔、孔内连通裂隙的水头。在一般的基岩裸孔中,连通到同一钻孔的不同裂隙之间的水头差异是导致孔内出现

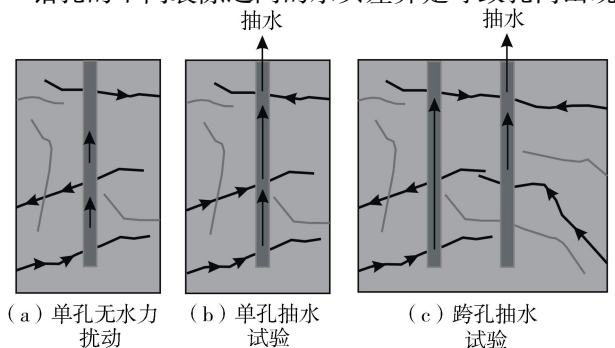


图 2 不同情况下钻孔中的垂向流动示意图^[36]

垂向流动的主要原因(图 2(a))。此外,人为改变钻孔中水力条件(如抽注水试验)必然会导致钻孔内的垂向流动(图 2(b)(c))。垂向流动对于基于温度的地下水流动识别研究有多方面的、不可忽视的影响^[41]。

基于 DTS 开展温度示踪试验的主要目的之一,是对钻孔中地下水的渗流通道,也就是连通裂隙的分布,进行定位识别,实质上是识别钻孔深度剖面上,不同深度位置的水平流动差异。而垂向流动的存在,可能会导致钻孔中部分水平流动的温度信号被掩盖。

当垂向流动强烈时,温度剖面是钻孔中垂向流动及水平流动的综合反映,较小裂隙的水平流动信号可能会被强烈的垂向流动掩盖,无法在温度剖面中得到体现;当垂向流动微弱时,温度剖面中能更多地反映水平流动的差异。大裂隙(或断裂)中地下水的水平流动比小裂隙中更强,因此可能会在温度剖面中表现出更显著的温度异常。

此外,由于垂向流动会对钻孔周边一定范围内的天然水力梯度造成影响,裸孔中的地下水流动状态并不能完全代表该场地的天然地下水流动。为了减弱钻孔中的垂向流动,可以采用 PVC 管或柔性内衬对钻孔壁进行封闭,有效地隔绝孔中连通裂隙之间的水力联系^[38,42]。相较于裸孔,封闭孔中的地下水流动状态更接近于场地天然地下水的流动,在之中开展的温度示踪试验也能识别出更多的连通裂隙^[41]。但是,由于地下水的流动受到了钻孔内衬的阻碍,如何从封闭孔温度剖面中提取出流速及流向信息开展进一步的定量研究是一大难题^[22]。

垂向流动可能会不利于温度示踪研究,但与此同时,它的存在也能反映其他信息。例如单孔内部的垂向流动可用于估算孔内各段的水力性质;跨孔水力试验引起的垂向流动可用于识别钻孔间的水力联系及水力性质。通过改变钻孔中的水力条件,引起垂向流动,获取温度-深度剖面的变化,可以定位连通裂隙的位置,并辨别出哪些裂隙是流入裂隙,哪些裂隙是流出裂隙,进一步推断出裂隙处的流速甚至流量。在垂向流动中被掩盖的裂隙,虽然与钻孔是连通的,但可能并不是钻孔或周边岩体中的主要渗流通道;而主导了垂向流动的裂隙,很有可能是主导钻孔及其周围地下水流动的优势渗流通道^[35-37]。

垂向流动反映了钻孔中不同的裂隙水力性质及地下水流动模式。研究人员在设计试验方案时,应该依据研究目的,采取不同的试验手段减弱或增强钻孔垂向流动,以达到理想的识别效果。若研究着重于钻孔的垂向流动识别,应该在裸孔中开展温度

示踪试验;若研究目的在于尽可能多地识别连通裂隙,研究人员则应根据垂向流动的强弱以及需要识别裂隙的尺寸,考虑对钻孔进行封闭,并结合抽注水试验开展温度示踪。

温度-深度曲线的变化既有可能是钻孔中地下水的上下流动导致的,也有可能是连通裂隙中地下水的水平流入流出造成的,还有可能是两者的共同作用。因此探明钻孔中的垂向流动,对于判别温度-深度剖面中异常信号的主导因素,及后续的地下水流速流向识别至关重要。总而言之,明确钻孔中的垂向流动的影响,既是设计温度示踪试验的重要依据,也是后续解译温度-深度剖面的重要前提。对于研究人员来说,如何依据研究目标采取不同的试验手段相互配合,削弱或增强垂向流动带来的信息,是未来基于 DTS 温度示踪的应用中需要重点关注解决的问题之一。

3.2 基于 DTS 的温度示踪与溶质示踪的对比与联合

溶质示踪是识别裂隙介质中地下水流动路径的一种常用方法。该方法大多基于质量平衡理论,通过将人工或天然示踪剂注入钻孔,在其他钻孔中取样并对示踪剂穿透曲线进行监测,从而分析地下水在岩体中的渗流路径,甚至进一步研究溶质在裂隙中的迁移和滞留规律。相比而言,溶质示踪方法的监测及后续试验分析对设备的要求较高,常需要结合钻孔栓塞进行分层取样,成本较高,操作复杂,不利于长时间的连续性观测。此外,溶质示踪中的部分示踪剂还可能对环境造成二次污染。

总体而言,基于 DTS 的温度示踪作为一种新型高效的监测方法,监测连续性高,分辨率高,经济简便,有助于在更长的时间尺度,更高的分辨率上实现对地下水在裂隙中流动过程的识别研究,为探究地下水在裂隙中的渗流路径及时空动态特征提供了一种新的思路。

然而,由于裂隙本身发育情况和空间分布的非均质性,裂隙介质中的地下水渗流过程及溶质运移规律也具有强烈的非均质性,甚至具有多维多尺度性。这使得单一的研究方法不足以完全清楚地识别裂隙中地下水的动态过程。通过运用不同的方法进行相互印证和比较,有助于进一步定性甚至定量分析裂隙介质的水文地质特征以及地下水在其中的流动特征。如,由于热运移与溶质运移机理的不同,温度示踪与溶质示踪所能提供的流动信息有所区别,从而有助于提高对裂隙岩体中地下水渗流机制和传热机制的理解。

Read 等^[19]基于 A-DTS 的跨孔温度示踪试验获

取了钻孔中裂隙处的热穿透曲线,发现这条热穿透曲线与同等条件下溶质示踪试验中同一裂隙处的溶质穿透曲线具有显著的差异,并推测这可能是裂隙与基质之间的热交换影响的结果。Klepikova 等^[39]基于数值模拟结果与场地试验数据结果分析,认为裂隙与基质之间的热交换会受裂隙开度、几何形态等参数的影响。结合场地数据的数值模拟结果表明,将裂隙形态刻画为平行平板时(parallel plate model)的热穿透曲线峰值大小、峰值出现时间以及热恢复的延迟时间与将裂隙形态刻画为渠道时(channel model)具有显著的差异(图3)。因此温度示踪试验中的热穿透曲线可能提供裂隙开度、几何形状的相关信息。在前人认识的基础上,Bernardie 等^[26]以流体注入方式开展 A-DTS 温度示踪试验,并结合测温结果及溶质示踪结果提出了热运移过程中热衰减系数(热穿透曲线的峰值温度相较于注入流体温度的下降幅度)及热延迟时间(热穿透曲线的峰值时间与溶质浓度穿透曲线的峰值时间之间的差值)的解析解,对单孔中连通裂隙的开度、几何形态进行了定量化的研究。以上研究证明,基于 DTS 的温度示踪试验与溶质示踪试验的联合应用,在裂隙地下水流动特征识别的进一步研究中具有极大的潜力。

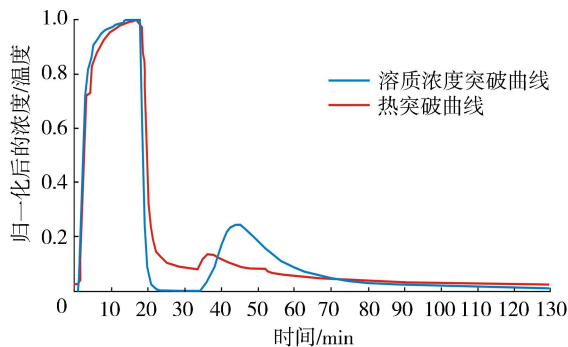


图3 热突破曲线与溶质浓度突破曲线对比
(改自 Klepikova 等^[39])

3.3 基于数值模拟的定量分析与解释

目前 DTS 在裂隙地下水流动特征识别研究领域的应用目的,多是定性地对孔中连通裂隙进行定位、分析钻孔间水力联系。然而随着研究的逐渐深入,如何从 DTS 试验中获取更多对钻孔或对场地的定量认识将是未来主要研究方向之一。作为获取场地水文地质特征的有力工具,数值模拟应在基于 DTS 温度示踪的定量研究中发挥出重要的作用。数值模型能通过对地下水的流动过程及热运移过程的耦合模拟,重现钻孔中复杂的试验情景,并获取不同情景下钻孔中地下水对试验条件的水文响应或热响应^[44-45]。基于这样的数值模型,研究人员就有可能将 DTS 监测数据解译为相关的水文地质参数(如地

下水的流速、裂隙的导水系数等),实现对温度信号的定量解译。

此外,由于 DTS 温度示踪的试验方式多种多样,试验方式的选择、试验条件的设置对于监测数据的合理性及有效性至关重要。因此在 DTS 温度实验的前期设计阶段,数值模拟也应占有一席之地;基于数值模型,研究人员可在试验前期或试验过程中不断测试优化试验参数,如测温光纤的监测参数、A-DTS 试验中的热输入功率等,以达到预期的试验目标,获取合理且有效的监测数据。综上,数值模拟作为一种重要的技术手段,将在定性识别走向定量认识的研究过程中发挥出不可忽视的作用。

4 结论

由于具有时空连续性强、分辨率高、监测简便、成本低廉等优点,基于 DTS 的温度示踪正逐渐成为裂隙地下水流动特征识别研究中的可靠手段,已在识别地下水流动状态、钻孔中连通裂隙分布甚至裂隙水力性质等方面取得了许多新的认识。

a. 基于 DTS 的温度示踪试验方法可简单分为被动温度示踪及主动温度示踪。在被动温度示踪中,利用 DTS 可以同时多个钻孔进行近乎实时的高分辨率温度监测,可满足长期监测的需求;主动温度示踪的主要目的在于识别钻孔中连通裂隙分布及地下水流动状态,试验方式多样,且各方式之间也具有一定的相似之处。但各试验方式的内在物理机制及侧重点各有不同,需要根据实际情况进行选择或组合。

b. 钻孔中的垂向流动也可能是导致温度-深度曲线出现异常变化的主导因素。在基于 DTS 的温度示踪中,如何依据钻孔中的垂向流动选择搭配不同的试验手段,开展有针对性的研究,是需要重点关注和解决的问题,也是后续解译温度-深度剖面的重要前提。

c. 由于热运移与溶质运移机理的不同,温度示踪与溶质示踪所能提供的流动信息也有所不同,二者的协同运用,不仅可以互相验证,还可以相互补充,对裂隙开度、几何形态甚至裂隙网络连通性开展进一步识别研究。

d. 如何从 DTS 试验中获取对钻孔或对场地的定量认识也是未来的主要研究方向之一,数值模拟作为水文地质学中的有力工具,将在 DTS 监测数据的定量解译过程中发挥重要的作用。

基于 DTS 的温度示踪为场地尺度裂隙地下水流动特征识别提供了新的方法,有助于加深对裂隙介质地下水渗流及热运移规律的理解,在涉及裂隙地

下水的深部地质工程如高放核废物地质处置选址、地热资源开发等实际问题中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ANDERSON MARY P. Heat as a ground water tracer [J]. *Ground Water*, 2005, 43(6): 951-968.
- [2] SAAR M O. Review: geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19 (1): 31-52.
- [3] TRAINER F W. Temperature profiles in water wells as indicators of bedrock fractures [R]. Washington, D. C. : United States Geological Survey, 1968.
- [4] SOREY M L. Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells [J]. *Water Resources Research*, 1971, 7(4): 963-970.
- [5] GE S M. Estimation of groundwater velocity in localized fracture zones from well temperature profiles [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1998, 84 (1/2): 93-101.
- [6] 黄丽,郑春苗,刘杰,等. 分布式光纤测温技术在黑河中游地表水与地下水转换研究中的应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2):1-6. (HUANG Li, ZHENG Chunmiao, LIU Jie, et al. Application of distributed temperature sensing to study groundwater-surface water interactions in the Heihe River Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39 (2): 1-6. (in Chinese))
- [7] SIMONITS D, FRANZEN A. Permanent downhole temperature sensing succeeds for low cost wells [J]. *World Oil*, 2007, 228(5): 37-44.
- [8] 肖衡林,邓翔文,何俊,等. 基于分布式光纤温度传感技术的库水温度测量方法及应用 [J]. *水利水电科技进展*, 2011, 31 (2): 85-88. (XIAO Henglin, DENG Xiangwen, HE Jun, et al. Application of reservoir water temperature measuring method base on distributed optical fiber temperature sensing technology [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31 (2):85-88(in Chinese))
- [9] SELKER J, VAN DE GIESEN N, WESTHOFF M, et al. Fiber optics opens window on stream dynamics [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24):L24401.
- [10] 常启昕,孙自永,马瑞,等. 冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系研究进展 [J]. *水利水电科技进展*, 2016,36 (5): 87-94. (CHANG Qixin, SUN Ziyong, MA Rui, et al. A review of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36 (5):87-94. (in Chinese))
- [11] LOWRY C S, WALKER J F, HUNT R J, et al. Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(10): 9.
- [12] HENDERSON R D, DAY-LEWIS F D, HARVEY C F. Investigation of aquifer-estuary interaction using wavelet analysis of fiber-optic temperature data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(6): 1-6
- [13] VOGT T, SCHNEIDER P, HAHN-WOERNLE L, et al. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(1/2): 154-64.
- [14] BENSE V F, GLEESON T, LOVELESS S E, et al. Fault zone hydrogeology [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 127:171-192.
- [15] SHANAFIELD M, BANKS E W, ARKWRIGHT J W, et al. Fiber-optic sensing for environmental applications: where we have come from and what is possible [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(11): 8552-8557.
- [16] HURTIG E, GROSSWIG S, JOBMANN M, et al. Fiber-optic temperature measurements in shallow boreholes: experimental application for fluid logging [J]. *Geothermics*, 1994, 23(4): 355-364.
- [17] YAMANO M, GOTO S. Long-term monitoring of the temperature profile in a deep borehole: temperature variations associated with water injection experiments and natural groundwater discharge [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 152(4): 326-334.
- [18] LEAF A T, HART D J, BAHR J M. Active thermal tracer tests for improved hydrostratigraphic characterization [J]. *Ground Water*, 2012, 50(5): 726-735.
- [19] READ T, BOUR O, BENSE V, et al. Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using fiber-optic distributed temperature sensing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (10): 2055-2059.
- [20] READ T, BOUR O, SELKER J S, et al. Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 3706-3713.
- [21] BANKS E W, SHANAFIELD M A, COOK P G. Induced temperature gradients to examine groundwater flowpaths in open boreholes [J]. *Ground Water*, 2014, 52(6): 943-951.
- [22] COLEMAN T I, PARKER B L, MALDANER C H, et al. Groundwater flow characterization in a fractured bedrock aquifer using active DTS tests in sealed boreholes [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528:449-462.
- [23] READ T, BENSE V F, HOCHREUTENER R, et al. Thermal-plume fiber optic tracking (T-POT) test for flow velocity measurement in groundwater boreholes [J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*,

- 2015, 4(2): 197-202.
- [24] SELLWOOD S M, HART D J, BAHR J M. An in-well heat-tracer-test method for evaluating borehole flow conditions[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(8): 1817-1830.
- [25] SELLWOOD S M, HART D J, BAHR J M. Evaluating the use of in-well heat tracer tests to measure borehole flow rates[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2015, 35(4): 85-94.
- [26] DE LA BERNARDIE J, BOUR O, LE BORGNE T, et al. Thermal attenuation and lag time in fractured rock: theory and field measurements from joint heat and solute tracer tests [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(12): 10053-10075.
- [27] 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.
- [28] 冯凯滨. 基于相干光时域反射计的温度传感技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [29] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, et al. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light-source and detector [J]. *Electron Letter*, 1985, 21(13): 569-570.
- [30] SELKER J S, THÉVENAZ L, HUWALD H, et al. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12): 8.
- [31] BENSE V F, READ T, BOUR O, et al. Distributed temperature sensing as a downhole tool in hydrogeology [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(12): 9259-9273.
- [32] TYLER S W, SELKER J S, HAUSNER M B, et al. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(4): 11.
- [33] DRURY M J, JESSOP A, LEWIS T J. The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes[J]. *Geothermics*, 1984, 13(3): 163-174.
- [34] FREIFELD B M, FINSTERLE S, ONSTOTT T C, et al. Ground surface temperature reconstructions; using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(14): L14309.
- [35] KLEPIKOVA M V, le BORGNE T, BOUR O, et al. A methodology for using borehole temperature-depth profiles under ambient, single and cross-borehole pumping conditions to estimate fracture hydraulic properties [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/2/3/4): 145-152.
- [36] KLEPIKOVA M V, LE BORGNE T, BOUR O, et al. Inverse modeling of flow tomography experiments in fractured media [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(11): 7255-7265.
- [37] KLEPIKOVA M V, LE BORGNE T, BOUR O, et al. Passive temperature tomography experiments to characterize transmissivity and connectivity of preferential flow paths in fractured media [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512:549-562.
- [38] LIU G, KNOBBE S, BUTLER J J. Resolving centimeter-scale flows in aquifers and their hydrostratigraphic controls [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1098-1103.
- [39] KLEPIKOVA M V, le BORGNE T, BOUR O, et al. Heat as a tracer for understanding transport processes in fractured media; theory and field assessment from multiscale thermal push-pull tracer tests [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5442-5457.
- [40] PAILLET F L. Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(5): 997-1010.
- [41] CHATELIER M, RUELLEU S, BOUR O, et al. Combined fluid temperature and flow logging for the characterization of hydraulic structure in a fractured karst aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 377-386.
- [42] PEHME P E. The active line source temperature logging technique and its application in fractured rock hydrogeology [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2007, 12(4): 307-322.
- [43] PEHME P E, PARKER B L, CHERRY J A, et al. Improved resolution of ambient flow through fractured rock with temperature logs [J]. *Ground Water*, 2010, 48(2): 191-205.
- [44] KURYLYK B L, IRVINE D J. Heat: an overlooked tool in the practicing hydrogeologist's toolbox [J]. *Ground Water*, 2019, 57(4): 517-24.
- [45] KURYLYK B L, IRVINE D J, BENSE V F. Theory, tools, and multidisciplinary applications for tracing groundwater fluxes from temperature profiles [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2019, 6(1): e1329.

(收稿日期:2019-06-23 编辑:郑孝宇)