基于钻孔成像和孔内流速流向试验的裂隙介质渗透系数计算方法

卢婷[a]，王萍[b]，王涛[a*]，罗朝晖[a]，钱晨宇[a]

中国地质大学（武汉）a. 环境学院；b. 期刊社，武汉 430074

第一作者，E-mail：2766502011@qq.com

* 通信作者，E-mail：twang21@cug.edu.cn

2025-01-15 收稿；2025-03-19 修回；2025-04-03 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42172278)

中图分类号：O645.14　　文章编号：2096-8523(2025)03-0334-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250024

摘　要：水文地质参数的获取在工程中具有重要意义。钻孔成像试验和流速流向试验是近年来新兴起的求取渗透系数的方法，都可以对单裂隙渗透系数进行计算，具有试验周期短、设备数量少的特点。但钻孔成像试验所得的理想条件下的渗透系数并不能代表实际情况，流速流向试验只能对单裂隙进行测量，难以实现钻孔整体渗透系数计算。为了找到钻孔成像和流速流向试验在计算单裂隙渗透系数之间的关系，并提出一个更为方便的计算渗透系数的新方法。以利川煤矿区钻孔 ZW2 为例，通过地下水流速流向试验、钻孔成像试验求得等效渗透系数并与抽水试验对比。结果表明：钻孔成像试验和流速流向试验求得的等效渗透系数与抽水试验计算渗透系数结果基本一致，误差分别为 40% 和 9%；钻孔成像试验结果和流速流向试验结果的对比表明，两者具有线性相关性，回归方程为 $Y=-0.23+0.82X$；通过两者之间的线性关系对钻孔成像试验所得渗透系数进行修正，得到了一个更为方便和精确的计算渗透系数的新方法。该方法较为可靠，可直接计算单裂隙、区域裂隙、整个钻孔等不同尺度裂隙渗透系数，具有试验周期短、工作量少和成本较低、适用范围广等优点。

关键词：钻孔成像；流速流向；抽水试验；渗透系数；裂隙介质

渗透系数在渗流力学研究中起着重要作用，是进行水文地质研究的重要参数之一，渗透系数的正确与否直接关系渗流分析结果的可靠性[1-3]，但渗透系数的计算一直是一个难点[4-5]。目前，常用的求取裂隙介质渗透系数的方法主要有裂隙几何测量法、流速流向试验法、野外抽/压水试验法、数学模型反演求解法等[6]。但抽/压水试验法工作量大且成本高；裂隙几何测量法主要通过岩心资料获取裂隙几何参数，测量结果受岩心采集过程影响；流速流向试验法主要通过示踪试验、电位差法等获得大范围流速流向，仅能获得测量点处的单裂隙渗透参数[7-10]。

钻孔成像技术是一种钻孔内的测井方法，可以获取孔内方位准确、清晰度高的连续裂隙影像，并可进行裂隙的测量与统计，如马峰等[11]、HAN 等[12]、GOCHIOCO 等[13] 利用钻孔成像技术对钻孔内的裂隙进行了测量，较好地排除了钻探过程中岩心扰动裂隙几何要素的问题。利用裂隙的隙宽与产状，可以进行裂隙渗透张量的计算。如李文雅等[14] 利用钻孔成像技术对研究区内裂隙的渗透张量进行了计算，并通过压水试验对钻孔成像所得渗透系数进行了修正。张礼等[15] 利用钻孔成像技术对研究区裂隙的几何特性进行了测量，计算出渗透主值和主方向。但钻孔成像方法是在假设裂隙光滑、平行、无填充的理想条件下进行的，所求得的等效渗透系数结果偏

著录信息：卢婷，王萍，王涛，等. 基于钻孔成像和孔内流速流向试验的裂隙介质渗透系数计算方法［J］. 地质科技通报，2025，44(3)：334-343.
LU Ting, WANG Ping, WANG Tao, et al. Calculation method of permeability coefficient of fractured media based on borehole imaging and in-borehole flow velocity and direction tests[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 334-343.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

大，并不能代表实际裂隙渗透性情况；且对于渗透系数的计算都集中在单裂隙或裂隙段渗透张量上，缺少对于全孔的渗透系数的计算。

不同于传统测量地下水流速流向的方法，Aqua Vision 流速流向仪[16-18]是近年来兴起的一种直接测量地下水流速流向的技术，可以应用于裂隙岩体渗透性研究。2018 年，蒋文豪等[19]利用流速流向仪和钻孔成像，对地下水流速流向进行了测量。2019 年，郭绪磊等[20]使用 Aqua Vision 流速流向仪计算了不同点位裂隙的渗透系数，并与压水试验结果进行了对比。2024 年，HU 等[21]将流速流向仪法所得渗透系数与抽水试验结果进行了对比。但该方法只能对单裂隙进行逐一流速和流向测量，试验工作量大，难以全面反映整个钻孔或大范围区域的水流特征，无法准确代表整个含水层的渗透性。在某些复杂地质条件下，如裂隙分布不均匀或含水层非均质性较强等，试验结果的可靠性和适用性可能受到限制。

但流速流向试验和钻孔成像试验在渗透性评价中具有互补性。流速流向试验能够校正钻孔成像试验在理想条件下获得的渗透系数，而钻孔成像试验则可克服流速流向试验需要密集布点测量的局限性。因此本研究以利川煤矿区水文地质钻孔 ZW2 为例，将钻孔成像和流速流向试验结合起来，通过流速流向计算所得的单裂隙渗透系数对钻孔成像试验在相同裂隙处的结果进行修正，建立起两者之间的关系，进而得到修正后的不同裂隙段的实际渗透系数。该方法可以选取少量点位测量流速流向，并获得符合实际条件的单裂隙、裂隙段等不同尺度的渗透系数，可以更好地节约成本，极大地减少工作量，为以后计算实际条件下不同尺度渗透系数提供更为可靠、方便的方法。

1　试验场地概况

清江源位于利川市汪营镇清江，是长江在湖北省内的第二大支流，为湖北省乃至长江中下游重要的生态屏障。由于附近废弃煤矿矿井内不断有废水涌出，并流入清江源河流中，导致清江源污染严重。为研究煤矿矿井水对清江源污染的影响，在场地内共施工了 6 个钻孔，本研究以 ZW2 钻孔为例，进行钻孔成像和流速流向试验结果分析，其地理位置和水位地质条件概况和位置见图 1 。

本研究选取的水文地质钻孔 ZW2 位于利川市清江源头区上游的空地上，坐标经度 108.622 448°，纬度 30.216 355°，孔口标高 1 181.87 m，孔深 50 m，

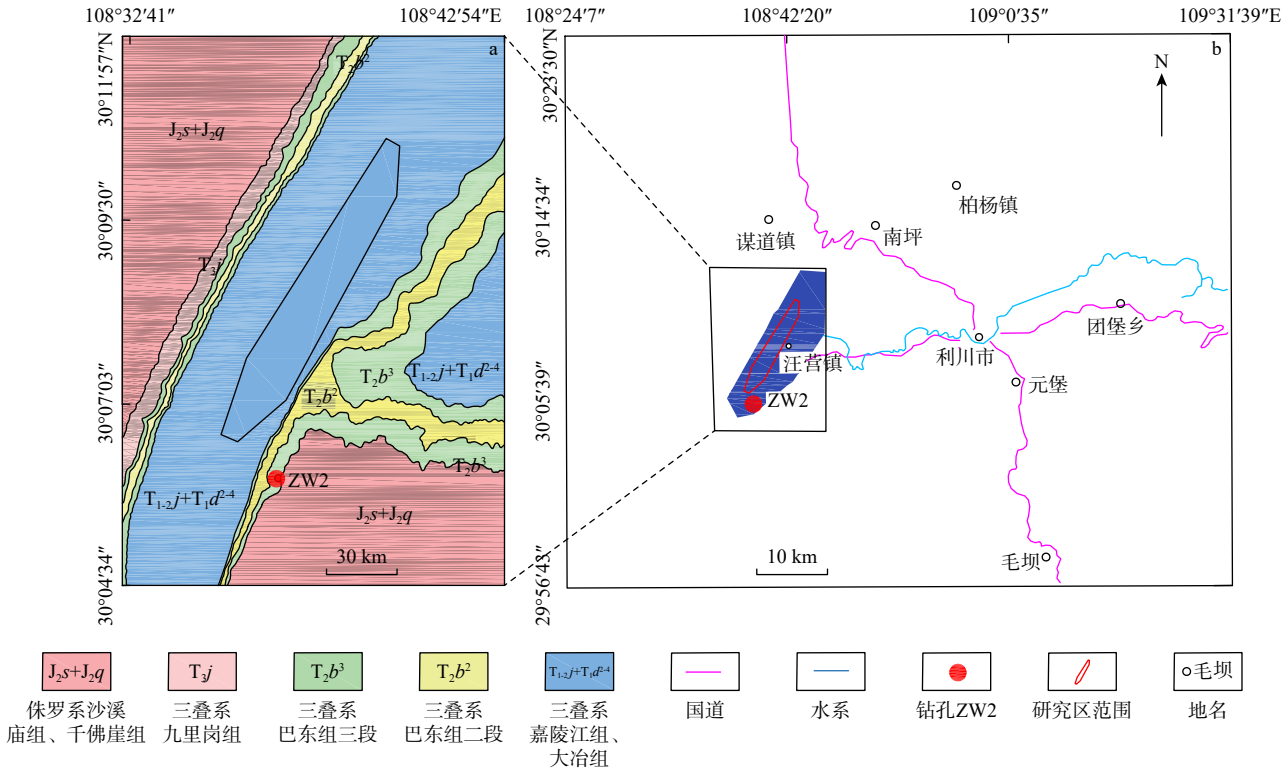


图 1　研究区水位地质条件概况 (a) 和地理位置 (b)

Fig. 1　Overview of hydrogeological conditions (a) and the geographical location (b) of the study area

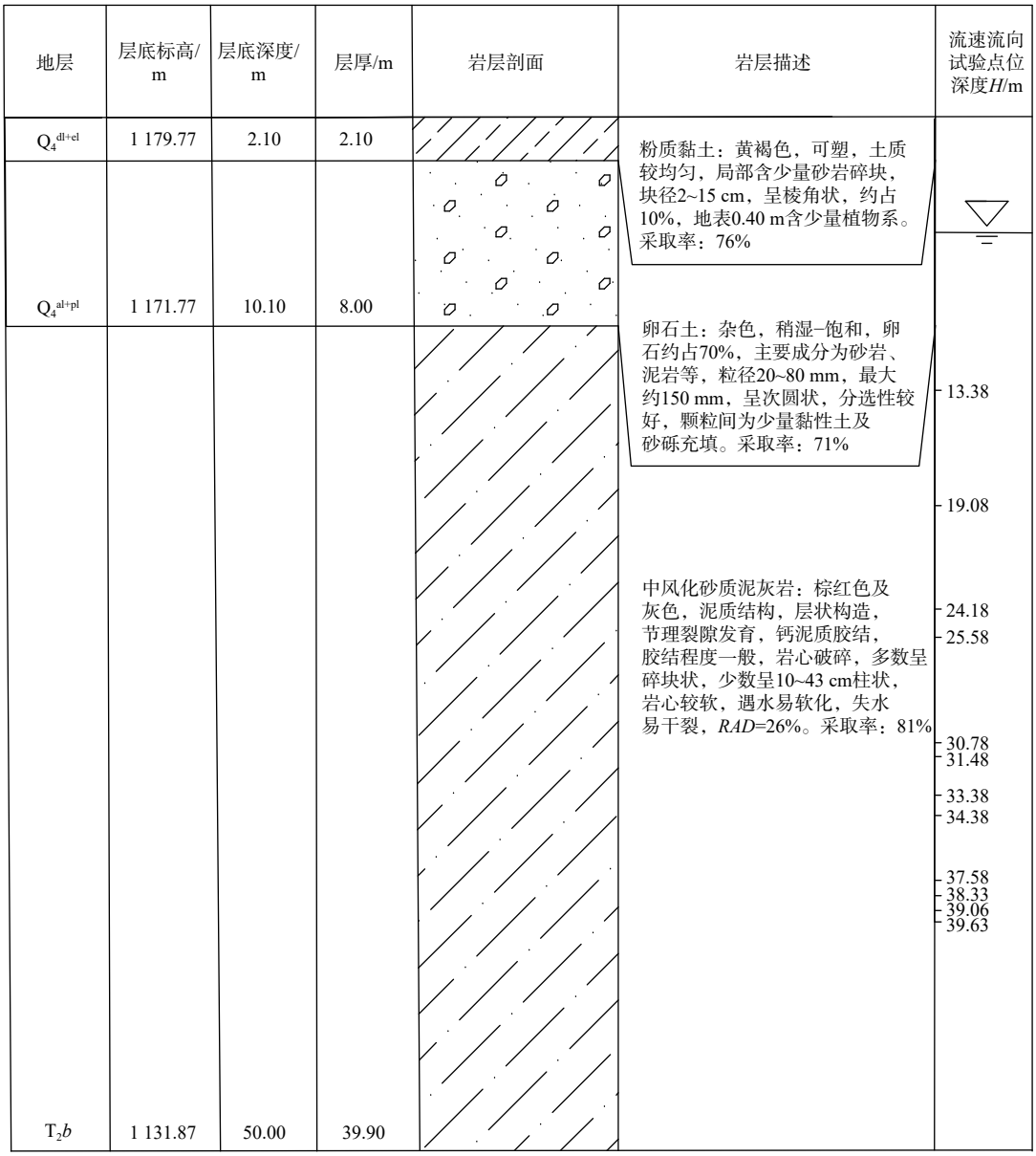
地下水位埋深 5.6 m。钻孔开孔层位为三叠系巴东组(T_2b),主要岩性从地面开始依次为粉质黏土、卵石土、中风化砂质泥灰岩。其中粉质黏土层厚 2.1 m,卵石土层厚 8 m,中风化砂质泥灰岩层厚 39.9 m,整体上渗透性较好,属含水层。地下水类型主要为赋存于第四系地表覆盖层的孔隙水和赋存于岩体裂隙、风化带的裂隙水,接受大气降水补给,向河流排泄。孔内对第四系含水层进行了止水。钻孔柱状图如图 2 所示。

在进行钻孔成像试验和流速流向试验前,根据场地的水文地质条件,采用稳定流抽水试验法进行单孔抽水试验。试验采用额定流量 1.5 m^3/h,观测时间间隔为 1, 1, 1, 1, 1, 5, 5, 5, 10, 10, 10, 10, 30 min…,恢复水位观测时间间隔与抽水时一致,所测得数据如图 3 所示。

根据拟建场地水文地质条件、井管结构类型和单孔抽水一个观测孔的试验条件,确定边界条件为:无限含水层边界、承压非完整井结构。根据边界条件[22-27]选择水文地质参数计算公式为:

$$K=\frac{0.366Q}{lS_{\mathrm{w}}}\lg\frac{0.66l}{r_{\mathrm{w}}}, \tag{1}$$

式中:K 为渗透系数,m/d;Q 为稳定抽水流量,m^3/d;r_{w} 为抽水孔半径,m;S_{w} 为抽水孔水位降深,m;l 为 ZW2 钻孔与观测井质检的距离,m。



Q_4^{dl+el}. 第四系残破积物;Q_4^{al+pl}. 第四系冲洪积物;T_2b. 三叠系巴东组;*RAD*. 岩石磨圆度

图 2　ZW2 钻孔柱状图

Fig. 2　ZW2 drilling core columnar chart

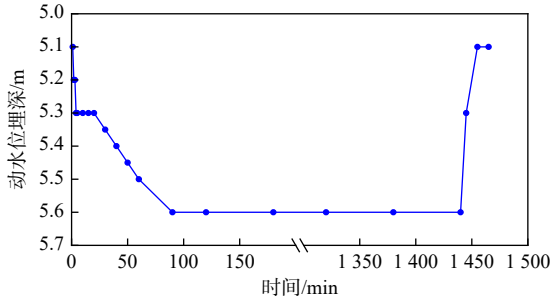


图 3　降深–时间历时曲线图

Fig. 3　Drawdown-time duration curve

根据抽水试验结果和公式(1)求得钻孔 ZW2 处的渗透系数 K=1.32 m/d。

2　试验原理和实施

2.1　钻孔成像试验

钻孔成像试验采用 Heavy-Duty Base System GS-0002 钻孔成像仪，该设备通过摄像头和带有自动调节光圈的广角镜头，对钻孔内裂隙进行拍摄，并将拍摄到的孔壁四周及下部的全景录像通过电缆分两路分别传送到地面监视器和录像带上。通过 DSP(数字像素系统 digital pixel system)图像采集和处理技术，地面监视器上收集视频信号，可以实时显示深度和孔壁图像，方便在试验过程中尽快发现问题并及时调整；录像机将计数脉冲信号记录在磁带上，方便后期对试验数据进行整理和处理[11, 28-29]。

在计算渗透系数时，岩溶通道和裂隙隙宽范围没有明显的界定。但地下水在 1 mm 以下隙宽裂隙中表现为层流，而在 1 mm 以上隙宽裂隙中表现为紊流[30-31]。立方定律是建立在层流的基础上，当水流处于紊流时，立方定律不再适用[5, 32-33]。因此，为了方便计算将钻孔内隙宽大于 1 mm 裂隙概化为岩溶通道，将隙宽小于 1 mm 概化为裂隙。

对于裂隙，将裂隙概化为一无限延伸的光滑平行板，在单裂隙中地下水运动的立方定律基础上，根据渗透性叠加原理，将每组渗透结构面的渗透张量进行叠加，公式如下[34-35]：

$$\boldsymbol{K}=\sum_{i=1}^{n}\frac{g\sum_{j=1}^{m}b^3}{12\mu_{\mathrm{w}}L\cos\theta}\begin{bmatrix}1-\cos\beta_i\sin^2\gamma_i & -\sin\beta_i\cos\beta_i\sin^2\gamma_i & -\cos\beta_i\sin\gamma_i\cos\gamma_i\\ -\sin\beta_i\cos\beta_i\sin^2\gamma_i & 1-\sin^2\beta_i\sin^2\gamma_i & -\sin\beta_i\sin\gamma_i\cos\gamma_i\\ -\cos\beta_i\sin\gamma_i\cos\gamma_i & -\sin\beta_i\sin\gamma_i\cos\gamma_i & 1-\cos^2\gamma_i\end{bmatrix},\tag{2}$$

式中：i 为组；n 为组的总数；j 为条；m 为每组裂隙总数；β 为裂隙倾向(°)；γ 为裂隙倾角(°)；g 为重力加速度，m/s^2；μ_{w} 为运动黏滞系数，m^2/s；b 为隙宽，m；L 为平行裂隙垂向距离，m；θ 为裂隙与垂向方向夹角，(°)。

裂隙隙宽是指张开裂隙两壁之间的距离。在钻孔成像试验中，隙宽的统计是根据拍摄得到的图像进行分析，通常会对图像进行放大等，这会在无意中扩大隙宽的统计值。同时，隙宽并不是固定不变的，且在钻探过程中往往会扰动孔壁，致使隙宽统计值过大[36]。因此本研究中隙宽采用有效水力隙宽，计算公式见式(3)[37-39]。根据国际岩石力学学会对结构面粗糙程度的描述，JRC(节理面粗糙度系数 joint roughness coefficient)范围在 8 ~ 10 之间，本研究中 JRC 取值为 10。

$$b_{\mathrm{yx}}=\frac{E^2}{JRC^{2.5}},\tag{3}$$

式中：E 为开度；b_{yx} 为有效裂隙开度，m。

岩溶管道具有很大的导水能力，地下水在岩溶管道中往往处于紊流状态。BAETON[37] 将岩溶管道的 K 值表达为：

$$K=\frac{d^2}{32}\times\frac{\omega}{\mu},\ \varphi=1,\tag{4}$$

式中：d 为管道内径，m；ω 为流体的重率，kg/(m^2·s^2)，μ 为流体的动力黏度，kg/(m·s)；φ 为孔隙率。

2.2　流速流向试验

流速流向试验采用 G.O.Sensor 地下水流向流速仪(智能化地下水监测仪)，内置电子罗盘，可以精准定位流向。通过显微镜头拍摄水中胶体粒子的图像并提供精确的磁航向信息，对不同状态下的胶体粒子图像进行数字化，通过数学运算确定同一个胶体粒子在不同时间的相对位置，进而计算相应粒子的运动方向和速度，实时测定地下水流速。与传统的地下水流向流速测定方式相比，可以实现单井、快速、实时测量地下水流向流速。

根据钻孔成像结果，在不同裂隙发育程度段内选点进行流速流向试验[30-31]。同时为了更好地计算出代表整个钻孔的等效渗透系数，本研究在 0，(0, 0.05]，(0.05, 0.2]，>0.2 cm 4 个隙宽范围内分别选取 3 个点进行地下水流速流向的测量，最终选取点位结果如图 2，表 1。

渗透流速是单位时间内通过特定过水断面的地下水流量和过水断面面积之比，实际流速是指地下水在含水层空隙中的真实流速[40-41]。本试验测得的流速为地下水实际流速，实际流速受空隙大小、形状

表 1　地下水流速流向试验点位

Table 1　Groundwater water flow velocity and direction test point

测试点编号	隙宽范围/cm	深度H/m
1	(0.05，0.2]	13.38
2	(0，0.05]	19.08
3	>0.2	24.18
4	>0.2	25.58
5	0	30.78
6	0	31.48
7	(0.05，0.2]	33.38
8	(0，0.05]	34.38
9	0	37.58
10	>0.2	38.33
11	(0.05，0.2]	39.06
12	(0，0.05]	39.63

等的影响，各部位流速并不相等，所以其不能直接计算等效渗透系数。故本研究使用平均实际流速来计算等效渗透系数，其公式[20] 如下：

$$K = K_{\mathrm{r}} V / J, \tag{5}$$

式中：K_{r} 为体积裂隙率；V 为地下水流速，m/d；J 为水力梯度。

3　试验结果

3.1　钻孔成像试验结果

在钻孔成像试验前，对钻孔进行洗井并进行沉淀，至钻孔内水由浑浊变清晰。而后对深度仪进行校正使其在孔口处为 0 m，沿钻孔轴向开展全孔段数字图像采集工作，进行井道电视影像录制。截取的部分钻孔成像图片如图 4。

根据钻孔成像试验结果发现，在 [8, 20.8]，(28.6, 31.9]，(36.1, 42.8] m 段裂隙较为不发育，在 (20.8, 28.6]，(31.9, 36.1]，(42.8, 50] m 段裂隙较为发育。因此对等效渗透系数的计算分为 [8, 20.8]，(28.6, 31.9]，(36.1, 42.8]，(20.8, 28.6]，(31.9, 36.1]，(42.8, 50] m 共 6 段进行。裂隙基本情况如表 2 所示。

将钻孔成像试验测得数据进行整理计算，分别计算裂隙和岩溶管道渗透系数。同时按照岩溶通道和裂隙隙宽所占比例对计算所得渗透系数进行加权平均，计算每段钻孔范围内的渗透系数。所得等效渗透系数结果如表 3 所示。

3.2　流速流向试验结果

根据钻孔成像测得的裂隙计算体积裂隙率[42]，根据钻孔揭露的地下水水位和附近河流水位计算水力梯度，得到等效水力梯度 J 为 1.18。计算各点位的等效渗透系数结果如图 5 所示。其中在 13.38, 19.08, 30.78, 31.48, 33.38, 34.38 m 处裂隙不发育或发育程度较小，隙宽在 0.2 m 以下，计算所得的渗透系数较小；在 24.18, 25.58, 38.33 m 处裂隙发育程度较高，隙宽大于 0.2 m，计算所得的渗透系数较大。

4　讨　论

4.1　与抽水试验渗透系数之间的关系

在钻孔成像试验中，裂隙发育程度较大段裂隙的等效渗透系数较大，裂隙发育程度较小段裂隙的等效渗透系数较小。与抽水试验结果对比，抽水试验所得钻孔渗透系数 K=1.32 m/d，钻孔成像试验测得钻孔的平均等效渗透系数为 1.85 m/d，以抽水试验为基准，其偏差为 40%。

在流速流向试验中，各点位处地下水流速和隙宽相对应，隙宽较大的裂隙处地下水流速较大，隙宽较小的裂隙处地下水流速较小。整个钻孔求得的等效渗透系数为 1.44 m/d，与抽水试验 1.32 m/d 的渗透系数结果基本一致，误差约为 9%。

4.2　孔内成像与流速流向渗透系数之间的关系

对比钻孔成像和流速流向试验结果可知，在相同点位处，钻孔成像和流速流向试验所测得的等效

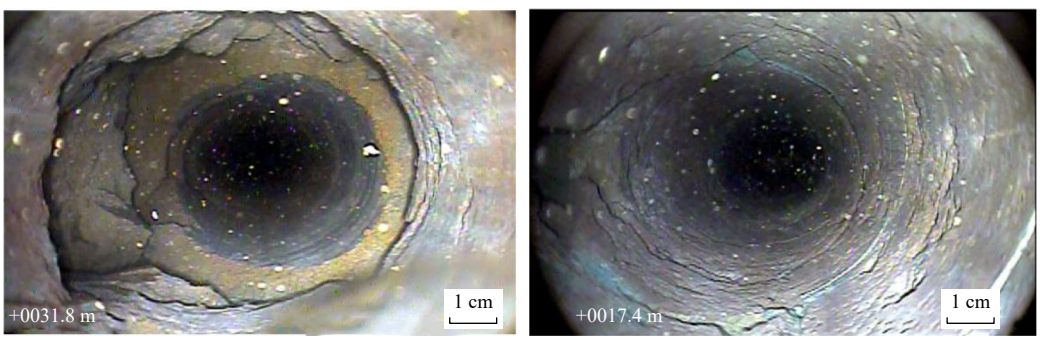


图 4　钻孔成像图

Fig. 4　Drilling imaging diagram

表 2　钻孔裂隙统计

Table 2　Drilling fracture statistics

深度/m	优势裂隙		裂隙数量/条		孔隙率
	组	产状	隙宽<1 mm	隙宽>1 mm	
[8，20.8]	1	335°∠45°	405	16	0.008
	2	225°∠53°			
（20.8，28.6]	1	335°∠45°	401	14	0.029
	2	225°∠53°			
（28.6，31.9]	1	335°∠45°	5	6	0.002
	2	225°∠53°			
（31.9，36.1]	1	335°∠45°	200	11	0.042
	2	225°∠53°			
（36.1，42.8]	1	335°∠45°	4	12	0.011
	2	225°∠53°			
（42.8，50]	1	335°∠45°	210	5	0.038
	2	225°∠53°			

渗透系数结果基本一致，且整体上钻孔成像所测得的等效渗透系数较流速流向试验所测得的等效渗透系数更大。这可能是因为在使用隙宽进行等效渗透系数的计算时将裂隙看成相互平行的平板模型，忽略了裂隙的填充情况。

在钻孔深度 19.08 m 和 37.58 m 2 处，裂隙隙宽小于 0.01 cm，但所测得的地下水流速分别为 334.89 m/d 和 220.67 m/d，流速较大，这是因为这 2 个点位靠近附近的较宽岩溶管道，对试验结果产生了干扰。因此剔除这 2 点对两者进行线性相关性分析，得到钻孔内钻孔成像试验计算的等效渗透系数和流速流向试验计算的等效渗透系数的回归方程为 $Y=-0.23+0.82X$，且在 95% 的置信区间内，表明线性回归方程显著，两者具有很强的相关性，在实际应用中，钻孔成像法可以对钻孔内所有裂隙进行统计，得到连续的裂隙分布，并计算出每条单裂隙和区域裂隙在理想条件下的渗透张量，而流速流向法由于工作量的限制，只能对有限裂隙的流速流向进行测量，得到有限的单裂隙渗透系数，因此，可利用该相关性对流速流向法测试的点位进行优化。具体相关情况如图 6 所示。

4.3　流速流向计算渗透系数的优点及适用性分析

本研究结合了钻孔成像试验和流速流向试验，很好地解决了钻孔成像试验只能计算理想条件下的等效渗透系数问题[21]。相较于抽/压水试验，本研究采用的方法对试验场地要求较低。在抽/压水试验中，往往需要 3 口以上的观测井且需要钻孔内可以持续稳定出水，对当地的条件和造价要求较高。本方法不考虑场地要求，只需 1 个钻孔即可完成试验。此外，本方法可以减少工作量和节省成本。抽/压水试验的时间取决于研究区域的地层渗透性，工作量大

表 3　钻孔成像等效渗透系数统计

Table 3　Statistical of equivalent permeability coefficient for borehole imaging

深度/m	渗透系数张量/(m·d^{-1})			渗透系数主值/(m·d^{-1})	等效渗透系数 K(裂隙)/(m·d^{-1})	等效渗透系数 K(岩溶管道)/(m·d^{-1})	分段渗透系数/(m·d^{-1})
[8，20.8]	1.47×10^{-1}	-4.27×10^{-5}	-2.57×10^{-3}	1.47×10^{-1}	0.15	0.65	0.398
	-4.27×10^{-5}	1.47×10^{-1}	-5.07×10^{-4}	1.47×10^{-1}			
	-2.57×10^{-3}	-5.07×10^{-4}	9.02×10^{-4}	1.47×10^{-1}			
（20.8，28.6]	7.26×10^{-4}	-4.17×10^{-7}	-1.28×10^{-5}	7.25×10^{-4}	7.23×10^{-4}	6.68	3.340
	-4.17×10^{-7}	7.25×10^{-4}	-7.22×10^{-7}	7.23×10^{-4}			
	-1.28×10^{-5}	-7.22×10^{-7}	-4.45×10^{-6}	7.22×10^{-4}			
（28.6，31.9]	3.83×10^{-3}	8.36×10^{-6}	-3.19×10^{-5}	3.83×10^{-3}	3.83×10^{-3}	0.44	0.223
	8.36×10^{-6}	7.82×10^{-5}	4.68×10^{-6}	3.83×10^{-3}			
	-3.19×10^{-5}	4.68×10^{-6}	4.45×10^{-5}	3.83×10^{-3}			
（31.9，36.1]	3.62×10^{-4}	-1.92×10^{-9}	-6.32×10^{-6}	3.62×10^{-4}	3.62×10^{-4}	7.03	3.515
	-1.92×10^{-9}	3.62×10^{-4}	-1.10×10^{-7}	3.62×10^{-4}			
	-6.32×10^{-6}	-1.10×10^{-7}	-6.62×10^{-5}	3.61×10^{-4}			
（36.1，42.8]	3.84×10^{-5}	-6.60×10^{-6}	-4.36×10^{-6}	4.43×10^{-5}	4.42×10^{-5}	0.97	0.486
	-6.60×10^{-6}	3.67×10^{-5}	-3.32×10^{-6}	4.42×10^{-5}			
	-4.36×10^{-6}	-3.32×10^{-6}	1.58×10^{-5}	4.42×10^{-5}			
（42.8，50]	3.80×10^{-3}	-2.02×10^{-8}	-6.63×10^{-5}	3.80×10^{-3}	3.80×10^{-3}	6.29	>3.147
	-2.02×10^{-8}	3.80×10^{-3}	-1.16×10^{-6}	3.80×10^{-3}			
	-6.63×10^{-5}	-1.16×10^{-6}	1.16×10^{-6}	3.79×10^{-3}			

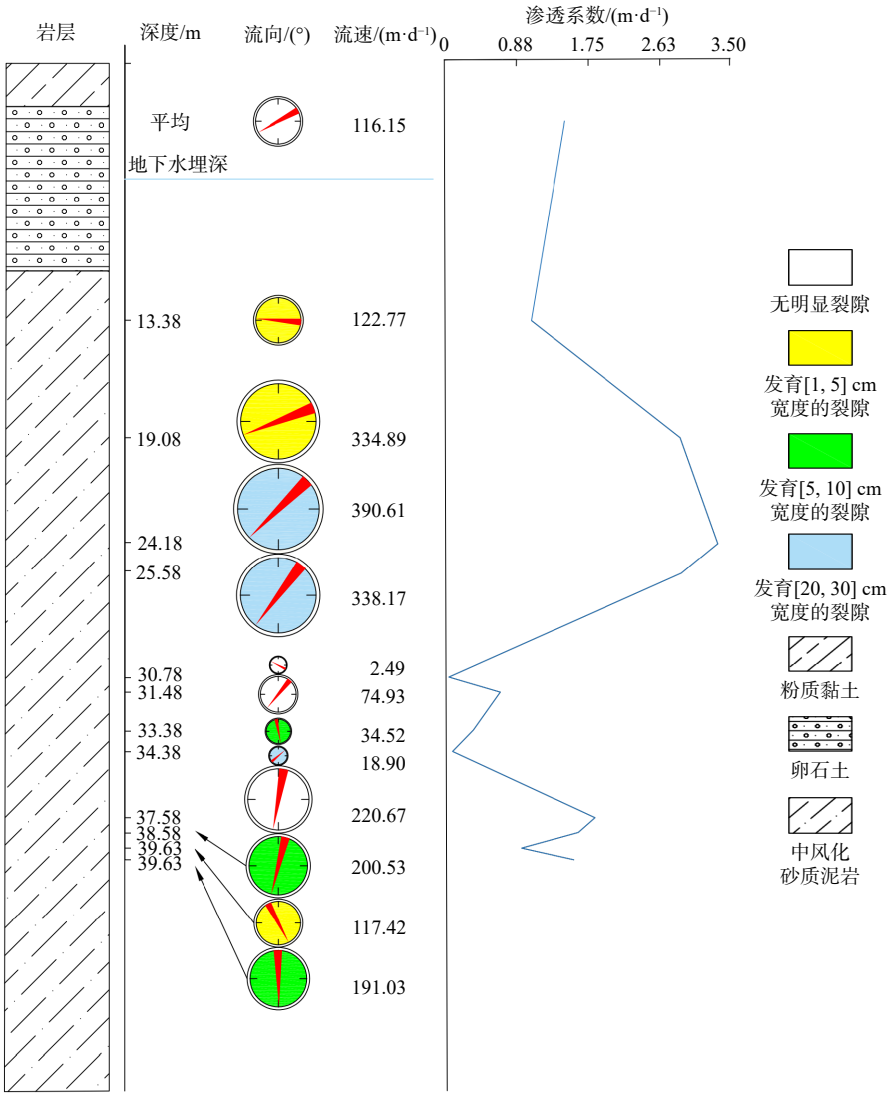


图 5　流速流向等效渗透系数统计

Fig. 5　Statistics of equivalent permeability coefficient for flow velocity and direction

且成本较高。本方法只需在钻孔成像的基础上，选取部分点位进行流速流向试验，试验时间和成本较少。同时，本方法可以计算不同点位、不同区域裂隙处渗透系数，计算精度更高。相较于抽/压水试验，本方法不仅可以计算不同精度裂隙的渗透系数，还可以根据实际需要，随时调整渗透系数的计算区域。

但本方法中各裂隙水力梯度采用了统一值，对于不同地下水系统的裂隙，其值应单独确定，这在一定程度上限制了本方法的使用。此外，流速流向仪不能测定垂向流速，对于补给区或排泄区地下水流垂向流速分量不可忽略区并不适用。

5　结　语

本研究以利川市清江源煤矿区 ZW2 钻孔为例，在钻孔内分别进行钻孔成像试验和流速流向试验。将钻孔成像和流速流向试验结果进行对比，发现在相同点位处钻孔成像试验结果较大，但两者基本一致。与抽水试验结果的对比表明，钻孔成像和流速流向试验取得的结果误差较小，分别为 40% 和 9%，验证了两者在计算等效渗透系数方面的可靠性。同时，建立了两者之间的关系，提出了一个更为便捷、准确的计算渗透系数的新方法：通过流速流向试验对钻孔成像试验所得渗透系数进行修正，可以获得单裂隙、区域裂隙和整个钻孔等不同尺度的实际渗透系数，为以后利用 2 种方法求取等效渗透系数有很好的借鉴意义。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

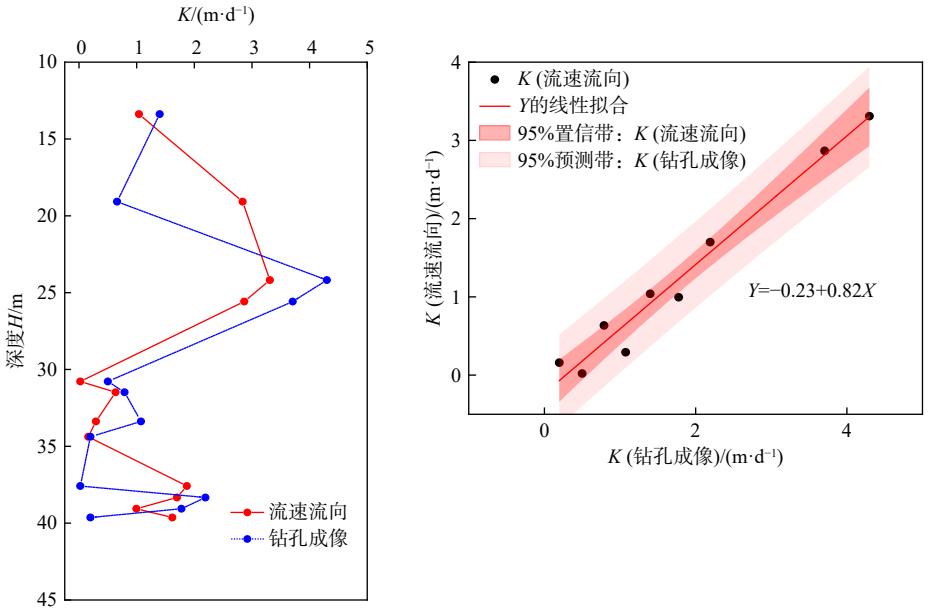


图 6　钻孔成像和流速流向试验结果对比

Fig. 6　Comparison of borehole imaging and flow velocity and direction test results

参考文献：

[1] 陈崇希, 胡立堂. 渗流–管流耦合模型及其应用综述 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 70-75.
CHEN C X, HU L T. A review of the seepage-pipe coupling model and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 70-75. (in Chinese with English abstract)

[2] 樊鑫成, 叶祖洋, 黄诗冰, 等. 岩体三维裂隙网络地质熵与渗透特性关系研究 [J]. 力学学报, 2023, 55(3): 792-804.
FAN X C, YE Z Y, HUANG S B, et al. Study on connectivity and entropy scale of three-dimensional fracture network[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(3): 792-804. (in Chinese with English abstract)

[3] 董晓飞, 胡成, 曹孟雄, 等. 裂隙介质渗透性的升尺度转换研究 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 259-267.
DONG X F, HU C, CAO M X, et al. Study on the upscaling transformation of hydraulic conductivity in fractured media[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 259-267. (in Chinese with English abstract)

[4] BAALOUSHA H M. Theis equation revisited: From infinite to finite aquifer and from fully to partially penetrating well[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2024, 24: 101069.

[5] LIU K W, ZHAO X R, LI X D, et al. Effects of delay time on crack coalescence between two boreholes[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 129: 104210.

[6] 孙蓉琳, 梁杏, 靳孟贵. 裂隙岩体渗透系数确定方法综述 [J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 120-123.
SUN R L, LIANG X, JIN M G. Review on determination of hydraulic conductivity of fractured rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 120-123. (in Chinese with English abstract)

[7] 谷现平, 聂新恕, 周江, 等. 利用高密度电法仪探测地下水流速流向 [J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(增刊 1): 83-85.
GU X P, NIE X S, ZHOU J, et al. Groundwater flow rate and direction detecting through high density electric method instrument[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(S1): 83-85. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘静, 刘盛东, 曹煜, 等. 地下水渗流与地电场参数响应的定量研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 986-993.
LIU J, LIU S D, CAO Y, et al. Quantitative study of geoelectrical parameter response to groundwater seepage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 986-993. (in Chinese with English abstract)

[9] ABDUL N S S, LOKE M H, LEE C Y, et al. Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(4): 647-661.

[10] JARDANI A, DUPONT J P, REVIL A. Self-potential signals associated with preferential groundwater flow pathways in sinkholes[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2006, 111(B9).

[11] 马峰, 陈刚, 胡成, 等. 利用钻孔成像研究基岩地区的渗透张量变化规律 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 496-500.
MA F, CHEN G, HU C, et al. Change of permeability tensors in fractured rock mass based on intelligent drillhole optical imager[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 496-500. (in Chinese with English abstract)

[12] HAN Z Q, WANG C Y, HU S, et al. Application of borehole camera technology in fractured rock mass investigation of a submarine tunnel[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 83(s): 609-614.

[13] GOCHIOCO L M, MAGILL C, MARKS F. The borehole camera: An investigative geophysical tool applied to engineering, environmental, and mining challenges[J]. The Leading Edge, 2002, 21(5): 474-477.

[14] 李文雅, 刘建磊. 高倾角裂隙岩体渗透张量确定方法探讨 [J]. 人民长江, 2014, 45(1): 53-56.
LI W Y, LIU J L. Determination of permeability tensor of fractured rock mass with high dip- angles[J]. Yangtze River, 2014, 45(1): 53-56. (in Chinese with English abstract)

[15] 张礼, 齐庆新, 张勇, 等. 采动覆岩裂隙场三维形态特征及其渗透特性研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 695-705.

ZHANG L, QI Q X, ZHANG Y, et al. Study on three-dimensional shape and permeability of mining-induced fractured field in overburden rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 695-705. (in Chinese with English abstract)

[16] 张昊, 敖松, 刘俊洋. 北京地铁下穿运河区间地下水流速流向测试 [J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(7): 27-29.
ZHANG H, AO S, LIU J Y. Test of groundwater velocity and flow direction in rivercrossing section of Beijing Metro[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(7): 27-29. (in Chinese with English abstract)

[17] 汪启航, 李旭, 郭强, 等. 表皮效应对井筒内地下水流速影响数值模拟研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 89-95.
WANG Q H, LI X, GUO Q, et al. Numerical simulation on influence of skin effect on groundwater flow velocity in wellbore[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 89-95. (in Chinese with English abstract)

[18] 独仲德. 几种地下水流向流速测定法的分析 [J]. 地下水, 1990, 12(3): 165-168.
DU Z D. Analysis of several methods for measuring groundwater flow direction and velocity[J]. Ground Water, 1990, 12(3): 165-168. (in Chinese)

[19] 蒋文豪, 周宏, 李玉坤, 等. 基于钻孔内地下水流速和流向的岩溶裂隙介质渗透性研究 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(6): 1-7.
JIANG W H, ZHOU H, LI Y K, et al. Permeability measurement of karst fractured media based on groundwater velocity and direction within a borehole[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[20] 郭绪磊, 朱静静, 陈乾龙, 等. 新型地下水流速流向测量技术及其在岩溶区调查中的应用 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 243-249.
GUO X L, ZHU J J, CHEN Q L, et al. Flow direction and its application in the investigation of karst area[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(1): 243-249. (in Chinese with English abstract)

[21] HU F, HUANG C S, HAN J H, et al. An improved technology for monitoring groundwater flow velocity and direction in fractured rock system based on colloidal particles motion[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 7685.

[22] 江峰, 黄琨, 马丁山, 等. 潜水含水层井流模型的对比研究 [J]. 地质科技情报, 2015, 34(3): 160-164.
JIANG F, HUANG K, MA D S, et al. Comparative study on well flow model in unconfined aquifer[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 160-164. (in Chinese with English abstract)

[23] 李本军. Theis 公式和 Dupuit 公式计算渗透系数对比与探讨 [J]. 煤炭与化工, 2023, 46(3): 62-66.
LI B J. Comparison and discussion of Theis formula and Dupuit formula for calculating permeability coefficient[J]. Coal and Chemical Industry, 2023, 46(3): 62-66. (in Chinese with English abstract)

[24] 崔原萍. Dupuit 稳定井流公式的应用及评价 [J]. 能源与节能, 2022(10): 55-57.
CUI Y P. Application and evaluation of dupuit's steady well flow formula[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(10): 55-57. (in Chinese with English abstract)

[25] 王项, 吴昱荟. 地下水勘察过程中的抽水试验分析及水文参数计算 [J]. 中国新技术新产品, 2023(9): 84-86.
WANG X, WU Y H. Analysis of pumping test and calculation of hydrological parameters in the process of groundwater exploration[J]. New Technology & New Products of China, 2023(9): 84-86. (in Chinese)

[26] 齐跃明, 吴佳欣, 王旭升, 等. 变径抽水井降深和涌水量关系的混合井模型 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 65-74.
QI Y M, WU J X, WANG X S, et al. Mixed-well model of the relation between drawdown and water inflow in a pumping well with variable-diameter[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 65-74. (in Chinese with English abstract)

[27] 焦赳赳, 万军伟, 王旭升, 等. 陈崇希教授在水文地质领域的学术研究贡献 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 1-14.
JIAO J J, WAN J W, WANG X S, et al. Prof. Chongxi Chen's academic research contributions in the area of hydrogeology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 1-14. (in Chinese with English abstract)

[28] 刘灿灿, 郑西贵, 王术龙, 等. 基于钻孔成像的结构面智能化识别系统 [J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 720-729.
LIU C C, ZHENG X G, WANG S L, et al. Research on intelligent identification system of structural plane based on borehole imaging[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4): 720-729. (in Chinese with English abstract)

[29] HE S Q, OU S N, LU Y, et al. Failure mechanism of methane drainage borehole in soft coal seams: Insights from simulation, theoretical analysis and in-borehole imaging[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 168: 410-421.

[30] Anon. The theory of ground-water motion[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 1940, 21(2): 648.

[31] QIAN J Z, LIU Y, WANG J H, et al. Non-lcl and tracer test for groundwater flow in a single fracture[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(1): 104-108.

[32] YAN C Z, ZHENG Y C, WANG G. A 2D adaptive finite-discrete element method for simulating fracture and fragmentation in geomaterials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105439.

[33] XU Z G, ZHANG J S, SHAO L, et al. Numerical simulation investigation on the seepage characteristics of aperture dilated rough single fracture under two-way hydro-mechanical coupling effect[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 110: 204865.

[34] SNOW D T. Anisotropie permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.

[35] SKJETNE E, HANSEN A, GUDMUNDSSON J S. High-velocity flow in a rough fracture[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 383: 1-28.

[36] 刘丽红, 李娴, 鲁程鹏. 岩溶含水系统水动力特征研究进展 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 21-24.
LIU L H, LI X, LU C P. Research progress on hydrodynamic characteristics of karstic water system[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 21-24. (in Chinese with English abstract)

[37] BAETON N. The theory behind high pressure grouting: Part 1[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2004, 36(9): 28-30.

[38] BAETON N. The theory behind high pressure grouting: Part 2[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2004, 36(10): 33-35.

[39] 陈雨孙. 渗流理论的新进展:《多孔介质流体动力学》中译本评介 [J]. 工程勘察, 1983, 11(3): 20-21.
CHEN Y S. New development of seepage theory: A review of

Chinese version of fluid dynamics in porous media[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1983, 11(3): 20-21. (in Chinese)

[40] 肖先煊, 许模, 蔡国军, 等. 基于潜水渗流模型的地下水实际流速 [J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(4): 11-14.
XIAO X X, XU M, CAI G J, et al. On actual flow velocity of groundwater based on diving percolation model tests[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(4): 11-14. (in Chinese with English abstract)

[41] 刘光尧. 广义管井水头损失 [J]. 勘察科学技术, 1994(1): 28-33.
LIU G Y. The generalized water head loss of pipe well[J]. Site Investigation Science and Technology, 1994(1): 28-33. (in Chinese with English abstract)

[42] 张杨, 宁立波, 尹峰, 等. 岩体体裂隙率野外测量及计算方法的研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 10-18.
ZHANG Y, NING L B, YIN F, et al. New method of field measurement and calculation for volumetric fracture rate of rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 10-18. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于钻孔成像和孔内流速流向试验的裂隙介质渗透系数计算方法”

Calculation method of permeability coefficient of fractured media based on borehole imaging and in-borehole flow velocity and direction tests

LU Ting[a], WANG Ping[b], WANG Tao[a*], LUO Chaohui[a], QIAN Chenyu[a]

a. School of Environmental Studies; b. Journal Press, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

First author, E-mail: 2766502011@qq.com

* Corresponding author, E-mail: twang21@cug.edu.cn

Abstract: The acquisition of hydrogeological parameters is of great significance in engineering. Borehole imaging test and velocity and direction test are emerging methods for obtaining permeability coefficients in recent years. Both of them can calculate the permeability coefficient of a single fracture with the advantages of short test cycles and few equipment. However, the permeability coefficients obtained under ideal conditions by borehole imaging tests cannot represent the actual situations, and the velocity and direction tests can only measure individual fractures, making it difficult to calculate the overall permeability coefficient of the borehole. [**Objective**] In order to investigate the relationship between borehole imaging and flow velocity and direction tests in calculating the permeability coefficient of a single fracture, a new and more convenient method for calculating the permeability coefficient was proposed. [**Method**] Taking the borehole ZW2 in the Lichuan coal mining area as an example, this study determines the equivalent permeability coefficient through the underground water flow velocity and direction tests, and the borehole imaging test. The results were then compared with the result from the pumping test. [**Results**] The results show that the equivalent permeability coefficients obtained from the borehole imaging test and the velocity and direction tests are basically consistent with the permeability coefficient calculated by the pumping test, with errors of 40% and 9%, respectively. There is a linear correlation of permeability coefficients between the results from borehole imaging test and those from the velocity and direction tests, with the regression equation being $Y=-0.23+0.82X$. By correcting the permeability coefficients obtained from the borehole imaging test through the above linear relationship, a new method for calculating the permeability coefficient has been obtained, which is more convenient and accurate. [**Conclusion**] This method is relatively reliable and can directly calculate the permeability coefficients of single fractures, regional fractures, and the entire borehole at different scales. It has the advantages of short test periods, less work, lower cost, and wide applicability.

Key words: borehole imaging; flow velocity and direction; pumping test; permeability coefficient; fractured media

Received: 2025-01-15; Revised: 2025-03-19; Accepted: 2025-04-03

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250024