隧道穿越岩溶区及断层带突水机理与防控对策研究

舒宗运　彭丁茂　刘　骏
（浙江数智交院科技股份有限公司　杭州　310030）

［摘　要］硬质岩地区的岩溶区和断层带突水防治的关键在于突水判据的建立。文章先从理论研究出发，以材料力学、结构力学和理论力学为基础，建立了“有效隔水岩层（柱）”的突水力学结构模型；采用了构建函数的方法，得到了“有效隔水岩层（柱）”的总势能函数表达式；基于突变理论，构建了岩溶区及断层带突水的尖点突变模型，获得了“有效隔水岩层（柱）”厚度、长度、水压力及岩石力学参数之间的函数关系；基于断裂力学，建立了一种硬质岩地区的岩溶区和断层带突水损伤力学判据，并以正在施工的广西某隧道为例，开展了应用研究，提出了隧道穿越硬质岩地区的岩溶区及断层带突水防控对策。研究结果表明：突水临界厚度值按计算突水临界厚度值的 1. 5 倍取用，能较为有效地指导施工，验证了理论方法较为合理；提出的岩溶区或断层带突水防控对策，对施工具有一定的指导意义，为解决隧道岩溶区和断层带突水问题提供一种新的理论支持。

［关键词］岩溶区突水；断层带突水；突水机理；防控对策；能量跃迁

0　引言

随着我国隧道与地下工程的大力建设，至目前为止，无论建设规模和数量，还是在难度方面都位居世界第一，特别是中西部地区的快速发展，已逐渐成为交通基建的重心。隧道与地下工程建设面临着地质构造复杂、地质环境多变、突水突泥灾害频发等诸多严峻考验。据统计，在交通、水电等地下工程基础建设中，近 80%的重大安全事故[1]是因隧道或地下空间的突水、突泥灾害及处置不当引起，造成了大量人员伤亡、重大经济损失与工期延误，甚至隧道或地下空间被迫改线或停建。此外，突水、突泥引发的地表塌陷等次生地质灾害，也给经济造成重大损失。然而，目前国内外与隧洞相关规范或规程，均未明确给出隧洞穿越岩溶区和断层带的设计和突水突泥的防控措施。因此，岩溶区及断层带的隧道及地下空间的突水机理及防控对策研究，一直是隧道及地下空间安全施工过程中亟待解决的重点和难点问题。多年以来，诸多学者和工程师们在隧道穿越岩溶区或断层带的突水机理与防控对策方面做了大量研究，亦取得了较多的科研成果。

在突水机理研究方面，大致可分为三类。一类是压裂式突水，即隧道开挖卸荷后形成临空面，在地应力和水压力共同作用下，防隔水岩体结构所受内力超过结构本身抗拉强度或抗剪强度而破坏，导致突水发生；针对完整防隔水岩体结构，岩体结构受力后产生弯矩，隧道掌子面形成受拉侧，达到抗拉强度后，产生破损，形成压裂式突水[2-3]；针对碎裂岩体或致密散体防突结构，在岩土体内部或接触面发生剪切破坏而形成突水[2]。二类是劈裂式突水，即岩溶水或断层水一侧的防突岩体结构已存在裂隙损伤，随着隧道开挖卸荷，防突岩体结构逐渐变薄，裂隙中的水压力对裂隙有劈裂作用，裂隙向隧道空间逐步扩展，最终形成贯通裂隙而突水。三类是渗透突水，即围岩结构破碎且破碎岩块之间充填黏性土，岩溶或断层水向隧道空间发生渗流，细颗粒在渗流力作用下被带走，逐渐形成连通管涌而发生渗透式突水。基于上述三类突水模式，众多学者以材料力学、结构力学等为基础，建立了防突岩体结构力学

收稿日期：2021-12-06
作者简介：舒宗运（1987-　），男，工程师，主要从事交通工程地质勘察工作。

模型，构建了突水力学判据，推导了防突结构未加固和加固后的安全厚度计算公式，譬如，周栋梁等[4]基于岩石剪切、冲切破坏的 Mohr 判据和格里菲斯判据，建立 4 种破坏模式下岩溶区分岔隧道底板安全厚度预测公式；吴祖松等[5]基于统一强度理论和弹性理论推导出防突岩体结构在简支约束和固支约束条件下的安全厚度计算公式；郭佳奇等[6]在研究掌子面防突层裂纹的尺寸和方位、岩石断裂韧度值、裂纹面强度参数的基础上，提出了岩溶隧道掌子面防突岩体结构的失稳判据，推导了防突岩体结构的临界安全厚度计算公式；YANG 等[7]基于 Hoek-Brown 非线性强度准则和极限分析理论，建立了岩溶隧道掌子面防突岩体失稳的最小厚度判据。另外，部分学者还开展了影响安全厚度的因素敏感度分析[8]。目前，在岩溶或断层带突水力学判据研究和防突岩体结构安全厚度计算公式推导方面，很少从能量角度出发进行研究，部分学者也尝试从能耗角度研究了隧道距离顶板岩溶的安全厚度[8]，但都以简单做功原理和能量守恒原理进行推导，很少从脆性的岩体结构表现出的能量突变角度去研究。

在岩溶区或断层带的突水防控对策研究方面，也取得和总结了较多的科研成果和防治经验。郭佳奇等[9]结合宜万铁路沿线众多岩溶隧道突水灾害治理的工程实践，概括性地总结了我国近年来岩溶隧道施工中突水防治的基本原则和六项治理对策。张智健等[10]以国家一带一路重点项目云南临沧临翔至清水河高速公路马家寨隧道工程为依托，在分析评价隧道围岩稳定性的基础上，提出了地质预报及全断面超前帷幕注浆堵水防治措施。罗依珍等[11]以音频大地电磁法为手段探测隧道的富水区，提出的注浆堵水方案很好地解决了突水问题。

前辈学者虽然做了大量研究工作，然而因地质条件的复杂性和差异性，岩溶区或断层带突水机理和防控对策很难达成共识，且从能量角度出发，在岩体突变破断导致突水方面的研究相对偏少。本文以广西某隧道穿越岩溶区和断层带为应用研究实例，提出“有效隔水岩层（柱）”的概念，并建立岩溶区和断层带突水损伤力学判据，计算“有效隔水岩层（柱）”厚度，提出的防控对策能有效解决突水问题，对隧道施工突水防治具有一定的指导作用。

1 岩溶区及断层带隧道突水机理

本文从能量角度出发，认为当硬质岩体积蓄的势能超过了岩体本身所能容纳的最大势能后，发生突然破断，进而引发岩溶区和断层带突水，由此提出了岩溶区及断层带隧道突水机理。本文提出的突水机理基于四个假设提前条件：①隧道围岩为硬质岩，力学行为表现为脆性；②“有效隔水岩层（柱）”（岩溶水或断层水与隧道之间扣除松动圈破碎岩体后的那部分岩体）可等效为梁结构；③未开挖前，“有效隔水岩层（柱）”内部无缺陷或力学损伤，为完整岩体；④隧道围岩为连续均质且各向同性的弹性体，满足小变形理论要求。

1.1 岩溶区及断层带隧道突水过程

隧道穿越岩溶区或断层带时，岩溶水或断层水突破“有效隔水岩层（柱）”而发生突水，突水位置可能发生在隧道顶板、底板或掌子面（见图 1）[12-14]。

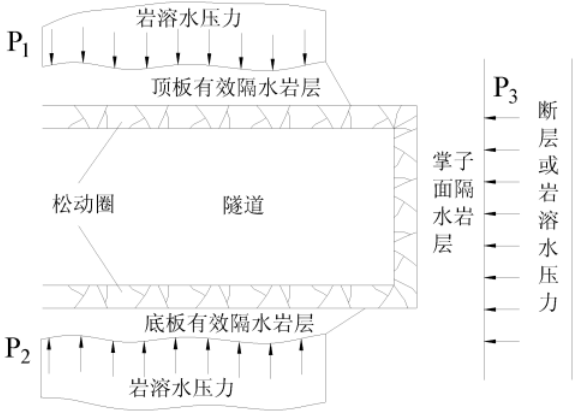

图 1 岩溶区及断层带突水位置示意图

隧道开挖后，在岩溶水或断层水的水压力和地应力双重作用下，“有效隔水岩层（柱）”向隧道临空方向发生形变，水压力和地应力对“有效隔水岩层（柱）”做功，当“有效隔水岩层（柱）”厚度较薄时，水压力和地应力所做的功大于“隔水岩层（柱）”吸收的能量，

“有效隔水岩层（柱）”受拉侧发生拉裂损伤（图2），并逐渐向岩溶区和断层带方向发展，直至全部破断，而导致岩溶区和断层带突水，“有效隔水岩层（柱）”从发生受拉损伤至全部破断的时间非常短，表现为突然破断，因此岩溶区和断层带突水具有突发性和瞬时性。

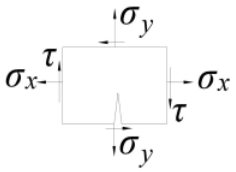

图2 “有效隔水岩层（柱）”单元体受拉侧发生拉裂损伤

鉴于上述岩溶区和断层带突水的突发性特征，“有效隔水岩层（柱）”从变形蓄势至破断释放变形能是一种能量突变过程，可用突变理论进行解释[15]。

1.2 岩溶区和断层带突水结构力学模型

本文将隧道顶底板及掌子面的“有效隔水岩层（柱）”简化为单宽的简支“岩梁”，岩梁受岩溶区或断层带内地下水的压力（均布水压力 q_w）、两端围岩的约束力（水平约束力 F 及力矩 M）及自重，隧道空间不受力。隧道顶底板的“有效隔水岩层（柱）”自重与均布水压力 q_w 方向均位于竖直方向上，自重与均布水压力 q_w 综合考虑后的合力可表示为 q；掌子面的“有效隔水岩层（柱）”自重方向与水压力 q_w 方向垂直，变形过程中，自重不做功，故不考虑自重。因此，岩梁所受的力系见图3。

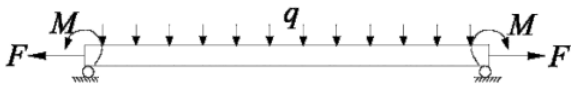

图3 岩梁力学模型

1.3 岩梁势函数的确定

岩梁在力系作用下发生变形（图4），假设岩梁横截面的弹性模量为 E，横截面惯性矩为 I，最大变形量 δ 发生在中部，长度方向为 x，岩梁横截面高度为 H，宽度为单宽1m，并设 w 是岩梁上任意位置 x 处的变形量。

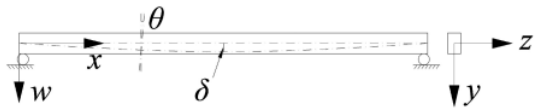

图4 岩梁变形及坐标系

岩梁上任意位置 x 处的变形量 $\omega(x)$ 为：

$$\omega(x)=\delta\sin(\frac{\pi x}{L}) \tag{1}$$

根据材料力学理论及高等数学曲率变换公式，岩梁变形后的曲率 k 为：

$$k=\frac{M(x)}{EI}=\frac{\omega''(x)}{[1+\omega'^2(x)]^{3/2}}\approx\omega''(x)\sqrt{1+\omega'^2(x)} \tag{2}$$

根据材料力学理论，岩梁内的变形能为：

$$\begin{aligned}U&=\frac{1}{2}\sum\varepsilon\sigma=\frac{EI}{2}\int[\omega''(x)\sqrt{1+\omega'^2(x)}]^2dx\\&=\frac{EI\pi^6\delta^4}{16L^5}+\frac{EI\pi^4\delta^2}{4L^3}\end{aligned} \tag{3}$$

岩梁为小变形构件，任意横截面的转角 θ 非常小，岩梁两端伸缩变形量为 Δ，则有：

$$\sin\theta\approx\tan\theta \tag{4}$$

$$\Delta=\int_0^L(1-\sqrt{1-\omega'^2(x)})dx \tag{5}$$

因 $|\omega'(x)|=1$，$\omega'^2(x)=1$，有：

$$\sqrt{1-\omega'^2(x)}=1-\frac{1}{2}\omega'^2(x) \tag{6}$$

$$\Delta=\frac{1}{2}\int_0^L\omega'^2(x)dx \tag{7}$$

岩梁所受的轴力 F 做的功 W_F 为：

$$W_F=-F\Delta=-\frac{F}{2}\int_0^L\omega'^2(x)ds=-\frac{F\pi^2}{4L}\delta^2 \tag{8}$$

水压力 q_w 所做的功 w_q 为：

$$W_q=q_w\int_0^L w(x)dx=\frac{2q_wL}{\pi}\delta \tag{9}$$

岩梁的总势能由三部分组成，即应变能、轴力做的功和水压力做的功，因此岩梁的总势能函数（势函数）为：

$$\begin{aligned}E&=U+W_F-W_q\\&=\frac{EI\pi^6}{16L^5}\delta^4+\frac{\pi^2}{4L}(\frac{EI\pi^2}{L^2}-F)\delta^2\\&\quad-\frac{2q_wL}{\pi}\delta\end{aligned} \tag{10}$$

势函数是以最大变形量δ为变量的函数，在确定的地质条件下，“有效隔水岩层（柱）”的势函数仅与变形量δ有关，势函数的形式满足尖点突变模型的标准形式。

1.4 突水尖点突变模型构建

基于尖点突变模型理论，岩溶区和断层带突水的尖点突变模型势函数的标准形式为：

$$V(x)=\frac{x^4}{4}+\frac{a}{2}x^2+bx \tag{11}$$

式中：$V(x)$—“有效隔水岩层（柱）”的势函数（势能），即岩梁最大变形量为x时所贮存的能量；x—岩梁中部的最大变形变量；a、b—控制参数。

势函数$V(x)$是以a、b为控制变量的函数，“有效隔水岩层(柱)”在突变破断前后均处于力学平衡状态，因此势函数式(11)必须驻值，则势函数$V(x)$的一阶导函数所对应的方程式必然成立且有实根。势函数$V(x)$的一阶导函数对应的方程为：

$$x^3+ax+b=0 \tag{12}$$

式（12）为三维平衡曲面方程，在$a-b-x$构成的空间坐标系中，三维平衡曲面的空间形态由上、中、下三叶组成（图5），方程式（12）所对应的判别式为：

$$\Delta=4a^3+27b^2 \tag{13}$$

由控制变量$a-b$构成的平面坐标系中，判别式（13）是一条半立方抛物线，由三维平衡曲面上所有突变点投影在$a-b$平面的集合，称为分叉集，在（0，0）处有一个尖点。

势函数的一阶导函数方程式（11）存在分叉集的充分条件为判别式（12）$\Delta=0$，由此求得的三个实数根分别为：

$$x_1=\frac{2b}{a},\quad x_2=x_3=-\frac{3b}{2a}$$

“有效隔水岩层（柱）”发生突变破断的过程，即是势函数从下叶的平衡位置$x_2=x_3$突变跃迁到上叶平衡位置x_1的过程。平衡位置$x_2=x_3$所处的物理状态为隧道未开挖前的初始稳定状态，平衡位置x_1所处的物理状态为“有效隔水岩层（柱）”发生突变破断后的稳定状态。

岩梁的总势能函数公式（10）按岩溶区和断层带突水的尖点突变模型势函数的标准形式（10）进行整理后，有：

$$x=\frac{\pi}{L}\left[\frac{EI\pi^2}{4L}\right]^{1/4}\delta \tag{14}$$

$$a=\frac{L}{2}\left[\frac{4L}{EI\pi^2}\right]^{1/2}\left[\frac{EI\pi^2}{L^2}-F\right] \tag{15}$$

$$b=-\frac{2L^2}{\pi^2}q_w\left[\frac{4L}{EI\pi^2}\right]^{1/4} \tag{16}$$

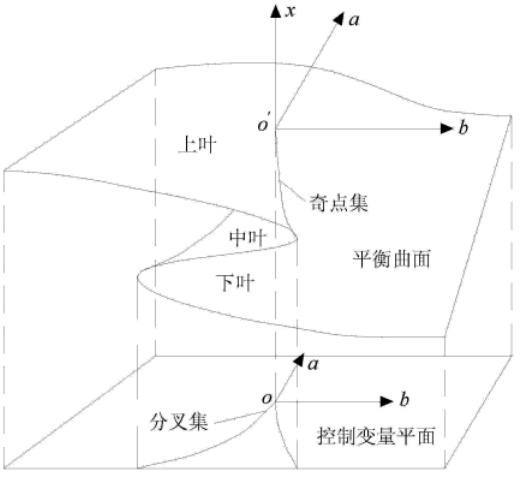

图5 平衡曲面与控制变量平面

“有效隔水岩层（柱）”的势函数存在交叉集的必要条件为$a\leqslant 0$，则有：

$$F\geq\frac{EI\pi^2}{L^2} \tag{17}$$

1.5 岩溶区和断层带突水损伤力学判据建立

根据上述分析，以岩梁单宽1m进行计算，式（17）可变换为：

$$h\leq\sqrt[3]{\frac{12FL^2}{E\pi^2}}=h_b \tag{18}$$

式中：h_b—“有效隔水岩层（柱）”发生突变破断的突水临界厚度值，m。

从式（18）中可以看出，“有效隔水岩层（柱）”发生突变破断的临界条件为：厚度小于等于临界厚度[16-18]，则“有效隔水岩层（柱）”的突变损伤力学判据为：

$$h=\sqrt[3]{\frac{12FL^2}{E\pi^2}}=h_b \tag{19}$$

2 工程应用实例研究

本文研究对象为广西某分离式特长隧道，左洞设计长度 1403m，最大埋深约 168m；右洞设计长度 1400m，最大埋深约 158m。

2.1 工程地质及水文地质条件

（1）工程地质条件

根据地质调绘及钻探结果，隧道范围地表为第四纪覆盖层残坡积含碎石粉质粘土，厚度<1m；覆盖层以下为基岩，以断层为界，小里程为泥盆系郁江阶（D_{2y}）白云质灰岩，产状为 282°∠16°，大里程为东岗岭阶（D_{2d}）泥质灰岩，产状为 300°∠11°。基岩总体呈深灰色，隐晶质结构，中厚层状构造，局部夹薄层泥岩，节理裂隙较发育，完整程度为较破碎~较完整，锤击声清脆，岩芯呈柱状，岩质坚硬。

隧道最大埋深约 168m，中部地表出露断距约 150m 的压扭性断层，产状为 265°∠60°，断层带内岩体受构造挤压作用明显，表现为构造破碎带，呈土夹碎石状，局部为构造角砾状，岩质较软。断层内富含锰锌矿，因此断层地表出露处有较多废弃的露天矿坑，矿坑深度 5~20m，坑底距离隧道顶板约 145m，雨季时，矿坑成为汇水区，形成短暂的积水洼地；断层带内溶蚀发育，钻孔揭示断层内发育有较大的无充填溶洞，高约 5-7m。

（2）水文地质条件

断层带易形成导水通道和储水空间，雨季时，矿坑内有大量积水，水位距离隧道约 158m，积水和降雨可通过断层下渗，使断层内充水，水力联系较强，隧道穿越断层时，采坑内的积水通过断层导入隧道，容易引发突水、突泥。

2.2 断层及岩溶区综合勘查

（1）断层的导水性探查

为了查明断层带的导水性及其它区域的地球物理特性，采用瞬变电磁法和音频大地电磁法进行综合探查，音频大地电磁法物探结果见图 6，从图中可以看出，断层范围内卡尼亚视电阻率等值线扭曲严重，具有明显的响应特征，相对视电阻率值为 50~100Ω·m，为低阻异常区，由此可推测此断层具有良好的导水性。

在断层内布置有一个钻孔（SK0571），根据钻孔岩芯情况可以判别：断层内岩体破碎，局部有石英细脉充填，此断层具有良好的导水性。

根据钻探和物探勘察综合判别，断层导水性良好，隧道开挖过程中，可能面临突水问题，对施工影响较大。

（2）岩溶区的富水性探查

瞬变电磁法和音频大地电磁法综合物探勘查结果见图 7。从图中可以看出，共查明岩溶发育区 4 处，其中岩溶区 1、3、4 富水性较强，岩溶区 2 富水性较弱，从安全角度出发，本文认为 4 处岩溶区对隧道施工均有较大影响。隧道施工中直接揭露岩溶区 1、2、3，岩溶区 4 位于隧道顶部，隧道施工过程中，可能因“有效隔水岩层（柱）”厚度不足，发生突水事故。

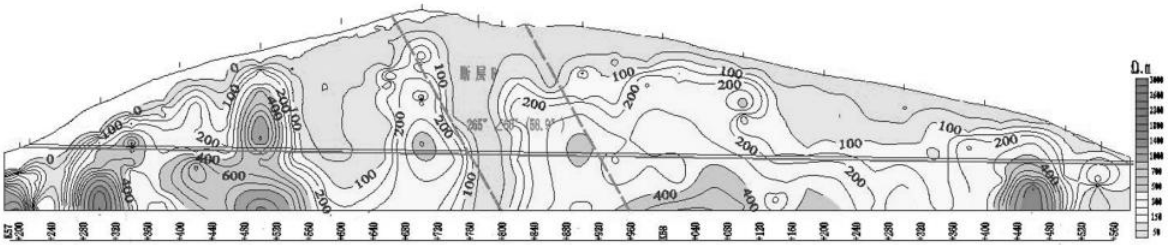

图 6 音频大地电磁法纵断面

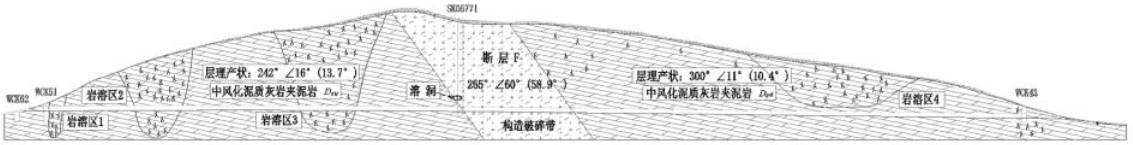

图7　场地工程地质纵断面

2.3　岩溶区及断层带突水分析

（1）断层带突水临界厚度确定

隧道临近断层带时，“有效隔水岩层（柱）”的平均内力 $F = 4160h_b$ kN（按自重应力考虑），断层带附近岩体平均弹性模量 $E = 1.62$GPa，隧道宽度 $L = 12$m，断层带的“有效隔水岩层（柱）”发生突水的临界厚度计算结果为 $h_b = 0.68$m。

（2）岩溶区突水临界厚度确定

岩溶区突水分析力学参数选取与突水临界厚度计算结果见表1。

表1　岩溶区力学参数选取表

岩溶区	内力 F /kN	弹性模量 E /GPa	隧道宽度 L /m	突水临界厚度 h_b /m
岩溶区1	$339h_b$	1.62	12	0.20
岩溶区2	$1980h_b$	1.62	12	0.47
岩溶区3	$3678h_b$	1.62	12	0.64
岩溶区4	$1961h_b$	1.62	12	0.47

（3）岩溶区及断层带突水分析

经过上述岩溶区及断层带的突水临界厚度计算，“有效隔水岩层（柱）”厚度均比较小，但实际厚度要大于理论计算厚度，主要有两个原因：①本文在进行理论推导时，假定“有效隔水岩层（柱）”没有力学损伤，实际岩体结构本身发育的节理裂隙和隧道开挖形成的松动圈均让岩体有损伤；②弹性模量是由岩块试验得到，岩体的弹性模量要比岩块小，内力计算采用的是自重应力，没有考虑构造应力作用，计算内力小于实际内力。因此，综合上述两个原因，通过本工程应用实践，突水临界厚度按表1中计算的突水临界厚度值的1.5倍进行取用，1.5倍由本工程实践所得，因地质条件的复杂性，需经大量工程验证。

为防止岩溶区和断层带突水，需留足安全距离，临界安全距离可表示为“松动圈厚度+‘有效隔水岩层（柱）’厚度”，需在临界安全距离之外采取岩溶区和断层突水防治措施。

3　岩溶区和断层带突水防控对策探讨

岩溶区和断层带发育区域地质条件复杂，不可能依靠单一勘察方法查明其工程及水文地质条件，结合上述实例研究，提出如下综合防控对策：

3.1　地面综合物探

基于地质调绘结果，对岩溶、构造发育的灰岩地区，应先进行地面物探。对于埋深大于120m的隧道，物探方法可选用可控源音频大地电磁法和瞬变电磁法进行综合探查；埋深小于120m的隧道，物探方法可选用高密度电法与可控源音频大地电磁法或瞬变电磁法进行综合探查。物探测线除了沿隧道走向布置外，应根据地质条件适当布置横向测线，查明视电阻率异常区分布情况，并结合地质条件进行综合研判与解释。

3.2　地面钻探

隧道进出洞口段及洞身段除了布置常规的地质钻孔外，应根据先行的地面综合物探探查的视电阻率异常区分布情况，并结合常规地质钻孔布置物探验证钻孔，根据验证结果，再对先行地面综合物探结果进行分析，对低阻异常区进行综合解释。

3.3　合理设计隧道标高

根据地面综合物探和地面钻探勘察结果，分析岩溶区发育范围和分布特征，合理设计隧道标高，保证“有效隔水岩层”足够厚度情况下，避开岩溶突水风险区。

3.4　超前物探

以地面物探及钻探结果为基础，隧道掘进

过程中，采用超前物探探测前方岩溶区或断层带的含水情况，物探方法可采用瞬变电磁法，探测方式可选用横向、纵向（图 8 和图 9）或混合 3 种扇形布置方式（角度可根据实际工程调整）。图 10 为隧道掌子面正前方典型瞬变电磁探测的物探结果[19-21]。

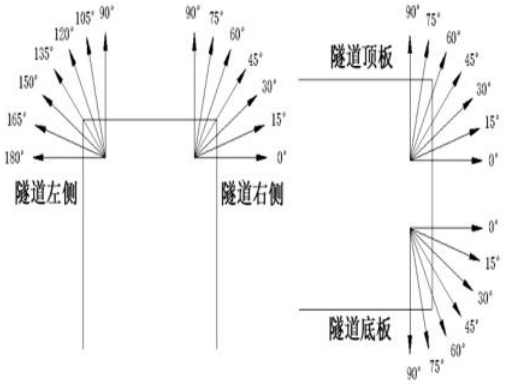

图 8　横向扇形布置方式

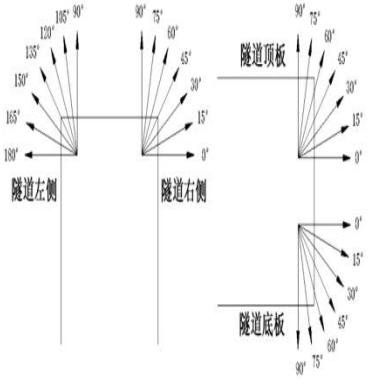

图 9　纵向扇形布置方式

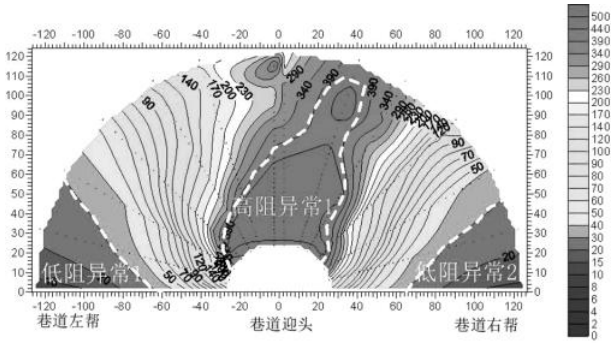

图 10　正前方瞬变电磁法典型扇形探测结果

3.5　超前钻探放水

隧道在岩溶区或断层带附近掘进过程中，根据已查明的岩溶区和断层带含水情况，布置超前钻孔，可呈扇形布置，根据实际情况设计长短钻孔深度，其中一种方式（图 11）为：超前长钻孔终孔距 5m，超前短钻孔终孔距 3m，掘进距离 3m，超前距 2m，钻孔方向和角度可根据断层与掌子面之间的空间位置关系设计。需要注意的是，探放水做好反压装置，防止水压过大，钻杆压出而出现安全事故。

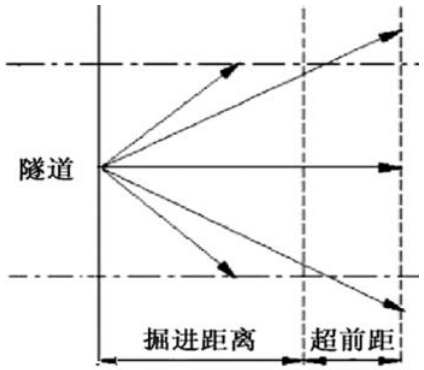

图 11　超前钻探扇形布置方式

3.6　疏水降压

疏水降压措施主要针对岩溶区和断层带有突水危险的区域，提前打超长孔进行疏水降压。实例中，隧道在断层带附近掘进前，建议在顶板处向断层带方向打 1~2 个超长孔，超前距 60~80m，仰角 15°，对断层带内的水进行疏放；建议在岩溶区附近的顶板向岩溶区方向打 1 个超长孔，超前距 60~80m，仰角根据岩溶区与隧道之间的空间位置关系进行设计，疏放岩溶水[22]。

4　结论

（1）本文认为隧道穿越硬质岩地区的岩溶区或断层带突水是“有效隔水岩层（柱）”积蓄的势能超过了岩体本身所能容纳的最大势能后，发生突然破断而引发的，这是一种能量跃迁方式，可以用尖点突变模型来解释；本文从能量角度研究岩溶区或断层带的突水问题，具有一定的新颖性。

（2）本文建立了隧道穿越岩溶区或断层带“有效隔水岩层（柱）”的突水结构力学模型，计算了“有效隔水岩层（柱）”的总势能函数，

建立了突水损伤力学判据。

（3）通过实例应用研究，分别计算了各岩溶区和断层带发生突水的临界“有效隔水岩层（柱）”厚度，建议突水临界厚度值按计算突水临界厚度值的1.5倍取用，能有效指导本工程；但鉴于地质条件的复杂性，需经大量工程验证。

（4）结合应用研究实例，提出的岩溶区或断层带突水防控对策，对隧道在岩溶区和断层带附近的施工具有一定的指导意义，但仍需要进一步研究。

参考文献

[1] 许增光，熊伟，柴军瑞，等．隧道裂隙突涌水过程中注浆技术研究进展及展望［J］．水资源与水工程学报，2021，32（2）：185-192.

[2] 贺振宇，郭佳奇，陈帆，等．隧道典型致灾构造及突水模式分析［J］．中国地质灾害与防治学报，2017，28（2）：97-106.

[3] 张军伟，孟宗衡，曾艺．岩溶隧道断层面突水灾害的力学机理［J］．中国地质灾害与防治学报，2017，28（03）：73-79.

[4] 周栋梁，邹金锋．岩溶区分岔隧道底板的安全厚度［J］．中南大学学报（自然科学版），2015，46（05）：1886-1892.

[5] 吴祖松，李松，涂义亮，等．统一强度理论下掌子面防突安全厚度理论研究［J］．地下空间与工程学报，2020，16（6）：1705-1710.

[6] 郭佳奇，陈建勋，陈帆，等．岩溶隧道断续节理掌子面突水判据及灾变过程［J］．中国公路学报，2018，30（10）：118-127.

[7] YANG Z H，ZHANG J H. Minimum Safe Thickness of Rock Plug in Karst Tunnel According to Upper Bound Theorem［J］. Journal of Center South University，2016，23（9）：2346-2353.

[8] 于丽，吕城，汪主洪，等．上伏溶洞下深埋隧道塌落破坏的上限分析［J］．中国公路学报，2021，34（4）：209-219.

[9] 郭佳奇，李宏飞，徐子龙．岩溶区隧道突水灾害防治原则及治理对策［J］．中国地质灾害与防治学报，2014，25（03）：56-61+78.

[10] 张智健，梁斌，徐红玉，等．富水软弱围岩隧道穿越断层破碎带的稳定性分析及施工技术［J］．河南大学学报（自然科学版），2020，50（03）：356-364.

[11] 罗依珍，成国文，尹利君，等．鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施［J］．水文地质工程地质，2020，47（5）：64-70.

[12] LI Li-ping，TUWen-feng，SHI Shao-shuai，et al. Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area［J］. Geomatics Natural Hazards and Risk，2016，7：1-12.

[13] 李术才，潘东东，许振浩，等．承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验［J］．岩土力学，2018，39（9）：3164-3173.

[14] 李术才，许振浩，黄鑫，等．隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析［J］．岩石力学与工程学报，2018，37（5）：1041-1065.

[15] 舒宗运，何标庆，黎灵．关键层突变破断的冲击能诱发离层突水机理研究［J］．煤炭科学技术，2020，48（05）：149-156.

[16] 孟凡树．深埋隧道断层破碎带突水力学判据研究［D］．中国矿业大学，徐州，2019.

[17] 李集，卢浩，夏沅谱．岩溶隧道防突安全厚度研究综述及估算方法探讨［J］．隧道建设，2014，34（09）：862-872.

[18] M. Golian，E. S. Teshnizi，M. Parise. A new analytical method for determination of discharge duration in tunnels subjected to groundwater inrush［J］. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2021：1-22.

[19] 李晓昭，黄震，许振浩，等．隧道突水突泥致灾构造及其多尺度精细观测技术［J］．中国公路学报，2018，31（10）：79-89.

[20] ZHOU Guan-qun，YUE Ming-xin，YANG Xiao-dong，et al. A metal interference correction method of tunnel transient electromagnetic advanced detection［J］. Journal of Geophysics and Engineering，2020，17（3）：429-438.

[21] 牟义，邱浩，牛超，等．多源干扰条件下瞬变电磁法电性响应规律研究［J］．地球物理学进展，2019，34（06）：2493-2502.

[22] LI Liang-ning，XIE Dao-lei，WEI Jiu-chuan，et al，Analysis and control of water inrush under high-pressure and complex karstic water-filling conditions［J］. Environmental Earth Sciences，2020，79（21）：194-206.