

中国地球物理学会团体标准

隧道全断面岩石掘进机施工  
超前地质预报技术规程

**T/CGS XXX-XXXX**

条 文 说 明

(征求意见稿)

# 目 次

4 基本规定 .....	2
5 超前地质预报设计与实施.....	3
6 地质分析法 .....	4
6.1 一般规定 .....	4
6.2 地质调查法 .....	4
6.3 超前地质钻探法 .....	6
6.4 超前导洞法 .....	7
7 物探法 .....	7
7.2 地震波法 .....	7
7.3 电法 .....	9
7.4 电磁波反射法 .....	12
8 综合超前地质预报法.....	13

# 隧道全断面岩石掘进机施工超前地质预报技术规程条文说明

## 4 基本规定

### 4.1

- a) TBM 隧道地质分析法、物探法等不同超前地质预报方法的探测范围受隧道工程和水文地质条件影响，其预报范围各有不同。地质分析法的预报范围较物探法更为广泛，可得到 TBM 隧道全段落地质分析结果。物探法则根据所用具体方法不同，探测范围也有所不同。

### 4.2

本条所列举的TBM隧道超前地质预报主要预报内容，是对于TBM施工中可能遭遇的不良地质体情况的总结，并且能够用相应的超前地质预报方法探测。然而实际工程面临的地质情况十分复杂，当遇到未在本规程中列出的其他复杂地质情况时，需要结合工程实际情况，通过试验研究解决工程问题。

### 4.5

TBM隧道超前地质预报工作前应全面收集和分析工程已有资料，包括工程概况、工程和水文地质、物探和钻探等相关资料，必要时可补充地质调查，以全面了解面临的工程和地质问题、地质灾害隐患及其分布范围等。

### 4.6

地质分析法是隧道超前地质预报最基本的方法，物探法的解释应用都是在地质资料分析判断基础上进行的。一般来说，地质调查法在隧道埋深较浅、构造不太复杂的情况下准确性较高，可得到TBM隧道全段落地质分析结果；超前地质钻探法是一种直接有效的超前地质预报方法，能够直接揭露掘进面前方地质情况，还可获得岩石强度等指标，但存在“一孔之见”的问题，可能导致不良地质体的漏报漏探；超前导洞法开挖断面较大，可较全面地揭露正洞前方的地质情况，但耗时较长，经济代价较高，工程实践中，人们往往将并行的几条隧道中的某一条作为超前导洞，而不是专门开挖，这样既节约了费用又实现了超前探测。地震波法是一种应用广泛的隧道超前地质预报方法，其探测距离较远，对具有弹性差异的不良地质体较为敏感，因此适用于探测不良地质体界面，而电法、电磁波反射法等对于不良地质体的含水性更加敏感，可探查隧道掘进面前方富水异常等地质情况。

### 4.7

TBM隧道超前地质预报工作主要受到2方面因素影响：1是TBM隧道中TBM机械占据了隧道内主要空间，超前地质预报工作的可用空间受到极大限制，如钻爆法隧道中应用广泛的超前预报方法大都需要在掘进面附近施作，但TBM护盾刀盘等占据了掘进面附近绝大部分空间，导致TBM隧道超前地质预报无法照搬钻爆法隧道中的预报方法；2是TBM机械会对超前地质预报方法产生振动噪声、电磁干扰等，例如锚杆钻机、通风风机等设备在工作时等会产生较强的振动，对地震法探测造成严重干扰，而TBM本身金属外壳和电气系统等会引起较强的电磁干扰，严重影响电法、电磁反射法等超前预报方法的使用。

- a) TBM 隧道工作环境比较复杂，主要表现在：TBM 隧道内环境温度受地层地温、TBM 掘进散热、隧道内照明及机械设备散热和作业人员散热等多方面影响，环境湿度则主要取决于地下水、隧道内施工用水等因素，因此在隧道埋深较大且地下水丰富时，容易出现高温高湿的情况。特别是 TBM 掘进时，刀盘破岩产生强烈振动，还会产生大量粉尘，因此，对 TBM 超前地质预报仪器的性能要求较高，本条规定 TBM 隧道超前地质预报仪器除应满足性能稳定、构件牢固可靠等基本要求之外，还应针对 TBM 复杂工作环境制定仪器的防尘、防潮、防震等保护措施。特别的，对于搭载式超前地质预报仪器，宜将仪器主机安置在具有恒温恒湿功能的专用机柜中。
- c) TBM 本身金属外壳和电气系统等会引起较强的电磁干扰，在仪器设计时需要采取适当的措施屏蔽电磁干扰。相比于非搭载式超前地质预报仪器，搭载式仪器由于本身集成到 TBM 上，更容易受到电磁干扰影响，更需要考虑屏蔽措施。例如，宜采用屏蔽电缆，并保证屏蔽层良好接地，甚至可以外套金属软管以提高屏蔽效果；电缆布置时要远离 TBM 主电缆及高压电缆；仪器主机外壳应进行屏蔽设计，做好接地，并尽量放置在单独的机柜里，不与其他设备共用。

#### 4.8

- a) TBM 掘进速度快，工序衔接紧密，为适应 TBM 快速施工的特点，将超前地质预报仪器搭载到 TBM 上实现自动化探测是优先选择的方案。
- b) 搭载式 TBM 超前地质预报仪器是 TBM 的组成部分，其主机、观测系统等占用的物理空间等需要在 TBM 设计时预留，预报仪器的动力与控制装置等需集成在 TBM 系统内。因此需在 TBM 装备设计阶段统筹考虑超前地质预报仪器搭载设计方案。搭载设计应满足以下几点要求：不影响 TBM 结构和强度安全；不影响 TBM 正常掘进；搭载装置构件牢固可靠、性能稳定、易于维护保养；尽量满足观测系统布置的需求；能够提高探测效率。如果 TBM 不具备搭载条件，则使用非搭载式超前地质预报仪器，非搭载式超前地质预报仪器应易于现场操作，同时，为提高作业效率，非搭载式超前地质预报仪器的电缆宜布置到 TBM 上，这样每次探测时可节省电缆布置时间。

### 5 超前地质预报设计与实施

#### 5.1

- b) 采用动态设计原则，要求 TBM 施工过程中及时将实际开挖的地质情况与预报结果进行对比分析，并根据实际地质情况及时调整超前地质预报方案，按有关程序经批准后执行。通过动态设计，有助于总结经验教训、指导和改进超前地质预报工作、提高超前地质预报水平。

#### 5.3

- c) TBM 施工工序可能对超前地质预报现场工作开展造成严重的干扰。例如在敞开式 TBM 隧道中，需进行挂钢筋网、架设钢拱架、打锚杆、喷射混凝土等施工工序。这些施工工序进行时，施工人员、材料等会挤占超前地质预报探测实施的物理空间，导致观测系统无法正常布置；锚杆钻机工作噪声会对地震波法造成干扰。因此需要在设计时充分调研 TBM 施工工序，合理安排超前地质预报探测时间。
- h) TBM 隧道超前地质预报工作中需要建立包括超前地质预报相关的施工、地质、测量、设计等人员的沟通配合制度等，保障超前预报工作的顺利开展，预报结果及时反馈指导施工。

#### 5.4

#### 5.4.1

##### 5.4.1.1

- a) TBM 隧道环境噪声复杂, 给超前地质预报工作带来较为严重的影响, 因此在开展 TBM 隧道超前地质预报工作前, 应针对 TBM 隧道中存在的干扰因素进行系统的调查分析, 并在设计方案及实施细则中提出相应的控制措施。为避免 TBM 施工干扰, 除特殊需要(如破岩震源)外, 一般选择 TBM 停机时间开展超前地质预报工作。针对 TBM 本身金属外壳和电气系统等引起的电磁干扰等, 在数据采集和处理过程中应专门进行干扰压制, 例如: 电阻率法与激发极化法数据采集时, TBM 刀盘应后退与掘进面分离 0.1~0.2m, 同时宜收起撑靴, 最大程度减少金属体对测量结果的干扰, 并在数据处理时采用干扰压制方法, 降低观测数据中的 TBM 干扰。

#### 5.4.3

- a) 预报原始记录包括 TBM 隧道几何尺寸、掘进面里程等工程信息, 以及测点坐标、采样频率、供电时长等工作参数。

#### 5.4.4

- a) 超前地质预报工作完成后应编制成果报告, 报告应做到格式规范、内容详实、数据可靠、结论明确, 附图附表等资料齐全。在实际工作中, 可根据超前地质预报工作持续时间, 编制相应报告, 如超前地质预报工作不跨年时, 年报可以总报告代替; 如只针对特定段落进行预报工作时, 可不编制月报、年报、竣工总报告。

## 6 地质分析法

### 6.1 一般规定

#### 6.1.1

地质分析法是隧道超前地质预报的一种基本方法, 也是采用物探法进行隧道超前地质预报的基础, 可随时进行, 不影响施工, 可推断和预报隧道掘进面前方的工程和水文地质条件, 但结果较为粗略, 需与物探方法相结合。

#### 6.1.2

- a) 在 TBM 隧道掘进过程中, 当隧道内所揭示的工程和水文地质条件与勘察资料出入较大及不良地质体存在时, 应开展地表补充地质调查。
- b) 综合考虑隧址区地层、岩性、构造、水文等各种地质条件的变化程度以及不良地质体的发育程度, 可将隧道所处地质条件复杂程度分为复杂、较复杂、中等、简单四级。在 TBM 隧道施工过程中, 地质条件复杂段落即为重点预报段落。

### 6.2 地质调查法

#### 6.2.2

- c) 开展地表补充地质调查时, 应包括下列工作内容:
  - 应调查地层在地表的出露与接触关系及其岩性特征。
  - 应调查断层、褶皱、节理密集带等地质构造在地表的出露位置、性质、规模及产状。
  - 应进行地表水和地下水调查。
  - 碎屑岩地区应重点调查断层破碎带、岩脉侵入体、裂隙发育带等。

- 可溶岩地区应调查岩溶水动力分带的分布位置及其特征，并应重点调查暗河、大型洞穴、泉水、地表岩溶漏斗和洼地等。
- 岩浆岩和变质岩地区应重点调查构造破碎带、岩性接触带、玄武岩柱状节理等及其含水特征等。
- 隧道通过地表水体（河流、湖泊、水库）附近和下部时，应调查隧道至地表水体地段的地质岩性、产状、节理裂隙发育程度、地下水补给径流排泄特征、富水程度等。
- 应调查特殊地层在地表的出露位置、宽度及其产状变化等。

6.2.3 隧道编录可采用三维激光扫描和数字照相等技术。

6.2.5 断层破碎带、岩溶、高磨蚀性硬岩、高地温、有害气体、放射性物质为重要的不良地质现象，突水突泥为重要的地质灾害，应进行专门调查，具体调查内容如下：

——TBM 超前地质预报中对于断层破碎带的地质调查应包括：

- 断层的位置、性质、产状和规模（长度、宽度和断距），破碎带中构造岩的特点。
- 断层上下盘的地层岩性、破碎情况及错动方向。
- 主断裂和伴生与次生构造形迹的组合关系。
- 断层形成的时代、应力状态及活动性。

——TBM 超前地质预报中岩溶地质调查应调查地层岩性、地形地貌、岩层产状、地下水位、可溶岩与非可溶岩接触带、层面与层间裂隙等内容。

——TBM 隧道超前地质预报中对高磨蚀性硬岩进行地质调查时应同时考虑岩石岩性、石英含量、岩体抗压强度、完整程度以及结构面因素对岩石强度的影响。具体应包括以下内容：

- 地质年代、地质名称、风化程度、颜色、主要矿物、结构、构造。对沉积岩应着重描述沉积物的颗粒大小、形状、胶结物成分和胶结程度；对岩浆岩和变质岩应着重描述矿物成分、矿物结晶大小和结晶程度。
- 结构面类型、性质、产状、组合形式、发育程度、延展情况、闭合程度、粗糙程度、频度、充填情况和充填物性质以及充水性等。
- 结构体的类型、形状、大小和结构体在围岩中的受力情况等。

——当 TBM 工作区经过地温梯度异常、地表热显示发育的地区施工过程中，可能出现高岩温或高温热水（汽）等热害现象，应对高地温区域开展补充地质调查工作，并包括以下内容：

- 调查沿线地表热显示分布情况。
- 地层岩性、地质构造及其演化、新构造运动、地震及岩浆（火山）活动情况与地热显示、地热异常的关系。
- 工作区热水系统的水文地质特征。
- 工作区的热储、盖层、导水和控热构造，区域热场特征，地下热水补给、径流、排泄条件和规律，地下热水的动态及其与一般地下水的关系，测定地热异常区，划分地温带。
- 预测可能出现高温热害的地段、危害程度以及处理原则、建议。

——当掘进路线通过煤层、厚层湖沼、石油、天然气层、含气的圈闭构造时，应调查有毒有害气体的含量、压力、性质，判断其对隧道施工的影响。有害气体根据其存在环境和基本成分可分为可燃气体、缺氧气体、毒气。TBM 超前地质预报中对有害气体进行地质调查应包括：

- 有害气体类型、物理化学性质及危害。
- 含气岩层岩性及特征：岩性、位置、层数、层厚及其空间变化特征。
- 围岩的岩性及与含气岩层的空间关系。

- 含气岩层的构造位置以及形成（储积）有害气体的地质构造。
  - 地下水与有害气体的共存关系。
  - 对有害气体地段采取有害气体监测并提出处理措施、意见。
- 线路通过有放射性矿床分布、高辐射地带、水源放射性超过限制浓度地区应按放射性地区进行地质调查。TBM 超前地质预报中对放射性物质进行地质调查应包括：
- 了解区内放射性异常的分布、范围、类型、规模和地层、岩性、构造的空间关系。
  - 线路所经过地区应调查区内各类岩性  $\gamma$  特性（环境地表  $\gamma$  辐射剂量率、隧道工程中空气中氡浓度、地表、地下水中放射性核素浓度）。
  - 进行放射性分级和放射工作场所分区、评价放射性对施工的影响和必须采取的防护措施。
- TBM 隧道超前预报中对突水突泥致灾构造进行地质调查主要包括对致灾构造进行分类判断，以及对突水突泥前兆特征进行辨识。其中，突水突泥主要致灾构造类型包括溶蚀裂隙型、溶洞溶腔型、管道及地下暗河型、富水断层型、导水断层型、阻水断层型、侵入接触型、层间裂隙型、不整合接触型、差异风化型和特殊条件型。常见致灾构造前兆特征如下：
- 岩溶类致灾构造前兆：
    - ◆ 频繁出现铁染锈或夹黏土裂隙或溶蚀裂隙。
    - ◆ 岩层湿化、软化现象明显，有水滴附着或出现滴水、淋水现象。
    - ◆ 小溶洞频频出现，含有水流或痕迹以及河沙。
    - ◆ 钻孔涌水量剧烈增加，呈喷射状，且夹有泥沙或磨圆度好的砾石等充填物。
    - ◆ 钻孔中有冷风冒出，或听到明显的水流声。
    - ◆ 岩层渗水或涌水时清时浊，或出现冒泥。
    - ◆ 空气温度明显降低，阴冷潮湿，出现雾气。
  - 断层类致灾构造前兆：
    - ◆ 围岩节理组数出现急剧增加。
    - ◆ 出现由弧形节理组成的小型帚状构造或反倾节理。
    - ◆ 岩石破碎、强度显著降低，出现铁锈染压碎岩、碎裂岩等。
    - ◆ 临近富水断层下盘的泥岩、页岩等隔水岩层湿化、软化现象显著，淋水现象明显，同时出现其他水流痕迹。
  - 当隧道揭示或穿越火成岩侵入接触富水带，层间裂隙发育区，不整合接触带，花岗岩风化深槽，人工开挖富水空间等条件下，也可能诱发突水突泥灾害。

### 6.3 超前地质钻探法

#### 6.3.1

超前地质钻探法中钻孔编录主要包括钻孔位置、开孔时间、终孔时间、孔深、卡钻位置、岩碴、冲洗液颜色及流量变化等；钻进参数主要包括钻杆震动情况、冲击器的响声、钻进压力及其变化、钻速及其变化等。钻孔编录和钻进参数可粗略探查岩性、岩石强度、岩体完整程度、溶洞、暗河及地下水发育情况等；采用取芯钻时，岩芯可准确确定岩性、岩石强度、岩体完整程度和地层变化里程等。

#### 6.3.4

- d) 超前钻探过程中应在现场做好钻探记录，包括钻孔位置、开孔时间、终孔时间、孔深、钻进压力、钻进速度随钻孔深度变化情况、冲洗颜色和流量变化、涌砂、空洞、振动、突进里程、冲击器声音变化等。同时应及时鉴定岩芯、岩粉，判定岩石名称，对于断层破碎带、溶洞充填物、特殊性岩土等应摄影或录像备查，并选择代表性岩芯或岩粉整理保存。

## 6.4 超前导洞法

### 6.4.1

超前正洞导洞法在采用TBM掘进时不易施作，一般采用超前平行导洞法，超前平行导洞位置选择应符合下列要求：平行导洞宜设在正洞的地下水补给侧。与正洞的最小净距应根据地质条件、施工方法等因素确定。如果将来可能扩建为隧道正线，两相邻隧道最小净距视围岩类别、断面尺寸、施工方法、爆破震动影响等因素，参照现行隧道设计和施工相关规范确定。若超前平行导洞作为正洞的泄水洞，则导洞底面标高应低于正洞底面标高。

## 7 物探法

### 7.2 地震波法

#### 7.2.1

地震波法要求被探测对象具有一定的体积和规模，才可能被探测出来，理论和实践表明，在条件适宜时，地震波法的探测分辨率能达到有效波长的1/4，也就意味着当被探测对象相邻界面距离大于有效波长的1/4时，两界面产生的反射波在地震记录上才能够被区分开；反之，当相邻界面距离小于有效波长的1/4时，两界面产生的反射波混叠在一起，难以分清。

#### 7.2.2

地震波法是一种长距离超前地质预报方法，但随着预报距离的增大，探测精度也会随之下降，因此预报距离需要在合理的范围内。为保证探测效果和工程安全，采用地震波法连续预报时，根据工程实践经验，相邻两次预报范围应搭接10m以上。

- a) 在岩体完整的硬质岩地层，地震波传播过程中衰减较小，因此传播距离相对较远，理论和实践表明，预报距离一般能够达到120m~150m。
- b) 在软弱破碎地层，地震波衰减较严重，因此传播距离相对较近，预报距离一般能够达到80m~100m。

#### 7.2.3

##### 7.2.3.1

TBM搭载式地震超前地质预报仪器主机宜安装在TBM主控室并与TBM操作台集成，探测电缆应进行防水、电缆屏蔽设计，并与TBM设备本身线缆统一布置，同时，电缆不应有破损、短路、断路等故障。

##### 7.2.3.2

搭载于TBM的机械震源安装位置应根据TBM结构进行设计，不应影响TBM正常施工、附属机械移动及人员走动。对于敞开式TBM、双护盾TBM、单护盾TBM，震源可安装在护盾上，利用护盾开孔直接敲击围岩，护盾上开孔的数量、孔径、位置等应在满足TBM安全及正常工作的前提下，与TBM生产商协商，探测结束后，开孔应做好密封；对于敞开式TBM，震源还可安装在TBM主控室附近的支架上。

#### 7.2.4

- b) TBM机械结构占据了隧道大部分空间，导致可用探测空间狭小，因此应选择合适的观测系统。经过工程实践，地震波法观测系统宜布置在掘进面后方约10m~70m范围内的隧道轮廓上，根据现场情况不同，观测系统的具体排布形式可以有多种选择，包括在隧道一侧边墙上沿轴向排列的单条测线、沿隧道轴向多条测线组合、空间内多测点散

布等方式。在条件允许时，应充分利用隧道全空间环境，将震源和检波器尽量排布在隧道空间内，使震源点和检波器点在隧道轴向、水平和垂直三个方向上均具有一定间距，这样有利于获得来自更加全面的波场信息。

- c) 为保证超前地质预报效果，现场采集的数据量应满足一定要求，通过对现有方法的调研分析及应用实践，建议现场测量得到的不重复地震记录道数不宜少于 20 道。
- d) 应根据 TBM 现场施工情况，选择合适的观测系统。一般来说，地震波法观测系统按照震源和检波器位置的相对关系，可分为 2 种布置形式：一是震源在前、检波器在后，即震源布置在靠近掘进面的边墙上、检波器布置在震源后方边墙；另外一种为震源在后、检波器在前，即震源布置在远离掘进面的边墙上、检波器布置在震源前方边墙，示意图可参见本规程附录 D。其中，震源在后、检波器在前这一类观测系统采集到的地震记录中，来自掘进面前方的反射波同相轴与直达波同相轴反向，具有负视速度的特点，可以更方便的滤除直达波和来自其他方向的干扰波。

### 7.2.5

#### 7.2.5.5

检波器安装时，需要根据现场情况选择合适的安装方式，常用的安装方式有孔中安装、岩体表面粘贴安装等方式。当采用孔中安装方法时，需要测量孔的几何参数并作好记录；当采用岩体表面粘贴安装时，应在粘贴在完整未破坏的岩体表面。

#### 7.2.5.6

为满足不同地质条件下地震波超前地质预报的需要，TBM 搭载的机械震源能量应在一定范围内可以调节。当采用机械震源激震时，激震点应选在围岩相对完整处，尽量与围岩接触良好、并保持垂直敲击，敲击后震源能够迅速收回，避免因反跳造成二次激震。为提高采集到的地震信号质量，可在同一个震源点处重复激震并进行信号叠加，有效激震次数建议在 3 次以上。应按照说明操作机械震源并注意使用安全，液压震源做好标识，方便维修更换，在液压震源激震时，应选择围岩较完整位置激震，且操作人员应与震源保持一定距离。

### 7.2.7

- e) 带通滤波等方法利用地震信号有效波和干扰波频谱特征的不同，实现压制干扰波、突出有效波的目的。在处理过程中，应在地震记录频谱分析的基础上，设置合适的滤波参数，避免波形发生畸变。 $\tau$ - $p$  变换滤波又称为线性 Radon 变换滤波，是将二维地震记录通过固定斜率和截距的直线叠加，转换到  $(\tau, p)$  域中，从而实现对二维地震记录中不同斜率或视速度同相轴的分离。倾角滤波是建立在二维傅里叶变换基础上的频率波数域滤波方法，又称为  $f$ - $k$  滤波，是利用二维傅立叶变换将时间空间域的信号变换到频率波域，根据有效波与干扰波视速度的不同进行分离。由此可见，倾角滤波、 $\tau$ - $p$  变换滤波都是基于有效波和干扰波视速度上的差异，实现压制干扰波、突出有效波的目的，在隧道地震波超前地质预报中，可以用于提取来自掌子面前方的反射波。
- g) 为实现不良地质体的定位，需要求取 TBM 掘进面前方的岩体波速。在地质条件较为简单的情况下，可以利用直达波波速近似替代掘进面前方岩体波速，但得到的是均一的波速值；为获得更加准确的波速分布，可采用走时层析成像、全波形反演、速度扫描等方式进行岩体波速计算。其中，全波形反演方法利用了地震波的走时、振幅、相位等全波形信息，具有揭示复杂地质背景下构造细节的潜在能力，在波速计算方面效果较好，已成为当前勘探地球物理领域的研究热点，但也存在计算耗时长、对原始数据的质量要求高等问题。同时，在实际工作中，还可考虑将已知地质信息作为先验约束，加入全波形反演，进一步提高波速计算精度。

- h) 目前, TBM 隧道中常用的偏移成像方法有绕射叠加偏移、克希霍夫偏移、逆时偏移、散射成像等, 可以根据现场情况选择合适的成像方法。其中, 绕射叠加主要利用了地震波的运动学信息。克希霍夫偏移和逆时偏移方法则基于波动方程, 但前者基于波动方程的积分解, 后者基于波动方程的有限差分解, 相比之下逆时偏移成像效果更精确, 但计算耗时长、对原始数据质量要求高。除此之外, 还可以选用散射成像、极化偏移成像等方法。
- i) 地震波在岩体传播的过程中携带了丰富的岩体信息, 通过计算得到的岩体纵波和横波波速, 能够评价掘进面前方的岩体坚硬程度等情况, 同时, TBM 掘进过程中的掘进参数(如推力、转速、掘进速度等)对岩体参数也有比较敏感的响应, 可通过试验数据、现场数据等的统计分析(如数据挖掘等方法)建立 TBM 掘进参数与围岩坚硬程度、完整程度等的关系, 进而基于这种关系可由 TBM 掘进参数来推测岩体参数。因此, 在 TBM 地震波法超前地质预报中, 可以综合利用岩体波速和 TBM 掘进参数等信息, 评价隧道围岩坚硬程度、完整程度等。

### 7.2.8

利用TBM掘进破岩振动作为震源的超前地质预报方法, 是在传统主动源地震方法的基础上, 针对TBM施工特点提出的。它利用TBM掘进破岩时产生的振动作为震源, 在刀盘后方安装先导(参考)传感器记录震源信息、在隧道边墙或管片预留孔中布置接收传感器记录波场信息, 通过数据处理与分析, 预报掘进前方地质情况。

- a) 利用 TBM 掘进破岩振动作为震源的超前地质预报方法, 要求长时间连续记录先导(参考)传感器及接收传感器信息, 因此仪器的采集主机需要具备长时间连续采集功能。同时, 为保证不同传感器在同一时刻开始采集信号, 仪器还需要具有较为精确的时间同步功能。
- b)
- 先导(参考)传感器用于记录 TBM 掘进破岩过程中产生的振动信息, 因此需要具备足够的量程和抗冲击性能。根据预报需要, 先导(参考)传感器宜安装在 TBM 刀盘后方固定位置, 例如, 可在刀盘后面板、TBM 驱动箱附近等位置安装 1 个或多个。
  - 若先导传感器采用有缆连接, 则电缆宜优先搭载到 TBM 上。
  - 接收传感器可按照探测需要布置 1 个或多个, 接收传感器间距根据 TBM 型式和现场实际情况确定, 但应尽量在隧道空间展布, 条件允许时宜优先采用在隧道轴向、水平和竖直三个方向上均具有一定间距的布置型式。对于敞开式 TBM, 接收传感器可粘贴在岩体表面或布置在孔中, 对于单护盾和双护盾 TBM, 接收传感器可布置在管片预留孔中。

### 7.2.9

在利用TBM掘进破岩振动作为震源进行探测时, 互相关处理是其数据处理中的核心方法, 通过对两个接收点记录到的地震信号进行互相关, 能够等效成一个点激震、另一个点接收的虚拟地震道, 即构建这两个点之间地震响应的格林函数, 从而将连续的TBM破岩振动信号地震记录, 转化成相当于脉冲震源激发条件下的标准地震记录, 然后就可采用第7.2.7条中的处理方法进行处理和解释。为提高转化后标准地震记录质量, 可以在互相关处理前, 对先导(参考)传感器与接收传感器信号进行归一化、反褶积等处理。利用TBM掘进破岩振动作为震源进行超前地质预报能够随TBM掘进动态探测, 更加适应TBM快速掘进的特点, 受到国内外研究人员的广泛关注, 有学者引入地面被动源地震的思想, 利用地面长时间监测得到的TBM掘进破岩振动信号, 来反映掘进前方地质情况, 是一种较好的思路。

## 7.3 电法

### 7.3.1

本条规定了电法应根据工作条件和探测要求选用相应的探测方法。电法一般包括自然电场法、电阻率法、激发极化法、充电法、地质雷达法、瞬变电磁法等探测方法，目前在TBM隧道超前地质预报中常用的有电阻率法与激发极化法。电阻率法的采集数据主要有电流、电位差等，激发极化法可采集电流、一次电位差、二次电位差等数据，其主要观测参数有视极化率、半衰时等。

### 7.3.2

- a) TBM 隧道电法的探测距离会受到 TBM 隧道洞径、地质条件等因素的影响，当隧道洞径较小或地质条件复杂时，探测距离会有所降低，具体应视实际探测效果而定。

### 7.3.3

#### 7.3.3.2

TBM刀盘、护盾等占据隧道空间，无法通过施做钻孔安装电极，柔性电极依靠柔性导电介质与围岩接触实现供电与测量，具有不需打孔、能与围岩良好耦合的优势，在TBM隧道电法探测时宜优先选用柔性接触电极。

#### 7.3.3.3

TBM隧道超前地质预报电阻率法和激发极化法可采用搭载式和非搭载式电法仪器。TBM施工速度快、工序安排紧凑，为适应TBM快速施工的需求，提高TBM隧道电法超前预报工作效率和自动化程度，对于具有搭载条件的，采用搭载式电法超前地质预报仪器。根据已有工程实践经验，搭载工作主要包括：

- 将电极安装到 TBM 刀盘和护盾上，需要根据观测系统在刀盘和护盾上开孔，建议开孔孔径满足电极与开孔内壁的间隙不小于 5mm。依靠机械装置(液压、气压等)实现电极的伸出和缩回：探测时电极伸出接触围岩，进行供电或数据采集；探测结束后，电极收缩到刀盘内，不影响 TBM 正常掘进。
- 将主机安装到 TBM 主控室内，主机宜安装在具有防潮、防尘、防震动的仪器柜中，保障主机在 TBM 隧道复杂环境中能正常工作。
- 将电缆布设在 TBM 上，应选用具有屏蔽功能的多芯电缆，电缆走线时应尽量避开 TBM 高压电缆、照明电缆等，避免对电法探测产生干扰，同时电缆不应有破损、短路、断路等故障，并需要做好标识，方便维修更换。

### 7.3.4

- a) TBM 隧道电阻率法或激发极化法超前地质预报时，在隧道轮廓线上从掘进面向后布置多圈供电电极系 A；在被 TBM 护盾遮挡的区域，应在护盾上开孔以使得电极接触到围岩。考虑到探测效果与工作效率，一般每圈供电电极系由 4~8 个同极性供电电极组成(探测时每圈供电电极系中的同极性电极同时供电)。在采集时，各圈供电电极系依次供电（即每圈之间依次切换），测量电极进行数据采集。为满足探测距离的需要，供电电极系应从掘进面向后布置足够长度范围。通过对隧道全空间的电阻率和激发极化法进行系统的数值模拟、物理模拟和现场试验，建议供电电极系从隧道掘进面向后布置的范围不小于 80m；为满足探测效果对数据量的要求，建议供电电极系圈数不少于 15 圈。建议可在靠近刀盘中心位置安装供电电极 A0，A0 电极与第一圈供电电极系组合使用，在周围同极性供电电极电流的作用下，使得 A0 电流流入隧道掘进面前方，有利于降低掘进面附近低阻体的影响，提高对隧道掘进面前方地层的探测效果。第一

圈供电时同性电极 A 和电极 A0 的供电电流大小根据地层岩性等情况调整,以满足预报需求。

- b) 根据 TBM 施工隧道的特点,在掘进面上布置测量电极,用于观测掘进面前方一定范围内介质的导电性或激电效应差异影响下的电场或激电场分布规律。由于隧道掘进面被 TBM 刀盘占据,搭载式探测和非搭载式探测的测量电极数量和布置形式均需考虑 TBM 刀盘的型式、结构、尺寸、刀具布置等因素。综合考虑上述因素和探测效果对数据量的要求,建议测量电极数量不少于 12 个;刀盘直径的增加或条件许可时,宜适当增加测量电极数量。对于搭载式探测方式,通过在刀盘上开孔安装测量电极;对于非搭载式探测方式,利用刀盘滚刀刀孔伸出电极接触掘进面进行探测。对于电极布置的均匀性,应考虑刀具布置等因素,使得电极尽可能均匀的布置。

### 7.3.5

TBM 隧道电阻率和激发极化法超前地质预报工作应按照本规程 7.3.4 所述的观测系统进行数据采集。每 1 圈同极性供电电极系供电时,记录供电电极的电流,对于电阻率法而言,刀盘上的测量电极测量电位差数据;对于激发极化法而言,测量一次电位差、视极化率与半衰时等数据。

- b) TBM 隧道电阻率和激发极化法超前地质预报工作前应开展 TBM 环境的现场试验,可利用 TBM 进场前后的始发洞开展现场试验,以研究和分析 TBM 装备对观测数据的干扰和影响。TBM 进场前在始发洞中没有 TBM 装备,此时采集的观测数据不包含 TBM 干扰;TBM 进场后在同样的位置、采用相同的观测系统采集包含 TBM 干扰的观测数据。对比分析 TBM 进场前、后的观测数据,可探索 TBM 干扰对观测数据的影响特征,为实际探测时识别和降低 TBM 干扰提供依据。
- c) TBM 电法探测时在保证电极能够接触掘进面的情况下,刀盘一般后退 0.1~0.2m。对于以滚刀为电极的探测仪器,可适当放宽要求,应做好滚刀电极与刀座的绝缘。

### 7.3.6

- b) 数据质量均方相对误差按下列公式计算:

$$\delta_M = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{|\Delta U_i - \Delta U'_i|}{\frac{\Delta U_i + \Delta U'_i}{2}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\delta_M$ ——观测数据均方相对误差;

$n$ ——观测数据个数;

$\delta_i$ ——第  $i$  个检查数据的单个数据相对误差;

$\Delta U_i$ ——第  $i$  个数据的基本观测值 (mV);

$\Delta U'_i$ ——第  $i$  个数据的检查观测值 (mV)。

### 7.3.7

- a) 在 TBM 隧道开展电法超前地质预报时,观测数据易受到 TBM 的干扰,影响探测结果。一般借助现场试验和数值模拟的手段,获得 TBM 对观测数据的影响特征,通过统计分析得到 TBM 对观测数据的干扰规律。TBM 对观测数据的干扰主要与 TBM 的具体型号、尺寸等因素相关,实际预报中对于一个具体的 TBM,可根据得到的干扰规律在实际观测数据中降低 TBM 的干扰,对实际观测数据进行修正。具备条件时,建议具体流程如下:

- b)

- TBM 进场前在 TBM 的始发洞采集不包含 TBM 干扰的观测数据, TBM 进场后采集包含 TBM 干扰的观测数据, 通过对比分析得到 TBM 对观测数据的干扰规律。
  - 针对实际工程中 TBM 具体的型号、尺寸等, 建立含有 TBM 装备和隧道腔体的全空间数值计算模型, 通过不同工况下的电法超前地质预报的数值模拟, 通过对大量数值正演数据的分析统计, 得到 TBM 对观测数据的干扰规律。
  - 对现场试验和数值模拟得到的 TBM 干扰规律进行统计分析, 根据规律性认识或定量化认识对干扰进行分类。
  - 依据干扰分类和规律, 结合实际探测工况, 对实际探测数据进行预处理, 从而达到降低观测数据中 TBM 干扰的目的。
- c) 目前对 TBM 电阻率法观测数据 (电流、电位差) 和激发极化一次场观测数据 (电流、一次场电位差) 一般采用反演方法进行处理, 可以得到隧道掘进面前方电阻率的分布情况。反演方法一般分为线性反演和非线性反演方法。对于存在已知信息的情况, 如岩芯电阻率、其他方法获得的已知信息, 可选用基于先验约束的反演方法, 压制反演多解性, 提高超前地质预报的探测效果。对于激发极化超前地质预报方法, 通过反演同时获取前方的电阻率和极化率结构是今后的研究热点, 对于提高预报可靠性有益。
- d) 对于电阻率法超前地质预报, 主要依靠掘进面前方电阻率分布和地质分析相结合的方式来判断地下水。对于激发极化法超前地质预报, 激发极化法利用含水岩石在人工电流场作用下产生的激电效应及其时间特性可以寻找地下水。目前, 激发极化法判断地下水的主要参数有电阻率、视极化率、半衰时等, 实际工作中, 在排除测区内可能存在金属矿、石墨等地质体后, 一般认为高电阻率、低视极化率、短半衰时异常可判断为弱富水; 低电阻率、高视极化率、长半衰时异常可判断为富水。在隧道的同一地层单元, 建议通过跟踪开挖揭示的地下水情况, 建立数据库, 结合地质分析, 进行统计分析和水量估算。

## 7.4 电磁波反射法

### 7.4.1

电磁波反射法以含水岩体电导与电容率增大、波阻抗降低特性为基础, 使用电磁波进行探测。在含水岩体与干燥岩体接触带电磁波发生反射, 依据接收点电磁波的相干特性来实现掘进面前方围岩含水性的预测。

#### (1) 岩体的电磁波阻抗

岩体中电磁波阻抗也称本征阻抗, 是电场与对应磁场的比值, 岩体中它是复数。波阻抗  $\eta$  与岩石的电导率  $\sigma$ 、介电常数  $\varepsilon$  (电容率) 和电磁波频率  $\omega$  有关:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (4)$$

当岩体的电导率很高 (如含水岩体), 或使用频率很低时 (音频测深), 有  $\sigma \gg \omega\varepsilon$ , 岩体的波阻抗变为:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (5)$$

此时电磁波不能在岩体中传播, 只能产生涡流。

当岩体的电导率很低 (如干燥岩体), 或电磁波的频率很高 (地质雷达) 时, 有  $\sigma \ll \omega\varepsilon$ , 岩体的波阻抗变为:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (6)$$

此时电磁波能够传播, 但由于高频衰减, 传播距离有限, 多在 40m 以内。

当频率为 1MHz 左右时, 有  $\sigma \approx \omega\varepsilon$ , 波阻抗变为:

$$\eta = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sqrt{2}\sigma}} e^{j\frac{\pi}{8}} \quad (7)$$

此时电磁波能传播较远的距离，但伴有一定的衰减。此频率称中频。

(2) 含水岩体与干燥岩体的波阻抗差异：

对于大多数岩体，含水后电导率提高大约2个数量级；相对介电常数由4提高的30，约5~8倍，其波阻抗随频率的变化曲线如图1所示。从中可以看到，频率在1MHZ左右，含水岩体与干燥岩体的波阻抗差异最大，约为120 Ω。这就是选择以1MHZ为中心频率探水的物理基础。

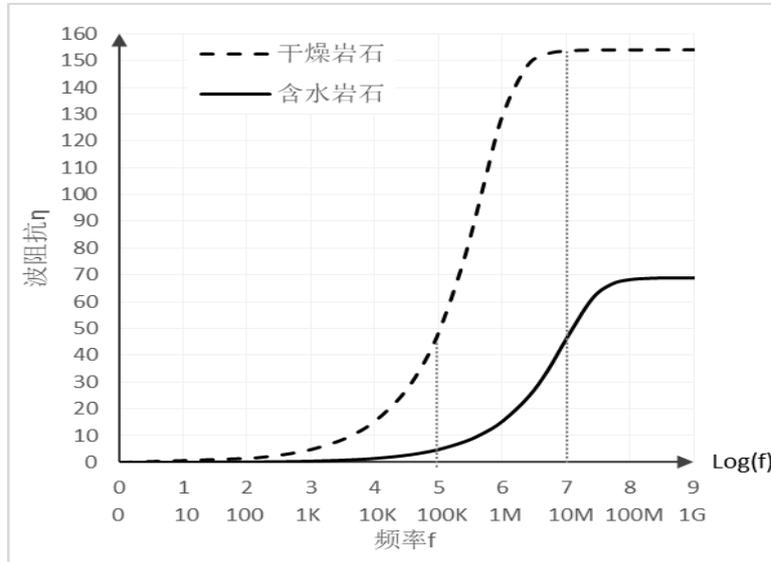


图1 含水与干燥岩体波阻抗随频率变化的关系

(3) 含水岩体界面电磁波的反射

电磁波在岩体中传播遇到波阻抗变化界面时发生反射与折射。反射系数R 取决于波阻抗差异的大小。

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2} \quad (8)$$

当界面的另一侧为饱水的低波阻抗岩体时，反射系数最大，可达-0.8。反射系数为负，表示反射波极性发生反转。

(4) 反射波相干频率

使用100KHZ~10MHZ频率的电磁波进行含水性探测时，波长大约在10~1000m的范围。探测的距离在100m以内，探测的距离与波长相当。此种情况下，一个完整周期的电磁波还没有发射完毕，反射的电磁波就已经返回接收点了。在接收点反射波与直达波形成相干，当反射界面到接收点的距离等于1/4波长时，相干幅值达到极大值，对应的频率称为相干频率。对于一个反射界面，不同距离接收点的相干频率是不同的。由此，利用多个位置的相干频率，可以对反射面位置与反射系数大小进行成像，据此对含水体的位置与含水量的多少做出预报。

## 8 综合超前地质预报法

### 8.1

综合超前地质预报遵循以下几个原则：

——洞外与洞内相结合：在隧道建设前期会开展地质调查、地面物探、钻探等工作，洞内超前地质预报工作应以这些前期勘察资料为基础。同时，可针对性的补充洞外地质调查和洞外物探，并配合洞内开展的地质分析工作，对洞内超前地质预报形成更有利的支撑。

- 地质与物探相结合：地质分析法是物探法的基础，在了解地质情况的基础上，才能使物探法的解释结果更接近真实情况，有利于减少物探法的多解性。
- 长距离与短距离相结合：根据施工进度和预报方法特点分为长距离预报和短距离预报，长距离预报一次预报掘进面前方不少于 80m 的范围，可采用地震波法、电磁波反射法等；短距离预报一次预报掘进面前方不大于 30m 的范围，可采用电法、岩体温度法、超前地质钻探法等。一般情况下，长距离与短距离预报方法相结合，按照由远及近开展预报工作。其中长距离超前地质预报是在较远距离判断是否存在断层、溶洞等可能充填或导通地下水的不良地质体。当长距离超前地质预报发现存在不良地质体时，进行短距离超前地质预报，获取不良地质体的位置和赋存形态。

### 8.3

- e) 孔中探测方法一般包括跨孔电阻率层析成像法、跨孔雷达法、跨孔弹性波法、钻孔电视法等探测方法。孔中探测法可用于探查掘进面前方的地质构造、裂隙带、破碎带、溶洞溶隙以及地下水等不良地质体的发育、分布及连通性。进行孔中探测时，为防止探测过程中孔中探测电缆、天线等被卡被埋，钻孔内壁应保持光滑、不塌孔，因此探测前钻孔应用清水循环冲洗，并检查孔壁、孔深，必要时在钻孔内安装非金属套管以防止塌孔。应用跨孔电阻率层析成像法、跨孔雷达法、跨孔弹性波法等方法进行探测时，钻孔(套管)内径不宜小于 75 mm，使用非金属材质的递送杆进行电缆、天线等孔中探测装置的递送，以确保递送过程顺利；钻孔深度不宜小于钻孔间距的 1.5 倍，以保证孔间探测具有较高的信噪比和较高的成像分辨率。应用跨孔雷达法、跨孔弹性波法和钻孔电视进行数据采集时，应同步记录仪器孔中部分的深度信息，探测前还应测量两个钻孔的间距、夹角。对孔中探测数据进行处理与解释时，应充分结合地质、钻探等已有资料；采用多种方法对相同钻孔对进行孔中探测时，应联合多种方法探测成果进行综合解释。

### 8.4

为提高探测效果，TBM隧道综合超前地质预报宜考虑其他辅助方法，例如TBM掘进参数和岩碴之中包含有地质信息，一般来说，TBM掘进参数(如推力、贯入度、扭矩等)能够反映掘进面岩体质量，而从岩碴的渣片质量、体积、形状及分布等参数也能够推测掘进面前方岩体条件，这些信息都可以为TBM隧道超前地质预报提供借鉴和参考。

### 8.5

综合超前地质预报中的约束反演，是指对未知地球物理参数的反演求解提供某种已知信息，作为约束条件对反演目标函数进行修正，可在一定程度上改善反演问题的不适定性，提高反演结果的准确性和可靠性。一般约束信息可来自介质内部的天然变化规律、介质地球物理参数范围以及对同一目标体的多种地球物理探测信息等。同时求解两种或两种以上地球物理参数的联合反演方法属于地球物理反演新的发展方向。