

# 复杂地质条件下隧洞开挖支护技术研究与应用

辛 聪 艾志刚

浙江省第一水电建设集团股份有限公司 浙江 杭州 310052

**摘要：**随着基础设施建设的不断推进，隧洞工程在水利、交通等领域的应用日益广泛。然而，复杂地质条件给隧洞开挖支护带来了巨大的挑战。本文深入探讨了复杂地质条件下隧洞开挖支护技术，分析了复杂地质条件的特点及其对隧洞工程的影响，阐述了常见的隧洞开挖方法与支护技术，并结合实际工程案例，研究了不同支护技术在复杂地质条件下的应用效果。旨在为复杂地质条件下隧洞工程的安全施工提供理论支持和技术参考。

**关键词：**复杂地质条件；隧洞开挖；支护技术；监测反馈

## 1 引言

隧洞工程在水利、交通等领域具有重要作用。随着工程向复杂地质条件延伸，如断层破碎带、软弱围岩、高地应力和岩溶区，施工面临围岩失稳、塌方、涌水等风险，威胁安全并影响进度。因此，研究复杂地质条件下隧洞开挖支护技术，对提升工程安全性、可靠性与经济性具有重要意义。

## 2 复杂地质条件特点及其对隧洞工程的影响

### 2.1 复杂地质条件特点

地质条件复杂性主要体现在断层破碎带、软弱围岩、高地应力和岩溶地区。断层破碎带内岩石破碎，节理裂隙发育，根据性质分为正断层、逆断层和平移断层等，宽度从数米到数十米不等，填充物松散强度低，不利于隧洞开挖支护。软弱围岩如泥岩、页岩等强度低、易风化崩解，开挖后变形显著且持续时间长，严重影响施工安全。高地应力环境下，隧洞开挖后的应力重新分布可引发岩爆或大变形，威胁施工安全与工程结构。岩溶地区因水对可溶性岩石的溶解作用形成溶洞和暗河，遇突水突泥灾害风险高，处理不当将造成严重事故。

### 2.2 对隧洞工程的影响

复杂地质条件下的隧洞工程面临施工安全风险增加、难度加大、工程造价提高及工程质量难以保证的挑战。围岩稳定性难以预测，易引发塌方、涌水、岩爆等灾害，严重威胁人员和设备安全，并且在断层破碎带塌方事故率较高。高地应力区域可能发生致命岩爆，大变形可致支护结构破坏。特殊地质要求特定开挖与支护技术，增加了施工复杂性和不确定性。地质勘探难度大，需不断调整方案。应对这些挑战需要更多先进设备和材料，延长施工周期，导致成本上升。由于支护设计和施工质量控制难，隧洞使用寿命和安全性可能受到影响。

## 3 常见隧洞开挖方法与支护技术

### 3.1 隧洞开挖方法

#### 3.1.1 全断面开挖法

全断面开挖法是将隧洞断面一次开挖成型的方法。该方法适用于围岩条件较好、断面尺寸适中的隧洞工程。其优点是开挖工序简单，施工速度快，对围岩的扰动次数少，有利于围岩的稳定。在围岩类别为Ⅱ-Ⅲ类，且隧洞断面面积小于100平方米的情况下，全断面开挖法具有较好的应用效果。但在复杂地质条件下，如断层破碎带、软弱围岩地段，全断面开挖容易导致围岩失稳，一般不宜采用。因为全断面开挖时，开挖面积大，对围岩的扰动范围广，在围岩自稳能力差的情况下，很难及时形成有效的支护，容易引发塌方等事故。

#### 3.1.2 台阶法开挖

台阶法开挖是将隧洞断面分成上下两个或多个台阶进行开挖的方法。根据台阶的数量和长度，可分为长台阶法、短台阶法和超短台阶法。长台阶法的上台阶长度一般大于5倍洞径，短台阶法的上台阶长度为3-5倍洞径，超短台阶法的上台阶长度小于3倍洞径。台阶法开挖适用于围岩条件一般至较好的隧洞工程，它能够及时支护开挖面，减少围岩的暴露时间，有利于控制围岩变形<sup>[1]</sup>。在复杂地质条件下，短台阶法和超短台阶法应用较为广泛，因为它们可以更好地适应围岩的变化，及时调整支护参数。例如，在断层破碎带地段，采用短台阶法开挖，上台阶开挖后及时进行支护，然后再进行下台阶的开挖和支护，可以有效控制围岩的变形，保证施工安全。

#### 3.1.3 分部开挖法

分部开挖法是将隧洞断面分成若干部分，按一定顺序分部开挖的方法。常见的分部开挖法有环形开挖预留核心土法、双侧壁导坑法、中隔壁法（CD法）和交叉中隔壁法（CRD法）等。分部开挖法适用于围岩条件较差、断面尺寸较大的隧洞工程，特别是断层破碎带、

软弱围岩等复杂地质条件。环形开挖预留核心土法是将隧洞断面分成上部弧形导坑、中部台阶和下部核心土三部分进行开挖，先开挖上部弧形导坑，然后进行初期支护，再开挖中部台阶和下部核心土。该方法通过分部开挖和及时支护，能够有效控制围岩的变形，保证施工安全。双侧壁导坑法则是先开挖两侧的导坑，再进行中间部分的开挖，适用于断面尺寸较大、围岩条件极差的情况<sup>[2]</sup>。但分部开挖法施工工序复杂，施工速度相对较慢，且各分部之间的衔接要求较高。

### 3.2 支护技术

#### 3.2.1 锚杆支护

锚杆支护是通过在围岩中钻孔，然后插入锚杆并注入浆液，使锚杆与围岩紧密结合，从而提高围岩的自稳能力。锚杆支护具有施工方便、成本低、对围岩扰动小等优点，在隧洞工程中得到了广泛应用。根据锚杆的受力特点和作用机理，可分为全长粘结式锚杆、端头锚固式锚杆、摩擦式锚杆和预应力锚杆等。全长粘结式锚杆是将锚杆全长与围岩粘结在一起，通过锚杆与围岩之间的粘结力来传递应力，适用于围岩条件较好的地段。端头锚固式锚杆则只在锚杆端部进行锚固，适用于围岩变形较小的地段。在复杂地质条件下，预应力锚杆能够主动对围岩施加压力，改善围岩的应力状态，增强围岩的稳定性，常用于断层破碎带、软弱围岩等不良地质地段的支护。预应力锚杆的预应力大小一般根据围岩的变形情况和支护要求确定，通常在50-300kN之间。

#### 3.2.2 喷射混凝土支护

喷射混凝土支护是利用压缩空气将混凝土混合料通过管道输送至喷头，在喷头处加入水后高速喷射到围岩表面，迅速凝结硬化而形成一层支护层。喷射混凝土支护能够及时封闭围岩，防止围岩风化、剥落，同时与围岩紧密粘结，共同承受围岩压力。喷射混凝土支护具有施工速度快、能够紧跟开挖面、及时提供支护等优点，是隧洞工程中常用的初期支护手段。喷射混凝土的强度等级一般根据围岩条件确定，在围岩条件较差的地段，喷射混凝土的强度等级通常不低于C20<sup>[3]</sup>。为了提高喷射混凝土的支护效果，通常会采用钢纤维喷射混凝土、合成纤维喷射混凝土等新型材料。钢纤维喷射混凝土中钢纤维的掺量一般为1%-2%，能够有效提高喷射混凝土的抗拉强度和韧性。

#### 3.2.3 钢拱架支护

钢拱架支护是用型钢或钢筋焊接而成的拱形骨架结构，安装在隧洞开挖断面内，与锚杆、喷射混凝土等联合使用，形成复合支护体系。钢拱架支护具有较高的强

度和刚度，能够承受较大的围岩压力，特别适用于围岩条件差、变形大的地段。常见的钢拱架类型有工字钢拱架、格栅钢拱架等。工字钢拱架一般采用I16-I25的工字钢制作，格栅钢拱架则由钢筋焊接而成，具有较好的柔性和适应性。在安装钢拱架时，需要保证其与围岩之间的间隙符合设计要求，并及时进行喷射混凝土回填，使钢拱架与围岩形成整体，共同发挥作用。钢拱架的间距一般根据围岩变形情况和支护要求确定，通常在0.5-1.2米之间。

#### 3.2.4 超前支护

超前支护是在隧洞开挖前，对开挖面前方的围岩进行加固和支护，以提高围岩的自稳能力，防止开挖过程中发生坍塌等事故。常见的超前支护方法有超前锚杆、超前小导管注浆、超前管棚等。超前锚杆是在开挖面前方钻设一定角度的钻孔，插入锚杆并注浆，形成锚杆支护体系。超前锚杆的长度一般为3-5米，环向间距0.3-0.5米，外插角5°-15°。超前小导管注浆是在开挖面前方沿隧洞周边钻设小导管，并向小导管内注入浆液，浆液扩散到周围围岩中，起到加固围岩和止水的作用<sup>[4]</sup>。超前小导管一般采用φ42-φ50的热轧无缝钢管，长度为3-6米，环向间距0.3-0.4米，外插角10°-30°。超前管棚是在隧洞开挖轮廓线外一定范围内，沿隧洞轴线方向钻设大直径钢管，并注入水泥浆或化学浆液，形成钢管棚架支护体系，能够有效承受上部围岩压力，为隧洞开挖提供安全保障。超前管棚一般采用φ89-φ159的热轧无缝钢管，长度为10-40米，环向间距0.3-0.5米，外插角1°-3°。在复杂地质条件下，超前支护技术常常与其它支护方法联合使用，以提高支护效果。

## 4 不同支护技术在复杂地质条件下的应用效果研究

### 4.1 工程概况

以某水利隧洞工程为例，该隧洞全长1500米，穿越的地质条件复杂，存在断层破碎带、软弱围岩和高地应力等不良地质现象。其中，断层破碎带宽度约20-50米，围岩破碎，节理裂隙发育；软弱围岩段主要为泥岩，遇水易软化崩解，长度约300米；高地应力区最大地应力达35MPa，长度约200米。

### 4.2 支护方案设计与实施

#### 4.2.1 断层破碎带支护方案

在断层破碎带地段，采用超前小导管注浆+钢拱架+喷射混凝土的联合支护方案。超前小导管采用φ42mm热轧无缝钢管，长度为4.5米，环向间距0.35米，外插角15°-20°，注浆材料为水泥-水玻璃双液浆，水泥浆与水玻璃的体积比为1:0.6，水玻璃模数为2.8-3.2，波美度为35-40。

钢拱架采用I20b工字钢,间距0.8米,与超前小导管焊接牢固。喷射混凝土厚度为25厘米,强度等级为C25,配合比为水泥:砂:石子=1:2.2:3.5,水灰比为0.45。

#### 4.2.2 软弱围岩段支护方案

针对软弱围岩段,采用超前锚杆+钢筋网+喷射混凝土+钢拱架的支护方案。超前锚杆采用 $\phi 25$ mm螺纹钢,长度为3.5米,环向间距0.4米,外插角 $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ 。钢筋网采用 $\phi 8$ mm钢筋,网格间距20厘米 $\times$ 20厘米,与锚杆焊接。喷射混凝土厚度为20厘米,强度等级为C20,配合比为水泥:砂:石子=1:2.5:3.8,水灰比为0.5。钢拱架采用格栅钢拱架,间距1米。

#### 4.2.3 高地应力区支护方案

在高地应力区,为防止岩爆和大变形,采用超前管棚+预应力锚杆+喷射混凝土+钢拱架的支护方案。超前管棚采用 $\phi 108$ mm热轧无缝钢管,长度为20米,环向间距0.4米,外插角 $1^{\circ}$ 左右,注浆材料为水泥浆,水灰比为0.5-0.6。预应力锚杆采用 $\phi 32$ mm中空注浆锚杆,长度为6米,间距1米 $\times$ 1米,预应力为150kN。喷射混凝土厚度为30厘米,强度等级为C30,配合比为水泥:砂:石子=1:2:3.2,水灰比为0.4。钢拱架采用I22b工字钢,间距0.7米。

### 4.3 应用效果分析

#### 4.3.1 断层破碎带支护效果

通过超前小导管注浆,有效地加固了断层破碎带围岩,提高了围岩的整体性和自稳能力。注浆后,围岩的粘结强度提高了3-5倍,抗压强度提高了2-3倍。钢拱架和喷射混凝土的联合支护,及时控制了围岩的变形,避免了塌方事故的发生。在施工过程中,通过对围岩变形和支护结构受力的监测,发现围岩变形速率逐渐减小,最终趋于稳定。围岩的最大收敛变形量为15厘米,小于设计允许值20厘米;支护结构的最大受力为120kN,也在设计允许范围内,说明该支护方案在断层破碎带地段取得了良好的支护效果。

#### 4.3.2 软弱围岩段支护效果

超前锚杆、钢筋网和喷射混凝土的初期支护,能够及时封闭围岩,防止围岩进一步风化、剥落。钢筋网的加入增强了喷射混凝土的抗裂性能,减少了喷射混凝土表面的裂缝。钢拱架的加入增强了支护结构的整体强

度和刚度,有效抵抗了软弱围岩的变形压力。监测数据显示,软弱围岩段在开挖后围岩变形得到了有效控制,围岩的最大收敛变形量为12厘米,小于设计允许值18厘米;支护结构未出现明显的破坏迹象,保证了隧洞施工的安全进行。

#### 4.3.3 高地应力区支护效果

超前管棚为隧洞开挖提供了有效的超前支护,防止了开挖过程中掌子面的坍塌。预应力锚杆主动对围岩施加压力,改善了围岩的应力状态,减少了岩爆的发生概率。在施工过程中,仅发生了轻微岩爆现象,未造成人员伤亡和设备损坏。喷射混凝土和钢拱架的联合支护,进一步增强了隧洞围岩的稳定性。监测数据显示,高地应力区的围岩最大收敛变形量为18厘米,小于设计允许值25厘米;支护结构的受力也在设计允许范围内,说明该支护方案能够适应高地应力区的地质条件,保证了隧洞工程的施工安全。

### 结语

复杂地质下的隧洞开挖支护技术是确保隧洞工程成功的关键。此类地质包括断层破碎带、软弱围岩等特征,增加了施工难度和安全风险。常用的开挖方法有全断面开挖法、台阶法和分部开挖法;支护技术则包含锚杆、喷射混凝土、钢拱架及超前支护等。不同技术根据地质条件各有优势。研究表明,选择合适的支护方案并严格执行,可以有效控制围岩变形,确保施工安全,为类似工程提供重要参考。

### 参考文献

- [1]杨润菊,王红军.特殊复杂地质条件下大跨度导流隧洞开挖支护技术[J].云南水力发电,2020,36(04):62-65.
- [2]漆祖芳,孔建,饶志文,等.乌东德水电站复杂地质条件下大型导流隧洞群开挖支护设计[J].水利水电快报,2022,43(12):41-48.
- [3]曹爱武,褚卫江,吴家耀,等.复杂地质条件下隧洞交叉口开挖支护稳定研究[C]//抽水蓄能电站工程建设文集2021.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司;浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司,;2021:442-446.
- [4]尤彦龙.复杂地质条件下引水隧洞工程质量管控关键技术标准[J].大众标准化,2025,(10):38-40.