

客运专线隧道的设计与施工



主要内容

- 一、我国客运专线隧道的概况
- 二、客运专线隧道的特点
- 三、客运专线隧道的设计
- 四、客运专线的施工
- 五、客运专线隧道施工机械配套
- 六、典型工程实例

第一节 客运专线设计施工概况

一、我国客运专线隧道的概况

根据国务院批准的《中长期铁路网规划》：

到2020年全国铁路营业里程达到10万公里，其中客运专线营业里程12000公里。

包括：

新建客运专线10000公里；

新建城际客运系统2000公里。

客运专线隧道的数量

➤ 据不完全统计，我国客运专线隧道的修建数量将超过1000km。

✓	武广客运专线	165km	甬温福厦	280km
✓	京沪高速	15km	石太客专	76km
✓	郑州西安客专	74km	武汉合肥	80km
✓	武汉成都	300km		

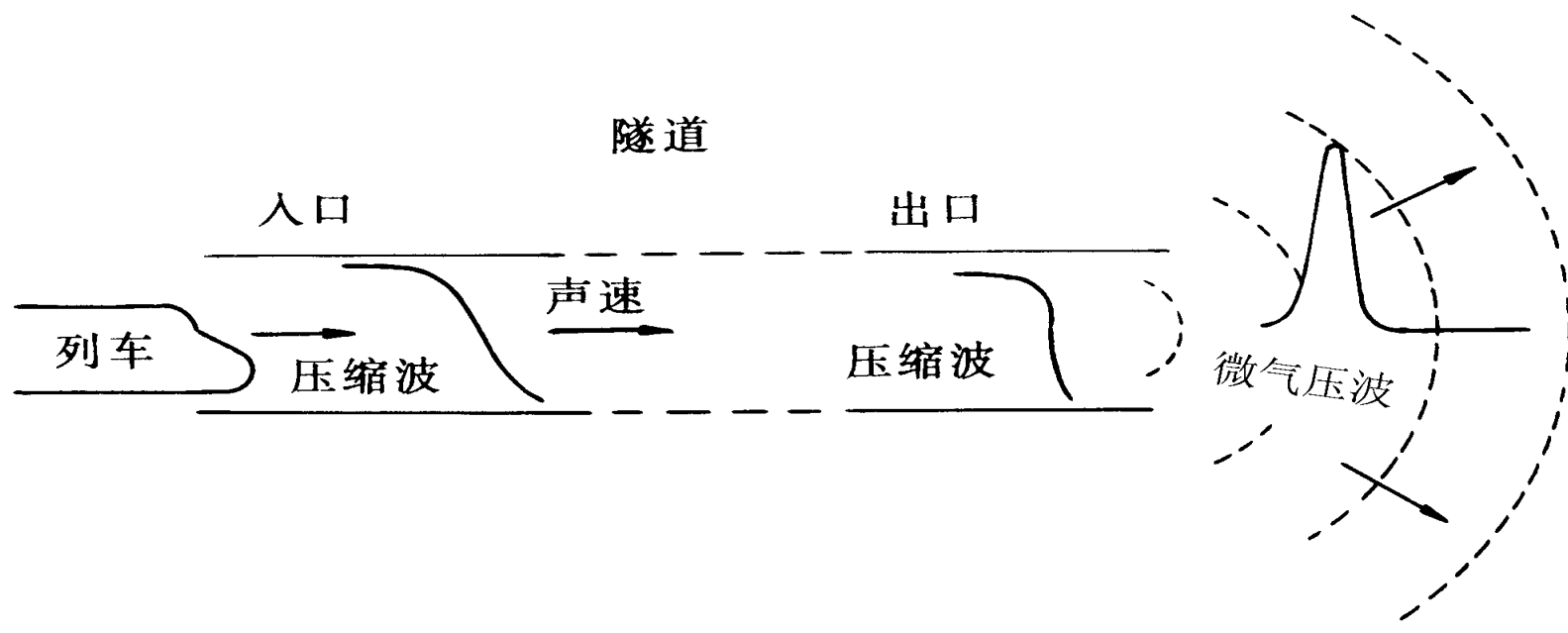
客运专线隧道的分类

序号	类别标准	线 别
1	200km/h客运专线	城际客运系统
2	200km/h近期客货共线	胶济、遂渝、徐郑
3	250km/h近期客货共线	石太
4	250km/h近期双箱运输	甬温福厦、合武、合宁
5	350km/h客运专线	京沪、武广、郑西

二、客运专线隧道的特点

- 空气动力学效应
- 可靠性和结构耐久性要求高
- 更加重视对环境的影响
- 防灾救援要求高

空气动力学效应



隧道微气压波的发生

高速列车在隧道内运行引起的问题

1. 由于瞬变压力造成旅客及乘务人员耳膜不适，舒适度降低，并对铁路员工和车辆产生危害；
2. 高速列车进入隧道时，会在隧道出口产生微气压波，发出轰鸣声，使附近房屋门窗嘎啦嘎啦作响，引起扰民问题；
3. 行车阻力增大，使运营能耗增大，并要求机车动力增大；

高速列车在隧道内运行引起的问题

4. 形成空气动力学噪声（与车速的6~8次方成正比）；
5. 列车风加剧，影响隧道维修养护人员的正常作业；
6. 列车克服阻力所作的功转化为热量，在洞内积聚引起温度升高等。

因此，在高速铁路设计时，应从车辆及隧道两方面采取措施，以减缓空气动力学效应。

空气动力学效应

空气动力学效应的因素：

车辆的因素

列车速度

列车横断面积

列车长度

列车头部形状

隧道的因素

隧道横断面积

隧道长度

隧道道床类型

洞口结构

可靠性和耐久性

可靠性：结构在规定的时间内，在正常规定的条件下，完成预定功能的能力，包括安全性、适用性和耐久性。当以概率来度量时，成为结构的可靠度。

耐久性：在使用过程中经受（抵抗）各种破坏因素的作用（破坏力）而能保持其使用功能的能力。

耐久性设计：通过控制内因即砼材料、钢筋性质和周围状态、砼施工使用过程、砼受力状态，以满足接触环境作用下耐久性的要求。如50年或100年等

环境的影响

环境包括：

生态环境、自然环境和周边人文环境

噪声的影响--减振降噪：

轮轨噪声、机械噪声、弓网噪声和空气动力学噪声。

防灾救援问题

影响列车安全运行的因素：

突发性的：火灾、撞车、列车脱轨

经常性的：隧道病害

三、客运专线隧道的技术要求

- 建筑限界和隧道内净空面积
- 洞门型式及缓冲结构
- 衬砌支护类型和支护参数
- 防水和排水措施
- 环境保护
- 防灾救援方案

隧道有效内净空面积

隧道净空面积的影响因素：

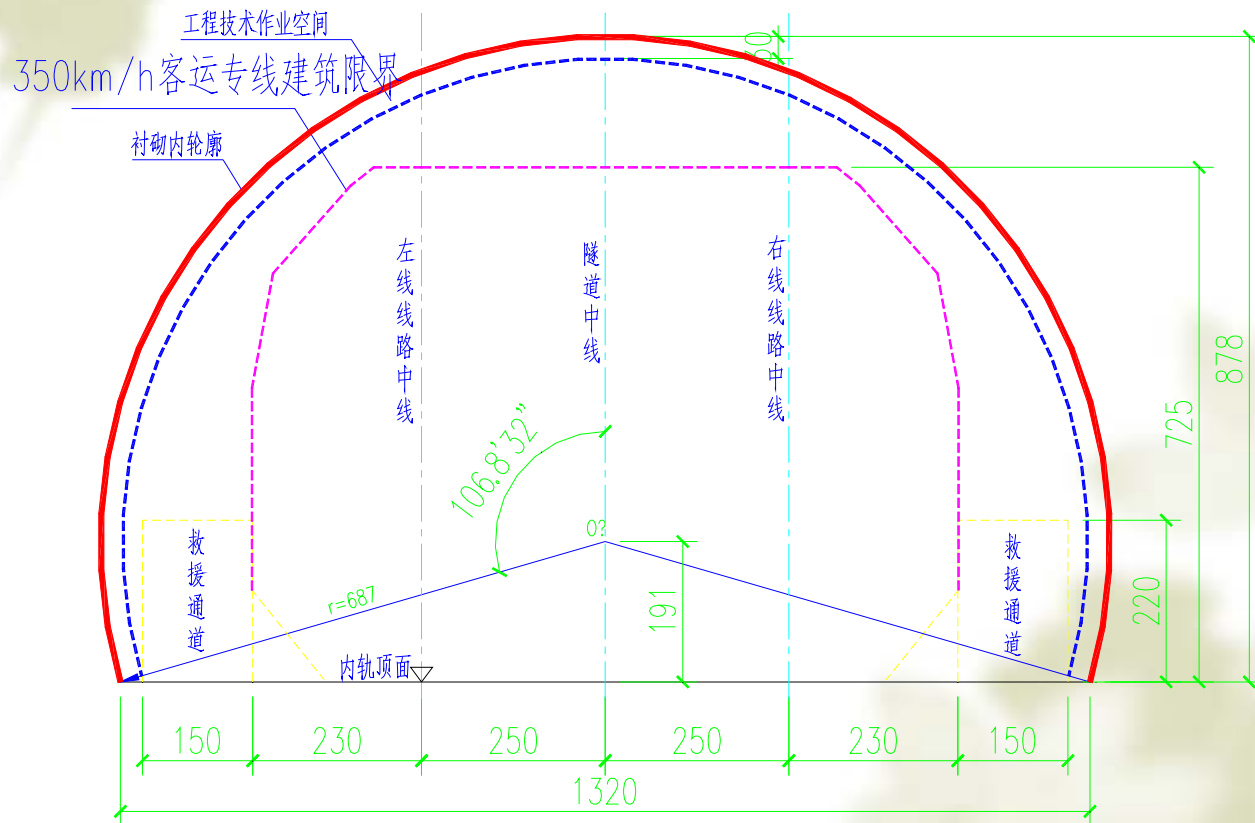
隧道建筑限界

线间距

应预留的空间：安全空间、救援通道、工程技术作业空间、内部配件空间等

考虑空气动力学影响所需的空間建筑限界和隧道内净空面积

客运专线隧道限界



我国客运专线隧道内净空面积

序号	类别标准	单线	双线
1	200km/h客专近期客货共线	52.86m ²	85.8m ²
2	200km/h客专近期双箱运输	56.67m ²	92.94m ²
3	250km/h近期客货共线	58m ²	90.16m ²
4	250km/h近期双箱运输	58m ²	95.06m ²
5	350km/h客运专线	70m ²	100m ²

洞门型式及缓冲结构

设计原则：早进晚出、确保安全、因地制宜、保护环境、简约实用

缓冲结构：双线隧道原则不设缓冲结构，当洞口位于城市或有密集建筑物时，可采取防噪音措施或结合洞门型式适当设置缓冲结构。

四、客运专线长大隧道的设计施工原则

- 1、设计、施工中必须建立综合超前预报系统作为工序并列入预算之中。
- 2、设计必须采取动态信息化设计和信息化施工，以及信息化动态管理。

3、从环境保护出发，尤其在岩溶地区隧道防排水设计原则，必须将以排为主改为以堵为主，限排为辅。

4、取消洞门或设计简易洞门

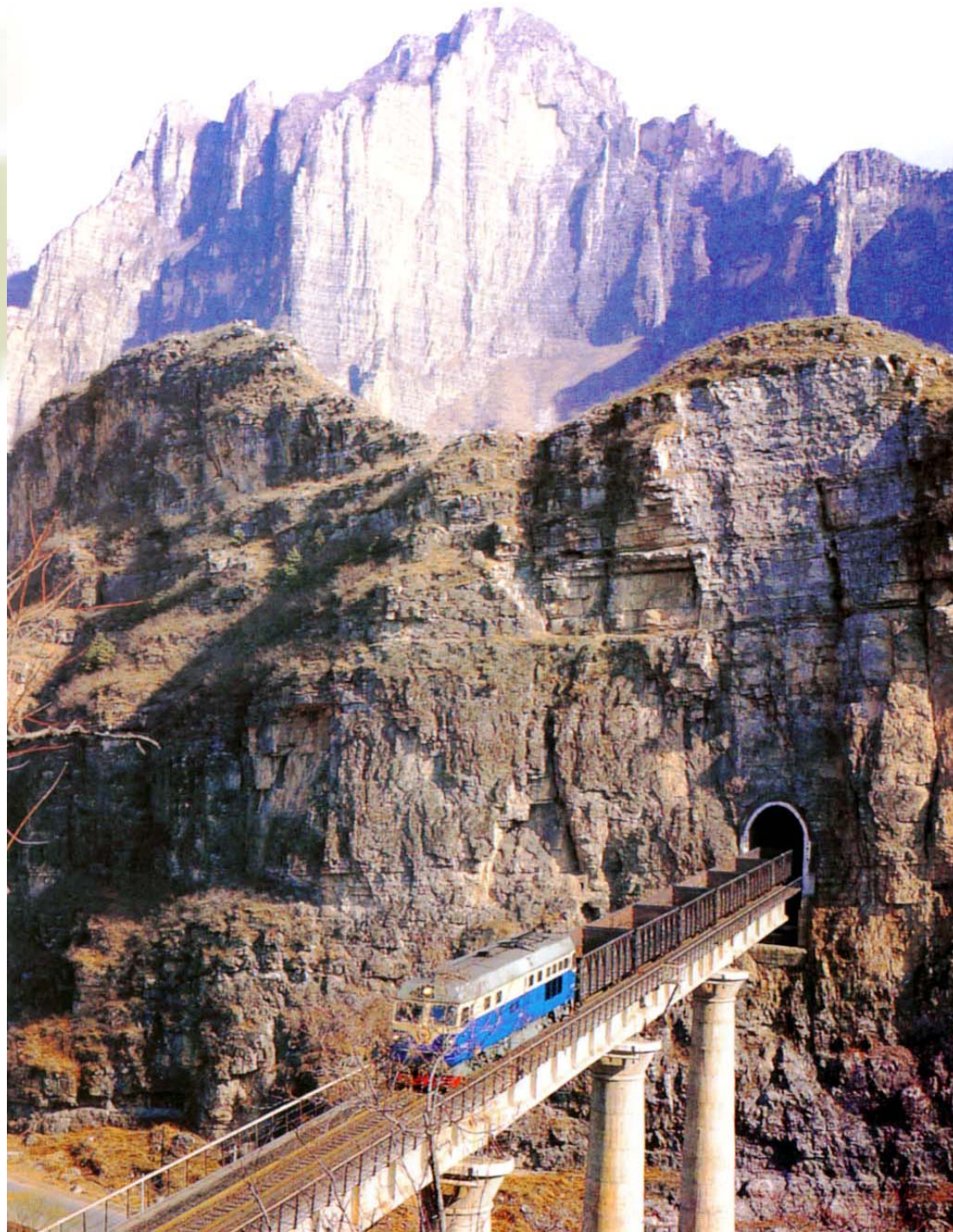
洞门应设在早进晚出地段，按不受力洞门设计，挡墙式洞门，必造成大的刷坡而破坏洞顶环境，在桥隧相联处，陡壁处可不设洞门，洞口易选在鼻梁上，洞口处取消深路堑。



几种洞门型式







5、5km以上隧道设置平行导坑是确保安全、质量、进度的重要措施，也是今后运营隧道所必须。

6、长隧道的开挖方法

(1) 全断面钻爆法。

(2) 导洞超前后部扩大钻爆法，导洞可超前5-6m争取临孔面，为后部扩大加快速度，节约炸药，减少超欠挖、减少振速提供条件，导洞超前也可利用平导投入正洞只打导坑而不增设工作面，反而更快，为推荐方法。

(3) 小直径TBM (3-4m) 加钻爆法扩大，
为推荐方法，以提高科技含量。

(4) 软弱地层段，采用正台阶开挖加超前
支护进行。

(5) 有轨运输、无轨装碴。

(6) 长隧施工通风方法

采用压入式和射流正洞式通风，可实
现左、右洞调节，通风效果很好。

第二节 隧道施工

一、隧道施工方法

(一) 隧道施工基本概念

隧道施工是指修建隧道及地下洞室的施工方法、施工技术和施工管理的总称。隧道施工方法的选择主要依据工程地质和水文地质条件，并结合隧道断面尺寸、长度、衬砌类型、隧道的使用功能和施工技术水平等因素综合考虑研究确定。

隧道施工方法可按以下方式分类：



(二) 山岭隧道的常规施工方法

山岭隧道的常规施工方法又称为矿山法。将采用钻爆开挖加钢木构件支撑的施工方法称为“传统的矿山法”；而将采用钻爆开挖加锚喷支护的施工方法称之为“新奥法”。

1、矿山法

是以木或钢构件作为临时支撑，待隧道开挖成形后，逐步将临时支撑撤换下来，而代之以整体式衬砌作为永久性支护的施工方法。

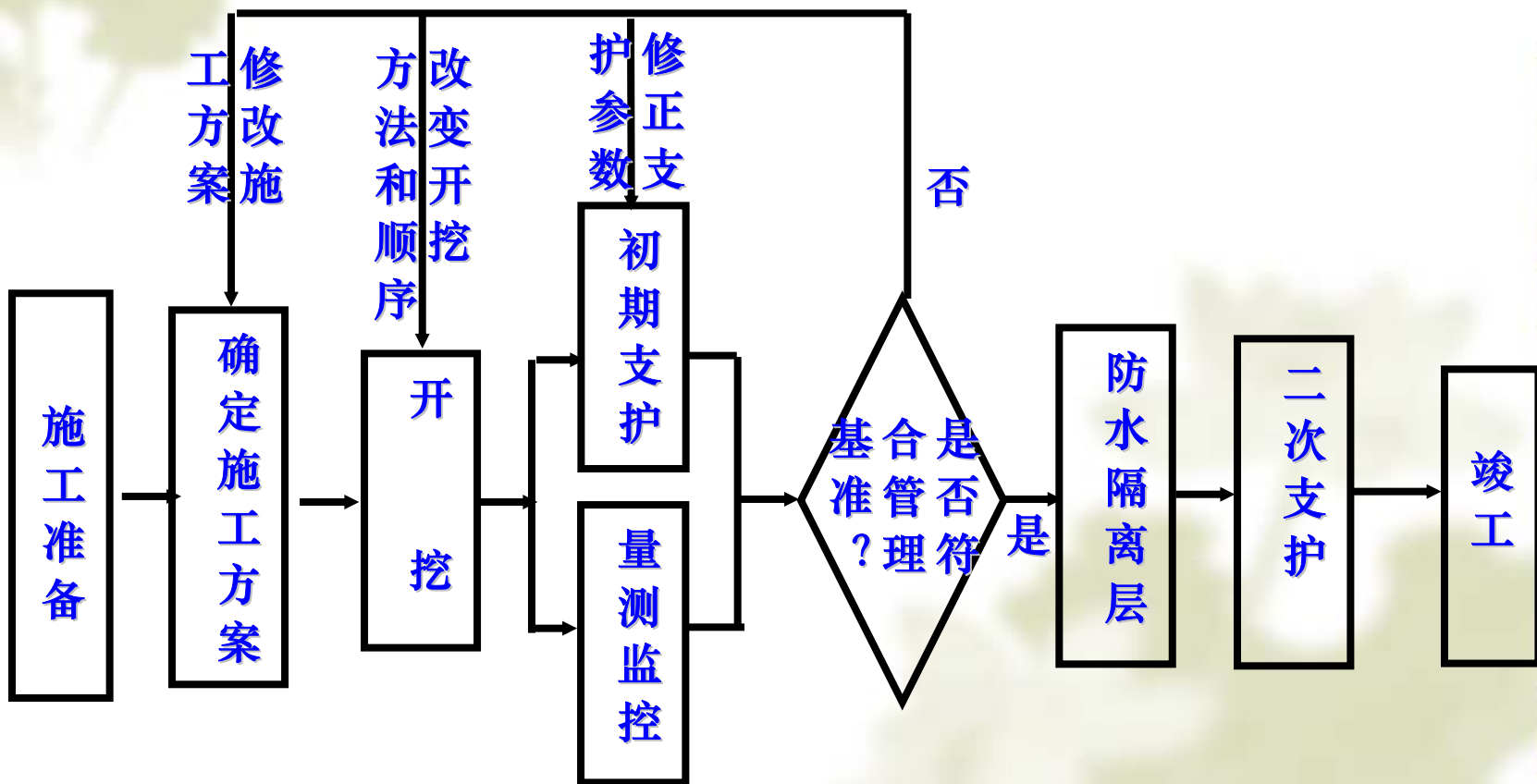
2、新奥法

新奥法即奥地利隧道施工新方法(New Austrian Tunnelling method – NATM)，是以喷射混凝土锚杆作为主要支护手段，通过监测控制围岩的变形，便于充分发挥围岩的自承能力的施工方法。

由于锚喷支护技术的应用和发展，导致隧道及地下洞室工程理论步入到现代理论的新领域，也使隧道及地下洞室工程的设计和施工更符合地下工程实际，即设计理论－施工方法－结构(体系)工作状态(结果)的一致。

二、新奥法的基本概念

(一) 新奥法施工程序



(二) 新奥法施工的基本原则

- ❧ **少扰动**——开挖时要尽量减少对围岩的扰动次数、扰动强度、扰动范围和扰动持续时间。
- ❧ **早支护**——开挖后及时施作初期锚喷支护，使围岩的变形进入受控制状态。
- ❧ **勤量测**——指以直观、可靠的量测方法和量测数据来准确评价围岩（或围岩加支护）的稳定状态，或判断其动态发展趋势，以便及时调整支护形式、开挖方法。
- ❧ **紧封闭**——一方面指采取喷射混凝土等防护措施，避免围岩因长时间暴露而致强度和稳定性的衰减。另一方面指要适时对围岩施作封闭形支护。

三、开挖方法

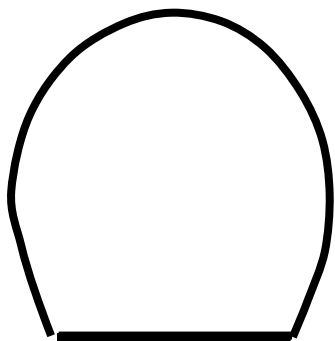
隧道开挖的基本原则是：在保证围岩稳定或减少对围岩的扰动的前提下，选择恰当的开挖方法和掘进方式，并应尽量提高掘进速度。

在选择开挖方法时，应对隧道断面大小及形状、围岩的工程地质条件、支护条件、工期要求、工区长度、机械配备能力、经济性等相关因素进行综合分析，采用恰当的开挖方法。

按开挖隧道的横断面分部情形来分，开挖方法可分为全断面开挖法、台阶开挖法、分部开挖法等。

(一) 全断面开挖法

全断面开挖法就是按照设计轮廓一次爆破成形，然后修建衬砌的施工方法。



► 适用条件

(1) I~IV级围岩，在用于IV级围岩时，围岩应具备从全断面开挖到初期支护前这段时间内，保持其自身稳定的条件。

(2) 有钻孔台车或自制作业台架及高效率装运机械设备。

(3) 隧道长度或施工区段长度不宜太短，根据经验一般不应小于1km，否则采用大型机械化施工，其经济性较差。

隧道机械化施工，有三条主要作业线，见表

作业线	采用的大型机械设备
开挖作业线	钻孔台车、装药台车、装载机配合自卸汽车（无轨运输时）、装渣机配合矿车及电瓶车或内燃机车（有轨运输时）
喷锚作业线	混凝土喷射机、混凝土喷射机械手、喷锚作业平台 进料运输设备及锚杆灌浆设备
模筑衬砌作业线	混凝土拌和作业厂、混凝土输送车及输送泵、施作防水层作业平台、衬砌钢模台车

➤全断面法施工特点

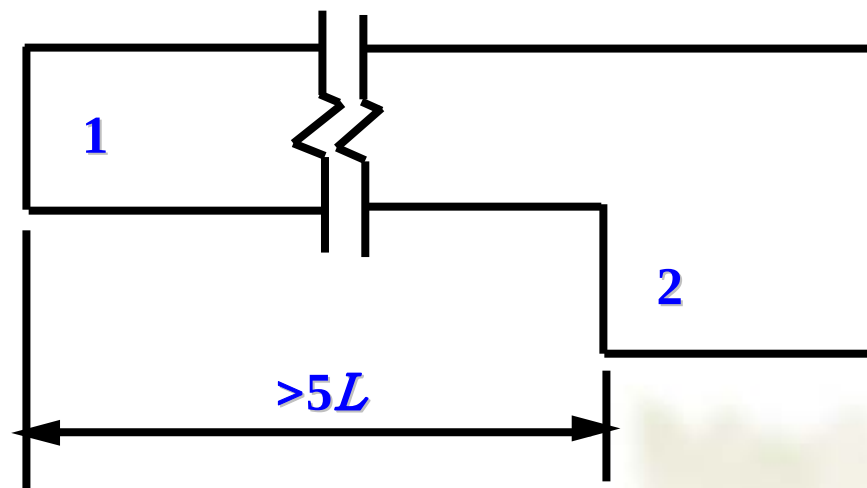
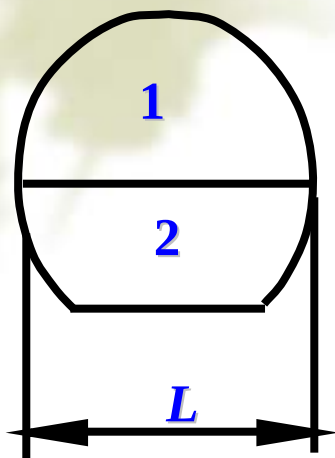
- (1) 开挖断面与作业空间大、干扰小；
- (2) 有条件充分使用机械，减少人力；
- (3) 工序少，便于施工组织与管理，改善劳动条件；
- (4) 开挖一次成形，对围岩扰动少，有利于围岩稳定。

(二) 台阶法

根据台阶长度不同，划分为长台阶法、短台阶法和微台阶法三种。

施工中采用哪一种台阶法，要根据两个条件来决定，第一是对初期支护形成闭合断面的时间要求，围岩越差，要求闭合时间越短，第二是对上部断面施工所采用的开挖、支护、出渣等机械设备需要施工场地大小的要求。

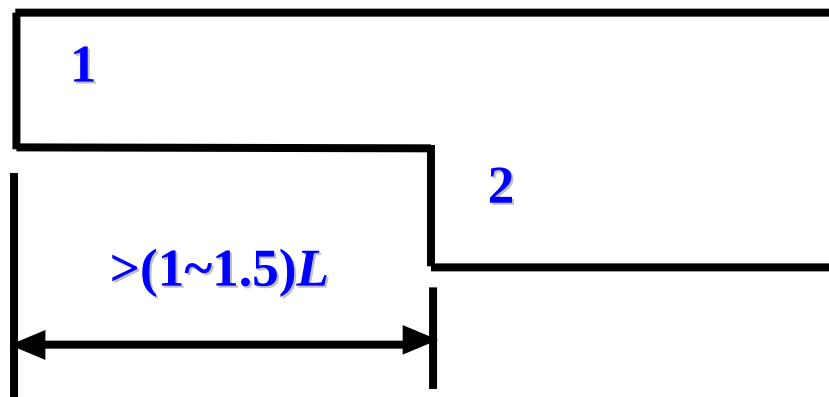
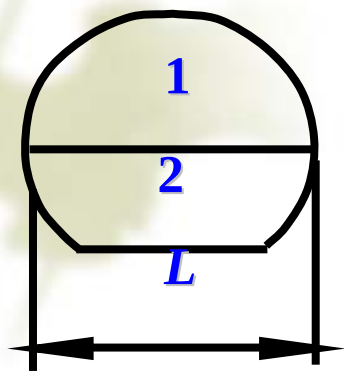
1、长台阶法



长台阶法

长台阶法开挖断面小，有利于维持开挖面的稳定，适用范围较全断面法广，一般适用于地质条件较差的Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩

2、短台阶法

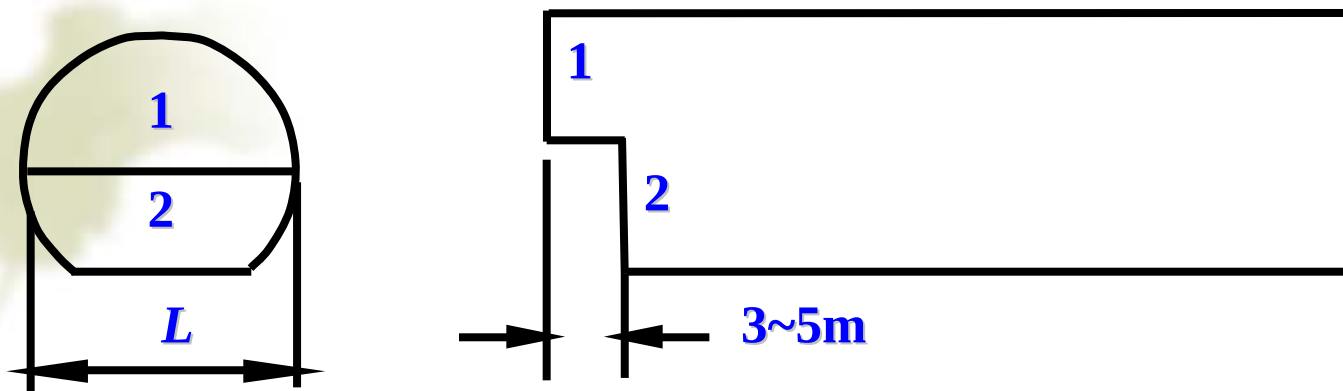


短台阶法

短台阶法适用于地质条件差的IV、V级围岩，台阶长度定为10~15m，即1~2倍开挖宽度，主要是考虑拉开工作面，减少干扰，因此台阶长度不宜过短。

短台阶法可缩短支护闭合时间，改善初期支护的受力条件，有利于控制围岩变形。缺点是上部出渣对下部断面施工干扰较大，不能全部平行作业。

3、微台阶法



微台阶法

适用于 I，II，III 级围岩，一般为 3~5m 的台阶长度。

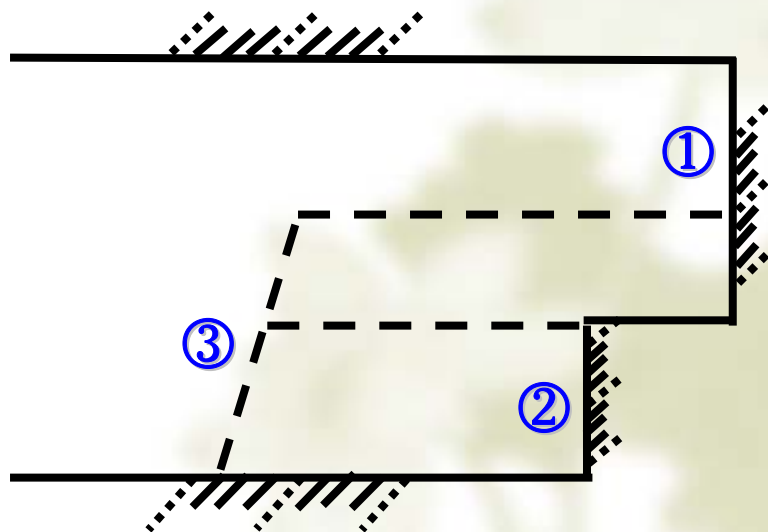
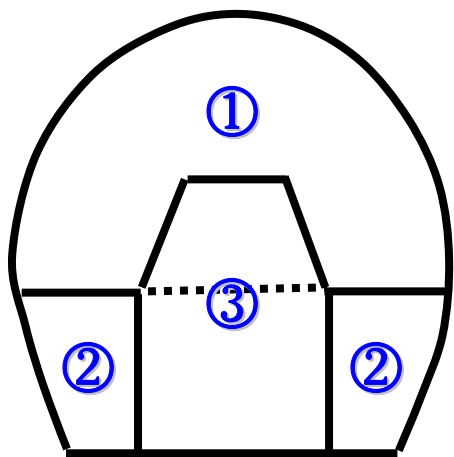
微台阶法上下断面相距较近，机械设备集中，作业时相互干扰大，生产效率低，施工速度慢。

(三) 分部开挖法

分部开挖法包括环形开挖预留核心土法、双侧壁导坑法、中洞法、中隔壁法等。

1、环形开挖留核心土法

环形开挖留核心土法常用于VI级围岩单线和V~VI级围岩双线隧道掘进。



施工要求：

- 环形开挖进尺一般为0.5~2.0m；
- 开挖后应及时施作喷锚支护、安设钢架支撑，每两榀钢架之间采用连续钢筋连接，并加锁脚锚杆；
- 当围岩地质条件差，自稳时间较短时，开挖前在拱部设计开挖轮廓线以外，进行超前支护

特点：

- 开挖工作面稳定性好
- 施工干扰大、工效低

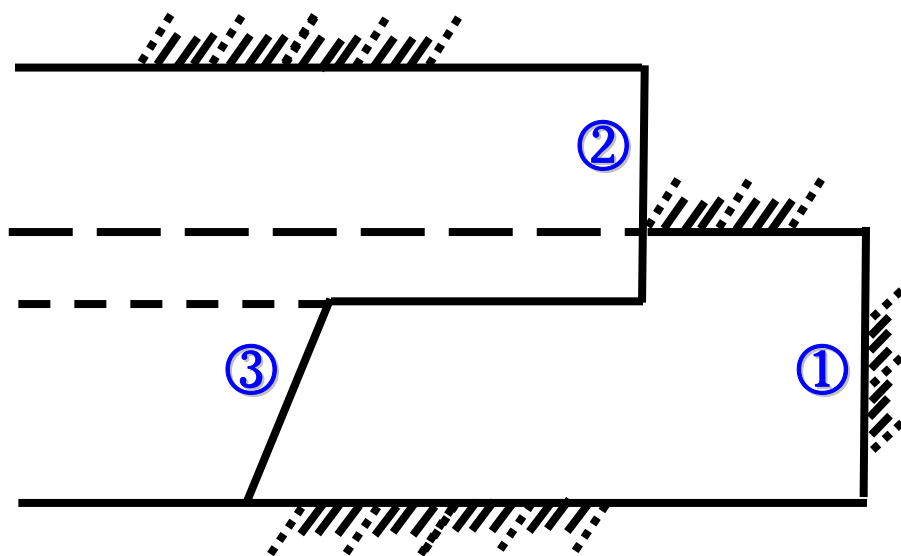
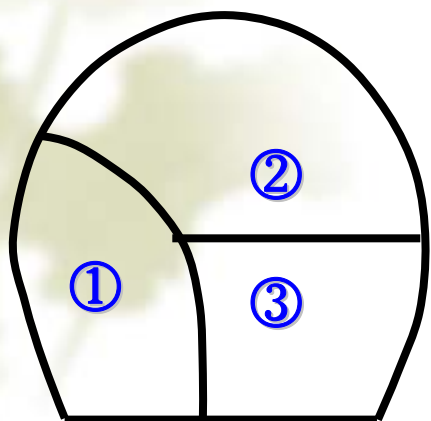
2、侧壁导坑法

根据侧壁导坑开挖的个数，分为单侧壁导坑法及双侧壁导坑法。

➤ 单侧壁导坑法

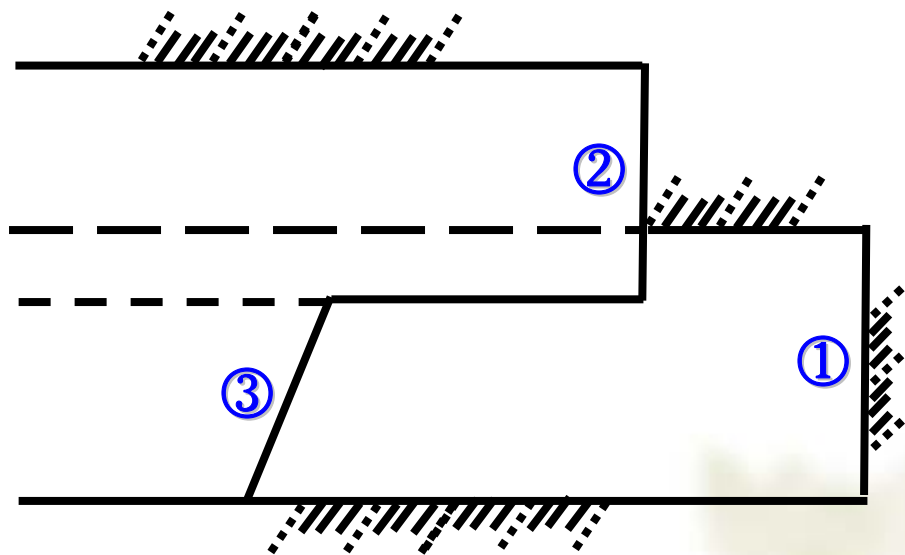
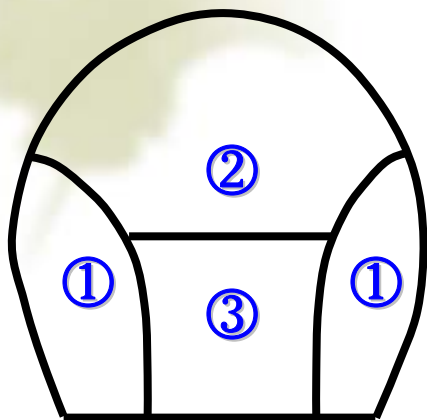
单侧壁导坑法一般将断面分成三块：侧壁导坑、上台阶、下台阶。

侧壁导坑宽度不宜超过0.5倍洞跨，高度以到起拱线为宜。导坑与台阶的距离没有硬性规定，一般以施工互不干扰为原则。



由于单侧壁导坑法每步开挖的宽度较小，而且封闭型的导坑初期支护承载能力大，所以它适用于断面跨度大，地表沉陷难于控制的软弱松散围岩中。

➤ 双侧壁导坑法



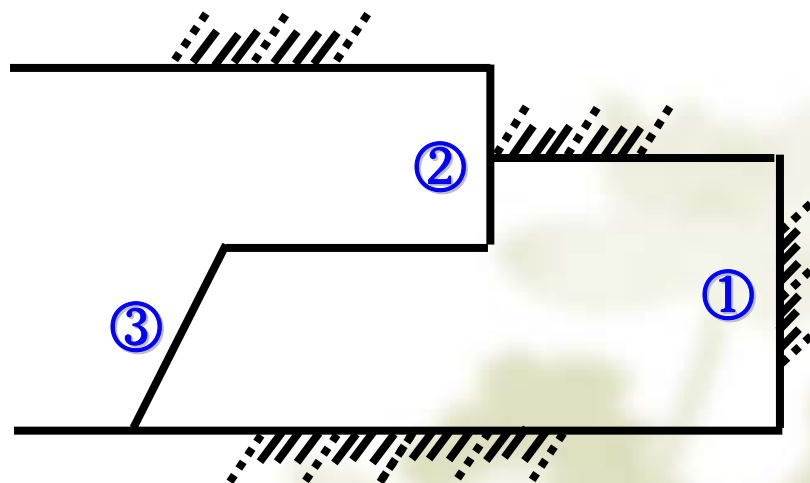
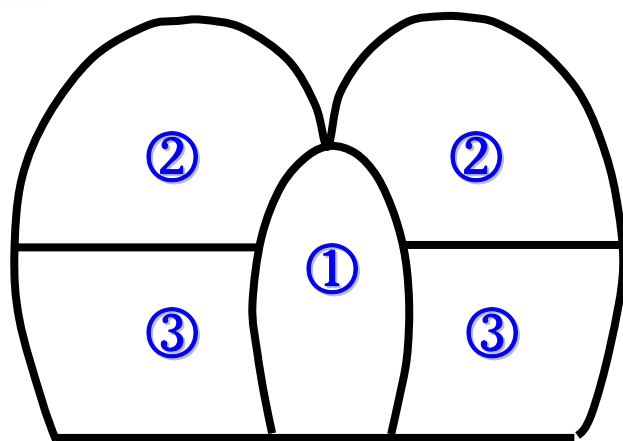
- ❖ 适用于V ~ VI级围岩双线或多线隧道掘进。
- ❖ 具有控制地表沉陷好，施工安全等优点，但进度慢，成本高。

施工要求：

- ❖ 侧壁导坑高度以到起拱线为宜；
- ❖ 侧壁导坑形状应近于椭圆形断面，导坑断面为整个断面的 $1/3$ ；
- ❖ 侧壁导坑领先长度一般为 $30 \sim 50\text{m}$ ，以开挖一侧导坑所引起的围岩应力重分布不影响另一侧导坑为原则；
- ❖ 导坑开挖后应及时进行初期支护，并尽早封闭成环。

3、中洞法

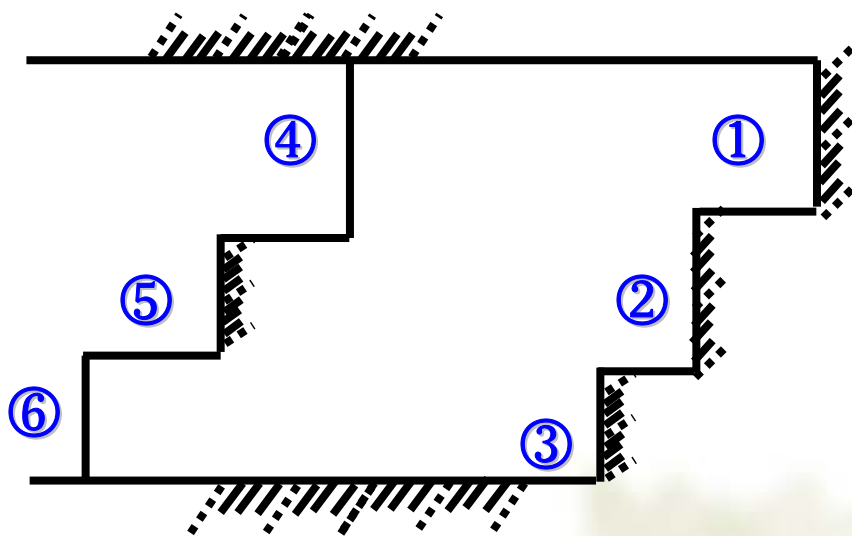
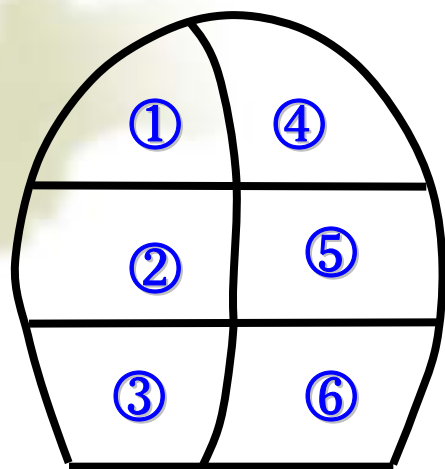
中洞法适用于双连拱隧道。采用先施作隧道中墙混凝土，后开挖两侧的施工方法。



施工要求：

- ❖ 中洞法开挖高度应大于中墙高度1m，开挖宽度应大于5m；
- ❖ 中洞开挖长度根据隧道长度、宽度以及地质情况综合考虑，一般为50~80m；
- ❖ 中洞开挖后应及时施作初期支护，再分段灌注中墙混凝土，在中墙混凝土达到设计强度后方可拆模，并进行临时横向支撑。

4、中隔壁法(CD)



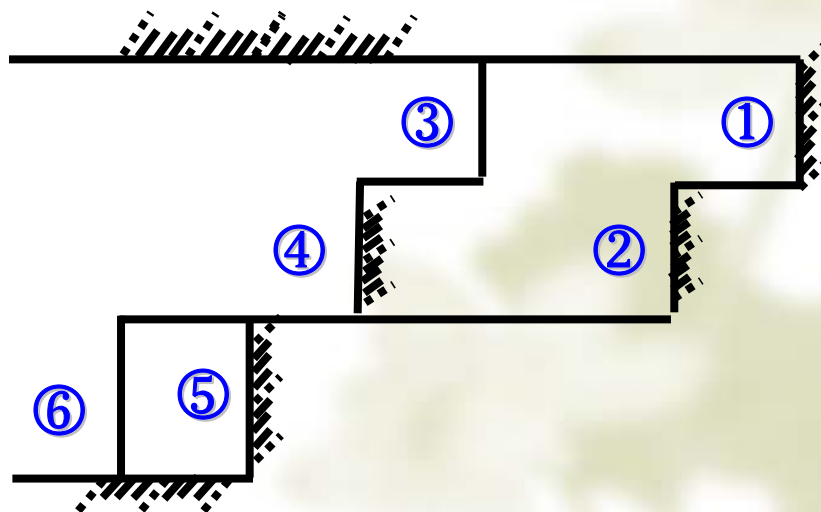
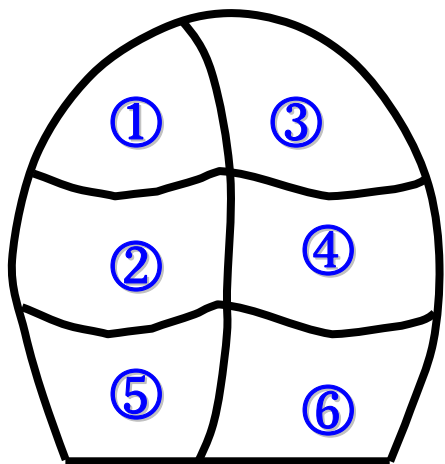
适用于V~VI级围岩的浅埋双线隧道。中隔壁开挖时，应沿一侧自上而下分为二或三部进行，每开挖一步均应及时施作锚喷支护、安设钢架、施作中隔壁，底部应设临时仰拱，中隔壁墙依次分步联结而成，之后再开挖中隔壁的另一侧，其分步次数及支护形式与先开挖的一侧相同。

施工要求：

- ❖ 各部开挖时，周边轮廓尽量圆顺，减小应力集中；
- ❖ 各部的底部高程应与钢架接头处一致；
- ❖ 每一部的开挖高度约为3.5m；
- ❖ 后一侧开挖应全断面及时封闭；
- ❖ 左右两侧纵向间距一般为30~50m；
- ❖ 中隔壁设置为弧形或圆弧形。

5、交叉中隔壁法(CRD)

交叉中隔壁法适用于V~VI级围岩浅埋的双线或多线隧道。采用自上而下分为二至三步开挖中隔壁的一侧，并及时支护，待完成1~2部后，即开始另一侧1~2部开挖及支护，形成左右两侧开挖及支护相互交叉的情形。



四、隧道施工辅助方法

稳定工作面

预留核心土挡护开挖面

喷射混凝土封闭工作面

超前锚杆锚固前方围岩

临时仰拱封底

管棚超前支护前方围岩

短管棚

长管棚

插板

注浆加固围岩和堵水

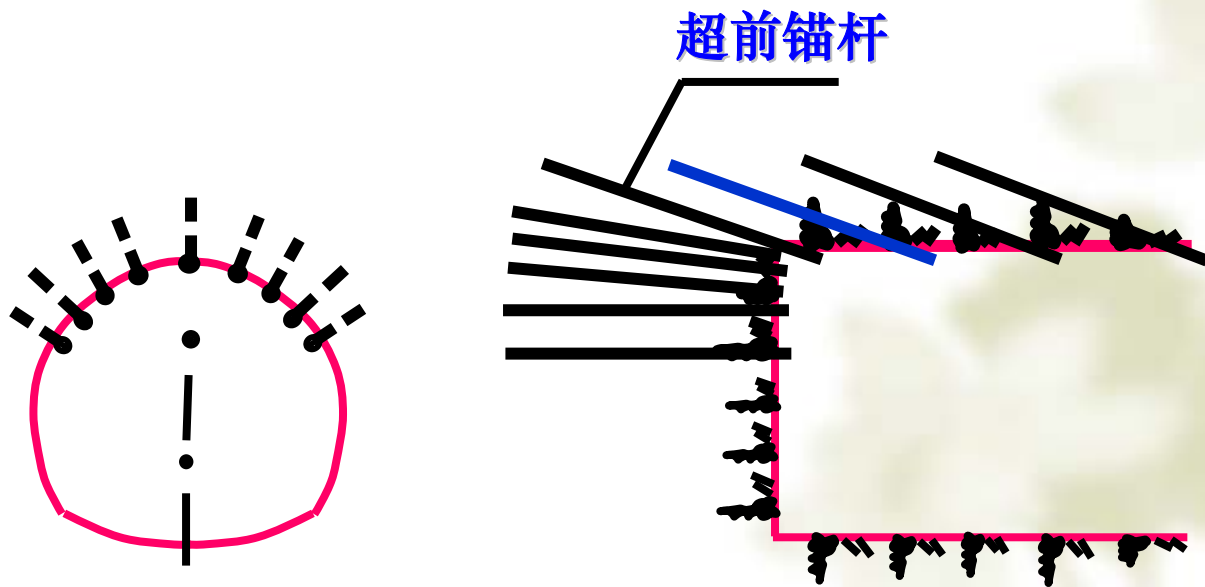
超前小导管注浆

超前深孔围幕注浆

(一) 超前锚杆

1、构造组成

超前锚杆是沿开挖轮廓线，以稍大的外插角，向开挖面前方安装锚杆，形成对前方围岩的预锚固，在提前形成的围岩锚固圈的保护下进行开挖等作业。



2、性能特点及适用条件

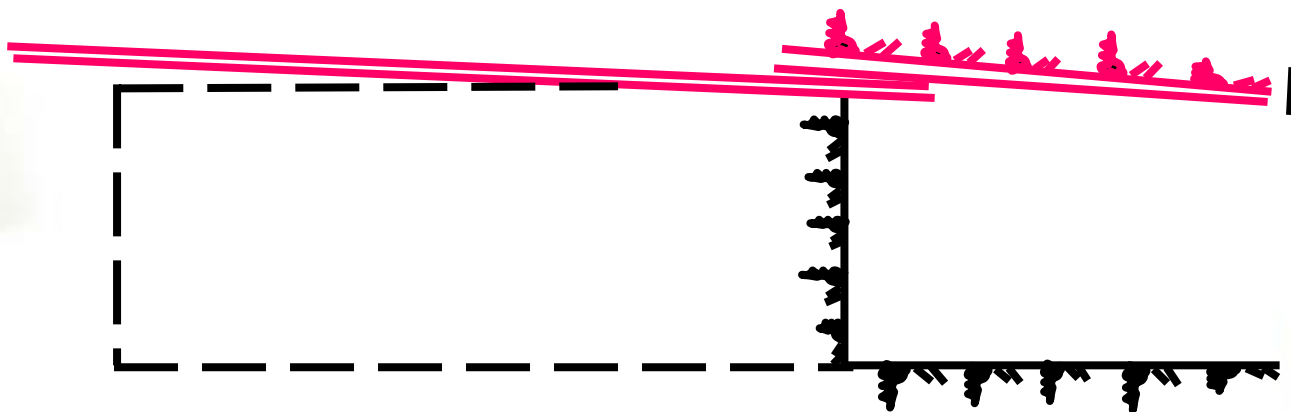
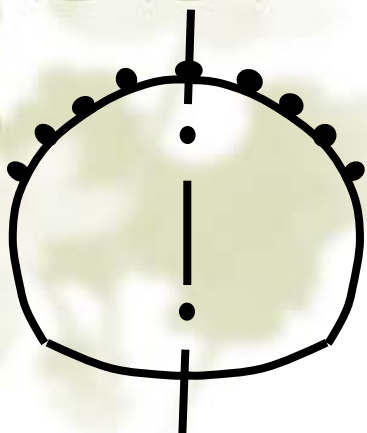
特点：柔性较大，整体刚度较小。

适用条件：应力不太大，地下水较少的软弱围岩的隧道工程中，如土砂质地层、弱膨胀性地层、流变性较小的地层、裂隙发育的岩体、断层破碎带等、浅埋无显著偏压隧道。

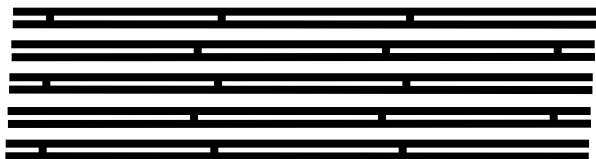
(二) 管棚

1、构造组成

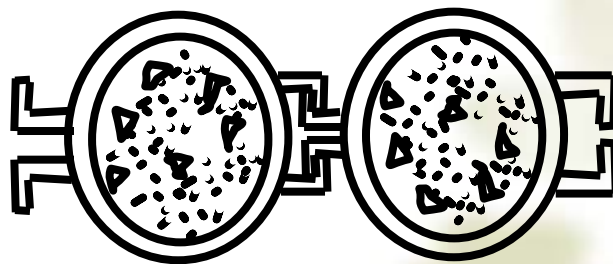
管棚是利用钢拱架沿开挖轮廓线以较小的外插角、向开挖面前方打入钢管或钢插板构成的棚架来形成对开挖面前方围岩的预支护



a) 棚管的环向布置



b) 管棚钢管纵向错接



c) 钢管端部横向联接

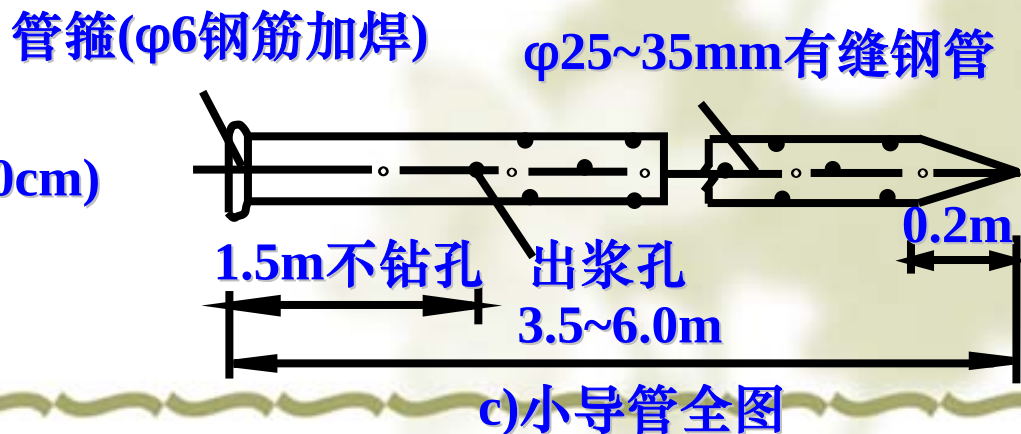
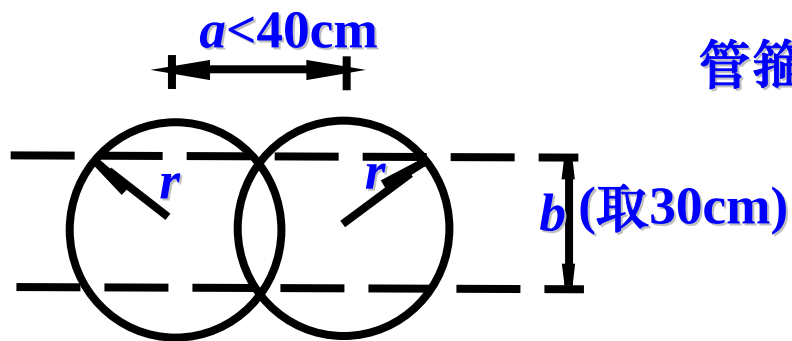
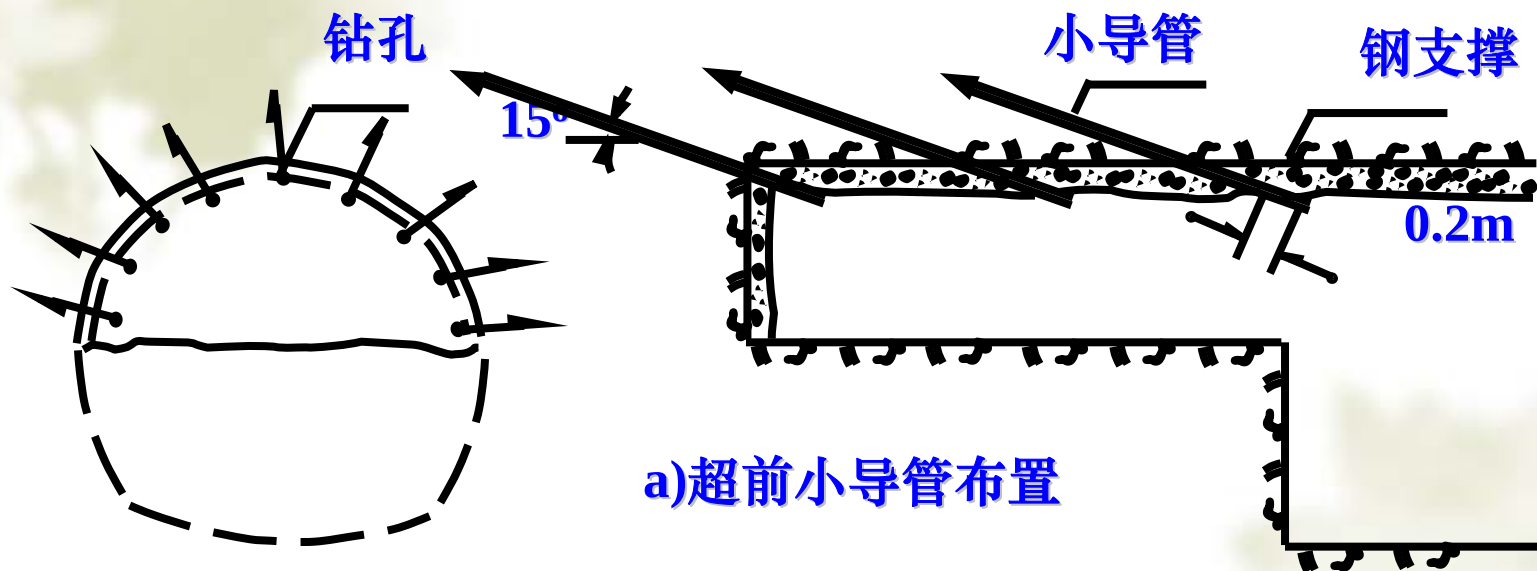
2、性能特点及适用条件

特点：整体刚度较大，对围岩变形的限制能力较强，且能提前承受早期围岩压力。

适用条件：主要适用于围岩压力来得快来得大、对围岩变形及地表下沉有较严格要求的软弱破碎围岩隧道工程中。

(三) 超前小导管注浆

1、构造组成

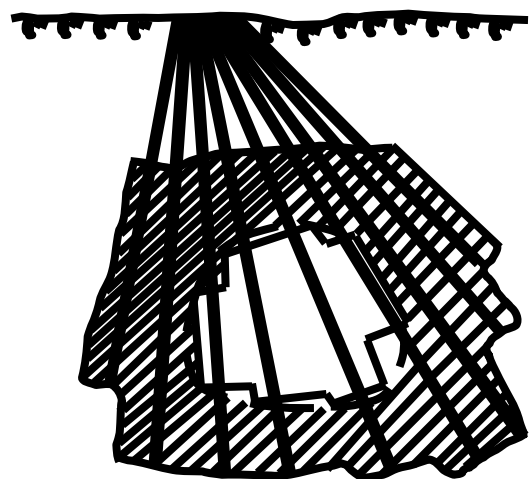
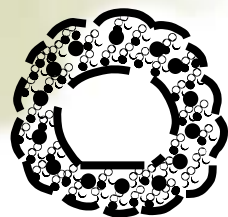


2、性能特点及适用条件

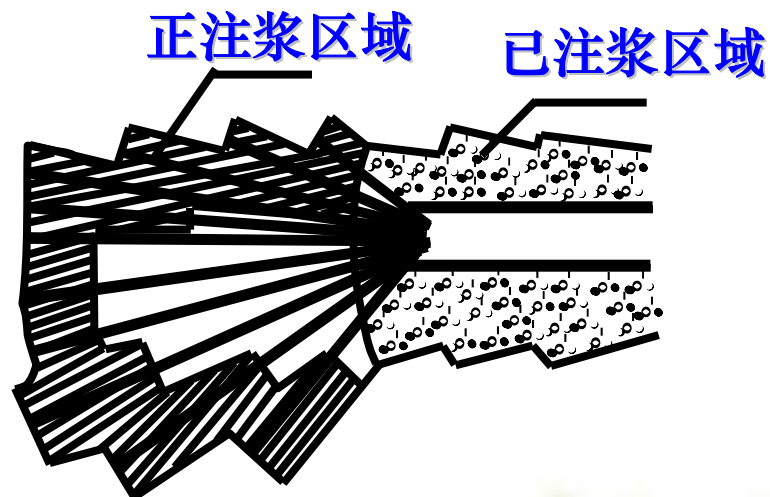
特点：浆液被压注到岩体裂隙中并硬化后，不仅将岩块或颗粒胶结为整体起到了加固作用，而且填塞了裂隙，阻隔了地下水向坑道渗流的通道，起到了堵水作用。

适用于一般软弱破碎围岩，也适用于地下水丰富的软弱破碎围岩。

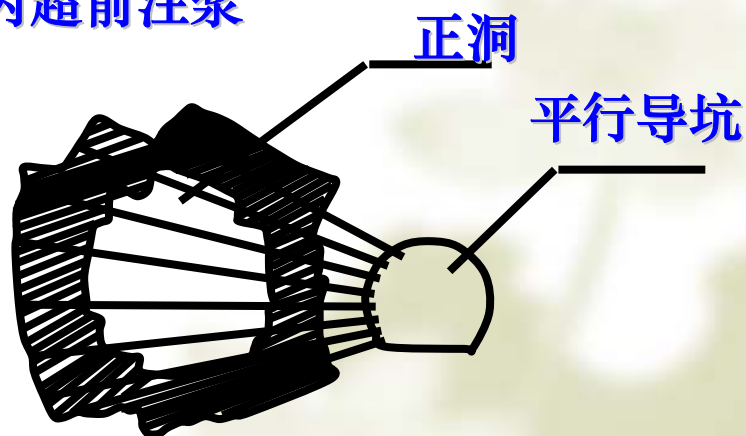
(四) 超前深孔帷幕注浆



(b) 地表超前注浆



(a) 洞内超前注浆



(c) 平导超前注浆

(五) 水平旋喷预支护

使用旋喷注浆机，沿着隧道掌子面周边的设计位置旋喷注浆形成旋喷柱体，通过固结体的相互咬合形成预支护拱棚。

一般每根旋喷体，首先通过水平钻机成孔，钻到设计位置以后，随着钻杆的退出，用水泥浆或水泥一水玻璃双浆液旋喷注入钻成的孔腔，通过高压射流切割腔壁土体，被切割下的土体与浆液搅拌混合、固结形成直径600mm左右的固结体，同时周围地层受到压缩和固结，其土体的物理力学性能得到一定程度的改善。

五、隧道洞口施工

(一) 洞口地段的一般概念

隧道施工的洞口地段，是指隧道进口(或出口)附近对隧道施工有影响的地段，该地段通常因地质地形复杂需要做特殊处理。

(二) 洞口地段施工注意事项

- 在场地清理作施工准备时，应先清理洞口上方及侧方有可能滑塌的表土、灌木及山坡危石等。
- 洞口施工宜避开雨季和融雪期。
- 洞口部分圬工基础必须置于稳固的地基上。
- 洞门拱墙应与洞内相邻的拱墙衬砌同时施工连接成整体，确保拱墙连接良好。
- 洞口段洞身施工时，应根据地质条件、地表沉陷控制以及保障施工安全等因素选择开挖方法和支护方式。
- 洞门完成后，洞门以上仰坡脚受破坏处，应及时处理。

(三) 洞口的施工方法

- 洞口段围岩为Ⅲ级以下，地层条件良好时，一般可采用全断面直接开挖进洞。
- 洞口段围岩为Ⅲ～Ⅳ级，地层条件较好时，宜采用正台阶法进洞（不短于20m区段）爆破进尺控制在1.5～2.5m。
- 洞口段围岩为Ⅳ～Ⅴ级，地层条件较差时，宜采用上半断面长台阶法进洞施工。
- 洞口段围岩为Ⅴ级以上，地层条件差时，可采用分部开挖法和其它特殊方法进洞施工。

六、装渣与运输

(一) 装渣

装渣就是把开挖下来的石渣装入运输车辆。

1、渣量计算

出渣量应为开挖后的虚渣体积，可按下式计算：

$$Z = R \cdot \Delta \cdot L \cdot S$$

式中， Z ——单循环爆破后石渣量；

R ——岩体松胀系数，见下表；

岩体 级别	VI		V		IV	III	II	I
土石 名称	砂砾	粘性 土	砂夹 卵石	硬粘 土	石质	石质	石质	石质
松胀 系数	1.15	1.25	1.30	1.35	1.6	1.7	1.8	1.85

Δ ——超挖系数，视爆破质量而定，一般可取1.15~1.25；

L ——设计循环进尺；

S ——开挖断面面积。

2、装渣方式

装渣的方式可采用**人力装渣或机械装渣**。

人力装渣：劳动强度大、速度慢，在短隧道缺乏机械或断面小无法使用机械装渣时才考虑采用。

机械装渣：速度快、可缩短作业时间，目前隧道施工中经常采用，但仍需配少数人工辅助。

3、装渣机械

隧道用的装渣机又称装岩机，要求外形尺寸小，坚固耐用，操作方便和生产效率高。

装渣机械的类型很多，按其扒渣机构型式可分为：铲斗式、蟹爪式、立爪式、挖斗式。

装渣机的走行方式有轨道走行和轮胎走行两种。

轨道走行式装渣机：须铺设走行轨道，因此其工作范围受到限制。

轮胎走行式装渣机：移动灵活，工作范围不受限制。但在有水土质围岩的隧道中，有可能出现打滑和下陷。

(二) 运输

隧道施工的洞内运输(出渣和进料)分为有轨运输和无轨运输。

1、有轨运输

优点：基本上不排除有害气体，对空气污染较轻，设备构造简单，容易制作；占用空间小而且固定等。

缺点：轨道铺设较复杂，维修工作量大；调车作业复杂；开挖面延伸轨道影响正常装渣作业等。

2、无轨运输

无轨运输主要是指汽车运输。

无轨运输不需要铺设复杂的运输轨道，具有运输速度快、管理工作简单、配套设备少等特点。

但由于内燃机排放大量废气，对洞内空气污染较为严重，尤其长期在长大隧道中使用，需要有强大的通风设施。

七、初期支护

初期支护是为了解决隧道在施工期间的稳定和安全的工程措施；二次衬砌则是为了保证隧道永久稳定和安全，作为安全储备的工程措施。初期支护加二次衬砌，构成复合式衬砌。

初期支护一般由锚杆、喷射混凝土、钢架、钢筋网等及其它们的组合组成，它是现代隧道工程中最用的支护形式和方法。

(一) 锚杆

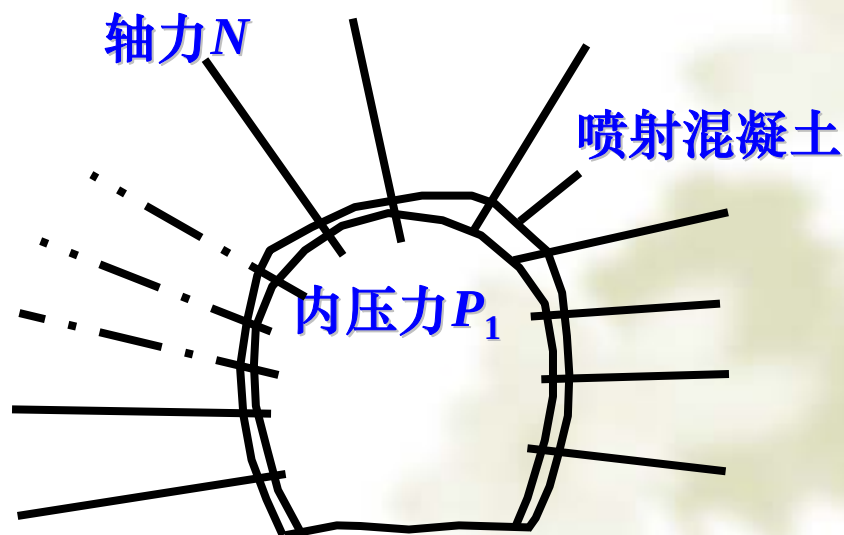
1、锚杆的支护效应

锚杆(索)是用金属或其它高抗拉性能的材料制作的一种杆状构件。

锚杆的支护效应一般认为有如下几种：

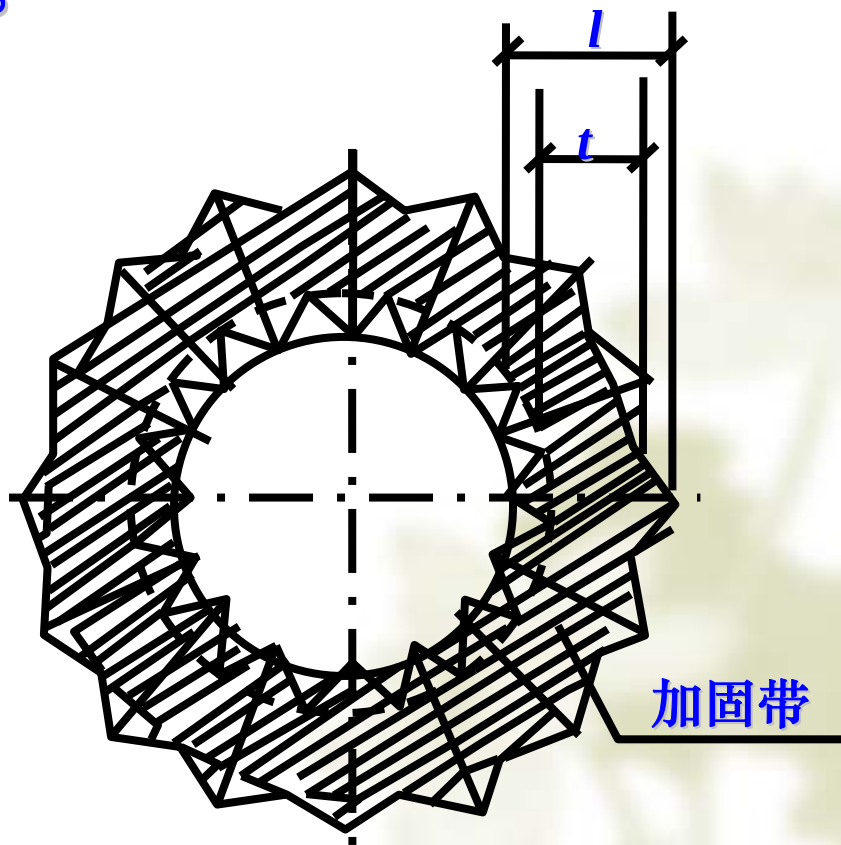
(1) 支承围岩：

锚杆能限制约束围岩变形，并向围岩施加压力，从而使处于二轴应力状态的洞室内表面附近的围岩保持三轴应力状态，因而能制止围岩强度的恶化。



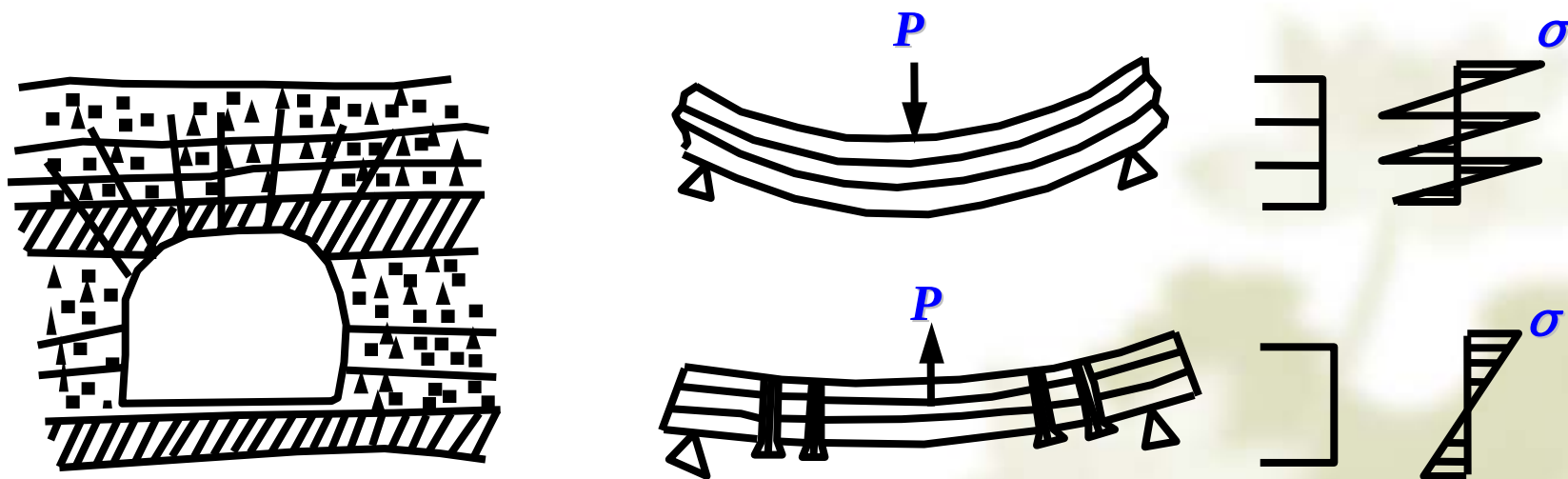
(2) 加固围岩

锚杆对加固节理发育的岩体和围岩松动区是十分有效的，有助于裂隙岩体和松动区形成整体，成为“加固带”（如图）。



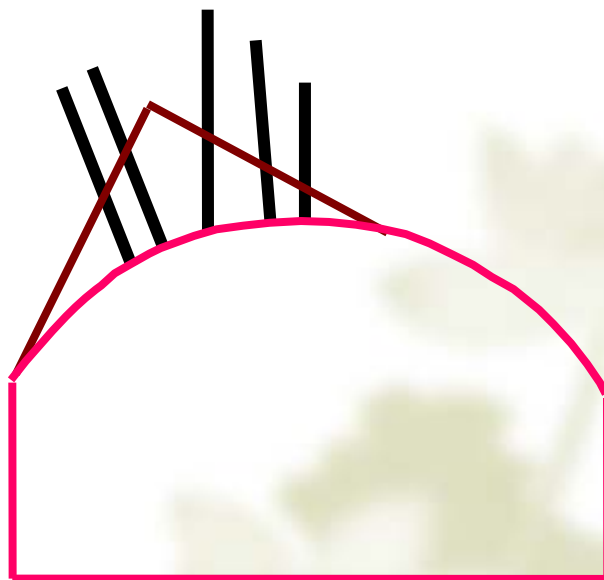
(3) 提高层间摩阻力，形成“组合梁”

对于水平或缓倾斜的层状围岩，用锚杆群能把数层岩层连在一起，增大层间摩阻力，从结构力学观点来看就是形成“组合梁”（如图）。



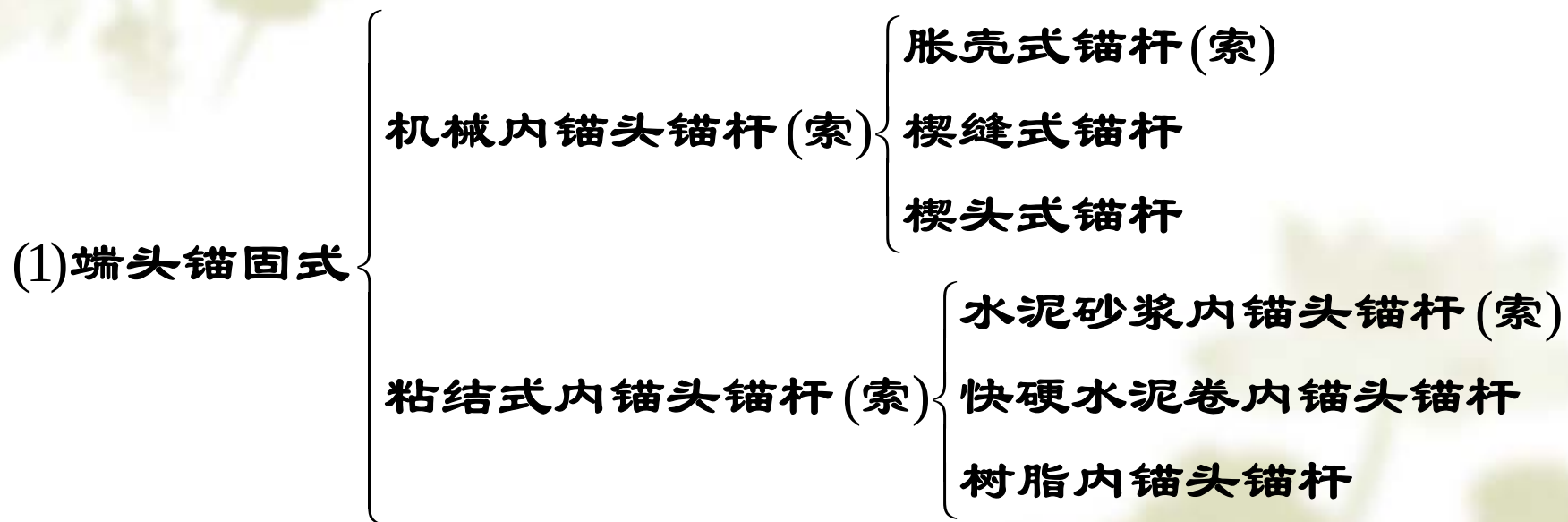
(4) “悬吊”作用：

水平“悬吊”作用是指为防止个别危岩的掉落或滑落，用锚杆将其稳定围岩联结起来，这种作用主要表现在加固局部失稳的岩体(如图)。



2、锚杆的种类

锚杆大致可分为以下几种：



(2) 全长粘结式 { 水泥浆全粘结式锚杆
水泥砂浆全粘结式锚杆 (砂浆锚杆)
树脂全粘结式锚杆

(3) 摩擦式 { 楔管式锚杆
缝管式锚杆

(4) 混合式 { 先张拉后灌浆预应力锚杆(索)
先灌浆后张拉预应力锚杆(索)

(二) 喷射混凝土

1、喷射混凝土的作用

- (1) 支撑围岩**
- (2) “卸载”作用**
- (3) 填平补强围岩**
- (4) 覆盖围岩表面**
- (5) 阻止围岩松动**
- (6) 分配外力**

2、喷射工艺种类

喷射混凝土的工艺流程有干喷、潮喷、湿喷和混合喷四种。主要区别是各工艺的投料程序不同，尤其是加水和速凝剂的时机不同。

客运专线要求采用湿喷技术

3、钢纤维喷射工艺

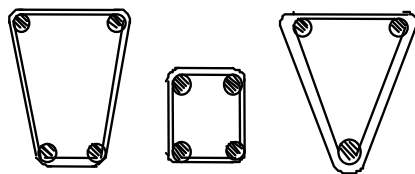
钢纤维喷射混凝土是在喷射混凝土中加入钢纤维，弥补喷射混凝土的脆性破坏缺陷，改善喷射混凝土的物理力学性能。

钢纤维的生产方法通常有钢丝切断法、薄钢板切断法、铣削法、熔抽法及轧制法。作为混凝土增强材料，钢纤维在投入搅拌机后，其形状、尺寸要能均匀地分散到混凝土中，同时喷射混凝土要容易输送、喷射。若钢纤维过长、过细，搅拌过程中钢纤维集结，并在喷射过程中宜堵塞管道。反之，若钢纤维过短、过粗，运输、搅拌过程中宜与混凝土分离下沉，不能均匀分布与混凝土中，起不到有效增强作用。通常在喷射钢纤维混凝土中，钢纤维的直径(或等效直径)为 $0.3 \sim 0.6\text{mm}$ ，长度为 $20 \sim 40\text{mm}$ ，长径比为 $40 \sim 60$ ，钢纤维的体积掺量为 $1\% \sim 2\%$ 。为增大钢纤维与混凝土的粘结力，通常改变钢纤维的表面特征，其几何形状、端面形状形式多样。

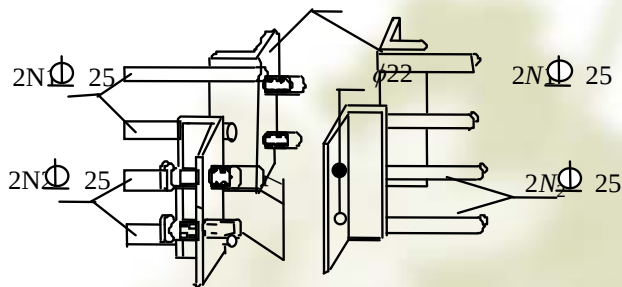
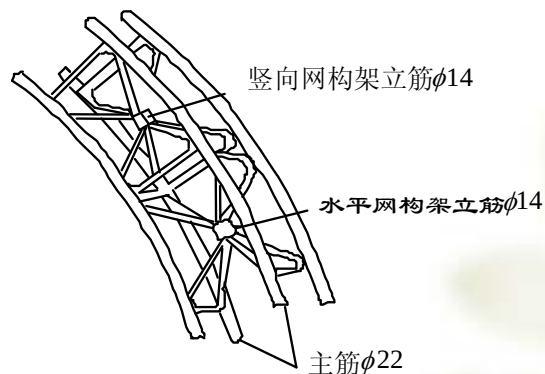
钢纤维喷射混凝土的配合比一般为水泥:砂:石
=1:1.6:1.6, 水泥标号不低于525号, 砂子采
用中砂, 石子采用筛洗卵石, 最大粒径10mm,
钢纤维掺量一般为喷射混凝土重量的
1.0%~2.0%; 钢纤维的长度一般不超过30mm,
 $l/d=45\sim80$ 之间规格尺寸为直径 $\times$ 长度=
0.3mm $\times$ 20mm或0.4mm $\times$ 20mm或0.4mm $\times$ 25mm。

(三) 钢拱架

钢拱架可以采用型钢、工字钢、钢管或钢筋制成。现场采用以钢筋制作的格栅钢架较多。



格栅钢架的断面



接头示意图

八、二次衬砌

常用的衬砌形式有以下三种：即整体式衬砌、复合式衬砌及锚喷衬砌。

复合式衬砌是由初期支护和二次衬砌组成的。初期支护是帮助围岩达成施工期间的初步稳定，二次衬砌则是提供安全储备或承受后期围岩压力。

对提供安全储备的二次衬砌，应在围岩或围岩加初期支护稳定后施作；对于要求承载的二次衬砌，则应及时施作。

二次衬砌的施工方法和模板类型的选择，应充分考虑到与围岩条件，开挖方法、支护方法、混凝土施工能力等相适应。

(一) 二次衬砌施工方法

二次衬砌多采用顺作法，即由下到上，先墙后拱顺序连续灌注。在隧道纵向，则需分段进行，分段长度一般为9~12m。

(二) 模板类型

常用的模板有：整体移动式模板台车、穿越式（分体移动）模板台车、拼装式拱架模板。

(三) 衬砌施工准备工作

在灌注衬砌混凝土之前，要进行隧道中线和水平测量，检查开挖断面，放线定位，混凝土制备和运输等准备工作。

1. 断面检查

根据隧道中线和水平测量，检查开挖断面是否符合设计要求，欠挖部分按规范要求进行修凿。并作好断面检查记录。

墙脚地基应挖至设计标高，并在灌注前清除虚渣，排除积水，找平支承面。

2. 放线定位

根据隧道中线和标高及断面设计尺寸，测量确定衬砌立模位置，并放线定位。

3. 拱架模板整备

4. 立模

根据放线位置，架设安装拱架模板或模板台车就位。安装和就位后，应作好各项检查，包括：位置、尺寸、方向、标高、坡度、稳定性等。

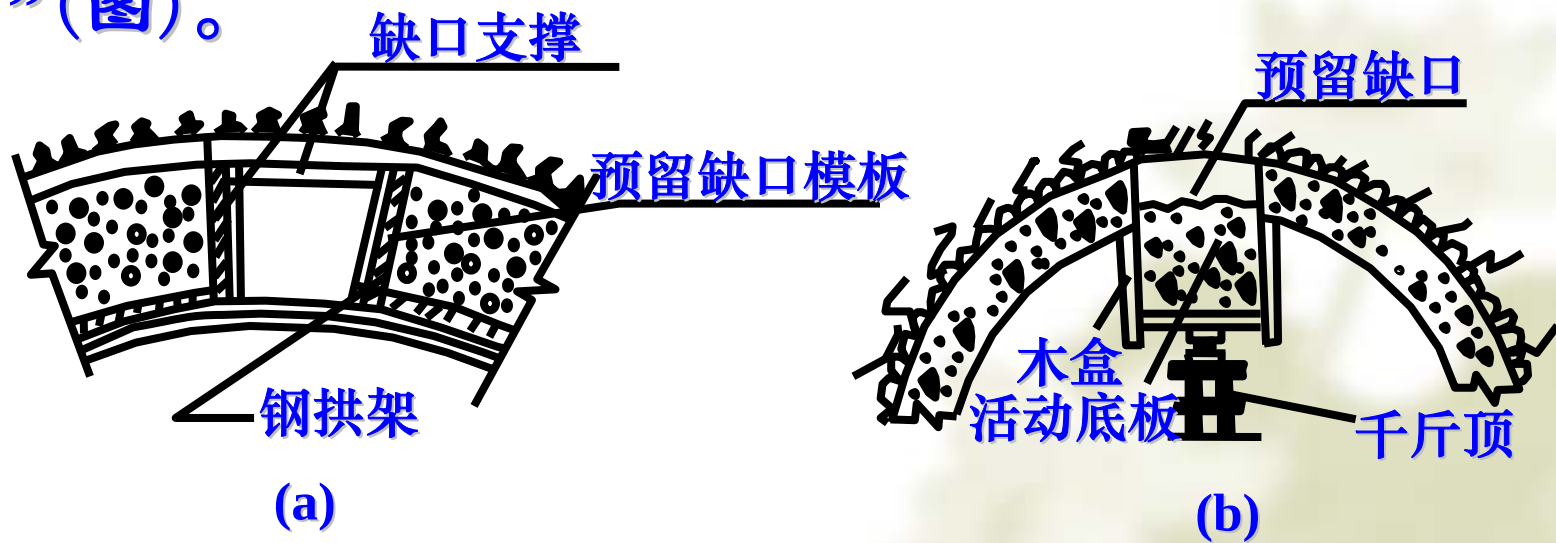
5. 混凝土制备与运输

运输工具的选择应注意装卸方便，运输快速，保证拌好的混凝土在运输过程中不发生漏浆、离析泌水，坍落度损失和初凝等现象。

(四) 混凝土的灌注、养护与拆模

- 1. 保证捣固密实，尤其应处理好施工缝。**
- 2. 整体模筑时，应注意对称灌注，两侧同时或交替进行。**
- 3. 若因故不能连续灌注，则应按规定进行接茬处理。**
- 4. 边墙基底以上1m范围内的超挖，宜用同级混凝土同时灌注。其余部分的超、欠挖应按设计要求及有关规定处理。**
- 5. 衬砌的分段施工缝应与设计沉降缝、伸缩缝及设备洞位置统一考虑，合理确定位置。**

6. 封口方法。当衬砌混凝土灌注到拱部时，需改为沿隧道纵向进行灌注，边灌注边铺封口模板，并进行人工捣固，最后堵头，这种封口称为“活封口”。当两段衬砌相接时，纵向活封口受到限制，此时只能在拱顶中央留出一个 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 的缺口，待后进行“死封口”(图)。



7. 多数情况下隧道施工过程中，洞内的湿度能够满足混凝土的养护条件。但在干燥无水的地下条件下，则应注意进行洒水养护。

8. 二次衬砌的拆模时间，应根据混凝土强度增长情况来确定。

(五) 压浆、仰拱和底板

1. 压浆

目的：限制围岩后期变形，改善衬砌受力工作状态。

压浆浆液材料多采用单液水泥浆。

2. 仰拱和底板

仰拱和底板可以纵向分条、横向分段灌注。纵向通常可分为左右两部分，交替进行；横向分段长度应视边墙施工缝、伸缩缝、沉降缝及运输要求来确定。

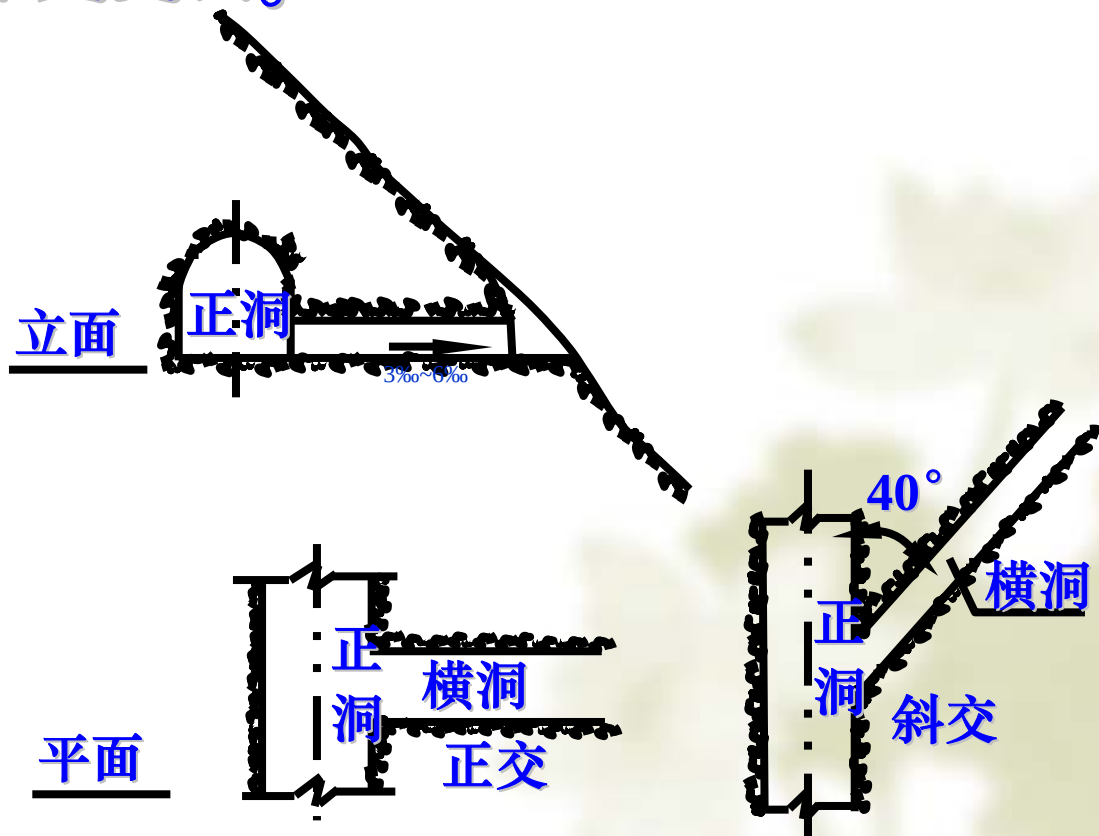
九、辅助坑道

当隧道较长时，可选择设置适当的辅助坑道，如横洞、斜井、竖井、平行导坑等，用以增加施工工作面，加快施工速度，改善施工条件（通风、排水）。

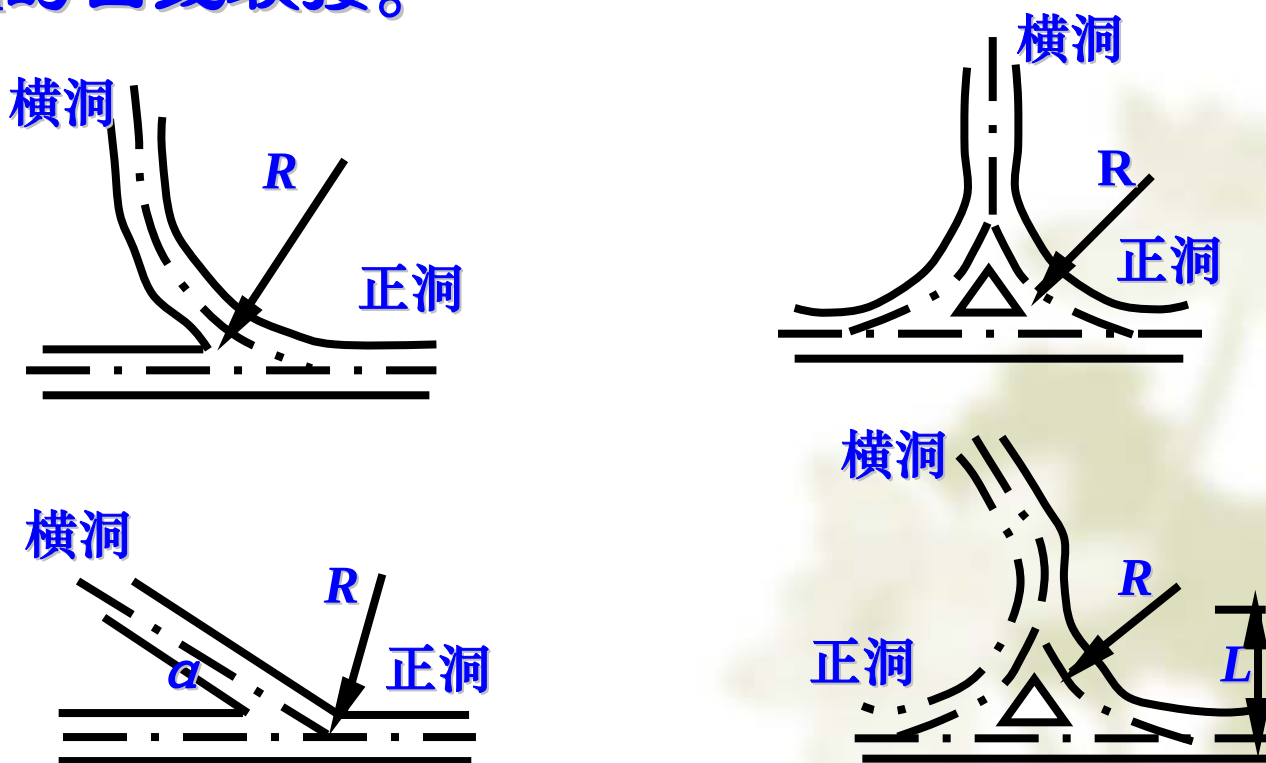
在选择辅助坑道时应根据是否利用作为永久通风通道、工期要求、施工组织、地形条件、地质及水文地质情况、弃渣场地、具备的施工机具、经济性等各个方面综合考虑、其断面尺寸由地质及施工需要、机具情况而定。

(一) 横洞

横洞是在隧道侧面修筑的与之相交的坑道。当隧道傍山沿河、侧向覆盖层较薄时，就可以考虑设置横洞。横洞布置见图。

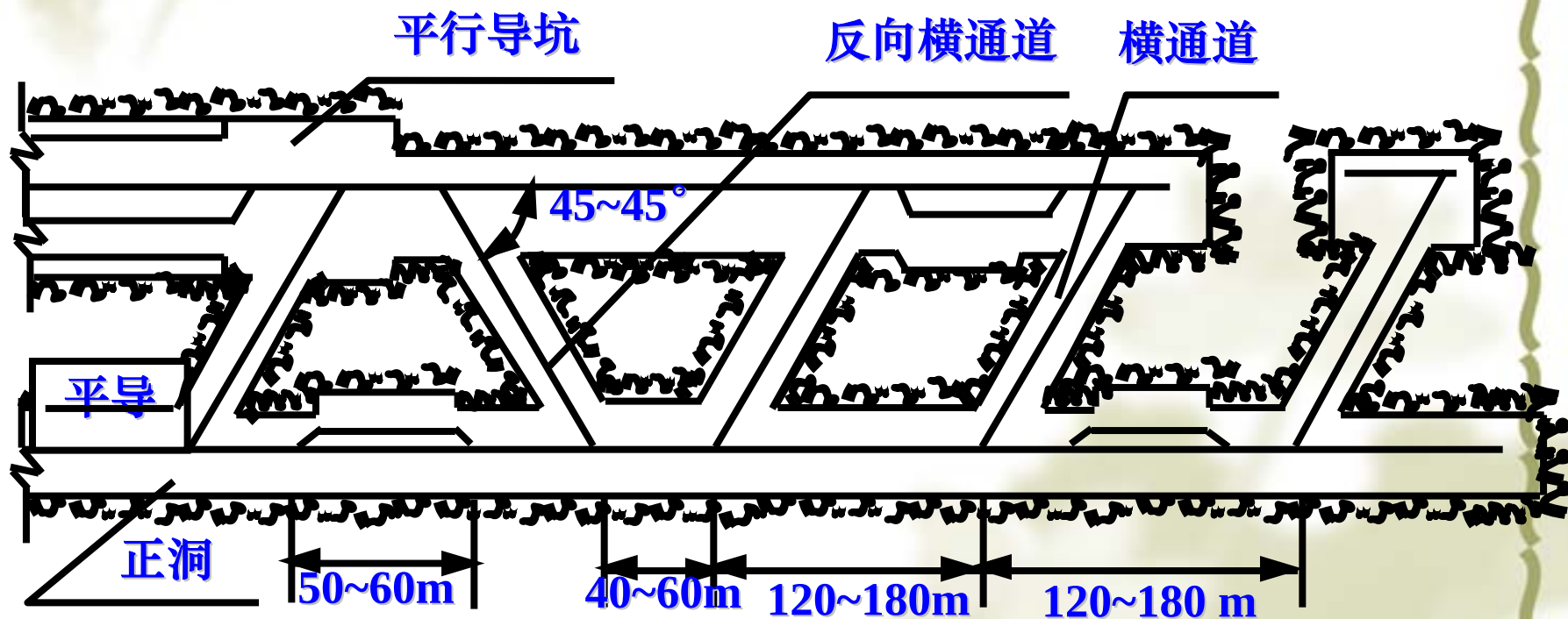


选择横洞与隧道的交角一般不小于 60° ，地形限制时不宜小于 40° ，交角太小则锐角段围岩较易坍塌，斜交时最好朝向主攻方向。横洞与隧道的联接形式有双联式或单连式(见图)，相交处用半径不小于12m的曲线联接。



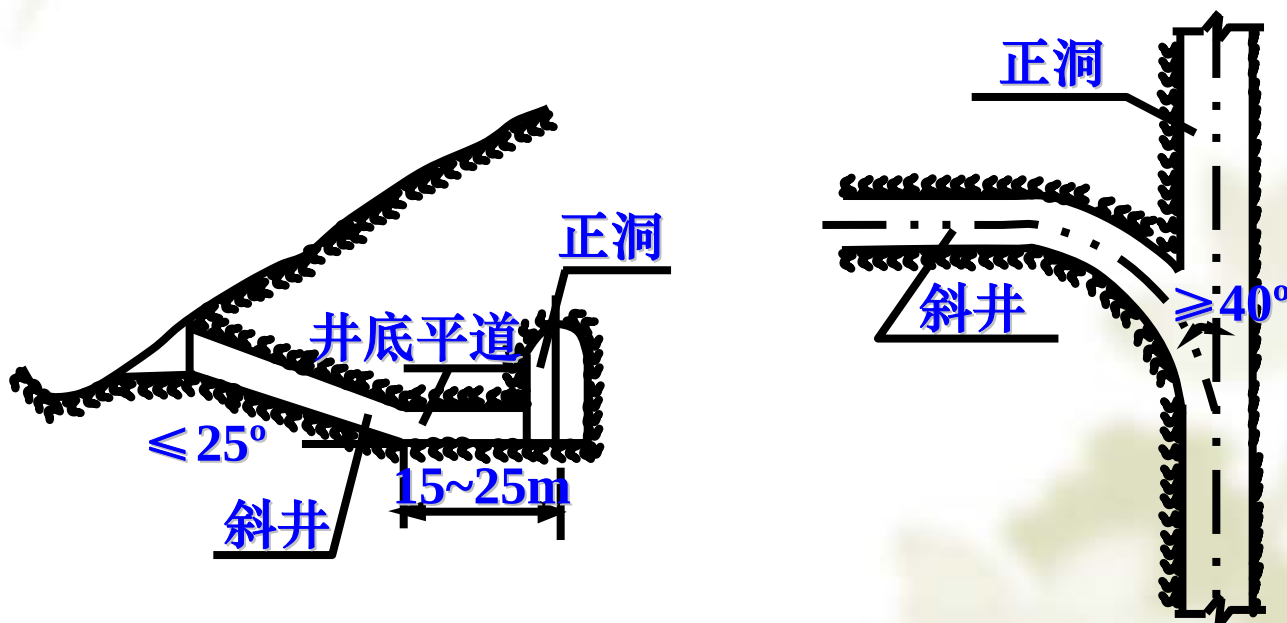
(二) 平行导坑

是与隧道平行修筑的坑道，平面布置如图所示。



(三) 斜井

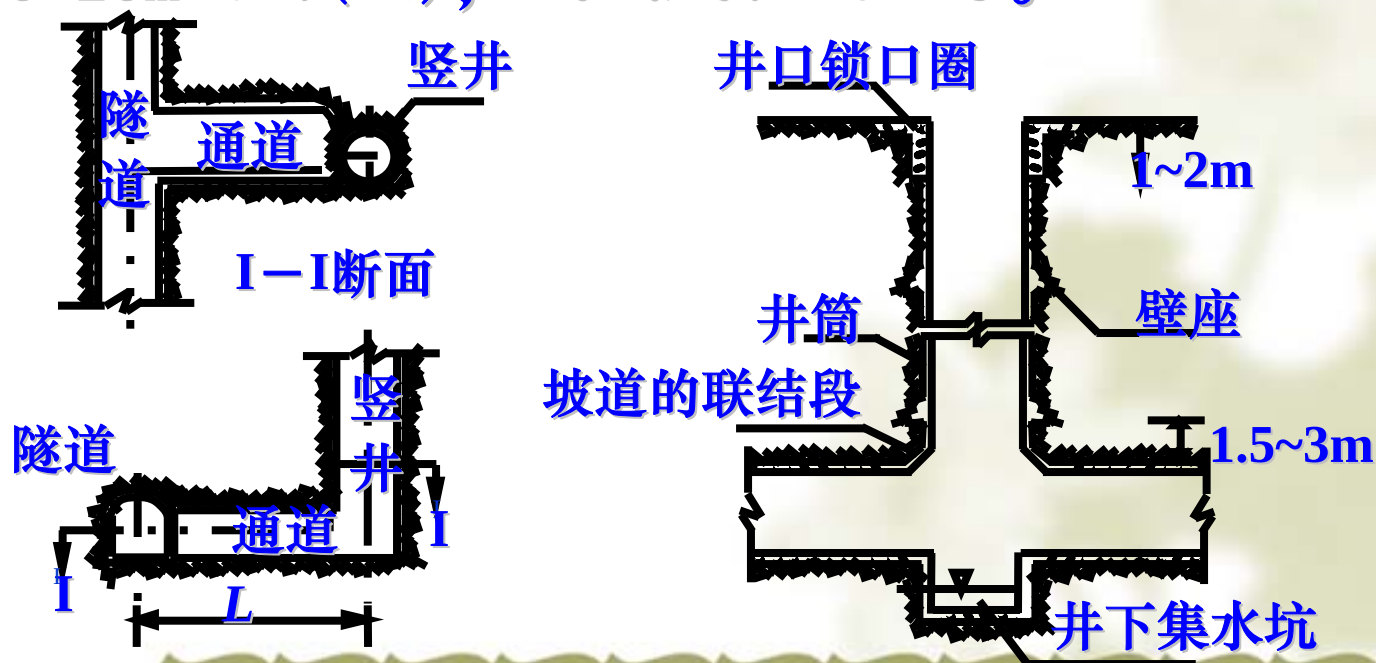
当隧道洞身一侧有较开阔的山谷且覆盖不太厚时，可考虑设置斜井。



(四) 竖井

覆盖层较薄的长隧道、或在中间适当位置覆盖层不厚、具备提升设备、施工中又需增加工作面，则可用竖井增加工作面的方案。

竖井的位置可设在隧道一侧，与隧道的距离一般情况下为15~25m之间(图)，或设置在正上方。



第三节 施工机械配套

设备投入是加快长隧道施工的关键

钻爆作业线，装碴运输作业线喷锚支护作业线、防水板、混凝土衬砌作业线是四条正洞和平导的必须配套设备，注浆作业线、通风作业线、排水作业线为三条辅助作业线，七条作业线的设备投入费用应占隧道施工总费用的20%左右。否则，隧道施工是实现不了安全、优质和快速。

主要施工设备



支护架设机



仰拱栈桥



自动喷浆机



钻孔台车

衬砌台车



暗洞



明洞



管棚钻机



工作平台车