

# 高压富水深埋充填型岩溶隧道施工工法

(TGJGF-03·04-40)

中铁隧道集团有限公司

## 一、前言

中铁隧道集团承建的新建渝(重庆)怀(怀化)铁路圆梁山隧道,全长 11070m,隧道穿越地区其主要地质构造为毛坝向斜和桐麻岭背斜,其中毛坝向斜段长 2200m,为高水位富水岩溶发育地段,施工时先后遇到三处大型深埋充填性溶洞,溶洞埋深 500m 以上,位于深部滞流带,规模为 30~70m,水压力 4.5MPa,涌水量一般情况下  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最大达  $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,充填物为淤泥质黏土、粉细砂、块石等,由于高水压岩溶水的作用,曾发生过大规模爆喷,给工程施工带来很大危害,岩溶地质及隧道方面的权威专家认为:“目前在这类高压岩溶水充填溶洞地区开挖深埋隧道等地下工程,是一个国内外罕见,具挑战性的技术难题,因而必须进行特殊的设计、施工和管理。”针对圆梁山隧道的复杂地质情况,我们在该隧道的建设中引入了动态设计的管理模式:施工中结合动态设计,积极探索特殊不良地质地区隧道施工的新方法,根据施工过程中反馈的信息,不断优化施工方案,实施施工的动态管理,采用集物探、钻探、洞探、地质素描等各种手段为一体的超前地质预测预报技术;根据不同的地质情况,必要时采用超前预注浆技术、超前支护技术作为开挖施工的辅助措施;为保证隧道结构安全,根据各段结构承受的不同荷载,设计采用了多种抗水压衬砌的特殊断面形式,施工中经过不断优化,形成了特殊衬砌结构的施工方法,进而形成了在高水位富水深埋岩溶隧道中从地质预报、软弱围岩加固、开挖支护到二次衬砌施工的成套施工方法,成功地突破了毛坝向斜高压富水深埋充填性溶洞地段,保证了圆梁山隧道的顺利建成。经总结形成本工法。

## 二、工法特点

1. 针对岩溶发育的无规律性,在高压、富水、深埋充填型岩溶隧道工程中采用了集物探、超前钻孔、洞探、地质素描等手段的综合地质预测预报技术,并将其作为隧道施工的首道作业工序。
2. 开挖施工按照边探边挖的方法进行,接近溶洞边界时,根据地质情况采用不同的开挖方法,溶洞核心段采用改进的 CRD 工法加快了溶洞段的施工速度,保证了施工安全。
3. 合理选择注浆材料,采用粗细搭配,先粗后细的注浆方法,对设计隧道开挖轮廓线一定范围的溶洞充填物实施以挤密加固、充填堵水为目的的超前预注浆,达到了稳定开挖掌子面和将水封堵于设计开挖轮廓线以外的目的。
4. 施工期间设泄水洞泄水降压,二次衬砌后及时封闭泄水洞,降低了溶洞的处理难度,有效地改善了深埋充填型溶洞段隧道施工的作业环境,加快了施工进度。
5. 采用超前预注浆+长、短管棚+初期支护+抗高压型钢钢筋混凝土二次衬砌所组成的联合超强支护体系与工程结构,确保了安全,解决了高压、富水技术难题。

## 三、适用范围

本工法适用于高水压(水压 1~4.5MPa)富水(涌水量  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  以上)岩溶隧道及铁路、公路、市政、水工、电力等各种地下工程施工。

## 四、工艺原理

### (一)原理

以超前地质预测预报为基础,对施工组织进行动态管理,施工期间泄水降压,以超前预注浆、长短管棚支护为开挖掘进的辅助措施,施做抗水压衬砌后,封闭临时泄水洞完成整个溶洞段施工。

## (二)关键技术

集物探、钻孔、洞探、地质素描等手段为一体,对获得的地质信息进行综合分析的综合地质预报技术;在高水压富水充填粉细砂溶洞中实施帷幕注浆堵水技术;高压富水充填型溶洞开挖施工支护技术;抗水压型钢衬砌施工技术。

## 五、施工工艺及操作要点

### (一)总体工艺流程(见图1)

1. 进入岩溶发育段后,开挖前应首先进行综合超前地质预报。

2. 根据综合超前地质初步预报结果,确定下一步施工方案:

(1)对于普通高压富水段,按照常规软弱困难地层的方法组织施工,遇管道型岩溶,可临时对水进行引排,继续进行开挖支护,二次衬砌施工完毕再处理涌水。

(2)对于高压富水充填型岩溶核心段,进一步探明溶洞水量、水压、充填介质性质以及岩溶发育范围;根据溶洞发育的有关信息,结合工期、技术、经济的可行性确定采取包括设置迂回导坑、临时泄水洞等辅助施工措施,进行开挖支护和二次衬砌施工。

### (二)地质预报

综合超前地质预报工艺流程见图2。

#### 1. 研究区域地质资料

研究区域地质资料,必要时到地表补充测绘,以达到对整个地区地质情况有一个比较全面和深刻的认识,掌握可溶岩分布情况、构造发育情况、地表水系发育情况、当地最低侵蚀基准面标高、岩溶大概发育几层、每层大概位置、哪一层对工程影响最大等。

#### 2. 确定地质预报方案

根据对区域地质资料的分析结果,制定超前地质预报方案,由于岩溶发育的复杂性,一般要采用综合超前地质预报方法。比较成功的预报组合形式为:做好地质素描、以 TSP202 或 TSP203 作长距离的宏观控制性预报,以红外探测作短距离有无地下水的定性预报,以深孔、浅孔超前钻探作验证性预报,通过综合分析作出预报结果。

#### 3. 超前地质预测预报

对开挖面前方未开挖段地质情况采用各种探测手段进行探测,对所取得的地质信息进行综合分析判断,为设计施工提供尽量详细的地质资料,作为对原设计支护参数进行调整和制定符合实际地质情况的施工方案的依据。

(1)物探法 利用 TSP202 或 TSP203 地质预报系统做长距离探测,一般每 100~200m 预报一次;地质雷达作为补充,探测前方 30m 范围内地质情况;采用红外探水仪探测前方 30m 范围内地下水情况,每个开挖循环进行一次。三种物探手段可以相互对比印证,以期获得较为准确的地质情况。

(2)水平地质钻探 在开挖面布置 3~4 个超前水平钻孔,孔径 90mm,一孔孔深 100m,其余孔深 30m,每开挖 22~25m 为一钻探循环,地质异常地段,应采用取芯钻探。根据钻探资料,分析判断地质情况。利用钻孔实测水压及涌水量。

(3)地质素描 对已开挖段的岩层、岩性、节理等进行地质素描,绘制地质素描图,根据岩层节理发育规律,推测前方地质信息。一般在开挖后及时进行,地层岩性变化点、构造发育部位、地下水发育带附近应每开挖循环进行一次素描,其他地段也应每 10~20m 进行一次素描。

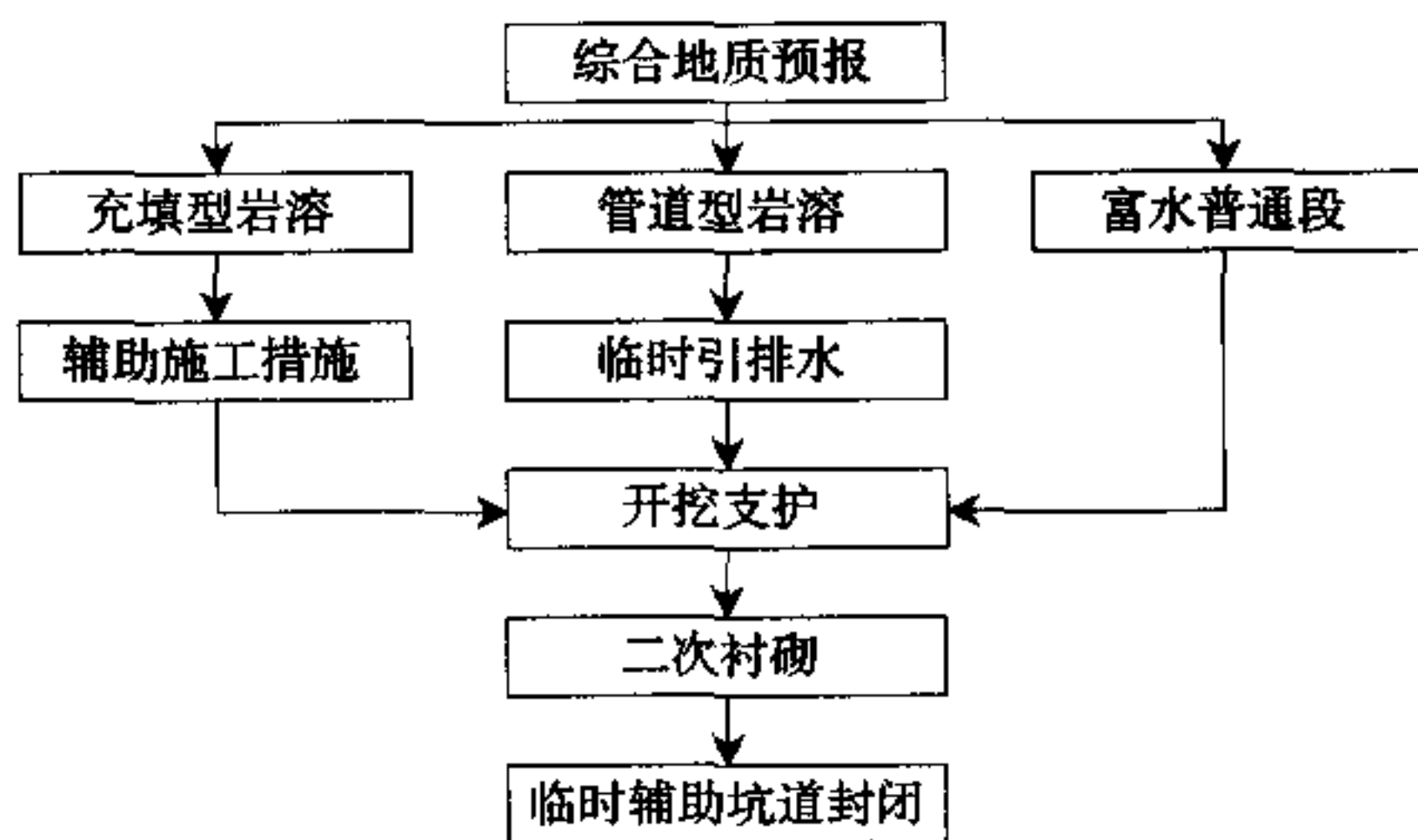


图1 总体工艺流程

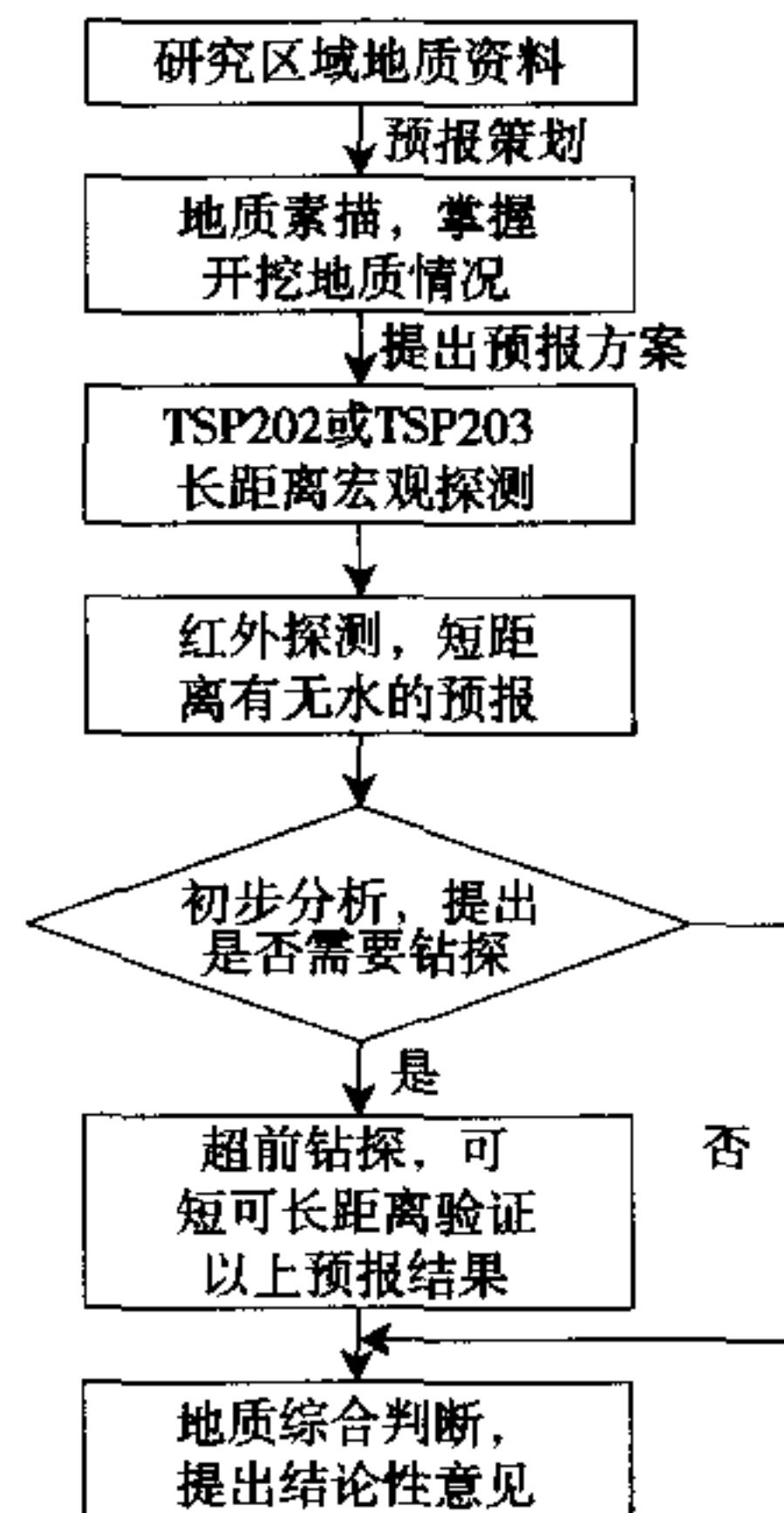


图2 超前地质预报工艺流程



(4)地质综合分析 地质综合判断是地质预报的中枢,对采用各种手段得出的预报结果进行综合归纳、分析、对比,提出预报结论,作为调整设计和指导施工的依据。

### (三)辅助施工措施

为保证施工的顺利进行,根据地质预报结果,在进行深埋充填型岩溶隧道施工时,需要适当采取一些辅助施工措施,具体措施为:

#### 1. 迂回导坑

当开挖过程中遇到的高压富水充填型溶洞规模较大(沿线路纵向发育范围 20m 以上),一个注浆作业面无法保证注浆进度和注浆质量,或地质预报表明前方存在多个溶洞时,从工程进度的角度考虑,必要时可设置迂回导坑。迂回导坑的断面、坡度、转弯半径及支护参数等应满足使用功能的需要,一般可参照平行导坑相关参数设置。

迂回导坑绕过溶洞后,可从反方向接近溶洞,对溶洞处理实施两面夹击,以降低溶洞处理的难度;对某一区段存在多个溶洞的情况,仍可利用迂回导坑分别从正反向接近溶洞,实施溶洞处理,达到对几个溶洞进行分割同步处理的目的。

#### 2. 泄水减压

当水压大于设计初期支护所能承受的最大压力且水量较大时,应考虑设临时泄水洞在施工期间泄水减压,泄水洞断面尺寸可根据开挖施工的需要及拟排水量的大小确定,泄水洞的设计位置既要考虑有最好的排水效果,又要保证不对主体结构产生不利影响。

#### 3. 注浆

(1)总体注浆工艺流程(参见图 3)

(2)一般根据地层岩性及设计注浆分段长度等选择钻机型号类型;根据设计注浆压力和流量要求选择注浆泵。

(3)注浆材料应根据注浆目的、地层岩性,并综合考虑环保等因素进行选择。

对于深埋充填型溶洞区,根据溶洞地质特征和注浆加固方案要求,从堵水性、耐久性、环保和工艺可操作性综合考虑进行注浆材料选择。注浆材料一般可按表 1 选择。

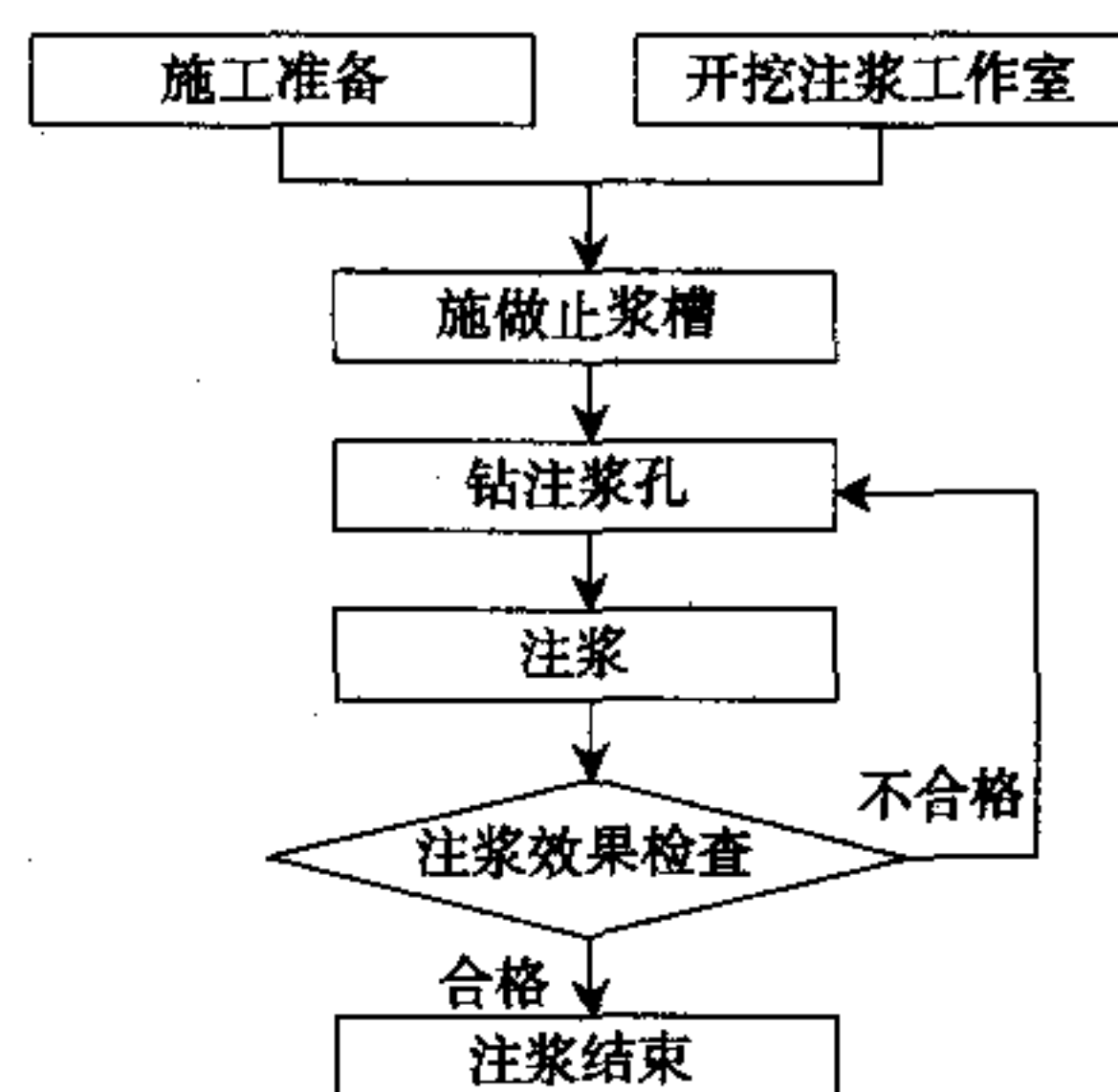


图 3 注浆工艺流程

表 1 注浆材料选择

注浆施工方案		注浆材料
超前预注浆	非溶洞体富水地段	普通水泥—水玻璃双液浆
	淤泥质溶洞体	普通水泥—水玻璃双液浆
	粉细砂层溶洞体	普通水泥、超细水泥—水玻璃双液浆
	爆喷型溶洞体	TGRM 浆或 HSC 浆或超细水泥—水玻璃双液浆
底部加固注浆		超细水泥单液浆或 TGRM 浆或 HSC 浆
径向加固注浆	一般地段	普通水泥单液浆
	特殊地段	超细水泥单液浆

注浆材料选定后,在注浆开始前,应按注浆设计备全、备足注浆材料。

#### (4)注浆施工设计

注浆设计根据以上选定的钻孔设备、注浆设备、注浆材料和注浆加固范围确定,主要有以下内容:

a. 止浆墙 止浆墙的位置应该尽可能接近溶洞边沿,止浆墙应根据超前预注浆施工过程中的注浆压力和埋设孔口管的要求设计。

b. 浆液扩散半径 根据注浆材料和拟加固地层工程地质及水文地质特点经现场试验进行初选。对于粉细沙层,浆液扩散半径选取  $R=2\text{m}$ 。注浆施工过程中,可根据注浆施工中地层的吸浆能力,注浆效果的检查评定等状况,对浆液扩散半径进一步调整。

c. 终孔间距 根据注浆加固交圈理论及现场注浆试验,确定终孔间距。

d. 注浆段长度 注浆段长度一般应综合考虑选择的钻机的最佳工作能力和溶洞的发育宽度确定。注浆段长度一般以不大于 30m 为宜。

#### (5) 开挖注浆工作室

注浆工作室大小根据选用钻机型号和注浆钻孔的断面布置确定,一般注浆工作室长 10 ~ 12m,横断面较设计开挖轮廓向外扩挖 80 ~ 100cm。

#### (6) 止浆墙施工

在注浆工作室开挖后进行。

#### (7) 钻孔注浆

a. 全断面超前预注浆 全断面超前预注浆采取前进式分段注浆施工工艺,即在施工中,实施钻一段、注一段,再钻一段、再注一段的钻、注交替方式进行钻孔注浆施工。每次钻孔注浆分段长 3 ~ 5m。前进式分段注浆可采用水囊式止浆塞或孔口管法兰盘进行止浆。

b. 局部注浆 对充填型溶洞,局部注浆是为处理超前预注浆盲区而采取的技术措施。

c. 径向注浆 径向注浆在开挖后进行。对于充填型溶洞地段,除进行超前预注浆外,同时还应在开挖后实施径向注浆补强和封堵散水。径向注浆加固范围为设计开挖轮廓线外 3 ~ 5m。径向注浆采用注浆花管进行全孔一次性注浆。注浆管采用壁厚 3mm 的  $\phi 42$  焊接钢管加工制作。

#### (8) 注浆效果检查评定

注浆效果检查评定是决策开挖施工方案的依据。注浆效果检查评定主要有分析法、钻检查孔法和开挖后取样测试三种方法。

### 4. 管棚支护

在充填型溶洞段隧道开挖前应进行超前支护,包括超前大管棚、小导管等措施,以保证开挖衬砌施工安全进行。

#### (1) 大管棚施工

在施做超前预注浆止浆墙时,按照设计位置预埋管棚导向管;注浆结束后,通过导向管在开挖断面周边施作环向密排管棚,钻孔用 MKD - 5 钻机,钻到深度后安设棚管。棚管一般采用  $\phi 108/\phi 75$ ,壁厚 6 ~ 8mm 的无缝钢管加工,每节长度 2m 或 3m,外设  $\phi 5 \sim \phi 10$  单向阀溢浆孔。棚管布设间距 20 ~ 40cm,管棚长 20m(现场根据钻孔状况以钻入硬岩 1 ~ 2m 为度)。管棚布设完成后,对管棚进行全孔一次性注浆,形成超前刚性支护体系,使它和超前注浆帷幕体系共同作用,提高超前帷幕效果。

#### (2) 超前小导管施工

开挖过程中,根据开挖掌子面的情况,在进行下一循环开挖前对注浆不足部位或注浆盲区进行小导管补充注浆。所用注浆管长 6m,采用每节长 2m 的  $\phi 42$  焊接钢管丝扣连接。注浆管前端加工成圆锥状并封死。

### (四) 开挖

充填型溶洞地段应采用边探边挖的施工方法。遇到管道型岩溶时,可暂时将岩溶水集中引排,继续向前掘进,衬砌施工完毕后用顶水注浆的方法将岩溶管道封闭;遇到充填性溶洞时,开挖接近溶洞边沿后,及时进行包括施做混凝土止浆墙、超前预注浆及超前管棚支护等溶洞开挖前的准备工作。之后可根据工程地质和水文地质情况的好坏及时调整开挖方法,可供选择的开挖方法一般有全断面法、正台阶法、侧壁导坑法、CD 工法、CRD 工法等,铁路单线隧道开挖方法的选择一般为:

全断面法适用于围岩完整或有少量裂隙水或小型管道岩溶的地段;

正台阶法适用于接近溶洞边沿,破碎岩石或基岩骨架基本完整的基岩加泥沙互层地段;

CRD 工法适宜于隧道开挖断面全部处于溶腔,溶腔充填物为粉土、沙、碎石开挖跨度较大地段。

对于全部开挖断面均处于充填型溶洞溶腔的单线铁路隧道,为便于机械作业和底部仰拱衬砌施工,可按如下优化后的 CRD 工法施工。

#### 1. 开挖顺序

对 CRD 工法进行优化,合并 CRD 工法的⑨、⑪步为底部仰拱开挖,将整个断面分成 5 步按①、③、⑤、⑦和底部仰拱顺序开挖,步与步掌子面最小距离不宜小于 5m,①、③、⑤、⑦步开挖完成后进行底部仰拱开挖。



## 2. 初期支护

每步开挖时,都要突出三快原则,即:快开挖、快支护、快封闭,尽快使已开挖部分的初期支护封闭成环,由初期支护形成的杆件结构应始终是稳定结构,高压富水充填型溶洞段开挖时,初期支护宜适当加强,一般可采用喷厚 30cm C20 级钢纤维混凝土+钢筋网+I18 工字钢+径向锚杆。在底部开挖前,架设型钢斜撑进行⑤⑦步中隔壁托换,斜撑间距一般与设计初期支护间距相同,斜撑材质型号由计算确定,斜撑与①③步底板及边墙初期支护的连接,采用电焊连接。中隔壁托换完毕,随着开挖前进逐步拆除⑤⑦步底板临时支护,⑤⑦步底板临时支护的拆除超前仰拱开挖掌子面的距离尽可能短,以不大于 1m 为宜。仰拱底部开挖后,应及时将初期支护封闭成环,⑤⑦步底板临时支护的拆除超前封闭初期支护的距离不大于 3m。仰拱开挖及初期支护完成之后即可进行二次衬砌。

## 3. 变形监测

应加强开挖过程中对初期支护变形的收敛监测,发生变形及收敛过大,则及时架设横撑或竖撑。变形及收敛监测频率正常情况下为每 8h 一次,特殊情况适当增加监测频次。初期支护仰拱部分厚度为设计初期支护厚度加 1/2 预留变形量。

## 4. 开挖工序施工步骤(详见图 4)

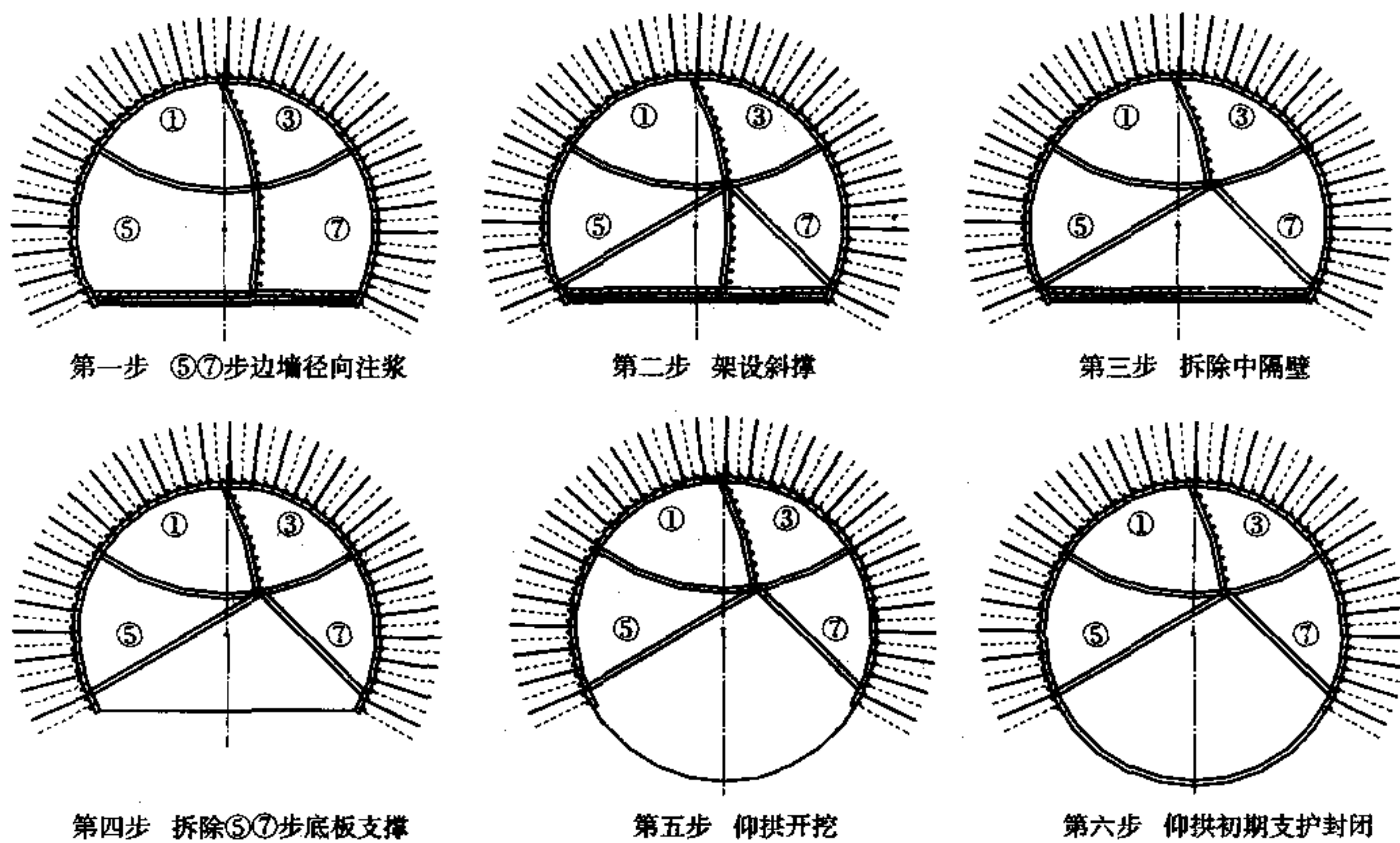


图 4 开挖工序施工步骤

## (五) 衬砌施工

衬砌施工一般在围岩变形稳定后进行,施做的顺序为先溶洞核心段,后一般段。为减少施工缝,在条件许可的情况下,应尽可能采用全圆穿行式衬砌台车一次浇注混凝土。深埋充填型溶洞段衬砌结构形式分为:过渡(隔离)段衬砌,设于充填型溶洞两端,衬砌结构体系由围岩注浆固结圈、初期支护和抗水压衬砌结构三部分组成,衬砌厚度大于一般地段;充填型溶洞段衬砌,根据将要承受的水压和围岩压力设计,衬砌结构体系由围岩注浆固结圈、初期支护、导水垫层和高抗水压衬砌结构四部分组成,其中初期支护采用厚 25cm 喷 C20 级钢纤维混凝土、钢筋网、全环径向中空注浆锚杆、H200×150 型钢钢架及  $\phi 108$  管棚超前支护组成,导水垫层采用复合防水板,高抗水压衬砌采用圆形型钢钢筋混凝土衬砌,型钢、钢筋骨架由外到内依次为:钢筋—外环型钢—钢筋—钢筋—型钢—钢筋,型钢纵向采用钢筋连接。过渡段衬砌为普通钢筋混凝土衬砌,施工按常规方法进行。型钢钢筋混凝土的施工方法如下:

### 1. 施工步骤

仰拱开挖完成后按以下步骤进行衬砌施工:施作防水板及纵环向盲管→施作型钢及钢筋→安装Ⅲ型施工缝止水带→浇注衬砌混凝土。

### 2. 钢轨及钢筋的预加工

### (1) P50 钢轨的弯制

P50 钢轨在工厂弯制,采用弯拱机进行加工,连接成环进行净空检查,内外圈钢轨的轮廓误差不大于 5mm,两钢轨接头缝隙不大于 3mm,螺栓孔孔位误差不大于 1mm,孔直径误差不大于  $\pm 0.5\text{mm}$ 。钢轨的纵联钢筋可在工地进行加工,纵联钢筋加工的长度、丝扣长度误差不大于  $\pm 5\text{mm}$ 。

### (2) 钢筋的预制

环向钢筋用钢筋弯曲机在工厂按设计半径弯制成弧,接头在洞内采取电弧帮焊。

### 3. 防水板及纵环向盲管施工

环向每间隔 5m 施作一环盲管,两侧边墙沿纵向全段设置盲管,纵环向盲管每隔 2~4m 用射钉悬挂固定。复合防水板全环设置,采用无钉铺设的施工方法,设置悬挂点,考虑 1.15 的松弛系数。

### 4. 钢筋型钢安装

#### (1) 钢筋及型钢安装步骤

铺设防水板→施作定位锚杆及定位钢筋→安装外环钢筋→安装外圈型钢、纵联钢筋、内外环钢轨横联→安装第二、三层钢筋→安装内圈型钢和纵联钢筋→安装内环钢筋。

#### (2) 钢筋及型钢施工方法

**安装定位筋** 为保证型钢、钢筋在衬砌断面上处于正确位置,在型钢钢筋安装前,先施作横向固定钢筋及纵向定位钢筋,定位钢筋应有足够的强度和刚度,直径以不小于 25mm 为宜,然后用全站仪在每根横向固定钢筋上放出纵向定位钢筋的位置。

**安装型钢钢筋** 根据预定位置,从外到里依次安装完成型钢钢筋。为能够承受型钢钢筋的重量,应在底部纵向定位钢筋中间适当增加支撑点。

### 5. III 型施工缝止水带的安装

III 型施工缝止水带施工安装见图 5。安装堵头模板前,用泡沫塑料将止水带定位并固定,以保证止水带的安装质量。

### 6. 混凝土浇注

#### (1) 原材料选用

粗细骨料强度、水泥标号应满足设计混凝土登记配制的要求,粗骨料最好采用机制碎石,最大粒径不应超过 31.5mm,且级配良好;细骨料采用中粗河沙,粒径小于 0.16mm 的石粉不应超过 2%,大于 5mm 粒径的砂砾不应超过 15%,可适当添加高效减水剂和粉煤灰,但掺后粒径小于 0.16mm 的石粉不应超过 1%。

#### (2) 浇注混凝土

泵送混凝土自下而上入仓,从已灌筑段接头处向未灌筑方向,分层对称浇灌,以防止偏压使模板变形。由于混凝土在密集的钢筋及型钢结构中的流动性较差,浇注混凝土过程中可通过堵头增设输料口。为保证混凝土灌注密实,可在振捣效果不佳部位预埋 TSS 管,以便衬砌后压浆回填。

### (六) 临时泄水洞和临时辅助坑道封堵

#### 1. 临时泄水洞封堵

临时泄水洞封堵在正洞衬砌施工完毕后进行,泄水洞封闭前,先在泄水洞内适当位置(圆梁山隧道为距泄水洞口 8m)施做混凝土止水墙,从出水点处预埋水压计和排水钢管,排水钢管安装高压闸阀。混凝土止水墙达到设计强度后,关闭高压闸阀,确认通过正洞溶洞段衬砌中的预衬砌工作正常,再开启闸阀泄水减压,然后进行顶水注浆并灌注混凝土将泄水洞止水墙以外部分封闭。

#### 2. 临时坑道封堵

临时坑道失去利用价值后随着衬砌进行封堵,临时坑道两端各 8m 范围用 C20 级混凝土回填,其余部分可用浆砌片石或 C10 级混凝土回填。

### (七) 监控量测

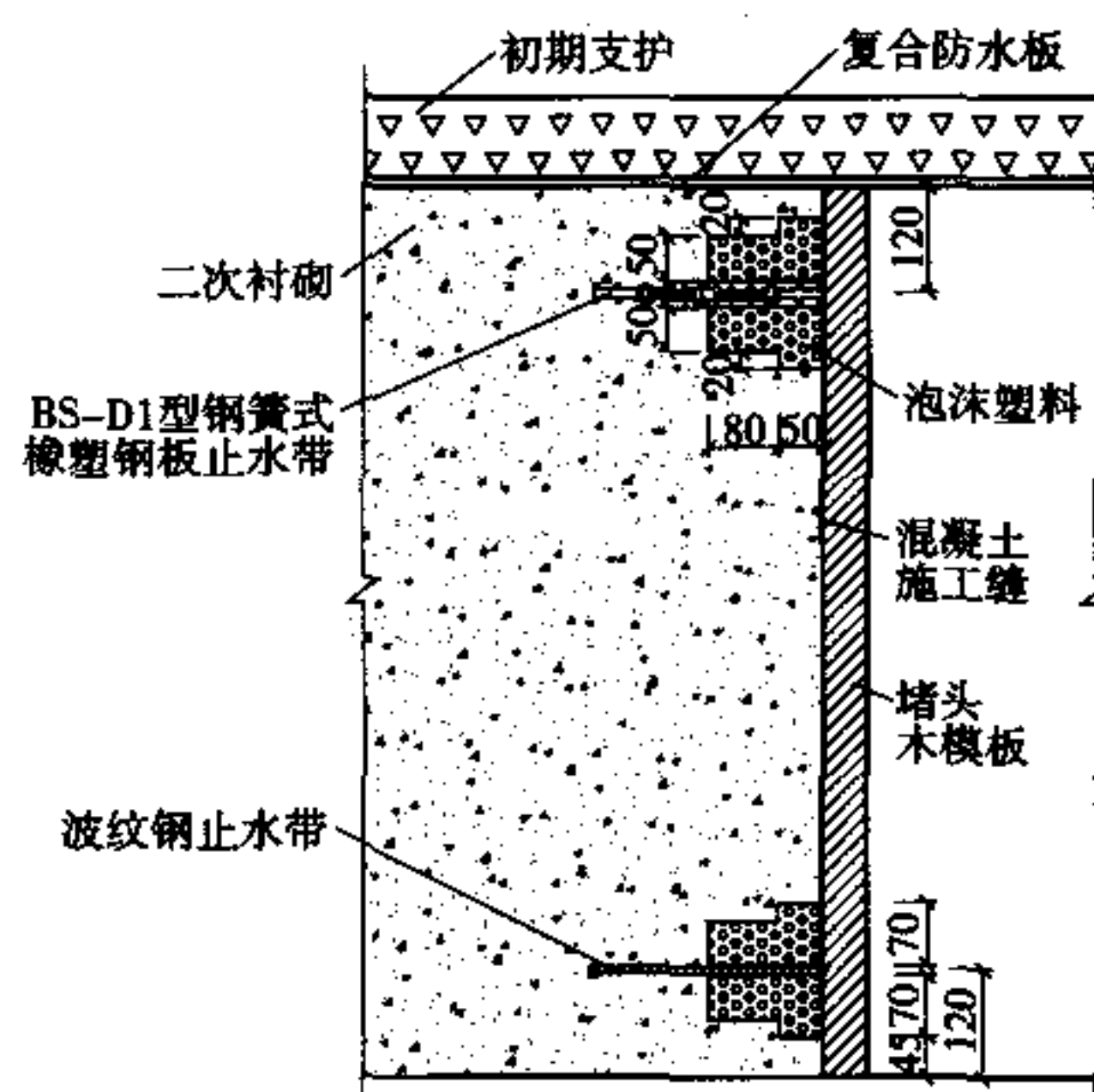


图 5 III 型止水带施工缝(单位:mm)



### 1. 监测的目的

对于高压富水深埋充填型岩溶隧道施工,监控量测应进行施工期间监测和长期监测;施工期间监测为掌握围岩、支护结构的动态信息和地表泉点水位、大气降雨信息,为施工决策提供基本依据;长期监测主要掌握隧道运营期间的动态信息和隧道修建对地表环境的影响程度。

### 2. 监测的主要项目

对于高压富水深埋充填型岩溶隧道施工,施工期间主要监测以下项目:初期支护拱顶位移及拱墙部位收敛监测;二次衬砌、钢筋应力、应变监测;衬砌承受的围岩压力、水压力监测;影响隧道施工范围的大气降雨规律;洞顶附近泉点水位变化、洞内涌水量变化。

运营期间主要监测以下项目:二次衬砌、钢筋应力、应变监测;衬砌承受的围岩压力、水压力监测;洞顶附近泉点水位变化。

## 六、主要材料

本工法所采用的主要注浆材料为普通水泥、超细水泥、TGRM 浆、HSC 浆、水玻璃;管棚材料为  $\phi 80 \sim \phi 108$  钢管及  $\phi 42$  钢管;钢支撑材料为 I18 型钢及 H 型钢;型钢衬砌材料为 P50 钢轨。

## 七、机具设备

开挖断面  $80 \sim 100\text{m}^2$  时一个工作面所需的机具设备见表 2。

表 2 机具设备

序号	名称	型号	单位	数量	备 注
—	地质预报设备				
1	地质预报系统	TSP202 或 203	套	1	探测长度 100 ~ 200m
2	红外线探测仪	HY - 303	台	1	探水 20 ~ 30m
3	地质雷达	CR - 20B	台	1	探测长度 20 ~ 30m
4	地质钻机	MK - 5	台	4	水平钻孔,与注浆钻机通用
二	注浆设备				
1	地质钻机	MK - 5	台	6	钻注浆孔,与地质钻机通用
2	注浆泵	ZJB - 30A	台	4	帷幕注浆
3	注浆泵	YZB - 130/14	台	2	帷幕注浆
4	注浆泵	KBY - 50/70	台	2	径向注浆
5	浆液搅拌机	300L	台	3	
6	移动空压机	VIP700	台	2	
三	开挖衬砌设备				
1	钻爆设备	钻孔台车或风钻	套	1	
2	混凝土拌合站	$60\text{m}^3/\text{h}$	座	1	
3	混凝土输送泵	$60\text{m}^3/\text{h}$	台	1	
4	模板台车	椭圆或圆形	台	1	

## 八、劳动组织(见表 3)

## 九、质量标准及技术要求

### (一)超前地质预报

超前地质预报尚属于半科研半生产项目,目前,还难于提出科学的技术标准,要在施工中不断总结经验,提高预报精度。采用的各种地质手段应达到的质量标准为:

1. TSP202 或 TSP203 能宏观控制掌子面前方 100 ~ 200m 范围软弱围岩的发育范围和里程;
2. 红外探测能定性判断掌子面前方有无地下水的存在;
3. 超前地质钻孔应揭示掌子面前方的地质情况;
4. 用地质理论和作图法通过平行导坑预报正洞地质情况;

5. 通过对以上探测结果的综合分析,能够比较准确地预先探知掌子面前方不良地质体的存在,如岩溶管道、大型充填性溶洞及其发育部位、岩溶水水量、水压等,基本查清在隧道轴线方向及周边的发育情况。

表3 劳动组织

序号	工种	人数		职 责
		一班	三班	
一	地质预报	15	27	
1	技术人员	9	9	地质素描、物探、岩芯判定、综合分析
2	工人	6	18	地质钻孔
二	注浆	9	27	
1	技术人员	1	3	全面负责钻孔注浆技术工作
2	工班长	1	3	协助技术人员工作,负责劳力安排
3	司钻	1	3	按钻机台数配备,负责钻孔,并纪录钻孔情况
4	司泵	1	3	注浆,并纪录注浆情况
5	工人	5	15	安装孔口管,换钻杆,安拆注浆管,制浆等工作
三	管棚施工	10	30	按长管棚施工工法配备
四	开挖支护	16	48	按相应开挖工法配备
五	型钢衬砌	46	138	
1	技术人员	1	3	负责型钢衬砌技术工作
2	工班长	1	3	负责劳力安排
3	钢筋工	12	36	加工型钢及钢筋
4	钢筋工	15	45	拼装型钢、绑扎钢筋
5	木工	3	9	安装止水带、堵头板
6	机修工	4	12	模板台车及输送泵就位
7	工人	6	18	混凝土拌制、灌注
8	转运工	4	12	混凝土运输
	合 计	106	270	

## (二) 注浆堵水

1. 充填性溶洞地段全环封堵,不排水;
2. 其它高水位富水地段,从泄水孔中流出的水量不大于  $5\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{d}$ ;
3. 不得使用有毒有害及对混凝土结构有腐蚀性的注浆材料;
4. 注浆结束,从检查孔中取芯检验,浆液胶结良好,孔中无涌水、涌砂现象;
5. 检查孔注水试验,注浆后地层渗透系数  $\leq 10^{-4}\text{cm/s}$ 。

## (三) 长管棚

间距误差不大于  $\pm 50\text{mm}$ ;管棚终端侵入开挖轮廓线内的数量不超过总根数的 10%;管棚内注水泥浆或砂浆。

## (四) 开挖支护

1. 断面尺寸满足设计要求,平均线性超挖不大于  $10\text{cm}$ ;
2. 钢支撑间距满足设计要求,误差不大于  $\pm 100\text{mm}$ ;喷混凝土强度、厚度满足设计要求,平均厚度不小于设计厚度,最小厚度不小于设计厚度的  $1/2$ ;
3. 开挖支护后的累计变形量不大于  $50\text{mm}$ ,变形速率不超过  $10\text{mm/d}$ 。

## (五) 型钢混凝土衬砌

型钢加工误差不大于  $\pm 10\text{mm}$ ;型钢拼装误差不大于  $\pm 30\text{mm}$ ;钢筋绑扎误差及接头要求满足相应规范要求;混凝土强度符合设计及规范要求。

## 十、安全措施

1. 超前地质钻孔时,孔口应牢固安装孔口管和闸阀,遇涌水时,可关闭闸阀,避免涌水伤人。
2. 钻孔时,钻机前方安设挡板,防止泥沙冲出伤人。
3. 注浆管应连接安设牢固,应经常检查管路,确保注浆管完好畅通,防止管接头脱落,浆液冲出伤人。
4. 开挖施工前,应制定应急预案,备足、备全治理涌水、涌沙和约束初期支护变形、下沉的物资。
5. 开挖支护后,及时埋设监测点,经常对支护进行监测,发现变形异常,立即采取支护加强措施。
6. 坚持对初期支护进行变形监测,发现异常及时处理。
7. 对洞内涌水量经常进行监测,观察水量变化是否异常。对地表降雨量实施监测,以便合理安排洞



内施工工序。

8. 充填性溶洞应安排在旱季开挖通过,减少地表降雨给洞内施工安全带来的危害。

9. 破碎带及充填溶洞地段开挖支护施工时,必须体现“快挖,快支,快封闭”的“三快”原则,使支护结构及时封闭成环。

10. 拼装型钢拱架时,应连接牢固,防止倾斜倒落伤人。

### 十一、效益分析

1. 综合超前地质预测预报技术,超细水泥基注浆材料,对高压富水实施衬砌全封闭,长、短管棚相结合的超前支护,保证了隧道的快速施工、施工安全,保护了周围环境。

2. 本工法用于圆梁山隧道施工压缩了工期6个月,节约现场经费300万元,洞内设备、用电等固定费用800万元,计1100万元;和化学注浆材料相比,本工法采用的注浆材料仅2<sup>#</sup>溶洞即可节约工程成本7501万元。

### 十二、工程实例

中铁隧道集团承建的渝怀铁路圆梁山隧道全长11070m,穿越区域主要地质构造为毛坝向斜和桐麻岭背斜及其伴生或次生断裂构造。其中,毛坝向斜核部DK353+200~DK355+410段为高水位富水区,并有多处大型溶洞存在,水压达4.5MPa,水量旱季为 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,雨季为 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最大达 $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;溶洞为充填型溶洞,规模为沿线路方向宽30~70m,充填物为粉细砂,黏土,块石等,埋深达500m以上。该类型溶洞具有隐蔽性、突发性等特点,给施工带来极大困难。

1. DK353+200~DK354+255段,地质预报与实际开挖后对比基本一致,该段石质较完整,岩溶不发育,采用全断面开挖,径向注浆,抗1.0MPa水压衬砌。在DK353+690处有一溶管,采用局部补充注浆封堵,该处前后30m采用抗2.0MPa衬砌。衬砌后泄水孔出水量小于设计要求标准 $5 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{d}$ 。

2. DK354+255~DK354+920段,位于全隧中间部位、毛坝向斜核部,节理发育,岩溶溶蚀现象严重,发育三个大型充填性溶洞,高压富水,揭露时曾发生大规模突泥、涌水、涌沙,造成地质灾害,施工一度严重受阻,三个溶洞发育范围分别为DK353+255~DK354+280,DK354+450~DK354+500,DK354+860~DK354+920,溶洞之间还发育一些大小不等的溶管。该段从2002年2月1日遇到第一个溶洞,到2004年4月12日最后一个溶洞上部贯通,共耗时26个月时间,月平均进尺仅为26.6m,特别是DK354+450~DK354+500段溶洞,充填物为粉细砂,水压达4.5MPa,水量为 $500 \sim 9000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,被专家称为在此类高压富水充填溶洞区修建地下工程,是“国内外罕见,极具挑战性的技术难题”。施工中通过采用施工组织动态管理、超前地质预报、迂回导坑贯通、泄水减压、帷幕注浆堵水等措施,成功地突破了该高压富水深埋充填性溶洞段。

3. DK354+920~DK355+410段,大地电磁探测显示,该段存在三处较大的地质异常区,通过采用超前地质预报,边探边挖的施工方式,加快了施工进度,增援了溶洞段的施工,实际开挖表明,除存在石油天然气外,并无溶洞存在。

4. 圆梁山隧道的胜利建成,为岩溶地区高压富水隧道的施工探索了一条新路,表明通过采取动态设计、动态施工管理、超前地质预报、泄水减压、迂回导坑、注浆堵水、管棚超前支护以及施做抗水压衬砌结构等技术措施是可以克服高水位富水岩溶隧道施工这个难点的,圆梁山隧道施工还首创了在山岭隧道全面注浆堵水,有效地保持了地表生态环境的实例,避免了隧道建成地表干枯局面的发生,取得了巨大的社会效益和经济效益。

执笔:陆少伟 罗 琼 石新栋 张继奎 金强国