

# 圆梁山隧道高压富水区径向注浆技术研究及应用

王雪琴<sup>1</sup>, 张民庆<sup>2</sup>

(1. 西安铁路工程职工大学, 陕西 西安 710065; 2. 中铁隧道集团科研所, 河南 洛阳 471009)

**摘要:**以圆梁山隧道高压富水区为对象,研究了径向注浆的边界条件、注浆材料和注浆施工,并进行了现场应用,取得了较好的效果。随着以后大量地下工程的设计与修建,径向注浆技术会越来越被广泛应用。

**关键词:**圆梁山隧道;径向注浆;边界条件;注浆材料;注浆施工

**中图分类号:**U455.49 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2004)01-0057-06

**Research and Application of Radial Slip Casting Technology in High Pressure Water Bearing Zone Within Yuanliangshan Tunnel/WANG Xue-qin<sup>1</sup>, ZHANG Min-qing<sup>2</sup>** (1. Xi'an Railway Engineering Workers' College, Xi'an Shanxi 710065, China; 2. Scientific Research Institute of China Railway Tunnel Groups, Luoyang Henan 471009, China)

**Abstract:** Boundary conditions of radial slip casting, grouting materials and grouting techniques are researched taking the high pressure water bearing zone within Yuanliangshan tunnel as a studying target. The research results were applied in the actual construction situations and a quite good result was achieved. As the amount of design and construction of underground engineering goes up, the radial slip casting technology will be applied more widely.

**Key words:** yuanliangshan tunnel; radial slip casting; boundary conditions; grouting materials; grouting engineering

## 1 概述

圆梁山隧道是渝怀铁路线上最长的隧道,全长 11068 m。圆梁山隧道毛坝向斜段 DK353+200~DK354+400 长 2200 m 为高压富水区,预计涌水量为 83000 m<sup>3</sup>/天,静水压力为 4.42~4.6 MPa。为保证圆梁山隧道施工安全,以及隧道完成后的施工质量,针对圆梁山隧道高压富水区,施工中采取“注浆堵水、限量排放”的施工原则。根据高压富水区的不同地质条件特点,施工中选择采用超前预注浆和径向注浆两种主要注浆方式进行注浆加固堵水。根据铁道部第二勘测设计院设计图纸,在圆梁山隧道毛坝向斜高压富水区地段设计中,超前预注浆正洞为 1090 m,平导为 1060 m;径向注浆正洞为 1110 m,平导为 1140 m。正洞径向注浆占 50.5%,平导径向注浆占 51.8%。在现场实际注浆堵水施工中,径向注浆所占的比例更大。因而径向注浆是圆梁山隧道建成后做到“注浆堵水、限量排放”的关键环节。

## 2 径向注浆方案实施的边界条件

注浆方案选择的合理与否对施工速度和施工进度会造成很大影响。实施全断面超前预注浆要占用掌子面,这样掌子面就没有开挖进度,而实施开挖后

径向注浆基本不会对掌子面开挖形成影响,因而当地质条件适合径向注浆时应选择径向注浆措施。

根据圆梁山隧道施工经验,确定实施径向注浆方案条件的目前最可靠方法是超前探孔。

通过利用超前探孔,判定水流方向,测算总涌水量,确定裂隙发育段和裂隙发育度,从而判断出前方地层在开挖后是否能够自稳,是否存在大量涌水、涌砂的可能,是否能保证涌出水量不会对施工造成太大的影响,并确定在开挖施工完成后是否能对涌水量进行控制。

经对圆梁山隧道高压、富水区施工的研究分析,当前方地层为富水岩裂隙构造时,只要总涌水量 > 300 m<sup>3</sup>/h,那么将不会对正常开挖施工造成太大影响,完全可以通过采取径向注浆措施进行注浆堵水。

### 2.1 探孔布置

为了较准确地判定水流方向和对总涌水量进行预测,按图 1 设计进行探孔布置。探孔共布置 4 个,分别位于左、右边墙和左、右拱腰。

探孔纵向探测长度 30 m,终孔为开挖轮廓线外 1.5 m,即外插角 2.9°。每探测 30 m 后,当确认前方可以开挖时,开挖施工 25 m,余留 5 m 作为下一循环探测的余留岩墙。

收稿日期:2003-06-24

基金项目:铁道部重点科研项目“渝怀线圆梁山隧道关键技术试验研究-B(高水压、富水区隧道帷幕注浆综合技术研究)”(2001G009-3(B))

作者简介:王雪琴(1971-),女(汉族),四川广安人,西安铁路工程职工大学讲师,桥梁工程专业,从事桥梁及隧道教研工作,陕西省西安市太白南路 189 号,(029)82057915。

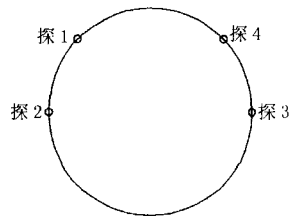


图1 超前探孔横断面布置图

在现场探孔施工中,当有一个探孔出现流水时,其它探孔应减慢钻进,首先钻进出水孔,并不断测试出水孔的涌水量,直到出水孔钻到设计深度。按这一钻探原则进行探孔施工。期间,应对每一个探孔涌水量进行监测。在探孔施工结束后,如果没有一个孔是满孔流水,那么基本上可不再进行补探施工。否则,可通过分析各探水孔的水力联系进行补探设计和施工。

## 2.2 水流方向的判定

通过分析各探水孔遇水时的钻孔深度,确定前方岩层的走向。综合各探水孔涌水量变化情况,分析探水孔之间的水力关系,确定水的来源方向。当需要进行补探时,主要在水源方向一侧进行补探设计和施工,以进一步确定水流方向和涌水量大小。

## 2.3 涌水量的分析与预测

正确地分析出前方涌水量大小是确定是否可以开挖的最主要依据之一。涌水量的分析预测主要通过“预估→涌水量稳定性分析→补探确定”这一程序进行。

### 2.3.1 涌水量预估

探水孔钻探完成后,若探孔不是满孔流水,则可以直接通过采用容器提水的方法进行涌水量测试。这种情况下,涌水量  $\leq 40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,测试的误差不大。若基本是满孔流水,即涌水量  $> 40 \text{ m}^3/\text{h}$  时,采用容器提水的方法很难较准确地测试,这主要是在很短的时间内所选择的容器就被涌水充满,测试时引起的时间误差太大,造成测试数据不准确。

当涌水量  $> 40 \text{ m}^3/\text{h}$  时,可采用射程计算法进行涌水量预估。如图2所示。将  $\phi 108 \text{ mm}$  孔口管变径转换为  $\phi 32 \text{ mm}$  的焊接水管,通过测试当涌水射出高程为  $1 \text{ m}$  处的水平射程,从而估算出前方涌

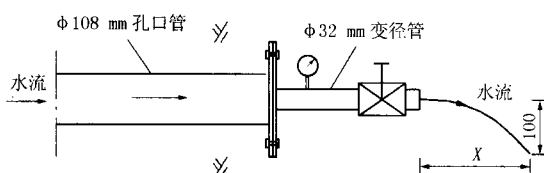


图2 涌水量测试方案示意图

水量。计算方法如下:

$$\begin{cases} X = Vt \\ y = \frac{1}{2}gt^2 \\ Q = 3600VS \\ S = \frac{1}{4}\pi D^2 \end{cases}$$

式中: $X$ ——水平射程,  $\text{m}$ ;  $y$ ——高程,取  $1 \text{ m}$ ;  $t$ ——流水时间,  $\text{s}$ ;  $Q$ ——预估涌水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $V$ ——涌水速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $S$ ——过水面积,  $\text{m}^2$ ;  $D$ ——管径,取  $\phi 32 \text{ mm}$  即  $0.032 \text{ m}$ 。

计算得: $Q = 6.4X$ 。

### 2.3.2 涌水量稳定性分析

测试各探孔涌水量和总涌水量(总涌水量可通过矩形堰测试),绘制涌水量变化曲线,以此分析前方涌水量的稳定性。

若涌水量呈稳定性,每个探水孔涌水量都小于  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,且总涌水量  $< 300 \text{ m}^3/\text{h}$  时,基本上可以确定前方发生突涌水的可能性不大,可以进行开挖施工,否则应进行前方涌水量的准确判析。

### 2.3.3 涌水量的准确判析

通过在水源侧增补探孔的方式来准确评估前方发生突涌水的可能性。

施工中一般按预设计的超前预注浆方案施作水源侧的注浆钻孔,通过钻孔数量的增加,使总涌水量进行分配。若能达到实施几个钻孔后不再有满孔流水现象,这时继续观测各孔流量和总涌水量,分析其关系和规律性,通过对总涌水量进行稳定性分析,从而界定出前方发生突涌水的可能性。

## 2.4 确定裂隙发育的分布特征

裂隙发育的分布特征也是影响注浆方案制定的主要因素之一。对裂隙发育的分布特征可采用止浆塞卡位技术,通过水量观测法进行确定。

如图3所示,将水力膨胀式止浆塞下入钻孔中,按  $1, 2, \dots, 29 \text{ m}$  的位置对止浆塞进行卡位。通过注水,使止浆塞膨胀,通过测试芯管中的出水量,以

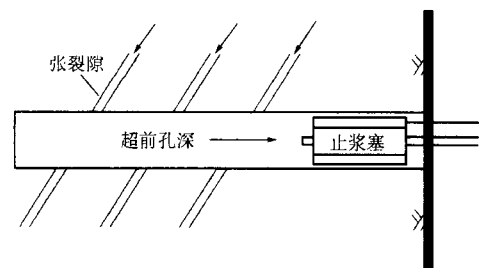


图3 裂隙发育分布特征测试方法示意图

确定测试段是否有水,以及水量大小。绘制水量随钻孔深度的分布特征曲线,由曲线判定水量的主要水源位置,从而确定钻孔范围内的裂隙发育分布特征。

## 2.5 边界条件

能否实施径向注浆方案,一般主要取决于对前方突水突泥的判定,对前方裂隙发育分布特征的分析,以及对开挖后径向注浆的可控性评估等3个条件。根据圆梁山隧道的施工经验,决定能否实施开挖后径向注浆方案的条件如下:

(1)当前方为淤泥或粉细砂层等充填性溶洞,那怕是只有 $3\sim 5\text{ m}^3/\text{h}$ 的流水,也会造成开挖后掌子面不能自稳,施工中易出现坍方、涌泥、涌砂等灾害,因而在这种情况下,不能实施开挖后径向注浆方案,必须采取超前预注浆加固方案。

(2)当探孔区段总涌水量不稳定,或采取预设计方案增加钻孔数量 $3\sim 5$ 个后仍不能使任一钻孔不再有满孔流水现象,即小于 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 时,不能实施开挖后径向注浆方案,必须采取超前预注浆加固方案。

(3)当探孔区段总涌水量稳定,但总涌水量 $> 300\text{ m}^3/\text{h}$ 时,涌水会对开挖施工造成较大的影响,因而不宜实施开挖后径向注浆方案,必须采取超前预注浆加固方案。

(4)当探孔区段总涌水量稳定,并小于 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 时,若钻孔范围内裂隙分布均匀,那么初期支护质量很难保证,实施径向注浆也十分困难,很难解决施工后的渗漏水问题,因而一般情况下不宜实施开挖后径向注浆方案,必须采取超前预注浆加固方案。

综合而言,开挖后径向注浆方案实施的边界条件为:(1)不适宜于动水条件下的深埋型充填型淤泥和砂层溶洞;(2)总涌水量必须稳定,且小于 $300\text{ m}^3/\text{h}$ ;(3)涌水段裂隙分布范围不得大于 $3\text{ m}$ 。

## 3 径向注浆材料

### 3.1 径向注浆材料选择

径向注浆作为工程结构的一部分,它起到加固堵水和抗水压的作用,因而在选择径向注浆材料时一定要综合考虑注浆材料的耐久性、高强度性以及收缩性和无污染性。

就注浆材料而言,目前国内外常用的注浆材料可基本分为水泥基浆液和非水泥基浆液。对于非水泥基浆液的耐久性,目前国内外专家的看法不太一致。一部分专家根据注浆后地层产生涌水涌泥后浆

液被冲出破坏这一现象,认为该类浆液的耐久性差。而另一部分专家则认为浆液只要经过充分化学反应,生成凝胶的不易再继续发生反应的化合物时则浆液本身已具有耐久性,至于浆液被破坏的这一现象是由于浆液加固机理主要依赖于劈裂作用。在动水压作用下,劈裂脉之间的夹层泥、砂被水逐渐冲击,形成“渗透→流水→涌水”,从而形成大量破坏,涌水的发展将浆液主脉冲出。因而,只要地层注浆机理是劈裂作用,如果产生渗透水后置之不理,就有可能产生这一破坏现象,解决或避免这一破坏现象的主要方法是加密注浆孔数,加入钢管形成支护构架,采用超细型材料形成主脉下渗透,注浆过程中采用低压力、小流量使主脉厚度减小。这样只要能形成网络状结构体系,支护后实施径向补强注浆,真正做到初期支护不渗漏,二次衬砌无水,不使水形成动水,那么地层越不容易被破坏。在此,我们倾向于第二种看法。但不管怎样,作为径向注浆而言,如果水泥基材料能满足要求,还是应首选这类浆材。

### 3.2 浆液配比及性能

选择普通水泥单液浆、超细水泥单液浆、HSC单液浆和TGRM单液浆进行室内试验,测试浆液的抗压强度、抗折强度、收缩率以及浆液的初凝和终凝时间等物理力学性能指标。

径向注浆应尽量采用高浓度浆液配比,以提高浆液的抗压和抗剪能力,减少浆液的收缩率。同时在选择浆液配比时,又要充分考虑浆液的可注性和可操作性要求。根据以往注浆施工经验和室内浆液试配结果,径向注浆材料配比参数及浆液性能如表1所示。

### 3.3 浆液性能指标结果分析及使用范围界定

综合对比4种浆液室内试验结果,参照其它相关资料,分析浆液的优缺点,界定其作用范围如表2所示。

## 4 径向注浆设计

径向注浆设计参数主要根据地层特点进行确定,并经现场试验后不断完善,一般径向注浆设计参数如表3所示。

## 5 径向注浆施工

### 5.1 施工工艺流程(见图4)

### 5.2 注浆管材

(1)当地层裂隙不太发育时,径向注浆管可采用自进式锚杆,或钻孔后下入注浆花管进行注浆施工。

表1 径向注浆材料配比及性能试验结果表

材料名称	原材料名称	浆液配比 (水灰比)	凝结时间/h		抗压强度/MPa					抗折强度/MPa					试件胀 缩率/%	
			初凝	终凝	8h	1d	3d	7d	28d	90d	8h	1d	3d	7d		28d
普通水泥 单液浆	P. O32.5R 普 通硅酸盐水泥	0.6	16	21		7.1	11.0	20.5	23.0		2.3	3.3	5.0	5.7	-3.34	
		0.8	24	48		1.5	3.9	10.0	17.8		0.8	1.8	3.0	4.4	-6.30	
超细水泥 单液浆	MC-20 超细 水泥	0.6	1.33	9	4.4	8.9	20.5	24.2	29.2	1.4	2.8	3.6	5.6	5.1	-1.79	
		0.8	2	12		1.3	7.0	17.1	23.6		0.7	2.4	4.1	4.9	-6.70	
HSC单液浆	HSC材料	1	0.5	0.5	10.1	12.3	12.8	16.8	19.9	20.7	1.8	2.0	1.0	1.3	1.1	2.20
TGRM单液浆	TGRM-II材料	1	0.5	0.5	6.4	8.3	9.6	12.4	13.8		1.9	2.3	2.3	3.1	1.8	0.42

注:(1)初凝时间以浆液不流动为止,终凝以浆液有强度、固化,可以脱模为止;(2)试件胀缩率正值指试件膨胀,负值指试件收缩。

表2 径向注浆材料性能特点及施工范围界定表

材料名称	优点	缺点	使用范围
普通水泥 单液浆	(1)凝胶时间长,具有较长的可注期。注浆时能够得到较大的注浆量和注浆加固范围 (2)具有极高的抗压、抗剪强度,能得到较好的径向注浆加固效果 (3)单价低	(1)初凝时间长,易被地下水稀释,影响其凝胶化性能和强度,因而不宜在水压高、水量大的条件下采用 (2)颗粒粗,在砂层和微小裂隙条件下注浆困难 (3)收缩率较大,不宜在对防水等级要求很高的条件下采用	适用于水量小、低水压、宽裂隙的地质条件下径向注浆
超细水泥 单液浆	(1)终凝时间较长,具有良好的可注期,能够得到大的注浆量和注浆加固范围 (2)固体抗压、抗剪强度极高,能得到最好的注浆加固效果 (3)颗粒细,在地层中,特别是砂层中能得到其它浆液不具有的渗透和劈裂效果,是径向注浆的最佳材料	(1)终凝时间较长,受地下水稀释影响,对其凝胶化性能会产生影响,因而在水压高、水量大条件下会有一些的浆液损失 (2)单价高 (3)略有收缩性,不宜采用大水灰比进行注浆加固施工	适宜于各种地层的径向注浆加固,特别是砂层、淤泥粉质粘土等充填性溶洞地层应采用该种注浆材料
HSC浆和 TGRM浆	(1)具有较好的抗分散性,能有效地控制注浆区域,适宜在水流量大的条件下注浆施工 (2)早期强度高,对抑制地层变形有较好的效果 (3)具有膨胀性,注浆后堵水效果好,不会产生渗透水现象	(1)粘度大,初凝时间短,易堵管,只适宜于水量大条件下施工,在水量 < 40 m <sup>3</sup> /h 时,现场不宜采用 (2)粘度大,在微小裂隙和小空隙率地层中注入困难 (3)具有早强性,但龄期强度并不高,作为径向注浆加固材料,有待于进一步对材料性能进行改进	仅适宜于水量 ≥ 40 m <sup>3</sup> /h 时径向注浆堵水施工

表3 径向注浆设计参数表

设计参数名称	加固厚度 B	注浆材料	扩散半径 /m	环向间距 /m	纵向间距 /m	布孔方式
一般裂隙地段	(0.2~0.5)D	普通水泥单液浆、超细水泥单液浆、HSC浆(或TGRM浆)	1~2	2~3	1~2	全环梅花形布置
溶洞间隔段	0.5D	超细水泥单液浆(局部HSC浆)	0.5~1	0.8~1.5	0.5~1.5	
溶洞段	(0.5~1)D	超细水泥单液浆(局部HSC浆)	0.5	0.6~1	0.5~1	

注:D——开挖断面宽度, m。

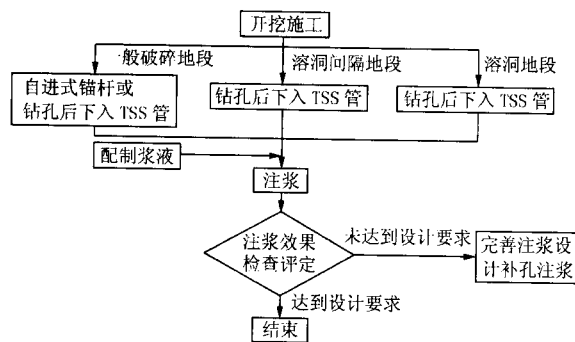


图4 径向注浆施工工艺流程图

(2)当地层裂隙比较发育时,或在溶洞间隔段及溶洞区段,径向注浆要求很高,因而宜采用TSS管(即单向袖阀式注浆管)结构,以减少或防止注浆施工中串浆的发生,从而提高径向注浆加固效果。

### 5.3 注浆参数

现场注浆施工中应根据地层特点,不断地进行注浆参数的动态完善和调整,以适应地层注浆加固。其注浆参数为:注浆速度5~100 L/min;注浆终压2~3 MPa;单孔注浆量按  $Q = \pi R^2 H n \alpha (1 + \beta)$  进行计算确定(Q——注浆量, m<sup>3</sup>; R——扩散半径, m; H——注浆段长, m; n——地层裂隙度或空隙率; α——浆液填充率; β——浆液损失率)。

### 5.4 注浆方式

径向注浆采用全孔一次性注浆方式进行施工。

### 5.5 注浆顺序

注浆顺序宜按两序孔进行,即先跳孔跳排注单序孔,然后注剩下的二序孔。这样,通过实施约束型注浆模式,实现挤压密实的注浆目的。

### 5.6 注浆结束标准控制

一序孔注浆结束标准以定量定压相结合为原则进行控制。注浆施工过程中,以定压为第一控制原则,如果长时间注浆压力不上升(一般指8 h),应将注浆材料调整为HSC单液浆,再注8 h后仍不上升,可按定量标准进行注浆控制。

二序孔注浆结束标准以必须达到设计注浆终压为原则进行控制。

## 6 径向注浆效果检查评定

(1) 径向注浆所有注浆孔的注浆  $P-Q-t$  曲线必须符合设计意图。

(2) 径向注浆结束后应达到设计规定的允许渗漏水标准要求。

## 7 应用情况

根据铁二院地质资料,圆梁山隧道高压富水区PDK353+580~610段地层为二叠系栖霞、梁山组灰、深灰色中厚层状灰岩与灰黑色沥青质泥岩,节理裂隙发育。TSP202地质预测预报系统成果显示,预报段岩体比较完整单一,节理裂隙发育,可能含水。HY-303红外线仪预报显示前方地质条件为非均质构造,不同地质体之间的介质密度存在较大差异,根据仪器原理与地质资料可判断前方存在含水构造。

### 7.1 探水过程

2001年10月4日在平导PDK353+580断面实施超前钻孔探水作业,当1号探水孔钻至12.1 m时,钻孔内出现少量流水,流量为 $0.24 \text{ m}^3/\text{h}$ ;当4号探水孔钻至18 m时,钻孔内也出现了少量流水,流量为 $0.36 \text{ m}^3/\text{h}$ ;3号探水孔钻至18.47 m时,孔内出现大量涌水,涌水量为 $42 \text{ m}^3/\text{h}$ ,涌水充满钻孔,涌水压力不高,水质较浑浊,呈岩粉乳液状;2号探水孔无水。

由探水孔水量分布情况来看,水源应在右侧。对涌水量进行监测,测试结果如图5所示。

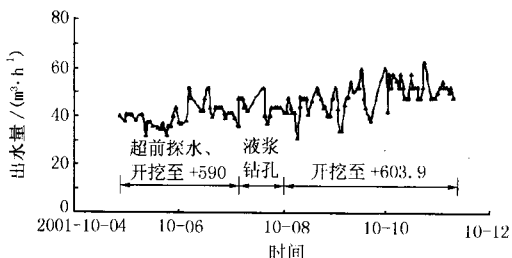


图5 总涌水量变化曲线

由总涌水量变化曲线监测结果来看,涌水量基

本保持平衡,在超前探水孔施工结束后前期开挖过程中涌水量有减少趋势,但不十分明显,这说明涌水补给源较强,短时间内排完的可能性不大。根据涌水为清水这一特点,该透水层应为断层破碎带,但由于在一个探水孔出水量 $>40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,因而也不能排除前方发生大涌水的可能性。经初步分析,现场决定除对涌水状况继续观察测试,平导施工至PDK353+590时停止施工,进一步探测,以确定方案。

### 7.2 补探过程

2001年10月6日,平导工作面开挖至PDK353+590,按设计的注浆方案进行下一步的涌水探测,以确定施工方案。注浆设计中将注浆孔设计为一孔两用,即注浆孔也起到探水孔的作用。注浆设计如图6所示。

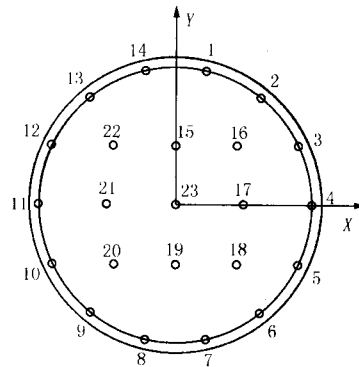


图6 注浆并补探设计图

2001年10月7日掌子面封闭后,首先对设计中的1、14、17、21号注浆孔进行钻孔。当1、14、21号孔钻至15~18 m深时,孔内均无涌水;17号注浆孔钻至5 m深时出现了大量涌水,其单孔涌水量为 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,同时原3号探孔涌水量明显减少,两孔涌水均无压力,涌水颜色为乳白色。如图7所示将水囊式止浆塞下至17号注浆孔4.5 m处时,17号注浆孔涌水,而注浆芯管中无水,同时原3号探孔和周围残余炮眼孔及裂隙涌水量明显减少。因而将止浆塞下至4 m处进行探测,这时,芯管中涌水,涌水量为 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

为进一步探明掌子面右侧的所有汇水区域及总涌水量,决定按注浆设计方案对掌子面右侧区域的3、4、5、6号注浆孔进行钻孔作业。5号孔钻至6 m时涌水,涌水量为 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,此时原3号探水孔及17号注浆孔基本无水。当3号孔钻深15.5 m,6号孔钻至16.4 m处时两孔均无水,4号孔钻深12 m,钻至6.1 m时出现涌水,此时5、17号钻孔有灰渣排出。

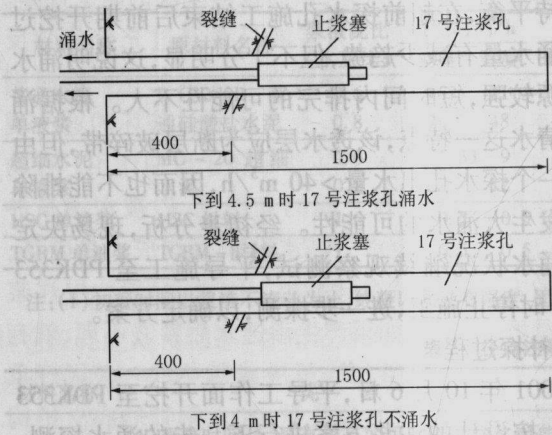


图7 止浆塞止浆现象示意图

### 7.3 成果分析

综合以上补探情况分析,在掌子面前方4~4.5 m之间的岩层中存在一条宽30~40 cm的裂缝,该裂缝为涌水通道,其余部位岩层比较完整。在原3号探水孔基础上增加17号孔,涌水量无明显增大,且钻孔内涌水无压力,基本可以判定断面内涌水量不大。由于5号钻孔孔位较原3号探水孔及17号注浆孔孔位低,从而对之形成截流,导致原3号探水孔和17号注浆孔基本无水。这充分表明地层涌水量不大,压力不高。3号钻孔孔位高于断面初始水位,即使该处存在裂缝也表现为无水,6号孔无水表明裂缝未贯通该区域或断裂不张开,裂隙贯穿高度不大。4号钻孔和5、17号钻孔连通性极强,贯通裂缝较宽,钻孔时由于风压、水压作用致使碎石堵塞5、17号钻孔涌水,表现为4号钻孔出水。

根据注浆钻孔和涌水量监测分析,水源主要来源于右侧,在开挖断面内总涌水量基本为定值,为40~50 m<sup>3</sup>/h。因而采取排放措施不会影响施工断面的安全开挖,开挖后不会形成较大涌(突)水。若采取超前预注浆施工,无论从经济、工期还是方案的可行性方面考虑都是不太合适,因而停止注浆,决定先开挖排放,后进行径向注浆进行涌水处理。

### 7.4 径向注浆

根据分析结果,现场采取了开挖施工。由开挖揭示的状况来看,水源从右侧流向左侧,和预测的情况一致。开挖揭露后在PDK353+600附近右侧明显可以看到出水点是一条20~30 cm横向张开断裂,断裂延伸入隧道右侧边墙,深度无法探测。当平导开挖至PDK353+604时,该贯穿断裂已完全进入底板以下。至2001年10月10日,开挖到PDK353+606.7未出现新的出水点,涌水量基本没变,稳定在45 m<sup>3</sup>/h左右,压力较小,水质澄清。

针对涌水状况,在开挖施工完成后采取了径向注浆措施。径向注浆加固设计厚度3 m,浆液扩散半径为2 m,注浆孔梅花型布置,注浆孔环向间距1.5 m,纵向间距2.6 m。注浆材料采用普通水泥单液浆,浆液配比为水灰比为0.6,注浆压力3 MPa。注浆结束后,如图8所示,注浆段基本无水,完全达到了设计所允许的5 m<sup>3</sup>/(m·d)渗流量标准,满足了“注浆堵水,限量排放”的施工原则。

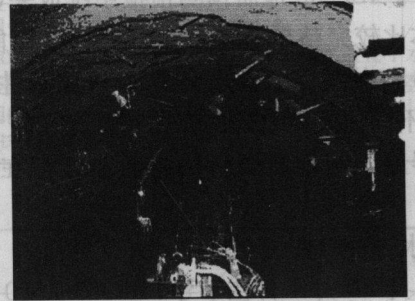


图8 径向注浆加固效果图

### 参考文献:

- [1] 编写组. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.

致谢: 本文在编写过程中参考了铁道部第二勘测设计院的《圆梁山地质资料》等, 特此致谢。