

# 反井钻机在终南山公路隧道竖井中的应用

## Application of Raise Boring Machine in Construction of Shaft in Zhongnanshan Tunnel

肖礼忠 中铁二十一局三公司, 陕西 咸阳 712000

任涛, 赵颖超 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710043

### 0 引言

在煤矿、水电、金属矿山、铁路、公路等地下工程建设中, 开凿竖井和斜井井筒常常是整个工程建设的关键工程之一, 其工程量虽然不大, 但受水文、地质等客观条件影响, 施工难度较大、安全程度低, 直接影响工程的进度<sup>[1]</sup>。

在秦岭终南山公路隧道中, 为解决隧道的通风问题, 共设计了3座运营通风竖井, 其中1号竖井采用反井钻机施工, 应用非常成功。

在原投标施工组织设计中采用正井法开挖, 但施工速度慢、不安全、辅助工程多、投入大, 不能满足主洞开挖通风要求和施工进度。为此, 在本项目施工中引进先进的反井钻机施工技术, 仅用35天就完成了竖井扩

孔, 快速、高效地完成了通风竖井施工任务。

### 1 施工辅助生产系统

#### 1.1 施工辅助生产系统

施工辅助生产系统主要包括供水、供电、通讯、井口临时设施、钻机安装、刀孔钻头和扩孔钻头换接、钻机拆除等工作, 现分述如下。

##### 1.1.1 供水

施工用水从石砭峪河中安装高压水泵抽取, 供给到已建高压水池中, 用 $\Phi 75$ 钢管连接至距离井口上部10 m处。施工期间应保证水流量不小于 $10\text{m}^3/\text{h}$ , 连续供应, 无间断。

##### 1.1.2 供电

在距离竖井中心300 m的位置安装建立630 kW变压器, 满足反井钻机

工作电压380 V、容量220 kW、循环水泵90 kW的需求, 用电设备应采取相应的启动方式, 并安装漏电保护器。

##### 1.1.3 通讯

地面通讯使用对讲机, 地面与井下的通讯采用“打点”的方法。

##### 1.1.4 井口临时设施

首先进行钻机混凝土基础、循环池和清水冷却池施工, 三者上表面为同一标高, 由水沟连接。

### 1.2 设备的选择及技术参数的确定

#### 1.2.1 破岩刀具的选择

破岩刀具包括导孔钻头和扩孔滚刀。导孔钻头一般按生产厂家推荐的适用范围选择, 但由于反井钻机施工过程中不进行导孔钻头的更换, 所以应选择硬度高于所钻地层的钻头; 扩孔钻头主要根据岩石的硬度、磨蚀性



来确定滚刀的齿形和结构。反井钻机一般采用碳化钨镶齿盘型结构, 选择依据见表1。

### 1.2.2 反井钻机的选择及主要设备

首先根据钻孔深度和钻孔直径初步选择合适的反井钻机, 然后对钻机的主要技术参数进行验算

$$W=G_1+G_2+G_3+P \quad (1)$$

式中:  $W$ ——提升力, kN;

$G_1$ ——动力头重量, kN;

$G_2$ ——扩孔钻头重量, kN;

$G_3$ ——钻杆重量, kN;

$P$ ——钻头压力, kN。

$$T=T_F+T_r \quad (2)$$

式中:  $T$ ——扭矩, kN·m;

$T_F$ ——破岩阻力矩, kN·m;

$T_r$ ——摩擦阻力矩, kN·m。

转速根据钻头类型、直径以及滚

刀结构确定。一般要求提升力不超过钻机设计最大提升力的60%, 扭矩不超过设计最大扭矩的70%。主要设备的选取见表2。

### 1.2.3 钻机辅助设备的确定

泵在导孔钻进时迫使洗井液循环, 是反井钻机的主要辅助设备。根据不同的地质条件, 洗井液可采用泥浆或清水。泥浆作洗井液时除了有将岩屑带到孔外的作用外, 还对地层有一定的支护作用。用清水钻进时一般可选用90 kW的离心泵。

### 1.2.4 钻井型号确定

根据竖井的用途和该井所穿过山体的地质条件, 并充分考虑到施工难度, 最后选择BMC-300型反井钻机施工。该钻机主要技术参数为: 导孔直径216 mm、扩孔直径1.40~1.52 m、设计钻孔深度250~300 m、钻机最大扭

矩64 N·m、钻机拉力1 250 kN、钻机推力550 kN、钻杆直径176 mm、钻机功率128.5 kW (不包括辅助设备)。

采用算法对提升力进行验算结果为 $W=G_1+G_3+G_2+P=50+180\times 2+15+38\times 15=895\text{ kN}<1\,250\text{ kN}$ 。

采用工程类比法对扭矩进行验算如下。

$$T\propto f(K, D, K_r, P, K_f) \quad (3)$$

式中:  $T$ ——扭矩, kN·m;

$K$ ——与钻头结构类型相关的系数;

$D$ ——钻孔直径, mm;

$K_r$ ——岩石的可钻性系数;

$P$ ——钻头压力, kN;

$K_f$ ——摩擦损失系数。

验算结果的对比工程为云南溪洛渡水电站反井钻井工程。

(1) 与钻头结构类型相关的系数 $K$ 。由于选用了相同结构的钻头, 故 $K_{\text{溪洛渡}}=K_{\text{终南山}}$ 。

(2) 钻孔直径 $D$ 。溪洛渡为1.4 m, 终南山为1.4 m, 即 $D_{\text{溪洛渡}}=D_{\text{终南山}}$ 。

(3) 岩石的可钻性系数 $K_r$ 。溪洛渡为玄武岩, 终南山为混合片麻岩, 即 $K_{r\text{溪洛渡}}\cong K_{r\text{终南山}}$ 。

(4) 钻头压力 $P$ 。溪洛渡、终南山的钻头压力均为470 kN, 即 $P_{\text{溪洛渡}}=P_{\text{终南山}}$ 。

表1 破岩刀具的选择

选择依据	岩石腐蚀性不同时刀具的选择		
	低	中	高
岩石硬度	软	中硬	坚硬
滚刀齿形	楔形	锥形/复合型	球形
滚刀结构	多刃盘形	多刃盘形	无盘布置

表2 钻机施工主要设备

序号	名称	型号	数量	单位
1	钻机	BMC-300	1	台(套)
2	钻杆	φ176	200	根
3	稳定钻杆	φ205	15	根
4	扩孔钻头	φ1400	1	只
5	油泵	40SCY14-1B	2	台
6	马达	2QMJ42/2.5	2	台





(5) 摩擦损失系数 $K_f$ 。二者均为竖井, 溪洛渡深度为200 m, 终南山深度为170 m, 即 $K_{f溪洛渡} > K_{f终南山}$ 。

故 $T_{溪洛渡} > T_{终南山}$ 。BMC-300型反井钻机在溪洛渡反井钻井工程中取得了良好的成效, 没有出现钻机扭矩不足的问题, 可以满足施工需要。

## 2 工艺流程

BMC-300型钻机的工作原理为: 液压马达驱动水龙头, 将扭矩传递给钻具系统, 带动钻具旋转, 破岩采用镶齿盘形滚刀, 滚刀在钻压作用下沿井底滚动, 从而对岩石产生冲击、挤压和剪切作用, 使其破碎。导孔时岩屑沿钻杆与孔壁间的环形空间由洗井液提升到水平, 扩孔时岩屑靠自重落到水平。其工艺流程为: 测量放样→钻机就位→导孔钻进→扩孔施工→扩挖→出碴<sup>[2-3]</sup>。

### 2.1 测量放样

由测量工程师测定竖井中心位置, 并用水泥钉做好标记。

### 2.2 钻机就位

BMC-300型反井钻机运至工地后

用吊车放至井内1 110 m高程位置。平整地面后, 钻机基础采用C20混凝土浇筑, 厚度为100 cm。尺寸位置以钻井中心定位, 在施工中确保钻机脚螺栓孔位的精确度。

### 2.3 反井钻机导孔开孔方案

本钻孔设计采用5根稳定钻杆, 开孔时先使用1根开孔器进行开孔, 孔位钻进后安装1根标准钻杆。此钻杆钻进后, 每隔6根安装1根稳定钻杆, 以保证钻进效果。

### 2.4 导孔钻进

开始钻进时, 转速为35 r/min。钻压控制在8~10 MPa, 导孔洗井液排碴采用正循环, 每钻完1根钻杆认真洗井1~2 min。钻完7 m后, 将钻杆提出, 按照每2根普通钻杆加1根稳定钻杆的密度进行前20 m的钻孔。钻进时施工的基本参数见表3。随着钻井深度加大, 适当延长冲洗时间, 以避免发生抱钻、堵钻事故。

经常检查钻杆的丝扣以及接头体的丝扣, 发现问题应及时解决。对于表3 导孔钻进施工的基本参数

施工工序	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	钻头压力/kN	扭矩/(kN·m)
Φ216导孔	15~40	50~60	20~30

有问题的钻杆要采用分次上紧的方法进行上紧。

为有效地控制偏斜率, 钻进中使用稳定器。稳定器在短接钻杆后就要用1根, 按开孔方案进行。

### 2.5 导井扩孔

钻井前与竖井底部相连的西线排风道已经贯通, 为运输及安装钻头创造条件。卸下Φ216的钻头, 换上Φ1 400的扩孔钻头, 自下而上将Φ216的导孔扩大为Φ1 400的导井。施工参数见表4。

将马达调至并联状态(即主轴转速15 r/min), 打开阀门供水, 即可开始扩孔。在扩孔前应将孔周围直径范围以内的岩面找平。

开始扩孔及终孔时宜采用低压慢速提钻, 主泵压力为4~7 MPa, 副泵压力为6~8 MPa; 当扩孔器完全进入岩层后即可进行正常扩孔。根据岩石软硬程度, 主泵和副泵的压力在10~18 MPa范围内匹配。扩孔中在刀刃接触岩面时, 严禁使马达反转。发生卡钻时, 应立即反向推进, 使刀刃

脱离岩面。

不论钻导孔还是扩孔，均应先开水后开钻，先停钻后停水。钻进必须连续供水，不得中断。

导井扩孔结束后，先将钻头固定在钢轨上，拆掉钻机的前后拉杆和各种油管，拆掉钻架主机车和一些辅助设备。将扩孔钻头吊牢再拆除轨道，然后将操作车吊下来，拆下泵车和油箱冷却器运至地面。

## 2.6 钻机的拆除

扩孔施工完毕后将 $\phi 1\ 400$ 钻头卸掉，并封好钻孔，然后开始卸机。卸机时全面做好安全工作，防止大型设备、配件、人员等掉到孔内。钻机移开钻孔后，立即做好钻孔的防护工作，设置安全警示标志。

## 3 围岩破碎带的施工

钻机就位前已将原设计中Ⅱ类围岩清除，通过钻进时，根据孔口石屑情况判断，实际地质情况在Ⅱ类与Ⅳ类围岩之间，有约15~20 m的过渡

表4 扩孔钻进施工的基本参数

施工工序	转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	钻头压力/kN	扭矩/( $kN \cdot m$ )
$\phi 1\ 400$ 导孔	10~16	380~470	50~60

段，此范围内的围岩较破碎，在导孔钻进过程中易出现塌孔现象，影响钻机正常钻进。根据以往的施工经验，采取灌注水泥浆液法对井筒进行护壁，待达到一定强度后，再进行二次导孔钻进。塌孔段经过处理后钻进过程正常。

## 4 反井钻进过程的偏斜控制

### 4.1 钻杆轴向载荷造成的偏斜

在垂直的导向孔钻进中，钻孔开孔时钻杆不会弯曲，因此不会出现由钻压引起的钻头偏转，但偏斜的可能性依然存在。随着钻压的增加，钻杆就会逐渐弯曲，由此产生的非垂直载荷实际上导致了钻进方向角度的变化。此时，钻具的下部（即从弯曲点到钻头）已偏离了钻孔的预定路线。

作用于斜孔的钻具载荷按受力性质可分成垂直分力和水平分力。垂直分力使钻头沿垂直方向或倾斜方向向下钻进，而水平分力使钻头沿水平方向或沿倾斜方向向上钻进。由于钻杆的直径比导孔直径小，钻杆的重量

将使钻杆朝着导孔低侧方向垂落。在给钻杆施加轴向载荷时，作用于钻杆上的推进力会使钻杆产生一定程度的弯曲，弯曲的钻杆顺着垂落的方向移动，而稳定器起支点作用，其结果使钻头沿倾斜上部钻进。

### 4.2 岩层对钻头的反作用造成的偏斜

在无层理、节理或断层的坚硬而均质岩层中钻凿导孔时，因岩层反作用造成的导孔偏斜较少发生或偏移量较小；但岩石硬度的变化则会使导孔偏斜。钻头钻进的方向在很大程度上取决于钻头与硬度变化的岩石表面相遇时的角度。如果角度小，钻头一般朝着与变化的岩石平面平行的方向钻进；若角度大，钻孔的偏斜将趋向与变化的岩石平面垂直。

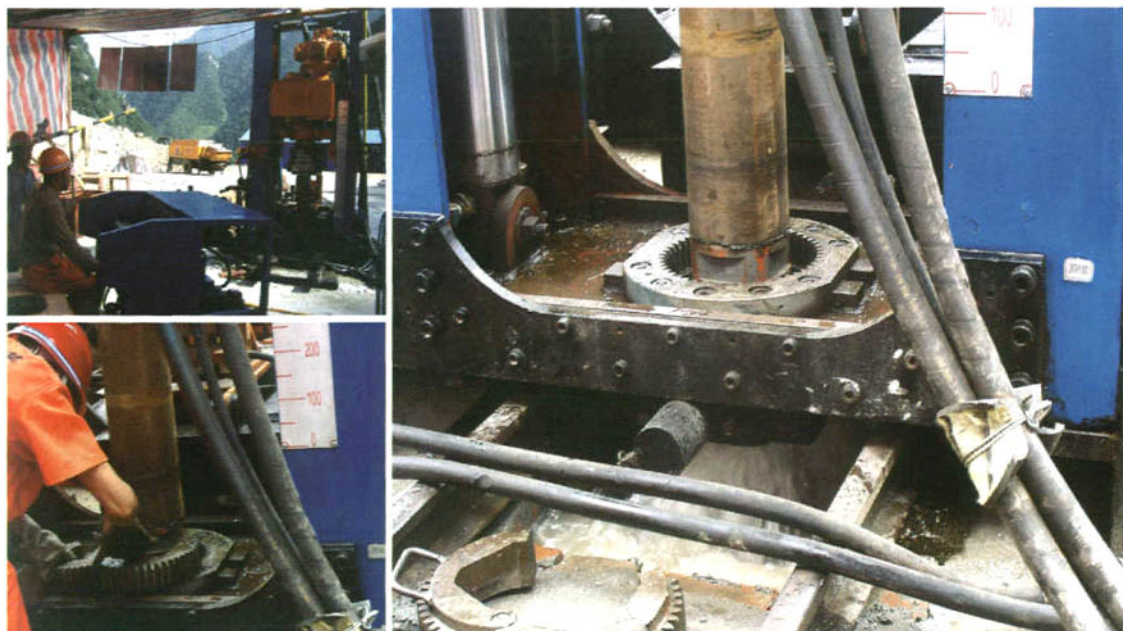
### 4.3 钻孔精度的影响因素及预防措施

#### 4.3.1 导孔钻头的选型

软岩钻头采用夹角较小的长楔齿或碳化钨一字形镶齿。硬岩钻头则采用夹角较大的短楔齿或碳化钨半球形镶齿，保证在低钻压下能够获得最大的钻进速度。

#### 4.3.2 钻压

为提高钻孔精度，应采用低于最



佳钻进速度的低钻压钻进。导孔钻头的钻压通常可参考钻凿相同或相似地层的钻井参数来确定，亦可参考钻头制造厂家提供的钻头产品样本介绍参数。由于低钻压能有效地减小钻孔偏斜，因此建议采用厂家规定的最低钻压值。

#### 4.3.3 转速

在钻进导向孔时，保持恒定的钻进速度是控制偏斜最常用的方法。

#### 4.3.4 钻井高压水

对实际钻进情况进行统计表明：沉积在孔底0.5~5.0 mm厚的钻屑可使钻进速度降低40%左右。高效钻进的一个基本要求是对孔底石屑进行有效的清理。

#### 4.3.5 稳定器

稳定器是避免钻孔偏斜最有效的工具，一般被设计为六棱形或八棱形。通常将2个或更多的稳定器连在一起使用，以便在钻孔底部形成一段刚性的、与孔壁多处接触的钻具组，起到约束作用，以防止偏斜。在本竖井钻进时，普通钻杆直径为175 mm，稳定钻杆直径为200 mm。

#### 4.3.6 岩层特性

掌握岩层的特性有助于选择最合适的钻头。在制订导孔的钻进工艺时，应该考虑所钻岩层的特性，收集

并掌握所钻地区的详细地勘材料以及附近施工时获得的地质资料。这将有助于钻井工艺措施的正确制订，以避免发生意外。

### 4.4 偏斜测量与纠偏

根据钻孔深度、岩石地质条件和钻孔精度要求等不同条件，可选用钟表测斜仪、磁性测斜仪和陀螺测斜仪进行测井。如果发现井孔超偏，必须停止钻进并进行纠偏处理。钻孔纠偏的方法必须视钻孔的具体情况而定。最常用的方法有如下几种。

(1) 如果钻孔偏斜程度和方向非常有规律，有时可采取偏置钻机的方法来纠正预计的偏斜。移动钻机的距离和方向可根据本地以前施工获得的经验而定。

(2) 可以采用堵塞偏孔、重新钻孔的方法解决偏斜。堵塞钻孔指用纯水泥浆将偏向点至孔底一段进行充填，使之凝固然后重钻。

## 5 结语

秦岭终南山公路隧道是目前中国最长、世界第二的特长公路隧道，共设计3座运营通风竖井。1号竖井深度为190.3 m，2号竖井深度为661.0 m，

3号竖井深度为392 m。1号竖井采用反井钻机施工，地质构造主要为混合片麻岩，饱和抗压强度为98.2~161.3 MPa，岩石坚硬，受构造影响严重，节理发育，围岩以IV、V类为主。经统计，导孔钻进速度为20 m/天，扩孔钻进速度为12 m/天。经测设，钻孔深度为174 m，实测钻孔偏斜率为0.34% (<1%)，满足施工要求。

该工程引进反井钻机施工，在很大程度上降低了施工难度和危险性，大大地提高了工作效率，减少了开挖成本，能及时解决洞内通风问题，创造了良好的施工条件，加快了工程进度。该技术成井速度快，施工安全性能好，在中硬岩、软岩中特别适用，为今后在公路隧道、铁路隧道竖井工程中推广打下了良好的基础，并为其他工程建设中的反井施工积累了经验，对深竖井、长斜井施工技术研究具有重要意义。 □

#### 参考文献：

- [1] 崔云龙. 简明建井工程手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [2] 刘志强, 甘文涛. 反井钻机与地下工程开发[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 425-428.
- [3] 赛云秀. 现代矿山井巷施工技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.



秦岭终南山特长公路隧道作为中国最长、世界第二长的隧道，设计、施工乃至运营都有其独特之处。现本刊有幸邀请到该项目常务总工程师赵秋林先生就隧道竖井设计以及施工方法进行探讨。赵秋林先生从事专业技术工作十余年，先后参加和主持了十余条铁路干支线和公路、城市道路、地铁、水利等隧道的勘测设计、科研试验等工作。



秦岭终南山隧道项目 赵秋林总工程师

特长隧道的运营通风是公路长隧道的关键设计内容。通风方式是一门十分复杂的综合技术，而以竖井为主的纵向通风方式中通风竖井的设计、建设更是难上加难。广泛地调研、借鉴国内外相关工程的经验和成果，并结合铁道、煤炭、矿山、冶金等行业的技术成果和国内外通风机械的技术指标，通过比较多种竖井的设计方案、权衡利弊后，秦岭终南山特长公路隧道确定了设置3座通风竖井，采用同井分隔技术将竖井分为送、排2个风道，东、西线隧道共用1个竖井，最深的竖井深度超过661 m，竖井最大直径达11.5 m，累计长度达到1 251 m。地面设有送风口、排风塔和检修房屋及设备。竖井和地下通风站的工程规模和通风控制系统为国内首创，在世界上亦属罕见。

竖井设计中不仅要考虑竖井的深度，而且要结合地形、地貌、工程地质、水文地质和地下、地上通风站等因素综合考虑，尽量将竖井设置在较完整的地层中。正确地处理竖井的施工难度、深度和降低通风运营费用的关系，通过进行技术、经济比较，找出合理的平衡点。竖井是采用1个竖井两分隔的形式，还是采用2个分开的小竖井形式值得商榷；作为运营通风或运输通道的永久结构，竖井和施工竖井的结构设计因其功能的不同而各异——永久结构更多地考虑结构安全，减少通风阻力；是否设置壁座尚无定论，但对于软弱地层、大直径并

设中隔板的竖井应考虑设置。

竖井施工中正井法施工应用较为广泛，技术也较为成熟；但用于开挖直径达12.8 m、深度达661 m的竖井实属罕见。要在缺乏可供参考的实际施工经验、设计规范等背景下顺利、安全地完成工程建设，难度极大。

对提升系统、装岩系统、悬吊系统、凿岩系统、供风系统、通风系统、排碴系统等八大系统均进行了配套设计，并针对大直径的特点设置了V型井架和2套单钩提升，缩短了出岩时间。竖井的开挖过程中，竖井工期往往受出碴时间制约，采用挖掘机装渣和4个吊桶出碴提高了出碴效率，在其他工程（如铁路乌鞘岭隧道竖井）也有类似的经验。可根据竖井直径选取相应类型的挖掘机。采用伞钻配合人工群钻的凿岩方式，既可发挥机械施工的便捷性，又可克服竖井直

径大、伞钻工作范围有限的缺点。

反井法施工对地质条件有一定的要求——工程地质较好、岩石软硬适中，最好是地层单一、地下水不发育的地层。而关键在于针对地层情况选取相应的钻机，有效地控制偏斜率，这样才能发挥反井法施工的优势，否则事倍功半。反井法施工在国内外也有失败的事例，主要原因在于地层复杂、技术水平较低、未能及时纠偏等。通过对秦岭终南山公路隧道反井施工的总结，提供了较为系统的反井施工成套技术，也提出了值得思考的问题。施工中导孔钻进速度为20 m/天，扩孔钻进速度为12 m/天，实测钻孔偏斜率为0.34%，体现了较高的技术水平和管理水平。竖井采用自下而上井身和中隔板整体滑模的施工技术，这是一种创新，可作为借鉴并加以推广。 □

