

# 高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施

郝旭鹏

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

**摘要** 高速公路隧道工程作为交通路网的关键控制性节点, 其洞身开挖与初期支护的施工质量直接决定隧道结构安全、施工效率及运营耐久性。本文结合新奥法施工原理, 针对高速公路隧道施工的复杂性和高安全性要求, 系统探讨洞身开挖施工技术的选择与应用、钻爆工艺优化、出渣运输流程, 详细阐述钢筋网铺设、喷射混凝土、锚杆支护、钢架支护等初期支护技术的实操要点并分析开挖与初期支护的协调施工策略, 以期为高速公路隧道洞身施工提供参考。

**关键词** 高速公路隧道; 洞身开挖; 初期支护; 钻爆工艺; 协调施工

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.018

## 0 引言

随着我国高速公路路网向山区、丘陵地带延伸, 隧道工程的建设规模不断扩大, 施工难度也随之提升。洞身开挖作为隧道施工的核心工序, 直接扰动围岩原有应力平衡, 若施工方法选择不当或操作不规范很容易引发围岩坍塌、变形等安全隐患; 初期支护作为隧道结构的第一道安全屏障, 承担着传递围岩压力、约束围岩变形的重要作用, 其施工质量直接影响隧道后续衬砌施工及长期运营安全。在此背景下, 深入研究高速公路隧道洞身开挖施工技术 with 初期支护措施, 优化施工流程, 强化各工序的协同配合, 对提升隧道施工质量、保障施工安全、缩短施工工期具有重要的现实意义, 也能为同类隧道工程施工提供实践借鉴。

## 1 高速公路隧道洞身开挖施工技术

### 1.1 开挖方法的选择与应用

#### 1.1.1 全断面开挖法

高速公路隧道洞身开挖施工前, 施工单位需结合围岩完整性与力学性能选择适配的全断面开挖模式, 从而最大限度减少对围岩的多次扰动, 提升施工连续性<sup>[1]</sup>。施工单位需先对隧道断面进行精准放线, 采用全站仪确定开挖轮廓线, 误差控制在 $\pm 5$  cm以内, 再搭配多功能台架凿岩机进行全断面钻孔作业, 钻孔深度控制在 $3 \sim 5$  m, 循环进尺与围岩级别适配, I~II级围岩可按 $3 \sim 5$  m控制, III级围岩采用预加固措施后可按 $2 \sim 3$  m控制。

#### 1.1.2 台阶开挖法

对于围岩稳定性中等、断面跨度较大的隧道段落

来说, 台阶开挖法能通过分层开挖、分层支护等措施有效控制围岩变形, 兼顾施工安全与效率(见图1)。施工单位需先划分上下台阶, 上台阶高度控制在 $3 \sim 4$  m, 宽度为隧道断面宽度的 $1/2 \sim 2/3$ , 采用短进尺开挖, 每次进尺 $1.5 \sim 2.5$  m, 开挖后及时施作初期支护, 形成临时受力体系。下台阶开挖滞后上台阶 $3 \sim 5$  m, 避免上下台阶施工相互干扰, 开挖过程中严格控制台阶坡度, 一般为 $1:0.5 \sim 1:1$ , 防止台阶坍塌。施工单位需安排专人负责台阶开挖的高程与坡度控制, 采用水平仪实时监测, 确保台阶尺寸符合设计要求。

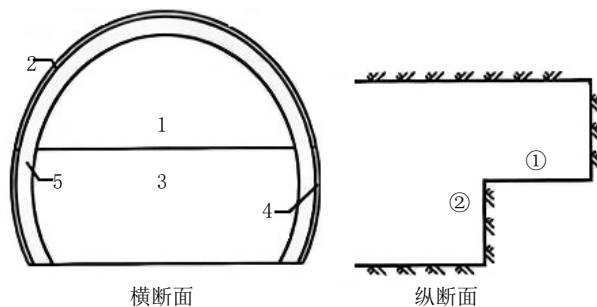


图1 台阶法开挖示意图

#### 1.1.3 分部开挖法

面对软弱松散、稳定性较差的IV~V级围岩, 分部开挖法可凭借分块开挖、逐步封闭等措施降低围岩坍塌风险, 适配大跨度隧道施工需求。施工单位可采用单侧壁导坑法实施分部开挖, 先开挖侧壁导坑, 导坑宽度不宜超过 $0.5$ 倍洞宽, 高度至起拱线为宜, 开挖后立即施作锚喷支护及中壁墙临时支撑, 尽快实现导坑支护闭合。随后开挖上台阶, 使其一侧支撑在导

作者简介: 郝旭鹏(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高速公路建设。

坑支护上,另一侧支撑在下台阶预留岩体上,上台阶开挖完成后及时施作拱部初期支护,最后开挖下台阶并完成边墙初期支护,尽快实现全断面闭合。

## 1.2 钻爆施工工艺

### 1.2.1 掏槽技术

掏槽技术作为钻爆施工的首要环节,施工单位需根据围岩硬度与整体性优化掏槽方式及参数。施工单位优先采用直眼掏槽或斜眼掏槽,硬岩地段选用直眼掏槽,掏槽孔深度比周边孔深 10~20 cm,孔间距控制在 15~25 cm,孔数设置为 6~8 个,呈对称布置;软岩地段选用斜眼掏槽,掏槽孔倾角控制在 60°~75°,孔深 2.5~3.5 m,确保掏槽效果。钻孔过程中需保证掏槽孔垂直度,误差不超过 1°,孔内无岩粉、积水,采用高压风吹洗清理孔内杂物。装药时选用适配的炸药,掏槽孔装药量比周边孔增加 20%~30%,采用连续装药结构,药卷之间紧密接触,起爆时优先引爆掏槽孔,为后续爆破创造自由面。

### 1.2.2 光面爆破技术

光面爆破技术能有效控制隧道开挖轮廓,减少超挖、欠挖,保护围岩完整性,降低初期支护工程量<sup>[2]</sup>。施工单位需根据围岩级别确定光面爆破参数,周边孔间距控制在 40~60 cm,抵抗线为 50~70 cm,炮孔偏斜度不超过 0.5%,孔深与开挖循环进尺一致。周边孔采用间隔装药结构,药卷直径选用 25~32 mm,装药集中度控制在 0.15~0.25 kg/m,采用导爆索起爆,确保周边孔同时起爆。炮孔堵塞选用可塑性好的黏土炮泥或水炮泥,堵塞长度不小于 20 cm,分层捣实,防止炸药爆炸时高压气体过早逸出。爆破完成后,施工单位需及时检查开挖轮廓,超挖部分及时采用喷射混凝土填补,欠挖部分进行补钻爆破,确保开挖断面符合设计要求,同时减少对围岩的扰动。

### 1.3 出渣运输

出渣运输作为洞身开挖的衔接工序,施工单位可采用“挖掘机+装载机+自卸汽车”的出渣运输模式,挖掘机负责掌子面渣体清理,装载机配合将渣体装入自卸汽车,自卸汽车选用载重 15~20 t 的车型,运输路线沿隧道一侧布置,预留另一侧作为施工通道。出渣前需清理运输路线,确保路面平整、无障碍物,运输过程中控制行车速度,隧道内行车速度不超过 5 km/h。施工单位还可在隧道出口设置渣体堆放场,对渣体进行分类堆放,可回收利用的渣体用于隧道回填,剩余渣体按环保要求妥善处置,确保出渣运输高效、有序、环保。

## 2 隧道初期支护施工技术

### 2.1 钢筋网铺设

钢筋网铺设作为初期支护的重要组成部分,能有效分散围岩压力,增强喷射混凝土的整体性与抗裂性能<sup>[3]</sup>。施工单位需选用 HPB300 级  $\Phi 8$  钢筋加工钢筋网,网格尺寸控制在 20 cm $\times$ 20 cm~25 cm $\times$ 25 cm,钢筋调直后采用数控切断机精准下料,切断长度偏差不超过  $\pm 5$  mm,调直后的钢筋直线度偏差不超过全长的 1%。钢筋网采用网片排焊机焊接成型,焊接电流、电压根据钢筋直径设定,焊点牢固,无虚焊、漏焊现象,焊缝长度不小于 10d (d 为钢筋直径)。铺设前清理岩面浮石、灰尘,采用高压风枪吹扫干净,钢筋网铺设紧贴岩面,间距控制在 3~5 cm,搭接长度不小于 30d 且不小于 1 个网格长边尺寸,搭接处采用焊接固定。

### 2.2 喷射混凝土施工

喷射混凝土施工需兼顾强度与密实度,依托快速凝结形成支护层及时约束围岩变形,施工单位需从材料、工艺、操作等多方面把控质量<sup>[4]</sup>。施工单位可选用 C25 喷射混凝土,水泥采用 P.042.5 级普通硅酸盐水泥,骨料选用粒径不超过 15 mm 的碎石,砂采用中砂,含泥量不超过 3%,水灰比控制在 0.45~0.55,添加速凝剂,掺量为水泥用量的 2%~4%,确保混凝土初凝时间不超过 5 min、终凝时间不超过 10 min。采用湿喷法施工,喷射机工作压力控制在 0.3~0.5 MPa,喷头与岩面保持 1~1.5 m 距离,喷射角度垂直于岩面,分层喷射,每层喷射厚度控制在 5~8 cm,前一层混凝土达到设计强度 70% 后再进行下一层喷射,总厚度符合设计要求(一般为 10~15 cm)。喷射过程中及时清理回弹料,回弹率控制在 15% 以内,施工完成后对喷射混凝土表面进行修整,确保表面平整,无裂缝、空鼓现象。

### 2.3 锚杆支护施工

锚杆支护凭借将锚杆植入围岩内部实现围岩与支护体系的协同受力,从而增强围岩稳定性。施工单位需严格控制锚杆选型、钻孔、注浆等关键工序<sup>[5]</sup>。选用 HRB400 级  $\Phi 22$ ~ $\Phi 25$  螺纹钢锚杆,长度根据围岩级别确定,IV 级围岩锚杆长度为 2.5~3.5 m,V 级围岩为 3.5~4.5 m,锚杆间距控制在 1.0~1.2 m,呈梅花形布置。采用潜孔钻钻孔,钻孔直径比锚杆直径大 10~15 mm,钻孔深度比锚杆长度大 10~20 cm,钻孔垂直度误差不超过 1°,钻孔完成后采用高压风吹洗孔内岩粉、积水。注浆采用水泥砂浆,水灰比为 0.5~0.6,注浆压力控制在 0.3~0.5 MPa,采用压力注浆法,

确保注浆饱满,注浆量不小于设计值,锚杆植入后及时固定,待砂浆强度达到设计强度70%以上,方可施加预应力。

#### 2.4 钢架支护施工

钢架支护适用于围岩稳定性较差的段落,能有效承受围岩压力,控制围岩大变形。施工单位需严格控制钢架加工、安装及固定质量。选用I16~I20型钢加工钢架,根据隧道断面尺寸在专用工装台上进行胎模焊接,工装台采用20mm厚钢板制作,主筋冷弯成型后检查弧度,沿隧道周边轮廓误差 $\leq \pm 3$ mm,平面翘曲 $\leq 2$ cm。钢架节段端部焊接连接板,连接板平面与钢架轴线垂直,采用三面焊,焊缝高度 $\geq 10$ mm,连接板上钻孔孔径比螺栓直径大1mm,孔眼中心间距误差 $\leq \pm 0.5$ mm。安装时采用全站仪定位,每隔1m标注一个控制点,钢架安装间距误差 $\leq \pm 100$ mm,同一榀钢架左右、上下偏差 $\leq \pm 50$ mm,倾斜度 $\leq \pm 1^\circ$ ,拱脚位于稳固基岩上,若地质较差可增设槽钢垫块。相邻钢架采用 $\Phi 22$ 螺纹钢作为纵向连接筋,环向间距50cm,焊接牢固,每侧拱脚施作 $\Phi 25$ 中空注浆锁脚锚杆,长度3~4m,与钢架焊接牢固,确保钢架与锚杆、喷射混凝土协同受力。

### 3 开挖与初期支护的协调施工

#### 3.1 步距控制

按照新奥法原理,开挖后应尽早支护,缩短围岩暴露时间。初期支护应紧跟开挖面,仰拱应及时施作以实现封闭成环。初期支护至掌子面的距离一般不宜大于1倍洞径;仰拱与掌子面的距离,IV级围岩不得大于50m,V级及以上围岩不得大于40m。施工单位需结合围岩级别制定专项步距控制方案,安排专人负责掌子面与支护面的距离监测,采用全站仪实时测量,做好记录并及时反馈。对于IV级及以上围岩,严格控制开挖循环进尺,每次进尺不超过2m,开挖完成后2h内必须开展初期支护作业,仰拱施工滞后掌子面的距离严格按规范执行。

#### 3.2 监控量测

高速公路隧道洞身开挖与初期支护过程中,施工单位需组建专业监控量测小组,配备经校验合格的监测设备,根据围岩变形速率确定量测频率,变形速率 $\geq 5$ mm/d时,每天监测2~3次;变形速率1~5mm/d时,每天监测1次;变形速率0.5~1mm/d时,每2~3天监测1次;变形速率0.2~0.5mm/d时,每3天监测1次;变形速率 $< 0.2$ mm/d时,每3~7天监测1次。监测数据及时整理分析,绘制时间—位移曲线,安排

专业技术人员解读数据,当变形速率明显增大或超过预警值时,立即停止开挖,采取增设临时支撑、补打锚杆、加大喷射混凝土厚度等措施加强初期支护,同时修改后续施工方案,待围岩变形趋于稳定后,再恢复施工,确保施工安全。

#### 3.3 超前地质预报

基于高速公路隧道地质的不确定性,施工单位施工时必须坚持“先探测、后施工”的原则。先采用地质雷达(TSP)、红外探水、超前钻探等手段,提前探测掌子面前方30~100m的地质情况,然后结合隧道地质勘察报告,制定分级超前地质预报方案。复杂地段采用TSP地震反射波法结合超前水平钻探,TSP预报距离100~150m,超前钻探钻孔深度 $\geq 30$ m,两次循环钻探搭接长度 $\geq 5$ m。安排专业地质工程师负责预报工作,对探测数据进行解译分析,明确掌子面前方地层岩性、地质构造及不良地质分布情况,若发现断层破碎带、溶洞或涌水突泥风险,及时调整开挖工法,采用超前注浆加固等措施,注浆压力控制在0.5~1.0MPa,待加固达到设计强度后再开展开挖作业,从源头规避地质风险。

### 4 结束语

高速公路隧道洞身开挖与初期支护施工作为一项系统性、复杂性的工程,需兼顾施工安全、质量与效率,强化各工序的协同配合。施工单位要结合隧道围岩实际情况,科学选择开挖工法,优化钻爆参数,规范出渣运输流程,确保开挖施工有序推进;严格控制初期支护各工序质量,做好钢筋网铺设、喷射混凝土、锚杆支护、钢架支护的细节管控,构建可靠的初期支护体系。同时,重视开挖与初期支护的协调施工,严格控制步距、强化监控量测、落实超前地质预报,及时发现并处置施工中的安全隐患,助力高速公路隧道施工技术向更安全、高效、绿色的方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 丁秋柏.公路隧道洞身开挖及支护施工技术分析[J].四川水泥,2025(02):257-259.
- [2] 周银加.公路隧道洞身开挖控制技术研究[J].工程建设与设计,2024(21):218-220.
- [3] 刘鑫.隧道洞身开挖施工技术研究[J].运输经理世界,2022(06):92-94.
- [4] 史雄博.高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施[J].运输经理世界,2021(34):79-81.
- [5] 李科.高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施[J].工程技术研究,2021,06(10):110-111.