

# 隧道管顶预施工工艺及开挖作业技术应用分析

吴 崑 韦 榛

株洲时代新材料科技股份有限公司 湖南 株洲 412000

**【摘 要】** 隧道工程穿越软弱围岩、浅埋及富水地层时，围岩自稳能力差、地表沉降控制难、坍塌风险高，管顶预施工（管棚 / 管幕）作为超前支护核心技术，可提前构建刚性防护拱圈，显著提升围岩稳定性、阻断渗水通道、控制地层变形。本文结合隧道工程实践，系统阐述管顶预施工的工艺原理、关键工序与参数控制，深入分析台阶法、环形开挖预留核心土法、CRD 法等适配开挖技术的作业要点，通过工程数据对比不同工艺组合的应用效果，总结质量控制措施与安全防控策略。研究表明，管顶预施工协同精细化开挖技术，可有效解决复杂地层隧道施工难题，为同类工程提供技术参考与实践借鉴。

**【关键词】** 隧道工程；管顶预施工；管棚；管幕；开挖技术；围岩稳定

## 1 引言

我国隧道建设规模持续扩大，大量隧道穿越软弱破碎、浅埋偏压、富水砂层等复杂地质条件，此类地层围岩强度低、遇水易软化、自稳时间短，传统开挖工艺易引发坍塌、冒顶、地表沉降超标等事故，严重威胁施工安全与周边环境安全。管顶预施工（管棚 / 管幕）技术通过在隧道开挖轮廓线外拱部预设钢管并注浆加固，形成纵向连续、横向成拱的刚性支护体系，提前承载围岩压力、约束地层变形，为后续开挖作业创造安全稳定条件。

当前，管顶预施工与开挖技术的协同应用已成为复杂地层隧道施工的主流方案，但部分工程存在管顶施工精度不足、注浆效果不佳、开挖工序衔接不当、参数匹配不合理等问题，导致支护失效、病害频发。因此，系统探析管顶预施工工艺及配套开挖作业技术，明确关键工序控制要点与参数标准，对提升复杂地层隧道施工质量、保障施工安全、控制工程成本具有重要工程价值。

## 2 隧道管顶预施工工艺原理与分类

### 2.1 工艺原理

管顶预施工（管棚 / 管幕）属于超前预支护技术，核心原理为：在隧道洞口或掌子面拱部，沿开挖轮廓线外一定范围，按设计间距与外插角钻孔，顶入大直径钢管（钢花管），通过钢管向周边围岩注入水泥浆或水泥 - 水玻璃双液浆，浆液扩散填充围岩裂隙，将松散岩体胶结成整体，与钢管共同形成“钢管 - 注浆结石体”复合支护拱圈。该拱圈具有刚度大、整体性强、防渗性能好等特点，可提前承受上方围岩荷载，阻断雨水渗透路径，限制围岩变形，为隧道开挖提供“安全防护壳”，遵循“管超前、严注浆、短进尺、强支护、快封闭、勤量测”的施工原则。

### 2.2 技术分类

根据钢管直径、布置形式与支护刚度，管顶预施工可分为超前小导管、大管棚、管幕三类，适配不同地质条件与工程需求：

超前小导管：钢管直径  $\phi 42 \sim 50\text{mm}$ ，长度  $3 \sim 5\text{m}$ ，环向间距  $30 \sim 50\text{cm}$ ，外插角  $5^\circ \sim 10^\circ$ ，适用于 IV~V 级围岩、浅埋段及局部破碎带，支护刚度较小，侧重浅层加固与防渗。

大管棚：钢管直径  $\phi 89 \sim 159\text{mm}$ ，长度  $10 \sim 30\text{m}$ ，环向间距  $30 \sim 50\text{cm}$ ，外插角  $1^\circ \sim 3^\circ$ ，沿拱部  $120^\circ \sim 180^\circ$  范围布置，适用于 V~VI 级软弱围岩、浅埋富水地层、临近建构筑物段，支护刚度大，可有效控制地表沉降。

管幕：钢管直径  $\geq 180\text{mm}$ ，长度  $30 \sim 50\text{m}$ ，环向密排（间距  $\leq 20\text{cm}$ ），钢管间锁口连接形成封闭帷幕，适用于超浅埋、富水砂层、城市核心区对沉降要求极严格的工程，可作为永久支护结构。

## 3 隧道管顶预施工关键工艺与参数控制

### 3.1 施工准备

#### 3.1.1 地质勘察与方案设计

详细勘察施工区域地层岩性、围岩等级、地下水分布、不良地质（断层、溶洞）发育情况，结合隧道断面尺寸、埋深及周边环境要求，确定管顶预施工类型、钢管参数、外插角、环向间距、注浆材料及压力。

#### 3.1.2 导向墙施工

导向墙是管棚施工的定位基础，采用 C20 喷射混凝土或模筑混凝土浇筑，厚度  $80 \sim 100\text{cm}$ ，内部埋设 I18~I22 型钢拱架，拱架上按设计间距预埋  $\phi 127 \sim 168\text{mm}$  孔口管（导向管），外插角与设计一致，确保钻孔精度。



隧道管棚导向墙施工

## 3.2 钻孔作业

### 3.2.1 设备选型

采用地质钻机或专用管棚钻机，配备角度调节器与导向装置，确保钻孔角度精准；破碎地层采用跟管钻进工艺，防止塌孔。

### 3.2.2 钻孔参数控制

孔径：比钢管直径大 15~20mm，便于钢管顶入；

孔深：设计长度 + 30~50cm，保证钢管完全顶入；

外插角：1°~3°（大管棚），偏差≤0.5°，防止侵入开挖轮廓或支护盲区；

钻孔顺序：采用跳孔施工，从两侧向中间推进，间隔 1~2 个孔位作业，避免相邻钻孔扰动塌孔。

## 3.3 钢管制作与安装

### 3.3.1 钢管制作

采用无缝钢管，管壁钻  $\Phi 6\sim 8\text{mm}$  注浆孔，间距 20~30cm，呈梅花形布置，前端加工成锥形便于顶进，后端焊接法兰盘连接注浆管路。

### 3.3.2 钢管顶入

采用钻机顶进或千斤顶顶推，顶进过程中实时监测钢管角度与位置，发现偏差及时调整；钢管接长采用丝扣连接或焊接，焊接处做好防渗处理，确保密封性。

## 3.4 注浆作业

### 3.4.1 浆液选择

普通地层：采用水泥浆，水灰比 0.8~1.0，成本低、强度高；

富水地层：采用水泥 - 水玻璃双液浆，水灰比 0.8~1.0，水玻璃浓度 35~40° Bé，凝胶时间 30~60s，防渗效果好。

### 3.4.2 注浆参数控制

注浆压力：初压 0.5~1.0MPa，终压 1.5~2.0MPa，压力过

大易导致地表隆起，过小则注浆不饱满；

注浆顺序：由下至上、由两侧向中间，防止窜浆；

结束标准：压力升至终压后持续 5min，且进浆量 < 0.5L/min，确保浆液填充密实。

## 3.5 质量验收

管顶预施工完成后，采用地质雷达检测注浆密实度，钻孔取芯检查结石体强度（≥5MPa），实测钢管位置与角度偏差，合格后方可进入开挖工序。

## 4 管顶预施工条件下隧道开挖作业技术

管顶预施工为隧道开挖提供安全保障，需根据围岩等级、断面尺寸与支护刚度，选择适配开挖工法，遵循“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭”原则，减少对围岩的扰动。

### 4.1 环形开挖预留核心土法

#### 4.1.1 适用条件

V 级及以上软弱围岩、浅埋段、大断面隧道，地表沉降控制要求严格的工程。

#### 4.1.2 作业要点

将隧道断面分为拱部环形、核心土、下部台阶三部分，开挖顺序：拱部环形→核心土→下部台阶，每循环进尺 0.5~1.0m；拱部环形开挖后立即施作初期支护（钢拱架 + 喷射混凝土 + 钢筋网），封闭成环；核心土预留长度 3~5m，保持掌子面稳定；下部台阶开挖后及时施作边墙支护，全断面封闭成环。



## 4.2 台阶法

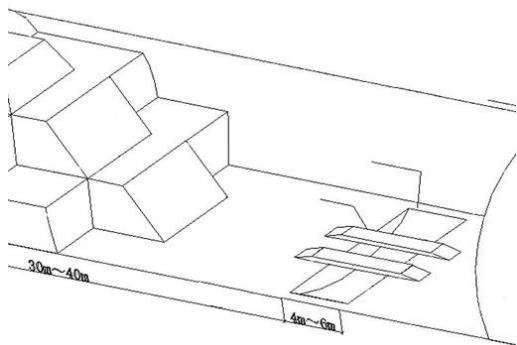
### 4.2.1 适用条件

IV 级围岩、中等稳定地层，中小断面隧道，施工效率要求较高的工程。

### 4.2.2 作业要点

将断面分为上、下两个台阶，上台阶高度 2.5~3.5m，下台阶高度 3.0~4.0m，台阶长度 5~8m；上台阶采用人工配合小型机械开挖，每循环进尺 1.0~1.5m，开挖后立即施作拱部支护；

下台阶滞后上台阶 3~5m 开挖，左右侧错开 2~3m，避免对称开挖导致拱架失稳；支护紧跟开挖面，及时封闭成环。



隧道台阶法开挖示意图

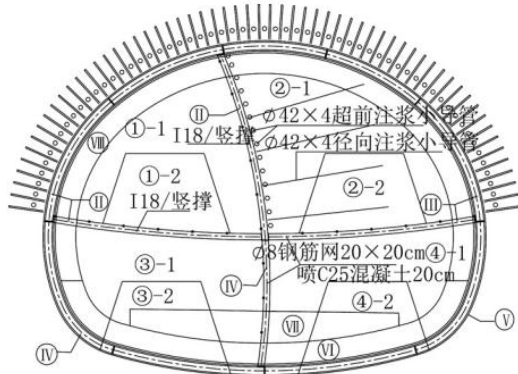
### 4.3 CRD 法（交叉中隔壁法）

#### 4.3.1 适用条件

V~VI 级富水软弱围岩、超大断面隧道、临近重要建构筑物，沉降控制极严格的工程。

#### 4.3.2 作业要点

将断面分为左、右、上、下四个导洞，开挖顺序：左上→右上→左下→右下，每导洞循环进尺 0.5~0.8m；每个导洞开挖后立即施作初期支护与临时中隔壁、横隔板，形成封闭网格体系；临时支护采用 I16~I18 型钢，喷射混凝土厚度 20~25cm；待初期支护稳定后，分段拆除临时支护，施作二次衬砌。



### 4.4 钻爆法开挖控制（硬岩段）

管顶预施工后，硬岩段采用光面爆破技术，减少对围岩与管棚的扰动：

炮孔布置：周边眼间距 40~50cm，最小抵抗线 50~60cm，采用间隔装药；

装药量：单孔装药量按围岩硬度系数调整，软岩 0.3~0.5kg/m，硬岩 0.8~1.0kg/m；

起爆顺序：掏槽眼→辅助眼→周边眼，段间间隔 50~100ms，控制爆破振动速度≤5cm/s，避免管棚变形受损。

## 5 工程应用效果对比与分析

### 5.1 工程概况

某山区隧道全长 1850m，进口段 300m 为浅埋段，埋深 8~15m，围岩为 V 级破碎砂岩，含少量地下水，地表为居民区，沉降控制要求≤30mm。采用  $\phi 108\text{mm}$  大管棚预支护（长度 25m，环向间距 40cm，外插角  $2^\circ$ ），开挖段采用环形开挖预留核心土法，循环进尺 0.8m。

### 5.2 不同工艺组合效果对比

选取该隧道进口段（管棚 + 环形开挖）、中段（无管棚 + 台阶法）、出口段（小导管 + 台阶法）各 100m，从地表沉降、围岩收敛、施工效率、病害率四个维度对比，结果如下：

表 1 不同支护 - 开挖组合应用效果对比

| 工艺组合       | 地表沉降 (mm) | 围岩收敛 (mm/d) | 月进尺 (m) | 病害率 (%) |
|------------|-----------|-------------|---------|---------|
| 大管棚 + 环形开挖 | 15~22     | 0.5~1.0     | 65      | 2.1     |
| 无管棚 + 台阶法  | 35~48     | 2.5~3.5     | 85      | 12.8    |
| 小导管 + 台阶法  | 25~32     | 1.5~2.0     | 78      | 6.5     |

### 5.3 效果分析

（1）沉降控制：大管棚预支护刚度大，可有效约束地层变形，地表沉降较无管棚段降低 50% 以上，满足居民区沉降要求；小导管支护效果次之，无管棚段沉降超标风险高。

（2）围岩稳定：管棚 + 环形开挖组合下，围岩收敛速率低，无明显失稳迹象；无管棚段围岩收敛快，易出现裂缝、掉块，病害率显著升高。

（3）施工效率：管棚施工增加前期工序，月进尺略低于无管棚段，但病害率低，减少返工成本，综合效益更优；小导管施工便捷，效率介于两者之间。

## 6 质量控制与安全保障措施

### 6.1 质量控制措施

（1）材料质量管控：钢管、水泥、水玻璃等原材料需进场检验，钢管材质符合 Q235B 标准，水泥强度等级≥42.5MPa，杜绝不合格材料使用。

（2）施工精度控制：管棚钻孔角度偏差≤0.5°，钢管位置偏差≤5cm；注浆压力与进浆量实时监测，确保注浆饱满；开挖轮廓采用激光放样，超欠挖控制在 ±10cm 内。

（3）监测反馈控制：布设地表沉降、围岩收敛、拱顶下沉监测点，频率 1 次 /d，数据异常时加密监测；根据监测数据动态调整开挖进尺与支护参数，实现信息化施工。

### 6.2 安全保障措施

(1) 超前地质预报: 采用 TSP、地质雷达、超前钻探等手段, 探明前方不良地质, 提前制定应对措施。

(2) 坍塌风险防控: 严格控制开挖进尺, 支护紧跟开挖面; 破碎地层缩短循环进尺至 0.5m, 及时封闭成环; 严禁超挖, 避免围岩暴露时间过长。

(3) 地下水防控: 富水地层采用管棚注浆堵水, 必要时增设超前小导管注浆; 施工中配备排水系统, 及时排出洞内积水, 防止围岩软化。

## 7 结论

隧道管顶预施工(管棚 / 管幕)技术通过预设钢管与注浆加固, 形成刚性超前支护体系, 可显著提升软弱、浅埋、富水地层围岩稳定性, 有效控制地表沉降与围岩变形, 为隧道开挖创造安全施工条件。环形开挖预留核心土法、台阶法、CRD 法

等开挖技术需与管顶预施工刚度匹配, 遵循“短进尺、弱扰动、强支护、快封闭”原则, 减少对围岩的二次扰动。

工程实践表明, 大管棚 + 环形开挖组合在复杂地层中应用效果最优, 地表沉降与围岩收敛控制效果显著, 病害率低, 综合效益突出; 小导管 + 台阶法适用于中等复杂地层, 兼顾效率与安全; 无超前支护工艺仅适用于稳定地层, 复杂地层应用风险高。

施工中需严格管控管顶预施工钻孔、钢管安装、注浆等关键工序精度, 选择适配开挖工法, 强化质量监测与安全防护, 实现管顶预施工与开挖作业的高效协同。未来, 可结合智能化钻孔、自动化注浆、数值模拟优化参数等技术, 进一步提升复杂地层隧道施工的智能化与精细化水平。

## 参考文献:

- [1] 交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG F60—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 交通运输部. 公路隧道超前支护技术规程: JTG/T D70—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [3] 王梦恕. 中国隧道与地下工程修建技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [4] 李术才, 张顶立. 隧道软弱围岩超前支护理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [5] 赵勇, 刘志强. 浅埋暗挖隧道管棚施工关键技术研究 [J]. 隧道建设, 2022, 42 (5): 821-828.
- [6] 陈卫忠, 杨建平. 富水软岩隧道管幕预支护与 CRD 开挖技术应用 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (3): 589-596.
- [7] 张军, 王亮. 山区浅埋隧道大管棚 + 环形开挖施工技术 [J]. 施工技术, 2024, 53 (8): 102-105. [8] 刘辉, 陈明. 隧道管棚注浆参数优化及应用效果分析 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (2): 156-162.