

# 高铁隧道施工中的洞内超前支护技术要求探究

王楠

中铁二十局集团第四工程有限公司

**摘要：**高铁隧道由于开挖断面大、埋深浅、围岩松动等特点，对隧道施工的安全和质量提出较高要求。超前支护技术可提高围岩的稳定性，减少变形沉降，保证施工安全。基于此，本文介绍了超前支护的基本概念、主要形式，以某高铁隧道为例，详细阐述了大管棚超前支护的施工工艺及施工技术要点，利用数值模拟方法分析了大管棚超前支护对围岩应力、位移的影响，旨在为高铁隧道施工提供参考。

**关键词：**高铁隧道；隧道施工；超前支护；支护技术；大管棚

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.22.062

## 引言

高铁隧道与普通铁路隧道相比，有其特殊性，如开挖断面较大（平均152m<sup>2</sup>），埋深较浅（平均50m），围岩松动（多为Ⅲ级以上），列车运行速度较高（时速350km/h）等<sup>[1]</sup>。因此，高铁隧道施工的安全质量要求较高，需严格控制隧道围岩变形沉降，防止坍塌、冒顶，保证衬砌结构的耐久性、抗渗性等。为了满足这些要求，隧道施工必须采用先进的支护技术，其中超前支护是一种有效的隧道施工支护技术，该技术在高铁隧道工程中被广泛应用，对于保证隧道施工安全，提高施工质量具有重要意义。

## 一、超前支护技术概述

超前支护技术是一种在隧道开挖工作面之前，对围岩进行加固或支撑的技术措施，旨在提高围岩的稳定性，减少变形和沉降，保证工作面的安全和质量。超前支护技术主要包括以下几种形式：

(1) 超前锚杆或超前小导管：利用锚杆或小导管锚固前方围岩的方法，一般长度为3~5m，适用于围岩自稳性较好的情况。超前锚杆或小导管可以提高围岩的抗剪强度，防止局部破坏塌方<sup>[2]</sup>。

(2) 超前管棚：由钢管和钢拱架组成的结构，顶入前方围岩的方法，适用于围岩自稳性较差的情况<sup>[3]</sup>。超前管棚可以形成一个刚性的空间结构，承受较大的荷载和变形，保护工作面不受外部扰动。

(3) 超前预注浆：通过深孔注浆或小导管注浆等方法，对前方围岩进行灌浆加固的方法，适用于含水或破碎的地层。超前预注浆可以改善围岩的物理和力学性质，增加其密实度和强度，阻止水土流失<sup>[4]</sup>。

超前支护技术的选用需根据地质条件，地下水状况，施工方法，环境要求等因素综合考虑，进行现场试验、数值模拟分析，以确定合理的支护方式及是施工参数。

## 二、工程概况

某高铁隧道全长738.4m，埋深最小10m，属于浅埋隧道。在秦岭中山区，古近系砾岩，泥质弱胶结，通过区域性断层F2-1断层破碎带，围岩松动，受雨水浸入影响，抗剪强度降低。为控制围岩变形，采用大管棚注浆技术，即在围岩中打入钢管，在钢管内注入水泥浆，形成稳定的支护结构。同时，由于浅埋部分的稳定性差，容易坍塌，且隧道断面面积较大，故采用三台阶法分段

开挖隧道，结合大管棚注浆技术加固围岩。图1为该隧道大管棚超前支护施工示意图。

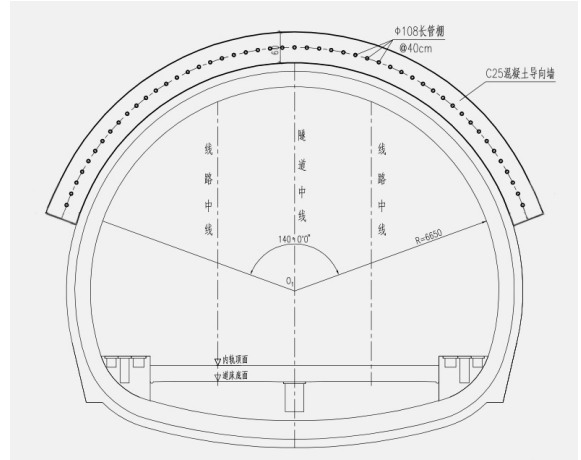


图1 管棚超前支护施工

## 三、大管棚超前支护施工技术分析

### (一) 施工工艺

大管棚超前支护施工流程如图1所示。

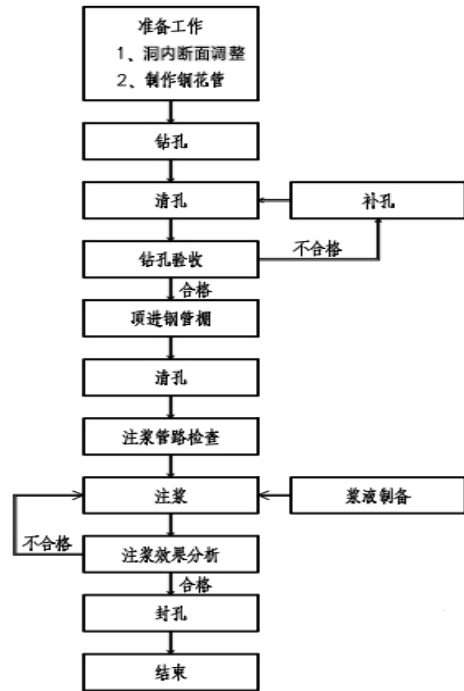


图2 管棚超前支护施工流程

### (1) 洞内管棚断面调整

在进入管棚施工里程前，根据施工工艺进行隧道初支断面调整，断面增大600-800mm，确保有管棚机械钻孔和管棚安装施工工作面。

### (2) 管棚制作

管棚是由钢管、钢拱架组成的结构。钢管选用直径108mm，壁厚6mm的无缝钢管，长度30米<sup>[5]</sup>。钢管入土

端应制作成尖靴状或楔形,以便顶入围岩。钢管末端设止水圈、止浆塞,以防止浆液外溢。钢管开设若干溢浆孔,以便灌水泥砂浆。钢拱架是由工字钢和钢板焊接而成的拱形结构,用于连接固定钢管。钢拱架的尺寸、形状应根据隧道断面和施工设计要求确定<sup>[6]</sup>。

### (3) 搭建作业平台

作业平台是用于安装钻机和顶进钢管的临时结构,一般采用洞渣临时填筑,距离掌子面约1.5~2m。作业平台的高度应根据钻机的尺寸和操作要求确定,一般为2~3m<sup>[7]</sup>。作业平台应有足够的强度和稳定性,以承受钻机和钢管的重量和作用力。

### (4) 测量放线

测量放线是指根据施工设计要求,在作业平台上标出钻孔的位置和方向的过程。测量放线应采用专业的测量仪器和工具,如水准仪、经纬仪、激光仪等,以保证测量的准确性和可靠性。测量放线应按照施工设计要求,确定钻孔的数量、间距、角度、深度等参数,并在作业平台上做好相应的标记。

### (5) 钻机就位

按照测量放线结果将钻杆对准标记位置,固定好钻机。基于3D坐标测量数据调整钻机后端水平、垂直角,确保满足导轨调平误差不超过±3mm、四方误差不超过±5mm的精度要求。钻机的功率、扭矩、冲击频率等参数应满足顶进钢管要求。钻杆直径应比设计管棚直径大20~30mm。钻杆长度应与循环进尺相适应,一般为1.5~2m<sup>[8]</sup>。

### (6) 钻孔与清孔

钻孔时控制好钻孔的方向、角度、深度等参数,钻孔径向误差不超过20cm,角度误差不超过1°。及时检查钻杆磨损情况。注意观察围岩的性质、裂隙、涌水等情况,做好记录。清孔时采用适当的冲洗介质,如水、泥浆、空气等,以保证钻孔质量。钻孔结束后用专用清孔器具清理干净孔内的碎石、泥浆,以便顶进钢管。

### (7) 管棚安装

采用顶进方式将钢管顶入钻孔中,与钢拱架连接形成管棚结构。按照施工设计要求选择合适的顶进方式,该隧道采用单管顶进方式,每次只顶进一根钢管。顶进过程中用测斜仪控制上仰角度,保证钢管的方向、位置。合理确定钢管的长度、搭接方式。采用丝扣方式连接钢管。双向相邻管棚的搭接长度不小于3m。钢拱架采用螺栓连接方式连接。安装管棚时需确保钢管在同一轴线上,分节钢管长度范围4~6m,同截面钢管接头数量不超过50%,同时相邻钢管接缝偏离1mm<sup>[9]</sup>。

### (8) 浆液灌注

管棚、钢筋笼安装完毕后,进行止浆阀焊接,浆液采用水灰比1:1水泥浆,应随用随拌,在初凝前全部用完,使用掺速凝剂时,一次拌制数量不应多于3个孔,以免时间过长,使浆液在泵、管中凝结。

一切就绪后,慢慢打开止浆阀阀门开始注浆,从高到低按孔位顺序跳孔注浆。先稀后浓,压力为0.5~1.5Mpa,将浆液不断压入管内,使浆液从溢浆孔内流出,管体与钻孔间应压浆密实,直至压力值升高,且恒压不变后结束注浆。压力表值增大时发现不满须拔出重新注浆。

注浆完成后及时用M10砂浆再次填充管体并封孔,增加钢管强度,由于管棚间距较小,成孔后需尽快注浆,避免多孔注浆导致浆液串孔,造成相邻钢管堵塞。

## (二) 数值模拟

### (1) 隧道建模

采用FLAC3D软件,根据实际工程参数,建立长为100m,宽为30m,高为30m的计算模型,模型中包含围岩、隧道、支护结构三部分。围岩采用八面体网格划分,共有29691个单元,每个单元的尺寸为0.5m×0.5m×0.5m。采用Mohr-Coulomb本构模型描述其力学行为。隧道断面形状为马蹄形,跨度为11.81m,高度为11.74m,埋深15m。隧道的轴线方向与X轴平行,中心点坐标为(50, 15, 15)。

### (2) 支护结构模拟分析

对该高铁隧道的支护结构进行模拟分析,主要考察钢管的受力情况、变形规律。为模拟钢管的力学性能,采用梁单元,即将钢管简化为一维的弯曲梁,忽略其轴向变形<sup>[11]</sup>。钢管端部被认为是固定支座,即不能移动也不能转动。该隧道采用无缝钢管作为支护材料,其直径为108mm,每个拱的长度为10m,间距为0.5m。无缝钢管的布置图如图3所示

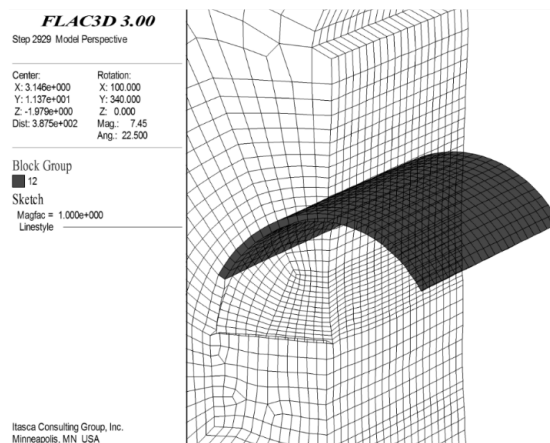


图3 钢管布置

采用等效弹性模量方法,即将水泥浆、钢管视为一个整体,用等效弹性模量表示其刚度<sup>[12]</sup>,换算后管棚弹性模量的计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$E = \frac{E_s S_s + E_g S_g + E_r S_r}{S_s + S_g + S_r}$$

式中,  $E$  为换算后管棚弹性模量;  $S$  为管棚截面面积;  $E_s$  为管棚钢管弹性模量;  $S_s$  为管棚钢管截面面积;  $E_g$  为混凝土截面面积;  $S_g$  为混凝土弹性模量,为  $1.5 \times 10^{10}$  Pa;  $E_r$  为钢筋截面面积;  $S_r$  为钢筋弹性模量。

由于钢管内部注入了水泥浆,形成坚固的管棚结构,因此在模拟分析中,需考虑水泥浆对钢管的影响,增大结构参数,根据浆液的扩散半径、相邻两注浆孔的间距,计算出水泥浆在围岩中形成的厚度。注浆厚度计算公式如下:

$$D = 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2}$$

式中,  $D$  为注浆厚度;  $R$  为浆液扩散半径;  $S$  为相邻两注浆孔间距。通过计算,得到管棚加固有效厚度59cm、管棚支护参数,如表1所示。

### (3) 施工步骤模拟分析

对高铁隧道的施工过程进行模拟分析,主要考察隧道的位移、沉降变化。采用大管棚单元、注浆壳单元分

表1 管棚支护参数

单元	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	X轴惯性矩/m <sup>4</sup>
管棚梁单元	4830	97.21	0.35	3.089×10 <sup>-6</sup>
初支壳单元	2500	32.10	0.30	2.30×10 <sup>-3</sup>
仰拱壳单元	2500	47.09	0.30	6.77×10 <sup>-4</sup>

别表示钢管、水泥浆的作用。隧道开挖采用台阶法，即分上下两个台阶进行开挖，在每个台阶上设置支撑。为模拟隧道的仰拱封闭过程，在上台阶围岩上设置壳单元支撑，在下台阶上设置临时仰拱壳单元。施工模拟步骤如下：

第一步，模型中添加大管棚单元、注浆壳单元，形成隧道的超前支护结构。

第二步，在上台阶围岩上设置壳单元支撑，增强围岩的稳定性。

第三步，进行下台阶开挖，并在下台阶上添加支撑，完成隧道的主体开挖。

第四步，在下台阶上设置临时仰拱壳单元，形成隧道的初步封闭结构。

第五步，进行仰拱封闭，完成隧道的最终封闭结构。

为评估隧道的位移变化，在每个施工步骤后进行位移计算，计算结果显示随着施工的进行，隧道的位移逐渐减小，并趋于稳定。

为评估超前支护技术应用效果，隧道拱顶每隔1m设置监测点，每个施工步骤后进行沉降监测，监测结果如图4所示

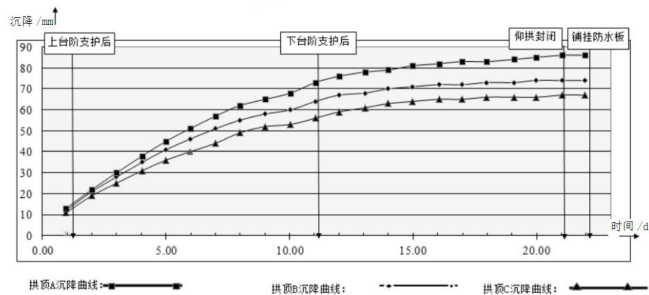


图4 沉降监测结果

根据图4可知，A、B、C三点分别为第1m、第10m和第20m处的监测点。其中横坐标是施工步骤，纵坐标是沉降量。A、B、C三点的沉降量分别为86.4mm、74.5mm和67.8mm，在上台阶支护后至下台阶支护后，A、B、C三点的沉降量有所减小，分别为73.5mm、64.4mm和56.4mm，表明此时围岩的变形较大，隧道稳定性较差。A、B、C三点的沉降量在下台阶支护至仰拱封闭阶段进一步减小，分别为13.2mm、10.2mm和11.1mm，表明此时围岩的变形有所缓解，隧道的稳定性有所提高。A、B、C三点的沉降量在封闭仰拱后都为0，表明此时围岩的变形基本停止，此时围岩已经完全稳定，隧道已经达到最终封闭状态。

(4) 管棚受力分析

对管棚结构在不同施工阶段、不同围岩条件下的内力、变形进行计算评价，检验其安全性和合理性。将大管棚结构划分为梁单元和注浆壳单元，分别计算其弯矩、应力分布情况。计算结果显示最大弯矩、最大应力位置在隧道前方未开挖阶段，距隧道3~6m处，主要原因是该位置大管棚承受了最大的围岩压力，且没有得到

隧道衬砌支撑。随着隧道开挖的进行，大管棚的弯矩、应力逐渐减小，并向隧道后方移动，原因是隧道开挖导致围岩压力重新分布，且隧道衬砌提供了一定的支撑作用。大管棚的弯矩、应力均呈现出一定的波动性，这是由于大管棚与围岩之间存在着间隙、摩擦，导致其受到周期性的冲击滑移。因此需要及时监测和评估，及时采取措施进行加固或修复。

结论

超前支护技术是一种在隧道开挖工作面之前，对围岩进行加固或支撑的技术措施，提高围岩的稳定性，减少变形和沉降，保证工作面的安全和质量。高铁隧道施工中的超前支护需综合考虑地质条件、施工方法、环境要求等因素。超前支护技术主要包括超前锚杆或超前小导管、超前管棚、超前预注浆等形式，其选用需根据现场试验、数值模拟分析确定合理的支护方式及施工参数。本文以某高铁隧道为例，详细阐述了大管棚超前支护的施工工艺及施工技术要点，并利用FLAC3D软件对大管棚超前支护的受力情况、变形规律进行了数值模拟分析，结果表明大管棚超前支护能有效地控制围岩变形，提高隧道稳定性。本文为高铁隧道施工提供了一种有效的支护技术方案。

参考文献

[1] 王岩. 铁路隧道超前以及初期支护施工技术[J]. 设备管理与维修, 2019(3): 144-146.  
 [2] 张哲. 长大管棚超前支护在铁路隧道洞口施工中的应用[J]. 智能城市, 2021, 7(19): 145-146.  
 [3] 张忠. 黄土地区浅埋大断面铁路隧道不同超前支护影响分析[J]. 市政技术, 2023, 41(7): 176-181.  
 [4] 刘海林. 铁路隧道大管棚超前支护施工过程分析[J]. 工程技术研究, 2021, 6(21): 10-13.  
 [5] 黄华, 张永厚. 超前加固支护技术在改建铁路隧道洞门施工中的应用[J]. 铁道建筑, 2010(4): 48-49.  
 [6] 崔光耀, 朱建伟, 姜冲, 等. 富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固方案研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 27-31.  
 [7] 张小君. 铁路黄岩隧道注浆和超前支护施工方法的应用[J]. 工程建设与设计, 2018(13): 281-282, 285.  
 [8] 何毅. 成昆铁路丙满隧道超前及初期支护中的关键施工方法[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2015, 14(2): 1-6.  
 [9] 施英, 罗春. 隧道管棚超前支护作用机理及其影响因素研究[J]. 人民长江, 2022, 53(11): 130-135.  
 [10] 束仁政. 川藏铁路康定2号隧道超前管棚支护对围岩变形控制的影响研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(24): 2078-2079.  
 [11] 徐镓. 软岩隧道在超前支护作用下的力学性能分析[J]. 市政技术, 2021, 39(3): 78-81.  
 [12] 石钰锋, 郭杰森, 耿大新, 等. 注浆饱满度对隧道管棚力学特性影响的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1735-1742.