

## 公路隧道工程中的小净距隧道施工技术

梁瑞利

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]我国是一个多山地丘陵的大国，在多山地带开掘隧道，是缩短公路里程、缩减交流耗时的重要工程方式。小净距隧道施工技术作为一种适用性强的隧道结构，在我国有广泛的应用。文中围绕小净距隧道施工的稳定性、安全性和施工效率需求，阐述了一个连续的、稳定为先的小净距隧道施工技术链条，为小净距隧道施工的作业开展提供技术支持。

[关键词]公路；隧道；小净距；施工技术；中夹岩柱

DOI: 10.33142/aem.v7i8.17742 中图分类号: U45

文献标识码: A

## Construction Technology of Small Clearance Tunnels in Highway Tunnel Engineering

LIANG Ruili

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** China is a large country with many mountains and hills. Excavating tunnels in mountainous areas is an important engineering method to shorten the mileage of highways and reduce communication time. The construction technology of small clearance tunnels, as a highly applicable tunnel structure, is widely used in China. The article focuses on the stability, safety, and construction efficiency requirements of small clearance tunnel construction, and elaborates on a continuous and stable construction technology chain for small clearance tunnel construction, providing technical support for the operation of small clearance tunnel construction.

**Keywords:** highway; tunnel; small clearance distance; construction technology; intermediate rock column

### 引言

我国是一个地形地貌复杂、多山地的大国，山会影响公路的修建走向，影响联通两地之间的路途长短、危险系数。为了保证山区公路交通的通畅，隧道是公路路线上常见的工程形式之一，可以有效缩短公路总长度，缩短两地交通的耗时。小净距隧道是一种能够满足复杂地形公路设计的隧道工程模式，是一种左右洞的中夹岩柱的厚度为隧道开挖洞直径一定倍数的隧道，左右洞的净距小，开挖时互相影响大。随着公路建设的快速发展，公路线形设计要求逐步提高，隧道之间的净距越来越小。

### 1 小净距隧道概述

在公路隧道工程建设领域，小净距隧道作为一种特殊且重要的隧道结构形式，其净间距通常处于 2-20m 的范围，巧妙地介于普通分离式隧道和连拱隧道之间<sup>[1]</sup>。这种独特的结构特性，使小净距隧道在实际的公路工程应用中具备诸多优势。一方面，小净距隧道对地形条件和总体线路型的适应性比其他隧道结构形式强，能够在我国复杂的地理环境中灵活进行公路线路布局，有效降低了线路规划和建设的难度；另一方面，能充分发挥双洞中间岩柱的承载作用，在保证隧道结构稳定性的同时，有效降低了接线难度，缩短了公路隧道工程的施工周期，控制了公路隧道工程的施工成本。因此，小净距隧道在我国的公路交通建设中被广泛应用。

小净距隧道在公路工程中应用时，也面临着一些不容忽视的挑战。由于小净距隧道特殊的结构，在施工过程中

应力分布情况较为复杂，隧道的变形控制难度较大。所以，小净距隧道的施工安全性和稳定性容易受到影响。比如，在隧道开挖过程中，周边围岩的应力状态会发生改变，伴随着较高的围岩变形、坍塌等风险。中夹岩柱作为连接两个隧道的关键部位，其受力情况复杂，容易出现应力集中的情况。若中夹岩柱的处理不当，将直接影响整个小净距隧道结构的稳定性。

### 2 公路隧道工程中小净距隧道施工技术

#### 2.1 超前预报和支护技术

识别地质风险、提前做好支护，是公路隧道工程施工保证安全的关键。小净距隧道这样结构特殊、力学情况复杂的工程，需提前做好优化和安全工作。

##### 2.1.1 超前预报

超前预报的目的是提前识别前方的地质构造和不良地质体，为施工方案的调整和风险防范提供依据。常用的超前预报方法包括：

掌子面地质调查是最基础、最直接的超前预报方法。施工技术人员在每次开挖作业完成后，及时对掌子面进行详细的地质观察和记录，重点观察掌子面岩性、岩层产状、节理裂隙发育情况、地下水出露情况等。通过对掌子面地质特征的分析，技术人员可以初步判断前方地层的稳定性，可以初步预测前方可能存在的不良地质现象。比如，地质观察掌子面时，发现掌子面的岩层破碎、节理裂隙密集且有地下水渗出，可以初步判断前方存在断层破碎带或富水地层，需要采取相应的防范措施。

地质雷达探测是一种利用高频电磁波探测前方地质情况的无损检测技术，利用的是高频电磁波在不同介质中的不同传播速度和反射特性。地质雷达探测具有检测速度快、分辨率高、操作简便等优点，能够有效发现前方岩层中的断层、溶洞、地下水富集区等不良地质体的存在，还能探测到位置和规模。

超前钻探是一种直接在隧道掌子面或侧壁钻孔，获取孔内的岩芯样品和地质信息的超前预报方法，预报结果准确率较高。超前钻探可以分为水平钻探和垂直钻探两种方式，在实际应用中需根据隧道的实际情况进行选择。在钻探过程中，技术人员要详细记录钻孔的深度、岩芯采取率、岩层变化情况、地下水出露位置、地下水水量等信息，并对岩芯样品进行试验室分析，确定岩石的物理力学性质，为施工方案的优化提供准确的地质参数。

### 2.1.2 超前支护技术

超前支护技术是在隧道开挖前，结合超前预报所获得信息，对前方围岩进行提前加固和支护的技术，能够提高小净距隧道围岩的稳定性，降低出现坍塌、涌水等事故的风险。常用的超前支护技术包括：

长管棚注浆超前支护技术是沿隧道的开挖轮廓线，保持一定间距向开挖面前方预先钻设惯性矩较大的厚壁钢管，尽量减少外插角，使形成的管棚能够兼顾支撑及注浆的技术。钢管强度和性能很重要，技术人员需根据隧道工程需求严格控制材料参数，并在接头位置错开长度约2m，注意不得在尾端2m范围内布设纸浆钻孔<sup>[2]</sup>。再用注入浆液的方式加固前方岩体，提高隧道开挖轮廓的整体稳定性和围岩的强度，降低开挖过程中岩体局部坍塌变形、土层坍塌、地表下沉等现象出现的概率。用于加固岩体的注浆水灰比控制在0.5:1，压力控制在0.5~1.5MPa。由于施工场地较为狭窄，采用钻机进行送管，然后将三通构造的注浆管与其焊接；采用全孔灌浆技术将水玻璃浆液一次性注入到位，遵循先无水孔、后有水孔的原则，以对称的形式逐步推进施工。长管棚注浆超前支护技术主要应用于隧道进口和出口，有适用性强、进尺长、刚度大等优势，可有效控制开挖沉降。

小导管注浆超前支护技术是将具有渗洞的小导管打入隧道岩体中，通过注浆泵的压力使水泥浆液扩散到岩体孔圈和裂隙中，形成一层止水、稳定的承载壳的技术。小导管不仅能起到超前锚杆的作用，还能改善围岩的力学性能，控制地层松动、变形等问题。小导管注浆超前支护技术的优势在于，加固效果好、成本可控、操作方便、可缩短开挖时间等，在公路隧道的V级和IV级围岩段应用广泛。V级围岩环向间距为350mm，IV级围岩为400mm，外插角宜为10~15°<sup>[3]</sup>，可根据实际情况调整。小导管注浆超前支护技术分为双层小导管和单侧小导管，需根据现场实际施工需求进行选择。小导管注浆的施工流程为施工

准备→测量并设置孔位→钻机就位→钻孔清孔→孔位检验→顶入小导管→封闭→安装止浆塞→注浆。注浆时遵循先两侧后中间、跳孔注浆、由稀到浓的原则，注浆压力控制在0.5~1.5MPa，要求提前通过压水试验确认注浆效果。为了控制串浆和跑浆等不良情况，施工现场可采用群管注浆的方式，工作人员必须实时关注泵口及孔口的压力变化情况。

## 2.2 钻爆开挖技术

钻爆开挖技术是小净距隧道施工中常用的开挖方法，效率高但容易扰动隧道围岩，在小净距隧道施工中尤其要注意钻爆对隧道结构力学的影响。

### 2.2.1 爆破参数设计

爆破参数的设计需要根据隧道的地质条件、断面尺寸、开挖方法等因素，综合确定炮眼直径、炮眼深度、装药量、炮眼间距、抵抗线、密集系数等参数。

炮眼直径通常根据钻孔设备和炸药性能来确定，一般为40~50mm。炮眼深度则根据循环进尺和围岩情况来确定，公式：

$$H = \frac{L}{\cos \alpha} \quad (1)$$

其中，H为炮眼深度，L为循环进尺，α为炮孔倾角。在实际施工中，循环进尺与围岩的稳定性有关。稳定性较好的III级围岩，循环进尺可以达到3.0~4.0m；稳定性较差的V级围岩，循环进尺需减小到0.6~1.0m，以减少围岩暴露时间，降低坍塌风险<sup>[4]</sup>。

装药量的确定是爆破参数设计的关键，直接影响爆破效果和对围岩的扰动程度。不同类型的炮眼装药量应根据岩石的性质等因素进行调整。比如，周边眼采用间隔装药的方式，以减少对周边围岩的过度破坏，保证隧道开挖轮廓的平整性。III级围岩周边眼装药集中度可控制在0.25kg/m左右；而V级围岩周边眼装药集中度需控制到0.15kg/m以下。

炮眼间距和抵抗线的确定需要相互协调，以确保爆破能量能够充分利用，同时避免出现欠挖或超挖现象。炮眼间距与抵抗线的比值称为密集系数m，取值范围0.6~1.0。周边眼为了保证光面爆破效果，密集系数通常取较小值，一般为0.6~0.8。比如，III级围岩周边眼间距可控制在50cm左右，抵抗线可控制在70cm左右，密集系数为0.71。

### 2.2.2 装药结构

合理的装药结构能够有效控制爆破能量的分布，减少对围岩的扰动。在小净距隧道钻爆开挖中，周边眼通常采用药卷与炮孔壁之间留有一定间隙的不耦合间隔装药结构，空气间隙的缓冲作用使得炸药爆炸时产生的能量均匀分布，降低对周边围岩的冲击压力，从而减少围岩的破碎和变形。同时，采用间隔装药的方式，将药卷分段布置在炮孔内，进一步分散爆破能量，使爆破作用更加温和。在实际应用中，周边眼通常采用导爆索将分段的药卷连接起

来，确保各段药卷能够同时起爆，形成平整的爆破面。

### 2.2.3 爆破顺序

在小净距隧道钻爆开挖中，通常按照掏槽眼→扩槽眼→辅助眼→底板眼→周边眼的顺序进行起爆。掏槽眼首先起爆，可以在隧道开挖断面内形成一个槽腔，为后续炮眼的爆破提供自由面，减少岩石的夹制作用，提高爆破效率。扩槽眼起爆可以进一步扩大槽腔的体积，为辅助眼的爆破创造更好的条件。辅助眼起爆可以破碎隧道断面内的大部分岩石，起爆顺序应根据隧道断面的大小和岩石的性质进行合理安排。辅助眼一般采用分层起爆的方式，可以兼顾爆破效率和爆破振动控制。底板眼在辅助眼后起爆，可以破碎掉隧道底部的岩石，便于出碴作业。周边眼最后起爆，通过精确控制装药量和起爆时间，让周边眼同时起爆，在隧道开挖轮廓线处形成平整的爆破面，减少超挖和欠挖现象，保护周边围岩的稳定性。

现代技术的发展使得隧道钻爆可以达到毫秒延时，各段炮眼的起爆时间间隔更容易控制，爆破振动的叠加效应也可以有效降低，减少钻爆对力学结构复杂的小净距隧道周边围岩和中夹岩柱的影响。技术人员为五种炮眼选择合理的雷管段别，还可以控制爆破岩石的抛掷方向和距离，提高出碴效率。

### 2.2.4 爆破振动控制

小净距隧道由于两洞之间的距离较小，爆破振动对相邻隧道和中夹岩柱的影响较大，因此必须采取有效的措施控制爆破振动。

首先，严格控制单段装药量。根据萨道夫斯基公式<sup>[5]</sup>

$$V = K \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\beta} \quad (2)$$

其中， $V$  为测点处的质点震动速度， $K$  为衰减系数， $Q$  为装药量， $R$  为测点到爆破中心的距离， $\beta$  为与地质条件有关的系数。通过计算确定合理的单段装药量，确保爆破振动速度控制在允许范围内。对于小净距隧道，一般要求爆破振动速度不超过 15cm/s。隧道穿越既有道路、建筑物等特殊地段的部分，爆破振动速度应控制在 2cm/s 以下更低的水平。

其次，优化爆破参数和爆破顺序。微差爆破技术是一种增加爆破段数，减少单段装药量，延长爆破总时间的爆破方式，可以有效降低爆破产生振动的峰值。应用微差爆破技术时若能合理安排炮眼的布置和起爆顺序，可以规避爆破振动波的叠加，进一步降低钻爆作业对小净距隧道周边围岩和中夹岩柱的扰动。

再次，采用更适合的爆破技术。比如，预裂爆破技术是在隧道开挖轮廓线处提前爆破出一条裂缝、减少爆破振动对周边围岩的影响的技术。在正式爆破时，预先爆破出的这条裂缝可以起到反射和折射爆破地震波的作用，减少爆破振动对周边围岩的影响。

最后，加强爆破振动监测。在隧道施工过程中，定期对爆破振动进行监测，通过在隧道周边围岩、中夹岩柱以及相邻隧道内设置测点，利用爆破测振仪实时监测爆破振动速度、加速度等参数，确保爆破振动控制在允许范围内。

### 2.3 中夹岩柱加固技术

小径距隧道两洞之间的距离较小，中夹岩柱所承受的应力较大，容易出现变形、开裂等问题。采取加固措施，提高中夹岩柱的稳定性很有必要。超前小导管预注浆加固是在隧道开挖前，通过在中夹岩柱中打入超前小导管，然后向小导管内注入浆液，浆液扩散到中夹岩柱的裂隙和孔隙中，形成结石体的加固技术。超前小导管通常采用热轧无缝钢花管，外径 42~50mm，壁厚 3.5~5mm，长度一般为 3.0~5.0m，具体需根据中夹岩柱的厚度和地质条件确定。导管上每隔 150~200mm 钻设四个溢浆孔，呈梅花形布置，溢浆孔直径为 8~10mm。注浆材料通常采用水泥-水玻璃双液浆，水泥采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，水玻璃的浓度约为 35~40Be'，模数在 2.4~2.8 范围内。浆液的配合比一般为 0.8~1.5，水泥浆与水玻璃的体积比为 1:0.5~1:1。注浆压力一般为 0.5~1.5MPa，具体注浆量应根据中夹岩柱的裂隙发育情况和加固范围需求来确定。在注浆完成 24h 后，进行压水试验。试验压力为注浆压力的 0.8~1.0 倍，若压水试验的透水率小于设计要求，则表明注浆效果良好；反之，则说明需要进行补注浆处理。

## 3 结语

综上，公路隧道工程中的小净距隧道施工技术的应用需要符合此类隧道结构的需要，侧重关注岩体稳定性和施工可能对中夹岩柱的扰动。文中围绕小净距隧道施工阐述了超前预报和支护、钻爆开挖技术以及中夹岩柱的加固技术，形成一个连续的、稳定为先的小净距隧道施工技术链条，为小净距隧道施工的作业开展提供技术支持。

## 【参考文献】

- [1] 姚宁.高速公路隧道工程中小净距隧道施工技术[J].四川建材,2025,51(2):152-155.
- [2] 吴江.大跨小净距公路隧道光面爆破设计及施工技术[J].工程建设,2024,56(6):57-61.
- [3] 吴华银.并行双洞小净距公路隧道施工技术分析[J].江西建材,2024(4):253-255.
- [4] 陈亮亮,金永红,郭新峰.复杂软岩小净距公路隧道施工安全技术研究[J].《施工技术》杂志社.2024 年全国土木工程施工技术交流会论文集（下册）.金华市建设工程质量安全管理总站;,2024(2):628-631.
- [5] 武涛.梅子岭小净距浅埋隧道施工控制技术研究[D].南京:南京林业大学,2022.

**作者简介：**梁瑞利（1978.11—），男，西安交通大学，土木工程，就职单位：新疆北新路桥集团股份有限公司，项目总工程师，工程师。