

低净空环境下沥青路面施工安全与健康保障技术研究

邹长青

上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月29日

摘要

随着城市地下交通基础设施的快速发展, 低净空隧道沥青路面施工面临环境密闭、空间受限等问题, 对施工安全、人员健康及工程质量提出了更高要求。上海市北横通道工程中的隧道部分净空高度仅3.2米, 传统沥青混合料施工中存在粉尘污染、有害气体排放及运输受限等突出问题。本文以此为依托, 通过分析决定采用引入高效控尘抛丸设备、选择净味沥青混合料及短驳技术, 并研究其应用效果。结果显示: 高效控尘抛丸设备通过负压吸尘与多级过滤技术, 有效将隧道内粉尘浓度降至8~10 mg/m³, 降幅可达85%~90%左右, 有效改善了作业环境; 净味沥青混合料的采用, 减少了34%~37%的有害气体排放量, 且其路用性能指标与热拌沥青混合料相当; 短驳技术的运用实现了混合料在受限空间内的连续高效运输, 并制定了严格温控标准及质量监测流程, 确保了混合料的性能稳定。经实践及双重差分模型验证, 这些技术有效解决了低净空隧道施工中的关键问题, 为类似工程提供了兼顾安全、健康与效率的解决方案, 对推动城市地下交通基础设施建设具有一定的工程应用价值。

关键词

低净空隧道, 沥青路面施工, 施工安全, 职业健康

Research on Safety and Health Protection Technology for Asphalt Pavement Construction in Low Clearance Environment

Changqing Zou

Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 24th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

With the rapid development of urban underground transportation infrastructure, the construction

of asphalt pavement in low clearance tunnels is facing problems such as environmental sealing and limited space, which puts forward higher requirements for construction safety, personnel health, and engineering quality. The clear height of the tunnel section in the North Cross Island Tunnel Project in Shanghai is only 3.2 meters, and there are prominent problems such as dust pollution, harmful gas emissions, and transportation restrictions in traditional asphalt mixture construction. Based on this, this article analyzes and decides to adopt high-efficiency dust control shot blasting equipment, select clean asphalt mixture and short haul technology, and studies their application effects. The results showed that the high-efficiency dust control shot blasting equipment effectively reduced the dust concentration in the tunnel to 8~10 mg/m³ through negative pressure suction and multi-stage filtration technology, with a reduction of about 85%~90%, effectively improving the working environment; The use of clean flavored asphalt mixture reduces harmful gas emissions by 34%~37%, and its road performance indicators are comparable to those of hot mix asphalt mixture; The application of short haul technology has achieved continuous and efficient transportation of mixtures in confined spaces, and strict temperature control standards and quality monitoring processes have been established to ensure stable performance of the mixtures. Through practice and verification of the double difference model, these technologies have effectively solved key problems in the construction of low clearance tunnels, providing a solution that balances safety, health, and efficiency for similar projects. They have certain engineering application value for promoting the construction of urban underground transportation infrastructure.

Keywords

Low Clearance Tunnel, Asphalt Pavement Construction, Construction Safety, Occupational Health

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

在我国城市化进程高速发展下,城市交通基础设施建设向地下空间拓展成为必然趋势。其中城市隧道作为缓解交通拥堵的重要组成部分,其建设规模和数量日益增加。上海市北横通道作为上海市“三纵三横”井字形主干路网的关键构成,西起中环北虹路立交,东至周家嘴路内江路,全长 19.2 km,隧道段长 14.2 km。贯穿长宁、普陀、静安、虹口和杨浦等多个行政区,建成后将极大缓解区域交通压力,提升交通的可靠性和便捷性。然而,其沥青铺面施工存在诸多难点。如沥青混合料的选择,传统沥青混合料施工时,在高温加热和摊铺时会释放大量有害气体[1]。而且,在施工过程中,因空间限制各类机械设备的持续运转以及一些特殊施工工艺的运用,也会产生一些对人体有害的物质和粉尘。施工人员如长时间在这样密闭的环境中施工,会对施工人员身体健康造成较大的影响[2][3]。这些有害气体和粉尘还会随着空气流动逐渐扩散到周边环境,对周边生态环境造成影响。同时,该隧道内部净空高度仅为 3.2 m,相对于常规隧道施工空间较为局促,使得常规混合料运输卡车进入后无法顶起卸料,常规卸料方式无法实施,给施工进度带来了极大的阻碍。因此,本文以上海市北横通道工程为依托,选用净味沥青混合料技术加高效控尘抛丸设备,直接从有害气体和粉尘产生的源头进行控制,通过净味沥青和先进的除尘技术,显著降低了隧道内的有害气体和粉尘浓度,这一方法相较于单纯依靠通风系统更为高效、经济。针对运输难题,创新性地提出短驳运输技术,通过合理规划转运场地和规范运输流程,成功解决了低净空隧道内沥青混合料的运输问题,这是以往研究中未曾涉及的。在研究方法上,对各项技术的应用效果进行了详细的现场监测和数据分析。解决低净空隧道施工中的运输阻碍、施工有害气体及粉尘污染等问题。为类似工程提供一些可参考方向。

2. 北横通道施工难点分析

2.1. 抛丸作业导致的粉尘污染

在沥青摊铺前,为增强沥青与隧道水泥混凝土基层的粘结力,需对基层进行抛丸处理,以提高表面粗糙度。然而,在抛丸过程中会产生大量粉尘。在无高效除尘措施的情况下,隧道内粉尘浓度急剧升高,可达 $80\sim 100\text{ mg/m}^3$,远远超出国家规定的职业接触限值(一般为 8 mg/m^3) [4]。高浓度的粉尘产生会严重影响隧道内的能见度,导致发生施工安全事故的概率增加,还会被施工人员吸入体内,可能会引发尘肺病等严重职业病,对施工人员的身体健康构成巨大威胁。

2.2. 施工过程中的有害气体排放

传统热拌沥青混合料施工时,高温环境会引发一系列复杂的物理化学反应,导致大量有害气体如氮氧化物(NO_2)、硫氧化物(SO_2)以及挥发性有机化合物(VOCs)等排放。在北横通道这样相对封闭的隧道空间内,空气流通不畅,有害气体极易积聚。有相关研究表明,如未采取有效控制措施时,隧道内有害气体浓度可比正常室外环境高出 4~6 倍[5]。这些有害气体会对施工人员的呼吸系统、心血管系统等造成不可逆的损害,长期暴露在高浓度有害气体环境中,施工人员患呼吸道疾病、肺部疾病的概率大幅上升。同时,还会对周边及大气环境造成污染。

2.3. 隧道净空限制与运输难题

标准的沥青混合料运输卡车在正常作业时,料斗需完全顶升至顶部,才能将内部装载的混合料顺利卸出。由于北横通道隧道的低净空限制,使得料斗无法像往常一样完成顶升动作,无论如何操作,都无法让料斗达到理想的卸料角度。这意味着沥青混合料难以直接被运送至指定的卸料位置,更无法顺利运输至摊铺位置。

这种限制严重阻碍了施工的正常进行。因此,需要一种创新的运输方式,以确保沥青混合料能够顺畅运输至摊铺地点,满足施工进度和质量的双重要求。

3. 施工难点应对策略

3.1. 高效控尘抛丸设备的选用

针对抛丸作业的粉尘污染问题,本次工程选用了具有高效除尘功能的抛丸设备。该设备集成了先进的粉尘收集和过滤系统,采用负压吸尘原理,在抛丸头对路面进行处理的同时,迅速将产生的粉尘吸入除尘管道,经过多级过滤后,将净化后的空气排出。分别选取隧道东西两段靠近隧道出口位置(东段 1、西段 1)和中心位置(东段 2、西段 2),对高效控尘抛丸设备在不同施工段落的粉尘控制效果进行监测,并与普通抛丸设备进行对比。结果如图 1 所示。

从图 1 可知,与普通抛丸设备相比,使用高效控尘抛丸设备后,隧道内粉尘浓度降低了 85~90%左右,隧道内粉尘浓度可降至 $8\sim 10\text{ mg/m}^3$ 。其原因是高效控尘抛丸设备在吸入粉尘后进入多级过滤系统,该系统由初效过滤、中效过滤和高效过滤等多个层级组成。初效过滤主要拦截较大颗粒的粉尘,起到初步净化的作用;中效过滤进一步去除较小颗粒的粉尘;而高效过滤则能捕捉极细微的粉尘颗粒,甚至是对人体危害极大的可吸入颗粒物,经过这一系列的过滤处理后,排出的空气达到净化标准,从而有效降低了隧道内的粉尘浓度。高效控尘抛丸设备在各施工段落均能有效降低粉尘浓度,且降低比例稳定在较高水平。

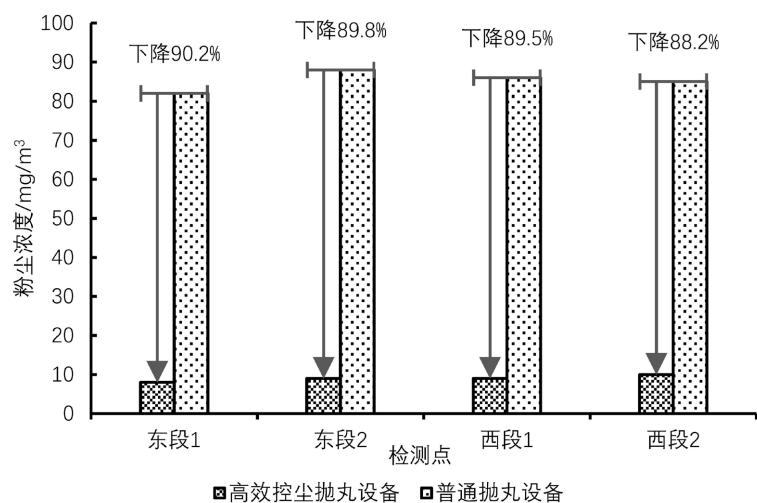


Figure 1. Comparison of dust removal effects of different shot blasting equipment
图 1. 不同抛丸设备除尘效果对比图

3.2. 净味沥青混合料的应用

为解决传统热拌沥青混合料带来的弊端，本次工程经前期讨论分析决定采用净味沥青混合料技术。该技术是通过特殊配方或生产工艺，与沥青中影响空气质量的气体、颗粒物及产生异味的分子发生化学反应，从源头抑制有害气体和异味产生，减少对空气质量的影响。有相关研究表明净味沥青混合料的使用让 NO₂ 排放降低了 35%左右，SO₂ 排放降低了 30%左右[6]，有效改善了隧道内的空气质量，保障了施工人员的健康。技术指标见表 1。

Table 1. Technical indicators of clean flavored asphalt mixture
表 1. 净味沥青混合料技术指标

检测项目	检测结果	技术要求
针入度(25℃, 100 g, 5 s) (0.1 mm)	47.5	30~60
延度(5 cm/min, 5℃) (cm)	>20	≥20
软化点(环球法) (℃)	86.8	≥85
闪点(℃)	>300	≥280
溶解度(三氯乙烯) (%)	99.7	≥99
弹性恢复(25℃) (%)	92	≥80
质量损失(%)	0.15	≤± 0.6
RTFOT 试验后	针入度比(25℃) (%)	≥65
	延度(5 cm/min, 5℃) (cm)	≥15
60℃车辙因子(kPa)	18	≥10
SHRP 分级	58	PG88-28
80℃ Jnr3.2 (kPa ⁻¹)	0.25	≤0.5

在净味沥青混合料摊铺阶段和碾压作业完成后进行数据监测，并与传统热拌沥青混合料进行对比，对其应用效果进行量化评估。具体数据见表 2。

Table 2. Comparison of application effects of purified asphalt mixture
表 2. 净味沥青混合料应用效果对比

项目	传统热拌沥青混合料	净味沥青混合料
NO ₂ 排放(mg/m ³)	83	52
SO ₂ 排放(mg/m ³)	64	42
动稳定度(次/mm)	3624	3556
低温弯曲应变(μɛ)	2650	2620
残留马歇尔稳定度(%)	87.5	85.6
冻融劈裂强度比(%)	82.4	81.2

从表 2 可知，净味沥青混合料有害气体氮氧化物(NO₂)和硫氧化物(SO₂)的排放分别降低了 37.3%和 34.3%。在高温稳定性方面，净味沥青混合料的动稳定度达到 3556 次/mm 以上，与热拌沥青混合料处于同一水平，确保了路面在长期交通荷载作用下的抗变形能力。在低温抗裂性试验中，净味沥青混合料在 -10℃时的弯曲应变达到 2620 μɛ，满足低温性能要求，有效减少了路面在低温环境下出现裂缝的风险。水稳定性试验结果显示，其残留马歇尔稳定度达到 85%以上，冻融劈裂强度比达到 80%以上，表明净味沥青混合料具有良好的水稳定性，能够适应潮湿环境下的长期使用。

3.3. 短驳技术的创新性应用

针对本次工程隧道净空低带来的运输难题，施工团队创新性地采用了短驳技术。短驳技术是通过在隧道外设置转运场地，利用运输车将混合料运至场地，再借助挖机和铲车转卸到短驳车，使短驳车能在受限净空条件下将混合料运输至摊铺位置，解决了净空限制带来的卸料难题，同时也是为了保障施工的顺利进行和工程质量。

短驳流程规划：在隧道外合适位置设置专门的转运场地，该场地需具备良好的交通条件和足够的空间，便于运输车和短驳车的进出及作业。运输车将沥青混合料从拌合站运输至转运场地后，按照既定的卸料流程，通过挖机和铲车的协同作业，将混合料快速、安全地卸入短驳车。短驳装车载完成后，迅速驶入隧道内指定摊铺位置。短驳车如图 2 所示。现场布置如图 3 所示。



Figure 2. Schematic diagram of short haul vehicles
图 2. 短驳车辆示意图

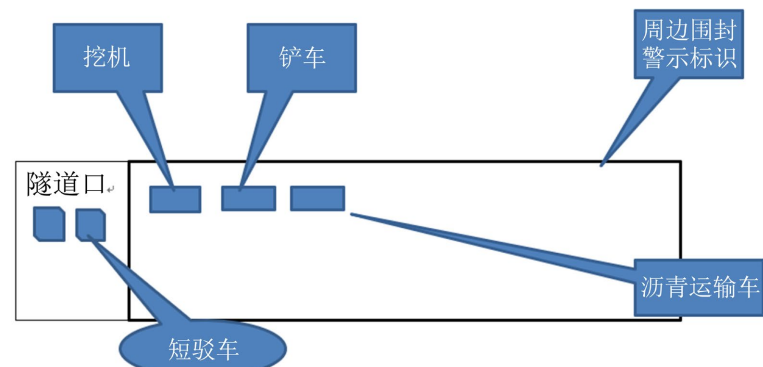


Figure 3. Site layout of transfer site
图 3. 转运场地现场布置图

在整个过程中应对沥青混合料的保温及质量采取控制措施，并规范现场操作。如下：

1) 转运场地保温：在转运场地搭建高效保温棚，减少混合料热量散失。卸料装置和短驳车在使用前进行预热，预热温度控制在 50~60℃，降低混合料接触低温设备导致的温度下降；

2) 短驳车保温：短驳车车厢可采用先进的聚氨酯保温板制作，保温板厚度不小于 5 cm，导热系数不大于 0.024 W/(m·K)，有效减少热量传导。车厢顶部配备保温篷布，篷布应具有隔热材料，在运输过程中紧密覆盖，防止热量散发；

3) 质量监测：在转运场地和隧道内设置多个温度监测点，使用高精度温度计实时监测混合料温度，温度监测误差控制在±2℃以内。每车混合料进行抽样检测，检测频率为每 5 车至少抽检 1 次，确保马歇尔稳定度、空隙率等性能指标符合要求。如发现温度异常或质量问题的混合料，立即进行处理或废弃，严禁用于施工。人员配制见表 3。

Table 3. Personnel configuration for short bridge control
表 3. 短驳管控人员配置表

担任本工程职务	单位	数量	备注
短驳点翻挖负责	人	2	材料 + 项目部各一人
短驳引领	人	1	项目部
摊铺现场	人	2	摊铺队 + 项目部各一人
现场安全巡视	人	1	项目部
合计	人	6	/

4) 现场操作规范：短驳点运输车卸料听从现场指挥，不得随意卸料。为便于卸料，沥青混合料运输车的车厢底板和侧板会涂刷一层适当的油水混合物隔离剂，并排除可见游离余液。短驳车到达现场后，听从现场指挥人员安排，料车排至纵向一列(匝道错开排列)，每辆料车间距 15 米。短驳至现场转向必须听从现场人员指挥。短驳车辆行驶必须有引领车辆，行驶速度 ≤20 km/h，回转区域 ≤5 km/h，到摊铺区域回转，慢慢听从现场摊铺人员指挥，倒置摊铺机前面，不得撞击摊铺机。因为限高限置，每辆短驳卸料时听从现场指挥人员命令卸料，不得盲目顶升撞坏隧道内设施。短驳运输区域实行人车分离，对上下连接道实行暂时封闭管理。短驳车辆驾驶人员不得随意更换。

综上所述，该技术通过在隧道外设置转运场地，利用运输车、挖机、铲车和短驳车协同作业，成功

克服了标准沥青混合料运输卡车因净空限制无法正常卸料的问题，实现了混合料在受限空间内的连续高效运输。转运场地的合理设置确保了车辆进出和作业的便捷性，保障了施工的顺利进行。在转运场地采取的一系列保温措施，如搭建保温棚、预热设备等，以及短驳车采用聚氨酯保温板制作车厢、配备保温篷布等，有效减少了混合料的热量散失，保证了混合料的性能稳定。同时，规范的现场操作流程和严格的人员配置，确保了运输过程的安全与高效。

4. 粉尘与气体排放的综合影响模型

为验证高效控尘抛丸设备技术和净味沥青混合料技术的应用效果，在基层抛丸阶段和净味沥青混合料施工阶段进行粉尘与有害气体排放的数据收集，与未采用高效控尘抛丸设备和热拌沥青混合料进行数据对比。具体数据见表 4。并采用双重差分法(DID)，来验证干预前后的差异。污染物削减率计算公式见式(1)。双重差分计算公式见式(2)。

Table 4. Comparison data of dust and harmful gas emission monitoring
表 4. 粉尘与有害气体排放监测对比数据

数据收集阶段		粉尘浓度(mg/m ³)	NO ₂ (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)
抛丸	传统	82	12	8
	高效控尘	9	12	8
摊铺	热拌沥青混合料	25	83	64
	净味沥青混合料	8	52	42

$$RR = \frac{C_b - C_e}{C_b} \times 100\% \tag{1}$$

式中：RR——污染物削减率(%)；
C_b——未通过技术处理前污染物浓度(mg/m³)；
C_e——通过技术处理后污染物浓度(mg/m³)。

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \cdot T_i + \beta_2 \cdot P_t + \beta_3 \cdot (T_i \cdot P_t) + \epsilon_{it} \tag{2}$$

式中：Y_{it}——污染物浓度(mg/m³)；
T_i——组别变量；
P_t——时间变量；
β₀——未通过技术处理前的基线值(mg/m³)；
β₁——两组的固有差异(mg/m³)；
β₂——时间趋势效应(mg/m³)；
β₃——技术干预的净效应(mg/m³)；
ε_{it}——未观测的随机扰动因素(mg/m³)。

通过式(1)计算结果和双重差分模型，可知粉尘浓度从原来的 82 mg/m³ 大幅下降到了 9 mg/m³，降幅高达 89%。抛丸作业过程中产生的两种有害气体浓度始终没有变化，这表明，抛丸作业本身并不会额外产生大量有害气体，高效控尘设备只是针对粉尘进行了有效控制，而对空气质量的其他方面没有负面影响。NO₂ 和 SO₂ 的排放量分别减少了 37.3%和 34.4%，与传统沥青相比净味沥青混合料通过改进配方或生产工艺，显著降低了这些气体的排放。双重差分模型结果显示，高效控尘设备和净味沥青混合料的联合

使用,使污染物浓度平均降低了约 69.2 mg/m^3 ($\beta_3 = -69.2$),且这一结果的统计学显著性极高($P < 0.01$)。这说明粉尘和有害气体的减少不是偶然发生的,而是新技术的采用直接导致的。由此可知高效控尘设备和净味沥青混合料的配合使用,在解决了粉尘污染问题的同时,又大幅减少了有害气体的排放。

5. 结论

本文针对低净空隧道沥青路面施工中的难点进行了深入分析,并提出了相应的应对策略,取得了以下效果:

1) 选用的高效控尘抛丸设备有效降低了隧道内的粉尘浓度,与普通抛丸设备相比,粉尘浓度降低了85~90%左右,有效改善了施工环境,降低了施工安全事故的发生概率,保障了施工人员的身体健康。

2) 净味沥青混合料的应用,让 NO_2 排放降低了37%左右, SO_2 排放降低了34%左右,有效降低了有害气体排放。而且在路用性能上与传统热拌沥青混合料相当。其在高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性等方面均满足北横通道的设计要求,为隧道内施工人员创造了更为健康的作业环境,同时确保了路面的长期使用性能。

3) 创新性的短驳技术成功解决了北横通道隧道净空低带来的运输难题。通过合理规划转运场地、采取有效的保温及质量控制措施,以及规范现场操作,保障了沥青混合料的运输质量和施工进度。在整个短驳运输过程中,严格的人员配置和操作规程确保了运输的安全与高效。

4) 基于双重差分法(DID)构建的综合模型显示,高效控尘设备与净味沥青技术的联合应用对污染物削减具有显著净效应($\beta_3 = -69.2$, $P < 0.01$),统计学显著性验证了技术措施的可靠性与普适性。

5) 综上所述,本研究提出的净味沥青混合料、短驳运输技术及严控除粉尘抛丸机等技术手段,有效解决了低净空隧道施工中的运输阻碍、施工有害气体及粉尘污染等问题,为同类型城市隧道沥青路面施工提供一些具有安全与健康保障的技术参考及经验。

参考文献

- [1] 蔡日升. 沥青混合料能耗与碳排放量化分析体系研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [2] 徐建峰, 郭春, 郭雄, 等. 公路隧道施工空气污染健康损害评价[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 409-414.
- [3] 高磊. 高地温隧道施工安全风险评价研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [4] 吕向红. 隧道施工中粉尘控制方法研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(12): 79-82.
- [5] 裴建中, 周灵昊, 刘靖, 张增平. 多功能有害气体检测仪[EB/OL]. 2011-04-01. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=N2LrlypoG-YUti65vP7opVIR_LWAur7i3EHdhGbH2nGt4BR3iM3qmH0vycKyPN2WA-JYZ5W7WTsXGHYsei6N0QTuM5Q0sOQlwGiX2nThkEPFLIf_eU1QINjmFtND9X-wp3sR5g0lDM1fGcEa-rvXW0mE-Ixx6sjhiCpG79gjn-VL32gZmwoiq-8w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-05-23.
- [6] 严家发, 张国民. 净味环保沥青混合料配合比设计及性能验证[J]. 广东公路交通, 2018, 44(1): 1-6+10.