

# 长大隧道沥青路面铺装中温拌阻燃技术对 施工环境的影响

鲜江林<sup>1</sup>,李雁翔<sup>2\*</sup>,杨青阳<sup>1</sup>

(1.广安交通投资建设开发集团有限责任公司,四川 广安 638550;2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆市 400074)

**摘要:**以长大隧道为研究对象,分别测试热拌工艺和温拌阻燃工艺条件下隧道中部挥发性有机化合物(VOC)体积分数、CO体积分数和照度在施工区域的变化情况,由此分析评价温拌阻燃工艺对长大隧道沥青路面施工环境的影响。结果表明:长大隧道铺装采用热拌工艺时,整个作业区域内的沥青烟质量浓度数值均偏高,且部分区域超出了阈值,照度均在人行照度标准之下;而采用温拌阻燃工艺时,施工区域沥青烟质量浓度降低显著,其中VOC体积分数降低26.8%,CO体积分数降低21.9%,施工区域照度提高103.2%,施工环境得到显著提升;良好的隧道铺装施工环境不仅有利于施工人员的身心健康,而且有助于提高隧道铺装施工质量。

**关键词:**沥青路面;长大隧道;温拌阻燃;沥青烟

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

## Influence of Warm-Mixed Flame Retardant Technology on Construction Environment of Asphalt Pavement in Long Tunnel

XIAN Jianglin<sup>1</sup>, LI Yanxiang<sup>2\*</sup>, YANG Qingyang<sup>1</sup>

(1.Guang'an Transportation Investment Construction Development Group Co., Ltd., Guang'an, Sichuan 638550, China;

2.School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** With the long tunnel as the research object, the variation of volatile organic compound (VOC) volume fraction, CO volume fraction, and illuminance in the construction area of the middle of the tunnel under the conditions of hot mix technology and warm-mixed flame retardant technology was tested respectively, and the influence of warm-mixed flame retardant technology on the construction environment of asphalt pavement in long tunnels was analyzed and evaluated. The results show that when the pavement of a long tunnel adopts hot mix technology, the mass concentration of asphalt fume in the whole operation area is relatively high, and that in some areas exceeds the threshold value. The illuminance is below the pedestrian illuminance standard. When warm-mixed flame retardant technology is employed, the mass concentration of asphalt fume in the construction area is significantly reduced. VOC volume fraction is reduced by 26.8%, and CO volume fraction is reduced by 21.9%. The illuminance in the construction area is increased by 103.2%, and the construction environment has been significantly improved. A good construction environment of tunnel pavement is not only conducive to the physical and mental health of the construction personnel but also contributes to the quality of tunnel pavement construction.

**Keywords:** asphalt pavement; long tunnel; warm-mixed flame retardant; asphalt fume

收稿日期:2023-04-18

基金项目:四川省科技计划项目(编号:2021YJ0044)

作者简介:鲜江林,男,高级工程师.E-mail:cqxiaowanggang@163.com

\*通信作者:李雁翔,男,硕士研究生.E-mail:583225795@qq.com

## 0 引言

沥青作为一种高分子材料,在高温作用下会释放出大量的沥青烟<sup>[1-3]</sup>。对长大隧道进行沥青路面铺装时,大量沥青烟堆积难以消散,不仅会直接伤害施工人员的身体健康<sup>[4]</sup>,而且会大幅降低隧道内的能见度,从而影响施工质量<sup>[5]</sup>。

目前,围绕隧道沥青路面铺装过程中如何降低沥青烟质量浓度、增大能见度及分析沥青烟的化学成分等课题,已有不少学者开展了较丰富的室内试验研究及工程实例分析,并取得了大量研究成果。邱延峻等<sup>[6]</sup>对热拌与温拌沥青路面施工中产生的排放物成分开展了较全面的对比研究;杨锡武等<sup>[7]</sup>、孙吉书等<sup>[8]</sup>采用沥青烟气抑制剂减少沥青路面施工中沥青烟的排放,并通过实体工程和试验进行了验证;李喆<sup>[9]</sup>通过优化长大隧道施工通风系统实现施工环境的改善;陈辉强等<sup>[10]</sup>通过制备基于表面改性的复合阻燃剂为隧道运营安全提供了技术保障;美国公路合作研究组织认为:采用温拌工艺可实现混合料生产过程中沥青烟浓度下降,其主要原因是生产温度的降低<sup>[11]</sup>。相关研究还表明:施工温度与沥青烟排放之间存在明显的正相关<sup>[12-13]</sup>。然而,既有研究成果尚未将温拌、阻燃和抑烟3个维度进行有机结合,且未系统分析三者协同作用下长大隧道沥青烟质量浓度的变化规律及沥青烟的运移规律。

本文自主研发一种基于表面改性的复合阻燃抑烟剂,与基于表面活性的温拌剂对基质沥青进行复合改性,制得温拌阻燃沥青。将温拌阻燃技术应用于工程实际,以热拌工艺为参照,通过测试依托工程在热拌和温拌阻燃工艺下施工现场的挥发性有机物(VOC)体积分数、CO体积分数及照度变化,分析评价温拌阻燃技术对长大隧道铺装施工环境的改善效果,总结沥青烟的运移规律,以期对隧道通风系统进行优化指导。

## 1 项目基本情况

### 1.1 依托工程概况

渝黔高速公路扩能项目二期工程,起于绕城高速巴南忠兴,止于小张坝附近省界,并与贵州省崇遵高速扩能工程相接,路线全长99.948 km,与渝黔高速构成重庆向南经贵州直达广西的出海高速“双通

道”。其中,天台山隧道左、右线长度分别为3 260 m、3 263 m,属特长隧道,为本项目的控制性工程。隧道铺装方案为:水泥混凝土基层+SBS热沥青防水层+6 cm低烟型AC-20+4 cm SBS改性温拌阻燃沥青混凝土AC-13。兴隆台隧道左线长2 695 m,右线长2 660 m,采用热拌SBS改性沥青混凝土施工,施工方案为水泥混凝土基层+6 cm SBS改性沥青混凝土AC-20C+4 cm SBS改性阻燃沥青混凝土AC-13。本文主要测试两座隧道上面层路段施工过程中沥青烟的质量浓度变化规律。

### 1.2 温拌阻燃沥青技术要求及性能

采用表面活性类温拌剂Rediset®LQ1102、自制基于表面活性的沥青阻燃剂AMZ-Ti及苯乙烯—丁二烯—苯乙烯嵌段共聚物SBS对重交70#沥青进行复合改性,制得温拌阻燃沥青,其技术要求及性能测试结果见表1。

表1 温拌阻燃沥青的技术要求及性能

Table 1 Technical requirements and performance of warm-mixed flame retardant asphalt

指标	单位	测试结果	技术要求
温拌剂掺量(外掺)	%	0.5	—
沥青阻燃剂掺量(外掺)	%	7.0	—
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	46.4	40~60
5℃延度(5 cm/min)	cm	22.3	≥20
软化点(R&B)	℃	77.6	≥70
弹性恢复率(25℃)	%	88.8	≥75
氧指数	%	29.1	≥25
烟密度	%	64.6	<75

## 2 现场检测设备与方法

### 2.1 检测设备

(1) 气体检测设备:爱德克斯ADKS-1/3.7VDC气体检测仪,量程为 $1 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ ,分辨率 $1 \times 10^{-6}$ ,用以检测空气中VOC(挥发性有机化合物)和CO气体体积分数。其中,VOC、CO量程为 $0 \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ ,分辨率为 $1 \times 10^{-6}$ 。

(2) 温度检测:得力(deli)DL333380非接触式红外测温仪,测量温度范围为 $-30 \sim 380$ ℃,测量精度 $\pm 2$ ℃。

(3) 照度检测:兰泰照度计LX-9621,测量范围为 $0 \sim 50\,000$  lx。

## 2.2 现场取样和检测方法

(1) 沥青烟质量浓度检测对象:考虑隧道内沥青混凝土施工过程中施工人员作业区大致在摊铺机熨平板向后 100 m 范围内,因此本文选距洞口 1.1~1.2 km 范围进行研究。

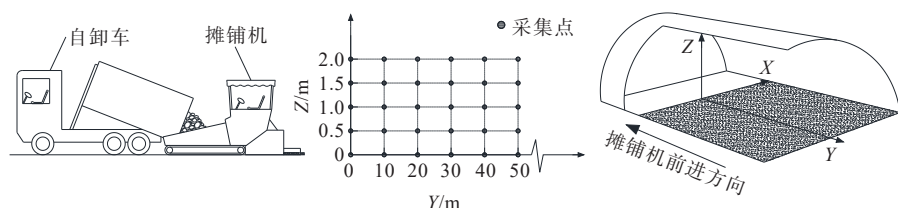


图1 沥青烟质量浓度采集点示意图

Figure 1 Mass concentration collection point of asphalt fume

(2) 长距离沥青烟质量浓度检测:为排除自然环境中气流变化对沥青烟的影响,选择隧道中气流流速低且稳定的区域进行测试,故选择沥青烟质量浓度检测区域在隧道中部,距洞口 1.1~1.2 km 处。纵向间隔距离为 10 m,总长约 300 m;烟气采集点竖向高度维持在  $(1.75 \pm 0.25)$  m;并同时检测路表的实时温度。

(3) 能见度检测:使用兰泰照度计,以摊铺机熨平板处为原点,沿路线方向,每 2.4 m 作一检测点,水平高度保持为  $(1.00 \pm 0.25)$  m,直到照度值降为 1 lx 为止。

## 2.3 现场环境及测试条件

(1) 提前调试好测试仪器,待施工队自隧道洞口外连续施工至拟定位置(距洞口 1.1~1.2 km 处)时,进行测试与数据采集。

(2) 根据章程规定,两座隧道在施工时均使用了共计 3 台轴流风机进行通风处理。风机作用位置固定在自卸车前方 50~100 m 处,通风量约为  $5\,300\text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{台})$ 。

(3) 天台山隧道上面层采用了温拌阻燃技术,初压开始时温度为  $139 \sim 147\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,兴隆台隧道上面层采用了阻燃技术,初压开始时温度为  $160 \sim 168\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,两上面层的配合比其余部分保持一致。

(4) 两处隧道下面层材料有所不同,但考虑到上面层施工中的沥青烟几乎都来自上面层材料,下面层对测试结果产生的影响体量过小,认为可以忽略不计。

## 3 结果与讨论

### 3.1 VOC和CO的阈值要求

一般认为,沥青烟主要成分为多环芳烃

在检测沥青烟时,以摊铺机熨平板处为原点,分别沿路线的纵向和竖向进行数据采集,沥青烟质量浓度采集点示意如图1所示。纵向间隔为 10 m,检测总长 100 m;竖向间隔为 0.5 m,总高度为 2 m(考虑人的身高一般不超过 2 m)。

(PAHs),同时还包含其他多种含氧、含硫以及含氮化合物。常用的重量法或紫外分光光度法等虽可以准确检测分析出沥青烟浓度及各成分的含量,但是其操作复杂,且不能有效反映出不同空间位置处沥青烟的质量浓度。因此,本文选择 VOC 和 CO 作为沥青烟的代表性物质,选择 VOC 体积分数和 CO 体积分分数作为测试指标,检测沥青烟质量浓度在隧道空间中的实时变化情况。

#### (1) VOC的阈值要求

根据《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分:化学有害因素》(GBZ 2.1—2019)、《工作场所有毒气体检测报警装置设置规范》(GBZ/T 223—2009)与常州爱德克斯仪器仪表有限公司提供的数据信息:对于以混合物形式存在 VOC,可采用无选择性探测器检测混合气体总量,并作为其职业接触限值来设置报警值。因此,可求得 VOC 的短接触容许值(PC-STEL)为  $400 \times 10^{-6}$ ,并选择其 PC-STEL 的 1/2(即  $200 \times 10^{-6}$ )为预报值,选择其 PC-STEL 即  $400 \times 10^{-6}$  为警报值。VOC 气体体积分数报警值见表 2,表中,PC-STEL 表示在满足 PC-TWA 的前提下,容许劳动者短时间(15 min)接触的加权平均体积分数;PC-TWA 表示以时间为权数规定的 8 h 工作日、40 h 工作周的平均容许接触体积分数。预报值提示场所内已发生有毒气体释放,须采取有效的预防控制措施;警报值提示该工作场所空气有毒气体已达到或超过国家职业卫生标准,应立即采取相应的防止释放、通风排风和人员防护等措施。

#### (2) CO的阈值要求

已有文献表明<sup>[14-16]</sup>,当人体长时间处于 CO 体积

分数较高的环境,或短时间处于CO体积分数过高的环境时,就会出现不同程度的中毒反应,轻则出现头痛、心悸、恶心等症状,重则四肢无力、恶心、呕吐,甚至出现意识障碍或昏迷等症状。在中国根据《工作场所所有害因素职业接触限值 第1部分:化学有害因

素》(GBZ 2.1—2019),CO设有时间加权平均容许体积分数(PC-TWA)为 $25\times 10^{-6}$ ,设有短间接接触容许体积分数(PC-STEL)为 $37.5\times 10^{-6}$ 。其他各机构提出的CO体积分数限值汇总见表3。

表 2 VOC 气体体积分数报警值  
Table 2 Alarm value of VOC gas volume fraction

名称	释义	体积分数大小/ $10^{-6}$
PC-STEL	短时间(15 min)接触容许值	400
预报值	提示场所内已发生有毒气体释放,须采取有效的预防控制措施	200(取 1/2 PC-STEL)
警报值	提示该工作场所空气有毒气体已经超标,应立即停止生产,并采取控制措施	400(取 PC-STEL)

表 3 各机构提出的 CO 体积分数限值  
Table 3 CO volume fraction limits proposed by various institutions

项目	体积分数限值/ $10^{-6}$	发布机构
阈限值时间加权平均值	25.0	美国政府工业卫生学家委员会(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)
阈限值短期暴露限值	400.0	
室内应急暴露限值时间加权平均值	35.0	美国国家职业安全卫生研究所(National Institute for Occupational Safety and Health)
立即危及生命和健康体积分数	1 200.0	
公共场所应急暴露限值时间加权平均值	50.0	
公共场所应急暴露最大值	200.0	中华人民共和国国家卫生健康委员会(National Health Commission of the People's Republic of China)
时间加权平均容许体积分数(PC-TWA)	25.0	
短间接接触容许体积分数(PC-STEL)	37.5	

注:阈限值是美国政府工业卫生学家委员会(ACGIH)推荐的生产车间空气中有害物质的职业接触限值,为绝大多数工人每天反复接触不致引起损害作用的体积分数。

(3) 照度的阈值要求  
《建筑照明设计标准》(GB 50034—2013)中对各类场所的照度要求见表4。

表 4 各类场所照度标准值  
Table 4 Standard illuminance values in various places

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值/lx
一般公共场所门厅、休息室	地面	100
大件仓库、公共车库	1.0 m 水平面	50
工厂人行通道、平台	地面或台面	30

3.2 CO 和 VOC 体积分数变化

3.2.1 热拌工艺下距洞口 1.1~1.2 km 处的 CO 和 VOC 体积分数

渝黔高速公路扩能项目二期工程兴隆台隧道采用阻燃沥青混凝土施工,现场施工中 VOC 体积分数与 CO 体积分数随摊铺机的距离及高度变化关系见图3。

从图3可看出:①不同高度的5条VOC曲线相距

较近,且均随着与摊铺机的距离增大而呈现下降趋势,表明 VOC 气体体积分数在同一断面上的不同高度相差不大,其最大差值仅为 $8\times 10^{-6}$ ,可以推断 VOC 气体从混合料中逸出之后迅速在摊铺机附近同一断面扩散开来,然后沿隧道纵向移动,且体积分数逐渐降低;在摊铺机附近 20 m 范围之内,VOC 气体的体积分数较高,且明显高于表2所列的相应阈值;而在整个100 m 的施工作业区内,VOC 体积分数最小值仍然高达 $168\times 10^{-6}$ ,不仅威胁施工人员的身心健康,且难以保证施工质量。VOC在隧道纵向方向的最大差值仅为 $44\times 10^{-6}$ ,证明了长大隧道中部 VOC 气体的扩散速率较慢;② CO 体积分数范围始终维持在 $23\times 10^{-6}\sim 32\times 10^{-6}$ ,数值差为 $9\times 10^{-6}$ ,超过了阈限值时间加权平均值。测试路段同一断面的不同高度范围内 CO 体积分数规律变化较无序,但在纵向整体随与摊铺机距离的增大而降低,但也有一定波动,可能原因是摊铺机运行过程中对 CO 的扰动及其自身释放出来的 CO 所致。



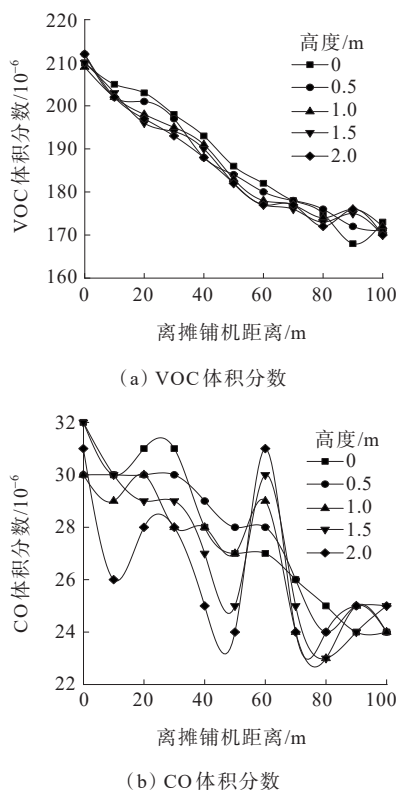


图3 热拌沥青混合料的VOC与CO体积分数  
Figure 3 VOC and CO volume fractions of asphalt mixture by hot mix technology

因此,在长大隧道中部的热拌沥青混合料施工过程中的摊铺机作业区域内,无论是VOC体积分数还是CO体积分数,均超过了相应阈值限定,故这种施工环境严重威胁着施工人员身心健康,应尽量改善和优化。

### 3.2.2 温拌阻燃工艺下距洞口1.1~1.2 km处的CO和VOC体积分数

渝黔高速公路扩能项目二期工程的天台山隧道采用温拌阻燃沥青混凝土施工,现场施工中VOC体积分数与CO体积分数随摊铺机的距离及高度变化关系见图4。

图4表明:5条曲线相距较近且相互交叉,证明同一截面的不同高度对VOC与CO体积分数影响并不明显,与摊铺机的纵向距离从0增大至100 m的过程中,VOC的体积分数从 $157 \times 10^{-6}$ 下降至 $122 \times 10^{-6}$ ,CO的体积分数从 $25 \times 10^{-6}$ 下降至 $17 \times 10^{-6}$ ,二者的降幅不大;就二者在不同高度的横截面Z方向和不同纵向深度的Y方向的运移规律而言,温拌阻燃与上节的热拌工艺并无差别;尽管CO体积分数在下降过程中有所波动而略显无序,但整体上仍然为平缓下降趋

势。值得注意的是,在距离摊铺机约60 m处,VOC和CO体积分数出现骤降,这是因为此处设有人行联络通道,另一幅隧道中的空气经联络通道与本隧道内的VOC和CO发生气体交换,最终降低了VOC和CO的体积分数大小,这也说明通风条件对隧道施工中沥青烟质量浓度大小的影响是非常显著的。

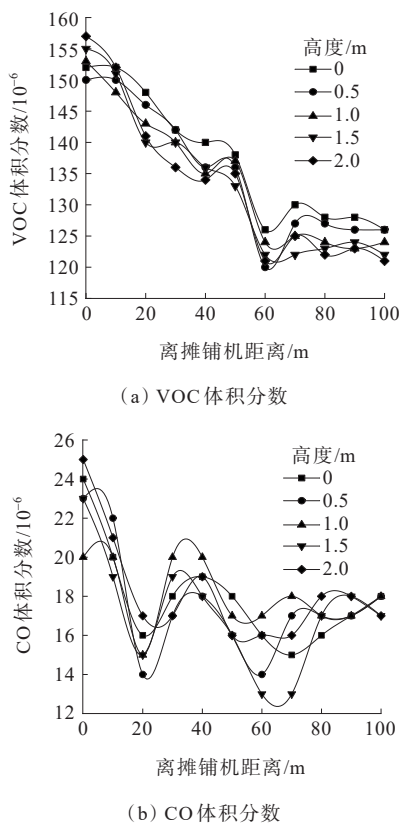


图4 温拌阻燃沥青混合料的VOC与CO体积分数  
Figure 4 VOC and CO volume fractions of asphalt mixture by warm-mixed flame retardant technology

### 3.2.3 热拌和温拌阻燃工艺条件下的对比分析

将图3、4中的相同Y坐标的气体体积分数求平均值,对比两种工艺条件下沥青烟质量浓度随与摊铺机距离(不同Y值)的变化趋势,结果如图5、6所示。

由图5可知:热拌工艺与温拌阻燃工艺下VOC体积分数的最大代表值分别为 $211 \times 10^{-6}$ 和 $156 \times 10^{-6}$ ,最小代表值分别为 $170 \times 10^{-6}$ 和 $121.5 \times 10^{-6}$ ,差值分别为 $55 \times 10^{-6}$ 和 $48.5 \times 10^{-6}$ ,最大值降幅为26.1%,最小值降幅为28.5%,两条曲线形状相似。一方面表明温拌阻燃工艺大幅降低了VOC在施工作业区的体积分数,增大了隧道施工的安全性;另一方面也可推断出两种工艺条件下VOC有着相似的运移规律。

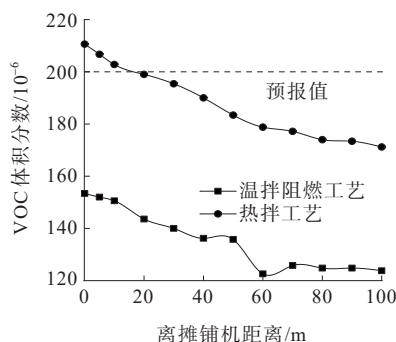


图5 不同工艺条件下的VOC体积分数对比

Figure 5 Comparison of VOC volume fractions under different technology conditions

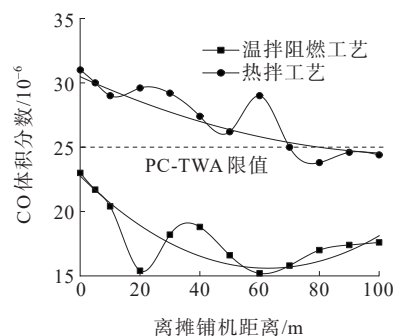


图6 不同工艺条件下的CO体积分数对比

Figure 6 Comparison of CO volume fractions under different technology conditions

图6中实线为拟合曲线,结合表3关于CO气体体积分数限值分析可知,热拌工艺下CO体积分数基本均在预警值之上或者附近,而温拌阻燃工艺下CO体积分数均在预警值以下,且随着Z值的增大而减小,因此长大隧道沥青路面施工中宜采用温拌阻燃工艺,体现以人为本的价值理念。

### 3.3 环境照度对比

本次测试的长大隧道沥青路面施工过程中,摊铺机上方安装了一组照明系统,主要为摊铺和碾压提供照明。在距隧道口1.1~1.2 km范围内,以摊铺机作业面的中心为原点,摊铺机前进方向为Y方向,每间隔2.4 m测试一组沿Y方向距地面1.5 m高度处的照度。热拌工艺和温拌阻燃工艺下的照度沿Y方向的变化曲线见图7。

从图7可以看出:随着Y值增大,无论是温拌阻燃工艺还是热拌工艺,照度均是逐渐递减,表明沥青烟对照度的衰减影响显著。对比二者的变化规律还发现,温拌阻燃工艺下摊铺机10 m范围内的照度明显高于热拌工艺,这对于施工人员正常作业极其有

利,从而可确保施工质量。结合照度要求(表4)进一步分析可知,在摊铺机作业面处,使用温拌阻燃沥青混合料时照度平均值为62 lx,完全达到大件仓库的标准照度需求;而热拌工艺下的照度值即便是在摊铺机附近最大值也仅为29 lx,低于工业用人行通道的照度标准。距离摊铺机5 m处分析,在目前照明条件下,热拌工艺不能满足长大隧道沥青路面的照度要求,而温拌阻燃工艺可以满足摊铺机近距离范围内施工的照度要求。

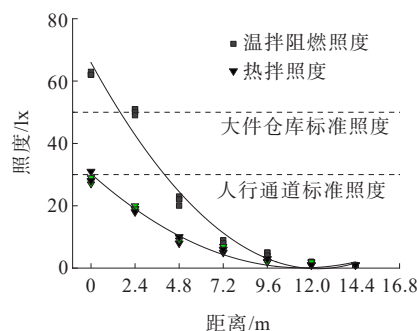


图7 长大隧道沥青路面施工照度随Z值的变化

Figure 7 Construction illumination variation of asphalt pavement in long tunnel with Z value

## 4 结论

(1) 对于长大隧道沥青路面施工,热拌工艺会释放大量沥青烟,在距摊铺机100 m范围内VOC体积分数和CO体积分数分别超过了相关规范的一般低报警值和阈限值时间加权平均值,且较大的烟雾浓度还导致热拌工艺下施工能见度大幅下降,热拌工艺不能满足长大隧道有害气体体积分数和能见度最低要求。

(2) 相对于热拌工艺,温拌阻燃工艺在长大隧道施工中可实现有害气体体积分数的显著降低,其中VOC和CO的体积分数降幅分别达到26.0%和21.9%,能见度从全部人行通道标准以下提高到部分人行通道标准甚至大件仓库能见度标准以上,不仅有效保护了施工人员的身心健康,而且有利于保障施工质量。

(3) 长大隧道的沥青烟自摊铺机开始释放并扩散,首先是极其迅速地沿隧道横截面的横向和竖向扩散,然后再沿隧道纵向扩散,且其质量浓度逐渐减小。

### 参考文献:

### References:

- [1] 程玲,闫国杰,陈德珍,等.温拌沥青混合料摊铺节能减排效

- 果的量化研究[J].环境工程学报,2010,4(9):2151-2155.
- CHENG Ling, YAN Guojie, CHEN Dezhen, et al. Quantitative investigation on energy conservation and emission reduction related to warm mix asphalt (WMA) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4 (9):2151-2155.
- [2] 吴珂,朱凯,黄志义,等.基于红外光谱研究沥青燃烧机理和有害气体成分分析[J].光谱学与光谱分析,2012,32(8):2089-2094.
- WU Ke, ZHU Kai, HUANG Zhiyi, et al. Research on the combustion mechanism of asphalt and the composition of harmful gas based on infrared spectral analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8):2089-2094.
- [3] 闫强,易可良,李平,等.沥青路面结构类型对建设期碳排放影响分析[J].中外公路,2021,41(2):41-48.
- YAN Qiang, YI Keliang, LI Ping, et al. Analysis on impact of structural types of asphalt pavement on carbon emissions during construction period[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2):41-48.
- [4] CUI P, SCHITO G, CUI Q B. VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244:118757.
- [5] 乔建刚,尹朋招,李志刚,等.公路隧道温拌阻燃沥青路面阻燃效果仿真研究[J].中外公路,2023,43(1):168-172.
- QIAO Jiangang, YIN Pengzhao, LI Zhigang, et al. Simulation study on flame retardant effect of warm-mixed flame retardant pavement in highway tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1):168-172.
- [6] 邱延峻,罗浩原,张家康,等.热拌与温拌沥青路面生产施工排放物对比[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):30-39.
- QIU Yanjun, LUO Haoyuan, ZHANG Jiakang, et al. Comparative of emissions from production and construction of hot mix and warm mix asphalt pavement [J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1):30-39.
- [7] 杨锡武,彭绪亚,钱诗林.路面施工沥青烟气抑制剂及现场应用试验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6):122-127.
- YANG Xiwu, PENG Xuya, QIAN Shilin. Experimental study on suppression agents of asphalt fume from pavement construction and its application[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(6):122-127.
- [8] 孙吉书,王亚萍,王鹏飞,等.抑烟环保型沥青性能试验分析[J].硅酸盐通报,2021,40(7):2428-2436.
- SUN Jishu, WANG Yaping, WANG Pengfei, et al. Performance test analysis of smoke suppression environment-friendly asphalt[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7):2428-2436.
- [9] 李喆.特长隧道沥青面层铺装施工通风系统研究[D].西安:长安大学,2021.
- LI Zhe. Study on ventilation system for asphalt pavement construction of extra-long tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [10] 陈辉强,王雄,李雁翔.阻燃剂表面改性对温拌阻燃沥青燃烧特性及贮存稳定性的影响[J].中国科技论文,2022, 17(4):457-462.
- CHEN Huiqiang, WANG Xiong, LI Yanxiang. Effects of surface modification of flame retardants on combustion characteristics and storage stability of warm-mixed flame retardant asphalt[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(4):457-462.
- [11] CHERAGHIAN G, CANNONE FALCHETTO A, YOU Z P, et al. Warm mix asphalt technology: An up to date review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268:122128.
- [12] 唐新端,冉德钦,任广军,等.基于隧道沥青路面温拌现场摊铺释放挥发性有机物(VOCs)GC-MS分析研究[J].当代化工,2020,49(7):1460-1463.
- TANG Xinduan, RAN Deqin, REN Guangjun, et al. Analysis of volatile organic compounds(VOCs) based on the warm mixing process of the tunnel asphalt pavement by GC-MS[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49 (7):1460-1463.
- [13] OLSEN R, GRAFF P, DAAE H L, et al. Occupational exposure during asphalt paving-comparison of hot and warm mix asphalt in field experiments[J]. Annals of Work Exposures and Health, 2021, 65(4):446-457.
- [14] NORSETH T, WAAGE J, DALE I. Acute effects and exposure to organic compounds in road maintenance workers exposed to asphalt[J]. American Journal of Industrial Medicine, 1991, 20(6):737-744.
- [15] 李海玲.沥青烟对小鼠中枢神经系统损伤机制的实验研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- LI Hailing. The experiment study on mechanism of the central nervous system injury of mice caused by bitumen fume[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
- [16] RICHARD C. Dart, 著.五分钟毒理学会诊[M].杨进生,译.北京:中国医药科技出版社,2001.
- RICHARD C. Dart. Five-minute toxicology consultation [M]. Translated by YANG Jinsheng. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2001.