

# 净味沥青隧道施工现场烟气排放及环境影响评估

邓温悌<sup>1</sup>, 邹桂莲<sup>2\*</sup>, 张园<sup>2</sup>, 余亮<sup>1</sup>, 谢辉端<sup>3</sup>

(1.广东省公路建设有限公司 江罗分公司, 广东 广州 510000; 2.华南理工大学 土木交通学院, 广东 广州 510640;  
3.广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:**针对沥青路面施工现场烟气排放监测比较随意的情况,结合净味沥青在长大隧道热拌热铺沥青路面施工中对烟气减排的工程应用,研究沥青路面施工现场的烟气采集与测评方法,并对净味沥青减排效果进行评价。在摊铺机的不同位置,采用苏玛罐对沥青烟气进行采集,通过GC-MS气质联用仪对沥青烟气进行定量分析。结果表明:与同源非净味沥青相比,使用净味沥青进行路面施工时,在摊铺机边位、侧翼中位、摊铺机上位3个采集点,沥青烟挥发性有机气体的总质量浓度减排了57.0%、22.6%、27.4%。摊铺机边位处,净味沥青混合料的施工现场中,1、2类致癌物气体的总质量浓度减排了62.3%,且其恶臭强度仅为非净味沥青混合料的1/3左右。通过研究,建议在沥青路面施工现场的烟气排放监测中,采用摊铺机边位处的总挥发性有机物质量浓度、2类以上致癌物总质量浓度及恶臭强度作为关键的环境影响评价指标。

**关键词:**隧道工程;净味沥青;环境影响评估;施工现场;烟气;恶臭强度

中图分类号:U454

文献标志码:A

## Fume Emission and Environmental Impact Assessment in Fresh Asphalt Tunnel Construction Site

DENG Wenti<sup>1</sup>, ZOU Guilian<sup>2\*</sup>, ZHANG Yuan<sup>2</sup>, YU Liang<sup>1</sup>, XIE Huiduan<sup>3</sup>

(1.Jiangluo Branch of Guangdong Province Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China; 2.School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3.Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

**Abstract:** In view of the random monitoring of fume emission in asphalt pavement construction sites, combined with the engineering application of fresh asphalt in the construction of hot-mixed and hot-spread asphalt pavement in large and long tunnels for fume emission reduction, the fume collection and evaluation method of asphalt pavement construction sites were studied, and the emission reduction effect of fresh asphalt was evaluated. The Summa tanks were used to collect the asphalt fume at different positions of the paver, and the asphalt fume was quantitatively analyzed by gas chromatograph-mass spectrometer (GC-MS). The results show that compared with the non-fresh asphalt from the same source, the fresh asphalt reduces the total mass concentration of volatile organic compounds (VOCs) in the asphalt fume at the edge of the paver, the middle of the paver flank, and the upper position of the paver by 57.0%, 22.6%, and 27.4% during pavement construction, respectively. The fresh asphalt mixture reduces the total mass concentration of class 1 and 2 carcinogens by 62.3% at the edge of the paver during construction, and the odor intensity is only about 1/3 of the non-fresh asphalt mixture. The study suggests that the total mass concentration of VOCs, the total mass concentration of carcinogens exceeding class 2, and the odor intensity at the edge of the paver should be used as the key environmental impact assessment indexes for fume emission monitoring in the asphalt pavement construction site.

**Keywords:** tunnel engineering; fresh asphalt; environmental impact assessment; construction site; fume; odor intensity

收稿日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178426)

作者简介:邓温悌,男,工程师.E-mail:489476564@qq.com

\*通信作者:邹桂莲,女,博士,教授.E-mail:glzhou@scut.edu.cn

## 0 引言

热拌沥青混合料在施工过程中,排放的挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)包含一些致癌和有毒害气体, VOCs达到一定浓度会威胁人体健康,同时是臭氧、灰霾形成的重要前体物<sup>[1-4]</sup>。沥青烟气抑制技术是指通过一定技术手段,降低沥青在受热情况下的烟气排放量,抑制多环芳烃(PAHs)、碳氧化物、氮氧化物和硫化物等有害物质的释放,实现公路绿色施工的技术措施之一<sup>[5-6]</sup>。目前主要有添加抑烟剂等外加剂、低温施工(温拌、冷拌)、从源头上优化原油种类、改进加工工艺等技术<sup>[7-9]</sup>。净味沥青是在沥青生产过程中添加抑烟剂,抑烟添加剂与有害烟气成分发生反应,减少有机气体及NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等有害气体生成,并抑制气体与颗粒物的扩散。

不论采取哪类减排技术,由于目前对沥青路面施工现场烟气排放监测比较随意,各种烟气减排技术的文献数据无法进行比较。因此,基于现场工况条件和施工人员,在施工现场的几个典型位置,规范烟气采集方法与评价指标等非常必要。目前,中国环保规范要求对沥青烟气的测试评价还只停留在国家环境保护总局标准《固定污染源排气中沥青烟的测定 重量法》(HJ/T 45—1999),该标准不能定量分析沥青烟气的组成。现场施工过程中,无组织排放的沥青烟气,受不同工况影响较大,相关采集及评价方法研究较少,采集方法以注射器、气袋、吸附管和苏玛罐采样为主<sup>[10-11]</sup>。其中,气袋采集比较随意,且需要引入采样动力,所采集的气体保存时间短;吸附管采样后需要脱附解析过程,过程比较复杂;相较而言,苏玛罐无须引入采样动力即可完成采样,携带方便,对气体样品保存时间长。烟气评价方法主要分为重量法、荧光分度计法、电化学传感器方法以及气质联用仪法<sup>[12-14]</sup>。通过对长大隧道超薄磨耗层施工中净味沥青施工段与同源非净味沥青施工段沥青烟气排放对比研究,一方面,验证净味沥青产品对减少沥青路面施工现场烟气排放的效果;另一方面,研究确定的现场烟气采集方法及环境影响评估方法是否可以在沥青路面施工现场推广应用。

## 1 施工现场与试验材料

### 1.1 隧道施工现场概况

项目依托工程为江(门)罗(定)高速公路三岔顶

隧道沥青路面养护工程,采用的“白改黑”方案为加铺2 cm的超薄磨耗层,原道路为单向三车道,隧道全长约3 km。施工现场采用半封闭施工,净味沥青超薄磨耗层与同源非净味超薄磨耗层的施工作业方向与现场通风设备的排风及车流方向一致。为避免隧道口的大气风速对烟气采集结果产生影响,选取隧道中段作为烟气采集区域。

### 1.2 隧道现场沥青混合料施工温度、风速等工况条件

沥青混合料施工温度与现场风速是影响烟气采集结果的主要因素<sup>[15-17]</sup>。监测两种沥青路面施工时摊铺机熨平板前和熨平板后混合料温度,每隔5 min记录一次数据。监测结果显示:摊铺速度3~4 m/min,环境温度20~25 ℃,净味沥青路面施工时熨平板前、后沥青混合料施工温度分别为145~166 ℃、137~162 ℃;非净味沥青路面施工时分别为151~169 ℃、144~161 ℃。采用风速仪对施工路段的风速数据进行记录,净味沥青路面施工时隧道风速为1.8~3.1 m/s,非净味沥青路面施工时风速为2.3~3.6 m/s,因为施工现场半封闭,长隧道中段空气流动主要由通车车道行驶的车辆引起。结果表明:两个对比段施工工况条件基本一致。

### 1.3 沥青及混合料

试验采用的净味SBS改性沥青与同源非净味SBS改性沥青,主要技术指标如表1所示。试验结果表明:添加净味剂对沥青主要技术指标及改性沥青的稳定性均无影响。超薄磨耗层混合料NovaChip-B的矿料级配组成如表2所示,油石比5.0%。

表1 净味剂对沥青主要技术指标的影响  
Table 1 Effect of fresh agent on main technical indexes of asphalt

试验项目	25℃针入度/ (0.1 mm)	软化 点/℃	5℃延度/ cm	弹性恢 复/%	离析/ ℃
净味SBS改性沥青	54	94.0	30.5	95	0.9
SBS改性沥青	54	92.0	30.5	93	0.9

表2 NovaChip-B沥青混合料矿料级配组成  
Table 2 Aggregate composition of NovaChip-B asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	通过百分率/%	筛孔尺寸/mm	通过百分率/%
13.2	100.0	0.6	12.7
9.5	98.1	0.3	9.3
4.75	33.3	0.15	7.0
2.36	25.8	0.075	5.3
1.18	17.6		

## 2 监测方案

### 2.1 采样点的布设

沥青烟气对施工现场作业人员健康影响大,烟气采集位置应考虑施工人员的工作位置。在摊铺机上共设置3个采样点:第1个采样点固定于摊铺机边栏杆处,简称摊铺机边位,此点位于下风口,调平手、地面修复工人的工作位置主要在该侧附近,高度距离地面1 m;第2个采样点固定在熨平板侧翼中间装置上,简称侧翼中位。摊铺机边位和中位采样点高度维持一致;第3个采样点位于摊铺机手旁边,位于摊铺机中线位置,采样点与摊铺机边位采样点位于同一截面,简称摊铺机上位。监测布点示意图如图1所示。



图1 施工现场气体采集位置

Figure 1 Collection location of fume in construction site

### 2.2 采样方法

为对比分析净味沥青超薄磨耗层以及同源非净味沥青超薄磨耗层施工时沥青烟气的排放效果,在固定的采样点放置苏玛罐采集现场烟气。苏玛罐连续采集30 min,可完成三车沥青混合料运输车的摊铺,减少现场风速、沥青混合料温度等因素的差异对烟气结果造成误差,每个测点检测3次。采样期间,若遇到施工间断情况,则停止采集,记录实际采集时间,正常施工后,再继续采集,直至合计30 min。

## 3 结果分析

### 3.1 挥发性有机物组成分析

苏玛罐所采集的烟气经过大气预浓缩仪预浓缩后,进入Agilent GC-MS气质联用仪,根据沥青烟气各组分从色谱柱流出的时间不同进行分离定性,在质谱仪中利用带电粒子在磁场或电场的运动规律,测定离子质量及其强度,实现对烟气定性定量分析。两种沥青路面施工时采集的沥青烟色谱图如图2所示。根据色谱峰峰值及峰面积对烟气成分进行定性定量分析。

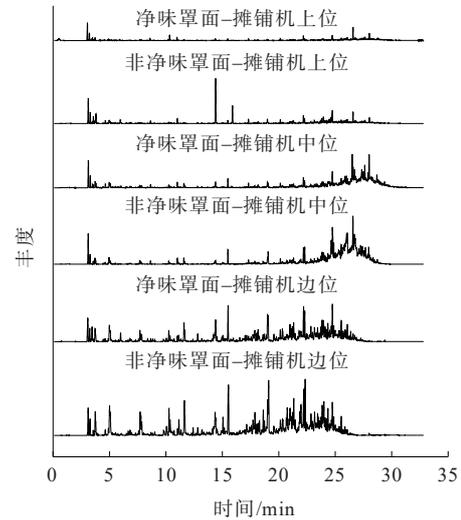


图2 烟气采集位置与净味沥青对烟气排放的影响

Figure 2 Effect of fume collection location and fresh asphalt on fume emission

由图2可知:对于同种沥青路面施工,不同采样点收集的烟气色谱图中色谱峰个数及峰面积相差很大。其中,摊铺机边位色谱峰个数及峰面积最大,所采集烟气VOCs气体种类最丰富,浓度最高。对于同一采样点,净味沥青磨耗层烟气色谱图的色谱峰及峰面积明显减小,烟气减排效果显著,与现场施工人员评价一致。

对两种沥青路面不同采样点收集的烟气组成进行分类汇总,结果如表3所示。由表3可知:占比最高的有机物均为烷烃,其次为芳香烃。烷烃和芳香烃总排放比例占沥青烟气VOCs总浓度的50%以上。

表3 不同施工断面净味沥青对烟气组成的影响

Table 3 Effect of different construction sections of fresh asphalt on fume composition

采集位置	沥青种类	烷烃	芳香烃	醛	酮	烯烃	其他
摊铺机边位	净味沥青	45.3	29.3	10.6	7.2	1.7	5.9
	非净味沥青	40.0	17.6	16.0	16.9	5.3	4.2
侧翼中位	净味沥青	48.6	21.1	8.5	6.4	8.9	6.5
	非净味沥青	49.3	18.9	10.6	10.1	9.1	2.0
摊铺机上位	净味沥青	68.8	15.0	3.4	3.2	4.5	5.1
	非净味沥青	59.4	13.3	11.3	2.8	2.4	10.8

### 3.2 致癌及毒害物质

根据2019年国际癌症研究机构IARC对致癌物的分类清单与美国环境保护署EPA制定的有害大气污染物排放标准,对隧道施工现场烟气中的致癌及有害气体进行了分析,这些标准共包含187种有害大气污染物。两种沥青混合料施工现场在不同采样点

所采集到的烟气分析结果中的致癌等有害气体种类及平均质量浓度如表4所示。非净味沥青超薄磨耗层施工时在排放的沥青烟气中检测出12种致癌有害气体,而净味沥青混合料沥青烟气没检测出异丙醇、氯苯、苯乙烯3种有害气体。在摊铺机边位采集的沥青烟中,净味沥青混合料的致癌等有害气体总质量浓度相较于非净味沥青混合料减排了49.6%,其中1类强致癌物苯的浓度减排了62.0%(摊铺机边位施工工作人员最多、沥青烟有害气体质量浓度最高)。侧

翼中位及摊铺机上位的致癌等有害气体总质量浓度分别减排了8.0%、6.8%。

### 3.3 挥发性有机物总质量浓度及2类以上致癌物总质量浓度

由于3类致癌物对人类致癌的影响尚无充分的人体或动物数据支持,研究选取了挥发性有机物总质量浓度以及2类以上致癌物的总质量浓度作为评价烟气对人类健康影响的重要指标,结果如图3所示。

表4 不同施工断面净味沥青对致癌物等有害气体的影响

Table 4 Effect of different construction sections of fresh asphalt on carcinogens and other harmful gases  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

有害程度	气体种类	摊铺机边位		侧翼中位		摊铺机上位	
		净味沥青气体质量浓度	非净味沥青气体质量浓度	净味沥青气体质量浓度	非净味沥青气体质量浓度	净味沥青气体质量浓度	非净味沥青气体质量浓度
1类致癌物	苯	28.77	75.78	7.51	8.73	4.61	3.46
2A类致癌物	二氯甲烷	1.84	4.60	3.07	4.97	0.01	3.67
2B类致癌物	乙醛	14.07	38.09	3.77	4.22	0.02	2.39
	异丙醇	0.00	3.63	0.00	1.67	0.00	0.94
3类致癌物	巴豆醛	1.86	9.28	0.22	0.90	0.00	0.20
	甲苯	63.84	45.06	13.75	0.00	18.09	9.11
	间二甲苯	0.56	39.66	4.87	5.98	5.73	4.50
	对二甲苯	24.22	50.95	3.93	6.80	1.97	6.29
4类致癌物	二甲醚	4.72	3.06	0.00	3.93	3.74	3.41
	二硫化碳	1.29	4.26	0.67	0.60	0.36	0.39
	氯苯	0.00	2.19	0.00	0.35	0.00	0.00
	苯乙烯	0.00	3.78	0.00	2.91	0.00	2.68
致癌等有害气体总质量浓度		141.17	280.34	37.79	41.06	34.53	37.04

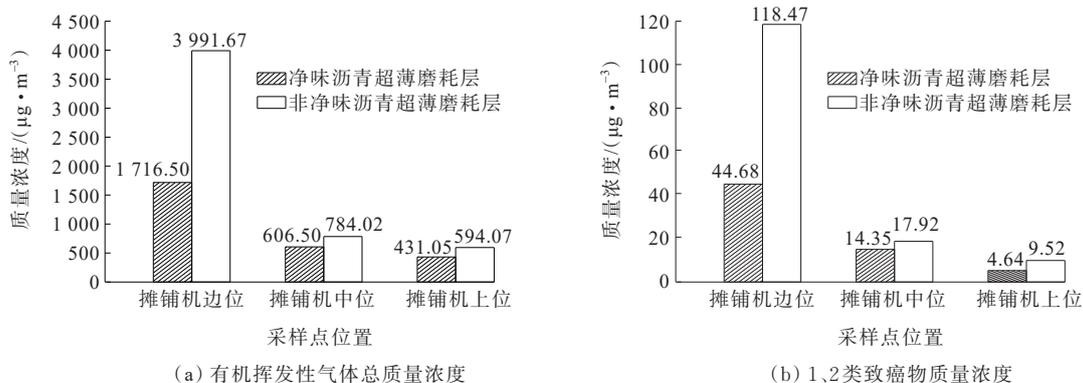


图3 不同施工断面净味沥青对挥发性有机物及2类以上致癌物质量浓度物排放的影响

Figure 3 Effect of different construction sections of fresh asphalt on mass concentration of VOCs and carcinogens exceeding class 2

由图3可知:两种沥青路面有机挥发气体质量浓度与2类以上致癌物的质量浓度大小依次为:摊铺机边位>侧翼中位>摊铺机上位,原因是摊铺机边位采样点位于沥青混合料出料口断面下风口,受旋转

拌和器的影响,此处混合料堆积最多,与氧气的接触面积最大,故此处所产生的沥青烟气质量浓度最高。相比之下,位置更高的摊铺机上位,由于隧道水平风的作用,烟气会顺着风向排放,导致向上扩散的烟气

质量浓度迅速降低。

净味沥青路面施工时,摊铺机边位、侧翼中位、摊铺机上位3个采样点采集的沥青烟有机挥发气体总质量浓度较非净味沥青路面减排了57.0%、22.6%、27.4%,1、2类致癌物总浓度减排了62.3%、19.9%、51.3%。说明净味沥青可抑制有机气体及致癌气体的排放。

### 3.4 空气质量影响评价及恶臭强度评估

#### 3.4.1 空气质量影响评价

目前缺乏开放环境空气质量标准,长隧道内部空气流通性差,有害气体难以逸出,更类似于室内环

境。因此参照国家标准《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2022)中有关规定以及现场沥青烟气中所检测出的气体成分,比较现场烟气中苯、甲苯、总挥发性有机物与室内空气质量标准限值,如表5所示。两种沥青路面施工时在3个采样点所采集排放的苯、甲苯浓度均满足《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2022)要求。对于总挥发性有机物质量浓度,只有摊铺机上位满足室内空气质量要求,但净味沥青路面施工所排放的挥发性气体总质量浓度有所下降。因此为避免挥发有机物对施工人员健康影响,应加强通风,减短工人工作时长。

表5 现场烟气检测结果及室内空气质量要求

Table 5 Results of fume monitoring in construction site and requirements for indoor air quality  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

气体种类	摊铺机边位		侧翼中位		摊铺机上位		室内空气质量浓度规范限值
	净味沥青烟气质量浓度	非净味沥青烟气质量浓度	净味沥青烟气质量浓度	非净味沥青烟气质量浓度	净味沥青烟气质量浓度	非净味沥青烟气质量浓度	
苯	28.77	75.78	7.51	8.73	4.61	3.46	110
甲苯	63.84	45.06	13.75	0.00	18.09	9.11	200
总挥发性有机物	1 716.50	3 991.67	606.50	784.02	431.05	594.07	600

#### 3.4.2 恶臭强度评估

净味沥青可减少沥青烟气,同时能减少有害气体产生恶臭味,改善施工人员工作条件。为了量化分析净味沥青恶臭强度减排效果,采用恶臭强度指标对净味沥青恶臭程度进行量化评价<sup>[18]</sup>。恶臭强度指标计算如式(1)、(2)所示:

$$S = \frac{C_i}{T_i} \quad (1)$$

$$I = \sum S \quad (2)$$

式中: $S$ 为阈稀释倍数; $I$ 为恶臭浓度; $C_i$ 为沥青烟气体 $i$ 组分的浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ); $T_i$ 为 $i$ 组分的嗅阈值( $10^{-6}$ )。

对于沥青烟不同组分的嗅阈值,中国相关数据库较少,研究引用了日本恶臭物质嗅阈值数据库<sup>[19]</sup>,对摊铺机边位收集的两种沥青路面施工所排放的沥青烟气中各组分与日本恶臭物质嗅阈值数据库进行对比,对式(1)、(2)计算结果进行汇总,如表6所示。

表6 摊铺机边位两种沥青烟气阈稀释倍数及恶臭强度

Table 6 Dilution multipliers and odor intensity of two asphalt fume thresholds at the edge of paver

气体名称	嗅阈值(体积分数)/ $10^{-6}$	净味沥青路面施工沥青烟		非净味沥青路面施工沥青烟	
		气体质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	阈稀释倍数	气体质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	阈稀释倍数
苯	2.700 0	28.77	0.003 056	75.78	0.008 049
二氯甲烷	160.000 0	1.84	0.000 003	4.60	0.000 008
乙醛	0.001 5	14.07	4.769 852	38.09	12.912 841
异丙醇	26.000 0	0.00	0.000 000	3.63	0.000 052
巴豆醛	0.023 0	1.86	0.025 845	9.28	0.128 947
甲苯	0.330 0	63.84	0.047 030	45.06	0.033 195
丙酮	42.000 0	45.20	0.000 415	93.09	0.000 855
间二甲苯	0.041 0	0.56	0.002 882	39.66	0.204 087
十二烷	0.110 0	11.06	0.013 223	68.05	0.081 357
环己烷	2.500 0	10.62	0.001 131	64.59	0.006 877

续表6

气体名称	嗅阈值(体积分数)/10 <sup>-6</sup>	净味沥青路面施工沥青烟		非净味沥青路面施工沥青烟	
		气体质量浓度/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	阈稀释倍数	气体质量浓度/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	阈稀释倍数
对二甲苯	0.058 0	24.22	0.088 103	50.95	0.185 337
丙烷	1 500.000 0	11.34	0.000 004	21.51	0.000 007
二硫化碳	0.210 0	1.29	0.001 813	4.26	0.005 971
3-甲基戊烷	8.900 0	3.62	0.000 106	0.30	0.000 009
甲基环戊烷	1.700 0	5.02	0.000 786	13.87	0.002 171
2-甲基庚烷	0.110 0	11.20	0.019 959	34.42	0.061 359
3-甲基庚烷	1.500 0	6.74	0.000 881	32.63	0.004 266
正壬烷	2.200 0	37.22	0.002 955	86.28	0.006 849
1,2,3,4-四甲基苯	0.011 0	13.45	0.204 075	99.24	1.505 718
恶臭强度	—	—	5.180 000	—	15.140 000

由表6可知:非净味沥青混合料施工所排放的沥青烟气恶臭强度是净味沥青混合料沥青烟气恶臭强度的2.9倍左右,说明净味剂可以大幅降低沥青烟气味道。其中,乙醛、1,2,3,4-四甲基苯、对二甲苯等醛类及芳香烃类物质是影响两种沥青烟气恶臭强度的主要成分。

#### 4 结论

结合隧道沥青路面施工现场环境条件,提出了现场沥青烟气的采集和评价方法,分析了净味沥青在烟气减排及环境影响方面的作用,主要结论如下:

(1) 沥青烟气的采集位置对试验结果影响显著,考虑到摊铺机边位是地面施工人员工作的主要位置,烟气浓度最高,建议采集点布设在摊铺机边位下风口处。净味沥青混合料在摊铺机边位采集的沥青烟中致癌等有害气体的总质量浓度相较于非净味沥青混合料减排了49.6%。

(2) 施工现场沥青烟气有机挥发性气体主要由烷烃、芳香烃、醛、酮、烯烃等组成,其中烷烃和芳香烃总排放比例占沥青烟气VOCs总质量浓度的50%以上。

(3) 与同源非净味沥青相比,净味沥青在摊铺机边位的1、2类致癌物总质量浓度减排了62.3%。醛类和芳香烃类是影响沥青烟气恶臭强度的主要物质,非净味沥青混合料施工时的沥青烟气恶臭强度是净味沥青混合料沥青烟气的2.9倍左右。

(4) 综合考虑排放浓度、人员工作位置、有害程度等因素,建议在评价沥青路面施工现场的烟气排

放时,以摊铺机边位采样点沥青烟气中的总挥发性有机物浓度、2类以上致癌物总质量浓度及恶臭强度作为关键评价指标,用于分析各类烟气减排技术的环境影响。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 叶伟.隧道抑烟沥青的研制与抑烟沥青混合料路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.  
YE Wei. Development of tunnel smoke suppression asphalt and research on road performance of smoke suppression asphalt mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2014.
- [2] 崔培强.沥青VOC分析技术及抑制方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.  
CUI Peiqiang. Research methodologies on the VOC emissions from bituminous materials and its inhibitor[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2015.
- [3] LI N, JIANG Q, WANG F S, et al. Emission behavior, environmental impact and priority-controlled pollutants assessment of volatile organic compounds (VOCs) during asphalt pavement construction based on laboratory experiment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 398: 122904.
- [4] 朱旭伟,田波.温度和光照对沥青排放物特征的影响[J].中外公路,2023,43(3):212-217.  
ZHU Xuwei, TIAN Bo. Effect of temperature and light on characteristics of asphalt emissions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3):212-217.
- [5] 屠书荣,秦绍清,王晓辉,等.基于过程控制的绿色公路评

- 价方法和标准研究[J].中外公路,2020,40(6):327-331.
- TU Shurong, QIN Shaoqing, WANG Xiaohui, et al. Research on evaluation method and standard of green highway based on process control[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(6):327-331.
- [6] 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.
- [7] 冯涛.壳牌沥青:升级再出发[J].中国公路,2019(24):48-49.
- FENG Tao. Shell asphalt: Upgrade and start again[J]. China Highway,2019(24):48-49.
- [8] 邹桂莲,孙学楷,刘新海.再生集料泡沫沥青混合料的配合比设计及路用性能[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(8):28-32.
- ZOU Guilian, SUN Xuekai, LIU Xinhai. Mix design and pavement performance of foamed asphalt mixture with recycled aggregate[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2019,36(8):28-32.
- [9] 侯宁宁.隧道温拌阻燃抑烟沥青混合料技术性能研究[D].西安:长安大学,2018.
- HOU Ningning. Research on the performance of warm asphalt mixture in tunnel with feature of inflaming retarding and smoke suppression[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.
- [10] LIANG M, REN S S, FAN W Y, et al. Characterization of fume composition and rheological properties of asphalt with crumb rubber activated by microwave and TOR[J]. Construction and Building Materials,2017,154:310-322.
- [11] 卢清,李婷婷,黄礼海,等.利用重质稠油生产沥青的VOCs排放特征[J].环境科学学报,2021,41(6):2282-2290.
- LU Qing, LI Tingting, HUANG Lihai, et al. Emission characteristics of VOCs during the production of asphalt using heavy-viscous crude oil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41(6):2282-2290.
- [12] 李婷婷,郭送军,黄礼海,等.沥青路面铺设VOCs排放特征及风险评估[J].中国环境科学,2021,41(1):73-80.
- LI Tingting, GUO Songjun, HUANG Lihai, et al. Emission characteristics and health risk assessment of VOCs from asphalt pavement construction[J]. China Environmental Science,2021,41(1):73-80.
- [13] 李澳.橡胶沥青净味机理及性能评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- LI Ao. Deodorization mechanism and performance evaluation of rubber asphalt[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2020.
- [14] 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.
- [15] MO S C, WANG Y H, XIONG F, et al. Effects of asphalt source and mixing temperature on the generated asphalt fumes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 371: 342-351.
- [16] WANG M, LI P, NIAN T F, et al. An overview of studies on the hazards, component analysis and suppression of fumes in asphalt and asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials,2021,289:123185.
- [17] 才洪美.沥青使用过程中对环境的影响研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
- CAI Hongmei. Research on the effect of asphalt components to environment in the course of using[D]. Qingdao: China University of Petroleum,2010.
- [18] 李伟芳,耿静,翟增秀,等.恶臭物质的嗅觉阈值与致臭机理研究概况与展望[J].安全与环境学报,2015,15(3):327-330.
- LI Weifang, GENG Jing, ZHAI Zengxiu, et al. Research advances and prospects on the olfactory threshold of odor substance and its formation mechanism[J]. Journal of Safety and Environment,2015,15(3):327-330.
- [19] NAGATA Y. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method[R]. Tokyo: Ministry of the Environment, Government of Japan,2003:118-127.