

文章编号:1671-8879(2020)01-0030-10

# 热拌与温拌沥青路面生产施工排放物对比

邱延峻<sup>1,2</sup>, 罗浩原<sup>1,2</sup>, 张家康<sup>1,2</sup>, 冷慧康<sup>1,2</sup>, 艾长发<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘 要:**为量化温拌剂的减排效果,对热拌与温拌沥青路面的生产和施工展开实地调研。选取排放问题较典型的拌和站出料、露天一般路面摊铺、隧道路面摊铺 3 个测试环境进行空气采样,选取采集空气样本中的 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、苯并(a)芘(BaP,挥发性有机物,一级致癌物质)、沥青烟(致癌物)9 种物质作为特征排放物进行定量分析,并将分析结果与有害浓度限制值以及相关研究结果进行了对比。研究结果表明:相较热拌工艺,选用的温拌剂可有效降低混合料的拌和与压实温度,降低了 20 ℃,与此同时,在上述 3 个测试环境中,掺入温拌剂使 9 种排放物的浓度平均降低了 28.6%、20.8%和 26.4%,并可将热拌工艺下拌和站出料测试环境中超标的 CO 和隧道路面摊铺环境中超标的沥青烟浓度控制至限制值以内;温拌剂对致癌物 BaP(降低 40%以上)和沥青烟(降低 30%以上)的减排效果最好,气态排放物 CO、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 次之,但 H<sub>2</sub>S、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 没有观察到具有统计意义的减排效果;与同类研究结果的对比表明,CO、CO<sub>2</sub> 的减排效果与温度降幅的相关性最高,SO<sub>2</sub> 的排放量除了与温度有关还与集料的酸碱性有关,NO<sub>x</sub> 的减排效果主要来自用于加热的燃料节约,加热温度的降低也使 BaP 的挥发变弱。温拌剂可以有效降低沥青混合料施工生产中的排放。

**关键词:**道路工程;沥青路面;温拌剂;减排;施工温度;施工排放物

中图分类号:U414

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.003

## Comparative of emissions from production and construction of hot mix and warm mix asphalt pavement

QIU Yan-jun<sup>1,2</sup>, LUO Hao-yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-kang<sup>1,2</sup>, LENG Hui-kang<sup>1,2</sup>, AI Chang-fa<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To quantify the emission reduction effect of warm mix additives, field research was carried out on the production and construction of hot mix and warm mix asphalt pavement and three typical test environments, namely, “mixing station discharge” “open-air general road paving” and “tunnel paving”, were selected for air sampling. Nine substances (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, Benzo(a)pyrene (BaP, volatile organic compounds, a primary carcinogen), and asphalt smoke (also carcinogen)) were selected as characteristic emissions for

收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51778541);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682019ZT05)

作者简介:邱延峻(1966-),男,浙江衢州人,教授,博士研究生导师,E-mail:publicqiu@vip.163.com。

quantitative analysis. The results were compared with the harmful concentration limit values and the test results of similar studies. The results show that the warm mix additive is selected by the project can effectively reduce the mixing and compaction temperature of a mixture by 20 °C, at the same time as the above three test environments, the warm mix additive reduces the concentration of the nine emissions by averages of 28.6%, 20.8%, and 26.4%, respectively, making the excessive CO concentration in the “mixing station discharge” environment and the excessive asphalt smoke concentration in the “tunnel paving” environment satisfy the limit value. The warm mix additive has the best emission reduction effect on the carcinogen BaP (reduced by more than 40%) and asphalt smoke (reduced by more than 30%), followed by gaseous emissions CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub>. However, for H<sub>2</sub>S, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub>, no significant emission reduction effects are observed. A comparison with similar studies shows that the carbon dioxide emission reduction effect has the highest correlation with the temperature drop, and the emission of SO<sub>2</sub> is related to the acidity and alkalinity of the aggregate in addition to temperature. The emission reduction effect of NO<sub>x</sub> comes from the saving of heating fuel and the reduction of heating temperature of asphalt also leads to the weakening of the volatilization of BaP. Furthermore, the warm mix additive can effectively reduce the discharge of the asphalt mixture in construction and production. 9 tabs, 3 figs, 31 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; warm mix additive; emission reduction; construction temperature; emission from construction discharge

## 0 引 言

近年来沥青路面的施工排放问题越来越受到重视,加之现阶段中国的交通网络建设中心转移向西部地区的高海拔带,这些地区普遍存在生态环境敏感、冬季气温寒冷问题。为了控制道路建设中的污染排放问题,具备节能减排优点的温拌沥青技术在西部地区路面摊铺工程中的应用越来越多。一般来说,温拌剂可以降低沥青混合料的生产施工温度 20 °C~30 °C<sup>[1]</sup>。根据美国公路合作研究组织:采用温拌工艺后,混合料生产过程中 CO<sub>2</sub> 的排放下降主要是源于降低生产温度而减少的加热燃料消耗效果<sup>[2]</sup>。大量研究表明:温度对于沥青混合料施工排放有着显著影响,降低 10 °C 的拌和温度后,可有效减少 10% 的 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[3]</sup>,降低 30 °C 后,对于 CO、SO<sub>2</sub> 等有毒有害气体排放减少超过 50% 以上<sup>[4]</sup>。可见,在改善施工温度的同时,温拌沥青技术拥有较强的综合环境效益。

温拌剂的减排效益具体表现在 2 个方面:一方面,生产沥青混合料过程中需要消耗的重油、电能、煤等化石能源显著下降,进而表现在燃料燃烧产生碳氧化物、氮氧化物、硫化物等气体排放量降低<sup>[5]</sup>;另一方面,沥青在加热过程中产生挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 和沥青加热燃

烧的特有产物——沥青烟显著下降<sup>[6]</sup>。VOCs 和沥青烟中的大部分物质存在致癌特性,且加热温度越高挥发越明显,对道路建设从业人员的身体健康造成威胁。同时,集料的加热烘干过程会产生大量的粉尘和颗粒物,代表物为 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>,这二者是造成“雾霾”的主要因素。因此,大部分研究在沥青混合料生产和施工排放的过程中选用了 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、沥青烟和 VOCs 中的几项或全部作为研究的特征排放物。在这方面,国外学者已经做出很多探索。Davidson 等测定了采用温拌工艺前后,3 种特征排放物 (CO<sub>2</sub>、CO 和 SO<sub>2</sub>) 含量变化,研究结果指出:添加 Evotherm 温拌剂后,CO<sub>2</sub>、CO 排放量降低约 20%,但是 SO<sub>2</sub> 的排放量却有少量增加<sup>[7]</sup>。Middleton 等的研究同样观测到了 CO 与 CO<sub>2</sub> 排放的减少和 SO<sub>2</sub> 排放的增加,除此之外,还发现温拌剂对于 NO<sub>x</sub> 也有较好的减排效果<sup>[8]</sup>。Hurley 等在 CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub> 的基础上进一步的对比了 VOCs,与热拌沥青相比,温拌沥青的 VOCs 的排放增加了 300%<sup>[9]</sup>。Del carmen rubio 等研究给出的温拌沥青的 CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub> 的减排结果与之前的研究结果类似,呈显著降低,但不同的是,SO<sub>2</sub>、VOCs 排放也是降低的,其主要是各研究的依托工程采用的沥青类型不同所致<sup>[10]</sup>。Sargand 等对 3 种常用温拌剂 (Evotherm、Aspha-min、Saso-

bit)进行研究,测定施工过程中 CO、SO<sub>2</sub> 和大气颗粒物的减排效果均在 50% 以上<sup>[11]</sup>。Thives 等指出,沥青混合料拌和时用以加热干燥集料产生的 CO<sub>2</sub> 排放量占比达到 80%,并对天然气、燃油、废油等不同加热燃料的排放物进行测定<sup>[12]</sup>。

由于沥青生产和摊铺过程中的排放测试较为复杂、昂贵且测试的边界条件不易控制,中国对沥青混合料生产施工过程的废气排放研究还比较少。多数学者致力于对沥青混合料碳排放分析评价模型和影响评估模型的开发。杨博基于全生命周期分析(life cycle assessment, LCA)方法对沥青路面建设阶段、施工阶段和使用阶段能耗与排放量进行量化分析,采用层次分析法和模糊综合评价法,设计开发了沥青路面能耗与排放评价系统<sup>[13]</sup>。何亮等采用生命周期分析方法对 CO<sub>2</sub> 的排量进行计算<sup>[14]</sup>。彭波等利用碳排放因子、能耗量等参数,建立了能耗碳排放量化模型和高温挥发碳排放量化模型<sup>[15]</sup>。但是,全生命周期的施工排放数据多是通过计算各类燃料的排放因子,从而对施工过程中典型排放物的排放当量进行预估,而对实际工程现场直接进行排放物测试的研究较为缺乏。

本研究针对工程项目建设过程中热拌与温拌沥青生产施工温度展开调研。分别对热拌与温拌沥青混合料在经历拌和站出料、露天一般路面摊铺、隧道路面摊铺 3 个测试环境时的周围空气进行采样,而后在实验室内将采样空气进行成分化验;选取 9 种物质,包括:5 种气体排放物(CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>)、2 种颗粒物(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)、1 种挥发性有机物苯并(a)芘(BaP)和沥青烟作为特征排放物进行热拌与温拌的排放对比研究,进一步将其测试值与中国工作场所规定的有害浓度限制标准进行对比,并与相关研究对比,对温拌沥青工艺使用前后的实际减排效果进行定量评估,分析其内在原因。

## 1 排放测试边界条件设置

### 1.1 依托工程概况

本文依托川西雅叶(雅安—叶城)高速公路建设项目,全长 135 km,在其路段内高程从 670 m 上升至 2 460 m,主线全程采用沥青混凝土路面铺筑,采用 SBS 改性沥青,该工程使用了美德维实伟克公司生产的 Evotherm@M1 表面活性型温拌剂。由于该地区的年平均气温为 13.8℃ 左右,冬季极端气温为-5℃ 左右,且全天温差较大,全年有至少 150 d 的平均气温低于 10℃,其中的二郎山国家森林公园

更是大熊猫保护基地之一,对于施工过程的环境影响要求极其严苛<sup>[16]</sup>。为了保证工期和低温环境下施工质量,90% 以上的上中下面层的沥青中都加入了 Evotherm@M1 温拌剂。该温拌剂属于表面活性型温拌剂,为暗黄色油状流体,具有刺激性氨味,其密度约为 0.96 g/cm<sup>3</sup>,建议掺量为沥青质量的 0.5%~1%<sup>[17]</sup>。

### 1.2 拌和站沥青混合料生产排放

本研究对比的热拌沥青混合料(hot mix asphalt mixture, HMA)与温拌沥青混合料(warm mix asphalt mixture, WMA)均是在全自动间歇式沥青拌和站中进行生产。以 HMA 生产过程为例,集料按照级配存放于 5 个干燥常温的料斗中,接到生产任务后,料斗会自动按设计配比卸料至传送皮带上,输送至干燥筒提取矿尘,筒内温度为 190℃。然后,经过除尘后的集料在保温料斗中以 180℃ 恒温保存并等待拌和。拌和开始后,集料从加热料斗投入混合料拌和仓内。与此同时,SBS 改性沥青从沥青储罐中被泵送至拌和仓,储存在填料储罐(存储温度为 180℃)的填料也随之投入拌和仓。在拌和舱内,集料、沥青和填料被充分混合,拌和完成后直接出料至运载卡车进行运输,冬季低温条件下的出料温度被要求控制在 175℃ 以上。

通过实测得到混合料生产的流程中的温度结果如表 1 所示。其中,沥青、集料、填料储罐及加热斗内的温度是通过拌和站控制塔楼的温度传感器反馈得知,出料温度通过插入式温度传感器插入盛满混合料的运载车货箱内获得。从表 1 可知,WMA 的各项生产温度较 HMA 均降低了 20℃ 左右。

表 1 拌和站进行沥青混合料生产温度  
Tab. 1 Asphalt mixture production temperature at mixing station

温度控制位置	HMA	WMA
集料干燥除尘桶内	191~197	170~176
SBS 改性沥青储罐内	170~175	152~155
填料储罐	189~200	171~178
集料加热料斗	180~190	158~164
出料	177~180	156~160

由于热拌 SBS 改性沥青施工温度较高,在其出料过程中,伴随拌料斗的打开会产生大量的白烟,见图 1。这些白烟直接排放至大气环境中,并未进行有效的尾气处理。因此,在料斗下方(即运载车停靠的位置)设置空气样品采集点,对 HWA 和 WMA 出料时空气样本进行采集,对比 9 种特征污染物的浓度变化。



图 1 拌和站出料时的白烟排放

Fig. 1 White smoke emission when discharging at mixing station

1.3 摊铺现场沥青混合料施工排放

摊铺现场采用的 HMA 与 WMA 摊铺方案基本相同。通过实测,摊铺各个阶段的温度如表 2 所示。其中,混合料进场温度测试的是在运载车到达摊铺现场后,通过插入式温度传感器从运载车货箱顶面插入 50 cm 后测得的温度。投料温度是测定摊铺机接料口处的温度,初压、复压、终压完成温度分别是采用插入式温度传感器插入已经完成摊铺的路面得到的。由表 2 可知,采用温拌剂后,WMA 摊铺各个环节的温度较 HMA 下降 20 ℃ 左右。

表 2 路面摊铺现场的温度测试情况

Tab. 2 Temperature testing on pavement paving sites      ℃		
温度测试阶段	HMA	WMA
混合料进场	167~171	145~150
运载车投料	161~169	139~147
初压完成	156~165	134~142
复压完成	141~146	119~126
终压完成	126~133	101~110

在进行摊铺作业时,当运载车向摊铺机料斗内倾倒和摊铺机向地面铺洒混合料时均会扬起白色烟尘,伴随在摊铺机后进行辅助整平的铺路工人将直接暴露在白色烟尘中,这些烟尘也是直接排入大气环境中,施工温度越高,白色烟尘越大。

进行隧道施工时,由于通风条件较差,上述白色烟尘问题更加显著。添加温拌剂后可以部分缓解白色烟尘,如图 2 和图 3 所示。因此,本研究分别在热拌与温拌条件下,露天一般路面摊铺和隧道路面摊铺过程中,对摊铺机行进后方的空气采样测定,以判断温拌剂对路面摊铺施工的减排效果。

1.4 排放物采样及测试方案

通过对依托工程的调研,设置了拌和站出料、露天一般路面摊铺、隧道路面摊铺 3 个沥青混合料生产施工过程中排放问题较为突出的测试环境,进行空气成分采样分析,具体测试方案如下。



图 2 隧道路面热拌铺筑时产生的白烟

Fig. 2 White smoke produced during tunnel paving of hot mix pavement



图 3 采用温拌工艺后,隧道路面摊铺时白烟有所缓和

Fig. 3 White smoke emission has been alleviated during tunnel paving after using warm mix additive

(1)环境空气采样方案。采用 QCS-6000 型四气路大气采样器(固定式采样器)和 Gilair 5 型空气采样器(手持移动式采样器)对环境空气进行采样,气体采样方法依据中国《工作场所空气中有害物质检测采样规范》(GBZ 159-2004)<sup>[18]</sup>进行操作,采样时间 15 min,采集设平行试样 6 个,采集完成的气体样品如表 3 所示。

拌和站的气体采样位置位于正在进行装料作业的运载车的驾驶室外(即拌和塔出料口下方位置),采用固定式大气采样器进行采集,采集的工况包括 HMA 出料和 WMA 出料下的环境空气样本。

摊铺时的气体采样位置位于正在进行摊铺作业的摊铺机尾部,即采集摊铺辅助工人作业位置附件的气体样本。采用手持式空气采样仪跟随摊铺作业行进进行移动采集,采集工况包括一般路面摊铺(露天)和隧道路面摊铺时 HMA 和 WMA 出料,共计 4 种状态的环境空气样本。

(2)空气样本检测方案。环境空气样本的检测项目共计 9 种物质。其中,CO<sub>2</sub> 是温室效应的主要

表 3 9 种排放物的检测方法及其检测依据

Tab. 3 Detection methods and criterions of nine kinds of waste

测试项目	检测方法	参照标准	主要检测设备
CO	不分光红外分析法	GBZ/T 160. 28—2004 <sup>[20]</sup>	GXH-3011A CO 红外分析仪
CO <sub>2</sub>	不分光红外分析法	GBZ/T 160. 28—2004 <sup>[20]</sup>	GXH-3010E CO <sub>2</sub> 红外分析仪
H <sub>2</sub> S	亚甲蓝分光光度法	GBZ/T 160. 33—2004 <sup>[21]</sup>	7230G 可见分光光度计
SO <sub>2</sub>	甲醛缓冲液-盐酸副玫瑰苯胺分光光度法	GBZ/T 160. 33—2004 <sup>[21]</sup>	7230G 可见分光光度计
NO <sub>x</sub>	盐酸萘乙二胺分光光度法	GBZ/T 160. 29—2004 <sup>[22]</sup>	7230G 可见分光光度计
BaP	高效液相质谱仪测定法	GBZ/T 160. 44—2004 <sup>[23]</sup>	Agilent 1200 型高效液相质谱仪
PM <sub>10</sub>	光散射法	GB/T 18204. 2—2014(5. 2) <sup>[24]</sup>	LD-5C(b)激光测尘仪
PM <sub>2. 5</sub>	光散射法	GB/T 18204. 2—2014(6) <sup>[24]</sup>	LD-5C(b)激光测尘仪
沥青烟	紫外分光光度法	GB 18553—2001 <sup>[25]</sup>	Cary100 型紫外分光光度计

原因,也是节能减排考察的最主要指标;而 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2. 5</sub>、PM<sub>10</sub> 是大气中主要的特征污染物<sup>[1-4]</sup>;BaP 是石油类物质加热和燃烧时极易产生的污染物,属于 VOCs,是皮肤癌、肺癌、胃癌的主要诱因,被世界卫生组织列为一級致癌物质;而沥青烟是沥青类物质过加热或燃烧产生的特有物质,其主要成分二噁英也是一级致癌物质<sup>[19]</sup>,上述物质测试方法、设备、检测依据如表 3 所示。

由于空气样本中的成分测定方法有较多标准可以参照,例如,中国卫生健康委员会的工作场所空气成分测定系列规范<sup>[20-24]</sup>和生态环境部的大气成分测定系列规范,但是在本文涉及的几种物质的测定上,二者采用的检测方法和主要的测试设备都基本相同。为讨论各排放物对路面施工从业人员的身体健康影响,本研究参照中国卫生健康委员会的系列测试方法进行试验。关于沥青烟的测定,两部委规范均无检测方法,所以采用中国国家质量监督检验检疫总局颁布的《车间空气中石油沥青(烟)职业接触限值》(GB 18553—2001)<sup>[25]</sup>中附录 A 进行测定。

(3)采样现场边界条件(工况条件)。由于空气样本采集受气温,风速,天气状态的影响较大,而本试验的采样工况较多,考虑工程施工的实际进度,无法做到测试边界条件的完全相同,只能尽可能的对照试验的边界条件基本相同,6 次采样的基本边界条件见表 4。

表 4 采样时的气象条件

Tab. 4 Meteorological conditions during sampling

采样环境	气温/℃	风速/(m·s <sup>-1</sup> )
HMA 拌和站出料	15. 6	0. 5
WMA 拌和站出料	11. 8	0. 2
HMA 一般路面摊铺	16. 4	2. 1
WMA 一般路面摊铺	11. 5	1. 9
HMA 隧道路面摊铺	26. 7	4. 1
WMA 隧道路面摊铺	24. 9	4. 0

注:隧道路面摊铺空气采样在隧道内,风速测定条件为鼓风机通风、迎风采集。

2 结果与讨论

通过对现场采集的空气样本进行定量分析,得到了温拌沥青技术采用前后 3 个测试环境中的 9 种特征排放物变化情况。为了表征温拌剂的加入是否会对被检物质的浓度起影响作用,引入了统计学上的 *p* 值检验方法(每种排放物的测试平行试验数 *n* 为 6)。

为了进一步明确温拌剂减排效果的实际意义,依据中国《工作场所有害因素职业接触限制——第 1 部分:化学有害因素》(GBZ/T 2. 1—2007)中对上述排放物的浓度限制要求,讨论了温拌剂使用前后各排放物是否安全<sup>[26]</sup>。参考文献[26],将工作场所中化学物质的接触限制浓度分为了 3 类:①时间加权平均容许浓度(permissible concentration-time weighted average,PC-TWA),定义为以工作时间为 8 h 工作日,40 h 工作周的平均接触浓度;②短时间接触容许浓度(permissible concentration-short term exposure limit,PC-STEL),定义为在遵守 PC-TWA 前提下的容许短时间(15 min)接触浓度;③最高容许浓度(maximum allowable concentration,MAC),定义为任何时间都不能超过的浓度。

测试物质的限值见表 5。由于沥青烟、BaP、PM<sub>2. 5</sub>和 PM<sub>10</sub>的限定值并未在上述规范中给出。因此,沥青烟的有害限制值按照《车间空气中石油沥青(烟)职业接触限制》(GB 18553—2001)给定的 MAC 值进行讨论<sup>[25]</sup>,而 BaP、PM<sub>2. 5</sub>和 PM<sub>10</sub>按照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)的日均限定值进行讨论<sup>[27]</sup>。

2.1 拌和站出料排放分析

拌和站出料时的空气样本检测结果如表 6 所示。通过第 1. 2 节中的生产温度调研结果可知(表 1),热拌沥青混合出料时的温度约为 179 ℃,加入温

表 5 9 种排放物的有害浓度限值

Tab. 5 Harmful concentration limits for nine types of emissions

检测物质	MAC	PC-TWA	PC-STEL	日均限值	参照依据
CO/(mg·m <sup>-3</sup> )		20	30		GBZ/T 2.1—2007 <sup>[26]</sup>
CO <sub>2</sub> /%		9 000	18 000		
H <sub>2</sub> S/(mg·m <sup>-3</sup> )	10				
SO <sub>2</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )		5	10		
NO <sub>x</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )		5	10		
BaP/(μg·m <sup>-3</sup> )				0.002 5	GB 3095—2012 <sup>[27]</sup>
PM <sub>10</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )				150	
PM <sub>2.5</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )				75	
沥青烟/(mg·m <sup>-3</sup> )	8				GB 18553—2001 <sup>[25]</sup>

表 6 拌和站出料时气体排放测试结果

Tab. 6 Test results of emissions concentration when mixing station discharge

参数		排放物浓度			<i>p</i> 值	WMA 比 HMA 排放物 浓度下降率/%
		浓度单位	HMA	WMA		
检测 物质	CO	mg·m <sup>-3</sup>	24.1 *	18.4	<0.05	23.70
	CO <sub>2</sub>	%	4.9	2.8	<0.05	42.80
	H <sub>2</sub> S	mg·m <sup>-3</sup>	<0.6	<0.6	>0.05	
	SO <sub>2</sub>	mg·m <sup>-3</sup>	9.2 *	5.7 *	<0.05	40.10
	NO <sub>x</sub>	mg·m <sup>-3</sup>	0.127	0.081	<0.05	33.70
	BaP	μg·m <sup>-3</sup>	0.47 *	0.128 *	<0.05	72.80
	PM <sub>10</sub>	μg·m <sup>-3</sup>	645 *	648 *	>0.05	−0.42
	PM <sub>2.5</sub>	μg·m <sup>-3</sup>	478 *	469 *	>0.05	1.80
	沥青烟	mg·m <sup>-3</sup>	19.8 *	11.2 *	<0.05	43.40

注：\* 代表该值超过标准限制值，下同。

拌剂后,其出料温度约为 158 ℃,下降约 21 ℃。通过分析温度变化前后排放物的浓度变化,并对照表 5 的排放物安全限值可得如下结果。

(1)温拌剂对气体排放物质 CO、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的减排效果明显,其减排效果具备统计意义(*p*>0.05)。4 种排放物的下降比例均超过 20%;但是对于同属气态物质的 H<sub>2</sub>S,却无法观测有效的减排效果,其原因是 H<sub>2</sub>S 的浓度值小于标准测试方法的最低检出浓度。

(2)温拌剂对颗粒状排放物 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的减排效果不明显(*p*>0.05)。颗粒状排放物主要由工程机械运转的燃料排放物、施工扬尘、沥青中的氧化溢出等物质造成的,且其与加热温度的关系不显著。

(3)温拌剂对于致癌物 BaP、沥青烟的减排效果极为明显,减排效果超过 40%。由于这 2 种物质是沥青燃烧或不完全燃烧而释放的物质,其与沥青及集料温度关系极为密切。

(4)通过对比排放物的有害浓度限制可以看出,在使用温拌剂前,CO、SO<sub>2</sub>、BaP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、沥青烟 6 种物质均处于超标状态,其中 BaP、沥青烟超标

情况严重,BaP 浓度超过日均限制值的 188 倍,沥青烟超出最高允许浓度 2 倍以上。采用温拌剂后,CO 的浓度已经降至限制值以内,但是其他几种物质仍然会对工作人员的健康造成威胁。

(5)由于出料时的废气排放是沥青及混合料加热拌和后在短时间内的集中排放,大量废气伴随混合料从出料口倾泻而出,但这些废气并没有采用有效的处理措施,直接排放入大气中,如图 1 所示。因此,无论采用温拌剂与否,都需注意加强出料时的安全生产保护措施。

(6)总体来说,在混合料的生产阶段,温拌剂的减排效果明显,9 种物质排放平均减少 28.6%,并将 CO 排放降至限值之内。

2.2 露天一般路面铺筑排放分析

对于露天情况下进行一般路面铺筑的空气样本检测结果如表 7 所示。通过第 1.2 节对路面摊铺施工的压实温度调研可知,见表 2,热拌沥青混合料的初压开始温度为 165 ℃,加入温拌剂后,其初压温度下降至 143 ℃,下降约为 22 ℃。通过分析温度变化前后排放物浓度变化,并结合表 5 排放限值可得

表 7 露天一般路面铺筑时气体排放测试结果

Tab. 7 Test results of emissions concentration in open-air general paving environment

参数		排放物浓度			p 值	WMA 比 HMA 排放物 浓度下降率/%
		浓度单位	HMA	WMA		
检测 物质	CO	mg·m <sup>-3</sup>	12.4	9.7	<0.05	21.70
	CO <sub>2</sub>	%	1.2	0.8	<0.05	33.60
	H <sub>2</sub> S	mg·m <sup>-3</sup>	<0.6	<0.6	>0.05	
	SO <sub>2</sub>	mg·m <sup>-3</sup>	1.24	0.85	<0.05	31.50
	NO <sub>x</sub>	mg·m <sup>-3</sup>	0.052	0.037	<0.05	28.80
	BaP	μg·m <sup>-3</sup>	0.012*	0.007*	<0.05	41.60
	PM <sub>10</sub>	μg·m <sup>-3</sup>	239*	232*	>0.05	2.92
	PM <sub>2.5</sub>	μg·m <sup>-3</sup>	117*	124*	>0.05	-3.30
	沥青烟	mg·m <sup>-3</sup>	7.2	4.9	<0.05	31.90

如下结果。

(1)与第 2.1 节拌和站出料排放结果分析类似,除了 2 种可吸入颗粒物与 H<sub>2</sub>S 以外,温拌剂对于其他 6 种排放质的减排效果明显,但各排放质的浓度下降比例小于混合料出料时。例如,4 种气体排放物(除 H<sub>2</sub>S 外)减排比例均未超过 35%。这是由于在进行摊铺时,混合料整体的温度已经下降(无论热拌还是温拌,进行初压时混合料的温度都较出料时下降了 12℃左右),且露天摊铺时气体不再是集中排放,其受自然风、湿度的影响较大。

(2)由于露天摊铺时通风条件较好,无论热拌还是温拌,CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和沥青烟的浓度均未超过限制值,但 BaP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 仍超标。使用温拌剂后,2 种可吸入颗粒物没有太大变化,这与第 2.1 节中拌和站出料环境下的情况相同,进一步说明温度对该类排放物的影响不大;而 BaP 虽然浓度依旧超标,但其下降幅度超过 40%。

(3)总体来说,在露天一般路面铺筑环境中,由于通风环境较好,各类排放物的浓度较出料时均有下降,温拌剂的减排效果没有混合料出料阶

段显著,但 9 类物质排放平均减排水平仍在 20.8%左右。

2.3 隧道路面铺筑排放分析

对于隧道路面铺筑的空气样本检测结果如表 8 所示。进行隧道路面铺筑时,温热拌路面铺筑采用的压实温度与第 2.2 节中基本相同。通过分析温度变化前后排放物浓度变化,并结合表 5 的排放物安全限值可得如下结果。

(1)隧道环境中采用热拌工艺进行路面摊铺时,浓度超标的物质有 BaP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和沥青烟,采用温拌工艺后,沥青烟的浓度降低至限制值以下,而 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 两种可吸入颗粒物的浓度基本没有变化。

(2)由于通风条件较差,且隧道内施工气温较高,见表 4,无论热拌还是温拌,进行隧道路面摊铺施工时的排放物总体浓度都较露天摊铺时高很多。例如,热拌工艺条件下的 CO 排放较露天摊铺时高出 40%,较温拌工艺条件下高出 14%。在上述条件下,温拌剂的减排效果表现的也较露天摊铺时明显,例如,除 H<sub>2</sub>S 外,4 种气体排放物减排比例接近或超过 35%。

(3)总体来说,在隧道路面铺筑环境中,由于通

表 8 隧道路面铺筑时气体排放测试结果

Tab. 8 Test results of emissions concentration in tunnel paving environment

参数		排放物浓度			p 值	WMA 比 HMA 排放物 浓度下降率/%
		浓度单位	HMA	WMA		
检测 物质	CO	mg·m <sup>-3</sup>	17.4	11.2	<0.05	35.60
	CO <sub>2</sub>	%	1.8	1.1	<0.05	38.10
	H <sub>2</sub> S	mg·m <sup>-3</sup>	<0.6	<0.6	>0.05	
	SO <sub>2</sub>	mg·m <sup>-3</sup>	4.21	2.17	<0.05	45.40
	NO <sub>x</sub>	mg·m <sup>-3</sup>	0.099	0.068	<0.05	31.30
	BaP	μg·m <sup>-3</sup>	0.093*	0.041*	<0.05	51.90
	PM <sub>10</sub>	μg·m <sup>-3</sup>	321*	318*	>0.05	1.41
	PM <sub>2.5</sub>	μg·m <sup>-3</sup>	178*	172*	>0.05	-2.71
	沥青烟	mg·m <sup>-3</sup>	11.1*	6.7	<0.05	36.60



风受阻,热量难以散去,空气中各类排放物的浓度较出料时低,但高于露天摊铺环境,温拌剂的减排效果也优于露天摊铺,9 类物质平均减排水平为 26.4%。

2.4 与同类研究的结果对比

将本文排放数据与相似研究的测试结果进行对比,结果如表 9 所示。由于进行环境空气实测时的影响因素众多,测试位置、采样方法、采样的气象条件都会对结果造成影响,难以保证测试的边界条件完全相同,选取了 6 项和本文测试条件与测试内容相似的研究进行对比。在这 6 项研究中,空气的采样环境均为拌和站的出料过程。3 项研究采用的化合物检测手段均参照美国国家职业安全卫生研究所(national institute for occupational safety and

health,NIOSH)的化学危害物测试手册中方法进行测试的<sup>[28]</sup>,其主要为美国劳工部的参考规范,还有 1 项研究采用美国环境保护局(environmental protection agency,EPA)给出的测试方法<sup>[29]</sup>。这 2 个规范对于 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 的测定方法基本与本文研究采用的中国标准中的方法是相同的,测试方法见表 9。但对于 VOCs 测定,NIOSH 和 EPA 相比均推荐采用氢火焰离子化检测仪进行测试,受限于测试仪器,本研究仅对 VOCs 中的 BaP 进行了测定。与美国的 NIOSH 标准相比,中国对于 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 的浓度限值更加严格,如 NIOSH 对于 CO 的 PC-TWA 限值要求为 40 mg/m<sup>3</sup>,而中国的 GBZ/T 规范为 20 mg/m<sup>3</sup><sup>[26]</sup>。

表 9 WMA、HMA 排放研究的相关文献数据对比  
Tab. 9 Comparisons of WMA and HMA stack emissions data from literature

来源	温拌剂	沥青类型	集料类型	热拌(温拌) 温度/℃	减排效果/%					测试方法
					CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	VOCs	
D'angelo 等 <sup>[30]</sup>	BituTech PER	PG70-22	玄武岩	170(155)	15~40	18~35	18~70	10~20	19~50	未说明
Middleton 等 <sup>[8]</sup>	Evotherm ET	PG70-22	花岗岩	168(155)	11	—14	8	10		非标准方法
Davidson 等 <sup>[7]</sup>	Evotherm DAT,	PG64-22	花岗岩	160(148)	17	—17	20	20		NIOSH (U. S.)
Hurley 等 <sup>[9]</sup>	EvothermTM 和 Sasobit®	70#		165(155)	5		14		—313	NIOSH (U. S.)
Prowell 等 <sup>[2]</sup>	未说明	70#		167(150)	19	55	18	19	17	NIOSH (U. S.)
Mariely- santiaao 等 <sup>[3]</sup>	发泡温拌剂	PG64-28	玄武岩	138(126)	22	55	70	20	50	EPA (U. S.)
本文研究(拌和站 生产)	Evotherm M1	SBS	玄武岩	179(158)	43	40	34	24	72 (仅 BaP)	GBZ/T

对比表 9 的排放结果可知:拌和温度(混合料生产温度)对于 CO<sub>2</sub> 与 CO 的排放量影响较大;本项目依托工程采用的是 SBS 改性沥青,加热温度高达 175℃,采用温拌剂后降温幅度为 21℃,其热拌加热温度和降温幅度是参与对比的所有研究中(采用的均为基质沥青)最大的,CO<sub>2</sub> 减排效果也是最明显的;在 Hurley 等的研究中,采用温拌剂技术后,施工温度仅降低了 10℃,是所有研究中最底的,其 CO<sub>2</sub> 排放水平降低也只有 5%左右<sup>[9]</sup>;其余研究中,降温幅度为 12℃~17℃不等,CO、CO<sub>2</sub> 的减排幅度也基本与温拌剂相同。这是由于碳氧化物主要是燃料燃烧造成,当采用更高的加热温度时,对于燃料的需求量变大,直接导致了完全燃烧产物 CO<sub>2</sub> 和不完全燃烧产物 CO 的增加。

对于 SO<sub>2</sub> 的排放,各个研究中表现差异很大。在 Davidson 等研究中甚至出现了在采用温拌剂后,

SO<sub>2</sub> 排放浓度提升的现象<sup>[7-8]</sup>。Prowell 等的研究指出,SO<sub>2</sub> 排放差异过大的原因可能是沥青的种类和生产方式导致沥青的硫化物含量不同导致的<sup>[2]</sup>。Mariely-santiago 等认为,SO<sub>2</sub> 的排放量与集料的酸碱性质有很大关系,碱性集料中的石灰石在在一定温度下可以有效吸附 SO<sub>2</sub>,且吸附性能较好,但中性和酸性集料却不具备这种功效<sup>[3]</sup>。在 SO<sub>2</sub> 排放增大的 2 项研究中,采用的均为花岗岩集料(酸性集料)。本研究 and Mariely-santiago 采用的均为玄武岩集料(碱性集料)。

随生产温度的降低,温拌剂对 VOCs 均表现出了较好的减排效果。本研究中仅观测 BaP,其减排效果也较显著。由于 VOCs 的组成成分复杂,加热温度、采样条件、测定方法、沥青种类、拌和工艺等都会显著影响其排放浓度变化。文献[2]中指出温度是影响 VOCs 排放的最主要因素,加热温度越高,芳香烃类



物质从沥青中挥发的概率越大,降低加热温度,可有效降低沥青混合料生产时的 VOCs 溢出。另外,加热工艺也会对 VOCs 的排放造成较大影响。一般情况下,提高燃料燃烧效率,合理分配加热时间,可以有效降低燃料不完全燃烧造成的 VOCs 排放。

降低生产温度后,所有研究均表现为  $\text{NO}_x$  排放降低,但是其减排效果与降温幅度无显著的相关关系。文献[31]指出,沥青中的氮元素一般不会以氮氧化物的形式溢出(多以存在于挥发性有机物中溢出),而  $\text{NO}_x$  主要来源是燃料燃烧的产物,燃料中的氮元素与燃料产地和各地方的燃料质量控制标准有关。因此,随降温幅度变化,氮氧化物的减排规律性不强,但总体呈下降趋势。

### 3 结 语

(1)在拌和站出料、露天一般路面摊铺、隧道路面摊铺 3 个测试环境中,温拌剂均表现出较好的减排效果。被测的 9 类特征排放物浓度在拌和站出料阶段中平均下降 28.6%,在隧道路面摊铺环境中平均下降了 26.4%,在露天一般路面摊铺环境中平均下降了 20.8%。温拌剂对于致癌物质 BaP、沥青烟的减排效果最好,气态排放物  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  次之,但对  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ ,则没有观察到具有统计意义的减排效果。

(2)参照文献[26]的要求,在采用热拌工艺时,拌和站出料环境中的  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$ 、BaP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、沥青烟排放浓度超标。露天一般路面摊铺环境中的 BaP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  排放浓度超标;隧道路面摊铺环境中的 BaP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、沥青烟 4 种物质排放浓度超标。采用温拌工艺后,拌和站出料时排放的  $\text{CO}$  和隧道路面摊铺时排放的沥青烟均降低至浓度限值以下,虽然 BaP 仍然超标,但其排放浓度下降幅度显著。

(3)通过文献调研和与相关研究的结果对比可以得出:碳氧化物( $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}$ )的减排效果与温度降幅的相关性最高; $\text{SO}_2$  的排放量除了与温度有关外,还与集料的酸碱性有关,碱性集料在较低温度时可以有效吸附  $\text{SO}_2$ ,但中性和酸性集料则不具备这种特性; $\text{NO}_x$  的排放主要与采用燃料的含氮量有关;而对于有机挥发类物质 VOCs 而言,降低生产温度可有效抑制其挥发,但温度降低幅值和排放降低幅值之间无显著相关性。在温拌剂减排的评估方面,增加研究特征排放物的数量、提供更加标准化的边界条件是今后研究的重点。

### 参考文献:

### References:

- [1] CAPITO S D, PICADO-SANTOS L, MARTINHO F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt[J]. Construction & Building Materials, 2012, 36: 1016-1024.
- [2] PROWELL B D, HURLEY G C, FRANK B. Warm-mix asphalt: Best practices[M]. Mitchell: National Asphalt Pavement Association, 2011.
- [3] MEJIAS-SANTIAGO M, OSBORN L V. Emissions reductions associated with the use of warm-mix asphalt as compared to hot-mix asphalt[R]. Washington DC: TRB, 2014.
- [5] 杨 博, 尚同羊, 张慧鲜, 等. 沥青路面建设阶段能耗与排放量化预估方法研究[J]. 中外公路, 2014, 34(1): 7-13.  
YANG Bo, SHANG Tong-yang, ZHANG Hui-xian, et al. Study on quantitative estimation method of energy consumption and emission in asphalt pavement construction stage[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, 34(1): 7-13.
- [6] 胡如安. 沥青混合料能耗与碳排放分析及节能减排技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.  
HU Ru-an. Asphalt mixture energy consumption and carbon emission analysis and energy-saving and emission-reduction technologies research [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [7] DAVIDSON J K, PEDLOW R. Reducing paving emissions using warm mix technology[C]//CTAA. Proceedings of the Fifty-Second Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA). Quebec: Polyscience Publications, 2007: 112-115.
- [8] MIDDLETON B, FORFYLOW R. Evaluation of warm-mix asphalt produced with the double barrel green process [J]. Transportation Research Record, 2009 (2126): 19-26.
- [9] HURLEY G, PROWELL B, KVASNAK A. Wisconsin field trial of warm mix asphalt technologies: Construction summary[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2010.
- [10] DEL CARMEN R M, MORENO F, MARTINEZ-ECHEVARRIA M J, et al. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41: 1-6.
- [11] SARGAND S, NAZZAL M D, AL-RAWASHDEH

- A, et al. Field evaluation of warm-mix asphalt technologies[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(11):1343-1349.
- [12] THIVES L P, GHISI E. Asphalt mixtures emission and energy consumption; A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72:473-484.
- [13] 杨 博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
- YANG Bo. Quantitative method and evaluation system of energy-saving and emission-reduction for asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] 何 亮, 李冠男, 张军辉, 等. 路面全寿命周期能耗与CO<sub>2</sub>排放分析研究进展[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2018, 38(4):10-20.
- HE Liang, LI Guan-nan, ZHANG Jun-hui, et al. Research progress on pavement life cycle energy consumption and carbon dioxide emission assessment [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2018, 38(4):10-20.
- [15] 彭 波, 邓海龙, 曹世江, 等. 热拌沥青混合料碳排放量化与评价体系[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2019, 39(3):1-9.
- PENG Bo, DENG Hai-long, CAO Shi-jiang, et al. Carbon emission quantification and evaluation system of hot mix asphalt mixture[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2019, 39(3):1-9.
- [16] 张堂仁, 陈 彬. 川藏高速泸康段复杂地形地质条件山区高速公路总体设计[J]. *公路交通科技*, 2018, 14(3):28-32.
- ZHANG Tang-ren, CHEN Bin. Overall design of expressway in mountainous area with complex topography and geological conditions in Lukang Section of Sichuan-Tibet Expressway [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 14(3):28-32.
- [17] 王朝辉, 陈 姣, 侯明业. 道路常用温拌改性剂现状与路用性能评价 [J]. *材料导报*, 2016, 30(7):102-108.
- WANG Chao-hui, CHEN Jiao, HOU Ming-ye. Status and performance evaluation of common warm mix modifier in road [J]. *Materials Review*, 2016, 30(7):102-108.
- [18] GBZ 159—2004, 工作场所空气中有害物质监测的采样规范[S].
- GBZ 159—2004, Specification of air sampling for hazardous substances monitoring in the workplace[S].
- [19] SPIEZIA L, CAMPELLO E, BON M, et al. Short-term exposure to high levels of air pollution as a risk factor for acute isolated pulmonary embolism [J]. *Thrombosis Research*, 2014, 134(2):259-263.
- [20] GBZ/T 160. 28—2004, 工作场所空气中有毒物质测定:无机含碳化合物[S].
- GBZ/T 160. 28—2004, Methods for determination of inorganic carbon compounds in the air of workplace [S].
- [21] GBZ/T 160. 33—2004, 工作场所空气中有毒物质测定:硫化物[S].
- GBZ/T 160. 33—2004, Methods for determination of sulfides in the air of workplace[S].
- [22] GBZ/T 160. 29—2004, 工作场所空气中有毒物质测定:无机含氮化合物[S].
- GBZ/T 160. 29—2004, Methods for determination of inorganic nitrogen compounds in the air of workplace[S].
- [23] GBZ/T 160. 44—2004, 工作场所空气中多环芳烃化合物测定方法[S].
- GBZ/T 160. 44—2004, Methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the air of workplace[S].
- [24] GB/T 18204. 2—2014, 公共场所卫生检验方法——第2部分:化学污染物[S].
- GB/T 18204. 2—2014, Examination methods for public—Part 2: Chemical pollutants[S].
- [25] GB 18553—2001, 车间空气中石油沥青(烟)职业接触限值[S].
- GB 18553—2001, Occupational exposure limit for petroleum asphalt(fume) in the air of workplace[S].
- [26] GBZ/T 2. 1—2007, 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[S].
- GBZ/T 2. 1—2007, Occupational exposure limits for hazardous agent in the workplace—Part 1: Chemical hazardous agents[S].
- [27] GB 3095—2012, 环境空气质量标准[S].
- GB 3095—2012, Ambient air quality standards[S].
- [28] National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH pocket guide to chemical hazards[R] Atlanta: DHHS publication, 2007.
- [29] Environmental Protection Agency (EPA). EPA test methods for evaluating solid waste, physical/chemical method[S].
- [30] D'ANGELO J, HARM E, BARTOSZEK J, et al. Warm-mix asphalt; European practice [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2008.
- [31] Australia National Pollutant Inventory. Emission estimation technique manual for hot mix asphalt[S].