

公路隧道温拌阻燃沥青路面阻燃效果仿真研究

乔建刚^{1,2},尹朋招¹,李志刚¹,郭蕊¹

(1.河北工业大学 土木与交通学院,天津市 300401;2.天津市交通工程绿色材料技术研究中心,天津市 300401)

摘要:为了得到公路隧道温拌阻燃沥青路面发生火灾时的阻燃效果,以有限元法、热力学理论为基础,通过 Ansys 有限元软件中热力学分析模块对不同火灾规模下普通沥青路面、阻燃沥青路面、温拌阻燃沥青路面的阻燃效果进行研究。3 种类型的路面最高温度均随火灾规模的增大而增大,在任意火灾规模下温拌阻燃沥青路面比普通沥青路面阻燃效果提升 4.9%~8.5%,火灾规模越小降温效果越明显;在最小火灾规模下沥青路面下方温度均高于沥青老化温度;在火灾规模 5~100 MW 情况下,相比普通沥青路面,阻燃沥青路面与温拌阻燃沥青路面完成修补需要的混合料平均增长率分别为-9.3%、-12.8%。提出路面最高温度与火灾规模之间的关系模型,并计算得到灾后修补所需的混合料质量,为隧道火灾的预防与修补工作提供参考。

关键词:公路隧道;温拌阻燃沥青;阻燃效果;火灾后路面修补

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

近年来,随着中国经济的迅速发展,公路隧道建设项目显著增多,在铺筑路面时以热拌沥青混合料的方式为主^[1]。传统热拌沥青混合料在生产、摊铺及压实过程中温度较高,排放沥青烟、粉尘、NO、CO₂等气体,且高温引起的沥青老化也影响沥青路面的路用性能^[1-2]。

Alice Bonati 等^[3]研究了常规阻燃剂和纳米黏土混合使用的阻燃剂对火灾的影响,得到矿物填料和氢氧化铝、氢氧化镁阻燃剂与纳米黏土改性沥青混合料混合使用可以显著改善混合物的防火性能;Wu 等^[4]、熊建平等^[5]基于热分析探究了熟石灰、DBDPE 阻燃剂、Sb₂O₃阻燃剂、ATH 阻燃剂的阻燃机理;李娜等^[6]通过 LOI 试验分析了阻燃沥青胶浆,发现阻燃剂材料的化学成分与颗粒大小都影响其阻燃效果;乔建刚等^[7]研究温拌剂对阻燃沥青混合料性能的影响;唐培培等^[8]研究掺入不同温拌剂的沥青混合料的动态模量及疲劳特性;刘薇等^[9]研究了隧道阻燃沥青及

混合料阻燃性能,通过燃烧试验发现加入阻燃剂的马歇尔试件燃烧火势小、烟气小、燃烧质量损失小、燃烧持续时间短;Xu 等^[10]通过对阻燃沥青结合料 SARA 馏分热分解进行研究,揭示了阻燃剂的阻燃机理。

现有研究主要是关于温拌阻燃沥青路面路用性能和阻燃性能方面,对于在发生火灾时沥青路面温度分布情况的研究较少。因此本文拟通过 Ansys 软件建立隧道火灾模型,研究在道路发生火灾时沥青路面温度分布规律,为隧道火灾的预防与修补工作提供参考。

1 求解参数的确定

1.1 路面材料参数

根据文献^[11-14]可得到在 25℃常温下路面材料的热力学参数,假设车辆材质为钢铁,热力学参数汇总如表 1 所示。

在路面结构层中,由于沥青的温度敏感性较大,

收稿日期:2022-01-10(修改稿)

基金项目:国家安全生产监督总局安全生产重特大事故防治关键技术科技项目(编号:hebei-0009-2017AQ);天津市交通运输科技发展计划项目(编号:2018-34)

作者简介:乔建刚,男,教授,博士生导师.E-mail:qiaojg@126.com.

表1 热力学材料参数

材料类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	比热容/ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]
钢铁	7 859	80.00	450
SMA-13	2 490	1.42	1 053
AC-20	2 334	1.67	1 053
C25水泥混凝土	2 300	1.38	1 200
C20素水泥混凝土	2 100	1.20	1 150
级配碎石	2 200	1.30	840
土基	1 800	1.20	840

因此沥青层材料的导热系数和比热容随温度的变化而变化,采用文献[9]建立沥青混合料的比热容和导热系数与温度之间的关系式如下:

对于 SMA-13 沥青混合料:

$$\lambda=0.009\ 8T+1.177\ 7 \quad (1)$$

对于 AC-20 沥青混合料:

$$\lambda=0.010\ 6T+1.409\ 2 \quad (2)$$

式中: λ 为导热系数[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]; T 为混合料温度($^{\circ}\text{C}$)。

沥青混合料比热容与温度之间的关系为:

$$C=KT+1\ 000 \quad (3)$$

式中: C 为比热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; T 为混合料温度($^{\circ}\text{C}$); K 为集料系数,玄武岩取 2.149 6。

1.2 仿真边界设定

在模拟计算时,假设公路隧道内无风,路面结构各层间接触良好,不存在热阻,模型底部及两侧绝热。环境温度为 $25\ ^{\circ}\text{C}$,路面对流系数为 $25\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$,FRMAX 阻燃剂的吸热量为 $0.38\ \text{kJ}/\text{g}$,在 $280\ ^{\circ}\text{C}$ 以上时发生分解。温拌剂的生成物中 Al^{3+} 全部转化为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。

1.3 计算理论

(1) 热传导是指完全接触的两个体之间或者一个体的不同部位之间由于存在温度差而引起的热量传递。热传递系数为:

$$D=\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为 x 、 y 、 z 3 个坐标方向的热传导系数[$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$]。

热梯度 L :

$$L=\left\{\frac{\partial}{\partial x}\ \frac{\partial}{\partial y}\ \frac{\partial}{\partial z}\right\}^{-1} \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial}{\partial z}$ 为温度 T 在 x 、 y 、 z 3 个方向的热梯度。

则热传导中传递模型为:

$$q=-D \times L \times T \quad (6)$$

式中: q 为热通量向量(W/m^2); T 为温度($^{\circ}\text{C}$);其他参数意义同前。

(2) 热对流是指不同温度的各个部位之间发生相对运动引起的热量传递,是将面作为边界热传递条件,热对流传递公式为:

$$q \times n=h_f(T_s-T_B) \quad (7)$$

式中: n 为单位法向向量; h_f 为对流换热系数[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]; T_s 为模型表面温度($^{\circ}\text{C}$); T_B 为临近流体的体温度($^{\circ}\text{C}$);其他参数意义同前。

2 隧道火灾模型的建立

2.1 火源设计

公路隧道发生火灾时,一般由汽车事故产生。参照美国消防协会颁布的关于公路隧道、桥梁及限制级高速公路的 502 标准,不同车型汽车的火灾规模如表 2 所示^[15]。

表2 不同种类汽车的火灾规模

车型	火灾规模/MW	车型	火灾规模/MW	车型	火灾规模/MW
客车	5	运油车	30~100	货车	20

发生火灾时车型不同产生的火灾规模也不同,根据上述建议参考值,系统分析火灾规模分别为 5 MW、10 MW、20 MW、50 MW、100 MW 情况下沥青路面的温度分布。

2.2 模型建立

以单孔双车道高速公路隧道为研究对象,首先假设火源为人员密集的大客车,以保有量较大的宇通 ZK6109H5Y 型旅游客车为参考,模型尺寸为 $10\ \text{m} \times 2.5\ \text{m} \times 3.5\ \text{m}$ 的立方体,底盘高 $0.25\ \text{m}$ 。假设当车辆发生火灾时,隧道内无风,车下火焰在车辆下方均匀分布,由于风速作用不考虑车辆周围热流对路面的影

响,由于火灾对路面的破坏主要发生在沥青层,因此主要研究温度对沥青层以上结构的影响,根据《公路隧道设计规范:第2册 交通工程与附属设施》(JTGD70/2—2014)^[16]并结合温度分析经验,选取30 m长的公路隧道路段,模型尺寸为30 m×10 m×2 m。

3 结果分析

3.1 路面最高温度与火灾规模之间的关系

仿真结果显示,路面最高温度位置处于道路中心点部位,因此对不同种类路面在不同火灾规模情况下的最高温度统计如表3所示。

表3 不同火灾规模下各路面最高温度统计

火源大小/MW	不同路面的最高温度/℃		
	普通沥青路面	阻燃沥青路面	温拌阻燃沥青路面
5	308.67	284.44	282.42
10	494.42	443.94	434.86
20	765.97	709.44	698.34
50	1 176.80	1 115.30	1 102.10
100	1 524.10	1 463.50	1 449.40

为了得到火灾规模对路面最高温度的影响规律,将表3中的数据利用SPSS软件进行拟合,得到的函数如图1所示。

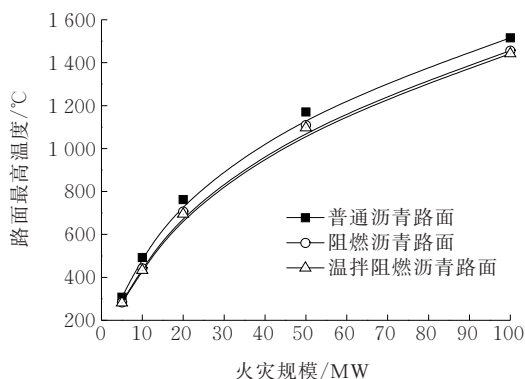


图1 路面最高温度与火灾规模关系

经分析,各类型路面最高温度与火灾规模之间的关系如表4所示。

综上可得,路面最高温度与火灾规模之间的关系模型为:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

对于普通沥青路面, $(a, b, c) = (-0.136, 26.530, 227.417)$; 对于阻燃沥青路面, $(a, b, c) = (-0.128,$

表4 路面最大温度与火灾规模之间关系模型

路面类型	拟合公式	R^2
普通沥青路面	$y = -0.136x^2 + 26.530x + 227.417$	0.992
阻燃沥青路面	$y = -0.128x^2 + 25.358x + 197.244$	0.994
温拌阻燃沥青路面	$y = -0.125x^2 + 25.013x + 193.828$	0.995

注: y 为路面最高温度(℃); x 为火灾规模, $5 \text{ MW} \leq x \leq 100 \text{ MW}$ 。

25.358, 197.244); 对于温拌阻燃沥青路面, $(a, b, c) = (-0.125, 25.013, 193.828)$ 。

由此可见,3种类型路面的最高温度均随火灾规模的增大而增大,在火灾规模为5 MW时,温拌阻燃路面中心处温度为282.42℃,相比普通沥青路面下降了8.5%,当火灾规模达到100 MW时,温拌阻燃路面中心处温度为1 449.40℃,同比下降了4.9%,可以看出:温拌阻燃沥青路面可以在不同火灾规模下提升阻燃效果,降低火灾对路面的损害。说明在路面加入阻燃剂可以降低路面温度,减少火灾对路面结构的破坏。

3.2 路面温度分布情况

为进一步深入研究路面温度与火灾规模之间的关系,根据有限元计算结果,分别提取道路行车方向、路幅方向和道路深度方向的温度分布情况绘制曲线,结果如图2~4所示。

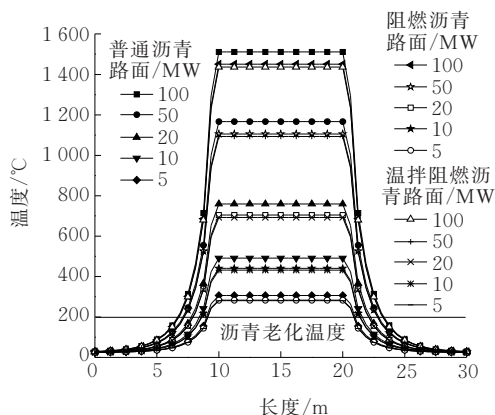


图2 行车方向上温度分布曲线

由图2~4可知:

(1) 行车方向上:火源温度最高位置中心在X轴为10~20 m处,长度为10 m,为车辆起火位置。3种类型路面在不同火灾规模下的温度在行车方向上的分布情况相似,关于火灾正中心对称分布。在火源位置路面的温度最高,随着与火源距离的增加,路面温度逐渐变小,当距离为10 m时,恢复到常温值。此

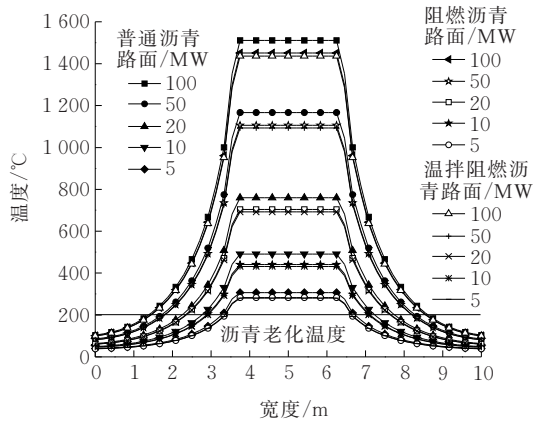


图3 路幅宽度方向上温度分布曲线

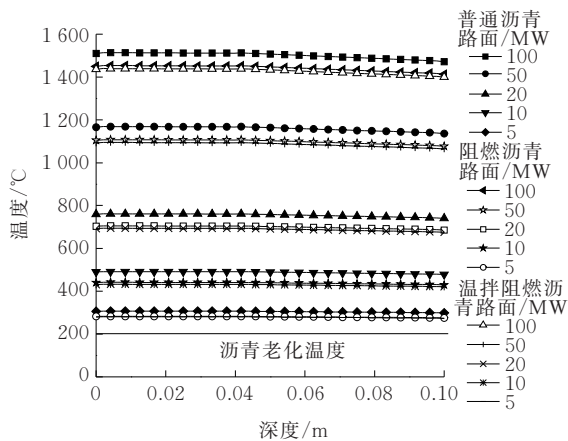


图4 深度方向上温度分布曲线

外,随着火灾规模的增大,路面温度增加,火灾规模为5 MW时,火源位置路面温度为282~309℃;当火灾规模为100 MW时,火源位置路面温度达到了1449~1524℃。添加阻燃剂可以将最高温度降低5%~12%,火灾规模越小,降温效果越明显。

(2) 道路横断面方向上,火源位置在X轴为5 m的位置,长度为2.5 m。在路幅方向上温度的分布情况与行车方向基本一致,但在达到边界时温度还未达到常温,说明发生火灾时会对公路隧道壁产生一定的影响,在道路最外侧,温拌阻燃沥青路面最高温度比普通沥青路面下降约5.4%,说明阻燃剂影响效果显著。

(3) 道路深度方向上,选取火灾正中心位置,X轴为路面的深度方向。随着路面深度的增加,3种类型路面温度下降趋势不大,火灾规模越大,沥青层温度越高,说明在发生火灾时整个沥青层都会受到高温损害,且在最小火灾规模下沥青路面下方温度均高于沥青老化温度。对比3种不同种类路面,温拌阻

燃沥青路面深度方向的温度均比普通沥青路面要小,规律与图2、3保持一致。

3.3 火灾后路面损害情况

由于SMA中SBS改性沥青严重老化温度约为200℃,因此发生火灾时,路面温度超过此温度后均会对道路疲劳性能造成影响,灾后沥青路面需要进行重新铺筑。根据模拟结果,路面温度云图的等温线关于X轴、Z轴均对称分布,以普通沥青路面、火灾规模为5 MW为例,选取1/4火灾区域,200℃等温线上的8个点(0,1.58 m)、(0.94 m,1.57 m)、(1.87 m,1.55 m)、(2.81 m,1.54 m)、(3.69 m,1.53 m)、(4.46 m,1.48 m)、(5.14 m,0.85 m)、(5.26 m,0)进行拟合,得到等温线X轴、Z轴之间的函数关系式:

$$z(x) = -0.055x^3 + 0.341x^2 - 0.509x + 1.652 \quad (9)$$

$$(0 \leq x \leq 5.26 \text{ m})$$

由此可得灾后需要修补面积:

$$S = 4 \int_0^{5.26} z(x) dx \quad (10)$$

同理,计算各类型路面在不同火灾规模下损害后修补需要的混合料质量,对比不同火灾规模下修补路面混合料质量变化,如图5所示(取混合料密度为2500 kg/m³)。

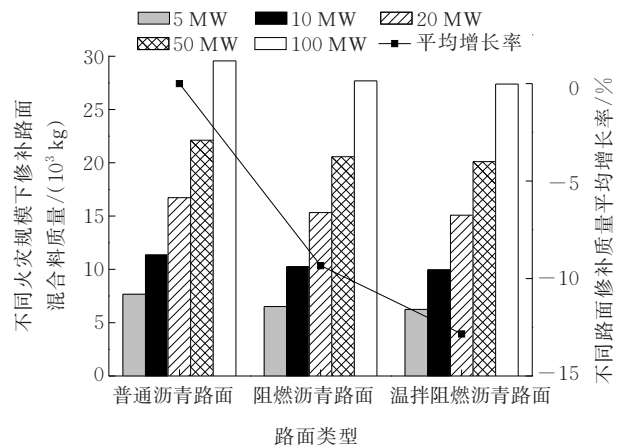


图5 不同火灾规模下修补路面混合料质量变化

由图5可知:在同一火灾规模下,所需修补路面混合料质量从大到小排序为:普通沥青路面>阻燃沥青路面>温拌阻燃沥青路面。发生火灾后阻燃沥青路面修补路面需要的混合料显著减少,相比普通沥青路面,阻燃、温拌阻燃沥青路面在火灾规模为5~100 MW时修补所需混合料平均增长率分别为-9.3%、-12.8%。说明阻燃剂有效地提升了沥青混合料的阻燃效果。温拌阻燃沥青路面在火灾规模

为 5~100 MW 时修补所需混合料相较于阻燃沥青路面平均增长率低。可以发现,温拌阻燃沥青路面的阻燃效果也优于只添加阻燃剂的沥青路面,发生火灾后可以节约更多的修补成本。

4 结 论

(1) 通过仿真得到普通、阻燃、温拌阻燃沥青路面的最高温度,并拟合得到普通、阻燃、温拌阻燃沥青路面最高温度与火灾规模之间的关系模型,3 种模型相关系数均为 0.992 以上。

(2) 温拌阻燃沥青路面可以在不同火灾规模下提升阻燃效果 4.9%~8.5%,降低火灾对路面的损害,掺加温拌剂和阻燃剂的沥青路面各位置温度最小。

(3) 通过探究不同火灾规模下路面温度,得到路面距离火源不同位置及沥青层的温度变化情况,发生火灾时整个沥青层都会受到高温损害,且会对公路隧道壁产生一定的影响。

(4) 通过计算得到路面灾后修补所需的混合料质量,温拌阻燃沥青路面在不同火灾规模下灾后修补所需混合料质量比普通沥青路面、阻燃沥青路面低,阻燃效果更优,节省修补成本,具有显著的经济效益。

参考文献:

- [1] 宿秀丽.隧道沥青混合料温拌阻燃技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- [2] 刘素梅,周泽宁,徐礼华,等.EC130 温拌剂掺量对温拌沥青混合料性能影响研究[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(5):414-418.
- [3] BONATI A, MERUSI F, BOCHICCHIO G. Effect of nanoclay and conventional flame retardants on asphalt mixtures fire reaction[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:990-1000.
- [4] WU K, ZHU K, KANG C, et al. An experimental investigation of flame retardant mechanism of hydrated lime in asphalt mastic [J]. Materials and Design, 2016, 103:223-229.
- [5] 熊剑平,彭文举,陈宇,等.基于热分析的阻燃沥青阻燃机理[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(2):47-56.
- [6] 李娜,关甫洋.阻燃沥青胶浆在隧道沥青路面中的应用研究[J].中外公路,2014,34(2):310-314.
- [7] 乔建刚,李志刚,程璨,等.温拌剂和阻燃剂对 SBS 改性沥青流变性能的影响[J].石油炼制与化工,2019,50(3):87-91.
- [8] 唐培培,申爱琴,付建村.掺不同温拌剂沥青混合料的动态模量及疲劳特性[J].建筑材料学报,2016,19(3):590-595.
- [9] 刘薇,张方方,张捷,等.隧道阻燃沥青及混合料阻燃性能评价[J].中外公路,2010,30(5):237-240.
- [10] XU T, WANG Y, XIA W J, et al. Effects of flame retardants on thermal decomposition of SARA fractions separated from asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173:209-219.
- [11] 叶建.旧水泥混凝土路面加铺沥青面层的力学性能分析[D].四川:西南交通大学,2011.
- [12] TATARI O, NAZZAL M, KUCUKVAR M. Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis [J]. Resources Conservation & Recycling, 2012, 58(1): 18-24.
- [13] 叶辉贤.不同外掺剂对沥青混合料导热系数的影响[J].江西建材,2016(5):199-200.
- [14] 王黎明,谭忆秋.沥青路面铺筑温度场数值仿真模型[J].北京工业大学学报,2013,39(12):1827-1834.
- [15] National Fire Protection Association. NFPA 502, Standards for highway tunnels, bridges, and other limited access highways[S]. United States: National Fire Protection Association, 2004.
- [16] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范:第 2 册 交通工程与附属设施:JTG D70/2—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.