

# 基于钢桥面铺装层内部温度变化监测的 隔热降温材料优选试验研究

叶伟

(招商局公路信息技术(重庆)有限公司, 重庆市 400060)

**摘要:**为进一步探索对钢桥面沥青铺装层高温病害的预防性研究,该文利用热电偶连接数显装置的温度监测设备,在完成室外模拟监测钢桥面铺装结构内部温度试验检测方法和隔热降温型铺装结构设计的基础上,对分别基于 MMA+纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温毡+GA+SMA 钢桥面铺装结构和掺轻质空心玻璃微珠的 MMA+GA+SMA 钢桥面铺装结构以及 MMA+GA+SMA 普通钢桥面铺装结构进行了同一试验环境下的沥青铺装层内部温度监测。试验结果显示:相比普通钢桥面铺装结构,纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温毡对沥青铺装层可实现约 18% 的平均降温幅度,掺轻质空心玻璃微珠的 MMA 对沥青铺装层可实现约 11% 的平均降温幅度。综合沥青铺装层内部温度波动范围、平均降温幅度以及钢板与沥青铺装层温度的差异大小 3 个方面评判,认为设置有纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温毡的钢桥面铺装结构对沥青铺装层的隔热降温作用最为显著。

**关键词:** 钢桥面; 沥青铺装层; 隔热降温; 温度监测; 纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶; 空心玻璃微珠

## 1 引言

当前中国钢桥面铺装层结构类型大多采用浇筑式沥青 GA+沥青玛蹄脂碎石 SMA 或双层环氧沥青混凝土 EA 的结构形式,环氧沥青混凝土为热固性材料,高温稳定性较好,但造价高,除个别经济发达的省份钢桥面铺装采用 EA 混合料以外,绝大多数情况下钢桥面铺装采用的是 GA+SMA 的典型铺装结构。

据统计,中国夏季某些地区的最高气温达 40℃ 以上,当采用浇筑式沥青混凝土作为钢桥面铺装层时,由于其油石比极高,黑色沥青受热辐射作用越明显,且散热慢,加上钢桥面不同于普通沥青路面的结构特点:与

路面铺装相比,钢桥面铺装体系及钢桥梁悬于地表之上,整个结构均裸露在空气中。同时,钢铁的热传导系数显著大于沥青混合料,在强烈的太阳光照射下,钢板温度急剧上升,产生的热量可迅速传递给箱内空气,且不能与外界空气进行热对流,箱梁内空气温度远高于外界空气温度。所以一般情况下,在相同的气温环境下钢桥面铺装体系的温度要显著高于路面铺装体系的温度,研究表明:在这样的结构特点之下伴随持续高温天气,钢桥面沥青铺装层的表面温度可升至 70℃,内部可达 60℃。长此以往,可导致铺装层出现高温车辙病害、铺装层与钢板的黏结性下降、沥青老化加速,从而缩短钢桥面铺装层的使用寿命。

如何利用隔热降温技术手段提高整个铺装体系的

[20] 邵旭东,胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京:人民交通出版社,2015.

[21] 管品武,涂雅箐,张普,等. 超高性能混凝土单轴抗压本构关系研究现状[J]. 复合材料学报,2018(7).

[22] 苏家战,傅元方,黄卿维,等. 钢筋超高性能混凝土梁受弯试验和有限元分析研究[J]. 中外公路,2017(6).

[23] 刘超,陈麒麟,袁伟杰,等. 超高性能混凝土组合箱梁弯曲性能有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018(4).

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51702282);重庆市社会事业与民生保障科技创新专项项目(编号:cstc2017shms-A30024)

作者简介:叶伟,男,硕士,工程师. E-mail:229970548@qq.com

抗高温车辙和热老化性能以及抑制层间黏结失效,有效延长钢桥面沥青铺装层的使用寿命,开展钢桥面铺装层隔热降温技术研究显得尤为迫切。

## 2 隔热降温技术手段与试验检测方法

### 2.1 参与对比试验研究的隔热降温技术手段

钢桥面沥青铺装层除受大气热辐射作用以外,另一重要热量来源就是与之直接接触的钢板热传导作用,该文以如何阻隔或减少来自钢板的热量传导为出发点,在基本不影响原铺装层结构设计,基本不改变结构层厚度的基础上,通过以下技术手段拟达到对沥青铺装层的隔热降温效果,从而提高沥青铺装层的高温稳定性以及抗热老化性,进而延长使用寿命。该文拟采用的主要技术手段如下:

(1) 目前市面上有很多技术成熟、施工方便的隔热板材(卷材),研究表明大多数隔热板材(卷材)能够降低热源表面温度  $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  不等,其优越的降温效果可作为钢桥面隔热降温型沥青混合料铺装结构设计的一项技术手段,其铺设位置可铺设在甲基丙烯酸甲酯树脂(英文简写 MMA)防水黏结层之上,然后再进行沥青混合料的铺筑。同时,隔热板材(卷材)厚度大多在  $0\sim 1\text{ cm}$  范围之内,基本不改变原有钢桥面铺装层的设计标高。

(2) 防水黏结层作为钢桥面铺装体系中的一项重要功能层,同时也是沥青铺装层与桥面钢板之间的过渡层,在起到防水黏结效果的同时介入隔热保温材料,也是减缓钢板对沥青铺装层热传导作用的一项重要技术手段。该文拟通过在 MMA 防水黏结剂中加入轻质空心微粒径材料,从而整体降低 MMA 防水黏结层干固后的导热系数,减缓钢板对沥青铺装层的热传导,达到隔热降温目的。

### 2.2 试验检测方法

该文以甲基丙酸甲酯树脂 MMA 防水黏结层+浇筑式沥青 GA10 下面层+高弹改性沥青 SMA10 上面层的钢桥面典型铺装结构为试验研究所用的沥青铺装层。为了有效检测出沥青铺装层 GA 和 SMA 在露天环境中,特别是高温季节下的温度变化情况,选择了利用热电偶连接数显温度计的测温方法,而在沥青铺装层的成型过程中预埋热电偶感温装置是其中一项重要试验环节。

在试验室内首先对钢板( $30\text{ mm}\times 30\text{ m}\times 10\text{ mm}$ )进行喷砂除锈、防腐处理以及设置 MMA 防水黏结层

后;再在成型 GA10 和 SMA10 沥青铺装层的过程中分别在各层预埋两个热电偶,且为了使试验过程中测得的沥青铺装层内部温度值更精准,热电偶探头在预埋过程中尽可能往沥青铺装层的中部埋设,将热电偶探头距板边缘的预埋深度预设  $10\text{ cm}$ ,如图 1 所示。

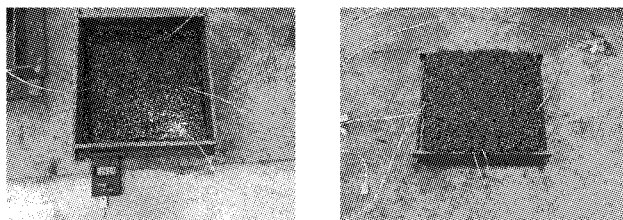


图 1 热电偶预埋入浇筑式沥青 GA 和改性沥青 SMA

按以上方法将预埋好热电偶的 GA+SMA 钢桥面隔热降温铺装组合试件以及常规 GA+SMA 钢桥面铺装组合试件放入光照充足的露天环境中,每隔  $1\text{ h}$  进行一次温度读数。特别地,当遇上光照时间长、气温较高的天气状况时,可每隔  $0.5\text{ h}$  进行一次温度读数,汇总数据,对比分析在相同试验条件下钢桥面隔热降温铺装结构和常规铺装结构的温度差异情况。

## 3 钢桥面隔热降温铺装结构设计及降温效果试验对比

### 3.1 增设保温毡隔热层的钢桥面铺装结构设计

该文拟在 MMA 防水黏结层与聚合物改性沥青 GA 之间设置一道隔热层(隔热层材料厚度控制在  $5\text{ mm}$  以内),试图在实现显著降低钢板对沥青铺装层热传导的同时基本不改变原设计标高。试验研究所用的保温毡采用当前建筑墙体以及管道建设中应用最为广泛的一种材料——纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡,主要技术指标见表 1。其常温下的导热系数极低 [ $0.016\sim 0.020\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ],且材料厚度仅为  $5\text{ mm}$ ,在室内进行试件成型过程中发现,铺设好纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡后再进行沥青混合料的摊铺碾压,其厚度会缩小至  $2\sim 3\text{ mm}$ ,对原设计标高基本无影响。

在不改变其他铺装材料物理化学性质、用量以及施工工艺的情况下,增设该纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡的钢桥面铺装结构示意图如图 2 所示。

### 3.2 MMA 中掺空心玻璃微珠的钢桥面铺装结构设计

通过在甲基丙烯酸甲酯树脂(MMA)中加入轻质空心玻璃微珠隔热材料,掺有空心玻璃微珠的 MMA 防水黏结层干固后在钢板与沥青铺装层之间在起到防

水黏结作用的同时兼具试图削弱高温环境下钢板对沥青混凝土铺装层的热传导。该文从市面上优选出一种导热系数小、耐高温、抗压强度较高的一种应用比较广泛的轻质高性能空心玻璃微珠隔热材料,一般混合在涂料中使用,其掺量为 5%~8%(外掺法),此次试验用量为相对 MMA 总质量的 7%。材料外观呈白色粉末状结构,其主要技术性能指标如表 2 所示。

表 1 纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温毡主要技术指标

项目	单位	检测结果
外观		白色毛毡卷材
主要成分		85% SiO <sub>2</sub> 、10% SiC、 3% TiO <sub>2</sub> 、2% 其他
厚度	mm	4.88
密度	g/cm <sup>3</sup>	0.24
导热系数	W/(m·K)(25℃时)	0.018
熔点	℃	1 248
空隙率	%	97.8
平均孔径	nm	35

铺装面层	高弹沥青 SMA10,厚度:35 mm
黏层	洒布改性乳化沥青,用量:300~500 g/m <sup>2</sup>
铺装下层	聚合物改性沥青 GA10,厚度:35 mm;撒布 5~10 mm 预拌碎石
防水黏结层	丙烯酸树脂黏结剂,用量:100~200 g/m <sup>2</sup>
	纳米气凝胶保温毡,约 5 mm
	丙烯酸树脂黏结剂,用量:100~200 g/m <sup>2</sup>
	TOPEVER <sup>®</sup> 两层 MMA 涂料,总用量:3 000~3 400 g/m <sup>2</sup>
钢板	防腐底漆,用量:250~350 g/m <sup>2</sup>
	喷砂除锈,清洁度:Sa2.5 级;粗糙度:50~100 μm

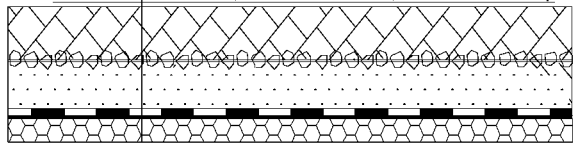


图 2 增设纳米气凝胶保温毡的钢桥面铺装结构示意图

表 2 高性能轻质空心玻璃微珠主要技术性能指标

项目	单位	检测结果
外观		白色流动性好的中空球形粉末
主要成分		65% SiO <sub>2</sub> 、25% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 5% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、3% MgO、2% 其他
真密度	g/cm <sup>3</sup>	0.58
堆积密度	g/cm <sub>3</sub>	0.34
导热系数	W/(m·K)(25℃时)	0.06
抗压强度	MPa	31.56
平均粒径	μm	60
体积漂浮率	%	98
软化点	℃	718
含水量	%	0.1

同样,在不改变其他铺装材料物理化学性质、用量以及施工工艺的情况下,掺轻质空心玻璃微珠的 MMA 钢桥面铺装结构示意图如图 3 所示。

铺装面层	高弹沥青 SMA10,厚度:35 mm
黏层	洒布改性乳化沥青,用量:300~500 g/m <sup>2</sup>
铺装下层	聚合物改性沥青 GA10,厚度:35 mm;撒布 5~10 mm 预拌碎石
防水黏结层	丙烯酸树脂黏结剂,用量:100~200 g/m <sup>2</sup>
	TOPEVER <sup>®</sup> 两层 MMA 涂料(添加相对 MMA 总质量 7% 的空心玻璃微珠隔热材料),总用量:3 000~3 400 g/m <sup>2</sup>
	防腐底漆,用量:250~350 g/m <sup>2</sup>
钢板	喷砂除锈,清洁度:Sa2.5 级;粗糙度:50~100 μm

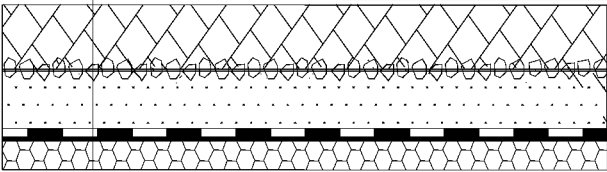


图 3 MMA 中掺空心玻璃微珠的钢桥面铺装结构示意图

3.3 隔热降温效果对比试验

试验前,为简化文中对各铺装结构的描述,先对参与对比试验研究的钢桥面铺装组合结构进行编号:

1<sup>#</sup>组合构件:钢板+防腐底漆+ MMA 防水黏结层+聚合物改性沥青 GA10+改性乳化沥青黏层+高弹改性沥青 SMA10。

2<sup>#</sup>组合构件:钢板+防腐底漆+MMA 防水黏结层+纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温毡+丙烯酸树脂黏结层+聚合物改性沥青 GA10+改性乳化沥青黏层+高弹改性沥青 SMA10。

3<sup>#</sup>组合构件:钢板+防腐底漆+ MMA 中掺有 7%空心玻璃微珠的防水黏结层+聚合物改性沥青 GA10+改性乳化沥青黏层+高弹改性沥青 SMA10。

试验检测当天的室外气象状况良好:晴,最高气温 35℃,微风;温度监测时间段选择在中午 12:00~17:00 气温较高的区间,而上午 08:00~12:00 为试件预热时间段,不计入温度监测时间;试验检测项目包括:钢板表面温度、GA 内部温度、SMA 内部温度。3 种组合结构在室外的温度变化监测。

3.3.1 1<sup>#</sup>组合构件测试结果及分析

1<sup>#</sup>组合构件试验结果见表 3。

由表 3 可知:GA 内部温度在 45.7~53.1℃范围内波动,SMA 内部温度在 46.7~52.1℃范围内波动;下午 12:00~14:00 钢板温度持续攀升,期间钢板正处于一个持续储热阶段;14:00 时,钢板温度到达峰值;14:00~17:00 钢板温度逐渐下降,期间钢板正处于一

个持续放热阶段,其中一部分热能向空气中辐射散失;另一部分热能因钢板导热系数高而向沥青铺装层传导,导致后期铺装层温度还略高于钢板温度。说明在没有任何隔热降温措施的钢桥面铺装结构中,沥青铺装层的热效应除了因大气温度变化而受影响外,受钢

板的热传导作用也很明显。如此到夏季持续高温季节,钢桥面沥青铺装层在行车荷载、大气热辐射、钢板热传导共同作用下产生的高温病害不容小觑。

3.3.2 2#组合构件试验结果及分析

2#组合构件试验结果见表 4。

表 3 1#组合构件室外温度监测结果

时刻	温度/℃					
	钢板表面	GA 内部	GA 内部均值	SMA 内部	SMA 内部均值	
12:00	43.7	45.0	46.3	45.7	46.3	47.1
12:30	48.1	50.4	48.5	49.5	47.2	46.8
14:00	61.2	51.8	53.6	52.7	51.3	50.8
14:30	55.1	52.5	52.1	52.3	50.0	51.3
15:00	53.6	52.8	53.4	53.1	52.8	51.3
15:30	48.9	49.5	50.9	50.2	50.7	49.8
16:00	47.4	48.9	48.3	48.6	48.6	48.8
16:30	46.7	48.7	48.0	48.4	47.5	48.6
17:00	46.0	46.7	48.1	47.4	46.8	47.8
平均值	50.1	—	—	49.8	—	—

表 4 2#组合构件室外温度监测结果

时刻	温度/℃					
	钢板表面	GA 内部	GA 内部均值	SMA 内部	SMA 内部均值	
12:00	45.9	37.0	36.5	36.8	34.7	34.2
12:30	52.2	37.0	36.7	36.9	38.7	39.1
14:00	59.3	39.3	38.6	39.0	39.1	38.4
14:30	55.2	41.6	42.8	42.2	41.1	42.5
15:00	54.1	42.9	41.7	42.3	42.8	41.4
15:30	53.2	43.0	42.4	42.7	43.5	43.7
16:00	52.9	43.1	43.9	43.5	42.7	42.9
16:30	49.5	42.6	43.9	43.3	42.3	44.0
17:00	46.6	41.8	42.6	42.2	40.8	42.4
平均值	52.1	—	—	41.0	—	—

由表 4 可知:在同一时刻下的 GA 和 SMA 沥青铺装层温度都要低于 1#组合构件中各沥青铺装层温度;GA 内部温度在 36.8~43.5℃范围内波动,相比 1#组合构件中 GA 内部温度平均降低了约 8.8℃,平均降温幅度约 17.7%;SMA 内部温度在 34.5~43.6℃范围内波动,相比 1#组合构件中 SMA 内部温度平均降低了约 8.3℃,平均降温幅度约 16.9%;另外,在整个温度监测时间范围内沥青铺装层温度都要显著低

于钢板温度。

分析其原因:2#组合构件中钢板与沥青铺装层之间设置了纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温毡,纳米 SiO<sub>2</sub> 气凝胶具有超高空隙率,而多孔材料的导热系数通常由固体热传导和孔洞介质的热传导所构成,固体材料的导热系数( $\lambda_s$ )为:

$$\lambda_s = (1 - P)\lambda_i$$
 (1)

式中: $P$  为多孔材料的空隙率; $\lambda_i$  为固体的本征导热

系数。

$\lambda_i$  的大小是由声子热传导、电子热传导和光子热传导(辐射热传导)3部分所决定。其中,光子热传导的作用是随着温度的升高而增强,因此,高温隔热材料往往在材料组成中掺入具有较强抗辐射能力的物质(如二氧化钛)或者遮黑剂,常温下材料的辐射热传导并不明显,光子导热系数基本可以忽略;电子热传导与电子浓度成正比,而二氧化硅属于绝缘材料,其电子导热系数同样可以忽略不计;因此对于大多数无机非金属材料如  $\text{SiO}_2$ ,其常温下的固体热传导主要来自声子热传导, $\text{SiO}_2$  气凝胶的非晶态结构以及二次粒子极小的接触面积均有利于控制声子热传导,从而  $\text{SiO}_2$  气凝

胶具有极小的声子导热系数;另外,孔洞介质的热传导主要与孔径大小及分布相关,由于  $\text{SiO}_2$  气凝胶的孔洞大多处于介孔范围(2~50 nm),小于常温下空气分子的平均振动自由程(90 nm),极大地抑制了孔洞中空气的热传导。因而,纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶的热传导实质上是由极小的声子热传导和孔介热传导所构成,经实测试验所用纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡导热系数仅 0.018 W/(m·K)(25℃),极大地削弱了钢板对沥青铺装层的热传导作用,从而能在一定程度范围内减小夏季高温季节沥青铺装层的车辙、推移、拥包等高温病害隐患。

### 3.3.3 3#组合构件试验结果及分析

3#组合构件试验结果见表5。

表5 3#组合构件室外温度监测结果

时刻	温度/℃					
	钢板表面	GA 内部	GA 内部均值	SMA 内部	SMA 内部均值	
12:00	48.7	40.8	40.4	40.6	41.7	42.0
12:30	54.5	44.4	43.9	44.2	43.3	43.1
14:00	61.8	46.0	43.8	44.9	43.2	41.9
14:30	56.9	44.8	45.8	45.3	43.3	45.4
15:00	53.7	46.7	46.7	46.7	45.6	46.1
15:30	50.5	45.5	46.4	46.0	43.6	46.6
16:00	47.8	44.8	43.8	44.3	43.6	44.5
16:30	46.3	43.9	44.7	44.3	42.6	45.1
17:00	45.0	43.2	44.6	43.9	42.4	45.0
平均值	51.7	—	—	44.5	—	—

由表5可知:在整个监测时间段内,GA和SMA沥青铺装层的温度差异很小,且无显著起伏现象;GA内部温度在40.6~46.7℃范围内波动,相比1#组合构件中GA的内部温度平均降低了约5.3℃,平均降温幅度约10.6%;SMA内部温度在41.9~45.9℃范围内波动,同样相比1#组合构件中SMA的内部温度平均降低了约5.3℃,平均降温幅度约10.8%。

经分析可知:试验所用的空心玻璃微珠具有中空、质量轻、密度小、导热系数低等特点,被广泛应用于涂料工业领域;而甲基丙烯酸甲酯树脂(英文简写MMA)是一种主要对钢结构起到防水和黏结作用的涂料,将空心玻璃微珠掺入MMA中,由于其粒径较小,相当于普通涂料用填料的细度,且流动性好,因而可以填料的方式直接加入到MMA涂料体系中;经过简单的机械搅拌作用,空心玻璃微珠可均匀分散于MMA涂料体系中,且不会出现结团、离析等现象,具有较好的配伍性,这样使得涂料固化后形成的涂膜具

有一定的保温隔热性能。从而相比普通钢桥面结构,掺空心玻璃微珠的MMA防水黏结层从一定程度上削弱了钢板对沥青铺装层的热传导。

综合以上试验结果和机理分析,在同一试验环境下,相比普通钢桥面铺装结构而言,从沥青铺装层内部温度波动范围、平均降温幅度以及钢板温度与沥青铺装层温度的差异大小3个方面综合评判,认为设置有纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡的钢桥面铺装结构对沥青铺装层的隔热降温作用最为显著。另外,利用纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡作为钢桥面铺装结构的功能层使用时,其在长期行车荷载作用下的抗磨损性能以及对上层铺装结构特别是磨耗层的抗滑性能影响可做进一步研究论证。

## 4 结 论

(1) 经模拟钢桥面沥青铺装层室外温度监测试验

结果可知:MMA+GA+SMA 普通钢桥面铺装结构因钢板导热系数高,沥青铺装层受钢板的热传导作用十分显著,在夏季持续高温季节,钢桥面沥青铺装层在行车荷载、大气热辐射、钢板热传导等因素的共同作用下会增大高温病害发生的可能性。

(2) 在相同的试验环境和条件下,同一时刻下的 MMA+纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡+GA+SMA 钢桥面铺装结构中的 GA 和 SMA 沥青铺装层温度都要低于普通钢桥面铺装结构沥青铺装层温度;且相比普通钢桥面铺装结构中 GA 和 SMA 的内部温度平均降温幅度分别约 17.7%和 16.9%;另外,在整个试验过程中沥青铺装层温度都要显著低于钢板温度。从而可推断 MMA+纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡+GA+SMA 的钢桥面铺装结构能在一定程度范围内减小夏季高温季节沥青铺装层的车辙、推移、拥包等高温病害隐患。

(3) 同样在相同的试验环境和条件下,掺轻质空心玻璃微珠的 MMA 对沥青铺装层也具有一定程度的降温隔热作用,且相比普通钢桥面铺装结构中沥青铺装层的内部温度平均降温幅度约 11%;但从整个试验过程中沥青铺装层内部温度的波动范围、平均降温幅度以及钢板温度与沥青铺装层温度的差异大小 3 个角度综合评判,认为设置有纳米  $\text{SiO}_2$  气凝胶保温毡的钢桥面铺装结构对沥青铺装层的隔热降温作用最为显著。

#### 参考文献:

- [1] 潘友强,郭忠印.大跨径连续钢箱梁钢桥面铺装设计[J].同济大学学报(自然科学版),2013(8).
- [2] 晏永,郭大进,封基良,等.钢桥铺装用环氧沥青的研究现状及展望[J].公路交通科技,2016(9).
- [3] 张肖宁,陈剑华,邹桂莲,等.基于使用性能的浇注式沥青混凝土设计[J].中南大学学报(自然科学版),2016(8).
- [4] 顾颖,李亚东,姚昌荣.太阳辐射下混凝土箱梁温度场研究[J].公路交通科技,2016(2).
- [5] 陈文,岳亚楠.拉曼热扫描技术同步测量一维导热和对流换热[J].工程热物理学报,2018(3).
- [6] Hao Zengheng, Wu Wenjun, Sheng Xingyue, et al. High Temperature Performance of Gussasphalt Based on Different Epithermal Temperatures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1):17-21.
- [7] Li Guofen, Wang Hongchang, Wang Yong, et al. Finite Element Analysis of Steel Bridge Deck Pavement Rut Based on Modified Burgers Model[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(5):120-125.
- [8] 钱振东,孟凡奇,杨理广.利用陶瓷废料的沥青混合料路用性能及隔热性能[J].公路交通科技,2015(5).
- [9] 郭晓煜,张光磊,赵霄云,等.气凝胶在建筑节能领域的应用形式与效果[J].硅酸盐通报,2015(2).
- [10] 李文军,孙宏健,郑永军.热电偶动态响应模型的贝叶斯推断[J].传感技术学报,2018(2).
- [11] 贾冠华,刘鹏,李珠.气凝胶/膨胀珍珠岩的制备及其微观特征对导热性能的影响[J].硅酸盐通报,2018(3).
- [12] Wei Gaosheng, Liu Yusong, Zhang Xinxin, et al. Thermal Conductivities Study on Silica Aerogel and Its Composite Insulation Materials[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2011, 54(11):2 355-2 366.
- [13] 彭寿,王芸,彭程,彭小波.空心玻璃微珠制备方法及应用研究进展[J].硅酸盐通报,2015(6).
- [14] 汪杰,陈先,周媛,等.浮力材料用国内外高性能空心玻璃微珠比较[J].化工新型材料,2011(10).
- [15] 刘晓燕,郑春媛,黄彩凤.多孔材料导热系数影响因素分析[J].低温建筑技术,2009(9).
- [16] 尹雨晨,雷辉,曾一兵,等.绝缘高辐射散热涂层配方设计及性能研究[J].涂料工业,2016(7).
- [17] 何雅玲,谢涛.气凝胶纳米多孔材料传热计算模型研究进展[J].科学通报,2015(2).
- [18] Ordonez-Miranda J, Ezzahri Y, Joulain K. Size Effects on the Thermal Conductivity of Nano Aerogels[C]. International Workshop on Thermal Investigations of ICS and Systems, 2017:1-5.
- [19] Liu Bing, Wang Hui, Qin Qinghua. Modelling and Characterization of Effective Thermal Conductivity of Single Hollow Glass Microsphere and its Powder[J]. Materials, 2018, 11(1):133.
- [20] Sue Ren, Liu Jiachen, Guo Anran, et al. Mechanical Properties and Thermal Conductivity of a Temperature Resistance Hollow Glass Microspheres/Borosilicate Glass Buoyance Material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 674:604-614.