

文章编号:1005-0523(2018)04-0117-07

# 超薄盐化物自融雪沥青罩面材料性能及寿命研究

韩亮<sup>1</sup>,石凯<sup>1</sup>,王素兰<sup>1</sup>,臧博青<sup>1</sup>,王博<sup>2</sup>,王玉清<sup>1</sup>

(1.保定市交通运输局,河北保定 071000;2.长安大学公路学院,陕西西安 710064)

**摘要:**使用超薄盐化物自融雪沥青材料作为道路罩面不仅能够有效地清除路面积雪,降低路面维护成本,而且有效地延长了沥青路面的使用寿命。基于国内外研究现状,通过冰点降低机理解释了超薄盐化物自融雪沥青混合料(TSSAM)的融雪机理,分析了空隙率、温度、加水量与盐化物替代量等因素对TSSAM融雪性能与寿命的影响。运用灰关联熵分析法得出影响融雪性能与寿命的关键因素。采用回归分析得到融雪性能与融雪寿命的预估方程,为盐化物自融雪路面的研究提供了参考依据。

**关键词:**TSSAM;盐化物;融雪性能;融雪寿命

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

我国冬季大部分地区道路积雪结冰现象普遍,易引发交通事故,给人民安全出行与道路交通带来严重威胁<sup>[1]</sup>。传统的道路除冰雪技术包括融雪剂除雪与人工机械除雪,但是普通融雪剂会造成道路沿线的土壤酸化与环境污染,而人工机械除雪更是需要大量的设备、财力与人力,盐化物自融雪沥青罩面材料能够显著地改善道路冰雪问题。因此,设计一种抗滑、降噪并且具有自动融雪功能的超薄盐化物自融雪沥青罩面材料变得尤为迫切。国内外学者对盐化物自融雪与罩面材料作了大量研究,瑞士 Verglimit 公司研制出一种沥青混合料防冻剂,降雪后该防冻剂可释放出有效成分,将冰点降至 20℃以下<sup>[2]</sup>;Konno R<sup>[3]</sup>在沸石空隙中掺入氯化钠和氯化钙混合物,研制出融雪剂 Mafilon;张忠<sup>[4]</sup>通过在 AC-13 沥青混合料掺加 Mafilon,研究了其对沥青混合料融雪性能与路用性能的影响,发现沥青混合料融雪性能提高,路用性能略微下降;张丽娟,等<sup>[5]</sup>研究了 IceBane 对 AC-13 与 SMA-13 两种沥青混合料融雪性能与路用性能的影响,发现后者具有更高的盐化物掺量,融雪效果更好。因此,只有不断改变粗细集料的比例,才能保证超薄沥青混合料的耐久性与高温稳定性。目前,国内外学者对 AC-13, SMA-13 等粗粒式盐化物混合料研究较多,对于超薄盐化物自融雪沥青混合料(TSSAM)的研究还不多见。本文以 SMA-5 为超薄罩面,通过冰点降低机理解释了超薄 TSSAM 的融雪机理,分析了空隙率、温度、加水量与盐化物替代量等因素对 TSSAM 融雪性能与寿命的研究,运用灰关联熵分析法得出影响融雪性能与寿命的关键因素,最后运用回归分析得到融雪性能与融雪寿命的预估方程,并通过实际对比分析验证了方程的可靠性,为盐化物自融雪路面的研究提供参考。

## 1 TSSAM 混合料与相关机理

### 1.1 TSSAM 混合料

TSSAM 作为一种罩面材料,不仅具有良好的耐久性与力学性能,而且具有融雪化冰的实用性能<sup>[6]</sup>。对 TSSAM 混合料进行设计时,首先确定主骨料的组成及各级料的配比,保证良好的骨架结构与骨架强度<sup>[7]</sup>;其次,确定填充料的组成与各级料的配比,保证骨架联接与填充的良好作用;主骨料与填充料的最佳配比通过

收稿日期:2018-01-05

基金项目:保定市科技支撑计划项目(17ZG018,17ZG005)

作者简介:韩亮(1981—),男,工程师,学士,研究方向为道路材料科学与工程。

混合料的体积指标和力学指标来确定,最后确定沥青的最佳用量为6%。本文试件沥青采用TPS高粘改性沥青,其TPS含量为12%。粗细集料采用易县玄武岩石料,最大粒径为4.75 mm。主骨料各级筛孔分别为1.18,2.36,4.75,9.5 mm,将主骨料各级筛孔粒料(1.18~2.36,2.36~4.75,4.75~9.5 mm)质量分数为7.8%:79.8%:12.4%。盐化物采用新型融冰雪清洁剂,其成分包括:二水氯化钙( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、缓蚀剂、硼砂( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )、附着剂(羧甲基纤维素)。

## 1.2 融雪机理

降雪前空气湿度一般较大,在毛细管作用下,水分将通过混合料进入沥青罩面内部,盐化物中的有效成分发生水解,电离形成盐溶液<sup>[8]</sup>。在汽车轮胎荷载真空负压及动水压力的作用下,盐溶液通过空隙由高浓度处向低浓度处扩散,逐渐从罩面内部扩散至路面表层,在冰雪与路面之间形成隔离层,能够有效地延缓路面结冰与积雪。由于路面行车荷载使得TSSAM中有效成分可以不断传质到路表,使得罩面材料TSSAM能够不间断融雪。TSSAM融雪机理见图1。

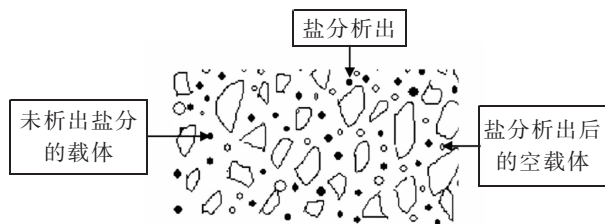


图1 TSSAM融雪机理图

Fig.1 Snow melting mechanism diagram of TSSAM

## 2 TSSAM融雪性能研究

### 2.1 融雪性能影响因素

电解质溶液中的阴阳离子在电场作用下会发生定向移动,产生电流。通过测量电解质溶液的电导率确定物质的浓度。电导率主要与溶液中有有机酸、盐含量、碱含量有关,根据电导率测量值可以间接计算水中的离子浓度,由此评价实际融雪效果。TSSAM的融雪性能取决于盐化物中的有效成分,盐溶液中的离子浓度越大,融雪性能越好。其释放速率取决于温度、降水量、空隙率与盐化物代替量。因此,分析各因素对融雪性能的影响,找到最主要的影响因素显得十分重要。考虑到冬季降雪时路面温度变化范围较大,为了使得不同温度条件下的电导率具有可比性,本文所有试验均将示值温度补偿至25℃。采用上海雷磁仪器厂DDS-11D型电导率测试仪,该仪器具有温度补偿装置。当调节器“温度”旋钮置于相应介质温度刻度时,示值为25℃时的电导率;当调节器“温度”旋钮置于25℃刻度时,示值为无温度补偿时的电导率。

#### 2.1.1 盐化物替代量对融雪性能的影响

为了研究盐化物替代量对TSSAM融雪性能的影响,马歇尔试件的制备条件为双面击实50次,盐化物代替量与混合料中矿粉比重分别为20%,30%,40%,50%,60%。5000 mL烧杯中放入试件,加入2500 mL水,将DDS-11D型电导率测试仪调节器“温度”旋钮置于相应介质实际温度刻度,测定各试件温度补偿至25℃后的电导率,试验结果如图2所示。

由图2可以看出,盐化物添加之后,电导率随着溶析时间的延长而增大,并且初期增幅较为明显,随着溶析时间的延长,电导率的增长趋于平缓。溶析初期混合料外部水中离子浓度与内部离子浓度差最大,所以离子的扩散速度最快,电导率增幅也最大,通过延长溶析时间使得进入混合料内部的水分增加,促进了有效成分的释放,提高了电导率增强了融雪性能。

相同的溶析时间,试件的电导率随着盐化物替代量增加而增大,其融雪性能就越好。盐化物替代量大于40%时,增加盐化物的替代量,电导率的增幅较大;盐化物替代量小于40%时,电导率的增幅随着盐化物的替代量增加而较小,主要由于增加盐化物的替代量能够增加有效成分在相同溶析时间内的释放量,进而增大电导率,优化融雪性能。

#### 2.1.2 空隙率对融雪性能的影响

为了研究空隙率对融雪性能的影响,以2500 mL的加水量和40%的盐化物替代量为例,通过双面击实75,50次和35次,分别得到孔隙率为4.4%,5.0%和6.6%的马歇尔试件。将DDS-11D型电导率测试仪调

节器“温度”旋钮置于相应介质实际温度刻度,测定各试件温度补偿至 25 ℃ 后的电导率,试验结果见图 3。

由图 3 可以发现,当溶析时间少于 75 min 时,电导率随着空隙率的变大而明显增加,溶析时间超过 75 min 时,随着空隙率的变化,电导率增加不明显,表明溶析时间越长,空隙率对融雪性能的影响越小。由于溶析时间少于 75 min,空隙率越大,进入混合料内部的水越多,有效成分析出越快;而溶析时间超过 75 min 时,进入混合料内部的水分相差不大,有效成分析出量相同,所以电导率相差不大。

### 2.1.3 温度对融雪性能的影响

为了研究温度对 TSSAM 融雪性能的影响,以双面击实 50 次,500 mL 的加水量和 40% 的盐化物替代量为例,分别测定环境温度为 55,40 ℃ 与 25 ℃ 下试件的电导率,试验结果见图 4。

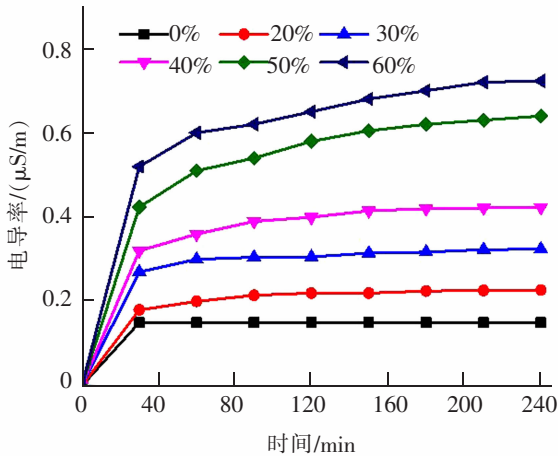


图 2 盐化物替代量对电导率的影响

Fig.2 Effect of substitution amount of salinization on electrical conductivity

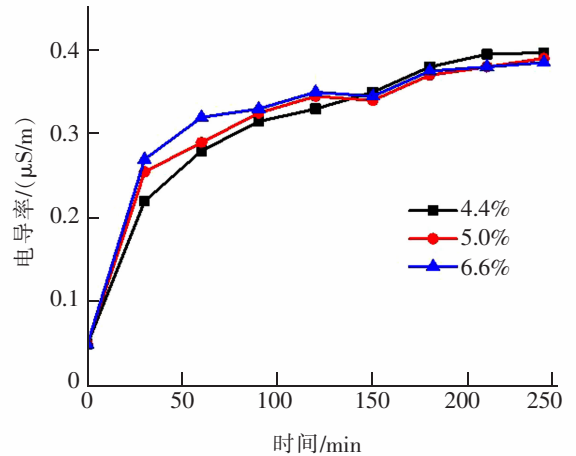


图 3 空隙率对电导率的影响

Fig.3 Effect of voidage on electrical conductivity

由图 4 可以发现,保持其他条件相同,电导率随着温度的增加而增大。温度增高能够加快溶液中离子的扩散速度,使得有效成分迅速扩展至路表。TSSAM 具有持续的融雪作用,温度较低时,有效成分释放速率低,融雪效果差,需要配合撒融雪剂、人工除雪等方式来保障行车安全与道路畅通。

### 2.1.4 加水量对融雪性能的影响

为了模拟降雪量与降雨对融雪性能的影响,马歇尔试件的制备条件为:双面击实 50 次,盐化物代替量控制为 40%。将 DDS-11D 型电导率测试仪调节器“温度”旋钮置于相应介质实际温度刻度,测定加水量为 1 600,2 200,2 800,3 400,4 000 mL 时,各试件温度补偿至 25 ℃ 后的电导率,试验结果见图 5。

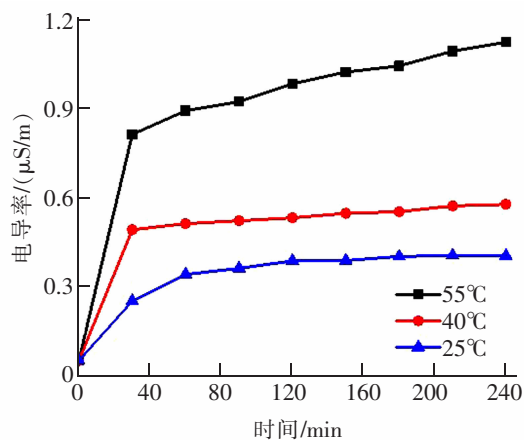


图 4 温度对电导率的影响

Fig.4 Effect of temperature on electrical conductivity

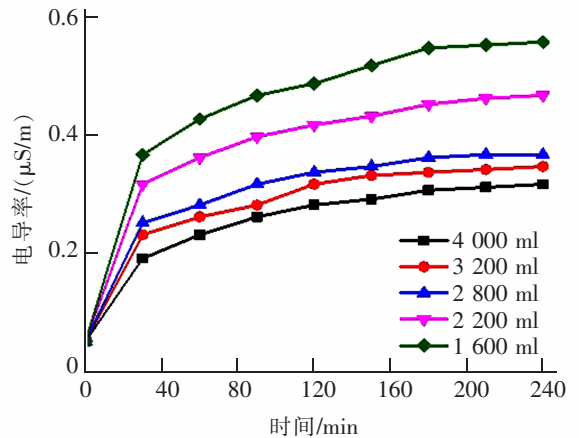


图 5 加水量对电导率的影响

Fig.5 Effect of water added amount on electrical conductivity

由图5可以发现,相同时间条件下,电导率随着加水量的增加而减小,加水量2 800 mL时,电导率受加水量的影响显著,加水量超过2 800 mL时,电导率受加水量的影响较小,表明降雪量越大,融雪效果越差。原因是同等条件下盐溶液中离子浓度随着加水量的增加而减小,导致电导率变小。

## 2.2 融雪性能关键影响因素确定

为了确定影响融雪性能的关键因素,通过对电导率( $D$ )及其关联因子加水量( $L$ )、空隙率( $V$ )、盐化物替代量( $C$ )、温度( $T$ )和溶析时间( $t$ )进行灰色关联熵分析<sup>[9]</sup>。得到各因素的灰熵关联度,结果见表1。

表1 各关联因子的灰熵关联度  
Tab.1 Grey entropy correlation of each associated factor

项目	$L$	$V$	$C$	$T$	$t$
灰熵关联度	0.704 55	0.541 71	0.552 88	0.596 59	0.563 82

由表1可以发现,电导率与影响因素的灰熵关联度排序为:空隙率( $V$ )<加水量( $L$ )<溶析时间( $t$ )<温度( $T$ )<盐化物替代量( $C$ ),盐化物替代量是影响融雪性能的关键因素,温度是影响融雪性能的主要因素。因此,在满足路用性能的前提下,设计TSSAM材料应该选取较大的盐化物替代量,在温度较低条件下,应当配合其他除雪方式清除路面积雪。

## 2.3 融雪性能预估及分析

通过灰色系统理论建立TSSAM融雪性能的预测模型,模型参数分别为:加水量( $L$ )、空隙率( $V$ )、盐化物替代量( $C$ )、温度( $T$ )和溶析时间( $t$ )。计算结果如下: $D=0.032\ 99\ V+0.021\ 02\ T+0.007\ 35\ C+0.098\ 27\ t-4.024\ 31\times 10^{-4}-0.001\ 93$ 。将TSSAM融雪性能计算值与实际测量值进行比较,得到融雪性能对比图,见图6。

由图6中计算值与实测值对比可以发现,两者数值相差较小,表明预测值与实际测量值数据吻合较好。因此,该融雪性能模型具有可靠性、可信性与可行性。

## 3 TSSAM融雪寿命研究

### 3.1 融雪寿命影响因素研究

由于盐化物不断释放,残留有效成分含量将逐渐降低,融雪期限缩短,当盐化物残余量为零时,路面将不在具有融雪性能<sup>[10]</sup>。因此,认为有效成分残余量达到零时所需的时间为融雪寿命。有效成分残余量计算式为

$$M_f=139.5C-\frac{D-0.04}{836.7}L_1 \quad (1)$$

式中: $L_1$ 为测定试件时的加水量,ml。

#### 3.1.1 盐化物替代量对融雪寿命的影响

为了研究盐化物替代量对TSSAM融雪寿命的影响,马歇尔试件的制备条件为:双面击实50次,盐化物代替量与混合料中矿粉比重分别为20%,30%,40%,50%,60%,5 000 mL烧杯中放入试件,加入2 500 mL水,计算1.5 h后各试件的有效成分残余量,试验结果见图7。

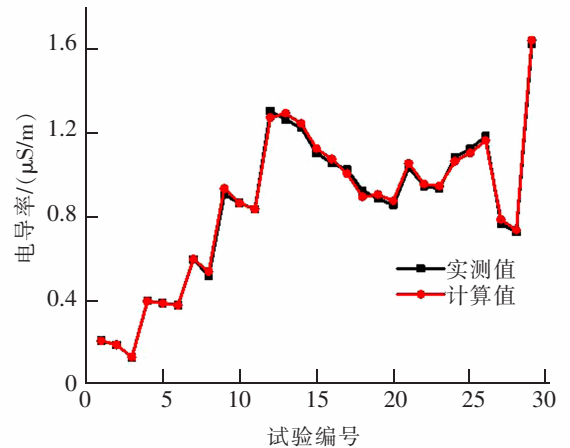


图6 融雪性能对比图

Fig.6 Contrast diagram of snow melting performance

由图7可以发现,盐化物替代量越大,有效成分残余越大,说明融雪寿命随着盐化物替代量的增加而逐渐延长,其中,盐化物替代量由20%增大至60%时,有效成分残余量增大了将近4倍。原因是同等条件下有效成分的总量随着盐化物替代量的增加而增多,未释放的有效成分越多,融雪寿命也就越长。

### 3.1.2 空隙率对融雪寿命的影响

为了研究空隙率对融雪寿命的影响,以2500 mL的加水量和40%的盐化物替代量为例,通过双面击实75,50次和35次,分别得到孔隙率为4.4%,5.0%和6.6%的马歇尔试件。计算1.5 h后各试件有效成分残余量,试验结果见图8。

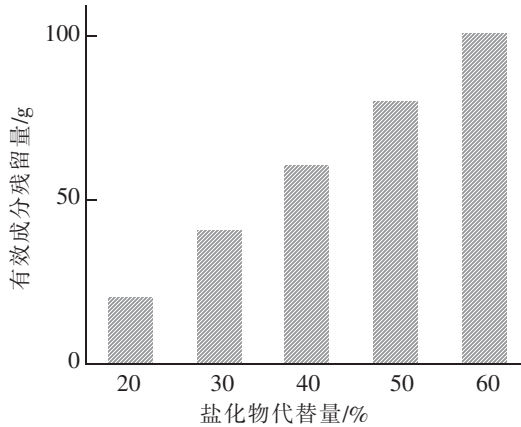


图7 盐化物替代量对融雪寿命的影响

Fig.7 Effect of replacement amount of salinization on snow melting life

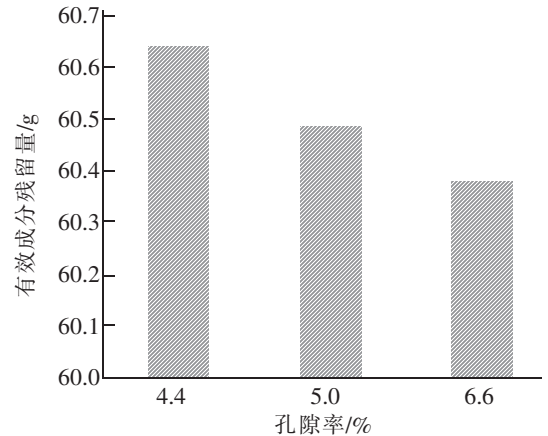


图8 空隙率对融雪寿命的影响

Fig.8 Effect of void fraction on snow melting life

由图8可以发现,有效成分残余量与融雪寿命随着空隙率的增大而降低。主要由于同等条件下空隙率越大,同等时间进入混合料内部的水分越多,有效成分的释放速度越快,融雪寿命越短。因此TSSAM进行施工时应该进行足够的压实才能保证融雪寿命与路用性能。

### 3.1.3 温度对融雪寿命的影响

为了研究温度对TSSAM融雪寿命的影响,以双面击实50次,500 mL的加水量和40%的盐化物替代量为例,分别计算环境温度为55,40℃与25℃下1.5 h后试件的有效成分残余量,试验结果见图9。

由图9可以发现,有效成分残余量与融雪寿命随着温度的升高而降低。其中,温度高于40℃时有效成分残余量明显减小,表明超薄盐化物自融雪沥青罩面材料的融雪寿命随着夏季高温降雨严重缩短,原因是,同等条件下,有效成分释放速度与离子扩散速度随着温度升高明显加快,进而使得超薄盐化物自融雪沥青罩面材料寿命变短。

### 3.1.4 加水量对融雪寿命的影响

为了模拟降雪量与降雨对融雪寿命的影响,马歇尔试件的制备条件为双面击实50次,盐化物代替量控制为40%,计算加水量分别为4000,3400,2800,2200 mL和1600 mL时1.5 h后试件的有效成分残余量,试验结果见图10。

由图10可以发现,有效成分残余量与融雪寿命随着加水量的增多变化不明显,表明融雪寿命受加水量的影响较小。原因是,孔隙率相当时,同等时间进入TSSAM的水分相当,有效成分释放量相当,所以有效成分残余量变化不大。

## 3.2 融雪寿命关键影响因素确定

为了确定影响融雪寿命的关键因素,通过对电导率( $D$ )及其关联因子加水量( $L$ )、空隙率( $V$ )、盐化物替代量( $C$ )、温度( $T$ )和溶析时间( $t$ )进行灰色关联熵分析,得到有效成分残余量与影响因素的灰熵关联度,结果见表2。

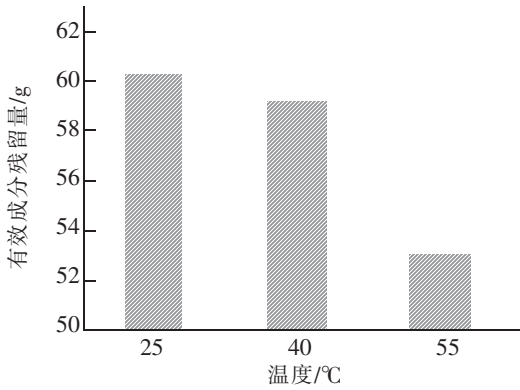


图9 温度对融雪寿命的影响

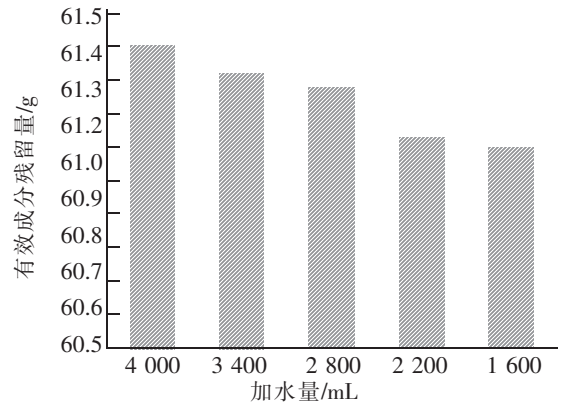


图10 加水量对融雪寿命的影响

Fig.9 Effect of temperature on snow melting life

Fig.10 Effect of water added amount on snow melting life

表2 有效成分残余量与影响因素的灰熵关联度

Tab.2 Grey entropy correlation of residual quantity of effective components and influencing factors

项目	<i>L</i>	<i>V</i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>t</i>
灰熵关联度	0.727 14	0.819 35	0.985 20	0.772 95	0.666 44

由表2可以发现,有效成分残余量与影响因素的灰熵关联度排序为:溶析时间(*t*)<加水量(*L*)<温度(*T*)<空隙率(*V*)<盐化物替代量(*C*),盐化物替代量是影响融雪寿命的关键因素,温度和孔隙率是影响融雪性能的主要因素。因此,为了延长TSSAM的融雪寿命,薄盐化物自融雪沥青混凝土的铺筑施工应该在秋冬季节,并且保证其充分压实。

### 3.3 融雪寿命预估

通过灰色系统理论建立TSSAM融雪寿命的预测模型,模型参数分别为:加水量(*L*)、空隙率(*V*)、盐化物替代量(*C*)、温度(*T*)和溶析时间(*t*)。计算结果如下

$$M_f = 7.813\ 00 + 1.160\ 84\ C - 0.215\ 68\ V - 0.060\ 76\ T - 0.001\ 56\ t - 0.001\ 44\ L$$

令  $M_f = 0$ , 得到持续融雪寿命方程为

$$t = 5\ 008.333\ 33 + 744.128\ 1\ C - 138.256\ 41\ V - 38.948\ 72\ T - 0.923\ 08\ L$$

根据气象资料将公路划分为7个地区,假设空隙率*V*为4%,盐化物替代量*C*为56%;同时选取地区年平均温度与降雨量,计算得到路面温度与试验对应加水量,则不同地区的持续融雪寿命可以通过持续融雪寿命方程计算得到,计算结果见表3。

表3 不同地区融雪寿命计算结果

Tab.3 Calculation results of snow melting life in different regions

地区	年降雨量/mm	计算加水量/mm	计算温度/°C	持续融雪寿命/year
青藏高寒区	200~400	6 805	34.4	4.43
西北干旱区	100~200	3 405	41.0	4.76
西南潮暖区	1 000~1 200	24 960	48.9	2.45
东南湿热区	1 600~2 000	40 838	51.5	0.76
黄土高原干湿区	400~600	11 345	48.9	3.88
东部湿润季冻区	600~800	15 885	51.5	3.39
北部多年冻土区	400~600	11 345	40.9	3.92

由表3可以发现,TSSAM的融雪寿命在青藏高寒区与西北干旱区最长,其余北方地区次之,而南方地区TSSAM的持续融雪寿命较短,其中东南湿热区TSSAM的持续融雪寿命最短。因此,在北方降雨量较小的地区进行TSSAM铺筑最为合适。

## 4 结论

为改善道路冰雪问题,保证人民安全出行,本文通过冰点降低机理解释了TSSAM的融雪机理,分析了空隙率、温度、加水量与盐化物替代量等因素对TSSAM融雪性能与寿命的研究,运用灰关联熵分析法得出影响融雪性能与寿命的关键因素,最后通过回归分析得到融雪性能与融雪寿命的预估方程,主要得出以下结论:

1) 融雪性能关键影响因素大小排序为:空隙率( $V$ )<加水量( $L$ )<溶析时间( $t$ )<温度( $T$ )<盐化物替代量( $C$ ),盐化物替代量是影响融雪性能的关键因素。因此,在满足路用性能的前提下,设计TSSAM材料应该选取较大的盐化物替代量。

2) 融雪寿命关键影响因素大小排序为:溶析时间( $t$ )<加水量( $L$ )<温度( $T$ )<空隙率( $V$ )<盐化物替代量( $C$ ),盐化物替代量是影响融雪寿命的关键因素,温度和孔隙率是影响融雪性能的主要因素。

3) 通过灰色系统理论建立TSSAM融雪寿命的灰色预估模型,计算得到预估方程,并对不同地区融雪寿命进行计算,发现在北方降雨量较小的地区进行TSSAM铺筑最为合适。

## 参考文献:

- [1] 熊锐,刘子铭,王小雯,等. 超薄盐化物自融雪沥青混合料路用性能研究[J]. 公路,2016(12):236-240.
- [2] JOHANNES HARALDPETER. Bituminous material used an ice-preventing additive for road surfaces [P]. DE4432869A;German, 1995.
- [3] KONNO RIYOUJI, YAHAZAKI HISAO, GOTO SEIJI. Antifreezing agent for road surface[P]. JP 06-136356;Japan, 2006.
- [4] 张忠,刘红莹,李云霞. 盐化物融雪剂在高速公路建设中的应用研究[J]. 公路工程,2012,37(6):204-207.
- [5] 张丽娟,孙青松,韩森. 掺加盐化物融冰雪材料的沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路,2011,31(4):269-273.
- [6] BROSSCAUD Y, ELLANGER J, OURDON J. Thinner asphalt layers for the maintenance of French roads[J]. Transportation Research Record TRR1334, 1992(8):9-12.
- [7] 王同福. 自融雪沥青路面长期融雪性能测试方法研究[J]. 公路与汽运,2016(5):80-82.
- [8] 张洪伟,韩森,张丽娟,等. 盐化物沥青混凝土抑制结冰与融雪试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(2):17-20.
- [9] 凌建明,纪更占,孔二春,等. 基于灰色关联的环氧沥青混合料疲劳性能影响因素分析[J]. 华东交通大学学报,2017,34(1):14-20.
- [10] 刘状壮,高杰,张正伟,等. 融雪抑冰沥青混合料路用性能及盐分溶析特性[J]. 公路,2016(8):199-204.