

# 改性明胶包膜制备抗凝冰 复合材料的试验研究

赵 苏,赵 佩,高丽丽,丁向群

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究抗凝冰复合材料的制备方法,延长抗凝冰复合材料的使用时间,提高其使用效率。**方法** 以无机粉体为载体吸附融雪盐制备蓄盐混合料,对明胶进行改性处理后包膜蓄盐混合料制备抗凝冰复合材料;通过试验测试路用性能。**结果** 凹凸棒的比表面积最大,具有纤维状结构,被确定为吸附载体;当融雪盐  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{NaCl}$  的质量比为 4:6 时,融冰速率最快;明胶改性条件:乙二醇质量分数为 12.5%, $60\text{ }^\circ\text{C}$  下搅拌 20 min;抗凝冰复合材料在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  条件下的离子析出量远大于其他温度段,V-260 的析出速率不受温度影响;路用性能测试得到的结果均符合《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017)。**结论** 抗凝冰复合料代替部分矿粉集料掺入沥青混合料中是可行的,减少了非冬季路面的盐分流失,提高了抗凝冰路面的使用效率。

**关键词** 改性;明胶;包膜;抗凝冰复合材料

中图分类号 TU528.042;U414

文献标志码 A

## Experimental Study on Preparation of Anti-freezing Ice Composite with Modified Gelatin Coating

ZHAO Su, ZHAO Pei, GAO Lili, DING Xiangqun

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Research the preparation method of anti-icing composite materials, prolong the use time of anti-icing composite materials, and improve their use efficiency. Inorganic powder was used as a carrier to absorb snow-melting salt to prepare a salt storage mixture. Gelatin was modified and coated with a salt storage mixture to prepare an anti-icing composite material; test the road performance with various tests specified in the specification. The attapulgite had the largest specific surface area and had a fibrous structure, which was identified as the adsorption carrier; when the mass ratio of snow melting salt  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{NaCl}$  was 4:6, the ice melting rate was the fastest; gelatin modification condition: ethylene glycol mass fraction It is 12.5%, stirred at  $60\text{ }^\circ\text{C}$  for 20min; the amount of ion precipitation of anti-coagulation ice composite material at  $0\text{ }^\circ\text{C}$  is far

收稿日期:2021-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51808354)

作者简介:赵苏(1965—),女,教授,主要从事材料物理与化学方面研究。

greater than other temperature ranges, and the precipitation rate of V-260 is not affected by temperature; The road performance is tested, and the test results are all in line with "Highway Engineering Quality Inspection and Evaluation Standard" (JTG F80/1—2017). It is feasible for the anti-icing composite to replace part of the mineral powder aggregate into the asphalt mixture, which reduces the salt loss of non-winter roads and improves the use efficiency of anti-icing pavements.

**Key words:** modified; gelatin; envelope; anti-freezing ice composite materia

环保型除冰雪技术<sup>[1-3]</sup>越来越得到各国交通和科研部门的重视,其主要方法有自应力弹性路面铺装技术<sup>[4]</sup>、导电铺面融冰雪技术、能量转换型融冰雪技术<sup>[5]</sup>和化学法抗凝冰路面技术<sup>[6]</sup>等。其中化学法抗凝冰路面铺装技术又称为蓄盐类沥青混合料路面技术<sup>[7]</sup>,是一种新型的绿色的主动除冰雪技术。瑞士首先成功实现了这项技术,将 Verglimit 防冻剂<sup>[8]</sup>添加在了路面中,又叫 V-260。车辆在行驶过程中,不断对路面进行碾压,加速释放类似融冰盐的物质,有效抑制结冰速度,延长路面结冰时间。马广一<sup>[9]</sup>借鉴化肥包膜技术对盐化物进行包膜以达到延长使用年限的目的,制备的抗凝点沥青路面外加的抗凝冰效果将持续6年。然而抗凝冰剂的析出量主要受车辆荷载和环境影响,夏季多雨天气会加速抗凝冰剂的流失,导致抗凝冰路面使用效率降低。王鹏<sup>[10]</sup>利用聚丙烯酸甲酯的玻璃化转变温度这一性质,制备出的抗凝冰材料具备温敏性能,虽然减少了融雪物质的流失,但是聚丙烯酸甲酯达到玻璃化转变温度以后的破碎是不可逆的,这在很大程度上限制了抗凝冰路面的使用年限。笔者制备的抗凝冰复合材料是利用物理吸附制备蓄盐混合料<sup>[11]</sup>,再用改性明胶包膜蓄盐混合料。改性明胶在低温下黏性增强,转变成凝胶,随着温度升高黏性减弱,又恢复成明胶,并且具有可逆性,提高了抗凝冰路面的使用效率,增加路面使用年限,减少融雪剂的使用量。

## 1 试验

### 1.1 蓄盐混合料的制备

在室温下分别取 74 g  $\text{CaCl}_2$  和 36 g  $\text{NaCl}$  溶于 100 mL 蒸馏水中形成饱和溶液,然后分别取 20 g 凹凸棒、粉煤灰和硅藻土粉末分别和饱和溶液混合,以 360 r/min 的速度搅拌 2 h,充分搅拌均匀后静置 12 h 完成吸附,进行抽滤,将得到的固体物质在 120 °C 下烘干后研磨。

### 1.2 蓄盐混合料的包膜

#### 1.2.1 改性明胶

利用化学法改性明胶。称取一定质量经过 30 min 溶胀的明胶,和质量分数为 12.5% 的一定质量的乙二醇混合,在 60 °C 水浴加热中搅拌至明胶溶解,混合液在超声消泡 30 min 后自然冷却,凝固物就是改性明胶<sup>[12]</sup>。

#### 1.2.2 包膜复合材料的制备

配制 A、B 两种溶液。A 溶液是在 37 °C 条件下在 50 mL 的蒸馏水中溶解 10 g  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 。溶液 B 是在同样温度条件下在同等蒸馏水中溶解 2 g 改性明胶。将两种溶液搅拌均匀,取 5 g 蓄盐混合料超声分散在 B 溶液中,接着加入 A 溶液并进行快速搅拌,直至溶液中出现凝聚现象。将混合均匀的溶液在冰浴锅中进行冷却,微胶囊在这个过程中会不断形成,待反应结束后。用蒸馏水和无水乙醇溶液洗涤微胶囊,洗涤结束后后进行抽滤、烘干和研磨,得到的粉末就是抗凝冰复合材料。

### 1.3 测试方法

盐分的析出量及缓释效果用电导率测试仪测试<sup>[9]</sup>;明胶膜的各项性能用万能试验机测试;

马歇尔试验和车辙试验根据规范《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2019)测试。

## 2 确定试验条件

### 2.1 确定载体

试验制备的材料替代矿粉内掺在沥青混合料中,粒径必须和矿粉接近,要求不大于0.075 mm。用3H-2000型BET比表面积测试仪测试选定的5种载体的比表面积,分别为粉煤灰、碳酸钙、火山岩、硅藻土、凹凸棒,在结果中选择比表面积最大的作为载体,不同种类粉体比表面积如表1所示。

表1 不同种类粉体比表面积

Table 1 Specific surface area of different powders

样品名称	比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )
粉煤灰	8.597
碳酸钙	0.981
火山岩	5.067
硅藻土	6.324
凹凸棒	126.1

由表1可知,凹凸棒的比表面积要比其他粉体大很多,通常载体比表面积越大吸附能力就越强<sup>[9]</sup>。另外,凹凸棒土为一种晶质水合镁铝酸盐矿物,具有独特的层链状结构特征,在其结构中存在晶格置换,晶体中存在不定量的阳离子,呈针状或者纤维状,凹凸棒的扫描电子显微镜照片如图1所示。从图可以看到其针状或纤维状的结构,独特的结构使凹凸棒具有阳离子交换性能,可以更多地吸附融雪盐,因此笔者选用凹凸棒为载体。

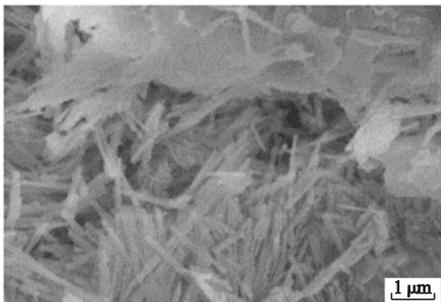


图1 凹凸棒土的微观结构

Fig. 1 Microstructure of Attapulgite

### 2.2 融雪盐的确定

选择常见的  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$  和  $\text{KCl}$  氯盐融雪材料进行冰点测试(见表2)。

表2 几种常用融雪材料不同质量分数下的冰点

Table 2 The freezing point of several commonly used snow melting materials with different mass fractions

质量分数/%	冰点/ $^{\circ}\text{C}$			
	$\text{CaCl}_2$	$\text{NaCl}$	$\text{MgCl}_2$	$\text{KCl}$
2	-0.7	-1.1	-1.2	-0.6
4	-1.8	-2.2	-2.4	-1.2
6	-2.7	-3.3	-3.8	-1.8
10	-5.8	-6.0	-7.0	-3.0
12	-7.6	-7.0	-8.8	-3.6
14	-10.0	-8.3	-10.5	-4.2
16	-12.1	-10.0	-13.0	-4.8
18	-15.0	-11.1	-15.5	-5.4
20	-17.0	-12.7	-18.7	-6.0
22	-22.0	-14.0	-22.0	-6.6
24	-25.0	-16.0	-25.9	-7.2
26	-28.9	-18.0	-30.0	—
28	-34.1	-19.2	-32.7	—
30	-41.0	-20.7	—	—

由表2可知,相同质量分数的  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  的冰点较  $\text{KCl}$  低,而在质量分数较低时, $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  两种盐降低冰点的能力更强,因此若在南方等冬季气温不是很低的地区可采用  $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  这两种氯盐作为融雪盐;在东北等冬季气温较低的地区,则  $\text{CaCl}_2$  更适合。

作为融雪抑冰材料必定要溶于水,溶于水放热的物质更具优势,由此再对  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  这3种氯盐的溶解热<sup>[13]</sup>进行对比(见表3)。

表3 3种氯盐的溶解热

Table 3 Heat of dissolution of three chloride salts

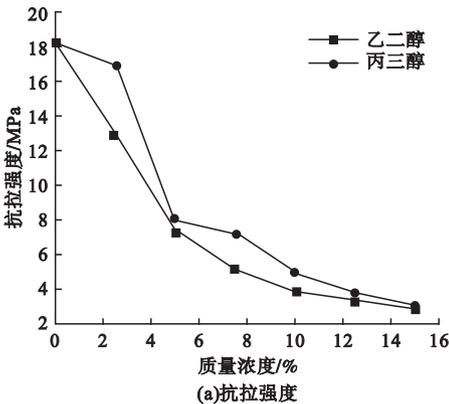
溶质	溶质温度/℃	水温/℃	溶液温度/℃	溶解热/kJ		
				水温变化热	溶质变化热	每公斤溶质溶解热
CaCl <sub>2</sub>	24.7	21.1	45.3	+5 066	+431	+1 009
NaCl	24.7	21.1	19.9	-356	-101	-91.4
MgCl <sub>2</sub>	21.1	19.3	33.3	+2 931	+253	+636.8

由表3可知,CaCl<sub>2</sub>溶于水放出大量热,低温时凝结成多水化合物。常温下NaCl和MgCl<sub>2</sub>的基本形态都是固态,但是MgCl<sub>2</sub>带的结晶水只有在温度较高时才会失去,这就导致抗凝冰复合材料的有效使用期很短。进一步将按照不同比例混合的CaCl<sub>2</sub>和NaCl置于100 mL水结成的冰块上,室温下记录冰块融化时间,两种不同比例盐的融冰测试结果如表4所示。

表4 两种不同比例盐的融冰测试结果

Table 4 Test of ice melting results of two different proportions of salt

$m(\text{CaCl}_2):m(\text{NaCl})$	时间/min
2:8	16
4:6	9
5:5	13
6:4	12
8:2	10



从表4可看出融冰效率最好的是 $m(\text{CaCl}_2):m(\text{NaCl})$ 为4:6的配比。笔者分别以CaCl<sub>2</sub>、NaCl单体以及复合氯盐制备材料进行比较。

### 2.3 改性明胶

明胶主要是由大分子亲水物质蛋白质构成,来源广泛易加工成膜,但抗拉性能太弱,成膜容易破碎,需要对其进行改性,降低脆性才能使用。

#### 2.3.1 改性剂的确定

准备6份溶胀30 min后的等质量的明胶,选择质量分数0、2.5%、5%、10%、12.5%和15%的改性剂和明胶混合,水浴加热同时超声消泡,将等质量的混合溶液滴在玻璃板上自流平,冷却后形成明胶膜,测试其抗拉强度和断裂伸长率,用万能试验机进行测试,不同质量分数的改性剂对明胶膜性能的影响如图2所示。

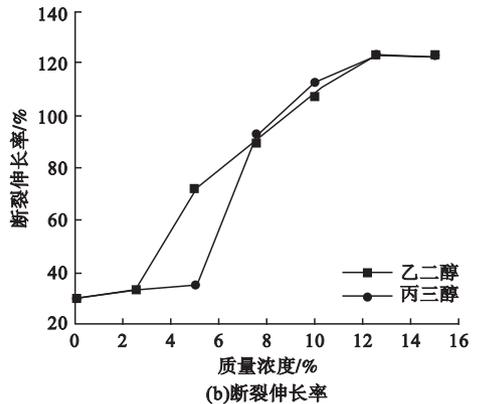


图2 不同质量分数的改性剂对明胶膜性能的影响

Fig. 2 Effects of different mass fractions of modifiers on the properties of gelatin film

从图2(a)可以看出,乙二醇和丙三醇对于明胶膜抗拉强度的影响趋势基本一致,都是随着改性剂掺量的增加,抗拉强度逐渐降

低。改性剂与明胶分子之间形成分子间氢键,随着改性剂质量分数的增加氢键不断增加,导致明胶分子间的范德华力被不断削弱,

因此明胶膜的脆性减弱,抗拉强度降低。从图2(b)可以看出,未改性前,明胶膜脆性极强,断裂伸长率只有30.13%,这是因为明胶分子之间的力原本以分子间瞬时偶极引起的范德华力为主,非常小。随着改性剂的加入,明胶分子间的范德华力被削弱,改性剂与明胶分子间的氢键增强,断裂伸长率增加,同时氢键具有饱和性,所以明胶膜的断裂伸长率不会无限增加,到达最大值后即停止。明胶膜的断裂伸长率值达到最大都是在乙二醇和

丙三醇的质量分数为12.5%时。以乙二醇为改性剂的明胶膜的断裂伸长率增加量和以丙三醇为改性剂的结果相比相差不大。最终笔者选用乙二醇作为改性剂,因其价格低廉。

### 2.3.2 改性温度和搅拌时间

称取20 g溶胀30 min的明胶,用质量分数为12.5%的乙二醇对其改性,在不同的改性温度和搅拌时间条件下,分别测量它的抗拉强度和断裂伸长率(见图3、图4)。

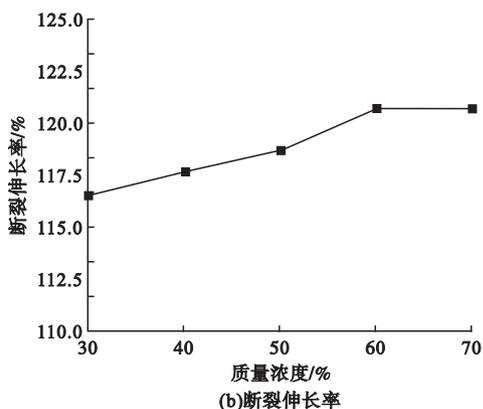
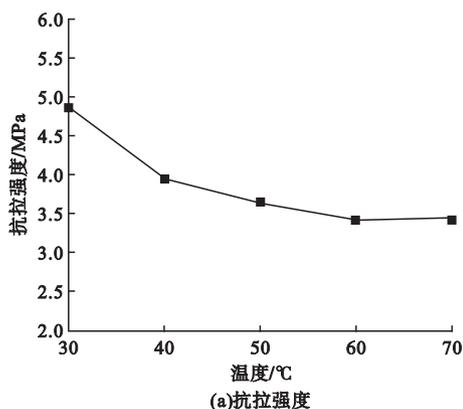


图3 温度对明胶膜性能的影响

Fig. 3 The influence of temperature on the performance of gelatin film

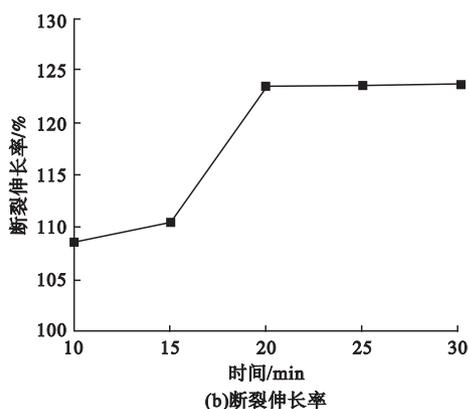
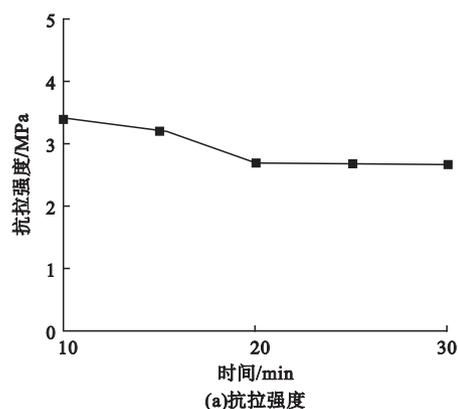


图4 搅拌时间对明胶膜性能的影响

Fig. 4 The effect of mixing time on the performance of gelatin film

由图3可以看出,抗拉强度和改性温度成反比例变化,断裂伸长率和温度成正比例变化。明胶的组成成分不会随温度升高发生变化,但微观结构会发生改变,胶原分子束在温度作用下变粗变短、分子链间氢键被破坏,导致脆性降低,抗拉强度变小,断裂伸

长率增加,当温度升高到60 °C时,这些变化将达到稳定值,因此笔者选择60 °C为改性温度。

由图4可以看出,随着搅拌时间的增加,抗拉强度和断裂伸长率不断变化,都在20 min时达到峰值。随着搅拌时间的持续,

混合物的均匀性越发良好,充分反应之后结果就不会再随着时间的增加而变化了,因此笔者确定搅拌 20 min 即可。

### 3 融冰雪性能测试

#### 3.1 抗凝冰复合材料的融冰雪性能

##### 3.1.1 沥青胶浆试验

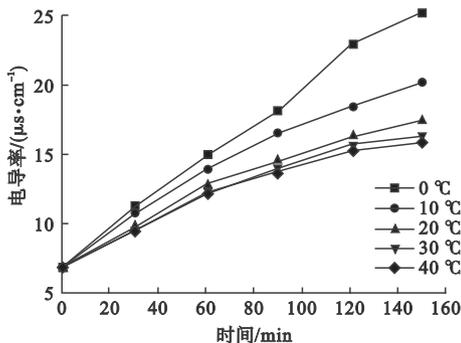
沥青胶浆通常是由沥青和矿粉按质量比 1:1 混合而成。沥青质量不变,将制备的抗凝冰复合材料分别按照矿粉质量的 0、10%、20%、50% 和 100% 进行替代,与 SBS 改性沥青混合均匀,倒在模具中,室温冷却后凝固成厚度约为 3 mm 的沥青胶浆板。提前将一定质量的水冷冻成冰,将冰和沥青胶浆板放在  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温试验箱中,记录冰融化完全的时间,沥青胶浆板的融冰时间如表 5 所示。

表 5 沥青胶浆板的融冰时间

Table 5 Melting time of asphalt mortar board

质量分数/%	时间/min
0	—
10	240
20	200
50	160
100	120

从表 5 可知,抗凝冰复合材料质量分数在 100% 时冰块完全融化所用时间最少,未添加抗凝冰材料的冰块未融化,可见将抗凝冰复合材料添加在沥青里融冰效果很好。



(a) 抗凝冰材料析出速率

##### 3.1.2 马歇尔试块试验

制备车辙板的混合料采用 AC-13 级配,集料规格为:0 ~ 3 mm 的机制砂及 3 ~ 5 mm、5 ~ 10 mm、10 ~ 15 mm 的玄武岩碎石<sup>[14]</sup>。沥青混合料中的矿粉分别用 V-260 和抗凝冰复合材料替代制备车辙板,和同样级配的普通车辙板进行对比。提前在冰箱中将 10 g 水冻成冰块,  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下分别放在不同的车辙板上,记录冰块完全融化的时间,融冰时间如表 6 所示。

表 6 车辙板的融冰时间

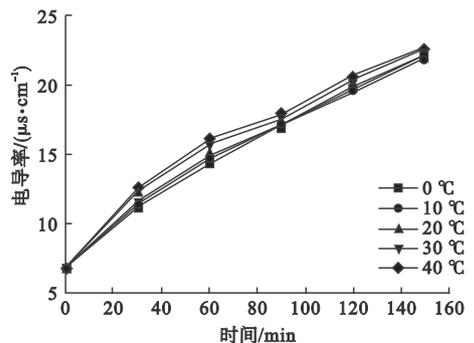
Table 6 Melting time of rut plate

样品	时间/min
不掺抗凝冰材料	—
掺 V-260	221
掺抗凝冰材料	205

从表 6 可知,普通车辙板上冰块几乎不融化,掺抗凝冰复合材料的车辙板上,冰块完全融化的时间稍短于掺 V-260 的车辙板,表明笔者制备的抗凝冰复合材料融冰雪效果达到了国外产品水准。

#### 3.2 温度的影响

分别将制备好的抗凝冰复合材料、V-260 和 SBS 改性沥青等质量混合均匀,制备成沥青胶浆板试件。将试件分别放入等质量的去离子水中,分别在不同温度下测量电导率,表征离子析出速率,判断缓释性能。温度对抗凝冰剂缓释性能的影响如图 5 所示。



(b) V-260 析出速率

图 5 温度对抗凝冰剂缓释性能的影响

Fig. 5 Effect of temperature on slow release performance of anti-freezing agent

由图 5(a) 可看出,随着时间的增加,0℃ 时的电导率远大于同一时间其他温度下的电导率,30℃ 和 40℃ 时,电导率整体差别不大且比 0℃ 时小。笔者制备的抗凝冰复合材料具备温控性能,缓释性能良好。由图 5(b) 可看出,各个温度的电导率差别可忽略不计,可得出温度对 V-260 的缓释性能基本无影响。

## 4 抗凝冰复合材料的路用性能测试

### 4.1 高温稳定性

笔者采用车辙试验<sup>[15]</sup>来评价抗凝冰复合材料的高温稳定性,采用 4.92% 油石比制备标准车辙试件<sup>[16]</sup>,长宽高为 300 mm × 300 mm × 50 mm,按马歇尔击实试验得到的密度 2.412 7/cm<sup>3</sup>、2.473 9/cm<sup>3</sup>,试验温度 60℃、轮压用 0.7 MPa,测试结果如表 7 所示。

表 7 车辙动稳定度测试结果

Table 7 Test results of rutting dynamic stability

检测项目	动稳定度实测值/(次·mm <sup>-1</sup> )
普通试件	4 782
掺 V-260	5 083
掺抗凝冰复合材料	4 690

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2019)中对改性沥青混合料动稳定度的要求最高位为 2800 次/mm。从表 7 可看出,添加抗凝冰复合材料的沥青混合料动稳定度值对比无添加的普通沥青混合料有所下降,下降值不大且满足规范要求。

### 4.2 低温抗裂性

依照现行规范对沥青混凝土进行低温弯曲性能测试。先制备 5 cm 厚的车辙板,再将其切割成长宽高为 30 mm × 35 mm × 200 mm 的棱柱体小梁试件,在规定条件下按照规范对小梁弯曲破坏强度和破坏弯拉应变等指标进行测试,用于评价沥青混合料的低温抗裂性能,用最大弯拉应变表征,低温弯曲测试结果如表 8 所示。

表 8 低温弯曲测试结果

Table 8 Low temperature bending test results

检测项目	弯拉应变/10 <sup>-6</sup>
不掺抗凝冰复合材料	3 925
掺 V-260	3 365
掺抗凝冰复合材料	3 501

现行规范对改性沥青混合料低温弯曲试验破坏应变要求为:冬严寒区的破坏应变大于等于 3 000 × 10<sup>-6</sup>、冬严寒区的破坏应变大于等于 800 × 10<sup>-6</sup>、冬冷区和冬温区的破坏应变大于等于 2 500 × 10<sup>-6</sup>。从表 8 可看出,在相同级配和油石比条件下,对比不添加抗凝冰复合材料的试件,添加 V-260 后和添加抗凝冰复合材料的最大弯拉应变都稍有减小,可以满足冬冷区和冬温区的要求。

### 4.3 水稳定性

试验依照浸水马歇尔试验的试验过程,测试稳定性,用残留稳定度表征,浸水马歇尔试验稳定度值如表 9 所示。

表 9 浸水马歇尔试验结果

Table 9 Immersion Marshall test results

检测项目	浸水时间/h	稳定度/kN
不掺抗凝冰	0.5	18.48
复合材料	48	16.22
掺 V-260	0.5	14.54
	48	11.87
掺抗凝冰	0.5	14.13
复合材料	48	11.94

残留稳定度值是浸水 48 h 后的稳定度与浸水 0.5 h 的稳定度的比。根据表 9 中的数据可以计算出:不掺抗凝冰复合材料的试块的残留稳定度为 87.77%,掺 V-260 的试块的残留稳定度为 81.63%,掺抗凝冰复合材料的试块的残留稳定度为 84.5%。

现行规范中要求改性沥青混合料残留稳定度大于 80%。对比普通沥青混合料和 V-260,笔者制备的抗凝冰复合材料残留稳定度较普通沥青混合料有大幅度下降但优于

V-260,且满足规范要求。

## 5 结论

(1)凹凸棒的比表面积最大,且具有纤维状的微观结构,为吸附载体;融雪盐  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{NaCl}$  的质量比为 4:6 时,融冰速率最快;乙二醇为明胶改性剂,最佳改性条件是质量分数为 12.5% 的改性剂和明胶混合后在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下搅拌 20 min。

(2)用改性明胶包膜制备的抗凝冰复合材料在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  条件下的离子析出量远大于其他温度段,大大减少了春、夏、秋三季盐分的大量流失,提高了抗凝冰路面的使用年限。

(3)添加抗凝冰复合材料制备的沥青混合料可达到国外融雪产品水准,同时可以满足路面使用性能的要求。

## 参考文献

- [1] 蒋军,代舒. 冰雪灾害对道路运输的影响及对策探讨[J]. 道路交通与安全,2008,8:18-22.  
(JIANG Jun, DAI Shu. Influence of ice snow disaster on road transportation and countermeasures [J]. Road traffic and safety, 2008, 8: 18 - 22.)
- [2] 秦昊. 潮湿山区公路沥青路面主动抗凝冰技术研究[D]. 南昌:南昌工程学院,2015.  
(QIN Hao. Research on active anti freezing technology of asphalt pavement in humid mountainous area [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2015.)
- [3] GIULIANI F, POLACCO G, FILIPPI S. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures [J]. University of Pisa, 2012, 30: 174 - 179.
- [4] PHILIP H. Snow and ice control and the transport environment [J]. University of Toronto, 1981, 8: 33 - 38.
- [5] GIULIANI F, MERUSI F, POLACCO G, et al. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures [J]. Construction and building materials, 2012, 30: 174 - 179.
- [6] 崔龙锡. 蓄盐类沥青混合料研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2010.  
(CUI Longxi. Research on salt storage asphalt mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.)
- [7] 吕丽丽,张丽娟,郭云霞. 化学类冻结抑制路面应用综述[J]. 交通标准化(公路工程与运输),2009(206):166-166.

- (Lü Lili, ZHANG Lijuan, GUO Yunxia. Chemical reezing check pavement application summary [J]. Traffic standardization (Highway engineering and transportation), 2009(206):166-166.)
- [8] 孙嵘蓉. 缓释蓄盐沥青混合料的研发及性能的评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
(SUN Rongrong. Development and performance evaluation of slow release salt storage asphalt mixture [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2012.)
- [9] 马广一. 长效抗凝冰剂的制备与应用研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2017.  
(MA Guangyi. Study on preparation and application of long-acting anticoagulant [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [10] 王鹏. 抗凝冰沥青复合材料的研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.  
(WANG Peng. Study on anti freezing asphalt composite [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.)
- [11] 赵苏,杨笑影,马广一,等. 槽水蓄盐型抗凝点沥青路面外加剂的制备[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(5):905-911.  
(ZHAO Su, YANG Xiaoying, MA Guangyi, et al. Study on the preparation of hydrophobic and salt accumulating anticoagulant point additive for asphalt pavement [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(5): 905 - 911.)
- [12] BERGO F, SOBRAL P. Effects of plasticizer concentration and type on moisture content in gelatin films [J]. Food hydrocolloids, 2013, 32: 412 - 415.
- [13] 胡英. 物理化学[M]. 北京:高等教育出版社,2014.  
(HU Ying. Physical chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.)
- [14] 唐磊,时建刚. 抗凝冰沥青混凝土的路用性能及抗冰效果研究[J]. 中外公路,2013, 33: 307 - 309.  
(TANG Lei, SHI Jiangan. Study on road performance and ice resistance effect of anti freezing asphalt concrete [J]. Chinese and foreign highways, 2013, 33: 307 - 309.)
- [15] 周阳阳,张哲安,范容雪,等. 基于汉堡车辙试验的玄武岩纤维沥青混合料高温性能研究[J]. 科学技术创新,2021, 3: 105 - 107.  
(ZHOU Yangyang, ZHANG Zhe'an, FAN Rongxue, et al. Study on high temperature performance of basalt fiber asphalt mixture based on Hamburg rutting test [J]. Science and technology innovation, 2021, 3: 105 - 107.)
- [16] 李洪华. 沥青路面车辙成因分析及车辙试验研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
(LI Honghua. Cause analysis and experimental study on rutting of asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.)  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)