

# 沥青路面灌缝体系的低温失效模式

李 峰,石小培,黄颂昌

(交通运输部公路科学研究院 道路结构与材料交通行业重点实验室,北京 100088)

**摘 要:**为了分析沥青路面灌缝体系的低温失效模式,采用低温拉伸试验、直接拉伸试验和内聚力试验,分别研究了密封胶-沥青混凝土的界面粘结强度、沥青混合料的低温抗裂性能和密封胶的低温抗裂性能。试验结果表明:按临界应力从大到小排序为,沥青混合料的峰值应力(4.02 MPa)、密封胶的峰值应力(1.59 MPa)和界面粘结强度(0.416 MPa);从临界应变来判断,密封胶的临界应变(0.453)远大于沥青混合料的临界应变( $4.296 \times 10^{-3}$ );由此得到了 3 种低温失效模式出现的概率从高到低排序为:粘结失效、侧缝失效、断裂失效,并从材料选择、施工工艺和低温性能 3 个方面提出了防治低温失效的综合技术措施。

**关键词:**道路工程;沥青路面;裂缝;密封胶;灌缝体系;低温失效模式

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Low-temperature failure modes of asphalt pavement seal system

LI Feng, SHI Xiao-pei, HUANG Song-chang

(Key Laboratory of Road Structure & Material, Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to evaluate low temperature failure modes of asphalt pavement seal system, interfacial bond strength of sealant-asphalt mixture, low-temperature cracking resistance of asphalt mixture and low-temperature cracking resistance of sealant were studied by means of low-temperature bond test, direct extension test and cohesion test respectively. The results show that the peak stress of the asphalt mixture (4.02 MPa) is larger than the peak stress of the sealant (1.59 MPa), and the peak stress of the sealant (1.59 MPa) is larger than the interfacial bond strength (0.416 MPa). The critical strain of sealant (0.453) is much larger than the critical strain of the asphalt mixture ( $4.296 \times 10^{-3}$ ). Based on the results, it can be obtained that the probabilities of three kinds of low-temperature failure modes from high to low are adhesive failure, secondary cracking and cohesion failure. In the end, technical measures for the prevention of low-temperature failure from material selection, construction techniques and low temperature performance are proposed. 3 tabs, 5 figs, 15 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; crack; sealant; seal system; low-temperature failure mode

## 0 引言

裂缝是沥青路面的主要病害之一,通常采用密封胶进行开槽灌缝封闭路面裂缝<sup>[1]</sup>。目前,各国已制订了一系列较为完整的密封胶技术标准,如 ASTM 标准<sup>[2-4]</sup>(D5329、D5078、D6690)、欧盟标准(EN 14188)<sup>[5]</sup>、俄罗斯标准(GOST 30740)<sup>[6]</sup>、中国标准(JT/T 740)<sup>[7]</sup>等。在这些标准中,低温性能试验方法都是以 ASTM D5329 的粘结试验(bond test)为基础,只是各国标准中的试验参数和技术要求不尽一致。

此外,国内外研究者还采用了各种新的技术手段以评价密封胶的低温性能。Soliman 等进行了一系列修正的 BBR 和 DTT 试验,并据此提出了密封胶的低温性能评价指标<sup>[8-9]</sup>;Al-Qadi 等在后续研究中采用 prony 级数线粘弹性模型对 BBR 试验结果进行拟合,并进行了三维有限元分析<sup>[10]</sup>;李峰等采用 3 参数固体模型拟合粘结试验的结果,得到了裂缝修补材料的粘弹性特征参数<sup>[11]</sup>;Soliman 等采用玻璃化温度和低温劲度模量指标评价密封胶的低温性能,指出这 2 个指标与路用性能有较好的相关性<sup>[12]</sup>;Fini 等开发了一种鼓膜试验(Pressurized blister test),以测试密封胶与沥青混凝土的界面粘结强度,并提出了界面断裂能量指标(Interfacial fracture energy)<sup>[13]</sup>。Hu 等采用德州罩面试验仪(TxDOT's overlay tester)设计了密封胶低温拉伸疲劳试验,拉伸位移为 2.54 mm,最高循环次数达 2 000 次,一次循环包括 5 s 的加载时间和 5 s 的卸

载时间<sup>[14]</sup>。文献分析表明,上述评价指标在一定程度上提高了密封胶室内试验与低温性能的相关性。

沥青路面裂缝采用开槽灌缝处理后,裂缝槽-密封胶将形成一个有机整体,本文将其定义为灌缝体系(sealant/AC system)。该体系在使用过程中由于受到交通荷载、温度应力和雨水侵蚀等外界因素的影响,必然会产生或多或少的失效。灌缝体系的低温有效性包括了密封胶-沥青混凝土界面粘结强度、密封胶低温抗拉性能以及沥青混凝土低温抗拉性能等 3 方面的因素。ASTM D5329 粘结试验评价密封胶-沥青混凝土的界面粘结强度,而各国研究者主要针对密封胶材料本身的低温性能开展研究,两者均没有充分考虑灌缝体系低温性能的三大影响因素。因此,通过现有评价方法预测灌缝体系的低温性能具有一定的局限性。为此,本文同时进行了低温拉伸试验、沥青混合料直接拉伸试验和密封胶内聚力试验,通过这 3 个试验分析了灌缝体系的低温性能,并提出了防治灌缝体系低温失效的综合技术措施。

## 1 灌缝体系的低温失效模式

本文对中国多条高等级公路沥青路面进行了调查,将中国沥青路面灌缝体系的失效模式归纳为以下几种:粘结失效、断裂失效、卷胎、跑料、啃边、侧缝、砂石嵌挤等。其中,低温失效模式是最常见的失效现象,主要包括粘结失效、断裂失效和侧缝等,如图 1 所示。

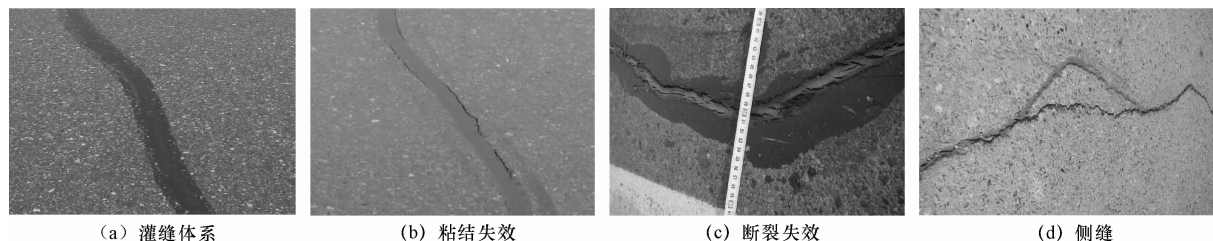


图1 沥青路面灌缝体系的低温失效模式

Fig. 1 Low-temperature failure modes of asphalt pavement seal system

图 1 中,密封胶-沥青混凝土组成的灌缝体系,在低温条件下随着裂缝的扩张,灌缝体系受到拉应力越来越大。当拉应力超过密封胶-沥青混凝土界面粘结强度时,密封胶-沥青混凝土界面出现开裂,即粘结失效,这是中国最常见的低温失效现象;当拉应力超过密封胶的低温抗裂强度(或拉应变超过密封胶的临界应变)时,材料自身出现断裂现象,常见于热沥青、改性沥青、改性乳化沥青等传统封缝材料;当拉应力超过沥青混凝土的低温抗裂强度(或拉应变超过沥青混凝土的

临界应变)时,沥青混凝土路面出现了新的开裂,即侧缝,这是由于路面材料老化导致沥青混凝土低温抗裂能力下降所引起的。

可以看到,由于低温季节沥青路面裂缝扩张导致灌缝体系受到了拉应力作用,当密封胶-沥青混凝土界面粘结强度、密封胶低温抗裂性能或沥青混凝土低温抗裂性能不足时,就有可能出现相应的失效现象。为此,本文对上述 3 方面的性能进行室内试验,以评估沥青路面灌缝体系的低温失效模式,提出有针对性的防治技术措施。

2 界面粘结强度

2.1 试验方案

ASTM D5239 中的粘结试验(Bond test)是国际上评价密封胶低温性能的主要试验方法<sup>[2]</sup>。中国交通行业标准《路面橡胶沥青密封胶》(JT/T 740—2009)中的低温拉伸试验也是引用自 ASTM 标准,该试验可以反映密封胶在低温试验条件下与界面的粘结能力<sup>[7]</sup>。试验按照交通行业的标准进行,试验试件如图 2 所示,密封胶尺寸为 50 mm×50 mm×15 mm,试验加载速率为 0.05 mm/min。

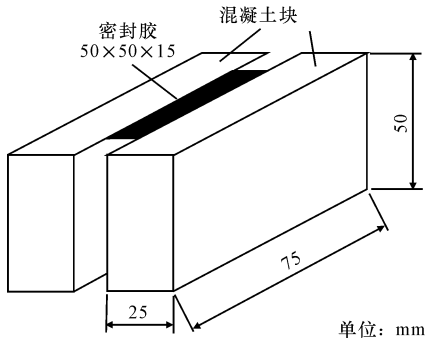


图 2 低温拉伸试验试件

Fig. 2 Low-temperature bond test specimen

界面强度与混凝土的界面特征有密切关系,本文采用文献<sup>[7]</sup>中的低温拉伸试验评价密封胶的“界面粘结强度”,行业标准规定试件由水泥混凝土块和密封胶组成。水泥混凝土块采用石灰石集料,标号为 32.5 的普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.49~0.55,混凝土水泥用量为 $(335\pm30)$  kg/m<sup>3</sup>。将制备的水泥混凝土放入标准混凝土养生室养生 28 d,然后用切割机把水泥混凝土件切割成小条块,水泥混凝土与密封胶的粘结界面为切割面。每个水泥混凝土块为 75 mm×50 mm×25 mm,水泥混凝土块的抗拉强度应大于 3 MPa。

行业标准规定密封胶分为 4 种类型,分别对应适用地区的极端气温为 0℃、-10℃、-20℃、-30℃,不同类型密封胶的试验温度采用对应的各自极端气温。不同的材料在低温拉伸试验过程中表现出了差异极大的力学行为特征,本文选择了 3 种不同性能密封胶(编号:a、b、c,对应的试验温度分别为-20℃、-30℃和-20℃),荷载-位移曲线如图 3 所示。3 种密封胶在各自试验条件下分别表现了玻璃体、玻璃化转换区及橡胶体的状态,即代表了差、中、优的低温性能。分别计算 3 种密封胶的界面粘结强度,结果见表 1。

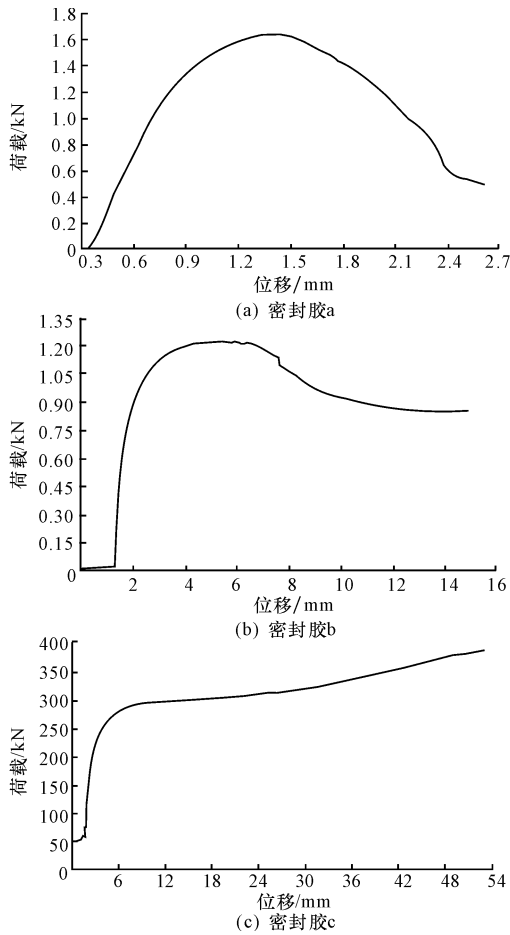


图 3 3 种密封胶的荷载-位移试验曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of three kinds of sealants

表 1 密封胶的界面粘结强度

Tab. 1 Interfacial bond strengths of sealants

密封胶编号	拉力峰值/kN	应力峰值/MPa
密封胶 a	1.63	0.652
密封胶 b	1.10	0.440
密封胶 c	0.39	0.156

2.2 试验结果及分析

图 3(a)是低温性能较差的密封胶在低温拉伸试验中的荷载-位移曲线。图中,位移 0~0.3 mm 阶段为试验夹具的安装引起的试验初始误差;位移 0.3~1.4 mm 阶段,荷载迅速由 0 上升至荷载峰值 1.63 kN,这个阶段接近于虎克弹性体,劲度模量约为 8.89 MPa;位移 1.4 mm 之后阶段,拉伸试件开始出现裂缝并随着位移的增大而增大,荷载随之下降。根据上述分析,该密封胶在最低使用温度时处于玻璃体状态,低温路用性能很差。

图 3(b)是低温性能较好的密封胶在低温拉伸试验中的荷载-位移曲线。图中,位移 0~1.3 mm 阶段为试验夹具的安装引起的试验初始误差;位移 1.3~3.0 mm 阶段,荷载由接近于 0 上升至 1.1 kN,为简

单起见,把这个阶段近似为虎克弹性体,则可以获得材料劲度模量约为 3.88 MPa;位移 3.0~6.5 mm 阶段,应力-应变曲线斜率随着荷载增大稳定且单调地减小,即材料进入塑性变形的强化阶段,直至达到荷载峰值 1.25 kN;位移 6.5 mm 之后阶段,应力-应变曲线斜率转变为负值,材料进入塑性变形的软化阶段。表明这种密封胶在最低使用温度时处于玻璃化转换区,在位移较大时,出现了塑性变形。这种密封胶材料在塑性变形之前的重复加载和卸载路径是不一致的。因此,在试验温度下,这种密封胶材料荷载-位移曲线表现出了粘弹塑性力学特征。

图 3(c)是低温性能优越的密封胶在低温拉伸试验中的荷载-位移曲线。图中,位移 0~2.0 mm 阶段为试验夹具的安装引起的试验初始误差;位移 2.0~6.0 mm 阶段,荷载由 60 N 上升至 280 N,为简单起见,把这个阶段近似为虎克弹性体,则可以获得材料劲度模量约为 0.33 MPa;位移 6.0 mm 之后阶段,试件呈现为橡胶体特征,荷载-位移曲线近似为直线,且斜率很小、位移很大,直至 53.0 mm(荷载约为 390 N)才出现断裂。表明这种密封胶在最低使用温度时处于橡胶体状态,变形能力很强,在其可以适用的最低使用温度区具有良好的低温路用性能。

表 1 中,a、b、c 这 3 种密封胶分别代表了差、中、优的低温性能。其中,性能为优和中的密封胶 c 和 b 在试验中没有发生断裂,因此临界界面强度应大于应力峰值;密封胶 a 在试验过程中出现了界面开裂现象,其临界界面强度等于应力峰值。

### 3 沥青混合料的低温抗裂性能

#### 3.1 试验方案

为了研究沥青混合料的低温抗裂性能,设计了沥青混合料直接拉断试验,拉伸试件如图 4 所示。沥青混合料试件尺寸为 40 mm×40 mm×200 mm,试件两端采用改性丙烯酸酯胶粘剂粘接模具。为了模拟沥青路面裂缝扩张速率,试验加载速率根据交通行业密封胶标准的低温拉伸试验方法,定为 0.05 mm/min。为了模拟沥青路面表面层材料,选择了 3 种级配(AC-13、AC-16 和 SMA-13)和 3 种沥青(70<sup>#</sup>、90<sup>#</sup>和 SBS),成型了 5 种沥青混合料(SMA-13-SBS、AC-13-70<sup>#</sup>、AC-16-70<sup>#</sup>、AC-13-90<sup>#</sup>和 AC-16-90<sup>#</sup>),分别进行 5 个不同温度(25 ℃、0 ℃、-10 ℃、-20 ℃和-30 ℃)的拉伸试验。

#### 3.2 试验结果及分析

拉伸试验结果如表 2 所示。分析表 2 数据,可以得到以下结论。



图 4 沥青混合料直接拉伸试验试件  
Fig. 4 Asphalt mixture direct extension test specimen

(1) 随试验温度降低,应力峰值先增后减,在-20 ℃时出现最大值;临界应变呈一直减少趋势(AC-13-90<sup>#</sup>和 AC-16-90<sup>#</sup>不完全满足)。该温度可定义为临界开裂温度,表中沥青混合料为-20 ℃(AC-13-70<sup>#</sup>为 0 ℃)。

表 2 沥青混合料的低温抗裂性能				
Tab. 2 Low-temperature cracking resistance of asphalt mixtures				
混合料 类型	试验温 度/℃	应力峰 值/MPa	临界位 移/mm	临界应 变/10 <sup>-3</sup>
SMA-13-SBS	25	0.085	6.957	34.79
	0	0.569	2.309	11.55
	-10	2.667	1.429	7.15
	-20	5.226	0.923	4.62
	-30	3.852	0.890	4.45
AC-13-70 <sup>#</sup>	25	0.021	2.341	11.71
	0	1.203	1.481	7.41
	-10	2.638	0.866	4.33
	-20	3.072	0.712	3.56
	-30	2.359	0.525	2.63
AC-16-70 <sup>#</sup>	25	0.067	3.880	19.40
	0	2.044	1.338	6.69
	-10	3.877	0.999	5.00
	-20	4.490	0.919	4.60
	-30	4.230	0.898	4.49
AC-13-90 <sup>#</sup>	25	0.082	1.472	7.36
	0	0.673	0.488	2.44
	-10	1.547	0.736	3.68
	-20	3.822	0.930	4.65
	-30	2.055	0.398	1.99
AC-16-90 <sup>#</sup>	25	0.180	1.338	6.69
	0	1.312	0.823	4.12
	-10	1.960	0.467	2.34
	-20	3.467	0.809	4.05
	-30	3.122	0.696	3.48

(2) 25 ℃时,混合料的应力峰值较小、临界应变较大,并且路面收缩也很小,因此实际上路面出现开裂的概率很低。当路面温度下降时,混合料的应力峰值增大、临界应变减小、路面收缩增大。当路面

温度低于混合料开裂临界温度后,各种不利因素叠加,路面出现开裂的概率将大大增加。

(3) 考虑沥青路面灌缝体系的整体性,当路面温度低于混合料临界开裂温度,如果该路段的路面材料老化严重,就有可能出现侧缝失效。

4 密封胶的内聚力

4.1 试验方案

密封胶抗拉强度采用直线延度试模进行<sup>[15]</sup>,如图 5 所示,制作的试件截面积为 1 cm<sup>2</sup>。试验目的是测得在一定拉伸速率和试验温度下的断裂强度。选择 4 种进口密封胶(501、516、515 和 522)和 2 种中国产密封胶(夏季型 SU、冬季型 WT),这 6 种密封胶均属于低温性能较好的密封胶。低温性能很差的密封胶,在界面强度试验中很容易出现界面开裂,而不可能出现材料自身断裂的情况。因此,本文只选择了低温性能较好的密封胶进行密封胶的内聚力试验。初步试验发现,采用与低温拉伸试验相同的速率(0.05 mm/min)是很难拉断的,最后采用了 5 mm/min 进行试验。515 为低温型密封胶,标准试验温度-20 ℃,当试验温度为-30 ℃,达到机器最大行程(60 mm)仍然不断裂;522 为严寒型密封胶,标准试验温度-30 ℃,当试验温度为-30 ℃,达到机器最大行程(60 mm)仍然不断裂,低温箱最低可控温度为-35 ℃,因此没有继续进行 515 和 522 的拉伸。其余 4 种密封胶,降低试验温度后测得的数据见表 3。

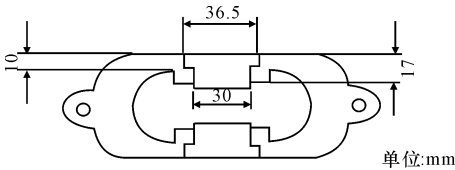


图 5 直线延度试验模型  
Fig. 5 Linear ductility test specimen

表 3 密封胶的低温抗裂性能

Tab. 3 Low-temperature cracking resistance of sealants						
类型	低温拉伸试验 标准温度/℃	材料	试验温 度/℃	应力峰 值/MPa	临界位 移/mm	临界 应变
高温型	0	SU	-10	1.941	10.838	0.361
		SU	-20	1.256	5.000	0.167
		SU	-30	0.937	2.077	0.070
		501	-20	1.511	24.762	0.826
		501	-30	2.267	14.734	0.492
普通型	-10	WT	-20	1.812	3.733	0.125
		WT	-30	1.293	2.474	0.083
		516	-30	2.301	22.120	0.737

4.2 试验结果及分析

由表 3 可以得出:①密封胶在很高的拉伸速率(5 mm/min)和较低的试验温度(低于标准试验温度 10 ℃~20 ℃)下,仍然有较大的变形能力,表明密封胶本身一般不会出现断裂;②现场观测表明,断裂开裂仅出现于沥青、乳化沥青、改性沥青类传统封缝材料,真正意义上的密封胶的低温失效模式一般只包括粘结失效和侧缝。

5 低温失效模式分析及防治

现场调研和大量文献均表明,低温失效是沥青路面灌缝体系最常见的失效现象。低温失效包括粘结失效、断裂失效和侧缝 3 种模式。粘结失效是指拉伸应力超过了密封胶与裂缝壁的粘结强度而导致的失效,断裂失效是指拉伸应力(应变)超过了密封胶抗拉强度(变形能力)而导致其本身出现断裂,侧缝是指拉伸应力(应变)超过了沥青混凝土抗拉强度(变形能力)而导致的裂缝周边出现新的裂缝。粘结失效和断裂失效是密封胶的失效,而侧缝是沥青路面在灌缝处理附近出现的新裂缝,虽然不是密封胶本身的失效,但也同样影响了灌缝的效果。显然,低温失效模式的研究需要结合沥青混合料、密封胶以及两者之间的粘结能力来进行。

表 1 中,3 种密封胶的平均界面粘结强度为 0.416 MPa。表 2 中,取-20 ℃时的试验结果,5 种沥青混合料的平均应力峰值为 4.02 MPa,临界应变为  $4.296 \times 10^{-3}$ 。表 3 中,取低于标准试验温度 20 ℃的数据,平均应力峰值为 1.59 MPa,临界应变为 0.453。

因此,从临界应力来判断,其大小顺序为沥青混合料的峰值应力、密封胶的峰值应力、界面粘结强度;从临界应变来判断,密封胶的临界应变远大于沥青混合料的临界应变。这表明,密封胶-沥青混凝土组成的灌缝体系中,密封胶是低模量高延展性材料,沥青混凝土是高模量低延展性材料。随着路面温度降低,沥青混凝土收缩导致裂缝运动增大,主要由密封胶产生位移变形以保持灌缝体系的完整性。

综合考虑应力应变影响因素,由于密封胶的临界应变非常大,密封胶保持自身完整性的前提下有足够的低温延展性,因此密封胶自身出现断裂的可能性很低,断裂失效是出现概率最低的一种低温失效模式;沥青混合料在低温状态下是脆性材料,尽管峰值应力较大,但临界应变很小,抵御变形的能力较弱,因此侧缝失效是出现概率相对较高的一种低温失效模式;界面粘结强度是灌缝体系的最薄弱环节,因此粘结失效是出现概率最高的一种低温失效模

式。3种低温失效模式出现概率从小到大的排序为:断裂失效、侧缝、粘结失效。

防止低温失效的综合措施建议如下。

(1)断裂失效。防止断裂失效的关键在于材料的选择,断裂失效一般只出现在热沥青、改性沥青、改性乳化沥青等传统封缝材料,在裂缝处理中,这些材料应该被淘汰。改用专用的密封胶,即可有效防止出现断裂失效现象。

(2)侧缝失效。防止侧缝失效的关键在于针对路面老化程度选择适当的施工工艺,对于路面老化程度不严重的路段,可采取开槽灌缝方式;而对于路面老化程度较为严重的路段,宜采取填缝的方式处理裂缝。合理的施工工艺可有效防止侧缝失效现象的出现。

(3)粘结失效。防止粘结失效的关键在于密封胶的低温性能,密封胶的低温性能是指在使用地区的最低路面温度条件下,保证界面粘结良好的前提下,密封胶的最大延伸率应大于使用地区沥青路面裂缝的实际最大运动量。在使用地区的最低路面温度时,材料应处于橡胶体或玻璃化转换区,不得处于玻璃体状态,这样才能保证材料具有良好的低温性能,可以有效防止粘结失效现象的出现。

## 6 结 语

(1)低温失效是中国沥青路面灌缝体系的主要失效模式,严重影响了裂缝修补工程的质量,研究低温失效模式有助于促进中国灌缝技术的发展。

(2)室内试验研究表明,3种低温失效模式出现的概率从小到大的排序为:断裂失效、侧缝失效、粘结失效。防治沥青路面灌缝体系低温失效,需要从材料选择、施工工艺和低温性能等3个方面进行综合考虑。

(3)采用合理的施工工艺和低温性能良好的密封胶材料,保证密封胶-沥青混凝土的界面粘结强度,可以有效减少低温失效的出现。

## 参考文献:

## References:

- [1] 刘桦,尹如军,王国安.公路裂缝处理技术及设备[J].筑路机械与施工机械化,2004,21(3):25-27,31.  
LIU Hua, YIN Ru-jun, WANG Guo-an. Highway crack treatment technique and equipment[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2004, 21(3):25-27,31. (in Chinese)
- [2] ASTM D5329—09, Standard test methods for sealants and fillers, hot-applied, for joints and cracks in asphaltic and portland cement concrete pavements[S].
- [3] ASTM D5078—95, Standard specification for crack

filler, hot-applied, for asphalt concrete and portland cement concrete pavements[S].

- [4] ASTM D6690—06a, Standard specification for joint and crack sealants, hot-applied, for concrete and asphalt pavements[S].
- [5] EN 14188—2004, Joint fillers and sealants[S].
- [6] GOST 30740—2000, Sealing materials used in joints of aerodrome coat[S].
- [7] JT/T 740—2009, 路面橡胶沥青灌缝胶[S].  
JT/T 740—2009, Rubber asphalt sealant and filler of pavement[S]. (in Chinese)
- [8] Soliman H, Shalaby A, Kavanagh L. Performance evaluation of joint and crack sealants in cold climates using DSR and BBR tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 20(7):470-477.
- [9] AL-Qadi I L, Yang S H, Dessouky S, et al. Low temperature characterization of hot poured crack sealant using modified SHRP direct tensile tester [C]//Transportation Research Board. 86st Annual Meeting Compendium. Washington DC: National Research Council, 2007:2509-2527.
- [10] Al-Qadi I L, Dessouky S, Yang S H. Linear viscoelastic modeling for hot-poured crack sealants at low temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(10):996-1004.
- [11] 李峰,黄頌昌.沥青路面裂缝密封胶的低温应力松弛评价指标[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(8):1185-1188.  
LI Feng, HUANG Song-chang. Low-temperature stress relaxation evaluation index of asphalt pavement crack sealants [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(8):1185-1188. (in Chinese)
- [12] Soliman H, Shalaby A. Characterizing the low-temperature performance of hot-pour bituminous sealants using glass transition temperature and dynamic stiffness modulus[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(11):688-693.
- [13] Fini H E, Al-Qadi I L. Development of a pressurized blister test for interface characterization of aggregate highly polymerized bituminous materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(5):656-663.
- [14] Hu X D, Zhou F J, Hu S, et al. A new laboratory evaluation method for the adhesive performance of crack sealants[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011, 39(2):1-7.
- [15] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].  
JTG E20—2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixture for highway engineering[S]. (in Chinese)