

文章编号:1671-8879(2019)06-0031-08

# 高寒地区成品橡胶沥青混合料的 低温性能及评价方法

刘占良<sup>1,2</sup>, 张 琛<sup>3</sup>, 许金良<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 石家庄铁路职业技术学院 铁道工程系, 河北 石家庄 050041; 3. 西安航空学院 能源与建筑学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:**为了研究高寒地区 RA-1 型成品橡胶沥青混合料的低温特性,以川藏南线四川段为依托工程,从沥青混合料的强度、老化及冻融循环效应等方面入手,通过室内小梁弯曲试验、劈裂试验、老化试验及冻融循环试验对其低温性能进行分析,并提出合理的低温性能评价标准。研究结果表明:在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变的增幅较大,约为 34.4%;当加载速率为 2 mm/min 时,采用劈裂试验更能体现出 RA-1 型橡胶沥青混合料在四川高寒地区的低温破坏过程;随着温度的升高,短期老化后,其最大弯拉应变和劈裂强度均大于长期老化后的相应值,在经历约 20 次冻融循环作用后,RA-1 型橡胶沥青混合料的劈裂抗拉强度衰减趋势逐渐趋于平缓;与初始未冻融状态相比,当经历 40 次冻融循环后,RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变衰减了 13.9%;劈裂试验适用于研究区域新拌 RA-1 型橡胶沥青混合料的低温性能评价,其加载速率适宜调整为 2 mm/min;低温弯曲试验适用于研究区域 RA-1 型橡胶沥青混合料经长期老化后的低温性能,其加载速率适宜调整为 15 mm/min;冻融劈裂试验适用于评价研究区域经冻融作用的 RA-1 型橡胶沥青混合料低温性能,其加载速率适宜调整为 2 mm/min。RA-1 型成品橡胶沥青混合料适用于四川高寒地区沥青路面的铺筑。

**关键词:**道路工程;高寒地区;成品橡胶沥青混合料;低温性能;评价方法

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.06.004

## Low-temperature performance and it's evaluation methods of finished product rubber asphalt mixture in alpine region

LIU Zhan-liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Chen<sup>3</sup>, XU Jin-liang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Railway Engineering, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, Hebei, China; 3. School of Energy and Architecture, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the evaluation methods and low-temperature performance of a RA-1 finished product rubber asphalt mixture in an alpine region, a test along the south section of the Sichuan-Tibet Highway was selected as the support construction. The strength, aging and freeze-thaw

收稿日期:2019-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51578075);陕西省教育厅科研计划项目(19JK0431)

作者简介:刘占良(1975-),男,河北定州人,石家庄铁路职业技术学院讲师,长安大学工学博士研究生,E-mail:542389337@qq.com。

cycle effect of the asphalt mixture through laboratory tests such as the beam bending, splitting, aging, and freeze-thaw cycle tests were used to analyze the low temperature performance of a the RA-1 rubber asphalt mixture and provide a reasonable performance evaluation standard at low temperature. The results show that when the temperature is from  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the maximum bending strain of the RA-1 rubber asphalt mixture show a greater increase of approximately 34.4%. When the loading rate is 2 mm/min, the splitting test can reflect the damage process of the mixture at low temperature. With an increase in temperature, the maximum bending strain and cleavage strength of the mixture following short-term aging are greater than that after long-term aging. After approximately 20 freeze-thaw cycles, the splitting tensile strength of the mixture attenuation trend gradually stabilizes. After 40 freeze-thaw cycles, the maximum bending strain of the mixture decreases by 13.9%, compared to that of the initial state. A splitting test is suitable to evaluate low temperature performance for the new mixture, and the loading rate is appropriate for an adjustment of 2 mm/min. A low-temperature bending test is suitable to evaluate low-temperature performance of the mixture after long-term aging, and the loading rate is appropriate for an adjustment of 15 mm/min. A freeze-thaw splitting test is suitable to evaluate the low-temperature performance for the mixture with freeze-thaw action and the loading rate is appropriate for an adjustment of 2 mm/min. The RA-1 finished rubber asphalt mixture is suitable for road surfaces in the Sichuan alpine region. 4 tabs, 8 figs, 24 refs.

**Key words:** road engineering; alpine region; finished product rubber asphalt mixture; low-temperature performance; evaluation method

## 0 引言

四川高寒地区具有温差大和冻融循环剧烈的特点,该区域沥青混合料的设计方法与沥青路面的性能评价体系均与热带不同<sup>[1]</sup>。低温裂缝是该区域沥青路面的典型病害,这主要是因为大温差和频繁的冻融循环作用对该地区沥青混合料的低温抗裂性能造成了不利影响<sup>[2-3]</sup>。因此,进行高寒地区沥青混合料的低温性能评价方法研究尤为重要。

当前国内外针对沥青路面低温性能的研究主要集中在沥青混合料的室内性能表征,材料不同性能之间的交互作用以及路面结构与材料的破坏行为等方面。黄明等通过室内四点弯曲疲劳试验,对橡胶沥青混合料疲劳性能自愈能力的主要影响因素进行了系统研究<sup>[4]</sup>。田宇翔等通过室内性能试验发现,水泥用量与养生龄期对混合料劈裂强度和弯拉强度均有明显的交互作用<sup>[5]</sup>。罗要飞等通过模拟混合料所处的大温差、频繁冻融、低温等环境特征,定量表征了频繁冻融循环对温拌沥青混合料性能的影响<sup>[6]</sup>。Moon 等基于低温弯曲蠕变试验和流变学模型,对经长期老化和短期老化作用的沥青混合料蠕变劲度进行了研究,给出沥青混合料弯曲蠕变劲度的范围<sup>[7]</sup>。Kataware 等分别采用布氏旋转黏度试

验、多重应力蠕变恢复(multiple stress creep recovery, MSCR)试验和线性振幅扫描(LAS)试验,对掺加 3 种不同温拌剂的胶粉改性沥青进行动态力学分析;研究表明温拌剂的添加可以降低胶粉改性沥青的黏度,选择温拌剂类型时不仅要依据黏度准则,还应考虑流变学性能参数<sup>[8]</sup>。Shatanawi 等通过动态剪切流变试验(DSR)和凝胶渗透色谱(GPC),对常规橡胶沥青和掺加糠醛抽出油的橡胶沥青流变性能进行评价;研究表明,糠醛抽出油的活化特性降低了小分子分布的比例,显著提高了橡胶沥青的存储稳定性<sup>[9]</sup>。Aliha 等对沥青混合料拉伸裂缝的统计特征进行了预测,发现平均断裂韧度会随着沥青混合料空隙率的增大而减小<sup>[10]</sup>。

综上可知,目前针对沥青混合料性能的研究大多未能对其应用区域的实际环境特征进行充分考虑,且缺乏具体的性能评价体系和试验标准,导致结构与材料设计不能满足当地沥青路面的实际使用需求,从而造成了大量路面病害<sup>[11-12]</sup>。基于此,本文以川藏南线四川段为依托工程,基于室内试验和现场实践经验,进行小梁弯曲试验、劈裂试验、老化试验以及冻融循环试验,并结合数理统计方法对四川高寒地区 RA-1 型成品橡胶沥青混合料的低温性能进行分析,以期提出合理的低温性能评价标准。

# 1 原材料的技术性能

本文依托工程为川藏南线四川段沥青路面工程,位于四川省甘孜州,平均海拔 3 000 m 以上,年平均气温在 0 ℃ 以下。该区域公路建设的难度较大,沥青路面的病害主要是低温裂缝,且病害处治也较为困难<sup>[13]</sup>。

## 1.1 成品橡胶沥青

本文中的 RA-1 型成品橡胶沥青为河北新材料公司采用湿法工艺生产,其胶粉掺量(质量分数,下同)约为 16%,胶粉粒径为 0.425 mm,基质沥青为壳牌 110# 沥青,其基本指标如表 1 所示,各指标技术要求与测试参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。

表 1 橡胶沥青的基本指标  
Tab. 1 Basic indexes of rubber asphalt

指标	技术要求	试验结果
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/0.1 mm	35~65	52
软化点/℃	≥60	78
延度(5 ℃,5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		23
25 ℃弹性恢复/%	≥75	107
135 ℃运动黏度/(Pa·s)		12.3
177 ℃运动黏度/(Pa·s)	1.0~4.0	2.26

## 1.2 集料

本文采用的集料来源于依托工程沿线自产的石灰岩,其各项指标见表 2。

表 3 AC16C 累积筛孔通过率  
Tab. 3 Cumulative sieve pass rates of AC16C

级配类型	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC16C	100	96	89	71	50	31	23	16	13	8	6

# 2 低温抗裂性能

## 2.1 低温小梁弯曲试验

《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中规定小梁弯曲试验的加载速率为 50 mm/min,但其无法体现高寒地区沥青材料重要的应力松懈特性,本文中的小梁弯曲试验加载速率调整为 15 mm/min<sup>[17]</sup>。试验采用由车辙板切割而成的小梁试件,在 MTS 万能试验机上进行,如图 1 所示。

试件尺寸为 30 mm(长)×35 mm(宽)×250 mm(高),采用的 4 个试验温度分别为 0 ℃,−5 ℃,−10 ℃和−15 ℃。以最大弯拉应变为控制指标来

表 2 集料的技术指标

Tab. 2 Technical indexes of Aggregate

指标		指标要求	测试结果
粗集料	表观相对密度	≥2.6	2.9
	吸水率/%	≤2.0	1.3
	坚固性/%	≤12	10.6
	针片状颗粒含量/%	≤15	12.6
	水洗法(小于 0.075 mm 集料)含量/%	≤1	0.71
细集料	表观相对密度	≥2.5	3.4
	坚固性(大于 0.3 mm)/%	≤12	8.7
	含泥量(小于 0.075 mm 集料的含量)/%	≤3	2.57
	砂当量/%	≥60	80.3

## 1.3 配合比

基于国内外高寒地区沥青路面的文献调研结果,本文以沥青路面的低温抗裂性能和抗冻性能为控制指标,进行四川高寒地区沥青混合料的配合比设计<sup>[14-15]</sup>。采用的级配为 AC16C,试件空隙率为 3.6%,矿料级配如表 3 所示。

根据现场经验,内陆城市该种橡胶沥青混合料的最佳油石比一般为 5.5%。本文依托工程位于高寒区,低温、强辐射及频繁冻融的环境特点使该区沥青混合料的老化速度较快。本文通过适当增加沥青用量以增大混合料蠕变速率,提升沥青混合料的低温抗裂和抗老化性能<sup>[16]</sup>。因此,最终确定本地区常规沥青混合料和橡胶沥青混合料的最佳油石比为 5.8%。

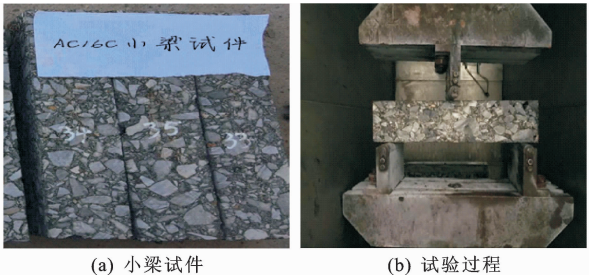


图 1 低温小梁弯曲试验

Fig. 1 Low temperature small beam bending test

评价 RA-1 型橡胶沥青混合料的低温变形能力,以壳牌 110# 基质沥青制备的传统沥青混合料作为对比试验,其配合比参数与 RA-1 型橡胶沥青混合料相同。在不同试验温度下,传统沥青混合料和 RA-1

型橡胶沥青混合料最大弯拉应变随温度的变化如图 2 所示。

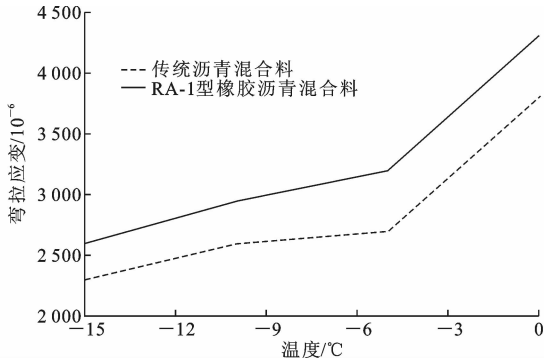


图 2 最大弯拉应变随温度变化

Fig. 2 Maximum bending tensile strains varies with temperatures

由图 2 可知,当试验温度从  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  增大到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的过程中,RA-1 型橡胶沥青和传统沥青混合料的最大弯拉应变均随之增大。在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,传统沥青混合料、RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变增幅分别为 17.4%、23.1%。当温度在  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,传统沥青混合料、RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变增幅分别为 40.7%、34.4%。由此可见,温度在  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,传统沥青混合料和 RA-1 型橡胶沥青混合料的小梁弯拉应变随温度的增长幅度比在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时大。这是因为沥青或沥青混合料为黏弹性材料,低温时呈现出弹性行为,随温度升高逐渐呈现黏性行为,进而发生脆性破坏,材料弯拉应变值急剧上升<sup>[18]</sup>。

## 2.2 低温劈裂试验

同样采用 AC16C 级配的 RA-1 型橡胶沥青混合料进行不同试验温度 ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和不同加载速率  $V_f$  (0.5、1、2、10 mm/min) 条件下的间接拉伸试验。本文以劈裂强度为控制指标来表征沥青混合料的低温抗变形能力,其中劈裂强度与低温抗变形能力为正相关关系,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,加载速率与劈裂强度成正相关关系。当加载速率为 0.5、1 mm/min 时,混合料劈裂强度均随温度的增加而呈下降趋势。当加载速率调整为 2 mm/min 时,混合料劈裂强度在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度区间内出现了一个峰值,这主要是因为该沥青混合料在加载速率为 2 mm/min 时的脆化温度点约为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;当环境温度高于此脆化温度点时,混合料劈裂强度值会随温度的增加而降低,当温度低于该脆化温度点时,混合料劈裂强度值则无明显变化<sup>[19]</sup>。由此可见,当劈裂试验的加载速率为

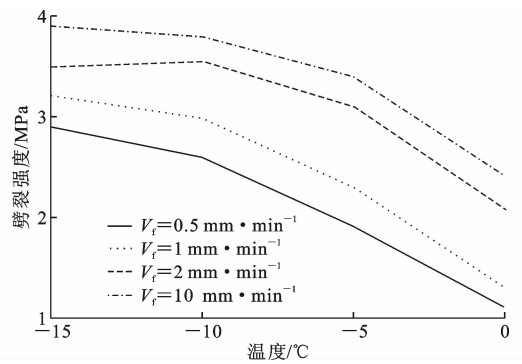


图 3 劈裂强度随温度的变化

Fig. 3 Splitting strengths varies with temperatures

2 mm/min 时,可以显著体现出 RA-1 型橡胶沥青混合料的脆化破坏行为。

采用变异系数对低温弯曲试验和劈裂试验进行评价,以获取更合理的沥青混合料低温抗裂性能评价指标及适用条件<sup>[20]</sup>。本文以最大弯拉应变与劈裂强度为评价指标,不同温度条件下试验结果的变异系数如图 4 所示。

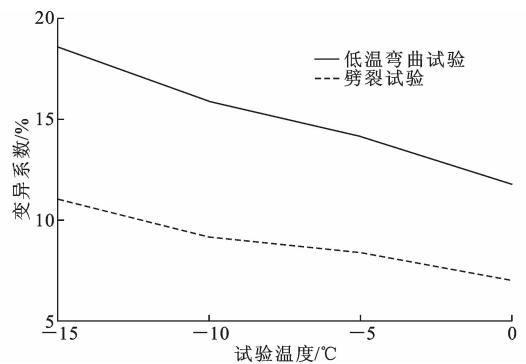


图 4 2 种试验的变异系数对比

Fig. 4 Comparisons of coefficients of variation for two tests

从图 4 可以看出,低温弯曲试验结果的变异性要大于劈裂试验,且随着试验温度的升高,2 种试验的变异系数都呈减小趋势。这主要是因为研究区域环境恶劣,在试验和施工过程中都存在较大的变异性。因此,将劈裂强度用于评价四川高寒地区沥青混合料的低温抗裂性更合理。

## 3 老化对沥青混合料低温抗裂性能的影响

高寒区日照时间长,紫外线强烈,对于沥青混合料的老化行为应当重点考虑<sup>[21-23]</sup>。试验前,在  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下经 6 h 强行通风加热对沥青混合料进行短期老化后,对小梁试件和标准马歇尔试件进行低温弯曲试验和劈裂试验。长期老化则还需将短期老化后的小梁试件和马歇尔试件放入  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

烘箱中,经 120 h 的加热进行老化。采用表 4 中的试验参数,进行不同老化状态下的低温弯曲试验和劈裂试验。试验结果如图 5 所示。

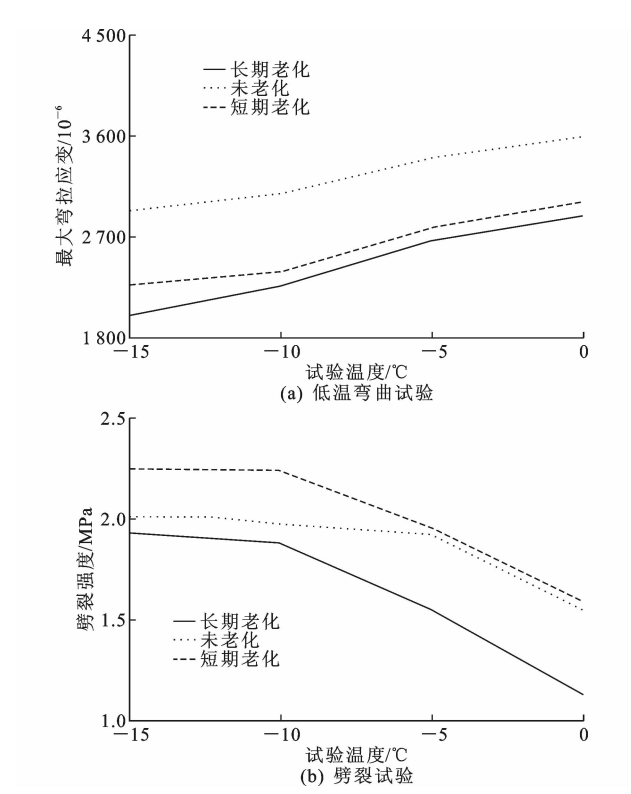


图 5 不同老化状态下的沥青混合料低温抗裂试验  
Fig. 5 Low temperature crack resistance tests of asphalt mixture under different aging conditions

由图 5(a)可知,在不同的老化状态下,随着温度的增加,橡胶沥青混合料的最大弯拉应变也逐渐增大。由图 5(b)可知,对于混合料的劈裂强度指标,经短期老化后的变化规律与长期老化相似,但短期老化后的沥青混合料劈裂强度值大于长期老化。同样采用变异系数对 2 种试验进行评价,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,2 种试验的变异系数均与温度成负相关关系,但低温弯曲试验的变异系数相对较小。此外,当采用 2 种试验评价沥青混合料的长期老化性能时,其变异系数要小于评价短期老化性能时。在高寒地区低压强辐射的条件下,沥青混合料老化的速率与程度要高于内陆城市,老化形式主要表现为长期老化,而短期老化仅为其中一个必经阶段,且低温条件下( $0^{\circ}\text{C}$  以下)沥青内部分子的活性较低,从而造成高寒地区长期老化和短期老化状态时沥青混合料低温性能的差异相对较小。

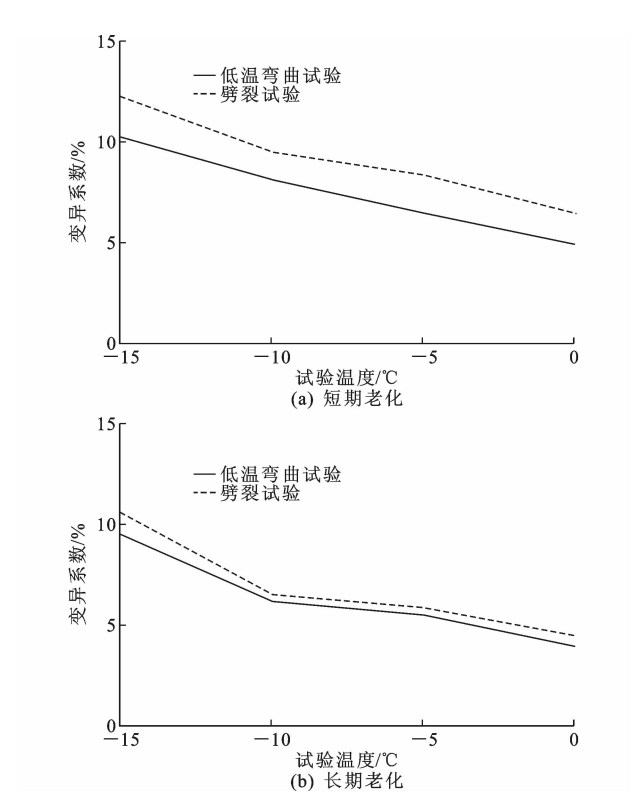


图 6 2 种试验不同老化状态的变异系数对比  
Fig. 6 Comparisons of coefficients of variation between two tests under different aging conditions

#### 4 冻融循环对沥青混合料低温抗裂性能的影响

本文利用冷冻箱与恒温水浴模拟高寒地区的冻融作用。将新拌沥青混合料成型车辙板,切割成  $30\text{ mm}(\text{长})\times 35\text{ mm}(\text{宽})\times 250\text{ mm}(\text{高})$  的小梁。

利用 UTM-30 液压伺服多功能材料试验机进行试验,试验温度为  $-10^{\circ}\text{C}$ ,冻融循环次数分别为 0、5、10、15、20、25、30、35、40。分别进行低温弯曲试验和间接拉伸试验,并采用 110<sup>#</sup> 普通沥青混合料进行对比试验,结果如图 7 所示。

由图 7(a)可知,随着冻融循环次数的增大,2 种沥青混合料的劈裂强度均呈下降趋势,RA-1 型橡胶沥青混合料的低温性能更好。沥青混合料的劈裂强度在冻融初期(0~20 次冻融循环)呈明显下降趋势,而后的衰减则趋于平缓。由图 7(b)可知,随着冻融循环次数的增加,2 种沥青混合料的最大弯拉应变与冻融循环次数成负相关关系,且 RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变更大。RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变在冻融初期(0~20 次冻融循环)呈明显下降趋势,当冻融循环次数达到 20 左右时,其最大弯拉应变衰减趋

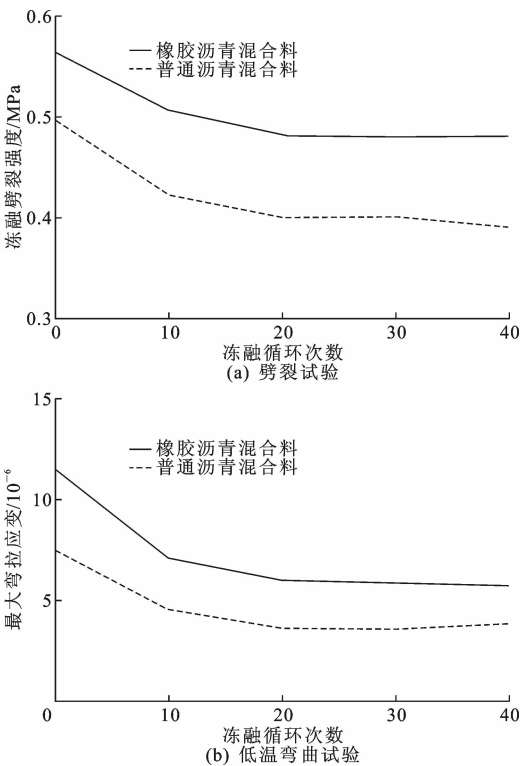


图7 不同冻融循环次数下的低温弯曲试验和劈裂试验  
Fig. 7 Low temperature bending test and splitting test under different freeze-thaw times

于稳定。与初始未冻融状态相比,当经历 40 次冻融循环后,RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变衰减了 13.9%。这是因为沥青混合料在高寒地区经饱水冻融循环作用下,水分会通过空隙进入结构内部结冰,从而使混合料内部产生较大的膨胀作用力。随着冻融循环次数的增加,混合料内

表 4 低温抗裂性能的评价方法和适用条件

适用条件	评价方法					
	劈裂试验(未老化)		低温弯曲试验(老化后)		劈裂试验(冻融状态)	
	试验温度/℃	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	试验温度/℃	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	试验温度/℃	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )
强辐射易老化区域	(-5,0]	2	(-5,0]	15	-10	2
冻融循环和强辐射区域	[-5,-15]		[-5,-15]			

6 结 语

(1)在四川高寒地区,RA-1 型橡胶沥青混合料相较于传统沥青混合料的低温抗裂性能更好。在-5℃~0℃时,RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变表现出了较大的增幅,约为 34.4%。此时的橡胶沥青混合料主要表现为弹性状态,处于柔性损坏状态。当加载速率为 2 mm/min 时,采用劈裂试

部孔隙不断变大,在动水压力作用下水分逐渐渗入沥青膜中,降低了沥青与集料的界面黏结力,进而降低了沥青混合料的劈裂抗拉强度和弯拉应变,最终形成路面裂缝<sup>[24]</sup>。采用变异系数对 2 种试验进行评价,结果如图 8 所示。

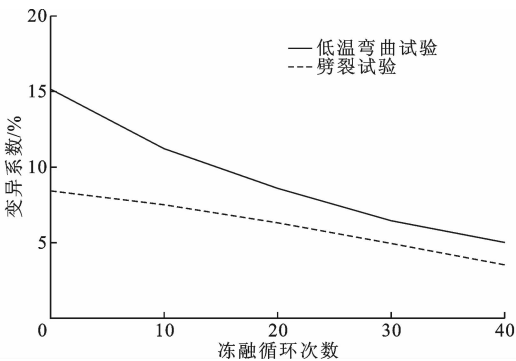


图8 2种试验不同冻融次数条件下的变异系数对比  
Fig. 8 Comparisons of coefficients of variation between two tests under different freeze-thaw numbers

由图 8 可知,2 种试验的变异系数均随冻融次数的增加而减小,但劈裂试验的变异系数更小。由此可见,在四川高寒地区的冻融环境下,采用劈裂试验评价沥青混合料的低温性能更合理。

5 高寒地区低温抗裂性能的评价方法及其适用条件

综合上述不同试验条件下的分析结果,提出四川高寒地区 RA-1 型橡胶沥青混合料低温抗裂性能的评价方法和适用条件,从而为该区路面设计与结构优化提供参考,如表 4 所示。

验表征 RA-1 型橡胶沥青混合料的低温破坏过程更为合理。

(2)随着温度的升高,RA-1 型橡胶沥青混合料短期老化后的最大弯拉应变和劈裂强度均大于其长期老化后的相应值,且 RA-1 型橡胶沥青混合料短期老化后和长期老化后的劈裂强度具有相似的变化规律。

(3)在冻融初期(0~20 次冻融),随着冻融次数

的增加,RA-1 型橡胶沥青混合料的劈裂抗拉强度和最大弯拉应变均呈明显下降趋势。当经历 20 次冻融循环后,其劈裂抗拉强度的下降则趋于平缓。当经历 40 次冻融循环后,RA-1 型橡胶沥青混合料的最大弯拉应变与初始未冻融状态时相比衰减了 13.9%。

(4)劈裂试验适用于研究区域新拌 RA-1 型橡胶沥青混合料的低温性能评价,加载速率宜调整为 2 mm/min;低温弯曲试验适用于其经长期老化后的低温性能研究,加载速率宜调整为 15 mm/min;冻融劈裂试验适用于评价其经冻融作用后的低温性能,加载速率宜调整为 2 mm/min。

(5)下一步,应对 RA-1 型成品橡胶沥青混合料在其他高寒地区的适用性进行探讨。

## 参考文献:

## References:

[1] 司伟,马 磊,汪海年,等. 沥青混合料在冻融循环作用下的弯拉特性[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(4):885-890.  
SI Wei, MA Biao, WANG Hai-nian, et al. Flexural tensile characteristics of asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(4): 885-890.

[2] 周雪艳,马 磊,田宇翔,等. 青藏高寒地区沥青混合料低温抗裂性能的灰关联分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2016,37(5):597-603.  
ZHOU Xue-yan, MA Biao, TIAN Yu-xiang, et al. Grey relational degree theory on low temperature anti-cracking performance of asphalt mixture under freeze-thaw cycles in cold plateau regions[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2016, 37(5): 597-603.

[3] 邱延峻,艾长发,黄 兵,等. 高寒地区沥青路面结构适应性[J]. 西南交通大学学报,2009,44(2):147-154.  
QIU Yan-jun, AI Chang-fa, HUANG Bing, et al. Field investigation and structural integrity of asphalt pavement in cold regions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 147-154.

[4] 黄 明,汪 翔,黄卫东. 橡胶沥青混合料疲劳性能的自愈合影响因素分析[J]. 中国公路学报,2013,26(4):16-22,35.  
HUANG Ming, WANG Xiang, HUANG Wei-dong. Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture [J].

China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4):16-22,35.

[5] 田宇翔,马 磊,王大龙,等. 高寒地区水泥稳定碎石弯拉特性研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(9):2569-2573.  
TIAN Yu-xiang, MA Biao, WANG Da-long, et al. Flexural tensile characteristics of cement-stabilized macadam in cold plateau regions[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2569-2573.

[6] 罗要飞,张争奇,张 苛. 高原寒冷地区温拌沥青混合料水稳性能分析[J]. 冰川冻土,2016,38(6):1592-1597.  
LUO Yao-fei, ZHANG Zheng-qi, ZHANG Ke. Study of the water stability of warm mix asphalt mixture in cold plateaus[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1592-1597.

[7] MOON K H, FALCHETTO A C, MARASTEANU M O. Investigation of limiting criteria for low temperature cracking of asphalt mixture[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1): 172-181.

[8] KATAWARE A V, SINGH D. Dynamic mechanical analysis of crumb rubber modified asphalt binders containing warm mix additives[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 135: 1-11.

[9] SHATANAWI K M, BIRO S, GEIGER A, et al. Effects of furfural activated crumb rubber on the properties of rubberized asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 96-103.

[10] ALIHA M R M, FATTAHI-AMIRDEHI H R. Fracture toughness prediction using Weibull statistical method for asphalt mixtures containing different air void contents[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40(1): 55-68.

[11] 李金平,章金钊,盛 煜. 冻土区水泥和沥青路面病害分布规律探讨[J]. 公路交通科技,2010,27(7):18-24.  
LI Jin-ping, ZHANG Jin-zhao, SHENG Yu. Study on distribution patterns of distresses in cement concrete pavement and asphalt pavement in permafrost regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 18-24.

[12] 汪水银,穆 柯,董元宏,等. 沥青混合料低温压实特性及其与多年冻土区路面病害关系细观建模[J]. 中国公路学报,2015,28(12):49-56.  
WANG Shui-yin, MU Ke, DONG Yuan-hong, et al. Microscopic modeling on relationship between low temperature compacting property of asphalt mixture

- and pavement diseases in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12):49-56.
- [13] 李 铭, 支喜兰, 柳 波. 川藏公路南线西藏境内病害类型分析与防治措施研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1):185-190.  
LI Ming, ZHI Xi-lan, LIU Bo. Type analysis and prevention-control measures of disease in south line of Sichuan-Tibet Highway in territory Tibet[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1):185-190.
- [14] 谭忆秋, 符永康, 纪 伦, 等. 橡胶沥青低温评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3):66-70.  
TAN Yi-qiu, FU Yong-kang, JI Lun, et al. Low-temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):66-70.
- [15] ZHANG C, WANG H, YOU Z, et al. Sensitivity analysis of longitudinal cracking on asphalt pavement using MEPDG in permafrost region[J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2015, 2(1):40-47.
- [16] LI X, MARASTEANU M O, KVASNAK A, et al. Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(22):145-152.
- [17] 汪双杰, 台电仓. 改性沥青结合料低温性能评价指标[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(3):25-30.  
WANG Shuang-jie, TAI Dian-cang. Evaluating indices for low-temperature performance of SBR modified asphalt binder[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(3):25-30.
- [18] 刘 栋, 李立寒. 沥青混合料抗裂性能评价指标的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4):503-507.  
LIU Dong, LI Li-han. Research on evaluating index of anti cracking performance of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4):503-507.
- [19] TAN Y Q, ZHANG L, JI L. Analysis of the evaluation indices from TSRST[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(10):1310-1316.
- [20] 徐志荣, 常艳婷, 陈忠达, 等. 沥青混合料动态模量试验标准研究[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3):1-8.  
XU Zhi-rong, CHANG Yan-ting, CHEN Zhong-da, et al. Study on test standard of asphalt mixture dynamic modulus[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3):1-8.
- [21] 陈华鑫, 姜 艺, 李 硕, 等. 沥青混合料老化后的低温性能[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(1):1-5.  
CHEN Hua-xin, JIANG Yi, LI Shuo, et al. Low-temperature properties of aged asphalt mixtures[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1):1-5.
- [22] 李祖仲, 陈拴发, 廖卫东, 等. 改性沥青应力吸收层混合料低温抗裂性能评价[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4):29-35.  
LI Zu-zhong, CHEN Shuan-fa, LIAO Wei-dong, et al. Evaluation of anti-cracking performance of modified HMA in stress absorbing layers under low temperature[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4):29-35.
- [23] 孙增智, 田俊壮, 石 强, 等. 承台大体积混凝土里表温差梯度与温差应力有限元模拟[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2):18-26, 36.  
SUN Zeng-zhi, TIAN Jun-zhuang, SHI Qiang, et al. Finite element simulation of inside-outside temperature gradient and thermal stress for abutment mass concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(2):18-26, 36.
- [24] 彭 勇, 孙立军, 石永久, 等. 沥青混合料劈裂强度的影响因素[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(6):1304-1307.  
PENG Yong, SUN Li-jun, SHI Yong-jiu, et al. Factors affecting splitting strength of asphalt mixture[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(6):1304-1307.