

水热耦合老化对橡胶改性沥青性能影响研究

陈振伟¹, 吴学文¹, 肖璇^{2*}, 李平², 刘深德²

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究水热耦合老化对橡胶改性沥青性能的影响, 该文模拟热老化及水热耦合老化试验, 利用常规指标试验、动态剪切流变试验与凝胶色谱试验从宏观与微观层面研究不同老化环境对沥青高低温性能的影响, 利用沥青与集料的低温黏结性试验研究不同老化环境对界面性能的影响。结果表明: 相较于热老化, 水热耦合老化对橡胶改性沥青的延度与软化点的影响更显著; 随着老化时间延长, 橡胶改性沥青的车辙因子、相位角与临界温度增加, 温度敏感性降低, 即橡胶高温性能提高, 但在水热耦合老化环境下其变化幅度会更大; 热老化和水热耦合老化均导致沥青集料界面性能下降, 但后者影响程度更大; 大分子含量 $C_{LMS}(\%)$ 与分散度 D 值均随老化时间延长而增大, 但水热耦合老化提高了前期的增长水平; D 值和 $C_{LMS}(\%)$ 与软化点和延度具有良好的相关性。

关键词: 橡胶改性沥青; 水热耦合; 老化; 性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Effect of Hydrothermal Coupling Aging on Performance of Rubber Modified Asphalt

CHEN Zhenwei¹, WU Xuewen¹, XIAO Xuan^{2*}, LI Ping², LIU Shende²

(1. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To study the effect of hydrothermal coupling aging on the performance of rubber modified asphalt, this article simulated thermal aging and hydrothermal coupling aging tests and investigated the effect of different aging environments on the high-temperature and low-temperature performance of asphalt from macroscopic and microscopic levels through conventional index tests, dynamic shear rheology tests, and gel chromatography tests, as well as the effect of different aging environments on the interfacial properties through low-temperature adhesion tests of asphalt and aggregates. The results show that the effects of hydrothermal coupling aging on the ductility and softening point of rubber modified asphalt are more significant than those of thermal aging. The rutting factor, phase angle, and critical temperature of rubber modified asphalt increase with the increase in aging time, and the temperature sensitivity decreases, meaning that the high-temperature performance of the rubber improves. However, the changes in the hydrothermal coupling aging environment are more significant. Both thermal aging and hydrothermal coupling aging lead to the degradation of the interfacial properties of asphalt aggregates, but hydrothermal coupling aging has a greater influence. The macromolecular content $C_{LMS}(\%)$ and dispersity D -value both increase with increasing aging time, but hydrothermal coupling aging increases the degree of growth in the early stage. D -value and $C_{LMS}(\%)$ have a good correlation with softening points and ductility.

Keywords: rubber modified asphalt; hydrothermal coupling; aging; performance

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2021YFB2601000); 广西重点研发计划项目(编号: 桂科 AB21220070, 2021AB22145); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51878075)

作者简介: 陈振伟, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: cznocude@qq.com

*通信作者: 肖璇, 男, 硕士研究生. E-mail: xiao990601@163.com

0 引言

中国南方地区属于高温多雨地区,气候环境严酷,热老化和水损坏是影响沥青路面使用寿命的重要因素。橡胶改性沥青混合料相较于普通沥青混合料,其高低温性能、水稳性能、抗疲劳特性等方面均有显著改善。为促进橡胶改性沥青在高温多雨地区的工程实际应用,研究热老化与水热耦合老化对橡胶改性沥青的影响具有重要意义。

张智豪等^[1]针对短期老化对胶粉沥青高温性能的影响展开研究,发现老化时间相较于老化温度,对胶粉改性沥青变形恢复能力的影响更为显著;李宁利等^[2]、马庆伟等^[3]分别对基质沥青和橡胶沥青进行短期老化和长期老化后的高温流变性进行测试,结果表明橡胶沥青的抗老化性能优于基质沥青;Wang等^[4]、周超^[5]利用红外光谱对老化后的橡胶改性沥青进行分析,发现橡胶沥青的抗老化性能与橡胶含量相关;Ghavibazoo等^[6]利用动态剪切流变仪和红外光谱对老化前后的橡胶改性沥青进行分析,发现橡胶改性剂可以通过释放抗氧化性的油性物质进入沥青或者吸收芳香烃和小分子物质持续发生溶胀反应,提高沥青的抗老化性;刘宇等^[7]发现热-氧-水蒸气老化5 h后的温拌橡胶沥青的老化效果相对于基质沥青的更加明显,因为水蒸气可以促进沥青的老化,使其生成更多的活性基团和易被氧化的双键官能团;郭猛^[8]采用动态力学分析(DMA)、热力学分析(DSC)、表面物理化学以及多种微观表征技术对沥青胶浆的相态结构、交互作用、黏结黏附等多种物理化学现象进行了研究,从机理上揭示了沥青胶浆的界面行为;邵显智等^[9]对沥青胶浆的微观界面进行了研究,得出了影响沥青胶浆微观界面的因素主要有粉油比、矿粉的不同指标和性状等。

本研究通过热老化和水热耦合老化试验,模拟南方湿热环境对橡胶改性沥青的影响,通过改变老化环境与作用时间,对橡胶改性沥青进行常规指标试验以及动态剪切流变试验,研究分析橡胶改性沥青在热老化和水热耦合老化作用下的高低温性能。利用凝胶渗透色谱GPC(Gel Permeation Chromatography)从微观层面解释了其高低温性能受环境因素影响的行为,利用沥青与集料的低温黏结性试验,研究不同老化环境对界面性能的影响,为揭示湿热环

境下的橡胶改性沥青老化机理提供一定参考。

1 试验材料与试验方案

1.1 材料

1.1.1 沥青

选用70[#]A级基质沥青,主要技术指标见表1。

表1 70[#]A级基质沥青技术指标

Table 1 Technical indexes of 70[#]A grade base asphalt

试验项目	单位	检测结果	技术要求	试验方法
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	68.8	60.0~80.0	T0604
软化点(R&B)	℃	48.1	≥46.0	T0606
延度(15℃,5 cm/min)	cm	>100	≥100	T0605
闪点	℃	269	≥260	T0611
溶解度	%	99.8	≥99.5	T0607
相对密度(25℃)		1.029	实测记录	T0603
RTFOT 质量变化	%	-0.385	≤±0.800	T0610
后残留物 残留针入度比(25℃)	%	68	≥61	T0604
残留延度(10℃)	cm	9	≥6	T0605

注:参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中道路石油沥青技术要求70[#]A级沥青,按气候分区1-4-1确定。

1.1.2 橡胶粉

选用40目橡胶粉,主要技术指标检测结果见表2。

表2 橡胶粉主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of rubber powder

试验项目	单位	检测结果	技术要求
加热减量	%	0.38	≤1.00
丙酮抽出物	%	7	≤10
炭黑含量	%	30	≥26
橡胶烃含量	%	56	≥48
筛余物	20目	%	0
	30目	%	4
铁含量	%	0.02	<0.05
纤维含量	%	未检出	<0.5
体积密度	kg/m ³	360	270~480

注:参考《硫化橡胶粉》(GB/T 19208—2020)。

1.1.3 橡胶改性沥青制备

参考厂家实际经验,橡胶粉掺量为沥青总量的20%,本文制备橡胶改性沥青性能见表3。

1.2 试验方案

1.2.1 沥青老化试验

(1) 沥青热老化

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

表3 橡胶改性沥青质量技术指标及要求

Table 3 Technical indexes and requirements for quality of rubber modified asphalt

技术指标	单位	测试结果	技术要求	试验方法
针入度(25℃,5s,100g)	0.1 mm	34.2	30.0~60.0	T0604
延度(5℃,5cm/min)	cm	10.4	≥5.0	T0605
软化点 $T_{R\&B}$	℃	68	≥65	T0606
旋转黏度(180℃)	Pa·s	2.52	1.50~5.00	T0625
弹性恢复(25℃)	%	94.5	≥75.0	T0662

注:参考广西壮族自治区地方标准《橡胶沥青路面施工技术规范》(DB 45/T 1098—2014)。

(JTG E20—2011)中的沥青薄膜加热试验(T0609—2011),采用直径为14 cm的试样皿将试样质量控制在(50±0.5) g,沥青薄膜厚度为1.5 mm,薄膜烘箱加热温度为163℃,加热时间分别为1 h、3 h、5 h,并分别模拟刚开放交通、实际使用2~3年、实际使用5年左右的沥青老化状态^[10-11]。

(2) 沥青水热耦合老化

参照沥青薄膜加热试验(T0609—2011),采用直径为10 cm的试样皿将橡胶改性沥青试样质量控制在(12.5±0.5) g,沥青薄膜厚度为1.5 mm,向试样皿中加水至覆盖沥青试样,薄膜加热温度为163℃,时间为1 h、3 h、5 h,同时每隔30 min补充100℃水,确保试样试验阶段一直处于浸水状态。

1.2.2 沥青性能试验

(1) 针入度与软化点

参考沥青延度试验(T0604—2011)与沥青软化点试验(T0601—2011)测试沥青延度与软化点。

(2) 动态剪切流变试验

参考沥青流变性质试验(T0628—2011)开展动态剪切流变试验(DSR)。试验时,采用直径为25 mm的振荡板,设定频率为10 rad/s,选取温度为46~82℃,评价指标为:① $G^*/\sin \delta$ 表征沥青的抗车辙能力,越大表明沥青抗车辙能力越强;② δ 表示沥青胶浆的黏弹特征;③ 临界温度 $T_{G^*/\sin \delta}$ 为根据各温度下的车辙因子预估车辙因子达到1 kPa时的温度,其值越高代表高温性能越好;④ 高温敏感性是对不同温度下的复数模量 G^* 进行线性拟合,计算公式如式(1)所示,利用拟合曲线的斜率(K_{GTS})评价沥青的高温敏感性, K_{GTS} 的绝对值越高,代表其温度稳定性越差^[12]。

$$\lg \lg G^* = K_{GTS} \cdot \lg T + C \quad (1)$$

式中: C 为常数。

(3) 沥青集料黏结性试验

参考沥青与集料的低温黏结性试验(T0660—2000)开展沥青集料黏结性试验,采用碎石被振落的百分率评价沥青集料黏结性,以此来评价不同老化条件的影响。

(4) 凝胶渗透色谱试验

采用凝胶渗透色谱法(GPC)获取橡胶改性沥青大分子含量 $C_{LMS}(\%)$ 与分散度 D 两个指标进行微观构成评价。

① $C_{LMS}(\%)$ 与沥青的软化点、针入度、黏度等宏观性能指标有较强的线性关系^[13]。将色谱图划分成13小块,如图1所示,横坐标为保留时间,纵坐标为响应值。选取1~5组合为大分子(LMS),6~9组为中分子(MMS),10~13组为小分子(SMS)。不同区域的面积可以代表物质的含量多少,但考虑到不同浓度时单纯比较 C_{LMS} 值所得含量不同,故定义 S_{LMS} 值与吸收峰的面积之比为所得的 $C_{LMS}(\%)$,具体计算公式如式(2)所示:

$$C_{LMS}(\%) = \frac{S_{LMS}}{S_{LMS} + S_{MMS} + S_{SMS}} \quad (2)$$

式中: S_{LMS} 为前1~5部分色谱图与 x 轴围成的面积; S_{MMS} 为6~9部分色谱图与 x 轴围成的面积; S_{SMS} 为后10~13部分色谱图与 x 轴围成的面积; $C_{LMS}(\%)$ 为大分子含量。

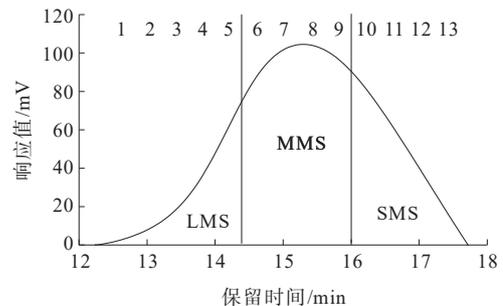


图1 GPC典型色谱图

Figure 1 Typical chromatogram of GPC

② D 为分散度,表征分子量的分布情况,越小则分子量分布越集中。计算公式如式(3)~(5)所示:

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \times M_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (3)$$

$$M_w = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times M_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \times m_i^2}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (4)$$

$$D = \frac{M_w}{M_n} \quad (5)$$

式中: M_n 为数均分子量; M_i 为第*i*种分子的相对分子质量; N_i 为第*i*种分子的分子数量; M_w 为重均分子量; m_i 为第*i*种分子的分子总质量。

2 试验结果分析

2.1 常规指标试验

热老化与水热耦合老化作用下,对不同时间的橡胶改性沥青进行5℃延度与软化点测试,试验结果如图2、3所示。

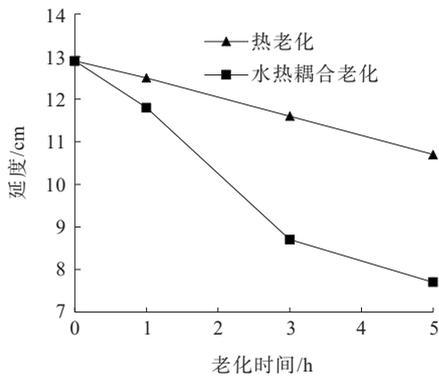


图2 不同老化条件下沥青延度

Figure 2 Asphalt ductility under different aging conditions

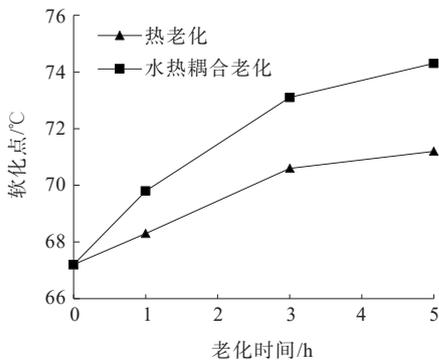


图3 不同老化条件下沥青软化点

Figure 3 Asphalt softening point under different aging conditions

由图2、3可知:

(1) 随热老化时间延长,橡胶改性沥青延度降低,软化点增大,且总体前期变化明显,后期趋缓。这是由于热老化作用下沥青发生聚合与氧化反应,

生成各种含氧官能团,伴随部分轻质组分逸出,造成饱和分和芳香分的含量降低,沥青质含量增加,宏观上沥青变得脆硬^[14-15],同时热老化可能造成胶粉降解,并破坏胶粉的溶胀状态,胶粉与沥青之间形成的网络结构稳定性被破坏^[16-17],以上情况导致改性沥青延度降低,软化点增大。

(2) 水热耦合作用下,随老化时间延长,橡胶改性沥青延度及软化点变化规律与热老化相同,但变化幅度更为明显,即水的存在显著加剧了沥青老化程度。这是由于老化后的橡胶改性沥青中亲水基团的含量增加,亲水性加强,同时生成部分含有C—O极性键的物质,在水作用下易发生降解,并进一步被氧化^[14],沥青中的极性基团引起沥青质向沥青-水界面移动,在界面上富集形成结构膜,沥青质自缔合使沥青-水界面结构膜随老化时间增长产生明显硬化^[18],宏观上沥青老化变硬,同时橡胶中的聚丁二烯链中含有大量的双键,与水发生反应,导致极性基团增多,胶粉的降解速率加快,橡胶分子的松弛速度提高,进一步破坏了胶粉与沥青的网络结构^[7,14],以上情况导致延度与软化点的变化幅值提高。

2.2 动态剪切流变试验

热老化与水热耦合老化作用下,对不同时间的橡胶改性沥青进行DSR试验, $G^*/\sin \delta$ 与 δ 结果如图4、5所示。

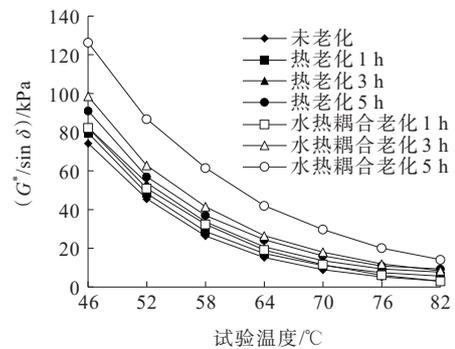


图4 橡胶改性沥青车辙因子

Figure 4 Rutting factor of rubber modified asphalt

由图4、5可知:

(1) 总体而言,各试样随温度升高,橡胶改性沥青车辙因子呈现指数状衰减,而相位角逐渐增大。车辙因子随试验温度增加而逐渐靠拢,不同老化方式之间橡胶改性沥青的高温性能差异逐渐减小。相位角代表橡胶改性沥青的黏弹特征,数值越大表示

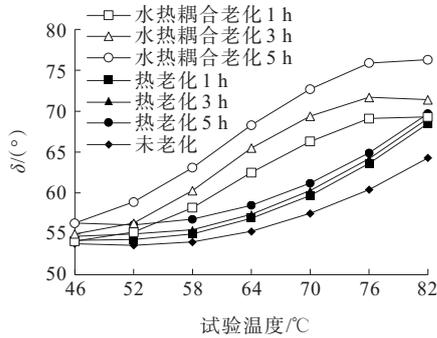


图5 橡胶改性沥青相位角

Figure 5 Phase angle of rubber modified asphalt

黏性比例越大,随着试验温度升高,沥青黏性状态更为明显,热老化的相位角前期增长平缓,后期增长迅速,但水热耦合老化则前期增长迅速而后期趋缓,主要因为橡胶形成的网络结构在46~58℃范围内抑制了改性沥青由高弹状态向黏性状态的转变,但水热老化对网络结构的破坏更显著,导致相位角在前期增长迅速。

(2) 随热老化时间延长,橡胶改性沥青车辙因子与相位角均逐渐增加,表明热老化能够提高橡胶改性沥青的高温性能,而相位角随老化时间延长而增大,原因是橡胶在热老化作用下发生脱硫与降解反应,导致黏性比例增大。

(3) 水热耦合作用下,随老化时间延长,橡胶改性沥青车辙因子和相位角变化规律与热老化作用下的相同,但变化幅度更为明显。水热耦合老化后的车辙因子与相位角明显大于热老化后的,且随老化时间延长而差距增大,表示水热耦合老化后的橡胶改性沥青高温性能和黏性比例均提高。

(4) 随着老化时间延长,橡胶改性沥青温度敏感性下降,但水热耦合老化对其下降幅度影响更显著。如表4所示。热老化与水热耦合老化环境下, K_{GTS} 均随着老化时间延长而降低,即温度敏感性不断降低。但水热耦合老化对橡胶网络结构破坏速率更高,橡胶的脱硫和大量降解导致温度敏感性提高。因此,当老化时间为1h时,水热耦合老化的温度敏感性高于热老化。

(5) 随着老化时间的延长而临界温度提高,但水热耦合老化的增长幅度大于热老化的,即水加速了临界温度的增长,如表5所示。相较于热老化,水热耦合老化1h、3h、5h下的临界温度分别上升了

0.27℃、5.76℃、17.83℃,表明水热耦合老化更有利于提高橡胶改性沥青的高温稳定性。水热耦合老化在0~1h、1~3h、3~5h时间段,临界温度分别增长了3.47℃、12.29℃、14.59℃,说明临界温度在水热耦合环境下的增长速率随老化时间延长而不断增加。

表4 橡胶改性沥青复数模量回归结果

Table 4 Regression results of complex modulus of rubber modified asphalt

项目	老化时间/h	K_{GTS}	回归公式	R^2
未老化		2.33	$y = -2.33x + 4.19$	0.910 07
	1	1.63	$y = -1.62x + 2.98$	0.984 64
	3	1.38	$y = -1.38x + 2.57$	0.986 30
热老化	5	1.25	$y = -1.25x + 2.37$	0.988 06
	1	2.20	$y = -2.20x + 3.99$	0.840 16
水热耦合老化	3	1.28	$y = -1.28x + 2.42$	0.965 17
	5	0.97	$y = -0.97x + 1.94$	0.958 35

表5 临界温度-车辙因子拟合关系

Table 5 Fitting relationship between critical temperature and rutting factor

项目	老化时间/h	拟合公式	R^2	临界温度/℃
未老化		$y = 4\ 042.826\ 28e^{-0.086\ 74x}$	0.999 38	95.74
	1	$y = 3\ 551.592\ 03e^{-0.082\ 63x}$	0.998 81	98.94
热老化	3	$y = 2\ 472.468\ 53e^{-0.073\ 89x}$	0.998 36	105.74
	5	$y = 2\ 503.278\ 28e^{-0.072\ 28x}$	0.997 58	108.26
水热耦合老化	1	$y = 3\ 955.969\ 76e^{-0.083\ 49x}$	0.996 98	99.21
	3	$y = 2\ 334.826\ 79e^{-0.069\ 56x}$	0.999 44	111.50
	5	$y = 2\ 004.687\ 31e^{-0.060\ 30x}$	0.999 64	126.09

2.3 沥青集料黏结性试验

热老化与水热老化作用下,对不同时间的橡胶改性沥青进行沥青集料黏结性试验,试验结果见图6。

由图6可知:

(1) 随着热老化时间延长,橡胶改性沥青振落率增大,且前期增速较快后期趋缓。热老化导致沥青与集料的黏附功减少^[19],同时沥青质含量增加导致沥青极性 with 浸润能力降低^[20],胶粉改性剂的改性效果在热老化作用下不断衰退,以上情况导致沥青与集料的界面性能降低。

(2) 水热耦合老化作用下,随着老化时间延长,振落率变化趋势与热老化作用下的相同,但变化幅

度更为显著。水热耦合热老化作用下,橡胶改性沥青老化程度加深,相较于沥青,集料更容易与水发生吸附,水分从沥青与集料的分离面上渗入,集料-沥青界面被集料-水分界面所取代,同时沥青膜在水的作用下发生乳化,内聚力与集料界面的附着力降低^[21]。

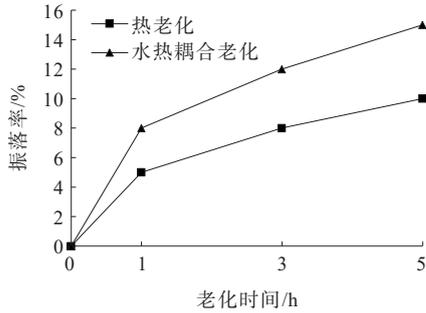


图6 橡胶改性沥青老化时间与振落率

Figure 6 Aging time and stripping rate of rubber modified asphalt

2.4 凝胶渗透色谱法试验

热老化与水热耦合老化作用下,对不同时间的橡胶改性沥青进行凝胶渗透色谱法(GPC)试验,试验结果如图7、8所示。

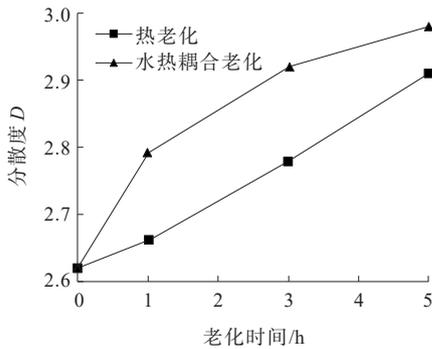


图7 橡胶改性沥青老化时间与分散度D关系

Figure 7 Relationship between aging time and dispersity D of rubber modified asphalt

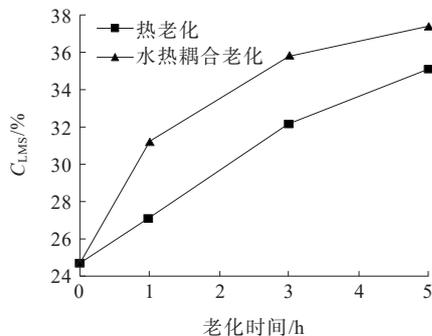


图8 橡胶改性沥青老化时间与C_{LMS}(%)

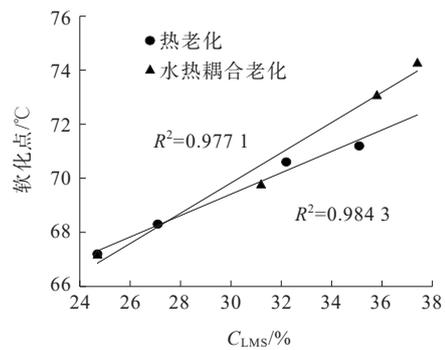
Figure 8 Aging and C_{LMS}(%) of rubber modified asphalt

由图7、8可知:

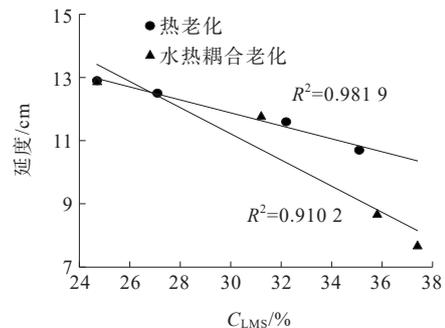
(1) 随着热老化时间延长,橡胶改性沥青D值与C_{LMS}(%)均逐渐增长。这是由于热老化促进中分子不断聚合生成大分子物质,同时部分中分子断链生成小分子物质,使得橡胶改性沥青的D值和C_{LMS}(%)不断增加。中分子初始含量高,因此在0~3h时间段聚合生成的速率保持不变,但随着老化时间的延长,中分子含量降低,大分子聚合速率逐渐降低。

(2) 水热耦合老化作用下,随老化时间延长,橡胶改性沥青D值与C_{LMS}(%)前期增长迅速而后期趋缓。由于水的存在加速了沥青与橡胶产生极性物质的速率,沥青分子与极性物质发生缔合,小分子聚合成为大分子物质,沥青质的含量增加,同时部分大分子分解为小分子。D值与C_{LMS}(%)的斜率在0~1h时间段增长最显著,表示水热耦合老化对D值与C_{LMS}(%)的影响主要集中于前期。

(3) C_{LMS}(%)和D值与软化点和延度具有良好相关性。如图9、10所示,软化点随着C_{LMS}(%)与D值的增加而增加,延度随着C_{LMS}(%)与D值的增加而降低,线性相关性R²均在0.8以上。橡胶改性沥青的



(a) 橡胶改性沥青软化点与C_{LMS}(%)关系



(b) 橡胶改性沥青延度与C_{LMS}(%)关系

图9 橡胶改性沥青性质与大分子含量关系

Figure 9 Relationship between performance of rubber modified asphalt and macromolecular content

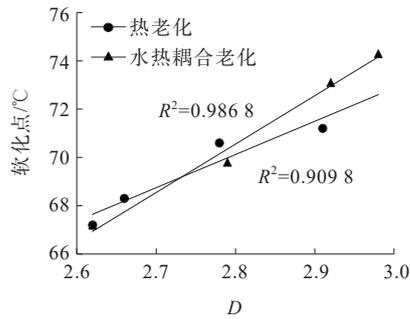
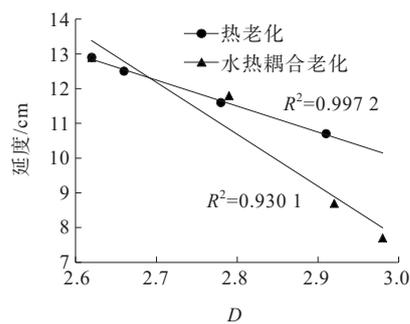
(a) 橡胶改性沥青软化点与 D (b) 橡胶改性沥青延度与 D

图 10 橡胶改性沥青性质与分散度关系

Figure 10 Relationship between performance of rubber modified asphalt and dispersity

水热耦合老化导致大分子含量增多并产生了部分小分子物质,但分子量整体仍呈现增大趋势,因此重组分的含量增大,导致软化点上升,延度下降。

3 结论

(1) 热老化与水热耦合老化均导致橡胶改性沥青的延度下降,软化点增加,但水热耦合老化的影响更显著。

(2) 试验温度的提高,橡胶改性沥青车辙因子呈现指数衰减,热老化的相位角呈现指数增长,水热耦合老化则呈凸曲线增长。随老化时间延长,橡胶改性沥青的车辙因子、相位角与临界温度均增长,温度敏感性下降,但水热耦合老化环境下的变化幅度更大。

(3) 热老化和水热耦合老化均导致沥青集料界面性能下降,但水热耦合老化对其变化趋势影响更显著。

(4) 热老化和水热耦合老化均导致 $C_{LMS}(\%)$ 与 D 值增大,但水热耦合老化显著提高了 0~1 h 时间段的增长速率。 D 值和 $C_{LMS}(\%)$ 与软化点和延度具有良好相关性。

参考文献:

References:

- [1] 张智豪,李波,魏永政.短期老化对胶粉改性沥青高温性能的影响[J].现代化工,2018,38(9):105-109,111.
ZHANG Zhihao, LI Bo, WEI Yongzheng. Effect of short-term aging on high-temperature properties of crumb rubber modified asphalt[J]. Modern Chemical Industry, 2018,38(9):105-109,111.
- [2] 李宁利,赵新坡,孙吉书,等.老化对橡胶沥青高温流变性能的影响[J].公路,2015,60(2):165-168.
LI Ningli, ZHAO Xinpo, SUN Jishu, et al. Effect of aging on the high-temperature rheological properties of rubber-modified asphalt[J]. Highway, 2015,60(2):165-168.
- [3] 马庆伟,郭忠印,李文博,等.不同因素对橡胶复合改性沥青高温性能影响分析[J].中外公路,2022,42(3):225-230.
MA Qingwei, GUO Zhongyin, LI Wenbo, et al. Analysis on the influence of different factors on the high temperature performance of composite rubber asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3):225-230.
- [4] WANG S F, WANG Q, LI S. Thermooxidative aging mechanism of crumb-rubber-modified asphalt[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016,133(16):43323.
- [5] 周超.橡胶粉改性生物沥青的老化特性研究[J].中外公路,2022,42(4):237-243.
ZHOU Chao. Study on aging characteristics of bio-asphalt modified by rubber powder[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4):237-243.
- [6] GHAVIBAZOO A, ABDELRAHMAN M, RAGAB M. Evaluation of oxidization of crumb rubber - modified asphalt during short-term aging[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015,2505(1):84-91.
- [7] 刘宇,杨国良,骆锦安,等.短期老化与热-氧-水蒸气老化作用下温拌橡胶沥青的性能分析[J].中国胶粘剂,2020,29(8):21-26.
LIU Yu, YANG Guoliang, LUO Jin'an, et al. Performance analysis of warm mix rubber asphalt under short-term aging and heat-oxygen-water vapor aging[J]. China Adhesives, 2020,29(8):21-26.
- [8] 郭猛.沥青胶浆的界面行为与机理分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
GUO Meng. Interfacial behavior of asphalt mastics and its

- mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 邵显智,谭忆秋,邵敏华,等. 沥青胶浆微观界面的研究[J]. 公路,2003,48(12):105-109.
SHAO Xianzhi, TAN Yiqiu, SHAO Minhua, et al. Research on microstructure of asphalt mortar[J]. Highway, 2003, 48 (12):105-109.
- [10] 栗培龙,张争奇,王秉纲,等. 道路沥青热氧老化模拟试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2008,29(1):119-123.
LI Peilong, ZHANG Zhengqi, WANG Binggang, et al. Experimental research on thermo-oxidative aging for simulation of pavement asphalt aging[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2008, 29(1): 119-123.
- [11] 李佳庆. 蜡基温拌剂对废橡胶粉改性沥青车辙与疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2023,43(5):230-235.
LI Jiaqing. Effect of wax-based warm mix additives on rutting and fatigue performance of waste crumb rubber modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5):230-235.
- [12] 谢小迪,吕大春,熊奎元,等. 高黏改性沥青的温度敏感性评价及指标适用性分析[J]. 中外公路,2021,41(6):266-270.
XIE Xiaodi, LYU Dachun, XIONG Kuiyuan, et al. Temperature sensitivity evaluation and index applicability analysis of high-viscosity modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):266-270.
- [13] 施沈越,孙钟良,张言,等. 基于凝胶渗透色谱技术的沥青老化研究进展[J]. 石油沥青,2018,32(1):22-30.
SHI Shenyue, SUN Zhongliang, ZHANG Yan, et al. Research progress of asphalt aging based on GPC[J]. Petroleum Asphalt,2018,32(1):22-30.
- [14] 曾祥鑫. 橡胶沥青老化机理及其再生性能研究[D]. 南宁: 广西大学,2015.
ZENG Xiangxin. Study on the aging mechanism and regeneration property of rubber asphalt[D]. Nanning: Guangxi University,2015.
- [15] 谭继宗,刘靖,徐升,等. 级配对橡胶沥青混合料高温性能影响研究[J]. 中外公路,2021,41(2):301-306.
TAN Jizong, LIU Jing, XU Sheng, et al. Study on influence of gradation on high temperature performance of rubber asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021, 41(2):301-306.
- [16] WANG S, HUANG W D, LIU X Y, et al. Influence of high content crumb rubber and different preparation methods on properties of asphalt under different aging conditions: Chemical properties, rheological properties, and fatigue performance[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327:126937.
- [17] 李小重,王笑风,冯明林,等. 橡胶颗粒对沥青的改性机理及其混溶体系分析[J]. 中外公路,2021,41(5):249-253.
LI Xiaozhong, WANG Xiaofeng, FENG Minglin, et al. Modification mechanism of asphalt composited with rubber crumbs and analysis on mixing capacity volume[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(5):249-253.
- [18] 冉龙飞. 热、光、水耦合条件下SBS改性沥青老化机理研究及高性能再生剂开发[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
RAN Longfei. Research on aging mechanism and high performance regenerant of SBS modified asphalt under coupling condition of light, heat, water[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2016.
- [19] 章清涛,李永振,周圣杰,等. 老化对不同沥青与集料黏附性的影响研究[J]. 合成材料老化与应用,2022,51(5):25-27,47.
ZHANG Qingtao, LI Yongzhen, ZHOU Shengjie, et al. Study on the effect of aging on the adhesion between different asphalts and aggregates[J]. Synthetic Materials Aging and Application,2022,51(5):25-27,47.
- [20] WANG L, SHAN M Y, CHANG C Q, et al. The macro-and meso-cracking characteristics of warm mix crumb rubber asphalt mastics before and after aging[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262:120724.
- [21] 甘新立. 集料与沥青的表面特性分析及黏附性评价[D]. 西安:长安大学,2017.
GAN Xinli. The surface character analysis of bitumen and aggregates and the evaluation of the adhesion between them[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.