

碲化镉发电智能融雪化冰系统下的 沥青抗老化研究

秦 黔, 梁明辉, 文 雨, 高 翔, 晏静思

四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

本文以四川高海拔地区久马高速中的碲化镉发电智能融雪化冰系统为研究背景, 研究沥青路面在频繁加热下如何提高其抗老化性能。文中采用橡胶粉和废弃食用油作为外掺材料加入沥青中, 橡胶粉掺量分别为0.3%、0.5%、0.7%, 废弃食用油掺量为4%。分析二者的掺入对沥青三大指标、黏度及流变性能的影响。试验结果显示: 三大性能试验二者可显著提高沥青高温稳定性, 老化后与基质沥青相比, 针入度降低、软化点和延度提升, 薄膜烘箱老化后软化点等有相应变化。黏度试验显示, 橡胶粉和废弃食用油掺入后未老化、薄膜烘箱老化、压力老化后的黏度较基质沥青均有提升, 二者能抑制沥青胶体结构变化, 橡胶粉掺量越大, 压力老化下黏度提高越显著。流变性能试验显示, 二者改变了沥青成分和结构, 压力老化下, 可降低复数剪切模量、提升相位角, 提升抗老化性能和耐久性。

关键词

抗老化性能, 沥青三大指标, 黏度, 流变性能

Research on Asphalt Aging Resistance under the Intelligent Snow Melting and Deicing System of Cadmium Telluride Power Generation

Qian Qin, Minghui Liang, Yu Wen, Xiang Gao, Jingsi Yan

Sichuan Provincial Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Based on the research background of the intelligent snow melting and deicing system of cadmium telluride power generation in Jiuma Expressway in Sichuan high-altitude area, this paper studies how to improve the anti-aging performance of asphalt pavement under frequent heating. In the article, rubber powder and waste edible oil are used as external additives added to asphalt, with rubber powder content of 0.3%, 0.5%, and 0.7%, respectively, and waste edible oil content of 4%. Analyze the effects of the addition of the two on the three major indicators of asphalt, viscosity, and rheological properties. The test results show that both of the three performance tests can significantly improve the high-temperature stability of asphalt. Compared with the matrix asphalt after aging, the penetration degree decreases, the softening point and ductility increase, and there are corresponding changes in the softening point after film oven aging. The viscosity test showed that the viscosity of the untreated, film oven aged, and pressure aged asphalt with the addition of rubber powder and waste edible oil increased compared to the base asphalt. Both can suppress the changes in asphalt colloid structure, and the higher the amount of rubber powder added, the more significant the increase in viscosity under pressure aging. The rheological property test shows that both of them change the asphalt composition and structure. Under pressure aging, they can reduce the complex shear modulus, increase the phase angle, and improve the anti-aging performance and durability.

Keywords

Anti-Aging Performance, The Three Major Indicators of Asphalt, Viscosity, Rheological Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国西部交通基础设施的不断发展，藏区高海拔地区的高速公路建设对于区域经济和交通便利性具有重要意义。而该地区受气候环境影响，全年低温严寒时间较长，路面容易出现结冰、积雪等情况，导致道路封闭或限行，同时也影响了行车安全。久马高速(久治 - 马尔康)为解决这一问题，研发了碲化镉发电智能融雪化冰系统(图 1)，为高速公路在冬季抗凝冰问题提供了创新解决方案。然而，这一系统在运行过程中给沥青路面带来了新的挑战。在融雪化冰过程中，频繁的加热操作使得路面长期处于高温环境，这种特殊工况严重影响了沥青路面的性能[1][2]。沥青作为路面的关键材料，在高温作用下老化速度加快[3]。原本具有一定柔韧性的沥青逐渐变硬变脆，如同失去弹性的弹簧，其内部结构遭到破坏。这一系列变化直接导致沥青路面的抗疲劳性能大幅降低，在车辆反复荷载的作用下，路面更容易出现细微裂缝，而这些裂缝在后续的交通压力和环境因素影响下，会迅速扩展，进而形成更严重的路面病害。同时，抗裂性能的下降使得路面在面对温度变化、车辆荷载等因素时变得更加脆弱，极大地缩短了路面的使用寿命[4][5]。在此背景下，提高沥青路面的抗老化性能成为保障久马高速公路长期稳定运行的关键。本文通过橡胶粉和废弃食用油作为外掺材料，来提高沥青抗老化性能。废弃食用油来源广泛且含有多种活性成分，橡胶粉则具有良好的弹性和韧性，二者与沥青混合料的结合有望改变沥青的性质，增强其对高温老化的抵抗能力，从而缓解碲化镉发电智能融雪化冰系统带来的负面影响，延长路面使用寿命，提高高速公路的耐久性和安全性。

2. 原材料

2.1. 沥青

本次试验中选择的沥青为茂名石化生产的 70 号沥青。技术指标见表 1。



Figure 1. Panoramic view of Jiuma Expressway cadmium telluride power generation intelligent snow and ice melting system
图 1. 久马高速碲化镉发电智能融雪化冰系统全景图

Table 1. Technical indicators of asphalt No. 70
表 1. 70 号沥青技术指标

检测项目	检测结果	规范标准
针入度(25°C, 100 g, 5 S)/0.1 mm	62.5	60~80
软化点/°C	46.7	≥46
闪点/°C	>300	≥260
密度(25°C)/(g·cm ⁻³)	1.035	—
延度(5 cm/min, 15°C)	>100	≥100

2.2. 橡胶粉

试验中的橡胶粉是由废旧橡胶制品经过粉碎加工后得到的，如图 2 所示。其性能指标见表 2。



Figure 2. Rubber powder
图 2. 橡胶粉

Table 2. Performance indicators of rubber powder
表 2. 橡胶粉性能指标

检测项目	检测结果	技术要求
体积密度/(kg·cm ⁻³)	1.18	1.10~1.30
金属含量/%	0.03	<0.05
纤维含量/%	0.61	<1.0
水分/%	0.42	<1.0
灰粉/%	4.5	≤8

2.3. 废弃食用油

已有相关已经显示经过处理后的废弃食用油对沥青的性能有所提升，最佳掺量为 4% [6]。本次试验中的废弃食用油是经过过滤、除杂等净化处理的。

3. 改性沥青制备

(1) 将橡胶粉分别以 3%、5%、7%种同掺量与 4%掺量的废弃食用油进行预混，温度设置为 70℃，搅拌为 60 分钟，使橡胶粉充分溶胀，形成均匀的橡胶油混合物；

(2) 将基质沥青加热至 150℃~160℃，然后将不同橡胶粉掺量的橡胶油混合物分别缓慢加入到基质沥青中，3 种改性沥青都在 180℃下高速搅拌 90 分钟，使橡胶粉、废弃食用油与沥青充分混合反应。将共混后的改性沥青在 160℃下保温发育 60 分钟，使改性沥青的性能更加稳定。将 3 种不同橡胶粉掺量的橡胶油改性沥青(Rubber Oil Modified Asphalt)分别用 3% ROMA、5% ROMA、7% ROMA 代表。

4. 橡胶油改性沥青性能分析

4.1. 三大性能指标试验

Table 3. Performance test results of modified asphalt under different aging states
表 3. 改性沥青在不同老化状态下的性能测试结果

沥青类型	老化程度	针入度(25°C/0.1 mm)	软化点/°C	延度(10°C/cm)
基质沥青	原样	62.5	46.7	25.4
	TFOT	46.8	53.4	15.6
	PVA	28.7	56.6	12.9
3% ROMA	原样	58.3	47.2	36.8
	TFOT	44.5	53.9	23.5
	PVA	26.4	57.7	18.5
5% ROMA	原样	54.6	47.8	36.2
	TFOT	42.8	54.5	25.3
	PVA	24.3	58.2	19.6
7% ROMA	原样	49.7	48.3	35.3
	TFOT	40.1	55.5	26.4
	PVA	21.9	59.1	18.4

分别将基质沥青和 3 种不同的橡胶油改性沥青按照试验规程进行针入度(25℃)、软化点、延度(10℃)试验,对比老化前后的性能变化。短期老化采用薄膜烘箱试验(TFOT),长期老化采用压力老化试验箱(PVA)。试验结果见表 3。

从表 3 可知,橡胶粉和废弃食用油的掺入对沥青的性能有显著影响,能提高沥青的高温稳定性,使其软化点和延度升高,针入度降低。薄膜烘箱老化后的掺入橡胶粉和废弃食用油的沥青与基质沥青相比,针入度分别降低了 4.91%、8.55%、14.31%;软化点分别提升了 0.94%、2.06%、3.93%;延度分别提升了 50.64%、62.18%、69.23%。这是因为沥青在掺入橡胶粉和废弃食用油后,在老化过程中,橡胶粉和废弃食用油的存在可以在一定程度上抑制沥青的老化反应,减缓性能的劣化。橡胶粉和废弃食用油其本身具有较好的抗氧化性能,与沥青发生相互作用,改变了沥青的分子结构和组成,使其更加紧密,从而提高了沥青的软化点和抗变形能力,导致针入度减小,与沥青形成的结构在老化过程中能够保持相对稳定,在一定程度上改善了沥青的性能。

借助傅里叶变换红外光谱(FTIR)对沥青微观结构进行分析,收集了波数在 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 范围内的光谱数据。结果显示,掺入橡胶粉和废弃食用油后,沥青在某些特征峰的强度和位置上出现明显变化。在波数为 2920 cm^{-1} 处,代表沥青中饱和烃 C-H 伸缩振动的特征峰强度明显增强,从基质沥青的吸光度 0.5 提升至 3% ROMA 的 0.6、5% ROMA 的 0.7 以及 7% ROMA 的 0.8,这表明橡胶粉和废弃食用油中的饱和烃类物质与沥青发生融合,增加了该类物质的相对含量。在波数为 1700 cm^{-1} 处,代表沥青中羰基 C=O 伸缩振动的特征峰位置向低波数方向移动了约 10 cm^{-1} ,说明橡胶粉和废弃食用油的加入改变了羰基周围的化学环境,影响了其化学键的振动特性,这些变化意味着橡胶粉和废弃食用油与沥青分子间发生了化学反应或物理吸附,改变了沥青的化学组成结构。

4.2. 黏度测试

按照《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》要求进行黏度测试,试验温度设置为 135°C 。试验结果见图 3。

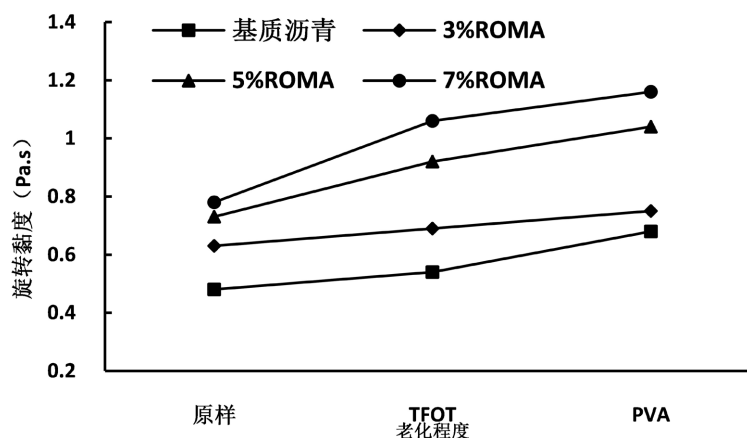


Figure 3. Viscosity test results of different rubber powder dosages
图 3. 不同橡胶粉掺量黏度测试结果

如图 3 所示,所有试件的黏度都随着老化程度增加而增长。掺入橡胶粉和废弃食用油后黏度有明显提升,与基质沥青相比在未老化时黏度分别提升了 31.25%、52.08%、62.5%;经过薄膜烘箱老化后提升了 27.78%、70.37%、96.30%;经过压力老化后提升了 10.29%、52.94%、70.59%。这是因为掺入橡胶粉和废弃食用油后,与基质沥青中的成分相互作用,改变了沥青的胶体结构,使沥青内部的摩擦力和内聚力

增大, 导致黏度上升; 在薄膜烘箱老化过程中, 沥青中的轻质组分挥发, 胶体结构发生变化, 导致沥青变硬变脆, 黏度增大。橡胶粉和废弃食用油的加入可以在一定程度上抑制沥青在老化过程中的胶体结构变化, 同时其自身在老化过程中也会发生交联等反应, 进一步提高了沥青的黏度。压力老化条件更为苛刻, 会加速沥青的老化进程。橡胶粉和废弃食用油在压力老化过程中能够更好地发挥其增强作用, 与沥青形成更稳定的结构, 从而显著提高了沥青的黏度, 且随着橡胶粉掺入量的增加, 这种增强效果更加明显。橡胶粉和废弃食用油的掺入能够有效提高沥青的黏度, 且橡胶粉的掺入量越大, 黏度提高越显著, 在不同老化条件下均表现出类似的规律。

4.3. 流变性能试验

沥青路面在使用中承受复杂的应力和应变, 流变性能测试可模拟这些实际受力条件, 这样得到的结果更能反映沥青在实际使用中的抗老化性能。加入橡胶粉和废弃食用油后, 沥青的成分和结构发生变化, 复数剪切模量可体现沥青抵抗变形能力, 能反映添加剂对沥青在受力时的影响。相位角能展现沥青粘性和弹性成分比例关系, 通过其变化可了解橡胶粉和废弃食用油如何改变沥青的粘性和弹性, 进而判断对沥青抗老化性能的作用。试验结果见图 4、图 5。

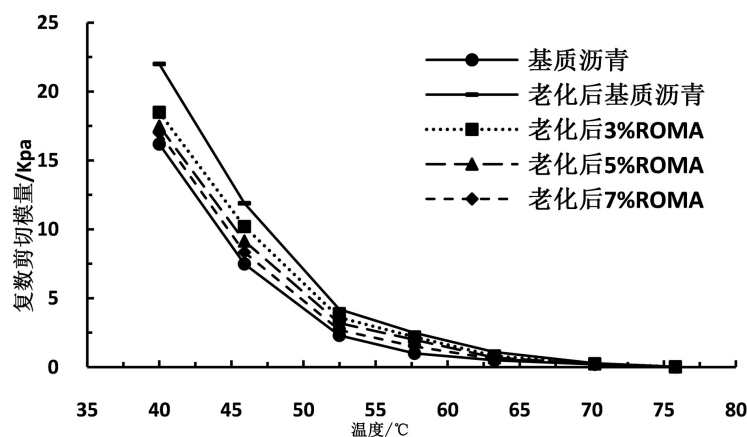


Figure 4. Temperature variation diagram of complex shear modulus

图 4. 复数剪切模量温度变化图

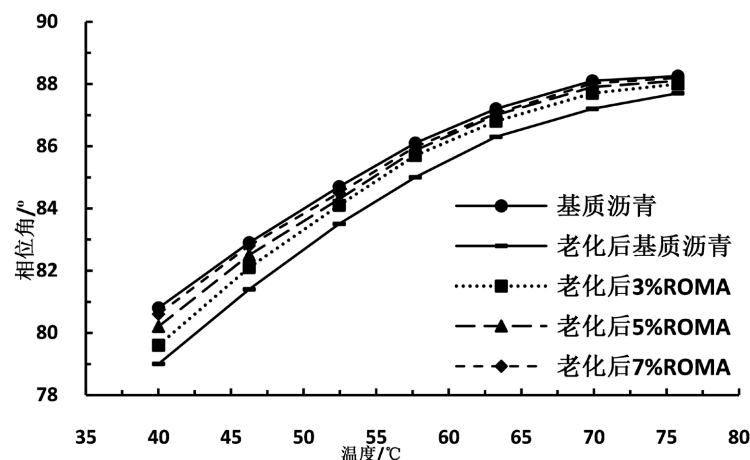


Figure 5. Temperature variation diagram of phase angle

图 5. 相位角温度变化图

由图 4 可知, 压力老化后沥青的复数剪切模量显著上升, 此现象表明老化使得沥青刚度增大。在掺入橡胶粉和废弃食用油后, 沥青的复数剪切模量相较于压力老化的基质沥青大幅降低。当掺量达到 7% 时, 该改性沥青的复数剪切模量与老化前的基质沥青相近, 且未出现低于老化前基质沥青复数剪切模量的情况。橡胶粉和废弃食用油沥青对温度的敏感性呈现出特定规律, 其敏感性高于老化沥青, 不过相较于原始沥青则更低。这种温度敏感性的差异, 暗示了橡胶粉和废弃食用油的加入改变了沥青的内部结构和性能, 使其在温度变化时的响应特性发生了变化, 在一定程度上优化了沥青的综合性能, 为在不同温度环境下的应用提供了更有利的条件, 由此可见橡胶粉和废弃食用油的掺入对沥青抗老化效果有较好的表现。

相位角是衡量沥青黏弹性特征的关键指标, 相位角大小与沥青黏性、弹性成分占比紧密相关, 通常相位角越大, 则意味着沥青所含的黏性成分越多。由图 5 可知, 随着橡胶粉掺量逐步增加, 改性沥青的相位角呈现出增长态势, 且逐渐向老化前的状态靠近。此变化规律与复数剪切模量相符, 且未出现超出老化前基质沥青相位角的现象。压力老化后的沥青相位角大幅降低, 这表明老化沥青中弹性成分占比显著升高, 因其相位角远低于基质沥青, 这也解释了沥青老化后质地变硬的缘由。而在掺入橡胶粉和废弃食用油后, 老化沥青的相位角在较高温度下明显增加, 这一现象充分揭示出橡胶粉和废弃食用油提升了老化沥青的黏性组分含量。这证明橡胶粉和废弃食用油对于提升沥青的抗老化性能有着积极且显著的作用, 为改善沥青材料的耐久性提供了有效的途径。

5. 结论

(1) 对掺入橡胶粉和废弃食用油的沥青进行三大性能试验, 试验结果显示橡胶粉和废弃食用油对沥青性能影响显著, 可提高高温稳定性, 使软化点和延度升高、针入度降低。老化后, 与基质沥青比, 掺橡胶粉和废弃食用油的沥青针入度降低、软化点提升、延度提升。薄膜烘箱老化后软化点最高降低了 14.31%; 软化点和延度最高提升了 3.93% 和 69.23%;

(2) 黏度试验结果显示, 掺入橡胶粉和废弃食用油后, 未老化、薄膜烘箱老化、压力老化后的黏度相较于基质沥青均有不同程度提升。薄膜烘箱和压力老化后最高提升了 96.30%、70.59%, 这是因为它们与沥青成分相互作用改变胶体结构, 增大摩擦力和内聚力。在老化过程中, 橡胶粉和废弃食用油能抑制沥青胶体结构变化, 自身反应也会提高黏度。而在压力老化下, 它们能更好地发挥增强作用, 且橡胶粉掺量越大, 黏度提高越显著, 不同老化条件下规律相似;

(3) 流变性能检测结果显示, 加入橡胶粉和废弃食用油改变了沥青成分和结构, 复数剪切模量体现其对沥青受力影响, 相位角展现沥青粘性和弹性变化。压力老化使沥青复数剪切模量上升、刚度增大, 掺入橡胶粉和废弃食用油后该模量降低, 当橡胶粉掺量为 7% 时接近老化前基质沥青, 且这种改性沥青对温度敏感性有变化, 优化了综合性能。从相位角看, 其随橡胶粉掺量增加而增长, 向老化前状态靠近, 与复数剪切模量变化规律相符。压力老化使沥青相位角降低、弹性成分增加, 掺入橡胶粉和废弃食用油可提升老化沥青粘性成分, 二者可提升沥青抗老化性能、改善耐久性。

参考文献

- [1] 郑丽莎. 湿热环境下沥青老化特性及再生融合影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- [2] 王雨露, 磨炼同, 曲良辰, 等. 长期高温浸水对热再生沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(26): 11409-11422.
- [3] 严园. 基于红外光谱的道路沥青老化性能表征及疲劳寿命预估[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- [4] 曹明明, 陈金蓉, 张洲洋, 陈阳, 苗春泽. 高温多雨区沥青路面裂缝率演化规律研究[J]. 市政技术, 2023, 41(12): 134-139.

- [5] 程实. 甘肃戈壁荒漠区沥青路面温度场及温度疲劳寿命分析研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [6] Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. and Karim, M.R. (2012) Investigation of the Possibility of Using Waste Cooking Oil as a Rejuvenating Agent for Aged Bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, **233**, 254-258.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021>