

超声处置石油沥青的流变学响应及响应机理

王黎明¹, 宋子坤^{1,2}, 周辉³, 魏文¹, 袁浩¹

(1. 东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150010;
3. 黑龙江省机场管理集团有限公司, 哈尔滨 150010)

摘要: 为确定超声处置石油沥青的流变学响应规律, 本文采用系列流变学测试手段, 分析了 3 种典型石油沥青经历超声处置前后的指标变化。研究发现, 超声使沥青高温实时黏度降低 50% 以上, 并具有不可恢复的残留影响; 中温时处置沥青略变软, 触变界限提高; 低温时处置沥青的蠕变能力降低。化学和微观分析表明, 沥青中重质组分含量明显减少, 沥青质聚集体均化分散。超声作用时的选择性不均匀加压加热引起沥青的裂化反应, 是化学和流变性质变化的原因。功率超声对石油沥青的这种显著理化影响有用于温拌、再生、改性加工等道路工程技术的可能。

关键词: 道路工程; 沥青; 功率超声; 流变性质; 响应机理; 裂化反应

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)04-1346-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230712

Rheological response and response mechanism of petroleum asphalt treated with ultrasound

WANG Li-ming¹, SONG Zi-kun^{1,2}, ZHOU Hui³, WEI Wen¹, YUAN Hao¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150010, China; 3. Heilongjiang Airport Management Group Co., Ltd., Harbin 150010, China)

Abstract: In order to determine the rheological response of ultrasonically disposed petroleum asphalt, a series of rheological tests were used to analyze the changes in the indexes of three typical petroleum asphalt before and after undergoing ultrasonic disposal. It was found that ultrasound reduces the real-time viscosity of asphalt at high temperature by more than 50%, and has an irrecoverable residual effect; the disposal asphalt becomes slightly softer and the thixotropic limit is increased at mid-temperature; and the creep capacity of the disposal asphalt is reduced at low temperature. Chemical and microanalysis showed that the content of heavy components in the asphalt was significantly reduced, and asphaltene aggregates were homogenized and dispersed. Selective inhomogeneous pressurized heating during ultrasound action induced a cracking reaction in the asphalt, which was responsible for the changes in chemical and rheological

收稿日期: 2023-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20315); 黑龙江省交通运输科技项目(HJK2023B014-3); 黑龙江省交通运输厅科技项目(20210027); 黑龙江省交投集团科技项目(JT-100000-ZC-FW-2021-0120).

作者简介: 王黎明(1975-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 路面结构与材料. E-mail: wlmdxx@126.com

properties. This significant physicochemical effect of power ultrasound on petroleum asphalt has the potential to be used in road engineering techniques such as warm mixing, recycling, and modified processing.

Key words: road engineering; asphalt; power ultrasound; rheological properties; response mechanism; cracking reaction

0 引言

超声波在介质中传播时将产生机械效应、空化效应、热效应和化学效应等与介质的相互作用,利用这些效应使物体和物性发生变化的超声波应用,称为功率超声技术^[1]。20世纪80年代,苏联报道了经30~60 min超声波处理后,原油黏度能下降20%~30%的研究发现^[2]。1980~1990年代加拿大在解决高稠页岩油低温输送的研究中也发现了超声作用可降低其黏度15%左右的现象^[3]。1990年代以后,国内外大量学者对渣油和稠油的研究也都证明超声处置后的不同石油产品的黏度可显著降低,并具有不可恢复特性^[4-9]。对于超声波使黏稠石油产品黏度降低的机理,目前的研究认为兼具物理作用和化学作用^[10]。超声的空化、机械等效应可打破黏稠石油产品中沥青质的 π 键和氢键,促使沥青质聚集体解聚成更小的分子团;超声的空化效应产生局部的瞬时高温高压区,可以引发沥青质的自由基反应,在还原环境下生成更多轻质组分,进而降低黏度^[11-15]。

石油沥青是渣油进一步加工的产物,在化学成分和化学结构上与其他黏稠石油产品没有本质区别。这种超声波对沥青质聚集体的物理和化学效应必定对熔融沥青产生影响。袁献伟^[16]开展了超声波对苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(Styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)在沥青中的溶胀发育影响的研究,结果表明超声处置可以促进SBS在沥青中的溶胀发育与分散细化。Wang等^[17]、王鹏等^[18]针对超声搅拌(处置)纳米改性沥青进行的研究表明超声可促进纳米材料在沥青中的相容。

功率超声对黏稠石油产品的物理化学作用可能对沥青的流变性质产生影响,具有技术应用潜质。迄今为止,有关超声作用对石油沥青流变性质的影响尚未被关注。本研究采用高温段的黏度测试、中温段的动态剪切流变试验、低温段的弯曲蠕变试验,分析了超声处置前后不同相态道路石

油沥青的流变特性变化,并借助组分分析和光学显微分析从化学和微观层面解释了流变特性变化的内在机理。

1 材料和方法

1.1 石油沥青样品

试验采用50、70和90号3种不同针入度的沥青样品,按我国JTGE20中的试验方法检验了3种样品的基础性能,确定其皆满足JTGF40的道路石油沥青技术标准。检验参数如表1所示。

表1 沥青样品基础性能参数

Table 1 Basic performance parameters of asphalt samples

指标	测值		
	50号	70号	90号
针入度P(25℃,5s, 100g)/0.1mm	44.5	75.1	85.4
针入度指数PI	-1.20	-1.62	-1.63
软化点(R&B)/℃	54.2	48.2	47.0
15℃延度/cm	87	>100	>100
RT 质量变化/%	-0.11	-0.22	-0.51
FO 残留针入度比/%	71	65	66
后 15℃残留延度/cm	19	53	55
产地/来源	塞内加尔/ ERES SENEGAL	中国/中石 化茂名石化 公司	中国/北 方盘锦沥 青公司

1.2 超声处置装置

本研究超声处置试验样品制备采用如图1所示的自制超声处置设备。超声波由4个设置于隔热钢筒底部总功率120W的超声波换能器(右下角小图)和与其连接的超声波发生器产生,超声频率可在28、40、52kHz三档调节。容器内部装入导热油作为超声波传播介质,导热油可通过热护套和自动控温设备调节处置温度(室温至160℃,误差不超过 ± 0.2 ℃)。沥青试样置于浸没在导热油的铝制试管中,装入量不超过导热油液面,每管约可装入20mL。

钢桶容器内的超声声场并非均布,不同处置

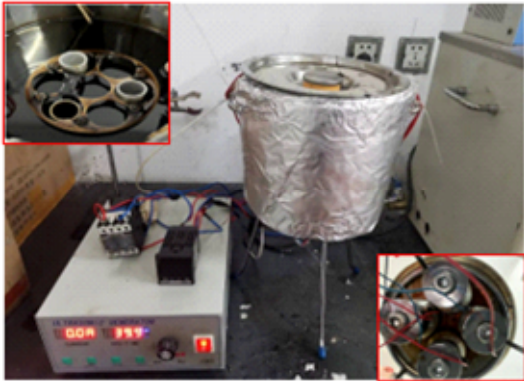


图 1 自制超声处置装置

Fig. 1 Self-made ultrasonic disposal device

频率下实测拟合声场如图 2 所示。水平方向中心和边缘部位的声强相差约 0.21 W/cm^2 , 竖向底部和顶部的声强相差约 0.23 W/cm^2 。考虑样品在声场中的位置, 沥青试样承受竖向加权平均声强约为 0.6 W/cm^2 。

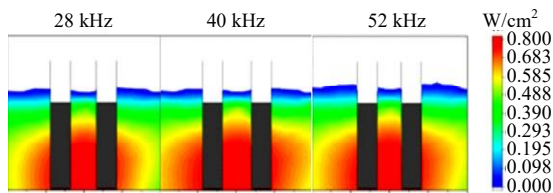


图 2 熔融沥青的实时黏度测试

Fig. 2 Measured sound field at different disposal frequencies

1.3 试验方案和方法

1.3.1 总方案

按研究目标将试验划分为流变响应分析和响应机理分析 2 个子内容。其中, 流变响应又分为高温黏度、中温黏弹特性、低温蠕变特性 3 个方面的流变特性分析; 响应机理分为微观形貌和化学组分分析 2 个方面。将超声处置与未处置作为分析中的 2 个主要变量条件, 对比 3 种沥青对超声处置的响应以辨识其共性规律。

试验首先基于实时黏度和标准黏度测试分析超声处置对黏流态沥青的影响趋势和规律, 并根据影响规律确定最佳的处置组合条件; 其次在最佳组合条件下制备后继试验试样, 开展中温黏弹特性、低温蠕变特性分析以及微观分析和化学分析。为弱化超声处置中老化带来的误差, 对比性的未超声处置样品在制件前经历相同时间和温度的加热条件。

1.3.2 实时高温黏度测试方法

如图 3 所示, 将 Brookfield 旋转黏度计的转子穿过钢桶容器的带孔保温盖板直接浸入沥青试样中。



图 3 熔融沥青的实时黏度测试

Fig. 3 Real-time viscosity test of molten asphalt

试验开始时先预控温至目标温度并稳定 30 min, 之后启动超声波发生器进行 10 min 超声处置, 处置后继续控温 10 min。保持旋转黏度计处于测试状态, 记录试验过程中黏度随时间的动态变化。标定试验表明, 由于转子与主机的挂钩式连接方式, 黏度测试不受超声处置过程的影响, 系统误差不会放大。

1.3.3 中温黏弹特性测试方法

玻璃化温度至软化点区间的中温黏弹特性测试基于动态剪切流变试验方法 (JTG E20 T0628), 分别采用基于动态剪切流变仪 (DSR) 的温度扫描、频率扫描和应变扫描试验测试模量、相位角, 及进行延伸分析。测试用设备为 Anton Paar 的 MCR302。

1.3.4 低温蠕变特性测试方法

玻璃化转化温度以下的低温蠕变特性测试基于弯曲梁流变试验方法 (JTG E20 T0627)。分别测试处置前、后 3 种沥青在不同低温下的蠕变曲线, 获得劲度模量 S 值和蠕变劲度变化率 m 值。测试用弯曲梁流变仪 BBR 为 Cannon 的 TE-BBR。

1.3.5 响应机理分析方法

根据超声处置前、后沥青的化学成分和化学结构的变化进行物理性质影响机理分析。采用化学吸附法 (JTG E20 T0618) 进行沥青化学组分分析; 采用 400 倍透射光学显微镜观察沥青质微观形貌在处置前、后的变化, 设备为 OLYMPUS 的 CX-23。

2 结果与讨论

2.1 沥青高温黏度在超声作用下的实时变化趋势

按1.3.2试验方法,测黏自超声处置前5 min开始,每30 s记录一次,直至控温结束。处置温度105℃、频率40 kHz的典型条件下实时黏度变化如图4所示。

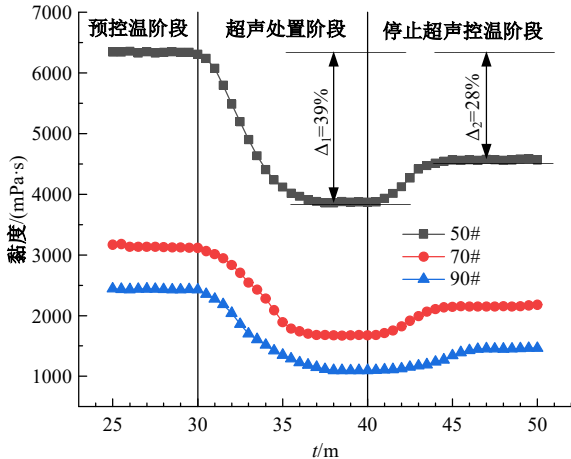


图4 典型处置条件下沥青的实时黏度变化

Fig. 4 Real-time viscosity change of asphalt under typical conditions

实时测定结果表明,自施加超声辐照开始熔融态沥青的黏度即刻降低;随着辐照时间的延长,3种沥青可在5~7 min后达到黏度降低的谷值,并维持稳定状态而不再降低;停止超声辐照后沥青的黏度逐渐提高,5~7 min后到达黏度稳定状态,稳定状态黏度值明显依然低于初始值。在此典型条件下,不同沥青在最大影响状态下的平底谷值黏度分别相当于初始值的61%(50#)、53%(70#)和44%(90#),而残留影响的不可恢复稳定黏度分别相当于初始值的72%(50#)、69%(70#)和60%(90#)。由此可见,道路石油沥青在超声作用下呈现与引言中稠油、渣油等其他黏稠石油产品相同的明显降黏影响,并且这种影响的幅度较大。

施加与停止超声时,黏度的变化几乎马上发生,但均需要一定的时间达到稳定状态。对3种不同沥青来说,达到稳定状态的拐点时间也有明显差异,沥青质含量较高的50#低针入度沥青变化迅速,而沥青质含量较低的90#沥青相对需要更长时间。按文献[19]的研究,沥青质含量显著影响道路石油沥青胶体结构的状态。而胶体结构的不同导致其对超声作用时的响应速度不同。

2.2 超声处置后残留黏度变化的长期时效性

90~110℃是典型的石油沥青储存温度,将典型条件下(105℃,40 kHz)超声处置后的沥青密闭置于105℃环境中,按T0625标准旋转黏度测试方法分别测定其储存0(处置后在自制超声处置钢桶内保温10 min)、0.5、1、3、6、12、24、48 h后的105℃黏度,数据绘制于图5,以表征超声处置后存储时间对黏度变化的影响。

图5显示,处置后沥青在105℃存储3~6 h前黏度有一定程度的增长,相对0 h增长9%~12%;至6 h之后无明显变化,此时黏度分别相当于处置前的78%(50#)、76%(70#)和72%(90#)。此现象表明,处置后高温黏度降低不可经历长期储存恢复,而这种不可恢复的黏度变化必然与超声处置引起的化学成分或化学结构变化关联。

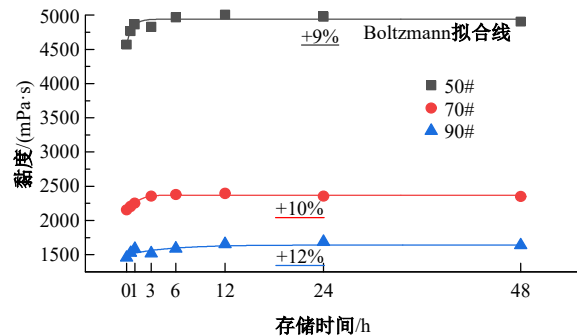


图5 处置后存储时间对黏度的影响

Fig. 5 Effect of storage time on viscosity after ultrasonic treatment

2.3 超声处置条件对沥青高温黏度的影响

相关研究^[12-15]表明,超声空化效应是引起被处置石油产品化学性质变化的根本原因,而功率超声频率和被处置液体黏度(对沥青来说是温度)是2个最显著的空化阈值影响因素^[1]。设计超声频率(28、40、52 kHz,3水平)和处置温度(90~120℃,步长10℃,同时加探索试验的105℃,共5水平)的双变量交叉试验,按1.3.2节实时高温黏度测试方法测试黏度动态变化。分别提取最大降黏率和残留降黏率绘制曲面,如图6所示。其中,最大降黏率和残留降黏率分别为图4中最大影响状态和残留影响状态下黏度变化值与未处置初始黏度值之比。

对比最大降黏率与残留降黏率的图像,可发现存在处置频率和温度的组合使曲面出现峰值。用软件追踪峰值,不同沥青的最大降黏率分别为

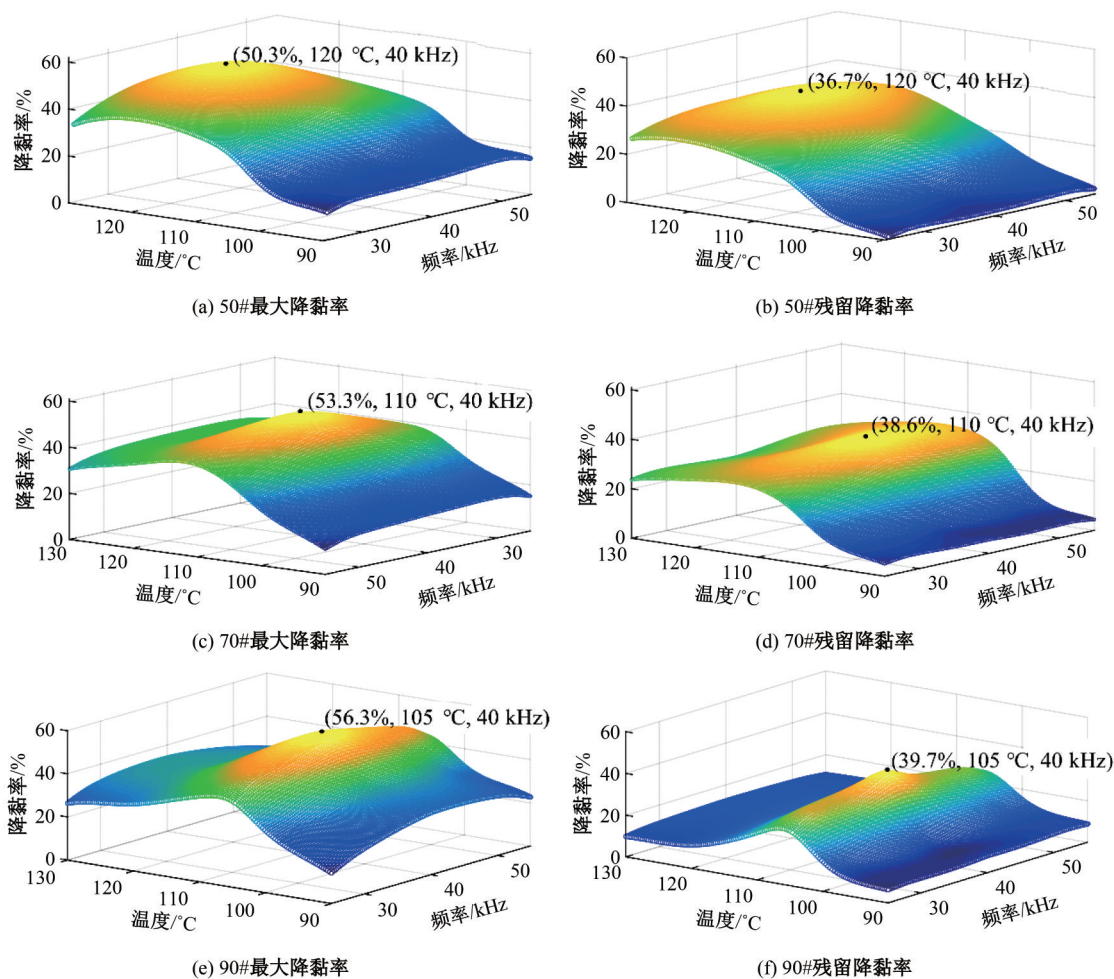


图 6 超声频率和温度双变量条件下的最大降黏率/残留降黏率曲面图

Fig. 6 Surface plot of maximum viscosity reduction/residual viscosity reduction under dual variable conditions of ultrasonic frequency and temperature

50.3% (50#)、53.3% (70#)、56.3% (90#), 残留降黏率分别为 36.7% (50#)、38.6% (70#)、39.7% (90#)。进一步的观察可发现: ①无论在何种处置温度下, 峰值对应的超声频率都在 40 kHz; ②最大降黏率峰值对应的温度分别为 120 °C (50#)、110 °C (70#) 和 105 °C (90#); ③残留降黏率峰值对应的温度条件与最大降黏率相同或接近。

试验现象表明, 沥青也与其他石油产品一样, 其对超声处置条件有依赖性, 在一定功率下, 存在最优的频率和黏度(温度)组合使响应最大, 当处置时间足以使其达到稳定状态时, 降黏率呈现峰值。黏度是沥青流变性的最基本指标, 与其他流变指标存在显著相关性, 基于自制超声处置设备(声强 0.6 W/cm²)和特定的处置时间(10 min), 用于后继流变和微观试验的样品分别在上述频率

(40 kHz) 和不同温度(120 °C (50#)、110 °C (70#) 和 105 °C (90#)) 条件下制备。

2.4 超声处置对中温段黏弹特性的影响

2.4.1 黏弹关系影响

基于动态剪切流变仪 DSR 对最佳超声处置条件下制备的试样和未处置试样(已经历相同加热条件)开展温度扫描和频率扫描试验。温度扫描试验的温度范围按 AASHTO M320 标准体系以 6 °C 为间隔在 34~70 °C 变化, 频率为 10 Hz, 应变 $\gamma=12\%$, 测试结果如图 7 所示。频率扫描试验频率为 1~30 Hz, 温度为 34 °C 和 58 °C, 测试结果如图 8 所示。

由图 7 可知, 在低于 46 °C 的试验温度段, 处置后沥青的复数剪切模量 G^* 明显有所降低, 即同等温度下变软; 处置后沥青的相位角 δ 在整个温度段均降低, 则显示沥青形变滞后变小, 相对变得弹

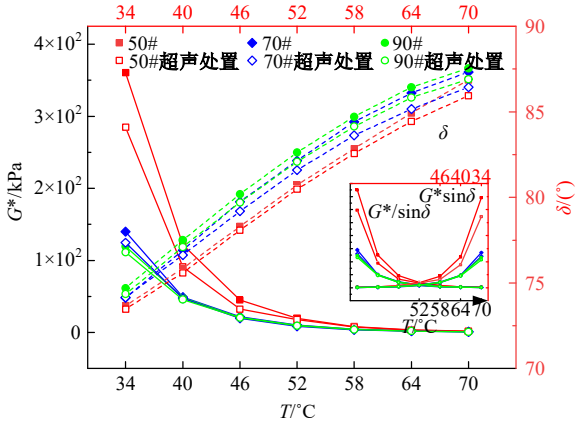


图 7 不同沥青的温度扫描曲线
Fig. 7 Temperature scanning curves of different asphalts

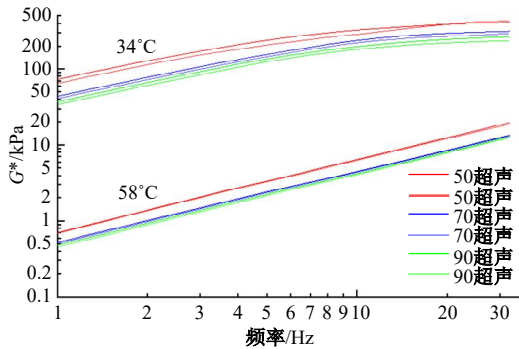


图 8 不同沥青的频率扫描曲线
Fig. 8 Frequency scanning curves of different asphalts

强黏弱,黏弹比例(或受荷载作用时能量损耗部分与储能部分之比)降低。对 3 种不同沥青来说,复数剪切模量的变化以 50#最为明显,70#和 90#则相对较小;50#和 70#沥青的相位角 δ 变化随温度提高略放大,而 90#沥青的略缩小。3 种不同沥青温度扫描模量曲线的区别说明较硬或沥青质含量高则沥青的软硬程度在超声处置后变化较大,这和黏流态温度段的黏度变化趋势相同;相位角曲线随温度变化趋势略有区别,也反应组分和结构的差异带来的影响。

按温度扫描试验结果计算车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 和疲劳因子 $G^*\sin\delta$,如图 7 中小图所示。车辙因子和疲劳因子曲线变化与 G^* 曲线几乎完全相同,这符合未老化基质沥青的特性,即此时抗高温流动变形能力和低温疲劳开裂能力主要由模量控制^[20]。如图 7 所示,无论何种沥青,超声处置前后, $G^*/\sin\delta$ 在高温段的变化(52 °C 以上)已不显著,说明超声处置所引起的沥青抗塑性流动(车辙)的变化在工程领域可忽略。疲劳因子 $G^*/$

$\sin\delta$ 又可称为损失剪切模量,其值越低则加载过程中能量的损失越慢,但 Superpave 之后的很多研究都表明它仅与基质沥青的疲劳相关性较好^[21]。本研究中不同基质沥青超声处置后 $G^*/\sin\delta$ 在低温段(46 °C 以下)小幅度下降,说明超声处置可引起沥青工程耐疲劳性能略有提高。

由图 8 频率扫描曲线可知,在 34 °C 和 58 °C 两个代表温度下,超声处置前后沥青的曲线变化趋势基本一致,表明沥青剪切模量的时间依赖性没有大的变化。超声处置后沥青的频率扫描曲线相对降低,在相对较低的 34 °C 较为明显,在较高的 58 °C 微乎其微,这与温度扫描结果相同。在弹性较强的 34 °C 时,随着加载频率的提高沥青的内部结构会发生变化,使得不同沥青模量曲线呈现向下的反弯,有研究认为这是一种疲劳现象^[22]。34 °C 时,50#沥青对比组在 20 Hz 左右出现交叉,表明在较高的频率下,超声处置沥青的反弯现象相对推迟,耐疲劳性变好。沥青具有时温等效性,通过频率扫描曲线所获得的对超声处置沥青的定性认识与温度扫描一致。

2.4.2 线性黏弹范围变化

黏弹性材料的线性黏弹区是指施加的应力能产生成比例的应变。采用 DSR 的应变扫描试验,应变范围按 $\gamma=0.1\% \sim 50\%$ 变化,以表征弹性部分的储能模量 G' 为指标观测沥青达到剪切变稀(剪坏点)时的极限应变。图 9 是不同沥青 34 °C 时的应变扫描曲线。

图 9 中,超声处置后不同沥青的储能模量 G' 明显降低,90#的线性黏弹区几乎没有变化,70#出现剪坏点(数据线的弯曲点)的极限应变略有推迟,而 50#沥青的剪坏点推迟明显。通过软件对应变扫描曲线拟合再求二阶导数可以较容易地确定确切的拐点,由拐点数据可得不同超声处置沥

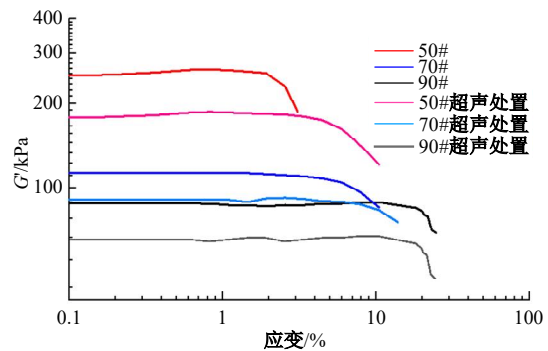


图 9 不同沥青的 34 °C 应变扫描曲线
Fig. 9 34 °C strain scan curve of different asphalts

青的剪坏极限应变相对未处置分别放大约 2.5 倍(50#)、1.3 倍(70#)和 1.05 倍(90#)。

线性黏弹区的变化意味着黏弹材料物性的变化,即沥青的化学成分(组分)和化学结构必然发生了变化,进而在剪坏点这样的宏观流变指标方面有所反应。通常线性黏弹区的放大意味着沥青触变界限的提高,如沥青老化前、后线性黏弹区的区别^[23],此时较大变形才会达到损伤状态。经过超声处置后,沥青的触变界限向高应变推迟,这对工程应用中沥青的抗疲劳是有利的。

2.5 超声处置对低温段蠕变特性的影响

采用超声处置前、后样品,开展基于弯曲梁流变仪 BBR 的蠕变试验。试验温度选取 -18~-6 °C,从经验上来说处于试验所用沥青的玻璃化转化点之下。由 BBR 蠕变试验获得的 60 s 蠕变劲度 S 值和蠕变劲度的变化率 m 值分别绘于图 10 和图 11。

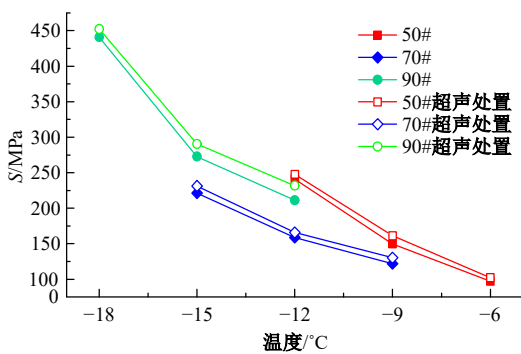


图 10 60 s 劲度模量变化曲线

Fig. 10 60 s strength modulus curves

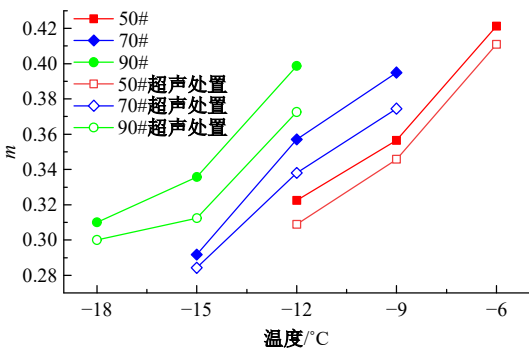


图 11 m 值变化曲线

Fig. 11 m value curves

两图中,无论何种沥青,超声处置后 S 值均提高, m 值均降低,这意味着经历超声处置后的沥青在玻璃态时的弹性相对增强,蠕变和应力松弛能力下降,变得更加硬脆。在工程应用中,如根据 AASHTO M320 中 S 值不高于 300 和 m 值不低于

0.3 的数量级指标判断,则超声处置后沥青的抗低温开裂性能变化不显著。

从 2.2 和 2.3 两节中高温到低温的全温度段对比试验结果来看,超声对不同温度段流变性能的影响显著性与沥青的种类相关,50# 沥青的处置响应最大,70# 沥青次之,90# 沥青最小。

基于黏弹态 52 °C 以上车辙因子、46 °C 以下疲劳因子、34 °C 频扫曲线反弯特征、应变扫描剪坏点,以及玻璃态的蠕变劲度分值与变化率 m 值的分析,超声处置后沥青作为道路工程材料的抗车辙性能略降低、耐疲劳性能略提高、抗低温开裂能力略降低。结合黏流态黏度的变化,超声处置沥青总体上表现为施工期流动性明显提高而服役期性能变化不显著。这种流变性能变化趋势使超声处置有用于温拌技术的可能。

2.6 超声处置沥青的流变性能变化机理分析

前述从高温到低温的宏观流变性质显著变化反映出超声处置对沥青的化学性质产生了不可逆的影响,现依据组分分析和光学显微分析验证这一推理,并初步对这一影响进行量化。

2.6.1 组分分析

图 12 是依据 SARA 化学吸附法获得的超声处置前、后沥青四组分的变化。与处置前沥青相比,超声处置后沥青中沥青质 As 和胶质 Re 的含量明显降低,而饱和分 Sa 和芳香分 Ar 的含量明显提高。相对来看,沥青质的含量普遍降低 50%~60%,胶质成分降低 22%~26%,芳香分成分提高 42%~44%,饱和分含量提高 13%~19%。

引入石油产品分析中胶体稳定的概念,计算沥青的胶体稳定指数 CI。CI 是石油产品胶体中的分散介质质量分数(芳香分和胶质)与分散相质

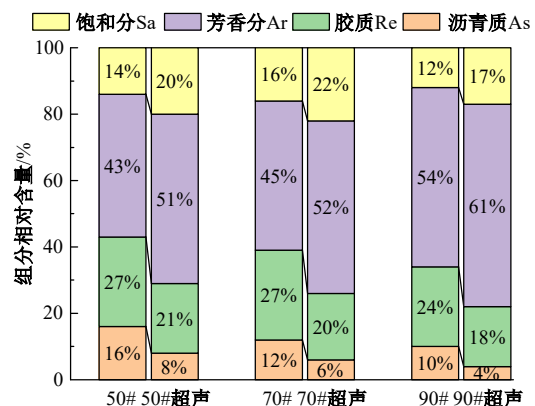


图 12 不同沥青的组分含量变化

Fig. 12 Components content changes of different asphalts and ultrasonic disposal asphalt

量分数(饱和分和沥青质)的比值,CI值较低时,胶体结构中缺少足够的芳香分来溶解沥青质,胶体偏向于凝胶型结构,结构稳定性差;而CI值较高时,胶体结构中的沥青质能够较好地分散于芳香分中,偏向于形成溶胶型结构^[24],结构稳定性更好。如表2所示,计算结果表明不同沥青的CI值在超声处置后皆有明显提高,提高幅度分别为10.2%(50#)、1.4%(70#)和6.1%(90#),沥青质含量高的50#变化最明显。

2.6.2 微观形貌分析

按1.3节试验方案和方法,采用400倍光学透射显微镜对沥青试样的玻片进行观察,采集的照

表2 不同沥青在超声处置前后的胶体稳定指数CI值
Table 2 CI values of colloidal stability index of different asphalt before and after ultrasonic treatment

条 件	50#	70#	90#
超声处置前CI	2.33	2.57	3.55
超声处置后CI	2.57	2.61	3.76
处置后CI值相对变化/%	10.2	1.4	6.1

片如图13所示。

同倍率显微图片显示:超声处置前3种沥青中普遍存在簇状的大颗粒沥青质聚集体,而处置后明显均化分散为小颗粒。

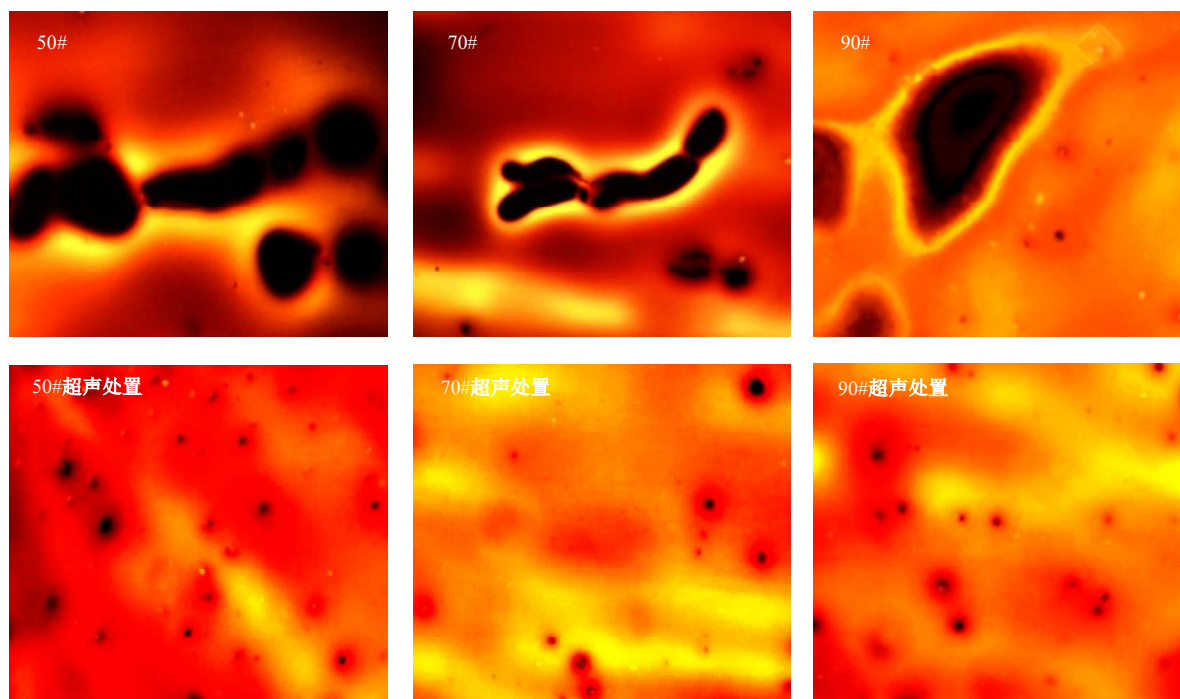


图13 不同沥青的400倍显微图片

Fig. 13 400× microscopic picture of different asphalt

根据组分和微观形貌两方面的变化,由文献[12~15]针对渣油、稠油的相关研究,推断超声的空化效应会产生以高密度凝结核——沥青质聚集体为核心的选择性不均匀加压加热,进而局部达到裂化临界(高于350℃^[12])而发生裂化反应,生成更多轻质不饱和成分;机械振动效应与空化效应协同,共同破坏了沥青质胶团的化学联结,使原有大分子聚集体解聚分散,转化为相对轻质的组分。解聚效应或振动搅拌在施加超声时最显著,裂化反应持续发生,在化学反应达至平衡时可使熔融沥青黏度降低到最大幅度而不再明显变化;停止超声作用后化学结构重构,有些成分也会发

生逆向的氧化反应,但不能完全恢复初始状态。这种化学成分与结构上的影响是超声处置沥青宏观流变指标变化的根本原因。

3 结 论

(1)在高温黏流态区间,超声波处置可降低高温黏流态沥青的黏度,并在超声处置后仍然具有不可恢复的残留影响。这种现象非常显著,处置中沥青的实时黏度可降低50%~56%,停止超声后短期静置的降黏幅度达36%~39%,残留影响不可经历长期储存恢复。超声降黏效果与超声频率、处置温度、处置时间相关,存在最佳组合使幅

度达到最大。

(2)中温高弹态区间,超声处置后沥青的剪切模量和黏弹比例降低,相对变得软化和弹强黏弱。超声处置沥青的剪切变稀极限向高应变区推迟,触变界限提高。

(3)低温玻璃态区间,超声处置沥青的弹性相对增强,蠕变和应力松弛能力下降。

(4)超声对不同温度段流变性能的影响显著性与沥青的种类相关,50#沥青的处置响应最大,70#沥青次之,90#沥青最小。

(5)组分及微观形貌分析表明,超声处置后沥青中重质组分明显减少而轻质组分增加,胶体体系向更稳定的溶胶型发展,同时簇状的大颗粒沥青质聚集体均化分散为小颗粒。沥青化学和微观性状的这种变化是流变性变化的根本原因,是超声空化和振动对沥青的选择性不均匀作用而引起的裂化和解聚反应的表现。

(6)基于道路工程应用标准判断,超声处置沥青总体上表现为施工期流动性明显提高而服役期性能变化不明显,这种影响效应与沥青温拌技术相符,使功率超声处置有用于温拌技术的可能;同时,超声作用使沥青发生了与老化相反的氢化裂化化学反应,使功率超声处置有可能用于老化沥青再生技术,以及其他可利用氢化裂化化学反应的协同改性技术。

参考文献:

- [1] Suslick K S, Price G J. Applications of ultrasound to materials chemistry[J]. Annual Review of Materials Science, 1999, 29(1): 295-326.
- [2] 孙仁远,王连保,彭秀君,等.稠油超声波降黏试验研究[J].油气田地面工程,2001,20(5):22-23.
Sun Ren-yuan, Wang Lian-bao, Peng Xiu-jun, et al. Experimental study on ultrasonic viscosity reduction of thick oil [J]. Oil and Gas Field Surface Procedure, 2001, 20(5): 22-23.
- [3] Mehdi R, Jafar Q. Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltenic crude oil[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020, 153:1 289-1295.
- [4] Abarasi H. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2014, 4(3): 327-336.
- [5] 黄序韬,梁淑寰.声波采油的机理与特点研究[J].石油学报,1993(4):110-116.
Huang Xu-Tao, Liang Shu-Huan. Study on the mechanism and characteristics of acoustic wave oil recovery[J]. Journal of Petroleum, 1993(4): 110-116.
- [6] Shedid S A. An ultrasonic irradiation technique for treatment of asphaltene deposition[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2004, 42(1): 57-70.
- [7] Guo X, Du Z, Li G, et al. High frequency vibration recovery enhancement technology in the heavy oil fields of China[C]//SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting, Bakersfield, California, USA, 2004.
- [8] 黄欣桐,周翠红,郭艳彤,等.超声应用于超重质渣油降黏的实验研究[J].北京石油化工学院学报,2018,26(1):9-13.
Huang Xin-tong, Zhou Cui-hong, Guo Yan-tong, et al. Experimental study on ultrasound application to viscosity reduction of super-heavy residue oil[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2018, 26(1): 9-13.
- [9] Huang X T, Zhou C H, Suo Q Y, et al. Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 41:661-669.
- [10] Mousavi S M, Ramazani A, Najafi I, et al. Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltic crude oils[J]. Petroleum Science, 2012, 9(1): 82-88.
- [11] 张龙力,杨国华,阙国和,等.超声波处理对渣油胶体稳定性的改善作用初步研究[J].石油学报:石油加工,2010,26(增刊1):203-206.
Zhang Long-li, Yang Guo-hua, Que Guo-he, et al. Preliminary study on the improvement effect of ultrasonic treatment on the stability of residue colloid[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing), 2010, 26 (Sup. 1): 203-206.
- [12] 王瑞和,万春浩,周卫东,等.空化射流降低稠油黏度机制[J].中国石油大学学报:自然科学版,2019,43(5):101-107.
Wang Rui-he, Wan Chun-hao, Zhou Wei-dong, et al. Mechanism of reducing viscosity of heavy oil by cavitation jet[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2019, 43(5): 101-107.
- [13] Hamidi H, Rafati R, Junin R B, et al. A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs[J]. Journal of Petro-

- leum Exploration and Production Technology, 2012, 2(1): 29-36.
- [14] 寇杰, 王冰冰, 张益华. 原油超声降黏机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2019, 43(5): 185-190.
Kou Jie, Wang Bing-bing, Zhang Yi-hua. Ultrasonic viscosity reduction mechanism of crude oil[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2019, 43(5): 185-190.
- [15] 韦胜超, 姚志林, 卞贺, 等. 氢键作用对沥青质超分子聚集的影响[J]. 石油学报: 石油加工, 2021, 37(3): 556-565.
Wei Sheng-chao, Yao Zhi-lin, Bian He, et al. Effect of hydrogen bonding on asphaltene supramolecular aggregation[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing), 2021, 37(3): 556-565.
- [16] 袁献伟. 超声波强化沥青发育技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2019.
Yuan Xian-wei. Research on the development technology of ultrasonic reinforced asphalt [D]. Harbin: School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] Wang L M, Song Z K, Gong C. Power ultrasound on asphalt viscoelastic behavior analysis[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: No. e01012.
- [18] 王鹏, 姜海龙, 王健, 等. 碳纳米管/SBS复合改性沥青制备工艺的研究[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(6): 21-26.
Wang Peng, Jiang Hai-long, Wang Jian, et al. Study on preparation process of carbon nanotube/SBS composite modified bitumen[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34(6): 21-26.
- [19] 唐伯明, 丁勇杰, 朱洪洲, 等. 沥青分子聚集状态变化特征研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 50-56, 76.
Tang Bo-ming, Ding Yong-jie, Zhu Hong-zhou, et al. Study on the characteristics of asphalt molecular aggregation state change[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 50-56, 76.
- [20] 詹小丽, 张肖宁, 卢亮. 沥青低温黏弹性能的预测[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(3): 530-534.
Zhan Xiao-li, Zhang Xiao-ning, Lu Liang. Prediction of low-temperature viscoelastic properties of bitumen[J]. Journal of Jilin University(Engineering Science), 2008, 38(3): 530-534.
- [21] 孙艳娜, 李立寒, 汪于凯. 沥青疲劳性能评价指标[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 1102-1107.
Sun Yan-na, Li Li-han, Wang Yu-kai. Evaluation index of fatigue performance of asphalt[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6): 1102-1107.
- [22] 董雨明, 谭忆秋. 硬质沥青混合料的动态黏弹特性[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 18-24.
Dong Yu-ming, Tan Yi-qiu. Dynamic viscoelastic characteristics of hard asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology, 2015, 32(6): 18-24.
- [23] 张喜军, 全配配, 蔺习雄, 等. 基于线性振幅扫描试验评价硬质沥青的疲劳性能[J]. 材料导报, 2021, 35(18): 18083-18089.
Zhang Xi-jun, Tong Pei-pei, Lin Xi-xiong, et al. Evaluation of fatigue properties of hard asphalt based on linear amplitude scanning test[J]. Materials Reports, 2021, 35(18): 18083-18089.
- [24] 赵泽鹏, 李源, 李梦园, 等. 沥青老化过程中组分与微观形貌演变研究[J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(1): 59-64.
Zhao Ze-peng, Li Yuan, Li Meng-yuan, et al. Study on component and micromorphological evolution during asphalt aging[J]. Refining Technology and Engineering, 2022, 52(1): 59-64.