

文章编号:1007-9629(2024)08-0720-07

# 硫化杜仲胶改性沥青的微观结构及热解过程分析

崔世超, 郭乃胜\*, 张军, 褚召阳

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**以天然植物基杜仲胶(EUG)为原料,制备了硫化杜仲胶改性沥青(VEUGMA),并对其微观结构和热解过程进行了研究.结果表明:与基质沥青相比,VEUGMA具有更小的针入度、更高的软化点、更大的延度和黏度,以及较好的高温抗变形和低温抗裂能力;与基质沥青相比,VEUGMA蜂窝结构数量更多且尺寸更小,均方根粗糙度更小,黏附力更大,热解温度更高,以及CO<sub>2</sub>和CO释放量更小;在基质沥青中加入6%EUG和3.5%硫磺(以EUG质量计)取得的改性效果最佳.

**关键词:**硫化杜仲胶改性沥青;交联网络;微观结构;热重-傅里叶红外联用;热解

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.007

## Analysis of Microstructure and Pyrolysis Process of Vulcanized Eucommia Ulmoides Gum Modified Asphalt

CUI Shichao, GUO Naisheng\*, ZHANG Jun, CHU Zhaoyang

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Vulcanized eucommia ulmoides gum modified asphalt (VEUGMA) was prepared by natural plant-based eucommia ulmoides gum (EUG), and the microstructure and pyrolysis process of VEUGMA were studied. The results show that VEUGMA is of lower penetration, higher softening point, larger ductility and viscosity, better deformation resistance at high temperature and cracking resistance at low temperature than matrix asphalt. Compared to matrix asphalt, VEUGMA has larger number and smaller size of honeycomb structures, lower root mean square roughness, greater adhesion, higher pyrolysis temperature, and less CO<sub>2</sub> and CO release. The modification effect is the best when 6% EUG and 3.5% sulfur (calculated by EUG quality) are added to the matrix asphalt.

**Key words:** vulcanized eucommia ulmoides gum modified asphalt; crosslinking network; microstructure; thermogravimetric-Fourier transform infrared; pyrolysis

杜仲胶(EUG)是中国独有的一种天然植物基经济作物,具有橡塑二重性,但由于其具有规整的柔性链结构,导致室温下易结晶,严重阻碍了推广应用<sup>[1-4]</sup>.通过合理的技术手段破坏EUG的结晶能力,即可为其成为沥青改性剂提供可能.

Li等<sup>[5-6]</sup>率先开展了EUG改性沥青的研究工作,尝试了硫化改性、接枝改性、密炼改性和复合改性等

多种工艺,发现对EUG进行硫化改性可以显著提高硫化杜仲胶改性沥青(VEUGMA)的高低温性能,且VEUGMA存在最佳交联区间.EUG接枝改性后可部分取代苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS),当EUG掺量为1.5%时,其与SBS复合改性效果最佳<sup>[7]</sup>.将EUG与橡胶粉进行密炼改性,可以显著提高沥青的弹性、黏度、定伸应力、软化点、抗车辙

收稿日期:2023-10-26; 修订日期:2023-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308084);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132017029);大连海事大学“双一流”建设专项项目(BSCXXM021);辽宁省公路科技创新重点科研项目(201701);大连市科技创新基金项目(2020JJ26SN062);辽宁省教育厅基金项目(LJKMZ20220922);大连市重点科技研发计划项目(2023YF22SN043)

第一作者:崔世超(1993—),男,内蒙古赤峰人,大连海事大学博士生.E-mail: cuisc@dlmu.edu.cn

通讯作者:郭乃胜(1978—),男,辽宁鞍山人,大连海事大学教授,博士生导师,博士.E-mail: naishengguo@126.com

能力和储存稳定性<sup>[8-9]</sup>.近年来,不少学者对EUG改性沥青进行了研究.Li等<sup>[10-12]</sup>制备了硫化杜仲胶(VEUG),将其与沥青共混,发现VEUGMA以物理改性为主,仅有少量化学反应,且VEUGMA具有较好的热稳定性和抗老化能力.目前关于VEUGMA的研究均是先制备VEUG,再将其与沥青共混,这种方法不利于EUG在沥青中形成交联网络,也没有考虑硫化助剂对硫化效果的影响.

本文提出了一种新工艺,以天然植物基EUG为原料,制备了VEUGMA,并对其微观结构和热解过程进行研究,以期揭示VEUGMA的微观结构特性.

## 1 试验

### 1.1 原材料

90<sup>#</sup>沥青(MA);天然植物基EUG,将其制成约2 500  $\mu\text{m}$ (60目)大小的颗粒.硫化助剂包括:硫化剂硫磺(S);硫化活化剂硬脂酸(SA)和ZnO;硫化促进剂N-环己基-2-苯并噻唑次磺酰胺(CBS);硫化防老剂N-异丙基-N'-苯基对苯二胺(IPPD).

### 1.2 VEUGMA的制备

首先,将基质沥青加热至145 $^{\circ}\text{C}$ ,加入EUG搅拌30 min,置于145 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中溶胀发育1 h;其次,在160 $^{\circ}\text{C}$ 、4 000 r/min下高速剪切45 min,置于烘箱中静置消除气泡;最后,按表1的硫化配方<sup>1)</sup>(以EUG的质量计)加入硫化助剂,剪切15 min后置于145 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中发育2 h,即制得VEUGMA.

表1 硫化配方  
Table 1 Vulcanization formula(by mass)

| Unit: % |     |     |      |          |
|---------|-----|-----|------|----------|
| SA      | ZnO | CBS | IPPD | S        |
| 2       | 5   | 2   | 2    | <i>x</i> |

由大量试验发现,硫化EUG中最佳硫磺用量 $w_s$ (以EUG的质量计)与VEUGMA中EUG用量 $w_{\text{EUG}}$ (以沥青的质量计)存在如图1所示的关系,因此本文选取不同掺量EUG在最佳硫磺用量下的VEUGMA为研究对象.根据 $w_s/w_{\text{EUG}}$ 将VEUGMA命名为2.5/8.0VEUGMA、3.0/6.0VEUGMA、3.5/6.0VEUGMA和4.0/4.0VEUGMA.

### 1.3 试验设计

根据JTG E20—2011《公路沥青及沥青混合料实验规程》测试了沥青的三大指标(25 $^{\circ}\text{C}$ 针入度、软化点和15 $^{\circ}\text{C}$ 延度)和布氏旋转黏度(135 $^{\circ}\text{C}$ ,下文简称

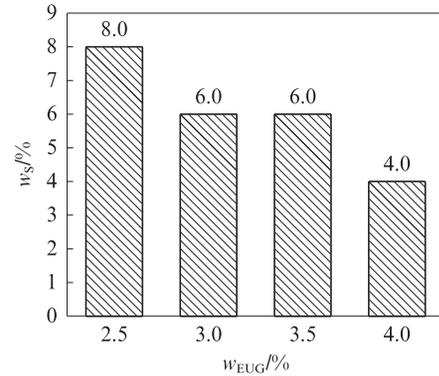


图1 杜仲胶用量与最佳硫磺用量关系图

Fig. 1 Relationship between EUG dosage and optimal sulfur dosage

黏度).原子力显微镜(AFM)测试用布鲁克原子力显微镜的QNM模式进行,扫描频率1 Hz,扫描范围5  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ .热重(TG)-傅里叶红外(FTIR)测试温度范围为40~700 $^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,光谱的分辨率为4  $\text{cm}^{-1}$ ,波数范围为4 000~600  $\text{cm}^{-1}$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 基础物理性能分析

基质沥青和VEUGMA的基础物理性能指标见图2.由图2可见,与基质沥青相比,VEUGMA的针入度更小,软化点温度更高,延度和黏度更大.说明VEUGMA具有更好的高温抗变形和低温抗裂能力,这主要是因为通过剪切可以使EUG均匀分散在沥青相中,当加入硫化助剂后,分散在沥青相中的EUG颗粒在硫化促进剂、硫化活化剂的作用下迅速与硫磺发生交联反应,使分散在沥青相中的EUG颗粒交联,破坏了EUG的结晶能力,形成了密实的交联网络.当沥青受外力作用发生变形时,交联网络可以承担大部分应力,使沥青的抗变形能力得到大幅度提升.由图2还可见,不同VEUGMA的针入度、软化点和延度相差较小,但黏度随着EUG掺量的增加显著增大.这是因为硫化交联反应只能交联部分EUG,并不能使全部EUG发生交联,而EUG在高温下分子链中的C=C断裂,使其失去结晶能力;而未参与硫化交联反应的EUG表现出橡胶特性,从而使VEUGMA的黏度随着EUG掺量的增加而增大.

### 2.2 AFM结果分析

#### 2.2.1 微观形貌分析

基质沥青和VEUGMA的AFM形貌图见图3.由图3可见:基质沥青和VEUGMA中均出现了黑白

1) 文中涉及的配方、掺量等均为质量分数.

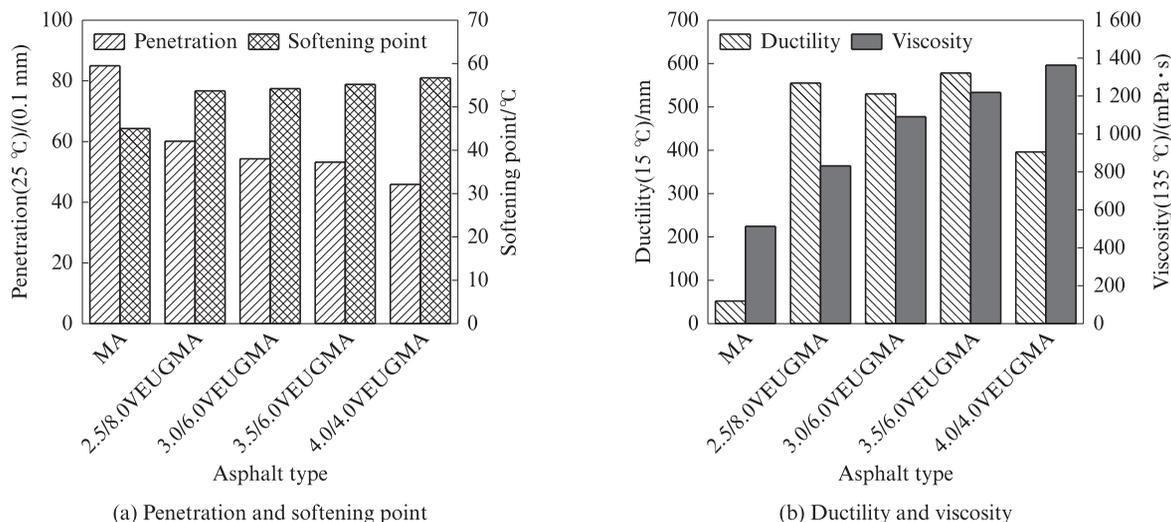


图2 基质沥青和VEUGMA的基础物理性能指标  
Fig. 2 Basic physical performance indicators of MA and VEUGMA

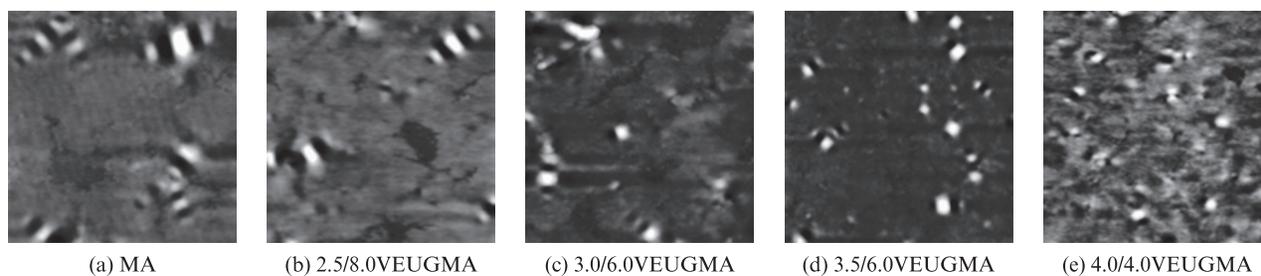


图3 基质沥青和VEUGMA的AFM形貌图  
Fig. 3 AFM morphologies of MA and VEUGMA

相间的蜂型结构;与基质沥青相比,VEUGMA的蜂型结构尺寸相对更小,数量更多,分散更均匀.已有研究<sup>[13]</sup>表明,蜂型结构的形成主要是以沥青质为核心的蜡结晶现象,其中明亮部分为坚硬的沥青质,而暗色部分为较软的沥青质.基质沥青经EUG硫化改性后,沥青质的含量降低,改善了沥青质的团聚现象,并阻止其形成更大的晶核,从而使蜂型结构的尺寸有所减小.同时,EUG可以吸收沥青中的轻质组分和蜡分,使得用来结晶形成蜂型结构的蜡分较少,同时EUG中大长链分子和交联网络使沥青质难以发生大规模团聚,从而使沥青质被均匀分散在沥青中,难以形成形状规则和体积较大的蜂型结构.根据现代胶体理论,胶体分散越均匀,其宏观性能越优异,验证了前述VEUGMA具有优异基础物理性能的结论.

### 2.2.2 微观形貌定量分析

沥青表面存在细微起伏和峰谷交错的情况,采用均方根粗糙度 $R_q$ 来表征改性沥青的粗糙程度. $R_q$ 值越大,改性沥青相态差异性越大,相分离现象越显著,结构稳定性越差,弹性性能越弱<sup>[14]</sup>.

基质沥青和VEUGMA的均方根粗糙度见图4.

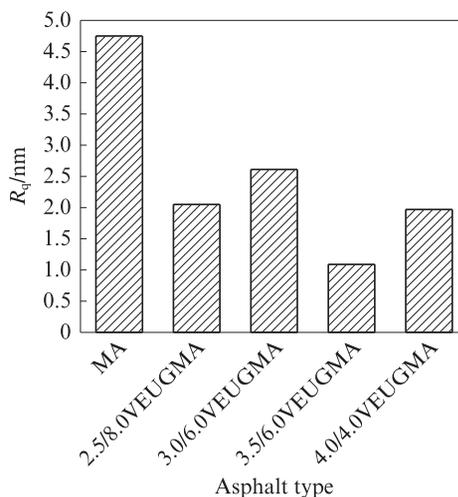


图4 基质沥青和VEUGMA的均方根粗糙度  
Fig. 4  $R_q$  of MA and VEUGMA

由图4可见:基质沥青的 $R_q$ 值最大,这是因为其沥青质可以不受阻挡地发生团聚,形成尺寸较大的蜂型结构,导致其 $R_q$ 值较大;与基质沥青相比,VEUGMA的 $R_q$ 值较小,说明其相态较稳定,不易发生相分离,具有良好的弹性性能,可以有效抵抗外力,从而提升沥青的抗变形能力.主要原因为:一方面,由于交联网络的存在,VEUGMA阻止沥青质的大规模团聚,

从而使沥青结构内部分散更均匀;另一方面,未参与硫化交联的EUG颗粒吸收沥青中的轻质组分,使EUG颗粒溶胀,沥青的表面更加均匀稳定.综合比较发现,3.5/6.0VEUGMA的 $R_q$ 值最小,说明其抗变形能力最强,这与基础物性性能分析结果一致.

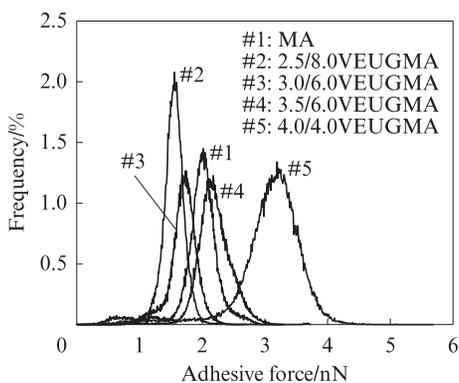
### 2.2.3 微观力学特性分析

基质沥青和VEUGMA的AFM黏附力(下文简称黏附力)统计结果见图5.由图5可见:沥青的黏附力呈正态分布,且存在唯一峰值,说明EUG分布较均匀,具有稳定的相态结构;基质沥青的黏附力分布

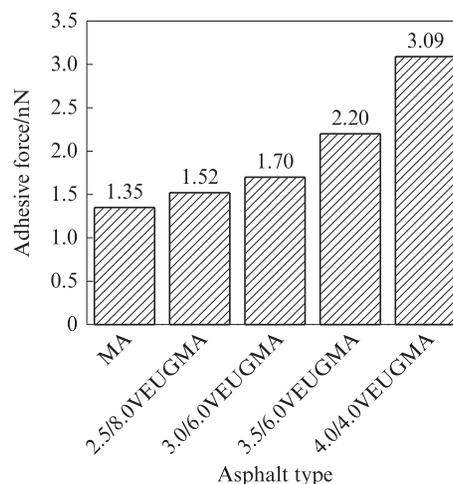
带较窄,主要在1.5~2.3 nN左右,VEUGMA的分布带宽度较基质沥青略宽;VEUGMA的黏附力均大于基质沥青,说明EUG和硫磺增加了沥青的黏附能力.

### 2.2.4 宏观黏度与微观黏附力相关性分析

对沥青的黏度与黏附力进行相关性分析,结果见图6.由图6可见:微观黏附力与宏观黏度的相关系数 $R^2$ 为0.74;随着微观黏附力的增大,宏观黏度也呈现增大的趋势.综上,VEUGMA具有良好的微观结构特性,且可以反映出其具有良好的宏观性能.



(a) Distribution of adhesive force



(b) Adhesive force

图5 基质沥青和VEUGMA的AFM黏附力统计结果

Fig. 5 Statistical results of AFM adhesive force between MA and VEUGMA

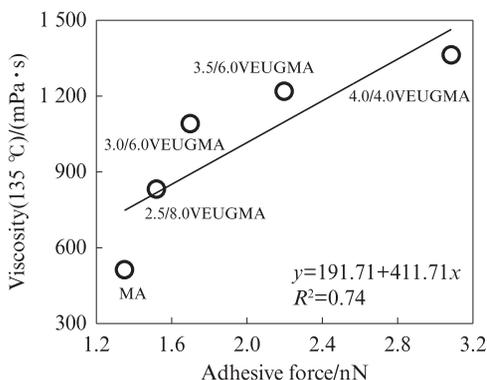


图6 黏度与黏附力相关性

Fig. 6 Correlation between viscosity and adhesive force

### 2.3 VEUGMA的热解过程分析

基质沥青和VEUGMA的TG-DTG曲线见图7.由图7可见:沥青的热解过程包括质量失重平稳阶段和迅速失重阶段;60 °C左右出现的失重峰是由于水分的蒸发和油分的分解引起的,且此温度下基质沥青的失重更明显;沥青在250 °C左右开始分解,并出现了2个较大的失重阶段——250~450、450~550 °C,此时沥青开始分解形成热分解产物,在250~

450 °C的失重可能是由于饱和分和芳香分的挥发引起,在450~550 °C的失重是由沥青质的分解引起的,由于沥青质含有苯环结构,而苯环结构稳定性良好,所以分解温度较高<sup>[15]</sup>;当温度达到600 °C以上时,曲线趋于平稳,这是因为沥青质的进一步分解和残基的碳化;基质沥青在250~450、450~550 °C处的失重速率均较VEUGMA快,说明VEUGMA具有更好的热稳定性,这是由于交联网络的存在,当温度升高时交联网络的裂解重组会消耗部分能量,使VEUGMA热解所需的能量变小,提升了其热稳定性.

根据TG-DTG曲线,可以得到沥青初始分解、失重5%、失重10%、失重50%和终止分解5个特征点对应的温度 $T_{Initial}$ 、 $T_{5\%}$ 、 $T_{10\%}$ 、 $T_{50\%}$ 、 $T_{Terminate}$ ,结果见表2.由表2可见,在相同失重水平下,VEUGMA的特征失重温度比基质沥青更高.可见VEUGMA具有更好的热稳定性,这与交联网络的存在有直接关系.

不同特征失重温度下基质沥青和VEUGMA的红外谱图见图8.由图8可见:沥青的热解产物主要有

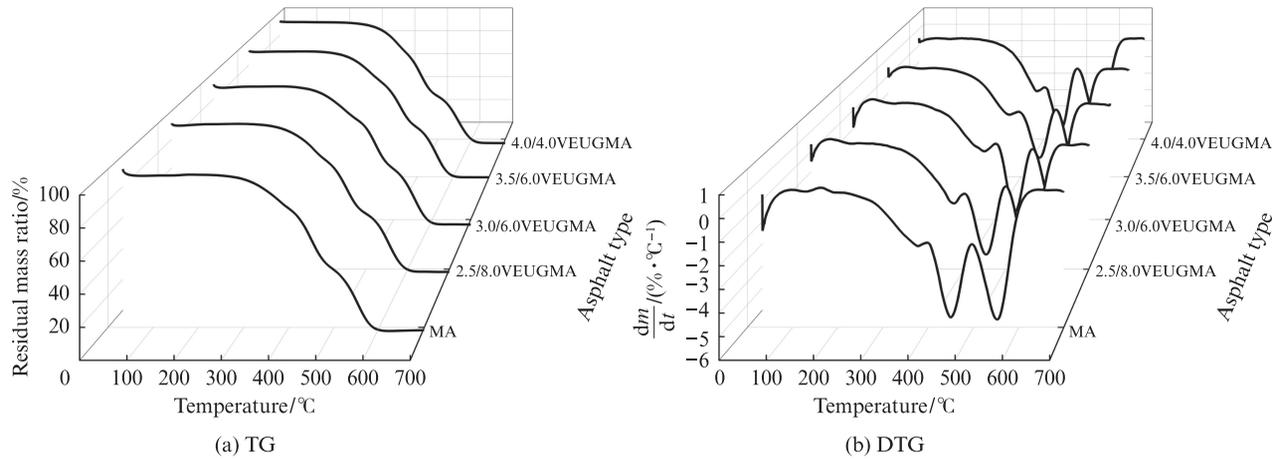
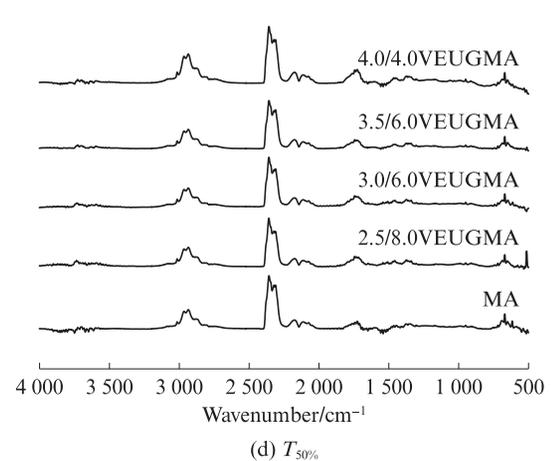
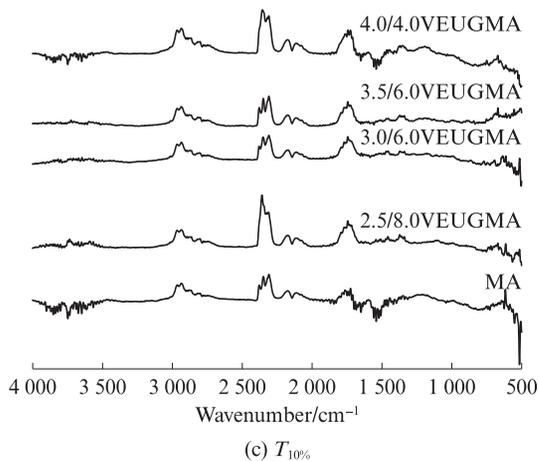
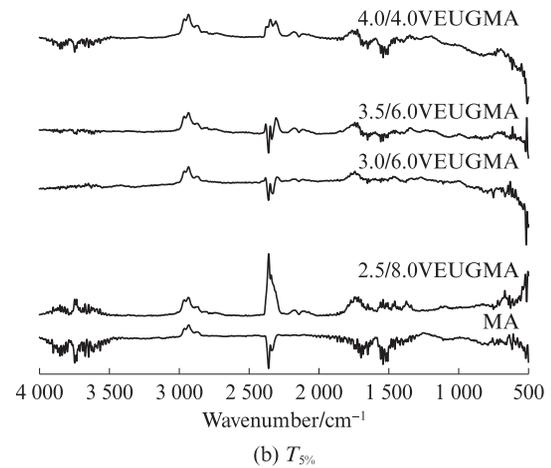
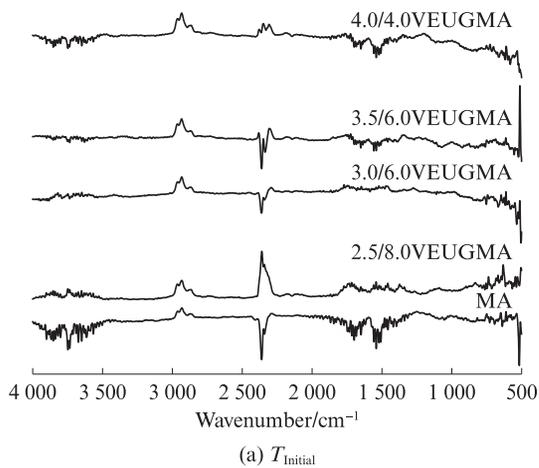


图7 基质沥青和VEUGMA的TG-DTG曲线  
Fig.7 TG-DTG curves of MA and VEUGMA

表2 沥青的特征失重温度

Table 2 Characteristic weightlessness temperature of asphalts

| Asphalt type  | $T_{\text{Initial}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{50\%}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{Terminate}}/^{\circ}\text{C}$ |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| MA            | 268.85                                | 275.35                     | 330.85                      | 459.85                      | 610.35                                  |
| 2.5/8.0VEUGMA | 295.24                                | 309.74                     | 342.74                      | 462.74                      | 621.24                                  |
| 3.0/6.0VEUGMA | 287.22                                | 298.22                     | 333.22                      | 463.22                      | 622.72                                  |
| 3.5/6.0VEUGMA | 296.98                                | 309.98                     | 338.98                      | 463.68                      | 623.98                                  |
| 4.0/4.0VEUGMA | 299.38                                | 313.38                     | 345.88                      | 457.38                      | 632.88                                  |



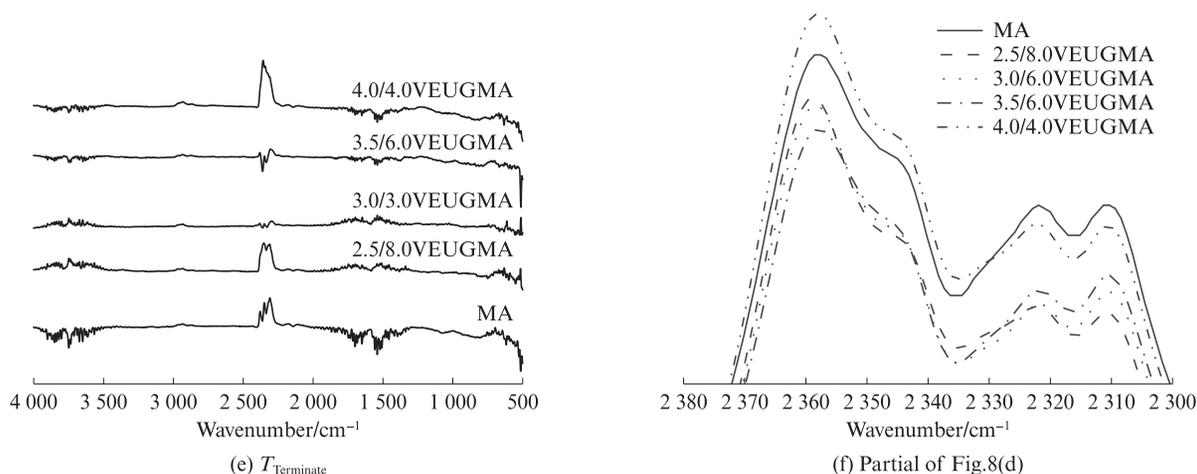


图8 特征失重温度下基质沥青和VEUGMA红外图谱  
Fig. 8 FTIR spectra of MA and VEUGMA under characteristic weight loss temperature

H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、NO、NO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和SO<sub>2</sub>; 3 640~3 711 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰是由O—H的伸缩振动引起的,来源于沥青中H<sub>2</sub>O的热解;2 850 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰主要是由于CH<sub>3</sub>、=CH<sub>2</sub>和C—H伸缩振动引起的,与CH<sub>4</sub>的形成有关;2 300、650 cm<sup>-1</sup>处的强吸收峰是由于—COOH、C=H的伸缩振动引起,与CO<sub>2</sub>的形成有关<sup>[16]</sup>,主要由沥青中的饱和分和芳香分的热解产生;2 100 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰是由C—O—C、C=C断裂导致的,与CO的形成有关;1 800、1 400 cm<sup>-1</sup>处的极弱吸收峰分别与NO<sub>2</sub>、NO和SO<sub>2</sub>的形成有关;在整个热解过程中,CO<sub>2</sub>和CO释放量最多,其次是CH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub>、NO、SO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O释放量极少。根据上述不同气体对应的波数位置还可发现:在T<sub>Initial</sub>和T<sub>5%</sub>时几乎没有气体排放,为H<sub>2</sub>O的热解;在T<sub>10%</sub>时,沥青开始排放气体,SO<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>排放量较多;在T<sub>50%</sub>时,各气体排放量均达到最大值,对CO<sub>2</sub>和CO波数位置放大(见图8(f))可以发现,除4.0/4.0VEUGMA的CO<sub>2</sub>排放量比基质沥青略高外,其余几种VEUGMA的CO<sub>2</sub>和CO排放量远远小于基质沥青,证实了前述交联网络的存在可以分担沥青在热解时的能量,使沥青抗热解能力更强;在T<sub>Terminate</sub>时,仍有微量CO<sub>2</sub>的释放,其余气体未见释放,沥青热解过程结束。

### 3 结论

(1)与基质沥青相比,硫化杜仲胶改性沥青(VEUGMA)具有更小的针入度、更大的软化点、更大的延度和黏度,以及更好的高温抗变形和低温抗裂能力。综合分析,在基质沥青中加入6%天然植物基杜仲胶(EUG)和3.5%硫磺(以EUG质量计)取得的改性效果最佳。

(2)基质沥青和VEUGMA均出现了典型的蜂

型结构,VEUGMA的蜂型结构尺寸较基质沥青的小,数量较基质沥青的多,添加EUG和硫磺降低了基质沥青微观均方根粗糙度,增大了微观黏附力,使沥青具有稳定相态结构的同时,提升了其微观力学性能。

(3)沥青在初始分解和失重5%两个特征点对应的温度T<sub>Initial</sub>和T<sub>5%</sub>下的热解主要是H<sub>2</sub>O的分解;在失重10%特征点对应的温度T<sub>10%</sub>下开始热解释放气体;在失重50%特征点对应的温度T<sub>50%</sub>下,气体释放量变大;在终止分解特征点对应的温度T<sub>Terminate</sub>下沥青热解完成。VEUGMA具有更高的热解温度,沥青的热解产物主要有H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、NO、NO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和SO<sub>2</sub>,其中CO<sub>2</sub>和CO释放量最大,其次是CH<sub>4</sub>,其余气体排放量可以忽略不计,除4.0/4.0VEUGMA外,其他VEUGMA的CO<sub>2</sub>和CO释放量均小于基质沥青。

### 参考文献:

- [1] 李清泉,李志刚.杜仲胶与沥青共混性能试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2007,8(2):176-179.  
LI Qingquan, LI Zhigang. Research on blending asphalt with eucommia ulmoides gum [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Nature Science), 2007, 8(2): 176-179. (in Chinese)
- [2] 张干,冀超,李志刚,等.基于密炼接枝工艺的杜仲胶改性橡胶沥青效果分析[J].科学技术与工程,2023,23(24):10498-10505.  
ZHANG Gan, JI Chao, LI Zhigang, et al. Effect analysis of eucommia ulmoides gum modified rubber asphalt based on mixing grafting process [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(24): 10498-10505. (in Chinese)
- [3] 李志刚,李聪,蔡敏东.接枝杜仲胶对干法橡胶沥青混合料的

- 改性机理与效果[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 845-848.
- LI Zhigang, LI Cong, CAI Mindong. Modification mechanism and effect of grafted eucommia ulmoides gum on dry-process rubber bitumen mixture [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2014, 44(4):845-848. (in Chinese)
- [ 4 ] 李志刚, 卓义金, 旷鹏. 接枝杜仲胶改性沥青路用性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(6):1222-1225.
- LI Zhigang, ZHUO Yijin, KUANG Peng. Performance of asphalt modified by grafting eucommia ulmoides gum[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2009, 39(6): 1222-1225. (in Chinese)
- [ 5 ] LI Z G, ZHAO Y. Research on performance of vulcanized eucommia ulmoides gum blending with asphalt[J]. Advanced Materials Research, 2012, 535-537:1652-1656.
- [ 6 ] LI Z G, LI C. Study on vulcanizing and asphalt modifying of eucommia ulmoides gum[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 488-489:765-768.
- [ 7 ] LI Z G, LI C. Improvement of properties of styrene-butadiene-styrene-modified bitumen by grafted eucommia ulmoides gum[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(2):404-414.
- [ 8 ] DENG X Y, LI Z G, HUANG Y X, et al. Improving mechanism and effect analysis of sulfurated and grafted eucommia ulmoides gum modified rubber asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148:715-722.
- [ 9 ] 李志刚, 邓思奇, 谭发茂, 等. 杜仲胶改性橡胶粉的混炼制备温度与时间参数分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6):1109-1114.
- LI Zhigang, DENG Siqi, TAN Famao, et al. Analysis on temperature and time for minxing preparation of crumb rubber modified by eucommia ulmoider gum[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2020, 50(6): 1109-1114. (in Chinese)
- [ 10 ] LI N, XU J J, XU T. Preparation, properties and modification mechanism of vulcanized eucommia ulmoides gum modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121992.
- [ 11 ] LI N, HU Z H, YAO X G. Performance characterizations of vulcanized eucommia ulmoides gum-modified [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(4):04022011.
- [ 12 ] WANG H S, LI N, XU T. Aging effects on microstructures and micromechanical properties of vulcanized eucommia ulmoides gum modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346:128432.
- [ 13 ] 王岚, 任敏达, 李超. 多聚磷酸改性沥青表面形态学与流变学特性[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9):2079-2084.
- WANG Lan, REN Minda, LI Chao. Morphological and rheological property analysis of polyphosphoric acid modified asphalt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(9): 2079-2084. (in Chinese)
- [ 14 ] 王岚, 张琪, 冯蕾. 温拌胶粉改性沥青的流变和微观性能评价[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1458-1463.
- WANG Lan, ZHANG Qi, FENG Lei. Performance evaluation of warm-mixed crumb rubber asphalt based on rheological and microscopic characteristics analysis [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1458-1463. (in Chinese)
- [ 15 ] 李宁. 硫化杜仲胶改性沥青制备、性能表征及改性机理研究[D]. 南京:南京林业大学, 2021.
- LI Ning. Study on preparation, property characterization and modification mechanism of vulcanized eucommia ulmoides gum modified asphalt[D]. Njing: Nanjing Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [ 16 ] 陈雷, 伊晓路, 孙来芝, 等. 基于热重-傅里叶红外联用的油泥砂热解过程[J]. 山东科学, 2021, 34(5):58-63.
- CHEN Lei, YI Xiaolu, SUN Laizhi, et al. Pyrolysis progress of oil sludge based on thermogravimetric-Fourier transform infrared [J]. Shandong Science, 2021, 34(5):58-63. (in Chinese)