

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023031524041983

文章编号:1674-599X(2024)02-0017-11

引用格式:陈彦雯,白桃,黄宣,等.增强型硫磺胶结料机理及混合料结构力学分析[J].交通科学与工程,2024,40(2):17-27.

Citation: CHEN Yanwen, BAI Tao, HUANG Xuan, et al. Mechanism of enhanced sulfur binder and structural mechanical analysis of its mixture [J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 17-27.

增强型硫磺胶结料机理及混合料结构力学分析

陈彦雯,白桃,黄宣,周小龙,吴璠

(武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430000)

摘要:为了提升Thiopave改性沥青混合料的水稳定性和低温性能,先加入双戊烯(dipentene, DIP)和硫磺,在高温条件下搅拌均匀。再加入丙烯酸异辛酯(ethylhexyl acrylate, EHA),继续高温搅拌。加热温度控制在140℃左右,将高速剪切搅拌机的转速缓慢提升至1500 r/min,持续反应4 h之后,冷却至室温,对Thiopave进行预处理,并对其改性机理、混合料路用性能和力学性能进行全面分析。研究表明:添加DIP和EHA后,硫磺分子链变长,硫磺胶结料的表面能和极性分量增加;与Thiopave改性沥青混合料相比,增强型硫磺改性沥青混合料的高温性能略有降低,而水稳定性和低温性能显著提高;与未改性沥青混合料路面相比,增强型硫磺改性沥青混合料路面的面层竖向总变形和变形贡献率均大幅下降。掺入1.0%DIP和0.5%EHA为最佳组合,能够明显改善增强型硫磺改性沥青混合料的路用性能和力学性能。

关键词:硫磺;沥青混合料;路用性能;力学性能;改性机理

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Mechanism of enhanced sulfur binder and structural mechanical analysis of its mixture

CHEN Yanwen, BAI Tao, HUANG Xuan, ZHOU Xiaolong, WU Fan

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to improve the moisture resistance and low temperature performance of Thiopave modified asphalt mixture, dipentene (DIP) and sulfur were added and stirred evenly at high temperature, followed by adding ethylhexyl acrylate (EHA) and stirred well at high temperature around 140 °C. The speed of mixer was slowly increased to 1500 r/min, and after reacting for 4 h, the Thiopave particles were cooled to room temperature for pretreatment. In the meantime, the modification mechanism and mixture road performance with its mechanical properties were investigated comprehensively. The results showed that the sulfur molecular chain became longer after the addition of DIP and EHA, the surface energy and polar fraction of the binder were increased. Compared with the Thiopave modified asphalt mixture, the high temperature performance of enhanced sulfur modified asphalt mixture was slightly reduced, while the moisture resistance and low

收稿日期:2023-03-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52108415);湖北省自然科学基金青年项目(2020CFB567);交通运输部重点研发项目(2020-MSI-061)

通信作者:周小龙(1983—),男,副教授,主要从事建筑结构方面的研究工作。E-mail:zhouxiaolong@cqu.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

temperature crack resistance were significantly improved. As compared to the unmodified asphalt mixture pavement, the total vertical deformation and deformation contribution rate caused by the surface course of the reinforced sulfur modified asphalt mixture pavement decreased significantly. It was revealed that 1% DIP and 0.5% EHA are recommended as the optimum dosage to apparently improve the road performance and mechanical properties of the enhanced sulfur modified asphalt mixture.

Key words: sulfur; asphalt mixture; road performance; mechanical property; modification mechanism

自2008年起,Shell公司通过添加降黏减阻剂,成功研制了新型Thiopave改性剂。近年来,大量研究表明,Thiopave改性剂对沥青混合料性能的增强作用明显。

在混合料的拌合过程中,硫磺在骨料的剪切作用下均匀分散在混合料中,这有助于降低拌合温度及施工温度。在混合料冷却过程中,部分硫磺会形成空间网状结构,从而提高沥青混合料的高温性能^[1]。从国内外学者的研究进一步表明:Thiopave改性剂不仅能够提升沥青混合料的高温稳定性,与特种沥青混合,还能改善其抗水损害性,但对普通沥青混合料的低温抗裂性影响不大^[2]。随着Thiopave改性剂中聚合硫含量的增加,沥青混合料的温度敏感性和高温稳定性均有提高,但疲劳寿命降低,对水分的敏感性也会提高^[3-5]。Thiopave改性沥青混合料和普通沥青混合料的动态模量变化规律相似,但不同硫磺掺量对沥青混合料黏弹性能的影响不同^[6-7]。

为进一步改善沥青混合料的路用性能,本研究采用双戊烯(dipentene, DIP)和丙烯酸异辛酯(ethylhexyl acrylate, EHA)对Thiopave进行协同改性。DIP与硫磺发生聚合反应,生成S-DIP大分子链,从而提高硫磺改性胶结料低温性能。同时,引入疏水基团EHA,形成疏水长大分子链,提高混合料的水稳定性。根据前期试验结果^[8],改性后的Thiopave可以直接在沥青混合料拌合过程中投放,无需增加成本,还可以替代部分沥青,提高混合料性能,降低施工温度,实现节能减排^[9]。本研究将进一步探讨Thiopave改性沥青混合料性能增强的机理,对混合料进行路用性能试验,并进行典型结构力学分析,开发满足使用要求的高性能路面材料。

1 原材料

本研究采用的沥青为70#A级道路石油沥青,硫磺改性剂选用壳牌公司生产的Thiopave改性剂,双戊烯(DIP)和丙烯酸异辛酯(EHA)均购自国药集团化学试剂有限公司,这些材料的具体技术参数见表1。

表1 双戊烯、丙烯酸异辛酯技术参数

Table 1 Technical parameters of dipentene and isooctyl acrylate

材料名称	分子式	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/°C	沸点/°C
双戊烯	C ₁₀ H ₁₆	0.86	-94	175
丙烯酸异辛酯	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	0.88	-90	238

硫磺改性过程如图1所示。其中,DPS为DIP和硫磺反应的中间产物。

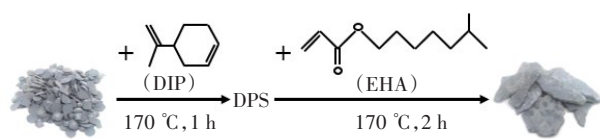


图1 硫磺改性过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sulfur modification process

粗集料和细集料均选用石灰岩,而填料采用石灰岩磨细的矿粉。经过检测,各项指标均符合技术要求。AC-13沥青混合料的矿料合成级配曲线,如图2所示。改性后沥青混合料的油石比及硫磺用量,见表2。其中,硫磺掺量占沥青混合料总质量的30.00%,改性后硫磺用量仅占沥青混合料总质量的1.59%。

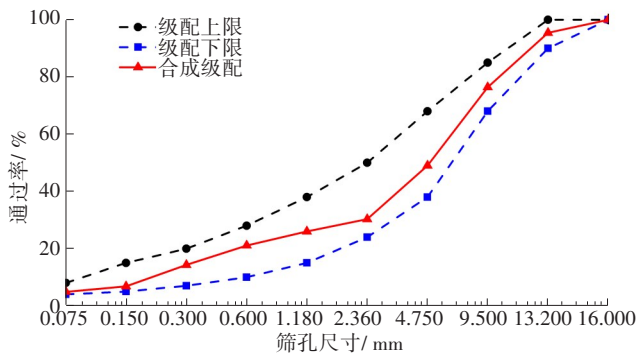


图 2 级配曲线图

Fig. 2 Gradation curves

表 2 混合料中各组分与集料比值

Table 2 Component to aggregate ratio in the mixture

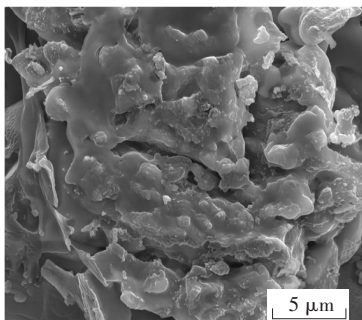
混合料	最佳油石比/ %	硫磺掺量/ %	改性后 油石比/ %	改性后 硫磺用量/ %
AC-13	4.80	30.00	3.71	1.59

2 Thiopave 改性增强机理

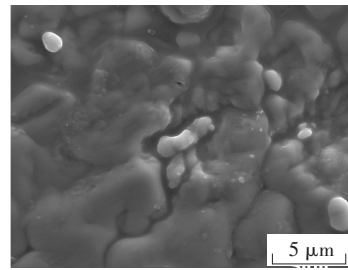
2.1 改性硫磺的微观形貌

改性硫磺电镜扫描结果如图 3 所示。普通硫磺加入 DIP 进行第一次改性生成中间产物 DPS,在 DPS 中加入 EHA 进行第二次改性生成最终产物 EHADPS,如图 3(b) ~ 3(c)所示。

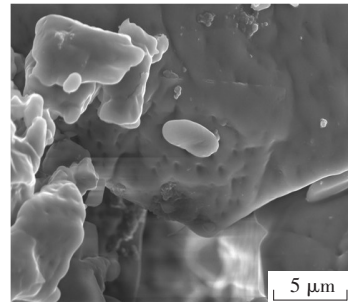
普通硫磺的表面较粗糙,但加入 DIP 和 EHA 后,改性硫磺表面逐渐光滑。这是因为 DIP 与硫磺发生聚合反应,生成了硫磺大分子链。由于分子链的变长,改性后的硫磺质地变软。同时,通过引入疏水基团 EHA,形成了疏水长链大分子。经过改性处理后,Thiopave 中的硫磺和有机物的相容性明显增加^[10]。



(a) Thiopave



(b) DPS



(c) EHADPS

图 3 电镜扫描图

Fig. 3 Scanning electron microscopy images

2.2 改性硫磺的电子结合态

X 射线光电子能谱仪 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 用于测定硫磺、DPS 和 EHADPS 等元素的组成和化学状态,XPS 图谱如图 4 所示。

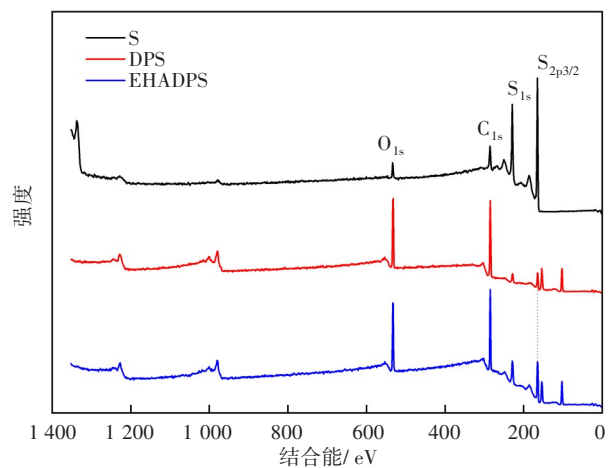


图 4 改性硫磺 X 射线光电子能谱

Fig. 4 X-ray photoelectron spectrum of modified sulfur

S、C 和 O 的表面原子浓度如图 5 所示。从图 5 可以看出,加入 DIP 和 EHA 之后,DPS 和 EHADPS 中的 S 原子浓度明显降低,而 C 和 O 原子浓度大幅提升。其中,DPS 中的 S 原子浓度下降了 86.7%,C 原

子浓度提高了105.0%,O原子浓度提高了303.0%。EHADPS中的S原子浓度下降了72.7%,C原子浓度提高了91.5%,O原子浓度提高了237.9%。C、O原子浓度大幅提升,表明硫磺与烯烃发生了聚合反应,使得硫磺分子链变长,由XPS结果证实了硫磺已经被DIP和EHA成功改性。

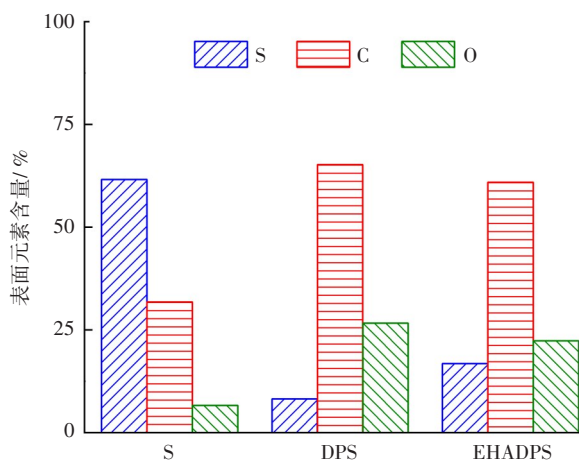


图5 样品表面元素的原子浓度

Fig. 5 Atomic concentration of elements on the sample surface

2.3 表面能

在表面能理论中,物质的表面张力由 Lifshitz-Van Der Waals 作用(γ_{LW})和 Lewis 酸碱作用(γ_{AB})共同组成。当液滴悬滴在光滑的固体表面上且处于平衡状态时,Young's 方程见式(1);对同种物质的表面能的计算见式(2)。

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_{LW,L} \times \gamma_{LW,S}} + \sqrt{\gamma_L^+ \times \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^- \times \gamma_S^+} \right) \quad (1)$$

式中: γ_L 为固-液接触面处的界面能; θ 为液体悬滴于固体表面后固液界面的接触角; $\gamma_{LW,L}$ 、 $\gamma_{LW,S}$ 分别为固体、液体的 Lifshitz-Van Der Waals 作用; γ_L^+ 、 γ_L^- 、 γ_S^+ 、 γ_S^- 分别为液体和固体表面能的酸性参数和碱性参数。

$$\gamma_{total} = \gamma_{LW} + \gamma_{AB} = \gamma_{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \times \gamma^-} \quad (2)$$

式中:

γ_{total} 为单相物质总的表面能; γ_{LW} 、 γ_{AB} 分别为单相物质 Lifshitz-Van Der Waals 作用和 Lewis 酸碱作用; γ^+ 、 γ^- 分别为表面能的酸性参数和碱性参数。

通过将液体、集料和沥青之间接触角的计算结果代入式(1),并联立求解相关问题。

表面能越大,表明材料之间的黏结性能越好,相应的水稳性能也就越好。沥青主要由非极性的碳氢化合物构成,因此在沥青胶结料的表面能中,非极性色散部分所占比例高达80%以上。而在极性分量的组成中,由于沥青呈弱酸性,其表面能的碱性参数小于酸性参数。沥青胶结料的表面能参数见表3。

表3 沥青胶结料的表面能参数

Table 3 Surface energy parameters of asphalt binders

黏结材料	表面能	表面能酸性参数	表面能碱性参数	极性部分	色散部分
AC	21.514	2.220	1.690	3.874	17.640
S	20.082	2.310	1.277	3.435	16.646
DPS	21.945	3.028	1.300	3.967	17.978
EHADPS	22.281	3.610	1.232	4.218	18.063

加入硫磺进行改性后,胶结料的总表面能下降了6.7%。在此基础上,根据前期试验结果^[8]再加入1%DIP,此时胶结料表面能增大了9.3%,比基质沥青胶结料的总表面能大2.0%;然后加入0.5%EHA,胶结料的总表面能持续增长,与基质沥青相比,其增大了3.6%。

综上所述,在加入DIP和EHA进行改性后,胶结料的表面能、色散部分、极性部分相较于普通硫磺改性沥青胶结料和普通基质沥青胶结料均有所提升。在沥青胶结料中,由于极性分量的增加,通过极性成分与集料间的化学吸附,提高了材料间的黏附强度,进而增强了混合料的水稳性能。

3 增强型改性硫磺沥青混合料路用性能试验

为了分析DIP和EHA对增强型硫磺改性沥青混合料路用性能的影响,针对普通沥青混合料、硫磺改性沥青混合料、DPS改性沥青混合料、两种不同EHA掺量的EHADPS改性沥青混合料进行冻融劈裂试验、动态单轴压缩试验和-10℃半圆弯拉试验等室内试验。试验数据汇总见表4。

表4 试验数据汇总

Table 4 Summary of experimental data

沥青混合料	水稳定性/%	动态单轴压缩 试验次数/次	低温抗裂性断 裂能/(J·m ⁻²)
普通沥青 混合料	84.2	1 308.0	1 196.0
硫磺改性 沥青混合料	82.5	4 315.0	1 096.0
DPS改性 沥青混合料	85.4	4 103.0	1 351.0
1.0%DIP、 0.5%EHA	90.2	3 480.0	2 026.0
1.0%DIP、 1.0%EHA	86.9	3 307.0	1 732.0

添加 Thiopave 后,沥青混合料的抗水损害性能有所降低,继续添加 DIP,将沥青混合料改性为 DPS 改性沥青混合料后,与硫磺改性沥青混合料相比,DPS 改沥青混合料的冻融劈裂强度比、断裂能均有所提升,尽管其动态单轴破坏次数略有降低,但与普通沥青混合料的相比仍有明显提高。同时加入 DIP 和 EHA 后,随着 EHA 掺量的增大,沥青混合料的冻融劈裂强度比呈先增大后减小趋势。当 EHA 的掺量占改性硫磺的 0.5% 时,沥青混合料的冻融劈裂强度比达到最大。加入 1.0%DIP 和 0.5%EHA 后的沥青混合料的冻融劈裂强度比相较于硫磺改性沥青混合料的提高了 9.3%,相较于普通沥青混合料则提高了 7.1%。但随着 EHA 掺量的增加,分子链的稳定性下降,导致混合料的水稳定性能开始下降。因此,掺入 1.0%DIP 和 0.5%EHA,可以显著提高硫磺改性沥青混合料的水稳定性。

随着硫磺的加入,部分硫磺在集料之间的剪切作用下均匀分散在沥青中,而剩余的硫磺在沥青混合料的冷却过程中逐渐析出,形成空间网状结构,从而提高沥青混合料的高温性能。但硫磺与 DIP 形成的分子长链在高温条件下稳定性较弱,加入 EHA 后,分子链长度增大,稳定性持续下降。因此,在加入硫磺后,动态单轴破坏次数达到最大值,但随着 DIP 和 EHA 的加入,混合料动态单轴破坏次数有所下降。在 1.0%DIP 和 0.5%EHA 的组合下,混合料的动态单轴破坏次数相较于普通沥青混合料的仍有明显提高,提高了约 166.1%。

普通沥青混合料加入硫磺后,混合料强度变

大,但断裂能下降了 8.4%;继续加入 DIP 后,形成 S-DIP 大分子链,使胶结料质地变软,断裂能提高了 23.3%。在此基础上,随着 EHA 的增加,混合料的断裂能随 EHA 掺量的增加呈先增大后减小的趋势。当 EHA 掺量为 0.5% 时,混合料的断裂能达到最大值,较普通沥青混合料的提高了 69.4%。这表明,掺入 1.0%DIP 和 0.5%EHA,可以显著提高硫磺改性沥青混合料的低温稳定性。

4 典型结构力学性能分析

4.1 硫磺改性沥青混合料的有限元模型

为研究增强型硫磺改性沥青混凝土上面层的力学性能,采用 ANSYS 软件建立三维沥青混凝土路面模型,并进行力学响应分析^[11-13]。模型边界条件假定模型底部完全约束无位移,垂直行车方向的 X 轴无位移,沿行车方向的 Y 轴无位移。路面结构及参数见表 5,沥青面层材料组合见表 6。

表5 路面结构及参数

Table 5 The structure and parameters of road structure

路面分层	层厚度/ mm	密度/ (kg·m ⁻³)	模量/ MPa	泊松比
上面层	40	2 600		
中面层	60	2 500		
下面层	80	2 450		
上基层	200	2 000	12 000	0.25
下基层	200	2 000	11 000	0.25
底基层	200	2 000	10 000	0.25
土基	6 000	1 800	60	0.40

表6 沥青面层材料组合

Table 6 Combination of asphalt surface layer materials

材料组合	组合 1	组合 2	组合 3
a-上面层	AC-13 (基质)	AC-13 (Thiopave 改性)	AC-13 (EHADPS 改性)
b-中面层	AC-20 (基质)	AC-20 (基质)	AC-20 (基质)
c-下面层	AC-25 (基质)	AC-25 (基质)	AC-25 (基质)

4.2 动态模量

动态模量是评估沥青混合料黏弹性能的关键参数之一,它能够有效反映车辆荷载作用下沥青路面的实际受力状态^[14-15]。为了更全面地研究硫磺改性沥青混合料的性能,将掺入不同改性剂的沥青混合料进行动态模量试验。在试验中,采用万能试验机(universal testing machine, UTM)进行动态模量试验,并选择半正弦加载方式。动态模量试验的具体参数见表7。

表7 动态模量试验参数

Table 7 Dynamic modulus test parameters

级配类型	应变/10 ⁻⁶	频率/Hz	温度/℃
AC-13	50~150	0.1、0.5、1.0、 5.0、10.0、25.0	-10、4、21、 37、54

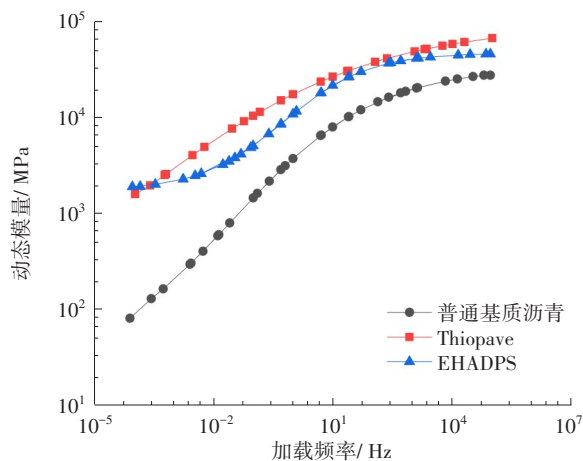
通过 Sigmoidal 函数^[16-17]以及 WLF 方程进行拟合,将不同温度下不同频域内的动态模量水平位移数据进行整合,从而得到较宽频域内完整的动态模量主曲线。动态模量是由存储模量和损失模量共同构成的复数模量。在本次研究中,选取 21℃ 作为参考温度,通过 sigmoidal 函数的转化,成功获得 3 种材料组合的存储模量主曲线^[18]。采用 Prony 级数展开式以及傅里叶变换^[11]的方法,得到这 3 种材料组合的松弛模量主曲线。这 3 种沥青混合料的不同主曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在相同温度下,加载频率对硫磺改性沥青混合料和普通沥青混合料的动态模量的影响规律相似^[11]。不同改性剂对沥青混合料黏弹性能的影响略有不同。单掺 30% 的硫磺时,硫磺沥青混合料的动态模量大于普通沥青混合料的,说明硫磺改性沥青混合料的弹性增大,温度敏感性降低;EHADPS 改性后的沥青混合料相较于硫磺改性后的黏性增加,温度敏感性增大。

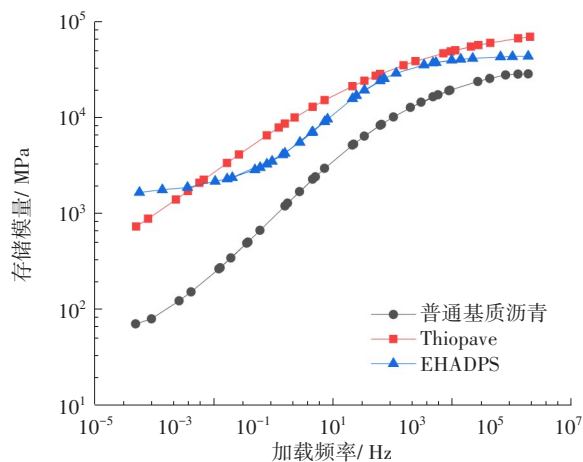
从图 6 又可以看出,增强型硫磺改性沥青混合料的动态模量基本在 Thiopave 改性沥青混合料和基质沥青混合料之间,这表明 1.0% DIP 和 0.5% EHA 的加入,能够同时改善 Thiopave 改性沥青混合料的高温性能和低温性能。

为准确描述沥青路面结构的力学响应,将面层划分为十个亚层(3+3+4)。在路表温度 21℃ 下,根

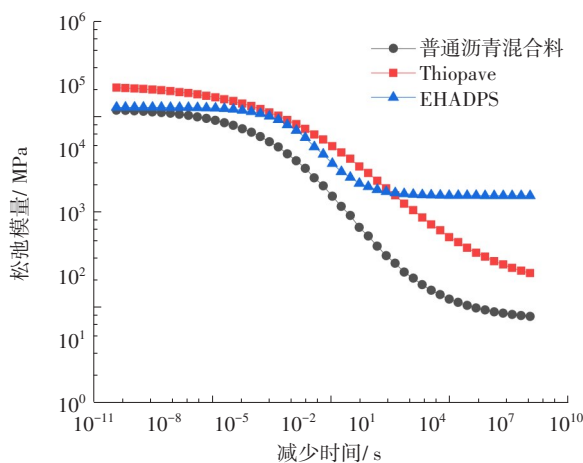
据松弛模量获取每个亚层的黏弹性参数,将其输入有限元 ANSYS 模型中,并利用该模型对路面结构进行相关的力学响应分析。



(a) 动态模量主曲线



(b) 存储模量主曲线



(c) 松弛模量主曲线

图 6 3 种沥青混合料的不同主曲线

Fig. 6 Master curves of 3 asphalt mixtures

4.3 沥青路面结构力学响应分析

4.3.1 应力分析

在路表温度 21 °C 下,建立有限元模型,并进行计算分析。在轮胎中心接地处,竖向压应力随路面深度方向变化的趋势如图 7 所示,路表及各面层层底剪应力变化的趋势如图 8 所示,各面层层底压应力随轮胎荷载横向分布点位变化的趋势如图 9 所示。

从图 7 可以看出,组合 1、2 和 3 在轮胎中心接地处的压应力随竖向深度的增大均减小。以组合 2 为例,路表应力为 730 kPa,上面层层底压应力为 300 kPa,为路表应力的 41.1%,减小幅度达到了 58.9%;中面层层底压应力为 210 kPa,为路表应力的 28.8%,减小幅度为 71.2%;下面层层底压应力为 130 kPa,为路表应力的 17.8%,减小幅度为 82.2%。这表明,压应力沿路面深度方向迅速减小,尤其是上面层的减小幅度最大。与组合 1 相比,组合 2 和组合 3 的路表压应力变化不大,组合 2 和组合 3 在上面层层底的压应力分别减小了 2.8%、1.1%,在中面层层底的压应力分别减小了 5.8%、2.6%,在下面层层底的压应力分别减小了 7.6%、5.0%。这表明,沥青混合料添加硫磺改性剂后,能够减小层底压应力,提高沥青混合料的动态模量,增强抵抗应力能力。

在图 8 中,1-o 表示组合 1 路表,1-a 表示组合 1 上面层层底,1-b 表示中面层层底,1-c 表示组合 1 下面层层底。从图 8 中可以看出,关于轮胎中心点对称,组合 1、2 和 3 的路表剪应力的最大值分别为 264.7、242.1、247.1 kPa。组合 1 的最大剪应力在轮胎中心处,而组合 2 和 3 的最大剪应力在轮胎边缘处。添加改性剂后,组合 2 和组合 3 路表剪应力有所下降。与组合 1 相比,组合 2 和组合 3 的路表剪应力分别下降了 8.5%、6.7%。这表明,沥青混合料添加硫磺改性剂后,可有效改善路表的剪应力分布。

从图 9 可以看出,随着路面深度的增加,压应力的波动逐渐减小。添加改性剂后,各面层层底的压应力有所降低。与组合 1 相比,组合 2 的上、中和下面层层底压应力分别下降了 9.0%、6.8%、7.1%;组合 3 则分别下降了 5.2%、3.4%、4.7%。综上所述,沥青混合料添加硫磺改性剂后,能够降低各面层层底的压应力。

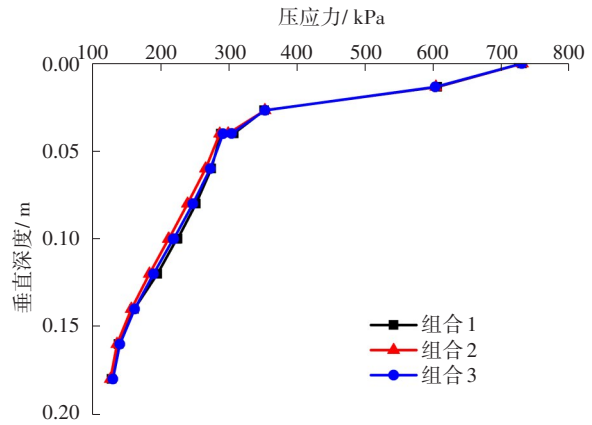


图 7 轮胎中心接地处竖向压应力

Fig. 7 Vertical compressive stress at the center of the tire joint

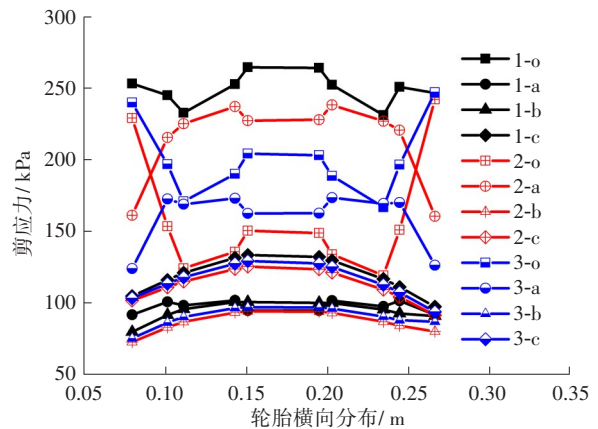


图 8 路表及各面层层底剪应力

Fig. 8 Shear stress of road surface and bottom of each surface layer

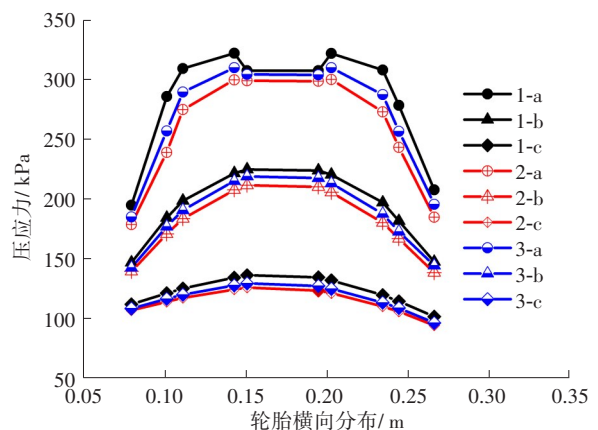


图 9 各面层层底压应力

Fig. 9 Compressive stress at the bottom of each surface layer

4.3.2 应变分析

轮胎中心接地处竖向压应变如图 10 所示,在路表温度 21 °C 下,沥青混合料添加不同改性剂后,随

着路面深度的增加,其在轮胎中心处的竖向压应变逐渐减小,且上面层的竖向压应力变化明显,中面层及以下曲线高度重合。组合1、2和3的轮胎中心点处的路表压应变分别为 252.4×10^{-6} 、 34.5×10^{-6} 、 69.1×10^{-6} 。其中,组合1的路表压应变远大于组合2、3的。此外,随着改性剂的加入,各面层层底的压应变均有不同幅度的下降。与组合1相比,组合2和3的路表压应变分别降低了86.3%、72.6%,上面层层底压应变分别降低了67.6%、56.9%,中面层层底压应变分别降低了5.8%、3.0%,下面层层底压应变分别降低了7.0%、4.0%。综上所述,上面层压应变的下降幅度最大;在降低各面层压应变方面,组合2的效果更佳。

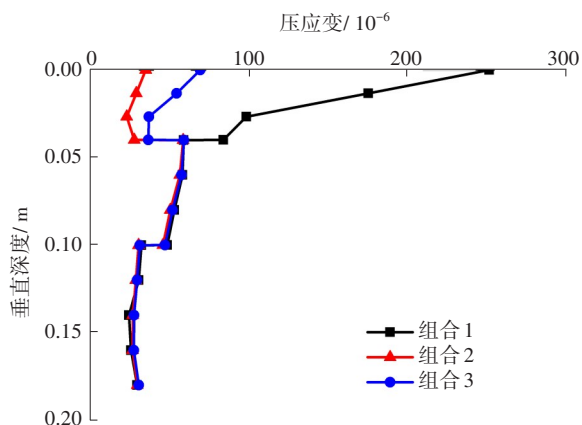


图10 轮胎中心接地处竖向压应变

Fig. 10 Vertical compressive strain at the center of the tire joint

路表压应变沿轮胎横向点位分布的变化趋势如图11所示。

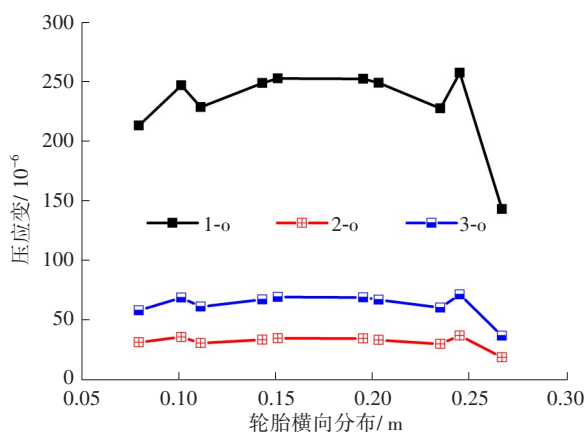


图11 路表压应变

Fig. 11 Compressive strain of road surface

通过计算轮胎横向各点位压应变降低的平均

幅度,可以评估路表压应变的整体下降幅度。与组合1相比,组合2和3的路表压应变分别降低了86.3%、73.0%。因此,加入改性剂,可有效降低路表压应变,尤其是组合2的效果最好。

4.3.3 变形贡献率分析

本研究通过计算得到沿路面深度方向的压应变和剪应变,并沿沥青厚度方向进行积分,得到沥青层的竖向变形。各沥青层的竖向变形贡献率计算公式如下:

$$D_i = l_i / \sum_{i=1}^3 l_i \quad (3)$$

式中: l_i 为每层的竖向变形; D_i 为第*i*层的变形贡献率。

在高温54℃下,路面结构(表5)在不同材料组合下(表6)的压应变与剪应变的变形贡献率,如图12~13所示。其中,a、b和c表示上面层、中面层、下面层; E_c 为压应变引起的沥青层平均竖向变形; E_s 为剪应变引起的沥青层平均竖向变形。

从图12~13可以看出,压应变与剪应变的变形贡献率在不同面层具有相同的变化趋势。对于组合1,上面层的变形贡献率在三个面层中最大。当上面层采用改性沥青时,其变形贡献率显著减小。与组合1相比,组合2的上面层压应变和剪应变的变形贡献率分别降低了57.5%、53.1%;而组合3上面层的压应变和剪应变的变形贡献率分别降低了80.2%、74.8%。无论上面层采用何种改性剂,中面层和下面层的变形贡献率均有增加,且中面层的变形贡献率最大。

添加改性剂后,尽管中、下面层的变形贡献率有所提升,但与组合1相比,组合2、3由压应变和剪应变引起的面层竖向总变形显著下降。当上面层采用Thiopave改性沥青的组合2时,在高温54℃条件下,其压应变和剪应变产生的竖向变形量分别约占组合1的42.0%和42.2%。这表明,Thiopave的加入,能够大幅降低路面结构的竖向变形量,减小了上面层的竖向变形量,并明显降低了上面层的变形贡献率。当上面层采用EHADPS改性沥青的组合3时,在高温54℃条件下,其压应变和剪应变产生的竖向变形量分别约占组合1的32.6%和31.7%。这表明,当DIP和EHA的掺量分别为1.0%和0.5%时,随着Thiopave的改性,进一步减少了路面的竖向变形量。添加改性剂后,各面层的压应变和剪应变引

起的变形量呈减小趋势,其中组合3的减小趋势最为显著。

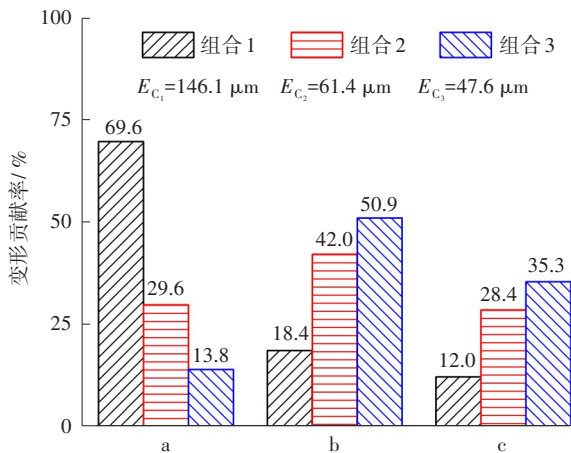


图12 压应变变形贡献率

Fig. 12 Contribution of compressive strain deformation

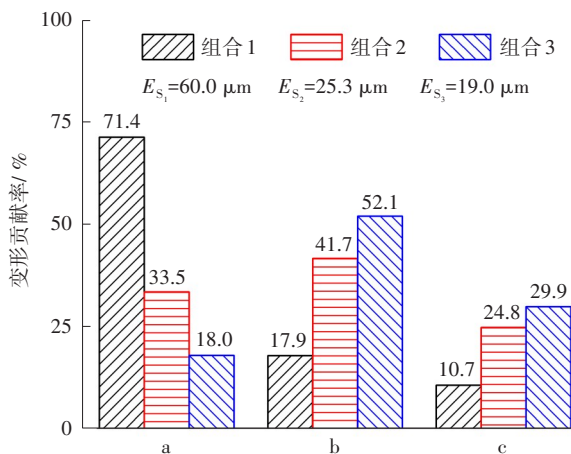


图13 剪应变变形贡献率

Fig. 13 Contribution of shear strain deformation

综上所述,面层材料对沥青层的变形贡献率影响显著,在上面层加入改性剂,上面层的压应变和剪应变能够明显降低了其变形量,同时减少中、下面层的部分变形量;改性剂可有效改善沥青混合料的抗变形能力,在这3种组合中,采用EHADPS改性剂的组合3效果最好。

5 结论

本文对沥青面层不同材料组合的动态模量试验和主曲线拟合进行了研究,根据实测模量数据,通过有限元计算进行力学响应分析,得出以下

结论:

1) 在沥青胶结料中加入DIP和EHA进行改性后,极性分量得到提升。通过极性成分与集料间的化学吸附,增大了材料之间的黏附强度,进而增强了混合料的水稳性能。DIP与硫磺发生聚合反应,生成了硫磺大分子链,同时引入疏水基团EHA,大幅提高了改性后的硫磺和有机物之间的相容性,达到了增强材料水稳性能的目的。

2) 当上面层采用最佳掺量1%DIP、0.5%EHA的组合3时,混合料的冻融劈裂试验强度达到90.2%,相较普通沥青混合料及硫磺改性沥青混合料分别提升了6.7%、8.5%。与组合1相比,混合料的动态单轴破坏次数提高了166.1%,断裂能提高了69.4%;与组合2相比,混合料的高温稳定性略微下降,但低温抗裂性和水稳定性均明显提升。

3) 当上面层采用改性沥青时,与普通沥青混合料相比,路表剪应力和沥青层底压应力均有所降低。特别是轮胎中心路表和上面层层底的压应变,均出现了大幅下降。尽管在加入改性剂后,中、下面层的变形贡献率有所提升,但与组合1相比,组合2、3中由压应变和剪应变引起的面层竖向总变形显著下降。各面层由压应变和剪应变引起的变形量均明显减小。综上所述,掺入1%DIP和0.5%EHA的组合为Thiopave硫磺改性最佳掺量。

参考文献(References):

- [1] 杨锡武. SEAM沥青混合料性能及其改性机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 194-198.
- [2] 张晓靖, 邱延峻, 张晓华, 等. Thiopave改性沥青混凝土综合试验研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1): 91-97. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.015.
- [3] KAVUSSI A, AZARNIA M, AYAR P, et al. The fatigue

- behavior of polymeric sulfur-modified asphalt mixtures subjected to freeze-thaw conditioning [J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2022, 35(4): 467-486. DOI: 10.1177/0892705719889985.
- [4] 王修山, 邱洋杰, 朱燮瀚, 等. Thiopave 改性沥青混合料路用性能评价[J]. *公路*, 2018, 63(4): 209-211. WANG Xiushan, QIU Yangjie, ZHU Xiehan, et al. Evaluation of road performance of Thiopave modified asphalt mixture[J]. *Highway*, 2018, 63(4): 209-211.
- [5] 张怀志, 王迪, 杨彦海. 沥青混合料高温性能评价指标区分度研究[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6): 1248-1254. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.017. ZHANG Huaizhi, WANG Di, YANG Yanhai. High temperature performance evaluation indices of asphalt mixtures[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1248-1254. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.017.
- [6] HU X D, ZHANG H W, BAI T, et al. Effects of using brake pad waste powder as a filler material on the rheological and mechanical properties of a sulfur modified asphalt mixture [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 198: 742-750. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.007.
- [7] 张玥珺, 徐敏, 赵西坡, 等. 含硫硅烷偶联剂对增强填料的改性及其在橡胶中的应用研究进展[J]. *合成橡胶工业*, 2017, 40(4): 327-331. ZHANG Yuejun, XU Min, ZHAO Xipo, et al. Modification of reinforcing filler with sulfur-containing silane coupling agent and its application in rubber [J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2017, 40(4): 327-331.
- [8] BAI T, WU F, ZHANG Y F, et al. Sulfur modification with dipentene and ethylhexyl acrylate to enhance asphalt mixture performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343: 128086. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128086.
- [9] 季节, 谢永清, 贾璐. 赛欧铺沥青混合料抗车辙性能及经济性分析[J]. *公路*, 2014, 59(12): 191-195. JI Jie, XIE Yongqing, JIA Lu. Anti-rutting performance and economic analysis of Sailupu asphalt mixture [J]. *Highway*, 2014, 59(12): 191-195.
- [10] DE F P, GIAVARINI C, SANTARELLI M L. Sulphur-extended asphalt: reaction kinetics of H₂S evolution [J]. *Fuel*, 1998, 77(5): 459-463. DOI: 10.1016/S0016-2361(98)80037-9.
- [11] 侯睿, 郭忠印. 硫磺改性沥青混合料的动态模量试验分析[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(3): 525-528, 538. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2013.03.027. HOU Rui, GUO Zhongyin. Dynamic modulus test analysis of sulfur modified asphalt mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(3): 525-528, 538. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2013.03.027.
- [12] 毛博温, 白桃, 张守城, 等. 考虑实测轮载和层间黏结状况的沥青路面黏弹性分析[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(4): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.04.001. MAO Bowen, BAI Tao, ZHANG Shoucheng, et al. Analysis on viscoelasticity of asphalt pavement considering actual tire-pavement contact pressure and interlayer bonding conditions [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(4): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.04.001.
- [13] 王志臣, 郭乃胜, 赵颖华, 等. 沥青混合料黏弹性主曲线模拟及换算[J]. *工程力学*, 2017, 34(2): 242-248. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.08.0647. WANG Zhichen, GUO Naisheng, ZHAO Yinghua, et al. Viscoelastic master curve simulation and conversion of asphalt mixtures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(2): 242-248. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.08.0647.
- [14] 罗文波, 梁晟, 张永军. 沥青混合料动态黏弹性的分数阶微分本构模型[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(2): 34-43. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.003. LUO Wenbo, LIANG Sheng, ZHANG Yongjun. Fractional differential constitutive model for dynamic viscoelasticity of asphalt mixture [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(2): 34-43. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.02.003.
- [15] 索智, 谭祎天, 张亚, 等. 骨架密实型沥青稳定碎石混合料动态模量研究[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2): 206-213. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.014. SUO Zhi, TAN Yitian, ZHANG Ya, et al. Dynamic modulus of skeleton dense asphalt treated base mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(2): 206-213. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.014.
- [16] 程怀磊, 李斌, 刘黎萍, 等. 移动轴载作用下路面沥青层动态响应模量主曲线研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 125-134. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-

7372.2020.10.007.

CHENG Huailei, LI Bin, LIU Liping, et al. Evaluation of master curve of response-based modulus for asphalt pavement layer under vehicular loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 125-134. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.007.

- [17] VESTENA P M, SCHUSTER S L, DE ALMEIDA P O B J, et al. Dynamic modulus master curve construction of asphalt mixtures: error analysis in different models and field scenarios [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124343.

conbuildmat.2021.124343.

- [18] 赵延庆, 唐积民, 白龙. 利用沥青混合料复数模量确定松弛模量研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 498-502. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.04.012.

ZHAO Yanqing, TANG Jimin, BAI Long. Determination of relaxation modulus using complex modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 498-502. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.04.012.

(责任编辑:罗容;英文编辑:焦登武)

(上接第16页)

- [18] DAI J S, MA F, FU Z, et al. Applicability assessment of stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material in cooling pavement [J]. Renewable Energy, 2021, 175: 748-759. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.063.

- [19] TANG B T, WU C, QIU M G, et al. PEG/SiO₂ - Al₂O₃ hybrid form-stable phase change materials with enhanced thermal conductivity [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 144(1/2): 162-167. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.12.036.

- [20] QIAN T T, LI J H, MA H W, et al. The preparation of a green shape-stabilized composite phase change material of polyethylene glycol/SiO₂ with enhanced thermal performance based on oil shale ash via temperature-assisted sol-gel method [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 132: 29-39. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.08.017.

- [21] JIA M, SHA A M, JIANG W, et al. Laboratory

evaluation of poly (ethylene glycol) for cooling of asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121774. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121774.

- [22] WANG H R, WANG Y M, QI M L, et al. PEG/diatomite modified asphalt mixture with self-regulating temperature property [J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00585. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00585.

- [23] JIN J, LIU L, LIU R H, et al. Preparation and thermal performance of binary fatty acid with diatomite as form-stable composite phase change material for cooling asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 616-624. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.305.

(责任编辑:罗容;英文编辑:王佳)