

# 沥青混合料永久变形模型研究

单景松, 杜贝贝

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:**以沥青路面常用混合料 AC-16, AC-25 为研究对象, 进行了动态模量试验, 得到了不同温度、不同频率下的动态模量; 然后, 通过间歇加载方法进行了动态蠕变试验, 得到了不同应力水平和温度下的蠕变规律; 最后, 依据动态模量和动态蠕变试验结果建立了沥青混合料蠕变模型。通过与实测结果对比表明, 所建立的蠕变模型可以较好地预估沥青混合料车辙产生的迁移阶段和稳定阶段。

**关键词:** 沥青混合料; 动态模量; 动态蠕变试验; 车辙预估模型

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)04-0091-06

## Study of Permanent Deformation Model of Asphalt Mixture

Shan Jingsong, Du Beibei

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Based on the common asphalt pavement (AC-16, AC-25), the properties of asphalt concrete materials are obtained by the dynamic modulus in different frequencies and temperatures, and then the development of permanent deformation of the different load level and temperature is available by the dynamic creep test. On the basis of the dynamic modulus and the result of creep test, a creep model of asphalt pavement can be built. Compared with the experimental result, the creep model can predict the migration stage and stable stage of asphalt.

**Key words:** asphalt mixture; dynamic modulus; dynamic creep test; rut predictive model

车辆荷载反复作用下, 沥青路面会产生不可回复的粘性流动变形, 即车辙。车辙的不断发展严重影响道路的平整度, 降低行车舒适性, 并影响行车安全。相关文献<sup>[1]</sup>研究表明, 温度和荷载水平都会直接影响沥青路面车辙的产生。美国的沥青路面设计方法 AASHTO2002 中使用塑性应变和弹性应变两者的比值关系建立了车辙预估模型<sup>[2-3]</sup>。我国的沥青路面设计中仅在沥青混合料级配设计阶段考虑了高温抗车辙性能, 在结构设计阶段并未考虑车辙因素。本研究针对山东省常用的沥青混合料 AC-16, AC-25, 通过动态模量试验和动态蠕变试验分析沥青混合料的受力变形特性和蠕变规律, 以此建立沥青混合料的永久变形模型, 为沥青路面车辙分析提供依据。

## 1 动态模量实验

动态模量试验的最新规程(AASHTO TP-62)建议, 在无围压的条件下对圆柱型试件( $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ )施加连续正弦荷载。动态模量可以根据试验达到稳定状态时的应力幅值和应变幅值的比值来确定, 计算方法如式(1)所示:

收稿日期: 2013-04-12

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2011EEQ027); 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金项目(201002)

作者简介: 单景松(1978—), 男, 山东东营人, 副教授, 博士, 主要从事路面结构研究。E-mail: cyhsjs@163.com

$$\begin{cases} \sigma_o = \frac{\bar{P}_1}{A} = \frac{4 \bar{P}_1}{\pi D^2} \\ \epsilon_o = \frac{\bar{\Delta}}{l_o} \end{cases} \Rightarrow |E^*| = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \quad (1)$$

其中： $\sigma_o$ —应力幅值； $\bar{P}_1$ —试验中施加的荷载值； $A$ —试样的横截面积； $\epsilon_o$ —应变幅值； $\bar{\Delta}$ —试件的形变量； $l_o$ —试件上应变计的测量间距； $|E^*|$ —动态模量。

本研究采用 UTM 试验机对山东地区常用的 2 种沥青混合料 AC-16, AC-25 进行了动态模量试验, 试验分别在 20, 40, 55 °C 下进行, 每一个温度分别测试 7 个不同频率(25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1, 0.01 Hz) 的动态模量。采用沥青混合料圆柱体试件, 沥青混合料的级配及最佳油石比列于表 1 中, 试件尺寸为直径 100 mm, 高度 150 mm。

试验荷载为半正弦波轴向压应力。试验过程中试件顶面沿圆周等距安放 3 个位移传感器, 以 3 个位置测量的试件压缩变形的平均值作为压缩变形值。动态模量试验结果列于表 2。从试验结果可以看出, 频率和温度对动态模量结果影响非常大。以 AC-16 为例, 40 °C 情况下频率从 0.01 Hz 变化到 10 Hz 过程中, 动态模量值从 522.0 MPa 增加到 3936.0 MPa, 增加幅度达 6.5 倍。同样温度对动态模量的结果影响也非常大, 如频率为 10 Hz 时, 20 °C 的动态模量是 40 °C 的 2.6 倍, 是 55 °C 的 8.5 倍。因此, 在使用沥青混合料的动态模量值时必须说明温度和频率。

表 1 沥青混合料 AC-16, AC-25 的级配及最佳油石比表

Tab. 1 The graded design of mixture (AC-16/AC-25) and bitumen aggregate ratio

筛孔 /mm	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	油石比
AC-16 的通过率 /%	100	100	100	94.2	85.9	74.3	46.1	32	23.4	15.8	11.3	8.4	6.0	4.8
AC-25 的通过率 /%	100	97.3	80.9	74.3	68.1	56.3	41.0	28.6	22.6	16.7	11.4	6.6	4.2	4.2

表 2 AC-16, AC-25 在不同温度和不同频率下的动态模量值表

Tab. 2 Dynamic modulus of AC-20 and AC-25 in different temperature and frequency

温度 /°C	材料	频率 /Hz						
		25	10	5	1	0.5	0.1	0.01
20	AC-16	12 151	10 266	8 801	5 906	4 856	3 011	1 506
		5 156	3 936	3 104	1 735	1 406	885	522
		1 689	1 201	906	520	440	312	217
40	AC-25	15 016	13 006	11 198	8 036	6 806	4 501	2 316
		5 923	4 396	3 506	2 006	1 570	931	478
		2 299	1 601	1 207	653	516	320	201

## 2 动态蠕变实验

动态蠕变试验主要测试沥青混合料试件在动态荷载下的蠕变变形规律。试验过程使用 UTM 试验机完成, 分别在 40, 60 °C 下进行, 每个温度下设定两个荷载水平, 分别为 1.0 和 0.6 MPa。采用的试件形状为圆柱体, 直径为 100 mm, 高度为 150 mm。施加的荷载形式为半正弦波, 1 s 作为一个循环周期, 加载过程 0.1 s, 卸载过程 0.9 s, 如图 1 所示。图 2 为 AC-16 和 AC-25 两种沥青混合料的蠕变规律。

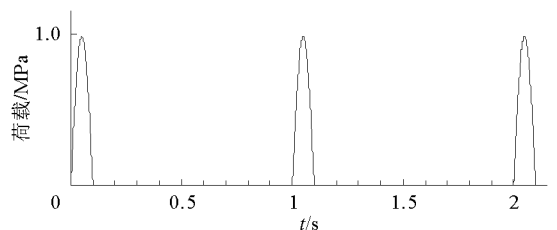


图 1 间歇式荷载加载方式图

Fig. 1 Loading pattern in each cycle

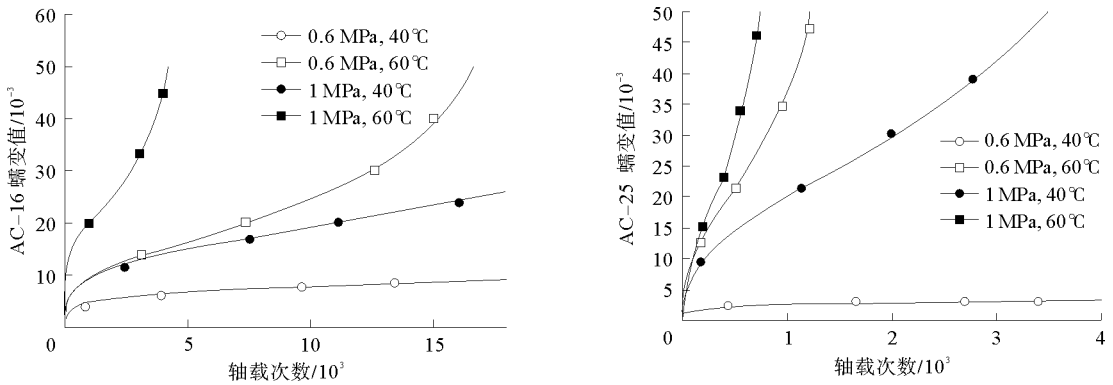


图2 蠕变实验结果图

Fig. 2 The curve of creep experimental results

由蠕变试验结果可以看出,沥青混合料蠕变过程的三阶段特征非常明显,即迁移期、稳定期和破坏期。迁移期(曲线起始阶段)蠕变变形在瞬间迅速增大,但应变速率  $\epsilon_s = d\epsilon/dt$  随荷载作用次数增加迅速减小;稳定期蠕变变形增长速度相对缓慢,应变速率相对稳定;破坏期蠕变变形和应变速率均急剧增大,直至破坏试件。动态蠕变试验结果同时表明:温度较高或荷载水平较高时,沥青混合料在较少的荷载作用次数下即进入第三阶段破坏期;相反,温度较低或荷载水平较低时,沥青混合料则需要较多的作用次数后进入破坏期。因此,在讨论沥青混合料的蠕变特性时必须将温度和荷载水平考虑在内<sup>[4]</sup>。

### 3 沥青混合料蠕变模型分析

#### 3.1 蠕变模型

近年来,国内外道路工作者提出了大量车辙预估模型,如 Burgers 模型及同济大学徐士法提出的修正 Burgers 模型,被广泛应用于沥青路面的车辙预估设计中<sup>[5-7]</sup>。该类模型以粘弹性力学为基础,对静态荷载下的蠕变增长特性进行分析,但模型不能将沥青混合料的塑性特性考虑在内,另外该模型能否正确使用取决于模型参数测试的准确性。美国公路学会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)经过多组室内试验提出了车辙分析模型:

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \quad (2)$$

其中:  $\epsilon_p$ —永久应变;  $\epsilon_r$ —弹性应变;  $T$ —温度;  $N$ —荷载作用次数;  $a_1, a_2, a_3$ —拟合常数。

该模型将沥青混合料的永久应变和弹性应变的比值表示为试验温度和荷载重复次数的函数,是一个比较全面且简洁的蠕变分析模型<sup>[8-9]</sup>。本研究首先采用 AASHTO 模型,对上文中的动态蠕变试验数据进行分析,以验证该模型的适用性。

根据式(2),永久变形模型中的弹性应变可以通过上文动态模量值和动态蠕变试验中的荷载水平得到。利用多项式拟合,将荷载 0.6, 1.0 MPa, 频率 10 Hz, 温度 40, 60 °C 下,蠕变试验值与预估值如图 3 所示。可以看出, AASHTO 模型可以较好地模拟沥青混合料蠕变的前两个阶段,即迁移期和稳定期。考虑到路面使用过程中,当车辙深度超过一定值时,必须进行维修,所以对车辙预估的研究一般不考虑破坏阶段。因此,对永久变形模型进行精度分析时,仅考虑迁移期和稳定期即可满足实际需要。

但是,通过对 AASHTO 模型进一步分析发现,在单个应力水平下,如 0.6 或 1.0 MPa 时, AASHTO 模型都能较准确地模拟永久变形规律,而两个应力水平下该模型的回归参数  $a_1, a_2, a_3$  相差很大,说明参数受应力水平的影响。因此,对 AASHTO 模型进行改进,以建立更为通用的永久变形分析模型。

从 AASHTO 模型可以看出,在同一温度下,随应力水平、荷载作用次数的变化,蠕变应变与弹性应变比值本身也受到应力水平的影响。为消除应力水平对模型参数的影响,将式(2)中左侧分母弹性应变移项,并表示为应力水平和动态弹性模量的关系,如式(3)所示。根据已有文献结果,对于同一种沥青混合料,其弹性

模量是关于温度  $T$  的指数函数,因此在温度范围内对式(3)中关于温度的项利用数学方法进行合并,并考虑到蠕变变形与应力水平并非线性关系,最终得到 AASHTO 模型的修正形式,如式(4)所示,下文称该模型为修正 AASHTO 模型。

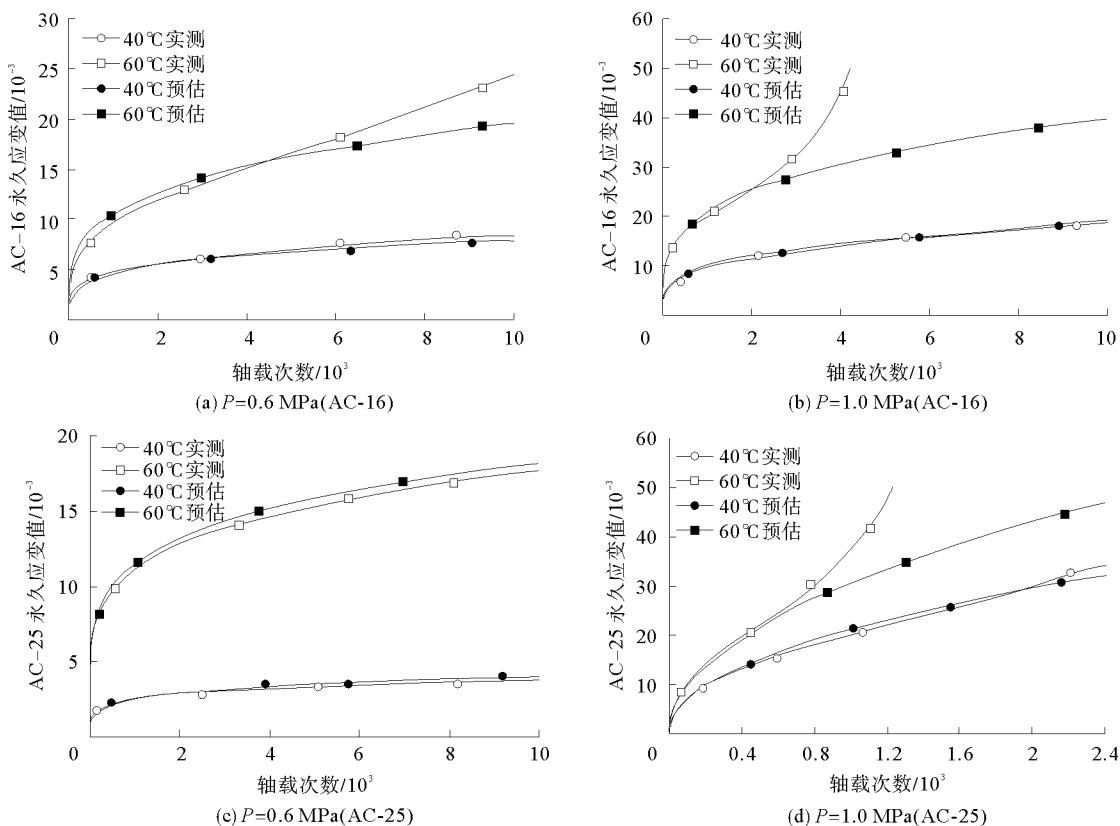


图 3 蠕变预估值与实测值比较图

Fig. 3 Comparison of calculated value and measured value of creep

$$\epsilon_p = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \epsilon_r \Rightarrow \epsilon_p = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \sigma |E^*|; \quad (3)$$

$$\epsilon_p = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \sigma^{a_4}. \quad (4)$$

其中: $T$ —温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $N$ —轴载作用次数;  $\sigma$ —应力水平,  $\text{MPa}$ ;  $a_1, a_2, a_3, a_4$ —拟合常数。

### 3.2 修正 AASHTO 模型分析

分别提取动态蠕变试验中 40, 60  $^{\circ}\text{C}$  条件下不同荷载水平的数据,使用式(4)进行曲线拟合,得到常用沥青混合料 AC-16 和 AC-25 的拟合参数  $a_1, a_2, a_3, a_4$  的取值,具体数值列于表 3 中。

表 3  $a_1, a_2, a_3, a_4$  取值表

Tab. 3 The value of  $a_1, a_2, a_3, a_4$

材料	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
AC-16	0.997	1.96	0.28	1.47
AC-25	0.898	1.638	0.28	1.51

将 AC-16 和 AC-25 两种沥青混合料的动态蠕变试验实测值

和本文提出的修正 AASHTO 模型的计算值分别绘于图 4 和图 5 中。可以看出,在车辙产生的前两个阶段即迁移期和稳定期,修正模型计算值跟试验实测结果比较吻合,说明修正 AASHTO 模型能够将不同应力水平下的蠕变规律统一在一个公式中。

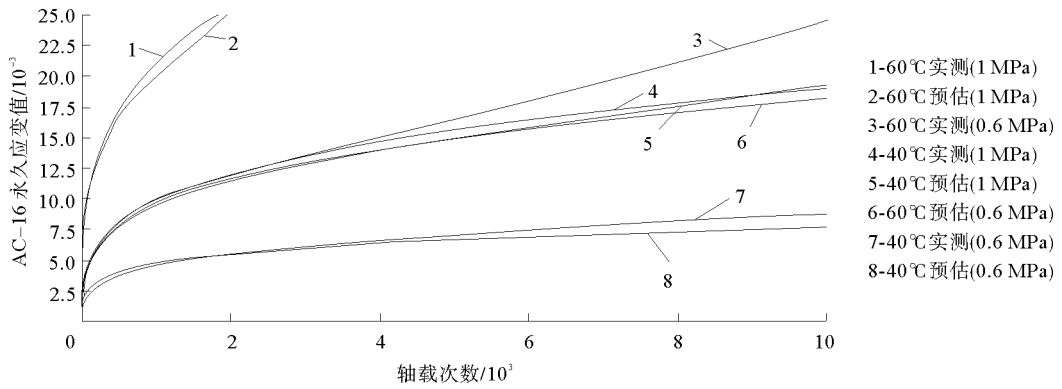


图 4 AC-16 永久应变的预估值与试验值图

Fig. 4 Comparison of calculated value and measured value(AC-16)

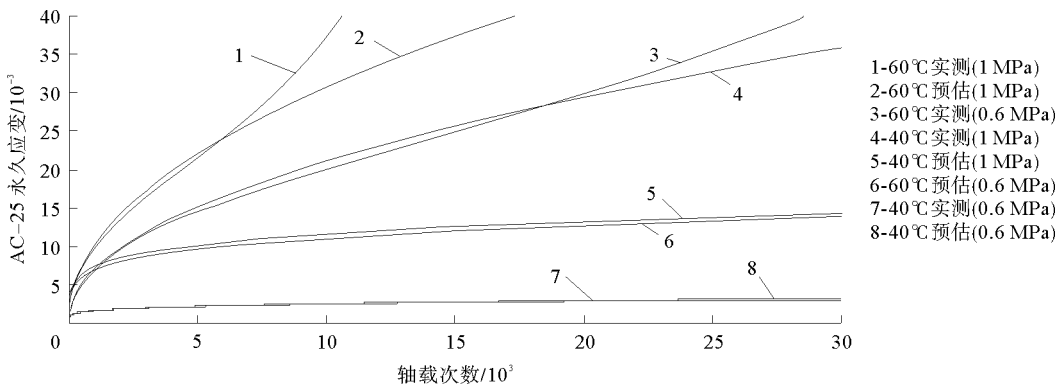


图 5 AC-25 永久应变的预估值与试验值图

Fig. 5 Comparison of calculated value and measured value(AC-25)

#### 4 结束语

沥青混凝土是温度敏感性材料,在高温季节汽车荷载反复作用下易产生车辙病害。选取山东省常用沥青混合料类型 AC-16 和 AC-25 作为研究对象,在最佳油石比下对其永久变形模型进行了探讨,主要完成了以下工作:

1)对 AC-16 和 AC-25 在不同温度和不同频率下进行了动态模量测试,试验结果表明频率和温度对动态模量有重要影响,因此对沥青混合料的力学参数取值时应充分考虑荷载作用的频率和温度。

2)分析了 AASHTO 设计方法中沥青混合料永久变形模型对应力水平考虑的不足,对其进行了改进,建立了修正 AASHTO 模型。该修正模型综合考虑了温度、荷载作用次数、应力水平和动态模量对永久变形的影响。修正 AASHTO 模型永久变形预测值与试验实测值的对比,表明修正模型可以较好地预测车辙产生的迁移期和稳定期。

#### 参考文献:

[1]苏凯,孙立军.高等级沥青混凝土路面车辙预估方法研究综述[J].公路,2006,9(7):16-19.  
Su kai,Sun Lijun. A summary of rutting prediction method on high grade asphalt concrete pavement[J]. Highway,2006,9 (7):16-19.

[2]AASHTO. Report of the joint task force on rutting[M]. Washington D. C. , AASHTO Publishers,1989:46-49.

[3]AASHTO. Mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures guide 2002[M]. Washington D. C. , AASHTO Publishers,2004:126-129.

[4]赵延庆,吴剑. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路,2006,9(8):163-166.

Zhao Yanqing, Wu Jian. Determination and analysis of dynamic modulus of asphalt mixture and its master curve[J]. Highway, 2006, 9(8): 163-166.

[5] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石粘弹塑性本构关系及改进的 Burgers 蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 23-26.

Yuan Haiping, Cao Ping, Xu Wanzhong, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 23-26.

[6] 许志鸿, 孙洪燕, 陈兴伟, 等. 沪宁高速公路扩建工程沥青路面结构研究试验路观测与分析 [J]. 公路工程, 2007(6): 101-105.

Xu Zhihong, Sun Hongyan, Chen Xingwei, et al. Research on asphalt pavement structure of Shanghai-Nanjing expressway extension survey and analysis of test section[J]. Highway Engineering, 2007(6): 101-105.

[7] 徐世法, 朱照宏. 高等级道路沥青路面车辙的控制与防治[J]. 中国公路学报, 1993(3): 1-7.

Xu Shifa, Zhu Zhaohong. Control and prevention of rutting in asphalt pavements of high-class road[J]. China Journal of Highway and Transport, 1993(3): 1-7.

[8] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 15-20.

[9] 张久鹏, 黄晓明, 李辉. 重复荷载作用下沥青混合料永久变形[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 511-515.

Zhang Jiupeng, Huang Xiaoming, Li Hui. Permanent deformation of asphalt mixture under repeated load[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(3): 511-515.

(责任编辑: 吕文红)

---

(上接第 90 页)

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家标准, GB/T 23541—2009, 建筑用轻质隔墙条板[S].

[2] 张兴福, 曹永敏, 催洪涛, 李战发. 菱镁复合保温建筑墙板研究[J]. 21 世纪建筑材料, 2010, 2(5): 20-24.

[3] DImore M, Neufeld R D. Autoclaved aerated concrete produced with low noburner/selective catalytic reduction fly ash[J]. Journal of Energy Engineering, 2001, 8: 37-50.

[4] Prabha P, Marimuthu V. Effect of confinement on steel-concrete composite light-weight load-bearing wall panels under compression. [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 81(9): 11-19.

[5] 金勇, 程才渊. 蒸压加气混凝土墙板连接节点性能实验研究[J]. 墙体革新与建筑节能, 2009(2): 34-39.

Jin Yong, Cheng Caiyuan. Experimental study on connection joint of autoclaved aerated concrete slabs[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2009(2): 34-39.

(责任编辑: 吕海亮)