

基于 SMA-13 级配的重载交通沥青路面设计及性能分析

Design and Performance Analysis of Heavy Traffic Pavement based on SMA-13 Gradation

王英帅¹, 万超²

(1. 郑州路桥建设投资集团有限公司, 河南 郑州 450000;
2. 河南工业贸易职业学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 重载交通沥青路面对于混合料的级配及材料组成要求较高, 研究采用 AC-13 和 SMA-13 两种不同级配分别制备掺和不掺抗车辙剂的沥青混合料, 探究不同级配组成混合料间的性能差异, 主要考察了沥青混合料的动稳定度、残留稳定度、冻融劈裂强度比及劈裂寿命, 研究表明 SMA-13 级配沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性及抗疲劳性能较好, 抗车辙剂材料的加入能整体提升混合料 15% 以上的综合性能, 建议重载交通沥青路面采用 SMA-13 级配和抗车辙剂, 可实现重载沥青路面长期的健康稳定发展。

关键词: 级配设计; 重载交通; 路用性能; 抗车辙剂

中图分类号: U416 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 06-0070-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.011

WANG Yingshuai¹, WAN Chao²

(1. Zhengzhou Road and Bridge Construction and Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;
2. Henan Industrial and Trade Vocational College, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Heavy-duty traffic asphalt pavement has higher requirements for gradation and material composition of mixtures. Two kinds of gradation, AC-13 and SMA-13, are used to prepare asphalt mixtures with and without anti-rutting agent respectively, the difference of performance among different gradation mixtures is explored, and the dynamic stability, residual stability, freeze-thaw crack strength ratio and crack life of asphalt mixture are mainly investigated, the results show that the SMA-13 gradation asphalt mixture has good high temperature stability, low temperature anti-cracking and anti-fatigue properties, and the adding of anti-rut agent material can improve the comprehensive properties of the mixture more than 15%, it is suggested that SMA-13 gradation and anti-rutting agent should be applied to heavy-load asphalt pavement to realize long-term healthy and stable development of heavy-load asphalt pavement.

Keywords: gradation design; heavy-duty traffic; road performance; anti-rutting agent

0 引言

道路基础建设的迅猛发展极大的促进了交通网络的联通, 交通量的持续增长对道路服役产生一定负担, 尤其是重载交通环境, 更会对道路产生严重变形破坏。现有路面结构常采用改性 AC 密实级配沥青混合料作为面层结构, 其抗变形能力

作者简介: 王英帅 (1975—), 男, 高级工程师, 主要从事道路工程专业工作。

收稿日期: 2023-07-02

较好，但在低温重载环境下易产生开裂损伤，而 SMA 和 SUP 级配的骨架结构较为稳定，在重载交通环境下具有较好的性能表现^[1-3]。王君^[4]在低温和高温两种不同环境下对 AC-13 及 SMA-13 两种不同级配沥青混合料进行冲击荷载作用，认为 SMA-13 混合料的抵抗冲击的韧性更好；何壮彬^[5]研究了粗骨料掺量对 SMA-13 沥青混合料的性能影响，认为粗骨料的增加可增强高温稳定性和施工和易性；石红星等^[6]对 AC-13 和 SMA-13 两种级配沥青混合料的低温性能进行研究，认为 SMA-13 混合料的柔韧性好，低温抗裂性更优；关永胜等^[7]分别在 AC-13 和 SMA-13 两种级配沥青混合料掺加橡胶沥青进行改性，研究表明 AC-13 橡胶改性沥青混合料的高温稳定性较好；李艳玲等^[8]对 AC-13 和 SMA-13 两种沥青混合料的抗老化性能进行研究，认为 AC-13 沥青混合料的抗老化性更强。上述研究表明：AC-13 和 SMA-13 两种不

同级配沥青混合料的性能各有优缺点，为进一步探究重载交通环境下不同级配的适用性，研究在道路结构设计的基础上对两类级配沥青混合料的路用性能进行研究，旨在促进重载道路路面的综合服役质量。

1 面层结构分析比选

关于道路结构的设计，不同国家和地区会根据其所处的地理位置、气候条件及交通发展水平做出一定适用性调整，道路结构的设计主要包括沥青层、基层及底基层的材料及厚度选取^[9-10]。上面层是直接和路面行车荷载相接触的层位，受雨水冲刷侵蚀影响，面层结构需具备较好的抗滑性能，研究一般采用改性沥青混合料作为上面层材料，要求具备较好的感温性、耐久性，常贵的上面层结构及其优缺点如表 1 所示。

表 1 上面层不同结构材料技术特征

Table 1 Technical characteristics of different structural materials in the upper layer

功能特点	级配类型	孔隙率	沥青用量	抗高温变形	抗裂性能	水稳定性	耐久性能	抗磨损性能	抗滑性能	结构功能
SMA-13	断级配	较小	较多	很好	很好	很好	很好	很好	较好	良好
Sup-13	粗级配	稍大	少	好	略差	差	略差	较好	略好	好
AC-13C	嵌挤密实级配	较少	少	较好	好	较好	较好	较好	差	好
OGFC-13	开级配	很大	较多	好	差	差	差	差	很好	差

目前道路上面层结构主要以传统 SMA-13 和 AC-13 为主，Sup-13 和 OGFC-13 级配是根据道路技术水平提升，为满足特定道路使用要求所设计的结构。SMA-13 沥青混合料的孔隙率较小，由于需要木质素等纤维材料来达到内部稳定效果，需消耗较多的沥青用量，其在抗裂、抗车辙、抗水损伤等方面均存在较好的表现。而 AC-13 密实型级配沥青混合料，其内部骨料均能实现较好的嵌挤作用，整体的强度和稳定性较好。而 Sup-13 和 OGFC-13 在高温抗变形、抗裂等方面交 SMA-13 和 AC-13 仍存在一定差异。

2 原材料与试验方案

2.1 矿料

研究选用的骨料存产自湖北，粗集料为普通石灰岩，细集料为玄武岩，填料为矿粉，矿料的粒径分布较为均匀，干净无明显杂质，粗集料的

压碎值和磨耗值符合道路施工技术要求，矿料的技术指标如表 2 所示。

表 2 矿料技术指标

Table 2 Technical indexes of mineral materials

矿料类型	毛体积相对密度 / (g/cm ³)	含水率 /%	吸水率 /%	压碎值 /%	磨耗值 /%
粗集料	2.72	4.2	0.8	13.2	12.4
细集料	2.61	3.6	1.2	—	—
填料	—	2.4	3.6	—	—

2.2 SBS 改性沥青

研究采用 SBS 改性沥青分别制备 SMA-13 和 AC-13 沥青混合料，沥青的技术指标如表 3 所示。

表 3 SBS 改性沥青技术指标

Table 3 Technical indexes of SBS modified asphalt

试验项目	针入度 /0.01mm	软化点 /°C	弹性恢复 /%	针入度 指数	延度 /cm
试验结果	58.6	77.8	68.2	0.525	36.2

2.3 木质素纤维

木质素纤维是 SMA 级配沥青混合料中的稳定剂，主要是维系沥青在混合料中的分布状态，可

材料科学

改善沥青混合料的路用性能，混合料拌合过程中掺量为 0.4%，技术指标如表 4 所示，其形貌如图 1 所示。

表 4 木质素技术指标

Table 4 Technical indicators of lignin

项目类别	长度/mm	灰分/%	温度/°C	PH 值	含水率/%
技术指标	6~8	18.3	285	5~7	3.6



图 1 木质素纤维
Fig.1 Lignin fiber

2.4 抗车辙剂

抗车辙剂 (PR) 是一种灰色的固体颗粒，可显著提高抗车辙能力、改善低温抗裂性能，减少因交通荷载所造成的路面疲劳破坏。具有增稠-粘连-增韧作用，适用于重载交通沥青路面，其技术指标如表 5 所示，其形貌如图 2 所示。

表 5 抗车辙剂技术指标

Table 5 Technical indexes of anti-rutting agent

项目类别	粒径/mm	软化点/°C	拉伸强度/MPa	密度/(g/cm ³)	断裂延伸率/%
技术指标	3~4	135~150	23~28	0.93~1.05	8~12



图 2 抗车辙剂
Fig.2 Anti-rutting agent

2.5 试验方案

研究对 AC-13 及 SMA-13 两种级配分别进行掺和不掺抗车辙剂沥青混合料的性能研究，其中，

抗车辙剂的掺量为 0.4%，AC-13 及 SMA-13 级配曲线如图 3 和图 4 所示。

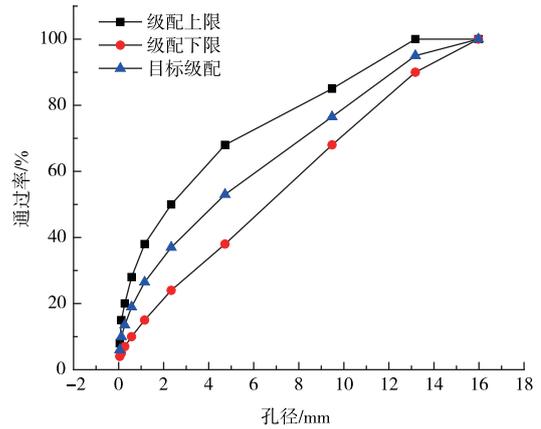


图 3 AC-13 级配曲线
Fig.3 AC-13 grading curve

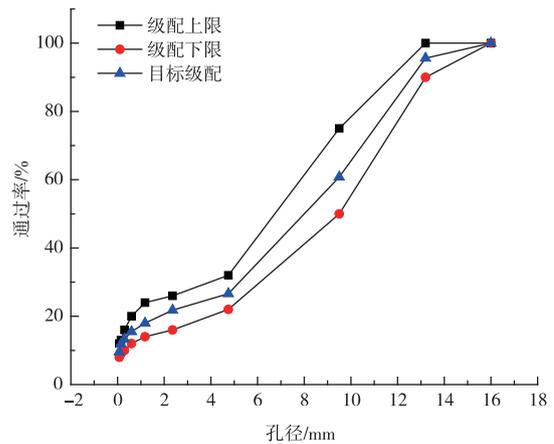


图 4 SMA-13 级配曲线
Fig.4 SMA-13 grading curve

对两种不同级配沥青混合料的马歇尔试件进行测试，试验结果如表 6 所示。

表 6 不同级配沥青混合料马歇尔技术指标

Table 6 Marshall technical indexes of different graded asphalt mixture

混合料类型	油石比/%	毛体积密度/(g/cm ³)	空隙率/%	稳定度/kN	流值/0.1mm
AC-13	4.9	2.432	4.68	14.2	26.5
AC-13 (PR)	5	2.435	4.72	17.2	28.7
SMA-13	6.3	2.483	4.86	8.6	42.6
SMA-13 (PR)	6.4	2.485	4.83	11.9	45.6

AC-13 级配与 SMA-13 级配在油石比、稳定度及流值方面均存在一定差异，SMA 级配中添加了木质素纤维，具体吸油特性，需要消耗更多的沥青来稳定混合料中集料的分布，而抗车辙剂 PR 的加入，也会在一定程度上增加油石比，且掺 PR

的沥青混合料，其稳定性和流值均有一定增长。

3 沥青混合料路用性能研究

3.1 高温稳定性

重载交通会对沥青面层产生一定变形损伤，在高温环境下更会加剧路面的车辙病害。研究为探寻适用于重载交通环境的路面结构及材料，对相关性能进行探究。选用高温车辙仪来模拟路面行车对沥青混合料的车辙损伤，用动稳定度来具体进行量化表征，动稳定度越大，则表明高温稳定性越好，路面车辙损伤程度越小，试验结果如图 5 所示。

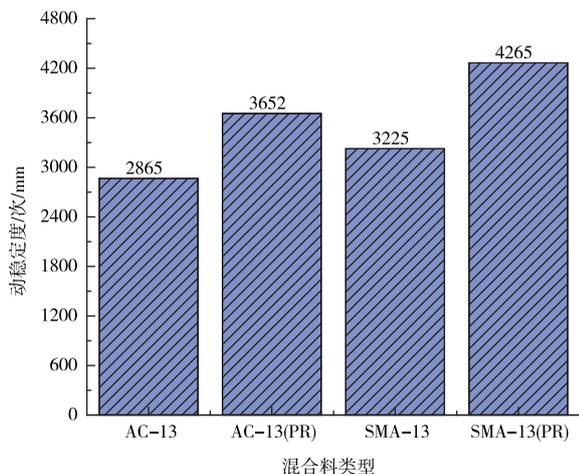


图 5 沥青混合料高温稳定性
Fig. 5 High temperature stability of asphalt mixture

由图 5 可知，四种不同级配类型沥青混合料的动稳定度值分别为 2865 次/mm、3652 次/mm、3225 次/mm 和 4265 次/mm，掺抗车辙剂的 AC-13 级配沥青混合料动稳定度较普通沥青混合料提升了 27.47%，掺抗车辙剂的 SMA-13 级配沥青混合料动稳定度较普通沥青混合料提升了 32.25%，而 SMA-13 (PR) 动稳定度较 AC-13 (PR) 提升了 16.79%。SMA-13 是一种由粗骨料嵌挤形成的开级配混合料，由木质素纤维填充起到稳定作用，与此同时，木质素页起到了材料内部加筋作用，可抵抗车辆荷载产生的变形开裂。而抗车辙剂的加入使得混合料的动稳定度进一步提升，抗车辙剂中的高黏组分能够实现材料的黏弹性增强，材料通过相关嵌挤裹附，使得强度进一步提升。

3.2 水稳定性

高等级沥青路面不仅要承受重载交通环境影响，还需要具备较好的抗滑和防水损伤性能，研究采用残留稳定性和冻融劈裂强度比来探究四种不同类型沥青混合料的水稳定性，试验结果如表 7 所示。

表 7 沥青混合料水稳定性
Table 7 Water stability of the asphalt mixture

混合料类型	残留稳定度/%	冻融疲劳强度比/%
AC-13	87.5	85.6
AC-13 (PR)	88.2	86.1
SMA-13	86.4	83.5
SMA-13 (PR)	87.1	83.7

将四种不同类型混合料的残留稳定度剂冻融劈裂强度比绘制成图分析，如图 6 所示。

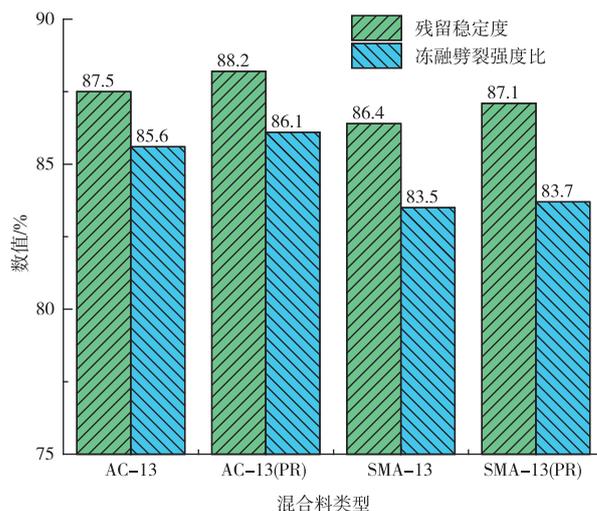


图 6 沥青混合料水稳定性
Fig. 6 Water stability of the asphalt mixture

根据图 6 可知，AC 级配沥青混合料的水稳定性要优于 SMA 级配，掺抗车辙剂 PR 沥青混合料水稳定性要优于不掺抗车辙剂沥青混合料，其主要原因是：AC 级配是密实型级配，粗细骨料的骨架嵌挤作用十分明显，在水损伤环境中，水分子的侵蚀不易对混合料的整体稳定性产生劣化影响，而 SMA 级配是大骨料支撑结构，且通过木质素纤维进行沥青、集料间的加筋和稳定作用，但木质素具有吸水特性，水分子侵蚀净润下，木质素易产生膨胀，削弱了其在混合料中裹附强度，水分子易沿内部孔隙进行渗透，进一步破坏结构的稳定性。抗车辙剂在混合料拌合过程中，受热作用

材料科学

下化解为黏聚较高的聚合物，在一定程度上会增强集料间的黏聚作用。

3.3 低温抗裂性能

高等级公路往往架设在空旷地域，受昼夜温差影响，沥青路面往往会受到低温开裂影响，在重载交通环境下会进一步削弱材料的强度等级，研究对四种不同类型沥青混合料的低温开裂性能进行研究，采用低温小梁试件在-10℃环境下进行破坏荷载施加，采用破坏应变指标来评价低温抗裂性能，试验结果如图7所示。

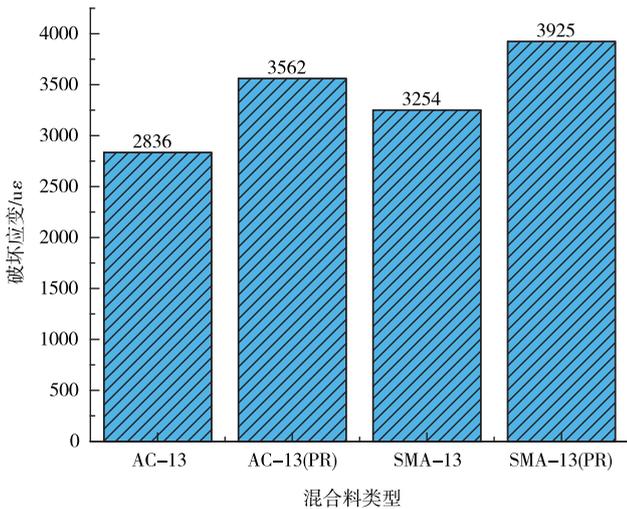


图7 沥青混合料低温抗裂性

Fig. 7 Low-temperature crack resistance of asphalt mixture

由图7可知，上述四类不同沥青混合料中，掺抗车辙剂的SMA-13级配沥青混合料破坏应变最大，达到3925με，掺抗车辙剂的AC-3级配沥青混合料次之，破坏应变达到3562με，二者分别较不掺抗车辙剂的沥青混合料提升20.62%和25.60%。说明SMA-13级配的低温抗裂性能要优于AC-13级配，抗车辙剂有利于提升材料的低温抗裂性能。其主要是因为SMA-13级配中采用了高用量改性沥青和木质素纤维，二者可以充分与集料产生均匀融合，材料的黏度增强，提升了沥青混合料抵抗外部荷载变形能力。抗车辙剂本质上高分子聚合物，在高温环境下，黏聚物能够与沥青进行有效熔融反应，进一步增强材料的延展性，在低温环境下材料产生开裂收缩破坏的风险有所降低。

3.4 抗疲劳性能

沥青路面在长期的服役过程中会面临疲劳损伤问题，疲劳损伤是沥青路面在持续的开裂破坏下产生的集中性病害，会削弱沥青路面的服役质量水平。研究对四种不同类型沥青混合料的疲劳性能进行研究，采用四点弯曲荷载试验来分析试件在650με下的疲劳寿命，试验结果如表8所示。

表8 沥青混合料疲劳寿命
Table 8 Fatigue life of asphalt mixture

混合料类型	AC-13	AC-13 (PR)	SMA-13	SM-13 (PR)
疲劳寿命/次	161550	188360	198760	222690

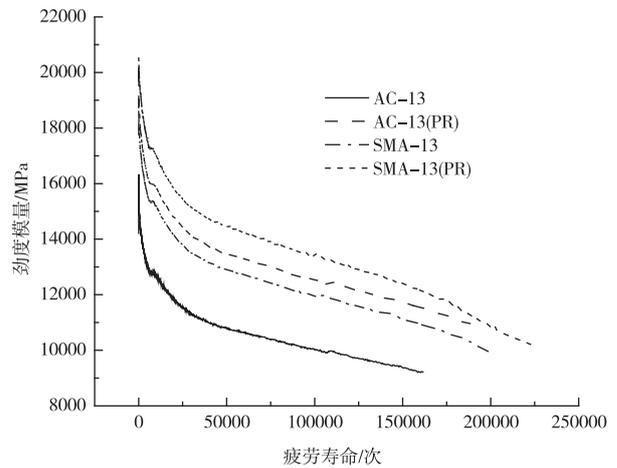


图8 疲劳寿命-劲度模量曲线

Fig. 8 Fatigue life-strength modulus curve

由图8可知，四种不同沥青混合料的疲劳寿命存在一定差异，其中，掺抗车辙剂的SMA-13混合料疲劳寿命最大，达到222690次，普通AC-13混合料的疲劳寿命最小，达到161550次。SMA-13级配沥青混合料在掺加抗车辙剂前后，其疲劳寿命提升了12.04%，而AC-13级配提升了16.60%。说明抗车辙剂对提升混合料的疲劳寿命效果方面，AC-13级配更加显著。SMA-13级配混合料的疲劳寿命要优于AC-13级配，其主要原因是SMA-13级配主要是由粗骨料嵌挤形成，骨架结构的稳定对维系沥青路面的疲劳性能具有重要意义。抗车辙剂高聚合物材料有利用增强沥青路面的疲劳性能，重载交通沥青路面可根据道路服役需求进行科学合理使用。

3.5 混合料综合性能分析

为进一步综合比选不同类型沥青混合料的差

异性，研究采用无量纲化对试验数据进行处理，结果如表 9 所示。

表 9 沥青混合料无量纲化数据处理
Table 9 Dimensionless data processing of asphalt mixtures

混合料类型	动稳定度	残留稳定度	冻融疲劳强度比	破坏应变	疲劳寿命
AC-13	0.67	0.99	0.99	0.72	0.73
AC-13 (PR)	0.86	1.00	1.00	0.91	0.85
SMA-13	0.76	0.98	0.97	0.83	0.89
SMA-13 (PR)	1.00	0.99	0.97	1.00	1.00

无量纲化后的数据表明，SMA-13 级配的动稳定度、破坏应变及疲劳寿命均优于 AC-13 级配，而 AC-13 级配在残留稳定度和冻融疲劳强度比方面占据优势。抗车辙剂材料的加入整体改善了沥青混合料的路用性能。对各路用性能进行均等赋值并对不同级配沥青混合料整体性能进行排序：SMA-13 (PR) > AC-13 (PR) > SMA-13 > AC-13。

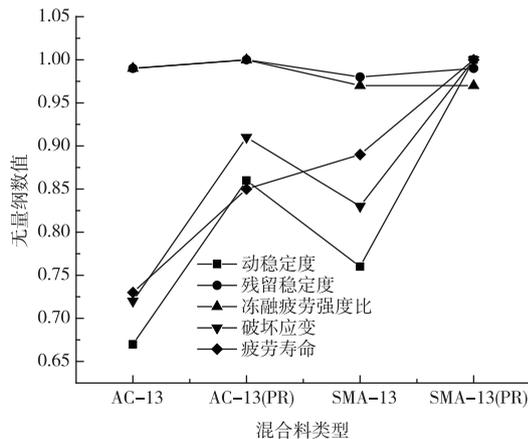


图 9 不同类型沥青混合料无量纲数值

Fig. 9 Dimensionless values of different types of asphalt mixtures

4 结语

重载交通环境对沥青路面有着更高的质量技

术要求，传统的密实型级配沥青混合料易在长期荷载作用下产生车辙变形、路面开裂等问题。本文在对比现有路面结构的基础上对比了掺加抗车辙剂前后 AC-13 及 SMA-13 级配的路用性能，研究表明 SMA-13 级配在高温稳定性、低温抗裂性剂疲劳寿命方面更具优势，而抗车辙剂能够进一步增强相关材料的综合性能。将抗车辙剂材料用于 SMA-13 级配中可满足重载交通路面服役需求，可延长道路使用寿命，具有较广的应用推广价值。

参 考 文 献

- [1] 湿热地区重载交通下沥青混合料服役性能快速评价技术 [J]. 广东公路交通, 2019, 45 (4): 260.
- [2] 李铭. 基于重载作用下川藏公路柔性加固基层力学性能研究 [J]. 公路, 2022, 67 (6): 16-19.
- [3] 王晨. 基于重载交通下沥青混合料抗车辙性能研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- [4] 王君. 冲击荷载作用下 AC 与 SMA 沥青混合料动力学性质比较 [J]. 湖南交通科技, 2011, 37 (2): 18-22+193.
- [5] 何壮彬. SMA 混合料级配参数特征研究 [J]. 西部交通科技, 2013 (11): 1-4.
- [6] 石红星, 吕伟民. SMA 混合料与 AC 低温性能之比较 [J]. 石油沥青, 1999 (2): 1-6+12.
- [7] 关永胜, 谈至明, 张志祥. 间断级配橡胶沥青混合料抗车辙性能 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (5): 705-709.
- [8] 李艳玲, 任立锋, 王富玉. SMA13 沥青混合料老化性能研究 [J]. 北方交通, 2009 (7): 1-4.
- [9] 焦江华. 钢渣增强排水沥青混合料路用性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (6): 101-105.
- [10] 高嫒嫒, 刘志, 王鹏. 层间接触对沥青路面粘弹性动力响应影响研究 [J]. 力学季刊, 2022, 43 (2): 446-457.