文章编号:1674-2869(2024)05-0585-06

温拌LDHs改性沥青混合料抗紫外老化性能及应用研究

卢忠明[1],米轶轩[2],吴少鹏[*3],蒋永庆[1],黄文嗣[1],王 志[2],周宇恒[3]
1. 四川久马高速公路有限责任公司,四川阿坝藏族羌族自治州 610000;
2. 北京新桥技术发展有限公司,北京 100089;
3. 武汉理工大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430070

摘 要:采用层状双金属氢氧化物(LDHs)作为抗紫外添加剂,温拌剂作为降黏添加剂,制备了一种新型抗紫外沥青混合料。通过透射电子显微镜研究了LDHs的晶体稳定性,同时通过黏度试验研究了温拌剂的降黏效果,再通过物理性能试验、车辙试验、水稳定性试验研究了LDHs的最佳掺量及温拌LDHs改性沥青混合料的抗紫外老化性能,最后铺筑温拌LDHs改性沥青混合料试验段,对试验路用性能进行评价。结果表明:在170 ℃下,LDHs具有良好的晶体稳定性,温拌剂能显著降低LDHs改性沥青的黏度,LDHs能够有效提高温拌沥青混合料的抗紫外性能和力学性能,推荐实体工程中掺加LDHs质量与沥青质量之比为0.03。

关键词:改性沥青;沥青混合料;层状双金属氢氧化物;温拌剂;老化性能
中图分类号:U414 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202304025

Anti-ultraviolet aging performance and application of warm-mix asphalt mixtures containing layered double hydroxides additives

LU Zhongming[1], *MI Yixuan*[2], *WU Shaopeng*[*3], *JIANG Yongqing*[1], *HUANG Wensi*[1], *WANG Zhi*[2], *ZHOU Yuheng*[3]
1. Sichuan JiuMa Expressway Co., Ltd, Aba (Ngawa) Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture 610000, China;
2. Beijing Xinqiao Technology Development Co., Ltd, Beijing 100089, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: A new anti-ultraviolet (UV) asphalt mixture using layered double hydroxides (LDHs) as UV-resistant additives and warm-mix agents as viscosity-reducing additives was prepared. The stability of LDHs crystals was investigated by transmission electron microscopy. Simultaneously, viscosity tests were conducted to investigate the viscosity-reducing effect of the warm-mix agents. Subsequently, physical performance test, wheel rutting test, and moisture damage resistance performance test were conducted to investigate the optimal content of LDHs and the anti-UV aging performance of warm-mix asphalt mixtures containing LDHs additives. Finally, a test road with warm-mix asphalt mixtures containing LDHs additives was constructed, and the pavement performances of the test road was investigated. The results indicate that LDHs have excellent crystal structure stability at 170 ℃. The warm-mix agents significantly reduce the viscosity of the LDHs modified asphalt. LDHs effectively improve the anti-UV aging performance and mechanical

收稿日期:2023-04-21
基金项目:湖北省国际合作项目(2022EHB006)
作者简介:卢忠明,中级工程师。Email:981960755@qq.com
***通信作者**:吴少鹏,博士,教授。Email:wusp@whut.edu.cn
引文格式:卢忠明,王志,吴少鹏,等. 温拌LDHs改性沥青混合料抗紫外老化性能及应用研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(5):585-590.

performance of the warm-mix asphalt mixtures. The recommended mass ratio of LDHs to asphalt binder for engineering is 0.03.

Keywords: modified asphalt; asphalt mixtures; layered double hydroxides; warm-mix agent; aging characteristic

沥青是由多种有机高分子化合物组成的复杂混合物,不可避免地因光、热、氧等诸多因素作用而发生老化[1-3],老化后变硬变脆[4-5]。在车辆荷载的反复作用下,沥青路面逐渐产生裂缝、坑槽等病害,导致沥青路面路用性能急剧恶化,服役寿命缩短[6-7]。尤其在高海拔强紫外辐射更强的地区,紫外老化程度较平原地区的沥青路面更为严重。

近年来,许多学者针对沥青紫外老化的问题,选择利用层状双层金属氢氧化物(layered double hydroxides,LDHs)对紫外线的双重阻隔作用(物理屏蔽和化学吸收)来提高沥青的耐紫外老化能力,取得了显著的成效[8-10]。LDHs是一类性能优异的紫外阻隔材料,当紫外线在通过其多级层板时,在层板界面上发生多次反射和折射,从而减弱到达沥青内部的紫外线能量,起到屏蔽紫外线的作用。此外,层板上的金属元素和层间阴离子也可以对紫外线起到化学吸收作用[11-12]。黄永方[13]将LDHs加入沥青中并进行紫外老化试验,研究表明LDHs改性沥青能有效地提升沥青的抗紫外老化性能,且老化时间越长效果越明显。Wang等[14]用镁铝LDHs制备改性沥青,采用动态剪切流变仪试验和蠕变试验研究了LDHs改性沥青紫外老化前后的流变性能和黏弹性能,结果显示LDHs有效减缓了沥青的老化。Xu等[15]和Zhang等[16]采用不同方法进行LDHs改性,以提高LDHs在沥青中的相容性。温拌技术具有经济环境效益,能减少烟雾和温室气体排放,节约建设成本的同时降低能耗,是未来沥青混合料的重要发展方向[17-19],LDHs虽然在沥青领域得到了广泛应用,但是大部分研究都集中在LDHs改性和LDHs对沥青各种性能影响的方面,而在温拌沥青混合料中外掺LDHs的研究相对不足,且国内从未铺筑温拌LDHs改性沥青路面试验段,导致对LDHs温拌沥青路面的长期抗紫外老化效能研究缺乏实体工程应用支撑。

本文以LDHs作为抗紫外助剂,通过透射电子显微镜观察LDHs与沥青搅拌后晶体结构的变化,通过沥青的常规性能试验研究LDHs用量对沥青胶结料性能的影响,通过冻融劈裂试验和车辙试验研究LDHs对温拌沥青混合料的影响,基于此确定温拌LDHs改性沥青混合料的最佳制备参数。通过现场路面试验评价实际沥青路面施工质量,该技术在四川铺筑试验路,后续将长期跟踪检测不同服役年限抗紫外老化效能,为延长高海拔地区路面寿命提供理论基础及应用经验。

1 实验部分

1.1 原材料

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene,SBS)改性沥青,油石比为5.9%;德国JRS木质素纤维,掺量为混合料质量的0.4%;AMR-3抗剥落剂,掺量为沥青质量的0.3%;温拌剂为油性温拌剂,闪点为180 ℃,结焦值≥50,无灰分,掺量为沥青质量的0.6%;JC-03型沥青抗紫外老化助剂(LDHs);粗集料与细集料为玄武岩,主要技术指标见表1;沥青混合料类型为沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt,SMA)-13,粒径10~15 mm的玄武岩、粒径5~10 mm的玄武岩、粒径3~5 mm的玄武岩、粒径0~3 mm的玄武岩、矿粉的质量比为43∶30∶4∶13∶10。

表1 粗集料与细集料的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of coarse and fine aggregates

粒径/mm	表观相对密度	表观密度/(g/cm³)	毛体积相对密度	吸水率/%
10~15	2.931	2.924	2.868	0.74
5~10	2.933	2.926	2.853	0.96
3~5	2.929	2.922	2.809	1.46
0~3	2.916	2.908	/	/

1.2 室内试验

LDHs改性沥青的制备:首先取一定量的沥青在165 ℃的烘箱中保温2 h,再将沥青取出,用剪切机预剪切10 min,剪切速率为4 000 r/min,剪切温度为170 ℃,预剪切结束后将LDHs粉末倒入沥青中,在同样的转速和温度下继续剪切1 h,最后得到成品。掺加LDHs质量(m_L)与沥青质量(m_A)之比m_L∶m_A分别为0.00、0.03、0.04。

温拌LDHs改性沥青混合料试件使用LDHs改性沥青和其他原材料依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)标准制作。

沥青紫外老化试验：取20 g沥青在薄膜烘箱中短期热养老化5 h，随后放入紫外老化箱中老化，设置紫外光强度为10 W/m^2、温度为50 ℃[20]。沥青混合料紫外老化试验，设置紫外光强度为250 W/m^2，紫外老化162 h[21]。

采用透射电子显微镜来判断LDHs晶体结构的稳定性；根据标准JTG E20—2011对紫外老化前后沥青软化点、针入度、直接拉伸试验和布氏黏度等物理性能进行检测；依据标准JTG E20—2011采用冻融劈裂试验测试紫外老化前后沥青混合料的水稳定性能；依据标准JTG E20—2011采用动稳定度试验测试紫外老化前后沥青混合料的高温抗车辙性能。

1.3　现场试验

根据标准JTG 3450—2019测试抗紫外老化试验路的压实度和渗水系数；根据标准JTG E20—2011分别检测现场抗紫外老化路面与普通路面的芯样马歇尔稳定度。

2　结果与讨论

2.1　LDHs改性沥青抗紫外老化性能研究

2.1.1　LDHs结构稳定性　图1为普通LDHs和搅拌后重新析出的LDHs的透射电子显微镜图。由图1可知，普通LDHs和析出LDHs的晶格条纹规则排列且晶格间距相同，均为0.26 nm，即在170 ℃搅拌混合后LDHs的晶体结构未改变，这表明LDHs具有极好的结构稳定性，在与沥青搅拌混合后仍能达到其物理屏蔽和化学吸收的双重紫外吸收作用。

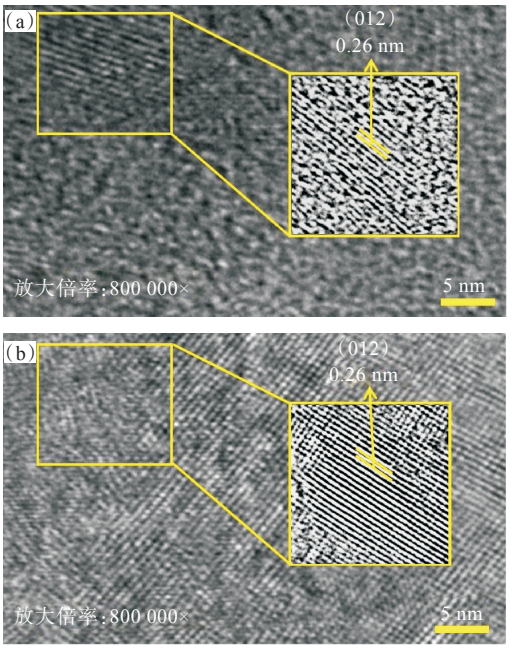

图1　普通LDHs(a)和搅拌后的LDHs(b)的透射电子显微镜图

Fig. 1　Transmission electron microscope images of ordinary LDHs (a) and LDHs precipitated after stirring (b)

2.1.2　LDHs改性沥青物理性能　图2(a)为LDHs改性沥青老化前后的针入度及针入度比。由图2(a)可知，外掺LDHs使沥青针入度下降，下降程度随掺量增加而增加，m_L∶m_A为0.03、0.04的改性沥青胶结料的针入度分别下降了0.20和0.67 mm，这是由于LDHs的加入会使沥青的流动性变差，从而导致沥青的针入度下降。紫外老化后针入度均降低，这是因为沥青老化会使轻质组分流失，从而导致沥青变硬针入度下降。同样由图2(a)可知，m_L∶m_A从0.00增加到0.04的过程中，残留针入度比逐渐增大，原因是LDHs起到了阻隔紫外线的作用，且改性沥青的抗紫外老化性能随LDHs掺量的增加而提高。

图2(b)为LDHs改性沥青老化前后的软化点及软化点增量。由图2(b)可知，外掺LDHs会使沥青的软化点上升，提高沥青的高温性能，因为LDHs的加入产生了填料硬化效应，会导致黏度和软化点的上升。同样从图2(b)中可以看出m_L∶m_A分别为0.00、0.03、0.04的3种改性沥青软化点增量分别为2.3、1.0、0.8 ℃，说明掺入LDHs后能提升SBS沥青抗紫外老化性能，其原因是LDHs反射和阻隔大部分紫外线。此外，m_L∶m_A为0.03和0.04的改性沥青的软化点增量的差别不明显，仅相差0.2 ℃。

图2(c)为LDHs改性沥青老化前后的拉伸强度及增加率。由图2(c)可知，LDHs的掺量增加，对应的应力值也逐渐增大，这是因为LDHs掺量越多，填料硬化效应越明显，所以相同拉伸长度下对应的拉伸强度更大。m_L∶m_A分别为0.00、0.03、0.04的3种改性沥青拉伸强度的增加率分别为15.9%、9.3%和10.1%，这说明LDHs的掺入减弱了沥青老化后的硬化效果，即很好地改善了其抗紫外老化性能，并且当m_L∶m_A为0.03时，改性沥青的抗紫外老化性能最佳。

图2(d)为175 ℃下LDHs改性沥青紫外老化前后的布氏黏度。由图2(d)可知，LDHs的掺入会使沥青的布氏黏度升高，掺量越多，升高得越多。紫外老化后m_L∶m_A分别为0.00、0.03、0.04的3种改性沥青的黏度分别上升0.003、0.002、0.002 Pa·s，这说明经过紫外老化后沥青的流动性变差，原因是老化后轻质组分减少。同样由图2(d)可知，m_L∶m_A为0.03、0.04的改性沥青比m_L∶m_A为0.00的

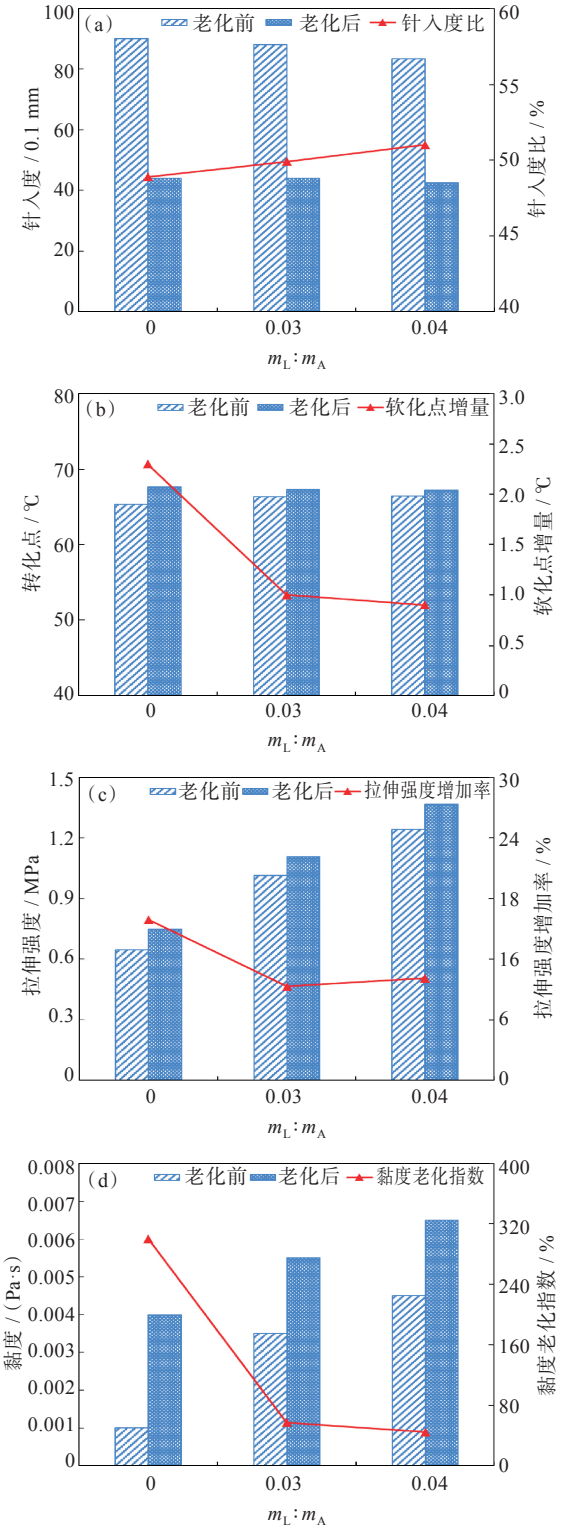

图2 LDHs改性沥青老化前后的性能比较:(a)针入度,(b)软化点,(c)拉伸强度,(d)黏度

Fig. 2 Performance comparison of LDHs modified asphalt before and after aging:(a) penetration,(b) softening point,(c) tensile strength,(d) viscosity

改性沥青的老化指数分别降低了242.9%、255.6%,表明LDHs的掺入会提高沥青的抗紫外老化性能,并且随着LDHs掺量的增加,提升效果越好。

图3为120 ℃下添加温拌剂与未添加温拌剂的LDHs改性沥青的黏度。由图3可知,添加温拌剂后LDHs改性沥青的黏度大幅度下降,m_L:m_A为0.03、0.04的改性沥青添加温拌剂后的黏度分别下降了48.6%和50.2%,m_L:m_A为0.03、0.04的改性沥青添加温拌剂后的黏度与未加温拌剂的原样基质沥青的黏度分别相差0.045和0.206 Pa·s。这说明温拌剂在LDHs改性沥青中起到了降黏作用,LDHs不会影响温拌剂的作用效果,且m_L:m_A为0.03的改性沥青在添加温拌剂后,其黏度与原样基质沥青相差较小。

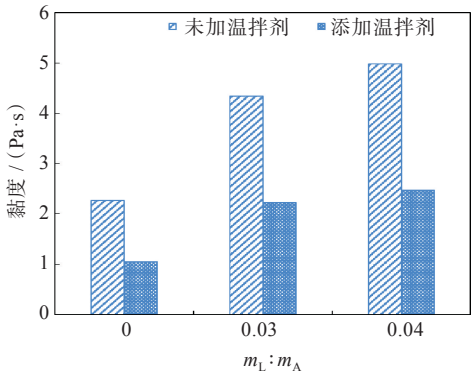

图3 普通LDHs改性沥青和温拌LDHs改性沥青的布氏黏度

Fig. 3 Brinell viscosity of LDHs modified asphalt with and without warm-mix agents

2.2 温拌LDHs改性沥青混合料抗紫外老化研究

图4(a)为温拌LDHs改性沥青混合料老化前后的冻融劈裂强度比及差值。由图4(a)可知,LDHs的掺入会使沥青混合料的冻融劈裂强度比下降,表明其水稳定性变差,原因是LDHs的加入使沥青在低温下更易变硬变脆,但仍大于80%(规范应大于80%),这说明同时使用LDHs和温拌剂的沥青混合料仍能满足路用要求,能适应高海拔地区。从老化前后强度比的差值中可看出,m_L:m_A为0.00的沥青混合料下降了15%,m_L:m_A为0.03、0.04的沥青混合料分别下降了5%和4%,强度比下降是因为沥青经过紫外老化后轻质组分减少,沥青质和胶质增多,从而导致沥青混合料的水稳定性性能下降,但由于LDHs优异的阻隔紫外线效果,使得温拌LDHs改性沥青混合料的下降值更小。此外m_L:m_A为0.04对温拌沥青混合料的抗紫外老化性能的提升相较于m_L:m_A为0.03不明显,强度比差值仅相差1%。该结果表明温拌LDHs改性沥青混合料水稳定性能满足规范,且能减少紫外线对水稳定性能的影响。

图4(b)为温拌LDHs改性沥青混合料老化前后的动稳定度及动稳定度下降幅度。由图4(b)可

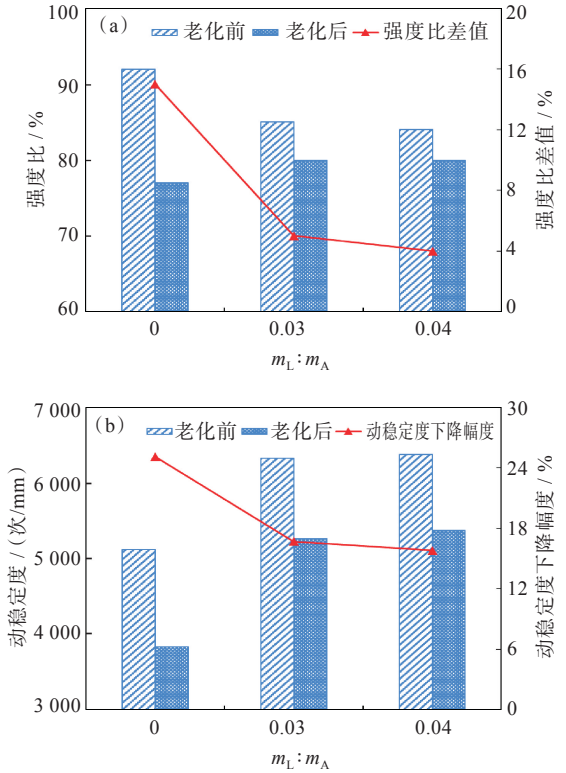

图4　温拌LDHs改性沥青混合料老化前后的性能比较：（a）冻融劈裂强度比，（b）动稳定度

Fig. 4　Performance comparison of warm-mix asphalt mixture containing LDHs additives before and after aging: (a) freeze-thaw splitting strength ratio, (b) dynamic stability

知，老化前后动稳定度均大于3 000次/mm（规范应大于3 000次/mm），外掺LDHs的混合料动稳定度更大，表明LDHs能提高沥青混合料的抗车辙性能，其原因是LDHs阻碍了沥青的流动。老化后，$m_L:m_A$为0.03、0.04的沥青混合料的动稳定度下降幅度较未掺加LDHs的沥青混合料分别降低了8.4%和9.3%，这表明LDHs起到了抗紫外老化的作用，LDHs的掺入提升了沥青混合料的抗紫外老化性能。此外$m_L:m_A$为0.04相较于$m_L:m_A$为0.03提升不明显，下降幅度仅相差0.9%。该结果表明温拌LDHs改性沥青混合料高温抗车辙性能满足规范，且能减少紫外线对高温抗车辙性能的影响。

2.3　温拌LDHs改性沥青混合料在实体工程中的应用及性能评价

结合前文试验结果，并结合经济效益，$m_L:m_A$为0.03时更适合用于实际工程。以$m_L:m_A$为0.03为最佳掺量，成功在久马高速铺筑试验段，并对其进行检测。表2为试验路段随机选取的3段路桩性能指标。由表2可知3个桩的压实度分别为101.7%、102.7%、102.0%，均大于技术要求99%，表明结构层压实质量良好，LDHs的掺入并未影响温拌沥青混合料的路用性能。同样从表2中可看出3段桩均不渗水，表明外掺LDHs温拌沥青混合料的渗水系数均符合技术要求。

表2　温拌LDHs改性沥青路面普通芯样性能

Tab. 2　Performances of ordinary core samples of warm-mix asphalt pavements containing LDHs additives

桩号	芯样厚度 / mm	实测毛体积相对密度	最大理论相对密度	标准击实密度	孔隙率 / %	标准击实密度压实度 / %		渗水系数 /（mL/min）	
						结果	技术要求	结果	技术要求
LK0+185	51	2.522	2.605	2.479	3.2	101.7	≥99	不渗水	≤80
LK0+385	51	2.547	2.605	2.479	2.2	102.7	≥99	不渗水	≤80
LK1+349	50	2.529	2.605	2.479	2.9	102.0	≥99	不渗水	≤80

表3为上面层芯样换算（依据JTG E20—2011标准中的T 0710进行换算）后的马歇尔稳定度，由表3可知抗紫外老化路段稳定度和普通路段相差不明显，且均大于5.5 kN（规范要求马歇尔稳定度应大于5.5 kN），这说明外掺LDHs的温拌沥青混合料路段芯样的马歇尔稳定度合格。

表3　上面层芯样马歇尔稳定度

Tab. 3　Marshall stability of upper core samples

路段类型	马歇尔稳定度/ kN				
	样1	样2	样3	样4	平均值
试验路段	10.81	9.70	8.38	8.39	9.32
普通路段	9.35	7.71	7.90	8.45	8.36

3　结　论

（1）透射电子显微镜结果显示LDHs的晶体结构稳定，表明掺入沥青后能稳定起到抗紫外老化作用；从沥青紫外老化前后的物理性能可知，LDHs使沥青的抗紫外老化性能显著提高；温拌剂能有效降低LDHs改性沥青的黏度，LDHs不会影响温拌剂的作用效果；沥青试验表明LDHs掺量为3%更合适，因为$m_L:m_A$为0.04对沥青的抗紫外老化性能提升幅度相较于$m_L:m_A$为0.03不明显，两者直接拉伸强度增加率差值仅为0.8%，更多掺量的LDHs反而会使沥青的低温性能下降。

（2）由冻融劈裂强度比和动稳定度可知，外掺LDHs的温拌沥青混合料均符合规范要求，说明LDHs可以用于温拌沥青混合料中；根据紫外老化试验可知，LDHs使沥青混合料的抗紫外老化性能显著提高；$m_L:m_A$为0.04相比于$m_L:m_A$为0.03提升不明显，动稳定度下降幅度仅相差0.9%，结合路

用性能和经济效益，建议选用$m_L:m_A$为0.03用于实际工程。

（3）由沥青混合料试验和公路路面现场测试结果可知，外掺LDHs的温拌沥青混合料的路用性能均满足规范，同时起到了抗热氧老化的效果；后续将长期检测不同服役年限抗紫外老化效能，为延长高海拔地区路面寿命提供理论基础及应用经验。

参考文献

[1] ZHANG C L, YU J Y, XU S, et al. Influence of UV aging on the rheological properties of bitumen modified with surface organic layered double hydroxides [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 574-580.

[2] ZHANG H L, ZHU C Z, YU J Y, et al. Influence of surface modification on physical and ultraviolet aging resistance of bitumen containing inorganic nanoparticles [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 735-740.

[3] 邓子逸，石津金，吴英彪，等. 不同废食用油对回收沥青物理性能的影响[J]. 武汉工程大学学报，2020，42(5)：558-562.

[4] WANG J, PANG L, WU S P, et al. Effect of ageing on fatigue properties of asphalt [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(Suppl. 1): 111-114.

[5] ZENG W B, WU S P, WEN J, et al. The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 1125-1131.

[6] MIRÓ R, MARTÍNEZ A H, MORENO-NAVARRO F, et al. Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens [J]. Materials & Design, 2015, 86: 129-137.

[7] XIAO F P, AMIRKHANIAN S N, KARAKOUZIAN M, et al. Rheology evaluations of WMA binders using ultraviolet and PAV aging procedures [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 56-64.

[8] WU S P, HAN J, PANG L, et al. Rheological properties for aged bitumen containing ultraviolate light resistant materials [J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 133-138.

[9] HUANG Y F, FENG Z G, ZHANG H L, et al. Effect of layered double hydroxides (LDHs) on aging properties of bitumen [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(5): 734-739.

[10] 黄永方，余剑英，董华均，等. LDHs对沥青老化性能的影响[C]//第十三次全国石油沥青技术交流会论文集. 中国石化沥青情报站，石油沥青编辑部，2012：101-104.

[11] ZHOU X, WU S, LIU Q, et al. Effect of surface active agents on the rheological properties and solubility of layered double hydroxides-modified asphalt [J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(Suppl. 5): 978-982.

[12] KIM Y R, LITTLE D N, LYTTON R L. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(1): 75-83.

[13] 黄永方. LDHs改性沥青的制备与性能研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2012.

[14] WANG J S, WU S P, HAN J, et al. Rheological properties of asphalt modified by supramolecular UV resistant material-LDHs [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2012, 27(4): 805-809.

[15] XU S, YU J Y, KE Y B, et al. Preparation and anti-ultraviolet aging performance of organic layered double hydroxides/bitumen composites [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2019, 34(4): 979-986.

[16] ZHANG C L, WANG T, YU M, et al. Preparation and performance of 3-aminopropyltriethoxysilane surface modified layered double hydroxides on ultraviolet aging resistance of bitumen [J]. Construction and Building Materials, 2021, 292: 123411.

[17] YOUSEFI A, BEHNOOD A, NOWRUZI A, et al. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP) [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121200.

[18] YOUSEFI A A, SOBHI S, ALIHA M R M, et al. Cracking properties of warm mix asphalts containing reclaimed asphalt pavement and recycling agents under different loading modes [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 124130.

[19] ZAREI M, ADBI KORDANI A A, ZAHEDI M, et al. Evaluation of low and intermediate temperatures fracture indices for modified warm mix asphalt (WMA) using edge notched disc bend (ENDB) specimen [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 116: 103137.

[20] LI H C, YU J Y, WU S P, et al. Property of anti-ultraviolet aging of LDHs modified asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2018, 33(3): 634-638.

[21] 童申家，高东远，王乾，等. 沥青类型对紫外光老化沥青混合料高低温性能研究[J]. 公路工程，2017，42(2)：63-66.

本文编辑：苗 变