

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023060223081988

文章编号:1674-599X(2023)04-0032-07

引用格式: 禰炜安,熊剑平,张仰鹏,等.改性乳化沥青混合料胶浆特性及强度分析[J].交通科学与工程,2023,39(4):32-38.

Citation: XUAN Weian, XIONG Jianping, ZHANG Yangpeng, et al. Analysis of mortar characteristics and strength of modified emulsified asphalt mixture[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 32-38.

改性乳化沥青混合料胶浆特性及强度分析

禰炜安^{1,2,3}, 熊剑平^{1,2,3}, 张仰鹏^{1,2,3}, 曾俐豪^{1,2,3}

(1. 广西交科集团有限公司, 广西南宁 530007; 2. 广西道路结构与材料重点实验室, 广西南宁 530007; 3. 高等级公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心, 广西南宁 530007)

摘 要:为探究改性乳化沥青混合料的性能,设计不同配合比的乳化沥青胶浆,研究不同粉胶比、水泥替代率、养护时间对乳化沥青胶浆黏度特性的影响,分析不同胶浆乳化沥青混合料的初始强度,并测试不同温度、湿度、风力等环境条件下乳化沥青混合料的马歇尔稳定度。研究表明:粉胶比越大,水泥替代率越高,乳化沥青胶浆的黏度越大;当粉胶比为1.0且水泥替代率不超过50%时,乳化沥青胶浆的马歇尔初始稳定度为3.32 kN。温度越高,湿度越小,风力越大,越有利于加速乳化沥青破乳,促进乳化沥青混合料强度的形成与发展;随着养护时间的延长,乳化沥青混合料的马歇尔强度增大,该强度发展呈前期增长较快、后续逐渐减缓甚至趋于平稳的规律。

关键词:道路工程;乳化沥青混合料;影响因素

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

Analysis of mortar characteristics and strength of modified emulsified asphalt mixture

XUAN Weian^{1,2,3}, XIONG Jianping^{1,2,3}, ZHANG Yangpeng^{1,2,3}, Zeng Lihao^{1,2,3}

(1. Guangxi Transportation Research & Consulting Co., Ltd., Nanning 530007, China; 2. Guangxi Key Lab of Road Structure and Materials, Nanning 530007, China; 3. Research and Development Center on Technologies, Materials and Equipment of High Grade Highway Construction and Maintenance Ministry of Transport, Nanning 530007, China)

Abstract: To explore the performance characteristics of modified emulsified asphalt mixture, Emulsified asphalt mortars with different mix ratios were designed. The effects of powder binder ratio, cement replacement rate and curing time on the viscosity characteristics of emulsified asphalt mortar were investigated. The initial strength of different mortar emulsified asphalt mixture was analyzed. And the Marshall stability of emulsified asphalt mixture under different temperature, humidity, wind force and other external environmental conditions was tested. The results show that, the larger the powder binder ratio, the higher the cement replacement rate, and the greater the viscosity of emulsified asphalt mortar. When the powder binder ratio is 1.0, the cement replacement rate should not exceed 50%, the initial Marshall stability is 3.32 kN. The higher the temperature, the smaller the humidity and the stronger the wind force, the more conducive to accelerating the demulsification of emulsified asphalt, and promoting the formation and development of emulsified asphalt mixture strength. With the extension of curing time, the greater the Marshall strength of emulsified asphalt mixture, the faster the

收稿日期:2023-06-02

基金项目:南宁市创新创业领军人才“邕江计划”资助项目(2019009);南宁市优秀青年科技创新创业人才培养项目(RC20200203);中央引导地方科技发展资金项目(桂科ZY21195043)

作者简介:禰炜安(1988—),男,广西交科集团有限公司高级工程师。

strength development in the early stage, and then gradually slow down or even tend to be stable.

Key words: road engineering; emulsified asphalt mixture; influencing factor

节能减排、降碳增效逐步成为生产经营活动的重要导向,道路工程从“重建轻养”向“建养并重”发展,对低碳高品质的沥青路面养护技术的需求迫切。传统养护工程常用的热拌沥青混合料在拌制过程中需要消耗大量的燃料,且会产生大量的烟尘和废气,严重污染环境。乳化沥青基冷拌材料在常温环境下就能完成拌合、摊铺、碾压成型等工序,具有节能减排、施工便捷、适于各种气候等优点,并可改善施工条件,是道路养护技术的重要发展方向。

21世纪,中国开始研究与推广使用SBS、SBR改性乳化沥青,这些沥青在微表处理、黏结层和雾封层材料等领域被广泛应用^[1]。王伟明等^[2-4]开展了改性乳化沥青制备技术与性能的研究,分析了新型改性乳化沥青的技术特点和优势。唐太熊^[5]研究了乳化沥青胶浆的干燥成膜过程的影响机制和发展过程。李霞等^[6-7]研究了乳化沥青材料特性对混合料性能的影响。徐世法等^[8-9]研究了环境条件对改性乳化沥青混合料强度的影响。李昊隆等^[10-11]对乳化沥青基材料的早期强度特性进行了研究。彭波等^[12-13]对乳化沥青混合料配合比设计方法开展了研究。这些研究主要集中于乳化沥青及其混合料的制备技术、基本性能等方面,但对不同条件下其强度发展规律的研究少见。胶浆组成、黏度特性对乳化沥青混合料的施工和易性、破乳控制、力学强度影响的研究也较为鲜见。因此,开展改性乳化沥青混合料胶浆特性及强度发展规律的研究是必要的。本研究拟设计不同配合比的乳化沥青胶浆,研究不同粉胶比、水泥替代率、养护时间对胶浆黏度特性的影响,分析不同胶浆的初始强度和在不同环境条件下乳化沥青混合料强度与时间的关系,研究乳化沥青混合料强度发展规律,为复合改性乳化沥青胶浆的设计及其力学强度的控制提供参考。

1 原材料及试验设计

1.1 原材料

1) 乳化沥青为自加工的SBS-SBR复合改性乳

化沥青。其中,SBS掺量为1%,SBR掺量为2%,固含量为65%,1.18 mm筛上剩余量为0.85%,蒸发残留物软化点68.5℃,5 d储存稳定性2.2%。

2) 集料中,粗集料采用5~10 mm、10~15 mm辉绿岩和3~5 mm石灰岩,细集料采用0~3 mm石灰岩;矿粉采用石灰岩碎石加工。矿料技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的相关技术要求。

3) 水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,经检测,其抗压强度为51.5 MPa,抗折强度为7.7 MPa,初凝时间为195 min,终凝时间为225 min。

1.2 混合料配合比设计

根据矿料筛分结果,进行AC-13混合料设计,各档矿料掺配比例为(10~15) mm:(5~10) mm:(3~5) mm:(0~3) mm:矿粉=20:40:6:32:2,水泥掺量为2%。矿料级配设计曲线如图1所示。

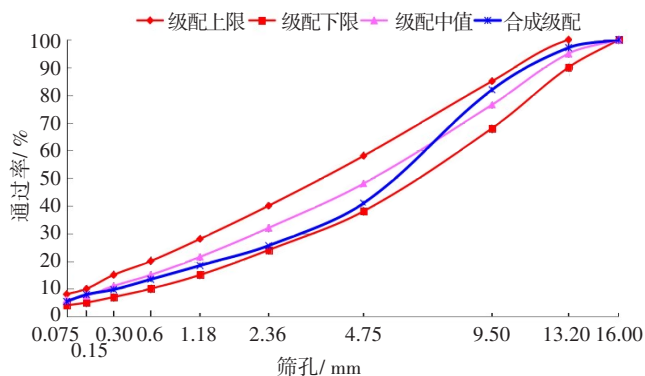


图1 矿料级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of mineral material

通过试验确定的最佳改性乳化沥青油石比为7.7%,在此条件下,AC-13改性乳化沥青混合料的马歇尔稳定度为8.82 kN,残留稳定度为91.6%,冻融劈裂强度比为88.7%,动稳定度为4 655次/mm。

1.3 试验方案设计

1) 胶浆黏度特性研究。

改性乳化沥青胶浆的粉胶比分别取为1.0和0.8,水泥等量替代矿粉分别取为0%、10%、30%、50%、70%进行试验,分析不同粉胶比、水泥替代率、持续时间等因素对改性乳化沥青胶浆布氏黏度的影响。试验方案见表1。

表 1 不同胶浆的黏度特性试验安排

Table 1 Test schedule of viscosity characteristics of mortar system

试验方案	粉胶比	乳化沥青/g	矿粉/g	水泥/g	替代率/%
A1	1.0	50	50	0	0
A2	1.0	50	45	5	10
A3	1.0	50	35	15	30
A4	1.0	50	25	25	50
A5	1.0	50	15	35	70
B1	0.8	50	40	0	0
B2	0.8	50	36	4	10
B3	0.8	50	28	12	30
B4	0.8	50	20	20	50
B5	0.8	50	12	28	70

2) 力学强度特性研究。

以马歇尔稳定度作为改性乳化沥青混合料力学强度的评价指标,研究不同胶浆组成对混合料初始马歇尔稳定度的影响,见表 2。分别设计不同温

度(室温、60℃、90℃)、湿度(20%、60%)、风力(无风、10 m/s)等养护条件,研究不同环境因素对改性乳化沥青混合料强度的影响。

表 2 不同胶浆的乳化沥青混合料初始强度试验安排

Table 2 Initial strength test schedule of emulsified asphalt mixture with different mortars

试验方案	粉胶比	替代率/%
A1	1.0	0
A4	1.0	50
B4	0.8	50

2 不同胶浆的黏度特性研究

2.1 不同胶浆的黏度测试

按照本试验方案制备乳化沥青胶浆,并采用布氏黏度仪测试不同胶浆在不同时间(0、15、30、45 和 60 min)的布氏黏度,试验结果见表 3。

表 3 不同胶浆的黏度的试验结果

Table 3 Viscosity test results of different mortars

时间/min	布氏黏度值/(Pa·s)									
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B2	B4	B5
0	0.577	1.513	1.604	1.852	—	0.325	0.831	1.058	1.120	1.323
15	0.557	1.545	1.624	1.985	—	0.285	0.772	0.918	1.205	1.386
30	0.553	1.612	1.694	2.206	—	0.275	0.738	0.852	1.176	1.397
45	0.531	1.610	1.962	2.163	—	0.300	0.719	0.792	1.158	1.424
60	0.496	1.626	1.932	2.168	—	0.283	0.684	0.781	1.116	1.455

2.2 粉胶比对胶浆黏度的影响

当粉胶比分别为 1.0 和 0.8 时,5 组不同水泥替代率的胶浆乳化沥青胶浆黏度的试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,在水泥替代率相同时,粉胶比为 1.0 的胶浆布氏黏度均大于粉胶比为 0.8 的。当水泥替代率为 0 时,粉胶比为 0.8 的胶浆布氏黏度为 0.325 Pa·s,粉胶比为 1.0 的胶浆布氏黏度为 0.577 Pa·s,粉胶比为 1.0 的胶浆布氏黏度较粉胶比为 0.8 的提高了 77.5%;当粉胶比为 1.0 时,水泥替代率分别为 10%、30%、50% 的胶浆布氏黏度较粉胶比为 0.8 的相同水泥替代率的依次提高了 82.1%、51.6%、65.4%。这表明粉胶比越大,乳化沥青胶浆的布氏黏度越大。

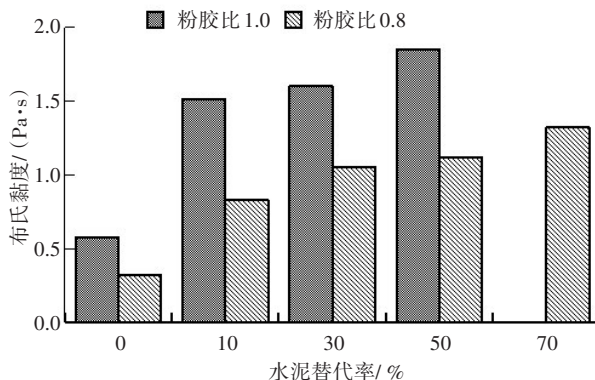


图 2 不同粉胶比胶浆黏度的试验结果

Fig. 2 Viscosity test results of mortar with different powder-binder ratio

2.3 水泥替代率对胶浆黏度的影响分析

本试验分别在乳化沥青胶浆中分别掺入0%、10%、30%、50%、70%的水泥替代矿粉,分析其对胶浆材料黏度的影响,试验结果如图3所示。

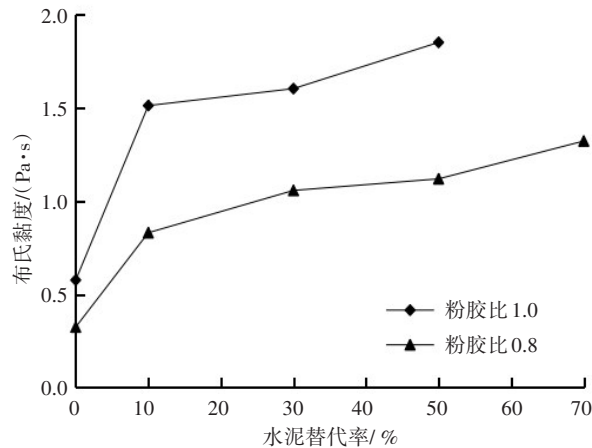


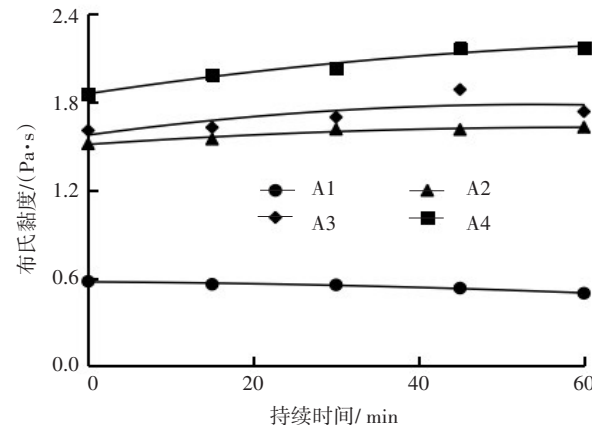
图3 不同水泥替代率胶浆黏度的变化曲线

Fig. 3 Viscosity change curve of mortar with different cement replacement rate

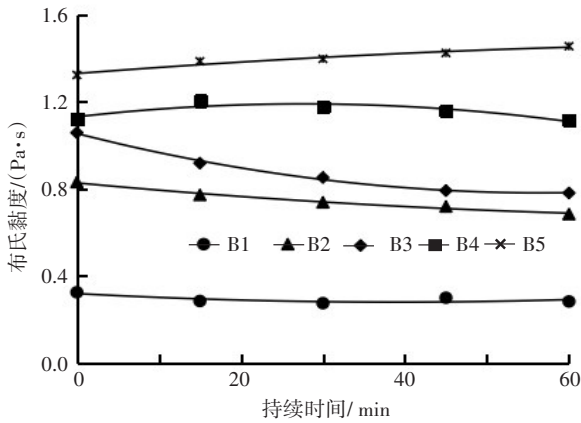
从图3可以看出,当粉胶比相同时,随着水泥替代率的增大,胶浆的布氏黏度值呈增大趋势。当粉胶比为0.8时,水泥替代率分别为10%、30%、50%、70%的胶浆布氏黏度依次是水泥替代率为0%的胶浆布氏黏度的2.56倍、3.26倍、3.45倍、4.07倍。粉胶比为1.0时,水泥替代率大于等于70%的胶浆的黏稠值,无法测出,如A5。不同粉胶比具有不同的水泥替代率临界值,需要根据实际乳化沥青混合料的粉胶比确定合适的水泥替代率。当粉胶比为1.0时,建议其水泥替代率不超过50%。

2.4 持续时间对胶浆黏度的影响分析

根据本试验方案配制的改性乳化沥青胶浆,分别测试试件在0、15、30、45和60 min的布氏黏度,试验结果如图4所示。



(a) 粉胶比为1.0



(b) 粉胶比为0.8

图4 不同粉胶比胶浆黏度随时间的变化曲线

Fig. 4 Viscosity change curve of mortar with different powder-binder ratio with time

从图4可以看出,当持续时间为0~60 min时,同一粉胶比的胶浆在不同水泥替代率的胶浆布氏黏度值变化不大。当粉胶比为1.0、水泥替代率为50%时,持续时间分别为0、30和60 min的胶浆的布氏黏度值依次为1.604、1.694和1.732 Pa·s,其最大相差值为0.128 Pa·s。其主要原因是在60 min内,尽管有部分水泥开始发生了水化反应,但水化程度并不高,远未达到使水泥材料凝结的程度;其次,由于该布氏黏度在室温条件下进行,改性乳化沥青破乳率不高,水分蒸发不多,因此其对胶浆材料的黏度值影响不大。

3 乳化沥青混合料力学强度特性研究

3.1 不同胶浆的初始稳定度

采用按照本试验方案配制的改性乳化沥青胶浆进行马歇尔试验,测量不同配方的改性乳化沥青胶浆的初始马歇尔稳定度,试验结果见表4。

表4 不同胶浆的马歇尔稳定度的试验结果

Table 4 The Marshall stability test results of different mortars		
kN		
试验方案	初始马歇尔稳定度	最终马歇尔稳定度
A1	1.52	5.50
A4	3.32	8.08
B4	2.79	6.25

由表4可知,按照不同粉胶比、不同水泥替代率制备的改性乳化沥青胶浆,其混合料的初始稳定度

均有所差异。当粉胶比相同时,随着水泥替代率的提高,乳化沥青混合料的初始马歇尔稳定度不断增强,A4方案下的初始马歇尔稳定度比A1方案下的提高了1.18倍。其主要原因是在乳化沥青胶浆体系中,水泥能够发生水化反应,该反应一方面加速了水分的消耗和乳化沥青的破乳;另一方面,水化反应形成了水泥石,促进了其初始马歇尔稳定度的提高。

当水泥替代率相同时,对比A4与B4方案可知,胶浆粉胶比越高,初始马歇尔稳定度也越高。粉胶比为1.0的胶浆的初始马歇尔稳定度比粉胶比0.8的胶浆的马歇尔稳定度提高了19.0%。这是因为粉胶比越高,其总比表面积越大,吸水量越大,乳化沥青的破乳时间越短,促进了胶浆初始马歇尔稳定度的形成。

对比不同的试验方案,可知:方案A4的初始马歇尔稳定度最高,即当粉胶比为1.0,水泥等量替代率为50%时,乳化沥青混合料的初始马歇尔稳定度较高,其值为3.32 kN。由表4还可知,初始马歇尔稳定度越高,其最终的马歇尔稳定度也越高,如:A4方案的马歇尔稳定度为8.08 kN,该值较A1、B4方案的5.50 kN、6.25 kN的马歇尔稳定度均有明显提高。

3.2 温度对强度的影响

对AC-13乳化沥青混合料试件进行击实后,分别将其置于室温、60℃、90℃3种不同温度条件下养护1、2、3、5和7 d,再将其取出,在常温下放置24 h,最后脱模并测试马歇尔稳定度,试验结果如图5所示。

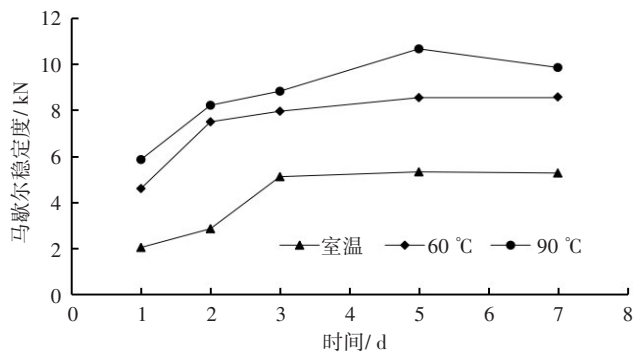


图5 不同温度下强度随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the Marshall strength with time at different temperatures

从图5可以看出,当养护时间相同时,养护温度越高,乳化沥青混合料的强度越高,90℃的乳化沥青混合料的强度最高,60℃的次之,室温养护的最小。当养护时间为1 d时,养护湿度分别为

60℃、90℃的乳化沥青的马歇尔稳定度比室温养护的乳化沥青的马歇尔稳定度分别提高了1.26倍、1.88倍。这是因为在乳化沥青混合料强度形成过程中,需要将材料体系内的水分蒸发,还原沥青常温条件下半固体状态,发挥其黏结作用。温度升高能够促进水分的蒸发,加快强度形成。因此,在乳化沥青混合料摊铺碾压后,较高的气温条件有利于材料强度的形成。

在3种不同温度下,乳化沥青混合料的强度均呈前期增长较快、后续逐渐减缓甚至趋于稳定的规律。但不同养护温度的乳化沥青混合料的转折点不太一致。在室温条件下,乳化沥青混合料的强度在3 d后趋于平稳;在60℃和90℃条件下,养护2 d后,乳化沥青混合料的强度可基本达到最终强度的80%左右。

3.3 湿度对强度的影响

在对AC-13乳化沥青混合料试件进行击实后,先将其置于室温,湿度分别设置为60%和20%的条件中,分别养护1、2、3、5和7 d,再取出常温放置24 h,最后脱模,并测试其马歇尔稳定度,试验结果如图6所示。

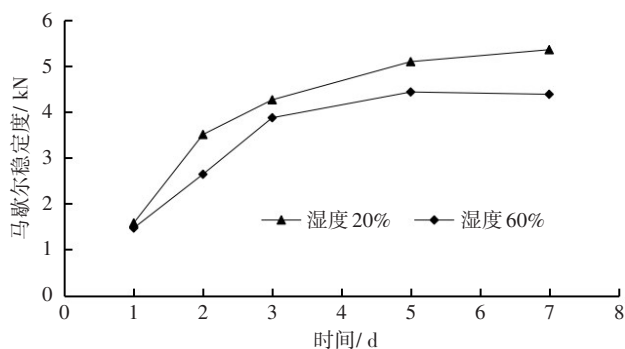


图6 不同湿度下强度随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the Marshall strength with time at different humidity

从图6可以看出,当养护时间相同时,养护湿度越小,乳化沥青混合料的马歇尔稳定度越大。当养护为3 d时,60%湿度的乳化沥青混合料的马歇尔稳定度为3.87 kN,20%湿度的乳化沥青混合料的马歇尔稳定度为4.26 kN,其增幅为10.1%。其主要原因是环境湿度越小,越有利于乳化沥青混合料中水分蒸发,越有利于乳化沥青破乳,缩短强度形成时间;而湿度越高,越不利于水分蒸发和混合料强度的形成。

在时间轴上,与温度的发展规律相似,乳化沥

青混合料的强度均呈前期增长较快、后续逐渐减缓甚至趋于稳定的规律。由于试验温度较低,其强度大致在3~5 d后才基本达到峰值。

3.4 风力对强度的影响

在对AC-13乳化沥青混合料试件进行击实后,先将其置于室温中,湿度设为60%,风力分别设为无风和10 m/s的风速,分别养护1、2、3、5和7 d,再将其取出,在常温中放置24 h后,最后脱模并测试其马歇尔稳定度,试验结果如图7所示。

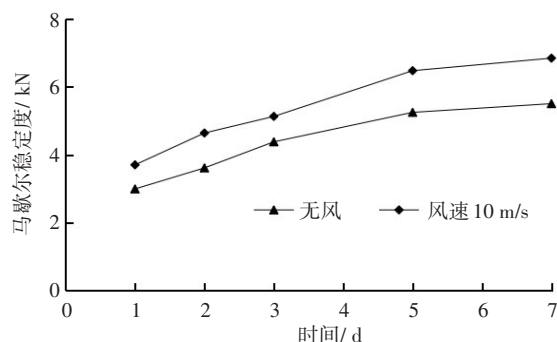


图7 不同风力马歇尔稳定度随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curves of the Marshall strength with time at different wind force

从图7可以看出,当养护时间相同时,风力越大,乳化沥青混合料的马歇尔稳定度越大。与无风环境的乳化沥青混合料相比,风速为10 m/s的乳化沥青混合料在养护1、3、5和7 d的马歇尔稳定度分别提高了23.7%、17.1%、23.4%、24.4%,表明风力对乳化沥青混合料的强度形成具有良好促进作用。其主要原因是,加大风力,有利于乳化沥青混合料中水分蒸发,促进乳化沥青混合料强度的形成。

与温度、湿度的发展规律相似,随着养护时间的延长,乳化沥青混合料的强度均呈前期增长较快、后续逐渐减缓甚至趋于稳定的趋势。

4 结论

1) 粉胶比越大,乳化沥青胶浆的黏度越大;随着水泥替代率的增大,胶浆的布氏黏度值总体呈增大的趋势,当粉胶比1.0时,水泥替代率建议不超过50%;持续0~60 min,胶浆材料的布氏黏度值变化不大,基本维持在相同水平。

2) 通过水泥等量替代矿粉,可提高乳化沥青混合料的初始强度;粉胶比越大,其乳化沥青混合料初始强度越高。当粉胶比为1.0,水泥等量替代率为

50%时,乳化沥青混合料的初始马歇尔稳定度为3.32 kN,具有较高的初始强度。

3) 温度越高,湿度越小,风力越大,越有利于水分蒸发,加速乳化沥青破乳,促进乳化沥青混合料强度的形成与发展。当养护温度分别为60℃和90℃时,乳化沥青混合料马歇尔稳定度2 d左右,基本达到其马歇尔强度峰值的80%以上。

4) 随着养护时间的延长,乳化沥青混合料的强度逐渐增大,该强度总体上呈前期增长较快、后续逐渐减缓甚至趋于平稳的趋势。

参考文献(References):

- [1] 李高, 廖义鹏, 叶流颖, 等. 改性乳化沥青的研究进展及其应用[J]. 化工新型材料, 2019, 47(10): 242-245.
LI Gao, LIAO Yipeng, YE Liuying, et al. Research progress and application of modified emulsified asphalt [J]. New Chemical Materials, 2019, 47(10): 242-245.
- [2] 王伟明, 吴旷怀, 王凤华, 等. 新型SBR复合改性乳化沥青研制与性能研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 235-240. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2014.05.053.
WANG Weiming, WU Kuanghuai, WANG Fenghua, et al. Development and performance study of new SBR composite modified emulsified asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 235-240. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2014.05.053.
- [3] 魏莘欣, 袁腾, 吴永畅, 等. 阳离子SBS改性乳化沥青制备研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(12): 92-94.
WEI Xinxin, YUAN Teng, WU Yongchang, et al. Preparation of cationic SBS modified emulsified asphalt [J]. New Chemical Materials, 2015, 43(12): 92-94.
- [4] 龚陶然, 刘其城, 李海斌. 稳定剂对季铵盐阳离子型乳化沥青储存稳定性的影响[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(1): 41-45, 84. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.01.012.
GONG Taoran, LIU Qicheng, LI Haibin. Effects of stabilizer on the storage stability of quaternary ammonium cationic emulsified asphalt [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(1): 41-45, 84. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.01.012.
- [5] 唐太熊. 乳化沥青及乳化沥青胶浆的干燥过程研究[D]. 大连: 大连理工大学. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.001724.
TANG Taixiong. The study on drying process of emulsified asphalt and emulsified asphalt paste [D]. Dalian: Dalian University of Technology. DOI: 10.26991/

- d.cnki.gdllu.2021.001724.
- [6] 李霞, TIGHEU SAUSAN. 不同改性剂乳化沥青及冷拌冷铺乳化沥青混合料性能研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 166-173. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.01.028.
- LI Xia, TIGHEU S. Study on properties of different modifier emulsified asphalt and cold mix cold laid emulsified asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2021, 46(1): 166-173. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.01.028.
- [7] 庄伟, 王健, 陈赛, 等. 水泥和乳化沥青含量对水泥乳化沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(8): 15-21, 57. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.08.003.
- ZHUANG Wei, WANG Jian, CHEN Sai, et al. Influence of cement and emulsified asphalt contents on performance of cement emulsified asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(8): 15-21, 57. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.08.003.
- [8] 徐世法, 房聪, 张绍源, 等. 养生条件对冷拌冷铺改性乳化沥青混合料强度增长规律的影响研究[J]. 北京建筑大学学报, 2022, 38(4): 24-31. DOI: 10.19740/j.2096-9872.2022.04.04.
- XU Shifa, FANG Cong, ZHANG Shaoyuan, et al. Study on the influence of curing conditions on the splitting strength growth law of cold-mixed and cold-laid modified emulsified asphalt mixture [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022, 38(4): 24-31. DOI: 10.19740/j.2096-9872.2022.04.04.
- [9] 孙斌, 张嘉林. 水分对乳化沥青厂拌冷再生混合料强度的影响研究[J]. 公路, 2018, 63(7): 295-298.
- SUN Bin, ZHANG Jialin. Study on the influence of moisture on the strength of emulsified asphalt plant-mixed cold recycled mixture [J]. Highway, 2018, 63(7): 295-298.
- [10] 李昊隆. 乳化沥青冷再生混合料早期强度发展规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021. DOI: 10.26943/d.cnki.gbjzc.2021.000310.
- LI Haolong. Research on early strength development of emulsified asphalt cold recycled mixture [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [11] 包惠明, 徐伟, 胡超. 水泥乳化沥青混合料初期强度影响因素及机理[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 53-60, 7. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2020.02.010.
- BAO Huiming, XU Wei, HU Chao. Influencing factors and mechanism of initial strength of cement emulsified asphalt mixture [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 41(2): 53-60, 7. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2020.02.010.
- [12] 彭波, 尹志全, 李龙刚, 等. 基于早期抗压强度的乳化沥青冷再生混合料配合比设计方法[J]. 公路交通科技, 2020, 37(1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.01.001.
- PENG Bo, YIN Zhiquan, LI Longgang, et al. Study on mix design of emulsified asphalt cold recycled mixture based on early compression strength [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.01.001.
- [13] 肖刘路, 黄晚清, 谢华明, 等. 不同RAP掺量乳化沥青冷再生混合料配合比设计[J]. 公路与汽运, 2021(4): 60-63, 67.
- XIAO Liulu, HUANG Wanqing, XIE Huaming, et al. Design of cold recycled mixture of emulsified asphalt with different RAP content [J]. Highways and Automotive Applications, 2021(4): 60-63, 67.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)