

再生剂对乳化沥青重复冷再生混合料特性的影响

张玉山¹, 栗威^{2,3}

(1.开封市杞县水利局, 河南 杞县 475000; 2.长沙理工大学, 湖南 长沙 410004;

3.河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 为研究乳化沥青重复老化冷再生混合料结构特性, 掌握沥青老化程度对路用性能的影响规律, 利用基本性能试验、劈裂强度试验、动态加载疲劳试验及水稳定性试验对掺加不同再生剂的混合料体积参数和性能指标进行分析。结果显示, 再生剂能显著改善混合料的力学性能、抗水损害能力和抗疲劳特性, 提高重复老化再生混合料的劈裂强度和劈裂最大荷载, 降低混合料的空隙率和 RAP 料重复老化对混合料劈裂强度的劣化作用; 随着应力比的增加, 再生混合料的荷载呈线性增加趋势, 疲劳作用次数呈指数函数下降趋势, 且再生剂对混合料疲劳作用次数的改善效果逐渐降低, 对疲劳破坏荷载的改善效果无显著变化。

关键词: 公路; 乳化沥青冷再生; 重复老化; 再生剂; 路用特性

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)02-0085-05

目前, 中国高速公路建设进入后期阶段, 原有路面大面积养护、维修及改扩建成为道路建设的重点之一, 由此产生的废旧沥青混合料逐年增多, 迫于环境污染、资源匮乏等问题, 沥青路面再生受到广泛关注, 同时旧沥青混合料的二次或多次重复再生是否满足路面性能要求成为再生技术发展亟需解决的问题。采用乳化沥青冷再生技术不仅能解决环境污染、资源浪费问题, 还可降低路面建设养护阶段的资源消耗, 有效控制公路整个寿命周期的运营成本。

李进、周志刚等分析了不同类型再生剂对老化沥青溶解、转移调整四组分的基本原理及影响再生沥青性能的因素, 提出了改善措施; Kupolati W. K. 分析了回收沥青的基本性能, 提出了回收沥青组分变化规律; 黄磊分析了多次水泥乳化沥青冷再生混合料性能衰减规律及水泥和乳化沥青用量对多次再生混合料力学性能、疲劳性能的改善作用; 苏志翔研究了乳化沥青冷再生最佳含水率确定方法及成型试件的养护温度等, 推荐提高试验养生温度至 110 °C。该文通过分析再生剂类型对乳化沥青初次冷再生、重复冷再生混合料特性的影响, 研究再生剂对重复再生所起的作用及调节规律, 为多次重复再生混合料性能改善和实体工程推广奠定基础。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

选择河南省某高速公路中面层铣刨料作为原材

料 RAP、15~25 mm 石灰岩为新集料; 乳化沥青采用阳离子慢裂乳化沥青, 其技术指标见表 1; 水泥采用 P.O32.5 普通硅酸盐水泥, 拌和用水为可饮用的自来水, 均满足再生规范的技术要求。

表 1 乳化沥青的技术指标

检测项目	试验结果	技术要求
电荷	阳离子	阳离子
破乳速度	慢	慢
1.18 mm 筛上剩余量/%	0.03	≤0.1
固含量/%	63.5	≥62
粘度(恩格拉粘度计 E25)	9.6	2~30
储存稳定性/%	1 d	≤1
	5 d	≤5

沥青再生的关键是确保再生沥青的粘度及各项物理力学指标满足使用要求。选用沥青: 抗剥落剂: 再生剂 = 10: 2: 1, 其中再生剂采用冷补剂 100 (ZS-A)、橡胶油 (ZS-B)、HW 型再生剂 (ZS-C) 3 种品牌, 其技术指标见表 2。

1.2 试验方案

(1) 配合比设计。依据 JTG F41-2008《公路沥青路面再生技术规范》中的乳化沥青厂拌冷再生配合比设计方法, 选择 AC-20 级配(见表 3), 乳化沥青用量为 4.2%, 用水量为 2.6%, 水泥用量为 1.0%。试件双面击实 50 次, 在 60 °C 烘箱中养生 48 h(成型后不脱模)后, 再双面击实 25 次。

表2 再生剂的技术指标

再生剂类型	25℃粘度/(Pa·s)	流变指数(25℃)	芳香分比例/%	薄膜烘箱粘度比 $\eta_{后}/\eta_{前}$	推荐掺量/%
ZS-A	0.5	0.02	35	2.5	3.1
ZS-B	1.5	0.05	48	2.0	2.8
ZS-C	3.8	0.06	51	1.8	3.2
建议值	0.01~20	≥ 0.09	≥ 30	< 3	—

表3 AC-20级配设计

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
26.50	100.0	2.360	29.2
19.00	97.4	1.180	21.7
16.00	83.4	0.600	15.2
13.20	74.2	0.300	9.3
9.50	58.4	0.150	5.8
4.75	38.6	0.075	5.6

(2) 重复老化料制备。对RAP原料进行室内老化试验,制备二次老化再生料。首先对RAP原料进行筛分分档(按照配合比设计要求),分别置于135℃烘箱中保持4h,然后调节温度为80℃恒温保持120h,冷却至室温后依据上述配合比进行乳化沥青重复冷再生混合料性能验证。

(3) 混合料性能试验方法。为分析再生剂类型对重复再生沥青混合料性能的适应效果,通过基本

性能试验、劈裂强度试验、正弦波加载动态劈裂试验分析再生剂类型对混合料体积参数(密度、空隙率等)、劈裂强度(浸水疲劳指标和劈裂强度指标)及疲劳特性的影响。

2 再生剂对混合料特性的影响

2.1 对体积参数的影响

沥青混合料体积参数确定是配合比设计中的重要组成部分,确定最佳沥青用量、控制空隙率等指标,为实体工程应用奠定基础。研究显示由于体积参数造成沥青混合料最佳沥青用量不当、空隙率过大的现象时有发生,影响沥青路面的设计和施工质量。因此,合理的体积参数是保证沥青路面路用性能的基本条件,对延长使用寿命、减少养护费用等具有重要意义。3种再生剂对乳化沥青重复冷再生混合料密度、空隙率的影响见图1。

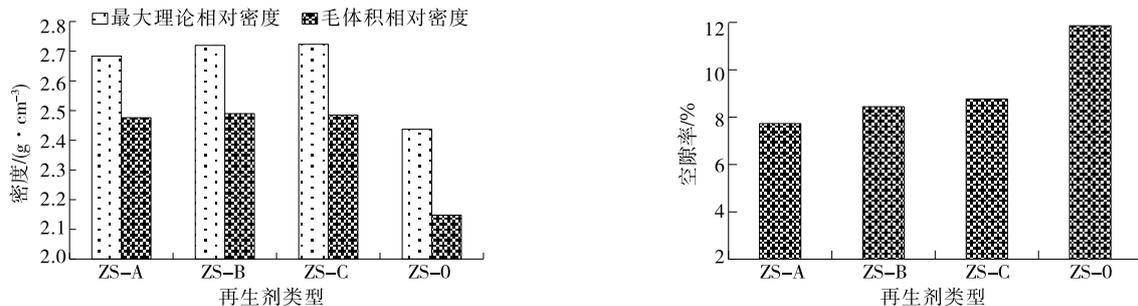


图1 不同再生沥青混合料的体积参数

从图1可看出:1) 再生剂对重复冷再生沥青混合料的基本性能具有显著影响,提高了混合料的理论密度和毛体积密度,降低了其空隙率,提高了其实质程度。且重复再生沥青混合料的空隙率为7%~13%,满足再生技术规范要求(9%~14%)。2) 再生剂ZS-A对混合料空隙率的改善效果优于再生剂ZS-B和ZS-C,再生剂ZS-A沥青混合料的空隙率降低34.9%(与未参加再生剂的ZS-0相比);而再生剂ZS-B、ZS-C混合料的毛体积密度相近且高于再生剂ZS-A混合料。说明不同类型再生剂对旧沥青的作用存在较大差别,主要与再生

剂、沥青组分之间相互结合原理有关。添加再生剂旨在恢复或补充老化沥青中的轻质组分,要求再生剂对沥青具有较强的溶解效果和良好的挥发性,在溶解老化沥青后能适时挥发,且不降低沥青混合料的路用性能。可根据RAP料中沥青类型、老化程度等进行分析,结合经济、环境效益优选再生剂。

2.2 对劈裂强度的影响

通过劈裂强度试验评价乳化沥青冷再生混合料的力学性能,分析不同类型再生剂对初次再生和重复再生混合料劈裂强度的影响,掌握重复再生混合料力学强度劣化程度。试验结果见图2、图3。

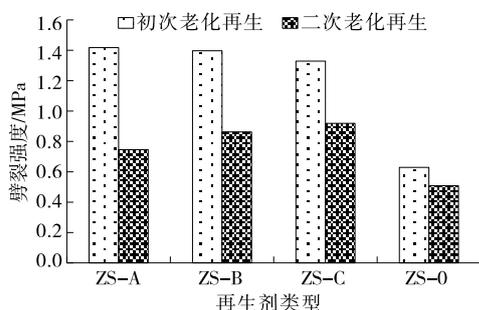


图2 初次老化和重复老化再生混合料劈裂强度、变形量试验结果

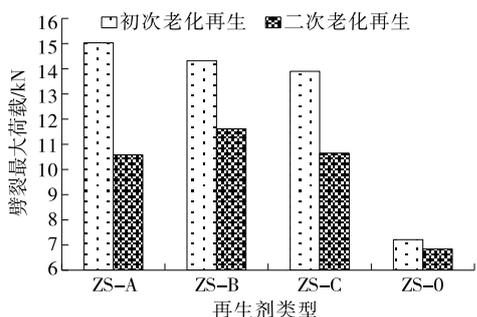
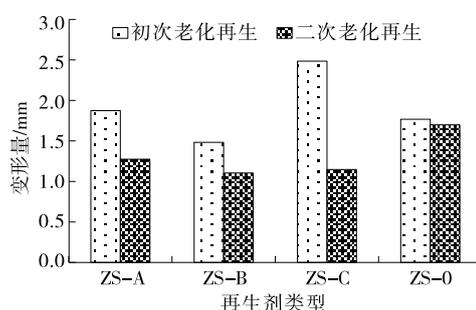


图3 初次老化和重复老化再生混合料最大劈裂荷载试验结果

从图2、图3可看出:1) RAP料重复老化再生后混合料的劈裂强度和劈裂最大破坏荷载显著降低,应变变形也呈降低趋势,且再生剂的加入显著提高了混合料的劈裂强度。如对于再生剂ZS-A,乳化沥青重复再生后混合料的劈裂强度降低47.4%,最大破坏荷载降低29.6%。说明乳化沥青重复再生后混合料的力学强度显著下降,而再生剂能改善RAP料的力学强度。再生剂通过改善、平衡RAP料沥青组分,相同乳化沥青用量下,混合料结构内部粘聚力得到提高,混合料力学性能得到改善。2) 再生剂对混合料疲劳强度和最大荷载的改善幅度与再生剂基本性质、旧料老化程度等密切相关。再生剂ZS-A对混合料的初次再生劈裂强度和最大破坏荷载的改善效果最佳,分别提高125%、108.4%;再生剂ZS-B次之,分别提高122%、98.6%;再生剂ZS-C分别提高111%、92.7%。对于重复老化再生混合料,再生剂ZS-C对劈裂强度的改善幅度最大,提高80.7%;再生剂ZS-A最差,提高46.7%;再生剂ZS-B对最大破坏荷载的改善效果最好,提高约69.8%。3) 重复再生混合料的最大破坏荷载劣化程度低于劈裂强度劣化程度,再生剂的加入提高了混合料劈裂强度和最大破坏荷载的劣化程度。如重复再生RAP料,未参加再生剂的混合料(ZS-

0)的劈裂强度和最大破坏荷载分别降低约19.2%、5.2%,而掺加再生剂的混合料的劈裂强度和最大破坏荷载分别降低30.0%~47.4%、18.9%~29.6%。

综上所述,再生剂能显著提高乳化沥青重复冷再生混合料力学强度,3种再生剂对初次再生混合料力学强度的改善效果接近,再生剂ZS-C对重复再生混合料劈裂强度的改善效果最佳。

2.3 对劈裂疲劳性能的影响

沥青路面长期性能主要指高温稳定性、疲劳性能及水稳定性等。对于乳化沥青冷再生沥青路面,掺加旧料的再生混合料的高温抗车辙能力优于普通沥青混合料,而低温性能和疲劳耐久性控制重点,水损害和疲劳破坏也是影响再生沥青路面寿命的主要因素。结合乳化沥青冷再生混合料结构特性,选择动态劈裂试验测试疲劳性能,试验采用MTS-810万能材料试验机和应力控制模式,温度15℃,频率10 Hz(加载正弦波),应力比为0.2、0.3、0.4、0.5和0.6(不同应力水平代表不同车辆荷载对沥青路面疲劳性能的不同影响)。试验结果见图4、图5。

从图4、图5可看出:1) 再生剂对乳化沥青初次再生和重复再生混合料的破坏荷载、疲劳寿命具有显著影响,对混合料疲劳寿命的改善效果与再生剂类型、应力比分布状态有关。随着应力比的增加,混合料的破坏荷载呈线性增加趋势,疲劳作用次数呈指数函数下降。如再生剂ZS-A,应力比为0.3时,最大疲劳荷载、疲劳作用次数分别为4508 N和7236次;应力比为0.6时,分别为9019 N和474次,最大疲劳荷载提高约100%,疲劳作用次数降低约93%。与未掺加再生剂的混合料相比,应力比为0.3时,再生剂ZS-A混合料的破坏荷载和疲劳作用次数分别提高54.7%、197.7%。2) 随着应力比的增加,再生剂对混合料疲劳作用次数的改善效果逐渐下降,对疲劳破坏荷载的改善效果则无显著变

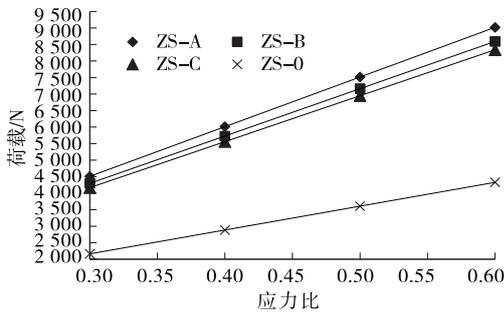


图4 不同应力比下初次老化再生沥青混合料破坏荷载试验结果

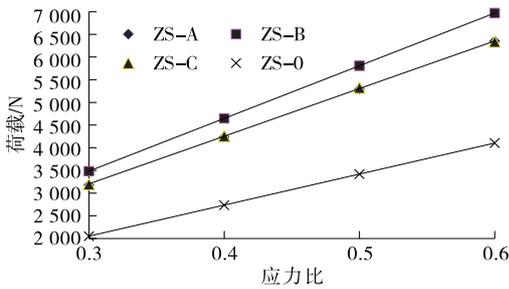
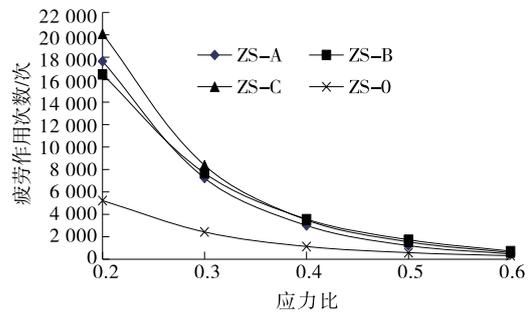
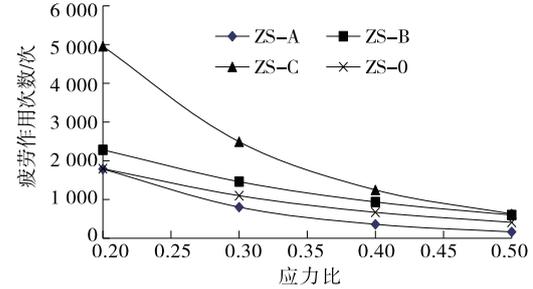


图5 不同应力比下重复老化再生沥青混合料破坏荷载试验结果



化。说明随着路面作用荷载的增加,再生剂对混合料疲劳性能的改善越来越不明显,荷载对混合料的疲劳破坏占主导作用。应力比为0.2时再生剂ZS-A、ZS-B、ZS-C混合料的疲劳作用次数分别提高约237.6%、215.1%、284.2%,而应力比为0.6时分别提高50.0%、128.3%、87.0%(初次再生混合料)。3) 添加再生剂的混合料的疲劳破坏荷载和疲劳作用次数受应力比的影响较显著(见表4),再生剂ZS-A、ZS-B、ZS-C混合料的破坏荷载随应力

比变化曲线的斜率均高于未参加再生剂的混合料,说明乳化沥青重复冷再生混合料性能受再生剂的影响更明显,再生剂的加入提高了混合料中自由沥青含量,增强了混合料的塑性,而未掺加再生剂的混合料的刚度更显著(乳化沥青冷再生混合料性质介于普通热拌沥青混合料柔性材料与半刚性材料之间),尤其是重复再生混合料,沥青的老化程度更严重,势必提高混合料刚度模量。

根据上述分析,再生剂对老化沥青具有良好的

表4 重复再生混合料应力比与破坏荷载、疲劳作用次数的关系

再生剂类型	应力比与破坏荷载的关系式	应力比与疲劳作用次数的关系式
ZS-A	$y = 10\ 580x + 2, R^2 = 1$	$y = 8\ 759e^{-7.964\ 2x}, R^2 = 1$
ZS-B	$y = 11\ 613x + 1.4, R^2 = 1$	$y = 5\ 558.4e^{-4.452\ 9x}, R^2 = 1$
ZS-C	$y = 10\ 497x + 56.1, R^2 = 0.999\ 9$	$y = 19\ 698e^{-6.897\ 7x}, R^2 = 1$
未掺再生剂	$y = 6\ 844x - 1.3, R^2 = 1$	$y = 4\ 808.9e^{-4.924\ 7x}, R^2 = 1$

改善功能,不同类型再生剂对初次老化混合料具有显著作用,对重复老化混合料疲劳寿命的改善效果存在较大差异,其中再生剂ZS-C的抗老化作用最佳,而再生剂ZS-A、ZS-B随着沥青的进一步老化其修复效果一般。如应力比为0.2时,再生剂ZS-A、ZS-B、ZS-C混合料的疲劳作用次数分别提高约-0.6%、27.1%和176.0%。

2.4 对抗水损害特性的影响

乳化沥青冷再生混合料独特的结构性质和施工工艺决定了路面现场压实空隙率指标控制范围高于普通热拌混合料,而在道路通车后,车辆荷载的反复碾压和高温环境又促使混合料空隙率进一步下降,说明冷再生沥青混合料路用性能稳定是一个循序渐进的过程。大量工程实践经验显示雨水对路面病害

的“贡献”达90%，当路面存在裂缝和孔隙时，水在车辆动态荷载作用下逐渐渗入路面结构，长期浸泡和荷载反复作用将加速沥青—集料粘附，促进沥青粘附膜脱落，导致集料脱落、松散，甚至出现结构性整体失稳。采用浸水劈裂动态加载试验分析再生剂

对重复再生沥青混合料水稳定性的影响，试验采用MTS-810万能材料试验机和应力控制模式，试件浸水按JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行，温度15℃，频率10 Hz(加载正弦波)，应力比为0.5。试验结果见图6。

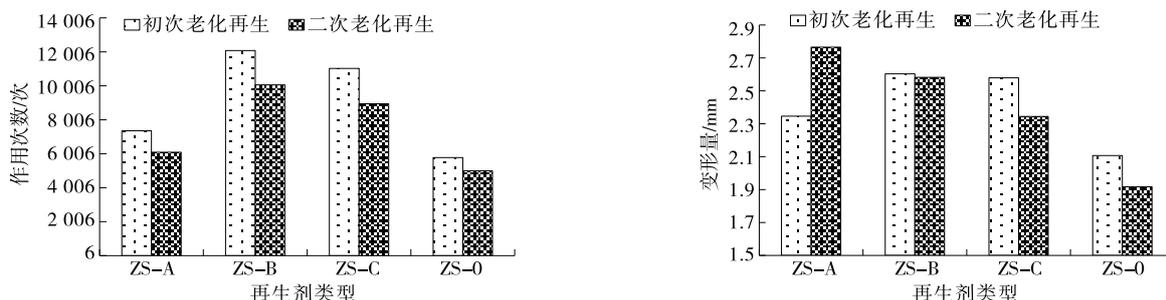


图6 初次老化和重复老化再生沥青混合料浸水劈裂试验结果

从图6可以看出:1)再生剂对乳化沥青冷再生混合料水稳定性的影响显著,无论是初次再生还是重复老化再生混合料,再生剂的加入均提高了其浸水劈裂作用次数,即改善了混合料的抗水损害能力。其中再生剂ZS-B、ZS-C对重复再生混合料水稳定性的改善效果较好,ZS-A的改善作用一般。如乳化沥青初次再生混合料,再生剂ZS-A、ZS-B、ZS-C的加入使其动态加载次数分别提高27.3%、109.1%和90.9%;重复再生后的动态加载次数分别提高22.0%、101.3%、79.1%。再生剂通过与老化沥青中沥青质和胶质组分进行相溶,利用组分转移达到平衡沥青性能的目的,由于再生剂ZS-B、ZS-C的芳香分含量远高于再生剂ZS-A,对老化沥青的相互作用效果优良,再生后沥青的各项性能指标均优于老化沥青,乳化沥青重复再生混合料内部结构粘聚力、集料分布状态(再生沥青性能提供了良好润滑状态)等均高于未掺加再生剂的混合料,混合料破坏加载作用次数显著增加。2)沥青混合料劈裂破坏时的变形量反映试件在动载反复作用下的竖向变形,添加再生剂混合料的劈裂强度与变形量均高于未掺加的混合料,说明再生剂增强了老化混合料的柔韧性,在相同环境条件下,再生混合料抵抗变形的能力显著提高,而未掺加再生剂的混合料易发生脆裂等现象,与文献[2]提出的再生沥青胶结料结论一致。如初次再生混合料,再生剂ZS-A、ZS-B、ZS-C的加入使其竖向变形分别提高11.3%、23.5%和22.4%;重复再生后的竖向变形分别提高44.2%、34.6%、22.2%,与再生剂对破坏作用次数的影响规律不一致。

3 结论

(1)再生剂对重复老化再生混合料的体积参数影响较大,显著提高了毛体积相对密度和最大理论相对密度,降低了混合料的空隙率,对基本性能的改善幅度与再生剂类型、沥青老化程度等因素存在密切关联。乳化沥青冷再生技术对重复老化的RAP料具有良好的再生恢复功能,基本性能指标和路用性能指标均满足再生技术规范要求。

(2)再生剂能改善重复再生混合料的力学性能,提高混合料的劈裂强度和劈裂最大荷载,降低RAP料重复老化对混合料劈裂强度的劣化,且再生剂对乳化沥青初次老化再生混合料力学性能的改善效果无明显差异,而对重复老化再生混合料劈裂强度的改善存在较大差异。

(3)再生剂提高了重复老化再生混合料的劈裂疲劳寿命和疲劳破坏荷载。随着应力比的增加,再生混合料的荷载呈线性增加趋势,疲劳作用次数呈指数函数下降趋势,再生剂对混合料疲劳作用次数的改善效果逐渐降低,对疲劳破坏荷载的改善效果无显著变化,且再生剂对初次老化再生混合料疲劳寿命的改善效果接近,对重复老化混合料疲劳寿命的改善效果存在较大差异。

(4)再生剂的加入显著改善了混合料的抗水损害能力,提高了浸水劈裂作用次数和竖向变形量,且再生剂类型对初次再生和重复再生混合料均具有较大差异,这与力学强度、疲劳特性影响规律并不一致。建议结合不同路用性能指标进行综合评价,选

(下转第93页)

前后总体变化幅度不大,基本维持在 2.68~2.70 kg/m³;吸水率、针片状含量和压碎指标随着研磨时间的增加呈先急后缓的减小趋势,最终趋于平稳状态。10~20 和 20~30 mm 两档再生骨料研磨 5 min,吸水率与针片状含量可满足 II 类骨料的技术要求;5~10 mm 再生骨料研磨时间达到 10 min 时才能满足 II 类骨料的技术要求。

(5) 经过颗粒整形的再生骨料砼的 7 和 28 d 抗压强度基本与天然骨料水泥砼持平;简单破碎再生骨料水泥砼的抗压强度略差,28 d 时抗压强度降低约 5 MPa。通过改性技术措施,再生骨料及其砼的各项指标与天然骨料接近,具有一定推广应用前景。

参考文献:

- [1] C J Kibert. Concrete masonry recycling progress in the USA[A]. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry[C]. 1994.
- [2] Mostafa Tevaki. The shrink feature of recycled aggregate concrete[J]. Concrete International, 1996(1).
- [3] ASTM C270: Standard specification for unit masonry [S].
- [4] 张凯. 废弃和再生骨料建材开发的理论和试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] 叶禾. 高品质再生骨料混凝土的力学性能与耐久性试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.

(上接第 89 页)

择乳化沥青重复冷再生混合料再生剂,降低单一或极端指标评价选择的缺陷。

参考文献:

- [1] 李进. 沥青再生剂扩散行为及其影响因素研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- [2] 周志刚, 杨银培. 再生剂对旧沥青的再生行为[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6).
- [3] Kupolati W K. Characterization of bitumen extracted from used asphalt pavement[J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 25(2).
- [4] 黄磊. 水泥乳化沥青多次冷再生混合料的路用性能研究[J]. 中外公路, 2013, 33(5).
- [5] 苏志翔, 李淑明, 吴小虎. 乳化沥青冷再生试验方法改进及性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(2).
- [6] JTG F41-2008, 公路沥青路面再生技术规范[S].
- [7] JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [8] Darren G Hazlett. Emulsion residue recovery tech-

- niques; how do we get emulsion residue representative of in-service binder[J]. Transportation Research E: Circular, 2007, 122.
- [9] Feme B W. Design and assessment of long-life flexible pavements[J]. Transportation Research Circular, 2001, 503.
- [10] Karlsson R, Isacson U, Ekblad J. Rheological characterization of bitumen diffusion[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(1).
- [11] 严金海, 倪富健, 杨美坤. 乳化沥青冷再生混合料的间接拉伸疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1).
- [12] Amir K, Amir M. Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10).
- [13] 林烈琼, 包双雁. 泡沫沥青冷再生技术在海南公路改建中的应用[J]. 公路与汽运, 2017(6).
- [14] 赵丹. 营口地区城市道路泡沫沥青再生技术的应用研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.

收稿日期: 2017-10-23

收稿日期: 2017-08-07