

不同 RAP 掺量乳化沥青冷再生混合料配合比设计*

肖刘路¹, 黄晚清², 谢华明³, 曹明明², 邹逸文¹

(1.西南交通大学 土木工程学院 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 2.四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 3.四川兴蜀公路建设发展有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要: 进行不同 RAP(沥青混合料回收料)掺量乳化沥青冷再生混合料级配设计,对比重型击实试验和马歇尔击实试验确定最佳含水率的区别,添加空隙率作为最佳乳化沥青用量的控制指标、低温弯曲破坏应变作为低温抗裂性能的检验指标。结果表明,RAP 掺量为 88%~98%时,乳化沥青冷再生混合料具有较好的路用性能;建议对乳化沥青冷再生配合比设计方法予以修正和补充,包括级配范围随工程需求变动、确定最佳含水率的方法由重型击实方法改为马歇尔击实试验、乳化沥青用量应使空隙率与工程实际接近、添加低温抗裂性能检验等。

关键词: 公路;乳化沥青冷再生混合料;配合比设计;RAP(沥青混合料回收料)掺量

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)04-0060-04

乳化沥青冷再生技术因旧料利用率高、能耗低、污染少,具有较高的经济和环境效益,在各等级路面养护及改扩建中应用日渐广泛。国外冷再生混合料设计方法大致分为经验公式法和试验测试法两类,经验公式法根据沥青混合料回收料(RAP)的性能指标预估最佳乳化沥青含量,代表方法有美国沥青协会设计法、俄勒冈州设计法;试验测试法以再生混合料试件的马歇尔稳定度、劈裂强度比及最大相对密度为主要指标确定最佳乳化沥青用量,代表方法有 AASHTO 修正的马歇尔法、加利福尼亚州设计法。中国主要采用修正马歇尔试验法,该方法存在诸多不足或不便,如所建议的级配范围存在局限、最佳含水率试验方法稍显复杂、最佳乳化沥青用量确定指标单一、路用性能配合比检验不充分等。以 RAP 掺量控制级配进行配合比设计也鲜有报道。该文基于室内试验,对不同 RAP 掺量乳化沥青冷再生混合料进行配合比设计。

1 原材料

1.1 RAP

RAP 采用 G544 线川九路段九寨沟县境内路面铣刨料,按粒径大小分为 3 档,其技术指标见表 1、表 2。

1.2 乳化沥青

采用某种慢裂型阳离子乳化沥青,其技术指标测试结果见表 3。

表 1 RAP 沥青含量与含水率

粒径/mm	沥青含量/%	含水率/%
0~5	4.80	0.11
5~10	3.64	0.09
10~30	3.35	0.11

表 2 RAP 回收沥青的技术指标

试验项目	试验结果
针入度(25℃,5s)/(0.1mm)	15.2
软化点/℃	68.1
15℃延度/cm	脆断
25℃延度/cm	78.5

表 3 乳化沥青的技术指标

项目	检测结果	技术要求
粒子电荷	阳离子	阳离子
破乳速度	慢裂	慢裂
筛上残留物/%	0.02	≤0.1
恩格拉黏度计 E_{25} /%	8.0	2~30
蒸发残留物含量/%	62.9	≥62
蒸发残留物针入度/(0.1mm)	67.8	50~300
蒸发残留物 15℃延度/cm	>100	≥40
储存稳定性(1d)/%	0.4	≤1
储存稳定性(5d)/%	3.0	≤5

1.3 其他原材料

试验采用 10~20 mm 石灰岩碎石,其各项指标均满足规范要求。矿粉指标也满足规范要求。采用 P.C.42.5 复合硅酸盐水泥,其性能测试结果见表 4。

* 基金项目:四川省交通运输科技项目(2019-ZL-13)

表 4 P.C42.5 水泥的技术指标

检测项目	检测结果	技术要求
凝结时间/min	初凝	≥45
	终凝	≤600
安定性	1.5	≤5
抗折强度(3 d)/MPa	6.1	≥3.5
抗压强度(3 d)/MPa	27.3	≥17.0

2 配合比设计

2.1 级配设计

未抽提的 RAP 用作黑色集料,分别调试不同

表 6 不同 RAP 掺量乳化沥青冷再生混合料的合成级配

RAP 掺量/%	各筛孔(mm)通过百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
98	100.0	97.4	93.7	82.6	52.2	35.1	20.9	11.6	6.5	3.9	2.8	2.2
88	100.0	96.8	90.0	77.4	52.9	35.9	21.4	11.8	6.6	4.0	2.9	2.3
80	100.0	96.3	87.2	73.4	52.9	35.6	21.5	12.1	7.0	4.5	3.4	2.8
级配上限	100.0	—	—	80.0	—	60.0	45.0	—	—	20.0	—	7.0
级配下限	80.0	—	—	60.0	—	25.0	15.0	—	—	3.0	—	1.0

测分散情况确定最佳用水量,该方法完全依据工程经验,没有量化指标,缺乏科学性。中国规范要求采用重型击实试验确定乳化沥青冷再生混合料最佳含水率,条件不足的工程可尝试采用马歇尔击实试验。根据相关研究和工程经验,水泥用量初拟为 1.5%。试验过程中保持混合料乳化沥青含量和水泥用量不变,变化总用水量进行重型击实试验与马歇尔击实(双面击实 100 次)试验,3 种级配混合料的试验结果见图 1、图 2。

由图 1、图 2 可知:通过重型击实试验与马歇尔击实试验得到的 3 种级配乳化沥青冷再生混合料的最佳含水率均在 4.5%左右,表明马歇尔击实试验在确定最佳含水率方面具有良好的准确性;相同含水率条件下,马歇尔击实试验所得干密度比重型击实试验所得结果大,表明马歇尔双面击实100 次试验

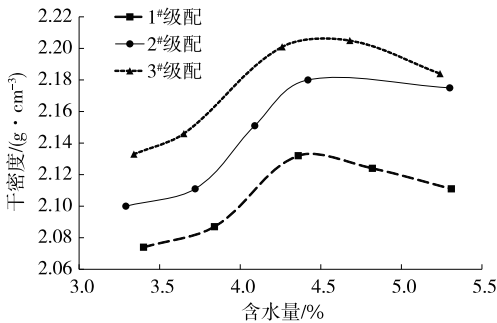


图 1 不同级配乳化沥青冷再生混合料重型击实试验结果

RAP 掺量的级配,得到 98%、88%和 80%RAP 掺量 3 种级配,分别记作 1#、2#、3# 级配,掺配比例见表 5,合成级配见表 6。

表 5 不同 RAP 掺量乳化沥青冷再生混合料各档集料的用量

级配号	RAP 掺量/%	各档(mm)RAP 用量/%			新料用 量/%	矿粉用 量/%
		10~30	5~10	0~5		
1	98	47.0	11.0	40.0	0.0	2.0
2	88	36.0	11.0	41.0	10.0	2.0
3	80	28.0	12.0	40.0	17.5	2.5

2.2 最佳含水率

北美地区的公路工程常采用裹附试验,通过目

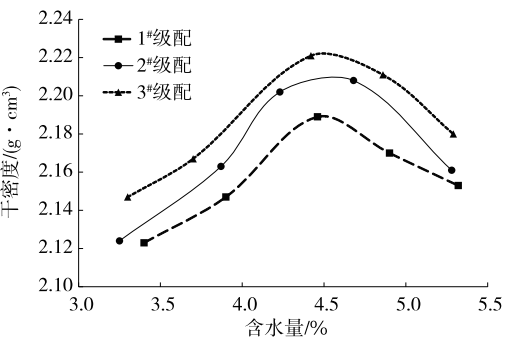


图 2 不同级配乳化沥青冷再生混合料马歇尔试验结果

的击实功过大,可酌情减少击实次数。

2.3 最佳乳化沥青用量

针对 1#、2#、3# 级配,保持最佳含水率不变,分别取乳化沥青用量为 2.9%、3.1%、3.3%、3.5%、3.7%,将乳化沥青冷再生混合料双面击实 50 次成型标准马歇尔试件,连同试模放入 60℃烘箱中养生 48 h 后取出,立即双面各击实 25 次,置于室温 12 h 后脱模,测试空隙率并进行干、湿劈裂试验,结果见图 3、图 4。

由图 3、图 4 可知:1) 乳化沥青冷再生混合料的空隙率随乳化沥青用量的增加而减小。乳化沥青用量增加,混合料中集料含量相对减小;增加乳化沥青用量,集料与沥青的裹附效果增强,混合料中自由沥青含量增加,填充部分空隙,使空隙率降低。2) 干、

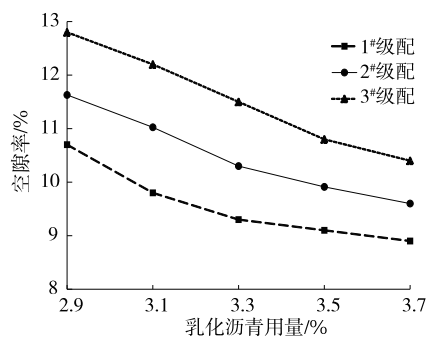


图3 不同乳化沥青用量再生混合料空隙率试验结果

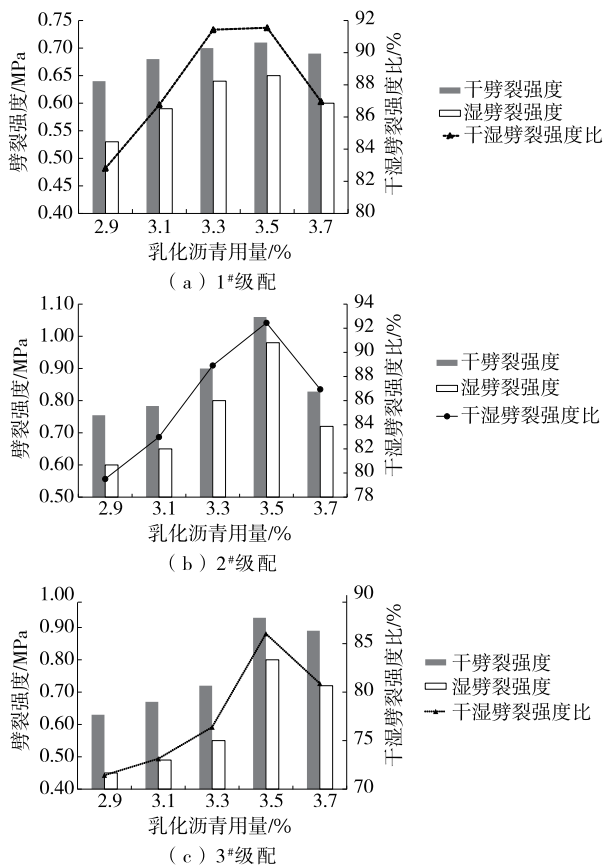


图4 不同乳化沥青用量再生混合料干、湿劈裂试验结果

湿劈裂强度及干湿劈裂强度比均随着乳化沥青用量的增加先增大后减小,1#、2#、3#级配分别在乳化沥青用量为3.4%、3.5%和3.6%时达到峰值,说明乳化沥青用量超过最佳用量时,自由沥青含量过高,过多的沥青会阻碍集料间的嵌挤,使混合料强度降低。3) 综合空隙率及强度,1#、2#、3#级配冷再生混合料分别在乳化沥青用量为3.4%、3.5%和3.6%时强度最大,浸水强度损失最小,空隙率较小,且均满足技术要求。

2.4 最佳水泥掺量

针对1#、2#、3#级配,保持最佳含水率不变,乳

化沥青用量分别取3.4%、3.5%和3.6%,P.C42.5水泥掺量分别为0.0%、1.5%、3.0%,进行15℃干、湿劈裂试验,试验结果见图5。

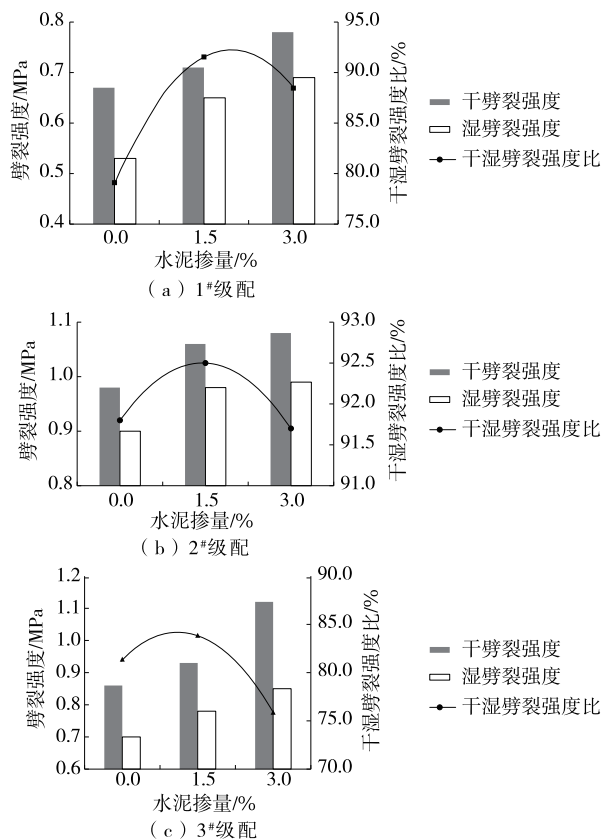


图5 不同水泥掺量乳化沥青再生混合料干、湿劈裂试验结果

由图5可知:随着水泥掺量的增加,乳化沥青再生混合料的干、湿劈裂强度逐渐增大,说明水泥通过水化反应吸收混合料的水分,混合料的整体强度提高,未水化的水泥充当活性矿粉的作用,提高了沥青与集料间的黏附性。但随着水泥掺量的增加,干湿劈裂强度比先增加后减小,需限制水泥掺量。综合考虑,1#、2#、3#级配的水泥掺量分别为1.7%、1.5%、1.3%时,冷再生混合料具有较高的力学性能,为最佳水泥掺量。

3 配合比检验与设计方法修正建议

3.1 配合比检验

根据确定的配合比,分别通过车辙试验、低温弯曲试验和冻融劈裂试验进行高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性验证,试验结果见表7。

由表7可知:1) 随着RAP掺量的增加,乳化沥青再生混合料的车辙动稳定度迅速减小,这是由于添加的粗集料逐渐减少,混合料整体沥青含量增加,

表 7 掺 RAP 乳化沥青再生混合料配合比检验结果

级配号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	低温弯曲最大 弯拉应变/ $\mu\epsilon$	冻融劈裂强 度比/%
1	6 471	2 184.9	76.2
2	12 256	2 033.4	82.0
3	14 217	1 902.6	70.2
技术要求	$\geq 2\ 000$	$\geq 2\ 000$	≥ 70

同时集料间嵌挤强度逐渐降低,因而高温稳定性能迅速降低。但 98%RAP 掺量的动稳定度仍大于规范下限,表明不掺加粗集料的乳化沥青冷再生混合料依然满足高温稳定性要求,也验证了水泥对其高温稳定性能的巨大提升作用。2) 随着 RAP 掺量的增加,再生混合料的低温弯曲最大弯拉应变逐渐增加,表明减少粗集料掺量可增加混合料的柔性。根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》,普通沥青混合料低温弯曲最大弯拉应变 $\geq 2\ 000\ \mu\epsilon$,80%RAP 掺量再生混合料的最大弯拉应变小于该控制指标。3) 随着 RAP 掺量的增加,冻融劈裂强度比先增加后减小,说明过多或过少掺加粗集料都不利于乳化沥青冷再生混合料的水稳定性。RAP 掺量过少,混合料整体沥青含量较低,黏结性不足,其抗水损坏能力较差;RAP 掺量过多,集料间嵌挤强度降低,内摩阻力减小,水稳定性降低。

从经济和环保效益方面考虑,希望尽可能提高 RAP 利用率。RAP 掺量 98%时,完全不掺加粗集料,只掺加 2%矿粉,RAP 被充分利用。此时,高温稳定性最差,但仍满足技术要求;低温破坏应变最大,且 $\geq 2\ 000\ \mu\epsilon$;水稳定性指标满足规范要求。

3.2 设计方法修正建议

根据配合比检验结果,88%~98%RAP 掺量乳化沥青冷再生混合料具有较好的路用性能。其中 98%RAP 掺量 100%利用 RAP,完全不添加新料,对应的 1#合成级配的 13.2 mm 筛孔通过率超过级配上限,但路用性能合格,表明规范建议的级配范围有待商榷。结合试验过程,建议对乳化沥青冷再生配合比设计方法作以下修正和补充:

(1) 级配范围结合实际工程需求予以调整,只需路用性能满足即可。

(2) 采用马歇尔击实试验替代重型击实试验确定最佳含水率,双面击实次数不超过 100 次。

(3) 确定最佳乳化沥青用量时,添加空隙率作为评价指标,并要求空隙率与实际施工碾压空隙率接近。

(4) 通过路用性能试验进行配合比检验时,规范仅需检验高温稳定性和水稳定性,建议添加低温抗裂性能检验,以满足低温地区路用性能需要。

4 结论

(1) 设计 98%、88%和 80%RAP 掺量的乳化沥青冷再生混合料配合比,通过马歇尔击实(双面击实 100 次)试验和重型击实试验,得到 3 种级配的最佳含水率为 4.5%,最佳乳化沥青用量分别为 3.4%、3.5%、3.6%,最佳水泥掺量分别为 1.7%、1.5%、1.3%。

(2) 添加空隙率作为乳化沥青用量的控制指标,添加低温抗裂性能指标用于配合比检验。RAP 掺量 80%时乳化沥青冷再生混合料的低温抗裂性能不足,RAP 掺量为 88%~98%时具有较好的路用性能。

(3) 对乳化沥青冷再生配合比设计方法予以修正和补充:级配范围随工程需求变动,可适当调整;含水率确定方法采用马歇尔击实试验替代重型击实试验,双面击实次数不超过 100 次;添加空隙率指标确定最佳乳化沥青用量,使室内试验与现场钻芯技术指标接近;配合比检验添加低温性能试验指标。

参考文献:

- [1] BEN C Cox, ISAAC L Howard. Evaluation of marshall stability design principles: Applied to cold in-place recycling[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672 (28): 211—222.
- [2] AHMED I Nassar, NICHOLAS Thom, TONY Parry. Optimizing the mix design of cold bitumen emulsion mixtures using response surface methodology[J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 216—229.
- [3] CHELELGO K, ZACHARY C A G, MUSE Shitote S, et al. Laboratory mix design of cold bitumen emulsion mixtures incorporating reclaimed asphalt and virgin aggregates[J]. Buildings, 2018, 8(12): 177.
- [4] ZHANG J, ZHENG M, XING X, et al. Investigation on the designing method of asphalt emulsion cold recycled mixture based on one-time compaction[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 286(11): 124958.
- [5] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面再生技术规范: JTG/T 5521—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [6] 何东坡, 金钊. 基于空隙率的水泥乳化沥青冷再生混合

(下转第 67 页)

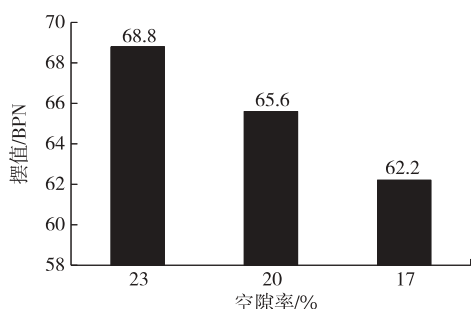


图 10 不同空隙率 PA-10 沥青混合料抗滑试验结果

隙越小,水渗透到混合料内部的能力越低,同时沥青路面表层构造深度越小。

3 结论

(1) 随着空隙率的降低,细粒式大孔隙 PA-10 沥青混合料的马歇尔稳定度逐渐增大,且均满足排水改性沥青混合料稳定度不小于 5 kN 的要求;空隙率为 20% 时,混合料动稳定度最优,从高温抗车辙能力角度考虑,空隙率为 20% 时最优。

(2) 随着空隙率的降低,细粒式大孔隙 PA-10 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比及弯曲破坏应变均逐渐增加,且均满足排水改性沥青混合料的相关规范要求。从抗水损害及低温抗开裂能力角度考虑,空隙率为 17% 时最优。

(3) 随着空隙率的降低,细粒式大孔隙 PA-10 沥青混合料的渗水系数及摆值均逐渐降低,且均满足排水改性沥青混合料的相关规范要求。从排水及抗滑能力角度考虑,空隙率为 23% 时最优。

(4) 综合考虑,细粒式大孔隙 PA-10 沥青混合料的空隙率宜为 17%~23%。

参考文献:

- [1] 李辉.城市道路交通噪声污染特征分析与管理对策研究[D].长沙:湖南农业大学,2012.
- [2] 储益萍.道路交通噪声控制措施的技术、经济比较分析[J].环境污染与防治,2011,33(5):107-110.

- [3] FAN Y, PING S, CAO D, et al. Investigation and modeling of sound absorption properties of thin layer wearing course[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2017, 46(1): 46-54.
- [4] 唐国奇.双层排水降噪沥青路面关键技术研究[D].南京:东南大学,2015.
- [5] 齐琳.多孔沥青路面吸声性能评价与优化研究[D].西安:长安大学,2011.
- [6] WAN J, YUE X, WEI S, et al. Self-healing property of ultra-thin wearing courses by induction heating[J]. Materials, 2018, 11(8): 1392-1405.
- [7] 郑健龙.基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J].中国公路学报,2014,27(1):1-7.
- [8] 吴后选,袁怡,邢成炜,等.新型高速公路沥青面层结构组合设计研究[J].中外公路,2017,37(6):55-60.
- [9] 朱琨琨,刘黎萍,陈长,等.上海逸仙高架 NovaChip® 超薄磨耗层降噪效果实测与分析[J].公路工程,2009,34(3):158-161.
- [10] 高晓伟,颜薇,宋琿,等.温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析[J].中外公路,2019,39(1):28-33.
- [11] 李江龙.用于薄层罩面的 SMA-8 组成设计工艺及路用性能试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [12] 咸红伟,张肖宁.ECA-10 超薄磨耗层在高速公路预防养护中的应用[J].中外公路,2011,31(1):209-212.
- [13] 何志敏.复合改性 UTAC 薄层罩面在北京高速公路中的应用[J].中外公路,2018,38(2):75-79.
- [14] 刘博.高黏改性剂在排水沥青混合料中的应用研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [15] 郑立宝,郭利扬,薛晓飞,等.基于不同沥青胶结料的抗滑防水超薄罩面性能评价[J].中外公路,2018,38(3):48-50.
- [16] 肖晶晶,沙爱民,蒋玮,等.多孔沥青混合料路用性能研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(4):49-53.
- [17] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

收稿日期:2020-08-24

(上接第 63 页)

- 料配合比设计方法研究[J].中外公路,2016,36(4):284-288.
- [7] 交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG E40-2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 马川义.乳化沥青冷再生混合料设计方法优化研究[D].济南:山东建筑大学,2014.

- [9] 杨彦海,邬宇航,杨野,等.水泥对乳化沥青冷再生材料性能影响的宏微观分析[J].公路交通科技,2018,35(10):1-8.
- [10] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

收稿日期:2020-11-19