

级配对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响^{*}张驰¹, 胡永林², 范人杰³, 项斌³, 蒋应军⁴, 陈浙江⁵

(1.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2.金华市金东区公路管理段, 浙江 金华 321000;

3.金华市交通规划设计院有限公司, 浙江 金华 321000; 4.长安大学 特殊地区公路工程教育

部重点实验室, 陕西 西安 710064; 5.金华市公路管理局, 浙江 金华 321000)

摘要:为提高乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性,采用垂直振动法成型圆柱体试件确定混合料最大干密度和最佳含水率,以此为依据成型标准车辙试件进行车辙试验,分析矿粉、机制砂和 9.5~19 mm 粗集料掺量对乳化沥青冷再生混合料高温性能的影响。结果表明,随矿粉掺量的增加,冷再生混合料动稳定度迅速增长,矿粉掺量大于 3% 时矿粉对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响不再显著,矿粉掺量为 3% 时动稳定度提高 41%;随机制砂掺量的增加,冷再生混合料动稳定度呈抛物线变化,机制砂掺量为 20% 时达到峰值,动稳定度提高 152%;随 9.5~19 mm 粗集料掺量的增加,冷再生混合料动稳定度呈抛物线变化,9.5~19 mm 粗集料掺量为 10%~30% 时动稳定度提高 60%~97%。建议冷再生混合料中 9.5~19 mm 粗集料、机制砂、矿粉掺量分别取 10%~30%、20%、3%。

关键词:公路;乳化沥青冷再生混合料;高温稳定性;级配;动稳定度**中图分类号:** U416.217**文献标志码:** A**文章编号:** 1671-2668(2018)04-0058-04

对于乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性,P. Jitarekul 等认为冷再生混合料在交通荷载作用下易产生车辙破坏而不是疲劳开裂;Kim Y. 等指出回收料中旧沥青含量越高冷再生混合料抗车辙性能越好,旧沥青越硬抗车辙性能越好;Stephane Charmot 等指出乳化沥青掺水泥能提高冷再生混合料的高温稳定性;吴旷怀等指出面层回收料 RAP 结团状况对乳化再生沥青混合料的高温性能有明显影响;王宏等指出乳化沥青冷再生混合料在后期强度形成后具有较好的高温稳定性,且混合料高温稳定性受温度的影响没有热拌沥青混合料敏感;蒋应军等认为级配对乳化沥青冷再生混合料力学强度的影响显著;王志刚等指出聚酯纤维能提高乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性,且其掺量越大,混合料高温稳定性越好;吕政桦等认为乳化沥青用量和水泥掺量对冷再生混合料高温性能的影响显著。上述研究均聚焦于 RAP 的结团状况、掺量、类型、龄期、乳化沥青用量、水泥、纤维对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响,未涉及矿料级配的影响,且均采用重型击实法确定最大干密度和最佳含水率。而已有研究表明重型击实法确定的最佳含水率偏大、最大干密度偏小,垂直振动法成型的试件与沥青混合料现场

压实机理更接近。该文采用垂直振动法确定乳化沥青冷再生混合料最大干密度和最佳含水量,通过动稳定度试验研究矿粉、机制砂、粗集料掺量对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响。

1 原材料及试件成型方法

1.1 原材料

(1) 乳化沥青。采用 SBR 改性乳化沥青(简称 SBR),其技术性质见表 1。

表 1 SBR 乳化沥青的技术指标

试验项目	试验结果	技术要求
筛上剩余量/%	0.01	≤0.1
破乳速度	慢裂	慢裂或中裂
粒子电荷	+	阳离子(+)
恩格拉粘度	13	2~30
蒸发残留物含量/%	63	≥62
蒸发残留物针入度(25℃)/(0.1 mm)	69	50~300
延度(15℃)/cm	—	≥40
溶解度(三氯乙烯)/%	98.2	≥97.5
贮存稳定性/%	5 d 1 d	≤5 ≤1
与矿料的粘附性(裹覆面积)	2/3	≥2/3

^{*} 基金项目: 浙江交通科技项目(2016-2-17)

(2) 面层回收集料 RAP。采用陕西某高速公路沥青路面 RAP,其级配筛分结果见表 2。

表 2 RAP 材料级配筛分结果

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
26.50	100.0	2.360	16.6
19.00	97.3	0.300	3.8
9.50	62.9	0.075	0.8
4.75	36.4		

由表 2 可看出:该 RAP 破碎后其中粒径 2.36~9.5 mm 的含量为 46.3%,粗集料和细集料含量较少。为此,添加一定粒径 9.5~19 mm 粗集料、机制砂和矿粉调整其级配。

(3) 新集料。粗集料(9.5~19 mm)、机制砂和矿粉采用洛南县正泰矿业公司的产品,其技术性质见表 3~5。

表 3 9.5~19 mm 粗集料的技术性质

检测项目	实测值	技术要求
表观相对密度	2.869	≥ 2.5
针片状含量/%	9.7	≤ 18
吸水率/%	0.62	≤ 3.0
压碎值/%	13.2	≤ 28
磨耗值/%	12.8	≤ 30

表 4 机制砂的技术性质

检测项目	实测值	技术要求
表观相对密度	2.745	≥ 2.5
坚固性(>0.3 mm 部分)/%	7.6	≤ 12
砂当量/%	82.3	≥ 60
亚甲蓝值/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.6	≤ 25
棱角性/s	45.4	≥ 30

表 5 矿粉的技术性质

检测项目	实测值	技术要求
表观相对密度	2.789	≥ 2.5
含水量/%	0.4	≤ 1.0
亲水系数	0.66	< 1.0
加热安定性	良好	实测
CaCO_3 含量/%	97	≥ 90

1.2 试件成型方法

采用垂直振动压实仪振动 60 s 成型圆柱体试件确定乳化沥青最佳用量及混合料最大干密度、最佳含水率。垂直振动压实仪的工作频率为 35 Hz,上车系统质量为 108 kg,下车系统质量为 167 kg。

按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合

料试验规程》成型车辙试件进行车辙试验,试件尺寸为 300 mm \times 300 mm \times 50 mm。

2 试验结果与分析

2.1 矿粉掺量的影响

混合料级配即 RAP:矿粉分别为 100:0、100:1、100:2、100:3、100:4、100:5,即矿粉掺量分别为 0、1%、2%、3%、4%、5%,RAP 级配见表 2。不同矿粉掺量下乳化沥青冷再生混合料的最大干密度和最佳含水率见表 6,固定乳化沥青试验用量为 4%。矿粉掺量对乳化沥青冷再生混合料最佳乳化沥青用量的影响见表 7,对混合料动稳定度 DS 的影响见表 8 和图 1。

表 6 不同矿粉掺量下冷再生混合料的最大干密度和最佳含水率

矿粉掺量/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%	矿粉掺量/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%
0	2.178	3.7	3	2.202	4.1
1	2.184	3.8	4	2.208	4.2
2	2.192	3.9	5	2.213	4.2

表 7 不同矿粉掺量下冷再生混合料的最佳乳化沥青用量 %

矿粉掺量	最佳乳化沥青用量	矿粉掺量	最佳乳化沥青用量
0	3.8	3	4.1
1	3.9	4	4.2
2	4.0	5	4.3

表 8 不同矿粉掺量下冷再生混合料车辙试验结果

矿粉掺量/%	DS/(次 $\cdot \text{mm}^{-1}$)	DS 相对值	矿粉掺量/%	DS/(次 $\cdot \text{mm}^{-1}$)	DS 相对值
0	976	1.00	3	1 373	1.41
1	1 076	1.10	4	1 424	1.46
2	1 241	1.27	5	1 437	1.47

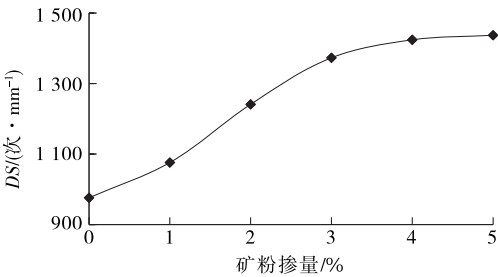


图 1 冷再生混合料动稳定度随矿粉掺量的变化

由表8和图1可知:随矿粉掺量的增加,冷再生混合料的动稳定度先急剧增大后趋于平缓;矿粉掺量超过3%时,继续增加其掺量对混合料动稳定度的影响不再显著。与不掺矿粉相比,掺3%矿粉的冷再生混合料的动稳定度提高41%,建议矿粉掺量取3%。

表9 不同机制砂掺量下冷再生混合料级配

级配编号	材料组成/%				下列筛孔(mm)的通过率/%						
	RAP	粗集料	机制砂	矿粉	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
C0S0K0	100	0	0	0	100	97.3	62.9	36.3	16.7	3.9	0.9
C10S10K3	77	10	10	3	100	97.5	62.3	41.4	25.3	8.4	4.3
C10S20K3	67	10	20	3	100	97.6	66.1	47.4	32.9	10.6	5.1
C10S30K3	57	10	30	3	100	97.7	69.6	53.9	40.5	12.4	5.9
C10S40K3	47	10	40	3	100	98.1	73.3	60.1	48.3	14.6	6.6

不同机制砂掺量下冷再生混合料最大干密度和最佳含水率见表10,固定乳化沥青试验用量为4%。机制砂掺量对冷再生混合料最佳乳化沥青用量的影响见表11,对混合料动稳定度DS的影响见表12和图2。

由表12和图2可知:随着机制砂掺量的增加,

表10 不同机制砂掺量下冷再生混合料的最大干密度和最佳含水率

机制砂掺量/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%	机制砂掺量/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%
0	2.177	3.7	30	2.218	4.0
10	2.199	3.8	40	2.201	4.2
20	2.241	3.9			

表11 不同机制砂掺量下冷再生混合料的最佳乳化沥青用量 %

机制砂掺量/%	最佳乳化沥青用量/%	机制砂掺量/%	最佳乳化沥青用量/%
0	3.9	30	4.1
10	3.9	40	4.2
20	3.9		

2.2 机制砂掺量的影响

机制砂掺量分别为0%、10%、20%、30%、40%,粗集料和矿粉掺量分别为10%、3%。为便于描述,采用CaSbKc表示级配,其中:a为9.5~19mm粗集料C的掺量,b为机制砂S的掺量,c为矿粉K的掺量(见表9)。

表12 不同机制砂掺量下冷再生混合料车辙试验结果

机制砂掺量/%	DS/(次 $\cdot \text{mm}^{-1}$)	DS相对值	机制砂掺量/%	DS/(次 $\cdot \text{mm}^{-1}$)	DS相对值
0	976	1.00	30	2 407	2.47
10	1 768	1.81	40	2 148	2.20
20	2 462	2.52			

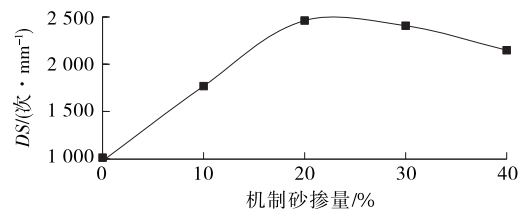


图2 冷再生混合料动稳定度随机制砂掺量的变化

乳化沥青冷再生混合料的动稳定度先增大后减小;机制砂掺量为20%时,动稳定度达到最大,与不掺新集料相比,动稳定度提高152%,建议机制砂掺量取20%。

2.3 9.5~19 mm 粗集料掺量的影响

不同9.5~19mm粗集料掺量下冷再生混合料级配见表13。试验时,机制砂和矿粉掺量分别为20%、3%。

表13 不同9.5~19mm粗集料掺量下冷再生混合料的级配

级配编号	材料组成/%				下列筛孔(mm)的通过率/%						
	RAP	粗集料	机制砂	矿粉	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
C0S20K3	77	0	20	3	100	98.1	72.4	52.6	35.2	11.1	5.4
C10S20K3	67	10	20	3	100	97.5	66.1	47.4	32.9	10.5	5.0
C20S20K3	57	20	20	3	100	97.2	60.5	43.7	31.2	10.1	4.9
C30S20K3	47	30	20	3	100	96.8	54.8	40.2	29.6	9.7	4.8
C40S20K3	37	40	20	3	100	100.0	96.5	49.3	36.5	27.5	9.3
C50S20K3	27	50	20	3	100	100.0	95.8	43.5	32.8	26.3	8.8

不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下冷再生混合料的最大干密度和最佳含水率见表 14,固定乳化沥青试验用量为 4%。粗集料掺量对冷再生混合料最佳乳化沥青用量的影响见表 15,对混合料动稳定度 DS 的影响见表 16 和图 3。

表 14 不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下冷再生混合料的最大干密度和最佳含水率

粗集料掺量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	粗集料掺量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%
0	2.199	3.9	30	2.286	3.7
10	2.241	3.9	40	2.283	3.6
20	2.267	3.8	50	2.271	3.4

表 15 不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下冷再生混合料的最佳乳化沥青用量 %

粗集料掺量/%	最佳乳化沥青用量	粗集料掺量/%	最佳乳化沥青用量
0	4.0	30	3.7
10	3.9	40	3.6
20	3.8	50	3.5

表 16 不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下冷再生混合料车辙试验结果

粗集料掺量/%	DS/(次·mm ⁻¹)	DS 相对值	粗集料掺量/%	DS/(次·mm ⁻¹)	DS 相对值
0	1 538	1.00	30	3 025	1.97
10	2 462	1.60	40	2 871	1.87
20	2 845	1.85	50	2 716	1.77

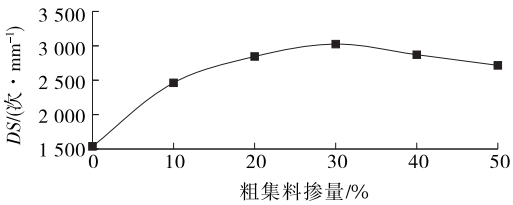


图 3 冷再生混合料动稳定度随 9.5~19 mm 粗集料掺量的变化

由表 16 和图 3 可知:随着 9.5~19 mm 粗集料掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的动稳定度先增大后减小;9.5~19 mm 粗集料掺量为 10%~30%时,与不掺新集料相比,冷再生混合料的动稳定度提高 60%~97%;掺量为 30%时,动稳定度达到峰值。这是由于 9.5~19 mm 粗集料掺量少于 30%时,冷再生混合料结构随着粗集料掺量的增加由密

实悬浮结构向骨架密实结构转变,高温抗车辙性能逐渐提高;掺量超过 30%后,随掺量的继续增加,冷再生混合料中粗集料掺量相对较多而细集料较少,成型的冷再生混合料车辙板空隙率较大,集料与集料之间的粘附性较差,在车轮荷载作用下容易发生滑移失稳,最终导致混合料高温抗车辙性能降低。建议 9.5~19 mm 粗集料掺量取 10%~30%。

3 结论

(1) 随矿粉掺量的增加,冷再生混合料的动稳定度迅速增长,矿粉掺量为 3%时动稳定度提高 41%,掺量大于 3%时矿粉对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响不再显著。建议冷再生混合料中矿粉掺量取 3%。

(2) 随机制砂掺量的增加,冷再生混合料的动稳定度呈抛物线变化,机制砂掺量为 20%时达到峰值,此时动稳定度提高 152%。建议冷再生混合料中矿粉掺量取 20%。

(3) 矿粉掺量为 3%、机制砂掺量为 20%时,随 9.5~19 mm 粗集料掺量的增加,冷再生混合料的动稳定度呈抛物线变化,粗集料掺量为 10%~30%时动稳定提高 60%~97%。建议冷再生混合料中 9.5~19 mm 粗集料掺量取 10%~30%。

参考文献:

[1] 徐剑,石小培,秦永春.乳化沥青冷再生路面性能衰变规律研究[J].公路交通科技,2015,32(1).

[2] 张志祥,吴建浩.再生沥青混合料疲劳性能试验研究[J].中国公路学报,2006,19(2).

[3] 王舜.水泥乳化沥青冷再生混合料性能评价[J].公路工程,2012,37(1).

[4] 周顺文,王端宜.泡沫沥青冷再生技术与乳化沥青冷再生技术的对比研究[J].公路工程,2009,34(6).

[5] P Jitarekul, S Sunarjono, S E Zoorob, et al. Early life performance of cement and foamed bitumen stabilised reclaimed asphalt pavement under simulated traffic-loading[R]. Nottingham Centre for Pavement Engineering, 2007.

[6] Kim Y, Lee H, Heitzman M. Validation of new mix design procedure for cold in-place recycling with foamed asphalt for iowa department of transportation [A]. Transportation Research Board, 2006 Annual Meeting [C]. 2006.

[7] Stephane Charmot. The theoretical analysis of the RAP (下转第 65 页)

5 结论

(1) 沥青混合料级配曲线越接近最大理论密度曲线,其毛体积密度越大、间隙率越小;满足贝雷法的3个检验指标即 CA 、 FA_C 和 FA_F 的级配具有更好的骨架结构,其水稳定性也越好。

(2) 级配理论检验结果表明AC20-3和AC20-4与 $n=0.45$ 时各筛孔通过率的方差过大,贝雷法检验结果表明只有AC20-2和AC20-3满足贝雷法三大指标要求,试验结果表明AC20-2的水稳定性优于AC20-1。综合考虑,推荐AC20-2为再生沥青混合料设计级配。

(3) 以最大密度曲线和贝雷法为基础对再生沥青混合料级配进行优化设计,有利于提高再生沥青混合料的路用性能。

参考文献:

- [1] 陈跃峰.五纵七横国道主干线贯通 高速路网雏形初现[J].公路交通科技:应用技术版,2008(1).
- [2] 季节,徐世法,罗晓辉.重复再生沥青混合料及温拌沥青混合料性能评价[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 郝培文,徐金枝,周怀治.应用贝雷法进行级配组成设计的关键技术[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(6).
- [4] 陈忠达,袁万杰,郑东启,等.级配理论应用研究[J].重庆交通学院学报,2005,24(4).
- [5] 陈忠达,袁万杰,高春海,等.多级嵌挤密实级配设计方法研究[J].中国公路学报,2006,19(1).
- [6] 吴爱祥,王建栋,彭乃兵,等.颗粒级配对粗骨料充填料浆离析的影响[J].中南大学学报:自然科学版,2016,47(9).
- [7] 王立久,刘慧.骨架密实型沥青混合料集料级配设计方

法[J].中国公路学报,2008,21(5).

- [8] 廖克俭,丛玉凤.道路沥青生产与应用技术[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 张金喜,李娟.我国废旧沥青混合料再生利用的现状和课题[J].市政技术,2005(6).
- [10] 王立久,刘慧.矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J].公路,2008(1).
- [11] 彭波.基于变 i 法理论的级配组成设计方法[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2005,29(5).
- [12] 陈爱文,郝培文.应用贝雷法设计和检验级配[J].中外公路,2004,24(5).
- [13] 张争奇,赵战利,张卫平.矿料级配对沥青混合料低温性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(2).
- [14] 吕文江,陈爱文,郝培文,等.贝雷法参数 CA 比对沥青混合料性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(4).
- [15] 张铭铭,李会娟,郝培文.基于贝雷法排水性沥青混合料级配设计方法研究[J].公路,2009(6).
- [16] 申康,陈爱文,吕文江,等.贝雷法设计密度对沥青混合料性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(3).
- [17] 谭忆秋.沥青与沥青混合料[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [18] 杨瑞华.基于分形理论的沥青混合料设计理论与方法研究[D].上海:同济大学,2008.
- [19] 杨瑞华,许志鸿,张超,等.沥青混合料分形级配理论[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(12).
- [20] 刘刚,郝培文,曹晓娟.基于级配理论的沥青混合料骨架结构研究[J].中外公路,2013,33(3).
- [21] 张金辉,于江,李林萍,等.分形级配理论在连续级配设计中的应用[J].中外公路,2013,33(6).

收稿日期:2018-01-10

(上接第61页)

aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes[J].Construction & Building Materials,2014,71.

- [8] 吴旷怀,李燕枫,杨国梁,等.乳化沥青冷再生沥青混合料的研究[J].暨南大学学报:自然科学版,2008,29(3).
- [9] 王宏,郝培文,南兵章,等.乳化沥青冷再生混合料高温稳定性研究[J].公路工程,2013,38(4).
- [10] 蒋应军,蔡永涛,胡永林,等.级配对乳化沥青冷再生混合料强度的影响[J].建筑材料学报,2017,20(5).
- [11] 王志刚.掺加纤维的乳化沥青冷再生混合料路用性能及机理分析[J].公路工程,2016,41(6).

- [12] 吕政桦,申爱琴,覃潇,等.乳化沥青冷再生混合料性能优化及机理研究[J].建筑材料学报,2018,21(1).
- [13] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [14] 蒋应军,乔怀玉.垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [15] 王天林,蒋应军.沥青混合料试件振动成型方法[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2014,38(3).
- [16] 苏勇文.AC-20 沥青混合料试件垂直振动方法[D].西安:长安大学,2013.

收稿日期:2018-03-06