文章编号：1000-8608(2018)06-0607-08

级配对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响

蒋应军*， 韩占闯

（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）

摘要： 为了优化乳化沥青冷再生混合料级配，采用垂直振动试验方法研究矿粉、机制砂和9.5～19 mm粗集料对冷再生混合料路用性能的影响.研究表明：矿粉对其水稳定性、低温抗裂性没有明显影响，矿粉掺量为3%时，与不掺矿粉相比冷再生混合料的动稳定度可提高41%；机制砂掺量为20%时，与不掺新集料相比，冻融劈裂强度比、动稳定度、弯拉强度可分别提高10%、54%、13%；9.5～19 mm粗集料对低温抗裂性能没有明显影响，与不掺新集料相比，9.5～19 mm粗集料掺量为10%～30%时，冻融劈裂强度比、动稳定度可分别提高7%～11%、151%～208%.建议冷再生混合料中9.5～19 mm粗集料掺量10%～30%、机制砂掺量20%、矿粉掺量3%为宜.

关键词： 乳化沥青冷再生混合料；垂直振动法；级配；路用性能

中图分类号： U414 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201806009

0 引 言

采用乳化沥青冷再生混合料铺筑道路的面层、基层能够降低道路建设成本，易于施工，同时减少环境污染[1].但由于乳化沥青冷再生混合料强度低、路用性能差，提高乳化沥青冷再生混合料的路用性能对提高路面使用耐久性具有积极影响.国内外道路科技人员在提高乳化沥青冷再生混合料的路用性能方面展开了一系列相关研究.He研究了回收料老化程度、回收料掺量对冷再生混合料抗永久变形的影响[2]；孙岩松研究了水泥对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响[3]；Bissada研究了泡沫沥青和温拌沥青混合料的疲劳性能[4]；Ebels研究了回收料掺量对乳化沥青冷再生混合料设计参数的影响[5].吴超凡等研究了回收料掺量对冷再生混合料路用性能的影响[6]；杜少文研究了水泥等外加材料对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响[7]；郭寅川等研究了结合料种类和掺量以及龄期对冷再生混合料路用性能的影响[8]；汪德才等分析了应力水平、水泥用量、RAP掺量、乳化沥青类型及乳化沥青用量等因素对冷再生混合料疲劳性能的影响[9].上述研究成果无疑对提高冷再生混合料性能具有重要意义，然而上述研究聚焦RAP掺量与性能、黏附和剥落机理、沥青类型、外加材料种类与掺量等因素对冷再生混合料路用性能的影响，而未见有矿料级配对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响的相关研究.且上述研究均采用重型击实方法与马歇尔方法制备试件，而马歇尔试件与路面芯样的工程相关性不足70%[10].本课题组采用与路面芯样力学性能相关性可达90%以上的垂直振动试验方法在水泥冷再生、二灰稳定碎石、SRX碎石、水泥稳定碎石等方面开展研究，并取得了一定的成果[11-13].鉴于此，本文采用垂直振动试验方法，研究矿粉、机制砂和9.5～19 mm粗集料掺量对冷再生混合料路用性能的影响，并将其应用到试验段，研究成果可供工程实践参考.

1 研究方案

1.1 原材料

(1)乳化沥青

SBR改性乳化沥青采用西安公路研究院产品，技术性质见表1.

收稿日期： 2018-05-22； **修回日期：** 2018-09-15.
基金项目： 浙江交通科技项目(2016-2-17).
作者简介： 蒋应军*(1975-)，男，教授，博士生导师，E-mail：895615537@qq.com.

表1 SBR改性乳化沥青性质

Tab.1 Properties of SBR modified emulsified asphalt

项目	破乳速度	筛上剩余量/%	蒸发残留物含量/%	恩格拉黏度E25	粒子电荷	蒸发残留物性质			贮存稳定性/%	
						溶解度(三氯乙烯)/%	延度(15 ℃)/cm	针入度(25 ℃)/0.1 mm	1 d	5 d
试验结果	慢裂	0.01	63	13	阳离子(+)	98.1	—	69	0.8	4.6
技术要求	慢裂或中裂	≤0.1	≥62	2～30	阳离子(+)	≥97.5	≥40	50～300	≤1	≤5

(2)面层回收集料

面层回收集料(reclaimed asphalt pavement material,RAP)采用金华曹岭线X115县道AC-20回收沥青路面材料,级配筛分结果见表2.

表2 RAP材料级配筛分结果

Tab.2 Results of RAP material grading screening

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
26.5	100	2.36	16.6
19	97.3	0.3	3.8
9.5	62.9	0.075	0.8
4.75	36.4		

(3)新集料

矿粉、机制砂和9.5～19 mm粗集料采用洛南县正泰矿业有限公司产品,其技术性质符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规定的技术要求.

1.2 试验方案

研究矿粉掺量(w_{mp})对混合料路用性能的影响时所采用混合料级配见表3.试验时,采用内掺法对RAP掺入不同掺量的矿粉.

研究机制砂掺量(w_{ms})对混合料路用性能的影响时所采用混合料级配见表4.试验时,9.5～19 mm粗集料掺量统一为10%,矿粉掺量统一为3%,机制砂掺量逐渐变化.

研究9.5～19 mm粗集料掺量变化对混合料路用性能的影响时所采用混合料级配见表5.试验时,机制砂掺量统一为20%,矿粉掺量统一为3%,9.5～19 mm粗集料掺量逐渐变化.

表3 不同矿粉掺量的混合料级配

Tab.3 Mixed material gradation with different mineral powder contents

材料组成/%				通过下列筛孔尺寸质量分数/%						
9.5～19 mm粗集料	机制砂	矿粉	RAP	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
0	0	0	100	100.0	97.3	62.9	36.4	16.6	3.8	0.8
0	0	1	99	100.0	97.3	63.2	37.0	17.4	4.8	1.7
0	0	2	98	100.0	97.4	63.6	37.7	18.3	5.7	2.6
0	0	3	97	100.0	97.4	64.0	38.3	19.1	6.7	3.4
0	0	4	96	100.0	97.4	64.4	38.9	19.9	7.6	4.3
0	0	5	95	100.0	97.4	64.7	39.6	20.8	8.6	5.2

表4 不同机制砂掺量的混合料级配

Tab.4 Mixed material gradation with different mechanism sand contents

级配类型	材料组成/%				通过下列筛孔尺寸质量分数/%						
	9.5～19 mm粗集料	机制砂	矿粉	RAP	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
i	0	0	0	100	100	97.3	62.9	36.4	16.6	3.8	0.8
ii	10	10	3	77	100	97.3	62.2	41.0	25.2	8.4	4.2
iii	10	20	3	67	100	97.5	65.9	47.4	32.9	10.5	5.0
iv	10	30	3	57	100	97.8	69.6	53.7	40.6	12.5	5.8
v	10	40	3	47	100	98.1	73.3	60.1	48.3	14.6	6.6

表 5　不同 9.5～19 mm 粗集料掺量的混合料级配

Tab. 5　Mixed material gradation with different 9.5-19 mm coarse aggregate contents

级配类型	材料组成/%				通过下列筛孔尺寸质量分数/%						
	9.5～19 mm 粗集料	机制砂	矿粉	RAP	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
Ⅰ	0	0	0	100	100	97.3	62.9	36.4	16.6	3.8	0.8
Ⅱ	0	20	3	77	100	97.9	71.4	51.0	34.5	10.8	5.1
Ⅲ	10	20	3	67	100	97.5	65.9	47.4	32.9	10.5	5.0
Ⅳ	20	20	3	57	100	97.2	60.4	43.7	31.2	10.1	4.9
Ⅴ	30	20	3	47	100	96.8	54.9	40.1	29.6	9.7	4.8
Ⅵ	40	20	3	37	100	100.0	96.4	49.3	36.5	27.6	9.3
Ⅶ	50	20	3	27	100	100.0	96.0	43.8	32.8	26.2	8.9

1.3　试验方法

(1)垂直振动试验方法

所采用的振动压实仪基本参数：工作频率 35 Hz，上车系统质量 108 kg，下车系统质量 167 kg；采用垂直振动击实确定最大干密度和最佳含水率，振动成型时间 60 s；采用垂直振动成型高 63.5 mm、直径 100 mm 试件，振动成型时间 60 s.

(2)车辙试验方法

采用车辙试验评价冷再生混合料的高温稳定性. 依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)成型尺寸为 300 mm×300 mm×80 mm 的车辙板，并采用《沥青混合料车辙试验》(T0719—2011)进行车辙试验. 试验温度控制在(60±0.5) ℃，试轮接地压强(0.7±0.05) MPa[14].

(3)低温弯曲试验

采用低温弯曲试验评价冷再生混合料的低温抗裂性. 依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)成型尺寸为 300 mm×300 mm×80 mm 的车辙板，将车辙板切成尺寸为 250 mm×40 mm×40 mm 的棱柱体小梁试件，并采用《沥青混合料弯曲试验》(T0715—2011)进行弯曲试验. 试验温度控制在(－10±0.5) ℃，加载速率为 50 mm/min.

(4)水稳定性试验方法

乳化沥青冷再生混合料的水稳定性可采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的冻融劈裂试验及浸水马歇尔试验来进行评价.

2　试验结果分析

2.1　矿粉掺量的影响

(1)配合比

垂直振动试验方法确定的不同矿粉掺量下乳化沥青冷再生混合料的最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量见表 6. 试验时乳化沥青用量为 4%，混合料级配见表 3.

表 6　不同矿粉掺量的最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量

Tab. 6　Maximum dry density, optimum moisture content and optimum emulsified asphalt content with different mineral powder contents

矿粉掺量/%	最大干密度/(g·cm^{-3})	最佳含水率/%	最佳乳化沥青用量/%
0	2.177	3.7	3.8
1	2.183	3.8	3.9
2	2.191	3.9	4.0
3	2.201	4.1	4.1
4	2.207	4.2	4.2
5	2.212	4.2	4.3

(2)水稳定性

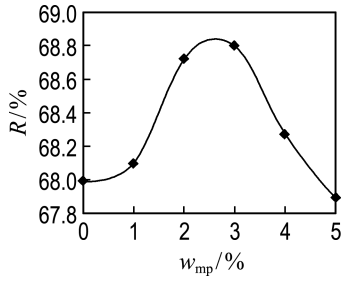
矿粉掺量对冷再生混合料冻融劈裂试验及浸水马歇尔试验影响见图 1.

由图 1 可知，随矿粉掺量增加，冻融劈裂强度比 R、残留稳定度 S 呈抛物线变化趋势；当矿粉掺量为 3%时，冻融劈裂强度比、残留稳定度达到峰值，与不掺矿粉相比，水稳定性略有提高，不超过 2%. 因此，掺矿粉对提高乳化沥青冷再生混合料的水稳定性效果不明显.

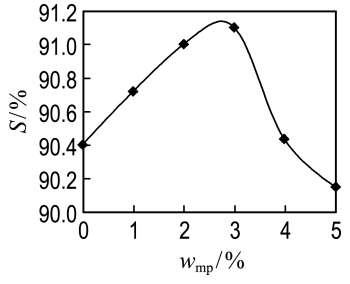
(3)高温稳定性

矿粉掺量对冷再生混合料车辙试验影响见图 2，其中 S_d 表示动稳定度.

由图 2 可知，冷再生混合料的动稳定度随矿粉掺量的增加而逐渐升高；与不掺矿粉相比，掺 3%矿粉冷再生混合料的动稳定度提高了 41%，当矿粉掺量超过 3%时，冷再生混合料动稳定度



(a) 冻融劈裂强度比



(b) 残留稳定度

图 1 水稳定性随矿粉掺量变化

Fig. 1 Variation of water stability with mineral powder content

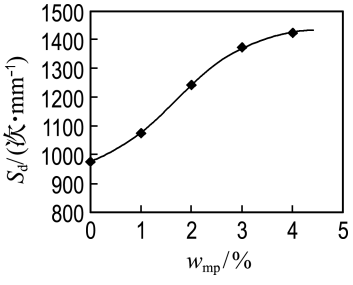


图 2 动稳定度随矿粉掺量变化

Fig. 2 Variation of dynamic stability with mineral powder content

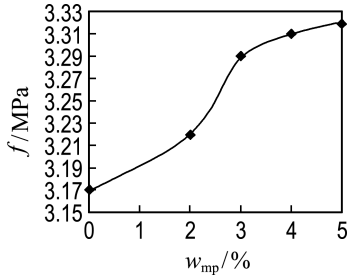
增长速率逐渐减缓. 因此基于冷再生混合料高温性能,兼顾经济性,建议矿粉掺量为 3%.

(4)低温抗裂性

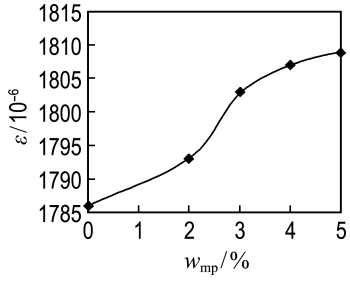
矿粉掺量对冷再生混合料低温弯曲试验影响见图 3.

由图 3 可知,随矿粉掺量增加,冷再生混合料弯拉强度和弯拉应变不断增大;当矿粉掺量超过 3%后,弯拉强度和弯拉应变增长相对缓慢;矿粉掺量 3%时,与不掺矿粉相比,弯拉强度和弯拉应变可分别提高 4%和 1%. 可见,掺矿粉有利于改善冷再生混合料低温性能,但效果不明显.

综上所述,建议乳化沥青冷再生混合料中矿粉掺量为 3%.



(a) 弯拉强度



(b) 弯拉应变

图 3 弯拉强度和弯拉应变随矿粉掺量变化

Fig. 3 Variation of bending strength and bending strain with mineral powder content

2.2 机制砂掺量的影响

(1)配合比

垂直振动试验方法确定的不同机制砂掺量下乳化沥青冷再生混合料的最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量见表 7. 试验时乳化沥青用量为 4%,混合料级配见表 4.

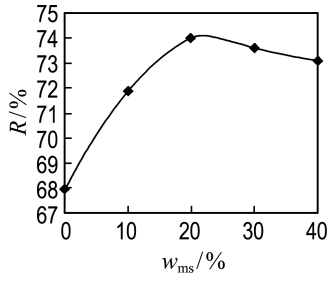
表 7 不同机制砂掺量的最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量

Tab. 7 Maximum dry density, optimum moisture content and optimum emulsified asphalt content with different mechanism sand contents

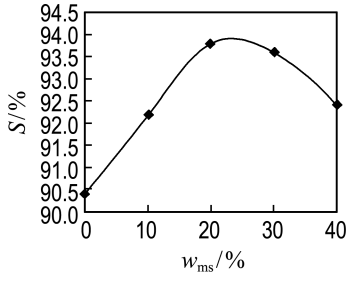
级配编号	最大干密度/(g·cm^{-3})	最佳含水率/%	最佳乳化沥青用量/%
i	2.177	3.7	3.8
ii	2.199	3.8	3.9
iii	2.241	3.9	3.9
iv	2.218	4.0	4.1
v	2.201	4.2	4.2

(2)水稳定性

机制砂掺量对冷再生混合料冻融劈裂试验及浸水马歇尔试验影响见图 4.



(a) 冰融劈裂强度比



(b) 残留稳定度

图 4　水稳定性随机制砂掺量变化

Fig. 4　Variation of water stability with mechanism sand content

由图 4 可知，随机制砂掺量增加，冻融劈裂强度比、残留稳定度呈抛物线变化趋势；当机制砂掺量为 20%时，冻融劈裂强度比、残留稳定度达到峰值，与不掺新集料相比，冻融劈裂强度比、残留稳定度分别提高 10%和 5%. 因此，基于冷再生混合料水稳定性，建议机制砂掺量为 20%.

(3)高温稳定性

机制砂掺量对冷再生混合料车辙试验影响见表 8.

表 8　机制砂掺量对冷再生混合料高温稳定性影响

Tab. 8　Influence of mechanism sand content on high temperature stability of cold regenerated mixture

级配类型	动稳定度/(次·mm^{-1})	动稳定度相对值
i	1 600	1.00
ii	1 768	1.11
iii	2 462	1.54
iv	2 407	1.51
v	2 148	1.34

由表 8 可知，9.5～19 mm 粗集料掺量 10%、矿粉掺量 3%时，乳化沥青冷再生混合料的动稳定度随机制砂掺量的增加先增大后减小. 这是因为 RAP 材料中 2.36 mm 以下集料较少，不足以使混合料填充密实，随机制砂掺入，试件逐渐趋于密实，高温抗车辙性能得以提高；当机制砂掺量过多时，则形成干涉作用破坏骨架结构，表现为抗车辙性能下降. 机制砂掺量为 20%时，乳化沥青冷再生混合料的动稳定度达到最大值，动稳定度与不掺新集料相比提高了 54%. 因此，基于冷再生混合料高温稳定性，建议机制砂掺量为 20%.

(4)低温抗裂性

机制砂掺量对冷再生混合料低温弯曲试验影响见表 9.

表 9　机制砂掺量对冷再生混合料低温弯曲性能影响

Tab. 9　Influence of mechanism sand content on low temperature bending performance of cold regenerated mixture

级配类型	弯拉强度		弯拉应变	
	绝对值/MPa	相对值	绝对值/10^{-6}	相对值
i	3.43	1.00	1 821	1.00
ii	3.55	1.03	1 847	1.01
iii	3.89	1.13	1 883	1.03
iv	3.70	1.08	1 814	1.00
v	3.12	0.91	1 780	0.98

由表 9 可知，9.5～19 mm 粗集料掺量 10%、矿粉掺量 3%时，随机制砂掺量增加，冷再生混合料弯拉强度和弯拉应变先增大后减小；当机制砂掺量为 20%时，弯拉强度和弯拉应变达到峰值，与不掺新集料相比，弯拉强度和弯拉应变分别可提高 13%和 3%. 因此，基于冷再生混合料低温性能，建议机制砂掺量为 20%.

综上所述，建议乳化沥青冷再生混合料中机制砂掺量为 20%.

2.3　9.5～19 mm 粗集料掺量的影响

(1)配合比

垂直振动试验方法确定的不同 9.5～19 mm 粗集料掺量下乳化沥青冷再生混合料的最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量见表 10. 试验时乳化沥青用量为 4%，混合料级配见表 5.

(2)水稳定性

9.5～19 mm 粗集料掺量对冷再生混合料冻融劈裂试验及浸水马歇尔试验影响见表 11.

由表 11 可知，随 9.5～19 mm 粗集料掺量的增加，残留稳定度、冻融劈裂强度比呈抛物线变化趋势；当 9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～30%

表 10 不同 9.5～19 mm 粗集料掺量的最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量

Tab. 10 Maximum dry density, optimum moisture content and optimum emulsified asphalt content with different 9.5-19 mm coarse aggregate contents

级配类型	最大干密度/(g·cm^{-3})	最佳含水率/%	最佳乳化沥青用量/%
Ⅰ	2.177	3.7	3.8
Ⅱ	2.198	3.9	4.0
Ⅲ	2.241	3.9	3.9
Ⅳ	2.267	3.8	3.8
Ⅴ	2.286	3.7	3.7
Ⅵ	2.283	3.6	3.6
Ⅶ	2.271	3.4	3.5

表 11 不同 9.5～19 mm 粗集料掺量混合料残留稳定度及冻融劈裂强度比

Tab. 11 The residual stability and freeze-thaw cleavage strength ratio of mixtures with different 9.5-19 mm coarse aggregate contents

级配类型	残留稳定度		冻融劈裂强度比	
	绝对值/%	相对值	绝对值/%	相对值
Ⅰ	89.4	1.00	68.0	1.00
Ⅱ	92.0	1.03	71.7	1.05
Ⅲ	93.8	1.05	72.9	1.07
Ⅳ	94.5	1.06	75.4	1.11
Ⅴ	94.6	1.06	75.8	1.11
Ⅵ	93.4	1.04	71.9	1.06
Ⅶ	92.5	1.03	57.1	0.84

时，与不掺新集料相比，残留稳定度、冻融劈裂强度比分别提高 5%～6%和 7%～11%；当 9.5～19 mm 粗集料掺量为 30%时，水稳定性达到峰值；当 9.5～19 mm 粗集料掺量大于 30%时，随着粗集料掺量增加，混合料空隙率尤其是开口孔隙逐渐增大，水分易进入试件内部导致混合料水稳定性下降. 因此，基于冷再生混合料水稳定性，建议 9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～30%.

(3)高温稳定性

9.5～19 mm 粗集料掺量对冷再生混合料车辙试验影响见表 12.

由表 12 可知，当机制砂掺量 20%、矿粉掺量 3%时，随 9.5～19 mm 粗集料掺量增加，乳化沥青冷再生混合料动稳定度先增大后减小，这是因为 RAP 材料中 13.2 mm 以上集料不足 20%，

表 12 9.5～19 mm 粗集料掺量对冷再生混合料高温稳定性影响

Tab. 12 Influence of 9.5-19 mm coarse aggregate content on high temperature stability of cold regenerated mixture

级配类型	动稳定度/(次·mm^{-1})	动稳定度相对值
Ⅰ	981	1.00
Ⅱ	1 538	1.57
Ⅲ	2 462	2.51
Ⅳ	2 845	2.90
Ⅴ	3 025	3.08
Ⅵ	2 871	2.93
Ⅶ	2 716	2.77

难以形成骨架结构，随 9.5～19 mm 粗集料掺入，试件骨架结构逐渐形成，高温抗车辙性能得以提高；当 9.5～19 mm 粗集料掺量过多时，则形成骨架空隙结构，表现为抗车辙性能下降；当 9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～40%时，冷再生混合料的动稳定度与不掺粗集料时相比可提高60%～97%，与不掺新集料相比，冷再生混合料动稳定度提高了 151%～208%，其中，当 9.5～19 mm 粗集料掺量为 30%时，动稳定度达到峰值. 因此，基于冷再生混合料高温性能，兼顾经济性，建议 9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～30%.

(4)低温抗裂性

9.5～19 mm 粗集料掺量对冷再生混合料低温弯曲试验影响见表 13.

表 13 9.5～19 mm 粗集料掺量对冷再生混合料低温弯曲性能影响

Tab. 13 Influence of 9.5-19 mm coarse aggregate content on low temperature bending performance of cold regenerated mixture

级配类型	弯拉强度		弯拉应变	
	绝对值/MPa	相对值	绝对值/10^{-6}	相对值
Ⅰ	3.17	—	1 786	—
Ⅱ	3.76	1.00	1 856	1.00
Ⅲ	3.89	1.03	1 883	1.01
Ⅳ	3.85	1.02	1 841	0.99
Ⅴ	3.53	0.94	1 815	0.98
Ⅵ	3.12	0.83	1 772	0.95
Ⅶ	2.91	0.77	1 704	0.92

由表 13 可知，机制砂掺量 20%、矿粉掺量 3%时，随 9.5～19 mm 粗集料掺量增加，乳化沥

青冷再生混合料弯拉强度和弯拉应变先增大后减小.但 9.5～19 mm 粗集料对冷再生混合料弯拉强度和弯拉应变影响总体上并不明显；当 9.5～19 mm 粗集料掺量超过 30%后，冷再生混合料弯拉强度下降较多.因此，基于冷再生混合料低温性能，建议 9.5～19 mm 粗集料掺量不宜超过 30%.

综上，考虑冷再生混合料路用性能，建议 9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～30%.

3　级配优选

基于冷再生混合料路用性能，兼顾经济性，提出乳化沥青冷再生混合料级配，见表 14.

表 14　不同材料组成冷再生混合料级配

Tab. 14　Gradation of cold regenerated mixture with different materials

级配类型	材料组成/%				通过下列筛孔尺寸质量分数/%							
	9.5～19 mm 粗集料	机制砂	矿粉	RAP	26.5 mm	19 mm	16 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
①	10	20	3	67	100	97.5	91.7	65.9	47.4	32.9	10.5	5.0
②	20	20	3	57	100	97.2	89.7	60.4	43.7	31.2	10.1	4.9

4　结　论

(1)矿粉对乳化沥青冷再生混合料的水稳定性、低温抗裂性没有明显影响；矿粉掺量为 3%时，与不掺矿粉相比，乳化沥青冷再生混合料的动稳定度可提高 41%.

(2)机制砂掺量为 20%时，与不掺机制砂相比，冻融劈裂强度比、动稳定度、弯拉强度可分别提高 10%、54%、19%.

(3)9.5～19 mm 粗集料对乳化沥青冷再生混合料的低温抗裂性能没有明显影响，与不掺新集料相比，9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～30%时，冻融劈裂强度比、动稳定度可分别提高 7%～11%、151%～208%.

(4)以路用性能最优为原则，兼顾经济性，综合分析冷再生混合料水稳定性，高、低温性能，优先推荐冷再生混合料中 9.5～19 mm 粗集料掺量为 10%～30%、机制砂掺量为 20%、矿粉掺量为 3%.

参考文献：

[1] 张道玲. 乳化沥青冷再生面层混合料配合比设计[J]. 城市道桥与防洪，2010(3)：25-28，16.
ZHANG Daoling. Design of mixture mixing ratio for emulsified bitumen cold regenerated surface [J]. **Urban Roads Bridges & Flood Control**, 2010(3): 25-28, 16. (in Chinese)

[2] HE Guiping. Study the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) with foamed bitumen in Hong Kong [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006.

[3] 孙岩松. 水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 武汉理工大学学报，2013，**35**(4)：45-48.
SUN Yansong. Influence of Portland cement on the performance of emulsified asphalt cold regeneration [J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2013, **35**(4): 45-48. (in Chinese)

[4] BISSADA A F. Structural response of foamed-asphalt-sand mixtures in hot environments [C] // **Asphalt Materials and Mixtures**. Washington D C: Transportation Research Board, 1987: 134-149.

[5] EBELS L-J. Characterisation of material properties and behaviour of cold bituminous mixtures for road pavements [D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2008.

[6] 吴超凡，曾梦澜，赵明华，等. 乳化沥青冷再生混合料路用性能试验研究[J]. 公路交通科技，2009，**26**(7)：27-32.
WU Chaofan, ZENG Menglan, ZHAO Minghua, *et al*. Experimental study on road performance of cold recycled asphalt mixture with emulsified asphalt [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2009, **26**(7): 27-32. (in Chinese)

[7] 杜少文. 外加材料对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响[J]. 建筑材料学报，2013，**16**(3)：534-538.
DU Shaowen. Effect of additives on pavement performance of cold recycled asphalt emulsion mixture [J]. **Journal of Building Materials**, 2013, **16**(3): 534-538. (in Chinese)

[8] 郭寅川，申爱琴，张名成，等. 沥青路面复合式冷再生基层混合料路用性能影响因素[J]. 公路交通科技，2014，**31**(7)：32-38.
GUO Yinchuan, SHEN Aiqin, ZHANG Mingcheng, *et al*. Influencing factors of road performance of composite cold recycled base mixture of asphalt pavement [J]. **Journal of Highway and**

Transportation Research and Development, 2014, **31**(7):32-38. (in Chinese)

[9] 汪德才,郝培文,魏新来. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能及影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2016, **42**(4):541-546.
WANG Decai, HAO Peiwen, WEI Xinlai. Fatigue performance and influence factor for cold recycling mixture with emulsified asphalt [J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2016, **42**(4):541-546. (in Chinese)

[10] 蒋应军,陈浙江,徐晓和,等. ATB-30 沥青混合料垂直振动成型方法及评价[J]. 建筑材料学报, 2014, **17**(4):638-643.
JIANG Yingjun, CHEN Zhejiang, XU Xiaohe, *et al*. Evaluation on vertical vibration compaction method of ATB-30 asphalt mixture [J]. **Journal of Building Materials**, 2014, **17**(4):638-643. (in Chinese)

[11] 蒋应军,李明杰,张俊杰,等. 水泥稳定碎石强度影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, **30**(4):1-7.
JIANG Yingjun, LI Mingjie, ZHANG Junjie, *et al*. Influence factors of strength properties of cement stabilization of crushed aggregate [J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2010, **30**(4):1-7. (in Chinese)

[12] 蒋应军,张邹羿,陈浙江,等. SRX 稳定碎石骨架密实级配及路用性能[J]. 建筑材料学报, 2017, **20**(2):215-221.
JIANG Yingjun, ZHANG Zouyi, CHEN Zhejiang, *et al*. Skeleton dense gradation and road performance of SRX stabilized crushed stone [J]. **Journal of Building Materials**, 2017, **20**(2):215-221. (in Chinese)

[13] 李明杰,蒋应军,张俊杰,等. 半刚性基层材料振动试验方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, **10**(1):6-12.
LI Mingjie, JIANG Yingjun, ZHANG Junjie, *et al*. Vibration test method of semi-rigid base course material [J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2010, **10**(1):6-12. (in Chinese)

[14] 张 驰,胡永林,范人杰,等. 级配对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响[J]. 公路与汽运, 2018(4):58-61, 65.
ZHANG Chi, HU Yonglin, FAN Renjie, *et al*. Effects of gradation on high temperature stability of emulsified asphalt cold regenerative mixture [J]. **Highways & Automotive Applications**, 2018(4):58-61, 65. (in Chinese)

Influence of gradation on pavement performance of emulsified asphalt cold regenerated mixture

JIANG Yingjun*, HAN Zhanchuang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to optimize the gradation of the emulsified asphalt cold regenerated mixture, the effect of mineral powder, mechanism sand and 9.5-19 mm coarse aggregate on the pavement performance of the cold regenerated mixture was studied by means of vertical vibration test. The results show that the effect of mineral powder on water stability and low temperature crack resistance is not significant. The dynamic stability of the cold regenerated mixture with 3% of mineral powder increases by 41% compared with that of the mixture with no added mineral powder. When the content of the mechanism sand is 20%, compared with the mixture with no added aggregate, the ratio of freeze-thaw cleavage strength, dynamic stability and bending tensile strength can be increased by 10%, 54% and 13% respectively. The effect of 9.5-19 mm coarse aggregate on low temperature crack resistance is not significant. When the content of 9.5-19 mm coarse aggregate is between 10% and 30%, compared with the mixture with no added aggregate, the ratio of freeze-thaw cleavage strength and dynamic stability can be increased by 7%-11% and 151%-208% respectively. It is suggested that the best mix proportion of cold regenerated mixture is 10%-30% of 9.5-19 mm coarse aggregate, 20% of mechanism sand and 3% of mineral powder.

Key words: emulsified asphalt cold regenerated mixture; vertical vibration method; gradation; pavement performance