

泡沫沥青就地冷再生混合料力学性能影响因素研究

李鹏飞¹, 韩占闯²

(1.山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006; 2.长安大学 公路学院)

摘要:研究了水泥掺量、9.5~19、19~26.5 mm 粗集料掺量对泡沫沥青就地冷再生混合料力学性能的影响,结果表明:随水泥掺量增加,混合料力学性能逐渐增加,随着 9.5~19 mm 粗集料掺量增加,劈裂强度、稳定度先增加后减小;随着 19~26.5 mm 粗集料掺量增加,混合料力学性能先增加后减小;根据力学性能最优原则,优先推荐掺加 19~26.5 mm 粗集料和水泥。

关键词:冷再生混合料; 集料; 力学性能; 影响因素

泡沫沥青就地冷再生混合料(为表述方便以下简称“FAICRM”)是以泡沫沥青作为冷再生混合料的胶结材料,添加一定比例的填料、外加剂、新集料提高混合料性能,后加水拌和形成混合料。FAICRM 主要被用于道路基层和底基层,要求 FAICRM 应具有较高的力学性能。对此,国内外道路研究人员进行了一系列研究:Liu 等研究了级配对 FAICRM 力学性能的影响,指出过筛率是影响 FAICRM 级配性能的主要因素;Xu J Z 等研究胶黏剂用量对 FAICRM 力学性能的影响,指出胶黏剂用量会影响混合料黏结力,但是在 FAICRM 配合比设计中可以忽略;Li Zhigang 等研究了 FAICRM 早起强度影响因素,指出水泥影响早期强度,泡沫沥青影响后期强度;邹友泉等研究了水泥掺量对力学性能的影响,指出随水泥用量增加 FAICRM 力学性能逐渐增加;李秀君等研究了沥青黏度、延度对 FAICRM 力学性能的影响,指出延度是影响 FAICRM 力学强度的关键因素;王宏等研究了养生温度对 FAICRM 宏观、微观性能的影响,指出随养生温度升高,FAICRM 劈裂试验试件的破坏界面呈线性增大的分布趋势;赵宾等研究了 3 种不同发泡机对 FAICRM 性能的影响,指出 3 种泡沫沥青发泡机中 Wirtgen 制备的泡沫沥青稳定性能最好,膨胀率最大。上述研究对 FAICRM 力学性能提升、推广应用起到重要作用。但是,上述研究大多是研究泡沫沥青用量、水泥掺量对 FAICRM 力学性能的影响,并未见有研究每档新集料对 FAICRM 力学性能的影响,该文分析水泥、9.5~19、19~26.5 mm 粗集料对 FAICRM 力学性能的影响,

并基于性能影响,选择添加相应新集料。

1 原材料

(1) 沥青。中海 A 级 70# 基质沥青,技术指标略;沥青发泡特性结果见表 1。表 1 中 *PE* 为膨胀率,*HL* 为半衰期。

表 1 沥青发泡特性结果

发泡 用水 量/%	<i>PE</i> /倍			<i>HL</i> /s		
	150 ℃	160 ℃	170 ℃	150 ℃	160 ℃	170 ℃
1	11	10	12	31	22	16
2	20	17	17	16	12	10
3	23	21	27	12	10	8
4	27	26	31	8	9	6

由表 1 可知:当发泡用水量为 2%~3% 时,在 3 种温度下,都能获得较好的发泡效果。最优发泡条件为:发泡温度为 150 ℃,发泡用水量为 2.0%,文中如无特殊说明,均采用此发泡条件。

(2) 新集料。山西华阳石料厂生产的 9.5~19 mm 和 19~26.5 mm 粗集料,技术指标略。

(3) 回收料。山西太原市双阳线的沥青路面面层回收集料(简称 RAP),级配筛分结果见表 2。

(4) 水泥。采用 P.O.32.5 级,技术指标略。

(5) 水。普通饮用水。

表 2 AC-25 回收料级配

筛孔尺寸/ mm	通过率/ %	筛孔尺寸/ mm	通过率/ %
31.5	100	4.75	54.5
26.5	98.6	2.36	35.3
19	97.1	0.3	15.1
16	93.3	0.075	7.5
9.5	78.6		

2 力学性能影响因素

原沥青路面经铣刨机或再生机铣刨后,沥青混合料中的一部分粗集料被破碎,因此,与原路面级配相比,铣刨后的级配缺乏粗骨料,相对较细。由表 2 可知:粒径小于 9.5 mm 的冷再生混合料占 78.6%,粒径大于 19 mm 的占 2.9%,因此 AC-25 冷再生混合料 9.5~19、19~26.5 mm 粗集料含量较少,无法形成骨架结构,0~2.36、2.36~4.75、4.75~9.5 mm 集料偏

多,因此需要添加 9.5~19、19~26.5 mm 粗集料调整回收料级配,研究每档新集料对泡沫沥青就地冷再生力学性能的影响,从而推荐出调节回收料级配优先添加的新集料。

2.1 水泥掺量的影响

泡沫沥青冷再生主要用于道路的基层和底基层,水泥作为一种活性添加剂,对 FAICRM 性能具有重要影响。水泥掺量会直接影响冷再生混合料的力学性能,掺量过少使得力学性能过低,掺量过多使得冷再生混合料变脆,易产生裂缝。因此该文将研究水泥掺量对泡沫沥青冷再生混合料力学性能的影响。

(1) 级配及最佳含水率的确定

为研究水泥掺量对 FAICRM 力学强度的影响,对 AC-25RAP 回收料掺加不同掺量的水泥,不同水泥掺量下,泡沫沥青就地冷再生混料的级配及 FAICRM 的最佳含水率和最大干密度随水泥掺量的变化规律见表 3。试验时固定泡沫沥青用量为 3%,变化含水率,采用重型击实法成型试件。

表 3 不同水泥掺量下 FAICRM 级配

材料组成/%		通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水 率/%
RAP	水泥	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075		
100.0	0.0	100	98.6	97.1	78.6	54.5	35.3	15.1	7.5	2.068	5.6
99.0	1.0	100	98.6	97.1	78.8	55.0	35.9	15.9	8.4	2.088	5.7
98.5	1.5	100	98.6	97.1	78.9	55.2	36.3	16.4	8.8	2.094	5.7
98.0	2.0	100	98.6	97.2	79.0	55.4	36.6	16.8	9.2	2.106	5.8
97.5	2.5	100	98.6	97.2	79.1	55.6	36.9	17.2	9.6	2.118	5.8

(2) 最佳泡沫沥青用量

不同水泥掺量的 AC-25RAP 混合料,在各自最

佳含水率下,变化泡沫沥青用量,成型 Marshall 试件,不同水泥掺量劈裂强度试验结果如图 1 所示。

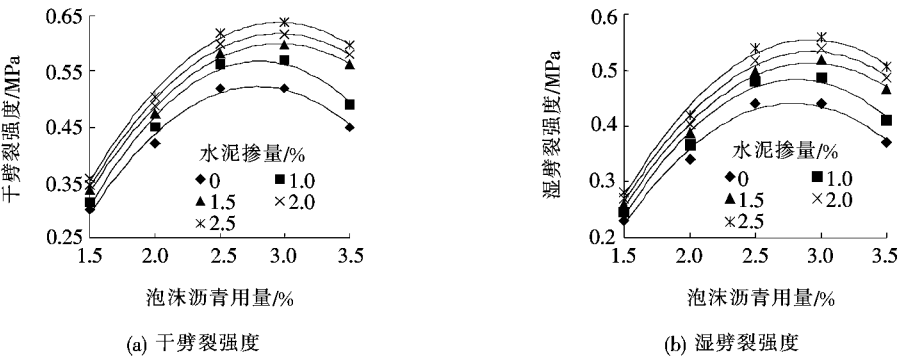


图 1 不同水泥掺量 FAICRM 劈裂强度

按照干湿劈裂强度最大的原则,确定最佳泡沫沥青用量。由图 1 可知:0、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 水泥用量时 FAICRM 最佳泡沫沥青用量分别为 2.8%、

2.9%、2.9%、3.0%、3.0%。

(3) 水泥掺量对力学性能的影响

不同水泥掺量对 FAICRM 劈裂强度、稳定度的影

响见表 4。表中 σ_{gp} 、 σ_{sp} 、 σ_w 分别为掺水泥与未掺水泥干劈裂强度、湿劈裂强度、稳定度的比值。

表 4 不同水泥掺量下 FAICRM 力学性能

水泥 掺量/ %	干劈 裂强 度/MPa	湿劈 裂强 度/MPa	稳定 度/ kN	σ_{gp}	σ_{sp}	σ_w
0	0.53	0.45	6.47	1.00	1.00	1.00
1.0	0.57	0.49	6.79	1.08	1.09	1.05
1.5	0.60	0.52	7.18	1.13	1.15	1.11
2.0	0.62	0.54	7.38	1.17	1.19	1.14
2.5	0.64	0.55	7.57	1.20	1.22	1.17

由表 4 可知:随着水泥掺量的增加,FAICRM 的劈裂强度和稳定度逐渐增加,与不掺水泥相比,当水泥掺量为 1.5%时,FAICRM 的劈裂强度和稳定度分别

增加 13%、15%、11%。这是因为水泥会和 FAICRM 发生水化,产生一种具有胶结能力的物质,与矿料交织在一起,形成空间网状结构,加强颗粒间的黏结强度,从而加强混合料强度;虽然水泥能够提升 FAICRM 力学强度,但是并不是水泥掺量越多越好,掺入过多水泥会增加 FAICRM 的脆性。冷再生混合料规范规定,水泥掺量不超过 1.5%,因此,水泥掺量建议为 1.5%。

2.2 9.5~19 mm 粗集料的影响

(1) 级配及最佳含水率

固定水泥掺量为 1.5%,改变 9.5~19 mm 粗集料掺量改变再生混合料级配。研究 9.5~19 mm 粗集料掺量对 FAICRM 力学性能的影响,不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下 FAICRM 级配、最大干密度及最佳含水率试验结果见表 5。试验时,固定泡沫沥青用量为 3%,变化含水率,采用重型击实法成型试件。

表 5 不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下 FAICRM 级配

材料组成/%			通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								最大干 密度/ (g · cm ⁻³)	最佳 含水 率/%
RAP	9.5~ 19 mm	水泥	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075		
98.5	0	1.5	100	98.6	97.1	78.9	55.2	36.3	16.4	8.8	2.094	5.7
88.5	10	1.5	100	98.8	96.1	71.3	49.9	32.9	15.0	8.1	2.141	5.3
78.5	20	1.5	100	98.9	95.0	63.6	44.5	29.4	13.5	7.5	2.186	5.0
68.5	30	1.5	100	99.0	93.9	56.0	39.2	26.0	12.1	6.8	2.165	4.6

(2) 最佳泡沫沥青用量

不同 9.5~19 mm 粗集料掺量的 FAICRM,在表 5 中的最佳含水率下,变化泡沫沥青用量,采用 Marshall 法成型圆柱体试件,不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下 FAICRM 劈裂强度如图 2 所示。

按照干湿劈裂强度最大的原则,确定最佳泡沫沥青用量。9.5~19 mm 粗集料掺量为 0、10%、20%、

30%时,FAICRM 的最佳泡沫沥青用量分别为 2.9%、2.6%、2.4%、2.2%。

(3) 9.5~19 mm 粗集料掺量对 FAICRM 力学性能的影响

不同 9.5~19 mm 粗集料掺量对 FAICRM 劈裂强度、稳定度的影响见图 2 和表 6。

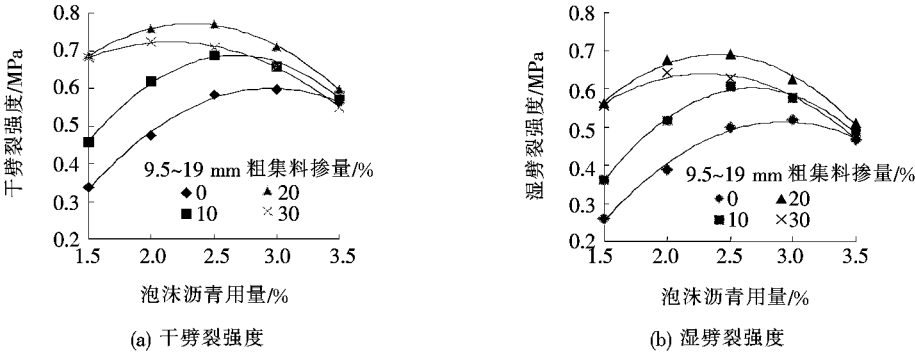


图 2 不同 9.5~19 mm 粗集料掺量下 FAICRM 劈裂强度

表 6 9.5~19 mm 粗集料掺量对 FAICRM 力学性能的影响

9.5~19 mm 粗集料掺量/%	干劈裂强 度/MPa	湿劈裂强 度/MPa	稳定度/ kN	σ_{sp}	σ_{sp}	σ_w
0	0.60	0.52	7.18	1.00	1.00	1.00
10	0.69	0.61	8.54	1.15	1.17	1.19
20	0.77	0.69	9.26	1.29	1.33	1.29
30	0.72	0.64	8.82	1.19	1.22	1.23

由表 6 可知:随着 9.5~19 mm 粗集料掺量的增加,FAICRM 劈裂强度、稳定度先增大后减小;当 9.5~19 mm 粗集料掺量为 20%时,FAICRM 的劈裂强度、稳定度达到峰值,与未参加 9.5~19 mm 的 FAICRM 相比,劈裂强度、马歇尔稳定度分别增加 29%、33%、29%。这是因为未添加 9.5~19 mm 粗集料时 FAICRM 级配偏细,没有足够的粗骨料形成骨架结构,随着 9.5~19 mm 粗集料掺量的增加,FAICRM 逐渐形成骨架密实结构,当粗集料掺量为 20%时,形成骨架密实结构,此时 FAICRM 性能最优,当粗集料掺

量超过 20%时,没有足够的细料起到填充作用,使得 FAICRM 密度减小,空隙率增大,力学性能降低。

2.3 19~26.5 mm 粗集料的影响

(1) 级配及最佳含水率

固定水泥掺量为 1.5%,改变 19~26.5 mm 粗集料掺量改变再生混合料级配条件下,研究不同 19~26.5 mm 粗集料掺量对 FAICRM 力学性能的影响,不同 19~26.5 mm 粗集料掺量 FAICRM 级配、最大干密度及最佳含水率见表 7。试验时固定泡沫沥青用量为 3%,改变含水率,采用重型击实法成型试件。

表 7 不同 19~26.5 mm 粗集料掺量 FAICRM 级配

RAP	材料组成/%			通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								最大干 密度/ (g · cm ⁻³)	最佳 含水 率/%
	9.5~ 19 mm	19~ 26.5 mm	水泥	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075		
98.5	0	0	1.5	100	98.6	97.1	78.9	55.2	36.3	16.4	8.8	2.094	5.7
88.5	0	10	1.5	100	96.0	88.1	71.2	49.8	32.8	14.9	8.1	2.155	5.1
78.5	0	20	1.5	100	93.4	79.0	63.4	44.3	29.3	13.4	7.3	2.204	4.8
68.5	0	30	1.5	100	90.8	70.0	55.6	38.9	25.8	11.9	6.6	2.182	4.5

(2) 最佳泡沫沥青用量

不同 19~26.5 mm 粗集料掺量的 FAICRM,在各

自最佳含水率下,改变泡沫沥青用量,成型 Marshall 试件,不同 19~26.5 mm 粗集料劈裂强度如图 3 所示。

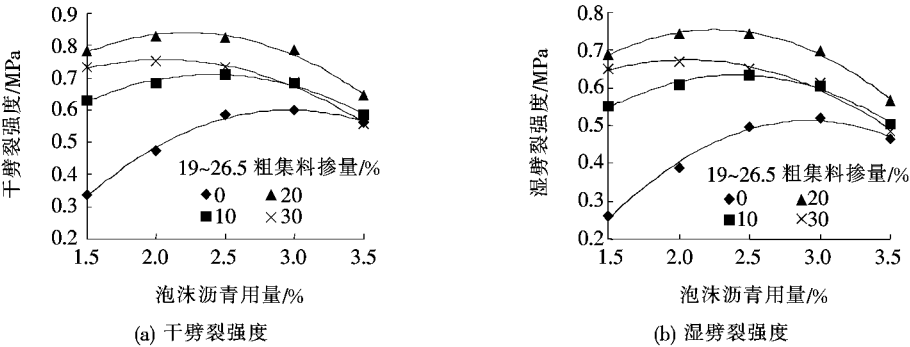


图 3 不同 19~26.5 mm 粗集料掺量 FAICRM 劈裂强度

按照干湿劈裂强度最大的原则,确定最佳泡沫沥青用量。由图 3 可知:19~26.5 mm 粗集料掺量为 0、

10%、20%、30%时,FAICRM 的最佳泡沫沥青用量分别为 2.9%、2.4%、2.3%、2.0%。

(3) 不同 19~26.5 mm 粗集料掺量对 FAICRM 力学性能的影响

不同 19~26.5 mm 粗集料掺量对 FAICRM 劈裂强度、稳定度的影响见表 8。

表 8 不同 19~26.5 mm 粗集料掺量对 FAICRM 劈裂强度、稳定度的影响

19~26.5 mm 粗集料掺量/%	干劈裂强 度/MPa	湿劈裂强 度/MPa	稳定度/ kN	σ_{gp}	σ_{sp}	σ_{sw}
0	0.60	0.52	7.18	1.00	1.00	1.00
10	0.71	0.63	8.62	1.19	1.22	1.20
20	0.83	0.75	9.98	1.38	1.45	1.39
30	0.75	0.67	9.12	1.25	1.29	1.27

由表 8 可知:随着 19~26.5 mm 粗集料掺量的增加,FAICRM 劈裂强度、稳定度先增大后减小;当 19~26.5 mm 粗集料掺量为 20%时,FAICRM 的劈裂强度、稳定度达到峰值,与未掺加 19~26.5 mm 的 FAICRM 相比,劈裂强度、马歇尔稳定度分别增加 38%、45%、39%,其原因与 9.5~19 mm 粗集料相同。

综上所述,与未掺新集料泡沫沥青相比,掺加 9.5~19、19~26.5 mm 粗集料 FAICRM 力学强度分别至少提高 29%、38%;因此,在对 AC-25 FAICRM 级配优化时,应优先推荐掺加 19~26.5 mm 粗集料和水泥,建议粗集料掺量为 20%,水泥掺量为 1.5%。

3 结论

(1) 研究了水泥掺量对混合料力学性能的影响,结果表明:当水泥掺量为 1.5%,与不掺水泥 FAICRM 相比,力学性能至少提高 11%。

(2) 试验研究表明:随着 9.5~19 mm 粗集料掺量增加,FAICRM 劈裂强度、稳定度先增加后减小,当 9.5~19 mm 粗集料掺量为 20%时,FAICRM 劈裂强度、稳定度达到峰值,与未掺加 9.5~19 mm 粗集料相比,FAICRM 力学强度至少提高 29%;随着 19~26.5 mm 粗集料掺量增加,FAICRM 劈裂强度、稳定度先增加后减小,当 19~26.5 mm 粗集料掺量为 20%时,FAICRM 劈裂强度、稳定度达到峰值,与未掺加 19~26.5 mm 粗集料相比,FAICRM 力学强度至少提高 38%。

(3) 对 AC-25FAICRM 级配优化时,应优先推荐掺加 19~26.5 mm 粗集料和水泥,建议粗集料掺量为 20%,水泥掺量为 1.5%。

参考文献:

- [1] 邢傲雪.乳化(泡沫)沥青冷再生混合料技术性能深入研究[D].长安大学硕士学位论文,2010.
- [2] Chaohui W, Peng W, Liu. Influence Analysis of Foamed Asphalt Mixture Gradation Based on Mechanical Properties[C]. International Conference on Electric Technology & Civil Engineering. IEEE, 2011.
- [3] Xu J Z, Hao P W, Ma Y F, et al. Study on the Optimization Design of Mixing Moisture Content in Foamed Asphalt Mix[J]. Materials and Structures, 2012, 45(7): 1 071-1 085.
- [4] Li Z, Hao P, Liu H, et al. Investigation of Early-Stage Strength for Cold Recycled Asphalt Mixture Using Foamed Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127:410-417.
- [5] 邹友泉,司徒丽新.水泥掺量对泡沫沥青混合料力学性能的影响[J].公路交通科技:应用技术版,2011(7).
- [6] 金松菊,王利敏,王光辉.泡沫沥青混合料疲劳性能的试验研究[J].交通标准化,2006(4).
- [7] 李秀君,朱洪哥,陈国强,等.泡沫沥青再生混合料物理力学性能影响分析[J].公路,2009(10).
- [8] 王宏.不同养生温度泡沫沥青冷再生混合料宏观微观结构性能研究[J].公路,2018(1).
- [9] 赵宾,申爱琴,郭寅川,等.基于发泡机种类的泡沫沥青及其混合料性能研究[J].中外公路,2018(2).
- [10] 张明杰,祁文洋,铣刨工艺对 RAP 变异性和级配的影响[J].石油沥青,2016(4).
- [11] 李光颖.乳化沥青就地冷再生技术研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2009.
- [12] 付淑芳,郝彦龙.浅谈泡沫沥青就地冷再生技术在河北省的应用[J].公路交通科技:应用技术版,2011(11).
- [13] JTG F41-2008 公路沥青路面再生应用技术规范[S].
- [14] 杜少文.水泥乳化沥青混凝土路用性能与强度形成机理研究[D].长安大学硕士学位论文,2007.