

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.016

水泥种类和掺量对乳化沥青冷再生混合料 路用性能的影响*

曹明明¹, 肖刘路², 钟鑫阳³, 袁泉⁴, 陶朝勋⁵

(1.四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 2.合肥市市政设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230041; 3.成都理工大学, 四川 成都 610059; 4.四川兴蜀公路建设发展有限责任公司, 四川 成都 610000; 5.阿坝州公路管理局, 四川 马尔康 624099)

摘要: 乳化沥青冷再生混合料早期强度的提升主要依靠水泥的水化作用, 但掺加过多的水泥对沥青混合料的抗裂性能不利, 乳化沥青冷再生混合料中水泥掺量应采用平衡设计, 兼顾早期强度、高温性能、低温性能和水稳定性。文中通过室内试验测试掺加普通硅酸盐水泥 P.O 42.5 和复合硅酸盐水泥 P.C 42.5 的乳化沥青冷再生混合料的早期动稳定度、低温弯曲应变和弯曲应变能密度、浸水飞散损失及冻融劈裂残留强度比, 分析水泥种类和掺量对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响, 确定适宜的水泥种类和掺量。结果表明, 随水泥掺量增加, 乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性、水稳定性逐渐增强, 低温抗裂性能先增强后减弱; 与掺加 P.C 42.5 水泥相比, 掺加早期强度更高的 P.O 42.5 水泥, 乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性和水稳定性提升更显著, 但低温抗裂性能变差。在高温性能和早期强度要求较低、低温性能要求较高的地区, 应严格限制水泥掺量, 宜控制在 1.5% 以内。

关键词: 公路; 乳化沥青冷再生混合料; 水泥种类; 水泥掺量; 路用性能

中图分类号: U418.67

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0087-04

经过多年的通车运营, 沥青路面会出现开裂、变形、松散等病害, 须进行大中修或改扩建。传统的铣刨恢复方式(铣刨旧沥青层后采用新沥青混合料修补)会产生大量废旧沥青混合料(RAP), 造成极大的资源浪费, 且严重污染环境, 探索 RAP 利用率高且节约资源、保护环境的 RAP 再生方式迫在眉睫。乳化沥青厂拌冷再生技术对 RAP 的利用率在 80% 以上, 相较于就地热再生技术, 采用乳化沥青厂拌冷再生技术可以避免 RAP 的二次加热, 有助于节约能源, 减少沥青烟排放, 具有显著的环保优势^[1-3]。

乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料强度形成机理与热拌料存在一定差异, 须待乳化沥青破乳后才能形成强度。受限于乳化沥青掺量及乳化沥青和 RAP 结合的差异, 乳化沥青冷再生混合料的早期强度并不是很高。因此, 乳化沥青冷再生混合料中往往需要掺加水泥以提高其早期强度和后期强度^[4-5]。已有研究表明, 乳化沥青冷再生混合料中用水泥代替矿粉, 利用水泥水化来加快乳化沥青的破乳速度,

可在提高混合料早期强度和刚度的同时改善混合料的路用性能^[6-7]。但在实际工程中, 水泥掺量过大会对乳化沥青冷再生混合料性能产生不利影响, 可能造成乳化沥青冷再生混合料强度提高速度过快、施工容留时间不足、低温脆性增大、抗裂性能不足等^[8-9]。目前, 虽然有一些学者研究了水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料性能的影响, 但对水泥种类对混合料性能影响的研究较少。本文依托川九(川主寺—九寨沟)路改建工程, 研究不同水泥种类和掺量下乳化沥青冷再生混合料早期高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性的变化, 为耐久性的乳化沥青冷再生混合料配合比设计提供依据。

1 原材料及配合比设计

1.1 原材料

乳化沥青厂拌冷再生混合料设计中加入水泥, 可加快乳化沥青的破乳速度, 提高混合料的早期强度、高温稳定性和水稳定性。但掺入过量水泥的乳

* 基金项目: 四川省交通运输科技项目(2019-ZL-13); 四川省交通设计院公司自立项目(232022101)

化沥青冷再生混合料的低温性能和疲劳性能均有一定程度衰减,且容易发生温度收缩和干缩开裂。因此,通常水泥掺量不超过 1.8%。本文采用普通硅酸盐水泥 P.O 42.5 和复合硅酸盐水泥 P.C 42.5 进行对比研究,水泥试验结果见表 1、表 2。

表 1 P.O 42.5 水泥的检测结果

检测项目	检测结果	技术指标	
凝结时间/min	初凝	62	≥45
	终凝	325	≤600
安定性/mm	1.5	≤5	
抗折强度/MPa	3 d	6.1	≥3.5
抗压强度/MPa	3 d	27.3	≥16.0

表 2 P.C 42.5 水泥的检测结果

检测项目	检测结果	技术指标	
凝结时间/min	初凝	202	≥180
	终凝	375	360~600
安定性/mm	1.0	≤5	
抗折强度/MPa	3 d	4.3	≥3.5
抗压强度/MPa	3 d	21.4	≥16.0

1.2 配合比设计

经筛分和破碎的 RAP 分为 10~30 mm、5~10 mm 和 0~5 mm 3 档,筛分结果见表 3。抽提、回收后测试各档 RAP 的沥青含量,分别为 4.08%、3.64%、4.80%。

表 3 RAP 的筛分结果

RAP 分级/ mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%												
	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075	
10~30	100.0	94.4	86.5	62.9	3.9	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
5~10	100.0	100.0	100.0	100.0	76.2	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
0~5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	82.3	47.2	23.8	11.0	4.7	1.9	0.6	

乳化沥青配合比设计中,掺入乳化沥青、水、矿粉和 10~20 mm 石灰岩碎石,经测试,其性能均满足设计和规范要求。根据 JTG/T 5521—2019《公

路沥青路面再生技术规范》进行乳化沥青配合比设计,合成级配见表 4,最佳含水量、最佳乳化沥青用量见表 5。

表 4 乳化沥青的合成级配

级配类型	各筛孔(mm)的通过百分率/%												
	31.500	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
合成级配	100.0	100.0	96.8	90.0	77.4	52.9	35.9	21.4	11.8	6.6	4.0	2.9	2.3
级配上限	100.0	100.0	—	—	80.0	—	60.0	45.0	—	—	20.0	—	7.0
级配下限	100.0	80.0	—	—	60.0	—	25.0	15.0	—	—	3.0	—	1.0

注:RAP 掺量为 88%。

表 5 乳化沥青配合比设计结果

项目	设计值
RAP 掺量/%	88
RAP 10~30 mm	36
RAP 5~10 mm	11
RAP 0~5 mm	41
新集料 10~20 mm	10
矿粉	2
最佳含水量/%	4.5
最佳乳化沥青用量/%	3.5

2 路用性能分析

在最佳含水量与最佳乳化沥青用量下,分别掺加 0.0、1.5%、3.0%、4.5% 的 P.C 42.5 水泥、P.O 42.5 水泥成型乳化沥青冷再生混合料试件进行室内试验,分析水泥种类和掺量对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响,确定适宜的水泥种类和掺量。

2.1 高温稳定性能

成型乳化沥青冷再生混合料车辙试件进行车辙试验,试验结果见图 1。

由图 1 可知:1) 随着水泥掺量的增加,掺入两

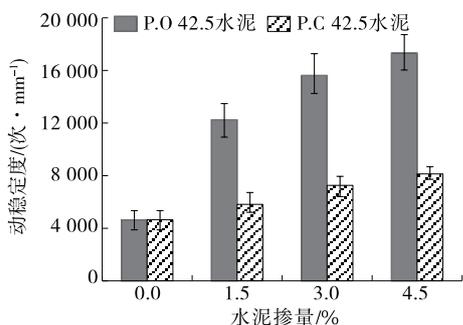


图 1 不同水泥种类和掺量下乳化沥青冷再生混合料的动稳度

种水泥的乳化沥青冷再生混合料的动稳度均逐渐增大,表明掺加水能提升乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性。水泥掺量低于 1.5% 时,随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性显著提升,这是因为水泥掺量小于 1.5% 时,水泥水化产物迅速填充混合物的空隙,混合物的密实度提高并产生强度;水泥掺量大于 1.5% 时,随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性提升幅度逐渐减小,这是因为水泥掺量大于 1.5% 时水泥

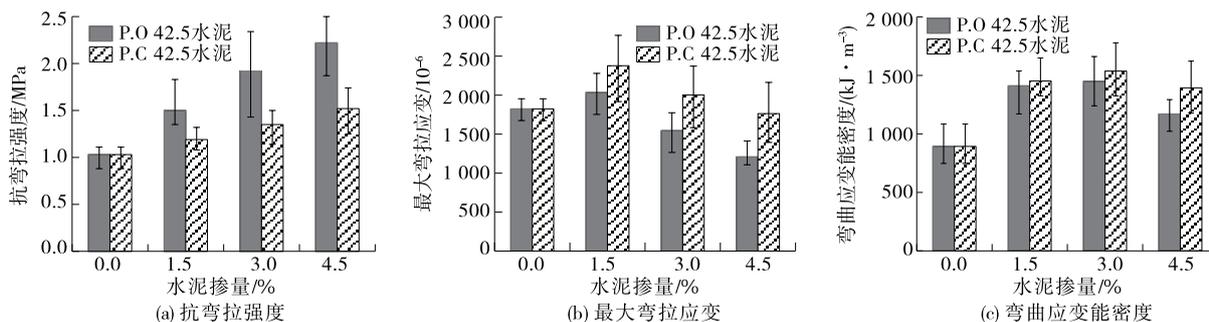


图 2 水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料低温性能的影响

青冷再生混合料的抗弯拉强度呈线性增大,最大弯拉应变和弯曲应变能密度先增大后减小。水泥掺量低于 1.5% 时,随水泥掺量增大,乳化沥青冷再生混合料的最大弯拉应变增大;掺量大于 1.5% 时,继续增大水泥掺量,最大弯拉应变逐渐减小,但减小幅度逐渐降低。对水泥掺量和乳化沥青冷再生混合料弯曲应变能密度采用二次多项式进行拟合,对于掺加 PC 42.5 水泥的冷再生混合料, $y = -175.65x^2 + 1036.7x + 44.75, R^2 = 0.9879$ (x 为水泥掺量, y 为弯曲应变能密度);对于掺加 PO 42.5 水泥的冷再生混合料, $y = -198.98x^2 + 1081.8x + 18.725, R^2 = 0.9933$ 。根据拟合结果, P.O 42.5 水泥、P.C 42.5 水泥掺量分别小于 2.5%、3.0% 时,随水泥掺量增加,乳化沥青冷再生混合料的弯曲应变能密度逐渐

未完全水化,充当活性矿粉,高温稳定性提升幅度降低。2) P.O 42.5 水泥掺量为 1.5% 时,乳化沥青冷再生混合料的动稳度远大于规范要求,过量掺加 P.O 42.5 水泥并不能显著改善乳化沥青冷再生混合料的高温性能。对于 P.C 42.5 水泥,动稳度 S_{DS} 与水泥掺量 C_c 基本呈线性关系 ($S_{DS, P.C} = 794.4C_c + 4677.6, R^2 = 0.9919$),但掺加 P.C 42.5 水泥的乳化沥青冷再生混合料的动稳度增长幅度明显小于掺加 P.O 42.5 水泥的再生混合料。相同掺量下,掺加 P.C 42.5 水泥的乳化沥青冷再生混合料的动稳度明显低于掺加 P.O 42.5 水泥的再生混合料,掺加 P.O 42.5 水泥对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的改善更显著,这一现象可能与水泥的早期强度有关,采用早期强度更高的水泥,乳化沥青冷再生混合料的动稳度更高,早期强度更大。

2.2 低温抗裂性能

成型板式乳化沥青冷再生混合料试件,并切割成小梁试件进行低温弯曲试验,试验结果见图 2。

由图 2 可知:1) 随着水泥掺量的增加,乳化沥

增大;P.O 42.5 水泥、P.C 42.5 水泥掺量分别大于 2.5%、3.0% 时,随水泥掺量增加,弯曲应变能密度逐渐减小;水泥掺量小于 1.0% 时,相同掺量的两种乳化沥青冷再生混合料的弯曲应变能密度几乎相同。水泥掺量较小时,尽管抗弯拉强度和最大弯拉应变有所差别,但弯曲应变能密度差别不大,说明水泥掺量低于 1% 时,水泥种类和掺量对乳化沥青冷再生混合料高温性能和早期强度要求不高,而冬季温度较低的地区,可尝试将水泥掺量降低至 1%。2) 掺量相同的情况下,与掺加 P.C 42.5 水泥相比,掺加 P.O 42.5 水泥的乳化沥青冷再生混合料的抗弯拉强度更大,最大弯拉应变和弯曲应变能密度更小,表明 P.O 42.5 水泥对抗弯拉强度的提升具有显著作用,

但对混合料的柔性不利,导致乳化沥青冷再生混合料在低温时易发生脆裂。建议在低温性能要求高的地区,乳化沥青冷再生混合料中掺加强度增长更慢的水泥。3) 最大弯拉应变的变异系数比弯曲应变能密度的变异系数大,采用弯曲应变能密度衡量乳化沥青冷再生混合料的低温抗裂性能更稳定。

2.3 黏附性

肯塔堡浸水飞散试验考虑了乳化沥青冷再生混合料在水的作用下其黏结性能衰减的情况,能更好地表征其水稳定性。但由于乳化沥青冷再生混合料的黏附性差于热拌沥青混合料,若洛杉矶磨耗仪的旋转次数采用热拌沥青混合料常用的 300 r,乳化沥青冷再生混合料的黏附性将缺乏对比性。为便于试验结果分析,将洛杉矶磨耗仪的旋转次数调整为 100 r。成型马歇尔试件进行浸水飞散试验,试验结果见图 3。

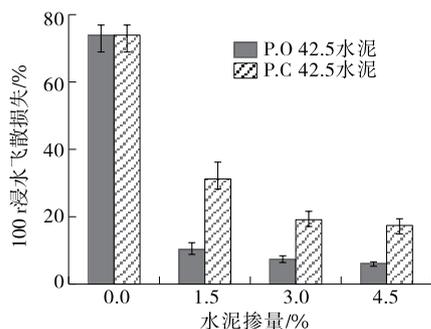


图 3 水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料黏附性的影响

由图 3 可知:1) 随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的浸水飞散损失均减小。水泥掺量为 0.0~1.5% 时,浸水飞散损失下降明显,较小的水泥掺量能显著提升乳化沥青冷再生混合料的水稳定性和黏附性;水泥掺量大于 1.5% 时,随着水泥掺量的增加,再生混合料的浸水飞散损失下降明显,特别是掺加 P.O 42.5 水泥的混合料,过多地掺入水泥,乳化沥青冷再生混合料的水稳定性提升不明显。建议在满足黏附性和水稳定性等要求的情况下,采用较低的水泥掺量,水泥掺量不宜大于 1.5%,特殊情况下不大于 1%。2) 相同掺量下,掺入 P.O 42.5 水泥的乳化沥青冷再生混合料的浸水飞散损失比掺加 P.C 42.5 水泥的小,P.O 42.5 水泥对乳化沥青冷再生混合料水稳定性的改善更显著。

2.4 水稳定性

成型马歇尔试件进行冻融劈裂试验,试验结果见图 4、图 5。

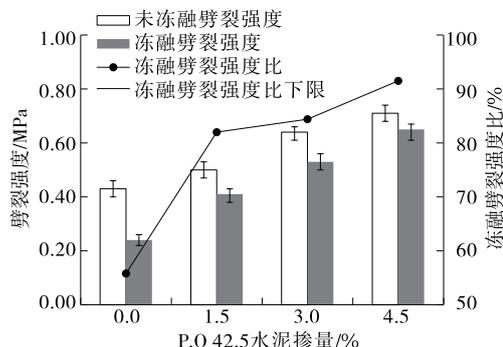


图 4 P.O 42.5 水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料冻融劈裂强度的影响

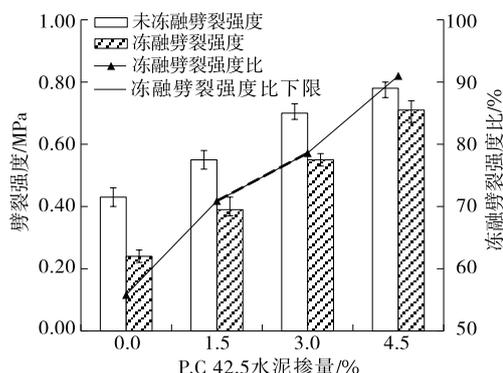


图 5 P.C 42.5 水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料冻融劈裂强度的影响

由图 4、图 5 可知:随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的冻融劈裂强度及冻融劈裂强度比增大,掺加水泥可使乳化沥青冷再生混合料的抗拉强度及水稳定性得到提升。水泥掺量小于 1.5% 时,随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的冻融劈裂强度比显著提升;掺量为 1.5%~3.0% 时,随着水泥掺量的增加,冻融劈裂强度比增长速度较缓慢,特别是 P.O 42.5 水泥,掺量大于 1.5% 时,冻融劈裂强度比提升不明显;水泥掺量大于 3.0% 时,随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的冻融劈裂强度比增长幅度增大,这可能是由于过多的水泥在试件浸水前未充分水化,这部分水泥在 60℃ 水浴中进一步水化,使混合料的冻融劈裂强度显著提升,冻融劈裂强度比增大。

3 结论

(1) 随着水泥掺量的增加,乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性增强,P.O 42.5 水泥比 P.C 42.5 水泥更能提升乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性,P.O 42.5 水泥掺量为 1.5% 时,乳化沥青冷再生混合料的动稳定度大于 10 000 次/mm。

(下转第 101 页)