

寒区冷补沥青液的制备及优化设计

杨彦海¹,朱 晓¹,杨 野^{1,2},岳 靓¹

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 大连海事大学交通运输工程学院,辽宁 大连 116026)

摘 要 目的 研究寒区冷补沥青液的制备,解决寒区沥青路面坑槽病害难以快速、高质量修补的问题。**方法** 采用3#航空煤油、100#溶剂油作为稀释剂,单组分湿固化添加剂、单组分树脂类添加剂以及抗剥落剂 LB-6176 作为添加剂,制备适合寒区使用的冷补沥青液;采用正交试验对冷补液的配方进行优化,提出寒区冷补液性能建议技术要求。**结果** 冷补液黏度受到稀释剂和添加剂掺量的影响程度最大,抗剥落剂和添加剂决定了黏附性和1~3d内挥发性的好坏,流动性能随添加剂掺量的增加而降低,且影响趋势相似。**结论** 冷补液的配比为:沥青100%(外掺质量分数),稀释剂40%,添加剂12%,抗剥落剂0.2%;建议冷补液常温表观黏度不超过20 Pa·s、黏附性等级不小于4级、流动时间小于180 s、1 d的损失率不小于0.7%、3 d损失率不小于1.0%。

关键词 寒区;冷补液制备;配方优化设计;正交试验

中图分类号 TU528.37;U416

文献标志码 A

Preparation and Optimization Design of Cold Patch Asphalt in Cold Regions

YANG Yanhai¹, ZHU Xiao¹, YANG Ye^{1,2}, YUE Liang¹

(1. School of Traffic and Surveying Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026)

Abstract: The preparation of cold patch asphalt in cold regions was studied. The problem that asphalt pavement potholes in cold regions are difficult to be repaired quickly and with high quality has been solved. 3 # aviation kerosene and 100 # solvent oil were used as diluents, and one-component wet-curing additive, one-component resin additive and anti stripping agent LB-6176 are used as additives. The formula of cold rehydration solution was optimized by orthogonal test, and the technical requirements for cold rehydration performance were proposed. The viscosity of cold rehydration solution is most affected by the amount of diluent and additive. The anti stripping agent

收稿日期:2022-06-16

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51908378);辽宁省特聘教授项目(tpjs2017003);辽宁省交通科技重点项目(202013)

作者简介:杨彦海(1972—),男,教授,博士,主要从事道路结构与路面材料、道路施工与养护技术、废旧材料循环再利用等方面研究。

and additive determine the adhesiveness and volatility within 1 ~ 3 days. The flow performance decreases with the increase of the amount of additive, and the influence trend is similar. The proportion of cold patch asphalt is: asphalt 100% (added mass fraction), diluent 40%, additive 12%, anti stripping agent 0.2%. It is recommended that the apparent viscosity of cold patch asphalt at room temperature should not exceed 20 Pa·s, the adhesion grade should not be less than Grade 4, the flow time should be less than 180 s, the loss rate of 1d should not be less than 0.7%, and the loss rate of 3 d should not be less than 1.0%.

Key words: cold region; preparation of cold patch asphalt; formulation optimization design; orthogonal analysis

冷补沥青混合料作为一种快速修补材料,近些年被道路工程广泛的应用,作为冷补料的主要组成部分,冷补液对于混合料的性能起到了决定性作用。相较于热拌沥青拌合条件要求高、不能及时修补病害的缺点,冷补沥青液具有储存方便、施工便利、即时即用^[1-3]的特点;它的出现,可以有效避免道路病害的进一步扩展,保护了路面结构和行车安全。在我国北方寒区,冬季温度普遍达到-20℃,路面出现坑槽病害时,一般的冷补料,或是自身和易性不足难以摊铺,或是材料摊铺压实完成后,性能和强度无法满足需求,出现松散、掉粒等情况,不仅没有及时对坑槽病害进行修补,反而加重病害的影响^[4]。因此制备一种适合寒区使用的冷补沥青液对于道路养护具有十分重要的意义。

国内外专家对于冷补液配方已深入研究,并取得了一定研究成果^[5-7]。苏联采用煤油等材料作为稀释剂,确保冷补料可以在低温状态下施工^[8]。加拿大宁枫公司研制出常温下呈液体状石油气味的宁枫冷补添加剂,可保证冷补液具有良好的低温黏结性和储存稳定性^[9]。谭忆秋等^[10]研制出适合于云贵川易冻山区的冷补材料,主要适用温度在-5~5℃。H. K. Shanbara^[11]通过在冷补液中掺入天然纤维和玻璃纤维,提高了冷补料的早期强度以及抵抗水损害的能力。QIAO Dong^[12]提出以硅酸盐水泥和纳米膨润土作为冷补液的添加剂可以降低水损害的影响,但价格相对较高,无法大面积使

用。WANG Xiang等^[13]提出以矿物油和乙酸异戊酯两种新溶剂作为冷补液的稀释剂材料,可以提高拌合后强度,但挥发性能较差,主要应用在孔隙率较大的沥青路面。张争奇等^[14-15]使用水性环氧组分和SBR胶乳对冷补液中沥青复合改性,开发一种低温型冷补沥青液。徐茜等^[16]使用经过简易处理的餐厨废油与柴油混合作为稀释剂,有效提高了冷补液的黏附性。黄红明等^[17]对环氧沥青的固化反应机理进行研究,研发出一种冷拌N-EA环氧沥青混合料,具有较好的路用性能。H. Kwon^[18]以液态硫聚物和环氧树脂混合作为冷补液的添加剂胶结材料,加快了固化成型速度,具有较好的坑槽修复效果。

尽管国内外研究人员对于冷补液的研究已经有所收获,但材料多应用在非寒区,在寒区使用的冷补沥青液仍存在着强度较低、施工和易性较差等问题。因此,为了制备一种适合在寒区使用的冷补沥青液,笔者从冷补液组成材料角度出发,根据材料自身性质筛选稀释剂的种类,通过黏度试验、马歇尔稳定度试验初定稀释剂的掺量,利用马歇尔稳定度试验初定添加剂的掺量;采用正交试验^[19]优化冷补液的配方,并对冷补液的性能进行测试,最终制备出一种寒区冷补沥青液,并提出相应的性能建议技术要求。研究表明:按此配比制备的冷补液性能优异,配置的沥青混合料可以在-20℃的环境下使用。

1 原材料及试验方法

1.1 沥 青

采用辽河 90#道路石油沥青,技术性能

表 1 基质沥青技术性能

Table 1 The technical properties of basis asphalt

针入度(25 ℃)/0.1 mm	软化点/℃	延度(10 ℃)/cm	延度(15 ℃)/cm	闪点/℃	密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)
92	49.2	50	>150	268	1.005 6

1.2 稀释剂

常温状态下基质沥青呈固态,无法进行施工,通过在沥青中加入稀释剂来降低黏度,使沥青在常温甚至低温状态下处于流动可施工状态。笔者选择-35#柴油、3#航空煤油、100#溶剂油、无水酒精、丙酮作为备选稀释剂材料,材料性能见表 2。

表 2 稀释剂性能

Table 2 The performance of diluent

稀释剂种类	闪点/℃	凝固点/℃	1 d 挥发率/%
-35#柴油	≥45	-35	12.3
3#航空煤油	38	-47	13.1
100#溶剂油	≥50	-45	20.9
无水酒精	-13~23	-117	19.7
丙酮	-18	-95	22.3

见表 1,符合现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的要求。

1.3 添加剂

添加剂的作用是对稀释后的沥青进行改性,提高稀释沥青黏度,解决混合料早期强度差的问题,使冷补沥青混合料即具有优异的施工和易性,又具有较好的路用性能。

结合材料的应用环境,经济效益等因素的综合考虑,冷补沥青液的添加剂选择一种单组分湿固化添加剂和低温增黏树脂添加剂,以质量比 1:2 的配比混合^[20]。另外选择工程上应用效果好的抗剥落剂 LB-6176 来提高冷补料抗水损害的能力,初定抗剥落剂掺量为外掺 0.2%。

1.4 集料及级配

试验集料选择石灰岩,按照现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中对冷补沥青混合料的级配范围规定,选择细粒式 LB-13 级配,试验级配明细见表 3。

表 3 LB-13 型混合料级配

Table 3 The gradation detail of LB-13 mixture

级配类型	通过不同直径筛孔的质量分数/%								
	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
LB-13	98.0	80.0	50.0	24.0	13.0	9.5	7.4	6.0	4.6

1.5 试验方法

按照现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),采用布氏黏度计法测量冷补液表观黏度,采用水煮法测量冷补液黏附性。测定特定温度黏度时,需将试样杯置于特定温度下 1.5 h,然后立即进行试验,每次测量时间不超过 3 min。

为了测量冷补料的早期强度,按照现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)和《沥青路面坑槽冷补成

品料》(JT/T972—2015)对冷补料马歇尔稳定度试验进行修改,将试件置于试验温度环境 12 h,取出后不经过水浴,立即进行马歇尔稳定度试验。

冷补液流动性测量方法:将配置好的冷补液装入试杯中,密封放置-20 ℃环境中 3 h,将试杯固定在流动性测量上,从冷补液滴落开始计时,到称量滴落沥青质量 30 g 停止,记录流出时间,并以此作为冷补液的流动性评价指标。

冷补液挥发性测量方法:将配置好的冷补液装入试杯中,总质量为 m_0 ,分别称量试杯放置于常温状态下1 d和3 d的质量 m_1 、 m_2 ,计算冷补液1 d和3 d的质量损失率分别为 $(m_0 - m_1)/m_0$ 和 $(m_0 - m_2)/m_0$ 。

2 寒区冷补液的制备

2.1 稀释剂的确定

稀释剂首先应选择闪点高、易控制的安全材料,由于丙酮和无水酒精闪点较低、易燃、安全性差,故不考虑两种材料;其次,稀释剂应具有快速挥发特性,以保证混合料的强度可以迅速生成,选择挥发速率快的100#溶剂油用来提高稀释剂的挥发率;最后,为保证混合料可以在寒区施工,选择两种凝固点低的-35#柴油和3#航空煤油进行筛选。

2.1.1 稀释剂的种类

根据文献[21]设计复配比例为 $m(3\text{\#航空煤油}/-35\text{\#柴油}):m(100\text{\#溶剂油})=2:1$,将复配稀释剂以外掺40%的比例与基质沥青充分混合制成稀释沥青。按照前文1.5节中方法,测定两种稀释沥青在不同温度下的黏度,试验结果见图1。

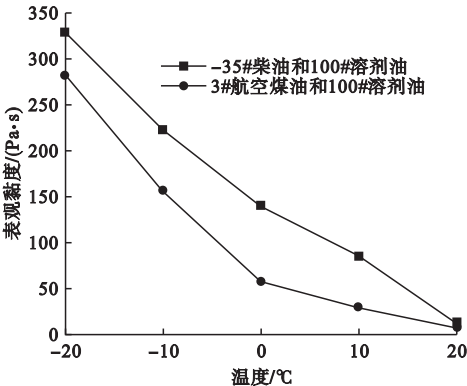


图1 稀释沥青在不同温度下的黏度

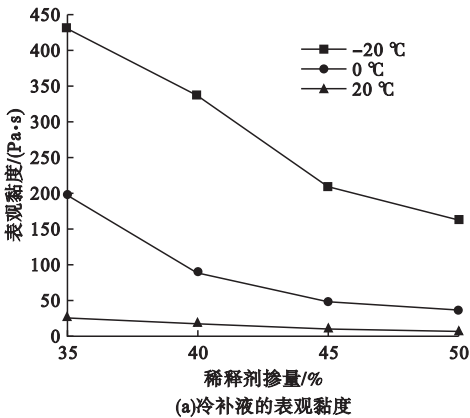
Fig.1 The apparent viscosity of cutback asphalt at different temperatures

由图1可知,在不同温度下,以3#航空煤油和100#溶剂油作为稀释剂的稀释沥青的黏度均小于以-35#柴油和100#溶剂油作为稀释剂的稀释沥青的黏度,这表示在温度

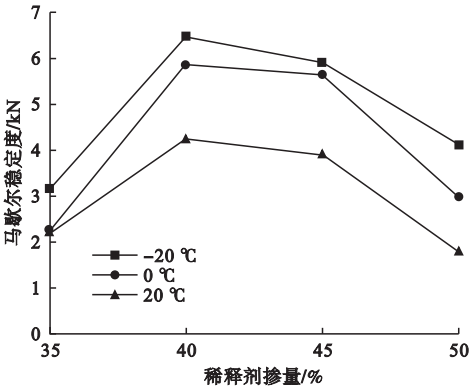
不变的情况下,掺量相同的3#航空煤油对基质沥青的稀释效果要优于-35#柴油,3#航空煤油作为稀释剂拌合的混合料拥有更好的储存稳定性和低温施工和易性。综上所述,选择3#航空煤油和100#溶剂油复配制成稀释剂,复配比例为 $m(3\text{\#航空煤油}):m(100\text{\#溶剂油})=2:1$ 。

2.1.2 稀释剂的掺量

稀释剂的掺量直接影响拌合后混合料的储存稳定性、施工和易性以及早期强度。选择稀释剂掺量35%、40%、45%、50%,添加剂掺量10%,抗剥落剂掺量0.2%,油石比4.5%,制备不同稀释剂掺量的冷补液和冷补料,测定在不同温度下、不同稀释剂掺量冷补液的黏度和冷补料的马歇尔稳定度,试验结果见图2。



(a)冷补液的表现黏度



(b)冷补液马歇尔稳定度

图2 不同稀释剂掺量试验结果

Fig.2 The test results of different diluent dosage

由图2可知,温度不变时,冷补液黏度随稀释剂掺量的增加而降低,黏度越低,冷补液

的稀释程度越好,冷补料越容易拌合,施工和易性越好;马歇尔稳定度代表了冷补料的早期强度,由于此时的冷补料中稀释剂尚未挥发,混合料强度主要由集料的黏结力决定,黏度越大,黏结力越大,冷补料的强度越大。

当稀释剂掺量为 35% 时,此时稀释剂掺量较小,冷补液黏度很大,拌合后混合料的强度很差,冷补料在拌合后无法成团,成型的试件在进行马歇尔稳定度试验时出现松散、掉粒的现象,强度以及低温和易性均难以得到保证。当稀释剂掺量为 50% 时,此时稀释剂的稀释程度优异,混合料的低温施工和易性好,但由于其黏度较小,混合料内部集料间的黏结力较小,试件较为松散,成型试件的强度不能达到恢复交通的标准。当稀释剂掺量为 40% 时,此时冷补液的黏度较为适中,冷补料集料间的黏附作用好、黏结力较大,试件的强度达到最大,代表此时的稀释剂掺量既能保证拌合后混合料的强度,也能保证较好的低温和易性,因此初定冷补液的稀释剂掺量为 40%。

2.2 添加剂的确定

选择添加剂掺量为 5%、10%、15%、20% ,抗剥落剂掺量为 0.2% ,稀释剂掺量为 40% ,油石比为 4.5% ,分别制备不同添加剂掺量的冷补料,将冷补料在 -20 ℃ 的低温状态下放置 12 h,成型马歇尔试件,按照上文试验方法,测定不同添加剂含量冷补沥青混合料的马歇尔稳定度,试验结果见图 3。

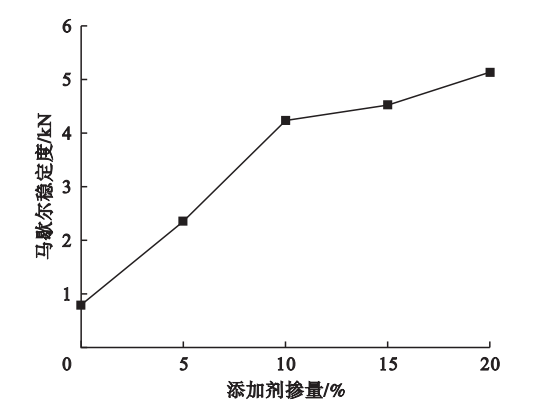


图3 不同添加剂掺量试验结果

Fig.3 The test results of different additive dosage

由图 3 所示,随着添加剂掺量的增加,混合料的马歇尔稳定度增大,添加剂的加入提高了冷补液的黏度,增大了集料间的黏附力,从而使混合料的强度得到提升。在添加剂掺量 5%~10% 内,强度增长最为迅速,此时添加剂的增黏效果最好,促进强度提升的效果最为显著,试件在成型过程中容易压实,耐低温性能较好。在添加剂掺量 15%~20% 内,强度增长趋于平缓,添加剂的增黏效果变缓,此时的冷补料虽然具有很大的强度,但在试件成型过程中容易硬结成团、难以压实,因此混合料的耐低温性能较差。综合考虑,选择冷补沥青混合料的马歇尔强度增长速率最大时刻,即掺量 10% 为冷补沥青液初定的添加剂掺量。

2.3 冷补材料的制备工艺

2.3.1 冷补液的制备工艺

将复配好的稀释剂加入到加热呈液态的基质沥青中,沥青剪切仪以 300~500 r/min 的转速搅拌 10~15 min,得到稀释沥青。将复配添加剂、抗剥落剂分别加入到稀释沥青中,沥青剪切仪以 500~600 r/min 的转速搅拌 45~60 min,将制备的沥青胶浆冷却至室温,得到冷补沥青液。

2.3.2 冷补料的制备工艺

选择 LB-13 级配,将集料按级配调和后烘干,得到调和好级配的集料,将冷补沥青液和调配好的集料按照比例加入到拌合锅中,常温拌合 90~120 s,再按配比加入矿粉,常温拌合 90~120 s,得到冷补沥青混合料。

3 配方优化

3.1 正交试验设计

设计三因素三水平的正交试验 $L_9(3^3)$ 选择冷补沥青液的常温表观黏度、黏附性、流动性和挥发性 4 个指标作为正交试验的质量特性指标,以稀释剂掺量 A、添加剂掺量 B、抗剥落剂掺量 C 作为水平因素。初定各组成材料配比:基质沥青 100%,稀释剂 40%,

添加剂 12%,抗剥落剂 0.2%,调整稀释剂、添加剂、抗剥落剂掺量,正交方案设计见表 4。

表 4 正交试验方案设计

Table 4 The orthogonal test design				
试验编号	试验组合	A/%	B/%	C/%
1	$A_2B_1C_2$	40.00	10.00	0.30
2	$A_3B_1C_3$	43.00	10.00	0.40
3	$A_1B_3C_2$	37.00	14.00	0.30
4	$A_2B_3C_3$	40.00	14.00	0.40
5	$A_1B_1C_1$	37.00	10.00	0.20
6	$A_2B_2C_1$	40.00	12.00	0.20
7	$A_1B_2C_3$	37.00	12.00	0.40
8	$A_3B_3C_1$	43.00	14.00	0.20
9	$A_3B_2C_2$	43.00	12.00	0.30

3.2 正交试验结果分析

3.2.1 正交试验结果分析

正交试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,使用极差分析法计算 4 个性能指标的 K

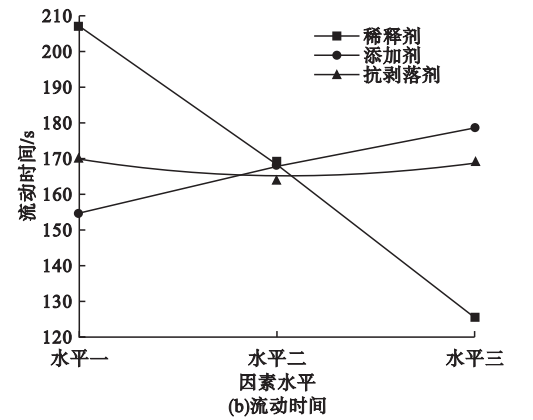
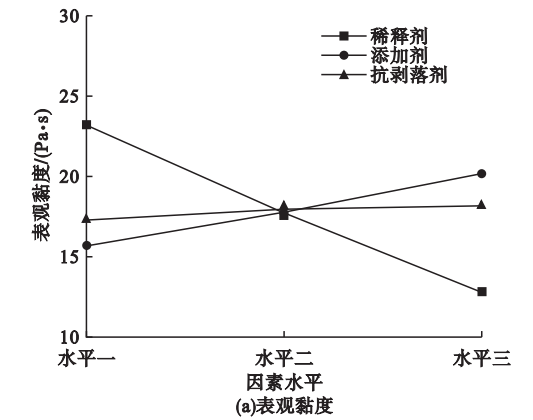
值和 R 值,利用各因素平均极差对试验结果进行分析。表 6 为正交试验极差结果分析,根据表中数据绘制各因素对试验指标的影响程度图,影响程度见图 4。

表 5 正交试验结果

Table 5 The orthogonal test results					
试验编号	表观黏度/(Pa·s)	黏附性等级	流动时间/s	1 d 损失率/%	3 d 损失率/%
1	16.03	5	150	0.51	0.75
2	11.07	4	115	0.40	0.51
3	25.87	5	215	0.33	0.39
4	19.71	5	184	0.15	0.16
5	20.01	4	199	0.47	0.69
6	17.00	4	173	0.74	1.03
7	23.74	5	207	0.62	0.86
8	14.90	4	137	0.20	0.31
9	12.41	5	124	0.87	1.12

表 6 正交试验结果分析

Table 6 The analysis of orthogonal test results															
指标	表观黏度/(Pa·s)			黏附性等级			流动时间/s			1 d 损失率/%			3 d 损失率/%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	69.62	47.11	51.91	14	13	12	621	464	509	1.42	1.38	1.41	1.94	1.95	2.03
K_2	52.74	53.15	54.31	14	14	14	507	504	489	1.40	2.23	1.71	1.94	3.10	2.35
K_3	38.38	60.48	54.52	13	14	14	376	536	506	1.47	0.68	1.17	1.94	0.86	1.53
\overline{K}_1	23.21	15.7	17.30	4.67	4.33	4	207	154.67	169.67	0.47	0.46	0.47	0.65	0.65	0.68
\overline{K}_2	17.58	17.71	18.10	4.67	4.67	4.67	169	168	163	0.47	0.74	0.57	0.65	1.03	0.78
\overline{K}_3	12.79	20.16	18.17	4.33	4.67	4.67	125.33	178.67	168.67	0.49	0.23	0.39	0.65	0.29	0.51
R	10.42	4.46	0.87	0.34	0.34	0.67	81.67	24	6.67	0.02	0.51	0.18	0	0.74	0.27



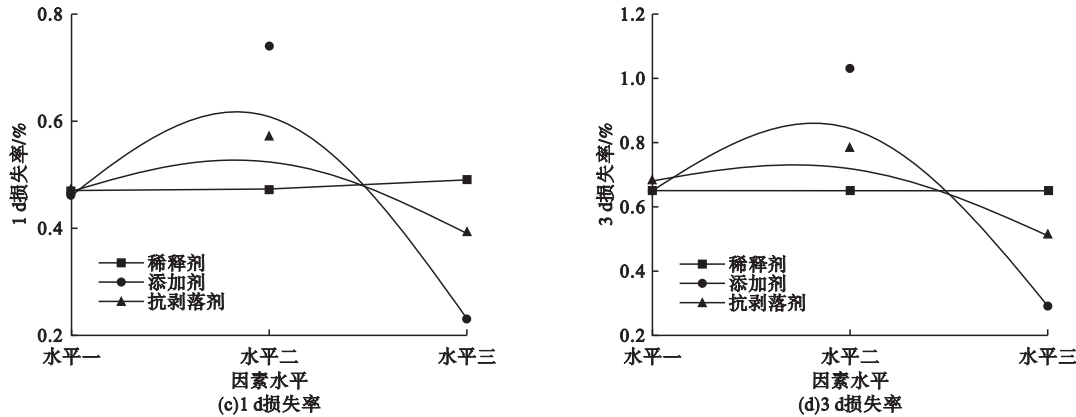


图4 各因素对冷补液指标影响

Fig. 4 The influence of various factors on the index of cold patch asphalt

3.2.2 单因素试验结果分析

(1)黏度

由图4(a)可知,冷补液的黏度受稀释剂的影响最大,随着稀释剂的掺量增大而降低;受添加剂的影响次之,随添加剂的掺量增加而升高;抗剥落剂的掺量变化对冷补液的影响最小。因为稀释剂和添加剂对于冷补液的黏度影响是相对应的,所以在选择稀释剂、添加剂掺量时可以使用黏度作为选择指标,当稀释剂以及添加剂对黏度的增减作用达到相对平衡时即为最佳掺量。由于笔者采用的冷补液需要在低温环境下进行施工,因此黏度不宜过高,综合考虑建议冷补液的常温表观黏度应该不超过 20 mPa·s。

(2)黏附性

由表5可知,所有组次冷补液黏附性等级均大于等于4级,这是由于在抗剥落剂和添加剂的作用下,冷补液的黏性较大,对集料的包裹性好,根据现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中对于黏附性的要求,建议冷补液的黏附性等级应不小于4级。

(3)流动性

由图4(b)可知,稀释剂的掺量对冷补液的流动性影响最为明显,稀释剂掺量增加时,冷补液流动时间减小,冷补液的流动性增强;添加剂的掺量对冷补液流动性的影响其次,

冷补液的流动性随着添加剂的增加而降低;抗剥落剂对冷补液流动性影响并不明显,可能与其掺量较低有关。在施工过程中要保证冷补液具有较好的流动性,根据表5中数据,建议流动时间不超过 180 s。

(4)挥发性

由图4(c)和图4(d)可知,在1~3 d内冷补液的损失率受添加剂掺量和抗剥落剂掺量的影响最大,并且影响的趋势相似;根据表5中数据绘制图5,直观反映9组冷补液1 d和3 d的挥发率。

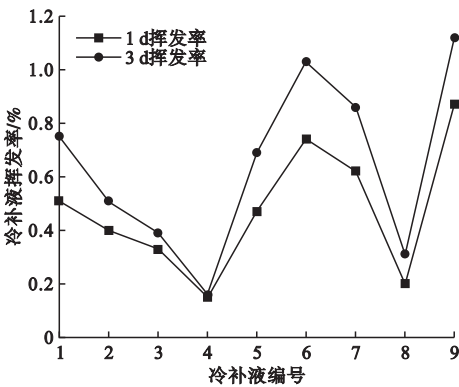


图5 冷补液的挥发率

Fig. 5 The volatilization percentage of cold patch asphalt

由图5可以看出,3 d的挥发率相较于1 d的挥发率更高;冷补液4号、8号的挥发率相对较低,6号、9号冷补液挥发率相对较高。由于4号、8号中的添加剂和抗剥落剂

掺量较高,从而导致挥发率过低。综合考虑,建议冷补液1 d挥发率不小于0.7%,3 d挥发率不小于1.0%。

按各因素对冷补液各项指标的影响程度从重到轻进行排序,黏度和流动性的影响程度从大到小依次为A、B、C,挥发性的影响程度从大到小依次为A、C、B,各因素对于黏附性的影响程度相同。

3.3 最优配比分析及建议技术要求

3.3.1 最优配比分析

冷补液的黏度和黏附性决定了冷补液的早期性质,为了保证冷补液的强度以及和易性,选取黏度适中、黏附性能优异的冷补液。由表5可知,1号、6号、8号试样的黏度相对合适,黏附性各组试样均满足规范中的要求。流动性的好坏直观地反映冷补液在寒区使用过程中施工和易性的优异程度,应选择具有良好流动性的冷补液,1号、2号、6号、8号、9号试样的流动时间较短,满足施工要求。挥发性决定了冷补料的强度生成速率,6号、9号试样的挥发率远高于其余试样,可以保证强度的快速生成。综合考虑,选择6号试样的配比作为冷补液的最终材料配比,水平组合为 $A_2B_2C_1$,即基质沥青100%,稀释剂40%,添加剂12%,抗剥落剂0.2%。

3.3.2 建议技术要求

通过对冷补液的黏度、黏附性、挥发性及流动性的测试所得到的数据,根据现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的要求,提出寒区冷补沥青性能建议技术要求,具体数据见表7。

表7 冷补液建议技术要求

Table 7 The recommend technical requirements of cold patch asphalt

常温表 观黏度/ (Pa·s)	黏附性 等级	流动 时间/s	挥发性	
			1 d 损失 率/%	3 d 损失 率/%
≤20	≥4	≤150	≥0.7	≥1.0

4 结 论

(1)3#航空煤油相比于-35#柴油具有更好的稀释效果,100#溶剂油的掺入可加速混合料中稀释剂的挥发速率,让强度快速成型,单组分湿固化添加剂和低温增黏树脂添加剂可有效提高冷补液的黏度,确保混合料具有足够的初始强度。

(2)冷补液的常温表观黏度不超过20 Pa·s,黏附性等级不小于4级、流动时间小于180 s、1 d的损失率不小于0.7%、3 d损失率不小于1.0%。该评价方法能够充分反映寒区冷补液的性能特点,使得拌合成型的冷补沥青混合料也具有较好的路用性能。

(3)稀释剂和添加剂的掺量变化对冷补液的黏度、黏附性和流动性影响最大,添加剂和抗剥落剂的掺量变化对挥发性影响最为显著。

(4)寒区冷补沥青液的最佳配方:沥青100%(外掺质量分数),稀释剂40%,添加剂12%,抗剥落剂0.2%;以此配方制备冷补沥青混合料可在-20℃的低温环境下使用。

参考文献

[1] 耿立涛,王丽艳,姜成岭,等.溶剂型冷补沥青及混合料的性能评价[J].建筑材料学报,2020,23(5):1177-1183.
(GENG Litao, WANG Liyan, JIANG Chengling, et al. Performance evaluation of solvent cold patching asphalt and asphalt mixture [J]. Journal of building materials, 2020,23(5):1177-1183.)

[2] 李峰,黄颂昌,徐剑,等.冷补沥青混合料性能评价及技术要求[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(10):1463-1467.
(LI Feng, HUANG Songchang, XU Jian, et al. Performance evaluation and technical requirements of cold patch asphalt mixture [J]. Journal of tongji university (natural science), 2010,38(10):1463-1467.)

[3] HUANG Shulei, REN Junda, LI Mingguang, et al. Development and evaluation of solvent-based cold patching asphalt mixture based on multiscale [J]. Advances in materials science & engineering, 2020(1):1-16.

[4] 迟银波. 沥青路面冷补材料试验研究[J]. 森林工程, 2007(3):55-57.
(CHI Yinbo. Experimental study on cold

- patching material of asphalt pavement [J]. Forest engineering, 2007(3):55-57.)
- [5] 张苛,张争奇. 沥青与集料黏附性的定量评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015,38(6):810-815.
(ZHANG Ke, ZHANG Zhengqi. Quantitative evaluation of the adhesion between asphalt and aggregate [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2015, 38(6): 810-815.)
- [6] 林科杰,弥海晨,向豪,等. 沥青路面快速修复用单组分树脂冷补料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020,39(5):1585-1593.
(LIN Kejie, MI Haichen, XIANG Hao, et al. Performance of single component resin cold patch material for rapid repair of asphalt pavement [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2020,39(5):1585-1593.)
- [7] 马全红,邢雪婷,许雪松,等. 冷补沥青混合料的制备及其性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016,46(3):594-598.
(MA Quanhong, XING Xueting, XU Xuesong, et al. Preparation and property analysis of cold patch asphalt mixture [J]. Journal of southeast university (natural science), 2016, 46(3): 594-598.)
- [8] CHO Y S, LIN F B. Integrity analysis of single and multi-layer thin cement mortar slab structures using the spectral analysis of surface wave NDT method [J]. Construction and building materials, 2000,14(8):387-395.
- [9] SIMITA B, LEILA H, HASANUZZAMAN M, et al. A study on pothole repair in Canada through questionnaire survey and laboratory evaluation of patching materials [J]. Canadian journal of civil engineering, 2016, 43(5): 443-450.
- [10] 谭忆秋,周水文,单丽岩,等. 抗冻型冷补沥青混合料优化设计及性能研究[J]. 建筑材料学报, 2014,17(01):89-94.
(TAN Yiqiu, ZHOU Shuiwen, SHAN Liyan, et al. Optimization design and study on properties of anti-freezing cold patch asphalt mixture [J]. Journal of building materials, 2014,17(1):89-94.)
- [11] SHANBARA H K, RUDDOCK F, ATHERTON W. A viscoplastic model for permanent deformation prediction of reinforced cold mix asphalt [J]. Construction and building materials, 2018,186(10):287-302.
- [12] DONG Qiao, YANG Jiawei, CHEN Xueqin, et al. Reduction of moisture susceptibility of cold asphalt mixture with Portland cement and bentonite nanoclay additives [J]. Journal of cleaner production, 2018,176(3):320-328.
- [13] WANG Xiang, CHEN Xueqin, DONG Qiao, et al. Material properties of porous asphalt pavement cold patch mixtures with different solvents [J]. Journal of materials in civil engineering, 2020, 32(10): 06020015-06020020.
- [14] 张争奇,许钺,成高立,等. 溶剂型冷补沥青液的路用性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017,38(2):236-242.
(ZHANG Zhengqi, XU Cheng, CHENG Gaoli, et al. Pavement performance of cold patch asphalt liquid [J]. Journal of Jiangsu university (natural science edition), 2017,38(2):236-242.)
- [15] 张争奇,王素青,路国栋,等. 水性环氧冷补沥青的性能与制备工艺[J]. 建筑材料学报, 2018,21(5):848-854.
(ZHANG Zhengqi, WANG Suqing, LU Guodong, et al. Properties and preparation process of cold patch asphalt modified with waterborne epoxy resin [J]. Journal of building materials, 2018,21(5):848-854.)
- [16] 徐茜,耿立涛,魏雪,等. 含餐厨废油的道路坑槽修补用冷补沥青室内性能评价[J]. 建筑材料学报, 2020,23(1):156-161.
(XU Qian, GENG Litao, WEI Xue, et al. Laboratory performance evaluation of cold patching asphalt containing cooking waste oil for pavement pothole [J]. Journal of building materials, 2020,23(1):156-161.)
- [17] 黄红明,曾国东,徐伟,等. 环氧沥青固化反应机理及施工控制性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020,23(4):941-947.
(HUANG Hongming, ZENG Guodong, XU Wei, et al. Study of curing reaction mechanism and construction control performance of epoxy asphalt [J]. Journal of building materials, 2020,23(4):941-947.)
- [18] KWON H, LEE A S, LEE J H, et al. Characterization of liquid state sulfur polymer/epoxy blend as asphalt pavement materials [J]. Journal of industrial and engineering chemistry, 2017,53:386-391.
- [19] 丁起. 正交设计优化 SBS 改性乳化沥青的制备工艺[J]. 中外公路, 2010,30(2):205-207.
(DING Qi. Orthogonal design optimization of the preparation process of SBS modified emulsified asphalt [J]. Journal of China and foreign highways, 2010,30(2):205-207.)
- [20] 杨彦海,闫羲钰,安中华,等. 沥青路面坑槽修复材料研发及结构力学响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020,36(2):314-322.
(YANG Yanhai, YAN Xitai, AN Zhonghua, et al. Development of asphalt pavement pit repair materials and analysis of structural mechanical response [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2):314-322.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)