

基于性能敏感性参数的溶剂型冷补料设计研究

胥亮

(厦门华特公路沥青技术有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要:在论述溶剂型冷补料性能指标与试验方法的基础上,利用正交试验对设计参数进行性能敏感性研究,结果表明:稀释剂掺量对施工性能及初期强度影响显著,设计空隙率对强度增长率以及成型强度影响显著,掺入稀释剂会引起黏附性等级及水稳定性不足,必须通过添加外掺剂弥补。依据设计参数与性能指标的敏感性对应关系进行冷补料设计,经实体工程验证方法可行。

关键词:性能指标;正交试验;敏感性参数;冷补料设计

1 前言

道路坑槽类病害常见于沥青路面运营期的各个阶段,影响道路通行能力与安全,又在自然环境与交通荷载综合作用下加速路面恶化从而降低道路使用寿命,需及时修补。冷补料常用于沥青路面坑槽修补,具有可存储、施工简单、开放交通快、适用范围广等优点,按胶结料类型的不同可分为溶剂型、乳化型及反应型3类。其中,溶剂型利于长期存储、低温施工性能(也称工作性)好,能适用于潮湿及雨雪环境,应用最为广泛,但存在强度及耐久性问题。

中国对于溶剂型冷补料的研究始于20世纪90年代,至今也开发了诸多适用于不同气候环境的产品,但仍未形成统一标准,市面上冷补料良莠不齐,二次病害常有出现。为改善性能,提高修补效果,围绕冷补液的开发、矿料级配选型与设计、强度形成机理与评价方法等方面开展了大量研究,成果显著。张争奇等研制了一种新型冷补沥青液,工程应用表现优良,并提出了冷补料性能评价方法和技术要求;顾成自主研发冷补沥青液,优化冷补胶结料用量确定方法,详细研究性能评价体系,并分析强度形成机理提出以设计空隙率作为冷补料设计控制指标;李峰等在分析冷补料关键性能的基础上开发了施工性能试验仪,提出并修正了黏聚性等试验方法,据此建立冷补料路用性能评价体系,改进矿料级配并制定配合比设计方法。然而,有关影响冷补料性能的敏感性参数研究尚鲜有报道。该文以

LB-10 常温型(施工温度10~25℃)冷补料为研究对象,在论述溶剂型冷补料性能指标与试验方法的基础上,设计正交试验对冷补料性能敏感性参数进行确定,据此进行冷补料设计。

2 性能指标与试验设计

2.1 性能指标

研究表明:冷补料的施工性能、成型强度、黏附性、水稳定性是关键性能指标,共识度较高且已形成行业标准。此外,冷补料初期强度与强度增长速率对冷补的有效性及其耐久性也有重要影响,因此该文增加了初期强度及48 h强度增长率作为冷补料性能评价指标。由于中国行业标准JT/T 972-2015《沥青路面坑槽冷补成品料》中施工性能试验方法所采用的试验装置尚未量产普及,自行加工制作有一定难度,笔者针对这一性能指标自主开发试验装置,经试验评价方法可行。行业标准所列性能指标试验方法此处不再赘述,仅对其余非标性能指标或试验方法阐述如下。

2.1.1 施工性能

采用自主开发的试验装置(图1)对冷补料施工性能进行量化评价,试验方法及步骤如下:

(1) 将待测冷补料1 000 g用密封筒封装并置于环境箱中保温至试验温度,同时将直径100 mm的旋转压实试模一并保温,试验温度为待测冷补料预计的最低施工温度,该文试验温度为10℃。

(2) 将待测冷补料装入旋转压实试模,在压力600



图 1 冷补料施工性能试验装置

kPa、有效内压实角 1.16° 的条件下旋转压实 7 次制得待测试件,经对比该条件下冷补料的压密状态与最不利堆叠存储、运输后的状态相近。

(3) 脱模后将待测试件立即侧放于图 1 所示试验装置的两条刃板上(刃板厚度 2 mm,两条刃板之间的中心距离 56 mm),同时开动秒表计时。

(4) 待冷补料试件在自重作用下散开,并完全从刃板上掉落,停止计时,此时的秒表读数即为该冷补料在测试温度下的施工性能测值,以秒(s)表示,测值越小则施工性能越好,反之越差。

2.1.2 初期强度

初期强度指冷补料摊铺、压实完成后便具有的强度,一定的初期强度可保障新铺筑的冷补路面在车辆荷载作用下不产生明显变形或破坏。用旋转压实仪在压力 600 kPa、有效内压实角 1.16° 的条件下压实 75 次制得冷补料试件,此时试件的压实度与通常用手推式压路机或平板夯修补路面的压实度相近。压实冷补料试件成型时冷补料的保温方式与施工性能试验一致,压实温度也采用 10°C 。强度则通过测试新成型冷补料试件的马歇尔稳定度获得,即冷补料试件压实成型后立即脱模并进行马歇尔稳定度试验。

2.1.3 48 h 强度增长率

坑槽修补冷补料摊铺碾压完成之后,随着阳光、温度、风等的综合作用,稀释剂逐渐挥发,强度随之增长。采用与初期强度试验同样的方法制备试件,脱模后将试件四周及底面用保鲜膜包裹,表面裸露,置于 60°C 鼓风干燥箱中养生 48 h,随后立即置于 10°C 环境箱中保温至试验温度并进行马歇尔稳定度试验,测得 60°C

养生 48 h 的试件强度。计算强度增长幅度,即 48 h 强度增长率,用于冷补料间的对比,计算值大则开放交通后强度的增长速率较大,能减少二次破坏提高修补效果。

2.2 试验设计

冷补料由矿质集料、沥青、稀释剂以及外掺剂组成,组成设计的主要任务是确定矿质集料的级配、沥青用量、稀释剂用量以及外掺剂用量,该文用设计空隙率、沥青膜厚度、稀释剂掺量以及外掺剂掺量 4 项设计参数(4 个因素)表征,每项设计参数设定 3 个水平,通过 $L_9(3^4)$ 正交试验对冷补料性能敏感性参数进行研究。所设计 $L_9(3^4)$ 正交试验的因素、水平见表 1。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交试验因素与水平

水平	设计空隙率 (A)/%	沥青膜厚度 (B)/ μm	稀释剂掺量 (C)/%	外掺剂掺量 (D)/%
1	10 ± 0.5	8	19	0
2	15 ± 0.5	10	24	1.5
3	20 ± 0.5	12	29	3.0

设计空隙率指开放交通且稀释剂得以挥发后压实冷补料的空隙率,与不掺加稀释剂时相同级配和沥青用量下热拌沥青混合料的空隙率一致,因此试验采用热拌方式进行,旋转压实 75 次成型试件并计算空隙率。沥青膜厚度指冷补料中不含稀释剂以及被集料吸收部分在内,裹覆与集料表面的有效沥青膜厚度,计算依据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》条款 B.6.8 进行。稀释剂与外掺剂掺量以沥青胶结料的质量百分比计,如:表 1 中 19% 和 1.5% 分别表示每 100 份(质量份)沥青胶结料掺加 19 份稀释剂和 1.5 份外掺剂。

试验用矿质集料及沥青胶结料采用满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求的玄武岩碎石、石屑、石灰岩矿粉以及 70# A 级道路石油沥青,稀释剂采用一种沥青胶结料的良溶剂(溶剂油),外掺剂采用一种冷补料专用添加剂。经设计 $L_9(3^4)$ 正交试验 9 种试验组合的矿料级配及沥青用量见表 2。

表 2 各试验组合的矿料级配及沥青用量

试验 编号	试验组合	油石比/ %	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
			13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1	$A_1B_1C_1D_1$	4.85	100	86.0	46.2	30.0	22.7	15.1	9.2	6.8	4.8
2	$A_1B_2C_2D_2$	4.10	100	84.3	40.1	23.5	17.8	11.9	7.2	5.4	3.8
3	$A_1B_3C_3D_3$	3.55	100	83.4	36.1	19.2	14.5	9.7	5.9	4.4	3.1
4	$A_2B_1C_2D_3$	5.35	100	85.2	43.4	27.0	20.4	13.6	8.3	6.2	4.4

续表 2

试验 编号	试验组合	油石比/ %	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
			13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
5	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	4.60	100	84.3	38.6	21.8	16.5	11.0	6.7	5.0	3.5
6	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	3.95	100	83.4	34.6	17.4	13.2	8.8	5.4	4.0	2.8
7	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	5.90	100	85.1	41.8	25.2	19.1	12.7	7.7	5.8	4.1
8	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃	5.25	100	84.2	38.2	21.3	16.1	10.8	6.6	4.9	3.5
9	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	4.45	100	83.4	34.2	17.0	12.9	8.6	5.2	3.9	2.8

3 试验结果与敏感性分析

3.1 试验结果

按 L₉(3⁴)正交试验安排的 9 种组合分别制备冷补料,测试其性能指标,结果如表 3 所示。

依据表 3 试验结果按正交试验直观分析方法对各因素水平下冷补料性能试验结果进行统计计算,直观分析结果如表 4 所示。

3.2 敏感性分析

结合表 4,对影响溶剂型冷补料性能的设计参数进行敏感性排序(表 5),并分析如下。

表 3 正交试验结果

试验 编号	施工性 能/s	初期强 度/kN	48 h 强度 增长率/%	成型强 度/kN	黏附性 等级/级	残留稳 定度/%
1	244	5.62	118	4.98	1	68.6
2	92	3.87	88	1.76	2	91.6
3	9	1.60	226	1.58	5	94.1
4	46	2.58	266	3.69	5	98.4
5	18	2.17	328	3.94	1	62.6
6	91	3.46	153	3.12	2	89.0
7	18	1.99	453	6.43	2	88.6
8	102	3.10	323	5.68	5	99.3
9	21	2.23	365	5.46	1	65.2

表 4 正交试验直观分析结果

项目	施工性能/s				初期强度/kN				48 h 强度增长率/%				成型强度/kN				黏附性等级/级				残留稳定度/%			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
K ₁	345	308	437	283	11.09	10.19	12.18	10.02	432	837	594	811	8.32	15.10	13.78	14.38	8	8	8	3	254.3	255.6	256.9	196.4
K ₂	155	212	159	201	8.21	9.14	8.68	9.32	747	739	719	694	10.75	11.38	10.91	11.31	8	8	8	6	250.0	253.5	255.2	269.2
K ₃	141	121	45	157	7.32	7.29	5.76	7.28	1141	744	1007	815	17.57	10.16	11.95	10.95	8	8	8	15	253.1	248.3	245.3	291.8
k ₁	115	103	146	94	3.70	3.40	4.06	3.34	144	279	198	270	2.77	5.03	4.59	4.79	2.67	2.67	2.67	1	84.8	85.2	85.6	65.5
k ₂	52	71	53	67	2.74	3.05	2.89	3.11	249	246	240	231	3.58	3.79	3.64	3.77	2.67	2.67	2.67	2	83.3	84.5	85.1	89.7
k ₃	47	40	15	52	2.44	2.43	1.92	2.43	380	248	336	271	5.86	3.39	3.98	3.65	2.67	2.67	2.67	5	84.4	82.8	81.8	97.3
极差	68	63	131	42	1.26	0.97	2.14	0.91	236	33	138	40	3.08	1.65	0.96	1.14	0	0	0	4	1.4	2.4	3.9	31.8

注: $k_i = K_i/3, i=1, 2, 3$ 。

表 5 溶剂型冷补料性能敏感性因素排序

性能指标	主次顺序(主→次)			
施工性能	C	A	B	D
初期强度	C	A	B	D
48 h 强度增长率	A	C	D	B
成型强度	A	B	D	C
黏附性等级	D	C	B	A
残留稳定度	D	C	B	A

3.2.1 设计空隙率

冷补料 48 h 强度增长率和成型强度受设计空隙率影响显著,虽然设计空隙率较小时冷补料具有相对较大的初期强度,然而伴随养生过程中稀释剂的挥发,设计空隙率 20% 的冷补料 48 h 强度增长率高达 380%,远高于设计空隙率 10% 条件下的 144%,即养生 48 h 后空隙率较大的冷补料因较快的稀释剂挥发而达到更高的强度。同理,对于成型强度,较大空隙率时冷补料中稀释剂挥发充分,较少残留,沥青胶结料性

能恢复较好强度较高,反之,稀释剂挥发不充分对成型强度造成不利影响。因此,为确保冷补料路面强度的快速形成并具有较高的成型强度,冷补料宜采用开级配,虽然此时初期强度略低,但通过适当降低稀释剂用量足以弥补(稀释剂用量为冷补料初期强度的敏感性影响因素)。

3.2.2 沥青膜厚度

试验选取的沥青膜厚度变化对冷补料性能影响相对较小。结合以上分析,冷补料宜采用开级配以利于稀释剂挥发与强度形成。为避免沥青膜厚度偏低导致黏结不足,交通荷载作用下路面表面集料脱落、散失造成二次病害,考虑参照开级配热拌沥青混合料(OG-FC)对成型后的冷补料试件进行肯塔堡飞散试验从而对沥青膜厚度进行确定。

3.2.3 稀释剂掺量

冷补料施工性能和初期强度受稀释剂掺量影响显著,稀释剂掺量越大冷补料施工性能越好,而初期强度则相反,原因在于稀释剂在降低沥青胶结料黏度、改善施工和易性的同时,也降低了压实冷补料的内聚力,冷补料设计中应平衡两者关系。

3.2.4 外掺剂掺量

专用添加剂是冷补料黏附性等级和残留稳定度敏感性的影响因素,显著提高了冷补料的水稳定性,尤其对于黏附性等级。在未掺加添加剂的 3 种因素水平组合下,冷补料的黏附性等级均为 1 级,水煮后粗集料表面沥青膜基本全部剥落,而当掺入 3% 的专用添加剂后,黏附性等级可达到 5 级,试验后冷补料粗集料表面沥青膜完全保存,剥离面积百分率接近于 0。

掺入稀释剂会直接降低沥青与石料之间的黏附能力,施工初期冷补料稀释剂含量最高,随着冷补路面开放交通时间的延长,稀释剂逐渐挥发,沥青与石料之间的黏附增强,因此冷补路面铺筑初期抗水剥离损害的能力最弱。外掺剂的主要作用则在于增强沥青与矿质集料界面间的结合力,尤其针对掺入较多稀释剂时,可使冷补料适宜于潮湿及雨雪天气环境,掺量宜通过黏附性等级试验确定。

4 设计与应用实例

依据上述设计参数与性能指标的敏感性对应关系,递变敏感性参数取值制备冷补料并测试相应性能指标,据此确定各设计参数取值,拌制成品冷补料进行工程应用测试。

4.1 确定空隙率

沥青膜厚度 12 μm 、专用添加剂掺量 3.0% 与稀释剂掺量 25% 恒定不变,制备不同空隙率的冷补料并测试 48 h 强度增长率与成型强度,试验结果见图 2、3。

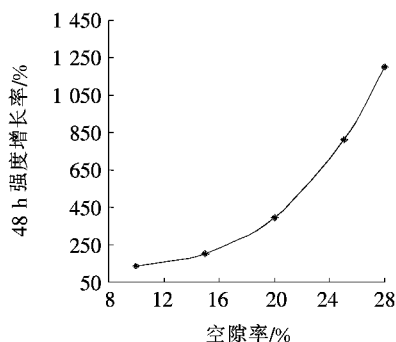


图2 空隙率—48 h 强度增长率关系曲线

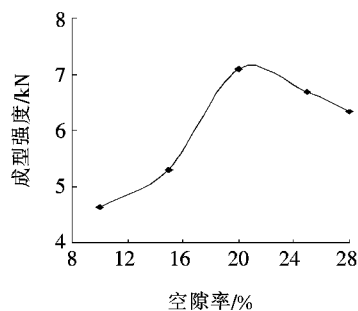


图3 空隙率—成型强度关系曲线

由图 2、3 可知:48 h 强度增长率随空隙率的增大而增大,成型强度也随之增大,当空隙率为 21% 时成型强度达到峰值,随后减小。较大的空隙率有利于稀释剂挥发和强度形成,增大至一定程度后虽有更高的强度增长率,但大空隙率对混合料结构稳定性的不利影响占主导地位引起成型强度的下降,综合考虑空隙率 21% 为最佳。

4.2 确定沥青膜厚度

如上所述,以肯塔堡飞散作为控制指标,在空隙率 21%、专用添加剂掺量 3.0% 与稀释剂掺量 25% 不变的条件下,拌制不同沥青膜厚度的冷补料测试飞散损失,沥青膜厚度—飞散损失关系曲线见图 4。肯塔堡飞散试验试件的制备同成型强度试验,试验方法与热拌沥青混合料试验方法相同。

由图 4 可知:飞散损失随沥青膜厚度增大而减小,拐点位于沥青膜厚度 12 μm 处,沥青膜厚度较小则内聚力不足,因此厚度不应小于 12 μm 。结合中国规范对开级配(OGFC)沥青混合料飞散损失不大于 20% 的技术要求,建议采用 13 μm 为宜。

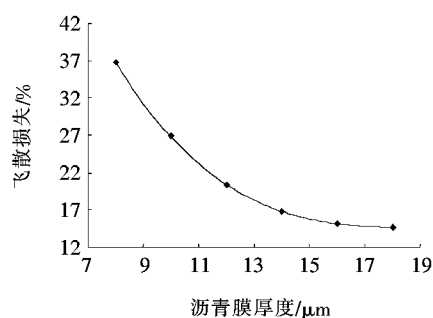


图 4 沥青膜厚度—飞散损失关系曲线

4.3 确定稀释剂掺量

空隙率为 21%、沥青膜厚度为 13 μm 、专用添加剂掺量 3% 恒定不变,采用不同稀释剂掺量拌制冷补料并测试施工性能与初期强度,试验结果见图 5、6。

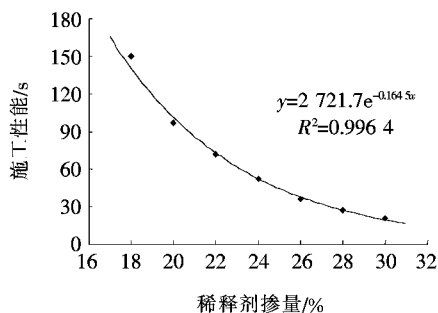


图 5 稀释剂掺量—施工性能关系曲线

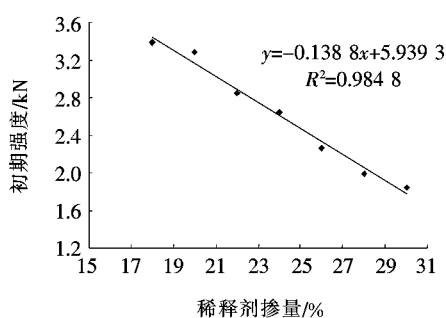


图 6 稀释剂掺量—初期强度关系曲线

由图 5、6 可知:稀释剂掺量与施工性能为指数函数关系,稀释剂掺量越大施工性能越好,拐点在稀释剂掺量 22% 处,稀释剂掺量应不小于 22%,否则施工性能急剧下降。初期强度随稀释剂掺量的增大线性降低,为保证坑槽修补初期不出现较大轮迹,初期强度应不小于 2.0 kN,据此稀释剂掺量应不大于 28%。综合以上分析,为平衡施工性能与初期强度,取下限 22% 与上限 28% 的均值 25% 作为最佳稀释剂掺量。

4.4 确定外掺剂掺量

在以上所确定各项参数值不变的条件下,制备添

加剂掺量不同的冷补料并测试黏附性等级,结果如表 6 所示。依据行业标准要求黏附性等级为 5 级,此时外掺剂掺量应取 3.0%。

表 6 不同添加剂掺量时冷补料黏附性等级试验结果

专用添加剂 掺量 / %	黏附性 等级 / 级	专用添加剂 掺量 / %	黏附性 等级 / 级
0	1	2.5	4
1.5	2	3.0	5
2.0	3	3.5	5

4.5 工程应用

采用以上确定结果(空隙率 21%、沥青膜厚度 13 μm 、稀释剂掺量 25%、专用添加剂掺量 3.0%)拌制成品冷补料于北京丰科路进行实体工程修补测试,经连续两年跟踪观测,修补后路面未见明显车辙、裂缝、坑槽以及松散等二次病害,修补有效且耐久性能较好。随后依据上述方法进行多种高低温气候类型冷补料设计,生产成品冷补料应用于北京、福建、赞比亚卢萨卡及澳大利亚维多利亚州等地效果良好。

5 结论

(1) 空隙率是溶剂型冷补料强度增长率和成型强度的敏感性参数,较大的空隙率有利于稀释剂挥发,促进强度形成,综合强度增长率与成型强度,空隙率宜为 21%。

(2) 参照开级配热拌沥青混合料设计方法通过成型后冷补料试件的肯塔堡飞散试验进行冷补料沥青膜厚度确定,沥青膜厚度宜为 13 μm 。

(3) 稀释剂掺量是冷补料施工性能和初期强度的敏感性参数,稀释剂掺量越大施工性能越好而初期强度则相反,冷补料设计时应平衡两者关系综合确定稀释剂掺量。

(4) 掺入稀释剂会严重降低沥青与石料的黏附性能,为使冷补料能适宜潮湿、雨雪天气环境,必须掺加外掺剂提高黏附性,掺量宜通过黏附性等级试验确定。

(5) 基于性能敏感性参数研究并通过系列试验进行设计参数取值的确定,据此设计的冷补料工程应用效果良好,实践表明方法可行。

参考文献:

- [1] 翟殿钢,赵健,郭昕,等.一种新型沥青冷补料应用研究[J].中外公路,2017(6).

低剂量水泥改性级配碎石力学指标分析

周志刚, 刘智仁, 张军

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了解决低剂量水泥改性级配碎石设计时缺乏强度控制指标及标准的问题,该文针对低剂量水泥改性级配碎石,通过加州承载比 CBR、无侧限抗压强度和抗压回弹模量等力学指标试验,探讨了相关力学指标随龄期和级配的变化规律,对比分析了低剂量水泥改性级配碎石 3 个力学指标之间的关系,并提出了 7 d 龄期和 14 d 龄期的 CBR 值、14 d 龄期的无侧限抗压强度和抗压回弹模量三者之间的回归关系公式。结果表明:CBR 值比无侧限抗压强度更适用于评价低剂量水泥改性级配碎石的强度性能,并建议采用 7 d 或 14 d 龄期的 CBR 值,其最低标准分别为 160% 和 180%,相应的 14 d 龄期的无侧限抗压强度和抗压回弹模量最低值分别为 1.3 MPa 和 260 MPa。按照现行技术规范中关于级配碎石的 CBR 强度要求,低剂量水泥改性级配碎石可用作任何交通等级下的任意等级公路的级配碎石基层和底基层。

关键词:低剂量水泥改性级配碎石;力学指标;CBR;无侧限抗压强度;抗压回弹模量;级配;龄期

1 前言

大量工程应用实践和理论研究表明:在沥青面层与半刚性基层之间设置级配碎石层是一种相对廉价而

又可有效延缓反射裂缝的措施。但在实际工程中,还存在以下问题:如岩石破碎筛分分档不够,难以调配出 JTJ 034-2000、JTG/T F20-2015《公路路面基层施工技术规范》推荐范围内的级配,混合料级配会超出规范范围;又如清洗不干净,含泥量较多,水稳定性不足,

- *****
- [2] 丁智勇,李永弟,侯俊涛,等.改性树脂冷拌混合料在路面坑槽修补中的应用[J].中外公路,2016(6).
- [3] 漆祥.冬季雨季沥青路面坑槽及时维修技术研究[D].长安大学硕士学位论文,2017.
- [4] 王火明.沥青路面坑槽冷补料的研究现状与最新进展[J].筑路机械与施工机械化,2018(5).
- [5] 裴飞鹏,田春玲,董元帅.溶剂型冷补料路用性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017(5).
- [6] 李璐,李睿,盛兴跃,等.高性能反应型沥青冷补液研究[J].公路工程,2015(2).
- [7] 胡国鹏,张帅,穆建青.沥青路面坑槽冷补料的研究进展[J].山西交通科技,2016(3).
- [8] 邓玉训,谢群.一种新型沥青路面坑槽修补材料的性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2018(5).
- [9] 张争奇,许钺,成高立,等.溶剂型冷补沥青液研制及其沥青混合料路用性能研究[J].铁道科学与工程学报,2016(9).

- [10] 顾成.冷补沥青混合料的结构特性及试验评价[D].东南大学硕士学位论文,2017.
- [11] 李峰,黄颂昌,徐剑,等.冷补沥青混合料组成设计研究[J].武汉理工大学学报,2010(14).
- [12] 李峰,黄颂昌,等.冷补沥青混合料性能评价指标体系[J].公路,2010(11).
- [13] JT/T 972-2015 沥青路面坑槽冷补成品料[S].
- [14] 王佳旭.冷补沥青混合料设计及其耐久性能研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2016.
- [15] 禚炜安.不同类型冷补沥青混合料的初始强度研究[J].交通科学与工程,2013(2).
- [16] 韩继国,王选仓,时成林,等.寒区冷补沥青混合料路用性能评价指标及试验方法研究[J].公路,2008(5).
- [17] 何雄刚.冷施中坑槽修补料工作性评价指标研究[J].中外公路,2018(4).
- [18] 林永会.高性能桥面铺装冷补沥青混合料技术应用研究[D].河北工业大学硕士学位论文,2014.

收稿日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378084);广西交通科技计划项目(编号:桂交综合发[2010]109号)

作者简介:周志刚,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:zhou_zgcs@sina.com