

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.036

冷补沥青混合料材料组成和性能评价综述

杨彦海,朱光旭,杨野

(沈阳建筑大学 交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为了总结国内外冷补沥青混合料最新研究成果,推动其发展和应用。该文首先介绍国内外冷补沥青混合料的发展历程,重点总结材料的分类和材料选择,以及常见的配合比设计方法,其次针对混合料性能评价的影响因素进行综述分析,最后结合强度作用机理、材料与性能之间的联系等问题和未来的研究方向,从冷补料的材料科学原理出发,建立冷补沥青混合料统一有效的评价体系,对路面坑槽病害预防和修护提供理论和技术基础指导。

关键词:冷补沥青混合料;材料组成;配合比;性能评价

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

沥青路面在使用过程中由于混合料自身问题及外部环境变化将会出现空隙和裂缝,伴随水损害、层间黏结不足、施工缺陷等问题使得路面结构剥落,最终形成坑槽破坏^[1-2]。路面坑槽快速修补技术应运而生,冷补沥青混合料可以快速修补路面坑槽,对施工环境要求较小,可以做到随用随取,施工简单。冷补技术于20世纪二三十年代由美国和苏联最先提出,随后日本和西方国家也相继开展了相关研究^[3]。国外学者主要进行了冷补沥青混合料产品路用性能提升方法的研究,Krishnan等^[4]、张涛^[5]提出矿粉用量为15%~30%的溶剂型冷补沥青混合料,研究发现混合料强度可随矿粉用量增加而增强,但存储性能和低温工作性降低;英国Heriot-Watt大学^[6-7]、Emcol公司^[8]分别研发出永久性冷铺路面材料PCSM和适用温度为-40~60℃的溶剂型冷补材料,具有高存储率和降低成本等特点,强度可达到普通热拌沥青混合料相应水平;美国SHRP计划^[9-10]通过实施多次修补方案后得出:沥青的黏结性不大于6 Pa·s时,有利于保证混合料工作性,稀释剂的挥发速率对混合料强度形成有影响,混合料残留物的黏附性能越好

反映其整体水稳定性能越好;Rosales-herrera等^[11]首次采用坍落度测试(CPST)和得克萨斯稳定性试验(TST)来确定不同级配设计条件下最佳黏结剂的用量;Chatterjee等^[12]提出汉堡车轮跟踪试验(HWTD)、间接拉伸强度试验(ITS)和水煮法以确定路面的车辙性能、黏结性和抗剥落性。国外研究侧重于产品的研发改进,实现了冷补材料技术支撑和商品量化生产,各国商品技术相同,强度高、黏结性好、工作时效长、允许低温条件施工等。

中国对冷补沥青混合料的研究起步较晚,20世纪90年代黑龙江、辽宁、上海等地的科研机构才开始进行研究开发。1997年山西省公路管理局在108国道、太长线等推广冷补技术,经过观察表现良好^[13-14];长安大学于2001年自主研发出HU-L冷补沥青材料,经实体工程验证,表现良好;四川公路科技实业有限公司在2003年投产使用LB沥青,这代表中国冷补材料实现了量产施工^[15]。中国早期的研究并没有形成系统的评价标准,更多的是借鉴国外已有的评价方法。近年来,吕伟民^[16]、毛玮芸^[17]通过大量室内试验得出强度形成机理,并且通过实地铺筑得出沥青最佳用量为4.5%~6.5%,矿粉的最佳用量为10%~15%;周玉利等^[18]研制出可以有效抵抗冻融破坏、减缓老化适用温度降低至0℃以下的复合型聚合

收稿日期:2021-12-19(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51908378);辽宁省特聘教授专项项目(编号:Z2218056);辽宁省交通科技项目(编号:202013)

作者简介:杨彦海,男,博士,教授。Email:yangyanhai168@126.com

物改性剂和 AH 型冷补沥青混合料。这些成果对研究冷补沥青混合料提供了指导建议。现如今中国学者开发了多款产品,研究水平也在奋力赶超。中国的产品开发主要针对各地区环境特点具有局限性,侧重添加剂制备开发、冷补料最佳级配、路用性能评价方法,整体缺乏统一、系统、有效的性能和理论评价体系。

本文结合国内外相关技术研究,对冷补沥青混合料材料的组成、配合比设计、性能特点及评价指标等进行总结,并对未来研究方向提出展望,深入研究冷补沥青混合料的坑槽修补原理,从而为道路快速修补技术以及研发新型沥青路面修补材料提供理论

和技术支持。

1 冷补沥青混合料的分类、材料选择与配合比设计

1.1 冷补沥青混合料的分类

冷补沥青混合料分为 3 类:溶剂型、乳化型和反应类。目前,中国对溶剂型冷补沥青混合料的结构特征、强度提升、性能测试以及实体工程应用的研究较多,而对乳化型和反应型冷补材料研究较少。本文根据分类情况,对冷补沥青混合料特点进行了归纳总结,见表 1。

表 1 冷补沥青混合料特点

类型	材料组成	作用机理	优点	缺点	经济性
溶剂型	沥青、集料、 稀释剂、添加剂	随着稀释剂挥发,沥青黏性恢复,添加剂改性黏性增强 ^[19]	不受环境影响,恢复交通快,存放时间久	初期强度差,强度增长缓慢	选择多样,成本低
反应型	沥青、集料、 反应溶剂、 固化剂	组分内部发生交联固化反应,改变性能机理,固化剂与其他内容物发生“火山灰效应”提供强度 ^[20]	成型快,强度高,封闭交通时间短,效果佳	成本高	选择条件严格,合成成本高
乳化型	乳化沥青、固化剂、改性剂、集料	依靠乳化沥青破乳后黏结性与添加剂的交联反应后生成的三维网状结构共同作用 ^[21]	可储存,施工简单,可循环利用,环保	破乳时间及强度增长规律无法精准测量	可循环利用

1.2 材料选择

冷补沥青混合料由基质沥青、矿料、稀释剂和添加剂等通过搅拌混合而成,经沥青黏结、添加剂改性和集料嵌挤共同作用形成的一种坑槽快速修补材料,各组分承担相应的功能,所以材料的选择尤为重要。

(1) 沥青

基质沥青与矿料的黏结状态直接影响混合料的强度及水稳定性。溶剂型和反应型冷补沥青混合料一般以 70[#]和 90[#]道路沥青为主^[22]。乳化型沥青易于乳化并兼顾工程实际条件进行选择。

(2) 矿料

冷补沥青混合料集料多选用玄武岩或石灰岩,且要求质地坚硬、表面洁净、无杂质。填料可选择石灰石矿粉、硅酸盐水泥等,以增强混合料黏性,填充空隙,提高早期强度。由于乳化沥青具有酸性,应选择碱性集料石灰岩提高混合料的黏附性。

(3) 稀释剂

稀释剂的主要作用在于降低沥青黏度,增大流

动性,使混合料具有更好的施工和易性。稀释剂应具有溶解沥青的能力、挥发性好、对环境影响小等特点^[23]。常用的稀释剂有柴油、煤油、轻油、苯类有机溶剂、航空煤油、重油和植物油等^[24]。徐茜等^[25]对餐饮废油作为稀释剂的可行性进行了研究,发现掺入餐饮废油的冷补沥青黏度与未掺入时布氏黏度相似,采用水煮法和间接拉伸强度试验分别检测混合料的黏附性、间接拉伸强度,其性能表现良好,说明餐饮废油可以作为稀释剂使用。

(4) 添加剂

添加剂的作用是对混合料进行改性,增强路用性能。主要的添加剂有防水剂、抗老化剂、干燥剂、改性剂、促凝剂和补强剂等。SMC 改性剂在降低沥青黏度的同时也提升了低温性能^[26]。有研究选用聚氨酯、USP 冷补添加剂、SBR 改性剂、聚胺类抗剥落剂、SBS 材料等作为添加剂进行研究。环氧树脂添加剂可分为缩水甘油类环氧树脂和非缩水甘油类环氧树脂。

相关科研人员所研制的冷补沥青混合料配比 见表2。

表2 有关冷补料研制所选材料及配比

研发者/专利号	主要功能	材料及配比
谭忆秋等 ^[27]	抗冻型溶剂型冷补材料	SBS改性沥青70%、煤油28%、添加剂(北京科宁-煤油、陕西路邦-煤油)2%
耿立涛等 ^[28]	高黏聚性溶剂型冷补材料	70 [#] 道路石油沥青73%~77%、柴油20%~24%、添加剂(乙烯基类硅氧烷、不饱和脂肪酸、醇类湿润剂、偶氮类引发剂、链终止剂母液)3%
张争奇等 ^[29]	新型溶剂型冷补材料	沥青78%、0 [#] 柴油19.5%、增黏剂1.5%、表面活性剂0.39%、抗剥落剂0.46%
重庆市智翔辅道技术工程有限公司 ^[30]	高性能反应型冷补材料	70 [#] 沥青52.5%、0 [#] 柴油22.5%、反应型树脂ZX-P 25%
朱东浩等 ^[31]	速凝乳化沥青冷补料	线性SBS改性沥青55%~60%、阴离子乳化剂1.2%~1.5%、余量为水
耿继光等 ^[32]	冰冻期溶剂型冷补材料	稀释剂12%~15%、石油树脂2%~4%、橡胶粉8%~10%、芳烃油2%~4%、分散剂1.5%~2%、余量为90 [#] A级沥青

1.3 冷补沥青混合料配合比

合理的配合比是保证混合料使用性能的前提,目前国际上冷补沥青混合料配合比没有统一的标准。采用热拌沥青混合料的配合比设计,缺乏针对性,并不能体现冷补材料的特点。很多学者提出不同性能要求的配合比设计,以供借鉴和完善。配合比设计主要包括冷补沥青的选择、矿料级配设计以及最佳油石比确定。

冷补液材料主要根据研究目的及性能提升目标进行选择。级配选择主要根据当地交通情况和《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)推荐的级配设计。表3为4种中国常见的级配设计方法。

表3 级配设计常见方法

研究者	采取方法	特点
李延猛 ^[33]	常规设计、贝雷法检验	可检验设计级配的密实性与骨架性
李青 ^[34]	分形理论	建立分形维数与路用性能之间的联系
黄东等 ^[35]	嵌锁骨架设计	以嵌锁能力和抗剪强度为原则进行优化
彭东波 ^[36]	SAC矿料级配设计方法	使矿料特征与级配建立关联

(1) 李延猛^[33]在常规的配合比设计方法基础上,采用了以粗集料为骨架,次级骨料依次填充,从而获得合理空隙率。并采用贝雷法检验完善矿料的级配设计,以此为基础提出简单有效的冷补料配合比设计方法。

(2) 李青^[34]采用分形预测模型级配设计方法,结合高低温试验和水稳定性试验结果,预测出路用性

能模型,根据满足路用性能的级配分形维数范围和路用性能技术指标,推演符合要求的级配分形维数 D 的范围,通过分形维数的理论公式推导出设计级配通过率公式,进行级配设计,该方法可以提高配合比设计效率。

(3) 黄东等^[35]提出嵌挤骨架级配,粗集料比例根据各档不同粗集料比例下不同冷补沥青掺量对应的 R_{CBR} 值(加州承载比)为标准选择;细集料比例根据同济大学提出的百分率递减系数 I 作为参数级配组成计算方法为基础进行选择。不同 I 值与不同冷补液掺量条件下,以抗剪强度最优为标准选择最佳细集料级配。检验得出嵌挤骨架级配混合料比规范级配混合料的高温性能有所提升。

(4) 彭东波^[36]采用SAC矿料级配设计方法,将矿料与设计级配建立体积关系方程,并通过级配检验方程得到混合料颗粒间的接触情况,以确定混合料空隙率在工程中是否合适,并进行相应调整。

苏联、加拿大和美国提出3种经典矿料设计,如图1~3所示。中国常见矿料级配如图4所示。

由图1~4可知:苏联经典级配为骨架悬浮型结构,矿粉用量达到20%以上,导致此类混合料比表面积大,与冷补液的接触更加充分,使其易于汇集成团,难以拌和,使得施工和易性受到影响^[37]。美国级配形式为骨架密实型结构,矿粉用量为6%,优点是空隙率小,耐久性好,缺点是强度成型慢,封闭交通时间长^[38]。加拿大级配形式为骨架空隙型结构,矿粉用量为2%,优点是存储性好,工作性好,粗集料接

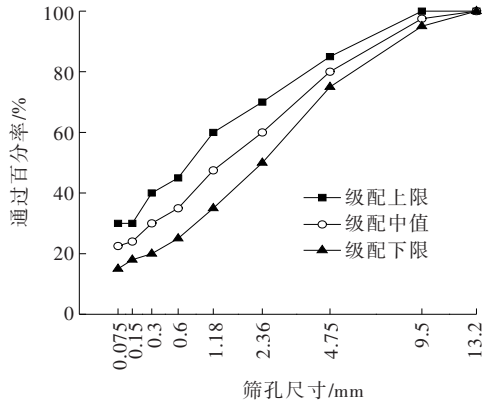


图1 苏联矿料级配

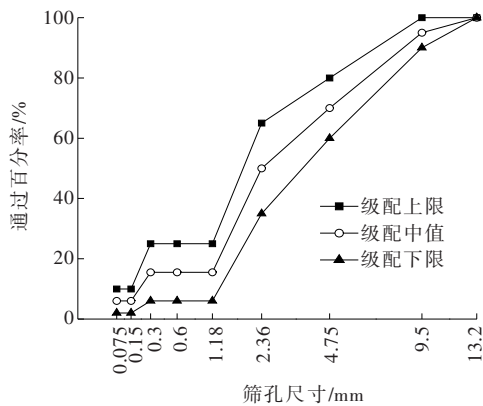


图2 美国矿料级配

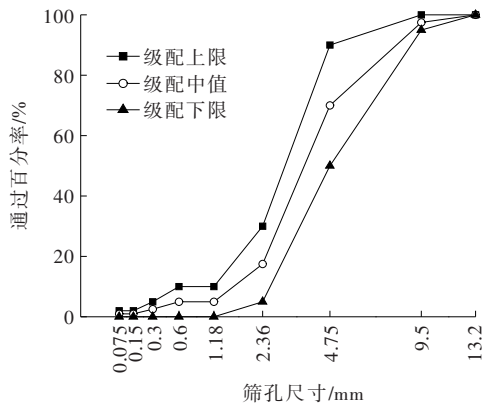


图3 加拿大矿料级配

触紧密使初始强度高,其空隙率大,使得稀释剂的挥发速率加快,利于成型强度快速形成,但也导致了受水的影响增大,水稳定性差^[39]。中国常见的矿料级配设计有LB-13、AM-13对应骨架空隙结构,AC-13对应骨架密实结构,SMA-13对应悬浮密实结构。其中LB型结构级配在性能测试中表现最佳,规范推荐LB级配^[40],由此可见,由于细集料和矿粉的含量不同,使得混合料级配产生差异,并且影响整体性能,其中矿粉用量可通过施工和易性与25℃强度确定^[41]。

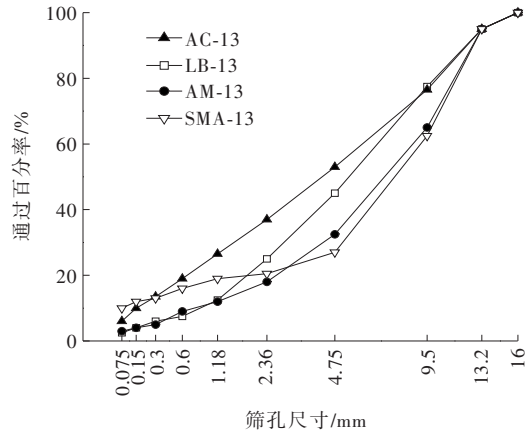


图4 中国沥青混合料常见矿料级配

常用冷补沥青混合料油石比确定方法有两种:
① 马歇尔试验方法,通过对比不同油石比成型试件的试验指标,如空隙率、毛体积密度、马歇尔稳定度、饱和度、矿料间隙率等,其中满足各项技术要求的为最佳油石比,并通过路用性能检验计算结果;② 经验法,加州经验公式^[42]通过集料级配和附着于集料表面的沥青膜厚度确定最佳油石比;同济大学经验公式^[43]通过各粒径集料的质量百分比确定最佳油石比,辅以纸迹试验进行验证。稀释剂和添加剂的掺配比例没有明确规定,需综合考虑路用性能以及强度要求进行试验对比最终确定用量。

乳化型冷补沥青混合料油石比首先要确定水性环氧-乳化沥青的配方,通常考虑环氧-乳化沥青混合物相容性,以静置后是否出现分层、离析和成膜效果评估,结合不同固化剂掺量比例下混合物黏结强度综合评定选取最佳配比。混合料的稳定度、密度、流值、空隙率等指标作为辅助指标。冷补液用量根据交通部阳离子乳化沥青课题协助组^[44]配合比设计方法确定,见式(1):

$$P = 0.06A + 0.12B + 0.2C \quad (1)$$

式中: P 为乳液占矿料干重质量的百分比(%); A 、 B 、 C 分别为粒径大于2.5 mm、2.5~0.074 mm、小于0.074 mm矿料占全部矿料总量的百分比(%)。

2 冷补沥青混合料性能评价

2.1 施工和易性评价

良好的施工和易性是冷补沥青混合料施工的前提。施工和易性评定方法一般采用简单的经验法评

价工作性能。何雄刚^[45]采用松散率试验、摊铺阻力试验以及初始马歇尔稳定度试验共同评价冷补沥青混合料施工和易性。影响混合料施工和易性的因素有沥青种类及用量、稀释剂的种类及用量、级配类型和温度等^[33]。由于施工和易性与黏聚性存在矛盾,研究者不宜为追求混合物的黏聚性而忽略施工和易性,二者应综合考虑。

2.2 强度性能评价

为确保坑槽修补后不会出现二次破坏,即要求冷补材料具有相应的强度。冷补沥青混合料强度与材料、配比、养生条件、行车荷载等密切相关。强度主要是由沥青黏性与矿料骨架共同提供,但不同类型冷补料的强度形成机理不同,都呈现时间性,所以分为初始强度和成型强度,评价方法为马歇尔试验。现行马歇尔试验是按热拌沥青混合料设计,并不能全面适应冷补材料,由于冷补材料中稀释剂和添加剂的存在,需相应调整试验方法,如减短养生时间、

降低水浴温度或取消水浴等。

2.2.1 初始强度

摊铺初期冷补沥青黏度小,黏结力作用较小,此时强度由骨架效应以及坑槽侧向约束提供,大粒径级配内摩擦角更大,相应初始强度更好。树脂、SBS和抗剥落剂可以有效改善沥青的黏度进而提升混合料初始强度。盖卫鹏等^[46]对比不同温度条件下冷补混合料初始强度发现低温环境(-30~5℃)初始强度比常温环境(5~30℃)高。因为低温条件下沥青活性降低,流动性差,黏结作用要强于常温环境。

2.2.2 成型强度

在修补完成通车服役过程中,冷补沥青混合料要承受车辆荷载作用,产生累积损伤和性能退化,因此研究成型强度及影响因素对冷补沥青混合料的服役状态和施工技术的完善有重要意义。表4为影响成型强度因素研究结果。

表4 影响成型强度因素研究结果

材料类型	研究者	研究因素	研究结论
溶剂型	邢雪婷 ^[3]	添加剂	矿质黏土作为添加剂时,拌和分散于混合料之中使基质沥青呈现更多的不规则条纹,增加混合料比表面积,增强界面黏性,使得强度增大
	马全红等 ^[47]	稀释剂	3种不同稀释剂成型强度差异较大,其中重油与沥青同为石油提炼物,可使稀释后的沥青混合物性质稳定,成型强度表现更为优秀
	杨亮等 ^[48]	填料	无机填料可以增加混合料的比表面积,使得混合料中结构沥青增多,自由沥青减少,黏聚能力增强,混合料的成型强度得到提升,硅灰对冷补料成型强度提高最为显著
	凌海宇等 ^[24]	稀释剂 树脂	轻油稀释与润滑作用,植物油可降低软化点但不降低黏性和延性,树脂有固化作用,可以加速强度的形成
	顾成 ^[49]	空隙率	通过PFC ^{3D} 模拟混合料成型过程,发现混合料空隙率越大,成型强度越大,空隙率有利于冷补料强度增长,并提出了“设计空隙率”作为评定强度的指标
乳化型	苏正扬 ^[50]	养生时间	采用车辙试验研究不同养生时间条件下的冷补材料的强度变化,溶剂型冷补材料的抗剪强度在7d后仍有增长趋势,乳化型和反应型在7d内强度趋于稳定
	毕研秋 ^[51]	养护条件成型 方式	增加击实次数有助于强度形成,60℃浸水30min的稳定度可作为环氧乳化沥青混合的成型强度评定标准
	杨帆 ^[52]	测试方法 环氧树脂掺量	采取拉拔试验和剪切试验来测试其强度,水性环氧树脂的掺量影响了环氧沥青胶结料中网络结构发达程度和固化效果
反应型	张俊等 ^[53]	成型方法	采取二次击实将提升乳化冷补沥青混合料的成型强度,并且60℃条件养生48h将更好地模拟实际路面使用情况
	李璐等 ^[54]	反应溶剂	反应溶剂中预聚体形成的固化空间结构是反应型冷补混合料强度形成的关键

各国对溶剂型冷补沥青混合料研究较多,但是没有形成标准规范,强度要求不尽相同,中美日三国溶剂型冷补混合料的强度大小如图5所示。

各国基本要求初始强度大于2.0kN,成型强度大于5kN。由图5可知:长安大学^[29]通过正交试验得到材料的最佳比例,进而研制出新型溶剂型冷补沥青

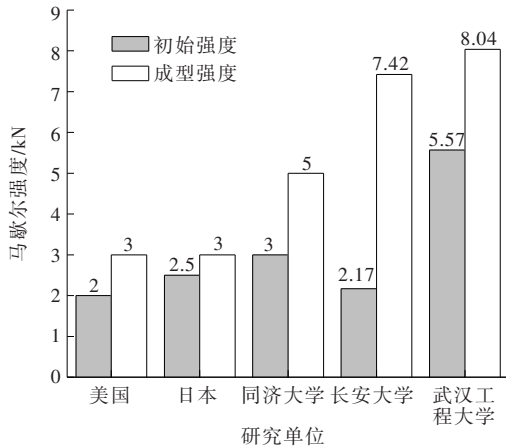


图5 中美日三国溶剂型冷补料强度对比

液,通过马歇尔试验测试出初始强度为2.17 kN,成型强度为7.42 kN,皆满足普遍要求,通过实地工程对其强度和路用性能进行检验,表现良好。杨亮等^[48]通过添加无机填料,使其与水发生化学反应,形成网状结构,自由沥青减少,结构沥青增多,黏结作用增大,混合料强度提升。

反应型冷补沥青混合料近年自主研发产品强度对比如图6所示。

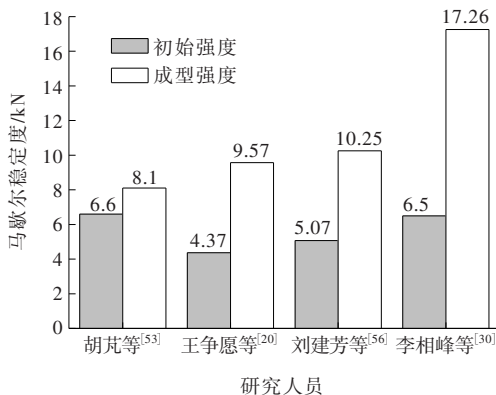


图6 反应型冷补料马歇尔强度

由图6可知:在4种反应型冷补沥青混合料制备条件相同情况下,不同级配和材料选择对强度的形成起了关键作用,反应型冷补材料强度依靠有机溶剂之间的化学反应,快速形成强度。并且初始强度均大于3 kN,成型强度达到8 kN以上,符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中马歇尔试验稳定度宜不小于3 kN规定,说明反应型冷补沥青混合料强度超过传统热拌沥青混合料,完全可以满足交通荷载要求。其中胡芑等^[55]自主研发的反应型冷补材料,26%稀释剂含量时此材料发挥最大强度,

初始强度6.6 kN、成型强度8.1 kN。王争愿等^[20]在混合料中混入40%的RAP材料,RAP在固化剂的“火山灰效应”产物影响下,接触面产生润湿和吸附作用,黏聚力得到提升,马歇尔强度在平均水平之上。刘建芳等^[56]提出一种新型反应型冷补沥青混合料,通过不同级配比较得到在LB-10级配下发挥其最佳状态,初始强度5.07 kN,成型强度10.25 kN,并且其他性能也符合热拌沥青混合料的指标要求。李相峰等^[30]研发高性能反应型冷补沥青混合料,其初始强度为6.5 kN,成型强度为17.26 kN。

2.3 耐久性评价

冷补沥青混合料在开放交通后,需要承受沥青老化、剥落、水损害作用、高温作用,通称为耐久性。

2.3.1 沥青老化

采用压力老化试验(PAV)和旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)评定沥青或者改性沥青的老化特点。Dong等^[57]对冬季条件下冷补料耐久性采用滚动筛试验、水分敏感性试验和荷载轮试验进行评估,其中水分敏感性试验测试混合料抗冻融性,用抗拉强度 S_t 和抗拉强度比 R_{TSR} 进行表征。ASTM通过大量试验提出冻融饱和度为70%~80%条件下,最能反映实际环境条件。荷载轮试验使用沥青路面分析仪测试修补材料的抗变形能力,通过对比得出单一级配的细集料可以用于裂缝填充,但抗变形能力不佳,对具有较粗和坚固骨架的修补材料,建议降低车轮载荷并改进压实试验以提高测试的有效性。

2.3.2 黏聚性

坑槽修补后会因为黏聚力弱和黏附性差等原因,出现集料与胶结料分离剥落现象。溶剂型冷补材料常用水煮试验、方孔筛黏聚力试验评价。水煮法试验要求黏附性评价指标裹附面积不低于95%。方孔筛黏聚力试验在4℃时,冷补沥青混合料破损率不得高于40%。王佳旭^[58]设计黏聚性试验采用在车辙板坑槽试件上模拟车辆荷载然后称取车辙试件并求出剥落质量损失率进行性能评定,试验发现修补坑槽较浅有利于提升抗剥落性。乳化类冷补材料测量黏附性方法有肯塔堡飞散试验和《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中阳离子乳化沥青与集料黏附性试验,水性环氧-乳化沥青体系中环氧树脂是热固性材料,固化后强度高并且黏结性好,分子结构中有极性基团可加强乳化沥青黏

附,并通过压实骨料嵌挤,使得集料相互黏结更加密实。

2.3.3 水稳定性

水稳定性直接影响沥青路面使用寿命和性能,评价方法分为两种:①评价沥青与集料的黏附性;②采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验进行评定^[59]。冷补材料参考普通热拌沥青混合料性能指标标准,浸水马歇尔残留稳定度不小于75%,冻融劈裂强度比不小于70%。邓吉升^[60]采用沥青裹覆率之比评定混合料水稳定性,进行冻融循环材料的沥青裹覆率 P_1 与未进行冻融循环材料的沥青裹覆率 P_2 之比 P 来评定。材料的选择对水稳定性影响较大,其中填料石灰影响效果明显,研究发现高温养生条件下石灰可以增强混合料的黏附性进而提高水稳定性。国内外大量研究发现消石灰用量1%时沥青混合料水稳定性效果最佳。

3种环氧-乳化沥青^[52,61-62]冷补料浸水马歇尔试验结果如图7所示。

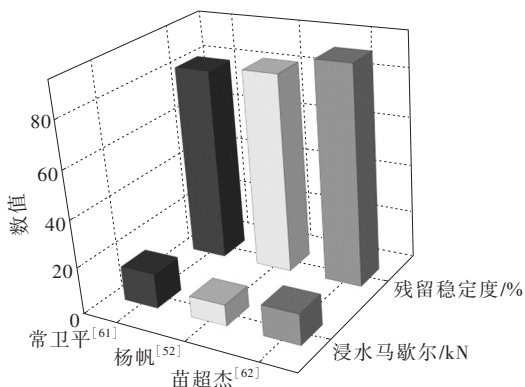


图7 水性环氧乳化沥青混合料的浸水马歇尔试验对比

由图7可得:3种冷补料的残留稳定度均大于75%,符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)要求。由于环氧树脂固化反应形成三维网络结构,改善冷补沥青混合料的黏结力,使得黏附性增强以及混合料空隙率减小,水分置换受阻,从而水稳定性良好。

2.3.4 高低温性能

目前常用车辙试验测试混合料的高温稳定性,以动稳定度进行评定,由于快速养生不能真正反映冷补料实际强度效果,所以冷补料高温稳定性试验需要修正使其达到真实效果。低温抗裂性采用小梁弯曲试验评定。目前中国对冷补料高低温性能研究

较少,缺乏相应的理论和技术支持。图8为3种水性环氧-乳化沥青冷补料高低温性能试验结果。

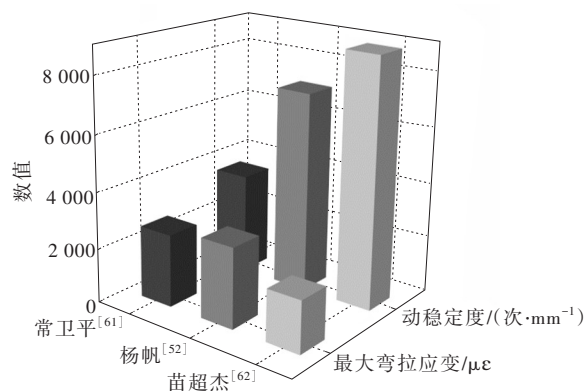


图8 水性环氧乳化沥青混合料高低温性能试验对比

由图8可得:3种混合料均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)弯拉应变不超过2000 $\mu\epsilon$ 、动稳定度大于2800次/mm的要求。环氧树脂固化反应形成三维网络结构改善混合料的黏结力,高温条件下加速环氧树脂的固化速度,并提供抗变形能力。由于环氧树脂刚性得到继承,混合料低温刚性表现明显,使得低温抗裂性差。常卫平^[61]提出掺水量会对性能产生影响,其中水稳定性和低温性能影响最大,高温性能受掺水量影响较小,综合3种性能得到最佳掺水量为20%。

3 结论与展望

从材料选择、配合比设计和路面性能评价3方面对冷补沥青混合料研究与发展进行总结,结论如下:

(1) 阐明了现行冷补沥青混合料的种类、成型作用机理以及优缺点。原材料选择、矿料组成设计、最佳油石比确定以及混合料内部材料性质的改变对于冷补料性能提升至关重要。介绍了4种级配设计方法并归纳了各自特点,同时横向对比了3种经典级配,发现折线型级配具有更好的路用性能。

(2) 冷补沥青混合料性能评价标准一直是世界的难题,本文阐述了冷补沥青混合料所需的性能评价要求以及影响因素。混合料性能所受影响多为材料种类、成型方法、养生方法、级配选择等方面;很多专家学者从施工和易性、强度性能方面明确了混合料性能特征。

现阶段更多是对冷补材料的开发研制以及施工工艺的研究,力求得到性价比高的冷补材料,对于冷补沥青混合料的研究在材料选择、不同材料最佳配合比和施工工艺方面趋于成熟,但是也忽略了理论层面与实际性能之间关联性的研究,对未来冷补技术研究的问题与展望如下:

(1) 目前对冷补技术的研究主要围绕材料的选择,新产品开发等方面,而对影响冷补沥青混合料路用性能的材料组成的交互作用、影响力学行为的性能形成演变规律以及坑槽修补二次破坏机理缺乏系统、完善研究。

(2) 对冷补材料的微细观特征与宏观路用性能关联联系研究,进一步建立定量本构模型等对深入了解冷补材料的耐久性很有必要。

(3) 加强水分、动荷载、温度变化等多场耦合作用下冷补材料服役模拟试验方法,老化机理以及使用寿命预测等研究,为冷补材料养护修补技术提供指导。

参考文献:

- [1] 韩传玉,袁英爽. 沥青路面坑槽破坏快速修补技术研究[J]. 中外公路,2013,33(6):59-63.
- [2] 郝尧生,刘兴东. 高速公路沥青路面坑槽病害成因与处治[J]. 中外公路,2012,32(3):118-120.
- [3] 邢雪婷. 冷补沥青混合料的制备及其性能研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [4] KRISHNAN J M, RAJAGOPAL K R. On the mechanical behavior of asphalt[J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37(11):1085-1100.
- [5] 张涛. 冷拌冷铺沥青混合料的研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [6] 孙鹏. 改性沥青混凝土材料的研究与应用[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [7] 王悦. 新型乳化沥青混合料及修补技术研究[D]. 西安:长安大学,2011.
- [8] ESTAKHRI C K, BUTTON J W. Test methods for evaluation of cold-applied bituminous patching mixtures[J]. *Transportation Research Record*, 1997, 1590(1):10-16.
- [9] ORUC S, CELIK F, AKPINAR M V. Effect of cement on emulsified asphalt mixtures[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, 16(5):578-583.
- [10] ANDERSON A, DUKATZ E L, PETERSCN J C. The effect of antistripping additives on the properties of asphalt cement[J]. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 1982, 51:298-317.
- [11] ROSALES-HERRERA V A, PROZZI J A. Mixture design and performance-based specifications for cold patching mixtures[R]. Austin: Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, 2007, 47(73):91-95.
- [12] CHATTERJEE S, WHITE R P, SMIT A. Development of mix design and testing procedures for cold patching mixtures[Z], 2006.
- [13] 王黎明,谭忆秋,石振武,等. 基于冲击贯入法的温拌沥青混合料合理压实温度的确定[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013,43(6):1494-1499.
- [14] 程培峰,范平. 矿料级配对温拌橡胶沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技,2014,31(3):32-37.
- [15] 延西利,金晓晴,李金永. LB冷拌冷铺沥青及其路面修补技术研究[J]. 公路,2005,50(8):147-151.
- [16] 吕伟民. 乳化沥青冷再生技术关键与应用前景[J]. 石油沥青,2009,23(3):29-34.
- [17] 毛玮芸. 冻土地区沥青路面冷补材料路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2005.
- [18] 周玉利,王亚玲,颜祖兴,等. AH型冷补混合料的研制与施工质量控制[J]. 中外公路,2011,31(4):274-277.
- [19] 吴恙,王彬. 反应型冷补料与溶剂型冷补料路用性能对比研究[J]. 公路与汽运,2022(1):95-98.
- [20] 王争愿,李九苏,娄梦雷,等. RAP掺量对反应型冷拌再生沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(4):35-41.
- [21] 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,2013,29(2):17-21.
- [22] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [23] 杨彦海,闫义钛,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.
- [24] 凌海宇,韩冰,胡师杰,等. 稀释剂和改性剂掺量对冷补沥青性能的影响研究[J]. 公路,2017,62(7):253-258.
- [25] 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.
- [26] 徐文远,李文赛,夏冬. 坑槽修补中冷补料级配及冷补添加剂[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(12):1463-1469.
- [27] 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(1):89-94.
- [28] 耿立涛,王丽艳,姜成岭,等. 溶剂型冷补沥青及冷补沥青混合料的性能评价[J]. 建筑材料学报,2020,23(5):

- 1177-1182,1191.
- [29] 张争奇,许铖,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,2016,13(9):1728-1736.
- [30] 李相锋,李璐,盛兴跃.沥青路面高性能反应型冷补料的路用性能研究[J].山西建筑,2013,39(16):100-101.
- [31] 朱东浩,丘俊锋,许龙,等.一种速凝乳化沥青冷补料及其制备方法:中国,201911381517.9[P].2020-05-08.
- [32] 耿继光,徐琦,祝晓磊,等.一种纳米改性沥青冷补料及其制备方法:中国,201910779784.5[P].2019-10-29.
- [33] 李延猛.高性能冷补沥青混合料材料组成与性能评价[D].西安:长安大学,2013.
- [34] 李青.冷补沥青混合料配合比设计方法研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2017.
- [35] 黄东,曹帆,薛金顺,等.冷补沥青混合料嵌锁骨架级配及其性能研究[J].中外公路,2018,38(1):279-283.
- [36] 彭东波.冷补沥青混合料矿料级配研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [37] 金晓晴.LB(冷拌冷铺)沥青及其路面修补技术研究[D].西安:长安大学,2005.
- [38] MAHER A, GUCUNSKI N, PETS F, et al. Evaluation of pothole patching materials[R], Report No. FHWA 2001-02, Federal Highway Administration, Washington, D. C., USA, 2001.
- [39] BISWAS S, HASHEMIAN L, 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.
- [40] 陈平.新型高性能坑槽冷修补材料研究与设计[D].西安:长安大学,2019.
- [41] 盖卫鹏.冷补沥青混合料养护技术研究[D].西安:长安大学,2010.
- [42] 姚海臣.沥青路面混合料冷补技术机理研究与应用[D].长春:吉林大学,2009.
- [43] 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,2010,32(14):79-82.
- [44] 庞世华.环氧乳化沥青冷补混合料及应用研究[D].西安:长安大学,2013.
- [45] 何雄刚.冷施工坑槽修补料工作性评价指标研究[J].中外公路,2018,38(4):84-88.
- [46] 盖卫鹏,韩微微.溶剂型冷补沥青混合料强度参数评价及指标研究[J].山西建筑,2017,43(9):103-104.
- [47] 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.
- [48] 杨亮,孟文专,王学华,等.无机填料对冷补沥青混合料强度的影响[J].武汉工程大学学报,2011,33(11):47-51.
- [49] 顾成.冷补沥青混合料的结构特性及试验评价[D].南京:东南大学,2017.
- [50] 苏正扬.冷拌沥青混合料强度增长特性研究[J].山西交通科技,2016(3):16-18,28.
- [51] 毕研秋.冷补环氧乳化沥青混合料研究[D].西安:长安大学,2015.
- [52] 杨帆.水性环氧乳化沥青冷补料及其路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [53] 张俊,楚好,逯艳华,等.乳化沥青冷补料成型、养生和试验方法研究[J].中外公路,2014,34(4):268-271.
- [54] 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,2015,40(2):83-86.
- [55] 胡芑,阮玉非,张伟,等.反应型冷拌沥青混合料的制备与强度性能研究[J].施工技术,2016,45(S1):373-375.
- [56] 刘建芳,李九苏,杨帆,等.反应型冷拌沥青混合料制备及性能研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):16-21.
- [57] DONG Qiao, HUANG Baoshan, ZHAO Sheng. Field and laboratory evaluation of winter season pavement pothole patching materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(4): 279-289.
- [58] 王佳旭.冷补沥青混合料设计及其耐久性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [59] 张勇.水性环氧乳化沥青混合料路用性能研究[J].中外公路,2017,37(5):289-293.
- [60] 邓吉升.冷补沥青混合料路用性能评价及其影响因素分析[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [61] 常卫平.水性环氧乳化沥青的应用研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- [62] 苗超杰.基于水性环氧-乳化沥青的坑槽冷补料研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.