

SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能研究

孙华东^{1,2}, 范维玉¹, 时敬涛³, 李玉环³,
赵品晖¹, 梁 明¹, 刘树俊¹, 李 军¹

(1. 中国石油大学重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 大连环资科技有限公司, 辽宁大连 116100;
3. 中石油燃料油有限责任公司研究院, 北京 100142)

摘要:针对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料的特点,建立基于断裂能理论的黏附性能评价方法,考察不同黏附性助剂对灌缝料黏附性能的影响,并探讨其作用机制。研究结果表明:水性丙烯酸树脂类助剂(AR)和丁苯胶乳类助剂(SBR)能够显著提高灌缝料与原路面间的拉伸断裂能和剪切断裂能,且随着助剂用量的增加断裂能增加;AR 通过提高灌缝料与原路面间的极限力值对断裂能产生影响,且 AR 的加入主要提高了沥青组分的极限拉伸力值和水泥砂浆组分的极限剪切力值;SBR 通过提高灌缝料与原路面间的极限位移对断裂能产生影响,且 SBR 的加入主要提高了沥青组分的极限拉伸和剪切位移。

关键词:灌缝材料;黏附性能;助剂;断裂能;极限位移;极限力值

中图分类号:TE 626.86

文献标志码:A

引用格式:孙华东,范维玉,时敬涛,等. SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):159-165.

SUN Huadong, FAN Weiyu, SHI Jingtao, et al. Study on adhesive property of SAC-sealant for cracks in asphalt pavement [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(5):159-165.

Study on adhesive property of SAC-sealant for cracks in asphalt pavement

SUN Huadong^{1,2}, FAN Weiyu¹, SHI Jingtao³, LI Yuhuan³,
ZHAO Pinhui¹, LIANG Ming¹, LIU Shujun¹, LI Jun¹

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Dalian Huanzi Technology Limited, Dalian 116100, China;
3. PetroChina Fuel Oil Company Limited Research Institute, Beijing 100142, China)

Abstract: On the basis of the characteristics of SAC-sealant, an adhesion performance evaluation method based of the fracture energy theory was established. The effects of different additives on the adhesive performance of sealant were investigated, and mechanism was studied as well. The results indicate that the tensile and shear fracture energy between SAC-sealant and the original pavement can be greatly improved by the addition of AR and SBR compared to other additives. And there is a positive correlation between the fracture energy and the amount of AR or SBR. The fracture energy between SAC-sealant with AR and the original pavement is mainly affected by the improvement of ultimate bond value. The addition of AR improves the ultimate tensile value of asphalt component and the ultimate shear value of cement mortar component. The fracture energy between SAC-sealant with SBR and the original pavement is mainly affected by the improvement of the ultimate displacement. The addition of SBR improves the ultimate tensile and shear displacement of asphalt components.

Keywords: filling material; adhesive performance; additive; fracture energy; ultimate displacement; ultimate value

收稿日期:2016-03-25

基金项目:中石油燃料油公司项目(ZYRLY-YJY-2014-JS-21);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2014NJ010)

作者简介:孙华东(1984-),男,博士,研究方向为道路沥青材料。E-mail:sunhuadong2004@163.com。

通讯作者:赵品晖(1985-),男,博士后,研究方向为道路沥青材料、沥青基微纳米碳材料。E-mail:zhaopinhu08@163.com。

裂缝是沥青路面普遍存在的病害形式^[1-2]。及时处理裂缝能降低道路养护成本、延长道路使用寿命,而且能够提高行车的舒适性和安全性^[3-5]。裂缝的处理方法有稀浆封层、微表处、罩面、灌缝、贴缝等^[6-8],其中灌缝处理由于操作简单、性价比高,应用最为广泛^[9]。现有的灌缝材料普遍存在价格昂贵、施工复杂、环境污染、自身强度差和黏结性差等问题^[10-13]。范维玉等^[14-17]开发了一种以乳化沥青和无机胶结料为主要成分的有机无机复合灌缝料-SAC型沥青路面冷灌缝材料,具有价格低廉、施工便捷、节能环保等优点。笔者在前期研究工作的基础上,建立灌缝料黏附性能评价方法,选取8种黏结力改性助剂,考察助剂的种类和用量对灌缝料黏结性能的影响,并探讨不同黏结性助剂对灌缝料黏附性改善机制。

1 试验

1.1 试剂材料

SAC型沥青路面冷灌缝材料主要原料:乳化沥青(阳离子慢裂快凝型乳化沥青,其制备方法见参考文献^[17]);无机胶结料(水泥、石英砂、膨胀剂等);功能性助剂(减水剂、消泡剂、早强剂)。

黏结力改性助剂。硅烷偶联剂类:KH-1,氨基官能团硅烷,相对分子质量221;KH-2,环氧基官能团硅烷,相对分子质量236;KH-3,甲基丙烯酰氯基硅烷,相对分子质量248。水性环氧树脂类:ER-1,环氧当量190~220 g/eq,含量(50±2)%;ER-2,环氧当量480~520 g/eq,含量(45±2)%;ER-3,环氧

当量1600~2000 g/eq,含量(40±2)%。水性丙烯酸树脂类:AR,pH=4~5,含量63%~65%。丁苯胶乳类:SBR,pH=10,含量69%。以上材料均购自国药集团。

1.2 试验方法

SAC型沥青路面冷灌缝材料的制备。按照文献^[17]中的流程制备SAC型沥青路面冷灌缝材料,首先将助剂加入到液体材料中拌合均匀后再与固体材料一起拌合制成SAC型沥青路面冷灌缝材料。除了助剂之外其他材料的配比为:沥青与水泥(骨料)比为0.80~0.95;减水剂、消泡剂、膨胀剂和早强剂等助剂的用量为水泥和砂子总量0.1%~5%。在考察黏结助剂影响时,其他组分配比不变。

2 结果分析

2.1 裂缝处灌缝材料受力分析及断裂评价

2.1.1 裂缝处灌缝材料实际受力分析及断裂判断标准

灌缝材料在服役过程中,在裂缝处主要受拉应力和剪应力作用^[6],其受力作用如图1所示。其中,由于气候温度的持续变化,路面裂缝随着路面的热胀冷缩产生缩小和扩大,使得处于裂缝处的灌缝材料受到拉应力作用(图1(a));而随着交通荷载的变化,如汽车驶近或驶离裂缝时,处于裂缝处的灌缝材料随着裂缝两边产生的错台变化受到剪应力作用(图1(b)),因此可以用拉伸黏附性能和剪切黏附性能作为灌缝材料黏附性能的评价指标^[18-19]。

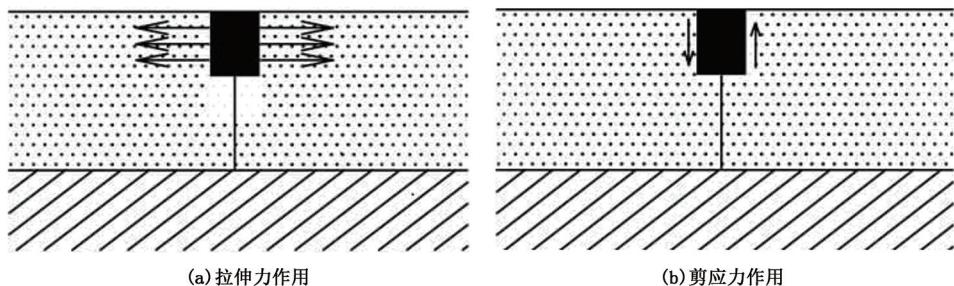


图1 裂缝处灌缝材料受力分析

Fig.1 Force analysis of crack filling material

此外,SAC型冷灌缝料在固化成型服役过程中属于具有一定强度和黏弹性的固体材料,因此可以利用固体材料的断裂力学对灌缝材料与原路面间的黏附力学进行研究,目前对固体材料有不同的判断断裂的准则^[20-24],主要包括能量释放率 G 和应力强度因子 K 等。但是,研究发现,用 G 和 K 作为固体

材料断裂的判断依据往往需要起裂准则,对于黏弹性的材料并不适用。Dugdale和Barrenblatt等^[25-26]提出了适用于黏弹性材料且不需要起裂准则的内聚力模型(CZM),提出判断断裂的3个重要参数,即极限位移 δ_{sep} 、极限力值 σ_c 和断裂能 G_F :

$$G_F = \int_0^{\delta_{sep}} \sigma(\delta) d\delta_0. \tag{1}$$

由式(1)可知,断裂能由 δ_{sep} 和 σ_c 决定。刘敬辉^[27]研究发现,基于能量法的内聚力模型能较好地模拟裂缝,解释了预裂缝技术的本质机制。

2.1.2 裂缝处灌缝材料断裂能评价体系的建立

对于一些灌缝料尤其是柔性灌缝料黏附性能的评价主要是基于拉伸循环后是否断裂,并未进行极限位移 δ_{sep} 、极限力值 σ_c 和剪切黏结力的测试^[28-30]。结合 SAC 型冷灌缝材料的特点,建立拉

伸、剪切实验测试系统,见图 2 和 3。其中,以水泥块模拟原有沥青路面,灌缝料填充在两个水泥块之间,将加入不同助剂材料制备的灌缝料灌注到水泥试块中间,养护 28 d,形成最终强度,进行拉伸试验和剪切试验。其中,极限拉伸力值 σ_{cT} 和极限剪切力值 σ_{cS} 为伺服万用试验机以 5 mm/min 的速度进行测试时得到的极限力值;极限拉伸位移 δ_{sepT} 和极限剪切位移 δ_{sepS} 为力值产生到减小为 0 时的位移差,通过式(1)计算分别得到拉伸断裂能 G_{FT} 和极限剪切断裂能 G_{FS} 。

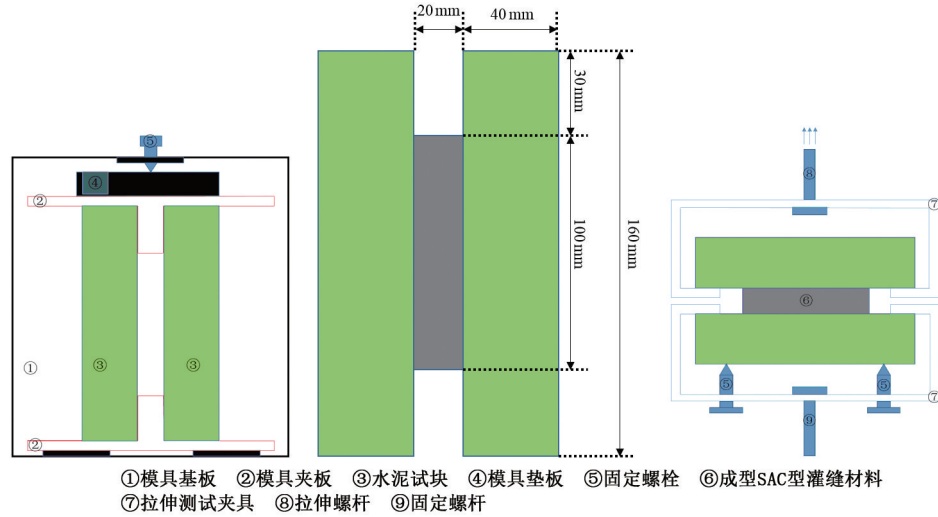


图 2 拉伸黏附性能测试模具、试块及测试

Fig. 2 Mold, block and test of tensile adhesive property

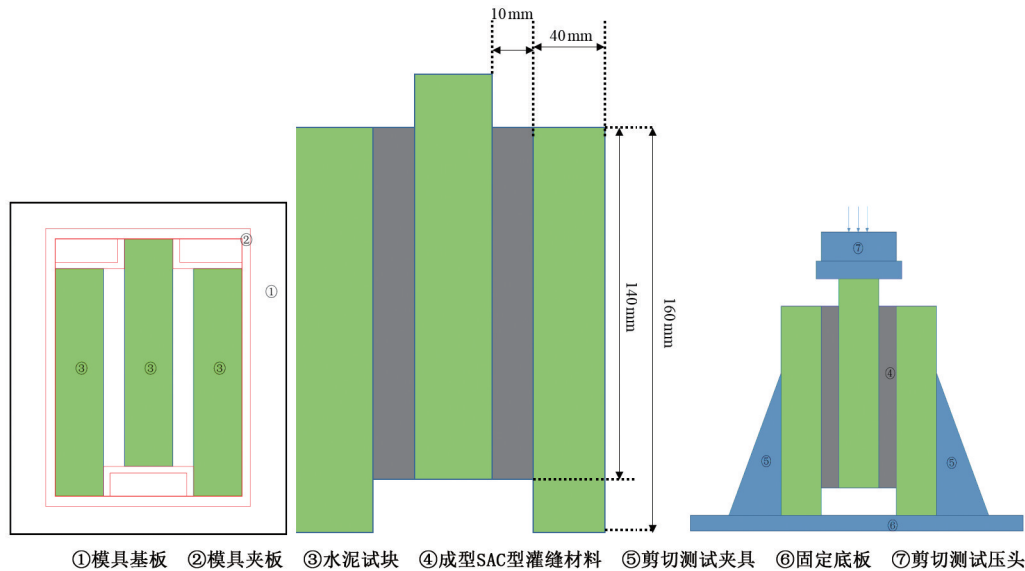


图 3 剪切黏附性能测试模具、试块及测试

Fig. 3 Mold, block and test of shear adhesive property

2.2 助剂类型对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能的影响

在其他条件一定,且助剂掺量为乳化沥青

2.5% 的情况下,考察助剂的类型对灌缝料黏附性能的影响,结果见图 4。由图 4 可知,在相同的助剂掺加量下,助剂的类型对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料

与原路面间的极限位移 δ_{sep} 、极限力值 σ_c 、断裂能 G_F 的影响程度不同,水性丙烯酸树脂类助剂(AR)和丁苯胶乳类助剂(SBR)能够显著提高灌缝料与原路面间的拉伸断裂能 G_{FT} 和剪切断裂能 G_{FS} 。添加助剂AR的SAC型沥青路面冷灌缝材料与不添加黏结助剂的空白组相比,其与原路面间的拉伸断裂能和剪切断裂能分别提高了151.84%和46.06%;而添加助剂SBR后灌缝料与原路面间的拉伸断裂能和剪切断裂能分别提高了185.74%和35.92%。同时,与其他黏附性助剂相比,助剂AR和SBR的价格更为便宜,因此这两种助剂作为提高SAC型沥青冷灌缝材料的黏附性具有很好的可行性。

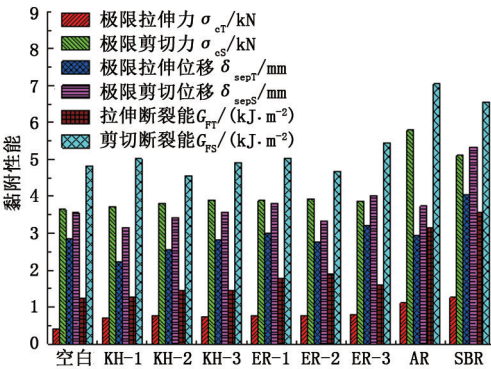


图4 助剂类型对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能的影响

Fig. 4 Effect of additive type on adhesive properties of SAC-sealant for cracks in asphalt pavement

2.3 助剂 AR 用量对冷灌缝材料黏结性能的影响及机制分析

在其他条件一定的情况下,考察助剂 AR 掺量在 0~4.5% 变化时对拉伸黏附性能和剪切黏附性能的影响。结果见图 5。由图 5 可知,随着 AR 掺量逐渐增大,SAC 型沥青路面冷灌缝材料与原路面之间的极限拉伸力值 σ_{eT} 、拉伸断裂能 G_{FT} 和极限剪切力值 σ_{eS} 、剪切断裂能 G_{FS} 均逐渐增大;而极限拉伸位移和极限剪切位移变化幅度较小。当 AR 掺量为 4.5% 时,极限拉伸力值、极限剪切力值、极限拉伸位移、极限剪切位移分别增加了 266%、82%、6% 和 9%。表明增加助剂 AR 的用量可以明显增大 SAC 型沥青路面冷灌缝材料的拉伸和剪切断裂能,从而有效地提高材料与原路面间的抗裂性能。从 AR 的掺加量对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料极限位移和极限力值的影响,并结合式(1)看出,AR 对断裂能的影响主要是通过其提高极限力值而不是通过

提高其极限位移来实现的。可能的原因是,黏结剂 AR 属于丙烯酸树脂类材料,材料中含有一定量的不饱和羧酸,其结构中的酸性基团与水泥试块接触界面处的碱性基团发生化学反应而形成牢固的结合面,从而提高 SAC 型沥青路面灌缝材料与原路面间的拉伸黏附性能^[31]和剪切黏附性能;同时由于酸碱反应而产生的气体的释放(如 CO₂ 等)导致灌缝材料自身孔隙率增大造成了接触界面处粗糙度增大。

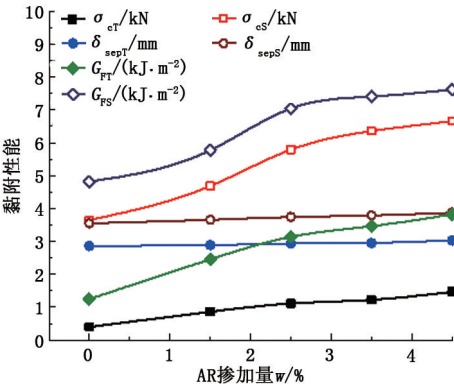


图5 助剂 AR 用量对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能的影响

Fig. 5 Effect of AR's content on adhesive properties of SAC-sealant for cracks in asphalt pavement

SAC 型沥青路面冷灌缝材料成型后属于一种由沥青、水泥及骨料组成的具有三维网络交叉结构的有机无机复合材料^[32],其与原路面接触界面处既存在沥青等有机材料也存在水泥砂浆等无机材料。

助剂 AR 掺加量对沥青组分、水泥砂浆组分与原路面间黏附性能的影响见图 6。由图 6 看出,随着助剂 AR 掺加量的逐渐增大,乳化沥青蒸发残留物(掺加助剂的乳化沥青水分蒸干且固化后的物质)与原路面之间的拉伸断裂能 G_{FT} 有明显增大趋势,极限拉伸力值呈现增大趋势但变化不明显,其他参数基本保持不变;掺加 AR 的水泥砂浆固化成型后(养护 28 d)与原路面之间的极限剪切力值 σ_{eS} 和剪切断裂能 G_{FS} 均呈现明显的增大趋势,而其他的参数基本保持不变。

综上所述,AR 的加入能够显著提高 SAC 型沥青路面冷灌缝材料与原路面之间黏附性能,其中对于拉伸黏附性能的影响主要通过提高沥青(乳化沥青破乳后的残留物)与原路面之间的极限拉伸黏附力值实现;对于拉伸黏附性能的影响主要通过提高水泥砂浆与原路面之间的极限剪切力值实现^[33]。

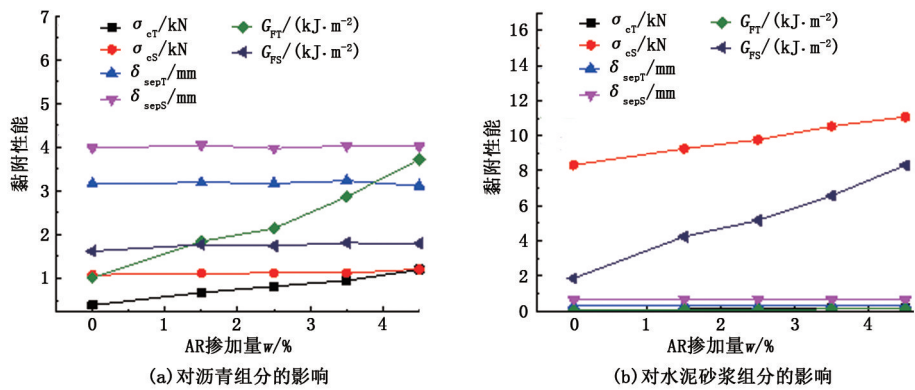


图 6 助剂 AR 用量对沥青组分、水泥砂浆组分黏附性能的影响

Fig. 6 Effect of AR's content on adhesive properties of asphalt component and cement mortar component

2.4 助剂 SBR 用量对冷灌缝材料黏结性能的影响及机制分析

助剂 SBR 掺加量对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能的影响见图 7。

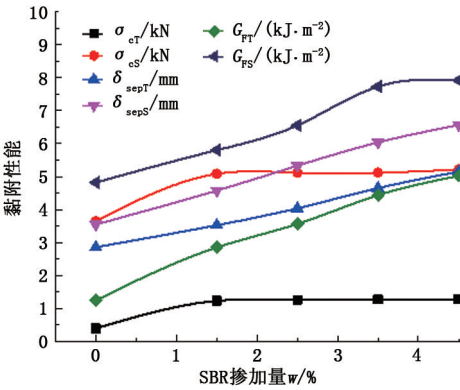


图 7 助剂 SBR 用量对 SAC 型沥青路面冷灌缝材料黏附性能的影响

Fig. 7 Effect of SBR's content on adhesive properties of SAC-sealant for cracks in asphalt pavement

从图 7 看出,随着 SBR 掺加量的增加(0 ~ 4.5%),拉伸断裂能和剪切断裂能显著增加,从而有效地提高材料与原路面间的抗裂性能;随着 SBR 掺加量的增加,极限拉伸位移和极限剪切位移明显增大,但极限拉伸力值和极限剪切力值基本保持不变。由式(1)可知,断裂能主要由极限力值和极限位移两个参数决定,所以在极限力值变化幅度不大的情况下,极限位移的增大导致断裂能的提高,因此 SBR 提高拉伸和剪切断裂能的根本原因在于提高了拉伸和剪切黏结测试时的极限位移。这是由于 SBR 胶乳属于橡胶,分子中不含有极性分子结构,所以不能与原路面界面处的水泥形成化学反应影响两者之间的力值,可能主要对沥青起作用。沥青用 SBR 胶乳改性时能够明显提高其韧性,提升延度(位移)^[34]。

助剂 SBR 的掺加量对沥青类有机组分和水泥砂浆类无机组分单独成型后与原路面之间黏附性能的影响结果见图 8。

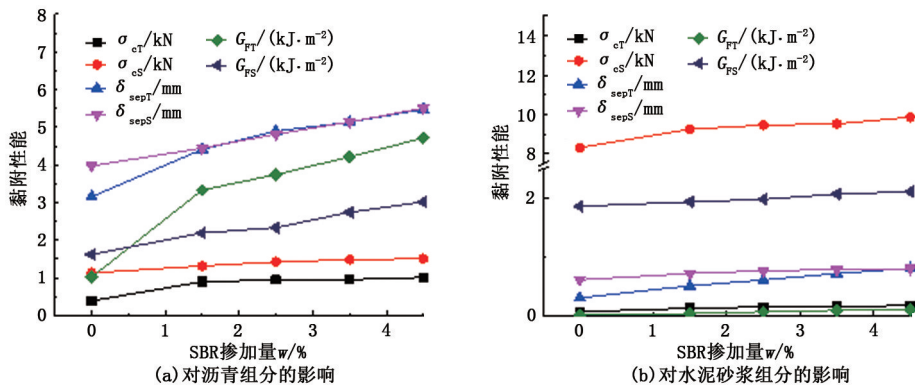


图 8 助剂 SBR 用量对沥青组分、水泥砂浆组分黏附性能的影响

Fig. 8 Effect of SBR's content on adhesive properties of asphalt component and cement mortar component

从图 8 看出,助剂 SBR 的加入对沥青组分与原路面之间的拉伸、剪切位移及拉伸、剪切断裂能的影响较大,而对极限拉伸力值和极限剪切力值影响较小;SBR 的加入对水泥砂浆与原路面间的极限断裂

能影响较大,而对极限拉伸力值和极限剪切力值影响较小;SBR 的加入对水泥砂浆与原路面间的极限断裂

力值、极限位移及断裂能有一定的影响但影响不大。SBR胶乳属于橡胶类材料,该类材料在沥青中的主要作用是改善沥青延度、提升沥青的韧性,从而使得加入助剂SBR后的乳化沥青蒸发残留物的拉伸、剪切位移显著增加。

3 结 论

(1)灌缝料在服役过程中主要受拉伸应力和剪切应力作用,由此建立基于内聚力模型的灌缝料黏附性能评价体系和方法。

(2)助剂的类型对灌缝料黏附性能的影响较大,水性丙烯酸树脂类助剂(AR)和丁苯胶乳类助剂(SBR)能够显著提高灌缝料与原路面间的拉伸断裂能和剪切断裂能,且随着助剂用量的增加断裂能增加。

(3)助剂AR提高SAC型沥青路面冷灌缝材料的拉伸断裂能和剪切断裂能通过提高极限力值得以实现,AR的加入提高了沥青组分的极限拉伸力值,同时提高了水泥砂浆组分的极限剪切力值。

(4)助剂SBR提高SAC型沥青路面冷灌缝材料的拉伸断裂能和剪切断裂能通过提高极限位移实现,对极限力值没有明显影响,SBR的加入提高了沥青组分的极限拉伸位移和极限剪切位移。

参考文献:

- [1] TAN Y Q, WANG H P, MA S J, et al. Quality control of asphalt pavement compaction using fiber Bragg grating sensing technology[J]. Construction and Building Materials, 2014,54:53-59.
- [2] AKIHIRO M, TOSHIRO J, TAKAAKI N, et al. Construction and pavement properties after seven years in porous asphalt with long life[J]. Construction and Building Materials, 2014,50:401-413.
- [3] 周辉. 高速公路沥青路面预防性养护研究[J]. 中外公路,2007,27(3):246-248.
ZHOU Hui. Research on preventive maintenance of expressway asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007,27(3):246-248.
- [4] 赵淑铭,刘亚娟. 高速公路沥青路面病害成因分析[J]. 公路交通科技,2013(7):24-26.
ZHAO Shuming, LIU Yajuan. Analysis on the causes of asphalt pavement distress of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013(7):24-26.
- [5] EPPS A. Design and analysis system for thermal cracking in asphalt concrete[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000,126(4):300-307.
- [6] 康敬东. 沥青路面裂缝和坑槽养护维修技术的研究[D]. 西安:长安大学,2002.
KANG Jingdong. Research on maintenance technology for asphalt pavement crack and pothole [D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.
- [7] 高艳丽,付丽琴,王玉顺,等. 高速公路沥青路面裂缝修补技术探讨[J]. 公路,2002(9):136-139.
GAO Yanli, FU Liqin, WANG Yushun, et al. Crack repair technology of asphalt pavement of expressway[J]. Highway, 2002(9):136-139.
- [8] 田莉,胡霞光. 美国沥青路面裂缝处治技术应用与研究进展[J]. 中外公路,2009(6):93-96.
TIAN Li, HU Xianguang. The research progress and application of asphalt pavement crack treatment technology in USA[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009(6):93-96.
- [9] CROVETTI J A, DARTER M I, JOHNSON K D, et al. Innovative materials and equipment for pavement surface repairs, volume (II): synthesis of operational deficiencies of equipment used for pavement surface repairs[R]. SHRP-M/UFR-91-505, 1991.
- [10] 黎力,吴芳. 自流平材料的应用发展综述[J]. 新型建筑材料,2006,4:7-11.
LI Li, WU Fang. Review on application and development of self-leveling materials[J]. New Building Material, 2006,4:7-11.
- [11] HEITZMAN M. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier[R]. Washington, D C: US Department of Transportation, 1992.
- [12] 张庆杰. 沥青路面裂缝填封和坑槽修补用密封胶的研制[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2009.
ZHANG Qingjie. Research on the sealants to be used to fill cracks and repair potholes in asphalt road[D]. Shenyang:Shenyang Ligong University,2009.
- [13] 常珍鹏. 沥青路面裂缝与密封胶灌缝处理[J]. 交通世界,2009(7):115-116.
CHANG Zhenpeng. Crack and sealant filling joint treatment of asphalt pavement[J]. Transport World, 2009(7):115-116.
- [14] 孙华东,范维玉,刘树俊,等. 有机黏结剂对沥青基灌缝材料黏结性能的影响[J]. 化学与生物工程,2014,31(9):55-58.
SUN Huadong, FAN Weiyu, LIU Shujun, et al. Effect of organic binders on cohesive force of asphalt-base crack repairing material[J]. Chemical and Bioengineering, 2014,31(9):55-58.
- [15] 孙华东,范维玉,唐自恒,等. 无机组分对冷灌缝材料

- 黏结力影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8): 1940-1944.
- SUN Huadong, FAN Weiyu, TANG Ziheng, et al. Effect of inorganic components on the cohesive force of the cold crack seal material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(8): 1940-1944.
- [16] 孙华东, 范维玉, 梁明, 等. 沥青基路面裂缝修补材料黏结性能影响研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(6): 92-95.
- SUN Huadong, FAN Weiyu, LIANG Ming, et al. The study of cohesive force of asphalt-base crack repairing material[J]. New Building Materials, 2014, 41(6): 92-95.
- [17] 范维玉, 孙华东, 张锐, 等. 一种用于路面裂缝修补的沥青基复合材料; ZL201310587172.9[P]. 2015-12-09.
- [18] TAN Y Q, GUO M, CAO L P, et al. Performance optimization of composite modified asphalt sealant base on rheological behavior[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 799-805.
- [19] JOAO M L, JORGE B. Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges[J]. Engineering Structures, 2009, 31: 1077-1084.
- [20] GRIFFITH A A. Phenomena of rupture and flow in solids[J]. Asm Transactions Quarterly, 1968, 61(4): 163-198.
- [21] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] IRWIN G R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(4): 361-364.
- [23] WELLS M J. Taste by touch-some experiment with octopus[J]. Journal of Experimental Biology, 1963, 40(1): 187-193.
- [24] RICE J R. A path independent integral and approximate analysis of strain concentration by notches and cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1968, 35(2): 379-386.
- [25] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [26] BARRENBLOTT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [27] 刘敬辉. 基于内聚力模型的预裂缝技术机制分析[J]. 公路交通科技, 2012, 29(7): 32-37.
- LIU Jinghui. Mechanism analysis of pre-cracking technique based on cohesive zone model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(7): 32-37.
- [28] ASTM D5329. Standard test methods for sealants and fillers, hot-applied, for joints and cracks in asphaltic and Portland cement concrete pavements[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [26] ASTM D5078. Standard specification for crack filler, hot-applied, for asphalt concrete and Portland cement concrete pavements[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
- [29] ASTM D6690. Standard specification for joint and crack sealants, hot applied, for concrete and asphalt pavements[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [29] ASTM D1190. Standard specification for concrete joint sealer, hot-applied elastic type[S]. West Conshohocken: ASTM International, 1997.
- [30] ASTM D1985. Standard practice for preparing concrete blocks for testing sealants, for joints and cracks[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [31] 李峰, 黄颂昌, 徐剑, 等. 沥青路面灌缝胶性能评价及技术要求[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 7-11.
- LI Feng, HUANG Songchang, XU Jian, et al. Performance evaluation and technical requirement of sealant and filler in asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(2): 7-11.
- [32] 农金龙. 聚合物改性水泥基黏结复合材料的黏结性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- NONG Jinlong. Study on bonding performance of polymer-modified cement-based bonding composite[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [33] 沈凡. 水泥-乳化沥青-水性环氧复合胶结钢桥面铺装材料研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- SHEN Fan. Research on composite steel bridge deck pavement of cement-emulsifying asphalt and waterborne epoxy[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [34] ZHANG F, YU J Y. The research of high-performance SBR compound modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24: 410-418.

(编辑 刘为清)