

灌注式复合路面中的水泥浆-沥青界面粘附行为的作用机制

王敬元¹, 洪锦祥^{1,2}, 张 宇¹, 熊子佳³, 张云升¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 南京 211103;
3. 东南大学交通学院, 南京 210018)

摘 要: 为探究灌注式复合路面中水泥基灌浆料-沥青胶凝体系界面微尺度粘附行为的作用机制, 根据实际界面形成过程设计了实验室界面成型工艺, 采用拉拔试验探究了环境温度、水泥基灌浆料类型和沥青类型对水泥浆-沥青界面粘结特性的影响。利用扫描电子显微镜、能谱仪和 Fourier 红外光谱仪研究了水泥浆-沥青界面过渡区的微观形貌与结构特征, 采用接触角分析仪评价了水泥基灌浆料与沥青的浸润能力, 揭示了水泥浆-沥青界面粘附行为的作用机制。结果表明: 水泥浆-沥青界面的粘结强度随温度升高而降低; 硫铝酸盐水泥基灌浆料与沥青在 25~35 °C 时的界面粘结强度为 1.03~1.98 N/mm², 比硅酸盐水泥基灌浆料与沥青的界面粘结强度提高了 10% 以上, 硫铝酸盐水泥与沥青的界面强度在 60 °C 时为 0.32~0.38 N/mm², 比硅酸盐水泥与沥青的界面粘结强度提高了 80% 以上; 水泥基灌浆料对沥青有微乳化作用, 促使更多自由沥青转变为结构沥青, 提高了水泥浆-沥青界面的粘结强度; 水泥与沥青界面的粘附力主要为硬化水泥浆与沥青之间的机械作用力, 水泥浆-沥青界面的粘附失效实际上是结构沥青与自由沥青之间的破坏。明确水泥-沥青界面粘附行为的作用机制可以解决水泥-沥青复合材料界面粘附性问题, 为减少灌注式复合路面开裂破坏奠定理论基础。

关键词: 灌注式复合路面; 水泥-沥青复合材料; 水泥浆-沥青界面; 粘结特性

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)07-1660-10

网络出版时间: 2023-05-29



Interfacial Adhesion Mechanism of Cement Grout Asphalt Composite Material

WANG Jingyuan¹, HONG Jinxiang^{1,2}, ZHANG Yu¹, XIONG Zijia³, ZHANG Yunsheng¹

(1. School of civil engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Jiangsu subote new materials Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: It is essential for the adhesion mechanism of the cement-asphalt interface to evaluate the performance of cement-asphalt composite material in a micro-scale. The interface molding experiment was designed in laboratory according to the actual formation process. The influences of environmental temperature, grouting type and asphalt type on the cement-asphalt interfacial bonding characteristics were investigated. The microstructures and features of the cement-asphalt interfacial transition zone were analyzed by scanning electronic microscopy, energy dispersive spectroscopy, and Fourier transformed infrared spectroscopy. The hydrophilia of grouting and asphalt was evaluated by contact angle analysis. The adhesion mechanism of the cement-asphalt interface was investigated. The results show that the bonding strength of the cement-asphalt interface decreases with increasing the temperature. The interfacial bonding strength of sulphoaluminate cement-asphalt is 1.03–1.98 N/mm² at 25–35 °C, which is more than 10% greater than that of the Portland cement-asphalt. The interfacial bonding strength of sulphoaluminate cement-asphalt is 0.32–0.38 N/mm² at 60 °C, which is increased by >80%, compared with that of Portland cement-asphalt. Grouting has a slight emulsification effect on the asphalt interface region, reflecting that the more free asphalt changes to structural asphalt and increases the bond strength. The cement-asphalt interfacial adhesion is due to the physical force. The adhesion failure is the damage between the structural asphalt and free asphalts. Based on the adhesion mechanism, the asphalt-cement composite material can be improved to reduce the crack risk of

收稿日期: 2022-10-06。 修订日期: 2022-12-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078241); 新基石科学基金会科学探索奖; 甘肃省高校自然科学基金(2022CYZC-25)。

第一作者: 王敬元(1997—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 洪锦祥(1976—), 博士, 教授级高工。

张 宇(1988—), 博士, 讲师。

Received date: 2022-10-06. Revised date: 2022-12-05.

First author: WANG Jingyuan (1997—), male, Master candidate.

E-mail: 904124089@qq.com

Correspondent author: HONG Jinxiang (1977—), male, Ph.D., Professor.

ZHANG Yu (1988—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: hongjinxiang@cnjsjk.cn; zygyj88@yeah.net

cement grouting asphalt composite pavement.

Keywords: cement grout asphalt composite; cement asphalt composite; cement-asphalt interface; bonding strength

灌注式复合路面(CGAC)是指在开级配大空隙(20%~30%)沥青混合料中灌注高流态水泥基灌浆料形成的一种复合路面^[1],属于密实-骨架嵌挤型结构,由硬化水泥胶浆和大空隙沥青混合料骨架共同抵抗车辆荷载。灌注式复合路面兼有水泥的刚性和沥青的柔性,具有优异的阻尼特性、承载能力和抗高温变形能力,在解决重载沥青道路的车辙问题、改善路面性能、美化环境等方面效果显著,应用和发展前景广阔。

近年来,国内外研究人员从材料种类、灌浆水胶比、沥青混合料空隙率等^[2-6]方面对改善 CGAC 路用性能的方法进行了大量的研究。相关结果表明,由于灌注式复合路面为无机胶凝材料和有机胶结材料复合制成,硬化水泥与沥青在力学性能、变形等方面存在较大的差别,水泥浆-沥青界面(CA-ITZ)为复合材料的薄弱位置,界面过渡区存在易开裂、冻融耐久性差等^[7-8]问题,而目前对水泥浆-沥青界面过渡区的认识较少,难以从根本上解决水泥与沥青的粘结失效问题。

因此,CGAC 水泥浆-沥青界面的粘结失效机理逐渐成为研究的重点,研究多从界面粘结、界面微观结构特征、界面细微观力学性能等方面展开。Ling 等^[9]利用 Positest AT-A 装置研究了材料种类、灌浆水胶比等对水泥浆-沥青界面粘结强度的影响;Cai 等^[10]利用扫描电子显微镜发现硬化水泥浆与沥青膜之间的纤维状水化产物提高了沥青和水泥浆的粘结强度和高温稳定性;Hou 等^[11]研究了 CGAC 水泥浆-沥青与集料-沥青界面过渡区弹性模量的变化规律,发现水泥灌浆料对沥青起到了硬化作用。以上研究对揭开水泥-沥青界面的粘结机理提供了重要的理论依据。然而,针对水泥-沥青界面微观失效形态、

水泥-沥青界面粘附行为机理的相关研究还较少。

本工作开发了实验室界面成型工艺,通过拉拔试验研究了不同灌浆料(早强型硫铝酸盐水泥、高强型硅酸盐水泥)与不同沥青(基质沥青、高粘改性沥青)的粘结界面在不同温度(-10、25、30、35、60℃)的粘结特性,建立了环境温度与界面粘结强度之间的关联性;通过 MATLAB 对失效的浆体侧界面图像进行了二值化处理和面积统计,分析了水泥浆体接触面上粘附失效、粘聚失效 2 种失效模式与界面粘结强度之间的规律;利用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)对水泥浆-沥青界面过渡区与浆体接触面的微观形貌及元素含量变化规律进行了表征;利用接触角测量仪测试了水泥基灌浆料在沥青上的接触角,评价了水泥浆在沥青上的浸润能力;采用 Fourier 红外光谱仪(FTIR)分析了界面处的特征基团,探究了水泥与沥青的粘附作用机制。

1 实验

1.1 样品制备

水泥灌浆料为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的早强型水泥基灌浆料 JGM301 (W/C=0.38)与高强型水泥基灌浆料 JGMHF5 (W/C=0.32),灌浆料由水泥、矿粉和外加剂组成,其中 JGM301 采用的是硫铝酸盐水泥, JGMHF5 采用的是普通硅酸盐水泥。灌浆料的基本性能按照 JTG3420—2020《公路工程水泥及混凝土试验规程》进行测定,如表 1 所示,满足 DB32/T 4074—2021《抗车辙半柔性路面应用技术规范》要求。沥青为 SK-70[#]基质沥青与高粘改性沥青(HVMA),沥青基本性能指标如表 2 所示,满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

表 1 水泥基灌浆料基本性能
Table 1 Basic properties of grouting

Type	Fluidity/s		Bleeding rate/%	Shrinkage/%	Flexural strength/MPa	Compressive strength/MPa		
	Initial	30 min			28 d	3 h	1 d	28 d
JGM-301	13.53	14.44	0.11	0.03	4.83	13.73	17.48	33.84
JGM-HF5	16.43	17.84	0.36	0.07	11.45		18.58	70.47

表 2 沥青基本性能
Table 2 Basic properties of asphalt

Type	Penetration (25℃, 100 g, 5 s)/mm	Softening point/℃	Ductility (5℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	Density/(g·cm ⁻³)
SK-70 [#]	7.28	55.3	0.90	1.028
HVMA	5.47	69.2	39.25	1.030

1.1.1 拉拔试验试样制备 由于沥青膜具有较大的黏性，且界面尺度较小，拉拔试验样品制备质量直接影响测试结果的准确性。为控制沥青膜厚度，采用体积法，根据沥青密度计算所需沥青质量。采用与上面层铺装中集料岩性相同的玄武岩石板，表面尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，需涂附的沥青质量为 2 g 。

界面制备过程分为 2 步，第 1 步为制备沥青膜，具体步骤如下：

- 1) 将沥青、玄武岩岩板、刮刀置于 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中保温 4 h ，使沥青有较好的流动性。
- 2) 将玄武岩岩板置于电子称上，取出沥青倒在岩石板面上，并注意观察质量增加示数，当稍大于 2 g 时停止加样，并迅速用刮刀抹平。
- 3) 将多余的沥青用刮刀刮除，直至岩石板质量增加为 2 g 时为止。

- 4) 将涂有沥青的岩板置于 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中保温 30 min 至沥青膜铺展平滑，取出放置直至冷却至室温。

以上步骤为沥青膜的制备，沥青膜厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。接触角试验的制样方法与沥青膜制备方法相同。

第 2 步为制备沥青–水泥浆界面。基于实际灌注式复合路面施工工艺，待沥青膜成型冷却后灌注水泥基灌浆料，其主要制备步骤如下：

- 1) 在冷却的沥青膜岩板上固定硅胶灌浆模具，模具为中间开槽的正方体块，其外围尺寸与岩板相同，为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，中间用于灌浆的槽口尺寸与拉拔头相同，为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。向槽口中灌入预先拌制的水泥基灌浆料，浇注厚度为 5 cm ，在自然环境中放置 1 d 后脱模。

- 2) 以 200 目砂纸打磨硬化的水泥基灌浆料表面，以去除浮浆，并用气泵吹扫浮尘，使表面光滑、清洁，便于粘结拉拔头。

- 3) 将环氧树脂胶涂于水泥基灌浆料与上拉拔头表面，使两者完全对中粘结，以实现上拉拔头的固定；下拉拔头采用 G 型夹具与岩板固定。

实测试样如图 1 所示。

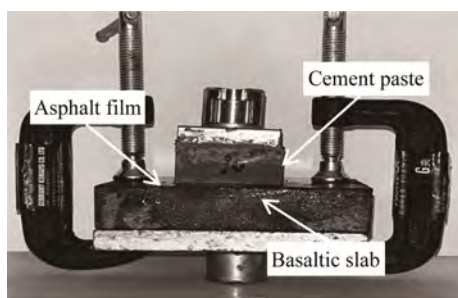


图 1 拉拔试验实测试样
Fig. 1 Test sample of the pull-off test

1.1.2 SEM 与 EDS 测试试样制备 微观试验用于观察水泥浆–沥青界面过渡区及浆体接触面的微观形貌与结构，分析微区元素组成与含量变化。试验样品包括 2 种：1) 拉拔失效后的浆体接触面试样；2) 原始水泥浆–沥青界面过渡区试样。拉拔失效后的浆体接触面试样直接从上述拉拔试验破坏后的浆体接触面获取，原始水泥浆–沥青界面过渡区试样的具体制备步骤如下：

- 1) 将特制的方形锡纸盒模具(尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$)和沥青置于 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中保温 3 h 。

- 2) 称取 1 g 沥青滴至锡纸盒模具中，在 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中保温 30 min 使沥青自然流淌平铺成沥青膜，取出冷却至室温。

- 3) 向冷却的模具中灌注预先拌制的水泥浆，灌注深度为 1 cm ，在自然环境中放置 1 d 。

- 4) 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻 2 h 脱模；用小型切割机切割截取水泥浆–沥青的横截面，截取试样厚度为 5 mm ，切割过程不超过 5 min 。

- 5) 使用无水乙醇对断面进行擦洗，置于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中直到干燥。

观测试样如图 2 所示。

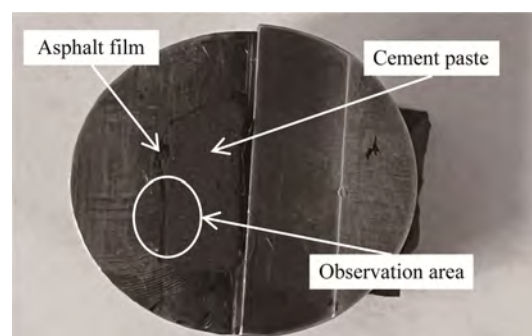


图 2 SEM 观测试样
Fig. 2 Observation sample of SEM

1.1.3 FTIR 试样制备 红外光谱试验用于对比分析水泥基灌浆料基体与水泥浆–沥青界面产物的物质基团结构，检测方法为 KBr 压片法，试样制备方法：首先使用刮刀刮取浆体接触面粉末(刮取厚度小于 1 mm)与原始水泥浆体粉末，随后各称取 10 mg 粉末和 $1\sim 2\text{ g}$ KBr 在红外灯下进行混磨，研磨后在红外灯下烘 5 min ，最后取适量样品进行压片，制得试样。

1.2 表征

1) 拉拔试验

采用 UTS 沥青测试机进行拉拔试验，测试拉拔试样的界面粘结力。拉拔区面积与模具面积相同，

为 1 600 mm²。测试加载速率为 5 mm/min, 测试温度为 -10、25、30、35 ℃ 和 60 ℃, 通过达到目标温度的恒温箱保温 3 h 后测试。拉应力下降至最大拉应力的 30% 视为实验结束。试样中水泥的龄期为 3 d。

2) 界面微观形貌表征

采用 Quanta 250 型电子显微镜进行微观形貌与结构的表征试验, 观察试样的水化产物形貌、结构与分布。试样中水泥的龄期为 3 d, 试验开始前对试样进行喷金。

3) 界面过渡区元素表征

采用 Octane Pro 能谱仪进行微区元素种类及含量的表征试验, 识别元素为 C、Ca、Al、Si、S、O, 扫描方式为线扫描, 试验开始前对试样进行喷金。

4) 水泥浆-沥青接触效应试验

采用 DSA 255 接触角测定仪测试水泥基灌浆料与沥青岩板的接触角, 测试温度为 25 ℃。

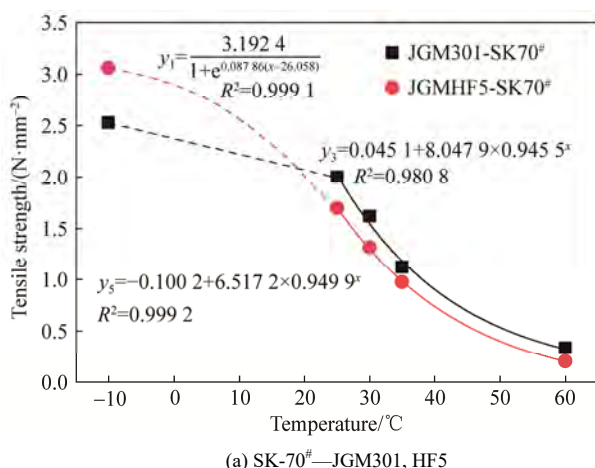
5) 红外光谱分析

采用 Nicolet iS20 Fourier 红外光谱仪分析 KBr 压片试样的化学键及官能团。

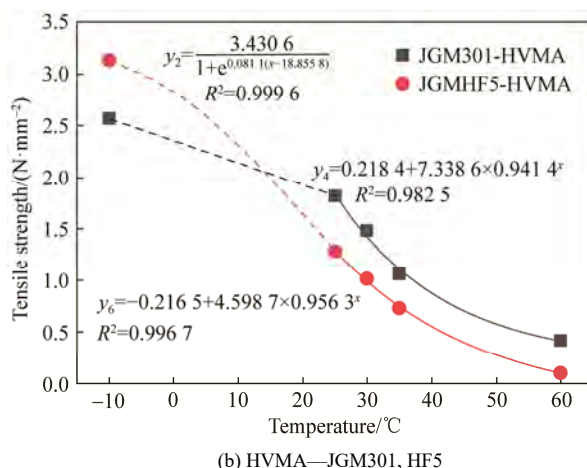
2 结果与讨论

2.1 界面粘结特性

拉拔试验结果如图 3 所示。由图 3 可见, 4 组拉拔试样的界面粘结强度均随环境温度升高而降低。在 -10 ℃, JGM301 拉拔试样为浆体断裂, 这说明在低温度下水泥浆-沥青界面的粘结强度大于水泥自身的抗拉强度。温度为 25~35 ℃ 时, JGM301 与沥青的界面粘结强度为 1.03~1.98 N/mm², 比 JGMHF5 与沥青的界面粘结强度提高了 10%~36%; 温度为 60 ℃ 时, JGM301 与沥青的界面强度为 0.32~0.38 N/mm², 比 JGMHF5 与沥青的界面粘结强度提高了 80%~291%。拉拔试验结果表明, JGM301 与沥青的粘附作用优于 JGMHF5。



(a) SK-70[#]—JGM301, HF5



(b) HVMA—JGM301, HF5

x is temperature; y is tensile strength; R^2 is correlation coefficient.

图 3 水泥浆-沥青界面粘结强度与温度的关系

Fig. 3 Relationship of cement-asphalt interface bonding strength and temperature

以温度量化表征水泥浆-沥青界面宏观力学性能, 建立温度与界面粘结强度的关联性。由图 3 可见, 环境温度与界面粘结强度变化呈现特定的规律, 表明二者存在关联。S 型函数模型可以有效表达 JGMHF5 与沥青在 -10~60 ℃ 环境温度下与界面粘结强度的非线性关系, 相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 拟合度较高, 分别以 y_1 和 y_2 进行表示, 通式为

$$y = \frac{a}{1 + e^{-k(x-b)}} \quad a > 0, k, b \in \mathbb{R}, k \neq 0 \quad (1)$$

式中: y 为水泥浆-沥青界面粘结强度指标; x 为水泥浆-沥青界面体系所处环境温度; a 、 b 、 k 均为拟合参数, k 反映水泥浆与沥青之间的粘附效果, 其

值越大, 水泥浆与沥青的粘附越好。由于 JGM301 在 -10 ℃ 发生水泥浆体破坏, 测量值不能反映界面的粘结强度, 为对比分析, 使用指数模型表示 25~60 ℃ 温度下 JGM301、JGMHF5 与沥青与界面粘结强度的非线性关系, 相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 分别以 y_3 、 y_4 、 y_5 和 y_6 进行表示, 通式为

$$y = a + c \times k^x \quad a, c, k \in \mathbb{R}, k \neq 0 \quad (2)$$

式中: y 为水泥浆-沥青界面粘结强度指标; x 为水泥浆-沥青界面体系所处环境温度; a 、 c 、 k 均为拟合参数, k 反映水泥浆与沥青之间的粘附效果, 其值越小, 水泥浆与沥青的粘附越好。

图 4 为不同温度下拉拔试样的浆体侧失效面

图, 根据浆体接触面上的失效方式划分区域为: 光滑浆体区(深灰色)、残留沥青区(黑色)和失效浆体区(浅灰色) 3 种。深灰色区发生水泥与沥青的粘附失效, 黑色区发生沥青膜内的粘(内)聚失效, 浅灰色区为沥青侧水泥浆体的失效。失效浆体区在接触面上占比均小于 1%, 温度因素对水泥浆体失效无显著影响。

由图 4 可见, 浆体接触面上残留沥青面积占比随温度升高逐渐增大, 说明界面区发生了水泥浆–沥青的粘附失效与沥青膜内的粘聚失效; 在 60 °C, 浆体接触面上全部为残留沥青, 界面失效为完全的沥青粘聚失效。使用 MATLAB 对浆体侧失效面的图像进行二值化处理与分析, 2 种失效模式在 4 组失效面上的占比变化如图 5 所示。

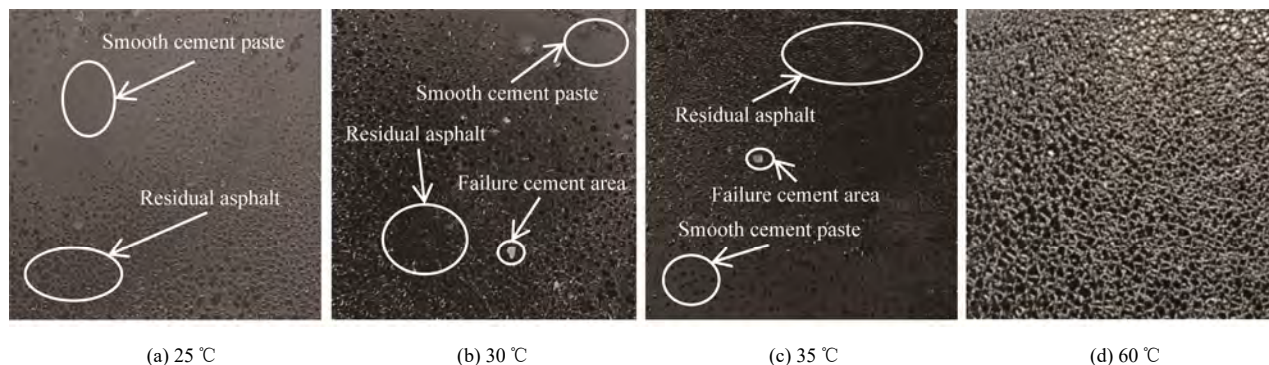


图 4 JGM301-SK70[#]浆体侧失效面

Fig. 4 Failure surface on the cement side of JGM301-SK70[#]

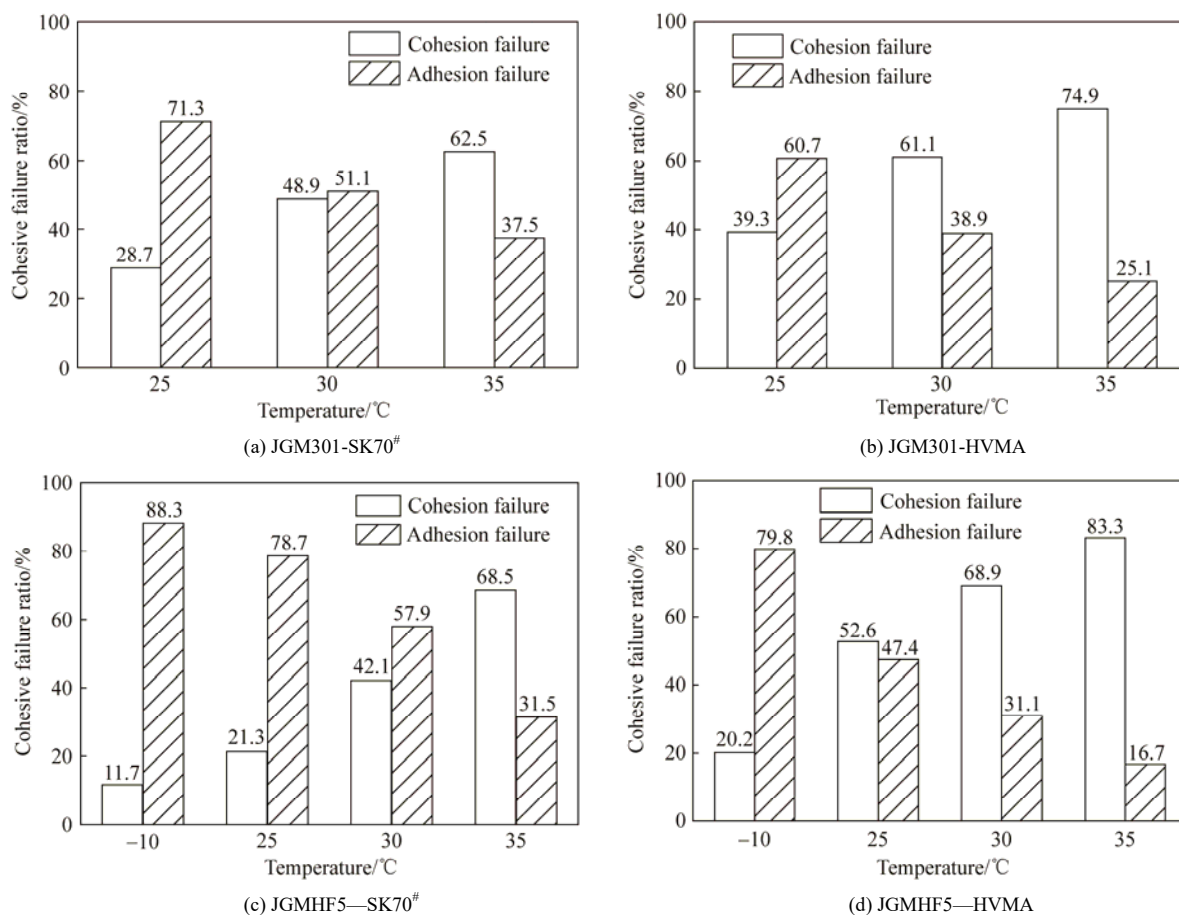


图 5 浆体侧失效面粘附失效占比

Fig. 5 Cohesive failure ratio on the cement side

由图 5 可见, 界面失效模式随温度增加由水泥浆–沥青界面破坏主导的粘附失效转为沥青膜内部

破坏主导的粘聚失效, 当 2 种失效模式占比相当时, 可认为此温度为水泥浆–沥青界面失效模式的转变

温度,该温度下沥青膜的粘聚作用力与水泥浆-沥青的粘附作用力相当。采用 SK70[#]基质沥青的试件,转变温度为 30~35 ℃;采用 HVMA 的试件,转变温度为 25~30 ℃。这主要是由于 SK70[#]基质沥青与 HVMA 自身的粘附性和粘聚性差异导致的。

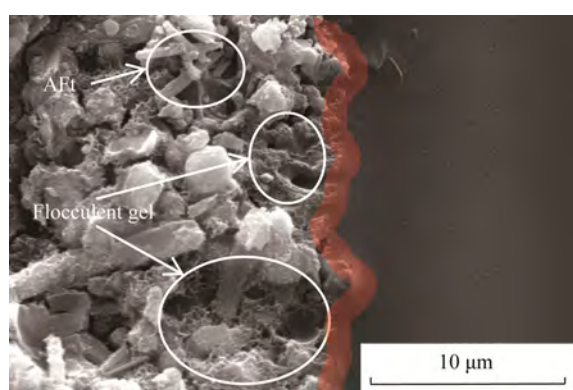
2.2 SEM 分析

通过研究水泥浆-沥青界面微结构与力学损伤后的界面形貌,进一步分析界面的粘附作用,以期得到界面粘脱机理。图 6 为 JGM301、JGMHF5 与 SK-70[#]、HVMA 界面过渡区的 SEM 照片。从图 6a 和图 6b 可以看出,JGM301 与沥青的界面过渡区较疏松,浆体在沥青侧生成了大量絮状凝胶和少量针棒状 AFt 晶体、层片状 AFm 晶体,凝胶产物与沥青穿插结合并表现为向沥青侧生长,两相之间无明显分界线;从图 6c 和图 6d 可以看出,JGMHF5 与沥青的界面过渡区结构致密,浆体在沥青侧生成大量 CH 晶体和少量 AFt 晶体,CH 与沥青紧密结合,两相之间有清晰的分界线。

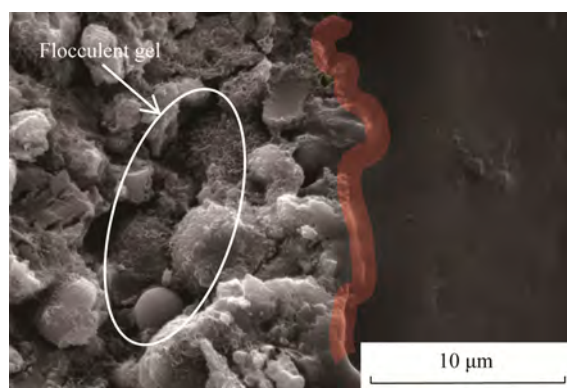
对比 4 组 SEM 照片可以发现,JGM301 与沥青呈“穿插式”结合,水泥的水化产物与沥青分子出现了渗透侵入;JGMHF5 与沥青呈“直线式”结合,水

泥的水化产物近似“贴合”于沥青表面。2 种水泥与沥青在界面处的结合状态示意图如图 7 所示。不同水泥基灌浆料与沥青在界面过渡区的结合方式不同,但从沥青类型上看,其对水泥浆-沥青界面的微观结构没有明显影响。

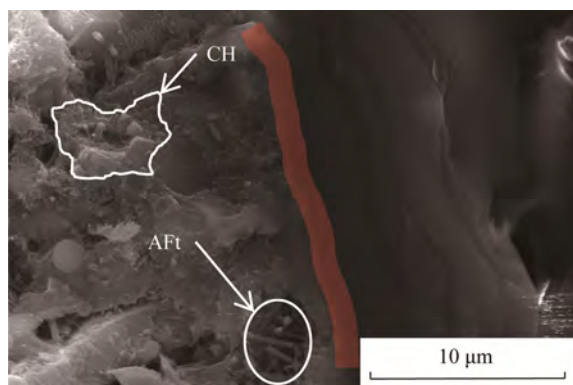
根据沥青选择性吸附理论,沥青中的极性分子(如:沥青质、沥青树脂等)会定向吸附于集料表面并呈现层状分布,表层沥青吸收水分能够促进沥青中的极性分子由本体扩散至水处理面^[12],增大了表层沥青的极性。此外,当 2 种物质的极性越接近时,其间的粘附功就越大。Zhang 等^[13]研究发现,甲基与沥青的极性相近,甲基硅酸钾改性的碱活化水泥基灌浆料能够与沥青产生较好的界面粘结。因此,结合上述试验结果可推测,水泥浆-沥青界面形成初期,沥青膜在水和水泥中的极性分子和离子化学基团的作用下发生“微乳化”,沥青黏度下降,在水泥基灌浆料硬化进程中水化产物与乳化沥青相互侵入、穿插,待完全硬化后水分散失,水泥、沥青两相紧密结合,使更多自由沥青转变为结构沥青,提高了水泥浆-沥青的粘附作用力。这一现象在 JGM301 中更为明显。



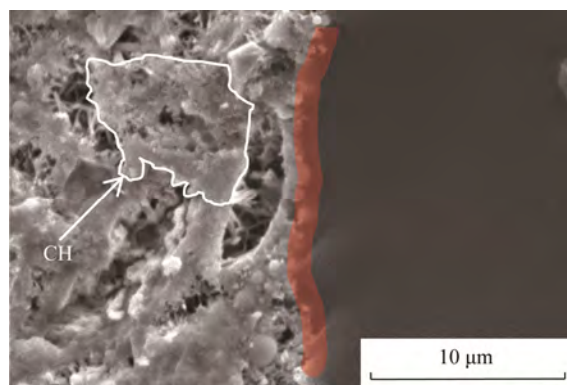
(a) JGM301-SK70[#]



(b) JGM301-HVMA



(c) JGMHF5-SK70[#]



(d) JGMHF5-HVMA

图 6 水泥浆-沥青界面过渡区 SEM 照片

Fig. 6 SEM images of the CA-ITZ

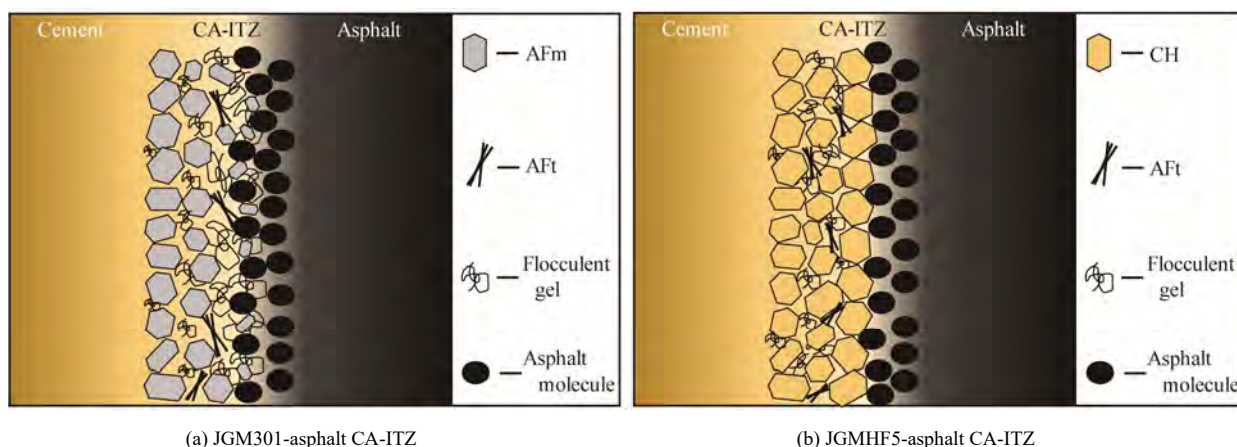


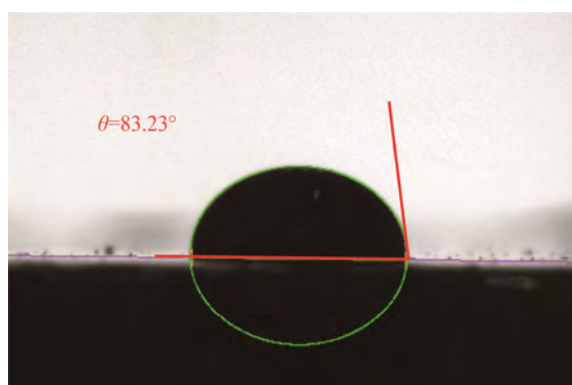
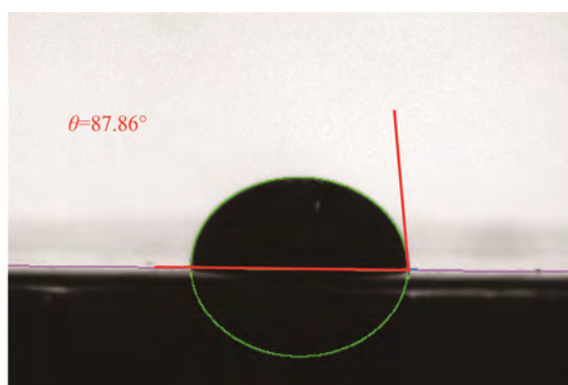
图7 水泥浆-沥青界面结合状态示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of cement-asphalt interface

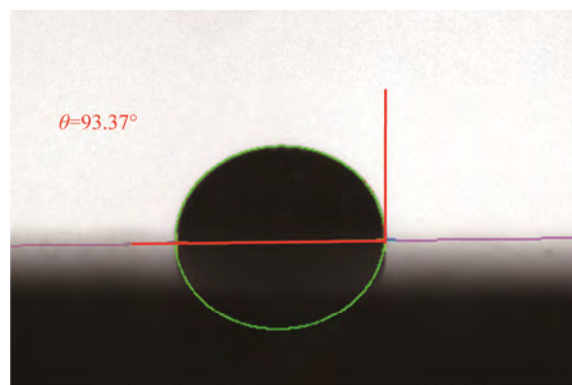
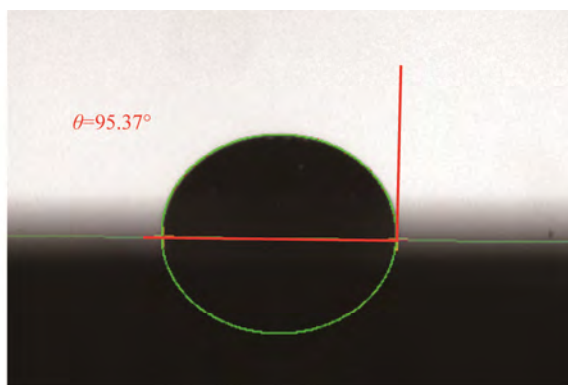
如图8所示,通过测试水泥基灌浆料与沥青的接触角可知,JGM301与沥青的接触角分别为 83.23° 和 87.86° ,而JGMHF5与沥青的接触角分别为 93.37° 和 95.37° ,由此可见,JGM301的接触角小于JGMHF5,这说明JGM301与沥青的浸润性更强,极性更为接近,两相产生的粘附功越大,水泥硬化后与沥青之间的粘结强度也越高,这与拉拔试验结果(图3)相符。

图9为 25°C 水泥浆-沥青粘附失效的浆体接触

面与水泥浆-玄武岩的浆体接触面SEM照片,灌浆水泥的水化龄期均为3d。可以看到,浆体接触面图9a~图9d微观结构相较于图9e和图9f更为致密、平整,图9a与图9b浆体上附着大量深色胶状产物,水泥水化产物与胶状物相嵌,图9c与图9d浆体上的胶状物附着较少,接触面平整度不如JGM301,这说明残留在JGM301上的沥青较多,JGM301与沥青的粘附作用优于JGMHF5。

(a) JGM301-SK70[#]

(b) JGM301-HVMA

(c) JGMHF5-SK70[#]

(d) JGMHF5-HVMA

图8 水泥浆-沥青接触角

Fig. 8 Contact angle temperatures of cement-asphalt

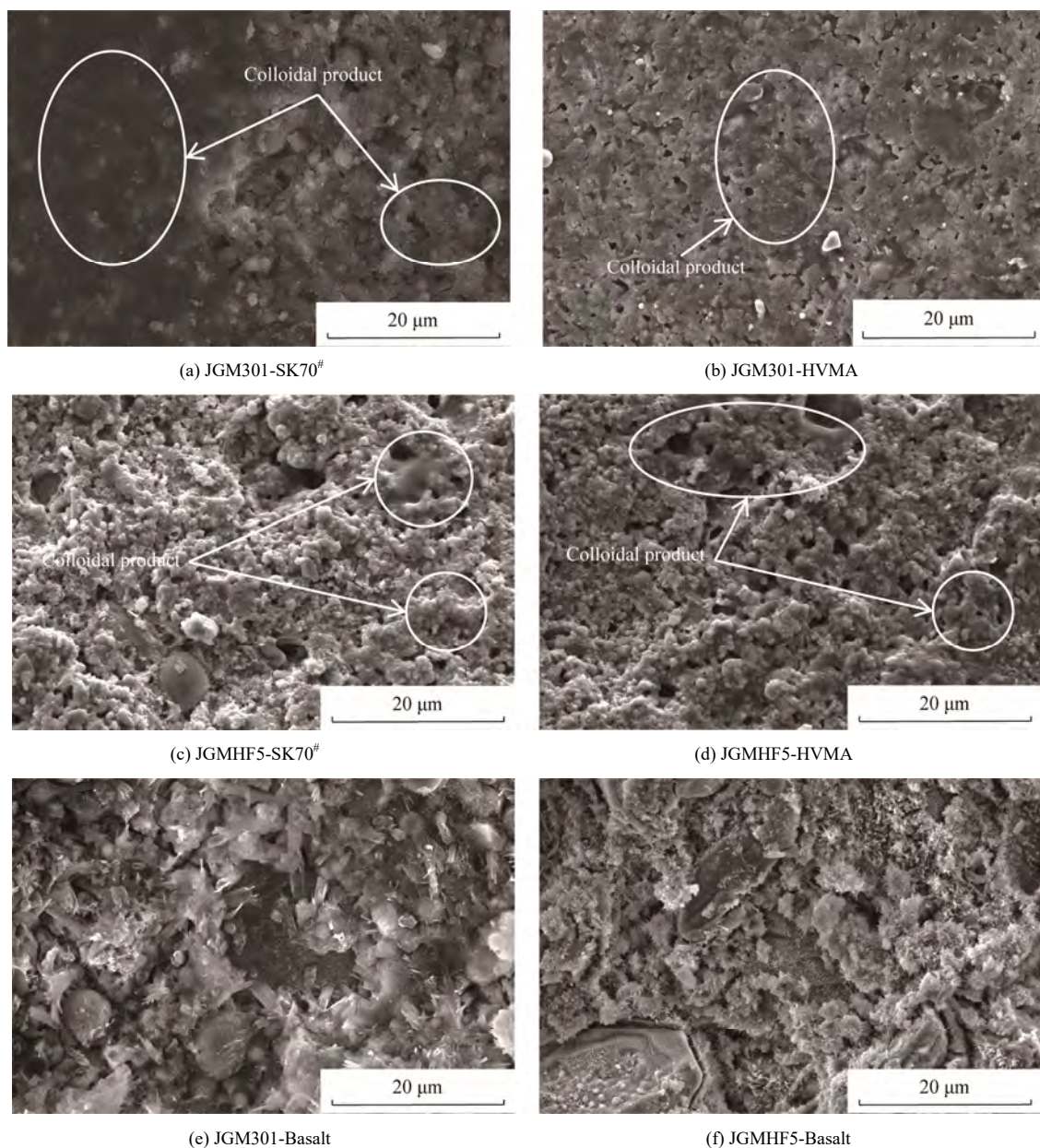


图 9 浆体侧失效面 SEM 照片

Fig. 9 SEM images of failure surface on the cement side

2.3 EDS 分析

沿水泥浆-沥青界面过渡区的垂直方向进行 EDS 线扫描, 结果如图 10 所示。 x 轴代表扫描路径, y 轴代表化学元素的信号强度。由图 10 可见, 元素 C、Ca、Al、Si、S、O 的信号强度在线扫描路径上有明显变化, 图 10a 中元素 Al 和 Si 在横坐标 $50\mu\text{m}$ 至 $65\mu\text{m}$ 范围内的信号强度大幅增强, 元素 Ca 的信号强度降低, 水泥水化产物 $n(\text{Ca})/n(\text{Si}) < 1$ (n 为物质的量), 说明该区域 C-S-H 凝胶含量较高, 元素 Al 信号强度高表明该区域含铝化合物富集; 图 10b 中元素 Ca 和 Si 在横坐标 $60\mu\text{m}$ 至 $70\mu\text{m}$ 范围内的信号强度小幅增强, 水泥水化产物 $n(\text{Ca})/n(\text{Si}) \geq 2.5$,

反映该区域范围内生成较多 CH 晶体, 这与微观分析(图 6)得出的结果一致。对比图 10a 与图 10b 可以发现, 元素 Ca、Al、Si、O 信号强度下降时, 元素 C 信号开始出现, 其含量增大并趋于稳定, 此时扫描位置由界面过渡区的浆体区到达了沥青区, 元素信号在接触面位置同时出现说明由这些元素构成的产物发生交互与结合的现象。

沿浆体接触面粘附失效区进行 EDS 线扫描, 结果如图 11 所示。由图 11 可见, 元素 Al、Si、O、Ca、C 的信号强度在扫描路径内无明显变化, 图 11a 中谱线与图 10a 中界面过渡区横坐标为 $70\mu\text{m}$ 处谱线的信号强度相似, 图 11b 中谱线与图 10b 中界面

过渡区横坐标为 75 μm 处谱线的元素信号强度相似。此外,浆体接触面的粘附失效区含有少量的元素 C, 元素 C 的信号强度明显大于水泥基体, 这说明浆体接触面上的元素 C 来自于沥青。由此可以确认: 浆体接触面上的胶状产物为水泥水化产物与沥

青的结合体, 沥青在水泥水化初期经历了乳化和破乳的过程, 与水泥水化产物结合形成结构沥青并产生较好的粘附作用力, 拉拔试验得到的浆体接触面粘附失效区实际上是结构沥青与自由沥青之间的失效, 由此说明水泥与沥青界面确实存在微乳化作用。

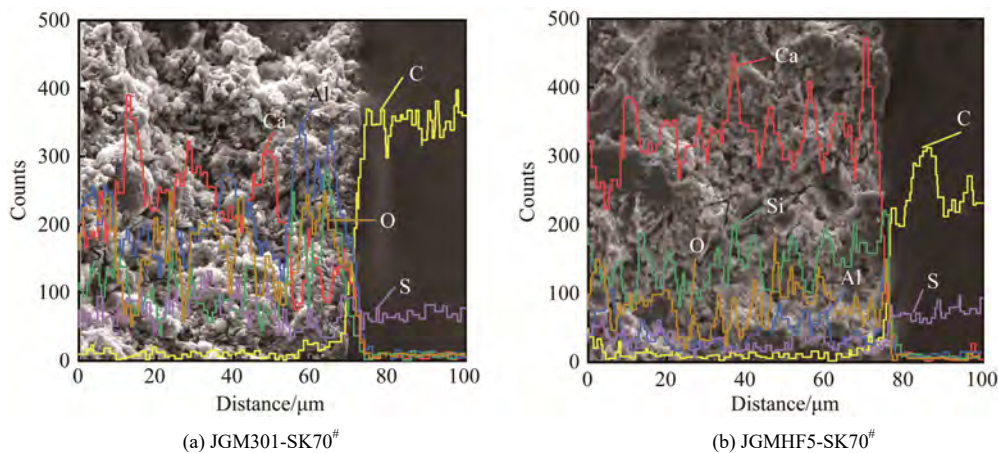


图 10 水泥浆-沥青界面过渡区 EDS 线扫描

Fig. 10 EDS analysis of the CA-ITZ

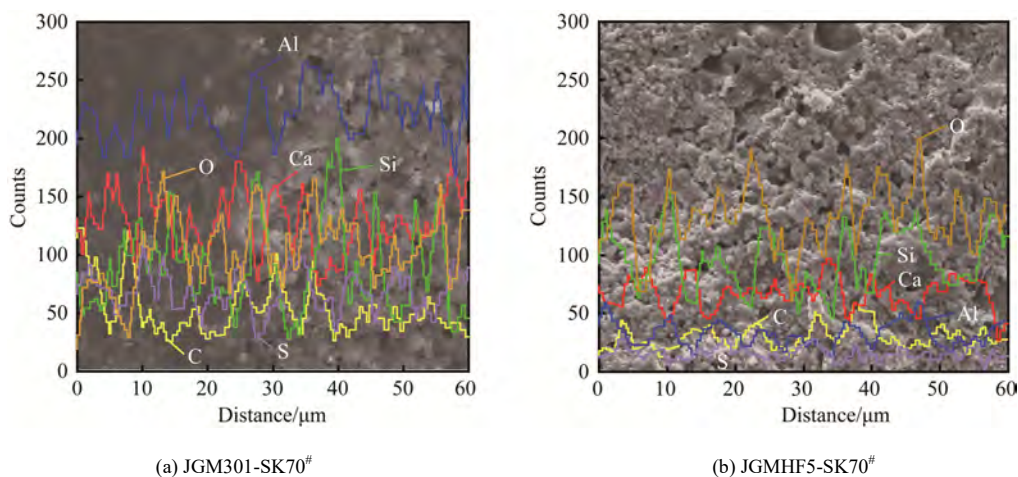


图 11 浆体侧失效面粘附失效区 EDS 线扫描

Fig. 11 EDS analysis of cohesive failure area on cement side

2.4 FTIR 分析

为确定结构沥青和水泥浆体的粘结方式, 采用 KBr 压片法对比分析水泥基体与水泥浆-沥青界面产物的物质基团结构, 界面产物样品的为刮刀制取的浆体接触面粘附失效区(图 4 深灰色区)粉末, 结果如图 12 所示。沥青谱线中, 波数 2919.51 cm^{-1} 和 2850.45 cm^{-1} 为亚甲基中 C—H 伸缩振动; 1601.34 cm^{-1} 为苯环骨架 C=C 伸缩振动; 1455.46 cm^{-1} 为甲基中 C—H 弯曲振动。JGM301 与 JGMHF5 特征频率区的特征峰强度基本相同, 波数 3401.95 cm^{-1} 为缔合 H_2O 中 O—H 伸缩振动; 1661.20 cm^{-1} 为 CO_3^{2-} 中 C=O 伸缩振动; 1461.65 为甲基中 C—H 弯曲振动。

JGM301 指纹区, 波数 1101.08 cm^{-1} 为 SO_4^{2-} 不对称伸缩振动; 870.95 cm^{-1} 为 CO_3^{2-} 弯曲振动。JGMHF5 指纹区, 波数 1079.01 cm^{-1} 为 $[\text{SiO}_4]$ (硅氧四面体) 伸缩振动; 872.25 cm^{-1} 为 CO_3^{2-} 弯曲振动; 626.35 cm^{-1} 为 SO_4^{2-} 弯曲振动。浆体界面谱线与水泥基体谱线基本相同, 仅在波长为 $(1460 \pm 10) \text{cm}^{-1}$ 时, 浆体界面甲基的特征峰强度近似于浆体与沥青特征峰强度叠加, 这说明水泥中含甲基的基团发生了定向移动。界面无新峰产生, 这说明水泥和沥青之间没有新物质生成, 两相未发生化学反应, 水泥与沥青界面的粘附力主要为硬化水泥与结构沥青之间的机械作用力。

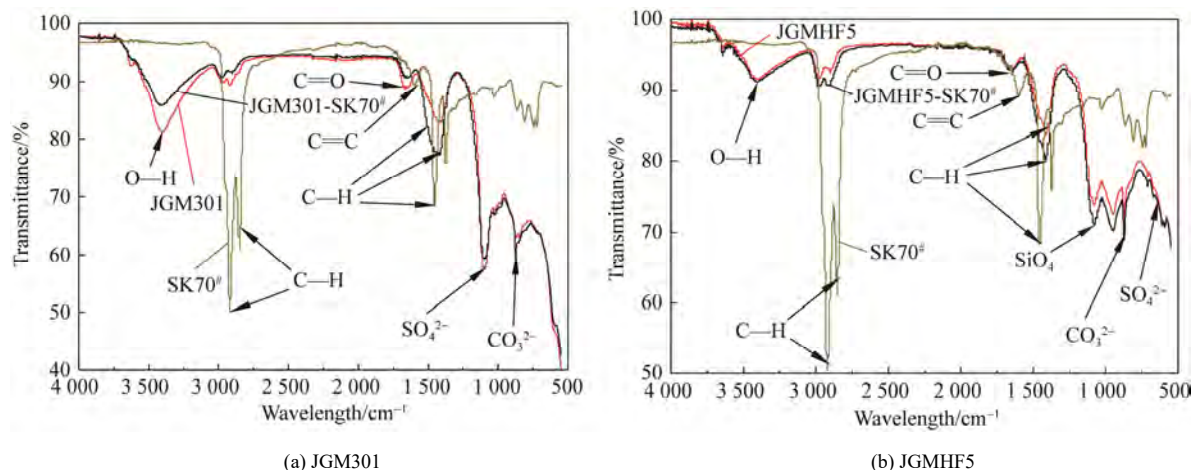


图12 水泥浆-沥青界面过渡区红外光谱

Fig. 12 FTIR temperatures of the CA-ITZ

3 结论

1) 制备的水泥浆-沥青界面成型方法能够较好地模拟实际灌注复合路面的界面成型过程, 为界面的研究提供了参考。

2) 灌注式复合路面水泥浆-沥青界面沥青膜内聚失效占比随环境温度的增加而增大, 沥青的感温性导致的内聚力变化是影响水泥浆-沥青界面粘结方式转变的主要因素。

3) 水泥浆-沥青界面的粘结强度随温度升高而降低; 25~35℃时早强型硫铝酸盐水泥基灌浆料与沥青的界面粘结强度为1.03~1.98 N/mm², 比高强型硅酸盐水泥基灌浆料与沥青的界面粘结强度提高了10%以上; 60℃时硫铝酸盐水泥与沥青的界面强度为0.32~0.38 N/mm², 比硅酸盐水泥与沥青的界面粘结强度提高了80%以上。硫铝酸盐水泥基灌浆料与沥青的粘附作用优于硅酸盐水泥基灌浆料, 这是由于硫铝酸盐水泥中的部分分子、离子基团与接触层沥青的极性相近, 沥青吸水膨胀更易发生流动, 水泥与沥青呈现“穿插式”结合, 两相接触面积增大, 水泥水化吸水与含水沥青排水同步进行, 促使更多的自由沥青转化为结构沥青, 增大了水泥浆-沥青界面的粘结力, 此过程暂称为“微乳化作用”。

4) 硫铝酸盐水泥基灌浆料与硅酸盐水泥基灌浆料均不与沥青发生化学反应, 界面的粘附力主要源于水泥与结构沥青之间的机械作用力。

参考文献:

[1] CAI J, PEI J Z, LUO Q H. Comprehensive service properties evaluation of composite grouting materials with high-performance cement paste for semi-flexible pavement[J]. Constr Build Mater, 2017,

153: 544-556.

- [2] GUO X G, HAO P W. Influential factors and evaluation methods of the performance of grouted semi-flexible pavement (GSP)—A review[J]. Appl Sci, 2021, 11(15): 6700.
- [3] HONG J X, WANG K J, XIONG Z J. Investigation into the freeze-thaw durability of semi-flexible pavement mixtures[J]. Road Mater Pavement Des, 2020, 21(8): 2198-2214.
- [4] HOU S G, XU T, HUANG K. Investigation into engineering properties and strength mechanism of grouted macadam composite materials[J]. Int J Pavement Eng, 2016, 17(10): 878-886.
- [5] SABOO N, RANJEESH R, GUPTA A. Development of hierarchical ranking strategy for the asphalt skeleton in semi-flexible pavement[J]. Constr Build Mater, 2019, 201: 149-158.
- [6] PEI J Z, CAI J, ZOU D G. Design and performance validation of high-performance cement paste as a grouting material for semi-flexible pavement[J]. Constr Build Mater, 2016, 126: 206-217.
- [7] HOU S G, XU T, HUANG K. Aggregate gradation influence on grouting results and mix design of asphalt mixture skeleton for semi-flexible pavement[J]. J Test Eval, 2017, 45(2): 591-600.
- [8] LING T Q, ZHOU J, ZHAO Z J. Study on optimization of polymer modified cement for poured semi-flexible pavement[J]. J Highway Transport Res Development, 2009, 26(6): 24-28.
- [9] LING S L, HU M J, SUN D Q. Mechanical properties of pouring semi-flexible pavement material and engineering estimation on contribution of each phase[J]. Constr Build Mater, 2022, 315: 125782.
- [10] CAI X, ZHANG J J, ZHANG H. Identification of microstructural characteristics in semi-flexible pavement material using micromechanics and nano-techniques[J]. Constr Build Mater, 2020, 246: 118426.
- [11] HOU S G, XU T, HUANG K. Investigation into engineering properties and strength mechanism of grouted macadam composite materials[J]. Intern J Pavement Eng, 2016, 17(10): 878-886.
- [12] HUNG A M, GOODWIN A, FINI E H. Effects of water exposure on bitumen surface microstructure[J]. Constr Build Mater, 2017, 135: 682-688.
- [13] ZHANG S, HE Y, LI J. Preparation of potassium methyl silicate modified one-part alkali-activated slag grouting material and its effect on adhesion properties of semi-flexible pavement[J]. Constr Build Mater, 2023, 366: 130139.