

钢渣-沥青界面黏附特性研究

李松, 张彩利*, 丁维哲, 王犇, 李天豪

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 为研究钢渣-沥青界面黏附机理,以石灰岩为对照,采用压汞仪、傅里叶红外光谱仪、接触角仪、原子力显微镜、扫描电镜从孔隙吸附、化学反应、表面黏结3个角度揭示钢渣-沥青界面作用,结合室内试验评价钢渣集料水稳定性.结果表明,钢渣孔体积、孔隙率均比石灰岩的大,以小孔、中孔为主;钢渣能与沥青发生化学反应,钢渣与沥青接触角小于石灰岩与沥青的;钢渣粗糙度、表面积、黏附力均大于石灰岩的;钢渣集料水稳定性能优于石灰岩的.即钢渣集料因其优越的孔隙吸附能力、活跃的化学成分、粗糙的表面纹理具备更强的吸附沥青特性.

关键词: 钢渣-沥青界面;孔隙结构;化学性质;粗糙度;黏附性

中图分类号: U414 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb202203005

0 引言

钢渣与天然石料相比具有优异的力学性能,钢渣路用已经成为道路行业新焦点.沥青和集料黏附性能与集料表面特性有关,黏附性影响沥青路面的水稳定性、耐久性等^[1].钢渣为工艺岩,其表面构造、化学组分和内部结构等不同于一类自然界岩石的,表面展现出特殊的性质,这直接或间接影响、制约沥青混合料的性能,故只有对钢渣-沥青界面黏附特性进行系统研究,才能发挥钢渣沥青混合料路用性能潜力.钢渣多孔结构易吸收沥青,其高碱度化学成分易与弱酸性沥青发生化学反应,表面形貌易影响与沥青物理作用^[2].相关学者对沥青-集料界面作用性能已做了大量研究,甘新立^[3]认为集料孔隙分布特征影响沥青与集料黏附性能及对沥青吸附量.陈国明等^[4]研究了集料表面粗糙度与沥青混合料水稳定性能关系.杨文锋等^[5]认为集料吸收沥青受集料孔隙分布特征影响,提出集料孔隙吸收沥青量约为7.5%.李继文^[6]研究了钢渣粉物理化学性质与沥青相容性关系.孙炜^[7]研究了沥青膜与集料界面之间作用强度关系.成志强等^[8]利用表面能及拉脱试验研究了沥青膜从集料界面剥落机制. Huang 等^[9]研究了沥

青膜在集料界面上流变行为,发现集料界面会吸附沥青中的极性组分,并且与极性组分发生物理化学反应.虞将苗等^[10]采用原子力显微镜研究了微观尺度下沥青与集料黏附作用,发现化学作用对沥青-集料界面黏附性能影响显著.王元元^[11]采用紫外分光光度计研究了集料对沥青吸附量,探讨了沥青-集料界面在无水条件下的黏附性能.

综上所述,目前关于沥青-集料界面作用性能已有广泛研究.然而,对钢渣集料吸附沥青机理方面研究还不够全面和系统.鉴于此,本文以石灰岩为对照,从钢渣集料孔隙吸附、化学反应、表面黏结3个角度分析钢渣与沥青黏附机理,结合室内试验评价钢渣集料水稳定性.

1 原材料与试验方案

1.1 原材料

1.1.1 集料 本研究所用集料为热闷钢渣、冷弃陈渣(外观如图1所示)及石灰岩,均来自唐山,所用钢渣均在自然条件下陈化半年.集料主要技术指标见表1,基本化学成分见表2.所用钢渣基本性能指标均满足规范《道路用钢渣》(GB/T 25824—2010)技术要求.

1.1.2 沥青 选用京博70#道路石油沥青,各项

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2022-03-10.

基金项目: 河北省交通运输厅科技项目(2018-03).

作者简介: 李松(1995-),男,硕士生, E-mail: 17865155725@163.com; 张彩利*(1978-),女,副教授,硕士生导师, E-mail: zhangcailimeng@163.com.



(a) 热闷钢渣 (b) 冷弃陈渣

图1 钢渣集料外观

Fig.1 Steel slag aggregate appearance

性能指标见表3,其性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中相关技术要求.

1.2 试验方案

1.2.1 压汞仪试验 采用美国 Quantachrome 公司 PM-33-18 型压汞仪对集料样品进行孔隙特征分析. 选取具有代表性、粒径相同的集料与沥青按照油石比 0%、1.0%、1.5%、2.0% 进行拌和, 拌和时集料温度为 180 °C, 沥青温度为 140 °C, 为了保证试验结果的精确性, 各油石比取 6 粒, 对结果求平均值.

表1 集料主要技术指标
Tab.1 Main technical indicators of aggregate

类型	吸水率/%	针片状含量/%	毛体积密度/ (g · cm ⁻³)	表观密度/ (g · cm ⁻³)	压碎值/%	磨耗值/%	
热闷钢渣	10~15 mm	2.4	5.6	3.437	3.624	9.0	11.6
	5~10 mm	2.7	—	3.269	3.462	—	—
	0~5 mm	3.0	—	3.212	3.414	—	—
冷弃陈渣	10~15 mm	1.9	7.8	3.406	3.610	9.5	13.3
	5~10 mm	2.6	—	3.318	3.546	—	—
	0~5 mm	2.9	—	3.323	3.562	—	—
石灰岩	10~15 mm	0.6	11.0	2.718	2.734	13.8	24.5
	5~10 mm	0.8	—	2.700	2.721	—	—
	0~5 mm	0.9	—	2.867	2.711	—	—
技术要求	≤3.0	≤12	—	—	≤26	≤26	

表2 集料基本化学成分分析结果
Tab.2 Basic chemical composition analysis results of aggregate

集料类型	w/%										
	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
热闷钢渣	42.91	3.14	30.47	2.03	15.19	0.10	1.76	2.14	1.42	0.45	0.34
冷弃陈渣	45.48	2.42	27.35	2.23	14.89	—	2.62	1.91	1.41	0.79	0.44
石灰岩	37.09	15.17	1.26	3.84	41.83	0.54	—	—	0.22	—	—

表3 沥青技术指标
Tab.3 Asphalt technical indicators

项目	针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1 mm	软化点 (环球法)/°C	延度(15 °C, 5 cm/min)/cm	含蜡量 (蒸馏法)/%	闪点(COC)/°C	密度(15 °C)/ (g · cm ⁻³)
测试结果	72	47	>100	0.9	310	1.035
技术要求	60~80	≥46	≥100	≤2.2	≥260	实测记录

1.2.2 傅里叶红外光谱试验 采用德国布鲁克公司 V80 型傅里叶红外光谱仪(FT-IR)对样品官能团进行对比分析. 通过振动磨机将热闷钢渣研磨成粉,取 0.075 mm 以下钢渣粉进行溴化钾压

片;将加热至 180 °C 的钢渣粉与 140 °C 的沥青按质量比 2 : 1 进行均匀拌和,制备成钢渣粉沥青胶浆;同时,将基质沥青作为对照组进行试验.

1.2.3 接触角仪试验 采用德国 KRUSS 公司

DAS30 光学接触角仪对集料与沥青的接触角进行测定. 将集料切割成 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 平面光滑的立方体, 彻底清洗干净集料表面后烘干; 将加热好的 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 沥青滴在不同温度 (25 、 45 、 65 、 85 、 $105\text{ }^\circ\text{C}$) 集料表面, 每组温度进行 3 次平行试验, 对结果求平均值.

1.2.4 原子力显微镜试验 采用韩国 Park NX10 型原子力显微镜 (AFM) 对集料表面微观特征进行测定, 测定区域面积为 $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$. 将集料切割成 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 平面光滑的立方体, 用 1000# 砂纸打磨集料表面, 消除切割纹理, 彻底清洗干净集料表面, 进行烘干.

1.2.5 扫描电镜试验 采用美国 FEI 公司的 Quanta 450FEG 扫描电镜对热闷钢渣-沥青、石灰

岩-沥青界面特征进行分析. 将热闷钢渣、石灰岩加热至 $180\text{ }^\circ\text{C}$, 放入 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 基质沥青中 15 s , 一半裸露在外部, 然后取出待其自然冷却.

1.2.6 水稳定性评价试验 选取热闷钢渣、冷弃陈渣, 以石灰岩为对比, 分别进行不同时间下水煮法试验. 试验方法按照规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011) 进行.

根据表 4 中级配, 按最佳油石比 5.2% 、 5.2% 、 4.9% 、 5.1% 分别成形热闷钢渣沥青混合料、冷弃陈渣沥青混合料、石灰岩沥青混合料、钢渣石灰岩沥青混合料 (粗集料为冷弃陈渣, 细集料为石灰岩) 试件, 按照规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011) 进行残留稳定性和冻融劈裂强度 (TSR) 试验.

表 4 级配筛孔质量通过百分率

Tab. 4 Percentage of gradation sieve quality passing

级配	通过以下筛孔的质量百分率/%									
	16 mm	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
AC-13	100.0	95.0	68.9	46.2	30.0	20.3	14.2	9.9	7.0	5.0

2 结果与讨论

2.1 集料孔隙结构对沥青吸附影响

2.1.1 钢渣集料孔隙特征 沥青与集料高温拌和时, 在高温流动性和毛细孔张力共同作用下, 沥青在集料孔隙中进行渗透, 影响沥青渗透性最主要的因素为孔径大小与孔隙数量, 即孔小而多者, 孔隙里气-液界面上毛细管张力愈高, 沥青渗透性愈好, 从而增加集料与沥青黏附性.

采用压汞仪测定未裹覆沥青的集料孔隙特征, 结果见表 5. 由表 5 可见, 钢渣孔隙结构较石灰岩有很大不同, 热闷钢渣、冷弃陈渣总进汞量为石灰岩的 11.3 倍、10.5 倍, 说明钢渣孔体积大于石灰岩的. 基于 Xoaotb 孔隙分类标准, 将孔隙按照孔径大小分为 4 种类型, 即大孔 ($>1\text{ }\mu\text{m}$)、中孔

($0.1 \sim 1\text{ }\mu\text{m}$)、小孔 ($0.01 \sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$)、微孔 ($<0.01\text{ }\mu\text{m}$)^[12]. 热闷钢渣、冷弃陈渣、石灰岩小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙分别占总进汞量的 74.30% 、 69.40% 、 14.54% , 说明钢渣孔隙以小孔、中孔为主, 提供大部分孔体积, 而石灰岩以大孔为主, 微孔、小孔、中孔发育较差. 另外, 热闷钢渣、冷弃陈渣总孔隙率为石灰岩的 5.7 倍、4.2 倍, 说明钢渣表面有丰富的开口孔隙数量. 钢渣孔隙结构发育比石灰岩复杂, 这种特性易吸附沥青, 增强了钢渣与沥青力学连接效应, 在一定程度上提高了钢渣与沥青总黏附力.

2.1.2 钢渣集料孔隙特征对沥青吸附影响 集料孔径大小不同, 对沥青吸附能力差异较大. 采用压汞仪对裹覆 0% 、 1.0% 、 1.5% 、 2.0% 沥青的集料进行孔径变化分析, 结果如图 2 所示. 由图可以

表 5 集料孔隙结构特征分布参数

Tab. 5 Feature distribution parameters of aggregate pore structure

集料类型	各分布孔径占总进汞量百分比/%				总进汞量/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔隙率/%
	$<0.01\text{ }\mu\text{m}$	$0.01 \sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$	$0.1 \sim 1\text{ }\mu\text{m}$	$>1\text{ }\mu\text{m}$		
热闷钢渣	0.62	43.16	30.52	25.70	0.039 4	7.37
冷弃陈渣	0.74	45.11	23.55	30.60	0.036 8	5.39
石灰岩	0.79	8.03	5.72	85.46	0.003 5	1.29

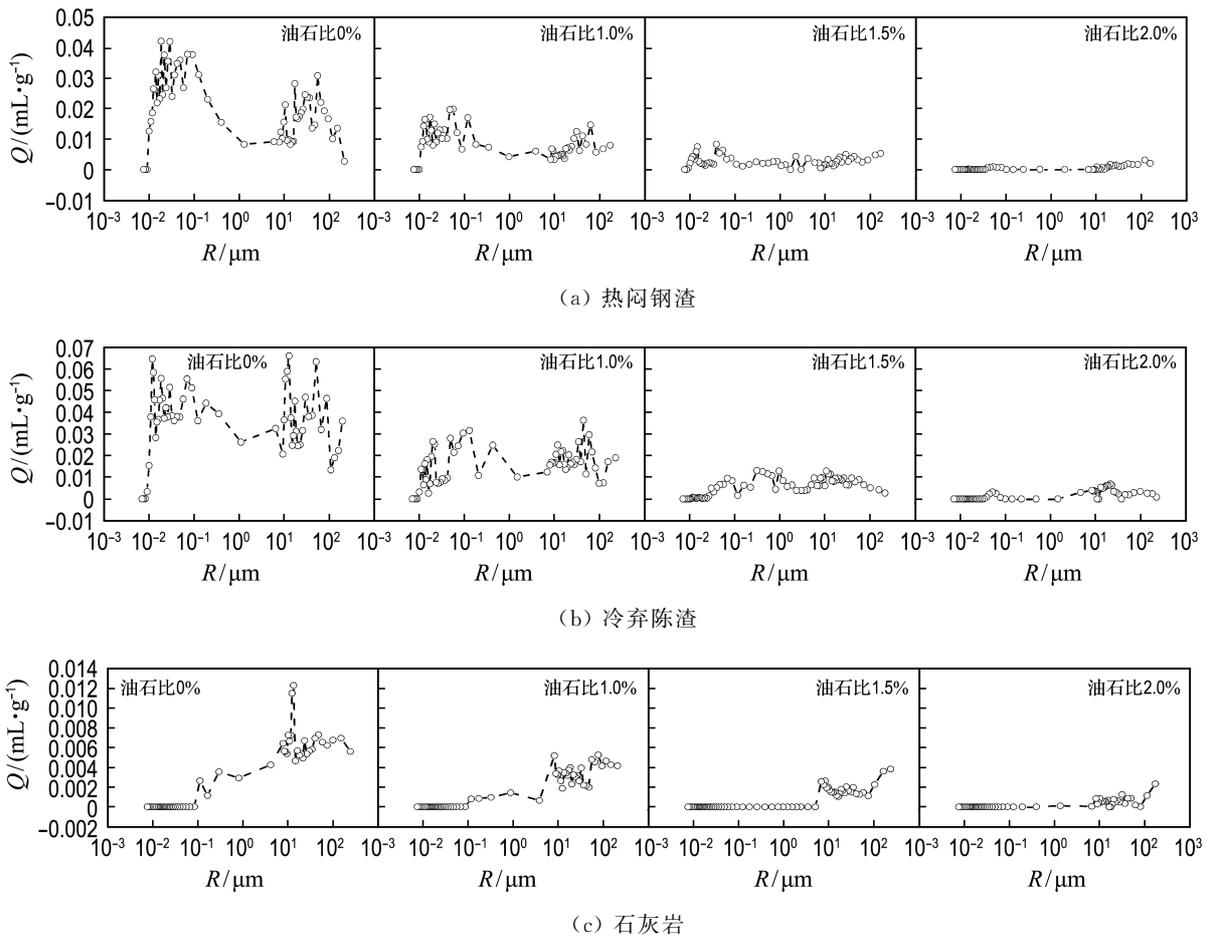


图 2 不同油石比集料孔径分布

Fig. 2 Pore size distribution of aggregates with different oil-stone ratios

看出,集料各孔径进汞增量 Q 均随着油石比增大而逐渐减小,说明沥青填充集料孔隙程度逐渐加深,集料孔隙体积为吸附较多沥青提供了条件,即集料孔隙体积会影响沥青与集料黏附性能.钢渣孔隙体积大,不仅增加了钢渣与沥青接触的内表面积,还增大了沥青在钢渣表面中的嵌入深度及锚固作用.当油石比增加为 2.0% 时,各集料微孔、小孔、中孔进汞增量均接近 0%,而大孔还存在进汞增量,说明孔径为 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 的孔隙相对于大孔更加有利于吸收沥青,即孔径为 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 的孔隙是影响沥青与集料黏附性能的主要因素.钢渣孔隙以 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 孔径为主,故钢渣吸附沥青能力高于石灰岩的,吸附沥青膜较厚,不易从界面脱落,所形成油石界面黏结强度较石灰岩大.

2.2 集料化学成分对沥青吸附影响

2.2.1 FT-IR 表征 沥青与集料界面黏附机理虽然复杂,但其本质为物理化学吸附作用,沥青中羧酸、酸酐和硫氧化物等极性官能团易与碱性集

料发生化学反应.因此采用 FT-IR 分析基质沥青与钢渣粉作用后官能团变化,以基质沥青、钢渣粉作为对照,结果如图 3 所示.由图可以看出,基质沥青在 $2750 \sim 3067 \text{ cm}^{-1}$ 处出现了宽而散的吸收峰,这是典型羧酸官能团存在的特征,为沥青能与集料发生化学反应提供了前提条件; 2870 cm^{-1} 处是烷烃类 C—H 键伸缩振动峰; 1473 cm^{-1} 处是 C—CH₃ 不对称键振动峰, 1380 cm^{-1} 处是 —CH₂— 对称键伸缩振动峰^[13].钢渣在 $3150 \sim 3750 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收带由 O—H 或 N—H 键相互作用产生; $750 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收带由 C—H 面外伸缩振动、Si—O 伸缩振动及 Si—H 弯曲振动引起^[14]; $500 \sim 750 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收带由 C—H 面外弯曲振动、N—O 弯曲振动及 C—S 弯曲振动引起.与基质沥青谱图对比,发现钢渣沥青胶浆在整个波数区间大部分吸收峰与基质沥青变化趋势一致,为沥青吸收峰与钢渣吸收峰的正负叠加;在 $3070 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 及 $1780 \sim 2730 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收

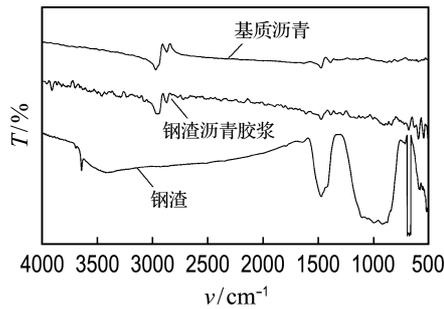


图 3 FT-IR 谱图

Fig. 3 FT-IR spectra

峰强度增加,说明沥青胶浆组分分子之间相互作用增强. 沥青胶浆在 $3\ 300\sim 3\ 750\ \text{cm}^{-1}$ 处是新产生的吸收带,是胺和酰胺 N—H 伸缩振动峰及 SiO—H 伸缩振动峰引起^[15];在 $2\ 140\sim 2\ 260\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了较微弱的 R—C≡N 键振动峰,表明钢渣与沥青之间会发生一定的化学反应. 化学反应发生必会形成新化学键,且不可逆,在界面相充当键桥连接,加强钢渣与沥青界面之间作用力.

2.2.2 接触角 沥青与集料界面要形成牢固黏结层,在黏附初期就要保证沥青能很好润湿集料,沥青在集料表面扩散及润湿会产生能量交换,而能量交换强度取决于沥青润湿集料能力^[11]. 从表面能理论来分析,沥青与集料的接触角 θ 表征沥青润湿集料能力,即接触角越小,黏附功越大,黏附强度越好,水稳定性越好^[16].

因此采用接触角仪对沥青与不同温度下集料的接触角进行测定,结果如图 4 所示. 由图可见,集料温度影响其与沥青接触角,原因在于集料表面温度升高,沥青分子热运动加剧,增大了沥青对集料浸润程度,使接触角伴随着集料温度增大而减小. 在集料温度相同下,接触角大小为石灰岩 > 热闷钢渣 > 冷弃陈渣,说明接触角与集料碱性有关. 基于表面能理论,可以认为钢渣与沥青界面黏

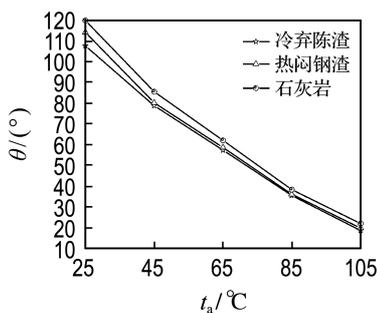


图 4 集料与沥青接触角

Fig. 4 Aggregate and asphalt contact angle

附性能较石灰岩好,原因在于钢渣是高碱性集料,沥青中酸性极性分子与钢渣表面碱性活性分子产生能量交换,增加了沥青对钢渣表面的浸润性能.

2.3 集料表面微观特性对沥青吸附影响

2.3.1 钢渣集料表面形貌分析 在动水压力及行车荷载作用下,表面光滑集料相比粗糙集料而言剪切阻力较低,一旦形成剪切破坏,剪切力便会扩展到整个沥青混合料路面. 对集料表面形貌进行 AFM 检测,并计算表面形貌相关参数. 采用机械设计与摩擦领域中常用到的轮廓算术平均偏差 R_a 作为粗糙度分析参数, R_a 是指在取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值,其计算公式如式 (1) 所示,结果如表 6 和图 5 所示.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |Z_j| \quad (1)$$

式中: R_a 为粗糙度的平均值, nm; Z_j 为扫描图中第 j 点高程, nm; N 为 AFM 扫描的测试点数.

表 6 集料表面形貌相关参数

Tab. 6 Related parameters of aggregate surface morphology

集料类型	集料扫描面积/ $10^{-9}\ \text{m}^2$	集料表面积/ $10^{-9}\ \text{m}^2$	集料粗糙度 R_a/nm
热闷钢渣	1.000	1.96	391.4
冷弃陈渣	1.000	2.45	433.7
石灰岩	1.000	1.13	118.3

由图 5 可以看出,钢渣与石灰岩表面纹理特征不同,钢渣呈现出较粗糙纹理形态,“山峰”高度较高,“山谷”深度较深,主要特点是表面高低起伏强度较大,“山峰”和“山谷”层次较分明;石灰岩表面部分区域较光滑,在“山峰”和“山谷”区域高低起伏强度较小. 由表 6 可以看出,热闷钢渣、冷弃陈渣粗糙度为石灰岩的 3.3 倍、3.7 倍,表面积为石灰岩的 1.7 倍、2.2 倍,说明钢渣粗糙度、表面积均大于石灰岩的. 由力学理论可知,沥青与集料间黏附性来源于两者分子间作用力,而分子间作用力和集料表面积密切相关^[17]. 集料表面越粗糙,则表面积越大,集料表面吸附沥青膜越厚,使得沥青-集料界面相黏结强度越好,相应的沥青与集料总黏附力越大^[4]. 即钢渣与沥青的抗水害能力会较石灰岩好.

2.3.2 钢渣集料表面黏附力分析 集料与沥青吸附特性不仅与集料表面微观形貌有关,还应考虑到集料自身黏附力对沥青-集料界面黏附强度的影响. 对集料黏附力进行 AFM 检测,结果如图 6 所示.

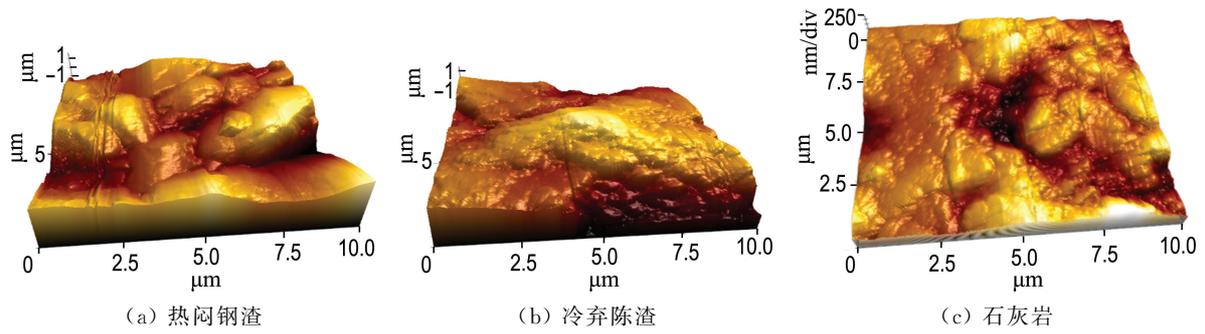


图 5 集料 3D 微观形貌

Fig. 5 3D microscopic morphology of aggregate

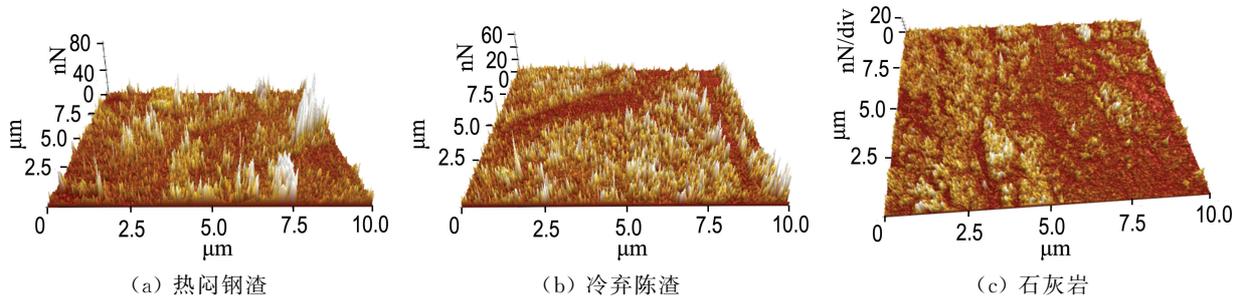


图 6 集料 3D 黏附力形貌

Fig. 6 3D adhesion morphology of aggregate

由图 6 可以看出,钢渣和石灰岩黏附力峰值(即图中白色部分)分布较随机,呈现散点式分布,而这些区域往往具有集料界面最高黏附力.热闷钢渣黏附力最大值为 92.7 nN,冷弃陈渣黏附力最大值为 94.2 nN,石灰岩黏附力最大值为 56.8 nN,初步分析,在单位区域下钢渣黏附力大于石灰岩的.但最大值不代表整个扫描区域黏附力,对扫描区域所有点黏附力求平均值,结果如图 7 所示.

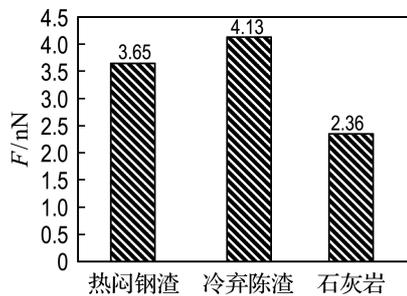


图 7 集料平均黏附力

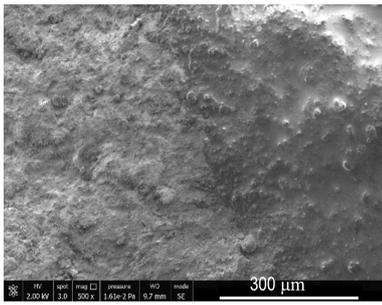
Fig. 7 Aggregate average adhesion

由图 7 可见,石灰岩平均黏附力为热闷钢渣的 64.7%,为冷弃陈渣的 57.1%,说明钢渣黏附力大于石灰岩的.在不考虑其他影响因素下,从黏附力来分析,钢渣比石灰岩与沥青黏结强度大.

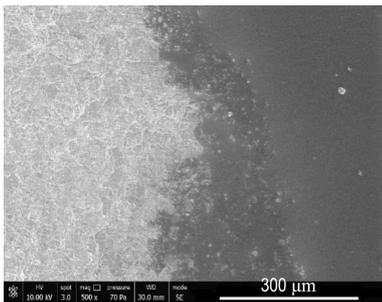
2.3.3 钢渣-沥青界面形貌分析 采用扫描电镜对热闷钢渣-沥青、石灰岩-沥青界面进行分析,结果如图 8 所示,图中黑色部分为沥青,具有一定表面纹理部分为集料.由图 8 可见,钢渣因为表面粗糙不规则的纹理,钢渣与沥青接触形成相互嵌挤状态,通过锚固作用,沥青膜不易从钢渣表面脱落,增加了两者界面之间机械咬合力,进而提高了钢渣与沥青的黏附性.而石灰岩因为粗糙度较低,局部区域较为光滑,与沥青没有形成一定的嵌入深度,未能形成较好机械咬合力,致使石灰岩与沥青黏附程度比较低,如果当沥青自身抗拉强度大于石灰岩-沥青界面黏附强度时,沥青膜在外力作用下易于从表面脱落,造成严重水损害现象.

2.4 集料与沥青水稳定性评价

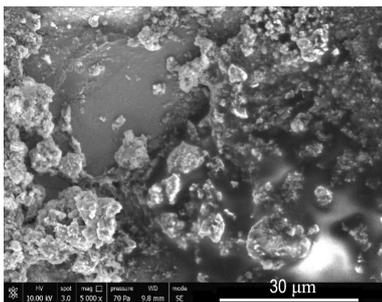
2.4.1 水煮法试验 对沥青与集料黏附等级 r 进行水煮法评价试验,结果如图 9 所示.由图可以看出,集料与沥青黏附等级随着水煮时间延长而降低,水煮时间对不同类型集料影响程度不同.在相同水煮时间下,不同类型钢渣黏附等级均大于石灰岩的,当水煮时间为 10 min 时,钢渣与沥青黏附等级还为 3 级,而石灰岩与沥青黏附等级仅为 2 级,这说明与石灰岩相比,钢渣与沥青之间黏附性更好.



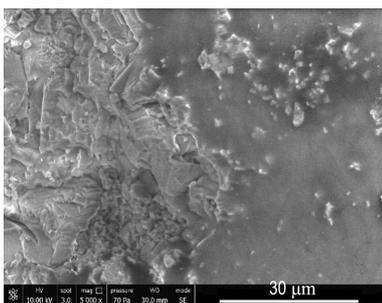
(a) 热闷钢渣-沥青界面 500 倍形貌



(b) 石灰岩-沥青界面 500 倍形貌



(c) 热闷钢渣-沥青界面 5 000 倍形貌



(d) 石灰岩-沥青界面 5 000 倍形貌

图 8 集料-沥青微观形貌图

Fig. 8 Aggregate-asphalt microscopic morphology map

2.4.2 水稳定性试验 对不同集料的沥青混合料进行水稳定性评价试验,结果如图 10 所示.由图可以看出,热闷钢渣、冷弃陈渣、石灰岩、钢渣石灰岩沥青混合料残留稳定度 S 分别为 100%、105%、89%、104%,热闷钢渣、冷弃陈渣、石灰岩、钢渣石灰岩沥青混合料冻融劈裂强度 R 分别为

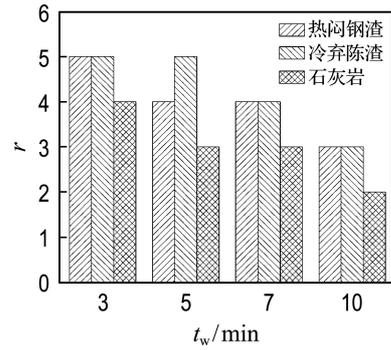
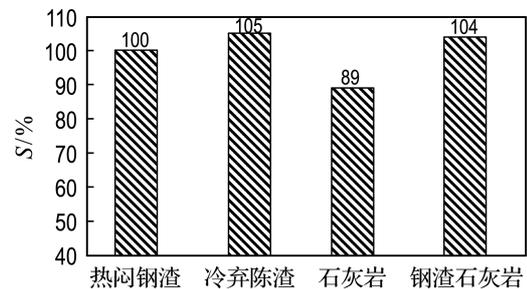
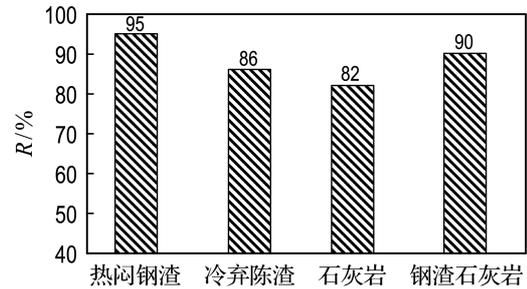


图 9 集料黏附等级

Fig. 9 Aggregate adhesion grade



(a) 残留稳定度



(b) 冻融劈裂强度

图 10 残留稳定性和冻融劈裂强度

Fig. 10 Residual stability and freeze-thaw splitting strength

95%、86%、82%、90%,说明不同类型钢渣沥青混合料残留稳定性和冻融劈裂强度均比石灰岩高,即钢渣集料比石灰岩具有更优良的抗水害能力.

2.4.3 钢渣沥青混合料体积稳定性试验 钢渣集料中含有游离氧化钙、游离氧化镁,这两种物质具有结构致密、水化速率较慢的特点,遇水会产生体积膨胀,将会引起钢渣沥青混合料体积稳定性的降低.故对钢渣沥青混合料膨胀量进行检验,使用试件为马歇尔试件,试验结果如表 7 所示.

由表 7 可见,热闷钢渣沥青混合料和石灰岩沥青混合料膨胀量均小于 1.5%,满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)技术要求;但冷弃陈渣沥青混合料膨胀量大于 1.5%,不满

表7 不同沥青混合料膨胀量试验结果

Tab.7 Expansion test results of different asphalt mixtures

沥青混合料类型	膨胀量/%
热闷钢渣沥青混合料	0.9
冷弃陈渣沥青混合料	1.9
石灰岩沥青混合料	0.1
钢渣石灰岩沥青混合料	1.2

足规范技术要求.用石灰岩细集料替代冷弃陈渣细集料后,钢渣石灰岩沥青混合料膨胀量较冷弃陈渣沥青混合料降低了36.8%,且满足规范技术要求,这说明冷弃陈渣细集料活性较大,严重影响着钢渣沥青混合料的体积稳定性,用石灰岩细集料代替冷弃陈渣细集料可以降低钢渣沥青混合料的膨胀性.

3 结 论

(1)钢渣孔隙结构比石灰岩的丰富,具有孔体积大、孔隙率大的特点,增大了钢渣与沥青机械咬合力与黏结内表面积;钢渣以小孔、中孔为主,钢渣孔径为 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 的孔隙相对于大孔更有利于吸收沥青.

(2)沥青与钢渣粉作用后,沥青出现两处新的吸收峰,在 $3\ 300\sim 3\ 750\ \text{cm}^{-1}$ 处胺和酰胺 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩振动峰及 $\text{SiO}-\text{H}$ 伸缩振动峰,在 $2\ 140\sim 2\ 260\ \text{cm}^{-1}$ 处的 $\text{R}-\text{C}\equiv\text{N}$ 键振动峰,说明沥青与钢渣发生了一定的化学反应,提高了钢渣-沥青界面相作用强度;在集料温度相同时,钢渣与沥青接触角比石灰岩与沥青的小,沥青对钢渣具有很好的润湿能力,提高了钢渣与沥青的黏附性.

(3)钢渣具有更大的粗糙度、表面积,增大了钢渣与沥青相互黏结面积及锚固作用;钢渣黏附力比石灰岩的大,增大了钢渣与沥青总黏附力.

(4)在同等水煮时间下,钢渣与沥青黏附等级一直大于石灰岩的;钢渣沥青混合料残留稳定性和冻融劈裂强度均比石灰岩的高,即钢渣集料与沥青具有更优秀的黏附性.

参 考 文 献:

[1] 胡芙蓉,涂崇志,李仁君,等.不同集料表面特性对沥青-集料黏附性能的影响[J].武汉理工大学学报,2020,44(2):363-368.
HU Furong, TU Chongzhi, LI Renjun, *et al.* Influence of different aggregate surface properties on asphalt-aggregate adhesion performance [J].

Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 44(2): 363-368. (in Chinese)

- [2] 李超,陈宗武,谢君,等.钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J].材料导报,2017,31(2):86-95,122.
LI Chao, CHEN Zongwu, XIE Jun, *et al.* A technological and applicational review on steel slag asphalt mixture [J]. *Materials Reports*, 2017, 31(2): 86-95, 122. (in Chinese)
- [3] 甘新立.集料与沥青的表面特性分析及黏附性评价[D].西安:长安大学,2017.
GAN Xinli. The surface character analysis of bitumen and aggregates and the evaluation of the adhesion between them [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [4] 陈国明,周纯秀,谭忆秋.粗集料表面纹理的分形评定及沥青混合料性能试验[J].交通运输工程学报,2009,9(4):1-5.
CHEN Guoming, ZHOU Chunxiu, TAN Yiqiu. Fractal evaluation of surface texture for coarse aggregate and performance test of asphalt mixture [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(4): 1-5. (in Chinese)
- [5] 杨文锋,吴少鹏,磨炼同,等.集料孔隙对沥青吸收和混合料体积性能影响[J].武汉理工大学学报,2003,25(12):72-75.
YANG Wenfeng, WU Shaopeng, MO Liantong, *et al.* Research on the effect of aggregate porosity on asphalt absorption and mixture volume's performance [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(12): 72-75. (in Chinese)
- [6] 李继文.钢渣粉对沥青混凝土水稳定性影响研究[J].公路交通科技,2020,16(4):93-95.
LI Jiwen. Research on the influence of steel slag powder on the water stability of asphalt concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 16(4): 93-95. (in Chinese)
- [7] 孙炜.沥青膜厚度对沥青-集料界面力学性能的影响[D].合肥:合肥工业大学,2019.
SUN Wei. Effect of asphalt film thickness on mechanical properties of asphalt-aggregate interface [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 成志强,张晓燕,孔繁盛,等.利用表面能理论及拉脱试验分析沥青膜的剥离行为[J].材料导报,2020,34(z2):288-294.
CHENG Zhiqiang, ZHANG Xiaoyan, KONG Fansheng, *et al.* Investigation on stripping behavior of asphalt film using surface energy theory and pull-off test [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(z2): 288-294. (in Chinese)

- [9] HUANG S C, ROBERTSON R E. Rheology of thin asphalt films in contact with aggregate [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2006, **7**(2): 179-199.
- [10] 虞将苗, 周文理. 宏纳观多尺度集料-沥青粘附性评价 [J]. 材料导报, 2021, **35**(2): 02052-02056.
YU Jiangmiao, ZHOU Wenli. Evaluation of adhesion between aggregate and asphalt binder in multi-scale [J]. *Materials Reports*, 2021, **35**(2): 02052-02056. (in Chinese)
- [11] 王元元. 表面能在评价沥青与集料粘附性中的应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
WANG Yuanyuan. Application research on adhesion between asphalt and aggregate based on surface energy theory [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 曹涛涛, 宋之光, 刘光祥, 等. 氮气吸附法-压汞法分析页岩孔隙、分形特征及其影响因素 [J]. 油气地质与采收率, 2016, **23**(2): 1-8.
CAO Taotao, SONG Zhiguang, LIU Guangxiang, *et al.* Characteristics of shale pores, fractal dimension and their controlling factors determined by nitrogen adsorption and mercury injection methods [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, **23**(2): 1-8. (in Chinese)
- [13] 郭猛. 沥青胶浆的界面行为与机理分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
GUO Meng. Interfacial behavior of asphalt mastics and its mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 徐帅. 钢渣透水沥青混合料的制备及界面机理研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
XU Shuai. Research on the preparation of permeable steel slag asphalt mixture and interface mechanism [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] SHEN Aiqin, ZHAI Chaowei, GUO Yinchuan, *et al.* Mechanism of adhesion property between steel slag aggregate and rubber asphalt [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2018, **32**(24): 2727-2740.
- [16] 耿九光, 兰倩, 刘光军, 等. 基于表面能理论的破碎卵石与沥青粘附性能研究 [J]. 材料导报, 2020, **34**(10): 20034-20039.
GENG Jiuguang, LAN Qian, LIU Guangjun, *et al.* Study on adhesion properties of broken pebble and asphalt based on surface energy theory [J]. *Materials Reports*, 2020, **34**(10): 20034-20039. (in Chinese)
- [17] 王高超. 基于 AFM 测试技术的沥青与集料粘附能力试验研究与评价 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
WANG Gaochao. Experimental study and evaluation adhesion capacity of asphalt and aggregates based on AFM testing technology [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

Research on adhesion characteristics of steel slag-asphalt interface

LI Song, ZHANG Caili*, DING Weizhe, WANG Ben, LI Tianhao

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to study the adhesion mechanism of steel slag-asphalt interface, with limestone as the control, mercury porosimeter, Fourier infrared spectrometer, contact angle meter, atomic force microscope, scanning electron microscope were used to reveal steel slag-asphalt interface effect from three angles of pore adsorption, chemical reaction and surface adhesion. Combined with laboratory tests, the water stability of steel slag aggregates was investigated. The results show that the pore volume and porosity of steel slag are larger than those of limestone, and the pores are mainly small pores and mesopores. Steel slag can chemically react with asphalt, and the contact angle between steel slag and asphalt is smaller than that between limestone and asphalt. The roughness, surface area and adhesion of steel slag are larger than those of limestone. The water stability of steel slag aggregate is better than that of limestone. That is to say, steel slag aggregate has stronger asphalt adsorption characteristics due to its superior pore adsorption capacity, active chemical composition and rough surface texture.

Key words: steel slag-asphalt interface; pore structure; chemical properties; roughness; adhesion