文章编号:1007-9629(2023)03-0251-08

典型岩性机制砂的吸附行为研究

王 振^{1,2}, 李化建^{1,2,*}, 黄法礼^{1,2}, 易忠来^{1,2}, 杨志强^{1,2}

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:研究了石荚岩、石灰岩、花岗岩和玄武岩等典型岩性机制砂对水、亚甲蓝及聚羧酸减水剂的吸附规律,采用Zeta电位、吸-脱附曲线和压汞曲线分析了机制砂的吸附特性.结果表明:玄武岩机制砂由于比表面积大、孔隙率高,对水和亚甲蓝的吸附性明显大于其他岩性机制砂,且随着石粉含量的增加,玄武岩机制砂的吸附性显著增大;机制砂石粉表面的负电荷与溶液中的阳离子形成了双电层来吸附减水剂分子,其对聚羧酸减水剂吸附率的大小是玄武岩石粉>石灰岩石粉>花岗岩石粉>石 荚岩石粉;在双电层吸附和物理吸附的双重作用下,玄武岩机制砂对聚羧酸减水剂的吸附率显著大于其他岩性机制砂.

关键词:机制砂;岩性;吸附性;石粉 中图分类号:TU526 文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.005

Adsorption Behavior of Typical Lithological Manufactured Sands

WANG Zhen^{1,2}, LI Huajian^{1,2,*}, HUANG Fali^{1,2}, YI Zhonglai^{1,2}, YANG Zhiqiang^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract : The adsorption rules of typical lithological manufactured sands to water, methylene blue and polycarboxylate superplasticizer were studied by taking the quartzite, limestone, granite and basalt as research objects. The adsorption characteristics of manufactured sands were analyzed by Zeta potential, adsorption-desorption isotherm and mercury intrusion curve. The results show that the adsorptions of water and methylene blue on basalt manufactured sand are significantly higher than those on other lithological manufactured sands due to its larger specific surface area and higher porosity. And the adsorption capacity of basalt manufactured sand is increased significantly with the increase of stone powder content. The double electric layer formed by the surface negative charges of stone powder and cations in solution can adsorb superplasticizer molecules. The adsorption ratio of polycarboxylate superplasticizer by stone powder. With the coupling effect of electric double layer adsorption and physical adsorption, the adsorption ratio of basalt manufactured sand for polycarboxylate superplasticizer is significantly higher than those of other lithological manufactured sands.

Key words: manufactured sand; lithological; adsorption; stone powder

机制砂具有产量和质量可控以及生产成本低的 优势,现已逐渐成为天然河砂的绿色替代建筑材料[1].

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1934206);中国铁道科学研究院基金项目(2020YJ049)

收稿日期:2022-02-08;修订日期:2022-03-07

第一作者:王 振(1993—),男,湖南岳阳人,中国铁道科学研究院集团有限公司助理研究员,硕士.E-mail:wangzhenbanana@163.com 通讯作者:李化建(1976—),男,安徽阜阳人,中国铁道科学研究院集团有限公司研究员,博士生导师,博士.E-mail:chinasailor@163.com

由于母岩成岩方式、矿物结构和化学组成的差异,不同岩性机制砂的物理、化学性能复杂多变.工程实践表明,机制砂的高吸附性导致混凝土在施工中出现了流变性能小、经时损失大和密实性差等问题^[2],其吸附行为对混凝土的工作性能和耐久性能有重要影响.

含有黏土矿物是机制砂具有高吸附性能的主要 原因之一.蒙脱土、高岭土和伊利土等黏土矿物具有 层状晶体结构^[3],水分子易进入层间且层间离子易被 低价金属离子取代,呈现出良好的吸水膨胀特性和 阳离子交换特性^[4].蒙脱土层间分子的作用力最弱, 从而表现出最强的吸附性能^[5].机制砂中黏土矿物对 水泥基材料性能的影响及作用机理比较清晰^[6],已采 用除土工艺来控制机制砂生产过程中黏土矿物的引 入,并研制出不同类型的减水剂来抑制机制砂中黏 土矿物对水泥基材料的负面效应^[7].

机制砂高吸附性的另一方面原因与母岩成分及 结构密切相关.Feng等^[8]研究认为聚羧酸分子链会 插层吸附至层状云母结构中,导致层状白云母石粉-水泥浆体的流变性明显低于链状辉石石粉-水泥浆 体.邓最亮^[9]指出机制骨料的高吸附性和吸水性源于 架状硅酸盐长石的矿物成分与多孔结构.张广田 等^[10]研究认为硅质机制砂的吸附性源于破碎表面的 电荷和断裂键.由于机制砂自身的吸附性能复杂且 变化规律揭示不足,导致高吸附性机制砂在混凝土 中应用困难,限制了机制砂的应用.

为探明典型岩性机制砂的吸附行为,本文研究 了石英岩、石灰岩、花岗岩和玄武岩机制砂对水、亚 甲蓝及聚羧酸减水剂的吸附规律,采用 Zeta 电位、 吸-脱附曲线和压汞曲线分析了机制砂的吸附特性, 以期为高吸附性机制砂混凝土的制备以及特种外加 剂的研发提供借鉴和支撑.

1 试验

1.1 原材料

试验水泥(C)为满足GB 8076—2008《混凝土外加剂》技术要求的P·I 42.5硅酸盐水泥,其化学组成(质量分数,文中涉及的组成、含量等除特别说明外均为质量分数)见表1.吸附介质亚甲蓝溶液的性能满足GB/T 14684—2011《建设用砂》的规定.减水剂

表1 水泥的化学组成 Table 1 Chemical composition of cement

								W/ 70
CaO	SiO_2	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	MgO	SO_3	Na ₂ Oeq	f-CaO	IL
62.84	21.34	4.69	3.15	2.57	2.09	0.56	0.92	1.68

采用了 2种侧链基团不同的聚羧酸减水剂 PCA-1和 PCA-2(分子结构见图 1),其中 PCA-2的侧链长度大 于 PCA-1.石英岩机制砂(SYY)、石灰岩机制砂(SHY)、花岗岩机制砂(HGY)和玄武岩机制砂(XWY)的主要性能如表 2所示.

图 2 为机制砂的 XRD 图谱.由图 2 可见:石英岩 机制砂以石英为主;石灰岩机制砂以方解石为主;花 岗岩机制砂以石英和水钙沸石为主,还含有少量的 珍珠云母;玄武岩机制砂中的矿物相对复杂,主要组 成为石英、普通辉石、钠长石和磁铁矿.

为避免机制砂颗粒级配、石粉含量等的影响,在 试验前对机制砂和石粉进行预处理:先将所有岩性机 制砂筛分成≪0.075 mm、0.075~0.150 mm、0.150~ 0.300 mm、0.300~0.600 mm、0.600~1.180 mm、 1.180~2.360 mm和2.360~4.750 mm共7个粒级; 再按表3所示的颗粒级配,将机制砂配制成细度模数 2.6且不含石粉的中砂.

制备不同石粉含量的机制砂时,首先将≪0.075 mm 粒级的颗粒进行粉磨,再采用球磨机对石英岩和花岗 岩石粉额外粉磨10 min,以保证4种岩性石粉颗粒的粒 度分布基本一致.事实上,石英岩、石灰岩、花岗岩和玄 武岩石粉(PSYY、PSHY、PHGY、PXWY)的中值粒 径(D₅₀)分别为20.5、21.6、22.6、23.8 µm(见图3).最



图 1 聚羧酸减水剂的分子结构 Fig. 1 Molecular structures of polycarboxylate superplasticizers

	表 2	机制砂的主要性能	
Table 2	Main p	roperties of manufactured	sands

Туре	Apparent density/($g \cdot cm^{-3}$)	$w(\mathrm{Cl}^-)/\%$	$w(\mathrm{SO}_3)/\sqrt[9]{0}$	Soundness/%	Crushing index(by mass)/ $\%$	Alkaline activity/%
SYY	2.55	0.001	0.034	3	14	0.02
SHY	2.70	0.002	0.017	1	11	0.07
HGY	2.56	0.002	0.017	1	7	0.15
XWY	2.77	0.002	0.034	1	9	0.12



表 3 机制砂的颗粒级配 Table 3 Particle gradations of manufactured sands

	Accumulative screen rate/ $\%$				
Sieve size/mm	Limit of second gradation	Manufactured sand			
4.75	10-0	0			
2.36	25-0	10			
1.18	50-10	25			
0.60	70-41	65			
0.30	92-70	80			
0.15	94-80	90			

后,称取定量石粉添入不含石粉、相同岩性的机制砂 样品中,充分搅拌混合均匀,制成石粉含量分别为 0%、3%、5%、8%、10%和15%的机制砂.



1.2 试验方法

1.2.1 机制砂对不同介质的吸附性能

机制砂的吸水率和亚甲蓝值(MB值)按GB/T 14684—2011规定的方法进行测试.

减水剂被吸附率试验在(20±2)℃的环境温度 下进行.首先,将100.0g机制砂石粉或水泥、200.0g 水以及0.2g聚羧酸减水剂混合并搅拌均匀,在搅拌 规定时间后取出25 mL 悬浊液,离心后取出9g上清 液;然后,加入1.5g浓度为1.0 mol/L的盐酸,以除去 上清液中的无机碳,再采用 Multi N/C3100 TOC 分 析仪测试上清液中的总有机碳含量;最后,通过差值 计算得到不同时间石粉或水泥对减水剂分子的吸附 量,吸附量与减水剂掺量的比值即为减水剂被吸 附率.

1.2.2 净浆流动度

按表4配合比制备石粉-水泥净浆,依据GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》中的试 验方法测试石粉-水泥净浆的流动度.为反映减水剂 被饱和吸附时石粉-水泥净浆体系的流变性能经时 损失,测试其30min净浆流动度.

表 4 石粉-水泥净浆的配合比 Table 4 Mix proportions of stone powder-cement pastes

					-
No.	Powder type	Cement	Stone powder	Water	Superplasticizer
1		300.00	0	87.00	0.75
2	PSYY	210.00	90.00	87.00	0.75
3	PSHY	210.00	90.00	87.00	0.75
4	PHGY	210.00	90.00	87.00	0.75
5	PXWY	210.00	90.00	87.00	0.75

1.2.3 Zeta电位

将100.00g水泥或石粉加入200.00g水中搅拌均匀,制备成不含减水剂的悬浊液,采用ZetaProbe型Zeta电位(自动测试和记录悬浊液的Zeta电位.在测试过程中,磁力搅拌机的搅拌速率为200r/min,以防止浆体沉降和分层.将100.00g水泥或石粉加入200.00g水中,并添加0.25gPCA-1型聚羧酸减水剂搅拌均匀,制备成含有减水剂的悬浊液,继续采用相同方法测试和记录悬浊液的Zeta电位.

1.2.4 等温吸-脱附曲线与压汞曲线

取机制砂筛分后粒径为0.600~1.180 mm的颗 粒作为试样,在110℃环境中脱气处理24h,采用 Tristar II型吸附仪测试机制砂对N₂的等温吸-脱附 曲线,试验温度为77.35 K,相对压力为10⁻⁶~1,采用 BET方程计算样品的比表面积.

采用 Microactive Autopore V 9600型压汞仪测 试试样的压汞曲线,温度为(20±0.5)℃,最大压力为 420.58 MPa.

ø

2 结果与讨论

2.1 机制砂对水的吸附规律

图4为机制砂的吸水率.由图4可知:

(1)当石粉含量相同时,机制砂吸水率受岩性的 影响显著,石英岩机制砂的吸水率最低,其次是花岗 岩和石灰岩机制砂,玄武岩机制砂的吸水率显著大 于其他岩性机制砂.

(2)石粉含量为0%机制砂的吸水率稍大于石粉含量为3%的机制砂,这与机制砂吸水率的测试方法相关.适量石粉改善了机制砂的级配^[11],使其达到GB/T 14684—2011中"锥形"饱和面干状态的用水量较小. 当石粉含量分别为0%、3%、5%、8%、10%和15% 时,玄武岩机制砂的堆积密度分别为1590、1638、 1660、1683、1697、1680 kg/m³.随着石粉含量的增 大,机制砂的堆积密度先增大后降低,证明适量石粉 对机制砂级配有改善效果.

(3)随着石粉含量的增大,机制砂的总比表面积 增加,对水的吸附作用更大.石英岩、石灰岩和花岗 岩机制砂吸水率的增加较小,玄武岩机制砂的吸水 率增加显著.石粉对机制砂具有改善堆积密度来降 低吸水率和增大比表面积来增加吸水率的双重作用. 对于不同岩性的机制砂,采用饱和面干吸水率测试 方法时应充分考虑石粉效应的影响.



Fig. 4 Water absorptions of manufactured sands

2.2 机制砂对亚甲蓝的吸附规律

图5为机制砂的MB值.由图5可知:

(1)当石粉含量相同时,玄武岩机制砂的 MB 值 显著大于其他岩性机制砂.当石粉含量为 0% 时,玄 武岩机制砂的 MB 值高达 1.6 g/kg,其高吸附性源于 自身的性能.

(2)随着石粉含量的增大,石英岩和石灰岩机制砂的MB值无明显变化,花岗岩机制砂的MB值稍有



增加,玄武岩机制砂的MB值增加显著.石粉含量的 增加提高了机制砂的总比表面积,增加了机制砂与 亚甲蓝之间的吸附位点^[12],导致高吸附性玄武岩机 制砂MB值的增量显著高于对亚甲蓝吸附性小的石 英岩、石灰岩和花岗岩机制砂.在工程实践中,通常 采用MB值来直接判断细骨料是否存在膨胀性黏土 矿物以及间接表征含泥量^[3].本试验证明,对于不同 岩性机制砂,采用MB值来判断机制砂是否含有黏土 矿物并不完全准确.

2.3 机制砂对减水剂的吸附规律

图 6 为水泥和石粉对聚羧酸减水剂的吸附率.由 图 6 可知:

(1)石英岩石粉对聚羧酸减水剂的吸附率低,且 随着时间的延长无明显变化;石灰岩、花岗岩和玄武 岩石粉对减水剂分子的吸附性高于石英岩石粉.在 减水剂加入粉体悬浊液10min内,机制砂石粉快速 吸附聚羧酸减水剂,然后吸附率缓慢增加直至保持 稳定.

(2)石英岩石粉对 PCA-1和 PCA-2减水剂的吸 附率分别为0.1%和2.4%,表现出较低的减水剂吸 附性,玄武岩石粉对 PCA-1和 PCA-2减水剂的吸附 率分别高达94.7%和94.3%,表现出极高的减水剂 吸附性,这与相应机制砂对水和亚甲蓝的吸附规律 一致.花岗岩石粉对水的吸附性以及石灰岩石粉对 亚甲蓝的吸附性与石英岩石粉相似,但两者对减水 剂的吸附性明显大于石英岩石粉,这表明机制砂石 粉对不同介质的吸附机理存在差异.采用不同类型 的聚羧酸减水剂作为吸附源时,机制砂石粉对聚羧 酸减水剂分子吸附率大小规律为:玄武岩石粉>石 灰岩石粉>花岗岩石粉>石英岩石粉.

(3)当减水剂由PCA-1变为PCA-2时,水泥和石 英岩、石灰岩、花岗岩、玄武岩机制砂石粉对减水剂





吸附率的变化值为-1.9%、2.3%、2.2%、17.9%和 -0.4%,花岗岩机制砂石粉吸附率的变化较大,而其 他岩性机制砂石粉对减水剂的吸附率无明显变化, 这可能与花岗岩机制砂中含有少珍珠云母有关.珍 珠云母的层状结构易使侧链较长的聚羧酸减水剂分 子发生插层吸附^[8],表现出对PCA-2型减水剂更高的 吸附性.

图 7 为水泥和石粉-水泥净浆的 30 min 净浆流 动度.由图 7 可见:

(1)掺加PCA-1型聚羧酸减水剂的浆体中,石英 岩、石灰岩、花岗岩和玄武岩机制砂石粉-水泥浆体 的30min净浆流动度分别是纯水泥浆体的119.6%、 110.4%、117.8%和88.7%,掺加PCA-2型聚羧酸减 水剂的浆体表现出相似的规律,即掺加30%玄武岩 机制砂石粉降低了水泥浆体的流动度,而掺加30% 其他岩性机制砂石粉增大了水泥浆体的流动度.

(2)聚羧酸减水剂分子通过吸附在水泥颗粒或水化产物颗粒表面发挥分散作用^[13-14],玄武岩机制砂



Fig. 7 Fluidities of cement and stone powder-cement paste at 30 min

石粉对减水剂的吸附率显著高于水泥,在浆体中与 水泥颗粒竞争吸附减水剂,削弱减水剂的分散作 用,显著降低了水泥浆体的流变性.石灰岩、花岗岩 和石英岩机制砂石粉对减水剂吸的附率小于纯水 泥,其替代水泥后改善了浆体的流动度,且对减水 剂吸附性越低的机制砂石粉,改善流动度的效果 越好.

2.4 机制砂的吸附特性分析

2.4.1 Zeta电位

图8为石粉和水泥的Zeta电位.由图8可知:

(1)水泥浆体表面带正电荷,4种岩性机制砂石 粉浆体表面均带负电荷.水化产物的Zeta电位与水 泥的矿物组成与含量相关,本试验所用水泥120min时 的Zeta电位为7.42mV.含有石英、长石等硅质矿物的 岩石破碎生产出的机制砂和石粉在解理面存在大量 Si—O、Al—O断裂键^{10]},使机制砂和石粉颗粒表面带 负电.因此,石英岩、花岗岩和玄武岩机制砂石粉在120min 时的Zeta电位分别是一10.08、-6.23、-6.07mV,石 英岩机制砂石粉电负性最大的原因可能是其Si₂O含 量高,表面具有更多的Si—O断裂键.石灰岩机制砂 120min时的Zeta电位是-7.65mV,源于其表面的 碳酸根离子^[15].

(2)在加入聚羧酸减水剂后,水泥浆体和石粉浆体的Zeta电位均向负电位方向移动,石英岩石粉、石灰岩石粉、花岗岩石粉和玄武岩石粉在120min时Zeta电位的变化值分别是为3.20、14.84、5.07、18.40mV,电位变化程度反映出石粉对减水剂分子的吸附能力是: 玄武岩石粉>石灰岩石粉>花岗岩石粉>石英岩石粉,与有机碳法(TOC)测试的吸附性结果一致.

综合矿物组成和Zeta电位测试结果分析,机制 砂石粉颗粒的表面在溶液中带负电,与矿物成分中 电离出的K⁺、Ca²⁺、Na⁺等阳离子形成双电层结构^[10], 从而吸附阴离子聚羧酸减水剂分子,如图9所示.虽



图 6 石材和小化的 Zeta 电位 Fig. 8 Zeta potentials of stone powders and cement



图 9 石粉吸附减水剂分子的示意图 Fig. 9 Schematic diagram of superplasticizer molecule adsorbed by stone powder^[10]

然石英岩石粉表面具有较多的Si—O断裂键,但其对 减水剂的吸附性小,原因在于其矿物组成比较单一, 无阳离子作为位点吸附减水剂分子;玄武岩石粉的 矿物组成复杂,Ca、Fe和Al元素较多,为减水剂吸附 提供了额外的位点,表现出对减水剂较强的吸附性. 因此,在使用高吸附性机制砂时,为获得较好的混凝 土施工性能,需要开发与之相匹配的减水剂.

2.4.2 等温吸-脱附曲线和压汞曲线

图 10 为机制砂的等温吸-脱附曲线.由图 10 可 见:在相对压力值小于 0.9 时,机制砂的吸附等温线 缓慢上升;当相对压力值大于 0.9 时,机制砂的吸附 等温线急剧上升,机制砂的脱附曲线与吸附曲线之 间呈现回滞环,曲线类型属于 IV 型等温线^[16];回滞环 与机制砂中的介孔结构发生毛细孔凝结现象相关, 滞回环类型为 H3 型,表明机制砂中存在的孔形是 狭缝孔^[17];玄武岩机制砂的比表面积(755.7 m²/kg) 分别是石英岩机制砂(85.3 m²/kg)、石灰岩机制砂 (169.2 m²/kg)和花岗岩机制砂(139.6 m²/kg)的 9.07、 4.46和5.41倍,反映出玄武岩机制砂具有更高的吸附性.



图 11 为机制砂的累积进汞体积.由图 11 可见: 随着压力的增大,机制砂中的大孔迅速被汞填充,表 现为累计进汞量的急剧增大;随后曲线缓慢增长,最 终测得石英岩、石灰岩、花岗岩和玄武岩机制砂的孔 隙率分别为7.41%、9.41%、7.12%和11.02%.





图 12 为机制砂的孔隙分布.由图 12 可见:机制 砂中孔隙体积占比最大的是大于10 µm的大孔,石英 岩、石灰岩和花岗岩机制砂的孔隙分布相似,而玄武 岩机制砂中小于100 nm 微孔的孔隙率明显高于其他 岩性机制砂;玄武岩机制砂的高孔隙率以及高微孔 比例,是其对水和亚甲蓝的吸附性显著大于其他岩 性机制砂的主要原因;孔隙结构的物理吸附和双电 层吸附耦合作用导致玄武岩机制砂对减水剂的吸附 率也显著大于其他岩性机制砂.



3 结论

(1)机制砂对不同介质的吸附特性与其自身岩 性密切相关.玄武岩机制砂具有较大的比表面积和 高孔隙率,导致其吸水率和亚甲蓝值明显高于石英 岩、石灰岩和花岗岩机制砂,且随着石粉含量的增大 呈现更高的吸附性.

(2)石粉具有改善机制砂堆积密度以及增加比 表面积的双重作用,其含量影响标准试验方法测得 的机制砂吸水率值.亚甲蓝值能够反映机制砂吸附 性能的大小,但不适用于判断岩性机制砂是否含有 黏土矿物.

(3)机制砂石粉对聚羧酸减水剂分子吸附率的 大小为:玄武岩石粉>石灰岩石粉>花岗岩石粉> 石英岩石粉.机制砂石粉吸附减水剂分子的原因是 其表面负电荷和矿物成分阳离子形成双电层结构, 吸附阴离子聚羧酸减水剂分子.石英岩的矿物组成 单一,无阳离子作吸附位点,对减水剂吸附性小;玄 武岩的矿物组成复杂,Ca、Fe和Al等元素在溶液中 为聚羧酸减水剂吸附提供位点,导致玄武岩石粉对 减水剂的吸附性更强.

参考文献:

- LI H J, WANG Z, HUANG F L, et al. Impact of different lithological manufactured sands on high-speed railway box girder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116943.
- SHEN W G, LIU Y, WANG Z W, et al. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance
 [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172:574-583.
- [3] CHEN X, GUO Y G, LI B, et al. Coupled effects of the content and methylene blue value (MBV) of microfines on the performance of manufactured sand concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240:117953.
- [4] BORRALLERAS P, SEGURA I, ARANDA M, et al. Absorption conformations in the intercalation process of polycarboxylate ether-based superplasticizers into montmorillonite clay[J]. Construction and Building Materials, 2019, 236:116657.
- [5] 王智,考友哲,王林龙,等.单矿物黏土对聚羧酸减水剂分散 性的影响与机理[J].建筑材料学报,2015,18(5):879-887.
 WANG Zhi, KAO Youzhe, WANG Linlong, et al. Effect and mechanism of single mineral clay on dispersibility of polycarboxylate superplasticizer[J]. Journal of Building Materials, 2015,18(5):879-887. (in Chinese)
- [6] 杨勇,冉千平,毛永琳,等.蒙脱土对聚羧酸超塑化剂的吸附 行为[J].建筑材料学报,2012,15(4):464-468.
 YANG Yong, RAN Qianping, MAO Yonglin, et al. Adsorption behavior of polycarboxylate superplasticizers onto montmorillonite
 [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4):464-468. (in Chinese)
- [7] LEI L, PLANK J. A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(10):1299-1306.
- [8] FENG H, PAN L S, ZHANG Q, et al. Effects of molecular structure of polycarboxylate superplasticizers on their dispersion and adsorption behavior in cement paste with two kinds of stone powder[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 182-192.
- [9] 邓最亮.多孔和层状骨料对聚羧酸减水剂的吸附及其对砂浆流 变性的影响[D].上海:华东理工大学,2021. DENG Zuiliang. Adsorption of polycarboxylate water reducer by porous and layered aggregates and its effect on the rheological properties of mortar[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] 张广田,刘娟红,孔丽娟,等.石英岩型铁尾矿机制砂中石粉的吸附特性及机理[J].材料导报,2021,35(6):71-77.
 ZHANG Guangtian, LIU Juanhong, KONG Lijuan, et al. Adsorption characteristics and mechanism of stone powder in quartzite-type iron tailings machine-made sand [J]. Materials Review, 2021, 35(6):71-77. (in Chinese)
- [11] NAKAYENGA J, CIKMIT A, TSUCHIDA T, et al. Influence of stone powder content and particle size on the strength of cement-treated clay [J]. Construction and Building Materials, 2021, 305:124370.

- [12] 王军伟,安明喆,刘亚洲,等.机制砂物理特性对水泥胶砂流 变性能的影响及机理[J].中国铁道科学,2021,42(2):19-27.
 WANG Junwei, AN Mingzhe, LIU Yazhou, et al. Effect of physical characteristics of manufactured sand on rheological properties of cement mortar and its mechanism[J]. China Railway Science, 2021, 42(2):19-27. (in Chinese)
- [13] KONG F R, PAN L S, WANG C M, et al. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105(15):545-553.
- [14] FLATT R J, HOUST Y F. A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers[J]. Cement and Concrete

Research, 2001, 31(8):1169-1176.

- [15] DIRK L, CHRISTOPH G. The zeta potential of cement and additions in cementitious suspensions with high solid fraction[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95:195-204.
- [16] 孙凯利.海泡石-粉煤灰体系在水泥基材料中的作用机理研究
 [D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.
 SUN Kaili. Study on the mechanism of sepiolite-fly ash system in cement-based materials[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. (in Chinese)
- [17] LI X, LI Z, XIA Q B, et al. Effects of pore sizes of porous silica gels on desorption activation energy of water vapour[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5/6):869-876.