

矽卡岩型尾矿机制砂对混凝土性能的影响*

Effect of Mechanism Sand of Skarn Tailings on Concrete Performance

于海洋^{1,3}, 钱宏德², 刘东基^{1,3}, 张艳佳^{1,3}

(1. 河北省建筑科学研究院有限公司, 河北 石家庄 050227; 2. 涞源县奥威矿业投资有限公司, 河北 保定 074300;
3. 河北省固废建材化利用科学与技术重点实验室, 河北 石家庄 050227)

摘要: 利用涞源地区矽卡岩尾矿废石制备机制砂, 分析其母岩的岩相和矿物组成, 测定机制砂石粉的主要成分。对比石灰岩机制砂, 研究了机制砂片状颗粒含量、石粉含量对 C30、C50 混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响。结果表明: 片状颗粒和石粉含量的提高均会使机制砂混凝土的工作性能和强度降低; 相比于石灰岩机制砂, 当片状颗粒相同时, 矽卡岩机制砂混凝土强度更高; 石粉含量小于 8% 时, 矽卡岩机制砂混凝土的强度较高; 对于 C30 矽卡岩机制砂混凝土, 片状颗粒含量的提高会使混凝土的耐久性变差, 但一定量的石粉对抗渗、抗冻以及抗氯离子渗透性能具有一定的改善效果。

关键词: 矽卡岩; 机制砂; 片状颗粒; 石粉含量; 混凝土性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0006-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.002

YU haiyang^{1,3}, QIAN Hongde², LIU Dongji^{1,3}, ZHANG Yanjia^{1,3}

(1. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050227, China; 2. Laiyuan County Orway Mining Investment Co., Ltd., Baoding 074300, China; 3. Hebei Province Science and Technology Key Laboratory of Solid Waste for Building Materials, Shijiazhuang 050227, China)

Abstract: The siliceous manufactured sand was prepared from the waste rock of skarn tailings in Laiyuan area. The lithofacies and mineral composition of tailings waste rock parent rock were analyzed, and the main performance indexes of the manufactured sand and the main components of the stone powder were determined. Compared with the limestone manufactured sand, the effects of the flake particle content and the stone powder content of the manufactured sand on the working performance, mechanical properties and durability of concrete were studied. The results show that: The increase of flake particles and powder content reduces the workability and strength of the skarn manufactured sand concrete and the limestone manufactured sand concrete. Compared with limestone machine-made sand, when the flaky particles are the same, the strength of skarn machine-made sand concrete is higher. When the powder content is less than 8%, the strength of the skarn manufactured sand concrete is higher. For the C30 skarn manufactured sand concrete, the increase of flake particles content will deteriorate the durability of the concrete, but a certain amount of powder has a certain improvement effect on the impermeability, frost resistance and chloride ion permeability resistance.

Keywords: skarn; manufactured sand; flake particles; stone powder content; performance of concrete

* 基金项目: 河北省重点研发计划项目资源与环境专项资助项目 (20373801D); 石家庄市科技计划项目 (226160507A)。

作者简介: 于海洋 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 固废尾矿资源化利用、建筑垃圾资源化利用等方面研究。

通信作者: 刘东基 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 固废尾矿资源化利用、高品质机制砂石等方面研究。

收稿日期: 2023-11-15

0 引言

在天然砂石极度短缺和环保要求不断提高的背景下，机制砂逐步替代天然砂成为主力砂源^[1]。目前，国家和行业在大力推广规范使用机制砂石的同时，也在推广使用尾矿废石制备机制砂石及建筑垃圾制备再生砂石^[2-3]，使用尾矿制备机制砂石，既解决了尾矿的出路问题，又解决了建设用砂石资源问题^[4]，有利于缓解资源开发与环境保护之间的矛盾。

目前，国内学者已经针对尾矿砂在混凝土中的应用展开了不同程度的研究。众多研究表明，合理选择尾矿砂的颗粒级配，调整细度模数，选择合适的配合比，可得到符合工作和强度要求的尾矿砂混凝土^[5-7]。但尾矿砂多为硅质机制砂，除粒形、石粉含量外，岩性对硅质机制砂的吸附行为影响显著，继而影响机制砂混凝土的性能^[8-10]，因此，针对特定岩型的硅质尾矿砂在混凝土中的应用展开研究。

针对河北涞源地区的矽卡岩型尾矿机制砂的特点，与石灰岩机制砂做对比，研究了片状颗粒含量、石粉含量对 C30、C50 混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响，研究结果可为矽卡岩型尾矿机制砂混凝土的工程应用和耐久性评估提供技术指导。

1 试验概况

1.1 原材料与配合比

水泥为金隅 P·O 42.5 水泥，主要性质见表 1；粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰，需水量比为 98 %；试验中机制砂分别为矽卡岩尾矿机制砂和石灰岩机制砂，颗粒级配见表 2，符合 2 区的规定，细度模数 2.9 的中砂；碎石为尾矿碎石，5~10、10~16、16~20 mm 间断级配，压碎值为 11.6 %，表观密度 2.63 g/cm³；水为自来水；减水剂为聚羧酸减水剂，减水率 20%。

试验配置强度等级分别为 C30、C50 的机制砂混凝土，混凝土基准配合比见表 3。

表 1 水泥的主要物理性能指标
Table 1 Main physical performance indexes of cement

比表面积/ (kg·m ²)	安定性	凝结时间 /min		标准稠度 用水量/%	抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa	
		初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
325	合格	155	196	27.5	19.6	45.5	4.2	8.9

表 2 机制砂的颗粒级配

Table 2 Particle gradation of machine-made sand / %						
筛余类型	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm
分计筛余	—	22	20	21	17	12
累计筛余	—	22	42	61	78	90

表 3 混凝土的基准配合比
Table 3 Benchmark mix ratio of concrete

等级	材料配比/(kg/m ³)					减水剂/%
	水泥	粉煤灰	机制砂	碎石	水	
C30	288	72	810	1 031	162	2.0
C50	384	96	683	1 069	149	3.0

1.2 试验方法

(1) 片状颗粒含量的确定 参照 GB/T 14684—2022《建设用砂》进行，取适量的机制砂分成 1.18~2.36、2.36~4.75 mm 两个粒级，分别使用条形孔、宽为 0.8、1.6 mm 的筛子手动筛分，将机制砂中的片状颗粒筛出，1：1 混匀，再按照 2%、4%、6%、8% 的质量比与无片状颗粒的机制砂混合，并保证机制砂的颗粒级配满足表 1 的要求。

(2) 混凝土的工作性能和力学性能 按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行测定，测试混凝土拌合完成后的坍落度及扩展度；混凝土的抗压强度按照 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》测定标准养护条件下养护至 3、28 d 龄期的混凝土立方体抗压强度，试块为 100 mm×100 mm×100 mm。

(3) 混凝土的耐久性能 按照 GB/T50082—2009《混凝土长期性能和耐久性实验方法》进行测定，测试混凝土的抗氯离子渗透能力、抗渗等级、抗冻等级和抗裂性能。

2 试验结果与分析

2.1 片状颗粒含量对混凝土性能的影响

分别选取片状颗粒含量为 2%、4%、6%、8% 的矽卡岩机制砂与石灰岩机制砂，按照表 3 的基准配合比配制 C30 与 C50 混凝土，试验研究片状颗粒含量对机制砂混凝土工作性能、力学性能以及耐久性能的影响。

由图 1 可以看出，随着片状颗粒含量的增加，混凝土的坍落度和扩展度均不断降低，对比两种岩性机制砂配置的混凝土，可知在相同片状颗粒含量下，矽卡岩尾矿机制砂混凝土的扩展度值和坍落度值均低于石灰岩机制砂混凝土；片状颗粒含量从 2% 增加至 8%

材料科学

时,对于 C30 与 C50 混凝土,矽卡岩机制砂混凝土的扩展度分别降低了 7.55%、10.19%,坍落度分别降低了 13.33%、13.64%,石灰岩机制砂混凝土的扩展度分别降低了 8.18%、9.09%,坍落度分别降低了 13.04%、14.89%。可见,片状颗粒含量的增加,对高强度机制砂混凝土的和易性影响略大。原因在于,片状颗粒含量的增加,使机制砂的空隙率增加,混凝土拌合物的裹浆量需求量大,机制砂外侧浆体包裹层变薄,导致机制砂混凝土的和易性变差^[11-12]。

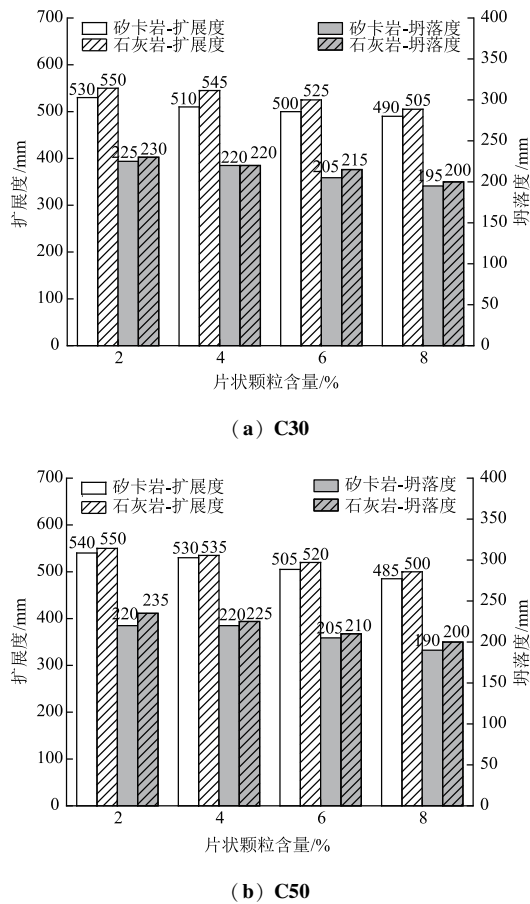


图 1 片状颗粒含量对混凝土工作性能影响

Fig. 1 Effect of flake particle content on working

图 2 为片状颗粒含量对矽卡岩与石灰岩机制砂 C30 和 C50 抗压强度的影响。随着片状颗粒含量的增加,机制砂混凝土的 3 d 和 28 d 抗压强度均不断降低,且同一片状颗粒含量下,矽卡岩尾矿机制砂混凝土的抗压强度高于石灰岩机制砂混凝土;片状颗粒含量从 2% 增加至 8% 时,对于 C30 与 C50 混凝土,矽卡岩机制砂混凝土的 3 d 抗压强度分别降低了 8.67%、8.30%,28 d 抗压强度分别降低了 5.82%、

5.65%;石灰岩机制砂混凝土的 3 d 抗压强度分别降低了 3.82%、6.96%,28 d 抗压强度分别降低了 4.37%、3.76%。可见,片状颗粒含量的增加,对高强度机制砂混凝土的抗压强度影响较小。原因在于,片状颗粒易折断,自身压碎指标相对正常粒形砂更高^[13],且易定向排列的片状机制砂会使混凝土局部水灰比增大,水泥浆体孔隙率提高,有害孔增多,界面过渡区缺陷增多^[14],造成机制砂混凝土抗压强度的减小,而高强度混凝土因水泥浆体含量的相对增多,在一定程度上削弱了片状颗粒含量造成的不良影响。

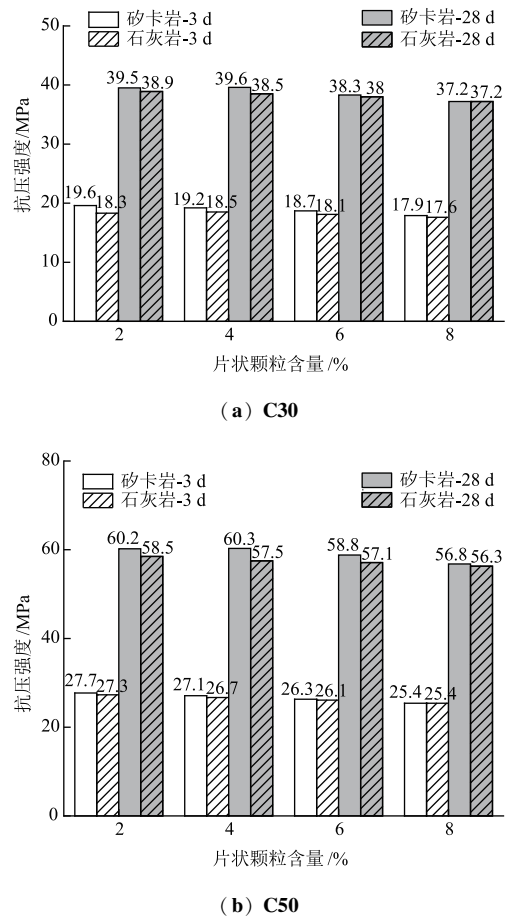


图 2 片状颗粒含量对混凝土抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of flake particle content on compressive strength of concrete

表 4 为矽卡岩机制砂片状颗粒含量对 C30 混凝土耐久性能的影响。从耐久性分析来看,矽卡岩机制砂混凝土耐久性随片状颗粒含量的上升呈现降低趋势,当片状颗粒含量达到 8% 时,混凝土各性能指标出现了明显的降低。原因在于,片状颗粒含

量的增加造成水泥石中有害孔比例以及混凝土孔隙率的提高^[12,14]，使水溶液更易深入混凝土内部。

表 4 片状颗粒含量对混凝土耐久性能的影响				
Table 4 Effect of flake particle content on durability of concrete				
片状颗粒含量/%	抗渗等级	抗冻等级	抗裂性能 / (mm ² · m ⁻¹)	抗氯离子渗透性/C
2	P10	F200	29 (L-V)	687 (Q-IV)
4	P10	F200	31 (L-V)	709 (Q-IV)
6	P10	F150	61 (L-V)	933 (Q-IV)
8	P8	F150	114 (L-IV)	1140 (Q-III)

2.2 机制砂石粉含量对混凝土性能的影响

分别选取石粉含量为 5%、8%、10%、13% 的矽卡岩机制砂与石灰岩机制砂，按照表 3 中的基准配合比配制 C30 与 C50 混凝土，考察两种类型机制砂的石粉含量对混凝土工作性能、力学性能以及耐久性的影响。由图 3 可以看出，对于 C30 与 C50 混凝土，随着机制砂石粉含量从 5% 提高到 13%，扩展度和坍落度均呈现降低趋势，矽卡岩尾矿机制砂 C30、C50 混凝土扩展度分别降低了 10.09%、9.35%，坍落度分别降低了 10.42%、19.15%；石灰岩机制砂 C30、C50 混凝土扩展度分别降低了 4.46%、5.45%，坍落

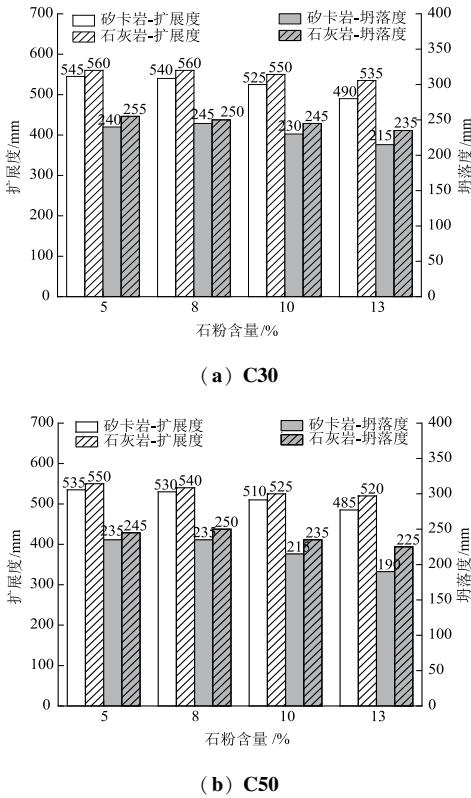


图 3 石粉含量对混凝土工作性能的影响
Fig. 3 Effect of stone powder content on working performance of concrete

度分别降低了 7.84%、8.16%；此外，同一石粉含量下，矽卡岩机制砂混凝土的扩展度和坍落度值均显著低于石灰岩机制砂混凝土。这是因为矽卡岩机制砂为硅质机制砂，其石粉的主要矿物成分为长石、石英、角闪石等硅酸盐矿物，这类矿物的解理面存在大量的硅氧、铝氧断键，致使石粉发生明显的团聚；同时，石粉容易形成羟基化表面，吸附溶液中的钙离子与减水剂^[10]，导致矽卡岩机制砂混凝土的和易性显著变差。

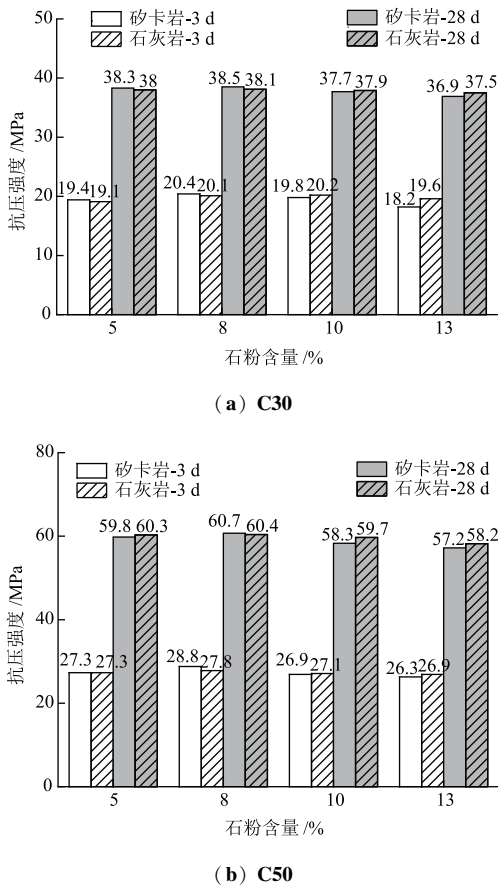


图 4 石粉含量对混凝土抗压强度的影响
Fig. 4 Effect of stone powder content on compressive strength of concrete

由图 4 可以看出，对于 C30 与 C50 混凝土，随着机制砂石粉含量从 5% 提高到 13%，混凝土 3、28 d 抗压强度呈现先增后减的趋势，且石粉含量为 8% 时强度最高，该石粉含量下，对于矽卡岩机制砂 C30、C50 混凝土的 28 d 抗压强度分别为 38.5、60.7 MPa；对于石灰岩机制砂 C30、C50 混凝土 28 d 抗压强度分别为 38.1、60.4 MPa。另外，石粉含量超过

材料科学

8%时,同一石粉含量矽卡岩机制砂混凝土的抗压强度均略低于石灰岩机制砂混凝土。原因在于,混凝土中石灰岩石粉为钙质石粉,具有一定的活性,除起到填充作用外还会参与水泥水化^[15];而矽卡岩石粉活性较低,主要充当惰性掺合料,起到微集料填充效应^[11],石粉含量较高时,因石粉产生团聚而不均匀分散^[16-17],从而降低了混凝土的强度。

表5为矽卡岩机制砂石粉含量对C30混凝土耐久性能的影响。从耐久性分析来看,在混凝土中掺入一定量的石粉对抗渗、抗冻以及抗氯离子渗透性能具有一定的改善效果,尤其是抗氯离子渗透性能,当石粉含量从5%提升至8%时,抗氯离子渗透性能出现明显提升。这是因为石粉的掺入起到了填充作用,在一定程度上优化了级配,改善了孔结构,使混凝土结果更为致密。

表5 石粉含量对混凝土耐久性能的影响				
Table 5 Effect of stone powder content on durability of concrete				
片状颗粒含量/%	抗渗等级	抗冻等级	抗裂性能 /(mm ² ·m ⁻¹)	抗氯离子 渗透性/C
5	P12	F200	32(L-V)	587(Q-IV)
8	P12	F200	58(L-V)	454(Q-IV)
10	P12	F200	126(L-V)	529(Q-IV)
13	P10	F200	227(L-IV)	491(Q-III)

3 结论

(1) 涪源地区矽卡岩型尾矿机制砂为硅质机制砂;随着片状颗粒含量的提升,机制砂混凝土的和易性降低,不同片状颗粒含量的混凝土,矽卡岩尾矿机制砂混凝土的工作性较石灰岩机制砂混凝土的工作性略差,但其混凝土抗压强度高于石灰岩制备的机制砂混凝土。片状颗粒含量的增加,对C50混凝土工作性能的影响略高于C30混凝土。

(2) 随着石粉含量的增加,机制砂混凝土的和易性不断降低,矽卡岩尾矿机制砂混凝土的和易性下降趋势较石灰岩机制砂混凝土更为显著。石粉含量为8%时,机制砂混凝土的抗压强度最高;石粉含量小于8%时,矽卡岩尾矿机制砂混凝土的抗压强度高于石灰岩机制砂混凝土;石粉含量大于8%时,石灰岩机制砂混凝土抗压强度略高。

(3) 对于C30混凝土,矽卡岩尾矿机制砂混凝土耐久性随片状颗粒含量的上升呈现降低趋势。当片状颗粒含量达到8%时,混凝土抗渗、抗冻、抗裂以及抗

氯离子渗透性能出现了明显的降低;掺入一定量的石粉对抗渗、抗冻以及抗氯离子渗透性能具有一定的改善效果,尤其是抗氯离子渗透性能;当石粉含量从5%提升至8%时,抗氯离子渗透性能出现明显提升。

参 考 文 献

[1] 吴跃. 让高品质砂石骨料助力高性能混凝土发展 [N]. 中国建材报, 2022-01-017 (012).

[2] 胡幼奕, 张朋, 赵婧. 当前我国砂石行业面临的问题及对策 [J]. 中国建材, 2021 (1): 128-130.

[3] 工业和信息化部等关于推进机制砂石行业高质量发展的若干意见[EB/OL]. (2019-11-04)[2024-04-22]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-11/13/content_5451478.htm.

[4] 陈家珑. 尾矿利用与建筑用砂 [J]. 金属矿山, 2005 (1): 71-75.

[5] 刘文燕, 张友来, 李绍纯, 等. 铁尾矿砂对机制砂混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (12): 84-86.

[6] 侯云芬, 司武保, 彭小东. 铁尾矿砂制备混凝土技术研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2016 (6): 43-46.

[7] 段国伟, 林双良, 张亮. 尾矿砂高性能混凝土力学性能的研究 [J]. 低温建筑技术, 2022, 44 (1): 77-80.

[8] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 典型岩性机制砂吸附行为研究 [J]. 建筑材料学报, 2022: 1-12.

[9] 方国富, 游秋森, 张显羽, 等. 硅质机制砂对混凝土性能影响机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (4): 81-84.

[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): 6071-6077.

[11] 张广田, 刘娟红, 刘昆, 等. 凝灰岩型隧道洞砟机制砂混凝土和易性与力学性能研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (2): 120-126.

[12] 于本田, 刘通, 王焕, 等. 机制砂中片状颗粒对水泥胶砂性能的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35 (14): 14058-14064.

[13] 熊珂, 习海平, 洪一粟. 机制砂针片状含量的测定及对混凝土性能的影响 [J]. 江西建材, 2015 (12): 160-164.

[14] 黄志刚, 徐志华, 李北星, 等. 机制砂片状颗粒对砂浆和混凝土性能与微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (6): 1981-1989.

[15] 蔡基伟. 石粉对机制砂混凝土性能的影响及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

[16] 张广田, 刘娟红, 隋宝龙, 等. 硅质机制砂改性剂的机理研究与应用 [J]. 材料导报, 2017, 31 (24): 56-62.

[17] 程成, 宋少民, 杨楠. 高吸附性机制砂细颗粒对胶砂和混凝土性能影响的研究 [J]. 混凝土世界, 2018 (2): 85-88.