

石材固废机制砂及其混凝土性能研究*

Study on Solid Waste Mechanized Sand of Its Concrete Properties

刘子仪, 宋少民

(北京建筑大学 建筑结构与环境修复功能材料北京市重点实验室, 北京 100044)

摘要: 在国家大规模基础设施建设需要巨量砂石骨料的大背景下, 国家鼓励利用隧道洞渣、石材废石等加工生产机制砂石。由于每个废石存储点存量大多较少, 多选择短线生产和移动式破碎加工, 但这样的生产工艺可能会影响砂石骨料的产品质量, 所以针对移动破碎装备生产的石材固废机制砂质量及其混凝土性能进行了试验和研究。结果表明: 石材固废机制砂满足标准要求, 可以作为混凝土用粗骨料, 其所制备的混凝土显示出较好的和易性和抗压强度, 收缩以及抗裂性能方面性能没有明显降低, 具有技术可行性。

关键词: 石材固废; 混凝土; 机制砂; 和易性; 强度; 耐久性

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0020-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.005

LIU Ziyi, SONG Shaomin

(Beijing Key Laboratory of Functional Materials for Building Structure and Environmental Restoration, Beijing Architecture University, Beijing 100044, China)

Abstract: Under the background that large-scale infrastructure construction in our country needs huge amounts of sand aggregate, the state encourages the use of production mechanism sand such as tunnel slag, stone waste and so on. Using waste rock to process sand and gravel aggregate, short-term production and mobile crushing processing are more suitable for each storage point of waste rock, but such production process may affect the product quality of sand and gravel aggregate. In this paper, the quality and concrete performance of manufactured stone solid waste sand produced by mobile crushing equipment are tested and studied. The results show that manufactured stone solid waste sand meets the standard requirements and can be used as coarse aggregate for concrete. The concrete prepared by manufactured stone solid waste sand shows good compressive strength, but the workability, shrinkage and crack resistance are not significantly reduced, so it is feasible.

Keywords: stone solid waste; concrete; mechanical sand; workability; strength; durability

0 引言

近年来我国的社会经济水平飞速发展, 随之而来的是大量基础设施建设, 因此我国对于混凝土的需求量呈逐渐递增的趋势, 处于供不应求的状态, 导致对于骨料资源的需求量也在随之增加。与此同时, 世界对水泥混凝土的需求量正在逐年递增, 全世界混凝土年消耗总量超 100 亿 t, 而且因为人类的开采活动, 天然的混凝土原材料正在大幅萎缩, 过度的开采对自然资源以及环境造成的负面影响也是

* 基金项目: 北京未来城市设计高精尖创新中心研究项目 (X20012)。

作者简介: 刘子仪 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 固废应用。

通信作者: 宋少民 (1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 现代混凝土材料。

收稿日期: 2022-09-30

非常严重，且难以修复的^[1-2]。利用废石加工再生骨料，可以合理利用资源，减少开采、加工、运输能耗和成本，降低建设成本，减少环境污染，保护生态环境，已有研究证实，使用石材固废再生骨料替换天然骨料可节省高达约 60% 的费用^[3]。

目前废石一般来源为生产石材所剩余的尾料或矿山开采剩余的玄武岩、花岗岩以及石灰岩等材料，其本质与机制砂石生产使用的原材区别不大，但整体资源在全国分布广泛，且每处废石存量互不相同，各个地方的总量也十分有限，因此建立定点固定的生产线并不适合应用于所有情况，利用石材固废来制作混凝土用机制砂石是一个两全其美的办法。其不仅可以从源头上解决石材固废的资源浪费、环境污染以及占用土地等问题，还可以在在一定程度上缓解当地的用砂紧张问题，减轻了由于天然砂的供应不足导致的混凝土的质量问题，供需矛盾可以得到一定程度的缓解，并对经济效益、社会效益和环保效益起到了显著的提高，也具有可持续发展性。

对废石再生骨料的原材料岩性进行对比，分析废石机制砂移动式破碎和其短线生产加工的特性，可知其产物会存在级配较差、石粉含量较高、MB 值较大等问题^[4-14]，因此通过试验研究采用移动式破碎生产加工废石机制砂及其制备的混凝土性能。

1 原材料和试验设计

1.1 原材料

水泥是北京金隅有限公司生产的 42.5 R 级普通硅酸盐水泥，水泥的各项基本性质见表 1。粉煤灰是河北金泰城生产的 II 级粉煤灰，粉煤灰的各项基本性能见表 2。粒化高炉矿渣是 S95 矿渣，各项基本性能见表 3，活性指数未达到 95%。粗骨料为两种：优质粗骨料和废石粗骨料。将优质机制砂骨料和普通机制砂骨料作为对照组，分别与废石机制砂骨料进行对比，进而判断其可行性。粗骨料是粒径 5 ~ 10 mm 和 10 ~ 20 mm 以 3 : 7 的比例混合进行使用，粗骨料的各项技术指标见表 4。

表 1 水泥性能指标
Table 1 Cement performance index

凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		细度 45 μm	标准稠度
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	筛余/%	用水量/%
150	300	4.8	9.2	20.0	49.5	16.0	26.9

表 2 粉煤灰技术指标

Table 2 Fly ash technical index

密度/(g/cm ³)	需水量比/%	活性指数/%	细度 45 μm 筛余/%
2.24	93	82	4.0

表 3 粒化高炉矿渣技术指标

Table 3 Granulated blast furnace slag technical index

密度/(g/cm ³)	流动度/%	活性指数/%	需水量比/%
2.87	91	90	104

表 4 粗骨料技术指标

Table 4 Coarse aggregate technical specification

骨料类型	表观密度 / (kg/m ³)	堆积密度 / (kg/m ³)	空隙率 / %	吸水率 / %	压碎指标 / %	针片状 / %
普通	2740	1560	43	1.1	9	2
废石	2680	1510	44	1.0	9	2

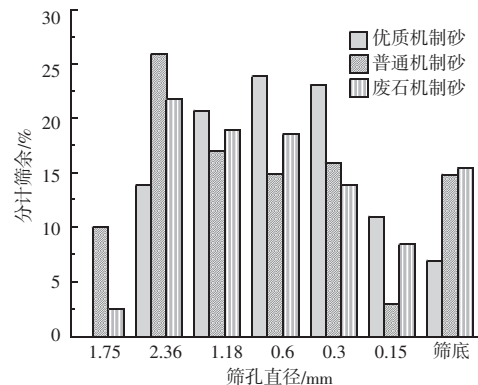
细骨料主要分为三种：优质机制砂、普通机制砂和废石机制砂，三种机制砂技术指标见表 5。三种机制砂级配分计筛余如图 1 所示。废石机制砂级配基本符合 T/CBMF 38—2018，T/CAATB 001—2018《高性能混凝土用骨料》、GB/T 14684—2022《建设用砂》中 II 级中砂的标准，压碎指标、砂片状颗粒含量符合两种标准的 I 类标准，表观密度、松散堆积密度符合前者标准，空隙率不符合前者标准，表观密度、堆积密度和空隙率均符合后者标准，MB 值和石粉含量均不符合两者标准。通过对比普通粗骨料和废石粗骨料基本性能，发现两者相差不大。

水为自来水。外加剂为长安育才生产的聚羧酸高效减水剂，固含量 33%，减水率 28%。

表 5 机制砂技术指标

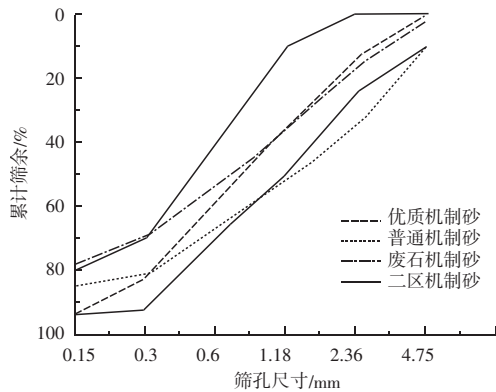
Table 5 Mechanized sand technical index

机制砂种类	表观密度 / (kg/m ³)	松散堆积密度 / (kg/m ³)	空隙率 / %	石粉含量 / %	片状含量 / %	压碎指标 / %	细度模数	亚甲蓝值
优质机制砂	2600	1640	37	4	2	6	2.8	0.2
普通机制砂	2600	1655	36	10	3	10	3.0	0.5
废石机制砂	2680	1505	44	15	2	15	2.8	1.5



(a) 分计筛余

材料科学



(b) 累计筛余

图1 机制砂的累计筛余和分计筛余

Fig. 1 Cumulative and fractional screen residue for mechanism sand

1.2 试验设计

根据规范法计算,得出3种不同性能机制砂在C30和C50强度等级下的混凝土配合比。C30、C50强度等级混凝土的配合比见表6。C30混凝土的粉煤灰掺量为25%,矿粉掺量为20%;C50混凝土的粉煤灰掺量为12%,矿粉掺量为20%;拌合水均为 170 kg/m^3 ;优质机制砂组和普通机制砂组粗骨料采用普通粗骨料,废石机制砂组粗骨料为废石粗骨料;优质机制砂组、普通机制砂组和废石机制砂组编号分别为A、B、C。

表6 混凝土配合比
Table 6 Concrete mixing ratio

组别	原材料配合比/(kg/m^3)						水胶比	砂率/%
	水泥	粉煤灰	矿粉	减水剂	石	砂		
A-30	207	95	76	2.29	1059	767	0.45	42
B-30	207	95	76	3.33	1059	767	0.45	42
C-30	217	99	79	4.67	1052	757	0.43	43
A-50	332	59	98	2.18	1091	652	0.37	37
B-50	332	59	98	3.73	1091	652	0.37	37
C-50	340	60	100	4.96	1054	750	0.34	38

通过分析可知,C30组废石机制砂混凝土(C-30)的MB值较大,且石粉含量较高,当用水量固定时,实际水胶比降低,导致减水剂用量较大;且石粉的吸附性较强,石粉会吸附大量的水和外加剂,从而导致减水剂的用量随之增加。优质机制砂混凝土(A-30)由于其良好的级配和较为适宜的石粉含量,导致其减水剂掺量明显小于废石机制砂混凝土(C-30)和普通机制砂混凝土(B-30)。

C50组废石机制砂混凝土(C-50)的MB值较高,会额外吸收减水剂,为了保证混凝土拌合物状态可以达到试验所需标准,要增加减水剂用量。由

于优质机制砂混凝土(A-50)拥有较为良好的级配,且石粉含量适宜,MB值较低,其吸附水能力较弱,所以优质机制砂混凝土的减水剂掺量最少。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土和易性

在进行试配之前,为保证混凝土和易性满足施工要求,混凝土坍落度要求大于220 mm,扩展度大于450 mm。C30、C50机制砂混凝土和易性如图2所示。

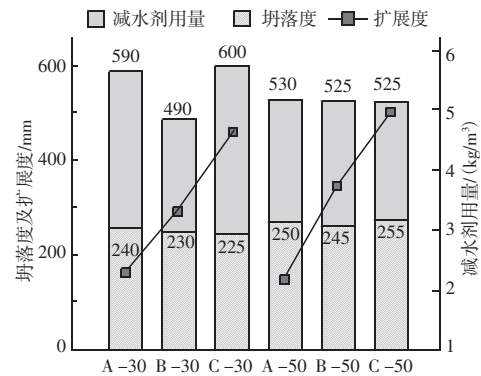


图2 混凝土和易性

Fig. 2 Concrete compatibility

C30组普通机制砂混凝土在拌和过程中存在不易翻拌的现象,且坍落度经时损失大;优质机制砂混凝土整体状况良好;废石机制砂混凝土石粉含量较高,增大了实际胶材用量。但因为用水量不变,实际水胶比降低,导致其混凝土拌合物出现了流速较慢的现象。

C50组普通机制砂混凝土呈现出黏性较高的状态,但在加入减水剂调整后能达到试验所需要的性能;废石机制砂混凝土的坍落度较大,由于废石机制砂混凝土的石粉含量较高,导致废石机制砂混凝土拥有较多的浆体体积,虽然可以使混凝土的包裹性得到提升,但是其流动度会降低,且出现黏度较高的情况。

通过对混凝土拌合物的比对,废石机制砂混凝土和易性虽然略微低于优质机制砂,但满足施工要求。在配合比方面,因为废石机制砂混凝土和普通机制砂混凝土的石粉含量都较高,石粉吸附性较强,在用水量不变的情况下,外加剂用量多,混凝土和易性相对比较黏,有些许漏石现象。

2.2 混凝土强度

混凝土的抗压强度见表7。C30组废石机制砂混

凝土水胶比与普通机制砂混凝土水胶比基本相同，但由于废石机制砂混凝土石粉含量较高，石粉作为一种粉体，显著提高了混凝土中粉体的用量，且在保持用水量不变的情况下，其实际水胶比要低于计算水胶比，由于实际水胶比较低，所以废石机制砂混凝土强度较高。普通机制砂混凝土的石粉含量较优质机制砂混凝土石粉含量高，但是低于废石机制砂混凝土，因石粉属于粉体，提高了普通机制砂混凝土配合比中的粉体用量，其实际水胶比同样低于计算水胶比，但是较废石机制砂混凝土实际水胶比来说高，因此 C30 混凝土 28 d 抗压强度明显低于废石机制砂混凝土，但是仍满足 C30 混凝土强度要求。C50 组废石机制砂混凝土抗压强度低于普通机制砂混凝土，虽然二者的石粉含量都较高，但是由于废石机制砂 MB 值较高，会导致混凝土抗压强度下降，且对于中高强混凝土来说，随着强度等级的提高，MB 值对混凝土性能影响的负面程度会加强，因此显示出 C50 废石机制砂混凝土抗压强度明显低于普通机制砂混凝土，从长远看不建议使用废石机制砂配制高强度等级混凝土。

表 7 混凝土抗压强度

Table 7 Compressive strength of concrete

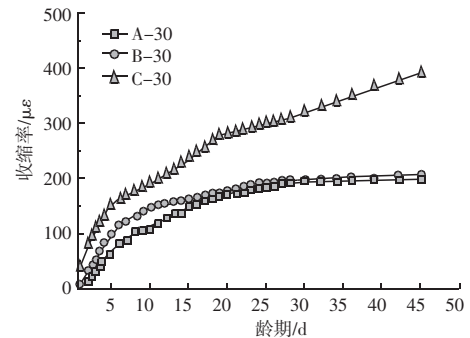
组别	胶材总量 / (kg/m ³)	水胶比	实际水胶比	抗压强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
A-30	378	0.45	0.416	24.0	36.8	48.3
B-30	378	0.45	0.373	27.0	34.5	43.4
C-30	395	0.43	0.334	21.4	31.2	49.6
A-50	332	0.35	0.330	43.8	55.6	72.0
B-50	332	0.35	0.310	44.4	55.0	68.3
C-50	340	0.34	0.280	37.3	49.4	64.4

C50 优质机制砂混凝土在全龄期内强度都明显高于废石机制砂混凝土，因此在进行配合比设计时，可以适当降低胶凝材料用量以及减水剂用量，适当降低成本。

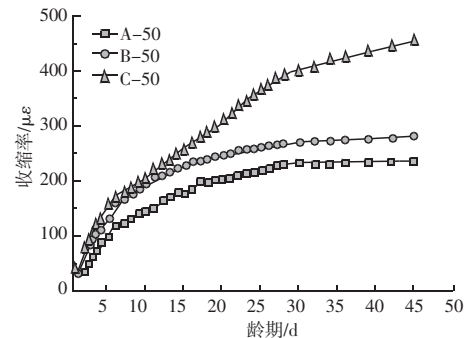
2.3 混凝土收缩性能

混凝土的收缩率如图 3 所示。C30 组废石机制砂收缩较高，这可能是由于其石粉含量较高导致混凝土干缩值增大；而石粉的吸附性也对混凝土的收缩性能有显著影响^[13]，机制砂的吸附性越高，其混凝土的收缩值越大。因此综合以上两点原因，可以看到废石机制砂混凝土的收缩大于优质机制砂组和普通机制砂组。

通过对比浆体体积可知，C50 组废石机制砂混凝土和普通机制砂混凝土都具有较大的浆体体积，所以二者早期收缩相近，后因为废石机制砂的 MB 值较大，且石粉含量较高，废石机制砂混凝土后期的收缩明显增大，超过优质机制砂组和普通机制砂组。通过试验可以发现发现，在 C50 高强度等级的混凝土收缩中，MB 值对于收缩的影响更加显著。



(a) C30 混凝土



(b) C50 混凝土

图 3 C30 和 C50 混凝土收缩

Fig. 3 C30 and C50 Concrete shrinkage

2.4 混凝土抗裂性能

混凝土抗裂性能见表 8。C30 组优质机制砂混凝土与废石机制砂混凝土在相同时间内的开裂速度均慢于普通机制砂混凝土。但废石机制砂混凝土由于其石粉含量较高、胶材用量较大、MB 值较高等问题，其 28 d 的最大裂缝宽度是最大的。

表 8 混凝土抗裂性能

Table 8 Cracking resistance of concrete

组别	首裂时间/d	28 d 裂缝数量/条	28 d 最大裂缝宽度/mm
A-30	16	1	0.12
B-30	14	1	0.12
C-30	15	1	0.47
A-50	9	1	0.35
B-50	7	1	0.58
C-50	8	1	1.21

材料科学

在 C50 的强度等级下, 废石机制砂混凝土仍在普通机制砂混凝土之后开裂, 且优质机制砂混凝土是最晚发生开裂的。3 种混凝土都只存在 1 条裂缝, 但废石机制砂混凝土的裂缝宽度远大于优质机制砂混凝土和普通机制砂混凝土。

2.5 混凝土碳化试验

混凝土的强制碳化是从混凝土养护 28d 后开始进行的试验, C30、C50 组混凝土碳化试验见表 9。可以看出 C30 组优质机制砂混凝土和普通机制砂混凝土的碳化深度均较大于废石机制砂混凝土, 且优质机制砂混凝土的碳化深度最大。因为优质机制砂混凝土的石粉含量相比于普通机制砂混凝土较低, 导致内部略微出现疏松的情况, 与二氧化碳接触地面积略微增大, 使混凝土碳化速度较快, 从而碳化深度较深。

C50 组废石机制砂混凝土的石粉含量较高, 增加了混凝土的密实度, 当水胶比与用水量一定时, 8%~16% 的石粉含量对混凝土抗碳化性能贡献较为明显; 又因为废石机制砂混凝土 MB 值较高, 在 C50 时, 对混凝土抗碳化性能起到了负面的影响, 导致碳化深度略高于普通机制砂混凝土。

表 9 混凝土强制碳化结果
Table 9 Concrete forced carbonation results

组别	7 d 碳化深度/mm	28 d 碳化深度/mm
A-30	3.51	4.18
B-30	3.36	3.92
C-30	1.33	2.38
A-50	0.80	1.00
B-50	0.50	0.60
C-50	0.70	0.90

3 结论

(1) 废石粗骨料符合 GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》和 T/CBMF 38—2018, T/CAATB 001—2018《高性能混凝土用骨料》标准, 可用做混凝土中的粗骨料, 且和普通粗骨料性能相差不大。废石机制砂除石粉含量和 MB 值外, 其余性能均基本满足 T/CBMF 38—2018、T/CAATB 001—2018《高性能混凝土用骨料》和 GB/T 14684—2022《建设用砂》标准。

(2) 废石机制砂混凝土达到黏聚性要求, 但整体和易性不如优质机制砂, 具有黏度较大、漏石、流速较慢特点。并且由于废石机制砂的级配一般, 石粉含量较高, MB 值较高等问题, 废石机制砂混凝

土减水剂用量大。

(3) 废石机制砂混凝土的收缩略高于优质机制砂混凝土和普通机制砂混凝土; 混凝土抗压强度满足 C30、C50 的设计要求, 但相对较低; 废石机制砂混凝土的裂缝宽度最大, 但与其他两者相差不大; 在 C30 强度等级时, 混凝土碳化深度最小, 在 C50 强度等级时, 三者碳化深度相差不大。

总体来看, 石材固废骨料更适用于中低强度等级的机制砂预拌混凝土; 在较高强度等级的机制砂混凝土使用时需注意废石机制砂的石粉含量以及 MB 值, 以确保混凝土性能。

参 考 文 献

- [1] 郭丹, 宋少民. 混凝土用骨料相关标准存在的问题与思考 [J]. 混凝土, 2017 (2): 46-49.
- [2] 王宇峰. 天然砂对混凝土的影响 [J]. 山西建筑, 2015 (41): 123-124.
- [3] 王洁军, 郎营. 新形势下我国砂石行业发展现状及对策研究 [J]. 建材发展导向, 2018 (8): 3-8.
- [4] 刘桂凤, 李世超, 秦彦龙, 等. 不同机制砂级配对于混砂浆性能的影响 [J]. 混凝土, 2013 (9): 112-114.
- [5] 黄泽轩. 典型岩性骨料基本属性及级配研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [6] 薛元, 曾晓辉, 唐珏凌, 等. 机制砂石粉含量对混凝土性能影响研究 [J]. 高速铁路技术, 2017 (5): 25-28.
- [7] 宋少民, 程成, 杨楠. 机制砂岩性对胶砂和混凝土性能影响的研究 [J]. 混凝土, 2018 (11): 22-25.
- [8] 蔡基伟, 李北星, 周明凯, 等. 石粉对中低强度机制砂混凝土性能的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2006 (4): 27-30.
- [9] 姚楚康. 石粉特性对混凝土性能的影响研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [10] 左文奎, 魏勇, 陈雷, 等. 机制砂 MB 值对混凝土性能的影响 [J]. 商品混凝土, 2013 (11): 38-42.
- [11] ZHANG X, SUN Q, LI F. Tests on properties of proto-machine-made sand and strength of cement mortar affected by stone powder [C]. //Frontiers of Green Building, Materials and Civil Engineering, 2011: 4348-4351.
- [12] 徐志华, 邓俊双, 刘战鳌, 等. 机制砂中细粉 MB 值对混凝土性能影响规律的研究 [J/OL]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版): 1-10 [2021-06-03].
- [13] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (1): 13-28.
- [14] 宋少民, 王宇杰, 李统彬. 新型胶凝材料体系的抗裂性能 [J]. 材料导报, 2021, 35 (增刊 1): 206-210.