

水泥用原材料岩石制备机制砂的可行性研究初探

吴齐跃

广州市越堡水泥有限公司, 广东广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025080014

摘要 : 本文基于水泥用原材料石灰岩、砂岩的母岩性质, 开展母岩物化特性对岩石作机制砂时影响研究。从母岩的化学组成、矿物组成、立方体抗压强度等方面全面评价了水泥用原材料矿山母岩制备机制砂的可行性, 对制备的机制砂进行了压碎指标、坚固性及放射性测试。结果表明, 石灰石岩石破碎后可制备石灰岩机制砂, 矿山砂泥经筛分可作为天然砂使用。

关键词 : 机制砂; 母岩性质; 石灰石

Preliminary Study on the Feasibility of Preparing Manufactured Sand from Raw Material Rocks for Cement

Wu Qiyue

Guangzhou Yuebao Cement Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper investigates the influence of the physical and chemical properties of parent rocks on the preparation of manufactured sand, based on the properties of limestone and sandstone used as raw materials for cement. The feasibility of preparing manufactured sand from the parent rocks of cement raw material mines is comprehensively evaluated in terms of chemical composition, mineral composition, and cube compressive strength of the parent rocks. Crushing index, soundness, and radioactivity tests are conducted on the prepared manufactured sand. The results indicate that limestone rock can be crushed to prepare limestone-based manufactured sand, and the screened mine sand and mud can be used as natural sand.

Keywords : manufactured sand; parent rock properties; limestone

引言

随着建筑、基础设施等行业的蓬勃发展, 对砂石的需求量急剧攀升。然而, 天然砂作为传统的建筑用砂来源, 其形成需要漫长的地质过程。在许多地区, 经过多年的开采, 天然砂资源已经接近枯竭。例如, 在一些河流流域, 过度采砂导致河床下切、河岸崩塌, 同时也使河砂储量迅速减少。随着天然砂资源减少, 岩石机制砂成为重要替代资源^[1-3]。

机制砂作为天然砂的替代品, 其来源广泛, 可以利用各种岩石^[4,5]、废石^[6]、尾矿^[7]等作为原料进行加工生产。徐良等^[8]发现, 在保持级配不变的情况下, 石灰岩机制砂制备的混凝土抗压强度优于天然砂混凝土。石英砂泥和石灰石岩是水泥生产过程中重要的原材料, 因此, 针对水泥生产过程中作为原材料的砂泥和石灰石, 研究其制备机制砂的可行性, 探究不同品位石灰石对制备机制砂的性能影响, 对水泥生产企业具有重要意义。

一、试验

母岩矿物组成见图1~4。XRD图谱与化学组成结果一致, 综合分析,

(一) 原材料

母岩取自广州市越堡水泥有限公司自有矿山。其主要化学成分分析、产地及宏观形貌见表1。

1#样品主要矿物为石英; 2#~4#样品矿物组成相近, 但略有不同。2#样品主要矿物为方解石, 除此之外, 还有少量的石英相; 3#样品中, 部分镁取代钙进入其方解石结构, 使衍射峰出现向右偏移; 4#样品主要矿物为方解石和少量石英。

表1 母岩主要化学成分 (wt.%)

| 样品编号 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | Cl | LOI | 产地 | 宏观形貌 |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|-------|-------|------------|-------|
| 1# | 97.27 | 1.69 | 2.95 | 0.16 | 0.01 | 1.09 | 0.24 | 0.05 | 0.001 | 0.04 | 越堡矿山砂泥 | 颗粒 |
| 2# | 2.28 | 0.93 | 0.36 | 52.14 | 0.58 | 0.08 | 0.02 | 0.27 | 0.003 | 41.62 | 越堡-35高钙石灰石 | 颗粒+块体 |
| 3# | 6.53 | 2.83 | 0.81 | 47.65 | 0.72 | 0.38 | 0.03 | 1.51 | 0.002 | 38.23 | 越堡-15高镁石灰石 | 颗粒+块体 |
| 4# | 3.33 | 1.44 | 0.49 | 51.07 | 0.55 | 0.14 | 0.02 | 0.09 | 0.001 | 40.74 | 珠水-40平台石灰石 | 颗粒+块体 |

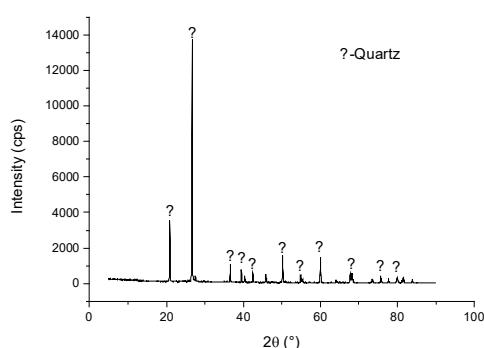


图1 1#越堡矿山砂泥的XRD谱图

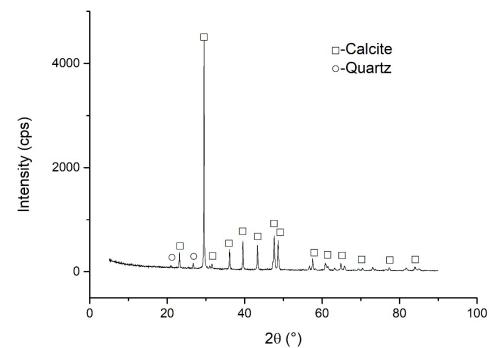


图2 2#越堡 -35高钙石灰石的XRD谱图

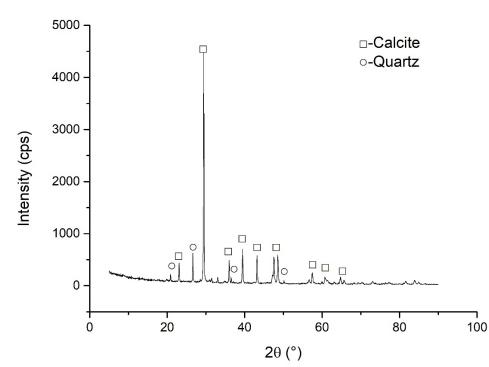


图3 3#越堡 -15高镁石灰石的XRD谱图

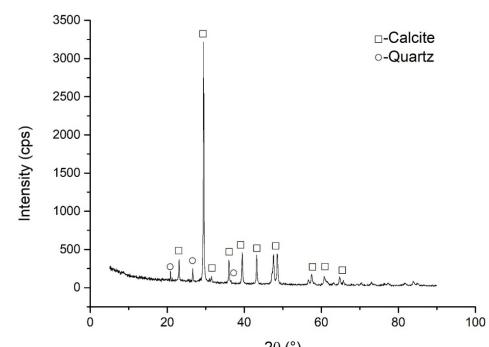


图4 4#珠水 -40平台石灰石的XRD谱图

(二) 试样制备

为确保试验的准确性和一致性，块状母岩样品采用高精度岩石切割机加工成尺寸为 $50 \times 50 \times 50$ mm的立方体试样，每组制备3块试样，以满足抗压强度测试的需求。加工完成后，试样在自然通风条件下进行充分风干，以消除水分对试验结果的潜在影响，随后密封保存于干燥环境中，以防止外界因素干扰，备用用于后续母岩立方体抗压强度测试。

为制备机制砂，母岩样品首先通过实验室小型颚式破碎机进行破碎处理，破碎过程严格控制以确保颗粒尺寸均匀。破碎后的试样在80℃恒温烘箱中烘干，以去除残余水分并保持样品稳定性。烘干后的试样采用标准振筛机进行多级筛分处理，制备出符合试验要求的砂样。筛分过程根据粒径分布需求，选用不同孔径的筛网，以确保砂样粒度分布的代表性。制备完成的砂样置于密封容器中保存，防止吸湿或污染，确保后续性能测试的可靠性。

(三) 试验方法

母岩的化学成分分析采用荷兰 PANalytical AxiosPw4400型X射线荧光光谱仪(XRF)进行，该仪器配备高性能铑靶端窗X光管，功率为4kW，分析精度高，相对误差控制在0.05%以内，确保化学成分数据的准确性。母岩的矿物组成通过XPertPowderX射线衍射仪(XRD)进行分析，测试条件设定为：Cu靶，工作电压40kV，电流40mA，扫描速度12°/min，步长0.013°，以获得高分辨率的衍射图谱，为矿物相鉴定提供可靠依据。

母岩立方体抗压强度测试严格遵循GB/T14685-2011《建设用碎石、卵石》标准方法，每组选用3个试件进行测试，以确保结果的统计代表性。测试过程中，试样受控加载直至破坏，记录其极限抗压强度，用于评估母岩的力学性能。

机制砂的性能测试依据GB/T14684-2011《建设用砂》标准方法执行，包括粒度累积分布、压碎指标及坚固性测试。粒度分布测试通过标准筛分法确定砂样的级配特性，压碎指标测试评估砂样的力学强度，坚固性测试则检验砂样在特定环境下的耐久性。

机制砂的放射性检验按照GB/T6566-2010《建筑材料放射性核素限量》标准要求进行，采用高灵敏度检测设备测定内照射指数(I_{ra})和外照射指数(I_{re})，确保机制砂的放射性水平符合建筑材料安全标准，为其工程应用提供依据。

二、试验结果与分析

(一) 母岩性能分析

立方体抗压强度是反应母岩性能的重要指标。1#样品由于来样为颗粒状，未进行此项检测，2#~4#样品母岩立方体抗压强度见图5。由图可知，对于不同的石灰石母岩，其抗压强度差异较大。对于四种样品，母岩抗压强度大小顺序为： $4\# > 2\# > 3\#$ ，但三种母岩抗压强度均大于60MPa，达到用作机制砂的要求。

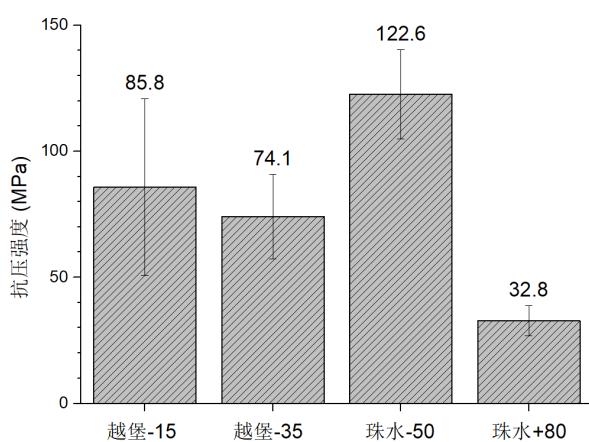


图5 母岩立方体抗压强度

(二) 母岩所制备机制砂的性能分析

1. 砂颗粒级配

机制砂的筛分结果如图6所示。从图6可以看出，1#样品在 $<0.3\text{ mm}$ 、 $0.3\text{~}0.6\text{ mm}$ 、 $0.6\text{~}1.18\text{ mm}$ 和 $1.18\text{~}2.36\text{ mm}$ 粒级区间的分计筛余百分数均较高，表明其粒度分布偏细，整体颗粒组成较细小。相比之下，2#、3#和4#样品的颗粒分计筛余百分数较为接近，这与其均来源于石灰岩母岩的相似矿物组成和理化特性有关。然而，2#样品在 $>4.75\text{ mm}$ 粒级区间的颗粒占比最低，显示其机制砂具有更细的粒度分布。现有研究表明，石灰石的易磨性受其纯度、硬度、体积密度、化学成分以及次生变质程度等因素的综合影响^[9,10]。因此，2#样品机制砂较细的粒度分布可能与其较低的 SiO_2 含量和较高的 CaO 品位密切相关，这提高了母岩的易碎性，促进了细颗粒的生成。3#和4#样品的颗粒分计筛余百分数较为接近，但3#样品的粒度略细于4#，这可能与4#样品母岩较高的抗压强度有关，导致其在破碎过程中生成较少的细颗粒。此外，3#样品中较高的石英相含量可能进一步影响其颗粒级配，使其偏向更细的粒度分布。

机制砂的细度模数如表2所示。由表2可知，1#至4#样品的细度模数大小顺序为：4#>3#>2#>1#。其中，1#样品（砂泥，未经破碎处理）细度模数为 $2.3\text{~}2.5$ ，属于中砂类别，符合天然砂的粒度特征。2#、3#和4#样品因受实验室颚式破碎机规格限制，制备的机制砂细度模数在 $3.2\text{~}3.5$ 之间，均属于粗砂范畴。值得注意的是，3#样品母岩抗压强度低于2#，但其机制砂的细度模数高于2#，这可能与其较高的石英相含量有关。石英具有较高的硬度和耐磨性，可能在破碎过程中形成较多的中等粒径颗粒，从而导致细度模数略高。此外，破碎设备的参数和母岩的理化特性共同决定了机制砂的粒度分布特性，为后续优化制砂工艺提供了重要参考。

表2 机制砂细度模数

| 样品编号 | 1# | 2# | 3# | 4# |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 模数 | 2.3~2.5 | 3.2~3.3 | 3.3~3.4 | 3.3~3.5 |
| 类别 | 中砂 | 粗砂 | 粗砂 | 粗砂 |

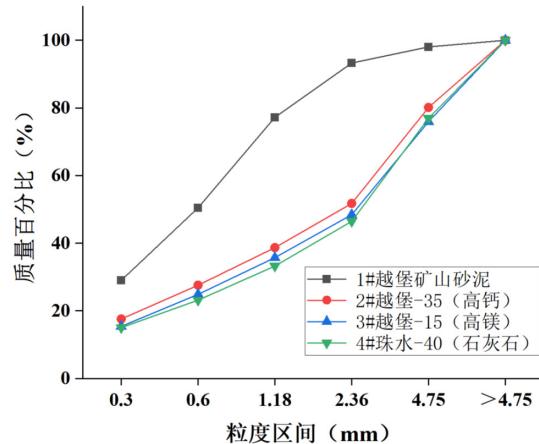


图6 机制砂的粒度累积分布

2. 砂压碎指标

机制砂的压碎指标测试结果如表3所示。结果表明，随着粒径的减小，各样品机制砂的单粒级压碎指标值呈逐渐下降趋势，反映出细小颗粒在受力时具有更高的抗压能力。1#样品（砂泥）在 $0.3\text{~}0.6\text{ mm}$ 、 $0.6\text{~}1.18\text{ mm}$ 和 $1.18\text{~}2.36\text{ mm}$ 粒级区间的压碎指标均优于2#、3#和4#样品，显示出较好的力学性能。然而，在 $2.36\text{~}4.75\text{ mm}$ 粒级区间，1#样品的压碎指标达到42%，显著高于其他样品，未能满足机制砂的技术要求。相比之下，2#、3#和4#样品制备的机制砂在所有粒级区间的压碎指标均符合GB/T14684-2011《建设用砂》中II类砂的要求（最大压碎指标 $\leq 25\%$ ），表现出良好的力学稳定性。

对于1#样品，尽管其在 $2.36\text{~}4.75\text{ mm}$ 粒级的压碎指标（42%）超过I类砂的技术标准（ $\leq 30\%$ ），但其他粒级区间的压碎指标均低于20%，显示出较优的抗压性能。进一步分析表明， $2.36\text{~}4.75\text{ mm}$ 粒级的质量分数仅占1#样品整体的约2%，对整体性能影响较小。因此，通过筛分工艺去除 $>2.36\text{ mm}$ 的颗粒，1#样品可满足I类砂的压碎指标要求（ $\leq 20\%$ ），从而显著提升其工程适用性。这一优化策略不仅能改善1#样品的力学性能，还为利用砂泥制备高质量机制砂提供了可行的技术路径，为水泥企业资源综合利用提供了参考。

表3 机制砂压碎指标

| 粒径 / mm | 各岩性机制砂单粒级压碎指标 / % | | | |
|-------------|-------------------|----|----|----|
| | 1# | 2# | 3# | 4# |
| 0.3~0.6mm | 11 | 19 | 19 | 18 |
| 0.6~1.18mm | 13 | 22 | 21 | 21 |
| 1.18~2.36mm | 19 | 21 | 22 | 20 |
| 2.36~4.75mm | 42 | 18 | 15 | 20 |
| 最大单粒级压碎指标值 | 42 | 22 | 22 | 21 |

3. 砂坚固性

机制砂压碎指标测试结果见表4。由表可知，1#样品 $2.36\text{~}4.75\text{ mm}$ 粒径的单粒级质量损失最大，为11%，超过GB/T14684-2011《建设用砂》中III类砂不大于10%的坚固性指标要求，与压碎指标呈现一样的特性，因此，在1#样品制备机制砂过程中，有必要筛除 2.36 mm 以上的部分。3#~5#样品坚固性

表现良好，满足 GB/T14684—2011《建设用砂》对 I类砂的技术要求。

表4 机制砂坚固性

| 粒径 / mm | 各岩性机制砂单粒级质量损失率 / % | | | |
|-------------|--------------------|-----|-----|-----|
| | 1# | 2# | 3# | 4# |
| 0.3~0.6mm | - | 3.7 | 3.6 | 4.5 |
| 0.6~1.18mm | 3.4 | 3.1 | 3.6 | 2.2 |
| 1.18~2.36mm | 2.6 | 1.9 | 5.3 | 2.6 |
| 2.36~4.75mm | 11.0 | 2.3 | 2.5 | 1.0 |
| 最大单粒级质量损失率 | 11.0 | 3.7 | 5.3 | 4.5 |

4. 砂放射性检验

机制砂的放射性核素限量检验结果见表5。结果显示，四种机制砂均满足 GB/T 6566—2010《建筑材料放射性核素限量》中对建筑主体材料的内照射指数 I_{Ra} 、外照射指数 I_r 不大于 1.0 的要求。

表5 机制砂的放射性核素限量检验结果

| 样品编号 | 1# | 2# | 3# | 4# |
|----------------|-----|-----|-----|-----|
| 内照射指数 I_{Ra} | 0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.1 |
| 外照射指数 I_r | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.1 |

三、结论

(1) 根据化学成分和矿物组成分析结果，1#越堡矿山砂泥以 SiO_2 为主要化学成分，矿物组成以石英为主，属于山砂或砂泥类原料，适合作为天然砂的替代品。2#越堡 -35 高钙石灰石、3#

越堡 -15 高镁石灰石和 4#珠水 -40 平台石灰石的化学成分以 CaO 为主，矿物组成以方解石为主，均属于石灰岩范畴。这些差异化的化学和矿物特性为后续机制砂制备提供了重要的基础数据，表明不同母岩类型对机制砂性能的影响显著。

(2) 水泥用石灰岩质原材料(2#、3#、4#样品)的母岩立方体抗压强度均超过 60 MPa，满足 GB/T 14684—2011《建设用砂》中对机制砂母岩强度的国家标准要求。这一结果表明，石灰岩母岩具有足够的力学性能，可作为制备高质量机制砂的可靠原料，为其在建筑和基础设施领域的应用奠定了基础。

(3) 利用水泥用石灰岩质原材料制备机制砂时，机制砂的性能受母岩立方体抗压强度和石灰石品位(CaO 含量)的共同影响。高品位石灰石(如 2#样品)因其较低的 SiO_2 含量和较高的 CaO 含量，表现出更细的粒度分布和较优的力学性能，而抗压强度较高的母岩(如 4#样品)则生成较少细颗粒，影响机制砂的级配特性。

(4) 依据 GB/T 6566—2010《建筑材料放射性核素限量》标准，1#硅质砂泥及 2#、3#、4#石灰岩质原材料制备的机制砂，其内照射指数(I_{Ra})和外照射指数(I_r)均符合建筑材料安全要求，证明其在工程应用中的环境安全性。

(5) 研究表明，利用水泥用原材料岩石制备机制砂具有较高的可行性。其中，硅质砂泥(1#样品)经筛分处理后可直接作为天然砂使用，满足 I 类砂标准；石灰岩质原材料(2#、3#、4#样品)经破碎和粉磨后可制备成符合标准的石灰岩机制砂，为水泥企业资源综合利用和砂石替代提供了可行的技术路径。

参考文献

- [1] 汤晴. 石灰岩与凝灰岩机制砂混凝土力学性能对比研究 [J]. 中国水运, 2015, (9):316~318.
- [2] 周鸿煜, 李家和, 王云东, 等. 不同岩性机制砂对混凝土力学性能的影响研究 [J]. 科技导航, 2018, (4):54~57.
- [3] 颜从进. 机制砂特性对混凝土性能的影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [4] 李遵云, 周玉娟, 秦明强, 等. 凝灰岩机制砂海工混凝土抗氯盐侵蚀耐久性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 955~959.
- [5] 乔宏霞, 陈志超, 梁金科, 等. 玄武岩机制砂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能 [J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(1): 48~55.
- [6] 王承军, 柴天红, 万振东, 等. 利用铜尾矿废石制备机制砂石的研究 [J]. 混凝土世界, 2021, (10):69~73.
- [7] 贺鑫鑫. 铁尾矿机制砂混凝土配合比设计及性能研究 [D]. 北京建筑大学, 2023.
- [8] 徐良, 程华才, 马子宸, 等. 机制砂岩性与级配对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(06):1973~1980.
- [9] 徐从战, 罗帆. 我国水泥生料的配料特点及其易磨性探讨 [J]. 水泥, 2019, (06):17~21. 2019.06.004.
- [10] 许刚. 分析水泥原料易磨性的影响及其改善 [J]. 四川水泥, 2018, (08):9.