# 机制砂防腐蚀混凝土在工程建设中的应用研究

## ——以潮惠高速建设项目为例

郑宇欣[1]，揭继兴[2]

(广东省高速公路有限公司，广州 510000；2. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司，广州 510641)

**摘要**:河砂资源的匮乏成为高速公路建设的一个制约问题,采用机制砂代替河砂使用成为基建项目的发展趋势。依托潮惠高速开展了花岗岩碎石制作机制砂代替河砂制备防腐蚀混凝土的技术研究,针对机制砂防腐蚀混凝土应用环节缺乏系统技术指导问题,建立机制砂防腐蚀混凝土的性能指标体系。分析机制砂生产加工关键工艺并提出推荐设备组合及参数设置;提出机制砂产品的关键性能指标控制标准,针对不同强度等级混凝土配合比设计给出推荐范围;对高速公路不同应用场景下机制砂防腐蚀混凝土的防腐蚀性能提出要求及检测方法。依托项目开展实体试验梁对照试验,比对梁体结构强度及防腐蚀性能,验证所建立机制砂防腐蚀混凝土性能指标体系的工程可行性。

**关键词**:机制砂;防腐蚀;混凝土;桥梁;性能指标

**中图分类号**:U444 **文献标志码**:B **文章编号**:1671－1807(2023)16－0254－09

在中国公路工程建设中,通常选用天然河砂作为细骨料,但随着中国路网系统在分阶段规划下不断完善,消耗了体量庞大的天然河砂资源。由于天然资源的不可再生性,加之公众对环保的要求不断提升,逐步出台了多条河流限采的规定,造成市面上优质河砂资源不断减少,产生供应质量波动、原材料价格上涨等问题。因此,在一些地区不得不采用机制砂、山砂等人工砂作为细骨料。

自 20 世纪 60 年代始中国即开展了对机制砂和机制砂混凝土的研究[1]。随着研究的深入,多个地区根据当地资源特点,先后制定了相应地方标准和应用规程。2011 年先后颁布了《人工砂混凝土应用技术规程》(JGJ/T 241—2011)和《建筑用砂》(GB/T 14684—2011),2022 年更新发布了《建筑用砂》(GB/T 14684—2022),这些标准和规程的制定均对机制砂及机制砂混凝土的实践产生极大的推动效果,但目前仍然存在机制砂防腐蚀混凝土制备技术匮乏,难以满足腐蚀环境下桥梁结构的耐久性要求;机制砂防腐蚀混凝土质量控制薄弱,缺少针对机制砂防腐蚀混凝土性能特点而制定的技术规程与管控文件等问题,从而使工程技术人员无从着手开展工作[2]。

潮州至惠州高速公路(以下简称潮惠高速)线路横跨五市十县,沿途地质条件复杂,气候条件恶劣,部分区域存在河砂资源紧缺和价格过高的情况,加之周边地区同期规划公路建设项目较多,加剧了项目地区供砂紧张,预计施工期间难以获得充足、稳定的河砂供应。针对潮惠高速项目沿线地区的河砂、岩石资源进行实地勘察及取样检验,在此基础上进行砂、石资源储量和价格等技术经济性分析,确定了在该项目使用花岗岩碎石生产机制砂的可行性。鉴于上述情况以及目前缺少机制砂防腐蚀混凝土技术的现状,有必要开展机制砂防腐蚀混凝土耐久性设计及其应用技术研究。

因此,针对潮惠高速项目优质河砂资源匮乏的现状,拟采用花岗岩碎石制作机制砂代替制备防腐蚀混凝土,鉴于目前机制砂防腐蚀混凝土生产应用的部分关键环节缺乏技术指导,开展了系列专项技术研究,建立机制砂混凝土防腐蚀性能指标体系,以期为类似项目的应用提供经验参考。

## 1 机制砂生产工艺

机制砂的生产流程主要包括料场规划、开采、除杂、破碎、筛分、除尘等步骤,对成品机制砂的性能和质量至关重要。结合潮惠高速公路总体机制砂使用规划量,确定了机制砂料场规划方案;分析

**收稿日期**:2023-02-17

**作者简介**:郑宇欣(1981—),男,广东潮阳人,广东省高速公路有限公司粤赣分公司,养护工程部副部长,路桥工程师,研究方向为高速公路新建、改扩建项目建设管理及高速公路营运项目养护管理;揭继兴(1997—),男,湖南常德人,广东肖宁道路工程技术研究事务所有限公司,主管,助力工程师,研究方向为沥青路面性能、高速公路路面施工技术咨询。

机制砂生产加工关键环节的常用工艺设备,提出推荐设备组合及参数设置。

### 1.1 料源选取与料场规划

根据施工需求确定机制砂所需用量进行砂石料源勘测。分别以预估用量的2倍确定矿山详勘最低储量;以预估用量的1.5倍确定最低可采储量;以预估用量的1.25~1.5倍作为规划开采量规划料场,并综合考虑地形、地质、运输等因素,最终确定料场规划方案位置。开采场区须进行地下水位探测,当水位过高时采取相应措施降水。开采前彻底清除料源覆盖层,以确保成品毛料质量与级配稳定。

### 1.2 机制砂生产加工工艺

机制砂的生产加工需经过破碎、筛分、除尘等步骤,加工产品的质量主要受到石料本身性能以及生产加工工艺的影响[3]。以潮惠高速TJ16标为例,加工厂采用干法工艺生产,加工厂生产采用三阶段破碎和三筛工艺,最终得可以生产3~5 mm、5~10 mm、10~20 mm、20~31.5 mm碎石和0~4.75 mm机制砂,生产流程如图1所示。

常规生产线制备机制砂多使用三级破碎工艺,常用的集料加工设备包括颚式破碎机、反击式破碎机、圆锥式破碎机、锤式破碎机、立轴冲击式破碎机[4]。在粗破时宜选择破碎效率较高、进料粒度大的颚式破碎机;中破时宜选择效率高的、具有一定整形作用和合适出料粒度的反击式破碎机,不造成加工时等料、溢料等情况;细碎时宜选择处理能大、出料颗粒合理、具备整形效果的立轴冲击式破碎机或圆锥式破碎机。合理配置各类破碎机,才能提高生产效率,防止等料、溢料现象产生,减少机械的零部件更换。

以潮惠高速TJ16标为例,初破采用PE鄂式破碎机(图2),其前端设置有振动给料机(图3),其作用是将粒径630 mm以下的石料加工粗破至粒径215 mm以下。

二破前段采用圆锥式破碎机,共安装2台(图4)。通过振动给料机(图5)把颚破破碎的石料送到第一台S155B中型S弹簧圆锥破碎机进行处理,第一道筛分机上的超限料则进入第二台S155D细型S弹簧圆锥破碎机进行二次破碎。

二破后阶段采用反击式破碎机,共安装2台反击破为一组,圆锥破碎机的料将直接进入反击破进行破碎。

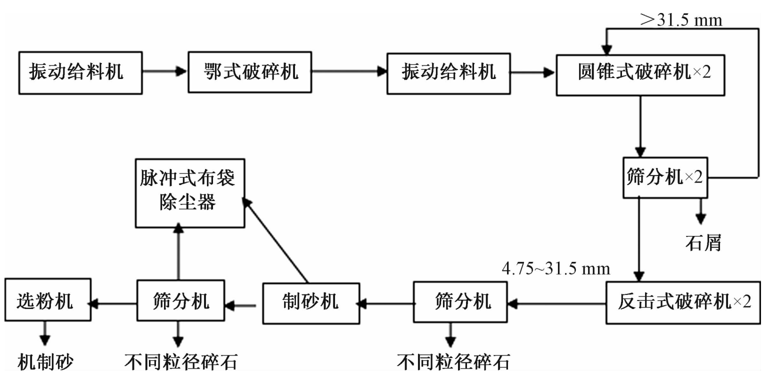



图1 机制砂生产流程

图2 颚式破碎机

图3 振动给料机

图 4　圆锥式破碎机

图 6　立轴式冲击破碎机

图 5　喂料皮带

图 7　一筛

三破采用的是立轴式冲击破碎机，用于生产机制砂。进料粒径为 4.75～9.5 mm 粗骨料，设计处理能力为 240～380 t/h(图 6)。

筛分工序通常采用振动筛，振动筛面积与筛孔大小需合理选择，以在生产效率与机制砂细度模数及石粉含量中取较为适宜的平衡；筛面倾斜设置角度对机制砂生产影响较大，适宜的筛面倾角不但可以提高矿料的过筛效果，还能提高生产效率，倾斜角度设计处于 20～24°范围为宜；若筛体的振动幅度太高则易使破碎料在筛网上过度晃动，无法快速完成过筛；若振动幅度太低则破碎料易卡住筛孔，从而导致溢出，无法实现有效筛分，通常将振动幅度设定为 3～4.5 mm 为宜，振动频率设定为 17～25 Hz 为宜[5]。

以潮惠高速 TJ16 标为例，一筛设计有 2 台筛分机(图 7)，均采用二层套筛，筛孔尺寸分别为 4.75 mm×4.75 mm 和 31.5 mm×31.5 mm。直接筛分出 0～4.75 mm、4.75～31.5 mm、大于 31.5 mm 三种规格的粒料，4.75 mm 以下的直接堆放到石粉堆，大于 31.5 mm 的超限骨料将回到圆锥式破碎机重新破碎。二筛(图 8)采用两层套筛，筛孔尺寸分别为 9.5 mm×9.5 mm 和 19.5 mm×19.5 mm，直接筛分出 9.5～19.5 mm 和 19.5～31.5 mm 两种规格的粗骨料，4.75～9.5 mm 直接进入制砂机。三筛(图 9)配二层筛网，采用筛孔尺寸为 3.0 mm×3.0 mm 和 4.75 mm×4.75 mm。经过筛分机三筛分后，直接筛分出 3.0～4.75 mm 和 4.75～9.5 mm 两种规格的粗骨料，3 mm 以下直接进入选粉机。

除了粉工序是调整产品含粉量的重中之重，为使砂里含粉量符合设计需求，且降低对混凝土整体级配扰动，推荐选择干法制砂分级设备、轮式洗沙机设备开展该工序。

以潮惠高速 TJ16 标为例，用干法生产过程中会产生较多灰尘，整个生产线设置有一台脉冲袋式除尘器，设置在破碎的第三阶段(图 10)。生产配备 SEPAX 高效涡流选粉机一台，用于机制砂级配调整。进料 0～3 mm(图 11)。

**图 8　二筛**

**图 9　三筛**

**图 10　制砂机处除尘器**

## 2　机制砂的性能要求

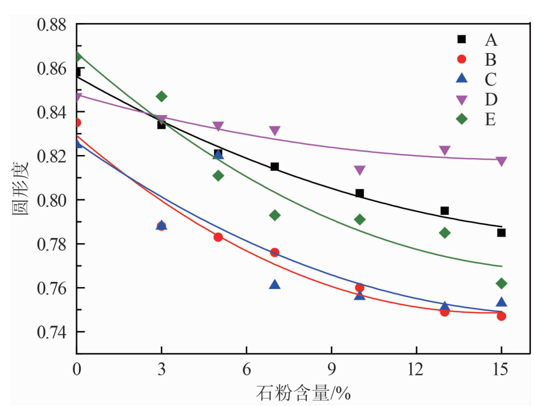
随着行业对机制砂应用技术的大力发展，依次颁布了《建筑用砂》(GB/T 14684)、《普通混凝土用砂石质量及检验方法标准》(JGJ 52)、《人工砂混凝土应用技术规程》(JGJ/T 241)等系列标准，不同地区分析本区域岩石特性，颁布了许多地方机制砂应用标准或规程，有力地推动机制砂在建设领域的应用推广。广东地区由于河砂资源天然储备相对丰

**图 11　选粉机**

富，对机制砂的应用探索起步较晚。参考各项国家标准及地方标准，结合项目应用具体要求与地方资源特征，潮惠高速提出了对机制砂产品的具体性能要求。

### 2.1　机制砂的石粉和泥块含量

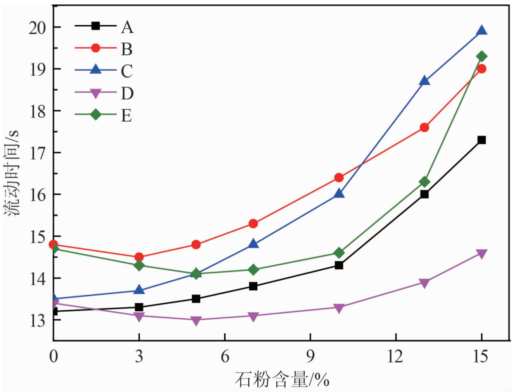
机制砂在制备工序中必定会伴生部分细小颗粒，通常将其中直径小于 75 μm 或公称粒径不足 80 μm、成分与所使用母岩一致的微粒判定为石粉[6]。由图 12 可知，圆形度随微粉含量的增大而减小，即细骨料中微粉部分的圆形度最小，其含量的增加必然导致细骨料颗粒体系圆形降低。由图 13 可知，图中 A、B、C、D、E 为不同石粉含量/含泥量细骨料的流动时间(流出孔径为 16 mm)，其流动时间随微粉含量的增加而延长。由于微粉圆形度小，其含量的增加导致颗粒间咬合力增大，使得细骨料通过流出孔的速率减缓。我国诸多国家标准与地方标准对于机制砂中石粉争议焦点主要在于石粉含量限值，强度等级越高，混凝土用机制砂中石粉含量限值越低，云南省《人工砂技术标准及应用规程》更是分别规定了 150 μm 和 75 μm 粒径粉末的含量，《人工砂应用技术规程》(DBJ/T 01-65—2002)




A、B、C、D、E 代表五个不同单位制备的机制砂试验结果曲线

**图 12　石粉含量对圆形度的影响(机制砂)**

规定经亚甲蓝试验合格的人工砂石粉含量，对强度等级 C30 及以下的混凝土在试验的基础上可按不大于 10%使用，在砂浆中使用时可按不大于 12%使用，参考各国家标准及地方标准，潮惠高速对机制砂的石粉和泥块含量做出如下技术要求(表 11)。




A、B、C、D、E 代表五个不同单位制备的机制砂试验结果曲线

**图 13 石粉含量对流动时间的影响(机制砂)**

**表 1 机制砂的石粉和泥块含量**

| 项目 | | 技术要求 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | <C30 | C30～C45 | ≥C50 |
| 石粉含量/% | MB<1.40 | ≤10.0 | ≤7.0 | ≤5.0 |
| | MB≥1.40 | ≤5.0 | ≤3.0 | / |
| 泥块含量/% | | ≤1.0 | ≤0.5 | 0 |

### 2.2 机制砂压碎值与母岩强度

机制砂强度有两种表征方式，一母岩强度，二是压碎指标值。母岩强度与质量直接影响骨料的质量，进而最终影响成品混凝土在力学与耐久方面的性能，尤其是耐磨能力[7]。压碎值可表征机制砂抵抗其被压碎的性能，可以侧面反映母岩强度，压碎值对中低等级混凝土的强度关联较弱，对高等级混凝土抗冻能力影响微弱，但会大幅削弱混凝土的耐磨能力[8]。参考《人工砂混凝土应用技术规程》(JGJ/T 241—2011)和云南省《人工砂技术标准及应用规程》，对制砂母岩的强度做出如下技术要求(表 2)。

以《建设用砂》(GB/T 14684—2022)为代表的规范根据砂的等级来区分别规定压碎指标。上海市《机制砂在混凝土中应用技术规程》(DG/T J08-506—2002)要求生产机制砂的母岩强度需满足《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)的要求。《贵州省高速公路机制砂高强混凝土技术规程》(DBJ 52-55—2008)中也要求母岩强度需不低于生产集料的矿料，所生产砂的压碎值需不高于 30%。参考以上标准，潮惠高速对机制砂压碎指标做出如下技术要求(表 3)。

**表 2 机制砂母岩的强度**

| 项目 | 指标 | | |
|---|---|---|---|
| | 火成岩 | 变质岩 | 沉积岩 |
| 母岩强度/MPa | ≥100 | ≥80 | ≥60 |

**表 3 机制砂的压碎指标**

| 项目 | 技术要求 | | |
|---|---|---|---|
| | <C30 | C30～C45 | ≥C50 |
| 单级最大压碎指标/% | <30 | <25 | <20 |

### 2.3 机制砂颗粒参数

标准机制砂颗粒的参数应包括细度模数、颗粒级配和颗粒形貌[9]。现多用细度模数与颗粒级配来表征，而颗粒形貌表征尚且处于研究阶段。

1)机制砂规格宜使用中、粗砂，细度模数宜处于 2.3～3.2，应选择细度模数处于 2.6～2.9 的机制砂来生产泵送机制砂混凝土。相同混凝土配合比中所使用砂的细度模数波动幅度需低于 0.2[10]。

2)《建设用砂》(GB/T 14684—2022)相较于 2011 版本对机制砂的颗粒级配做出了更严格的要求，参考该表标准给出潮惠高速机制砂级配范围要求(表 4)。

**表 4 机制砂的颗粒级配范围**

| 公称粒径/mm | | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.60 | 0.30 | 0.15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 累积筛余/% | Ⅰ区 | 5～0 | 35～5 | 65～35 | 85～71 | 95～80 | 97～85 |
| | Ⅱ区 | 5～0 | 25～0 | 50～10 | 70～41 | 92～70 | 94～80 |
| | Ⅲ区 | 5～0 | 15～0 | 25～0 | 40～16 | 85～55 | 94～75 |

### 2.4 其他性能指标

机制砂的其他的关键性能指标还包括密度、空隙率、耐久性、有害物质含量等。机制砂的耐久性与碱骨料反应、坚固性、吸水率和抗冻能力等性能相关[11]；吸水率与机制砂的石粉占比相关，当石粉占比升高，吸水率增大；坚固性用来表征骨料防止其被环境因素腐蚀的性能。当机制砂混凝土用于路面或桥面混凝土时，需额外考虑磨光性能。机制砂中有害成分占比包含云母、轻物质、有机物含量、氯离子和泥块等物质的占比。参考各类国家与地方标准，对上述机制砂性能提出指标如表 5 所示。

## 3 机制砂防腐蚀混凝土配合比与性能指标

### 3.1 配合比设计

机制砂防腐蚀混凝土的配合比在参考相关标准基础上进行，根据机制砂材料性能特征及高速公路应用场景需求，对不同强度等级混凝土配合比提出设计要求如表 6 所示。

表 5　机制砂的其他性能指标

| 项目 | | 表观密度/(kg·m$^{-3}$) | 松散堆积密度/(kg·m$^{-3}$) | 空隙率/% | 云母含量/% | 轻物质含量/% | 有机物含量 | 吸水率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 技术要求 | | >2 500 | ≥1 400 | ≤45 | ≤1.0 | ≤0.5 | 浅于标准色 | ≤2 |
| 项目 | | 坚固性/% | 硫化物和硫酸盐含量(按 $SO_3$ 计)/% | | $Cl^-$ 含量/% | 碱活性 | | 母岩磨光值/% |
| 技术要求 | <C30 | ≤8 | ≤0.5 | | ≤0.06 | 强度等级≥C50 时所用机制砂不应具有碱活性反应 | | ≥35(用于路面、桥面时) |
| | C30~C45 | ≤8 | | | ≤0.02 | | | |
| | ≥C50 | ≤6 | | | ≤0.01 | | | |

表 6　机制砂防腐蚀混凝土配合比技术设计

| 机制砂混凝土强度 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 | C55 | C60 及以上 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 胶凝材料用量/(kg·m$^{-3}$) | ≤420 | | ≤500 | | | | ≤600 |
| 矿物掺合料 | 选用品质良好的磨细矿渣粉、硅灰、粉煤灰等,矿粉用量须根据各使用部位的测试结果决定,按不低于总用量 30% 控制 | | | | | | |
| 石粉 | 可作为掺合料成分,须根据具体测试结果按照总量的 10% ~20% 加入使用 | | | | | | |
| 最大水胶比 | ≤0.55 | ≤0.50 | ≤0.45 | ≤0.40 | ≤0.36 | — | — |
| 砂率 | 宜控制在 37%~47% | | | | | | |

### 3.2　拌合物性能指标

根据目前机制砂在高速公路领域具体应用项目经验及相关技术规范,用于不同部位的机制砂混凝土,由于施工工艺与环境的区别,其性能侧重有所差异。用于灌注桩时,混凝土施工工艺为自密实,无法振捣且满于水/土中,因此要求混凝土有较高流动性,且能自动密实;用于墩身、承台等结构时,混凝土结构体积大,更需控制水化升温,抑制结构开裂;用于梁体时,梁体中钢筋布设密集,且存在预应力部件,要求所使用的混凝土流动和黏聚能力较好,以减少收缩徐变[12]。因此,对于应用于不同结构的机制砂防腐蚀混凝土拌合物,提出性能要求如表 7 所示。

### 3.3　防腐蚀性能指标

潮惠高速项目地区处于沿海地区,对于其各部分混凝土结构而言,需着重考虑其防腐蚀性能。由于机制砂代替河砂作为参与混凝土组分时,其含有的部分石粉具有类似于粉煤灰与矿渣粉的性质,可有效加强水泥混凝土的密实程度,并因此增强抗腐蚀因子渗透的能力[13];结合相关混凝土质量控制国家标准和公路工程行业标准,对不同环境作用下不同结构机制砂防腐蚀混凝土防腐蚀性能提出不同的要求和检测方法(表 8)。

## 4　工程应用验证

为验证机制砂防腐蚀混凝土配合比和拌和物性能指标的实际应用可行性和科学性,在潮惠高速公路项目进行了预制梁 C50 机制砂防腐蚀混凝土

表 7　用于不同部位的机制砂混凝土拌合物性能指标

| 拟用结构 | 强度等级 | 出机坍落度/mm | 坍落度经时损失/(mm·h$^{-1}$) | 扩展度/mm | 含气量/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 灌注桩 | C30~C40 | 200±20 | ≤30 | ≥450 | ≥4.0 |
| 墩柱、承台 | C30~C40 | 180±20 | ≤30 | — | ≥3.5 |
| 梁体 | C50 | 180±20 | ≤30 | — | 2~4 |

表 8　不同部位机制砂防腐蚀混凝土耐久性要求和检测方法

| 环境类别 | 环境条件 | 应用部位 | 56 d 电通量/C | | 56 d 氯离子扩散系数/($10\sim12\ m^2\cdot s^{-1}$) | | 56 d 抗硫酸盐侵蚀破坏等级 | | 28 d 胶材耐蚀系数 | | 抗渗等级 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 100 年 | 50 年 | 100 年 | 50 年 | 100 年 | 50 年 | 100 年 | 50 年 | 100 年 | 50 年 |
| Ⅰ | 与无侵蚀性静水浸没环境 | 灌注桩 | <1 500 | <2 000 | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | | 墩柱、承台 | | | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | | 梁体 | | | ≤7 | ≤10 | / | / | / | / | / | / |
| Ⅱ | 严寒地区的露天环境、受除冰盐影响环境、海岸环境 | 灌注桩 | <1 200 | <1 500 | / | / | / | / | 0.8 | 0.8 | / | / |
| | | 墩柱、承台 | | | ≤5 | ≤8 | ≥KS150 | ≥KS120 | | | / | / |
| | | 梁体 | | | | | / | / | | | ≥W12 | ≥W12 |
| Ⅲ | 海水环境 | 灌注桩 | <1 000 | <1 200 | / | / | / | / | 0.8 | 0.8 | / | / |
| | | 墩柱、承台 | | | ≤5 | ≤8 | ≥KS150 | ≥KS120 | | | / | / |
| | | 梁体 | | | | | / | / | | | ≥W12 | ≥W12 |
| Ⅳ | 受侵蚀性物质影响的环境 | 灌注桩 | <1 000 | <1 200 | / | / | / | / | 0.8 | 0.8 | / | / |
| | | 墩柱、承台 | | | ≤5 | ≤8 | ≥KS150 | ≥KS120 | | | / | / |
| | | 梁体 | | | | | / | / | | | ≥W12 | ≥W12 |
| 检测方法 | | | JTG/T F50—2011 | | GB/T 50082 | | GB/T 50082 | | TB 10005—2010 | | JTG E30—2005 | |

配合比设计和性能试验以及结构试验。为充分利用工程副产物，进一步降低施工成本和实现节能环保，现场采用隧道花岗岩洞渣生产机制砂，尝试代替河砂来制备防腐蚀混凝土。

**4.1　试验室配合比设计**

预制梁使用 C50 机制砂防腐蚀混凝土进行浇筑，采用隧道洞渣所生产花岗岩机制砂，根据上文提出的配合比设计范围，最终确定试验梁配合比，花岗岩机制砂性能与混凝土配合比分别如表 9 和表 10 所示。

测试按照如上配合比所制拌合物性能，坍落度为 200，扩展度在 450 左右，比值约 0.44，含气量为 2.6%，而当混凝土坍落度与扩展比处于 0.425±0.025 范围内时施工性能较好[14]，因此可认定按该配方所制得拌合物性能良好。

根据试验梁配合比，测试了各龄期混凝土相关力学及耐久表现，主要包括弹性模量、抗折性能、抗压性能、氯离子扩散系数、电通量，汇总结果如表 11 所示。

根据试验结果，机制砂防腐蚀混凝土弹性模量和抗折性能试验结果均证实制备的混凝土力学性能优良，符合预制梁制备需求。各龄期抗压性能发育明显，3 天抗压性能便可达 52.9 MPa，56 天时已高达 87.4 MPa，其性能满足设计要求。氯离子扩散系数与电通量试验均说明其抗渗性能与耐久性能优越。

**4.2　实体结构测试**

在制备试验梁时，采用上述配合比下的机制砂防腐蚀混凝土以及纯水泥河砂混凝土，在相同的施工及养护环境下分别浇筑的预制梁实体结构形成对比实验，在 28 天龄期时比对测试实体结构性能，以对混凝土性能进行分析。采用的河砂混凝土配合比汇总表 12。

对机制砂防腐蚀混凝土现场取样，对混凝土试件开展性能测试，通过无损检测技术分别对 28 天龄期的机制砂防腐蚀混凝土、纯水泥河砂混凝土所浇筑预制梁的表面回弹强度、抗氯离子渗透性、表面吸水率以及表面电阻率等指标进行了检测。

**4.2.1　表面回弹强度**

分别对两种混凝土所浇筑梁体表面强度进行测试，各取 50 个测点部位，均匀遍布梁体表面。测试结果显示，机制砂防腐蚀混凝土梁试件表面回弹强度最小值为 57.4，强度高于 60 MPa 的测点比率为 84%；纯水泥河砂混凝土试件表面回弹强度最小值为 56.1，强度高于 60 MPa 的测点比率为 56%，强度低于机制砂防腐蚀混凝土梁。

**4.2.2　抗氯离子渗透性能**

使用 PERMIT 离子迁移法评估两种梁体抗氯离子渗透混凝土能力强弱，分别取两点位进行测量，测定机制砂防腐蚀混凝土梁结果仅 $6.28\times10^{-12}\ m^2/s$，远低于纯水泥河砂混凝土预制梁的 $10.17\times10^{-12}\ m^2/s$，参照能力等级评定，机制砂防腐蚀混凝土相较于纯水泥河砂混凝土要高出 1 级，抗腐蚀因子表现更优(图 14)。

**4.2.3　表面吸水率**

对两种混凝土梁体的顶板、侧面上部、侧面下部分别于相同位置取 4 个测点进行表面吸水率测试，分析吸水性能，检测结果如图 15 所示。由图 15 可知，机制砂防腐蚀混凝土梁各区位均值均低于纯水泥河砂混凝土，其梁体表面抗水渗性能更优。

**表 9　花岗岩机制砂性能**

| 细度模数 | 吸水率/% | 泥块含量/% | $SO_3$ 含量/% | $Cl^-$ 含量/% | 石粉含量/% | MB 值/% | 压碎指标/% | 坚固性/% | 砂浆棒膨胀率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.0 | 0.6 | 0.2 | 0.07 | 0.001 | 4.0 | 0.8 | 5.3 | 3 | 0.04 |

**表 10　试验梁配合比**

| 强度等级 | 配合比/($kg\cdot m^{-3}$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 水泥 P·Ⅱ52.5 | 粉煤灰 | 机制砂 | 碎石(5～10 mm) | 碎石(10～25 mm) | 水 | 外加剂 |
| C50 | 400 | 80 | 708 | 425 | 637 | 144 | 6.0 |

**表 11　混凝土性能试验结果**

| 强度等级 | 弹性模量/GPa | | 抗折强度/MPa | | 抗压强度/MPa | | | | 氯离子扩散系数/($10^{-12}\ m^2\cdot s^{-1}$) | 电通量/C | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 7 d | 28 d | 28 d | 56 d | 3 d | 7 d | 28 d | 56 d | 28 d | 28 d | 56 d |
| C50 | 33.1 | 41.2 | 6.6 | 6.7 | 52.9 | 57.0 | 77.7 | 87.4 | 5.9 | 1 829 | 980 |

**表 12　纯水泥河砂混凝土预制梁配合比**

| 强度等级 | 配合比/($kg\cdot m^{-3}$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 水泥 P·Ⅱ52.5 | 河砂 | 碎石(5～10 mm) | 碎石(10～25 mm) | 水 | 外加剂 |
| C50 | 444 | 682 | 222 | 892 | 160 | 4.44 |

#### 4.2.4 表面电阻率

使用表面电阻测试仪开展梁体表面电阻率试验，分别对两种梁体试件表面电阻率进行试验，各取测试点位18个，均匀分布与梁体一侧表面，测试结果如图16所示。

根据结果分析，纯水泥河砂混凝土梁体表面电阻率在3～11 kΩ•cm波动，平均为6.9 kΩ•cm，而机制砂防腐蚀混凝土梁体表面电阻率在8～14 kΩ•cm波动，平均达到12.9 kΩ•cm，几乎两倍于纯水泥河砂混凝土梁体，其保护梁体内部钢筋防止锈蚀的性能较好。

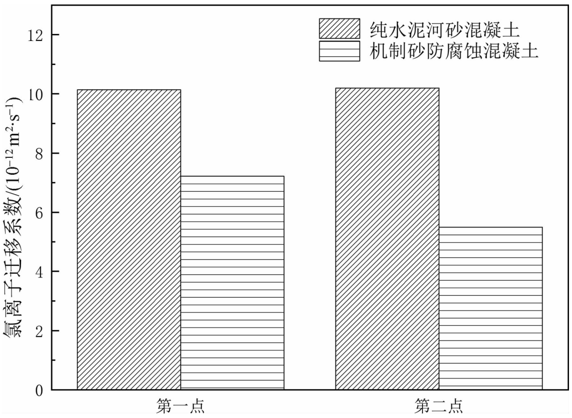



图14 梁体抗氯离子渗透性能测试数据对比

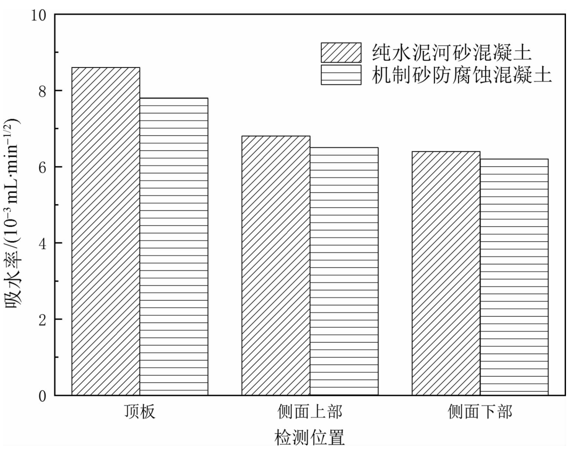



图15 梁体各部位表面吸水率对比

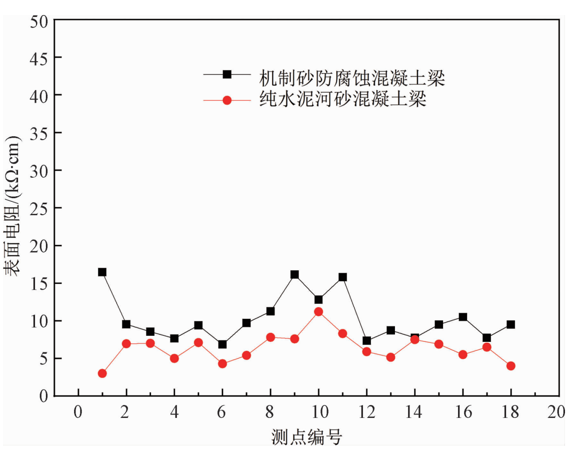



图16 梁体各点位表面电阻率对比

## 5 结论

分析了机制砂生产加工关键环节的常用工艺设备，提出推荐设备组合为颚式破碎机前破＋圆锥式破碎机、反击式破碎机中破＋立轴式冲击破碎机后破＋振动筛＋干法制砂分级设备、轮式洗沙机。振动筛参数设置宜为倾斜角度20°～24°、振幅3～4.5 mm、振频17～25 Hz。

针对机制砂防腐蚀混凝土的应用场景，对生产指标提出了控制范围，要求重点控制含泥/粉含量、颗粒参数、压碎值和母岩强度等性能指标。

对不同应用场景特性下混凝土的配合比设计、性能测试、工艺要点进行了分析设计，分别提出了建议的配合比设计范围，并对拌合物性能、防腐蚀性能提出指标要求及检测方法。

对比机制砂防腐蚀混凝土和纯水泥河砂混凝土试验梁性能，两种试验梁强度均达使用需求，机制砂防腐蚀试验梁强度表现更优、抗氯离子渗透性能高62％、表面吸水率低6.3％、表面电阻率高87％，所建立机制砂混凝土防腐蚀性能指标体系具备工程实践可行性。

## 参考文献


[1] 余川. 机制砂在巴南高速公路中的应用研究[D]. 成都：西南交通大学，2011.

[2] 孟乔，黄维蓉. 基于耐久性能的混凝土寿命预测方法研究进展[J]. 科学技术与工程，2022，22(5)：1751-1759.

[3] 杨东来，刘涛，黄维蓉. 沥青路面集料加工质量控制技术[J]. 公路交通技术，2012(4)：41-44.

[4] 林宗寿. 水泥工艺学[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2012.

[5] 邢海涛. 甘肃省高等级公路沥青路面施工质量变异性研究[D]. 西安：长安大学，2016.

[6] 唐伟军. 机制砂参数对混凝土性能的影响[J]. 智能城市，2020，6(20)：60-61.

[7] 王帆. 基于比强度的高强高性能混凝土配合比优化设计[D]. 西安：西安建筑科技大学，2014.

[8] 孙世国，鲁艳朋. 超高性能混凝土国内外研究进展[J]. 科学技术与工程，2018，18(20)：184-199.

[9] 王添新，刘秀梅. 浅析武深高速公路中机制砂与河砂混掺混凝土施工技术[J]. 科学技术创新，2015(1)：134.

[10] 张淑云，陈秘，周杰，等. 孔隙特征对机制砂自密实轻骨料混凝土强度的影响规律[J]. 科学技术与工程，2022，22

(11):4539-4546.
[11] 鲁浩,李固华,杨家伟,等. 机制砂混凝土研究现状与存在问题分析[J]. 四川建材,2014,40(1):3-4,6.
[12] 尹华伟,舒佳建,黄帅,等. 混凝土收缩徐变和温度对外墙瓷砖性能及安全性的影响[J]. 科学技术与工程,2018,18(14):54-49.
[13] 姜天华,管建成,张秀成. 超高性能混凝土掺合料应用综述[J]. 科学技术与工程,2022,22(14):5528-5538.
[14] 凌海宇,田波,权磊,等. 振动条件下基于扩展度的低坍落度混凝土工作性评价[J]. 混凝土,2018(6):101-104.

# Research on Application of Manufactured Sand Corrosion Proof Concrete in Engineering Construction:

Take Chaohui Expressway construction as an example

ZHENG Yuxin[1], JIE Jixing[2]

(1. Guangdong Province Freeway Co Ltd, Guangzhou, 510000, China;
2. Xiaoning Institute of Roadway Engineering, Guangzhou, 510641, China)

**Abstract**: The shortage of river sand has become a restricted problem in expressway construction, and the use of machine-made sand instead of river sand has become the development trend of infrastructure projects. Based on Chaohui Expressway, the technology research on the preparation of corrosion-resistant concrete with machine-made sand instead of river sand was carried out. In view of the lack of systematic technical guidance in the application of corrosion-resistant concrete with machine-made sand, the performance index system of corrosion-resistant concrete with machine-made sand was established. The key process of sand production and processing was analyzed, and the recommended equipment combination and parameter setting were put forward. The control standard of key performance indexes of manufactured sand products is put forward, and the recommended range is given for the mix design of concrete with different strength grades. The requirements and detection methods for the anti-corrosion performance of manufactured sand anti-corrosion concrete in different application scenarios of expressway are put forward. Based on the project, the solid test beam control test is carried out to compare the structural strength and anti-corrosion performance of the beam, and the engineering feasibility of the established performance index system of machine-made sand anti-corrosion concrete is verified.

**Keywords**: manufactured sand; anti-corrosion; concrete; bridge; performance index