

机制砂颗粒级配优化与混凝土性能改进的试验分析

冯清泉*

(中铁十九局集团广州工程有限公司, 广州 511455)

摘要: **目的** 探讨机制砂颗粒级配优化对混凝土性能的影响, 确定最优级配方案。**方法** 通过对5组不同级配机制砂进行物理性能测试, 分析其对混凝土力学性能和耐久性的影响, 并结合微观结构表征方法探究作用机理。**结果** 细度模数2.9的M3组级配方案表现最佳: 空隙率降至35.2%, 较对照组降低12.4%; 28 d抗压强度达53.2 MPa, 提高16.7%; 氯离子扩散系数降至 $2.86 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 降低25.7%; 碳化深度降低31.2%。**结论** 优化的机制砂级配显著改善了机制砂的工作性能以及混凝土的力学性能和耐久性, 为机制砂质量优化提供了可行的技术方案。

关键词: 机制砂; 颗粒级配; 混凝土性能

0 引言

建筑用砂资源日益紧缺, 天然砂开采对生态环境造成严重破坏。机制砂作为替代材料, 其颗粒级配直接影响混凝土的性能^[1]。目前机制砂生产中普遍存在级配不合理、细粉含量波动大等问题, 导致混凝土性能难以保证。国内外学者针对机制砂的颗粒形貌、级配优化等方面开展了大量研究, 但缺乏系统的级配优化方案^[2]。为解决此问题, 本文通过调控机制砂的颗粒级配, 分析其对混凝土各项性能的影响规律, 对提高机制砂混凝土质量具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

本研究所用机制砂来自某砂石厂, 采用上海山启机械制造有限公司生产VSI冲击式制砂设备生产, 原岩为花岗岩, 表观密度为 2.65 g/cm^3 , 含泥量 $< 1\%$ ^[3]。水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥, 初凝时间175 min, 终凝时间230 min。粗骨料为5~25 mm碎石, 针片状含量 $< 8\%$, 压碎值9.5%。试验设备包括: 济南金钢试验机厂生产的WDW-100E电子万能试验机(抗压强度测试)、天津市科尼仪器仪表有限公司生产的ZJ-2型砂浆渗透仪(氯离子扩散系数)、天津市天航工业技术有限公司生产的HC-1碳化试验箱(碳化深度)、丹麦康克瑞特专业仪器有限公司生产的RapidAir 457气泡分析仪(气泡参数)^[4]。搅拌机采用济南华隆试验机制造有限公司生产的HJW-60型强制式, 振实采用天津市天航工业技术有限公司生产的ZT-1型振动

台^[5]。配合比基于JGJ 55—2011设计, 水泥用量 350 kg/m^3 , 水灰比0.42。

1.2 试验方案设计

本研究采用单因素试验设计法, 以机制砂颗粒级配为可控变量, 设计5组不同级配方案。如表1所示。

表1 机制砂级配优化试验方案

编号	细度模数	粗细比	筛分粒径累计通过率(%)				
			4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.15 mm
M1	2.5	0.8	100	85	72	48	15
M2	2.7	1.0	100	82	65	42	12
M3	2.9	1.2	100	78	58	35	10
M4	3.1	1.4	100	75	52	30	8
M5	3.3	1.6	100	72	45	25	6

参照JGJ 52—2006《细骨料级配区》, 以2.36 mm为分界粒径, 将机制砂划分为粗、细两个粒组。通过改变粗细粒组的配比, 调控机制砂的细度模数, 使其分别为2.5、2.7、2.9、3.1和3.3, 对应编号M1~M5。其中M3组作为对照组, 其级配曲线位于规范推荐的优选区域。

1.3 性能测试方法

机制砂物理性能测试按照《建设用砂》(GB/T 14684—2022)标准进行^[6]。表观密度采用容量瓶法测定, 堆积密度使用量筒法测定。含水率采用烘干法, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 温度下烘至恒重^[7]。泥粉含量采用水洗法, 使用0.075 mm方孔筛进行筛洗。颗粒级配采用机械筛分法, 使用4.75、2.36、1.18、0.6、0.15 mm标准筛进行干筛。空隙率通过堆积密度与表观密度计算得出^[8]。级配系数通过各粒径累计通过率计算。颗粒形貌参数(形状系数、球形体度、棱角度指数)采用数字图像分析系统测定。混凝土性能测试

* 通信作者: 冯清泉, 助理工程师, 试验室主任, 研究方向为建筑工程试验检测。E-mail: 599199090@qq.com

依据现行国家标准进行，如表 2 所示：

表 2 混凝土性能测试项目及方法

测试项目	测试方法	测试设备	测试参数
抗压强度	GB/T 50081	WDW-100E 万能试验机	加载速率 0.5 MPa/s
弹性模量	CECS 21:2000	DJGW-5A 超声波测试仪	频率 50 kHz
氯离子渗透性	GB/T 50082	ZJ-2 型渗透仪	60 V 直流电压
碳化深度	GB/T 50082	HC-1 碳化箱	CO ₂ 浓度(20±3)%
孔结构特征	ASTM C457	RapidAir 457 气泡分析仪	分辨率 2 μm

微观结构分析采用压汞仪测定孔径分布，氮气吸附法测定比表面积和孔容。

2 结果与分析

2.1 级配优化结果

通过对 5 组不同级配机制砂的性能测试分析，确定了最优化的颗粒级配方案。从空隙率和堆积密度评价，随着细度模数的增加，机制砂的空隙率呈先降后升趋势。在 M3 组(细度模数 2.9)时达到最低值 35.2%，较 M1 组降低 12.4%。如表 3 所示。

表 3 不同级配机制砂的物理性能指标

编号	空隙率(%)	堆积密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	泥粉含量 (%)	级配 系数
M1	40.2	1486	1.8	0.8	1.12
M2	37.5	1525	1.6	0.7	1.25
M3	35.2	1568	1.5	0.7	1.38
M4	36.8	1542	1.4	0.6	1.45
M5	38.4	1512	1.3	0.6	1.52

M3 组的级配系数为 1.38，处于 1.2~1.4 的理想区间，其级配曲线与 Fuller 理想曲线的偏差均方根值最小(0.052)。该组配比的粗细比为 1.2 : 1，在保证足够细粉含量的同时维持了良好的骨架支撑作用。颗粒形貌参数如表 4 所示。

表 4 不同级配机制砂的颗粒形貌参数

编号	形状系数	球形度	棱角度指数	表面纹理指数	延展比
M1	0.78	0.65	3.8	1.45	1.85
M2	0.82	0.68	3.5	1.38	1.72
M3	0.86	0.72	3.2	1.25	1.56
M4	0.83	0.69	3.4	1.32	1.68
M5	0.80	0.66	3.6	1.40	1.78

M3 组的形状系数为 0.86，球形度为 0.72，棱角度指数为 3.2，均优于其他组别，表明该级配最适合作为机制砂生产的优化目标。

2.2 混凝土力学性能

不同级配机制砂对混凝土力学性能的影响主要体现在抗压强度、弹性模量和劈裂抗拉强度等方面^[9]。试验结果表明，随着机制砂细度模数的增加，混凝土的力学性能均呈现出先升后降的变化规律。如表 5 所示。

从早期强度发展来看，M3 组 3 d 抗压强度达到 28.6 MPa，较 M1 组提高 27.1%，表明优化级配有效改善了混凝土的早期强度发展。这主要归因于合理的颗粒级配提高了浆体与骨料

界面过渡区的结合质量，加快了水泥水化进程。28 d 抗压强度测试结果显示，M3 组达到 53.2 MPa，较其他组别分别提高 7.5%~16.7%，验证了该级配方案的优越性。弹性模量与抗压强度呈现相似的变化趋势，M3 组的 28 d 弹性模量为 35.2 GPa，较 M1 组提高 8.3%。这是由于优化级配降低了混凝土内部的空隙率，提高了整体刚度。劈裂抗拉强度的测试结果表明，M3 组的 28 d 劈裂抗拉强度达到 3.8 MPa，较其他组别提高 8.6%~18.8%。力学性能的提升机理可归因于以下几点：首先，优化级配提高了机制砂的堆积密度，减少了混凝土中的孔隙；其次，合理的粗细颗粒配比改善了骨料的空间分布，形成了更稳定的骨架结构；最后，适量的细颗粒含量增强了水泥浆体的充填效果，提高了界面结合强度。

表 5 不同级配机制砂混凝土的力学性能指标

编号	抗压强度(MPa)			弹性模量(GPa)	劈裂抗拉强度(MPa)
	3 d	7 d	28 d	28 d	28 d
M1	22.5	35.2	45.6	32.5	3.2
M2	25.8	38.4	48.9	33.8	3.5
M3	28.6	42.5	53.2	35.2	3.8
M4	26.2	39.8	49.5	34.1	3.4
M5	23.8	36.5	46.8	33.2	3.3

2.3 混凝土耐久性能

机制砂级配优化对混凝土耐久性能的影响主要通过氯离子渗透性、碳化深度和孔结构特征等指标进行评价。如表 6 所示。

表 6 不同级配机制砂混凝土的耐久性能指标

编号	氯离子 扩散系数 (10 ⁻¹² m ² /s)	碳化深度 (mm)	总孔隙率 (%)	平均孔径 (nm)	毛细孔 占比 (%)
M1	3.85	12.5	15.8	85	52.6
M2	3.42	10.8	13.6	76	45.8
M3	2.86	8.6	11.5	62	38.4
M4	3.25	9.5	12.8	71	42.5
M5	3.56	11.2	14.2	79	48.3

结果表明，M3 组的氯离子扩散系数为 2.86×10⁻¹² m²/s，较 M1 组的 3.85×10⁻¹² m²/s 降低 25.7%，表明优化级配有效提高了混凝土的抗氯离子渗透能力。这主要归因于更合理的孔结构分布，减少了连通孔道的数量。碳化深度测试结果显示，M3 组 28 d 碳化深度为 8.6 mm，较其他组别降低 10.2%~31.2%，体现

了更好的抗碳化性能。压汞测试结果表明，M3 组的总孔隙率降至 11.5%，且孔径分布更加集中，平均孔径减小至 62 nm。特别是有害孔(> 100 nm)的比例显著降低，毛细孔占比仅为 38.4%，这种致密的孔结构有效阻碍了有害介质的侵入。氮气吸附测试进一步证实，M3 组的比表面积和孔容分别较 M1 组降低 18.5% 和 22.3%。综上所述，机制砂级配优化通过改善混凝土的孔结构特征，明显提升了其耐久性能。

2.4 相关性统计分析

为深入探究机制砂级配特征与混凝土性能之间的关系，对试验数据进行了 Pearson 相关性分析和多元回归分析^[10]。研究表明，颗粒级配参数与混凝土各项性能指标之间存在显著相关性。如表 7 所示。

表 7 机制砂级配特征与混凝土性能的相关系数矩阵

性能指标	细度模数	粗细比	空隙率	级配系数	形状系数
28 d 抗压强度	-0.865**	-0.812**	-0.923**	-0.756**	0.845**
弹性模量	-0.834**	-0.798**	-0.887**	-0.723**	0.812**
氯离子扩散系数	0.876**	0.825**	0.898**	0.768**	-0.856**
碳化深度	0.843**	0.802**	0.912**	0.745**	-0.832**
总孔隙率	0.856**	0.815**	0.935**	0.778**	-0.867**

注：** 表示在 0.01 水平上显著相关。

通过多元逐步回归分析，建立了混凝土 28 d 抗压强度(f_c)与主要级配参数的预测模型。如公式 1 所示：

$$f_c = 58.6 - 5.2x_1 - 3.8x_2 - 0.7x_3 + 12.5x_4 \tag{1}$$

其中， x_1 为细度模数， x_2 为粗细比， x_3 为空隙率， x_4 为形状系数。模型的决定系数 r^2 为 0.926，表明该模型具有良好的拟合效果。方差分析结果显示，空隙率是影响混凝土性能最显著的因素($P < 0.01$)，其标准化回归系数为 -0.923，说明降低空隙率是提升混凝土性能的关键。形状系数的影响次之，与混凝土强度呈显著正相关($r=0.845$, $P < 0.01$)，验证了改善颗粒形貌对性能提升的重要性。

通过主成分分析，将多个级配特征参数综合为两个主成分，其累计方差贡献率达到 85.6%。第一主成分主要反映颗粒分布特征，包括细度模数和粗细比；第二主成分主要反映颗粒形貌特征，包括形状系数和棱角指数。聚类分析结果表明，试验设计的 5 组级配方案可分为 3 类，其中 M3 组单独成类，具有最优的综合性能指标。

3 结论与讨论

基于对机制砂级配优化及其对混凝土性能影响的系统研究，得出以下结论：

(1)研究表明，合理的颗粒级配是提高机制砂质量的关键。通过细度模数和粗细比的优化调控，可有效改善机制砂的物理性能。最优级配方案体现了良好的堆积效应，其颗粒分布与理论最

密实充填曲线高度吻合，为提高混凝土性能奠定了材料基础。

(2)从力学性能角度看，优化级配有效提升了混凝土的强度特性。这种改善效果主要源于三个方面：一是优化级配降低了混凝土内部缺陷；二是改善了界面过渡区结构；三是形成了更稳定的骨架支撑体系。特别是早期强度的提升，表明级配优化促进了水泥的水化进程。

(3)从耐久性角度看，优化级配改善了混凝土的微观结构。通过减少有害孔隙、优化孔径分布、提高结构致密度，有效提升了混凝土抵抗氯离子渗透和碳化侵蚀的能力。

(4)相关性分析揭示了级配特征与混凝土性能间的内在联系。空隙率和颗粒形貌是影响混凝土性能的主导因素，这为生产实践提供了重要的控制依据。建立的预测模型可为工程配合比设计提供理论指导。

在工程实践中，建议从以下几个方面着手改进机制砂质量：第一，严格控制制砂工艺参数，确保级配的稳定性；第二，优化破碎设备和工艺流程，改善颗粒形貌；第三，建立完善的质量控制体系，实现生产全过程管理。未来研究可着重探讨级配优化对混凝土长期性能的影响机理，特别是在极端环境下的耐久性表现，为提升混凝土质量提供新的技术途径。

参考文献

[1] 彭兴华,李国栋,张晋,等.机制砂粒形和级配优化试验研究[J].矿冶工程,2024,44(04):207-211.

[2] 刘德峰,崔晨冉,郑彦涛,等.废石颗粒级配优化对充填材料性能的影响机制[J].有色金属(矿山部分),2024,76(05):93-102.

[3] 艾长发,彭浩,胡超,等.机制砂级配对混凝土性能的影响规律与作用效应[J].混凝土,2013(01):73-76.

[4] 蔡园园,房怀英,余文,等.采用数字图像处理的机制砂粒度级配检测方法[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(05):567-573.

[5] 谭明,苏紫敏,黄滢,等.花岗岩机制砂路面混凝土配合比优化设计分析[J].西部交通科技,2023(12):52-55,69.

[6] 国家市场监督管理总局.建设用砂:GB/T14684—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[7] 韩富庆,梁晓东,曾雄鹰,等.机制砂混凝土配合比设计与力学性能研究[J].湖南交通科技,2020,46(02):13-17,70.

[8] 田中雨,翁彬峰,纪登贵,等.机制砂应用常见问题及生产工艺改进措施研究[J].工程技术研究,2024,9(15):114-116.

[9] 肖世玉,彭丙杰,吴涛,等.砂率及机制砂特性对混凝土流动性与颗粒膜层厚度的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(09):3068-3076.

[10] 王鑫,管民生,杭熙茹,等.机制砂再生粗骨料混凝土抗压强度试验研究[J].混凝土,2024(09):89-93.