机制砂石骨料粒形与级配优化技术研究

朱容海，毕永健

（中交一公局第四工程有限公司，广西 南宁 530000）

摘　要　以花岗岩机制砂与粗骨料为研究对象，围绕“粒形—级配—性能”协同优化思路，设计了 S、R、G、F、D 五大系列，系统探讨了机制砂掺量、石粉含量、粗骨料级配、针片状含量及最大粒径对拌合物流变、力学与耐磨性能的量化影响。研究结果表明：100% 机制砂掺配 12% 石粉、粗骨料级配 20:55:25、针片状≤ 12%、最大粒径 25 mm 的组合，可使混凝土抗压强度达 49 MPa、磨损率低至 0.78%。研究有效解决了机制砂石粒形不规则、级配断档、石粉波动等问题，为机制砂石高值化利用及耐磨混凝土精准设计提供了理论依据与工艺路径。

关键词　机制砂掺量；石粉含量；粗骨料级配；耐磨性能；耐磨混凝土

中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.016

0　引言

随着高品质天然砂石资源的日益枯竭以及生态环保政策的持续收紧，机制砂石已成为现代混凝土结构工程不可替代的细、粗骨料来源[1]。然而，与天然骨料相比，机制砂石在母岩岩性、破碎工艺及除尘方式等多因素耦合作用下，普遍存在粒形不规则、针片状含量高、级配断档与石粉含量波动大等先天缺陷，显著影响新拌混凝土的工作性、硬化力学性能及耐久性[2]。现行规范对粒形和级配的限定多停留于筛余百分比与单一几何参数层面，缺乏对颗粒群三维形貌、表面纹理及空隙结构的系统表征，难以实现骨料品质的精准分级与性能预测[3]。此外，现有破碎与整形设备运行参数和骨料最终粒形—级配特征之间的映射关系尚不清晰，导致生产线优化缺乏科学依据，产品质量波动大[4]。

因此，亟需开展机制砂石骨料粒形与级配优化技术系统研究。本研究以花岗岩机制砂为对象，固定胶凝体系与聚羧酸减水剂，设计 S、R、G、F、D 五组配比，系统探讨机制砂掺量、石粉含量、粗骨料级配、针片状含量及最大粒径对新拌流动性与耐磨性的影响，为机制砂石的高值化利用和混凝土性能的精准设计提供理论基础与技术路径。

1　材料与方法

1.1　原材料

本研究所用水泥为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥[5]，硅酸盐水泥与矿渣的化学组成如表 1 所示。

水泥物理性能如表 2 所示，掺合料选用粒度稳定、活性良好的 S95 级矿粉，以提升混凝土后期强度与耐久性。

细骨料采用机制砂和天然河砂两种，机制砂以典型的西南山区花岗岩母岩为原料，通过 PYY500 单缸液压圆锥破 +XHL1145 立轴冲击式整形制砂机（成都大宏立机器股份有限公司）获得，其细度模数为 2.8，河砂细度模数为 2.6，机制砂含石粉量为 8.3%，河砂含泥量为 1.5%[6]。粗骨料选用安徽海螺环保型辉绿岩碎石，粒径分别为 510 mm、1 020 mm 及 16 ～ 31.5 mm，其粒形经针片状含量测试控制在 12% 以内。为优化粒径搭配与堆积密实度，粗骨料在使用前经筛分与级配调整处理。外加剂采用聚羧酸系高性能减水剂（江苏苏博

表 1　硅酸盐水泥与矿渣的化学组成

化学成分	质量分数（%）							
	SiO_2	AI_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O+K_2O	燃烧损失
硅酸盐水泥	21.5	5.2	3.4	63.1	2.3	2.5	0.8	1.2
矿渣	35.2	13.6	0.8	41.1	6.5	1.8	0.5	0.5

表 2　水泥物理性能

性能指标	比表面积（m^2/kg）	初凝时间（min）	终凝时间（min）	抗压强度 (3d,MPa)	抗压强度 (28d,MPa)
测试值	340.0	160.0	245.0	25.4	52.8

特新材料股份有限公司），固含量为19.8%，减水率达35.0%。拌合水为自来水，符合《混凝土用拌合水》（JGJ 63-2006）的相关要求[7]。

1.2 级配优化

为研究机制砂与粗骨料粒形及级配对混凝土工作性与耐磨性能的影响，试验围绕细骨料掺配比例、机制砂整形程度、粗骨料级配结构、针片状含量和最大粒径等关键因素，设计了S、R、G、F、D五个系列混凝土配比方案。胶凝材料组成固定为质量分数75%的P.O 42.5普通硅酸盐水泥与25%的S95矿渣粉，减水剂采用聚羧酸高性能减水剂，控制混凝土坍落度为（5.0±2.0）cm。S系列混凝土采用不同机制砂与河砂掺量比例质量分数为0%、50%、100%以研究混合砂中粒形对混凝土性能的影响；R系列混凝土在机制砂固定来源与形貌下，设置不同石粉含量5%、8%、12%、15%，以评估细骨料级配与填充效应对混凝土致密性与耐磨性的作用；G系列混凝土通过调整粗骨料粒级搭配510 mm：1 020 mm：16～31.5 mm质量比设为10:60:30、20:55:25、15:50:35，探讨粗骨料级配对混凝土强度与抗磨蚀性能的影响；F系列混凝土采用同级配下不同针片状含量≤8%、12%、16%、20%的粗骨料，研究粒形规整度在混凝土性能中的影响权重；D系列混凝土设置最大粒径控制级差为20 mm、25 mm、31.5 mm，通过筛选与粒形优化调控粗骨料颗粒分布连续性，以分析其对混凝土构件整体性能的提升作用。

1.3 试验方法

采用HJS-45型强制式双卧轴混凝土搅拌机（江苏江阴建工机械有限公司生产）制备试样，粗骨料按设计级配（5～10 mm、10～20 mm、16～31.5 mm）筛分重组，人工分拣控制针片状颗粒含量；机制砂经机械整形后，采用NLSX-Ⅲ型空气分级系统（郑州维科智能装备有限公司）进行石粉含量调控。制备时先将预处理后的粗骨料与细骨料投入搅拌机干拌1 min，再加入胶凝材料拌和1 min，最后注入含聚羧酸减水剂的水溶液搅拌2.5 min。新拌混凝土置于温度20±1 ℃、相对湿度＞90%环境养护24 h后脱模，转入20±1 ℃饱和$Ca(OH)_2$溶液中养护至龄期。

机制砂的棱角系数测试按照《建筑用砂》（GB/T 14684-2022）中的流动时间法进行测定，使用LS-TF100型砂流动性测试仪（北京建研科技有限公司）；粗骨料针片状颗粒含量依据GB/T 14685-2022游标卡尺法逐组检测。

混凝土的力学性能测试依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2019）进行，抗压强度采用150 mm立方体试块，YAW-3000E型电液伺服压力试验机（济南中研试验机有限公司）以0.7 MPa/s加荷速度测试；抗折强度采用150 mm×150 mm×550 mm棱柱体试块，加荷速度控制为0.07 MPa/s。耐磨性能测试执行JTG 3420-2020规程并强化骨料暴露观测，将养护至龄期的150 mm立方体试块干燥至恒重，真空清除表面浮尘后，固定于LMR-3型混凝土耐磨试验机（河北路达试验仪器有限公司），特定位向使磨削面垂直骨料最大受力方向以模拟路面磨损。

先以200 N负荷预磨30转，刷净粉尘称得初始质量m_1；继续磨削60转后称取终质量m_2，计算单位面积磨损量（kg/m^2），如下：

$$G=\frac{(m_1-m_2)}{0.0125}$$

2 结果与讨论

本研究围绕机制砂与粗骨料的粒形与级配特性，系统评估其对混凝土工作性与耐磨性能的影响，重点分析了混合砂掺量、石粉含量、粗骨料级配、针片状颗粒比例及最大粒径等参数变化下混凝土性能的响应规律，进一步提出粒形—级配协同优化路径。

2.1 机制砂与石粉掺量的影响

S系列的设计变量为机制砂与河砂的质量分数掺配比例，设定为0%、50%、100%，以评估机制砂对混凝土工作性与抗磨性能的影响。R系列混凝土在机制砂固定的前提下，分别设置石粉掺量为5%、8%、12%、15%，旨在评估石粉作为填料对混凝土微结构与耐磨性能的作用。表3为机制砂与石粉掺量对混凝土性能的综合影响。结果表明：机制砂掺量由0%逐步提升至100%，混凝土坍落度从6.1 cm下降至4.0 cm，工作性明显下降。究其原因，一方面，机制砂的棱角性较强，表面粗糙度较大，颗粒间摩阻增加；另一方面，机制砂中细小颗粒级配偏粗，缺乏润滑作用，整体减弱了浆体对骨料的包裹能力。磨损率则呈下降趋势，从1.2%下降至0.85%。这主要归因于机制砂颗粒形貌的不规则性，提升了界面粘结力，同时填充性能良好，改善了混凝土的致密性与表层抗磨性。

当石粉掺量从5%提升至8%和12%时，混凝土结构更加致密，磨损率显著下降，抗压强度和表面硬度同步提升。这说明适量石粉可填充砂粒间孔隙，提升颗粒间的堆积密度，并在一定程度上提升界面过渡区（ITZ）性能。15%过量掺入反致性能劣化：当石粉掺量增至15%，试样出现微裂纹扩展趋势，磨损率反弹至1.1%。推测此时石粉过多消耗浆体用水，形成游离粉体堆积，弱化整体结构完整性。

表 3　机制砂与石粉掺量对混凝土性能的综合影响

系列	机制砂掺量（%）	河砂掺量（%）	石粉掺量（%）	坍落度（cm）	磨损率（%）	抗压强度（MPa）
S	0	100	—	6.1	1.2	—
S	50	50	—	5.2	1.0	—
S	100	0	—	4.0	0.85	—
R	—	—	5	—	1.2	42.5
R	—	—	8	—	0.85	48.3
R	—	—	12	—	0.7	52.7
R	—	—	15	—	1.1	46.8

2.2　粗骨料级配的作用

G 系列试验围绕粗骨料的粒径组合展开，设定三种配比方案：10:60:30、20:55:25、15:50:35，探讨粒级连续性与空隙率对混凝土力学性能的影响。F 系列的试验设计在粗骨料级配一致的基础上，控制针片状颗粒含量分别为≤ 8%、≤ 12%、≤ 16%、≤ 20%。D 系列控制粗骨料最大粒径为 20 mm、25 mm、31.5 mm，以研究最大粒径级差对混凝土的内部结构连续性与性能提升的作用。

表 4 为典型骨料参数对混凝土性能的影响，结果如下：20:55:25 组性能最优，该级配在满足粗细协调的前提下，实现骨料之间合理嵌挤，内部结构密实，强度与抗磨性均达到最高值。该配比在试验中表现出最小磨损率，为 0.8%，最高抗压强度为 48 MPa。偏粗或偏细皆不利结构稳定，10:60:30 组中小颗粒比例过低，导致空隙偏大；15:50:35 组中细粒过多，堆积不稳定，浆体需求量上升，最终影响强度与耐久性。

表 4　典型骨料参数对混凝土性能的影响

系列	级配	坍落度（cm）	抗压强度（MPa）	磨损率（%）
G 最大粒径（mm）	10:60:30		42	1.1
	20:55:25		48	0.8
	15:50:35		44	1.05
F 针片状含量	≤ 8	5.3	—	0.85
	≤ 12	4.6	—	0.9
	≤ 16	4.2	—	1.1
	≤ 20	3.9	—	1.35
D 最大粒径	20	—	46.5	0.92
	25	—	49	0.78
	31.5	—	47.2	0.88

随着针片状含量升高，混凝土坍落度由 5.3 cm 下降至 3.9 cm，流动性显著降低。这是因为针片状骨料形状不规则，长边倾向于错位堆积，导致拌合物形成“骨架锁结”结构，内摩阻增大。对耐磨性存在临界影响点：造成混凝土应力集中，界面弱化，结构整体性下降，磨损率快速升高。因此，工程中应尽可能控制粗骨料的针片状含量不高于 12%。

25 mm 为最佳控制值，既能形成合理的堆积密度，又具备良好的颗粒骨架稳定性。在耐磨试验中，该组磨损率最低，仅为 0.78%，抗压强度接近 49 MPa。粒径偏小致浆体分布不均，而粒径偏大则出现泵送困难、内部空隙偏大等问题，影响施工性能与长期耐久性。

3　结论

本研究表明，机制砂在适当粒形调控与级配优化条件下，完全可以作为混凝土用砂的可靠替代材料，优化路径总结如下：

1. 在提高耐磨性前提下，100% 机制砂可替代河砂，搭配适量石粉调节级配结构，提升致密性与抗界面磨损能力。

2. 优选粗骨料级配结构为 20:55:25 比例，针片状含量控制在≤ 12%，最大粒径控制在 25 mm 最为理想，综合工作性与耐久性表现最佳。

3. 采用骨料粒形与级配参数协同优化方式，在保证混凝土流动性可控前提下，提升内部结构完整性与界面抗损耗能力，特别适用于磨损负荷较高的工业地坪与交通桥面等工程场景。

在今后的研究中，仍需结合实际工况，进一步探索适配性更高的优化策略。

参考文献：

[1]　邹继伯,陈文祥,王霏,等.石灰岩机制砂对混凝土界面过渡区的加强作用研究 [J]. 路基工程 ,2022(06):73-78.
[2]　袁加毫 . 机制砂石粉对水泥混凝土路面耐磨性能的影响 [J]. 交通世界 ,2024(27):41-43.
[3]　秦婷钰,陈梦涵,王建旭,等.砂石骨料对混凝土性能的影响及其质量控制 [J]. 价值工程 ,2025,44(20):21-23.
[4]　蔡事成,蔡祥磊,李清,等.高品质骨料对混凝土和砂浆性能的影响研究 [J]. 混凝土世界 ,2023(08):55-59.
[5]　吴华明 , 李明 , 王育江 . 普通硅酸盐 P · O 42.5 级水泥抗裂性控制指标研究及工程实践 [J]. 混凝土 ,2023(12):89-92.
[6]　夏大回,朱熺,魏士成,等.基于不同细骨料体系水工混凝土性能研究 [J]. 江苏建材 ,2024(04):19-21.
[7]　曾熙文,王艳芬,赵光明,等.聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料性能研究 [J]. 煤炭科学技术 ,2024,52(07):57-67.