



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404472

引用格式: 龚磊, 秦拥军, 田元, 等. 基于响应面与非支配排序遗传算法 II 对沙漠砂混凝土配合比优化[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(13): 5571-5578.

Gong Lei, Qin Yongjun, Tian Yuan, et al. Optimization and performance study of desert sand concrete mix proportion based on response surface and NSGA-II algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5571-5578.

基于响应面与非支配排序遗传算法 II 对沙漠砂混凝土配合比优化

龚磊, 秦拥军*, 田元, 黄东, 冯倍森

(新疆大学建筑工程学院, 乌鲁木齐 830017)

摘要 为探究不同因素对混凝土性能的影响, 采用响应面法来优化混凝土配合比, 试验以水胶比、钢渣掺量、沙漠砂掺量为变量, 重点分析了混凝土坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度等主要性能指标。试验结果显示, 沙漠砂掺量对混凝土坍落度影响最显著, 抗压强度与劈裂抗拉强度主要受水胶比变化的影响。随着沙漠砂掺量的增加, 混凝土坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度呈现先增加后减小的趋势, 在沙漠砂掺量在 30% 时, 达到其性能最优。钢渣的加入可以改善沙漠砂混凝土 (desert sand concrete, DSC) 的流动性, 随着钢渣的增加, DSC 的抗压强度呈现减小趋势, 抗拉强度先增加后减小; 钢渣的加入与沙漠砂有交互作用, 尤其是对 DSC 的抗拉强度。通过响应分析, 得到最优配合比为水胶比 0.39、钢渣掺量 10%、沙漠砂掺量为 30%, 此时 DSC 综合性能最优。最后, 使用非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 进行多目标优化, 该优化得到更加完善的解集, 从而为 DSC 的应用提供一定的技术支持。

关键词 沙漠砂混凝土; 响应面法; NSGA-II; 多目标优化

中图分类号 TU528;

文献标志码 A

Optimization and Performance Study of Desert Sand Concrete Mix Proportion Based on Response Surface and NSGA-II Algorithm

GONG Lei, QIN Yong-jun*, TIAN Yuan, HUANG Dong, FENG Bei-sen

(School of Civil Engineering and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

[Abstract] To explore the impacts of various factors on the performance of concrete, the response surface methodology was adopted to optimize the concrete mix proportion. In the experiment, the water-binder ratio, the dosage of steel slag, and the content of desert sand were taken as variables, with a focus on analyzing the main performance indicators such as the slump of concrete, compressive strength, and splitting tensile strength. The experimental results indicate that the content of desert sand has the most significant influence on the slump of concrete, while the compressive strength and splitting tensile strength are mainly affected by the variation of the water-binder ratio. With the increase of the content of desert sand, the slump, compressive strength, and splitting tensile strength of concrete exhibit a trend of initially increasing and then decreasing. When the content of desert sand reaches 30%, the performance is optimal. The addition of steel slag can enhance the fluidity of desert sand concrete (DSC). As the amount of steel slag increases, the compressive strength of DSC shows a decreasing trend, and the tensile strength increases initially and then decreases. The addition of steel slag interacts with desert sand, particularly on the tensile strength of DSC. Through response analysis, the optimal mix proportion was obtained as a water-binder ratio of 0.39, a dosage of steel slag of 10%, and a content of desert sand of 30%, at which the comprehensive performance of DSC is the best. Finally, non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was utilized for multi-objective optimization, which yielded a more complete solution set, thereby providing certain technical support for the application of DSC.

[Keywords] desert sand concrete; response surface method; NSGA-II; multi-objective optimization

利用沙漠砂替代细骨料可以有效减小因河床开挖造成的环境问题。近些年, 对沙漠砂混凝土 (desert sand concrete, DSC) 性能进行了深入研究, 研

究发现^[1-2], 在混凝土中掺入适量沙漠砂, 其技术性能可以满足工程需求。通过 Shen 等^[3]、Yan 等^[4]与维利思等^[5]研究表明在沙漠砂替代河砂

收稿日期: 2024-06-15 修订日期: 2025-01-24

基金项目: 国家自然科学基金 (52268046)

第一作者: 龚磊 (1999—), 男, 汉族, 安徽亳州人, 硕士研究生。研究方向: 混凝土材料。E-mail: 2812519889@qq.com.

* 通信作者: 秦拥军 (1970—), 男, 汉族, 江苏太仓人, 硕士, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 新型混凝土材料。E-mail: qyjjg@xju.edu.cn.

时,会存在一个最佳掺量,过量掺入反而会降低混凝土性能。钢渣是炼钢过程中产生的一种副产品,目前国内对于钢渣的利用率较低;有学者^[6-7]把钢渣粉替代部分水泥加入混凝土中发现,在合理的范围内,可以改善混凝土的流动性,增强其强度和耐久性。因此,为了充分利用沙漠砂和钢渣的优点,考虑将钢渣和沙漠砂同时掺入混凝土中,探讨这两种材料对混凝土性能的交互影响。通过试验研究,期望找到一种最佳配比,使混凝土的整体性能得到最大提升。

目前,多数对混凝土配合比的研究采用正交设计,此方法可以在全局中找到部分具有代表性的位置进行试验,可以有效筛选出较优配合比。然而,正交设计对每个试验位置平等对待,指向性较差,收敛速度慢,不利于全面反映数据变化规律^[8]。相比于正交设计,响应面设计更加高效、快速,得到的线性回归方程精度高,可以反映各因素之间的交叉作用,找到最优配合比^[9]。响应面法已经被广泛地应用在各个领域,用于确定不同因素交互作用时的最优响应值。在混凝土配合比优化中也开始使用响应面法来确定最优配合比。例如:黄志强等^[10]使用响应面法对透水混凝土配合比优化设计;刘方宁等^[11]利用响应面法设计超高性能混凝土。无论是正交设计还是响应面设计,通常是以混凝土单一性能作为评价标准,而对于多目标优化研究较少。非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 是一种基于 Pareto 最优概念的最优遗传算法,被广泛用于处理多目标优化问题,通过多次迭代改善优化结果,可以从全局寻找最优解,得到更加完整的解决方案^[12-13]。现阶段对于 DSC 配合比的多目标优化还未见报道。塔克拉玛干沙漠作为世界第二大沙漠,位于新疆地区,如何利用沙漠砂替代细骨料以有效减小因河床开挖造成的环境问题具有重要的研究意义。

现采用响应面设计,以水胶比、钢渣掺量与沙漠砂掺量为变量,以坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度为响应值,利用响应面中的 Box-Behnken 进行试验设计与响应分析,分析各因素之间对混凝土性能的交互影响,通过响应分析得到 DSC 最优配合比。最后,利用 NSGA-II 进行多目标分析,以期对 DSC 应用提供新思路与方法。

1 试验

1.1 试验材料

水泥选用新疆乌鲁木齐中建西部建设生产的西部牌 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,化学成分见

表 1。粗骨料选自新疆地区的卵石,粒径范围在 5 ~ 20 mm,体积密度为 2 710 kg/m³;细骨料来自搅拌站水洗中粗砂,细度模数为 3.1,表观密度为 2 500 kg/m³;沙漠砂来自新疆塔克拉玛干沙漠,取沙地点在新疆巴州轮台县塔河油田沙漠公路 62 km 处背风浮沙,细度模数为 0.9,含泥量 0.1%,具体成分见表 2;硅灰:市售,新疆乌鲁木齐生产的硅灰;钢渣来自河南锦润材料有限公司生产的钢渣粉;减水剂来自新疆乌鲁木齐西部建设搅拌站的减水剂母液,减水率为 28%;水使用乌鲁木齐自来水。

表 1 水泥成分表

Table 1 Cement composition table

成分	含量/%	成分	含量/%
CaO	54.38	MgO	2.45
SiO ₂	24.36	R ₂ O	0.86
Al ₂ O ₃	7.17	K ₂ O	0.65
Fe ₂ O ₃	2.92	Na ₂ O	0.50
SO ₃	2.88	其他	3.83

注:R₂O 表示碱物质的含量。

表 2 沙漠砂成分表

Table 2 Composition of desert sand

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO ₂	55.61	K ₂ O	2.32
Fe ₂ O ₃	2.44	Na ₂ O	2.08
Al ₂ O ₃	9.56	Ti ₂ O	0.36
CaO	14.38	P ₂ O ₃	0.14
MgO	2.54	其他	12.24

1.2 试验方案

试验以水胶比(A)、钢渣掺量(B)、沙漠砂掺量(C)为因素进行配合比设计,通过前期试验固定硅灰掺量 10%、砂率 35%、减水剂用量取为胶凝材料 1.7%。其中钢渣与硅灰是替代部分水泥,沙漠砂替代部分细骨料。采用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 版块设计试验方案,选用三因素三水平,共进行 17 组试验,各因素范围如表 3 所示。

表 3 响应面因素范围

Table 3 Range of response surface factors

水平	因素		
	水胶比 A	钢渣掺量 B/%	沙漠砂掺量 C/%
低水平	0.36	0	20
中水平	0.39	7.5	30
高水平	0.42	15	40

2 结果与讨论

2.1 试验结果

依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)与《普通混凝土力学性能试验

方法标准》(GB/T 50081—2019) 分别进行坍落度试验和力学试验; 使用单卧轴强制式混凝土搅拌机与 WA-300 电液式压力试验机, 测量其坍落度、28 d 抗压强度与 28 d 劈裂抗拉强度, 得出试验数据, 见表 4。

表 4 试验结果
Table 4 Test results

组别	A	B/%	C/%	坍落度/ mm	抗压强度/ MPa	劈裂抗拉 强度/MPa
1	0.39	0	20	110	65.73	3.96
2	0.36	7.5	20	75	59.39	3.75
3	0.39	7.5	30	118	58.50	3.85
4	0.36	0	30	65	68.54	3.93
5	0.42	7.5	20	100	54.61	3.42
6	0.39	7.5	30	120	52.53	3.95
7	0.42	15	30	105	55.18	2.85
8	0.39	15	40	100	52.41	3.57
9	0.39	7.5	30	125	53.68	3.87
10	0.39	15	20	110	52.68	2.41
11	0.39	0	40	85	52.61	3.19
12	0.42	7.5	40	65	48.40	2.99
13	0.36	7.5	40	45	50.55	3.91
14	0.39	7.5	30	120	52.62	3.80
15	0.36	15	30	65	52.24	3.38
16	0.39	7.5	30	120	53.74	3.95
17	0.42	0	30	75	60.07	3.55

2.2 回归模型建立及显著性

探究各因素与 DSC 性能的关系, 利用 Design-Expert 软件对试验结果进行拟合分析, 分别得到坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度的响应面曲面拟合方程 y_1 、 y_2 与 y_3 。

$$y_1 = -6258.3 + 32034.16667A - 11.9766B + 7.74C + 33.3333AB - 4.16667AC + 0.05BC - 40722.22A^2 - 0.1182B^2 - 0.129C^2 \quad (1)$$

$$y_2 = 117.66125 - 112A - 7.471B + 0.42825C + 12.67778AB + 2.19167AC + 0.042833BC - 129.16667A^2 + 0.044511B^2 - 0.032663C^2 \quad (2)$$

$$y_3 = -18.50525 + 102.98333A - 0.0761333B + 0.29845C - 0.16667AB - 0.491667AC + 0.006433BC - 123.05556A^2 - 0.006147B^2 - 0.002558C^2 \quad (3)$$

从式(1)~式(3)来看, 在各因素范围内, 坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度与水胶比、钢渣掺量和沙漠砂掺量之间存在线性关系。对建立的回归模型进行方差与显著性分析, 如表 5 所示, F 越大 P 越小表示相关系数越显著, 通过方差模型分析, 其回归模型 P 远远小于 0.05, 其中抗压强度与劈裂抗拉强度的回归模型的 P 均小于 0.0001, 表明模型是极显著的。此外, R^2 是用来评估实际值与模型预测值的匹配程度, 越接近 100% 时, 表示模型相关性越好。试验模型的 R^2 都大于 95%, 坍落度的 R^2 最高为 98.2%, 说明模型的可靠性高。 R^2 与调整确定系数 Adj. R^2 相差越小, 拟合效果越好。当变异系数 CV 小于 10% 时, 越小表示模型的精确度越好, 对比最高 CV 值 5.41% 小于 10%, 说明模型的精确度较高。

图 1 展示了坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度预测值与实际值的关系, 可以看出实际值与预测值呈线性关系, 表明预测值与实际值相近, 模型可靠。点越密集, 试验出现次数越多, 以密集点的数值, 作为最优配合比的响应值, 更好地提高优化的准确性。因此, 基于响应面配合比优化可以很好地反映出水胶比、钢渣掺量、沙漠砂掺量对混凝土的性能的影响, 从而实现对 DSC 配合比的优化。

表 5 回归模型建立及显著性分析结果

Table 5 Results of regression model establishment and significance analysis

来源	坍落度			抗压强度			劈裂抗拉强度		
	F	P	显著性	F	P	显著性	F	P	显著性
模型	20.01	0.0003	**	42.08	< 0.0001	**	29.11	< 0.0001	**
A	8.48	0.0226	**	43.26	0.0003	**	47.02	0.0002	**
B	64.76	< 0.0001	**	9.71	0.017	**	59.02	0.0001	**
C	44.16	0.0003	**	47.93	0.0002	**	0.1451	0.7145	*
AB	14.22	0.007	**	8.63	0.0218	**	0.4535	0.5223	*
AC	0.7553	0.4136	*	0.2397	0.6394	*	7.02	0.033	**
BC	18.03	0.0038	**	2.16	0.1854	*	75.08	< 0.0001	**
A ²	0.0249	0.8792	*	216.87	< 0.0001	**	4.16	0.0806	*
B ²	11.53	0.0115	**	7.14	0.0319	**	40.58	0.0004	**
C ²	19.62	0.003	**	26.87	0.0013	**	22.2	0.0022	**
R ²		0.9819			0.9626			0.9740	
Adj. R ²		0.9585			0.9145			0.9405	
CV		5.41			2.69			3.14	

注: ** 表示因素影响显著, $P < 0.05$; * 表示因素影响不显著, $P > 0.05$ 。

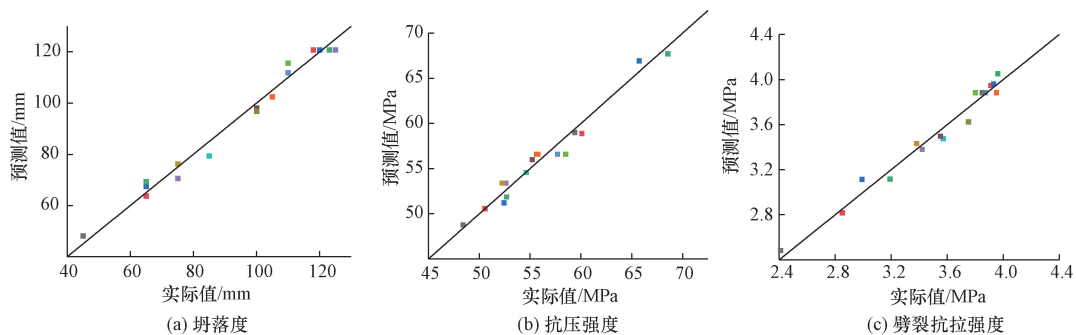


图1 预测值与实际值关系图

Fig. 1 Relationship between predicted value and true value

2.3 响应面分析

2.3.1 坍落度分析

图示2显示坍落度与各个因素的3D响应面曲线和等高图。从图2(a)可知,水胶比为0.36时,随着钢渣掺量的增加,坍落度基本无变化;而当水胶比为0.42时,随着钢渣掺量的增加,坍落度从75 mm增加到105 mm;水胶比的增加会使钢渣对DSC塌落度的影响更加明显,从图2(b)可知,随着沙漠砂掺量的增加,不同水胶比的混凝土坍落度呈现先增加后减小。沙漠砂表面光滑,可以填充混凝土的

孔隙,使砂浆与骨料之间的摩擦力减小,出现“滚珠效应”增加了自由水与砂浆的流动,从而提高了混凝土的流动性;此外,沙漠砂中含有的 SiO_2 和 Al_2O_3 具有一定的活性,在碱性环境下具有二次水解的潜力,并产生具有胶体性质的负离子基团,改善了浆体的黏稠度和流动性^[14];但沙漠砂表面干燥,具有较强的吸水性,当掺量过多时会形成水膜,使混凝土有成团现象,降低混凝土的流动性;当掺入30%时,对混凝土坍落度的改善达到最大。由图2(c)可知,钢渣与沙漠砂对混凝土的坍落度存在交互关系,

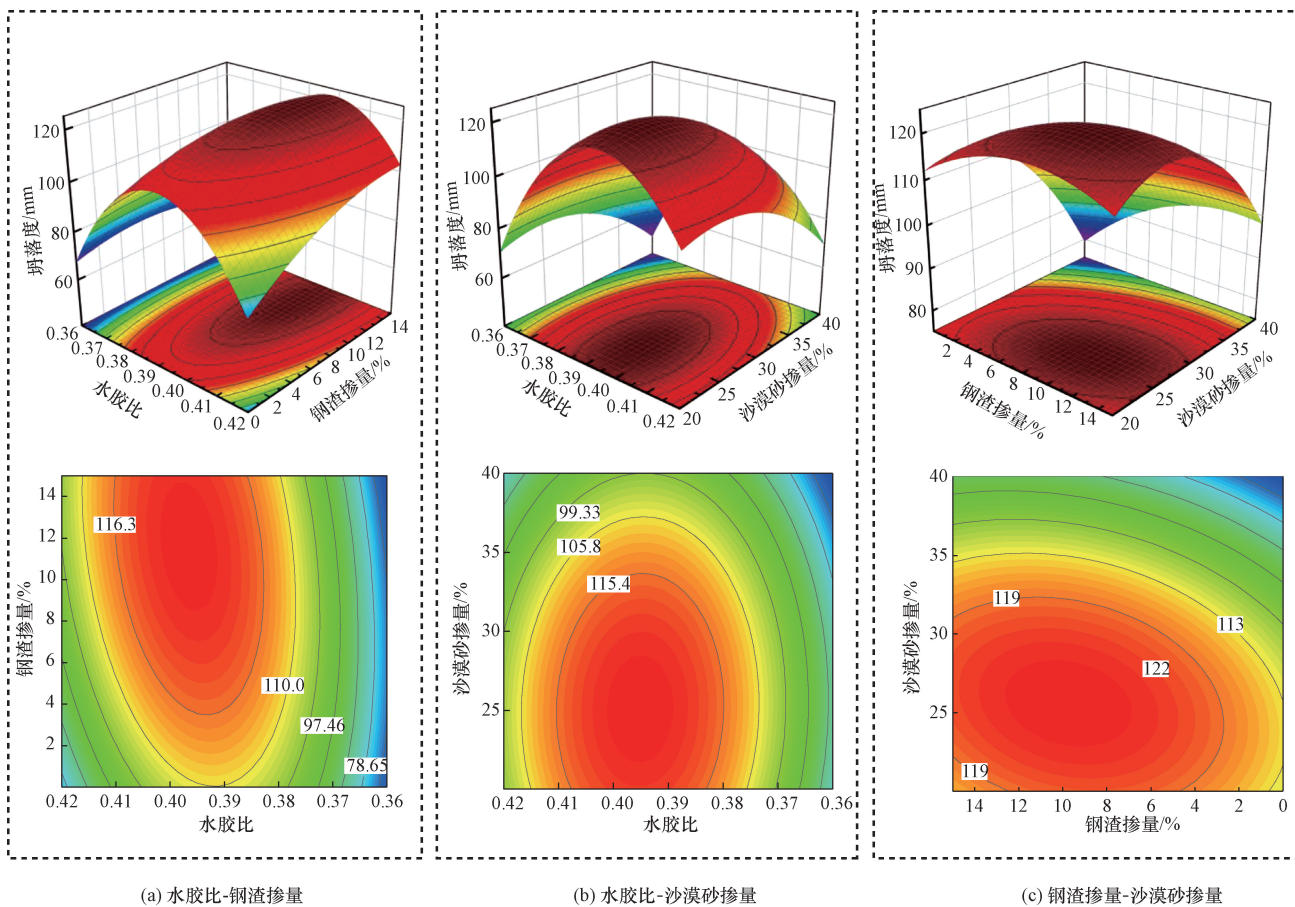


图2 坍落度响应曲线与等高图

Fig. 2 Slump response curve and contour map

钢渣的加入对不同沙漠砂掺量的混凝土坍落度都存在提高作用, 随着钢渣掺量的增加, 提升作用呈现先增加后减小的趋势。

综上所述, 沙漠砂掺量对混凝土坍落度的影响最大, 其次是水胶比, 最后是钢渣掺量。且钢渣掺入可以使 DSC 的坍落度得到改善; 钢渣形状不规则, 具有较多棱角^[15], 在与沙漠砂共同使用时, 能够很好地改善混凝土黏聚性, 提升其保水性, 增加混凝土的流动性。

2.3.2 抗压强度分析

图 3 显示抗压强度与水胶比、钢渣掺量、沙漠砂掺量 3D 曲面图与等高图。由图 3(a) 可知, 当沙漠砂掺量一定时, 其混凝土强度随着钢渣掺量的增加, 呈现减小的趋势; 水胶比为 0.36 时, 抗压强度随钢渣掺量增加从 67.72 MPa 降低到 53.40 MPa, 降低了 21%; 水胶比为 0.42 时, 抗压强度随钢渣掺量增加从 58.90 MPa 降低到 55.99 MPa, 降低了 5%; 表明水胶比越小钢渣掺量影响作用越明显。图 3(b) 展示了沙漠砂掺量与抗压强度的关系, 混凝土的抗压强度随着沙漠砂掺量的增加呈现先增加后减小的趋势, 掺量在 30% 左右时其抗压强度出现峰值, 沙漠砂适量的加入可以完善颗粒级配, 减小混凝土的孔隙率, 此外沙漠砂可以维持混凝土水化所

需要的碱性环境, 促进水泥水化^[16]; 掺量过大时, 会增加骨料的比表面积降低浆料厚度, 大量聚集在骨料附近, 浆体不能充分包裹骨料, 从而降低混凝土抗压强度^[16]。图 3(c) 描述了钢渣-沙漠砂掺量的交互影响作用, 可以看出沙漠砂可以缓解钢渣增加所带来的抗压强度的减小, 这表明钢渣与沙漠砂可以相互作用。综合来看, 在水胶比 0.36 ~ 0.42, 钢渣是影响混凝土抗压强度的主要因素, 钢渣中含有硅酸二钙、硅酸三钙、铁铝酸四钙等, 可以用来制备水泥, 但钢渣粉的活性较水泥活性较低^[17], 这在制备较高等级混凝土会放大其不利影响; 在与沙漠砂共同作用时, 可以得到部分改善。

2.3.3 劈裂抗拉分析

图 4 展示了劈裂抗拉强度与各因素的 3D 曲线和等高图。从图 4(a) 所示在各个水胶比下, 混凝土劈裂抗拉强度随着钢渣掺量的增加, 先增加后减小; 在钢渣掺量在 10% 时其劈裂抗拉强度最大。图 4(b) 展示了水胶比-沙漠砂掺量对混凝土抗拉强度的影响, 混凝土抗拉强度随沙漠砂掺量的增加, 呈现先增加后减小的趋势, 在 30% 其抗拉强度达到峰值; 结合图 4(a)、图 4(b) 来看, 水胶比的变化对抗拉强度影响显著, 当沙漠砂掺量一定, 钢渣掺量 0% 时, 随着水胶比的减小, 抗拉强度从 3.38 MPa 增加

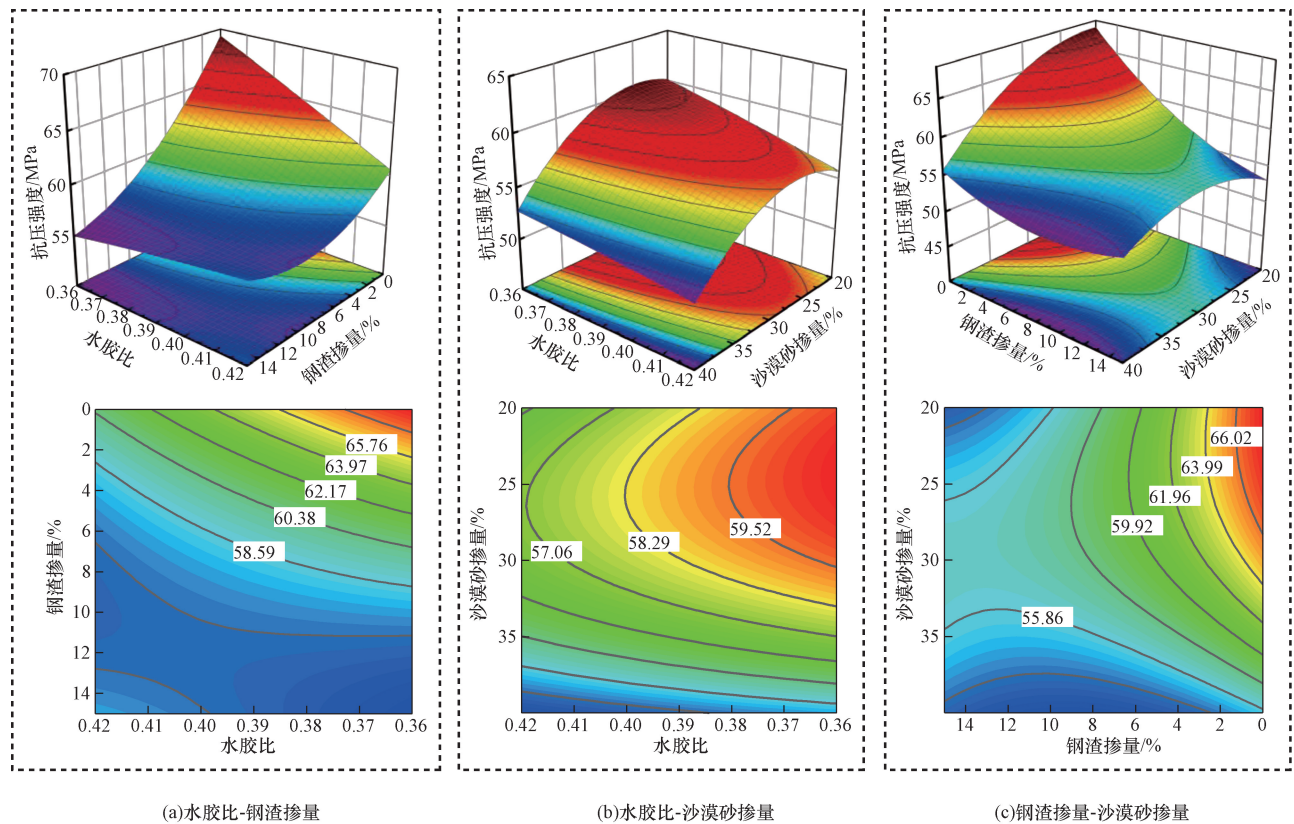


图 3 抗压强度响应面曲线与等高图

Fig. 3 Compressive strength response surface curve and contour map

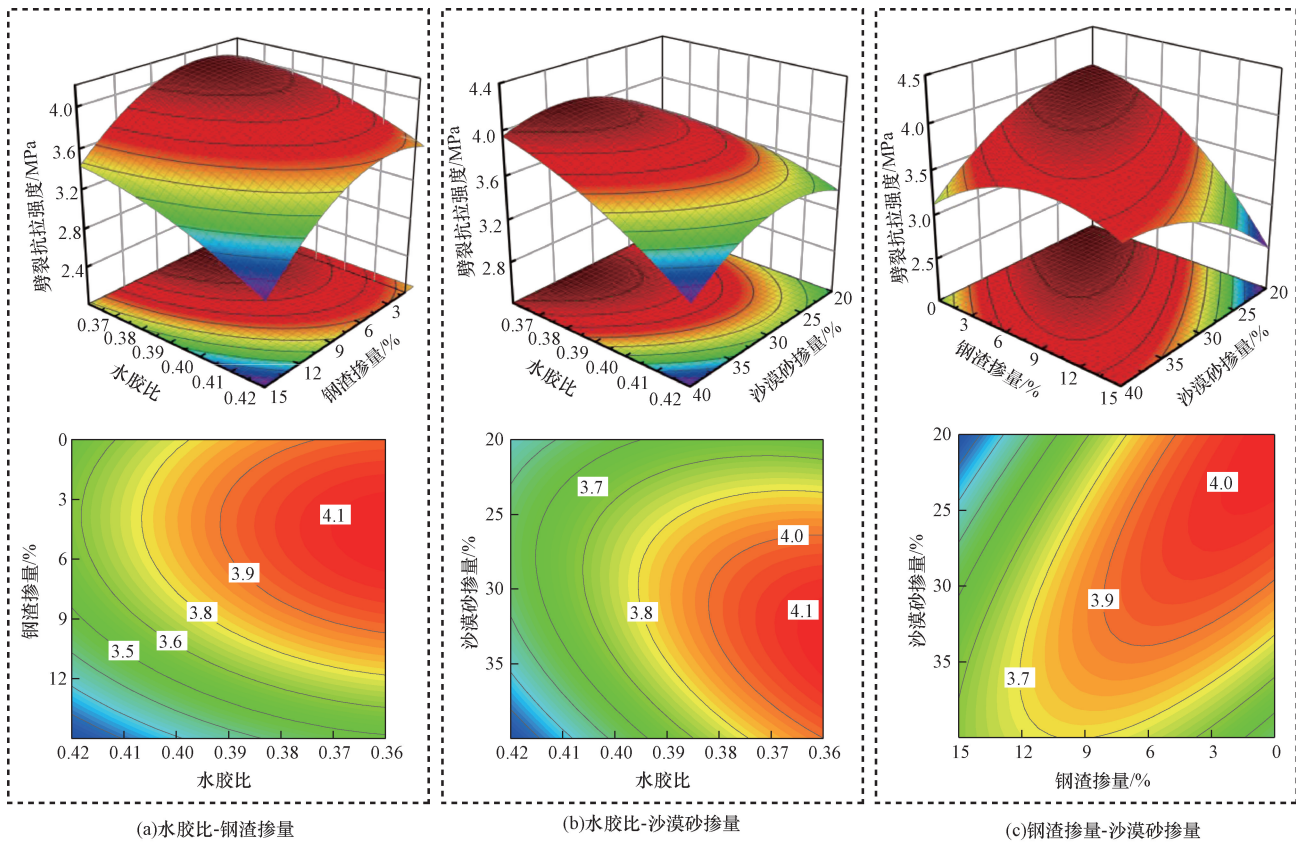


图4 劈裂抗拉强度响应曲面与等高图

Fig. 4 Response surface and contour map of splitting tensile strength

到 3.93 MPa, 增加 16.2%; 钢渣掺量为 15% 时, 随着水胶比的减小, 抗拉强度从 2.85 MPa 增加到 3.55 MPa, 增加了 24.5%; 在使用钢渣代替部分水泥时, 在水胶比较大时, 由于钢渣中含有其他不参与水化反应的物质^[18], 导致其反应物质进一步减少, 使加入钢渣后抗拉强度小于未加入钢渣。而当水胶比较小时, 其水化产物变多, 抗拉强度大幅度提高; 此外, 钢渣中大粒径物质可以充当细骨料的作用^[19], 填充孔隙, 也可以提高混凝土抗拉强度, 只是提升作用小于水泥水化。图 4(c) 所示钢渣在 0~10% 时, 混凝土抗拉强度随沙漠砂掺量的增加逐渐减小; 当钢渣掺量为 10%~15% 时, 混凝土抗拉强度随沙漠砂掺量的增加, 逐渐增大; 造成这一现象是大掺量的钢渣加入与沙漠砂形成的砂浆, 可以更好地包裹骨料, 在界面区形成更加密实的结构, 从而提高其抗拉强度。

综上所述, 影响混凝土抗拉强度的主要因素是水胶比, 其次是钢渣, 最后是沙漠砂掺量, 高掺量的钢渣可以在沙漠砂掺量增加时, 提高混凝土抗拉强度, 钢渣与沙漠砂掺量, 在对混凝土抗拉强度有着明显的交互作用。

2.4 配合比优化与验证

基于回归模型的多目标优化, 选取 Max 流动

性、抗压强度 49~55 MPa、Max 劈裂抗拉强度作为目标值, 以试验中水胶比、钢渣掺量、沙漠砂掺量作为变量。经过优化, DSC 配合比设计参数为水胶比 0.39、钢渣掺量 10%、沙漠砂掺量为 30%, 预测塌落度 118 mm、抗压强度 55 MPa、劈裂抗拉强度 3.83 MPa; 期望值为 91.3%, 预测可靠度高。为了验证优化后 DSC 配合比的准确性, 以预测配合比制备混凝土, 并测量其性能, 通过 3 组预测值与实际值差值的绝对值比预测值来计算平均误差, 如表 6 所示, 平均误差分别为 3.37%、1.7%、2.7%, 均小于 5%, 表明模型准确性高。

表 6 响应面优化预测值与试际值误差

Table 6 Error between predicted value and actual value of response surface optimization

项目	坍落度/mm	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
预测值	118	55	3.83
实际值-1	115	56.62	3.62
实际值-2	125	54.76	3.78
实际值-3	120	53.98	3.76
平均误差/%	3.370	1.70	2.70

3 DSC 配合比多目标优化

不同环境下对于混凝土性能要求不同, 使用

NSGA-II 算法进行多目标优化, 综合考虑坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度进行归类, 以便在不同情况下, 选择不同最优配合比。

NSGA-II 是一个用于多目标优化问题的经典算法。它是 NSGA 的改进版本, 旨在解决多目标优化中的非支配排序和多样性维持的问题。以 DSC 坍落度最大、抗压强度、劈裂抗拉强度最大, 为优化目标, 约束条件为

$$\begin{cases} \max(y_1, y_2, y_3) \\ x_i(\min) \leq x_i \leq x_i(\max) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: y_1, y_2, y_3 分别为坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度; x_i 为各种因素; $x_i(\min)$ 为因素可取的最小值; $x_i(\max)$ 为因素可取的最大值。利用 python 软件, 基于 NSGA-II 对式(4)求解。具体流程如图 5 所示。算法各运行参数设置如下: 种群个数为 100, 最大遗传代数为 400, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1。

图 6 展示了坍落度、抗压强度与劈裂抗拉强度的

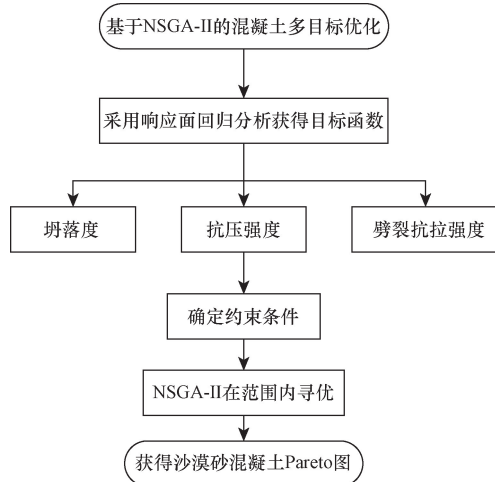


图 5 优化分析流程图

Fig. 5 Flow chart of optimization analysis

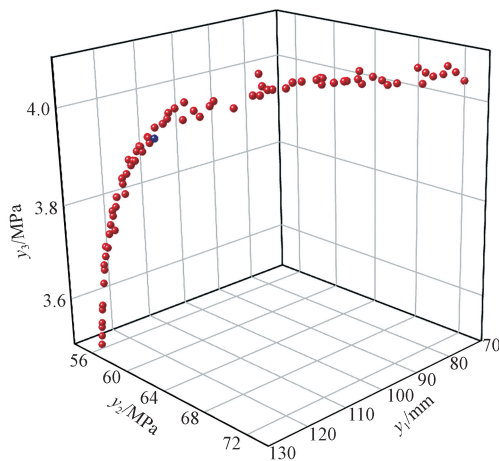


图 6 Pareto 最优前沿曲线

Fig. 6 Pareto optimal frontier curve

Pareto 三维多目标配合比优化图, 可从看出解集分布均匀, 曲线平整光滑, 说明优化结果好。DSC 的 3 个性能之间相互影响, 当坍落度逐渐增加时, 其抗压强度与劈裂抗拉强度逐渐减小; 其中抗压强度与抗拉强度呈现正相关, 即抗压强度增加时, 其 DSC 抗拉强度也随之增加。抗压强度从 56 MPa 增加到 60 MPa 时, 抗拉强度从 3.3 MPa 增加到 4.0 MPa, 坍落度从 130 mm 降 121 mm; 而抗压强度从 60 MPa 增加到 72 MPa, 其抗拉强度基本无变化, 其坍落度从 120 mm 降低到 70 mm。降低 40% 左右。因此, 考虑 DSC 的综合指标选取在抗压强度在 56 ~ 60 MPa 范围, 使混凝土综合性能最优。选取蓝色点位进行试验验证, 具体情况如表 7 所示, 可以看出误差小于 5%, 证明了 NSGA-II 对 DSC 多目标优化的精准性与可靠性。

表 7 多目标优化预测值与试实际值误差

Table 7 Error between predicted value and actual value of multi-objective optimization

项目	坍落度/ mm	抗压强度/ MPa	劈裂抗拉度 强/MPa
预测值	121.23	60.68	3.96
实际值	118.00	58.53	3.98
误差/%	2.70	3.50	0.50

4 结论

采用响应面来优化掺入钢渣的 DSC 配合比, 研究了水胶比、钢渣掺量、沙漠砂掺量对混凝土性能影响, 并使用 NSGA-II 对 DSC 进行多目标优化, 得到如下结论。

(1) 随着沙漠砂掺量增加, 混凝土的坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度呈现先增加后减小的趋势, 最优掺量在 30%; 随着钢渣掺量的增加, 会改善 DSC 的坍落度, 降低混凝土抗压强度, 对抗拉强度先提升后降低, 最优掺量在 10%。

(2) 钢渣加入可以提升 DSC 的坍落度, 且这种提升随着钢渣掺量增加先增加后减小; 在水胶比较小时钢渣的加入会大幅度降低 DSC 强度, 而对于较大水胶比, 这种减小不明显, 沙漠砂的掺入可以使这种减小得到部分改善; 高掺量的钢渣与沙漠砂共同作用提高混凝土抗拉强度, 钢渣与沙漠砂对混凝土抗拉强度的提升有明显的交互作用。

(3) 通过响应面分析得出 DSC 最优配合比为: 水胶比 0.39、钢渣掺量 10%、沙漠砂掺量 30%。

(4) 使用 NSGA-II 对 DSC 多目标优化时, 其预测值与试实际值接近, 表明优化可靠度与精准性较好, 可以对 DSC 的应用提供一种选择。

参 考 文 献

- [1] 刘超,林鑫,朱超,等. 风积沙应用于混凝土的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(4): 695-705.
Liu Chao, Lin Xin, Zhu Chao, et al. Aeolian sand is applied to the research progress of concrete [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(4): 695-705.
- [2] 冯倍森,秦拥军,黄东,等. 玄武岩纤维沙漠砂混凝土柱受压破坏研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14760-14768.
Feng Beisen, Qin Yongjun, Huang Dong, et al. Study on compressive failure of basalt fiber desert sand concrete columns[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(34): 14760-14768.
- [3] Shen Y J, Peng C, Hao J S, et al. High temperature resistance of desert sand concrete: strength change and intrinsic mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126948.
- [4] Yan W L, Wu G, Dong Z Q. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 469-482.
- [5] 维利思,申向东,刘倩,等. 不同风积沙混凝土强度的影响因素研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2933-2940, 2946.
Willis, Shen Xiangdong, Liu Qian, et al. Study on influencing factors of strength of concrete with different aeolian sand [J]. Bulletin of Silicate, 2019, 38(9): 2933-2940, 2946.
- [6] Abhijit W, Elavenil S. Strength and durability properties of waste steel slag mixed concrete[J]. Engineering Review, 2022, 42(1): 36-45.
- [7] 曹芙蓉,杨珍,王晨霞,等. 不同取代率下钢渣混凝土力学特性及耐久性研究[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(2): 181-187, 197.
Cao Fubo, Yang Zhen, Wang Chenxia, et al. Study on mechanical properties and durability of steel slag concrete with different substitution rates [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 41(2): 181-187, 197.
- [8] 程敬丽,郑敏,楼建晴. 常见的试验优化设计方法对比[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(7): 7-11.
Cheng Jingli, Zheng Min, Lou Jianqing. Comparison of common experimental optimization design methods [J]. Laboratory Research and Exploration, 2012, 31(7): 7-11.
- [9] 王慧斌,崔通,陈捷,等. 基于响应面法的机制砂路面混凝土配合比优化及其性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1878-1888.
Wang Huibin, Cui Tong, Chen Jie, et al. Study on mix ratio optimization and performance of machine-made sand pavement concrete based on response surface method [J]. Silicate Bulletin, 2024, 43(5): 1878-1888.
- [10] 黄志强,李峰,王耀强,等. 基于响应面法的透水混凝土配合比优化设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(5): 587-593.
Huang Zhiqiang, Li Feng, Wang Yaoqiang, et al. Optimal design of pervious concrete mix based on response surface method [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2023, 45(5): 587-593.
- [11] 刘方宁,吕梁胜,谭昱. 基于响应面法白色超高性能混凝土配合比研究[J]. 混凝土, 2023(7): 181-187.
Liu Fangning, Lü Liangsheng, Tan Yu. Study on mix ratio of white ultra-high performance concrete based on response surface method [J]. Concrete, 2023(7): 181-187.
- [12] 王鹏博,尹冠生,冯俊杰,等. 基于NSGA-II与熵权TOPSIS法的混杂纤维再生混凝土配合比多目标优化[J]. 硅酸盐通报, 2022, 9(12): 4189-4201.
Wang Pengbo, Yin Guansheng, Feng Junjie, et al. Multi-objective optimization of mix ratio of hybrid fiber recycled concrete based on NSGA-II and entropy weight TOPSIS method [J]. Silicate Bulletin, 2022, 9(12): 4189-4201.
- [13] Zhang Z, Guo Y, Tao Q. Dynamic multi-objective path-order planning research in nuclear power plant decommissioning based on NSGA-III[J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 199: 110369.
- [14] Luo F J, He L, Pan Z, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. Construction & Building Materials, 2013, 47(10): 131-137.
- [15] 靳晶,何文飞,李志强. 钢渣细度对混凝土耐久性能影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 75-80.
Jin Jing, He Wenfei, Li Zhiqiang. Study on effect of steel slag fineness on durability of concrete [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 75-80.
- [16] Li Y G, Zhang H M, Chen S J, et al. Influence of aeolian sand on capillary water absorption of concrete under freeze-thaw conditions [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2023, 17(1): 1-17.
- [17] 杨建伟. 钢渣和含钢渣的复合矿物掺合料对混凝土性能的影响[D]. 北京: 清华大学, 2013.
Yang Jianwei. Effects of steel slag and composite mineral admixtures containing steel slag on concrete properties [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [18] 彭琪雯. 工农业废弃物在混凝土中的资源化再利用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Peng Qiwen. Recycling of industrial and agricultural waste in concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [19] 唐咸远,马杰灵,罗杰,等. 钢渣微粉生态型超高性能混凝土力学性能影响因素分析[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 607-617.
Tang Xianyuan, Ma Jieling, Luo Jie, et al. Analysis of influencing factors on mechanical properties of eco-type ultra-high performance concrete with steel slag micro-powder [J]. Bulletin of Silicate, 2023, 42(2): 607-617.