

基于层次分析法分析的 C150 超高性能混凝土综合性能评价

Comprehensive Performance Evaluation of C150 Ultra High Performance Concrete based on Analytic Hierarchy Process

周立红, 侯鑫鑫, 王 硕

(中铁建物产科技有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 以 C150 超高性能混凝土配合比为例, 通过设计正交试验, 并使用 AHP 层次分析法, 同时设置权重获得各因素对 C150 综合性能影响大小, 研究了配合比中主要胶凝材料掺量对其抗压强度、流动性能及水化放热量 3 项性能综合指标的影响。结果表明: 对 C150 超高性能混凝土综合性能影响程度依次为粉煤灰 (0.35) > 偏高岭土 (0.29) > 硅灰 (0.20) > 水泥 (0.17), 最佳配合比为水泥用量 700 kg/m^3 、硅灰用量 200 kg/m^3 、偏高岭土用量 100 kg/m^3 、粉煤灰用量 150 kg/m^3 。研究成果对于 C150 超高性能混凝土配合比设计具有一定指导意义。

关键词: 超高性能混凝土; 层次分析法; 影响权重; 正交试验; 综合评价

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0035-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.008

ZHOU Lihong, HOU Xinxin, WANG Shuo

(China Railway Construction Materials Industry Technology Co., Ltd., Luoyang, 471000, China)

Abstract: Taking the mix proportion of C150 ultra-high performance concrete as an example, the influence of various factors on the comprehensive performance of C150 was obtained by designing orthogonal experiments and using the Analytic Hierarchy Process (AHP) with weights set. The influence of the main cementitious materials added in the mix proportion on the comprehensive indicators of its compressive strength, flow performance, and hydration heat release was studied. Research has shown that the comprehensive performance of C150 ultra-high performance concrete is affected by fly ash (0.35), metakaolin (0.29), silica fume (0.20), and cement (0.17) in the following order. The optimal mix ratio is 700 kg/m^3 of cement, 200 kg/m^3 of silica fume, 100 kg/m^3 of metakaolin, and 150 kg/m^3 of fly ash. The research results have certain guiding significance for the mix design of C150 ultra-high performance concrete.

Keywords: ultra high performance concrete; analytic hierarchy process; influence weight; orthogonal experiment; comprehensive evaluation

0 引言

随着混凝土结构的发展, 结构形式及用途对混凝土性能要求也越来越高, 超高性能混凝土混凝土

(UHPC) 应运而生, 如今 UHPC 广泛应用至桥面铺装、幕墙及军事领域中^[1-2]。超高性能混凝土配合比设计一般遵循最紧密堆积理论^[3], 采用改进的安德森模型对各种粒径原材料的比例进行计算, 为实现最紧密堆积, 促进水化反应, 通常加入硅灰、S105 矿粉、超细粉煤灰等掺合料, 例如黄伟^[4]系统性地研究了石灰石粉、F 级与 C 级粉煤灰、粒化高炉矿渣等矿物掺合料对 UHPC 性能的影响规律; 温得成等^[5]以残差平方和 (RSS) 作为堆积密实度指标, 通过研究 UHPC 水化产物特性发现最佳水胶比和硅灰

作者简介: 周立红 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 钢结构及超高性能混凝土材料研究工作。

收稿日期: 2023-04-27

材料科学

掺量可以促进水化反应。由于 UHPC 中材料类型较多且取材地点不同，所以需要在设计配合比的基础上进行大量试验才能确定最优佳配合比^[6]。

UHPC 原材料特点为胶凝材料用量大、水胶比低，这会导致 UHPC 浇筑后水化放热量大，混凝土内部温度迅速上升。尤其是大体积 UHPC 现浇施工，容易在水化早期产生温度裂缝，为避免出现该现象，UHPC 现浇施工多半采用冷却水管、加冰块法进行降温^[7-8]，同时掺外加剂和改变骨料级配等方法^[9-10]。但是胶凝材料作为水化放热源头，改变胶凝材料中各种材料掺量是降低水化热最直接有效方法之一^[11]。因此，通过正交试验和层次分析法，以 C150 超高性能混凝土配合比为例，研究配合比中主要胶凝材料用量与其强度、流动性、放热量间的关系，并对其进行综合性能评价。

1 试验原材料及方案

1.1 原材料

水泥采用南京小野田品牌 P·O 52.5 水泥；硅灰为甘肃三远硅材料有限公司生产，SiO₂ 含量在 95% 以上；偏高岭土使用河南焦作某矿业有限公司生产的高活性偏高岭土；粉煤灰使用河南焦作某矿业有限公司生产的 I 级粉煤灰，上述各材料的粒径分布如图 1 所示；砂采用连续级配的石英砂，粒径分布在 75~300 μm 之间；外加剂使用西卡公司生产的主要成分为聚羧酸高性能外加剂，粉状；钢纤维采用镀铜平直形钢纤维，直径 0.2 mm，长度 13 mm。

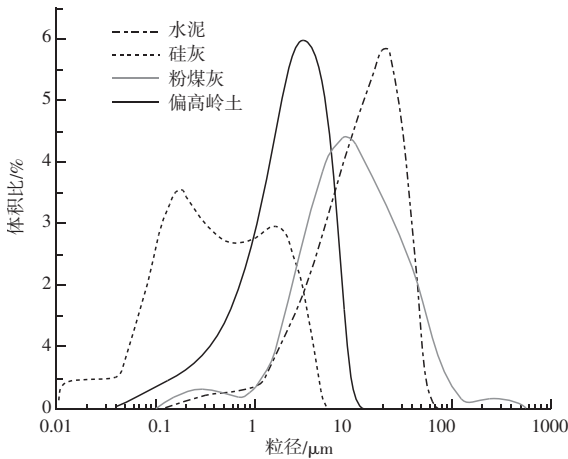


图 1 原材料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of raw materials

1.2 试验方案

为了探究主要材料掺量对 C150 超高性能混凝土综合性能的影响，在先前大量试配试验的基础上，水泥掺量控制在 700 kg/m³ 以上，硅灰掺量控制在 150 kg/m³ 以上，钢纤维掺量控制在 200 kg/m³，将水胶比控制在 0.19，外加剂掺量控制在总材料用量的 1.4%。为了研究水泥、硅灰、偏高岭土、粉煤灰各掺量对超高性能混凝土抗压强度、流动性及放热量的影响，采用 L₁₆ (4⁴) 正交试验的方法设计配合比。正交因素水平设计见表 1。

表 1 正交因素水平表
Table 1 Orthogonal design mix proportion / (kg/m³)

水平	因素			
	水泥 (A)	硅灰 (B)	偏高岭土 (C)	粉煤灰 (D)
1	650	100	0	0
2	700	150	50	50
3	750	200	100	100
4	800	250	150	150

用行星式搅拌机对 C150 原材料进行混合 5 min，加水后搅拌 15 min，最后撒入钢纤维再搅拌 5 min 出料。出料后立即进行扩展度测量。试件边长 100 mm 的立方体试件，成型试块在 24 h 后脱模，放入混凝土快速养护箱内进行养护，升温速率不大于 15 ℃/h，养护温度 90 ℃，养护时间 3 d，养护完成自然冷却至室温后进行抗压强度测试。

为了探究各种矿物掺合料对混凝土早期水化放热程度的影响，按照《水泥水化热测定方法》中直接法原理测量各配合比原材料在成型后 24 h 内的单位累计放热量，每组配合比进行 2 次试验，误差不大于 12 J·g⁻¹时取平均值 q_x。

1.3 层次分析法

层次分析法（即 AHP）是一种决策思维方法，是将所分析的问题层次化，根据达成的总目标将问题分为多项指标，每项指标受到不同因素的影响，每个因素下有不同的水平，通过 AHP 法对正交试验数据结果进行分析，得出各因素各水平对各指标及综合性能的影响程度。图 2 为 C150 超高性能混凝土的综合性能评价结构层次图。

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

由图 3 可知，各因素对各个指标的影响。对于扩

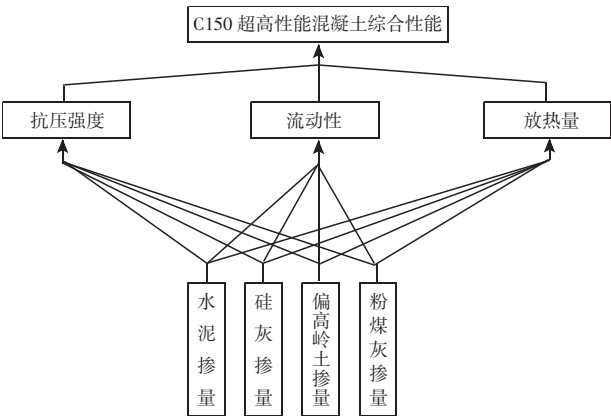


图2 C150超高性能混凝土综合性能评价结构层次图
Fig. 2 C150 ultra - high performance concrete comprehensive performance evaluation structure hierarchy diagram

展度，只有粉煤灰掺量与扩展度呈正相关，水泥掺量对扩展度影响不大，硅灰和偏高岭土掺量与扩展度呈负相关；对于抗压强度，发现随着4种材料掺量增加，抗压强度呈先上升后减少的规律，说明最佳掺量范围可获得较高的抗压强度；对于放热量，水泥及硅灰掺量与放热量呈正相关，偏高岭土和粉煤灰对放热量似乎影响不大。仅凭以上数据无法确定最佳组合，因此需要设置指标权重分析。

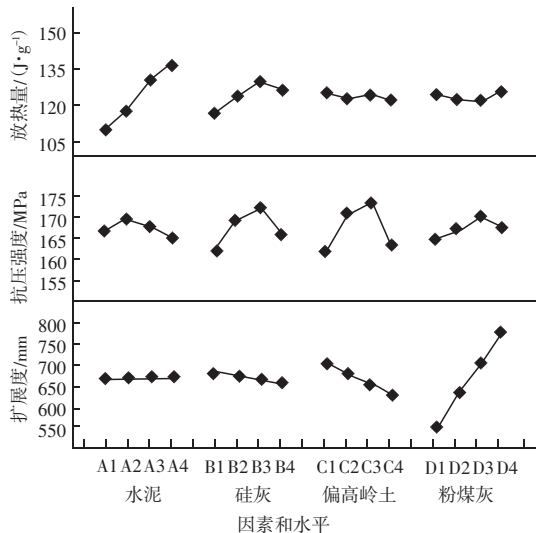


图3 试验结果
Fig. 3 Test results

2.2 指标权重分析

利用 AHP 法将复杂问题分解为多指标层次结构，可以确定各指标的主次顺序，客观全面体现样本数据信息。根据正交试验法，将抗压强度、扩展度、放热量作为指标，为了消除这3个指标单位量纲影响，采用极差变化法对试验数据做线性处理^[12]。对

于抗压强度和扩展度，则要求越大越好，而放热量则越小越好。当指标越大越好时，采用公式：

$$y_i = \frac{x_i - \min (x_i)}{\max (x_i) - \min (x_i)} \times 100 \tag{1}$$

当指标越小越好时，采用公式：

$$y_i = \frac{\max (x_i) - x_i}{\max (x_i) - \min (x_i)} \times 100 \tag{2}$$

式中： x_i 、 y_i 分别为指标的试验值和标准值； $\max (x_i)$ 、 $\min (x_i)$ 分别为 i 的最大值和最小值。按照 AHP 法确定指标权重的方法，将 C150 超高性能混凝土的抗压强度、扩展度、放热量3项性能指标分为3个层次，对于 C150 超高性能混凝土，考虑到抗压强度冗余系数越高，现场施工质量稳定性越高，因此抗压强度设为第一优先级；扩展度决定工作性能和 C150 超高性能混凝土自密实性能，可以增大外加剂掺量来调整流动性，因此扩展度设为第二优先级；放热量主要影响到冷却工艺及冷却设备功率，因此设为第三优先级，即抗压强度 > 扩展度 > 放热量。抗压强度与扩展度对比赋值2，抗压强度与放热量对比赋值5，扩展度与放热量对比赋值3。利用 Yaahp 12.1 软件计算得到这3个性能指标权重 ω 分别为 0.5813、0.3092、0.1096。（一致性比例因子 $0.0036 < 0.10$ ，权重系数有效），综合评价 = $0.5813 \times$ 抗压强度分值 + $0.3092 \times$ 扩展度分值 + $0.1096 \times$ 放热量分值。试验结果及评价分值见表2。

表2 试验结果及评价分值
Table 2 Test results and evaluation scores

编号	扩展度		抗压强度		放热量		综合评价
	实测值 /mm	分值	实测值 /MPa	分值	实测值 /($J \cdot g^{-1}$)	分值	
1	600	29.03	153.25	0	106	100.00	19.94
2	640	41.94	173.25	72.73	109	92.31	65.36
3	680	54.84	180.75	100.00	115	76.92	83.52
4	720	67.74	160.75	27.27	111	87.18	46.35
5	730	70.97	170.75	63.64	107	97.44	69.61
6	820	100.00	165.75	45.45	119	66.67	64.65
7	510	0	168.25	54.55	126	48.72	37.05
8	600	29.03	173.25	72.73	122	58.97	57.72
9	780	87.10	168.75	56.36	127	46.15	64.75
10	670	51.61	168.75	56.36	129	41.03	53.22
11	660	48.39	167.25	50.91	135	25.64	47.37
12	550	12.90	167.25	50.91	132	33.33	37.24
13	610	32.26	156.25	10.91	126	48.72	21.66
14	550	12.90	171.25	65.45	138	17.95	44.01
15	790	90.32	174.75	78.18	145	0	73.37
16	730	70.97	159.75	23.64	141	10.26	36.81

材料科学

2.3 因素权重分析及最优组合确定

利用 AHP 层次分析法对结果进行统计分析，得出每个因素下各水平对多指标的影响权重值，从而确定因素的主次顺序，因素和水平对指标影响权重 ω 计算公式为^[13]：

$$\omega = ASC^T$$

(3)

式中： A 为水平试验影响效应矩阵； S 为水平标准影响效应矩阵； C 为因素试验影响权重矩阵。权重计算结果见表 3。由表 3 可知，粉煤灰对扩展度影响最大，其次是偏高岭土，硅灰与水泥影响较小，4 个因素对扩展度影响权重为：粉煤灰（0.66）> 偏高岭土（0.22）> 硅灰量（0.09）> 水泥（0.03），说明粉煤灰对于超高性能混凝土流动性改善起较大作用；4 因素各水平中，影响最大的分别是 D4（粉煤灰掺量 150 kg/m³）、C1（偏高岭土掺量为 0）、B1（硅灰

掺量 100 kg/m³）、A4（水泥掺量 800 g/m³）。以此类推，对于抗压强度影响程度，偏高岭土（0.38）> 硅灰（0.33）> 粉煤灰（0.17）> 水泥（0.12），说明粒径较小的高活性矿物掺合料是提高超高性能混凝土的关键因素；4 因素各水平中，影响最大的分别为 C3（偏高岭土掺量 100 kg/m³）、B3（硅灰掺量 200 kg/m³）、D3（粉煤灰掺量 100 kg/m³）、A3（水泥掺量 750 kg/m³）。对于放热量影响权重为：水泥（0.59）> 硅灰（0.3）> 偏高岭土（0.05）= 粉煤灰（0.05），说明减少水泥掺量可以获得较低的水化放热量；4 因素各水平中，影响最大的分别为 A4（水泥掺量 800 /m³）、B3（硅灰掺量 200 kg/m³）、C3（偏高岭土掺量 100 kg/m³）、D4（粉煤灰掺量 150 kg/m³）。

表 3 各因素对各指标的权重分析表
Table 3 Weight analysis of various factors on various indicators

因素	水平	扩展度		抗压强度		放热量		综合评价	
		极差/mm	权重	极差/MPa	权重	极差/（J·g ⁻¹ ）	权重	极差/mm	权重
水泥（A）	650（1）	10	0.007 30	4. 0	0.031 16	27. 25	0.131 41	13. 295	0.043 71
	700（2）		0.007 35		0.031 62		0.141 24		0.046 52
	750（3）		0.007 35		0.031 34		0.155 85		0.041 15
	800（4）		0.007 41		0.030 88		0.163 89		0.035 72
硅灰（B）	100（1）	30	0.022 56	10. 5	0.079 46	13. 75	0.070 07	16. 338	0.043 92
	150（2）		0.022 22		0.083 13		0.074 43		0.056 72
	200（3）		0.021 89		0.084 60		0.078 34		0.060 24
	250（4）		0.021 56		0.080 93		0.076 08		0.044 46
偏高岭土（C）	0（1）	75	0.058 26	12. 0	0.090 39	2. 50	0.013 70	22. 930	0.059 13
	50（2）		0.056 18		0.095 99		0.013 48		0.086 04
	100（3）		0.054 11		0.097 11		0.013 72		0.087 58
	150（4）		0.052 04		0.091 51		0.013 45		0.055 45
粉煤灰（D）	0（1）	225	0.137 45	5. 5	0.042 26	2. 50	0.013 72	27. 720	0.057 03
	50（2）		0.156 11		0.042 90		0.013 45		0.079 25
	100（3）		0.174 77		0.043 67		0.013 45		0.100 31
	150（4）		0.193 43		0.043 03		0.013 72		0.102 77

从综合评价极差值看出，对综合性能影响最大的是粉煤灰、依次是偏高岭土、硅灰、水泥；4 因素各水平中，影响最大的分别是 D4（粉煤灰掺量 150 kg/m³）、C3（偏高岭土掺量 100 kg/m³）、B3（硅灰掺量 100 kg/m³）、A2（水泥掺量 700 kg/m³）。因此最佳水平应为 A2B3C3D4。

2.4 试验验证及最优组合确定

由于 A2B3C3D4 该组合并未出现在 16 组试验中，因此补充试验后得出结果，抗压强度 176 MPa，

扩展度 7801 mm，放热量 110 J·g⁻¹，综合评价 84.86 分。由于该组综合评价与第三组试验 A1B3C3D3 综合评价分值相差较小，可控制硅灰掺量与偏高岭土掺量不变，对水泥掺量和粉煤灰掺量在区间内进行二次优化，得到更优异的组合，试验过程不再赘述。

3 结论

针对 C150 超高性能混凝土配合比中主要材料掺量（水泥、硅灰、偏高岭土、粉煤灰）对其综合性

能（流动性（扩展度）、抗压强度和放热量）的影响程度，通过正交试验设计和 AHP 层次分析法，得出 4 个因素对指标的影响程度，结论如下：

（1）粉煤灰掺量对流动性影响较大，偏高岭土和硅灰掺量对抗压强度影响较大，水泥掺量对放热量影响最大。

（2）通过 AHP 层次分析法和权重分析，得出 4 个因素对 C150 超高性能混凝土综合评价影响权重依次为：粉煤灰（0.35）> 偏高岭土（0.29）> 硅灰（0.20）> 水泥（0.17），粉煤灰和偏高岭土对 C150 超高性能混凝土综合性能影响较大。通过权重比较获得了最优组合 A2B3C3D4（水泥掺量 700 kg/m³、硅灰掺量 200 kg/m³、偏高岭土掺量 100 kg/m³、粉煤灰掺量 150 kg/m³）。

针对 C150 这类原材料种类较多，材料掺量范围不确定的超高性能混凝土，通过正交试验和 AHP 层次分析法可以快速并准确的确定最优配合比，对后期设计具备各类特点的超高性能混凝土起指导作用。

参 考 文 献

- [1] 2021 年中国超高性能混凝土（UHPC）技术与应用发展报告（上）[J]. 混凝土世界, 2022, 152（2）: 24-33.
- [2] 魏久淇, 李磊, 王世合, 等. 超高性能混凝土临空板接触爆炸

破坏效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42（4）: 28-35.

- [3] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48（8）: 1145-1154.
- [4] 黄伟. 矿物掺合料对超高性能混凝土的水化及微结构形成的影响[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [5] 温得成, 魏定邦, 吴来帝, 等. 基于 MAA 模型的 UHPC 基体配合比设计和特性分析[J]. 建筑材料学报, 2022, 25（7）: 693-699, 743.
- [6] 叶庆阳, 薛聪聪, 余敏, 等. 超高性能混凝土配合比设计与抗压强度试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50（3）: 124-130, 141.
- [7] 汪平航. 大体积 UHPC 箱梁锚固块水化热监测及数值分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [8] 熊鲲, 吴小斌, 徐少波, 等. 大体积超高性能混凝土温控措施及施工监测[J]. 水泥工程, 2019, 189（3）: 86-89.
- [9] 何廷树, 申富强, 王福川, 等. 复合使用高效减水剂与缓凝剂对水泥水化历程的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007, 217（6）: 796-800.
- [10] 熊华飞. 一次性浇筑厚尺寸承台大体积混凝土温控防裂研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [11] 朱鹏飞. 大掺量矿物掺合料胶凝材料体系水化放热规律研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- [12] 刘竞妍, 张可, 王桂华. 综合评价中数据标准化方法比较研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36（6）: 84-85.
- [13] 郭穗勋, 黄榕波. 正交试验层次分析法[J]. 大学数学, 2004, 20（1）: 4.
- [12] 蒋亮. 钢渣氧化重构及重构钢渣的组成、结构与性能[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2018.
- [13] 刘满超. 矿山充填胶凝材料的研究及应用[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [14] 董培鑫. 鞍钢大型铁矿全尾砂胶凝材料和高浓度料浆流变特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [15] 张浩, 王林, 龙红明. 基于 XRD 与 FTIR 的碱钢渣胶凝材料复合激发机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38（7）: 2302-2306.
- [16] 刘轩, 崔孝伟, 倪文, 等. 钢渣粉对全固废混凝土强度的影响[J]. 金属矿山, 2016（10）: 189-192.
- [17] GAO T M, DAI T, SHEN L, et al. Benefits of Using Steel Slag in Cement Clinker Production for Environmental Conservation and Economic Revenue Generation[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 124538.

（上接第 29 页）

- 盐通报, 2020, 39（1）: 175-181.
- [6] 蒋亮, 吴婷, 马良富, 等. 改质转炉钢渣的易磨性研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37（12）: 4034-4039.
- [7] 李健生, 李家茂, 葛雪祥, 等. 早强型钢渣胶凝材料的制备与性能表征[J]. 安徽工业大学学报（自然科学版）, 2020, 37（4）: 321-326.
- [8] SINGH S K, VASHISTHA P. Development of newer composite cement through mechano-chemical activation of steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121147.
- [9] 王会刚, 彭彝, 岳昌盛, 等. 钢渣改性研究进展及展望[J]. 环境工程, 2020, 38（5）: 133-137, 106.
- [10] 赵计辉. 钢渣的粉磨/水化特征及其复合胶凝材料的组成与性能[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [11] 崔孝伟. 以钢铁行业固废为原料的高强高性能混凝土研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.