

# 风电混塔管片高强混凝土配合比设计优化

王庆海

(中交天津港湾工程研究院有限公司)

**摘要:**为解决高强混凝土黏度大、施工困难等问题,采用掺加超细复合矿物掺合料的方式对高强混凝土配合比进行优化。通过对比研究掺加矿渣粉、粉煤灰等传统掺合料与掺加硅灰、超细复合矿物掺合料2种高强混凝土的拌合物状态和力学性能,研究结果发现:硅灰等超细矿物掺合料能有效改善混凝土拌合物性能,提高混凝土强度;超细复合掺合料可以明显降低配合比中减水剂的用量。采用优化后的高强混凝土配合比进行风机混塔高强混凝土管片预制生产,可为东北严寒地区风电领域高强混凝土的应用提供参考。

**关键词:** 高强混凝土; 配合比设计优化; 超细复合矿物掺合料; 风电混塔

## 0 引言

按照 JGJ/T 281—2012《高强混凝土应用技术规程》定义,强度等级不低于 C60 的混凝土均属于高强混凝土,可有效缩小构件截面尺寸,减轻自重,具有较好的经济效益,在大跨度、高耸及高层建筑施工中发挥重要作用。通过优选原材料,充分发挥矿物掺合料和减水剂的改善作用,优化和优选配合比设计参数。张文海等<sup>[1]</sup>配制出了 C100 高强混凝土并在某重大工程中成功应用。周永等<sup>[2]</sup>采用超细矿渣粉和微硅粉两种高活性矿物掺合料以及高效减水剂“三掺”技术,通过对矿渣粉和微硅粉等掺合料用量优化及减水剂配方调整,配制出 C80 高强混凝土并在某高层建筑主塔楼成功应用。

高强混凝土因其胶凝材料用量大,水胶比低,容易出现混凝土黏度大,施工较为困难等问题。低水胶比导致的浆体中颗粒表面水膜层厚度减小是引起高强混凝土黏度大的最主要原因,可行的降黏措施主要从减水剂和掺合料两方面开展。侧链长度大且单体比例高的聚羧酸外加剂和掺入定量和合适颗粒级配的粉体材料均可明显降低低水胶比的黏度<sup>[3]</sup>。钱珊珊等<sup>[4]</sup>利用低分子量且在分子结构中引入憎水基团的异戊烯醇聚氧乙烯聚氧丙烯醚大单体,以马来酸酐为主要原材料,设计合成了一种能够降低高强混凝土黏度的聚羧酸系减水剂,能够改善高强混凝土的流变性能和工作性能。宋少民等<sup>[5]</sup>研究发现,掺加超细石灰石粉能明显降低高强混凝土拌合物的黏度且对各龄期强度没有影响。赵华磊等<sup>[6]</sup>研究了硅灰和矿粉掺合料体

系下分别掺加粉煤灰、超细石灰石粉、超细石英粉高强混凝土黏度变化,发现这3种矿物掺合料均可显著降低混凝土黏度且超细石灰粉与超细石英粉的降黏效果更加显著。

近年来随着风电行业风机塔架高度的增长,风力发电机组塔架的荷载也越来越大,传统的钢塔架已经无法满足结构受力的要求,高强混凝土混合塔筒技术成为市场的选择<sup>[7]</sup>。国内外研究机构对于风电领域中高强混凝土的应用研究较少,本文研究优化高强混凝土配合比并应用于东北严寒地区混塔管片的生产,可为后续相关研究应用提供参考。

## 1 工程概况

本文研究基于东北区域某风电工程,该工程位于黑龙江省北部区域,地处东北偏远地区,风力资源丰富,施工条件较好。风机塔架采用高强混凝土混塔塔筒,塔筒由 C80 高强混凝土预制管片进行拼装。共包含预应力混塔塔筒 48 根,共需预制 5 760 个预制单元,6 912 片管片。为能够大批量、高效率生产风电混塔管片,工程配套建设了自动化管片生产流水线,覆盖包含钢筋加工,模具加工,混凝土生产及养护等在内的混塔管片制作工艺全流程,并通过自动控制系统实现运转。

## 2 高强混凝土配合比设计及试验

### 2.1 混凝土原材料

水泥选用齐齐哈尔蒙西水泥有限公司生产的 P.O 52.5R 水泥,检测结果符合 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》标准要求。检测数据统计如表 1 所示。

表 1 水泥物理性能检测数据

| 检测项目 | 比表面积/<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 密度/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 烧失量/% | 凝结时间/min |     | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      |
|------|--|--|-------|----------|-----|----------|------|----------|------|
|      |  |  |       | 初凝       | 终凝  | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 检测结果 | 335  | 3.06                                       | 2.15  | 197      | 274 | 32.6     | 55.0 | 6.6      | 8.6  |

砂采用洁净的天然中砂，细度模数为 2.5；碎石采用岩石抗压强度为 120 MPa 的石灰岩反击破加工生产，使用 5~10 mm 与 10~20 mm 单粒级级配按照 2:8 比例掺配，符合 5~20 mm 连续级配碎石。使用 2 级配碎石能够提高碎石级配稳定性，

减小离析情况，进而保证混凝土和易性。砂石的碱活性测试结果显示两者均不含潜在碱活性物质。砂石各项指标符合 GB/T 14684—2022《建设用砂》、GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》标准要求，检测数据统计见表 2。

表 2 粗细骨料检测数据

| 检测项目 | 含泥量/% | 泥块含量/% | 表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 颗粒级配 | 针、片状含量/% | 压碎指标/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 有机物含量 | 碱活性/% |
|------|-------|--------|--|------|----------|--|-------|-------|
| 砂    | 1.1   | 0.3    | 2 560                                    | 合格   | —        | —  | 合格    | 0.06  |
| 碎石   | 0.5   | 0.1    | 2 690                                    | 合格   | 5        | 7  | 合格    | 0.07  |

矿渣粉、粉煤灰为混凝土常规掺合料，就地择优取材。矿渣粉选用齐齐哈尔蒙西水泥厂生产的 S95 级粒化高炉矿渣粉，其相关检测结果符合 GB/T 18046—2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》。粉煤灰选用哈尔滨晟福源生产的 F 类 I 级粉煤灰，其检测结果符合 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》标准要求。

硅灰选用本基工程技术(上海)有限公司销售的 928D 硅灰。硅灰检测结果均符合 GB/T 18736—2017《高强高性能混凝土用矿物外加剂》标

准要求。

复合矿物掺合料选用南京瑞迪高新技术有限公司生产的 HLC-HMA 型掺合料。该复合矿物掺合料含有平均粒径为 0.5~1.0  $\mu\text{m}$  的微硅粉，平均粒径为 2~5  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠，平均粒径为 10~15  $\mu\text{m}$  的磨细矿渣粉以及超分散剂，通过不同功能组分的合理配伍，发挥粒子尺寸效应、表面效应、滚珠轴承效应，能够降低混凝土的塑性黏度，有效提高混凝土的后期强度<sup>[8]</sup>。

各类掺和料检测结果见表 3。

表 3 掺合料检测结果

| 检测项目    | 细度/% | 需水量比/% | 烧失量/% | 比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 流动度比/% | 密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | $\text{SiO}_2$ 含量/% | 28 d 强度活性指数/% |
|---------|------|--------|-------|--|--------|--|---------------------|---------------|
| 矿渣粉     | —    | —      | 0.62  | 414  | 98     | 2.91                                   | —                   | 97            |
| 粉煤灰     | 6.1  | 92     | 1.94  | —  | —      | 2.38                                   | —                   | 74            |
| 硅灰      | —    | 125    | 2.15  | 18 426                                     | —      | —                                      | 92.93               | 115           |
| 复合矿物掺合料 | —    | —      | 3.34  | —  | 92     | —                                      | —                   | 105           |

减水剂选用南京瑞迪高新技术有限公司生产的 HLC-IX(B)型液体聚羧酸高性能减水剂，有超高的保塑作用，适用于高性能混凝土、高强混凝土。实测减水率为 29%，检测结果均符合 GB 8076—2008《混凝土外加剂》标准要求。

2.2 高强混凝土配合比设计

配合比设计按照 JGJ/T 281—2012《高强混凝土应用技术规程》进行。基准配合比确定胶凝材料总量为 590  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，掺合料总量为胶凝材料总量的 25%，砂率为 35%，水胶比为 0.22，外加剂的用量按照坍落度控制为(210±30) mm 进行调整。

优化试验确定选用的 C80 高强混凝土配合比

方案见表 4。

表 4 C80 高强混凝土配合比

| 配合比<br>方案 | 水泥  | 粉煤<br>灰 | 矿渣<br>粉 | 硅灰 | 复合矿物<br>掺合料 | 砂   | 碎石    | $\text{kg}/\text{m}^3$ |         |
|-----------|-----|---------|---------|----|-------------|-----|-------|------------------------|---------|
|           |     |         |         |    |             |     |       | 水                      | 减水<br>剂 |
| A1        | 440 | 41      | 109     | —  | —           | 609 | 1 131 | 130                    | 7.1     |
| A2        | 440 | 41      | 109     | —  | —           | 609 | 1 131 | 130                    | 7.7     |
| A3        | 440 | —       | 109     | 41 | —           | 609 | 1 131 | 130                    | 8.5     |
| A4        | 440 | —       | 60      | 90 | —           | 609 | 1 131 | 130                    | 8.8     |
| A5        | 440 | —       | 91      | —  | 59          | 609 | 1 131 | 130                    | 6.5     |
| A6        | 440 | —       | 91      | —  | 59          | 609 | 1 131 | 130                    | 6.8     |

A1 与 A2 采用 7%粉煤灰+18%矿渣粉双掺，A3 采用 7%硅灰+18%矿渣粉双掺，A4 在 A3 基础上提高硅灰掺量为 15%硅灰+10%矿渣粉双掺，A5

与 A6 为 10%复合矿物掺合料+15%矿渣粉双掺。

2.3 高强混凝土拌合物及力学试验

按照表 4 中配合比进行混凝土试配试验，参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试新拌混凝土坍落度及扩展度；新拌混凝土成型试件后表面覆盖湿布，以防水分蒸发，脱模后放置在饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 水养池内标准养护 3 d、7 d、14 d 和 28 d 后参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》测试抗压强度。

将抗压强度试件放入饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液中进行养护，保证养护温度、湿度更均匀稳定，可提高养护质量，减小因养护条件不均匀引起的抗压强度离散。养护期间按照标准每天检查养护池的水温 2 次。

使用电液伺服压力机进行抗压强度检测，检测前仔细检查系统设置，如加载速率、破型判断条件等。

3 试验结果分析

3.1 拌合物工作性能检测结果及分析

按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》对各配合比进行坍落度、扩展度试验，检测结果见表 5。

表 5 混凝土拌合物工作性能检测结果

| 配合比方案 | 坍落度/mm | 扩展度/mm | 工作性能描述                     |
|-------|--------|--------|----------------------------|
| A1    | —      | —      | 工作性能差，无坍落度，流动性差，包裹性差，混凝土抓底 |
| A2    | —      | —      | 工作性能差，无坍落度，流动性差，包裹性差，混凝土抓底 |
| A3    | 235    | 600    | 工作性能良好                     |
| A4    | 180    | 500    | 工作性能一般，包裹性差                |
| A5    | 210    | 400    | 工作性能良好                     |
| A6    | 225    | 450    | 工作性能良好                     |

由表 5 分析可知：

1) 粉煤灰+矿渣粉组合：A1 混凝土出机后无流动性，且存在混凝土抓底，干硬导致人工拌和困难，混凝土工作状态不能满足现场施工；A2 在 A1 基础上提高外加剂掺量后进行试验，混凝土工作性能依旧没有显著改善。

2) 硅灰+矿渣粉组合：A3 和 A4 在混凝土的工作性能上均状态良好，能够满足施工要求。配合比 A4 中将硅灰掺量提高至 15%，通过与 A3 数据结果对比，实测坍落度与扩展度均没有提高反而出现降低，而且出现混凝土有包裹性变差现象。说明过高的硅灰掺量并不能持续提高混凝土工作性能。

3) 复合矿物掺合料+矿渣粉组合：配合比 A5 及 A6 中使用复合矿物掺合料代替了硅灰，坍落度与扩展度都较高，扩展度相较于掺加硅灰的配比有所降低，但外加剂用量相比于掺加硅灰的配比明显降低。混凝土和易性良好，没有出现离析等现象，能够满足施工要求。

综上，粉煤灰+矿渣粉组合配合比混凝土工作性能不能满足施工要求，硅灰+矿渣粉组合、复合矿物掺合料+矿渣粉组合均能满足施工要求。说明硅灰与复合矿物掺合料均能够提高 C80 高强混凝土的工作性能，且复合矿物掺合料因其级配合理可填充各种材料之间的颗粒空隙，对提高混凝土拌合物的坍落度、扩展度、流动性及和易性的效果更为显著。

3.2 高强混凝土力学性能检测结果及分析

根据各配合比分别成型混凝土抗压试块，养护 3 d、7 d、14 d 和 28 d 后进行抗压强度试验。检测结果见表 6。

表 6 混凝土配合比抗压强度检测结果

| 配合比方案 | 3 d      |           | 7 d      |           | 14 d     |             | 28 d     |             |
|-------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-------------|
|       | 抗压强度/MPa | 设计强度百分比/% | 抗压强度/MPa | 设计强度百分比/% | 抗压强度/MPa | 达到设计强度百分比/% | 抗压强度/MPa | 达到设计强度百分比/% |
| A1    | 64.7     | 81        | 79.5     | 99        | 83.6     | 105         | 85.7     | 107         |
| A2    | 57.2     | 72        | 69.6     | 87        | 70.3     | 88          | 80.0     | 100         |
| A3    | 63.7     | 80        | 74.2     | 93        | 91.9     | 115         | 107.9    | 135         |
| A4    | 54.9     | 69        | 68.9     | 86        | 82.2     | 103         | 84.2     | 105         |
| A5    | 65.0     | 81        | 78.5     | 98        | 100.8    | 126         | 111.0    | 139         |
| A6    | 64.6     | 81        | 81.5     | 102       | 103.2    | 129         | 112.4    | 141         |

由表 6 分析可知：

1) 不同掺合料体系配合比的 3 d、7 d 抗压强

度分散性并不显著；高强混凝土的抗压强度早期增长较快，7 d 混凝土抗压强度基本达到了设计强

度等级的 90% 左右；采用复合矿物掺合料的配合比 A6 早期抗压强度发展较快，7 d 抗压强度已达到 81.5 MPa，达到设计强度等级的 102%。

2) 从不同掺合料体系配合比的 14 d 抗压强度差异显著，采用粉煤灰+矿渣粉组合的配合比 A1 和 A2 抗压强度在 7 d 后基本不再增长，且 28 d 强度比较低，分别为 85.7 MPa、80.0 MPa，最高仅有设计强度等级的 107%。

3) 硅灰+矿渣粉组合配合比中 A3 早期抗压强度增长比较平稳，28 d 抗压强度为 107.9 MPa，达到设计强度等级 135%；而提高硅灰掺量至 15% 的 A4 早期抗压强度与 A3 无显著差异，但 28 d 抗压强度明显降低，为 84.2 MPa，仅达到设计强度等级 105%。过高的硅灰掺量对混凝土和易性和强度均不利。

4) 复合矿物掺合料+矿渣粉组合配合比 A5 和 A6 早期抗压强度与硅灰+矿渣粉组合配合比 A3 无明显差别，但 28 d 抗压强度均有所提高，A6 的 28 d 抗压强度最高，为 112.4 MPa，达到设计强度等级的 141%。

根据 JGJ/T 281—2012《高强混凝土应用技术规程》中对配合比的要求，高强混凝土配制强度应满足  $f_{cu,0} \geq 1.15f_{cu,k}$  的要求，即配合比的 28 d 配制强度应不低于 92.0 MPa。所有组合配合比中，采用粉煤灰+矿渣粉组合的 A1 和 A2 配合比无法满足配制强度的要求；硅灰+矿渣粉组合配合比中 A4 配合比配制强度也无法满足规范要求，同组合 A3 配合比满足配制强度要求，且富裕强度充足；复合矿物掺合料+矿渣粉组合 A5 和 A6 配合比均满足配制强度要求，强度富裕较大。

#### 4 生产应用

1) 用于风电混塔工程的高强混凝土，掺加硅灰、复合矿物掺合料等后均能显著改善 C80 高强混凝土的工作性能，解决常规矿渣粉+粉煤灰组合混凝土黏度大的问题，保证混凝土顺利施工。

2) 掺加硅灰、复合矿物掺合料等能够显著提升高强混凝土 28 d 抗压强度，但硅灰掺量不宜超

过 10%，掺量过高会降低混凝土拌合物性能、力学性能以及配合比的经济性。

3) 按照配合比设计及优化试验结果，风电混塔管片预制工程采用硅灰+矿渣粉组合配合比 A3、复合矿物掺合料+矿渣粉组合配合比 A5 进行管片预制，生产过程中拌合物工作性能良好，混凝土强度均达到设计要求，成品外观质量良好。

#### 5 结语

本文结合相关工程实例，通过选择符合标准并适用于工程实际情况的原材料、分析影响高强混凝土和易性和强度的关键因素，对混凝土配合比进行设计优化等措施，配制出适用于东北区域风电设备制造、符合施工要求和强度要求的高强混凝土，可为今后高强混凝土在东北区域风电混塔管片的生产控制提供借鉴。

除了优选减水剂和掺合料外，也可选用球形度较高的骨料减小颗粒间摩擦力，或者掺入少量的优质引气剂，在混凝土中引入封闭微细孔起到滚珠作用以降低混凝土黏度。在后续研究中，将继续对影响高强混凝土拌合物性能和力学性能的因素进行分析，优化混凝土配合比，在保证混凝土质量的前提下提高高强混凝土的经济性。

#### 参考文献：

- [1] 张文海,贾会杰,崔志忱,等. C100 高强混凝土的配合比设计[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(6): 47-50.
- [2] 周永,黄友珍,周求林. 基于三掺技术的高强混凝土配合比优化设计[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11): 89-91.
- [3] 缪昌文,刘建忠. 应用高强混凝土应注意的几个问题[J]. 施工技术, 2013, 42(10): 1-5.
- [4] 钱珊珊,姚燕,王子明,等. 降低高强混凝土黏度的减水剂制备与机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(2): 2046-2051.
- [5] 宋少民,刘娟红. 超细石灰石粉对高强混凝土和易性与强度的影响[C]//中国硅酸盐学会 2010 年混凝土与水泥制品学术讨论会论文集. 2010: 289-296.
- [6] 赵华磊,张倩倩. 高强大流动度混凝土黏度影响因素研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(8): 21-23, 30.
- [7] 赵靓. 百米之上的进化[J]. 风能, 2022(1): 22-28.
- [8] 安徽瑞和新材料有限公司,南京瑞迪高新技术有限公司. 一种高强混凝土专用多功能掺合料组合物及其制备方法: CN202011130849.2[P]. 2021-01-05.