

风电混塔用高强混凝土 CF100 基础性能研究

牛子东

上海电气研砼（木垒）建筑科技有限公司，上海，200060；

摘要：从原材料特性出发，探究了原材料选型及配合比设计以及钢纤维体积掺量对 CF100 高强混凝土工作性能、力学性能以及耐久性的影响，并优选出配合比，进行投产应用。结果表明：通过材料优选和配合比优化设计，优选机制砂、花岗岩 5-20mm 连续级配碎石、I 级粉煤灰和硅灰以及微珠复掺取代部分水泥，钢纤维体积掺量 0.75%，配制出了具有优异工作性能、力学性能的 CF100 高强混凝土。

关键词：风电混塔；原材料选型；钢纤维；工作性；抗压强度；耐久性

DOI：10.69979/3029-2727.26.04.066

引言

世界格局与国际体系正在以前所未有的速度变化，能源领域加速演变，全球对气候变化的需求更为迫切。2023 年度，全球新增可再生能源装机量超 4.7 亿 kW，同比增长 13.9%，其中可再生能源新增装机占电力行业新增装机的 86%。全球清洁能源领域投资规模达 1.8 万亿美元，增速 18%，在可再生能源科技领域投资约 6380 亿美元。中国正在积极践行“30·60 双碳战略”，可再生能源装机量占全球装机量的 40%，同比增长 24.9%，其中风力发电装机量跃居我国第三大电源^[1]。

我国地幅辽阔，风力资源丰富，陆上 100m 高度风能资源技术可开发量超 34kW。2023 年，全国风电新增装机 7566 万 Kw，同比增长 101.6%，陆上风电仍是风电新增装机主体^[2]。陆上风电单机容量迭代迈入“高速时代”，单机容量不断刷新记录，目前陆上风电 8.5MW 机组已并网发电，其叶片长度超过 200m。塔筒是风力发电机组的重要组成部分，它下连基础、上支撑风电机和叶轮等主机部件，要求有足够的刚度和强度。随着多兆瓦级风电工程的发展，研发与大功率主机配套的超高高度（百米以上）新型塔架越来越受到关注。作为一种大刚度、高承载性能塔架结构，钢筋-混凝土组合塔筒（以下简称“混塔”）已成为风力发电机组优先选择的

塔架结构^[3]。

目前塔筒混凝土强度等级通常为 C60~C80，随着主机荷载和塔筒高度的不断提高，C80 混凝土已达现有钢筋混凝土结构设计规范的极限，再提高强度等级会造成更大的脆性，同时对原材料要求更为苛刻，质量控制难度急剧攀升，不仅不利于成本控制，反而会加剧质量风险隐患；尽管通过扩大塔筒直径或锥度可以满足结构计算，但是当叶片尺寸达到一定程度时不可避免的会出现“扫塔”风险^[4]。

鉴于此，本文基于混塔行业发展趋势和市场需求以及面临的钢塔和混塔发展技术瓶颈制约所提出，拟开展强度等级 100MPa 的钢纤维增韧混凝土（CF100）风电混塔用混凝土的开发与应用。通过对 CF100 混凝土的原材料选型、配合比设计、拌合物工作性以及强度等性能的研究，并针对风电混塔的生产工艺特点，开发出一种质量稳定的适用于混塔生产用混凝土。

1 原材料选型与配合比设计

1.1 原材料

依据 GB/T 14684-2022《建设用砂》，对不同厂家生产的机制砂进行压碎值、颗粒粒型、石粉流动度比等性能测试，结果如表 1 所示，优选样品 5 为试验用砂；

表 1 各石场机制砂检测数据

厂家	细度模数	片状颗粒含量%	石粉流动度%	石粉 MB 值	压碎值%	表观密度 kg/m ³	松散堆积密度 kg/m ³	空隙率%	需水量%
样品 1	2.7	5.8	105	0.3	20	2700	1710	37	114
样品 2	2.5	3.8	102	0.4	21	2720	1680	38	109
样品 3	2.5	3.6	106	0.4	25	2750	1680	39	107
样品 4	2.8	6.3	89	1.1	23	2720	1610	41	109
样品 5	2.7	2.1	108	0.3	10	2670	1560	41	107
样品 6	3.0	6.0	83	0.6	16	2600	1680	38	115

通过开展各石场生产的碎石性能检测及比对,探究不同破碎工艺对原材料性能的影响,本次比对研究采用GB/T 14685-2022《建设用卵石、碎石》、JG/T 568-2019《高性能混凝土用骨料》及JGT E42-2005《公路工程集

料试验规程》中的游标卡尺法,相关检测数据见表2。

选取青鹏花岗岩碎石,粒径5-20mm为试验用碎石,I类单粒级碎石,表观密度2720kg/m³,压碎指标5.5%,泥块含量0.1%,含泥量0.3%,针片状颗粒含量3.8%。

表2 各石场碎石检测数据

厂家	母岩强度 MPa	级配	针片状颗粒含量%	压碎值%	表观密度 kg/m ³	空隙率%	含泥量%	泥块含量%
育英	96	5-20 连续	8.1	12.2	2650	44	2.2	0.4
青鹏	143	5-20 连续	3.8	5.5	2720	42	0.3	0.1
航辉	101	5-20 连续	7.2	9.7	2650	43	0.4	0.2
穗展	88	5-20 连续	6.6	13.1	2620	43	0.5	0.2
鼎格	91	5-20 连续	6.4	13.3	2670	44	0.5	0.1

胶凝材料:水泥应符合GB 175-2023《通用硅酸盐水泥》及相关标准规定,采用湖北天瑞水泥有限公司生

产的P·O 52.5级水泥。

表3 水泥基本性能指标

名称	标准稠度用水量(%)	凝结时间(min)		抗压强度(MPa)		抗折强度(MPa)	
		初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
水泥	27.7	175	225	37.6	58.4	6.3	8.5

矿粉应符合GB/T 18046-2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》及相关标准规定,采用徐州科建环保有限公司S95级矿粉,流动度比99%,28d活性指数101%。

钢纤维购自赣州大业,直径0.20mm、长度13mm、长径比65、直线形、抗拉强度2000MPa以上、弹性模量210GPa。

粉煤灰应符合GB/T 1596-2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》及相关标准规定,采用国能徐州发电有限公司生产的F·I级粉煤灰,细度10.5%,需水量比93%,28d活性指数87%;

外加剂应符合GB 8076-2023《混凝土外加剂》及相关标准规定,采用上海应诺施建材有限公司生产的聚羧酸高性能减水剂,含固量30%,混凝土减水率28.6%。

硅灰应符合GB/T 27690-2023《砂浆和混凝土用硅灰》及相关标准规定,采用北京江汉科技有限公司生产的SF-90硅灰,SiO₂含量93%,比表面积19431m²/kg,活性指数115%。

1.2 配合比

配合比设计应符合JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》、JGJ/T 281-2012《高强混凝土应用技术规程》及相关标准规定;混塔混凝土设计的强度等级为CF100,其中砂为机制砂,碎石为5-20mm连续级配,具体配合比见表1。

微珠应符合JG/T486-2015《混凝土用复合掺合料》及相关标准规定,采用北京江汉科技有限公司生产的uffa2.0微珠,烧矢量2.2%,需水量比98%,细度(45um筛余)11.1%。

混凝土其配合比见表5,其中C100-1、CF100-2、CF100-3、CF100-4、CF100-5为不同钢纤维体积掺量(0.0%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%)。

表4 混塔用混凝土配合比 kg/m³

编号	水泥	矿粉	粉煤灰	硅灰	微珠	钢纤维	砂	碎石	外加剂	水
C100-1	420	120	60	30	40	0	820	880	5.40	145
CF100-2	420	120	60	30	40	20	820	880	5.40	145
CF100-3	420	120	60	30	40	40	820	880	5.40	145
CF100-4	420	120	60	30	40	60	820	880	5.40	145
CF100-5	420	120	60	30	40	80	820	880	5.40	145

1.3 试验方法

依据混塔混凝土混凝土浇筑特点,其混凝土工作性需近似自密实混凝土,因此依据GB/T 50080-2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》和JGJ/T 283-2012《自密实混凝土应用技术规程》测试拌合物性能;依据

GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》测试100*100*100mm试件28d抗压强度;依据GB/T 50082-2024《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》测试耐久性。

2 结果与分析

2.1 混凝土工作性研究

本试验各组拌合物的工作性测试结果见图1。由图1可知，随着钢纤维掺量从0增至1.0%，拌合物的30s扩展度、T500分别从650mm和5s降至570mm和14s，说明掺入钢纤维降低了混凝土的工作性。是因为钢纤维在混凝土中形成网状结构，阻碍了混凝土的流动，导致拌合料变得更加黏稠，难以浇筑和振捣。同时增加摩擦力，钢纤维的表面粗糙，与水泥浆体和骨料之间的摩擦力较大。当掺量增大时，这些摩擦力的总和也会增加，进一步降低了混凝土的工作性。另一方面影响水泥浆体的包裹，大量的钢纤维需要更多的水泥浆体来包裹，以确保纤维与基体之间的粘结力。然而，在一定的水泥用量下，过多的钢纤维会导致水泥浆体相对不足，无法充分包裹纤维，从而影响混凝土的和易性。随着钢纤维掺量的增加，其需要更多的浆体包裹才能有效保证其与基体间的黏结^[5]。

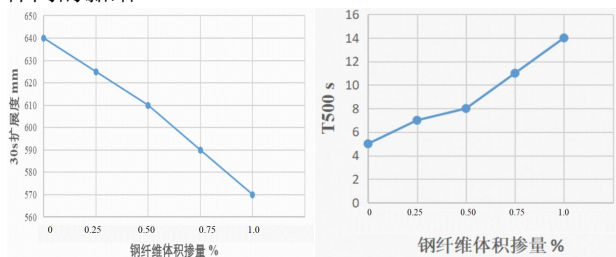


图1 CF100混凝土工作性

2.2 混凝土力学性能研究

图2为C100混凝土7d和28d抗压强度，从图中可以看出随着钢纤维体积掺量的增加从0%增加至1.0%，其抗压强度随之增大，28d抗压强度由92.3MPa增长到123.0MPa，增长了33%，这是因为钢纤维在混凝土中起到了增强和阻裂的作用，钢纤维与混凝土基体之间的界面粘结力较强，钢纤维的掺入可以增加混凝土的整体性，当混凝土受到外力作用时，钢纤维可以有效地传递应力，阻止裂缝迅速发展和贯通，使得混凝土能够承受更大的

荷载，表现出更高的强度和韧性^[5]。未掺加钢纤维的C100-1配合比其强度未能满足设计强度要求（≥115MPa），随着钢纤维掺量的增加由0.5%增加至1.0%，其28d强度仅增加了5MPa，强度未明显增强。这是因为过高的钢纤维掺量在混凝土基体中分散不均匀，导致部分区域纤维含量过高聚团，而其他区域纤维含量过低，从而影响整体的增强效果，因此选取钢纤维体积掺量为0.75%。

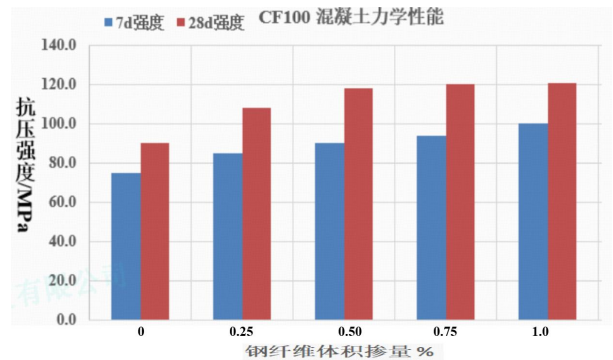


图2 混凝土抗压强度

2.3 混凝土耐久性能研究

选择C100-1（0%钢纤维）、CF100-2（0.25%钢纤维）、CF100-3（0.5%钢纤维）、CF100-4（0.75%钢纤维）配合比进行混凝土平板开裂试验，试验结果如表5所示。随着钢纤维掺量的增加，试件的开裂程度显著降低，甚至完全抑制开裂^[6]。C100-1仅1条裂缝，但长度达600mm、最大宽度2.14mm，开裂面积和总开裂面积都较大（单条开裂面积642mm²，总开裂面积1348mm²/m²），表现为“少而宽”的集中开裂；CF100-2出现裂缝数量增加，但单条裂缝长度缩短、最大宽度大幅减小，单条开裂面积从642mm²降至197mm²，总开裂面积从1348mm²/m²降至1221mm²/m²，呈现“多而细”的分散开裂，开裂程度明显减轻；CF100-3和CF100-4其裂缝数量、长度、宽度均为0，表明钢纤维抑制了早期开裂。

表5 试验结果

名称	裂缝数量	裂缝长度/mm	裂缝最大宽度/mm	开裂面积(mm ² /条)	裂缝数目(条/m ²)	总开裂面积(mm ² /m ²)
C100-1	1	600	2.14	642	2.1	1348
CF100-2	3	600	1.37	197	6.2	1221
CF100-3	0	0	0.00	0	0	0
CF100-4	0	0	0.00	0	0	0

基于上述研究，选择0.75%的钢纤维体积掺量（CF100-3），进行混凝土早期收缩及干燥收缩测试。发现采取JTG 3420公路法标准测试混凝土其72h收缩率为844με，采取GB/T 50082标准测试其72h收缩率

为849με，两者结果高度一致，表明在该配合比下，不同测试标准对早期收缩的表征结果稳定性较好。对该配合比进行干燥收缩测试，其3d收缩率为150με，7d收缩率为190.5με，14d收缩率为218.5με，28d收缩率

为 277.2 $\mu\epsilon$, 45d 收缩率为 333.4 $\mu\epsilon$ 。干燥收缩源于混凝土内部水分向环境蒸发导致的体积收缩, 随龄期延长, 水分持续流失, 收缩累积增大。早期收缩较大, 因早期材料内部孔隙水丰富, 表面水分蒸发速率快; 随着时间推进增量放缓, 可能因表层已形成一定干燥硬化层, 阻碍内部水分迁移; 然后时间进一步发展, 收缩率再次速率降低, 其早龄期收缩相较于常规混凝土常见范围 (通常早龄期自收缩可达 1000~3000 $\mu\epsilon$), 说明 0.75% 钢纤维体积掺量下可降低其早期收缩。

3 结论

(1) 配置高强混凝土, 对细集料性能要求极高, 应选取 I 类砂, 且砂的压碎值应可能低; 粗骨料应选取整形类碎石, 保证针片状含量小于 7%, 且母岩强度满足设计强度的 1.5 倍, 为满足设计要求需选取花岗岩 5-20mm 连续级配碎石;

(2) 随着钢纤维掺量的增加, 混凝土的工作性呈降低趋势, 达到一定掺量后其强度未明显增强, 推荐钢纤维最佳掺量为 0.75%。

(3) 在 0.75% 钢纤维体积掺量下, 混凝土的收缩性能表现优异。随着钢纤维掺量的增加, 试件的开裂程

度显著降低, 甚至完全抑制开裂。早龄期收缩经两种标准测试结果高度一致, 干燥收缩随龄期持续增长且 45d 收缩率仅为 333.4 $\mu\epsilon$, 较于常规混凝土显著降低。

参考文献

- [1] 中国风电产业发展报告 (2023) [J]. 电气时代, 2023(05): 14-19.
- [2] 吕萍, 石耀鹏. 中国风电产业进入市场化高质量发展阶段 [J]. 风能, 2023(05): 72-76.
- [3] 王经亚. 陆上风电塔筒产品发展趋势探析 [J]. 中国设备工程, 2022(10): 223-226.
- [4] 张后禅. 风电混塔行业技术发展现状及标准体系分析 [J]. 能源, 2023, (7): 61-67
- [5] 卢佳林, 牛子东, 蓝国平, 刘东, 王子杰, 兰聪. 钢纤维自密实混凝土的工作性、力学及耐久性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (1): 56-59
- [6] 刘加平, 田倩. 现代混凝土早期变形与收缩裂缝控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2020, 2.

作者简介: 牛子东 (1997-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事混凝土材料研发。