

# 超高性能混凝土室内实验拌合设备性能研究

付博音<sup>1</sup>, 刘锦成<sup>2</sup>, 张荣华<sup>1</sup>, 牛腾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东高速建设管理集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东高速工程检测有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2024年5月4日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

超高性能混凝土(UHPC)具有高强、高韧及高耐久性能,在桥面铺装、建筑结构等领域有着广泛的应用,能够满足现代建筑结构不断向超重载、轻量化等方向发展的需求。目前,工程中使用的UHPC材料拌合设备种类较多,而在实验室做性能测试时采用的拌合设备一般为单卧轴强制式搅拌机,与工程实际使用的拌合设备有所差异。本文结合工程实际,分别采用小型的振动搅拌机、行星搅拌机与单卧轴搅拌机来研究UHPC材料的拌合性能,通过比较拌合时间与能耗、UHPC材料扩展度、含气量以及力学性能,综合分析了不同搅拌设备的搅拌效率。通过研究发现,三种搅拌机都能够满足UHPC材料的拌合工作,振动搅拌机和行星搅拌机与单卧轴搅拌机相比,都能够提升UHPC材料的实验室拌合效果,其中行星搅拌机的拌合效果最佳。

## 关键词

UHPC, 拌合设备, 振动搅拌机, 行星搅拌机

# Research on the Performance of Experimental Mixing Equipment for Ultra-High Performance Concrete

Boyin Fu<sup>1</sup>, Jincheng Liu<sup>2</sup>, Ronghua Zhang<sup>1</sup>, Teng Niu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Hi-Speed Construction Management Group Co., Ltd., Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Hi-Speed Engineering Test Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: May 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) has the properties of high strength, high toughness and

high durability, and has a wide range of applications in the fields of bridge decking, building structures, etc., which can satisfy the needs of modern building structures that are constantly developing in the direction of ultra-heavy loads and lightweighting, etc. Currently, there are more types of mixing equipment for UHPC materials used in the project, but the mixing equipment used for performance testing in the laboratory is generally a single horizontal shaft forced mixer, which differs from the mixing equipment actually used in the engineering. This paper combines with the actual project, using small vibratory mixer, planetary mixer and single horizontal axis mixer respectively to study the mixing performance of UHPC, by comparing the mixing time and energy consumption, the extensibility of UHPC materials, air content and mechanical properties, and comprehensively analyzes the mixing efficiency of different mixing equipment. It is found that the three kinds of mixers are able to meet the mixing of UHPC materials, vibratory mixers and planetary mixers are both able to improve the laboratory mixing of UHPC materials compared to single horizontal axis mixers, with planetary mixers providing the best results.

## Keywords

UHPC, Mixing Equipment, Vibratory Mixers, Planetary Mixers

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

超高性能混凝土(UHPC)具有高强、高韧、高耐久的性能,满足现代建筑结构不断向超重载、超大跨、轻量化等方向发展的需求,在桥梁桥面铺装、预制结构件、异型建筑物等领域有着广泛的应用,对建筑结构本身受力性能改善和耐久性方面都有着极大的提高[1] [2]。

UHPC 工程应用中所使用的搅拌设备主要有双卧轴搅拌机、振动搅拌机以及立轴行星搅拌机等[3];而在实验室对 UHPC 性能检测中,用得较多的拌合设备是普通混凝土拌合使用的强制式单卧轴搅拌机。GB/T 31385-2015《活性粉末混凝土》最早规定了 UHPC 材料的拌合设备采用强制式搅拌机[4]; T/CBMF 37-2018 T/CCPA-2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》规定了搅拌设备可用变速、定速强制搅拌、逆流式、振动式搅拌机等,并对拌合顺序及时间进行了规定[5]; T/CECS 10107-2020《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》规定了采用强制式搅拌机对 UHPC 进行拌合,规定了拌合的顺序及时间的同时,说明搅拌方式应根据产品特点和实际情况进行调整[6];以上规范只是规定了 UHPC 材料的拌合设备采用强制式搅拌机,并未根据不同搅拌设备性能对搅拌方式进行区分。

本文从实际工程应用的卧轴搅拌机、振动搅拌机以及行星搅拌机出发,采用对应的实验室拌合设备,对 UHPC 材料的拌合时间、工作性能、含气率以及力学性能进行了比较研究,总结了各个拌合设备对 UHPC 材料性能的影响。

## 2. 原材料及设备和方法

### 2.1. UHPC 原材料及配合比

1) UHPC 预混料:包含水泥、硅灰、微珠、石英砂、外加剂等;由山东高速工程咨询集团有限公司新材料研究中心提供。

2) 减水剂: UHPC 专用聚羧酸减水剂, 减水率约 50%, 乳白色液体; 由山东高速工程咨询集团有限公司新材料研究中心提供。

3) 钢纤维: 0.2~13 mm, 抗拉强度不低于 2800 MPa, 弹性模量不低于 190 GPa, 密度 7.8 g/cm<sup>3</sup>; 由山东高速工程咨询集团有限公司新材料研究中心提供。

4) UHPC 材料配合比。

## 2.2. UHPC 拌合设备

本试验所用的拌合设备包括针对普通混凝土试验用的 60 L 单卧轴搅拌机、60 L 的振动搅拌机和 60 L 的立轴行星搅拌机, 表 1 标明了各搅拌机的性能参数。

**Table 1.** Comparison of three kinds of mixer performance parameters

**表 1.** 三种搅拌机性能参数对比

性能参数	单卧轴搅拌机	振动搅拌机	立轴行星搅拌机
规格	60 L	60 L	60 L
构造形式	单卧轴	双卧轴	行星式
搅拌速率	48 r/min	55 r/min	40 r/min
功率	2.2 KW	4 KW	3 KW
振动强度	/	3~5 g	/
工作原理 <sup>[7]</sup>	在搅拌叶片的驱动下强迫物料进行挤压和搓动, 同时叶片对物料产生阻挡作用进一步加剧搅拌能力。	混合料在两根搅拌轴之间存在相互剪切运动, 使物料得到充分搅拌。同时两搅拌装置边搅拌边振动, 加强了搅拌效果, 提高了混合料微观匀质性。	形成上下左右的立体运动, 形成的剪切、穿插、对流、揉搓作用显著, 对均匀度的形成做到快速、高质。

## 2.3. 试样制备及性能检测

1) 拌合物性能测试: 按照 UHPC 配合比将预混料倒入搅拌机中拌合 1 min, 然后将混合均匀的水与减水剂在搅拌状态下慢慢倒入搅拌机中继续搅拌, 直到出现均匀稳定的浆体, 加入钢纤维, 继续搅拌均匀后将 UHPC 浆料倒出。参照规范 GB/T 50080-2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测量 UHPC 拌合物扩展度和含气率。

2) 成型与养护: 于 100 mm × 100 mm × 100 mm、100 mm × 100 mm × 400 mm 模具中成型, 成型室温度应保持在 20℃ ± 2℃, 相对湿度应不低于 50%, 一天后拆模; 将拆模后的试件放入混凝土标准养护室进行养护至规定龄期, 温度 20℃ ± 2℃, 湿度大于 95%。

3) 力学性能测试: 按照 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》对经过养护后的试件进行力学性能测试。

## 3. 试验结果与讨论

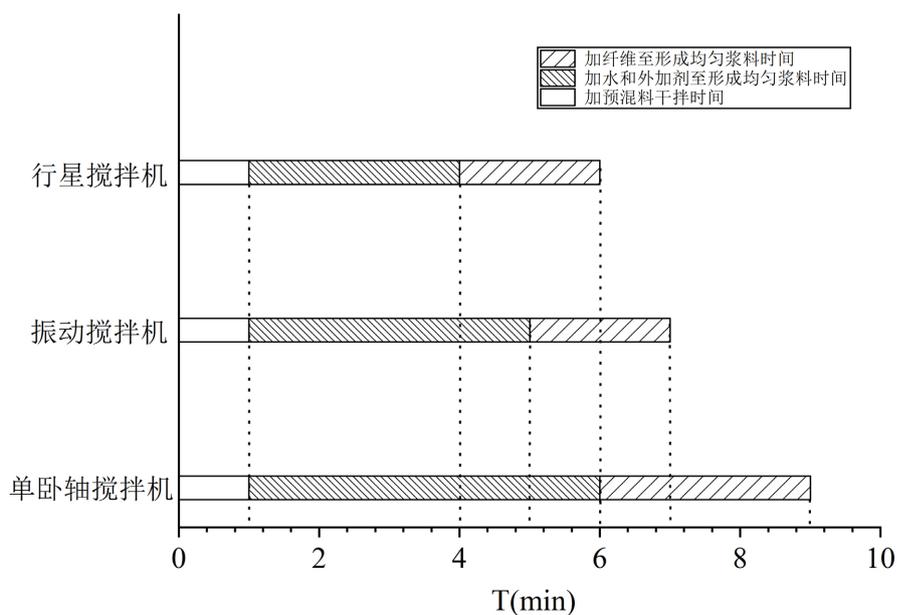
本文采用统一的 UHPC 原材料配合比, 按照表 2 称取 25 L 的 UHPC 预混料、减水剂、水和钢纤维, 采用统一的加料顺序, 得到均匀稳定的 UHPC 浆料。对整个拌合各阶段时间进行统计, 测试浆料的工作性和含气率, 成型养护后, 对 UHPC 材料的抗压抗折强度进行测试。

**Table 2.** Mixing ratio of UHPC  
**表 2.** UHPC 配合比

预混料	减水剂	水	钢纤维
2140	28	165	184

### 3.1. 拌合时间与能耗对比分析

本文中 UHPC 的拌合时间是指从开始加料到某种 UHPC 状态所消耗的时间。对每种拌合机各阶段的搅拌时间进行统计和比较,结果如图 1 所示。分析发现,三种搅拌机都可以完成 UHPC 材料的拌合试验,行星搅拌机的拌合时间最短,其次是振动搅拌机,单卧轴搅拌机的拌合时间最长;由于粉料都是预先混好的,因此干拌时间只有 1 min;从开始加水到出现稳定浆料的时间,行星搅拌机使用的时间最少,其次是振动搅拌机,最后是单卧轴搅拌机,这说明行星搅拌机的拌合效率最高,这是由于行星搅拌机的剪切、穿插、对流和揉搓的多重作用下实现的快速拌合;其次是振动搅拌机,振动搅拌机通过振动作用将粉料打散,加快拌合速率,但效率相对行星搅拌机较低的原因是因为采用试验机器,振幅较小,未能将预混料充分打散混合;单卧轴搅拌机的搅拌效率最低,这是由于 UHPC 原材料多为细粉料,缺少大骨料的搓动作用,使得拌合效率较低;从加纤维到混合均匀来看,行星搅拌机与振动搅拌机所用的时间一样,而单卧轴搅拌机的拌合效率最低,这与粉料拌合的特点相同。综合来看,三种搅拌机都能够满足 UHPC 材料拌合的需求,行星式搅拌机较单卧轴搅拌机搅拌效率提升 33.3%,振动搅拌机较单卧轴搅拌机搅拌效率提升 22.2%。



**Figure 1.** Comparison of mixing times for different mixers at each stage of mixing  
**图 1.** 不同搅拌机各阶段拌合时间比较

从图 2 各搅拌机拌合相同体积的 UHPC 所产生的能耗来看,单卧轴搅拌机所消耗的能量最少,行星搅拌机与单卧轴搅拌机接近,振动搅拌机所产生的能耗最大,较单卧轴搅拌机提高了近 59%,这是由于振动搅拌机的功率最大,振动搅拌机的双轴高速搅拌需要消耗大量的能量,其次振动也需要较大的能量,综合起来该搅拌机拌的拌合中所消耗的能力最多。

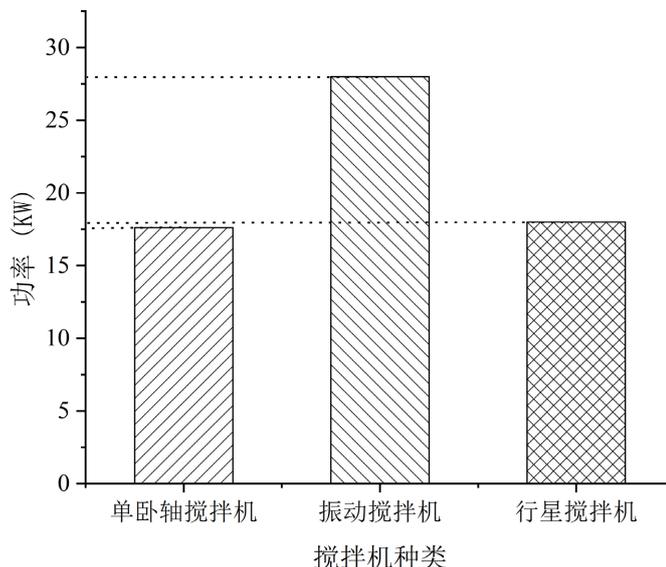


Figure 2. Comparison of energy consumption of different mixers  
图 2. 不同搅拌机搅拌能耗对比

### 3.2. 扩展度分析

分别对三种搅拌机拌合出来的 UHPC 浆料进行流动度测试，试验结果如图 3 所示，从流动扩展度来看，单卧轴搅拌机的流动扩展度最小，为 640 mm，振动搅拌机的扩展度为 655 mm，行星搅拌机的扩展度为 650 mm，这说明振动搅拌机与行星搅拌机的搅拌效率较单卧轴搅拌机提高较大，尤其是振动搅拌机的流动扩展度最大。这是由于振动搅拌机的频率振动，将粉料打散，使得颗粒与颗粒之间分散得更均匀，流动扩展度更大[8]。通过对扩展度完成状态来看，单卧轴搅拌机的浆料经流动后存在些许的纤维结团现象。只是由于搅拌效率较低，纤维不能够充分地均匀分布在 UHPC 浆料内，在流动时，有些纤维嵌接在一起，形成了部分结团现象。综合来说，振动搅拌机和行星搅拌机的 UHPC 材料流动性能更好，浆料分布更加均匀。

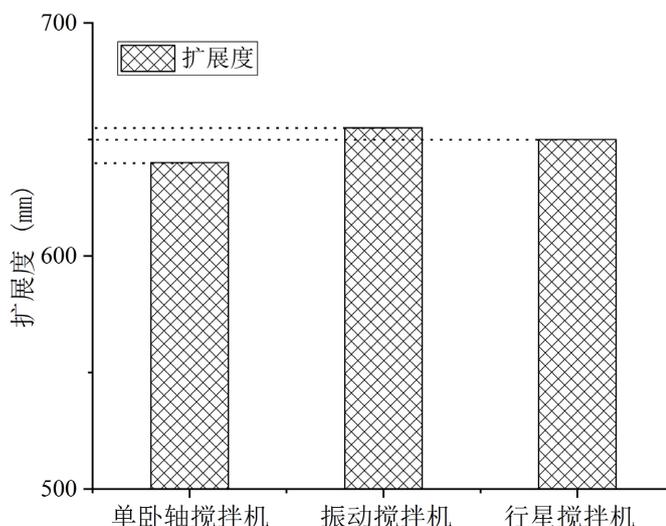


Figure 3. Comparison of flowability of UHPC slurry mixed by different mixers  
图 3. 不同搅拌机拌合出的 UHPC 浆料流动度对比

### 3.3. 含气率分析

UHPC 在搅拌过程中, UHPC 材料在搅拌过程中形成的涡流卷入一定的空气和细骨料相互碰撞形成的立体的屏障困住的空气[9], 使得机械拌合后的 UHPC 浆料中存在气泡, 影响 UHPC 材料的致密性以及力学性能。下面对三种搅拌机得到的 UHPC 浆料的含气率进行测试, 得到试验结果如图 4 所示。从图中可以看出, 单卧轴搅拌机拌合形成的 UHPC 浆料含气率最低, 其次是行星搅拌机, 含气率最大的是振动搅拌机拌合后的 UHPC 浆料。行星式搅拌机的搅拌结构埋在混合料中, 不容易引入空气, 但是, 搅拌的混合料中空气也不容易排出, 造成 UHPC 浆料中的含气率相对单卧轴搅拌机高[10]; 对于振动搅拌机, 在振动下, 一方面 UHPC 中的较大气泡在振动和揉搓作用下破裂并排出, 另一方面, 振动破坏了胶凝材料颗粒表面的水膜, 空气易进入浆料内部, 并且高速率的搅拌下空气以小气泡的形式带入 UHPC 浆体内部, 造成了振动搅拌下的 UHPC 浆料的含气率偏高[11]。

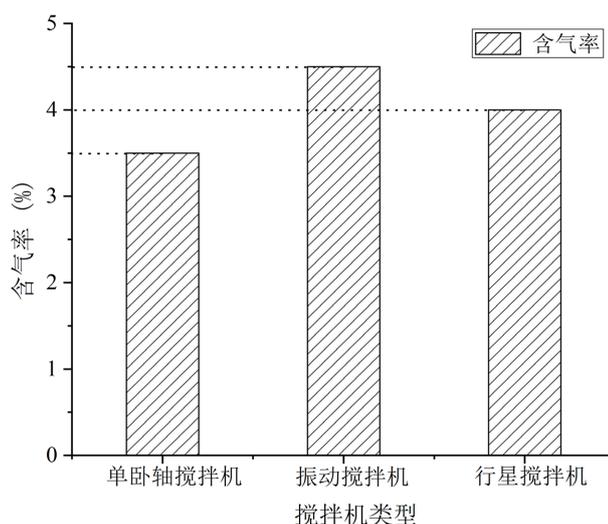


Figure 4. Air content of slurry mixed by different mixers

图 4. 不同搅拌机拌合浆料含气率

### 3.4. 力学性能分析

分析三种搅拌机下 UHPC 材料的抗压抗折力学性能, 从图 5 中看出, 随着养护龄期的增长, UHPC 的抗压抗折强度都随之增长; 针对抗压强度, 单卧轴搅拌机拌合的 UHPC 材料的抗压强度都低于其它搅拌机拌合出的 UHPC 材料, 这是因为单卧轴搅拌机的搅拌效率相对较小, UHPC 的粉料颗粒并没有充分分散, 形成的 UHPC 试块强度相对较低; 单卧轴搅拌机与行星搅拌机的搅拌效率相对较高, 形成 UHPC 试块 28 d 龄期的抗压强度较单卧轴搅拌机的 UHPC 试件抗压强度提高 8% 左右; 这是由于振动搅拌机与行星搅拌机的搅拌效率高, 使得原材料颗粒分散的更加均匀, 纤维分布不均以及结团现象减少, 提高了试块的力学性能; 对于抗折强度, 单卧轴搅拌机形成的 UHPC 试块的抗折强度最低, 其次是振动搅拌机, 其 28 d 龄期抗折强度较单卧轴搅拌机 UHPC 材料提高 8%; 行星搅拌机形成的 UHPC 试块抗折强度最高, 是单卧轴搅拌机的 16%; 单卧轴搅拌机的搅拌效率低, 纤维存在结团和分布不均的现象, 造成抗折强度偏小; 振动搅拌机与行星搅拌机纤维分散及结团现象较少, 抗折强度相对较高, 单振动搅拌机由于振动作用使得纤维出现了垂直分布的趋势, 影响了纤维的各向性分布, 减弱了纤维阻止 UHPC 内部裂纹扩展及宏观裂缝形成的作用, 纤维在抗折强度上的积极作用降低, 因此其抗折强度较行星搅拌机下的 UHPC 试块低。

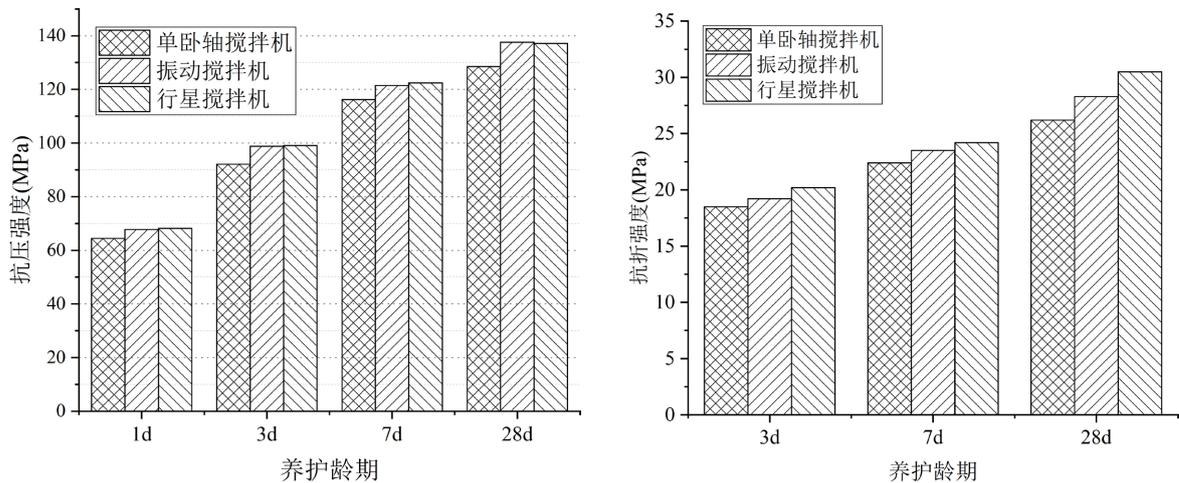


Figure 5. Comparison of mechanical properties of UHPC materials formed by different mixers

图 5. 不同搅拌机形成 UHPC 材料力学性能对比

综上所述, 三种搅拌机都能够满足 UHPC 材料的拌合, 振动搅拌机和行星搅拌机较单卧轴搅拌机都能够大大提升 UHPC 材料在实验室拌合中的搅拌效率, 振动搅拌机与行星搅拌机都可极大地提升 UHPC 拌合浆料的流动度和力学性能, 但是, 两种搅拌机都会增加 UHPC 浆体的含气率。此外, 拌合相同体方量的 UHPC 材料, 振动搅拌机的搅拌能耗最大, 并且振动搅拌会造成 UHPC 材料的纤维出现垂直分布的趋势, 一定程度上降低 UHPC 材料的抗折强度, 所以, 针对 UHPC 材料的实验室拌合, 行星搅拌机的拌合效果最佳。

#### 4. 结论

本文通过对不同种类的实验室搅拌机对相同体积 UHPC 拌合性能的研究, 得到以下结论:

- 1) 三种搅拌机都能够满足 UHPC 材料的拌合工作, 相对单卧轴搅拌机, 振动搅拌机和行星搅拌机对 UHPC 材料的拌合分散效果较好, 且行星搅拌机的拌合分散效果最佳。
- 2) 振动搅拌机与行星搅拌机都可极大地提升 UHPC 拌合浆料的流动度和力学性能, 但振动搅拌机由于振动作用会影响纤维的分布均匀性, 造成抗折强度相对较低。

#### 致 谢

感谢山东省交通厅课题“装配式波形钢腹板-UHPC 高性能组合梁桥建设关键技术研究(2020B47)”的支持。

#### 参考文献

- [1] 2022 年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(下) [J]. 混凝土世界, 2023(8): 18-23.
- [2] 2022 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, 2023(7): 19-27.
- [3] 张太山, 陈白云, 孙庆华, 等. UHPC 及其搅拌设备的发展现状[J]. 建筑机械, 2023(1): 26-28.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31385-2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. T/CBMF 37-2018 T/CCPA-2018 超高性能混凝土基本性能与试验方法[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- [6] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 10107-2020 超高性能混凝土(UHPC)技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

- 
- [7] 张太山, 张勤河, 陈白云, 等. UHPC 超高性能混凝土搅拌设备搅拌装置的研究[J]. 建筑机械, 2021(12): 30-31.
- [8] 李传习, 聂洁, 冯峥, 等. 振动搅拌对超高性能混凝土施工及力学性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2586-2594.
- [9] Powers, T.C. (1954) Void Space as a Basic for Producing Air-Entrained Concrete. *American Concrete Institute*, **50**, 741-760. <https://doi.org/10.14359/11792>
- [10] 冯忠绪, 郝俊峰. 搅拌设备设计讲座(第二十五讲) 立轴行星搅拌机[J]. 工程机械, 2020, 51(9): 97-100.
- [11] 张颜科, 路珏, 杨迎, 等. 振动搅拌对普通混凝土和超高性能混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(11): 16-21.