

# 32 m 大直径群仓仓顶施工支撑体系设计研究

Design Study of 32 m Large Diameter Group Silo Roof Construction Support System

崔邯龙<sup>1</sup>, 郭建行<sup>1</sup>, 索晓峰<sup>2</sup>, 胡旭光<sup>2</sup>, 谢正权<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国建筑第八工程局华北公司, 天津 300450;  
3. 辽宁金煜建设工程有限公司, 辽宁 大连 116407)

**摘要:** 某 32 m 大直径钢筋混凝土筒仓仓顶为锥壳结构, 常规混凝土筒仓仓顶施工时需搭设满堂红脚手架或中心井架, 脚手架搭设难度大、成本高、所需工期长。为解决此类问题, 以 32 m 大直径筒仓仓顶为例提出三种施工支撑平台方案, 结合有限元分析, 综合考虑工期、成本、周转效率等多方面因素, 最终采用贝雷架钢平台结合中心立柱作为仓顶施工的支撑体系。该体系形式简单、受力性能好、周转率高、通用性强, 可适用于不同直径筒仓仓顶施工需求, 缩短工期, 节约成本。

**关键词:** 贝雷架钢平台; 大直径筒仓; 仓顶结构; 储粮筒仓

中图分类号: TU745 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 05-0120-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.019

CUI Hanlong<sup>1</sup>, GUO Jianhang<sup>1</sup>, SUO Xiaofeng<sup>2</sup>, HU Xuguang<sup>2</sup>, XIE Zhengquan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;  
2. North China Company, China Construction Eighth Engineering Bureau, Tianjin 300450, China;  
3. Liaoning Jin Yu Construction Engineering Co., Ltd., Dalian 116407, China)

**Abstract:** The roof of 32m large diameter reinforced concrete silo is a conical shell structure, and the construction of a conventional concrete silo roof requires the erection of a full-scale scaffolding or a central shaft frame, which is difficult, costly and requires a long construction period. In order to solve such problems, three construction support platform solutions are proposed for the 32m large diameter silo roof, combined with finite element analysis, taking into account various factors such as construction period, cost and turnover efficiency, and finally adopting the beryl frame steel platform combined with central column as the support system for silo roof construction. The system is simple in form, with good force performance, high turnover rate and high versatility, and can be applied to the construction needs of different diameter silo roofs, shortening the construction period and saving costs.

**Keywords:** bailey truss platform; large diameter silos; silo roof structure; grain storage silos

## 0 引言

大直径筒仓具有仓容大、占地面积小及受力性能好等优点, 被广泛应用于粮食、煤炭、钢铁等行业物资储存<sup>[1]</sup>。我国粮食产量逐年增加, 所需粮仓仓容需求也相应提高, 但目前我国近 1/3 的粮仓是在 21 世纪初建设的, 仓房建设时间长,

作者简介: 崔邯龙 (1977—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 施工技术与项目管理、BIM 技术理论及应用。

通信作者: 郭建行 (1998—), 男, 硕士, 主要研究方向: 施工技术与项目管理。

收稿日期: 2022-08-03

仓容严重不足, 保管费用不断增加等一系列问题都迫切需求新的粮仓建设<sup>[2-3]</sup>。

传统大直径筒仓仓顶施工需搭设满堂架, 存在费用较高、工期长等缺点, 逐渐被中心井架或格构柱结合辐射梁桁架取代, 相较于满堂脚手架, 提高了安全性和经济性, 但平台通用性不高且搭设中心井架或格构柱花费时间仍相对较长<sup>[4-6]</sup>。为节约施工工期, 部分工程采用滑模拖带技术, 采用该方法, 可以节省仓顶支撑平台的搭设时间, 但相对增加了滑模施工过程中的荷载, 造成浪费, 增加施工成本<sup>[7]</sup>。李勤山等人结合试验研究了新型旋转盘口式桁架的承载能力, 总结了该桁架变形的规律, 该平台安拆便捷, 但当筒仓直径较大时, 仓顶施工时跨中挠度较大<sup>[8-10]</sup>。孟文清等设计了两种新型模块化钢桁架平台, 有效解决了传统刚性滑模平台通用性低等问题<sup>[11-12]</sup>。通过以往研究可知新建筒仓所需仓容越来越大, 仓顶直径随之增加, 对仓顶施工的便捷性, 安全性要求越来越高, 同时如何设计通用性强, 可适用于不同直径筒仓仓顶施工平台也成为一个重要研究方向。

本文以秦皇岛某粮仓项目为研究对象, 提出了一种贝雷架结合中心立柱作为仓顶施工支撑体系, 因为贝雷片为工具式承重构件, 组装便捷<sup>[13]</sup>, 同时通过调节贝雷片标准节和不同长度的非标节, 可使该体系适用于不同直径的筒仓仓顶施工, 具有通用性强、周转率高、综合成本低的特点。通过有限元分析, 验证了贝雷架钢平台在 32 m 大直径筒仓仓顶施工中应用的可行性。

## 1 工程概况

本项目位于河北省秦皇岛市海港区, 新建 20 座大直径储粮筒仓, 施工时四个筒仓为一组, 一组中相邻的两个筒仓同时滑模施工。其中, 大直径筒仓为钢筋混凝土结构, 仓容量 25 万吨, 直径 32 m, 地上 2 层, 筒仓壁厚 300 mm, 建筑总高度为 28.4 m。仓顶为锥壳式结构, 锥壳与水平面夹角  $26^\circ$ , 厚度为 200 mm, 仓顶混凝土强度等级为

C35, 上环梁截面尺寸为 500 mm×900 mm, 下环梁截面尺寸为 500 mm×1200 mm。

## 2 仓顶结构施工方案比选

### 2.1 传统满堂脚手架支撑方案及特点

该方案为在仓底搭设满堂脚手架作为仓顶的支撑体系, 顶部立杆支撑底模木方将施工荷载传至底部, 具有操作简单、通用性强等优点。但满堂支撑体系整体稳定性不够良好, 危险性高, 且搭设满堂脚手架所需的钢管、扣件较多, 所需工期较长, 施工成本高, 目前已很少采用。

### 2.2 伞状悬空滑模刚性平台支撑方案及特点

伞状悬空滑模刚性平台支撑整体呈伞状, 中心部位是中心鼓圈, 外围是辐射梁, 桁架一端支撑在仓壁刚牛腿上, 一端与中心鼓圈相连, 如图 1 所示。平台的拼装在漏斗上完成, 通过电动倒链将平台提升至预定标高, 然后再平台上搭设脚手架完成仓顶施工。该方案组装拆除较方便, 但是在锥壳施工过程中要分多次浇筑, 施工工艺繁琐, 耗费工期较长。

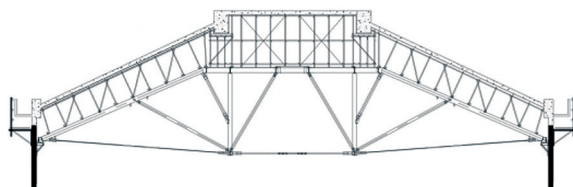


图 1 伞状悬空滑模刚性平台支撑方案示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the rigid platform support scheme for an umbrella-shaped overhanging slipform

### 2.3 斜梁式支撑平台方案及特点

斜梁式支撑平台主要由外圆主悬挑桁架和内圈圆钢桁架两部分组成, 外圆主悬挑结构外径 32 m, 内圆桁架直径 10.6 m。外圈主悬挑结构由 24 榀组成, 内圈由圆形桁架+槽钢连梁组成, 如图 2 所示。桁架在漏斗上拼装完成, 与滑模提升架通过措施埋件相连, 随滑模同步提升。该方案不需要在桁架平台再搭设脚手架, 但是平台跨度大, 跨中挠度较大, 多通过焊接连接, 平台通用性较差。

## 施工技术

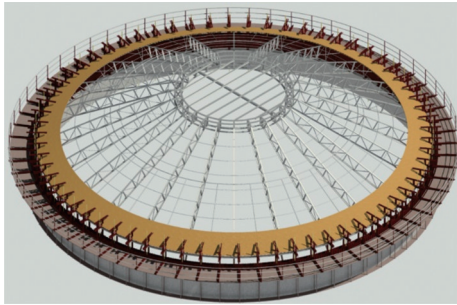


图2 斜梁式支撑平台方案  
Fig. 2 Inclined beam support platform solution

### 2.4 贝雷架钢平台+中心立柱支撑体系方案及特点

具有拼装便捷, 运输方便, 结构简单、适用性强等特点。贝雷架之间由销子连接组装而成。贝雷架钢平台+中心立柱支撑体系在滑模结束后在仓顶安装贝雷架, 钢平台端部放置在仓壁预留洞口处, 中心侧通过环形托盘与中心立柱相连, 在钢平台上搭设支撑仓顶结构脚手架。该方案贝雷架传力路径明确, 施工安全, 周转率高, 施工成本低, 平台通用性强, 可适用于不同直径的筒仓仓顶施工。

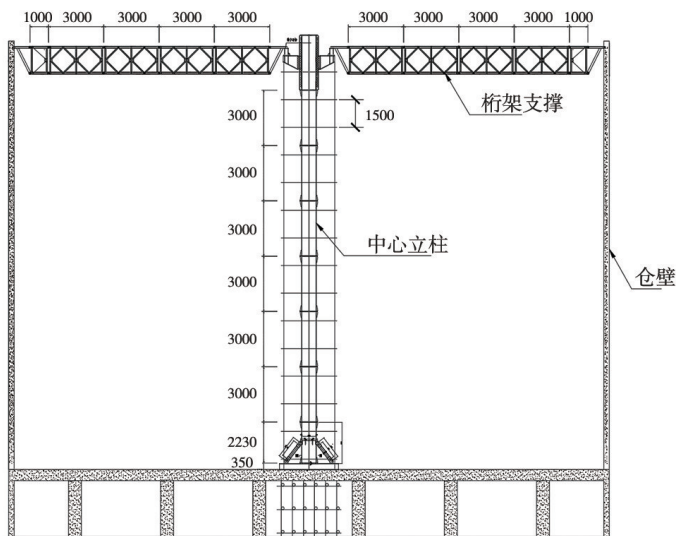


图3 贝雷架钢平台方案示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the steel platform solution for the beryl frame

### 2.5 对比结果分析

传统满堂脚手架支撑方案钢管用量大, 工期较长, 故不考虑此种施工方案。其他3种仓顶施

工支撑平台的方案各有优缺点, 32 m 直径筒仓仓顶三种施工方案的各方面性能对比见表1。

表1 方案对比

项次	伞状悬空滑模刚性平台	斜梁式支撑平台	贝雷架钢平台+中心立柱
位移最大值	50 mm	25 mm	24 mm
用钢量	42 t	31 t	62 t
仓顶施工平台搭拆时间	35 d	12 d	10 d
工期	120 d	70 d	55 d
造价	1226.98 万	996.92 万	794.85 万元

从图中数据可以看出, 贝雷架钢桁架整体变形最小, 对上部混凝土浇筑影响最小。该平台虽然用钢量最多, 但贝雷架为工具式承重构件, 采购方便, 周转率高, 通用性强, 每次周转时间相较于其他两种平台分别节省25天和2天, 且贝雷架安拆都较为方便, 可节约人工成本。

综合成本考虑, 选用贝雷架式钢平台相较于伞状悬空滑模刚性平台节约成本432万元, 节约一半工期, 相较于斜梁式支撑平台节约成本202万元, 提高施工效率约21%。因此, 采用贝雷架结合中心立柱支撑体系相较于其他两种支撑平台在成本、工期、周转效率等各方面均有较大优势。综上所述, 贝雷架式钢平台为最优方案。

### 3 贝雷架钢平台+中心立柱支撑体系设计

贝雷架中心立柱组合钢平台由贝雷式桁架、环梁、中心立柱以及环向支撑等组成, 钢平台主要杆件截面参数见表2, 钢平台组成截面示意图如图4所示。

#### 3.1 钢桁架

钢桁架共40榀, 沿环向每 $9^\circ$ 布置一榀, 桁架由贝雷架标准节与非标准节组成, 贝雷架通用尺寸 $3.0\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ , 非标准节 $1.0\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 。贝雷片两端有阴阳头, 通过销轴连接, 桁架外侧通过预留洞口与筒仓相连, 中心通过销轴与环梁相连, 面对不同直径的筒仓时, 可以通过调节径向贝雷片的数量及非标准节的尺寸来满足施工需求。

表 2 贝雷架钢平台主要杆件截面参数  
Table 2 Cross-sectional parameters of the main bars of the steel platform of the beryl frame

钢桁架			环梁	中心立柱	环向支撑
上弦	下弦	腹杆			
[ 10 ]	[ 10 ]	18	400×230×10×16	φ800×16	[ 8 ]

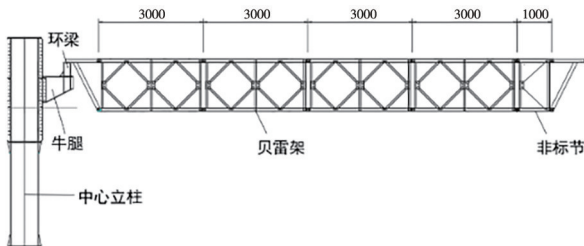


图 4 贝雷架钢平台+中心立柱截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the section of the steel platform and central column of the beryl frame

### 3.2 中心立柱

中心立柱选用 φ800×16 钢管，每 3 m 一节通过螺栓连接，中心立柱放置于下部底板上，为加强支撑体系的稳定性，中心立柱底部设置两个方向均长 3.2 m H 型钢成十字形与中心立柱连接，H 型钢与结构板漏斗处理件进行焊接，同时在 H 型钢上设置四根钢管支撑加固体系，以确保平台结构安全，支撑加固体系立于底板上。

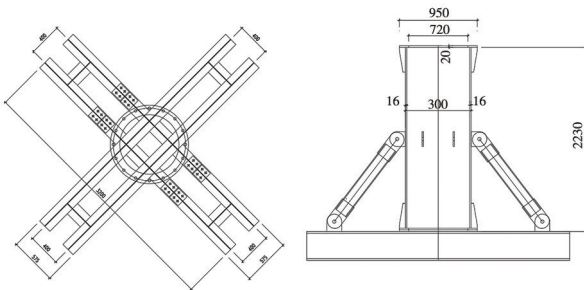


图 5 中心立柱底部加强图

Fig. 5 Bottom reinforcement of the central column

### 3.3 环梁

为便于钢桁架与中心立柱连接，在中心立柱顶端设置八个钢牛腿及箱型环梁，环梁采用箱型截面，为便于运输与安装，由两段拼接而成，采用 M20 高强螺栓连接，环梁高度 230 mm，直径 2.45 m。中心立柱顶部设置钢牛腿，牛腿与中心立柱采用 M20 螺栓连接，环梁通过螺栓与牛腿连接，贝雷架通过销轴与环梁连接。

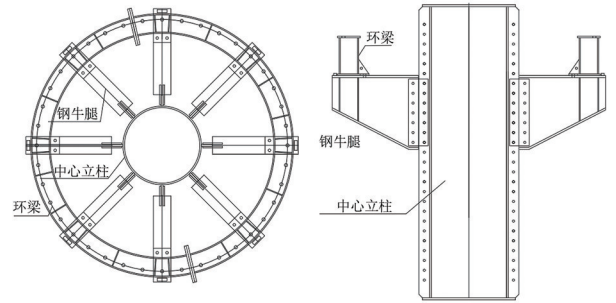


图 6 环梁与牛腿连接示意图

Fig. 6 Diagram of the connection between the ring beam and the bull leg

## 4 钢桁架+中心立柱支撑体系有限元分析

### 4.1 荷载统计

荷载主要为筒仓仓顶结构施工荷载，仓顶结构施工示意图如图 7 所示，根据 JGJ 162-2008 《建筑施工模板安全技术规范》等规范相关规定，对仓顶结构施工过程荷载进行统计。

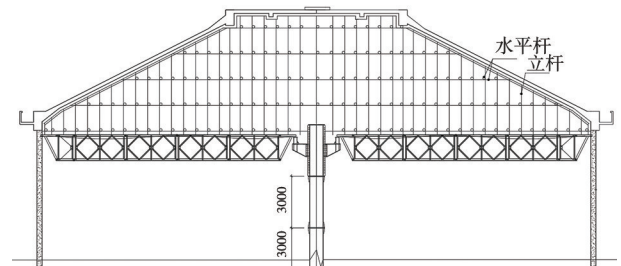


图 7 仓顶结构施工示意

Fig. 7 Illustration of the construction of the silo roof structure

仓顶结构施工过程恒载包括钢平台自重、跳板、木方、脚手架及其模板体系自重，还包括上部混凝土结构的自重，经统计恒载取值为 6.3 kN/m<sup>2</sup> (不包含平台自重，平台自重由软件自动计算)，活载参照规范取 2.0 kN/m<sup>2</sup>。按照现场实际施工情况，工况为仓顶锥壳一次浇筑完成。操作平台上布置 700 mm×800 mm 的满堂脚手架，立杆所在位置即钢平台外荷载的作用点，且为符合实际工程状况，环形钢平台外侧面积大于内侧，按从属面积分配荷载。

### 4.2 钢桁架有限元分析

#### 4.2.1 有限元模型建立

运用有限元软件 Midas Gen 建立施工操作平台的有限元模型。钢平台上下弦杆及腹杆、环梁、牛腿及基座钢材为 Q345B，中心立柱及环向槽钢

## 施工技术

为 Q235B, 弹性模量  $E$  取  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ , 泊松比取 0.3。贝雷片的上弦杆、下弦杆以及腹杆采用梁单元模拟, 腹杆与上下弦杆之间采用刚接, 贝雷片之间采用销轴连接故定义为铰接, 钢桁架与仓壁连接点只约束竖向及切向位移, 缆风绳选取只受拉单元模拟。计算按照 GB 50017-2017《钢结构设计标准》受压构件长细比取控制值为 150, 钢平台变形控制值取  $L/400$ 。

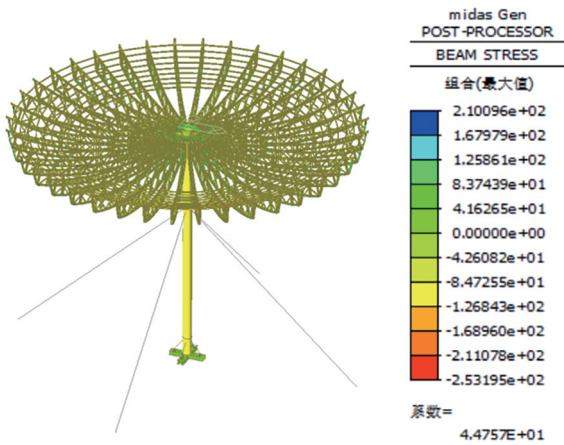


图 8 应力云图

Fig. 8 Stress cloud diagram

### 4.2.2 有限元分析结果

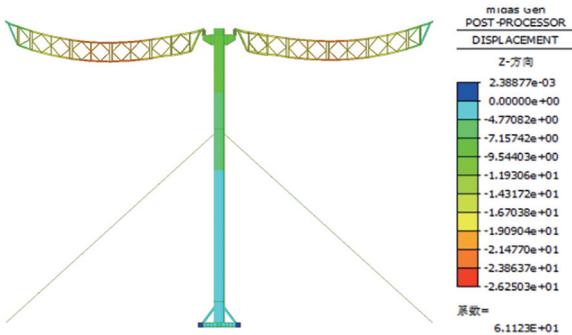


图 9 竖向位移云图

Fig. 9 Vertical displacement cloud

经有限元分析结果可知, 贝雷架钢平台在最不利组合工况下最大应力值为 276.4 MPa, 最大竖向位移为 23.5 mm, 结构应力值及最大竖向变形值均满足相关规范规定要求。

## 5 模块化设计

贝雷片之间通过销轴连接, 具有组装拆卸便

捷, 适用性强等特点。该平台通用性强, 通过调节贝雷片片数及非标节尺寸, 可以很好的适用于不同直径筒仓, 解决了常规平台闲置的问题, 通过统计以往实际工程, 常见筒仓直径一般为 36 m, 34 m, 30 m, 26 m, 因为桁架平台对称布置, 模块化平台体系 (半跨) 组合表见表 3。

表 3 常见直径筒仓组合形式表

Table 3 Table of common diameter silo combinations

平台半径/m	桁架榫数	标准节		非标准节长度/m	环梁半径/m
		贝雷片个数	两端三脚架		
18	44	5片×3 m	0.945 m×2	—	1.225
17	42	4片×3 m	0.945 m×2	2	1.225
15	36	4片×3 m	0.945 m×2	—	1.225
13	32	3片×3 m	0.945 m×2	1	1.225

表中桁架径向长度略大于筒仓半径, 这是由于钢平台两端需要一定的搭接长度, 通过表中数据可知, 平台通过调节贝雷片个数与非标节长度便可适用于不同直径筒仓仓顶施工, 通用性较强, 但由于筒仓直径不同、仓顶结构形式及平台搭设脚手架布置的不同上部产生的荷载不同, 此处仅讨论平台在不同直径应用的可行性, 具体产生的挠度及应力等需要根据实际工程具体分析。本平台已成功应用于 26 m、28 m、30 m、32 m 等不同直径筒仓施工, 目前应用效果较好。

## 6 结论

(1) 利用有限元软件 midas gen 对贝雷架钢平台+中心立柱整体结构进行了验算, 相比较将贝雷架钢平台与中心立柱分开验算, 整体验算结果更加符合实际工程情况。计算结果表明该平台在承受上部施工荷载时产生的挠度较小, 可以很好的保证仓顶的平整度。

(2) 贝雷架结合中心立柱平台组成简单, 具有较强承载能力, 解决了传统施工时需要搭设中心脚手架时间长的难题, 并且该平台可以满足筒仓锥壳与仓顶环梁一次性浇筑, 缩短了施工工期, 提高了平台周转效率, 节约成本。

(3) 该平台本身具有模块化特性, 且组装拆卸简单, 可以很好的适应不同直径筒仓施工, 增强了平台的通用性, 解决了平台闲置的问题。

(5) 结合本工程实际应用可知, 相较于伞状

悬空滑模刚性平台及斜梁式支撑平台, 采用贝雷架结合中心立柱钢桁架平台至少可提高施工效率 20%, 节约施工成本 200 余万元, 在实际工程应用中, 取得了良好的经济效益。

#### 参 考 文 献

- [1] 余监华. 新型筒仓锥壳仓顶施工组合式支撑体系研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [2] 郭呈周, 段锦茹, 庞瑞, 等. 装配式 RC 浅圆仓仓顶结构设计关键技术研究 [J]. 混凝土, 2020, (12): 111-117.
- [3] 郭庆华. 粮食仓储设施建设是实现粮食安全的重要保障 [J]. 粮食问题研究, 2022 (3): 43-46.
- [4] 马仁伟, 夏军武, 陈晓森, 等. 装配式钢桁架筒仓施工支撑平台力学参数优化设计 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (7): 166-172.
- [5] 曾涛, 郭宇, 童胤淇. 辐射梁式桁架、格构柱组合平台在筒仓锥顶施工中的应用 [J]. 施工技术, 2017, 46 (S1): 554-557.
- [6] 谢艺. 大直径筒仓模架施工工艺 [J]. 施工技术, 2014, 43 (23): 36-39.
- [7] 赵少伟, 张冬, 郭蓉, 等. 滑模拖带技术在筒仓工程中的应用 [J]. 施工技术, 2013, 42 (22): 98-101.
- [8] 李勤山, 王铁成, 赵海龙. 超大直径筒仓仓顶现浇混凝土施工悬吊支撑桁架安全分析 [J]. 工业建筑, 2015, 45 (1): 143-147.
- [9] 王文星. 筒仓仓顶钢管桁架支撑体系研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] 李东阳. 筒仓新型桁架支撑平台研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [11] 孟文清, 赵鹏, 张亚鹏, 等. 新型筒仓刚性滑模平台模块化设计研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52 (8): 72-76.
- [12] 田旺. 筒仓模块化穹顶式滑模刚性平台设计与施工研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [13] 曹军, 吴赞. 采用贝雷架钢平台施工储煤仓仓顶结构技术 [J]. 煤炭工程, 2019, 51 (10): 54-57.
- [14] 辛酉阳, 李华. 大跨度梁高支撑模板脚手架专项施工方案设计与施工 [J]. 粉煤灰综合利用, 2014, 27 (6): 40-42.
- [8] J PêRA, HUSSON S, GUILHOT B. Influence of finely ground limestone on cement hydration [J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21 (2): 99-105.
- [9] 余小小, 李如燕, 董祥, 等. 机械力粉磨对再生微粉性能的影响 [J]. 人工晶体学报, 2017, 46 (4): 688-692.
- [10] 李炜, 孙南屏, 何健恒. 废砖粉水泥胶砂基本性能试验研究 [J]. 砖瓦, 2014 (2): 3-6.
- [11] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (10): 3314-3319+3325.
- [12] 董自修. 碱激发制备废弃混凝土聚物基再生材料 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [13] 王海进, 耿欧, 赵桂云. 再生微粉基本性能及胶砂强度的试验研究 [J]. 混凝土, 2015 (8): 74-77.
- [14] 康晓明, 李滢, 樊耀虎. 不同激发方式对再生微粉性能的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1135-1139.
- [15] 王朝霞. 化学激发剂对再生微粉活性激发研究 [J]. 建材技术与应用, 2021 (2): 4-7.
- [16] 金彪, 徐卓越, 杨留栓, 等. 建筑垃圾的活性激发及制备蒸养砖 [J]. 环境工程, 2019, 37 (7): 190-193+129.

(上接第 49 页)