DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.6002

厂房结构改造方案比选及风险与耐久性分析——以某皮带廊厂为例

陈凯亮[1]，陈俊杰[1]，董　霜[1]，文嘉鑫[2]，补国斌[2]

（1. 中国轻工业长沙工程有限公司，湖南 长沙 410114；2. 湖南工业大学 土木与环境工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：以德兴铜矿泗洲选矿厂 5# 皮带廊厂房结构改造为例，针对上部围护结构老化坍塌及吊车荷载提升需求，提出了“拆除墙”（方案一）与“加固墙”（方案二）两种改造方案。采用 PKPM 软件对两种方案进行建模与结构复核，对比分析其对下部粉矿仓的受力影响、技术经济指标差异，并探讨施工过程中关键风险控制要点及长期耐久性与维护成本。结果表明：两种方案均使上部总荷载显著减小，不会引起粉矿仓结构额外加固，结构安全性能满足规范要求；方案一虽钢材消耗较多、拆除工程量较大，但总投资较方案二更省，施工工艺成熟、工期较短，且后期维护需求明确、成本可预测；方案二加固层短期防护效果良好，但存在内部砌体劣化隐蔽风险，长期监测成本不可忽略。综合来看，方案一更具优势，推荐作为首选改造方案。研究成果可为同类老旧工业皮带廊厂房的结构改造提供参考。

关键词：皮带廊厂房；结构改造；经济性；施工风险；耐久性分析

中图分类号：TU272.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)06−0001−07

引文格式：陈凯亮，陈俊杰，董　霜，等 . 厂房结构改造方案比选及风险与耐久性分析：以某皮带廊厂为例 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(6)：1−7.

Comparison and Selection of Plant Structure Renovation Schemes with Risk and Durability Analysis：A Case Study of a Conveyor Gallery Plant

CHEN Kailiang[1]，CHEN Junjie[1]，DONG Shuang[1]，WEN Jiaxin[2]，BU Guobin[2]

（1. China CEC Engineering Corporation Co., Ltd.，Changsha 410114，China；
2. School of Civil and Environmental Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Taking the structural renovation of the No. 5 belt gallery workshop at the Sizhou Concentrator of Dexing Copper Mine as an example, in view of the aging-induced deterioration and partial collapse of the upper enclosure system, as well as increased service loads from upgraded crane operations, two distinct renovation strategies are proposed: Scheme I (demolition and reconstruction of existing walls) and Scheme II (in-situ strengthening of retained masonry walls). Both schemes are modeled and computationally verified by using PKPM structural analysis software. A comprehensive comparative evaluation is conducted, encompassing the influence on the underlying powder ore bunker, technical and economic performance, key construction risk factors, and long-term durability and

收稿日期：2025−09−10

基金项目：湖南省自然科学基金资助面上项目（2023JJ30213）；湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目（25A0418）；湖南省研究生教学改革基金资助重点项目（2023JGZD064）；湖南省普通高校教学改革基金资助项目（HNJG-20230746）

作者简介：陈凯亮，男，中国轻工业长沙工程有限公司高级工程师，主要研究方向为结构设计与改造，E-mail：258067081@qq.com

通信作者：补国斌，男，湖南工业大学副教授，博士，主要研究方向为结构设计与改造，E-mail：guobinbu@hut.edu.cn

maintenance implications. The results show that both schemes significantly reduce the total load on the upper part, without causing additional reinforcement of the fine ore bin structure, and the structural safety performance meets the requirements of the specifications. Although scheme I entails higher steel consumption and more extensive demolition work, it is characterized by lower overall capital investment, a shorter construction duration, mature construction technology, and more transparent and predictable long-term maintenance requirements. Conversely, scheme II provides satisfactory short-term protective performance through the applied strengthening layer; nevertheless, there is a hidden risk of internal masonry deterioration, necessitating sustained long-term monitoring at non-negligible expense. Overall, scheme I is recommended as the preferred renovation option with more advantages. The research results provide a valuable reference for multi-criteria decision-making in the structural renovation of comparable aging industrial belt gallery facilities.

Keywords：belt gallery workshop；structural renovation；economic viability；construction risk；durability analysis

0 引言

目前，中国大量厂房建筑面临着老化严重问题，厂房结构使用性能逐渐下降，一些甚至无法投入使用。若对旧厂房建筑进行拆除重建，则建设成本费用较高，不符合企业经济效益，但若忽视结构老化问题，则会影响生产安全。为此，可对老化厂房建筑进行结构改造，其成本相对较低，也能提高结构的强度和稳定性，为内部生产提供安全稳定的环境。

针对厂房结构改造，诸多学者进行了相关研究和讨论。施澄宇 [1] 提出了通过增大截面法提升钢构件承载力，采用围套法加固柱下独立基础。吴涛等 [2] 提出了“永临结合”的加固方式，并建立有限元模型，模拟结果表明“永临结合”的加固方式可显著提升厂房结构的抗震性能。张晧等 [3] 通过增设屈曲约束支撑（BRB），减少了传统加固措施的工程量，提升了建筑的抗震性能。王金花等 [4] 在使用传统加固方法加固某文保厂房的基础上，通过设置 BRB 和黏滞阻尼器（VFD、VFW），兼顾抗震效能与建筑特色保护。袁朋举等 [5] 针对炼钢厂房进行了结构检测和验算，并提出结构加固建议。高志军等 [6] 采用增设钢柱、梁的方式加固厂房，并对原有构件和节点进行加固设计，降低了厂房加固工程量。董启灏等 [7] 在原有建筑基础上叠加独立筏板、外包钢桁架等方式实现厂房结构加固，并保留了厂房历史风貌。黄彬辉 [8] 将厂房结构体系由原设计的混凝土框架改造成屈曲约束钢支撑－现浇钢筋混凝土框架结构，改善了结构的抗震性能。武乾等 [9] 基于结构方程模型（SEM），揭示了设计方案、结构特征和施工技术对改造加固风险的影响，为施工风险控制提供了理论支撑。此外，郭晓燕 [10] 对比了传统加固方式与消能减震加固的抗震性能和经济性，结果表明消能减震加固具有显著优势。总体而言，现有研究在加固技术、抗震性能提升方面已较为成熟，但针对老旧皮带廊这类兼具工业运输与围护功能的结构，如何在改造中统筹考虑对既有结构的影响、施工风险控制，以及改造后的长期耐久性与维护成本，仍有待深入探讨。

综合上述分析，本研究拟以德兴铜矿泗洲选矿厂 5# 皮带廊厂房结构改造工程为例，针对上部围护结构老化严重、局部坍塌及吊车荷载提升等实际需求，提出“拆除墙”与“加固墙”两种改造方案。并采用 PKPM 软件对两种方案进行建模与结构复核，对比分析其对下部粉矿仓的受力影响、技术经济指标差异；同时，延伸探讨施工过程中的关键风险控制要点，并对两种方案的长期耐久性与维护成本进行初步预测，旨在为同类既有工业建筑改造提供借鉴。

1 工程概述

本工程为德兴铜矿泗洲选矿厂 6400T/ 日粉矿仓 5# 皮带廊上部围护结构加固改造项目。原粉矿仓皮带廊由冶金工业部长沙有色冶金设计院（长沙有色冶金设计研究院有限公司）于 1969 年完成施工图设计，1970 年建成投产使用，至今已使用 56 a。

5# 皮带廊上部围护结构长 114.0 m(轴线尺寸)，宽 9.0 m(轴线尺寸)。25~27 轴为框架－钢屋架结构，框架柱顶标高 30.5 m。8~24 轴砌体为砌体－预制混凝土屋支架结构，壁柱顶标高 27.0 m。屋盖为预制混凝土槽板，槽板设计选用早已作废的国标图集，查找困难，槽板厚度及配筋不详。8~25 轴砌体围护结构支座为壁厚 250 mm 的粉矿仓，其混凝土强度等级为 200#（相当于 C18）。粉矿仓上部围护结构为砌体结构，砌体强度等级为 50#（相当于 MU5.0），混

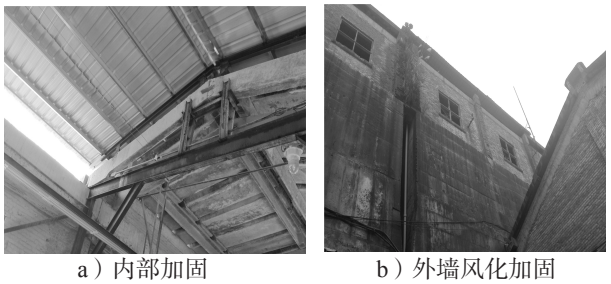
合砂浆强度等级为 25#(相当于 M2.5)。

2　结构已有改造情况

目前泗洲选矿厂业主为满足生产要求对屋架及围护结构进行了局部改造，25~27 轴屋架下方增加了 5 t 电动单梁悬挂吊（原设计为 3 t 电动葫芦），8~9 轴间在砌体墙上增加了伸出窗外 2 m 左右的 5 t 电动葫芦。经过复核，该改造超出原有结构的承载力和变形要求。

该粉矿仓皮带廊屋盖系统 16~24 轴之间的部分预制槽板已发生坍塌，部分三角形预制屋架已严重开裂，失去了承载能力。为保证现场生产及人员财产安全，业主采用钢架托梁办法，已经对部分屋架梁进行抢险形式的加固，对已经坍塌的屋面槽板用彩钢板替代（如图 1a 所示）。粉矿仓上部围护砌体结构的室外部分风化较为严重（如图 1b 所示）。

目前虽然对坍塌屋架进行了抢救性加固，但是仍然不能完全消除整个皮带廊的安全隐患。皮带廊已使用 56 a，已超出建筑的使用年限（50 a）。因此，为确保工作人员的安全和生产的正常进行，对该皮带廊的加固改造迫在眉睫。

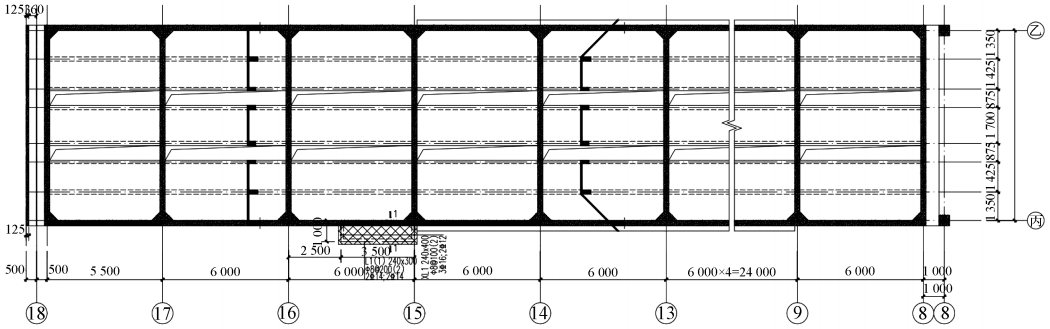


a）内部加固　　b）外墙风化加固

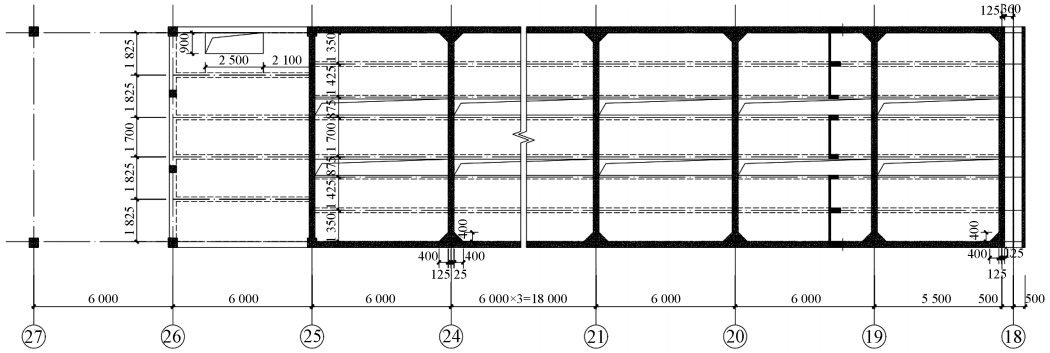
图 1　粉矿仓皮带廊已加固示意图

Fig. 1　Reinforcement sketch of the belt gallery of the powder ore bin

依据原有图纸及现状绘制粉矿仓仓顶结构布置，如图 2 所示，图中单位为 mm。



a）仓顶 8~18 轴结构布置



b）仓顶 18~27 轴结构布置

图 2　粉矿仓仓顶结构布置

Fig. 2　Layout of the roof structure of the powder ore silo

3　结构老化原因分析

屋盖系统坍塌的主要原因：1）该工程投入使用时间已达 56 a，由于受矿区环境气候和雨水的长期侵蚀，槽板和屋架梁混凝土的腐蚀和炭化严重，造成受力钢筋的锈蚀，结构的安全性降低。2）三角形屋架底部的张拉钢筋在长期恒定荷载作用下，产生内在应力松弛，造成混凝土屋架梁产生裂缝。随着时间推移，张拉钢筋应力松弛越多，梁裂缝发展越大，裂缝发展到一定程度会使得混凝土梁失去承载力。

砌体围护结构粉化的主要原因：1）砖长期暴露在亚稳定空气条件下，接触不同的温度、压力和湿润方式，经过微观结构以及矿物学改变导致砖的风化或劣化。2）长期雨水的侵蚀导致外部雨水沿墙毛细孔渗透到墙身内，砖墙经常处于饱和状态，砖表面即被粉化，随着风雨外部因素的影响使得粉化不断向砖

内部发展，导致黏土砖的腐蚀劣化现象。粉矿仓伸缩缝处，设置了天沟落水管，雨水比其它位置丰富，导致砌体围护结构粉化情况更为严重。

4　结构改造主要内容与设计参数

1）在 25~27 轴之间设置 5 t 电动单梁悬挂吊车，为方便检修和提高起吊设备的起吊高度，改造后柱顶比原框架柱顶高 1.8 m（柱顶标高 32.300 m）。

2）8~9 轴之间已改造的电动葫芦，为方便设备从东面墙外起吊需要进行重新改造。现电动葫芦改为 5 t 电动单梁悬挂吊车，吊车轨道伸出东面墙外 2.0 m。同样，为方便起吊设备，改造后柱顶比原砌体壁柱顶高 1.8 m（柱顶标高 28.800 m）。

3）9~25 轴之间沿着 5# 皮带廊方向设置 3 t 电动葫芦，在 24~25 轴间轨道设计为弧形，方便在不使用葫芦时，葫芦能停靠在过道上，不影响卸料小车的正常使用。同样，为方便起吊设备，改造后柱顶比原砌体壁柱顶高 1.8 m（柱顶标高 28.800 m）。

4）15~16 轴处的操作室往丙轴墙外扩大 1.0 m，增加操作室空间；16~17 轴处往丙轴墙外扩大 1.0 m，增加一个工具间。

5）拆除原有屋盖系统，采用门式刚架轻型钢结构替换原有混凝土屋架和角钢屋架。屋面板采用 0.5 mm 厚 820 型镀锌彩板。

6）参数设计。抗震设防烈度为 6°；基本地震加速度为 0.05g；基本风压为 0.40 kPa；基本雪压为 0.35 kPa。

5　结构改造方案比选

按照新的工艺布置，采用两种不同的结构方案进行比较，并建模重新计算。本改造工程结构计算采用中国建筑科学研究院 PKPMCAD 工程部编制的《多层及高层建筑结构空间有限元分析与设计软件》进行。

方案一：拆除墙。将 8~25 轴原有的砌体墙及屋架全部拆除，更换为 5.8 m 高（柱底至檐口的高度）的门式刚架，其结构详见图 3。25~27 轴框架柱及其填充墙保留，但对填充墙进行加固处理，在柱顶处设置 1.8 m 高（柱底至檐口的高度）的门式刚架。15~16 轴的操作室往东扩大处采用植筋技术，后浇梁挑出仓壁 1.0 m。

方案二：加固墙。将 8~9 轴原有的砌体墙及屋架全部拆除（因外挑电动单梁吊车产生的荷载较大，原砌体承载力不够）。9~25 轴砌体结构不拆，采用高性能水泥复合砂浆钢筋网砂浆面层法进行加固，即每侧抹压或喷射 40 mm 厚 M30 高性能水泥复合砂浆，配筋为Φ8@150（竖向）、Φ8@150（水平），墙体两侧的钢筋网同植入墙体的Φ6 剪切销钉拉结，销钉沿墙梅花形布置，间距为 450 mm。25~27 轴框架柱及填充墙保留，对填充墙进行加固处理，在柱顶处设置 1.8 m 高（柱底至檐口的高度）的门式刚架，详见图 4。15~16 轴的操作室往东扩大处，采用植筋技术，后浇梁挑出仓壁 1.0 m。该方案必须对承重砌体围护结构进行检测鉴定。

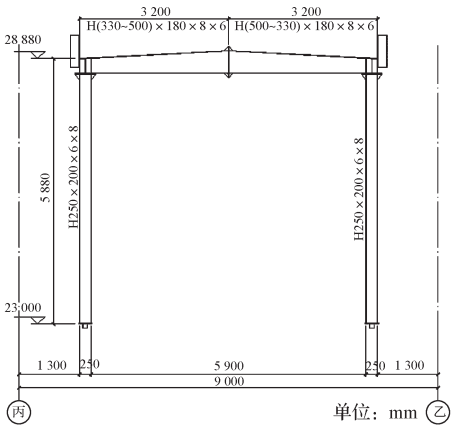


图 3　方案一的门式刚架结构示意图

Fig. 3　Portal frame schematic in scheme I

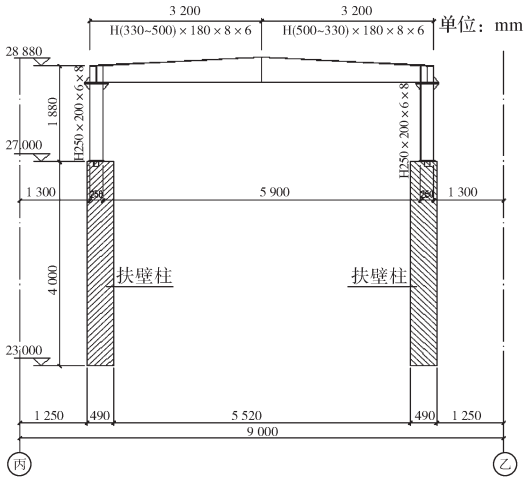


图 4　方案二的门式刚架结构示意图

Fig. 4　Portal frame schematic in scheme II

5.1　改造对原有结构的影响

5.1.1　*方案一、方案二与原结构的总荷载对比*

由表 1 可知，改造前结构的总荷载为 9 156.63 kN，改造后方案一结构的总荷载为 2 063.01 kN，总荷载下降了 77.47%，改造后方案二结构的总荷载为 5 371.14 kN，总荷载下降了 41.34%。方案一和方案二的改造均会使结构的总荷载有较大减小，这不仅减小了对下部的粉矿仓的竖向压力，而且对整个结构的抗震设计有利。

表 1　粉矿仓上部荷载

Table 1　Load on the upper part of the powder ore bin　kN

轴号	恒荷载 + 活荷载		
	改造前	方案一	方案二
8~9 轴	524.05	168.41	168.41
9~25 轴	7 403.08	1 146.37	4 454.50
25~27 轴	1 229.50	748.23	748.23
总荷载	9 156.63	2 063.01	5 371.14

5.1.2　方案一、方案二与原结构的内力对比

从表 2 可以得出，改造后的柱底内力比改造前降低，方案一和方案二的剪力都有所增加。方案一因柱底剪力可以通过在钢柱底设置抗剪键处理，通过抗剪键传到粉矿仓仓壁，剪力的增加对粉矿仓的影响极小。方案二因柱底剪力通过计算复核，壁柱的受剪承载力满足计算要求（按照砖强度为 MU5.0、砂浆强度为 M2.5 进行计算。实际情况应该通过检测后，由检测单位提供数据）。

表 2　粉矿仓上部结构的底部内力

Table 2　Internal force at the bottom of the upper structure of the powder ore bin　N

交点	改造前		方案一		方案二	
	轴力	剪力	轴力	剪力	轴力	剪力
9 交乙轴	162.6	5.88	102.10	5.88	102.10	5.88
13 交丙轴	278.3	11.76	71.44	14.40	187.72	22.80
21 交丙轴	319.6	11.76	82.44	20.80	198.72	26.00
26 交丙轴	200.8	46.00	96.24	36.70	96.24	36.70

注：26 交丙轴是框架柱顶处内力设计值，其它位置是粉矿仓顶部内力设计值。

5.2　方案一与方案二的刚架计算结果对比

两种方案的刚架计算结果如表 3 和表 4 所示。

表 3　方案一的刚架计算结果

Table 3　Calculation results of rigid frame for scheme Ⅰ

编号	柱顶位移 / mm	柱顶位移与房屋高度的比值	钢梁挠度 / mm	挠跨比	最大应力比
GJ-1	31.1	1/187	19.1	1/456	0.70
GJ-2	33.3	1/177	7.2	1/859	0.54
GJ-3	13.0	1/446	8.7	1/995	0.94
GJ-4	3.2	1/562	9.2	1/984	0.61

表 4　方案二的刚架计算结果

Table 4　Calculation results of rigid frame for scheme Ⅱ

编号	柱顶位移 / mm	柱顶位移与房屋高度的比值	钢梁挠度 / mm	挠跨比	最大应力比
GJ-1	0.4	1/4 399	10.2	1/888	0.57
GJ-2	0.3	1/5 750	4.90	1/1 257	0.41
GJ-3	13.0	1/446	8.74	1/995	0.94
GJ-4	3.2	1/562	9.2	1/984	0.61

由表 3 和表 4 可知，对照现行规范的控制指标，两种方案的计算结果均在规范允许范围内，满足规范要求，方案二的计算柱顶位移和钢梁挠度相对于方案一较小。

5.3　方案一与方案二的经济性对比

由表 5 可知，方案一砌体拆除工程量较多（基本将屋架和砌体围护结构拆除重建）、钢材消耗较多。方案二砌体加固工程量较多，土建投资较大。

表 5　方案一与方案二的经济性对比结果

Table 5　Economic comparison between scheme Ⅰ and scheme Ⅱ

序号	项目名称	单位	方案一	方案二
1	混凝土量	m^3	0.5	0.5
2	钢筋量	t	1.524	1.212
3	钢材量	t	53.21	37.36
4	砌体（拆除）	m^3	198.0	11.52
5	砌体（加固）	m^3	57.2	224.88
7	土建投资	万元	110.0	127（不含检测费）

5.4　方案一与方案二的施工过程风险控制分析

因 5# 皮带廊改造期间需保证下部皮带正常生产，施工过程存在不容忽视的安全风险。结合两种方案的施工工艺特点，对其关键风险及控制措施分析如下：

1）方案一（拆除墙）风险分析。方案一需拆除 8~25 轴全部砌体围护墙及原有屋盖系统，拆除体量较大，高空坠落、结构失稳风险较高。主要风险点包括：①大面积墙体拆除时对下部粉矿仓仓壁的冲击扰动；②原砌体墙作为横向支撑被拆除后，施工阶段刚架未形成整体时的临时稳定性；③拆除作业与下部皮带运行交叉带来的坠物伤人风险。采用如下控制措施：在拆除区域搭设满堂承重脚手架及双层水平安全网，将拆除区与运行区完全隔离；采用静力切割与机械破碎相结合的工艺，分轴分段拆除，严禁大锤猛砸；拆除后立即安装临时柱间支撑，确保施工阶段结构抗侧刚度。

2）方案二（加固墙）风险分析。方案二保留 9~25 轴砌体墙并进行钢筋网砂浆面层加固，施工风险主要集中于：①墙体植筋钻孔对原强度等级较低（MU5.0）砌体的局部损伤与扰动；②高性能砂浆抹压厚度较大（每侧 40 mm），若基层处理不当易发生空鼓、脱落；③加固施工需在墙体两侧同步进行，高空作业防护难度较大。故采用如下控制措施：加固前必须对原砌体强度进行原位检测，根据实测结果调整植筋深度与间距；植筋钻孔应采用低震动电钻并严格控制孔径，注胶饱满；砂浆分层抹压并加强养护，施工期间对墙体变形进行实时监测；搭设防护脚手架与水平安全网。

综合对比，方案一施工风险集中在拆除阶段的安全隔离与临时支撑有效性上，而方案二风险侧重于加固过程中的质量控制与砌体扰动控制。在科学制定专项施工方案的前提下，两种方案的风险均可控。

5.5 方案一与方案二的耐久性与长期维护成本分析

1）方案一的耐久性与维护分析。方案一上部结构采用全轻型门式刚架钢结构，屋面为 0.5 mm 厚镀锌彩钢板。钢结构设计使用年限为 50 a，但其耐久性高度依赖于防腐涂层的完好程度。矿区环境中存在 SO_2 等腐蚀性介质及高湿度条件，预计钢结构防腐涂层首次大修周期为 8~10 a，彩钢板因镀锌层消耗及可能机械损伤，预计 10~15 a 需局部更换或整体翻新。长期维护成本主要包括：①定期（每 2~3 a）检查与局部补漆费用；②中期大修时的除锈、重新涂装费用；③屋面系统更换费用。总体呈现“初期投资省、后期维护投入较为明确且可预测”的特点。

2）方案二的耐久性与维护分析。方案二保留的砌体墙采用 40 mm 厚 M30 高性能水泥复合砂浆钢筋网面层进行加固。加固层自身具备良好的密实性和抗碳化、抗氯离子渗透能力，可为内部老旧砖砌体提供有效保护，延缓其风化进程。然而加固层与内部原砌体之间存在相容性问题，若原砖墙内部已存在严重风化裂缝或泛碱，加固后内部劣化可能仍在缓慢发展，且难以直接观测。因此，方案二需建立长期健康监测机制，重点监测墙体裂缝扩展与加固层空鼓情况。长期维护成本主要包括：①定期（每 1~2 a）外观普查与敲击检测费用；②若 20~30 a 后局部加固层失效，需进行二次修补或补强。

相较之下，方案一维护内容直观、技术成熟、费用易估算；方案二短期维护需求低，但存在内部劣化的潜在隐蔽风险，长期监测与诊断成本不可忽略。

5.6 比选结论分析

综合结构受力、技术经济、施工风险及长期耐久性 4 个维度，对两种方案进行了系统比选，结论如下：

1）在对下部粉矿仓影响方面，两种方案均使上部总荷载显著下降（方案一下降了 77.47%，方案二下降了 41.34%），柱底内力降低，不会引起粉矿仓结构的额外加固，均满足安全要求。

2）在技术经济与工期方面，方案一的基建工程量大、钢材消耗多，但施工工艺成熟、工序衔接快，总投资较省；方案二的砌体加固工序复杂、养护周期长，且需额外支付检测鉴定费用。

3）在施工风险控制方面，方案一需重点应对大面积拆除与皮带运行交叉作业的安全隔离风险；方案二则需高度关注植筋加固质量及对低强砌体的扰动。通过搭设满堂脚手架、分段施工、实时监测等措施，二者风险均在可控范围。

4）在耐久性与长期维护方面，方案一钢结构防腐及屋面系统维护需求清晰、周期可预测，后期维护费用较明确；方案二加固层初期防护效果较好，但内部砌体劣化具有隐蔽性，需建立长期监测机制，远期维护成本存在一定不确定性。

综上，方案一（拆除重建门式刚架）在投资可控性、工期保障及维护透明度方面更具优势，建议作为本工程推荐方案。

6 结论

本文以德兴铜矿泗洲选矿厂 5# 皮带廊厂房结构改造工程为依托，提出“拆除墙”与“加固墙”两种改造方案，运用 PKPM 结构软件进行建模计算，并从结构受力、技术经济、施工风险及长期耐久性 4 个维度进行系统比选，得出以下主要结论：

1）两种改造方案均使上部结构总荷载较改造前大幅降低（方案一下降了 77.47%，方案二下降了 41.34%），柱底轴力减小，对下部粉矿仓的竖向压力显著减轻，有利于结构抗震。柱底剪力虽略有增加，但方案一可通过抗剪键有效传力，方案二经验算壁柱受剪承载力满足要求，均不会引发粉矿仓结构的额外加固，原有结构安全性能未因本次改造而降低。

2）PKPM 计算结果显示，两种方案的门式刚架柱顶位移、钢梁挠度及最大应力比均满足现行规范控制指标，结构安全性能均得到保障。方案二因保留部分砌体墙的侧向约束，变形指标略优于方案一，但方案一各项指标亦在安全范围之内。

3）技术经济对比表明，方案一虽涉及大面积砌体及屋架拆除，钢材消耗量较多，但施工工艺成熟、工序衔接紧密，土建总投资为 110 万元，较方案二（127 万元）节省约 13.4%；方案二砌体加固工序复杂、养护周期长，且需额外支付检测鉴定费用，综合经济性稍逊。

4）施工过程风险控制方面，方案一风险集中于拆除阶段的安全隔离与临时支撑有效性，方案二风险侧重于植筋加固质量控制及对低强砌体的扰动。通过搭设满堂防护脚手架、分轴分段作业及实时监测等措施，两种方案的施工风险均处于可控范围内。

5）耐久性与长期维护成本分析表明，方案一钢结构防腐及屋面系统维护周期明确（8 ~ 10 a 首次大修），维护成本可预测性强；方案二加固面层初期防护性能良好，但内部老旧砌体劣化过程具有隐蔽性，需建立长期健康监测机制，远期维护成本存在一定的

不确定性。

6）综合受力影响、经济投资、施工风险及全寿命周期维护 4 个维度的对比分析，方案一（拆除墙方案）在投资可控性、工期保障及维护管理透明度方面优势更为突出，且对下部粉矿仓影响可控，结构安全性能满足要求，推荐作为本工程的首选改造方案。若因特殊条件限制无法实施大规模拆除，方案二可作为备选，但须配套严格的施工质量控制与长期监测计划。

7）针对业主提出的改造期间不停产要求，建议在冬季组织施工，并在拆除与改造区域搭设满堂脚手架及双层安全网，确保下部皮带安全运行与作业人员安全。

参考文献：

[1] 施澄宇 . 某钢结构厂房加固改造设计工程实践 [J]. 建筑结构，2017，47(20)：94−97.
SHI Chengyu. Engineering Practice on the Structure Strengthening Design for a Steel Structure Workshop[J]. Building Structure，2017，47(20)：94−97.

[2] 吴　涛，万　伟，王开君，等 . 基于施工全过程老旧厂房加固的抗震性能分析 [J]. 工程抗震与加固改造，2024，46(1)：161−168，147.
WU Tao，WAN Wei，WANG Kaijun，et al. Seismic Performance Analysis of Old Factory Building Reinforcement Based on the Whole Construction Process[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting，2024，46(1)：161−168，147.

[3] 张　皓，张　偲，马敬友，等 . 某烧结厂房改扩建设计与分析 [J]. 建筑结构，2023，53(18)：119−123.
ZHANG Hao，ZHANG Cai，MA Jingyou，et al. Design and Analysis of a Sintering Factory Building Reconstruction and Expansion[J]. Building Structure，2023，53(18)：119−123.

[4] 王金花，陈泽赳，何天森 . 消能减震在某文保厂房改造加固中的应用 [J]. 建筑结构，2023，53（增刊 1）：1049−1054.
WANG Jinhua，CHEN Zejiu，HE Tiansen. Application of Energy-Dissipated Design in Reconstruction and Reinforcement of a Cultural Preservation Factory Building[J]. Building Structure，2023，53(S1)：1049−1054.

[5] 袁朋举，孙广宇，徐长彬，等 . 某旧炼钢厂房结构诊治及加固技术 [J]. 建筑结构，2023，53（增刊 2）：1607−1613.
YUAN Pengju，SUN Guangyu，XU Changbin，et al. Diagnosis，Treatment and Strengthening Technology of an Old Steel-Making Plant Structure[J]. Building Structure，2023，53(S2)：1607−1613.

[6] 高志军，段世昌 . 某带夹层门式刚架轻型房屋钢结构厂房加固改造结构设计 [J]. 建筑结构，2023，53（增刊 2）：1576−1581.
GAO Zhijun，DUAN Shichang. Steel Structure Workshop of a Light-Weight Building with Mezzanine Portal Frame Reconstruction and Reinforcement Design[J]. Building Structure，2023，53(S2)：1576−1581.

[7] 董启灏，连兴华，张　季，等 . 沈阳红梅味精厂老发酵厂房加固改造设计 [J]. 建筑结构，2021，51（增刊 1）：1681−1685.
DONG Qihao，LIAN Xinghua，ZHANG Ji，et al. Reinforcement Design of Old Fermentation Workshop in Shenyang Hongmei Monosodium Glutamate Factory[J]. Building Structure，2021，51(S1)：1681−1685.

[8] 黄彬辉 . 外高桥保税区通用厂房由多层改造成高层的结构加固设计与分析 [J]. 建筑结构，2020，50(24)：69−73，90.
HUANG Binhui. Design and Analysis of Structural Reinforcement of General Factory Transformed from Multi-Storey to High-Rise in Waigaoqiao Free Trade Zone[J]. Building Structure，2020，50(24)：69−73，90.

[9] 武　乾，李　娜，胡　鑫，等 . 钢筋混凝土旧工业厂房主体结构的改造加固风险研究 [J]. 中国安全生产科学技术，2019，15(3)：167−173.
WU Qian，LI Na，HU Xin，et al. Research on Reconstruction and Reinforcement Risk of Main Structure of Reinforced Concrete Old Industrial Plant[J]. Journal of Safety Science and Technology，2019，15(3)：167−173.

[10] 郭晓燕 . 某框排架结构加固方案应用研究 [J]. 建筑结构，2023，53（增刊 1）：2006−2009.
GUO Xiaoyan. Analysis of Rebuilding and Reinforcing Methods of Frame Bent Structure[J]. Building Structure，2023，53(S1)：2006−2009.

（责任编辑：姜利民）