

老旧工业厂房改造施工中的结构加固与抗震性能提升技术

侯鹏飞

河南省豫西建设工程有限责任公司 河南 三门峡 472399

摘要：本文聚焦于老旧工业厂房改造施工过程中的核心环节——结构加固与抗震性能提升技术，系统梳理了其面临的典型挑战，深入剖析了结构检测与评估的关键流程，并在此基础上，全面阐述了当前主流的加固技术体系（包括增大截面法、外包钢加固法、碳纤维复合材料加固法、预应力加固法及基础加固技术）及其适用条件。同时，本文重点探讨了基于性能的抗震设计理念在改造工程中的应用，提出了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的多层次设防目标。最后，文章对智能化监测、绿色低碳加固材料等未来发展趋势进行了展望，旨在为同类项目的科学决策与精细化施工提供理论参考与实践指导。

关键词：老旧工业厂房；结构加固；抗震性能；城市更新；改造施工；碳纤维复合材料

引言

21世纪以来，中国城市发展进入以存量提质为核心的内涵式发展阶段。老旧工业厂房作为城市存量空间的重要组成部分，是宝贵的工业文化遗产。在“十四五”规划提出实施城市更新行动的背景下，如何安全、高效、可持续地改造再利用体量巨大但结构陈旧的工业遗存，成为建筑学等领域焦点课题。这些厂房多建于20世纪50至80年代，原始设计服务于单一生产功能，遵循当时较低标准。历经数十年，结构面临自然劣化问题，且抗震设防标准远低于现行规范，存在极大安全隐患。功能置换前，必须解决结构安全尤其是抗震性能不足问题。结构加固与抗震性能提升是改造工程的“基石”，关乎后续使用安全及改造方案可行性等。本文旨在探讨改造施工场景下，如何科学评估既有结构状态并选择适宜加固技术，为工业遗产活化提供技术支撑。

1 老旧工业厂房结构现状与改造挑战

在着手加固之前，必须对老旧工业厂房的结构现状有清晰、全面的认知。其主要特征与改造所面临的挑战可归纳如下：

1.1 设计标准滞后

早期工业厂房的设计依据多为已废止的规范，如《工业与民用建筑抗震设计规范》（TJ11-78）等。这些规范在地震作用计算模型、内力组合方式、构造措施等方面均与现行规范存在显著差异。例如，对罕遇地震的考虑不足，对结构延性、耗能能力的要求几乎空白，导致结构在强震下极易发生脆性破坏。

1.2 结构体系缺陷

典型的老旧工业厂房多采用排架结构（钢筋混凝土柱+屋架）或砖混结构。排架结构横向刚度大，但纵向刚

度弱，且柱顶与屋架的连接多为铰接，整体性差；砖混结构则普遍存在墙体高厚比过大、圈梁和构造柱缺失等问题^[1]。这些先天性的体系缺陷使其在地震中容易产生扭转效应、局部失稳乃至整体倒塌。

1.3 材料性能退化

长期服役导致建筑材料性能严重退化。混凝土结构普遍存在保护层剥落、骨料外露、裂缝开展等现象，内部钢筋因碳化深度超过临界值而发生锈蚀，有效截面面积减小，力学性能大幅下降。砌体结构的砂浆强度随时间推移而降低，砖块本身也可能出现粉化，导致墙体承载力和整体性减弱。

1.4 使用功能变迁带来的新荷载

改造后的使用功能往往与原设计初衷大相径庭。例如，将空旷的厂房改为多层商业或办公空间，会引入大量的楼板、隔墙、设备管线等新增恒荷载和活荷载。这种荷载模式的根本性改变，对原有仅按吊车荷载和屋面荷载设计的结构体系构成了严峻考验，常常需要对柱、基础等关键构件进行承载力复核与加固。

上述问题交织在一起，使得老旧工业厂房的加固改造成为一项高度复杂的系统工程，要求工程师具备跨学科的知识储备和精细化的分析能力。

2 主流结构加固技术及其应用

基于鉴定评估结果，可选择一种或多种加固技术进行组合应用。以下是几种在老旧工业厂房改造中最为常用的技术：

2.1 增大截面加固法

增大截面加固法是一种历史悠久且技术成熟的传统加固手段。其核心原理是在原有混凝土构件，如柱或梁的受力面周围，重新浇筑一层新的混凝土，并配置相应

的受力钢筋，从而有效增大构件的截面尺寸和配筋率，最终达到显著提升其抗弯、抗剪及轴向承载能力的目的。这种方法的优势在于其可靠性高、耐久性好，且所用材料与原结构一致，协同工作性能优异，成本也相对可控。然而，该方法的弊端同样明显，大量的湿作业不仅延长了施工周期，还不可避免地会侵占宝贵的建筑内部净空，这对于追求高大开敞空间感的工业厂房改造项目而言是一个不小的挑战。此外，新增混凝土自重的引入，也会对下部结构及基础带来额外的负担，这在设计时必须予以充分考虑^[2]。因此，增大截面法通常被优先应用于对空间占用不敏感、且承载力需求提升幅度较大的竖向承重构件，如厂房的排架柱和基础的加固中。

2.2 外包钢加固法

外包钢加固法通过在原有混凝土柱的四周包裹型钢（如角钢或钢板），并用缀板将其焊接成一个封闭的钢套箍，从而形成一种组合结构。根据是否在型钢与混凝土之间填充粘结材料，可分为湿式和干式两种。湿式外包钢通过灌注环氧树脂等高性能胶粘剂，使钢材与混凝土能够紧密协同工作，共同承担外部荷载。这种方法的最大优势在于，它能在几乎不增加构件外形尺寸的前提下，实现承载力的大幅提升。更重要的是，外包的钢套箍对核心区域的混凝土形成了强有力的侧向约束，极大地改善了混凝土的受压性能，显著提高了柱子的延性和耗能能力，这对于提升结构的抗震性能至关重要。尽管外包钢加固法具有诸多优点，但其较高的钢材用量导致成本偏高，且外露的钢结构必须进行严格的防腐和防火处理，增加了后期维护的复杂性。在实际工程中，该方法特别适用于那些空间受限、但又亟需提升柱子承载力和抗震性能的改造场景，是处理老旧排架柱问题的有效技术路径。

2.3 碳纤维复合材料（CFRP）加固法

碳纤维复合材料（CFRP）加固技术是近几十年来发展起来的一种新型高效加固方法。它利用高强度、高模量的碳纤维布或板材，通过高性能结构胶粘贴于混凝土构件的受拉区域，利用其卓越的抗拉性能来分担原有钢筋所承受的拉力，从而有效提高构件的抗弯和抗剪承载力。CFRP加固法最突出的优点是其自重极轻，几乎不会给原结构增加任何额外负担，这对于老旧厂房这类对自重敏感的结构尤为重要。同时，其施工过程多为干作业，操作便捷快速，对原有建筑的干扰极小，且能完美保留工业建筑粗犷、质朴的原始风貌，不影响内部空间的净高，因此在文化保护类改造项目中备受青睐^[3]。然而，该技术也存在一些局限性，例如材料本身的成本较

高，防火性能较差（高温下会迅速丧失强度），对混凝土基面的平整度和清洁度要求极为苛刻，且在极端情况下可能发生界面剥离的脆性破坏模式。尽管如此，凭借其独特的优势，CFRP已被广泛应用于梁、板的抗弯加固以及柱子的环向包裹以替代传统箍筋，成为现代结构加固技术体系中不可或缺的一员。

2.4 预应力加固法

预应力加固法是一种主动式的加固策略，其核心思想是通过在结构外部施加预应力，人为地在结构内部产生一个与外部荷载效应相反的内力场，从而达到卸载、控制变形和裂缝发展的目的。在老旧厂房改造中，通常采用张拉高强度钢绞线或预应力碳纤维板的方式，在大跨度的屋架或吊车梁下方形成一个反拱效应。这种方法不仅能有效提高构件的刚度和承载力，更能主动改善其受力状态，尤其适用于那些因长期服役已产生较大挠度或裂缝的水平承重构件。相较于被动加固，预应力加固的效果更为直接和显著。不过，该技术的实施对施工精度要求极高，复杂的锚固系统设计是其成败的关键，同时还需要考虑预应力随时间发生的松弛和损失问题，这对长期性能的预测提出了更高要求。因此，预应力加固法常被用于对结构性能有特殊要求或跨度较大的关键构件加固，有时也用于整体结构的托换，以支撑新增的夹层楼板。

2.5 基础加固技术

上部结构的加固往往伴随着使用功能的改变和荷载的显著增加，这使得原有的基础可能无法满足新的承载和变形要求，因此基础加固是整个改造工程中不可忽视的一环。常用的基础加固技术主要包括加大基础底面积、桩基托换和注浆加固等。加大基础底面积是最直观的方法，即在原独立基础或条形基础的周围增设混凝土扩大头，通过增大与地基土的接触面积来分散压力。当浅层地基土承载力不足或沉降难以控制时，则可采用桩基托换技术，在原基础下方静压或植入微型桩，将部分甚至全部上部荷载传递至更深、更稳定的持力层。对于地基土本身较为松散的情况，还可以采用注浆加固，通过向土体中注入水泥浆或化学浆液，填充孔隙，胶结颗粒，从而提高地基的整体强度和密实度。基础加固方案的选择需综合考虑地质条件、上部荷载增量、施工空间及对周边环境的影响，是一项需要岩土工程与结构工程紧密结合的复杂工作。

3 抗震性能提升的核心策略

3.1 基于性能的抗震设计理念

现代抗震设计已从传统的“强度设防”理念转向更

为先进和理性的“基于性能的抗震设计”（Performance-Based Seismic Design, PBSD）。这一理念的核心在于明确结构在不同水准地震作用下的预期性能目标，而非仅仅满足某一固定的安全系数。具体到老旧厂房改造工程中，应确立“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准设防目标。这意味着，在遭遇低于本地区设防烈度的小震时，结构应基本处于弹性状态，不出现损伤；在遭遇设防烈度的中震时，允许结构出现可修复的非结构性或轻微结构性损伤；而在遭遇罕遇的大震时，结构虽可能遭受严重破坏，但必须保证整体稳定，不发生倒塌，为人员疏散赢得宝贵时间。这种分层次、有目标的设计思路，使得加固方案更具针对性和经济性，避免了过度加固或加固不足的问题。

3.2 提升结构整体性

大量震害调查表明，老旧工业厂房在地震中失效的主要原因之一是结构“散”，即各个构件之间缺乏有效的连接，无法形成一个协同工作的整体来抵抗水平地震力。因此，提升结构的整体性是抗震加固的首要任务。针对排架结构纵向刚度薄弱的问题，应在屋架两端或适当位置增设水平支撑或柱间支撑，将原本孤立的单榀排架连接成一个空间受力体系，确保水平地震力能够有效地在各榀框架间传递和分配^[4]。对于采用砖砌体作为围护墙的厂房，必须按现行规范要求增设钢筋混凝土圈梁和构造柱，并通过可靠的拉结筋将墙体与主体排架柱牢固连接，形成封闭的“盒子”效应，防止墙体在地震中发生平面外倒塌，从而保护内部人员和主体结构的安全。

3.3 改善构件延性

延性是衡量结构在保持承载力前提下发生非弹性变形能力的关键指标。高延性的结构能够在强震中通过塑性铰的形成和发展，耗散大量的地震输入能量，从而避免发生突然的、灾难性的脆性破坏。在老旧厂房的抗震加固中，改善构件延性是重中之重。对于作为主要抗侧力构件的排架柱，应重点加强其柱端（即潜在的塑性铰区域）的约束。通过外包钢、CFRP环向包裹或在增大截面时配置高体积配箍率的螺旋箍筋等方式，可以有效约束核心混凝土，延缓其压溃，显著提高柱子的变形能力和耗能能力。此外，还应遵循“强柱弱梁”的抗震设

计原则，通过对柱子进行有针对性的加固，确保在地震作用下，塑性铰优先出现在延性更好、修复更容易的梁端，而不是发生在一旦破坏就可能导致结构连续倒塌的柱端。

3.4 增设消能减震装置

对于一些具有重要历史价值、或改造后使用功能对安全性和舒适性有极高要求的工业厂房项目，可以在主体结构加固的基础上，进一步考虑增设消能减震装置。这类装置，如金属屈服阻尼器、黏滞阻尼器或摩擦阻尼器等，被战略性地布置在结构的特定位置。当地震发生时，这些装置会率先进入非弹性工作状态或产生阻尼力，主动地、大量地耗散地震能量，从而显著减小传递到主体结构上的地震作用。虽然增设消能减震装置会增加一定的初期投资，但它能极大地提升建筑的抗震韧性，减少主体结构的损伤，缩短震后修复时间，从长远来看具有良好的经济效益和社会效益。

4 结语

老旧工业厂房改造再利用是城市可持续发展重要路径，结构加固与抗震性能提升是保障其安全可行的核心技术。本文系统论述了从现状评估、技术选型到抗震提升策略的全过程，通过科学检测鉴定，结合多种加固技术优势，融入性能抗震设计理念，能让老旧厂房满足现代建筑安全与功能需求。展望未来，该领域将呈智能化（嵌入传感器构建监测系统，实时监控结构性能）、绿色化（研发应用低碳环保新型加固材料）两大趋势。唯有如此，才能守护城市历史文脉，注入未来安全与活力。

参考文献

- [1]丛宇,褚云朋,古松.旧工业厂房加固改造与抗震性能研究[J].施工技术,2020,49(21):7-11.
- [2]武乾,黄太兴,孙敏,等.钢筋混凝土旧工业厂房结构加固方案优选[J].运筹与管理,2022,31(02):224-230.
- [3]王浩.旧工业厂房主动加固综合施工技术[J].广州建筑,2021,49(03):12-15.
- [4]武乾,李娜,王力,等.钢筋混凝土旧工业厂房主体改造加固的风险耦合研究[J].安全与环境学报,2020,20(05):1661-1667.