

钢结构加固既有混凝土框架结构的力学性能及抗震性能研究

陈超凡

福建技术师范学院，福建福州，350000；

摘要：既有混凝土框架结构在长期使用过程中，易受荷载变化、环境侵蚀及抗震标准提升等因素影响，力学性能与抗震性能逐渐衰减，难以满足现行使用与安全要求。钢结构凭借强度高、延性好、施工便捷等优势，已成为既有混凝土框架结构加固的优选方案之一。本文基于既有混凝土框架结构的加固需求，系统梳理钢结构加固的常用技术类型，通过理论分析与实例验证相结合的方式，深入探讨钢结构加固对混凝土框架结构力学性能（包括承载力、刚度、延性等）和抗震性能（包括抗震承载力、耗能能力、位移响应等）的影响规律，揭示钢结构加固的作用机理，最后提出钢结构加固施工过程中的关键控制要点与优化建议，为既有混凝土框架结构的加固改造工程提供理论参考与技术支撑。

关键词：钢结构加固；既有混凝土框架；抗震性能；加固技术

DOI：10.64216/3080-1508.25.11.072

1 引言

1.1 研究背景与意义

混凝土框架结构在我国建筑领域应用广泛，但大量既有建筑因建造标准偏低、使用年限较长或抗震规范升级等原因，力学与抗震性能衰减明显，存在安全隐患，加固改造需求迫切。地震灾害经验表明，此类结构易在地震中发生梁柱开裂、倒塌等破坏，而钢结构凭借强度高、延性好、施工便捷等优势，成为该类结构加固的优选方案。开展钢结构加固后的性能研究，对保障建筑安全、延长使用寿命具有重要理论与工程价值。

与增大截面法等传统加固技术相比，钢结构加固对原结构扰动小、耗能能力提升显著，能有效改善混凝土框架的承载与抗震性能。因此，深入探究其加固机理与性能影响规律，优化设计施工方案，是当前土木工程领域的重要研究方向。

1.2 国内外研究现状与研究内容

国外较早开展钢结构加固混凝土结构研究，欧美侧重承载力提升设计，日本聚焦节点加固与耗能体系开发；国内相关研究虽逐步深入，但在加固协同机理、适用条件梳理等方面仍有不足。本文核心研究内容包括：梳理常用钢结构加固技术特性，探究其对混凝土框架力学与抗震性能的影响规律，揭示加固机理，提出设计施工优化建议。技术路线以文献梳理为基础，结合模型试验与数值模拟开展研究。

2 钢结构加固既有混凝土框架的常用技术

结合加固部位、机理及施工方式，钢结构加固技术可分为四大类，各有其特性与适用场景，具体如下：

2.1 钢构外包加固技术

钢构外包加固通过钢板、型钢外包混凝土梁柱，借助粘结剂或锚栓实现钢混协同工作，分为全外包与局部外包两类，前者适用于构件承载力严重不足，后者针对梁端、柱端等薄弱部位。该技术加固效果显著、施工便捷，能有效提升构件抗剪抗弯能力与延性，但存在钢材易腐蚀、后期维护成本高及增加结构自重的问题。

钢构外包加固技术具有加固效果显著、施工便捷、对原结构扰动小等优点，能够有效提升混凝土构件的抗压、抗弯、抗剪承载力，同时还能改善构件的延性和耗能能力。然而，该技术也存在一些局限性，如钢材易受腐蚀、后期维护成本较高，且外包钢材会增加结构的自重，对结构的基础产生一定的附加荷载。

2.2 钢结构支撑加固技术

钢结构支撑加固通过在框架内外部设置交叉、斜向等八字支撑传递荷载，减小结构内力与变形，适用于整体刚度不足、抗震性能较差的多层或高层框架。其施工周期短、成本适中，对原结构使用功能影响小，可灵活布置，但支撑构件会占用部分建筑空间。

钢结构支撑加固技术具有施工周期短、加固成本相对较低、对原结构使用功能影响小等优点，能够有效分担框架结构的水平荷载，减小结构在地震作用下的侧移，提升结构的整体抗侧刚度。此外，钢结构支撑还可以根据结构的受力特点进行灵活布置，能够适应不同结构形式的加固需求。但其缺点是支撑构件会占用一定的建筑空间，可能会对建筑的使用功能产生一定的影响。

2.3 钢-混凝土组合加固技术

钢-混凝土组合加固将钢结构与混凝土有机结合，常见形式为钢骨混凝土与钢管混凝土加固，兼具两者优势，承载力与抗震性能优异，适用于高要求的加固场景。

但该技术施工工艺复杂、对人员技术要求高，加固成本较高，应用范围受限。

钢-混凝土组合加固技术兼具钢结构和混凝土结构的优点，具有承载力高、刚度大、延性好、抗震性能优异等特点，适用于对承载力和抗震性能要求较高的既有混凝土框架结构加固。但该技术施工工艺相对复杂，对施工人员的技术水平要求较高，且加固成本相对较高，限制了其在部分工程中的应用。

2.4 节点钢结构加固技术

节点是框架结构核心，地震中易率先破坏，节点钢结构加固通过外包钢板、增设钢牛腿或替换钢节点等方式增强节点承载力与延性，避免脆性破坏。该技术针对性强、加固效果好，但施工难度大，需严格控制施工质量。

节点钢结构加固技术具有针对性强、加固效果显著等优点，能够有效提升节点的抗剪承载力和延性，防止节点出现脆性破坏。但该技术施工难度较大，对节点部位的处理要求较高，需要严格控制施工质量，否则会影响加固效果。

3 钢结构加固对框架力学性能的影响

3.1 试验设计与方案

以某3层混凝土框架为原型，按1:2比例制作缩尺模型（原结构混凝土强度C30，钢筋HRB335级），设未加固对照组与“钢构外包柱+钢结构交叉支撑”加固试验组。采用顶层梁端静力分级加载（速度2mm/min，每级持荷10min），通过位移计与应变片采集变形、应变数据，分析承载力、刚度、延性等指标。

试验采用静力加载方式，加载点设置在框架结构的顶层梁端，加载速度为2mm/min，采用分级加载制度，每级加载后持荷10min，直至结构出现明显破坏。试验过程中，通过位移计测量结构的顶点位移和构件的变形，通过应变片测量梁、柱及加固钢材的应变，记录不同加载阶段的荷载-位移曲线和应变变化曲线，分析结构的承载力、刚度、延性等力学性能指标。

3.2 承载力提升规律

试验表明，钢结构加固可显著提升框架承载力：对照组极限承载力120kN，加固组达280kN，提升幅度133.3%；屈服承载力提升125.0%。核心原因在于钢结构强度高，能有效分担荷载并与混凝土协同工作，避免构件过早破坏，且交叉支撑可优化水平荷载传递路径，进一步提升承载效率。

对比分析可知，钢结构加固后，框架结构的极限承载力提升了133.3%，屈服承载力提升了125.0%。这主要是因为钢结构具有较高的强度，能够有效分担混凝土

构件的荷载，同时钢材与混凝土协同工作，避免了混凝土构件过早出现破坏，从而显著提升了结构的整体承载力。此外，钢结构交叉支撑能够有效传递水平荷载，减小梁、柱的内力，进一步提升了结构的承载力。

3.3 刚度变化规律

刚度方面，对照组初始刚度 5.2×10^4 kN/m、屈服后刚度 1.8×10^4 kN/m，加固组分别提升至 8.6×10^4 kN/m、 3.5×10^4 kN/m，增幅达65.4%、94.4%。这得益于钢构外包对混凝土变形的约束作用，以及交叉支撑对结构整体抗侧刚度的强化，同时钢混良好粘结避免了变形不协调导致的刚度衰减。

由此可见，钢结构加固后，框架结构的初始刚度提升了65.4%，屈服后刚度提升了94.4%。这是因为钢构外包加固能够有效约束混凝土构件的变形，增强构件的抗变形能力，而钢结构交叉支撑能够显著提升结构的整体抗侧刚度，减小结构在荷载作用下的侧移。同时，钢材与混凝土之间的粘结作用确保了两者协同工作，避免了因变形不协调导致的刚度下降，从而有效提升了结构的整体刚度。

3.4 延性改善效果

延性系数（极限位移/屈服位移）对照组为1.875，加固组提升至2.667（增幅42.2%）。钢结构良好的延性可吸收大量能量，外包钢能抑制混凝土剥落开裂，配合交叉支撑的塑性变形，有效改善了结构的塑性变形能力与耗能特性，避免脆性破坏。

对比分析可知，钢结构加固后，框架结构的延性系数提升了42.2%，表明钢结构加固能够显著改善既有混凝土框架结构的延性。这主要是因为钢结构具有良好的延性，在荷载作用下能够产生较大的塑性变形，吸收大量的能量，同时钢构外包加固能够有效约束混凝土的剥落和开裂，避免构件出现脆性破坏，从而提升了结构的整体延性。此外，钢结构交叉支撑在变形过程中能够产生一定的塑性变形，进一步增强了结构的耗能能力和延性。

4 钢结构加固对框架抗震性能的影响

4.1 拟静力试验设计

采用上述缩尺模型开展水平低周反复拟静力试验，以屈服位移为控制增量，屈服前每级循环1次、屈服后3次，直至承载力降至极限值的85%。通过记录滞回曲线、骨架曲线等指标，分析加固对结构抗震性能的改善效果。

4.2 滞回曲线与骨架曲线分析

滞回曲线显示，对照组呈“捏拢”状、滞回环面积小，耗能能力差，源于反复荷载下混凝土裂缝扩展、钢

混粘结退化；加固组滞回曲线呈饱满“梭形”，耗能能力大幅提升，因钢结构可通过塑性变形吸收地震能量，且能抑制混凝土损伤发展，交叉支撑的塑性屈服进一步强化了耗能效果。

钢结构加固试验组模型的滞回曲线呈饱满的“梭形”，滞回环面积显著增大，表明结构的耗能能力大幅提升。这是因为钢结构具有良好的延性和耗能能力，在反复荷载作用下能够产生较大的塑性变形，吸收大量的地震能量，同时钢材与混凝土协同工作，有效抑制了混凝土裂缝的扩展和剥落，避免了结构刚度的快速退化。此外，钢结构交叉支撑在反复荷载作用下能够产生塑性屈服，进一步增大了滞回环面积，提升了结构的耗能能力。

骨架曲线对比表明，加固组承载力显著高于对照组，且屈服后下降平缓，说明其不仅抗震承载力提升，还具备良好的塑性变形能力，可避免地震中突发破坏。

4.3 耗能能力与位移延性分析

耗能能力上，加固组最大位移时滞回环面积达 $350\text{kN}\cdot\text{mm}$ ，较对照组($120\text{kN}\cdot\text{mm}$)提升191.7%；位移延性系数同步提升42.2%，表明加固后结构抗倒塌能力显著增强，能为地震中人员疏散争取时间。

位移延性是反映结构在地震作用下塑性变形能力的重要指标，延性越好，结构在地震作用下的抗倒塌能力越强。试验结果显示，未加固对照组模型的位移延性系数为1.875，钢结构加固试验组模型的位移延性系数为2.667，加固后结构的位移延性提升了42.2%。这表明钢结构加固能够有效改善既有混凝土框架结构的塑性变形能力，提升结构的抗倒塌性能，确保结构在强烈地震作用下不会发生突然倒塌，为人员疏散和财产转移争取时间。

4.4 抗震作用机理分析

钢结构加固的抗震作用机理可概括为四点：一是荷载分担，钢结构承接部分水平与竖向荷载，降低混凝土构件内力；二是约束强化，外包钢抑制混凝土裂缝与剥落，提升其强度与延性；三是耗能增效，钢结构塑性变形与支撑屈服共同耗散地震能量；四是稳定提升，增强结构整体抗侧刚度，减小地震侧移。

5 施工控制要点与设计优化建议

5.1 施工关键控制要点

施工质量直接决定加固效果，需严控六大关键环节：一是前期检测评估，全面排查混凝土强度、钢筋锈蚀等问题，精准制定加固方案；二是材料质量管控，确保钢材、粘结剂等符合规范，进场前严格检验；三是基层处理，清理构件表面杂质并修补裂缝，保障钢混粘结质量；

四是连接施工，控制粘结剂涂抹与锚栓锚固质量，确保连接牢固；五是防腐处理，及时除锈涂装，保证钢结构耐久性；六是施工监测，实时跟踪结构变形与内力，异常时立即停工处置。

5.2 加固设计优化建议

设计优化需兼顾效果与经济性：一是按需选技术，构件承载力不足用外包或组合加固，整体刚度不足用支撑加固，节点薄弱重点强化节点；二是优化参数，通过模拟与试验确定钢材截面、布置方式及连接件参数，保障协同工作；三是考虑二次受力，合理匹配加固钢材受力状态；四是融合耗能设计，增设耗能支撑或节点提升抗震性能；五是平衡经济实用，选用高性价比材料与工艺，减少对建筑使用功能的影响。

6 结论与展望

6.1 主要结论

本文通过理论分析、模型试验与数值模拟，得出核心结论：一是四类钢结构加固技术各有适用场景，可根据结构缺陷精准选用；二是加固后结构力学性能显著提升，极限承载力、初始刚度、延性系数分别提升133.3%、65.4%、42.2%；三是抗震性能大幅改善，耗能能力提升191.7%，位移延性同步优化，抗倒塌能力增强；四是加固机理源于荷载分担、约束强化、耗能增效与稳定提升的协同作用；五是施工需严控检测、材料等关键环节，设计应注重技术匹配与参数优化。

6.2 未来展望

未来可从四方面深化研究：一是探究加固结构在复杂荷载组合下的性能演化规律；二是开发高性能防腐钢材、智能加固体系等新型技术与材料；三是积累工程案例，完善设计施工规范；四是优化数值模拟方法，建立加固效果评估与寿命预测模型，为工程实践提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1]许焱.装配式梁-柱钢结构全螺栓连接节点的力学性能和抗震性能研究[J].四川水泥,2024(7):94-96.
- [2]张大英,叶逸凡,王树明,等.混凝土剪力墙延性连接装配技术及抗震性能研究[J].混凝土,2024(5):142-148.
- [3]高啸宇.高层建筑钢结构-钢筋混凝土组合结构施工要点研究[J].2025.

作者简介：陈超凡（1996.11—），男，汉族，籍贯：福建莆田，本科，助理工程师，研究方向：建设工程管理。