

建筑钢结构工程 加固新技术

成勃 姜丽萍 崔珑 著

中国建筑工业出版社

建筑钢结构工程加固新技术

成勃 姜丽萍 崔珑 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑钢结构工程加固新技术/成勃,姜丽萍,崔珑著. —北京: 中国建筑工程出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-112-20924-8

I. ①建… II. ①成… ②姜… ③崔… III. ①钢结构—加固 IV. ①TU391.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 156665 号

本书在分析对比国内外关于钢结构工程加固的研究现状的基础上,对预应力 FRP 板加固钢结构梁、钢套管加固受压杆件、粘贴 U 型围套加固 H 型钢柱等建筑钢结构工程加固新技术进行了详细研究,分析了受力特征、加固效果,总结了各类加固方法的实用计算公式,并提出了“考虑加固截面相对长度影响的等效刚度法”的概念,可用于部分截面加固后构件的整体稳定性、受弯作用下挠度等方面的计算。

本书可供广大建筑工程技术人员及土木工程专业的教师和研究生参考。

责任编辑:张 明 李翰伦

责任设计:王国羽

责任校对:王 烨 焦 乐

建筑钢结构工程加固新技术

成勃 姜丽萍 崔珑 著

*

中国建筑工程出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京锋尚制版有限公司排版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7 $\frac{3}{4}$ 字数: 190 千字

2017 年 12 月第一版 2017 年 12 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-20924-8

(30583)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

记得 1990 年代初上大学的时候,任课老师在讲授钢结构课程时曾不无遗憾地说:钢结构是个好东西,可惜咱们国家钢产量偏低,还是要限制使用。如今我国钢产量迅猛提升,再加上大规模的经济建设,为建筑钢结构的发展提供了物质基础,各类形式新颖、造型美观、富有现代感的工业厂房、体育场馆、会展中心、候机大厅、大剧院、博物馆等建筑钢结构工程如雨后春笋般涌现。然而,随着建筑钢结构工程数量飞速增长,一些钢结构工程的安全问题也逐渐暴露出来,钢结构安全事故时有发生,给人民生命财产安全造成了巨大的损失。建筑钢结构的加固与修复已经发展成为一个全新领域。

相对于混凝土结构和砌体结构的加固技术,我国的建筑钢结构加固技术略显滞后,目前建筑钢结构方面的加固规范是二十年前冶金部发布的《钢结构检测评定及加固技术规程》YB9257-96 和中国建设工程标准化协会发布的《钢结构加固技术规范》CECS77:96。当前的钢结构加固技术无法适应当前钢结构这种快速发展、隐患较多的现状,研究钢结构工程加固新技术势在必行。

本书在分析对比国内外关于钢结构工程加固的研究现状的基础上,对预应力 FRP 板加固钢结构梁、钢套管加固受压杆件、粘贴 U 型围套加固 H 型钢柱等建筑钢结构工程加固新技术进行了详细研究,分析了受力特征、加固效果,总结了各类加固方法的实用计算公式,并提出了“考虑加固截面相对长度影响的等效刚度法”的概念,可用于部分截面加固后构件的整体稳定性、受弯作用下挠度等方面的计算。

本书的部分研究成果受到国家重点研发计划(National key R&D Program of China, 2017YFC0806100)的资助,同时也列入了住房和城乡建设部科研计划(2013-K3-25)。

本书在介绍最新研究成果的同时,也详细介绍了本项技术研究的思路和方法,可供广大工程技术人员以及土木工程专业的教师和研究生参考。

限于作者水平,本书难免存在各种问题,恳请广大读者提出宝贵意见。

目 录

第一章 钢结构工程加固技术综述	001
1.1 钢结构工程加固的意义	003
1.2 加固技术的总体思路	005
1.2.1 提高结构抗力法	006
1.2.2 减小作用效应法	008
1.3 主要研究内容及研究方法	011
1.3.1 研究方向	011
1.3.2 试验方案	011
第二章 材料性能检验	013
2.1 钢材	015
2.1.1 试验过程	015
2.1.2 试验数据	016
2.2 FRP 板	017
2.2.1 FRP 板材的分类与选用	017
2.2.2 FRP 试验板材的制备	017
2.2.3 测试结果	017
2.3 结构胶	018
2.3.1 基本情况	018
2.3.2 测试结果	019
第三章 FRP 加固钢梁抗弯性能试验研究	021
3.1 绪论	023
3.1.1 FRP 加固钢结构的研究现状	023
3.1.2 本章的研究内容	024
3.2 受弯承载力试验	024
3.2.1 钢结构试件的加固和施工	024
3.2.2 试验方案	028
3.2.3 试验结果	031

3.3	钢梁抗弯性能计算	038
3.3.1	加固后钢梁抗弯破坏机理	038
3.3.2	理论计算	039
3.4	有限元计算	045
3.4.1	有限元模型的建立	045
3.4.2	未加固梁受力计算	046
3.4.3	非预应力 FRP 板加固梁受力计算	047
3.4.4	预应力 FRP 板加固梁受力计算	048
3.5	分析与小结	050
3.5.1	试验结果、本章提出公式及有限元计算对比	050
3.5.2	小结	051

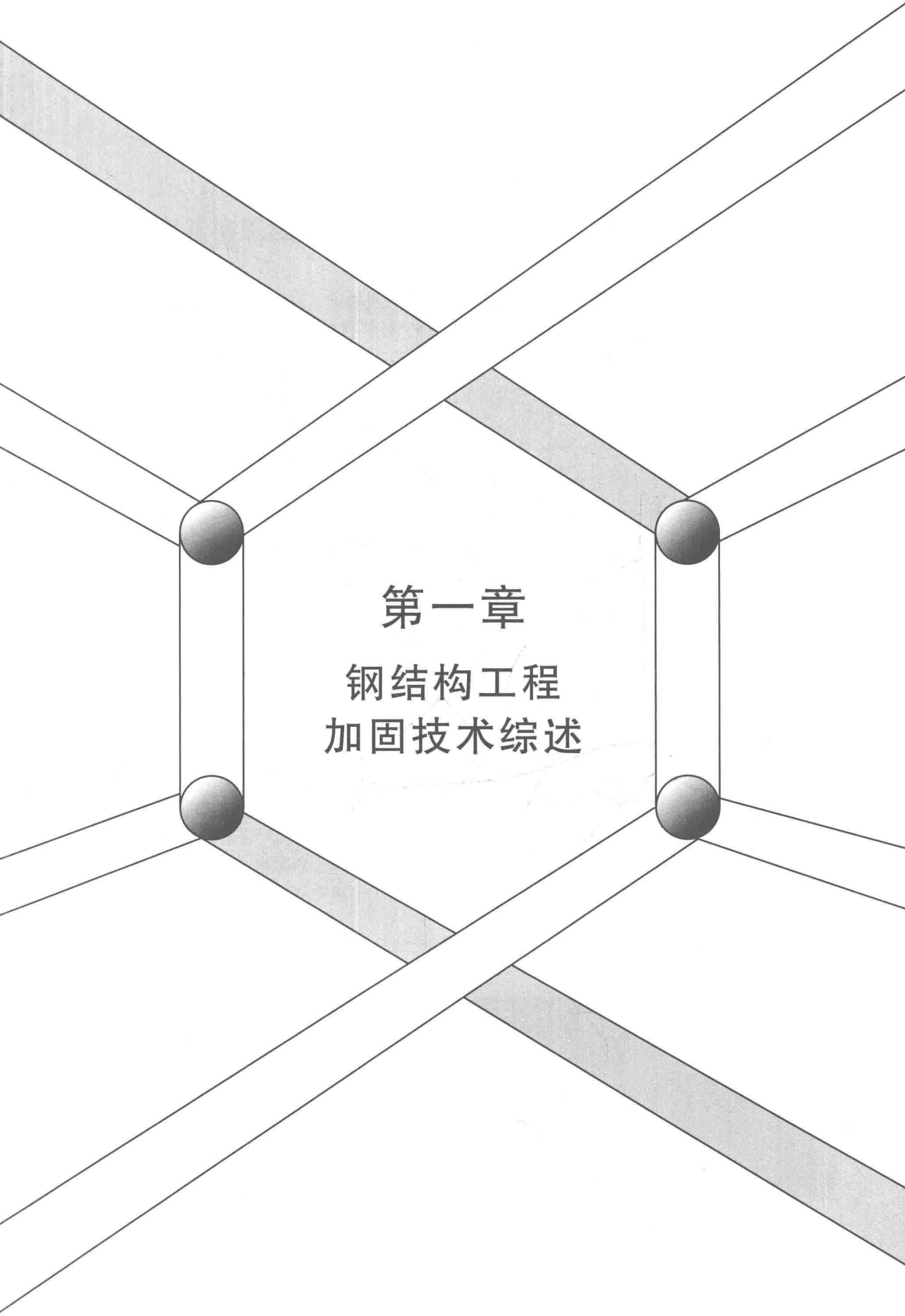
第四章 网架结构杆件的加固技术研究 053

4.1	绪论	055
4.1.1	网架结构杆件加固的必要性	055
4.1.2	研究现状	055
4.1.3	本章的研究内容	056
4.2	理论分析	056
4.2.1	杆件加固方案与计算理论选择	056
4.2.2	间断焊接采用等效刚度法计算	058
4.3	试验研究	062
4.3.1	加固方案	062
4.3.2	试验情况	064
4.4	有限元计算	070
4.4.1	有限元模型的建立	070
4.4.2	计算结果分析	071
4.5	分析与小结	076
4.5.1	承载力的理论计算	076
4.5.2	理论计算、试验数据和有限元模拟结果的对比	078
4.5.3	小结	079

第五章 H 型钢柱的加固技术研究 081

5.1	绪论	083
5.1.1	型钢柱加固的必要性	083
5.1.2	研究现状	083
5.1.3	本章的研究内容	084
5.2	理论分析	084
5.2.1	型钢柱加固原理	084
5.2.2	计算模型与参数取值	087

5.3	试验研究	087
5.3.1	加固方案	087
5.3.2	试验情况	089
5.4	有限元计算	094
5.4.1	有限元模型的建立	094
5.4.2	计算工况	095
5.4.3	计算结果分析	095
5.5	分析与小结	100
5.5.1	承载力计算	100
5.5.2	理论计算、试验数据和有限元模拟结果的对比	103
5.5.3	小结	103
第六章	创新点和结论	105
6.1	预应力 FRP 板加固钢梁技术	107
6.1.1	FRP 加固钢梁抗弯性能试验研究	107
6.1.2	预应力 FRP 板加固钢梁抗弯性能的实用计算公式	107
6.1.3	小结	107
6.2	钢套管加固受压杆件技术	108
6.2.1	试验结论	108
6.2.2	计算公式的参数选择	108
6.2.3	考虑加固截面相对长度影响的等效刚度法	109
6.2.4	二次受力情况	109
6.3	型钢柱加固技术	109
6.3.1	试验结论	109
6.3.2	实用计算公式	110
6.3.3	粘贴 U 型围套的方法加固 H 型钢柱	110
6.4	相关专利技术	110
6.4.1	一种加固用钢结构空间体系	110
6.4.2	一种梁板用临时卸荷结构体系	111
	参考文献	112
	后 记	116



第一章

钢结构工程 加固技术综述

1.1 钢结构工程加固的意义

随着经济与技术的发展,我国钢产量大大提高,由新中国成立初期的年产几百万吨提高到如今11亿吨以上(图1-1)。近年来,随着加入WTO、2008奥运项目的启动、西部大开发、一带一路建设等一系列的大事件,在客观上促进了我国钢结构领域与国际的沟通,促进了钢结构的飞速发展。

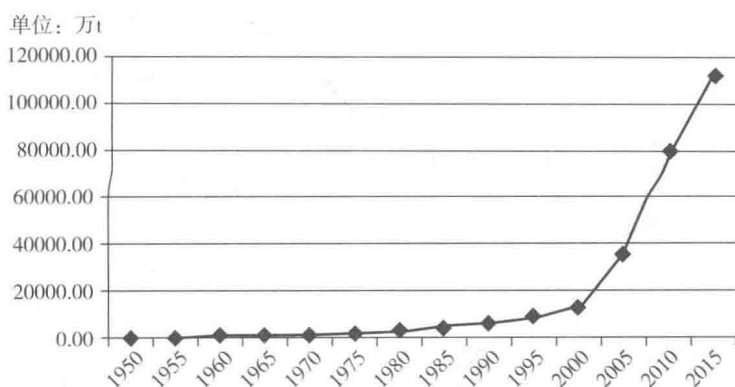


图 1-1 我国历年钢产量

建筑钢结构具有自重轻、强度高、塑性及韧性好、抗震性能好、便于工业化生产、节能环保、可循环使用等诸多优点,被誉为21世纪的“绿色建筑”之一。随着我国城镇化建设的发展,国内建筑钢结构工程数量飞速增长,建筑钢结构已广泛应用于工业建筑与民用建筑中(图1-2~图1-4)。

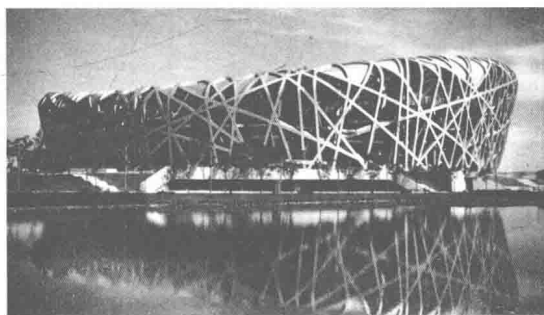


图 1-2 鸟巢

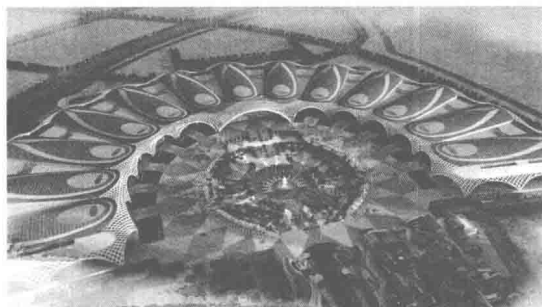


图 1-3 昆明滇池会展中心



图 1-4 高层建筑群

但是由于各种各样的原因, 钢结构工程也可能出现各种缺陷和损伤:

(1) 使用条件发生变化, 结构荷载增加。钢结构, 特别是轻钢结构自重轻, 超载能力差, 容易发生承载力或刚度不足的事故 (图 1-5)。为减少此类事故的发生, 在《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022-2015 中规定了门式刚架轻型房屋钢结构基本雪压按《建筑结构荷载规范》GB 50009 规定的 100 年重现期的雪压采用。

(2) 意外自然灾害对结构的损伤。例如 2008 年 1 月至 2 月, 中国南方多省遭受低温、冰冻灾害影响, 许多输电塔及通信塔因冰冻而严重破坏 (图 1-6、图 1-7)。

(3) 由于化学物质的侵蚀而产生腐蚀以及电化学腐蚀致使钢结构构件截面削弱 (图 1-8)。

(4) 设计、生产、施工中的缺陷 (图 1-9~图 1-13)。

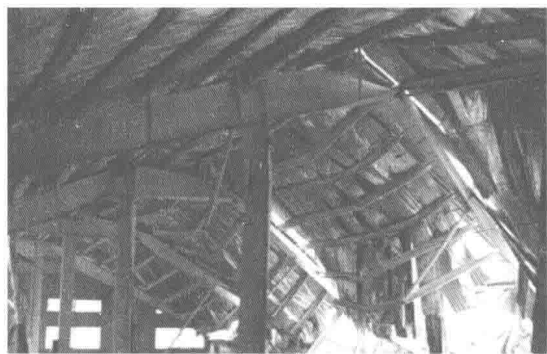


图 1-5 某钢结构被积雪压塌

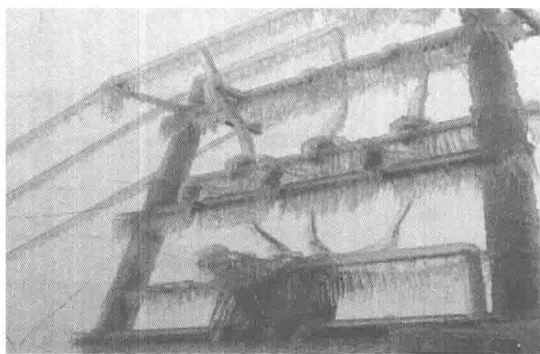


图 1-6 输电塔上冰冻情况

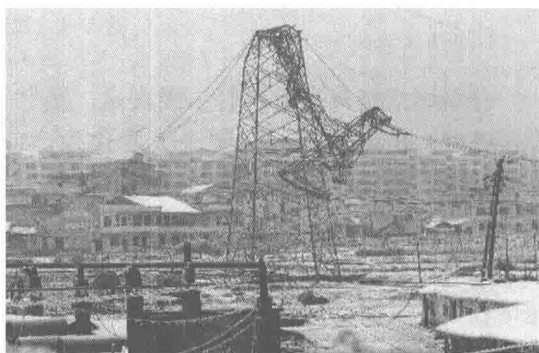
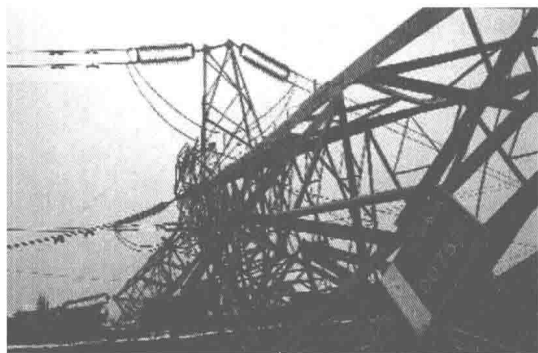


图 1-7 输电塔倒塌情况

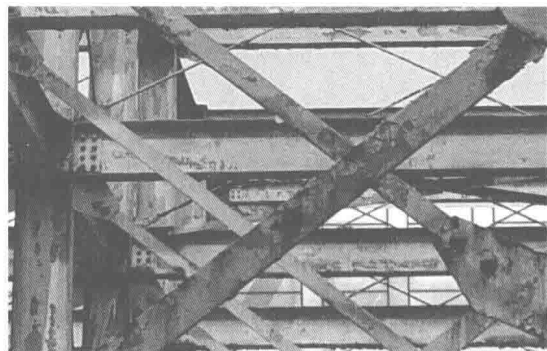


图 1-8 钢结构锈蚀情况



图 1-9 柱中心与支座中心偏移

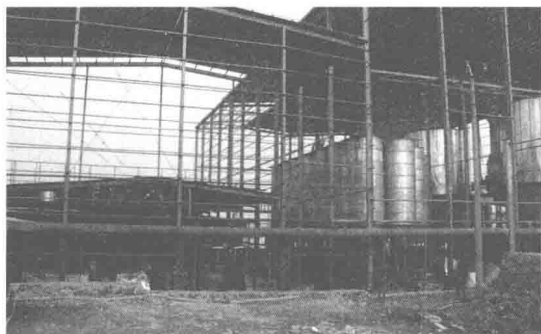


图 1-10 柱截面过小, 柱间支撑设置不当



图 1-11 私自取消螺栓球节点

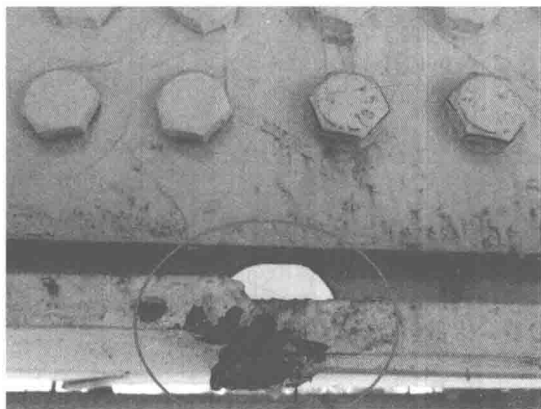


图 1-12 钢梁翼板竖向偏移, 焊缝未融合



图 1-13 焊缝未焊透、气孔

钢结构工程的缺陷和损伤将引起结构宏观力学性能的劣化, 使结构的强度、刚度或稳定性不满足要求, 严重的将导致工程事故。钢结构损伤具有局部性和多发性特点, 这些结构不可能在出现损伤时就立即退役。对损伤构件进行更换将造成极大的浪费, 而且会影响结构的正常使用。

大量钢结构工程存在技术改造和加固的要求, 寻求经济高效的钢结构加固技术既是建筑工程领域亟待解决的技术问题, 也是一个关系到社会可持续发展的问題。

1.2 加固技术的总体思路

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001, 当仅考虑作用效应 S 和结构抗力 R 两个基本变量时, 结构按极限状态设计应符合式 (1-1) 要求:

$$R - S \geq 0 \quad (1-1)$$

据此, 与混凝土结构和砌体结构的加固一样, 钢结构加固的主要思路有提高结构抗力和减小作用效应及两种方法的结合。

从加固设计的角度考虑, 提高结构抗力法主要是对构件截面和连接进行加固, 减小作用效应法主要是改变荷载分布、传力途径、节点性质、边界条件、增设附加杆件和支撑、

施加预应力、考虑空间协同作用等。

1.2.1 提高结构抗力法

提高结构抗力法是在局部或沿构件全长进行补强，主要方法有：加大截面法、连接的加固和加固件的连接、裂纹的修复与加固等。

1.2.1.1 加大截面法

加大截面法是通过加大构件的截面积来提高构件的刚度和承载能力。对于构件不同的受力特征，其加大截面的形式也不尽相同。受拉、受压、受弯构件的加固形式分别如图 1-14~图 1-16 所示。

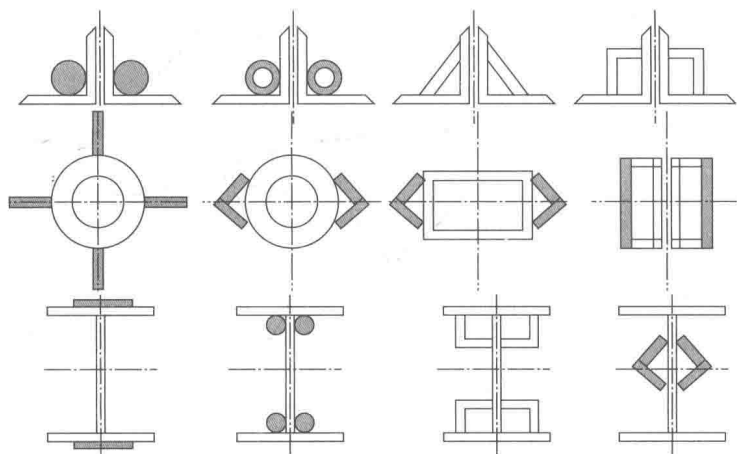


图 1-14 受拉构件截面加固形式

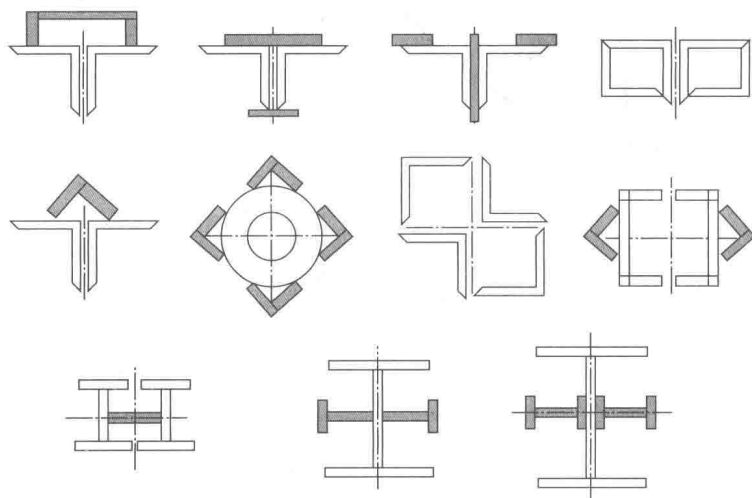


图 1-15 受压构件截面加固形式

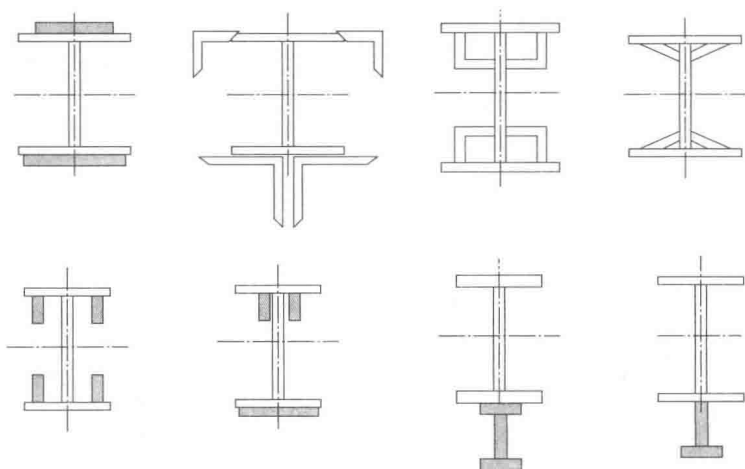


图 1-16 受弯构件截面加固形式

采用加大截面法时应考虑以下因素：

- (1) 保证加固构件有合理的传力路径，使其与原构件能共同工作；
- (2) 加固构件布置应适应原构件几何形状或已发生的变形，以利施工；
- (3) 尽量减少加固施工工作量，如采用焊接或粘接的形式；
- (4) 采用焊接时，应尽量减少焊接工作量，注意焊接顺序，降低焊接变形和应力，尽量避免仰焊；在负载状态焊接应采用较小焊接尺寸，并应首先加固对原有构件影响较小、构件最薄弱的部位等；

(5) 轻钢结构中的小角钢和圆钢杆件不宜在负载状态下进行焊接，必须焊接时应采取适当措施；

(6) 加大截面尺寸不能过多削弱原构件的承载力，尽量采用小螺栓和高强度螺栓，焊接时应尽量避免采用与原构件应力方向垂直的焊缝，否则应采取专门措施；

(7) 轴心受力构件加固后，应考虑构件截面形心偏移的影响。

1.2.1.2 连接的加固与加固件的连接

连接加固是钢结构加固中较为复杂的环节，钢结构加固连接方法应根据结构的受力状态、施工条件，并结合原有连接方法来确定。在同一受力部位连接的加固中，不宜采用刚度相差过大的加固措施。

(1) 焊缝连接的加固

当使用焊接施工较方便时，且加固处允许采用焊缝连接时，可考虑采用焊缝进行加固。焊缝加固应首先考虑增加焊缝长度来实现，其次考虑增加焊脚尺寸、同时增加焊缝长度和焊脚尺寸、增加独立的新焊缝等方式。

焊接连接加固时，应严格控制垂直于受力方向的横向焊缝，以确保焊接时的受力安全。

(2) 螺栓连接的加固

原有螺栓松动、损坏失效或连接强度不足需要更换或新增时，应首先考虑采用相同直径的高强度螺栓连接，也可采用焊接。

在《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82—2011 中，提出了考虑摩擦型高强度螺

栓连接和贴角焊缝共同承担同一剪力进行设计的栓焊并用连接形式，在梁、柱、支撑构件的拼接及相互间的连接节点中，翼缘采用熔透焊缝连接，腹板采用摩擦型高强度螺栓连接的栓焊混用连接形式。

(3) 加固件的连接

加固件与被加固结构间的连接，应根据设计受力要求经计算并考虑构造和施工条件确定。

1.2.1.3 裂纹的修复与加固

在结构构件上发现裂纹时，作为应急措施，可在板件裂纹的端外钻孔，以防止其进一步急剧扩展（该孔称为止裂孔，见图 1-17），并及时根据裂纹性质及扩展倾向再采取恰当措施修复加固。

修复裂纹应优先采用堵焊的方式，堵焊的施工顺序一般为：清洗裂纹两边 80mm 以上范围内板面油污至露出洁净的金属面；用气刨、风铲或砂轮将裂纹边缘加工成坡口，直达纹端的止裂孔；将裂纹两侧及端部金属预热至 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，并在焊接过程中保持此温度；用与钢材相匹配的低氢或超低氢型焊条施焊，并尽可能用小直径焊条流分段分层逆向施焊，每一道焊完后宜立即进行锤击；对承受动力荷载的构件，堵焊后其表面应磨光，使之与原构件表面齐平。

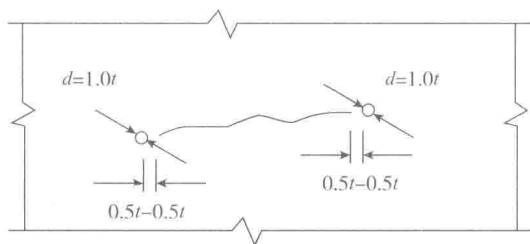


图 1-17 止裂孔

1.2.2 减小作用效应法

减小作用效应法的思路是采用改变荷载分布状况（如将集中荷载改为多个集中荷载）、传力途径、节点性质、边界条件、增设附加杆件和支撑、减小杆件自由长度、施加预应力、考虑空间协同工作等措施，改变构件的受力特征，降低其应力水平。对超静定结构支座还可以进行强迫位移。

1.2.2.1 受弯构件的加固

考虑减小作用效应时，受弯构件加固的方法主要有：

- (1) 调整结构支座位置，改变结构跨度；
- (2) 改变端部支撑情况，如该铰接和钢接；
- (3) 增加中间支座，将简支改为连续；
- (4) 将构件改为支撑式结构（图 1-18、图 1-19）。

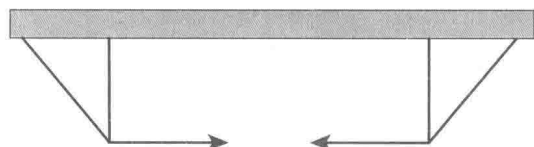


图 1-18 简支梁设置撑杆

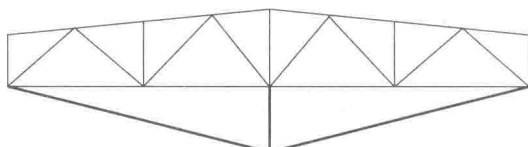


图 1-19 屋架下设置撑杆

1.2.2.2 桁架杆件的加固

改变桁架杆件内力的方法主要有：

- (1) 增加撑杆，变桁架为撑杆式构架（图 1-20、图 1-21）；
- (2) 加设预应力拉杆（图 1-22、图 1-23）。

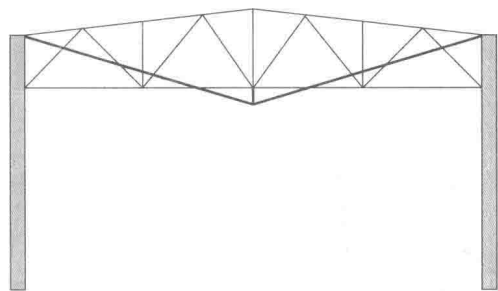


图 1-20 单下撑

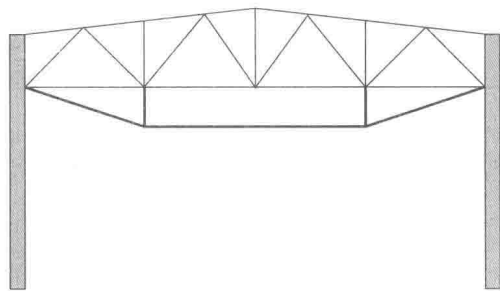


图 1-21 双下撑

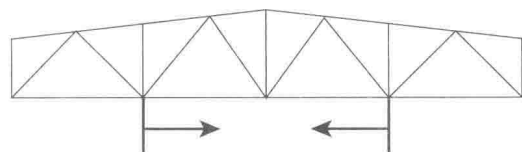


图 1-22 加设直线预应力拉杆

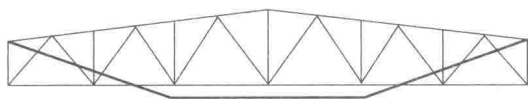


图 1-23 加设折线预应力拉杆

1.2.2.3 改善构件受力状况

在结构中可以采用以下方法改善构件的受力状况：

- (1) 加强节点和增加支撑，如：采取相应措施，使钢屋架和天窗架共同工作；
- (2) 排架和框架中，为减小加固工作量和加固施工影响，集中加强某一柱列刚度，其他柱列可不加固或少加固（图 1-24）。

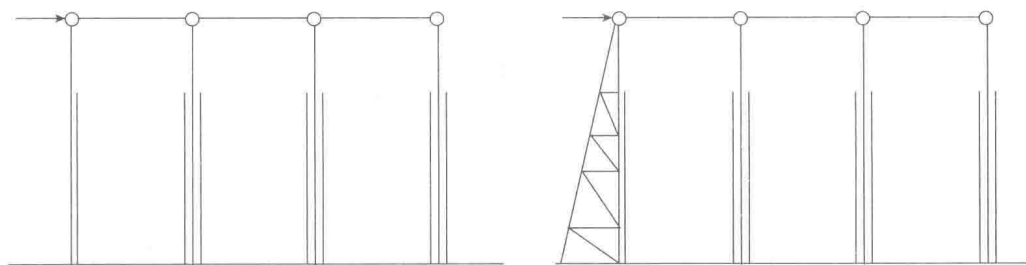


图 1-24 加强左侧柱列

1.2.2.4 增加支撑或辅助构件

- (1) 增加屋盖支撑及结构空间刚度使排架柱可以按空间结构进行验算，挖掘结构的潜力（图 1-25）。

- (2) 增设支撑以调整结构的自振频率，改善结构的动力性能（图 1-26）。
- (3) 增设支撑以减小构件长细比，提高稳定性（图 1-27、图 1-28）。
- (4) 在塔架等结构中设置拉杆或适度张紧拉索，加强结构的刚度（图 1-29）。

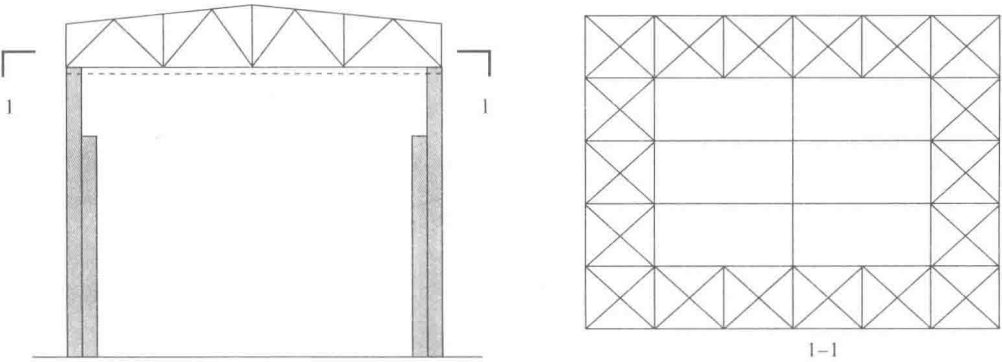


图 1-25 增加屋盖支撑

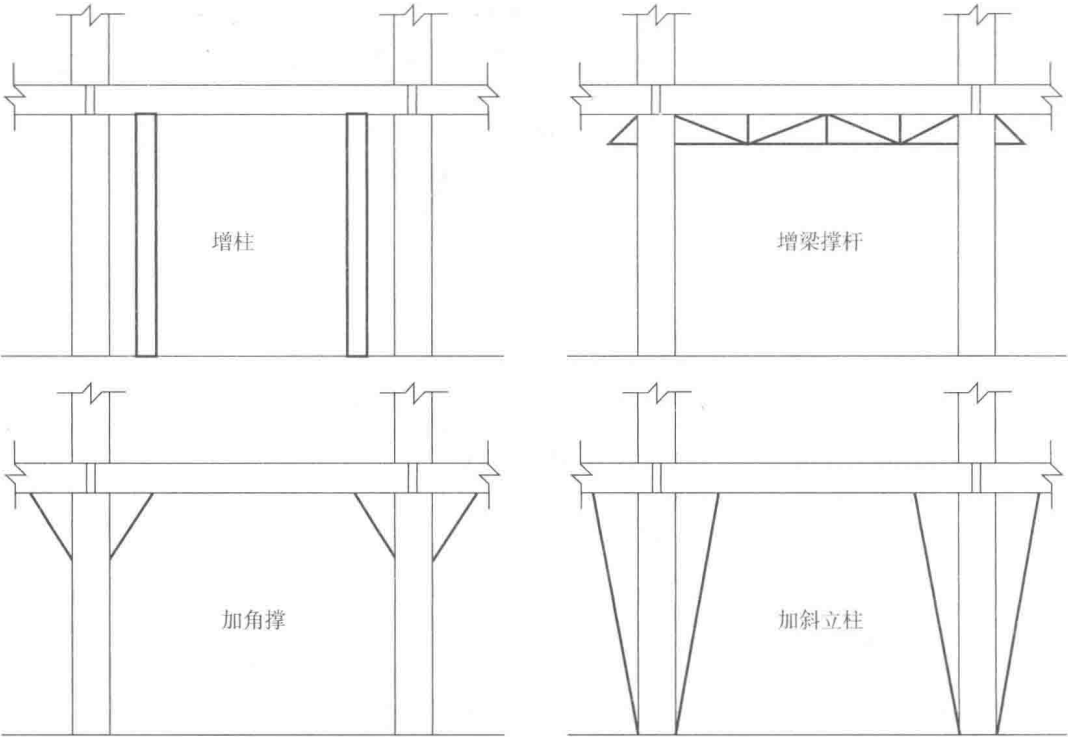


图 1-26 增设支撑

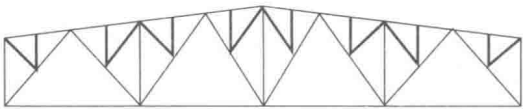


图 1-27 提高上弦稳定性

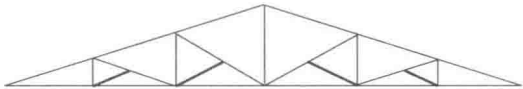


图 1-28 提高下弦稳定性