

高强度钢材钢结构

GAOQIANGDU GANGCAI GANGJIEGOU

施 刚 石永久 班慧勇 著

中国建筑工业出版社

高强度钢材钢结构

施 刚 石永久 班慧勇 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高强度钢材钢结构/施刚, 石永久, 班慧勇著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-112-16181-2

I. ①高… II. ①施…②石…③班… III. ①高强度钢—钢结构
IV. ①TG142.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 287588 号

本书是清华大学土木工程系钢结构与建筑幕墙研究室在高强度钢材钢结构的基础理论、设计方法、工程应用等关键技术问题方面的研究成果总结。本书通过试验研究、理论分析和数值计算, 全面、系统地阐释了高强度钢材钢结构的材料基本力学性能、构件截面残余应力分布、轴压构件整体稳定性能、轴压构件局部稳定性能、连接节点受力性能以及结构抗震性能, 从材料、构件、节点等层面介绍了高强度钢材钢结构的受力性能特点和设计计算方法。

本书主要内容属于基础性研究成果, 可供土木工程领域从事高强度钢材钢结构科研与工程设计的技术人员、高等院校相关专业的教师和研究生参考。

责任编辑: 王 跃 聂 伟

责任设计: 张 虹

责任校对: 姜小莲 关 健

高强度钢材钢结构

施 刚 石永久 班慧勇 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京楠竹文化发展有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 1/4 字数: 600 千字

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-16181-2

(24927)

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

钢结构的发展始终与钢材材料特性和生产工艺的发展紧密相连。钢材材料的不断改进,提高了钢结构的承载力、经济性和使用性能,促进了钢结构的发展和应用。同时,大跨度和高层、超高层钢结构的不断发展,需要开发新型高效、节能环保的高强度钢材钢结构体系,即通过提高钢材强度,减轻结构自重,提高结构抗灾能力,实现更加灵活、轻巧、多样化的结构体系,发展可回收利用、可重复使用的高强度、高性能绿色建筑结构体系,降低单位建筑产品的能耗,发展低碳经济。

随着钢材生产工艺的提高以及相应焊接材料、焊接技术和加工方法的日趋成熟,新型高强度钢材钢结构已在世界范围内多个建筑结构和桥梁结构中得到成功应用,并取得了良好的社会效益和经济效益。我国已具备了此类钢结构的生 产、加工等产业技术基础。相比普通强度钢材钢结构,高强度钢材钢结构在构件受力、建筑表现、结构安全性和耐久性以及环境可持续发展等方面具有显著优势,既能够减少用钢量、降低工程成本从而创造良好的经济效益,同时也有利于我国可持续发展战略和保护环境等基本国策的实施,有利于实现我国降低能耗的发展目标和发展低碳经济政策的实施,并促进有中国特色的低碳减排、节能环保、安全抗灾的经济型建筑结构体系的建设。

然而,新型高强度钢材强度高,材料化学成分特别是合金元素含量和碳当量与普通强度钢材相比有明显差别,因此高强度钢材的力学性能和构件的稳定性能、疲劳与断裂性能等均发生变化,需要对新的设计方法和设计理论进行研究。本书重点从高强度钢材钢结构的材料力学性能、构件初始缺陷(主要是截面残余应力)、受压构件的整体和局部稳定性能、连接节点的力学性能以及结构的抗震性能等方面展开论述。

清华大学土木工程系钢结构与建筑幕墙研究室自 2007 年起率先在国内开始高强度钢材钢结构的研究工作,针对其受力性能、设计理论和方法、工程应用等展开了深入的试验研究和数值理论计算,至今已积累了丰富的试验数据和重要的研究成果。本书即是在此基础上的成果总结,以期为后续的研究提供参考,为相关结构工程的设计和计算提供安全、可靠、合理、准确的方法和工具,确保工程安全性,并促进高强度钢材钢结构这一绿色、低碳建筑结构体系在我国的应用。本书对于推动学科建设和发展,促进我国可持续发展战略、保护环境基本国策以及降低能耗、构建低碳社会发展目标的实现,具有前瞻性理论意义、很高的工程应用价值和社会经济效益。

本书的研究工作先后得到了三项国家自然科学基金(包括一个重点项目(51038006)和两个面上项目(50708051、51078205))、两项国家重点实验室开放基金(土木工程防灾国家重点实验室开放基金:SLDRCE08-TS-01、海岸和近海工程国家重点实验室开放基金:LP0901)、中信镍钢研究项目(2010-D048)等的资助。研究人员根据研究成果在国内外学术期刊发表论文 60 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 数据库检索的论文达 40 余篇。同时,与中信建筑设计研究总院有限公司联合主编的我国工程建设行业标准《高强钢结构设计规程》的编制工作也已启动,本书也为该规程的编制提供了直接的科学依据。

本书的研究工作还得到了舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司金属结构工程分公司以及山东中通钢构建筑股份有限公司的大力支持，特别是试验材料的提供和试件的加工。

本书是作者及其研究团队的研究成果，其中包括了学术前辈的关怀和指导，也包括了实验室同事及国内外高校和工程界广大专家学者的支持和参与。本课题组博士研究生王萌，硕士研究生刘钊、王飞、邓椿森、林错错、潘斌、姜雪等等相关课题研究中出色地完成了大量的试验、计算及分析工作，他们对本书的完成作出了重要的贡献。

限于作者的水平，书中难免有不足之处，需要在今后的研究工作中不断加以改进和完善，敬请专家和读者批评指正。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

本书在编写过程中，参考了国内外大量的文献资料，在此对有关文献的作者表示衷心的感谢。同时，本书的出版也得到了山东理工大学、舞阳钢铁有限责任公司、鞍钢股份有限公司、北京首钢股份有限公司、中国二十二冶集团有限公司、山东中通钢构建筑股份有限公司等单位的支持。

目 录

第 1 章 高强度钢材钢结构的工程应用与研究现状	1
1.1 高强度钢材钢结构的定义	1
1.1.1 高强度结构钢材	1
1.1.2 高强度钢材钢结构	2
1.2 高强度钢材钢结构的技术优势	3
1.3 高强度钢材钢结构的工程应用现状	3
1.3.1 高强度钢材钢结构在国外的工程应用	3
1.3.2 高强度钢材钢结构在国内的工程应用	7
1.4 高强度钢材钢结构的研究现状	9
1.4.1 国内外研究现状	9
1.4.2 需研究的主要技术问题	19
1.5 高强度结构钢材的静力力学性能	20
1.5.1 应力 - 应变曲线	22
1.5.2 屈强比	23
1.5.3 延性	23
1.5.4 数值计算用材料本构简化模型	24
参考文献	24
第 2 章 高强度钢材构件截面的残余应力	31
2.1 热轧等边角钢截面	31
2.1.1 试件设计及测量方法	32
2.1.2 试验结果及分析	35
2.1.3 残余应力分布模型	37
2.2 焊接工字形截面	42
2.2.1 试件设计及测量方法	42
2.2.2 试验结果及分析	46
2.2.3 残余应力分布模型	54
2.3 焊接箱形截面	65
2.3.1 试件设计及测量方法	65
2.3.2 试验结果及分析	67
2.3.3 残余应力分布模型	74
2.4 焊接圆钢管截面	82
2.4.1 试件设计及测量方法	82

2.4.2	试验结果及分析	85
2.4.3	残余应力分布模型	90
	参考文献	93
第3章	高强度钢材轴压柱的整体稳定性能	96
3.1	热轧等边角钢柱	96
3.1.1	试验概况	96
3.1.2	试验结果及分析	100
3.1.3	有限元分析方法及模型验证	107
3.1.4	影响参数分析	110
3.1.5	设计方法制定	114
3.2	焊接工字形和箱形截面柱	119
3.2.1	试验概况	119
3.2.2	试验结果及分析	125
3.2.3	有限元模型验证	131
3.2.4	影响参数分析	138
3.2.5	设计方法制定	147
3.3	焊接圆钢管截面柱	163
3.3.1	试验概况	163
3.3.2	试验结果及分析	168
3.3.3	有限元模型验证	172
3.3.4	影响参数分析	176
3.3.5	设计方法制定	178
	参考文献	188
第4章	高强度钢材轴压柱的局部稳定性能	191
4.1	热轧等边角钢柱	191
4.1.1	试验概况	191
4.1.2	试验结果及分析	194
4.1.3	有限元模型验证	199
4.1.4	影响参数分析	201
4.1.5	设计方法建议	206
4.2	焊接工字形截面柱	208
4.2.1	试验概况	208
4.2.2	试验结果及分析	212
4.2.3	有限元模型验证	220
4.2.4	影响参数分析	225
4.2.5	设计方法制定	234
4.3	焊接箱形截面柱	246
4.3.1	试验概况	246

4.3.2	试验结果及分析	249
4.3.3	有限元模型验证	254
4.3.4	影响参数分析	259
4.3.5	设计方法制定	266
参考文献		273
第5章 高强度钢材连接节点的受力性能		275
5.1	螺栓连接孔壁承压性能	275
5.1.1	试验概况	275
5.1.2	试验结果及分析	276
5.1.3	有限元模型验证	281
5.1.4	影响参数分析	288
5.1.5	孔壁承压强度设计值	292
5.2	高强度螺栓摩擦型连接抗滑移性能	296
5.2.1	试验概况	297
5.2.2	试验结果及分析	299
5.2.3	抗滑移系数	305
参考文献		307
第6章 高强度钢材钢结构的抗震性能		310
6.1	往复循环荷载下钢材的力学性能	310
6.1.1	试验概况	310
6.1.2	循环加载性能及骨架曲线分析	316
6.1.3	单调曲线和循环骨架曲线比较	321
6.1.4	钢材循环本构模型	324
6.2	往复循环荷载下对接焊缝接头的力学性能	329
6.2.1	试验概况	329
6.2.2	循环加载性能及骨架曲线分析	332
6.2.3	焊接接头循环骨架曲线拟合	334
6.2.4	焊接接头循环本构模型	335
6.3	压弯构件的抗震性能	337
6.3.1	试验概况	337
6.3.2	试验结果及分析	341
6.3.3	有限元模型验证	353
6.3.4	影响参数分析	358
6.3.5	抗震设计建议	376
参考文献		379

第 1 章 高强度钢材钢结构的工程应用与研究现状

1.1 高强度钢材结构的定义

1.1.1 高强度结构钢材

高强度结构钢材是指名义屈服强度 $f_y \geq 420\text{MPa}$ ，同时具有良好韧性、延性以及加工性能（特别是焊接性能）的结构钢材；名义屈服强度 $f_y \geq 690\text{MPa}$ 的结构钢材称为超高强度钢材。

提高钢材屈服强度的方法主要有两种^[1]：一种是加入合金成分，例如碳、锰等元素，可以很容易提高钢材强度，但同时也降低了钢材的加工性能，特别是可焊性；一种是热处理技术，热处理工艺影响着钢材的微观结构和晶粒大小，其主要优点在于细晶粒结构材料相对于粗糙晶粒结构材料的强度更高、韧性更好。新型高强度结构钢材主要是微合金化细晶粒钢，采用的现代冶炼技术包括：高纯净化、微合金化和热机械轧制技术^[2]。高纯净化指降低 S、P、N、H、O 等杂质元素和 C 的含量从而提高塑性和韧性。微合金化是适当添加 Nb、V 及 Ti 等微合金元素，在提高钢材屈服强度（也提高了屈强比）的同时能够改善塑性和韧性，降低含碳量。热机械轧制即 TMCP，将最后轧制的变形控制在一定的温度范围内，使钢材在冶炼过程中形成精细的铁素体和珠光体的微观结构，从而避免采用高含量的合金元素，可以使钢材具有很好的韧性和焊接性能。国内高强度钢材的交货状态包括热轧、控轧、正火、正火轧制或正火加回火、热机械轧制等。目前包括欧洲、美国、日本、中国在内的国家和地区已有较成熟的高强度结构钢材产品，如表 1-1 所示。

高强度结构钢材的种类

表 1-1

国家（地区）及标准	高强度钢材牌号	质量等级
中国，低合金高强度结构钢 GB/T 1591—2008 ^[3]	Q420、Q460、Q500、Q550、Q620、 Q690	A、B、C、D、E
中国，建筑结构用钢板 GB/T 19879—2005 ^[4]	Q420GJ、Q460GJ	C、D、E
欧洲，建筑结构用高强度钢材规范 BS EN10025—6 ^[5]	S460、S500、S550、S620、S690、 S890、S960	Q、QL、QL1
美国，ASTM 标准 ^[6-9]	A992/992M、A913/913M、A709/709M、 A514/514M	—
英国，可焊接结构钢规范 BS 4360：1990 ^[10]	55	C、EE、F

续表

国家（地区）及标准	高强度钢材牌号	质量等级
日本 ^[1,11]	BHS500、BHS700、HT590、HT780、SA440	—

欧洲和中国的高强度钢材牌号中数字即为钢材的屈服强度标准值；美国和日本的同一种牌号高强度钢材有不同的强度等级，例如美国的 A709/709M 钢材有 HPS 70W 和 HPS 100W 两种强度等级，屈服强度标准值分别为 485MPa 和 690MPa；而英国牌号为 55 的高强度钢材屈服强度标准值为 450MPa。我国《低合金高强度结构钢》GB/T 1591—2008^[3] 中质量等级 A 和 B 只适用于 Q420 牌号及以下的钢材。加拿大钢结构极限承载力设计规范 CAN/CSA-S16-01^[12] 和结构钢材规范 CSA standard G40. 20/ G40. 21^[13] 允许使用的钢材共包括 8 个钢材强度等级，钢材屈服强度在 260 ~ 700MPa 之间。

我国《低合金高强度结构钢》GB/T 1591—2008 和《建筑结构用钢板》GB/T 19879—2005 等规范对高强度结构钢材的力学性能指标、化学成分等均做了详细的规定。国内许多大型钢铁厂，如首钢集团、舞阳钢铁、鞍山钢铁、武汉钢铁等，均已成功冶炼出国产 460MPa 高强度钢材，690MPa 结构钢材也正在试制中。高强度钢材的关键冶金技术，如热轧、控轧、正火、正火轧制或正火加回火、热机械轧制（TMCP）或热机械轧制加回火等交货状态，上述钢厂也都已经掌握，完全能够实现量产，满足未来市场的需求。我国《钢结构焊接规范》GB 50661—2011 已经针对 Q460 ~ Q690 高强度结构钢材提出了建议的焊接材料和焊接工艺，加之我国近年多个高强度钢材建筑工程应用实践的积累以及相应焊接工艺的评定工作，我国高强度钢材钢结构的焊接技术和水平已经十分成熟。因此，我国高强度钢材钢结构的发展已具备坚实的产业基础，工程应用前景十分广阔。

1.1.2 高强度钢材钢结构

高强度钢材钢结构是指以高强度结构钢材为主要受力体系或受力构件的钢结构。

高强度钢材钢结构可以应用在建筑结构、桥梁结构、塔桅结构等工程中，其主要的适用范围有^[14]：

- (1) 承受竖向和水平荷载非常大的多高层和超高层建筑的底部柱；
- (2) 大跨屋盖结构，采用高强度钢材能够减轻结构自重，减小下部结构的受力；
- (3) 大跨桥梁结构，可明显提高桥梁疲劳使用寿命；
- (4) 大型超高压输电铁塔；
- (5) 军用越障安装桥梁；
- (6) 海洋平台结构。

由于高强度结构钢材的化学成分和基本力学性能与普通钢材相比有所不同，初始缺陷对构件受力性能的影响也发生了变化，因此高强度钢材钢结构的受力性能呈现出不同特征。虽然包括我国在内的多个国家和地区已经制定了高强度钢材材料标准，并已被引入到部分钢结构设计规范（如欧洲的 Eurocode 3 和美国的 ANSI/AISC360-10）中，但尚没有形

成完善的计算理论和设计方法,这导致高强度钢材结构在我国的应用受到极大限制。如果简单套用原有普通强度钢结构的设计方法,一方面会使高强度钢材结构的巨大优势得不到发挥,另一方面也会使设计的安全性和可靠性得不到充分保证。高强度钢材结构已成为目前的研究热点。

1.2 高强度钢材结构的技术优势

与普通强度钢材结构相比,高强度钢材结构同样具有材质均匀、刚度大、塑性和韧性好、易于连接、便于机械化制造和运输、安装和拆卸方便、可靠性高、主要建筑材料环保可回收利用等优点。此外,还具有以下优势^[15,16]:

(1) 钢结构采用高强度结构钢材能够满足当前钢结构工程向更大跨度、更高高度不断发展的要求,同时创造更大的建筑使用空间。

(2) 能够减小构件的截面尺寸,从而减轻结构自重,降低地震作用。

(3) 能够减少钢材和焊接材料用量以及防锈、防火等涂层的用量和工作量,降低加工制作、运输和施工安装成本,从而直接创造良好的经济效益(实际工程表明工程总造价降低约10%)。

(4) 构件截面尺寸特别是钢板厚度的减小,使焊缝尺寸得以减小,加之新型高强度焊接材料的应用,焊缝质量得到提高,钢结构的疲劳性能得到明显改善。

(5) 钢材、焊接材料以及各种涂层用量的减少能够降低铁矿石等不可再生资源的消耗量,符合可持续发展战略和保护环境的基本国策。

1.3 高强度钢材结构的工程应用现状

高强度钢材结构最早在20世纪60年代日本的工程界得到应用,之后逐渐发展到德国、澳大利亚、美国等国家^[15]。当前我国也开始应用高强度钢材。

1.3.1 高强度钢材结构在国外的工程应用

(1) 建筑结构

日本常用的结构钢材强度通常为400~490MPa。但是近十几年来,日本开始研究和使用的极限抗拉强度为800MPa的钢材,而且已经开始研究应用强度为1000MPa的钢材。特别是,他们更着重于采用超高强度钢材结构来减轻和避免地震对结构造成的破坏^[16]。日本第一幢采用高强度钢材的建筑是位于横滨的Landmark Tower大厦(如图1-1所示),其I形截面柱采用了600MPa钢材;日本东京的JR East Japan总部大厦(如图1-2所示)和NTV Tower(如图1-3所示)也采用了高强度钢材。位于日本清水、高550m的超高层建筑也采用了600MPa高强度钢材。当前日本的结构设计公司在研究采用高强度钢材改变结构的自振频率和减轻结构自重,以减小结构在地震作用下的破坏作用^[15]。

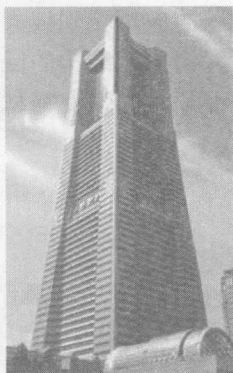


图 1-1 日本横滨的
Landmark Tower



图 1-2 日本东京的
JR East Japan 总部

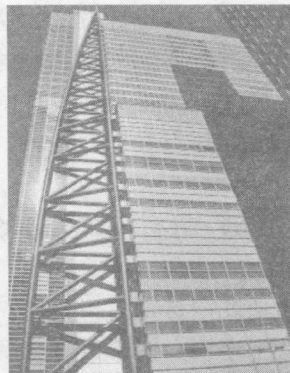


图 1-3 日本东京的
NTV Tower

德国柏林索尼中心大楼 (Sony Center) 为保护已有的一个砌体结构建筑物, 将大楼的一部分楼层悬挂在屋顶桁架上 (图 1-4)。其屋顶桁架高 12m, 跨度为 60m, 桁架杆件为 600mm × 100mm 的矩形实心截面, 采用 S460 和 S690 高强度钢材 (屈服强度标准值分别为 460MPa 和 690MPa), 从而减小构件截面尺寸, 达到美化建筑外观和减轻结构自重的效果。该工程还对 S460 钢材在低温下的脆性断裂性能进行了试验和计算分析, 保证了该结构在低温下的安全性^[1,16]。

澳大利亚悉尼的星城饭店 (Star City, 图 1-5) 在悉尼中心区的西部, 位于繁华的达令港 (Darling Harbour) 内, 建筑物包括一个娱乐场、一个酒店和两个大型剧院。整个建筑物共 13 层, 包括屋顶和地下 5 层。该工程在建筑物的两个区域采用了 650MPa 和 690MPa 钢材。第一个区域是地下室的柱子。由于地方议会要求该建筑物提供至少 2500 个停车位, 使得地下车库的柱子截面尺寸最大为 500mm, 唯一的解决办法就是采用超高强度钢材-混凝土组合柱。如前所述, 超高强度钢材能够大大减小柱截面的尺寸, 尤其是对于一个高层建筑中承受荷载较大的底部几层。第二个区域就是 Lyric 剧院屋顶的 2 个桁架, 每个桁架跨度均为 30m, 高度为 3.5m^[15,16]。

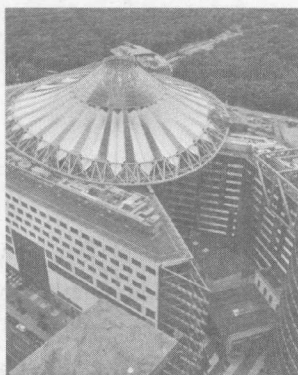


图 1-4 德国柏林索尼中心
大楼 (Sony Center)

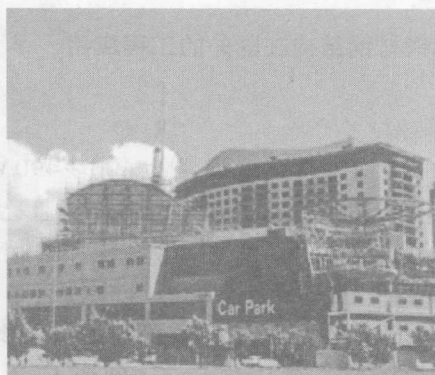


图 1-5 澳大利亚悉尼的星城饭店
(Star City)

Latitude 大厦 (图 1-6) 位于澳大利亚悉尼中心区的世界广场 (World Square), 2005 年建成, 共 55 层。由于场地上已有一个部分完成的建筑物, 如果在既有建筑物顶部增建

新结构,则需要对原有的柱子进行加固。出于经济效益的考虑,为了尽快完工,结构工程师在第16层采用7m高的钢结构转换层(图1-6b)将荷载从新增结构的柱子传到既有建筑物上。转换层钢结构采用了16mm厚的Bisplate 80(690MPa)钢板,以减小结构重量。虽然该工程中超高强度钢材的总用量只有280t,却收到很好的效果^[15,16]。

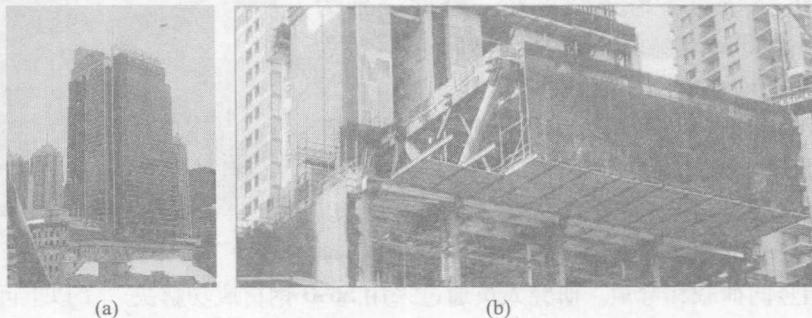


图1-6 澳大利亚悉尼的 Latitude 大厦

(a) 大厦全貌; (b) 钢结构转换层

位于美国休斯敦的雷利昂体育馆(Reliant Stadium,图1-7)具有可开启屋顶结构,10个可移动三弦桁架横跨在两个纵向巨型桁架之上;桁架结构采用的A913 Grade 65高强度钢材(屈服强度标准值450MPa),使该工程取得了良好的经济效益^[17]。

(2) 桥梁结构

位于德国杜塞尔多夫的Dusseldorf-Ilverich莱茵河大桥(图1-8)是一座斜拉公路桥,建于1998~2002年。该桥由于靠近杜塞尔多夫机场,其桥塔高度受到限制。两个V形桥塔顶部中间的焊接箱形截面连系钢梁采用S460钢材,减小了截面钢板厚度,减小了焊缝尺寸,提高了焊缝质量等级,从而提高了焊缝的疲劳强度和桥梁使用寿命。同时,减小焊缝尺寸还大大减少了焊接工作量,并且避免了钢板的预热处理要求,大大缩短工期,取得了很好的经济效益^[1]。



图1-7 美国休斯敦的雷利昂体育馆
(Reliant Stadium)



图1-8 德国的 Dusseldorf-Ilverich
莱茵河大桥

法国著名的 Millau 大桥(图1-9)是一座多跨斜拉桥,建造高度达到343m,创造了世界纪录。其2460m长的桥面由中间的6个342m主跨和两边各一个204m跨组成。桥梁的中心箱形截面主梁以及一些连接构件采用了80mm厚S460钢板,桥塔则采用了最大为120mm厚的S460钢板,取得了以下良好效果:在不增加结构重量的前提下提高了结构承

载力；大大降低了桥梁施工中悬臂段的弯矩；减小焊缝尺寸，提高了焊接工作的效率；显著降低构件从工厂到现场的运输成本；大大降低结构自重使得钢结构的加工制作（包括焊接）、运输和施工安装变得容易，确保了桥梁建造的顺利进行^[1]。

德国 Ingolstadt 附近的一座高速公路桥（图 1-10）是一座组合结构多跨连续梁桥，跨度分别为 24m、5×30m、20m，混凝土桥面板宽 15m。该桥为一个整体结构，钢梁直接用柔性钢板连接到柱，而没有支座。钢梁和组合结构桥墩之间的半刚性节点（图 1-10b）采用 S690 钢材。为了保证节点为半刚性，柔性钢板必须满足下列要求：钢板厚度必须足够小，以减小结构对柱子的平动和转动约束；钢板厚度又必须足够大以承担竖向荷载和弯矩。研究人员通过采用 S690 钢材成功解决^[1]了以上问题。

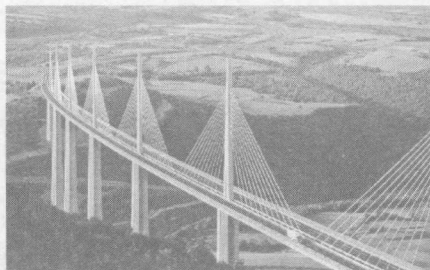
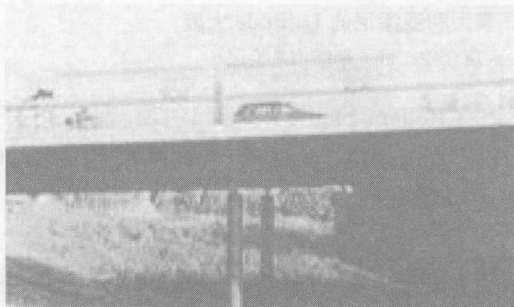


图 1-9 法国的 Millau 多跨斜拉桥



(a)



(b)

图 1-10 德国 Ingolstadt 市高速公路桥

(a) 公路桥全貌；(b) 半刚性节点

德国斯图加特附近长 572m 的 Nesenbachtalbrücke 组合桥（图 1-11），跨度从 35.1m 到 89.5m。该桥梁的建筑外观纤细轻巧，通过空心截面杆件和小尺寸构件来实现；柱呈树状，包括很多细长分支。这种结构形式导致很多部位（如梁柱连接的节点区域）应力峰值较大，因此采用了 S690QL1 高强度钢材（屈服强度标准值 690MPa），实现了建筑设计效果^[18]。

瑞典 Mittådalen 的杂交梁桥（图 1-12）是一座跨度为 25.6m 的简支桥，在钢梁的下翼缘采用了 S690 高强度钢材（屈服强度标准值 690MPa），使桥梁很好地满足了承载力极限状态和正常使用极限状态的要求。目前，瑞典已经将这种类型的杂交梁列入桥梁设计规范^[1]。

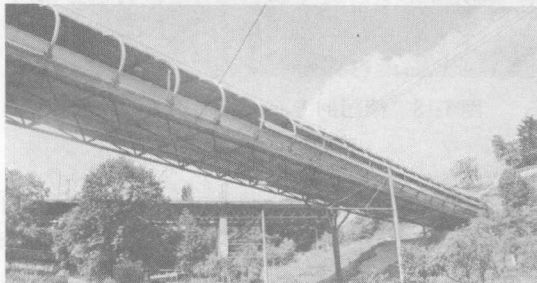


图 1-11 德国的 Nesenbachtalbrücke 组合桥



图 1-12 瑞典 Mittådalen 的杂交梁桥

瑞典的 48m 跨快速军用桥梁（图 1-13）是按照北约（NATO）要求设计，承重约 64t 的军用快速架设桥梁。该桥采用了 S960 和 S1100（强度标准值 960MPa 和 1100MPa）钢材，能够在 90 分钟以内从河流或者凹口的一侧展开架设到另一侧，也能够同样的时间内收起来。桥梁的跨度可以在 32 ~ 48m 之间变化，由 4 或 6 个 8m 长的单元组成，宽 4m，截面高 1.6m。桥面板用 5mm 厚 S1100 钢板加工，并用冷弯薄壁槽形钢加劲。桥梁桁架的下弦用冷弯薄壁型钢制作，斜撑用 S460 矩形钢管。每两个单元之间的连接板采用 50mm 厚的 S960 钢板。该桥由于采用了超高强度钢材，大大减轻了结构重量，减少了加工和安装成本，同时减小焊缝尺寸，提高焊缝质量，从而增加了结构使用寿命^[1]。

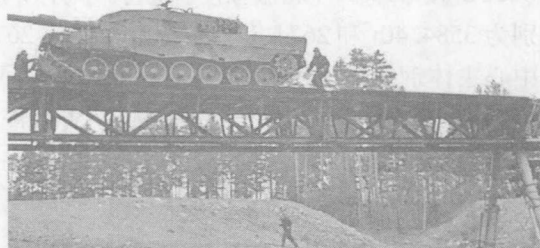


图 1-13 瑞典的 48m 跨快速安装军用桥

此外，日本从 20 世纪中期开始在多个桥梁工程中采用高强度钢材，如早在 1964 年 Hanawa Overpass Bridge 工程就采用了 800MPa 高强度钢材（8.8t），1974 年 Minato Ohashi Bridge 工程采用了 700MPa 和 800MPa 两种等级高强度钢材（用量分别为 1073t 和 4195t），10km 长的 Seto Ohashi Bridge 工程采用了 600MPa、700MPa 和 800MPa 等级的高强度钢材^[19]。

1.3.2 高强度钢材钢结构在国内的工程应用

(1) 建筑结构

我国新建的一些大跨建筑结构也开始采用高强度钢材^[20]。2008 年奥运会主会场——国家体育场（鸟巢，图 1-14）钢结构的关键部位采用了厚度为 100 ~ 110mm 的国产 Q460E/Z35（屈服强度标准值为 460MPa）高强度钢材，用量超过 500t，用于柱脚等主要受力节点，满足了设计要求，达到了很好的效果^[21]。国家游泳中心（水立方，图 1-15）钢结构部分主要为多面体空间刚架，厚度大于 18mm 的板材选用 Q420C（ $f_y = 420\text{MPa}$ ）高强度钢材，总用量达 2900t，占工程总用钢量的 42.6%^[22]。



图 1-14 国家体育场（鸟巢）

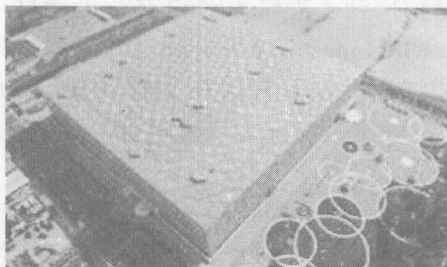


图 1-15 国家游泳中心（水立方）

另外，我国其他几个大跨度和高层建筑结构也用到了高强度钢材。北京新保利大厦（图 1-16）采用了 GR60 级低合金高强度结构钢，最大板厚 125mm，这是国内首次在建筑

钢结构上使用该类钢材, GR60 级钢符合美国 ASTM 标准的规定, 相当于国内钢材标准中的 Q420 钢 (屈服强度标准值为 420MPa)^[23]。央视新台址主楼 (图 1-17) 钢结构采用了 Q420D 和 Q460E (屈服强度标准值分别为 420MPa 和 460MPa) 两种高强度钢材, 用量分别为 3584.40t 和 2674.19t^[24]。2011 年第 26 届世界大学生夏季运动会的主会场深圳湾体育中心主体钢结构 (图 1-18) 部分构件采用了国产 Q460D 高强度钢材^[25]。在建的凤凰国际传媒中心 (图 1-19) 外壳结构部分构件也采用了国产 Q460GJE 和 Q420GJD 高强度钢材^[26]。



图 1-16 北京新保利大厦

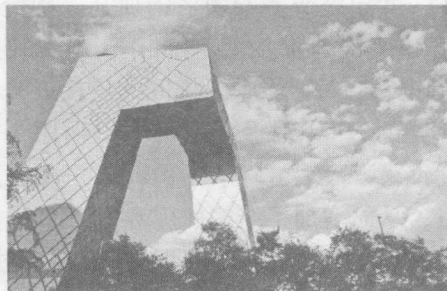


图 1-17 中央电视台新台址

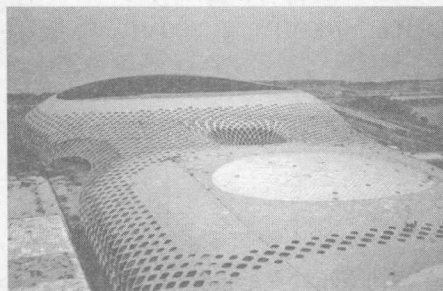


图 1-18 深圳湾体育中心



图 1-19 凤凰国际传媒中心

(2) 桥梁结构

我国从 20 世纪 80 年代开始了将屈服强度大于 700MPa 的高强钢应用在移动桥梁装备中的研究, 最先应用的是调质高强钢 14MnMoNbB, 近年来又开始使用 18Mn2CrMoBA^[27]。在民用桥梁结构工程中, 1991 年建成的上海南浦大桥 (图 1-20), 主桥钢结构用到了进口 StE460 高强度钢材 (屈服强度标准值 460MPa, 属于德国工业标准 (Beutsche Industrie-Normen) DIN EN 10028), 该桥全长 846m, 主跨 423m^[28]。1993 年建成的江西九江长江大桥工程 (单跨 216m, 如图 1-21 所示) 采用了约 20000t 的 15MnVN 高强度钢材 (屈服强度标准值为 450MPa), 最大厚度 56mm, 满足了强度和焊缝质量的要求^[29]。

除建筑结构和桥梁结构外, 我国的一些高压、特高压输电线路和大截面导线输电线路的输电铁塔结构中也逐步开始采用高强度结构钢材, 如我国第一条西北 750kV 输电线路成功采用了 Q420 高强钢 (屈服强度名义值为 420MPa)。目前关于高强钢在输电铁塔结构中应用的一系列研究也已经开始, 包括经济性分析和受压构件稳定特性的研究^[30-38]。



图 1-20 上海南浦大桥



图 1-21 江西九江长江大桥

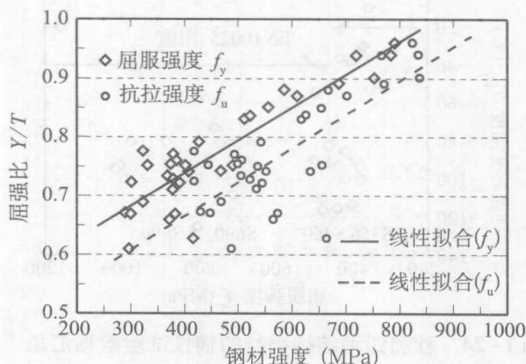
1.4 高强度钢材钢结构的研究现状

1.4.1 国内外研究现状

目前国内外针对高强度钢材钢结构的研究主要集中在材料的力学性能、构件的初始缺陷特别是截面残余应力、受压构件的整体稳定和局部稳定性能、受弯构件、连接节点、疲劳与断裂等方面。

(1) 高强度钢材的材料力学性能

国外已有学者通过对比不同强度等级钢材的材性试验数据,分析钢材屈强比 Y/T 随钢材强度的变化规律。Sivakumaran^[39]通过总结多位学者对钢材力学性能(包括高强度钢材)的试验结果,发现屈强比 Y/T 随钢材屈服强度 f_y 的提高而提高,随抗拉强度 f_u 的提高也同样提高,如图 1-22 所示。

图 1-22 钢材屈强比与钢材强度的关系^[39]

学者 Langenberg^[40]总结了 S355、S460、S690 和 S890 等 4 种欧洲结构钢材(其中的数字分别为其屈服强度标准值)的力学性能,如图 1-23 所示;其中横坐标为钢材屈服强度 f_y ,纵坐标为屈强比 Y/T (左侧)和断后伸长率 A 、断面收缩率 Z (右侧)。从图 1-23 中的对比数据可以得到,随着钢材屈服强度 f_y 的增加,屈强比 Y/T 明显增大且逐渐接近于 1.0;超高强度钢材 S690 和 S890 的屈强比均在 0.95 附近,且二者无明显区别;S460 高强度钢材的屈强比在 0.8 附近且有较大变化,S355 钢材同样如此;断后伸长率 A 随钢材强度