

# 高强钢受弯构件

极限承载力设计理论研究  
与经济适用性思考

闫晓雷 赵国仲 黄小松◎著



四川大学出版社  
SICHUAN UNIVERSITY PRESS

闫晓雷 赵国仲 黄小松◎著

# 高强钢受弯构件

极限承载力设计理论研究  
与经济适用性思考



四川大学出版社  
SICHUAN UNIVERSITY PRESS

项目策划：王 锋  
责任编辑：王 锋  
责任校对：许 奕  
封面设计：墨创文化  
责任印制：王 炜

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高强钢受弯构件极限承载力设计理论研究与经济适用性思考 / 闫晓雷, 赵国仲, 黄小松著. — 成都: 四川大学出版社, 2021.11

ISBN 978-7-5690-5192-6

I. ①高… II. ①闫… ②赵… ③黄… III. ①高强度钢—建筑结构—受弯构件—承载力—设计—研究②高强度钢—建筑结构—受弯构件—建筑经济分析—研究 IV. ①TU392.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 234267 号

书名 高强钢受弯构件极限承载力设计理论研究与经济适用性思考

著 者	闫晓雷 赵国仲 黄小松
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5690-5192-6
印前制作	四川胜翔数码印务设计有限公司
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	148mm×210mm
印 张	7.5
字 数	200 千字
版 次	2021 年 11 月第 1 版
印 次	2021 年 11 月第 1 次印刷
定 价	35.00 元

版权所有 ◆ 侵权必究

- ◆ 读者邮购本书, 请与本社发行科联系。  
电话: (028)85408408/(028)85401670/  
(028)86408023 邮政编码: 610065
- ◆ 本社图书如有印装质量问题, 请寄回出版社调换。
- ◆ 网址: <http://press.scu.edu.cn>



四川大学出版社  
微信公众号

# 前 言

材料科学的进步与冶金工艺的发展，使其为机械、船舶、桥梁、建筑工程制造越来越高强度的钢材已经成为现实。低合金高强钢材相对普通钢材而言不仅可以减轻结构自重节约材料，使得同样承载力下构件更轻薄以获得更大的建筑空间，而且还能减少运输、焊接等的工作量，缩短工期，节约造价。高强度钢材的推广使用能减少对钢材、能源的消耗，减少污染，对建设节约能源型经济与产业升级具有重大意义。

我国现行《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)所涵盖的承重结构钢材最高牌号已升至 Q460 等级，但是其中对于屈服强度大于或等于 460MPa 的高强度钢材基本构件的设计还是延续了普通钢材的设计方法与理论。因此，高屈服强度的构件设计是否适用现有规范、如何进行分析设计成为亟待解决的问题。这一问题主要涉及高强钢材的力学性能、高强钢焊接构件中残余应力的分布形式、高强钢基本构件的受力性能等方面。

为了研究 Q460 高强钢焊接箱形、H 形截面压弯构件极限承载力，本书采用 11mm 与 21mm 厚国产高强钢板制作了 7 个焊接箱形、6 个焊接 H 形压弯构件进行试验研究。其中箱形试件包括截面板件宽厚比分别为 8、12、18 的三种截面，长细比分别

为 35、50、80 的构件；H 形截面试件包括自由外伸翼缘宽厚比分别为 3、5、7，长细比分别为 40、55、80 的试件。

在试验研究的基础上，采用数值积分法与有限单元法建立了考虑初始几何缺陷与残余应力影响的箱形、H 形截面压弯构件数学计算模型，并且通过试验结果验证了数学计算模型的正确性。采用数学计算模型对箱形、H 形压弯构件进行参数分析，分析参数包括弯曲方向、有无残余应力、截面板件宽厚比及构件长细比；分析总结两种构件参数结果，得出了参数变化对构件极限承载力的影响规律；通过参数分析结果与我国现行钢结构规范进行比较，得出采用现行钢结构规范设计计算 Q460 高强钢焊接箱形、H 形压弯构件极限承载力偏于保守的结论；基于现行钢结构规范理论基础，提出适合 Q460 高强钢压弯构件的建议设计公式。

本书同时进行了 4 根 Q460 高强钢焊接工字形截面纯弯构件临界弯矩试验研究，主要考察 Q460 高强钢纯弯构件弹性与弹塑性整体稳定临界弯矩，并且通过试验结果与我国现行钢结构设计规范进行比较。为了进一步开展参数分析研究，采用数值积分法与有限单元法建立了考虑初始几何缺陷与残余应力影响的工字形截面受弯构件数值计算模型，并且通过试验结果验证了数值计算模型的正确性。利用数值计算模型对工字形纯弯构件进行参数分析；总结纯弯构件参数分析结果，得出了参数变化对构件极限承载力的影响规律；通过参数分析结果与我国现行钢结构规范进行比较，得出采用现行《钢结构设计标准》（GB 50017—2017）设计计算 Q460 高强钢焊接工字形纯弯构件整体稳定临界弯矩与试验结果符合较好，并且能够满足工程精度和可靠安全的要求，建议采用现行《钢结构设计标准》（GB 50017—2017）公式进行

Q460 高强钢焊接工字形纯弯构件设计。

最后，本书以焊接 H 形压弯构件为例，将 Q460 高强钢焊接 H 形压弯构件试验和数值分析结果与欧洲钢结构设计规范（BS EN 1993-1-1: 2005）及美国钢结构规范（ANSI/AISC 360-16）进行了比较，得到定量比较结果。并且进一步开拓研究方向，对高强钢受弯构件的经济适用性进行分析，提出后续研究计划。

# 目 录

1	概 述 .....	( 1 )
1.1	研究背景 .....	( 1 )
1.2	高强钢结构工程应用现状 .....	( 3 )
1.3	高强钢结构研究现状 .....	( 8 )
1.4	研究问题及意义 .....	( 10 )
1.5	目标及创新点 .....	( 10 )
1.6	章节安排 .....	( 11 )
2	文献综述 .....	( 15 )
2.1	高强钢材材料力学性能研究 .....	( 15 )
2.2	受压构件 .....	( 18 )
2.3	受弯构件 .....	( 29 )
2.4	本章小结 .....	( 36 )
3	焊接箱形压弯构件试验研究 .....	( 48 )
3.1	引 言 .....	( 48 )
3.2	试验设计与制作 .....	( 49 )

3.3	试验方案设计 .....	( 51 )
3.4	初始缺陷 .....	( 54 )
3.5	试验现象 .....	( 54 )
3.6	试验结果与规范比较 .....	( 64 )
3.7	本章小结 .....	( 67 )
✻		
4	焊接箱形压弯构件的参数分析与设计建议 ...	( 69 )
4.1	引言 .....	( 69 )
4.2	数值模型方法 .....	( 70 )
4.3	数值分析结果与试验结果比较 .....	( 78 )
4.4	实用设计公式建议 .....	( 117 )
4.5	本章小结 .....	( 122 )
5	焊接 H 形压弯构件试验研究 .....	( 124 )
5.1	引言 .....	( 124 )
5.2	试验设计与制作 .....	( 124 )
5.3	试验方案设计 .....	( 127 )
5.4	初始缺陷 .....	( 128 )
5.5	试验结果及分析 .....	( 131 )
5.6	本章小结 .....	( 138 )
6	焊接 H 形压弯构件的参数分析与设计建议 ...	( 140 )
6.1	引言 .....	( 140 )

---

6.2	数值模拟方法的建立 .....	(141)
6.3	数值分析结果与试验结果比较 .....	(145)
6.4	焊接 H 形压弯构件参数分析 .....	(148)
6.5	实用设计公式建议 .....	(169)
6.6	本章小结 .....	(174)
7	焊接工字形受弯构件试验研究 .....	(176)
7.1	引 言 .....	(176)
7.2	试件设计 .....	(176)
7.3	试验方案 .....	(178)
7.4	试验结果及分析 .....	(185)
7.5	本章小结 .....	(196)
8	焊接工字形受弯构件的参数分析与设计建议 .....	(198)
8.1	引 言 .....	(198)
8.2	数值模型的建立 .....	(199)
8.3	焊接工字形受弯构件参数分析 .....	(204)
8.4	实用设计公式建议 .....	(215)
8.5	本章小结 .....	(221)

9 高强钢受弯构件研究结论与经济适用性思考	
.....	(222)
9.1 主要工作和结论	(222)
9.2 焊接 H 形压弯构件研究结论与国外钢结构 设计规范比较	(223)
9.3 高强钢经济性能思考	(226)
9.4 今后研究工作建议	(229)

# 1 概述

## 1.1 研究背景

20 世纪 90 年代以前，Q235 钢（相当于欧洲标准 S235，美国标准 ASTM A 36）被广泛应用于建筑结构中，而在当时 Q345 钢（相当于欧洲标准 S355，美国标准 ASTM A 572）被认为是高强度钢材，其应用相对于 Q235 钢较少<sup>[1.1][1.2]</sup>。20 世纪 90 年代至今，屈服强度为 345~355MPa 的钢材逐渐替代了屈服强度为 235MPa 的钢材，成为主要结构用钢。根据中国钢结构协会对我国钢结构制造企业 2009 年度调查结果，2009 年我国消耗钢材强度级别及所占比例如图 1.1 所示：Q235 钢为 370.8 万吨，占 35%；Q345 钢为 575.4 万吨，占 53%；Q390 钢为 71.3 万吨，占 7%；Q420 钢为 30.4 万吨，占 3%；Q460 钢为 20.4 万吨，占 2%<sup>[1.3]</sup>。此后数年，我国钢结构建筑用钢量不断增长，年均增速超过 10%，至 2017 年已达到 6480 万吨，成为全球钢结构用量最大、产业规模最全、企业数量最多的钢结构大国<sup>[1.3]</sup>。

建筑钢结构的发展与材料性能的改善、制造方法的进步有着相辅相成的关系。材料科学与冶金工艺的发展，为机械、船舶、桥梁、建筑工程提供了高强度、高性能钢材<sup>[1.1]</sup>。同时，实际工程的应用需求推动了钢结构的发展，尤其是 21 世纪后，大跨和超高层钢结构工程越来越多，对钢材的力学性能提出了更高的要

求，特别是要求结构材料应具有更高的抗拉屈服强度。因此，建筑钢结构中使用高强度钢材、高性能钢材成为建筑用钢一个主要的发展趋势。

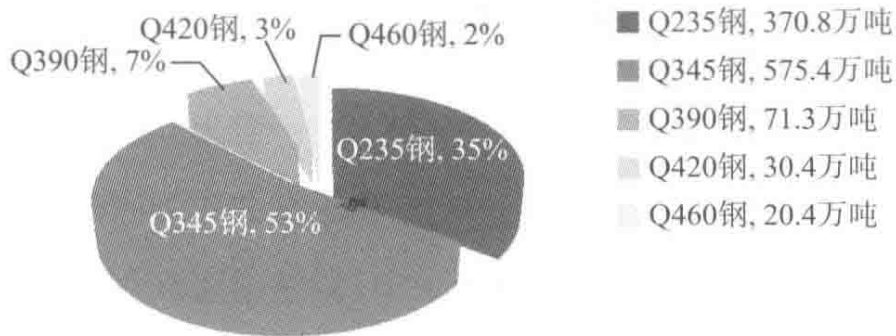


图 1.1 2009 年我国消费钢材强度级别及所占比例

近年来，各国普遍将屈服强度大于或等于 420MPa 的钢材称为高强钢，屈服强度高于 690MPa 的钢材称为超高强钢。这些等级的钢材得到应用的主要原因有以下几个方面<sup>[1,4]</sup>。

(1) 经济优化性能：通过提高钢材的强度可以减小构件截面尺寸，既减少了结构自重又降低了加工和安装成本，符合可持续发展战略的基本国策。

(2) 建筑功能需求：高强度结构钢材能够满足当前钢结构工程向更大跨度、更大高度发展的要求，并且创造更大的建筑结构空间。

(3) 资源环境保护：建筑用钢量的降低意味着减少了对世界稀缺资源的消耗，符合减排环保的基本国策。

(4) 耐久安全性能：现代高强钢不仅具有强度高的特性，一些特殊等级的高性能钢材还表现出良好的韧性，能够保证在施工过程中和结构使用过程中的安全性，适用于低温的现代海港结构用钢就是一个很好的例子。

低合金高强钢通过改进生产工艺，在保证低碳当量的基础上，适当增加了微合金元素的含量，使其具有良好的焊接性与抗

拉延伸性，并且材料强度较普通钢材提高。随着由舞阳钢铁厂研制生产的 Q460 高强度结构钢材首次在我国国家体育场“鸟巢”应用，对新型高强钢材料强烈的需求与制约高强钢应用现状的矛盾越加凸显。我国现有钢结构设计规范（GB 50017—2017）所涵盖的承重结构钢材最高牌号为 Q460，但是其关于高强钢的设计还是延续普通钢材的设计方法。Q460 及更高屈服强度的构件设计是否适用现有规范，如何进行分析设计成为亟待解决的问题。本书的研究重点即为 Q460 高强钢焊接截面压弯、纯弯构件等端弯矩荷载情况下整体稳定承载力设计计算方法。

## 1.2 高强钢结构工程应用现状

近年来，为了满足建筑物与构筑物高度和跨度不断增加的设计需求，高强度钢结构在美国、日本、欧洲、澳大利亚和中国等已有一些工程应用的实例，其涉及建筑结构、桥梁工程与输电铁塔结构等领域。

### 1.2.1 建筑结构

#### 1.2.1.1 索尼中心

2000 年，索尼公司在波茨坦广场建成了其在欧洲的总部——索尼中心（Sony Center）。索尼中心是以钢材和玻璃为主要材料建设的一个建筑群，其设计理念相当前卫。7 栋风格各异的大型玻璃建筑围成一个小广场，一个巨大的圆形穹顶在空中将它们连成一个整体，远望去仿佛一个飞碟落在建筑上一样，尤其在夜幕降临彩灯变换时，使这里多了一份神秘感。现在索尼中心已经成为柏林的标志性建筑，如图 1.2 所示。为了保护已有的一个砌体结构建筑物，工程将大楼的一部分楼层悬挂在屋顶桁架上，如图 1.3 所示。屋顶桁架跨度 60m，高 12m，其杆件用

600mm×100mm 矩形实心截面，采用了 S460 和 S690 钢材（强度标准值 460MPa 和 690MPa），以尽可能减小构件截面。在该工程中，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，研究结果保证了该结构在低温下的安全性<sup>[1,1]</sup>。

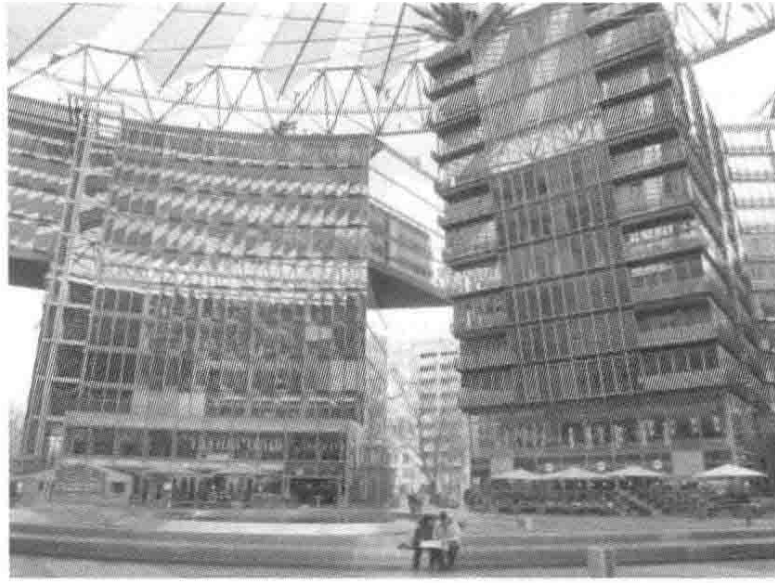


图 1.2 索尼中心帝王大厅



图 1.3 索尼中心圆形穹顶

## 1.2.1.2 星城饭店

澳大利亚悉尼的星城饭店 (Star City) (如图 1.4 所示) 坐落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, 由于地方议会要求这个建筑物至少提供 2500 个停车位, 这就使得地下车库的柱子截面尺寸最大为 500mm, 唯一的解决办法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。第二个区域是 Lyric 剧院屋顶的两个桁架。每个桁架都是跨度 30m, 高度 3.5m<sup>[1.5]</sup>。

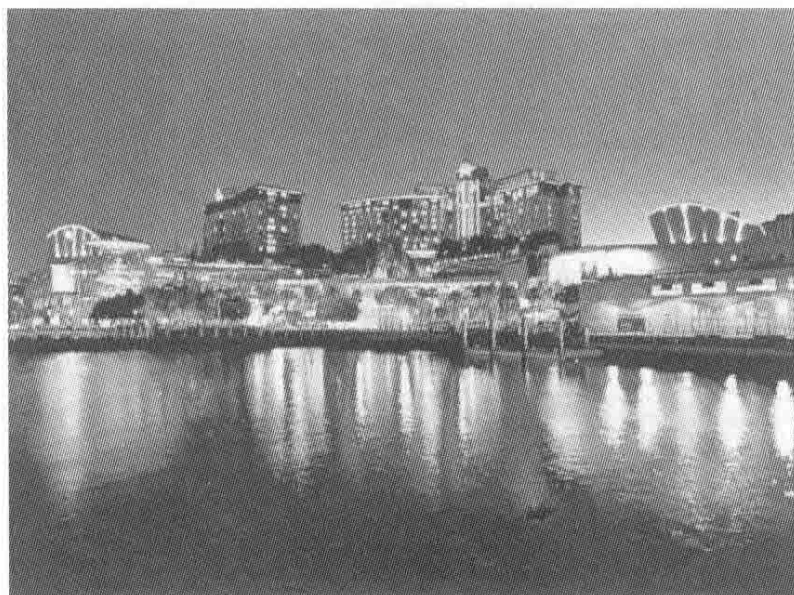


图 1.4 星城饭店

## 1.2.1.3 “鸟巢”

北京国家体育场 (“鸟巢”) 是 2008 奥运会主会场, 其地面以上的平面呈椭圆形, 长轴最大尺寸 323.3m, 短轴最大尺寸

296.4m；建筑屋盖顶面为双向圆弧构成的鞍形曲面，最高点高度为 68.5m，最低点高度为 42.8m；屋盖中部的洞口长度为 190m，宽度为 124m；其放射状混凝土框架结构与环绕它们并形成主屋盖的空间钢结构完全分离。空间钢结构由 24 榀门式桁架围绕着体育场内部碗状看台区旋转而成，与顶面和立面交织形成体育场整体的“鸟巢”造型，可容纳观众 9.1 万人，用钢 4.19 万吨。国家体育场钢结构工程中采用的 Q460E-Z35 厚板为舞阳钢厂生产的产品，厚度可以达到 110mm，在国内建筑钢结构工程应用尚属首例<sup>[1.9]</sup>。

除此之外，日本横滨的 Landmark Tower 大厦<sup>[1.5]</sup>采用了 600MPa 高强钢 H 形截面柱。美国休斯敦的雷利昂体育馆<sup>[1.6]</sup>的可开启屋顶，纵向巨型桁架结构采用了名义屈服强度为 450MPa 的 A913 Grade 65 高强钢材，如图 1.5 所示。



图 1.5 雷利昂体育馆

## 1.2.2 桥梁工程

### 1.2.2.1 德国 Dusseldorf-Ilverich 莱茵河大桥<sup>[1.7]</sup>

德国杜塞尔多夫的 Dusseldorf-Ilverich 莱茵河大桥如图 1.6 所示。由于靠近杜塞尔多夫机场，其桥塔高度受到限制。为了减小斜拉桥的承压塔高度，设计时采用两个 V 形承压塔，桥塔顶部中间的焊接箱形截面连系钢梁采用 S460 钢材，有效地减小了截面尺寸，并取得很好的经济效益。



图 1.6 德国 Dusseldorf-Ilverich 莱茵河大桥

### 1.2.2.2 法国 Millau 大桥<sup>[1.7]</sup>

法国著名的 Millau 大桥是一个多跨斜拉桥，建造高度达到 343m，如图 1.7 所示。桥梁截面中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 120mm 厚的 S460 钢板，取得了良好效果。



图 1.7 法国 Millau 大桥