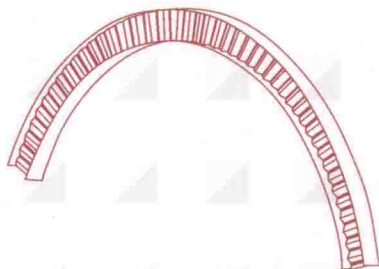
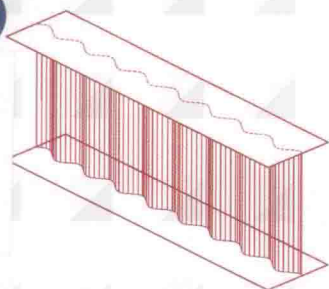


波形腹板钢结构 设计原理与应用

Design Fundamentals and Application
of Corrugated-web Steel Structures

郭彦林 童精中 姜子钦 著



科学出版社

波形腹板钢结构 设计原理与应用

郭彦林 童精中 姜子钦 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者课题组对波形腹板钢结构设计理论的最新研究成果,系统地阐述了各类波形腹板钢结构的受力特点、设计原理、设计方法及其工程应用等。重点介绍了波浪腹板工形轴心受力构件、受弯构件及压弯构件的承载力计算方法,波浪腹板受剪和局部承压稳定承载力计算,节点构造与设计,波浪腹板工形构件承载力与疲劳试验以及用波浪腹板连接的内核分离式防屈曲支撑的试验结果等。同时,也介绍了其他形式的波形腹板钢结构,如波浪腹板钢拱、波形钢板剪力墙、波形腹板组合构件受力性能与设计理论等。本书的部分研究成果已纳入我国《波浪腹板钢结构应用技术规程》(CECS290:2011)。

本书可作为从事波形腹板钢结构教学、科研、设计、制作及施工技术的人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

波形腹板钢结构设计原理与应用/郭彦林,童精中,姜子钦著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-043233-3

I. ①波… II. ①郭… ②童… ③姜… III. ①钢板-腹板-结构设计 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 022467 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 434 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62140850 编辑部电话 010-62148322

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

波形腹板钢结构是由冷轧成型的波形钢板与边缘构件共同组成的一类新型钢结构。目前应用最普遍的是波形腹板工形构件，适合应用在门式刚架轻型房屋结构、多层框架结构及大跨度梁系受弯构件中。波浪腹板工形截面钢拱、波形腹板组合构件、波形腹板箱型梁、波形钢板剪力墙以及用波形腹板连接的内核分离式防屈曲支撑构件等也开始在工程中应用。与一般平腹板工形构件比较，高而薄的波形腹板与翼缘板焊接形成的工形构件，能有效地提高截面的抗弯承载效率，其波形腹板的抗剪屈曲荷载也往往高出同厚度平腹板几倍到几十倍。此外，由于腹板波形使得构件在制作与运输过程中具备了必需的刚度，也进一步加大了其应用前景。

波形腹板工形构件具有独特的受力机理，轴向力与弯矩由截面翼缘承担，剪力完全由腹板承担且均匀分布。工程设计时需要建立波形腹板钢结构完整的设计理论与设计方法。本书结合作者课题组对波形腹板钢结构设计理论的最新研究成果，系统地阐述了各类波形腹板钢结构的受力特点、设计原理、设计方法及其应用等；重点介绍了波浪腹板工形轴心受力构件、受弯构件及压弯构件的承载力计算方法，波浪腹板的受剪和局部承压稳定承载力计算，节点构造与设计，波浪腹板工形构件的承载力和疲劳试验以及用波浪腹板连接的内核分离式防屈曲支撑的试验研究。此外，本书也对其他形式的波形腹板钢结构，如波浪腹板钢拱、波形钢板剪力墙、波形腹板组合构件等受力性能与设计理论进行了介绍。基于上述成果形成的我国《波浪腹板钢结构应用技术规程》(CECS290:2011)也已经实施。

本书共分13章，各章主要内容是：第1章，波形腹板钢结构的受力特点及应用范围；第2章，波浪腹板工形构件的强度计算模型、波浪腹板抗剪稳定承载力设计方法、局部承压及支承加劲肋承载力设计方法等；第3章，波浪腹板工形构件的翼缘板屈曲模态及设计宽厚比

限值；第4章，受弯构件平面内与平面外稳定承载力计算方法，波浪腹板工形构件截面翘曲惯性矩的推导，以及波浪腹板吊车梁设计方法；第5章，波浪腹板剪切刚度对绕强轴稳定承载力设计方法的影响，以及用波浪腹板连接的内核分离式防屈曲支撑设计方法；第6章，等截面与变截面压弯构件的平面内和平面外稳定承载力计算与设计方法；第7章，波浪腹板钢结构内力与变形计算方法；第8章，连接计算与构造设计；第9章，波形腹板组合构件的设计方法；第10章，波形钢板剪力墙的受力性能与承载力计算；第11章，波浪腹板工形截面钢拱的计算及设计理论；第12章，波浪腹板工形构件及钢拱的制造设备和制作技术；第13章，波浪腹板钢结构工程应用实例。

本书包含了课题组研究生王小安、童精中、姜子钦、张庆林、陈航、张旭乔、张博浩、朱博莉、刘锋、邓静芝、李靓姣等对波形腹板钢结构的部分研究成果。研究生陈航参与了第11章的研究工作，郇志乾绘制了部分插图。山东华兴钢结构有限公司、奥地利 ZEMAN 钢结构公司对波浪腹板钢结构的研究给予了支持。在此一并表示致谢。

鉴于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者斧正。



2015年元月

目 录

第 1 章 波形腹板钢结构的应用与发展	1
1.1 引言	1
1.2 波形腹板工形截面构件受力特点	3
1.3 结构应用	4
参考文献	9
第 2 章 波浪腹板截面及局部承载力计算	10
2.1 引言	10
2.2 截面承载力设计	10
2.2.1 轴心受压构件的受力特点	10
2.2.2 受弯构件的受力特点	12
2.2.3 受剪构件的受力特点	14
2.3 波浪腹板抗剪稳定承载力设计	16
2.3.1 波浪腹板抗剪屈曲性能	16
2.3.2 弹性屈曲荷载计算	18
2.3.3 弹塑性屈曲荷载计算	20
2.3.4 开孔波浪腹板抗剪稳定承载力设计	22
2.4 波浪腹板局部承压承载力设计	26
2.4.1 有限元模型介绍	27
2.4.2 腹板几何初始缺陷的影响	28
2.4.3 腹板局部承压破坏形式	28
2.4.4 局部承压承载力计算公式	29
2.4.5 弯矩和局部荷载作用下承载力相关公式	31
2.5 波浪腹板支承加劲肋承载力设计	33
2.5.1 支承加劲肋类型及受力特点	33
2.5.2 有限元模型及初始缺陷	34
2.5.3 弹塑性极限承载力设计方法	35
2.6 波浪腹板抗剪承载力试验	38
2.7 本章小结	42

参考文献	43
第 3 章 翼缘板局部稳定设计	45
3.1 引言	45
3.2 翼缘稳定设计原则及简化模型	46
3.3 翼缘板弹性屈曲荷载	48
3.3.1 翼缘宽厚比的影响	48
3.3.2 腹板波形的影响	49
3.3.3 边界条件的影响	53
3.4 翼缘板弹塑性屈曲荷载及宽厚比限值	54
3.5 本章小结	55
参考文献	56
第 4 章 受弯构件	57
4.1 引言	57
4.2 波浪腹板受弯构件的设计理论	57
4.2.1 抗弯及抗剪强度设计	57
4.2.2 腹板抗剪稳定承载力	58
4.2.3 波浪腹板梁平面外整体稳定计算	58
4.2.4 挠度计算	59
4.3 平面外稳定设计理论	59
4.3.1 扭转惯性矩与翘曲惯性矩	59
4.3.2 弹性屈曲临界弯矩	65
4.3.3 平面外稳定承载力计算	69
4.4 平面内承载力试验	72
4.4.1 试件设计与加载方案	72
4.4.2 试验结果及分析	73
4.4.3 有限元数值分析	76
4.5 平面外稳定试验	79
4.5.1 试件设计与加载方案	79
4.5.2 试验结果及分析	80
4.6 吊车梁	83
4.6.1 静力计算	83
4.6.2 疲劳计算	85
4.6.3 标准吊车梁构件	87
4.6.4 吊车梁疲劳性能试验研究	88

4.7 本章小结	93
参考文献	94
第5章 轴心受压构件	96
5.1 引言	96
5.2 强度计算	96
5.3 绕弱轴稳定设计	97
5.4 绕强轴稳定设计	99
5.5 轴心受压构件试验研究	103
5.6 波浪腹板连接的分离式防屈曲支撑	107
5.6.1 弯曲侧向位移与剪切侧向位移的关系	109
5.6.2 单内核防屈曲支撑的弹性屈曲荷载	109
5.6.3 波浪腹板连接的分离式防屈曲支撑屈曲荷载：两端固接	111
5.6.4 波浪腹板连接的分离式防屈曲支撑屈曲荷载：两端铰接	113
5.7 用波浪腹板连接的分离式防屈曲支撑试验研究	119
5.7.1 试件基本参数	119
5.7.2 加载与测试方案	119
5.7.3 试验结果及分析	121
5.8 本章小结	124
参考文献	125
第6章 压弯构件	127
6.1 引言	127
6.2 强度验算	127
6.3 压弯构件稳定承载力研究方法	128
6.4 等截面压弯构件稳定性能	129
6.4.1 平面内稳定计算	129
6.4.2 平面外稳定计算	131
6.5 变截面压弯构件稳定性能	133
6.5.1 平面内稳定计算	133
6.5.2 平面外稳定计算	135
6.5.3 阶形柱稳定计算	138
6.6 压弯构件平面内稳定承载力试验	146
6.6.1 等截面构件	146
6.6.2 变截面构件	150
6.7 本章小结	153

参考文献	154
第7章 变形计算	156
7.1 引言	156
7.2 受弯构件挠度计算	156
7.3 阶形柱侧向变形计算	158
7.4 开孔对波浪腹板梁挠度的影响	161
7.5 波浪腹板结构变形计算有限元简化模型	164
7.5.1 简化模型的提出	164
7.5.2 梁单元简化模型与壳单元模型比较	165
7.5.3 简化模型参数的敏感性分析	166
7.5.4 梁单元简化模型与壳单元模型用于门式刚架变形 计算的比较	167
7.6 门式刚架的侧向变形计算	168
7.6.1 单跨等截面门式刚架变形	168
7.6.2 单跨变截面门式刚架变形	171
7.6.3 多跨门式刚架变形	175
7.7 本章小结	177
参考文献	178
第8章 节点构造与设计	179
8.1 引言	179
8.2 节点构造	179
8.2.1 门式刚架梁-柱节点	180
8.2.2 门式刚架梁-梁节点、柱-柱节点	184
8.2.3 门式刚架柱的牛腿节点	185
8.2.4 门式刚架柱脚节点	186
8.2.5 吊车梁节点	187
8.2.6 多高层框架梁-柱、梁-梁连接节点	189
8.2.7 主桁架与波形腹板梁刚性连接	192
8.2.8 箱型桥梁波形腹板与翼板连接	192
8.2.9 波形钢板墙连接节点	194
8.2.10 波浪腹板拱节点构造	196
8.3 节点设计	197
8.3.1 梁-柱节点设计	197
8.3.2 牛腿节点设计	201

8.3.3 柱脚节点设计	201
8.4 本章小结	204
参考文献	204
第9章 波形腹板组合构件	206
9.1 引言	206
9.2 波形腹板组合梁	207
9.2.1 有效宽度计算	207
9.2.2 抗弯承载力计算	209
9.2.3 抗剪承载力计算	213
9.2.4 剪力连接件设计	213
9.2.5 挠度计算	214
9.3 波形腹板组合箱型桥梁	216
9.3.1 发展现状及其受力特点	216
9.3.2 设计要点	217
9.4 波形腹板组合柱	220
9.4.1 单肢承载力计算	221
9.4.2 整体承载力计算	222
9.4.3 波形腹板抗剪承载力计算	223
9.5 本章小结	224
参考文献	224
第10章 波形钢板墙	226
10.1 引言	226
10.2 普通波形钢板墙	228
10.2.1 波形棱线水平放置的波形钢板墙	228
10.2.2 波形棱线竖直放置的波形钢板墙	234
10.3 加劲波折钢板墙	239
10.3.1 抗剪弹性屈曲荷载的推导	240
10.3.2 数值计算及公式拟合	247
10.4 多层钢板剪力墙	254
10.5 波形钢板-混凝土组合剪力墙	256
10.6 本章小结	259
参考文献	260
第11章 波浪腹板钢拱	261
11.1 引言	261

11.2	弧形波浪腹板的受剪性能	261
11.2.1	剪切刚度修正	262
11.2.2	抗剪承载力	263
11.3	平面内强度计算	264
11.3.1	简化计算模型	265
11.3.2	截面承载力控制下的经济性比较	266
11.4	平面内破坏机理及承载力	269
11.4.1	径向均布荷载	269
11.4.2	全跨水平均布荷载	270
11.5	均匀受压波浪腹板拱的稳定系数	271
11.5.1	两铰圆弧拱均匀受压下的弹性屈曲荷载	271
11.5.2	均匀受压拱的稳定系数	272
11.6	全跨均布荷载作用下的稳定承载力	274
11.6.1	稳定承载力计算	274
11.6.2	设计方法	276
11.7	波浪腹板钢拱试验	277
11.7.1	构件设计与加载方案	277
11.7.2	试验结果及分析	279
11.7.3	有限元数值模拟	280
11.8	本章小结	282
	参考文献	283
第 12 章	波浪腹板构件的制造技术	284
12.1	引言	284
12.2	波浪腹板工形构件的制作误差控制	284
12.3	波浪腹板工形构件制作技术	285
12.4	波浪腹板钢拱制作技术	288
12.5	波浪腹板箱型截面构件制作技术	291
12.6	本章小结	295
	参考文献	295
第 13 章	工程应用	296
13.1	引言	296
13.2	构件经济效益比较	296
13.2.1	构件经济性比较	296
13.2.2	设计算例	300

13.3 轻型门式刚架：华兴钢构 1 号车间	301
13.3.1 工程概况	301
13.3.2 结构设计条件	302
13.3.3 厂房结构试设计	303
13.4 大跨度屋面梁：滨州市某职工餐厅	320
13.4.1 工程概况	320
13.4.2 框架设计	322
13.4.3 节点设计	323
13.5 大跨度屋面梁：北京五里桥停车列检库	324
13.5.1 工程概况	324
13.5.2 框架设计	325
13.5.3 节点设计	325
13.6 本章小结	326
参考文献	327
附录	328

第 1 章 波形腹板钢结构的应用与发展

1.1 引 言

波形腹板钢结构构件是由冷轧成型的波形腹板与边缘构件共同组成的一类新型钢结构构件，其腹板按照截面波形的不同，通常可分为正弦波形腹板、梯形波折腹板和三角波折腹板三种^[1]，如图 1.1 所示。通常将正弦波形腹板称为波浪腹板，而将梯形或三角形腹板统称为波折腹板。

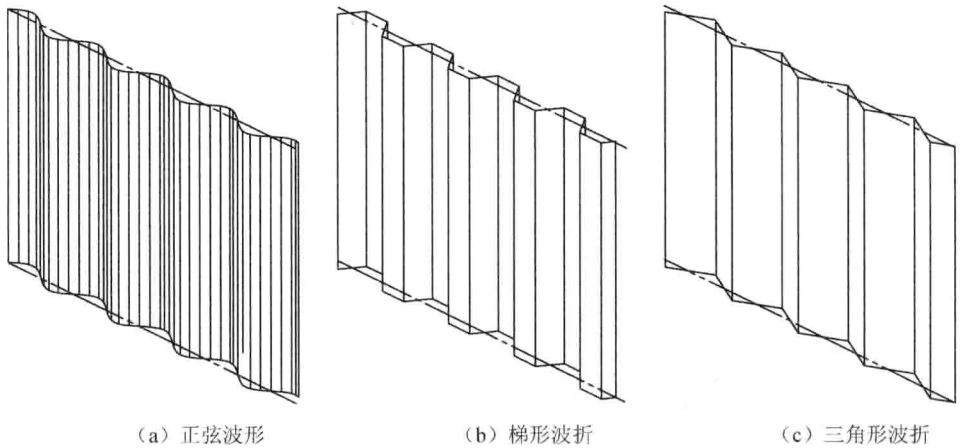


图 1.1 波形腹板的三种截面形式

波形腹板钢结构构件形式多样，主要包括波形腹板工形截面构件、波形钢板剪力墙、波浪腹板钢拱、波形腹板组合构件等。其中，波形腹板工形截面构件由波形腹板和平翼缘通过高频连续焊接组成，目前最常用的两种截面形式是波浪腹板工形截面构件与梯形波折腹板工形截面构件，如图 1.2 所示。

波形腹板工形截面构件作为普通焊接工形截面构件的一种改进形式，已在德国、奥地利、澳大利亚等国家的门式刚架及多层轻型房屋钢结构工程中应用。近十年来，随着国内对波形腹板钢结构设计理论与试验研究工作的不断深入，已经形成了我国的《波浪腹板钢结构应用技术规程》(CECS290:2011)^[2]，主要适用

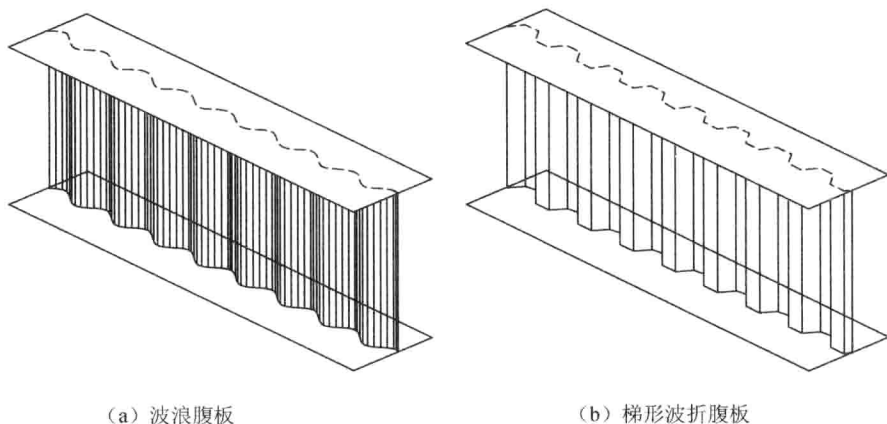


图 1.2 波形腹板工形截面构件

于使用波浪板作为构件腹板的门式刚架轻型房屋钢结构以及梁系构件的设计、制作、安装及验收。2010年，山东华兴钢结构有限公司从奥地利引进了国内第一条波浪腹板工形构件全自动化生产设备（图 1.3），并消化改进形成了具有自主知识产权的波浪腹板工形构件全自动化生产线。显然，这一切都在很大程度上推动着波形腹板钢结构这一新型高效结构体系在国内的推广与应用。

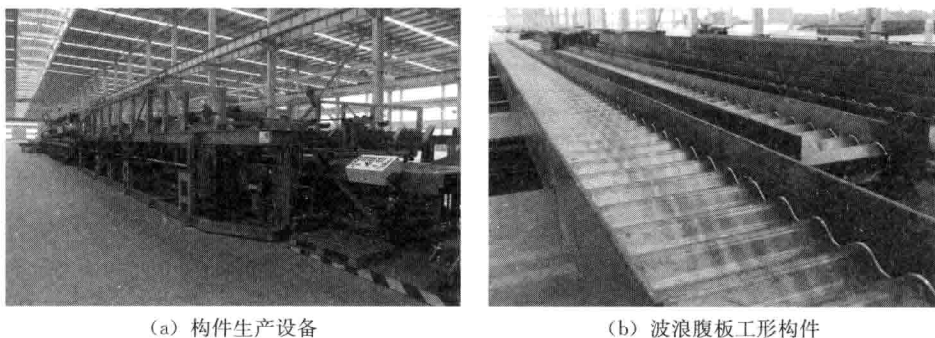


图 1.3 波浪腹板工形构件生产设备

波浪腹板工形截面构件应用在梁系结构中，其承载效率更高、跨度更大、节省材料更突出，有着非常广阔的应用前景。目前在工程中应用的截面形式有多种，翼缘可采用平钢板、箱型截面型材等，腹板可采用单腹板以及双腹板等，如图 1.4 所示。

波形腹板还可以应用在组合构件中，如组合梁（板）或组合柱等，如图 1.5 所示。

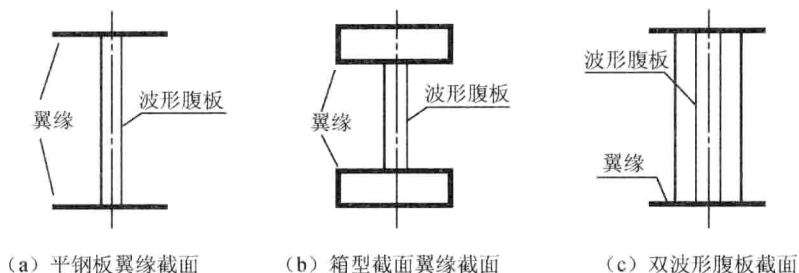


图 1.4 波形腹板构件的截面形式

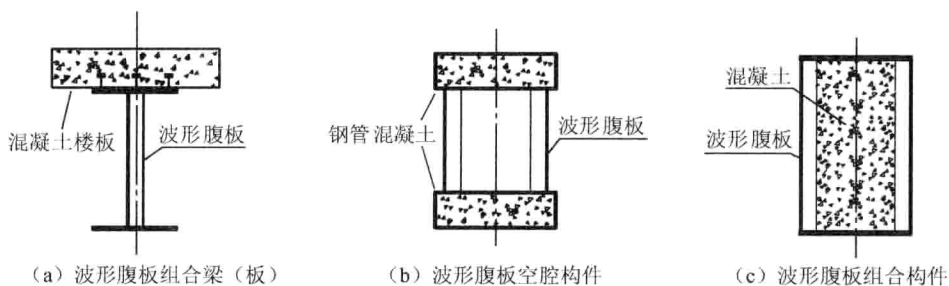


图 1.5 波形腹板组合构件的截面形式

1.2 波形腹板工形截面构件受力特点

波形腹板工形构件是波形腹板钢结构最主要的构件形式之一。传统的平腹板工形构件可分为焊接工形构件、热轧工字型钢与 H 型钢三种。焊接构件一般通过板材切割后焊接而成，因而可灵活控制截面尺寸；相比之下，热轧型钢构件板件厚度较大，截面更为厚实，因而不会出现板件的局部屈曲，截面尺寸根据整体承载力需求来决定，容易造成材料的浪费。对于承受横向荷载的焊接工形截面梁，工程中希望把腹板做得尽可能高而薄，从而达到增加截面惯性矩、提升构件抗弯承载力的目的；实际上，如果构件腹板高厚比过大，在制作、运输及现场安装过程中容易产生较大变形，制作与安装位形控制难度较大。因此，现行的《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:2002)^[3]中规定，平腹板工形构件腹板高厚比不应大于 250，以防止由于构件腹板刚度不足而给制作、运输、安装等工作带来不便。

为了克服传统平腹板工形构件所存在的上述问题，最早在国外出现了波浪腹板和梯形波折腹板工形截面构件。与平腹板工形构件相比，波浪或波折腹板工形构件的面外刚度与扭转刚度大大提高，即便腹板高厚比远远超过了 250 的规范限

值，仍然能够保证构件在制作、运输及安装过程中的刚度要求。

相关研究表明^[4,10]，腹板的面外正弦波浪或梯形波折变形可以很大程度上改善工形构件的抗剪受力性能，其抗剪屈曲荷载是同厚度平腹板的几倍甚至几十倍；与此同时，由于存在面外的正弦波浪或梯形波折变形，腹板在法向力作用下退出工作。对于受弯或压弯波浪腹板或梯形波折腹板构件，由于腹板面外刚度增强，可以通过增大腹板高度、减小腹板厚度来有效提高构件承载力。尽管采用波形腹板牺牲了腹板自身承受弯矩的能力，但增大腹板高度可使翼缘板对构件整体抗弯承载力的贡献更大。可以设想，如果梁腹板的高度设计不受空间限制，其跨度愈大，承载力效率就越高。对于轴心受压波形腹板构件，尽管腹板不能承载轴向应力，但可以通过增大腹板高度、减小腹板厚度并增大翼缘截面尺寸来提高构件的惯性矩和整体稳定性，这种处理方式对于稳定承载力控制的轴压构件设计也是十分有效的。

在不同设计参数下对波浪腹板构件及平腹板构件进行比较，并对大量现有波浪腹板钢结构工程进行实际测算发现^[5]，与传统平腹板构件相比，采用波浪腹板工形构件的门式刚架或吊车梁结构体系，用钢量均可降低 20% 以上。结构的跨度或梁跨度越大，节材效果越明显。

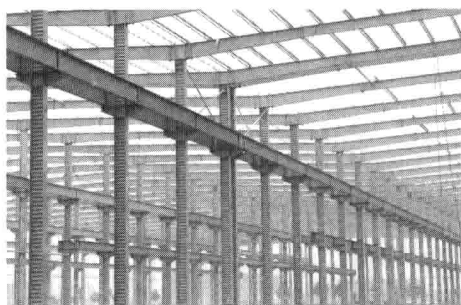
综上所述，波形腹板工形构件在作为大跨度构件时体现出节约材料、提高承载力效率的优势，但是同样存在些许劣势。腹板所具有的面外波形虽然提高了其自身的面外抗弯刚度，但腹板沿构件轴向的压缩刚度几乎变为零，故不能承受腹板截面的法向应力；另外，由于腹板冷轧成波浪形或梯形波折形，使得波形腹板工形构件之间的连接节点的构造设计变得复杂，在节点或节点域处往往需要将波浪腹板置换成平腹板或者采取其他相关构造措施才能实现节点的可靠连接和荷载的有效传递。

1.3 结构应用

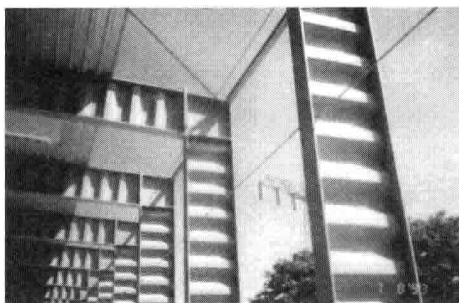
波形腹板工形构件最适合应用在门式刚架轻型房屋结构体系、多层框架结构及大跨度梁系结构体系中。尤其在大跨度工业厂房、大跨度空间结构以及桥梁结构中，更能发挥其优越的力学及经济性能。

波浪腹板和梯形波折腹板工形构件主要应用在门式刚架轻型房屋钢结构中(图 1.6)，这是由波形腹板构件的轻量化及其较高的承载力效率决定的。由于此类构件可以标准化、工业化生产，因而更加适合应用在装配式的门式刚架结构中。众所周知，门式刚架结构主要采用焊接工形构件，其截面尺寸的选择十分灵活，通常其腹板做得较高而厚度取值较小，能充分发挥翼缘对抗弯承载力的贡

献。但是,平腹板的厚度选择受其运输与安装刚度的要求影响不能太小,否则其变形过大会影响安装质量。波浪腹板工形构件的出现能很好地解决这一问题,腹板可以做得高而薄,比平腹板工形构件具有更好的经济效益。



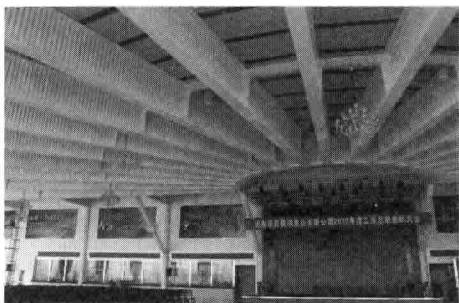
(a) 某工业厂房(波浪腹板)



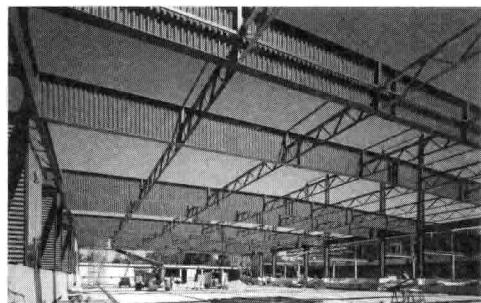
(b) 某工业厂房(梯形波折腹板)

图 1.6 波形腹板工形构件在门式刚架轻型房屋钢结构中的应用

波形腹板工形构件也同样适合应用在大跨度空间结构中(图 1.7),如会展中心、体育馆、机库等。作为大跨度梁系构件,采用高而薄的波形腹板,不仅能保证腹板具有较大的抗剪屈曲荷载,而且能充分提高构件的整体抗弯刚度。特别是结构跨度越大,越能体现出波形腹板构件承载效率高与节约材料的优点。



(a) 山东滨州市某职工餐厅



(b) 国外某建筑

图 1.7 波形腹板工形构件在大跨空间结构中的应用

此外,波形腹板工形构件还可以应用在多层框架结构中的梁系构件上(图 1.8)。当主梁与框架柱刚接连接且设计要求在梁端附近充分发展塑性变形时,可在框架柱上伸出一段平腹板工形截面牛腿,再与波形腹板工形截面梁连接,这样可使梁端有充分的塑性变形能力而形成塑性铰。当次梁和主梁均采用波形腹板工形构件时,由于楼面板能提供侧向支撑作用,设计无需考虑梁的整体稳定性,此时腹板尽可以做得高而薄,其抗弯刚度和抗弯承载力更高。

除了上述应用的波形腹板工形构件,波形腹板钢结构还有其他多种形式。目前建成的不少桥梁结构中(图 1.9),波形腹板常作为 PC 组合箱梁的腹板,这也