



# 波纹腹板钢结构性能、设计与应用

BEHAVIOR, DESIGN AND APPLICATION OF STEEL  
CORRUGATED WEB STRUCTURES

◎李国强 张哲 范昕 编著



中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 波纹腹板钢结构性能、设计与应用

李国强 张 哲 范 昕 编著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

波纹腹板钢结构性能、设计与应用/李国强, 张哲, 范昕编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 12  
ISBN 978-7-112-21378-8

I. ①波… II. ①李… ②张… ③范… III. ①腹板-钢结构-结构设计 IV. ①TU225②TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 256550 号

传统平腹板受弯钢构件的腹板高度不能太大, 以保证腹板的局部稳定性, 使其在屈服前不发生局部屈曲。这种限制使得平腹板钢构件的腹板不能太薄, 造成钢构件腹板厚度和用钢量较大。为提高钢构件腹板的稳定性, 同时又不增加腹板的厚度, 可用波纹腹板代替平腹板, 这样在不采用加劲肋的条件下腹板就具有较大的平面外刚度和稳定性, 即可确保腹板屈服前不发生局部屈曲, 使腹板材料强度充分发挥作用, 从而降低钢构件的用钢量。达到节材轻量、节约资源、减排环保目的。本书系统地介绍了波纹腹板钢结构的受力性能和设计方法, 包括: 概述波纹腹板抗剪性能; 波纹腹板 H 形钢翼缘受压局部稳定; 波纹腹板 H 形钢截面抗弯性能; 波纹腹板 H 形钢梁整体稳定; 波纹腹板 H 形钢梁局部承压强度; 波纹腹板 H 形钢梁抗疲劳性能; 波纹腹板 H 形钢组合梁受力性能; 波纹腹板 H 形钢梁开洞与补强; 波纹腹板钢结构节点与设计; 波纹腹板钢结构应用。本书还通过一些典型工程实例, 介绍了波纹腹板钢结构工程应用的情况及效益。

责任编辑: 赵梦梅 刘瑞霞

责任设计: 李志立

责任校对: 王 瑞 姜小莲

## 波纹腹板钢结构性能、设计与应用

李国强 张 哲 范 昕 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京富生印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 410 千字

2018 年 4 月第一版 2018 年 4 月第一次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-21378-8

(31092)

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)

# 序

我国当前仍处于城镇化发展与建设阶段，与建筑业相关的资源消耗占全国资源利用总量的40%~50%，能源消耗约占全国能耗总量的30%，因此在保证安全的前提下，节约建筑、桥梁等国家基础设施建设的材料消耗量，提高其结构性能，对我国可持续发展战略有重要意义。

采用波形钢腹板代替传统平腹板钢构件，可以提高钢腹板的稳定性，大幅度减小腹板厚度，减少用钢量。将波形钢腹板替代传统混凝土或预应力混凝土构件腹板，构成组合构件，不但可以利用波形钢腹板抗剪切屈曲能力强的优点，显著减少混凝土用量，还可以发挥波形钢腹板纵向刚度小的特点，避免传统混凝土构件因收缩、徐变造成腹板易开裂对结构性能影响大的问题，也能大大减少预应力损失。我十多年前就进行了波纹钢腹板组合箱梁的研究，并在桥梁工程中得以应用。

我与李国强教授均从事钢结构研究，我们两人的导师王世纪教授和沈祖炎院士是我国钢结构领域交往很深的学术前辈，因此我们很早就相识，并在学术生涯中结下深厚的友谊。国强天资聪慧，勤奋好学，1978年15周岁考入天津大学，1985年重庆建筑工程学院硕士毕业和1988年同济大学博士毕业时曾两度想回家乡湖南大学工作，均因故未能如愿，我们未能成为同事。但多年后我们在国家高级教育行政学院同学三个月，也算有同窗之谊。

李国强教授一直从事钢结构研究，他对钢结构相关问题的认识较全面，研究较系统而深入，这也体现在他对波纹腹板钢构件受力性能与设计理论问题的研究上。波纹腹板钢构件多用于建筑结构，针对其应用中亟须解决的一系列问题，他开展了系统的研究，这些问题包括：概述波纹腹板抗剪性能；波纹腹板H形钢翼缘受压局部稳定；波纹腹板H形钢截面抗弯性能；波纹腹板H形钢梁整体稳定；波纹腹板H形钢梁局部承压强度；波纹腹板H形钢梁抗疲劳性能；波纹腹板H形钢组合梁受力性能；波纹腹板H形钢梁开孔洞与补强；波纹腹板钢结构节点与设计；波纹腹板钢结构应用。本书即是这些研究成果的汇集。

波纹钢腹板结构（包括波纹腹板钢结构和波纹钢腹板组合结构）在我国已推广用于桥梁与建筑结构，但应用比率还不高。相信本书的出版有助于高校学生和设计院工程师了解波纹钢腹板结构（特别是波纹腹板钢结构）的知识，为促进波纹腹板钢结构的广泛应用发挥作用。

周绪红

中国工程院院士

2016年6月

# 前 言

2014年我国粗钢产量为8.23亿吨,约为世界总产量一半。钢铁生产除消耗资源和能源外,还会造成环境污染,因此节约用钢是我国节能环保、可持续发展战略的需求。钢结构在我国广泛用于建筑、桥梁、输电塔、海洋平台等重要设施,传统钢结构构件(特别是受弯构件)多采用工字形或箱型截面,腹板采用平钢板。为使构件具有较大的抗弯能力,构件截面设计尽可能加大腹板高度,以充分利用翼缘抗弯效率高的特性。

然而传统平腹板受弯钢构件的腹板高度也不能太大,腹板的高厚比需限制在80以内,以保证腹板的局部稳定性,使其在屈服前不发生局部屈曲。这种限制使得平腹板钢构件的腹板不能太薄,造成钢构件腹板厚度和用钢量较大。为减小高大截面钢构件腹板的厚度,传统的措施是在腹板上设置加劲肋。但加劲肋除增加钢构件用钢量和制作工作量外,还因焊接加劲肋增加构件的初始缺陷,影响构件的受力性能。

为提高钢构件腹板的稳定性,同时又不增加腹板的厚度,可用波纹腹板代替平腹板,这样在不采用加劲肋的条件下腹板就具有较大的平面外刚度和稳定性,采用较薄的钢板(高厚比可达600),即可确保腹板屈服前不发生局部屈曲,使腹板材料强度充分发挥作用,从而降低钢构件的用钢量。与平腹板钢构件相比,腹板部分采用波纹形式后可降低用钢量30%~60%,显著提升钢结构的经济性,达到节材轻量、节约资源、减排环保目的。

国外对波纹腹板钢构件的研究始于20世纪50~60年代,而我国的研究比国外要晚,约始于20世纪80年代,周绪红院士、聂建国院士、郭彦林教授等是我国较早开展波纹钢腹板构件受力性能与计算理论的研究者。然而,由于受波纹钢腹板制造的限制,特别是波纹腹板H形钢构件的自动生产设备需进口,大大制约了我国波纹钢腹板技术的推广应用。

进入21世纪,国内企业认识到波纹钢腹板技术的先进性,开始自主研制波纹腹板钢构件制造技术,特别研制成功波纹腹板H形钢构件的生产线,为在我国(尤其在建筑领域)推广波纹腹板钢结构技术创造了条件。正是在这样的背景下,我们开始从事波纹腹板钢结构的理论与应用研究。

为解决波纹腹板钢结构应用的设计与计算问题,自2005年我们系统地开展了下列研究:

- 1) 波纹腹板抗剪性能;
- 2) 波纹腹板H形钢翼缘受压局部稳定;
- 3) 波纹腹板H形钢截面抗弯性能;
- 4) 波纹腹板H形钢梁整体稳定;
- 5) 波纹腹板H形钢梁局部承压强度;
- 6) 波纹腹板H形钢梁抗疲劳性能;
- 7) 波纹腹板H形钢组合梁受力性能;
- 8) 波纹腹板H形钢梁开孔与补强;
- 9) 波纹腹板钢结构节点与设计。

本书即是在参考国内外相关研究成果的基础上，对我们在波纹腹板钢结构方面的研究成果加以总结而成。全书大纲由我拟定，由张哲起草第1、2、4、6、8、11章，范昕起草第3、5、7、10章，我起草第9章，最后由我负责全书的修改和统稿。

本书内容主要基于下列我所指导研究生的学位论文工作，他们是张哲博士、范昕博士、罗小丰硕士、朱奇硕士和邱介尧硕士。我的同事孙飞飞教授参与了上述研究生的指导，对本书介绍的研究成果也有重要贡献。此外，上海欧本钢结构有限公司和浙江中隧桥波形钢腹板有限公司对本书介绍的工作也给予了大力支持，对此，本书作者表示衷心感谢。

由于我们学识和水平有限，书中不当与错误之处，敬请读者批评指正。

李国强

2016年5月

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 波纹腹板钢结构的特点	1
1.1.1 形式与类型	1
1.1.2 受力特性与优越性	2
1.1.3 设计和应用需关注的重点	3
1.2 波纹腹板钢结构的应用概况	4
1.3 波纹腹板钢结构的发展现状	5
1.3.1 产品现状	5
1.3.2 研究现状	7
1.3.3 设计规范现状	8
参考文献	8
第 2 章 波纹腹板抗剪性能	10
2.1 波纹腹板 H 形钢抗剪性能研究概述	10
2.1.1 波纹腹板抗剪基本理论	10
2.1.2 对相关研究成果的分析	11
2.2 波纹腹板 H 形钢抗剪性能试验研究	20
2.2.1 试验概况	21
2.2.2 试验结果	22
2.2.3 试验结果讨论	25
2.3 波纹腹板 H 形钢腹板波形的优化	28
2.3.1 优化基本理论	28
2.3.2 优化分析	29
2.3.3 优化结果验证	31
参考文献	31
第 3 章 波纹腹板 H 形钢翼缘受压局部稳定	33
3.1 概述	33
3.2 理论分析	36
3.2.1 波纹腹板 H 形钢梁翼缘局部屈曲三角级数解	36
3.2.2 波纹腹板 H 形钢梁翼缘局部屈曲多项式解	39
3.3 试验研究	45
3.4 试验分析与设计建议	51
参考文献	56

<b>第 4 章 波纹腹板 H 形钢截面抗弯性能</b> .....	58
4.1 概述 .....	58
4.2 抗弯承载力 .....	58
4.2.1 理论分析 .....	59
4.2.2 试验研究 .....	59
4.2.3 试验结果讨论 .....	62
4.3 变形性能 .....	64
4.3.1 波纹腹板 H 形钢弹性刚度分析 .....	64
4.3.2 波纹腹板 H 形钢延性性能分析 .....	66
4.4 总结 .....	67
参考文献 .....	68
<b>第 5 章 波纹腹板 H 形钢梁整体稳定</b> .....	69
5.1 概述 .....	69
5.2 等截面波纹腹板 H 形钢梁整体稳定性能 .....	70
5.2.1 弹性稳定承载力 .....	70
5.2.2 弹塑性极限稳定承载力 .....	73
5.2.3 整体稳定承载力设计方法 .....	75
5.3 变截面波纹腹板 H 形钢梁整体稳定性能 .....	76
5.3.1 弹性稳定承载力 .....	77
5.3.2 弹塑性稳定承载力 .....	88
5.3.3 试验验证 .....	90
参考文献 .....	102
<b>第 6 章 波纹腹板 H 形钢梁局部承压强度</b> .....	103
6.1 概述 .....	103
6.2 试验研究 .....	105
6.3 试验结果分析 .....	112
6.4 波纹腹板 H 形钢吊车梁局部压应力分布及设计表达式 .....	114
6.5 结论与设计建议 .....	116
参考文献 .....	117
<b>第 7 章 波纹腹板 H 形钢梁抗疲劳性能</b> .....	118
7.1 概述 .....	118
7.2 试验研究 .....	118
7.2.1 试验装置 .....	118
7.2.2 加载制度 .....	119
7.2.3 试验现象 .....	120
7.2.4 结果分析 .....	122



7.3 有限元分析 .....	123
7.3.1 应力分析 .....	123
7.3.2 下翼缘应力分布 .....	124
7.3.3 腹板下边缘应力分布 .....	126
7.3.4 支座加劲肋附近应力分布 .....	128
7.4 设计建议 .....	128
参考文献 .....	129
<b>第 8 章 波纹腹板 H 形钢组合梁受力性能 .....</b>	<b>131</b>
8.1 概述 .....	131
8.2 抗剪性能理论分析 .....	133
8.2.1 弹性分析 .....	133
8.2.2 塑性分析 .....	134
8.3 抗剪性能试验研究 .....	136
8.3.1 试件设计与制作 .....	136
8.3.2 试验装置和测量内容 .....	137
8.3.3 试验结果及分析 .....	137
8.4 抗剪性能有限元分析 .....	140
8.4.1 模型建立 .....	140
8.4.2 有限元分析结果 .....	141
8.5 抗弯承载力理论分析 .....	143
8.5.1 弹性分析 .....	143
8.5.2 塑性分析 .....	145
8.6 抗弯性能试验 .....	148
8.6.1 试件设计与制作 .....	148
8.6.2 试验装置和测量内容 .....	149
8.6.3 试验结果 .....	150
8.6.4 结果分析 .....	153
8.7 抗弯性能有限元分析 .....	154
8.7.1 模型建立 .....	154
8.7.2 结果分析 .....	154
8.8 变形性能 .....	156
8.8.1 考虑滑移效应的短期刚度及变形计算 .....	157
8.8.2 试验对刚度分析的验证 .....	160
8.9 结论 .....	162
参考文献 .....	162
<b>第 9 章 波纹腹板 H 形钢梁开洞与补强 .....</b>	<b>165</b>
9.1 概述 .....	165

9.2 波纹腹板 H 形钢梁开洞后的性能 .....	166
9.2.1 弹性抗剪屈曲承载力 .....	166
9.2.2 弹塑性抗剪屈曲承载力 .....	172
9.3 波纹腹板 H 形钢梁开洞的补强 .....	180
9.3.1 补强方法 .....	180
9.3.2 补强原则与要求 .....	180
参考文献 .....	190
<b>第 10 章 波纹腹板钢结构节点与设计</b> .....	<b>191</b>
10.1 波纹腹板钢结构连接节点构造形式 .....	191
10.1.1 波纹腹板钢 H 形钢梁柱铰接节点构造形式 .....	191
10.1.2 波纹腹板 H 形钢梁柱栓焊刚接节点构造形式 .....	191
10.1.3 波纹腹板 H 形钢梁柱端板螺栓连接节点构造形式 .....	191
10.1.4 波纹腹板 H 形钢主次梁连接节点构造形式 .....	192
10.1.5 波纹腹板 H 形钢梁梁端板螺栓拼接节点构造形式 .....	192
10.2 波纹腹板 H 形钢梁柱铰接节点 .....	193
10.2.1 节点性能 .....	193
10.2.2 设计方法 .....	197
10.3 波纹腹板 H 形钢梁柱刚接节点 .....	199
10.3.1 节点性能 .....	199
10.3.2 设计方法 .....	201
10.4 波纹腹板 H 形钢梁柱螺栓端板连接节点 .....	205
10.4.1 节点性能 .....	205
10.4.2 设计方法 .....	210
10.5 波纹腹板 H 形钢梁拼接节点 .....	214
10.5.1 节点性能 .....	214
10.5.2 设计方法 .....	220
10.6 波纹腹板 H 形钢主次梁铰接节点性能研究 .....	222
10.6.1 节点性能 .....	222
10.6.2 设计方法 .....	228
参考文献 .....	230
<b>第 11 章 波纹腹板钢结构应用</b> .....	<b>231</b>
11.1 设计与应用要点 .....	231
11.1.1 波纹腹板钢结构合理应用范围 .....	231
11.1.2 波纹腹板钢结构软件支持 .....	231
11.1.3 在设计中应注意的问题 .....	232
11.2 结构运输与安装要点 .....	234
11.2.1 建筑结构运输与安装要点 .....	234

11.2.2 桥梁结构运输与安装要点 .....	241
11.3 应用实例 1: 烟台潮水机场 .....	247
11.3.1 工程概况 .....	247
11.3.2 采用波纹腹板钢结构情况 .....	247
11.3.3 采用波纹腹板钢结构的效益分析 .....	247
11.4 应用实例 2: 靖江体育中心 .....	248
11.4.1 工程概况 .....	248
11.4.2 采用波纹腹板钢结构情况 .....	248
11.4.3 采用波纹腹板钢结构的效益分析 .....	248
11.5 应用实例 3: 扬州牧羊三园项目 .....	248
11.5.1 工程概况 .....	248
11.5.2 采用波纹腹板钢结构情况 .....	249
11.5.3 采用波纹腹板钢结构的效益分析 .....	249
11.6 应用实例 4: 上海爱茉莉项目 .....	250
11.6.1 工程概况 .....	250
11.6.2 采用波纹腹板钢结构情况 .....	250
11.6.3 采用波纹腹板钢结构的效益分析 .....	250
11.7 应用实例 5: 伊朗德黑兰 br-061/r 特大桥 .....	251
11.8 应用实例 6: 河南桃花峪黄河大桥 .....	251
参考文献 .....	253

# 第 1 章 概 述

## 1.1 波纹腹板钢结构的特点

波纹腹板钢结构是通过将普通结构构件中的平面钢腹板或混凝土腹板用波纹钢腹板代替，做成波纹钢腹板构件所形成的结构（图 1.1~图 1.4），可以应用在厂房、仓库等大跨度结构、多高层建筑结构和桥梁结构。采用波纹钢腹板代替传统平钢腹板，可以提高钢腹板的稳定性，大幅度减小腹板厚度，减少用钢量。将波纹钢腹板代替传统混凝土构件腹板，构成钢-混凝土组合构件，不但可以利用波纹钢腹板抗剪切屈曲能力强的优点，显著减少混凝土用量，还可以发挥波纹腹板纵向刚度小的优点，避免传统混凝土构件因收缩、徐变造成的腹板开裂，对结构性能产生不利影响的问题。

现有规格的热轧工字钢和热轧 H 型钢，为了保证腹板屈服前不发生局部屈曲，腹板的高厚比都较小，一般都在 80 以内。对于焊接 H 形钢梁，我国《钢结构设计规范》GB 50017—2003<sup>[1,1]</sup>规定腹板高厚比任何情况下不得大于 250，且需通过设置加劲肋来保障腹板的稳定性，以上这些将造成普通钢梁的腹板用钢量较大或疲劳强度降低。据统计，用于受弯的普通热轧型钢的腹板用钢量一般占到整个构件的 40%~70%。但与此对应的则是，在实际工程设计时，构件所受剪力一般较小，腹板材料强度很难充分发挥作用。因此，通过采用波纹钢板来代替平腹板（见图 1.1），可以在腹板厚度较小的情况下，不使用加劲肋就能够具有较高的平面外刚度和防屈曲强度，因此可以采用较薄的厚度，获得较高的抗剪承载力。

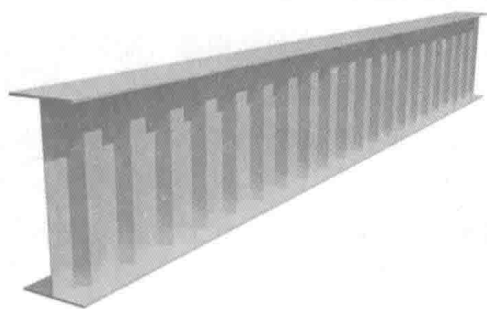


图 1.1 波纹腹板 H 型钢示意图

### 1.1.1 形式与类型

波纹钢腹板常用的波纹形式包括：梯形、正弦曲线、矩形和三角形等（图 1.2），其中梯形和正弦曲线是应用最多的形式。

在桥梁领域可以采用上、下混凝土板和波纹钢腹板组成箱梁<sup>[1,2~1.6]</sup>，如图 1.3 所示。1986 年在法国建成了世界上第 1 座波纹钢腹板梁桥——Cognac 桥。

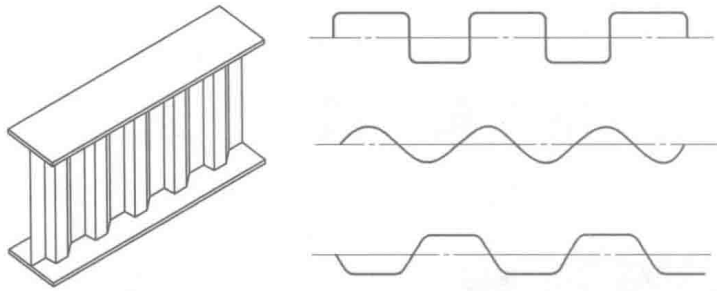


图 1.2 波纹腹板截面简图

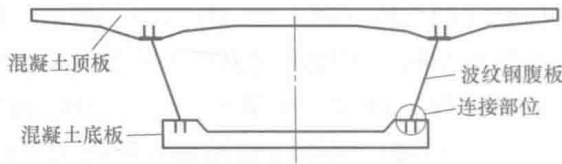


图 1.3 波纹钢腹板桥梁截面图

另有研究者提出工字形截面的波纹腹板预应力组合桥梁结构形式，如图 1.4 所示。

### 1.1.2 受力特性与优越性

波纹腹板 H 形钢梁的理论受力模型与平腹板 H 形钢梁有显著区别（图 1.5、图 1.6），具有下述 4 个显著特征：1) 在面内弯矩  $M_x$  作用下，弯矩主要由翼缘承担，而由于“折叠效应”，腹板上基本无弯曲正应力分布；2) 竖向剪力  $V_y$  完全由腹板承担，且剪应力均匀分布；3) 由于腹板的波纹形状，腹板与翼缘之间的剪力流将在翼缘中形成附加横向弯矩，因此翼缘存在附加应力；4) 在面外弯矩  $M_y$  作用下，腹板无正应力和剪应力作用，弯矩完全由翼缘承担。

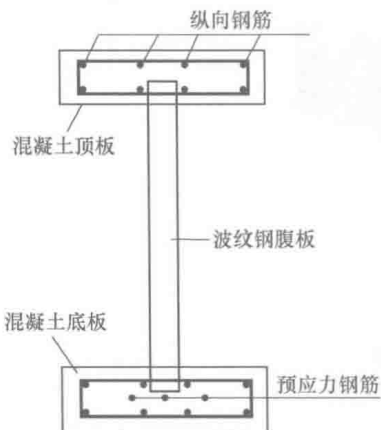


图 1.4 波纹腹板预应力组合桥梁截面图

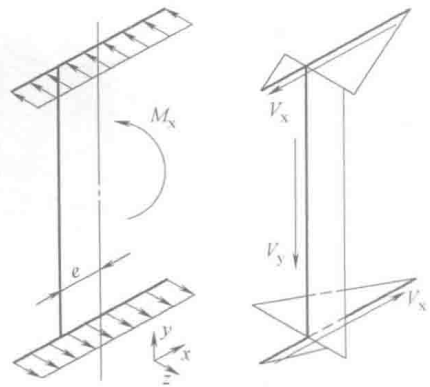


图 1.5 面内弯矩作用下应力分布示意图

波纹腹板 H 形钢受力特点与桁架较为类似，上下翼缘可视为弦杆，承受弯矩和轴力，波纹腹板可视为腹杆，仅承受剪力，而不承受弯矩和轴力作用，因此，波纹腹板 H 形钢特别适合用于以受弯为主的构件。

由于波纹钢腹板在厚度较小的情况下,不使用加劲肋就能够具有较高的平面外刚度和抗剪切屈曲强度,因此腹板可以较薄,厚度一般为 $2\sim 6\text{mm}$ ,高厚比较大(最大达600),使波纹腹板H形钢构件具有较高的抗弯和抗剪承载力。

波纹腹板H形钢的腹板用钢量一般占到整个构件的25%左右,最低甚至可以低至4%。与热轧工字钢和热轧H形钢相比,在抗弯刚度近似的情况下,波纹腹板H形钢用钢量可节省达40%,比焊接H形钢也可节省30%左右。此外,与普通平腹板H型钢相比,波纹腹板H形钢的侧向整体稳定性能好,便于运输和安装,且受压翼缘局部稳定强度高,局部承压强度高,疲劳强度高。表1.1是波纹腹板H型钢与传统H形钢的对比。

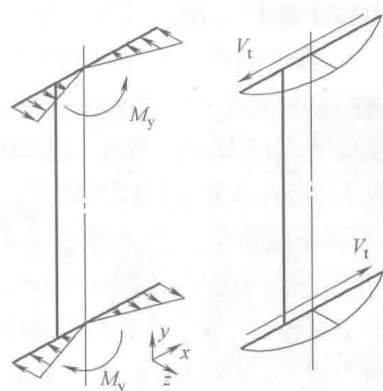


图 1.6 面外弯矩作用下应力分布示意图

波纹腹板H型钢与传统H形钢对比

表 1.1

区别特征	波纹腹板H形钢	传统H形钢	
腹板高厚比	200~600	60左右	
腹板纵向刚度	无	有	
腹板厚度	约33%	100%	
构件用钢量减少率	H400	约20%	0%
	H1800	约30%	0%
	H3600	约40%	0%
构件整体造价降低率	H400	约8%	0%
	H1800	约18%	0%
	H3600	约28%	0%

波纹钢腹板预应力混凝土箱形梁,是用波纹钢板取代预应力混凝土箱梁的混凝土腹板的组合梁。其显著特点是用 $10\sim 16\text{mm}$ 厚的波纹钢板取代 $350\sim 800\text{mm}$ 厚的混凝土腹板,可有效降低桥梁的重量,同时,还可以解决传统混凝土箱梁存在的腹板开裂、跨中持续下挠、预应力效率低、管道压浆不足等问题。

与平腹板钢箱梁相比,腹板采用波纹形式后,可以大幅降低腹板钢板的厚度,从而降低用钢量 $30\%\sim 50\%$ ,若考虑到波形腹板钢板折弯、焊接等因素,以综合成本计算,波形腹板钢箱梁也可以降低总体造价20%左右,用于桥梁可减轻结构自重,减小结构横向和竖向地震反应,下部墩柱和基础造价都可相应降低。若考虑到运输、吊装等成本,则经济效益将更加显著。

### 1.1.3 设计和应用需关注的重点

波纹腹板钢结构具有良好的受力性能与经济性,但由于其构造与传统平腹板钢结构不同,其设计与应用需重点关注以下几点:

1. 构件适用类型。波纹钢腹板构件适合用于以受弯为主的构件,适用于结构中的梁、

轴力较小的柱（如抗风柱）等。此外，构件的腹板高度不能太小，一般不小于 500mm。

2. 构件制造。波纹腹板可采用辊压和模压成型。辊压能够连续生产，适合波纹腹板 H 形钢的自动化生产。然而辊压成型能力有限，故一般辊压成型的波纹腹板 H 形钢产品，腹板厚度不超过 6mm。模压成型能力较辊压大，但难以连续自动化生产，故模压一般用于厚度大于 6mm 的波纹腹板 H 形钢产品，目前国内外模压成型的波纹腹板 H 形钢最大厚度可达 30mm。

3. 长效防护。由于波纹腹板较薄，腐蚀对构件的受力性能会产生很大影响，防护措施将决定波纹腹板钢结构使用的耐久性能，为保证波纹腹板钢构件的耐久性，腹板厚度不得小于 2mm。对于重要结构构件（如吊车梁），腹板厚度不得小于 3mm。此外对于用于腐蚀严重环境下的钢构件，除应采取有效的防腐蚀涂装措施外，腹板厚度还应按受力设计需要值加 1mm 取。

4. 节点连接与安装。由于波纹腹板钢结构形式的特殊性，常规的平腹板钢结构的连接节点构造与安装工艺不能直接适用于波纹腹板钢结构。

## 1.2 波纹腹板钢结构的应用概况

目前波纹腹板 H 形钢在国内外已被大量应用于建筑结构中，如单层工业厂房、仓库、多层房屋等（见图 1.7）。

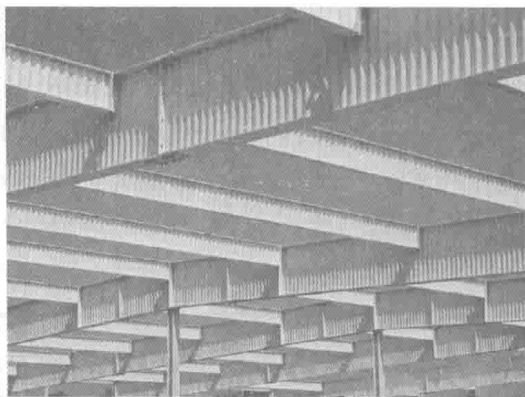


图 1.7 波纹腹板 H 形钢应用于单层厂房

将波纹腹板 H 形钢应用到组合梁中形成波纹腹板 H 形钢组合梁（见图 1.8），则可进一步降低多高层建筑的用钢量。

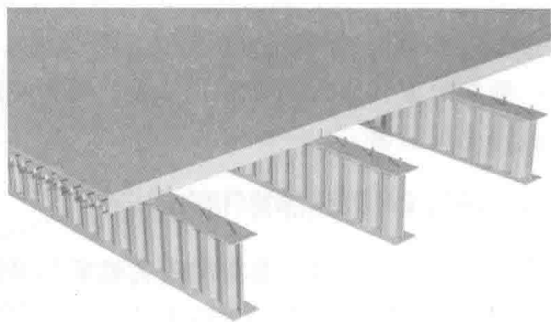


图 1.8 波纹腹板 H 型钢应用于多层框架房屋

图 1.9 为波形钢腹板在桥梁中的应用, 分别为波形腹板 H 形钢-混凝土组合梁桥, 预应力波形腹板-混凝土箱形梁桥。

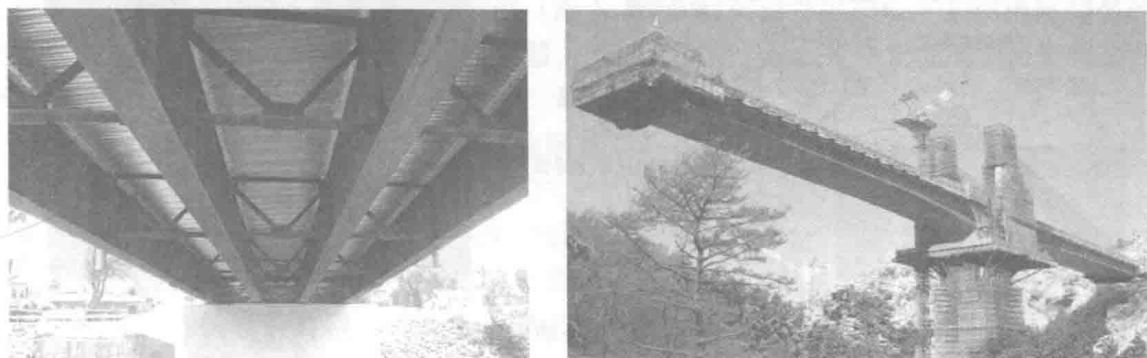


图 1.9 波纹钢腹板应用于桥梁

### 1.3 波纹腹板钢结构的发展现状

波纹金属板比平板具有更好的面外刚度及抗屈曲能力, 这一性能在很多领域已经得到验证和广泛应用, 例如集装箱、火车车厢及地下管道等。

#### 1.3.1 产品现状

国外于 20 世纪 50~60 年代起开始研究波纹腹板钢构件的受力性能, 其应用也已经有了相当长的时间, 最初是在航天器制造中, 随后应用到了工业与民用建筑和桥梁结构领域, 例如屋盖、墙板及楼板。20 世纪 80 年代起, 日本住友公司最早采用焊接的方法, 生产出中间部分波纹腹板 H 形钢<sup>[1.7]</sup>。我国东北重型机械学院于 1985 年轧制出了全波纹腹板 H 形钢<sup>[1.8]</sup>。近年来, 随着自动焊接技术的精进, 焊接全波纹腹板 H 形钢在欧美国家如德国、瑞典和美国等发展较快, 较多的应用于桥梁、房屋、工业厂房等结构中。

奥地利 Zeman 公司是生产正弦曲线波纹腹板 H 形钢的厂家, 德国的 Spelten 公司则以生产梯形波纹腹板 H 型钢为主。无论采用哪种波形作为腹板波形, 生产工艺中, 最为关键的技术为波纹的成型技术和腹板与翼缘的焊接技术。

波形钢腹板的连续式辊压成型机如图 1.10 所示, 主要由成型辊、动力输入分配箱、动力输入机等组成。成型辊输入方向还设有对中装置、板头对准装置、辅助夹送装置、进出料自动检测装置等机构。成型辊由上、下两组成型辊组成, 由动力输入机通过动力分配箱驱动成型辊旋转, 通过齿轮啮合原理, 将钢板成型为需要的波纹板板型。成型辊成型速度可通过变频控制调整, 使成型速度与整条流水线匹配。下成型辊为只允许绕轴回转的固定辊, 上成型辊为可以上下移动调整的浮动辊, 下成型辊通过调整电机、同步升降机构调整上、下两成型辊的间距, 以获得需要的波纹板。成型辊间距的调整均可以 PLC 控制器自动调整, 自动化程度高。成型辊输入方向的对中装置、板头对准装置、辅助夹送装置、进出料自动检测装置等, 保证板材每次进料均保持同一位置, 实现每个波纹板板头保持一致。成型辊是设备的核心部分, 每种成型辊对应一种波形。

这套设备利用辊压原理, 由两个上下对称设置的驱动滚轮和钢带弯曲辊实现连续式波形钢板辊压和自动传送, 提高了制造效率; 通过在钢带弯曲辊与驱动滚轮之间设置钢珠解



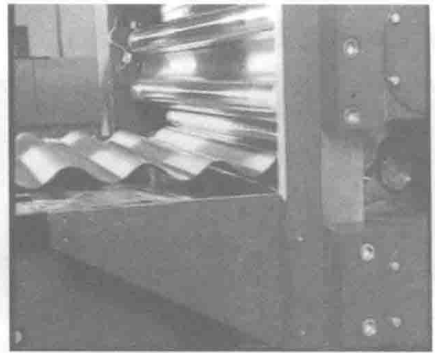
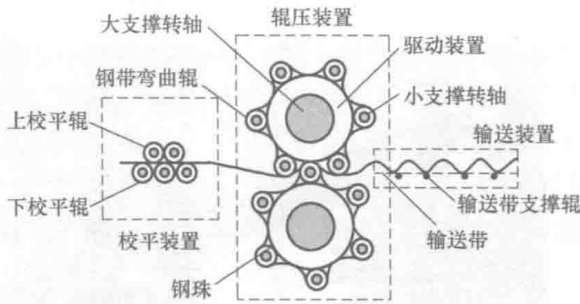


图 1.10 波纹自动辊压成型机

决了传统辊压装置易磨损问题；通过校平装置，提高波形钢腹板的制作精度。

当腹板厚度大于等于 8mm，宜采用模压法，模压法又分为无牵制模压法和普通模压法，根据钢板成型时可能产生的缺陷和钢板厚度间的相关关系，大于等于 14mm 的钢板，宜采用无牵制模压法。小于 14mm 的钢板可采用普通模压成型法。

普通模压法利用液压机与波形断面相同的模具进行一次性成型（图 1.11a），其特点为：

- (1) 可以用较短时间压制一个波长；
- (2) 因为可以连续压制，故可进行长波形钢板的制作（但受运输长度限制）；
- (3) 波形钢板长度受压力机能力制约；
- (4) 按波形要求制造模具需较多的资金。

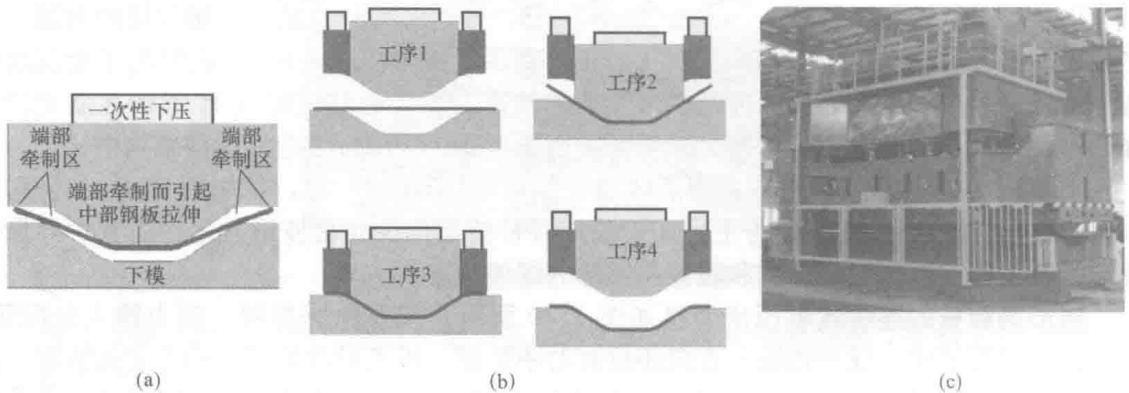


图 1.11 模压法示意图及无牵制模压设备

(a) 传统模压技术；(b) 无牵制模压技术；(c) 2800 吨无牵制模压设备

无牵制模压法是在同一横断面上同时不超过两个受压牵制区的模压方法（图 1.11b），图 1.11c 为国内 2800t 大型无牵制模压机组。无牵制模压法模压时两侧钢板不受牵制，可自由伸缩，与传统模压法相比具有以下优势：

- (1) 对钢板的物理损伤小，克服传统模压法上模同时下压、两侧钢板不能自由伸缩、转角处金属相位发生滑移的缺陷；
- (2) 减少钢板模压后的回弹变形，避免了钢板因牵制回弹对成型精度的影响；