

Fengxili Xia Lengwan Bobi

Lintiao Fuban Wumian Tixi De Chengzaili Yanjiu

风吸力下冷弯薄壁

檩条覆板屋面体系的承载力研究

宋晓光 梅佐云 李守才 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

风吸力下冷弯薄壁檩条覆板屋面 体系的承载力研究

宋晓光 梅佐云 李守才 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

轻型钢结构的冷弯薄壁檩条覆板屋面具有跨度大、坡度缓、柔性大、自振频率低、刚度与质量分布不均匀的特点,导致风吸力成为控制屋面结构设计的主要荷载之一。而现行规范和规程相对于轻型钢结构屋面体系的迅速发展和广泛应用是略显滞后的,不能满足该类结构体系的抗风设计要求。因此,深入研究量大面广的轻型钢结构屋面在风荷载作用下的承载力具有重要的工程应用价值和学术价值。本书结合理论分析、试验研究、数值分析等方法,对风吸力下冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的承载力进行了较系统的研究,紧扣我国现行相关设计规程编写而成,为冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的设计、分析和施工提供参考。

本书可以作为高等学校土木工程专业的教材,也可以作为土木工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风吸力下冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的承载力研究/宋晓光,梅佐云,李守才著. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2241 - 1

I. ①风… II. ①宋… ②梅… ③李… III. ①轻型钢结构—房屋结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU392.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031548 号

书 名 风吸力下冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的承载力研究

著 者 宋晓光 梅佐云 李守才

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 13.25 字数 330 千字

版次印次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

轻型钢结构的冷弯薄壁檩条覆板屋面具有跨度大、坡度缓、柔性大、自振频率低、刚度与质量分布不均匀的特点,导致风吸力成为控制屋面结构设计的主要荷载之一。而现行规范和规程相对于轻型钢结构屋面体系的迅速发展和广泛应用是略显滞后的,不能满足该类结构体系的抗风设计要求。因此,深入研究量大面广的轻型钢结构屋面在风荷载作用下的承载力具有重要的工程应用价值和学术价值。

本书结合理论分析、试验研究、数值分析等方法,对风吸力下冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的承载力进行了较系统的研究,针对自攻钉连接和固定支架连接的檩条覆板体系提出了实用设计公式,并采用随机振动理论对典型的檩条覆板屋面结构的动力特性及风振系数进行了分析。本书主要包括以下几个方面内容:

第一,基于覆板对檩条部分约束的概念,提出了自攻钉连接和立缝支架连接的C形和Z形截面覆板檩条的简化模型,采用平衡法和能量法建立微分方程组,并对特殊约束情况下控制方程的解进行了讨论。

第二,对自攻钉连接的简支檩条覆板体系进行数值分析,重点分析檩条截面类型、拉条设置数量及位置、压型钢板板型及板厚、钢材型号等因素对于屋面体系承载力的影响,提出了实用设计公式并与现有规范公式进行比较。

第三,对立缝支架连接的简支檩条覆板体系进行足尺试验研究及数值分析,重点分析檩条截面类型、拉条设置数量及位置、压型钢板板型及板厚、钢材型号、连接方式等因素对于屋面体系承载力的影响,提出了实用设计公式并与现有规范公式进行比较。

第四,采用随机振动理论对典型的冷弯薄壁檩条覆板屋面结构的动力特性进行分析,通过编程计算得到典型屋面结构的振型参与特性及风振系数分布。

在编写本书的过程中,得到了同济大学土木工程学院张其林教授及山东省建筑科学研究院领导及专家的指导,特此表示衷心的感谢。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2014年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 檩条覆板屋面体系的主要构造和特点	2
1.2.1 冷弯薄壁型钢檩条	2
1.2.2 建筑压型钢板	3
1.2.3 连接件	4
1.3 冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的研究概况	5
1.3.1 冷弯薄壁受弯构件的研究概况	5
1.3.2 冷弯薄壁檩条及檩条覆板体系的研究概况	9
1.4 屋盖体系风荷载及风振响应的研究概况	16
1.4.1 屋盖体系风荷载研究手段	16
1.4.2 典型屋盖体系的流场特点和风压分布	17
1.4.3 屋盖体系风振响应研究概况	19
1.5 本书的主要研究内容	20
第2章 覆板檩条简化模型的理论推导	22
2.1 引言	22
2.1.1 概述	22
2.1.2 基本假设	22
2.1.3 薄壁杆件的弯曲	22
2.1.4 剪力中心及其位置的确定	24
2.1.5 薄壁杆件的扭转	24
2.2 覆板檩条简化模型的建立	26
2.3 C形覆板檩条简化模型分析	26
2.4 Z形覆板檩条简化模型分析	30
2.5 能量法	32
2.6 理论推导的局限性	34
2.7 本章小结	35
第3章 自攻钉连接的檩条覆板体系承载力数值分析	36
3.1 引言	36
3.2 自攻钉连接的檩条覆板体系数值模型	36

3.2.1	几何模型	36
3.2.2	材料属性	39
3.2.3	单元选取	39
3.2.4	边界条件	40
3.2.5	荷载施加	41
3.2.6	稳定承载力分析	41
3.3	数值模型的验证	41
3.3.1	理论解验证	41
3.3.2	试验验证	42
3.4	数值分析	48
3.4.1	基本试件数值分析	48
3.4.2	檩条横截面类型的影响	56
3.4.3	拉条设置数量的影响	63
3.4.4	拉条设置位置的影响	68
3.4.5	压型钢板板型的影响	72
3.4.6	压型钢板厚度的影响	80
3.4.7	钢材型号的影响	84
3.5	建议设计公式的提出	87
3.5.1	C形覆板檩条	88
3.5.2	Z形覆板檩条	90
3.5.3	几点说明	90
3.6	建议设计公式与现有规范公式的比较	93
3.7	本章小结	104
第4章	立缝支架连接的檩条覆板体系承载力研究	106
4.1	立缝支架连接的檩条覆板体系试验研究	106
4.1.1	试件信息	107
4.1.2	试验目的及装置布置	109
4.1.3	加载制度	109
4.1.4	测点布置	110
4.1.5	试验现象和试验数据分析	112
4.1.6	试验结论	116
4.2	立缝支架连接的檩条覆板体系数值分析	118
4.2.1	数值模型的试验验证	118
4.2.2	基本试件数值分析	123
4.2.3	檩条横截面类型的影响	130
4.2.4	拉条设置数量的影响	135
4.2.5	拉条设置位置的影响	143
4.2.6	压型钢板厚度的影响	147

4.2.7 钢材型号的影响	151
4.2.8 连接方式的影响	154
4.3 建议设计公式的提出	161
4.3.1 C形覆板檩条	161
4.3.2 Z形覆板檩条	163
4.3.3 几点说明	165
4.4 建议设计公式与现有规范公式的比较	167
4.5 本章小结	174
第5章 檩条覆板屋面体系的动力特性及风振系数分析	176
5.1 冷弯薄壁檩条覆板屋面的动力特性分析	176
5.2 基于随机振动理论的振型参与特性分析	180
5.2.1 脉动风气动力谱	180
5.2.2 结构风振的随机振动理论	180
5.2.3 振型对风振响应的影响与组合振型的选择	182
5.3 基于随机振动理论的风振系数分析	184
5.4 本章小结	186
第6章 结语	187
6.1 结论	187
6.2 展望	188
参考文献	189

第1章 绪 论

1.1 研究背景

20 世纪 90 年代以来,我国钢结构建筑特别是轻型钢结构建筑的发展十分迅速。轻型钢结构由于具有施工周期短、综合经济效益好、利于环保等优点,并且随着近年来防火、防腐技术的完善,使得轻型钢结构房屋在厂房、仓储等工业建筑以及民用建筑中应用十分广泛,据 2007~2008 年钢结构行业市场运行及投资分析报告的数据,每年仅新建成和在建的门式刚架轻型厂房约 1 000 万 m^2 ,并且还在以每年 6%~7% 的速度增长。

但是,轻型钢结构房屋与其他结构形式相比,在大的风灾、雪灾等灾害天气发生时,往往更易遭受严重的破坏^[1-8],尤其是风灾对轻钢结构造成的破坏更为普遍。而轻钢房屋的风致破坏主要来自于围护结构的破坏,围护结构包括屋面板、墙面板和门窗^[9-11]。如 2004 年 8 月第 14 号台风“云娜”袭击了浙江省温岭市和台州市,温岭市工业厂房倒塌 272 万 m^2 ,厂房破损 756 万 m^2 ,台州市工业厂房受损面积达 247 万 m^2 ,其中绝大部分是轻钢厂房或轻钢围护厂房^[12]。图 1-1 为其中一受灾的轻型钢结构厂房,可以看出屋面围护板几乎全部被台风掀掉,只剩下檩条和刚架;2010 年 12 月 10 日,北京地区遭遇大风天气,首都机场风速高达 26 m/s ,最大风力为 10 级,该天气造成首都机场 T3 号航站楼屋面局部金属板被强风掀开,导致首都机场共延误航班 200 余架次。又如 2009 年 8 月 29 日卡特里娜飓风(Hurricane Katrina)席卷了美国路易斯安那州东南部,造成了 810 亿美元的损失,受灾面积达 14 500 km^2 ,其中各种屋面结构破坏占据经济损失的绝大多数^[13]。可见,由于轻型钢结构屋面具有跨度大、坡度缓、自振频率低、刚度与质量分布不均匀的特点,导致风荷载成为控制



图 1-1 遭受台风破坏的轻钢厂房

屋面结构设计的主要荷载之一。因此,深入研究量大面广的轻钢结构屋面在风荷载作用下的承载力具有重要意义。

1.2 檩条覆板屋面体系的主要构造和特点

典型的轻钢结构屋盖体系是由冷弯薄壁檩条、压型钢板、连接紧固件及拉条等共同组成的檩条覆板屋面体系,典型的基本构造之一如图 1-2 所示,近年来广泛地应用于门式刚架、钢桁架等作为承重结构的屋面围护体系中。与其他常见屋面结构形式相比,檩条覆板屋面体系具有以下特点:

- ① 屋面造型美观新颖,色彩丰富,装饰性强,组合灵活多变;
- ② 自重轻,强度高,具有良好的防水密闭性能;
- ③ 施工安装机械化程度高,施工周期短;
- ④ 各组成材料均可回收利用,属于环保型建材。

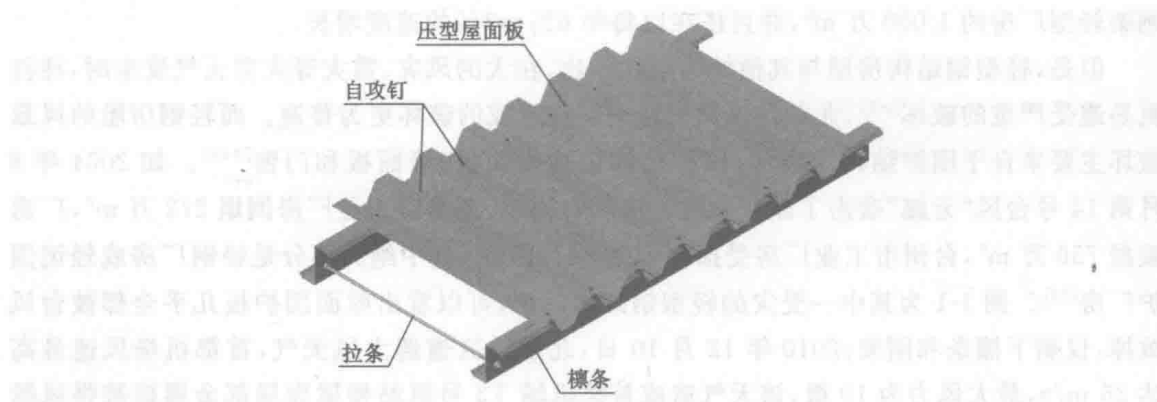


图 1-2 典型的檩条覆板屋面体系之一

1.2.1 冷弯薄壁型钢檩条

冷弯薄壁型钢是一种高效经济型材,由热轧钢板或镀锌钢板在常温下通过辊轧或冲压弯折而成型。这种成型方式能根据需要生产出材料分布最优的合理截面形状,与同样质量的材料制成的冷弯薄壁型钢构件与热轧型钢相比,在承载力、整体刚度、受力性能方面表现更好,并可以节约材料、减轻结构重量,而且制作、施工、运输、安装都比较方便。檩条用于屋面系统主要作用是支撑屋面板,国内外轻钢结构中用做檩条的薄壁型钢主要是冷弯 C 形和 Z 形钢,如图 1-3 所示,国产材料强度有普通(Q235)和高强(Q345)两种,进口材料强度可以高达 550 MPa。常用厚度有 1.5 mm、2.0 mm、2.2 mm、2.5 mm、3.0 mm 等多种,常用高度范围为 100~250 mm,也可根据实际设计要求采用特殊高度。加工长度可以根据需要定尺加工,但通常情况下不超过 12 m。

相对于普通热轧钢梁,冷弯薄壁檩条由于其腹板及翼缘板壁较薄、宽厚比相对较大等原因,更容易发生板件的局部屈曲和构件的侧向屈曲。因此,在轻钢结构的设计中,冷弯薄壁檩条的稳定性指标比强度指标更为重要。

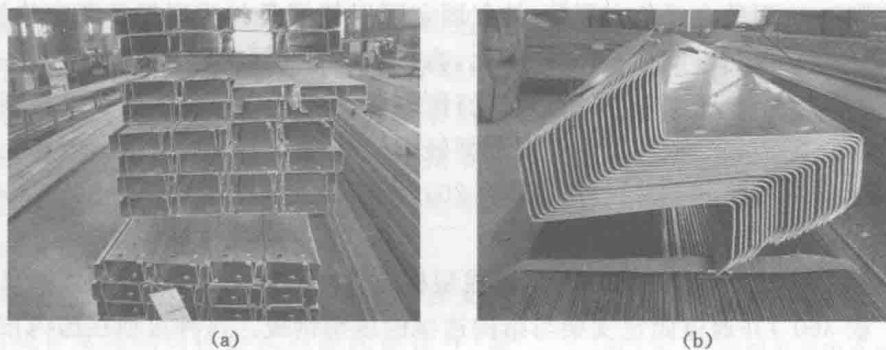


图 1-3 典型的 C 形、Z 形檩条

1.2.2 建筑压型钢板

建筑压型钢板是指以厚度为 $0.4 \sim 1.6 \text{ mm}$ 的镀锌板或彩色涂层板经辊压冷弯成型的波纹板材,如图 1-4 所示,可以根据需要加工成波形、V 形、U 形、W 形以及其他形状,具有成型灵活、施工速度快、外观美观、质量轻、易于工业化、商品化生产等特点,是轻型钢结构屋面系统的重要组成部分。

建筑压型钢板的型号名称各异,但归纳起来,可以分为三大类。按照《建筑用压型钢板》(GB/T 12755—2008)^[14],根据压型钢板间连接形式不同,板件分为搭接板、咬合板、扣合板三大类,如图 1-5 所示。

搭接板是指成型板的纵边自然搭接后通过自攻螺钉与结构连接的压型钢板。搭接板是最传统的压型钢板,是通过自攻螺钉穿透压型钢板来实现其固定与搭接,这种板型通常用于单坡排水长度不大的屋面,对于一般的工业建筑,波高 $20 \sim 35 \text{ mm}$,波峰间距 $200 \sim 300 \text{ mm}$ 是常用板型。这类板型的特点是:① 价格经济,对安装要求不高,简单方便;② 通常都带有防毛细水的空腔,防止虹吸渗漏;③ 自攻螺钉固定方式分为波谷



图 1-4 压型钢板的生产过程

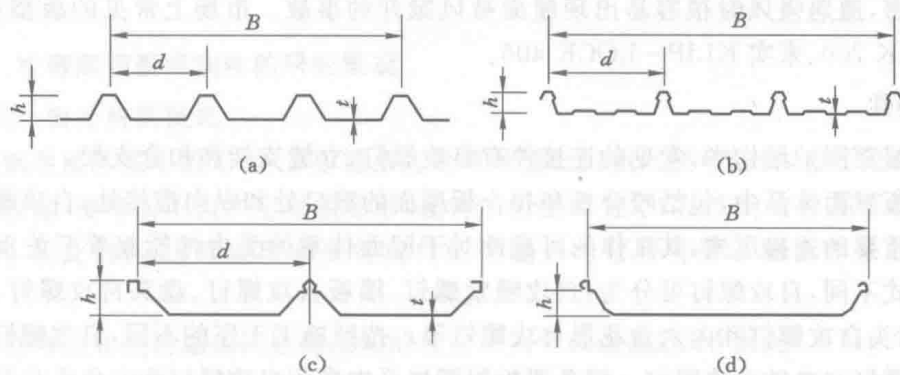


图 1-5 典型的压型钢板板型

(a) 搭接型屋面板;(b) 扣合型屋面板;(c) 咬合型屋面板(180°);(d) 咬合型屋面板(360°)

固定和波峰固定,这两种方式各有利弊:波谷固定可以使檩条与压型钢板紧密连接,但随着使用年限的增加和自攻螺钉尼龙垫圈的老化,会有积水和渗漏的隐患,波峰连接一般可以消除积水渗漏的隐患,但热胀冷缩会使自攻螺钉倾斜而影响连接的可靠性。该板型虽然使用上受到一定限制,但仍然广泛地应用于中小型轻型钢结构屋面围护结构。市场上常见的板型有:浙江精工钢构集团的 HV—125、HV—200,浙江杭萧钢构集团的 HXY—750、HXY—980 等。

咬合板又称直立缝锁边板(SSMR),指成型板的纵边自然搭接后,经专用机具沿长度方向咬合(180° 或 360°)并通过固定支架与结构连接的压型钢板。这种板型在国内市场属相对高端的产品,在市场上出现的时间比较短,但在实际工程中由于直立缝的卓越性能,得到越来越广泛的应用。直立缝屋面板最主要的特点有以下三点:①屋面板与檩条之间通过特制的固定支座连接,固定支座上设计可动调节片,允许屋面板在一定范围内的长度变形,解决了大跨度屋面板温度变形而导致的局部损坏及渗漏;②屋面板间的搭接采用机械咬合方式,很大程度上改善了屋面板侧向搭接防渗漏的可靠性;③屋面板侧向搭接的肋高一般为 60 mm,形成所谓的“直立缝”,从而避免在屋面积水的情况下由搭接肋处渗入雨水。以上的技术改进可以使得屋面的坡度更小,而屋面的单坡长度更长。直立缝屋面系统的缺点同样也由其构造特点产生:首先,由于固定支座的可滑动功能,显著降低了屋面对檩条的侧向约束,从而要求屋面檩条增加可靠支撑保证其侧向稳定;其次,机械咬合会损坏板面的涂层,影响其耐久性能;最后,屋面板维修难度大,局部破损板件的更换是相当困难的。市场上常见的板型有:浙江精工钢构集团的 HV—450、HV—470B、HV—612,美建 ABC 的 SS360,浙江杭萧钢构集团的 HXY—478 等。

扣合板也称隐藏式暗扣板,是指成型板纵边在安装时经公母肋的扣压结合并通过固定支架与结构连接的压型钢板。与咬合板的区别在于不需要借助机械或手工咬合,而是通过板自身的弹性变形咬合。这类板型的特点是:①板与板通过固定支座连接,固定支座与檩条通过自攻钉连接,屋面除檐口等边缘部位外,基本无外露螺钉;②板型的所有折角都是钝角,把对压型钢板的镀层、涂层、基材的损伤降到最低;③该系列板型公母肋之间设有防毛细凹槽,波高通常在 40 mm 以上,适用于单坡较长的屋面;④由于屋面板扣合在固定支座上,可沿屋面坡度方向滑动,对温度变形有一定的适应能力。但是该板型必须使用屈服强度高于 550 MPa 的高强钢板保证其扣合紧密,以抵抗风吸力,如果用低强度钢板成型,容易造成扣合不紧密,遭遇强风时很容易出现屋面被风掀开事故。市场上常见的板型有:来实 KLIP—LOCK 700、来实 KLIP—LOCK 406。

1.2.3 连接件

在轻钢屋面围护结构中,常见的连接件有自攻螺钉、立缝支架和扣合支架。

檩条覆板屋面体系中,包括咬合板和扣合板屋面的檐口处和纵向搭接处,自攻螺钉连接都是一种很重要的连接形式,其工作的可靠性对于屋面体系的受力性能起着至关重要的作用。按照形式不同,自攻螺钉可分为:自攻锁紧螺钉、墙板自攻螺钉、盘头自攻螺钉、六角头自攻螺钉、沉头自攻螺钉和内六角花形自攻螺钉等。按照施工工序的不同,自攻螺钉又可分为普通自攻螺钉与自钻自攻螺钉。檩条覆板屋面体系中常用自攻螺钉为六角头自钻自攻螺钉,如图 1-6 所示,常见规格为 12 号,公称直径为 5.43 mm。

咬合板屋面与檩条间的连接是通过立缝支架来实现的,尽管不同钢构企业所用的立缝

支架具体形式各异,如图 1-7 所示,但基本构造相同,都是由支架基座和支架调节片两部分组成。由图可以看出,基座是通过自攻螺钉与檩条固定连接,调节片与屋面板咬合连接,而基座与调节片之间是通过可滑动槽连接,以适应温度变化导致的板长伸缩。

扣合屋面板与檩条间的连接是通过扣合支架来实现的,扣合支架的具体形式因屋面板各异,如图 1-8 所示,都是通过自攻螺钉与檩条固定连接。

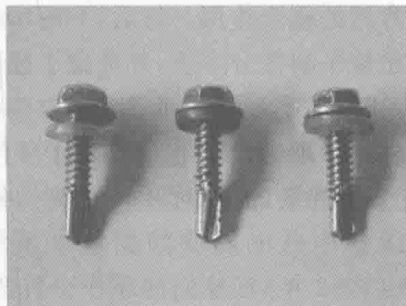
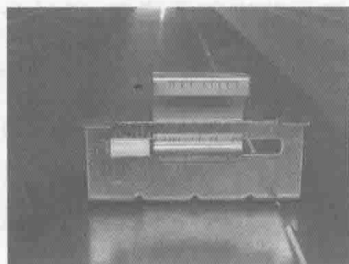
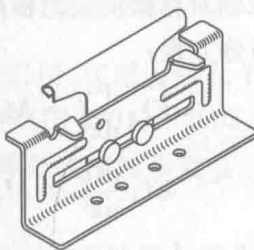


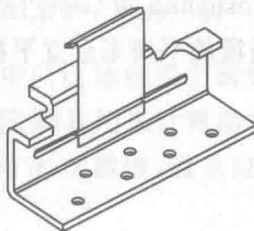
图 1-6 轻钢屋面常用自攻螺钉



(a)

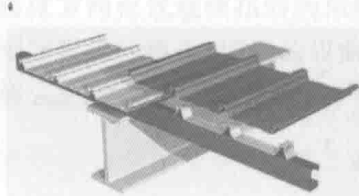


(b)

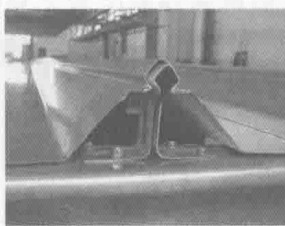


(c)

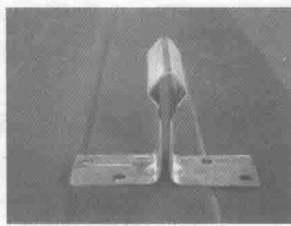
图 1-7 立缝支架



(a)



(b)



(c)

图 1-8 扣合支架

1.3 冷弯薄壁檩条覆板屋面体系的研究概况

1.3.1 冷弯薄壁受弯构件的研究概况

1.3.1.1 国外研究概况

轻钢屋面体系中的 C 形、Z 形檩条为冷弯薄壁开口截面受弯构件,由于开口薄壁截面抗扭性能较差,受弯时不仅产生弯曲变形,还将产生扭转变形,在横向力作用下通常会发生弯扭失稳。因此,深入透彻地研究受弯构件的性能为冷弯薄壁檩条覆板体系的研究奠定了基础。

弹性弯曲和扭转屈曲问题的最初的理论研究可以追溯到 18 世纪。1744 年,Euler 首次给出细长柱弯曲屈曲的理论研究方法。1855 年,Saint-Venant 对杆件受自由扭转的情况第一次向世人提供了令人信服的表述形式。之前的研究,仅针对弯曲或者扭转变形单独进行研究,直到 1899 年,Michell 和 Prandtl 在研究狭长矩形截面梁的侧向屈曲问题时,首次考

考虑了弯扭的耦合作用。之后, Timoshenko 于 1905 年发展了他们的理论, 建立了工字形截面梁的扭转平衡微分方程, 并考虑了翘曲扭转的影响。1929 年, Wanger 在和其他研究者的努力下, 研究了不对称截面或单轴对称截面结构的弯扭失稳问题, 至此, 弯扭失稳理论发展成为一种一般理论。20 世纪五六十年代, Vlasov 第一次系统地研究了弹性开口薄壁构件的强度、稳定和振动问题, 对开口薄壁构件理论的发展做出了重要的贡献。同一时期的 Bleich 也对薄壁构件的屈曲问题作过系统研究。Timoshenko (1961 年)、Vlasov (1961 年) 和 Bleich (1952 年) 在他们的著作中将弯扭失稳理论系统化, 奠定了经典的薄壁构件稳定理论的基础。国内外许多学者在此以后对开口薄壁构件的弯扭失稳理论进行的研究, 基本上都是在 Timoshenko 平衡法、Vlasov 假想荷载法和 Bleich 的能量法的基础上进行的^[15,16]。

Timoshenko 和 Gere^[17] 对双轴对称截面梁的横向弯扭屈曲进行了研究, 通过分析失稳后构件微段的平衡来建立平衡微分方程:

$$EI_{\xi} \frac{d^2 v}{dz^2} = M_{\xi} \quad (1-1)$$

$$EI_{\eta} \frac{d^2 u}{dz^2} = M_{\eta} \quad (1-2)$$

$$C \frac{d\phi}{dz} - C_1 \frac{d^3 \phi}{dz^3} = M_{\xi} \quad (1-3)$$

受作用于跨中截面形心的集中荷载 P 作用下, 简支工字形截面梁横向屈曲的临界荷载:

$$P_{cr} = \gamma_2 \frac{\sqrt{EI_{\eta} C}}{l^2} \quad (1-4)$$

式中 γ_2 ——与比值 $l^2 C/C_1$ 有关的无量纲因子;

C ——梁的扭转刚度;

C_1 ——梁的翘曲刚度。

受均布荷载 q 作用下, 简支工字形截面梁横向屈曲的临界荷载:

$$(ql)_{cr} = \gamma_4 \frac{\sqrt{EI_{\eta} C}}{l^2} \quad (1-5)$$

式中 γ_4 ——与比值 $l^2 C/C_1$ 和荷载作用位置有关的无量纲因子。

具有中间横向支承的简支工字形截面梁, 分别受作用于跨中截面形心的集中荷载 P 作用和均布荷载 q 作用时, 梁横向屈曲的临界荷载表达式分别同式(1-4)和式(1-5), 但是系数 γ_2 及 γ_4 的取值不同于无横向支承的梁。

Vlasov 曾用能量法得到截面关于弯曲轴(x 轴)对称的受弯构件在相同端弯矩作用下, 其弹性弯扭屈曲临界荷载的近似计算公式:

$$(M_x)_{cr} = \frac{\pi}{k_y l} \sqrt{EI_y (GI_k + \bar{R}) \left[1 + \frac{\pi^2 EI_{\omega}}{(GI_k + \bar{R}) (k_{\omega} l)^2} \right]} \quad (1-6)$$

式中 k_y, k_{ω} ——系数, 可根据不同的边界条件查表得到。

Bleich 在研究偏心轴力和横向均布荷载作用下的单轴对称截面薄壁构件的稳定性时, 提出了如下的总势能表达式:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_L [EI_y u''^2 + EI_{\omega} \theta'^2 + (GJ - Pr_0^2 + 2Pe\beta_x) \theta'^2 - Pu'^2 -$$

$$2P(y_0 + e)u'\theta' + 2M_{qx}u''\theta - q_y a\theta^2]dz \quad (1-7)$$

式中 P ——轴力；

q_y ——横向均布荷载；

M_{qx} ——横向均布荷载引起的弯矩。

后来研究一致表明：Wagner 效应项中的弯矩应该是各种外荷载产生的各项弯矩之和，应包含横向荷载产生的弯矩 M_{qx} ，因此 Wagner 效应项应该记做 $\frac{1}{2} \int_L (GJ - Pr_0^2 + 2Pe\beta_x + 2M_{qx}\beta_x) \theta'^2 dz$ ，考虑这点同时假定没有轴力 P 的作用，将 Bleich 理论应用于梁的弯扭失稳问题，得总势能表达式：

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_L [EI_y u''^2 + EI_\omega \theta''^2 + (GJ + 2M_x \beta_x) \theta'^2 + 2M_x u''\theta - q_y a \theta^2] dz \quad (1-8)$$

这个总势能的表达式被许多著作所引用，在过去的几十年中广泛地应用于研究薄壁截面梁的稳定性。我国《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)^[19]附录 B 用来计算简支梁整体稳定系数 φ_b ，所依据的临界弯矩 M_{cr} 计算公式中的系数 β_1 、 β_2 和 β_3 的取值，就是以式(1-8)的总势能为依据的。

N. S. Trahair 等^[20,21]对无侧向支撑梁的弹性侧向屈曲承载力的影响因素进行了研究，并系统地研究了关于弯曲轴单轴对称梁在跨中截面设置了扭转约束的情况下，弯矩分布以及荷载作用位置高度对梁弹性弯扭屈曲的影响，进一步推广到扭转约束不位于跨中截面以及沿梁跨度方向设置连续扭转约束情况下对于弹性弯扭屈曲的影响。Trahair 等提出了扭转约束刚度限值的概念，即梁的屈曲模态由对称转变为关于支撑点反对称模态时对应的扭转约束值 α_{RtL} ，并给出了近似公式：

$$\frac{\alpha_{RtL} L}{GJ} = \frac{2\pi}{K} + \beta_{L1} K \sqrt{\frac{2\pi}{K}} + \beta_{L2} K^2 \quad (1-9)$$

式中 β_{L1}, β_{L2} ——系数； $K = \sqrt{\pi^2 EI_\omega / GJ L^2}$ 。

B. Larue 和 A. Khelil 等^[22,23]提出了分析一侧翼缘有连续约束时工字钢梁弯扭屈曲的方法，用以预测屈曲荷载及相应的屈曲形状，研究了弯矩分布和连续约束对工字梁弹性弯扭屈曲的影响，结果表明，施加于钢梁受拉翼缘的约束对临界屈曲弯矩的影响不显著。Gosowski^[24]求解了沿长度方向非连续支撑约束下单轴对称、等截面薄壁构件，在压力及其对称平面内弯曲共同作用下的偏微分方程的通用解析解，端部任意支承构件空间稳定问题的特殊解可以根据通用解求得。

1.3.1.2 国内研究概况

吕烈武等^[18]采用构件微分段平衡条件得到薄壁构件弯扭微分方程，并推导出构件形心轴具有微小初始变位 u_0 、 v_0 和 θ_0 时薄壁构件的一般性微分方程：

$$EI_y(u - u_0)^{IV} + (M_x \theta)'' - q_x = 0 \quad (1-10)$$

$$EI_x(v - v_0)^{IV} - (M_y \theta)'' - q_y = 0 \quad (1-11)$$

$$EI_\omega(\theta - \theta_0)^{IV} - GI_t(\theta - \theta_0)'' + M_x u'' - M_y v'' - [(\beta_x M_x + \beta_y M_y + \beta_\omega B_\omega + \bar{R})\theta']' - m_z - M'_\omega \frac{\beta_\omega}{2} \theta - \left[q_x \left(x_0 - \frac{\beta_y}{2} - a_x \right) + q_y \left(y_0 - \frac{\beta_x}{2} - a_y \right) \right] \theta = 0 \quad (1-12)$$

式中 E, G ——材料的弹性模量和剪切模量；

I_x, I_y, I_w, I_t ——截面对 x 轴、 y 轴的惯性矩, 截面的翘曲惯性矩及扭转惯性矩;

u, v, θ ——分别为剪力中心 $S(x_0, y_0)$ 沿 x 轴、 y 轴的位移及沿构件纵轴 z 发生的转角;

$\beta_x, \beta_y, \beta_w$ ——截面的不对称截面系数;

M_x, M_y, M_w, B_w ——截面上对 x 轴、 y 轴的弯矩、翘曲力矩及双力矩;

q_x, q_y, m_z ——作用于构件轴线上的沿 x 轴、 y 轴的分布荷载及沿构件纵轴 z 的均布外扭矩;

a_x, a_y ——荷载 q_x, q_y 作用点至剪心 S 的距离;

$\bar{R}$ ——残余应力的 Wagner 效应系数。

陈骥^[25]按照小变形假定采用平衡法建立了单轴(x 轴)对称截面受弯构件弹性弯扭屈曲的微分方程:

$$EI_y u^{IV} + (M_x \varphi)'' = 0 \quad (1-13)$$

$$EI_w \varphi^{IV} - [(2\beta_y M_x + GI_t - \bar{R}) \varphi']' + (M_x u')' = 0 \quad (1-14)$$

两端具有不同约束条件或在构件的跨中设置侧向支承点以限制其位移和扭转时, 引入计算长度系数 μ_y 和 μ_w , 得到纯弯构件弯扭屈曲临界弯矩的通式:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_y}{(\mu_y l)^2} \left\{ \beta_y + \sqrt{\beta_y^2 + \frac{I_w}{I_y} \left[1 + \frac{GI_t - \bar{R}}{\pi^2 EI_w} (\mu_w l)^2 \right]} \right\} \quad (1-15)$$

对于双轴对称截面, 如 I 形和箱形截面、点对称的 Z 形截面以及绕对称轴弯曲的单轴对称截面, 如槽型截面, 它们的不对称截面常数 $\beta_y = 0$, 如不计残余应力影响, 临界弯矩为:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{\mu_y l} \sqrt{EI_y \left[\frac{\pi^2 EI_w}{(\mu_w l)^2} + GI_t \right]} \quad (1-16)$$

将假定的位移函数代入薄壁构件的弯扭屈曲问题的总势能, 用能量法可以得到横向荷载作用下两端简支单轴对称截面受弯构件的临界弯矩通式:

$$M_{cr} = \beta_1 \frac{\pi^2 EI_y}{l_y^2} \left[\beta_2 a + \beta_3 \beta_y + \sqrt{(\beta_2 a + \beta_3 \beta_y)^2 + \frac{I_w}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t l_w^2}{\pi^2 EI_w} \right)} \right] \quad (1-17)$$

式中 β_1 ——临界弯矩修正系数, 取决于作用于受弯构件上的荷载形式;

β_2 ——荷载作用点位置影响系数;

β_3 ——荷载形式不同时对单轴对称截面的修正系数。

β_1, β_2 和 β_3 的值还与构件端部的约束条件有关。Clark 和 Hill 采用迦辽金法得到了在横向荷载作用下计算受弯构件临界弯矩系数的精确值, 包括计算长度系数 μ_y, μ_w 和 $\beta_1 \sim \beta_3$ 。

童根树等^[15]给出了跨中有侧向和扭转支撑时单轴对称等截面简支梁在纯弯情况下屈曲问题的闭合解, 得到了支撑临界刚度的计算公式, 并给出了临界弯矩和支撑刚度间的简单关系式。童根树和张磊^[26-29]根据薄壁梁弯扭稳定理论, 推导了考虑非线性正应变和剪应变的梁失稳过程应变能的变化公式, 从而解释了考虑非线性剪应变的理论与 ANSYS 分析结果不符的原因。对工字形钢梁在横向分布和集中荷载作用下, 各板件内的横向正应力进行了分析和比较, 指出了在支座截面和跨中集中荷载作用截面, 有时必须考虑这个横向正应力的影响。采用板件稳定理论的方法研究了横向正应力对钢梁整体稳定性的影响, 并发现其对单轴对称截面的钢梁, 在横向荷载作用下的稳定性有很大的影响, 并在考虑非线性横向应变能的基础上, 导出了薄壁构件的总势能方程。

1.3.2 冷弯薄壁檩条及檩条覆板体系的研究概况

1.3.2.1 国外研究概况

国外学者针对冷弯薄壁檩条的研究始于 20 世纪 60 年代,自 1961 年以来,关于有蒙皮支撑的梁的研究就在美国康奈尔大学展开了。1971 年,Celebi、Pekoz 和 Winter^[30]研究了荷载作用于平行腹板平面内且有蒙皮板支撑的 C 形、Z 形檩条的受力性能,受压翼缘与蒙皮板连接情况对应于受到向下重力荷载作用时,受拉翼缘与蒙皮板连接情况对应于受到向上的风吸荷载作用时,研究的目的是寻求蒙皮板抗剪刚度简单实用的表达式。研究表明,对于在上吸荷载作用下的 C 形、Z 形檩条,蒙皮面板的剪切刚度可以按无穷大 Q_{∞} 来考虑,对计算所得的抗弯承载力进行适当折减即可。

1982 年,Pekoz 和 Soroushian^[31]针对风吸力下覆板的 C 形、Z 形檩条提出了经典的简化分析模型和基于经验的设计公式,并被欧洲规范 EC3^[32]所采用。风吸力下覆板的 C 形、Z 形檩条变形可简化为竖向弯曲和扭转两个阶段的叠加,Z 形檩条变形的两个阶段如图 1-9 所示。竖向弯曲阶段可以应用简单弯曲理论分析,截面惯性矩应考虑扭转变形后的截面惯性矩折减。扭转阶段包括了侧向弯曲和扭曲,分析时采用了经典的简化分析模型:将檩条自由翼缘假定为支承在弹性基础上的梁柱模型,如图 1-10 所示,约束翼缘上的均布风吸力 q 转化为作用于自由翼缘上的等效均布荷载 w :

$$w(x) = q \left(\frac{Qb}{2I} + \alpha \right) \quad (1-18)$$

式中 b ——檩条翼缘的宽度;

Q ——梁柱等效横截面绕檩条形心轴的静矩;

I ——变形后截面关于水平轴的截面惯性矩;

α ——转动中心至翼缘与腹板交点的距离除以截面高度。

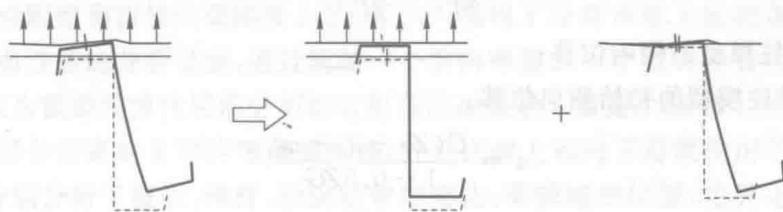


图 1-9 Z 形檩条变形简化为竖向弯曲和扭转的叠加

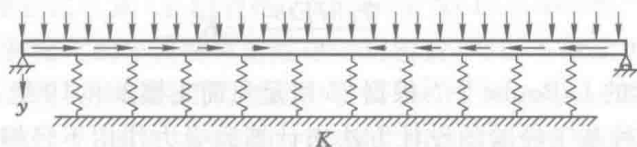


图 1-10 檩条自由翼缘的简化模型

弹性基础的弹簧刚度 K 确定如下:檩条与屋面板的连接可以简化为扭转弹簧施加于檩条的扭转中心,如图 1-11(a)所示;将上述扭转弹簧进一步简化为施加于自由翼缘平面内、刚度为 K 的线弹簧,如图 1-11(b)所示,该线弹簧综合考虑了屋面板和檩条腹板对檩条截面受压部分的约束。该梁柱模型的等效横截面包括受压翼缘和一部分受压腹板,如图

1-11(b)实线所示。

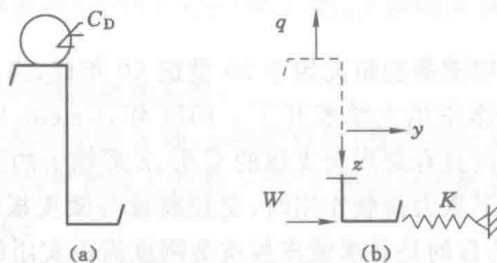


图 1-11 扭转弹簧 C_D 转化为施加于自由翼缘的线弹簧 K

檩条横截面的总应力为在腹板平面内的竖向弯曲应力叠加上扭转与侧移产生的应力：

$$\sigma = \frac{M}{S} + \frac{M_t}{S_t} \quad (1-19)$$

式中 M ——竖向弯曲阶段的弯矩值, $M=qx(1-x)/2$;

S ——基于折减后截面惯性矩 I 的截面模量;

S_t ——梁柱模型横截面关于其自身竖直形心轴(平行于腹板)的截面模量;

M_t ——梁柱模型侧向弯曲弯矩:

$$M_t = \frac{EI_t \pi^2}{l^2} \cdot \sum_{n=1,3,5\ldots} n^2 (a_n - a_{n0}) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (1-20)$$

将梁柱横截面模型中腹板部分忽略,仅考虑宽度为 b 的受压翼缘部分时,取 $n=1$ 时 M_t 结果可以获得满意的精度, Z 形檩条的最大应力出现在翼缘与腹板的交汇处, C 形檩条的最大应力出现在翼缘与卷边的交汇处,最大应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{MH}{2I} + \frac{Eb\pi^2}{2l^2} (a - a_0) \quad (1-21)$$

式中 a ——梁柱模型的侧向位移;

a_0 ——梁柱模型的初始侧向位移:

$$a = \frac{C(Zb + \alpha) + a_0}{1 - 0.9ZG} \quad (1-22)$$

$$Z = \frac{tbH}{4I_0} \quad (1-23)$$

$$C = \frac{1.27q}{\frac{7.87Et b^3}{l^4} + K} \quad (1-24)$$

密苏里罗拉大学的 LaBoube^[33,34] 根据 25 组足尺简支檩条和 19 组足尺连续三跨檩条试验的数据,提出了一种基于经验的设计方法来计算风吸力作用下轻钢屋面系统的承载力。当荷载施加在平行于腹板平面内且受拉翼缘与覆板连接、受压翼缘侧向无支撑时, C 形或 Z 形檩条的名义抗弯承载力为:

$$M_n = RS_e F_y \quad (1-25)$$

式中 R ——考虑全截面屈服时的抗弯承载力折减系数;

S_e ——有效截面弹性模量。

LaBoube 根据试验数据统计确定了各种情况下的系数 R ,简支 C 形檩条: $R=0.4$,简支