

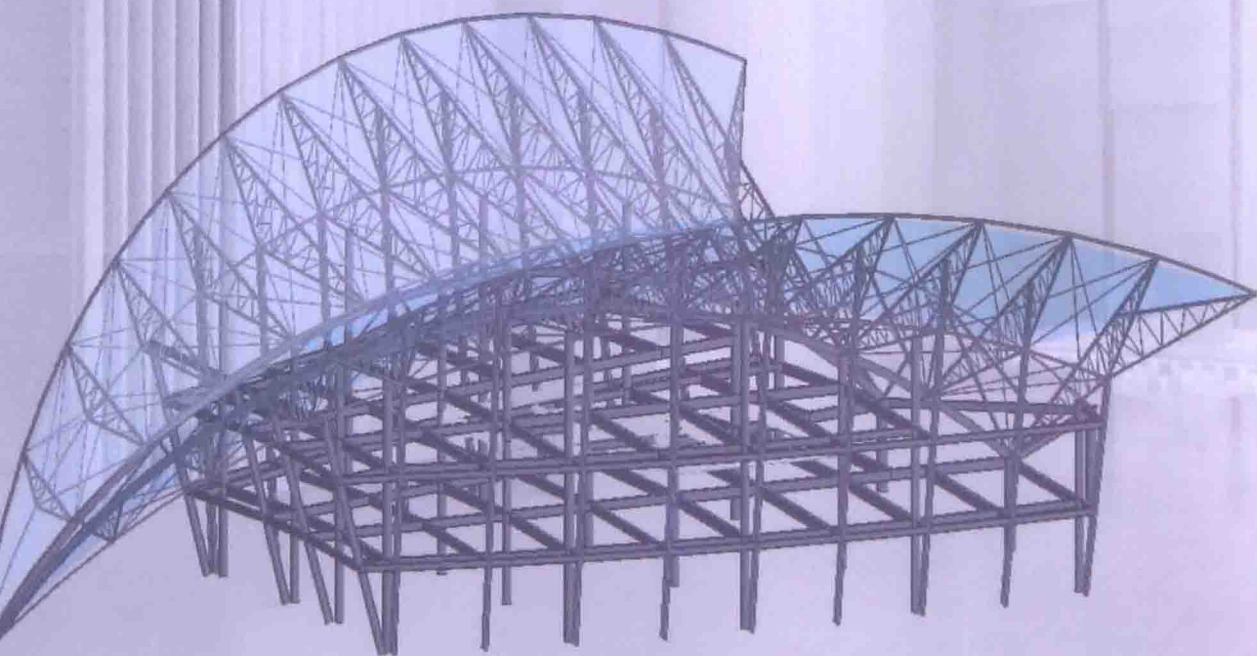
中国科学院教材建设专家委员会立项项目
土木工程科学研究暨研究生教学丛书



薄壁构件的弹性与 弹塑性弯曲与扭转简明教程

Elastic and Elastic-Plastic Bending and
Torsion of Thin-Walled Members

陈骥 编著



科学出版社

中国科学院教材建设专家委员会立项项目
土木工程科学研究暨研究生教学丛书

薄壁构件的弹性与弹塑性 弯曲与扭转简明教程

Elastic and Elastic-Plastic Bending and
Torsion of Thin-Walled Members

陈 骥 编著
Chen Ji

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书介绍了薄壁开口截面扭转屈曲或弯扭屈曲、畸变屈曲和扭转塑性破坏,即均匀扭转塑性破坏和翘曲扭转塑性破坏的理论分析,包括均匀受扭、约束受扭、沙堆比拟方法、翘曲扭转诸多试验研究和设计问题。

本书给出了两端简支焊接工形截面、轴心受压柱的扭转屈曲荷载、轴心受压冷弯开口加劲卷边槽钢构件弹性畸变屈曲荷载的计算实例,并有按照澳大利亚冷弯薄壁规范 AS/NZS 4600—2005 2nd Ed. 确定弹性畸变屈曲荷载的计算实例。

本书可作为高等院校土建类和力学类专业研究生教材,也可供相关工程技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄壁构件的弹性与弹塑性弯曲与扭转简明教程/陈骥编著. —北京:科学出版社,2014

(中国科学院教材建设专家委员会立项项目. 土木工程科学研究暨研究生教学丛书)

ISBN 978-7-03-041740-4

I. ①薄… II. ①陈… III. ①薄壁结构-结构构件-弹性力学-研究生-教材 ②薄壁结构-结构构件-塑性力学-研究生-教材 IV. ①TU330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 199041 号

责任编辑:童安齐 闫洪霞 / 责任校对:刘玉靖

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 9 月第一次印刷 印张:4 3/4

字数:78 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154(HB08)

版权所有,侵权必究

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

序

随着钢材性能以及在钢结构中受扭构件的设计要求的提高,冷弯开口薄壁钢构件在结构工程中的应用日益广泛。因此,从事钢结构理论试验、研究和设计的教学和工程技术人员,迫切需要了解薄壁构件弯曲与扭转中的扭转屈曲、弯扭屈曲和畸变屈曲等问题。本书是为在读的钢结构方向研究生编写的。

陈骥教授在编写本书时,结合了多年教学实践和许多的工程设计实例,十分重视薄壁受扭构件的弹性和弹塑性的理论分析。这些内容颇能引起读者的重视。

本书涉及内容有冷弯开口薄壁截面受扭、轴心受压构件的弹性扭转与弯扭、轴心受压冷弯卷边槽钢截面畸变屈曲、单轴对称和双轴对称工字形钢梁在平面内均匀受弯时的畸变屈曲,以及最新的科学研究成果。

许世界 宋文俊

2014年5月

前 言

本书是专门为高等院校土建类和力学类专业研究生编写的。书中所选内容,从理论分析、试验研究、设计方法到计算举例,都注重研究生基本理论的学习和具体应用,以便为今后研究生学习钢结构构件中的扭转屈曲或弯扭屈曲,以及截面畸变屈曲直至构件破坏等内容打下坚实基础。

本书还重视钢构件在各种外力作用下,构件内部发生的变化和构件变形的表现形式,从而可以预防构件的破坏发生。这样一来,可以落实到具体的钢结构设计方法和钢材选取。

本书分为四章,依次为:第一章 概论;第二章 冷弯开口薄壁截面受扭;第三章 轴心受压构件的弹性扭转和弯扭屈曲;第四章 轴心受压构件的弹性截面畸变屈曲;第五章 钢双轴对称工形截面梁在平面内均匀受弯时的畸变屈曲;第六章 钢单轴对称工形截面梁在平面内均匀受弯时的畸变屈曲。

书中选用的参考文献,除了人们熟知的经典著作外,注意选取学者们近年来的最新科研成果。

本书也是一本为在读研究生编写的有关薄壁构件内容的简明教程。读者如有需要,也可阅读与本书相关的英文版图书 *Torsional Analysis of Steel Structural Mem-*

bers Theory and Design。该英文版图书分为十一章,其阐述的内容不仅涵盖本书的主要内容,还增加了压弯构件的畸变屈曲,压弯构件在弯矩和扭矩联合作用下的理论分析和设计方法,双向压弯构件的弯扭屈曲和多种设计方法,以及工形截面受扭梁的塑性破坏分析等内容。

一个轴心受压、受弯或者压弯构件在外力作用下,有以下几种屈曲模式,即局部屈曲、畸变屈曲、扭转屈曲、弯扭屈曲和它们之间的相关屈曲。

需要特别强调的是,本书用了相当大的篇幅介绍轴心受压构件、受弯构件、单向和双向压弯构件畸变屈曲的理论分析和设计方法,这是因为在构件的截面尺寸、长度、边界条件和外力作用相同时,读者容易注重于构件的扭转和弯扭屈曲,而不重视构件的畸变屈曲。诟不知,构件的畸变屈曲荷载常常会比构件的扭转和弯扭屈曲荷载小得多。受扭构件在其侧向有约束支承时,畸变屈曲荷载略有提高。但是,如果在其侧向没有足够的约束支承,受扭构件也会发生弯扭屈曲。下面用图1来说明这一问题。

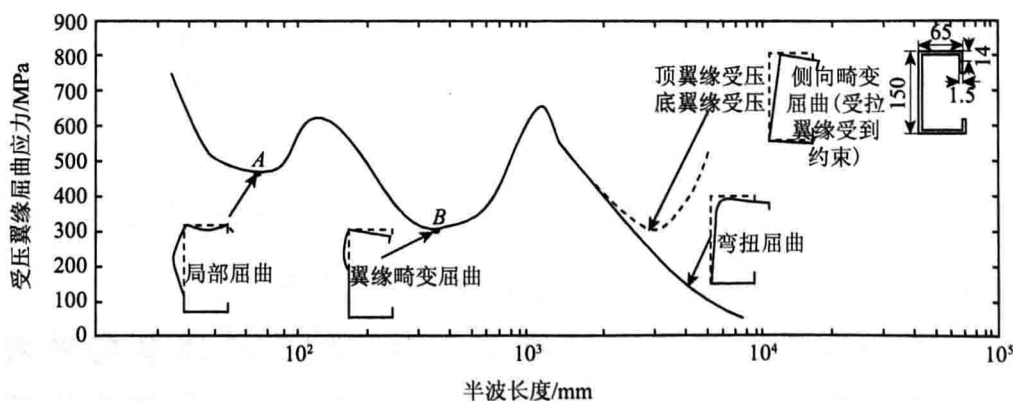


图1 卷边槽钢屈曲模式

实际上,当受扭构件的腹板稍厚时,不会出现局部屈曲,但是会出现与畸变相关的屈曲。当构件侧向的约束不足时,构件会出现弯扭屈曲。

陈 骥

2014 年 5 月于西安建筑科技大学

符 号

A	截面面积, 常数
A_f	受压翼缘截面面积
B	冷弯卷边槽钢的宽度
B_ω	双力矩
C_1, C_2, C_3	扭转常数
D	任意点
E	弹性模量
E', E''	纤维上端点
G	剪切弹性模量
H	冷弯卷边槽钢的高度
I_t	截面扭转常数, 自由扭转惯性矩
I_x	截面绕 x 轴弯曲的惯性矩
I_y	截面绕 y 轴弯曲的惯性矩
I_ω	截面翘曲常数, 截面翘曲惯性矩
I_{xf}	受压翼缘截面绕 x_f 轴弯曲的惯性矩
I_{yf}	受压翼缘截面绕 y_f 轴弯曲的惯性矩
I_{xyf}	受压翼缘截面绕 x_f 和 y_f 轴弯曲的惯性积
I_{tf}	受压翼缘截面的扭转常数
$I_{\omega f}$	受压翼缘截面的翘曲惯性矩
M_x	外弯矩
M_u	自由扭矩, 或称均匀扭矩
M_z	扭矩
M_ω	约束扭矩, 或称翘曲扭矩
P	荷载

P_{crd}	弹性畸变屈曲荷载
P_{cry}	绕 y 轴弯曲的临界屈曲荷载
$P_{\text{cr}\omega}$	临界扭转屈曲荷载
P_{yw}	弯扭屈曲荷载
R	受压翼缘圆角处的外回转半径
S	剪力中心
S_{12}, S_{24}, S_{45}	一段距离绕 x 对称轴的静矩
S_f	冷弯卷边槽钢截面受压翼缘的剪心
S_ω	翘曲静矩, 或称扇性静矩
W_x	截面抵抗矩
b	板件的宽度, 冷弯卷边槽钢截面的中心线宽度
d	一段距离
e_0	形心距
h	冷弯卷边槽钢截面的中心线高度
k	系数
l	板件的长度
o_f	冷弯卷边槽钢截面受压翼缘的形心
r_0	截面对剪心的极回转半径
s	一段距离
t	板件厚度
t_f	翼缘壁厚
t_w	腹板壁厚
x_0, y_0	薄壁开口截面剪力中心的坐标
x_{of}, y_{of}	冷弯卷边槽钢截面受压翼缘的形心距
q_{yf}	作用于冷弯卷边槽钢受压翼缘的竖向均布反力
α	夹角
σ_ω	翘曲正应力
τ_u	板件的最大剪应力

τ_{ω}	翘曲剪应力
φ	薄壁开口截面的扭转角, 函数
ρ	截面的剪心距
ρ_0	薄壁开口截面上翼缘的极距
ω_n	扇性坐标
$\omega_{ni}, \omega_{ni+1}$	线段端点的扇性坐标
ω_s	作用点 P 的扇性坐标

目 录

序

前言

符号

第一章 概论	1
参考文献	2
第二章 冷弯开口薄壁截面受扭	3
2.1 冷弯开口薄壁截面受扭的自由扭矩	5
2.2 冷弯开口薄壁截面受扭的约束扭矩	6
2.3 冷弯开口薄壁截面的几何性质	7
习题	16
参考文献	16
第三章 轴心受压构件的弹性扭转和弯扭屈曲	17
3.1 轴心受压柱绕 z 轴扭转的弹性扭转屈曲	17
3.2 轴心受压柱绕 y 和 z 轴弯扭的弹性弯扭屈曲	19
习题	23
参考文献	23
第四章 轴心受压构件的弹性截面畸变屈曲	24
4.1 截面弹性畸变屈曲应力	24
4.2 用平衡法确定弹性畸变屈曲荷载	25
4.3 按照 Schafer B W 和 Pekoz T 的手算法计算	26
4.4 按照澳大利亚 AS/NZS 4600—2005 ^{2nd} Ed. 确定弹性畸变屈曲荷载	28
习题	39
参考文献	39

第五章 钢双轴对称工形截面梁在平面内均匀受弯时的畸变屈曲	40
5.1 概述	40
5.2 双轴对称工形截面梁畸变屈曲的理论分析	43
参考文献	46
第六章 钢单轴对称工形截面梁在平面内均匀受弯时的畸变屈曲	47
参考文献	53
Appendix —— Derivations of I_{xf} , I_{yf} , I_{xyf} , I_x , I_y and I_ω for Sloping Lipped Channel	54
部分习题答案	61
索引	62

第一章 概 论

早在 1855 年,法国工程师 Saint-Venant^[1.1],在其提交给法国科学院的论文中,首次提出了杆受扭时的经典理论。一个半世纪以来,关于构件受扭的计算有了长足的进步,很多学者提供了各种截面梁弹性和弹塑性受扭时的理论解。

1931 年,Nadai A^[1.2]创建了沙堆比拟方法,解决了冷弯薄壁开口截面均匀受扭时的塑性破坏弯矩。随后 Nadai^[1.3]于 1954 年用薄膜相似理论解决了弹塑性弯扭梁的弯矩。在 1946 年,Sokolovsky W^[1.4]创建了蛋形截面弯扭梁的弹塑性弯矩。

近年来,许多学者,如 Yamada Y, Katagiri A 和 Takatruka K^[1.5]于 1972 年,用数值法研究了均匀和非均匀受扭梁的弹塑性性能。

1969 年,由 Farwell C R Jr 和 Galambos T V^[1.6]指导的受非均匀扭矩作用的工形截面梁的试验研究见图 1.1。

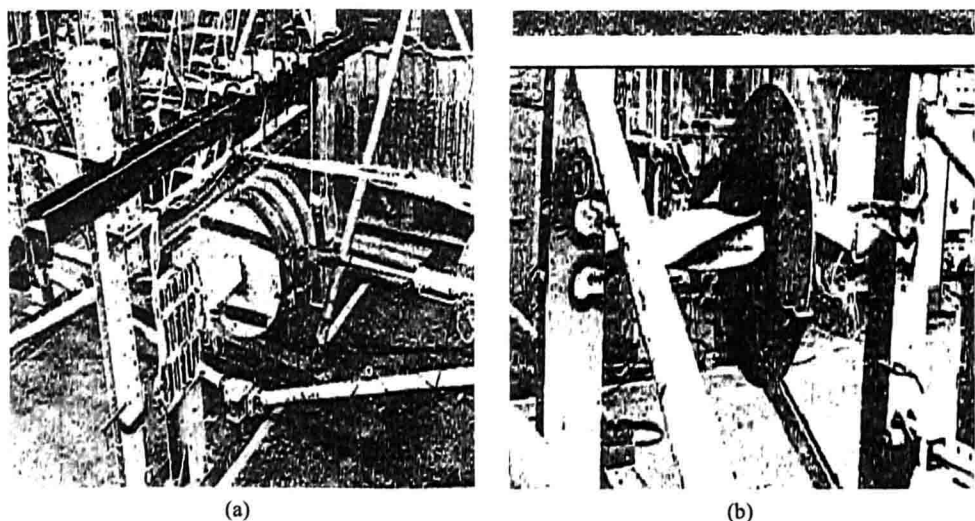


图 1.1 宽翼缘工字钢梁非均匀受扭的试验装置
(a)试验前在梁 5 跨中点作用一荷载;(b)试验后直至破坏

受扭或者弯扭的钢构件有三种失稳形式：一种是扭转屈曲或弯扭屈曲；一种是畸变屈曲；一种是扭转塑性破坏，即均匀扭转塑性破坏，也即沙堆均匀扭转塑性破坏和翘曲扭转塑性破坏。其中，以受扭或者弯扭构件的畸变屈曲，常被人们所忽视。

人们常用冷弯薄壁开口截面弯扭构件，其截面的形式多种多样。图 1.2(a)~(i)展示了几种冷弯开口薄壁截面。

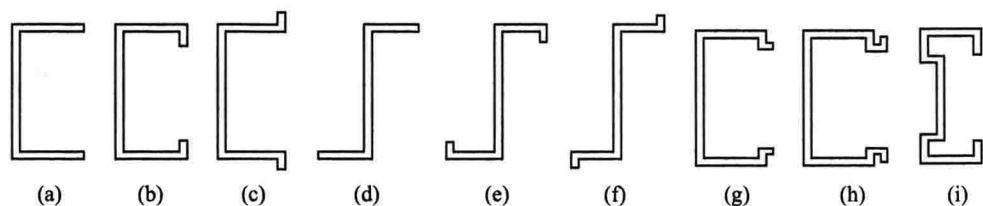


图 1.2 薄壁冷弯型钢截面

参 考 文 献

- [1.1] Saint-Venant, Memoire sur la Torsion des Prismes, Memoires des savants Etrangers. New York; France, XIV, 233-Inc. , 1855.
- [1.2] Nadai A. Plasticity. New York; McGraw-Hill, 1931.
- [1.3] Nadai A. Theory of Flow and fracture of Solids. New York; McGraw-Hill, 1954.
- [1.4] Sokolovsky W W. Theory of Plasticity, Moscow, Russia (in Russian), 1946.
- [1.5] Yamada Y, Katagiri S, Takatruka K. Elastic-plastic analysis of saint-venant torsion problem by hybrid stress Model. Institute Journal of Numerical Methods in Engineering, 1972; 193—207.
- [1.6] Farwell C R Jr, Galambos T V. Non-uniform torsion of steel beams in inelastic range. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1969. 195(12); 2813—2829.

第二章 冷弯开口薄壁截面受扭

关于冷弯开口薄壁截面构件受扭,许世界在 2013 年提出一个很好的计算表达式,即将分割开的双力矩和翘曲扭矩归入求解轴心受压拉弯扭屈曲荷载的平衡方程。

冷弯开口薄壁截面受扭梁的扭矩分为自由扭矩 M_u (均匀扭矩) 和约束扭矩 M_w (翘曲扭矩) 两种。图 2.1 给出了工形截面受扭梁受外力作用时的变形情况。截面翘曲的特征是受压翼缘和受拉翼缘受扭时在相反的方向变形。

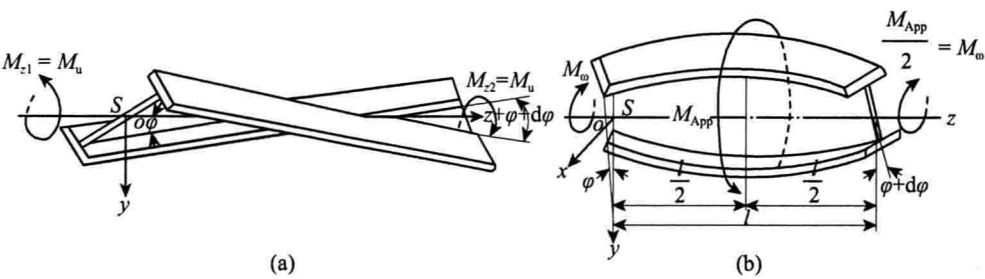
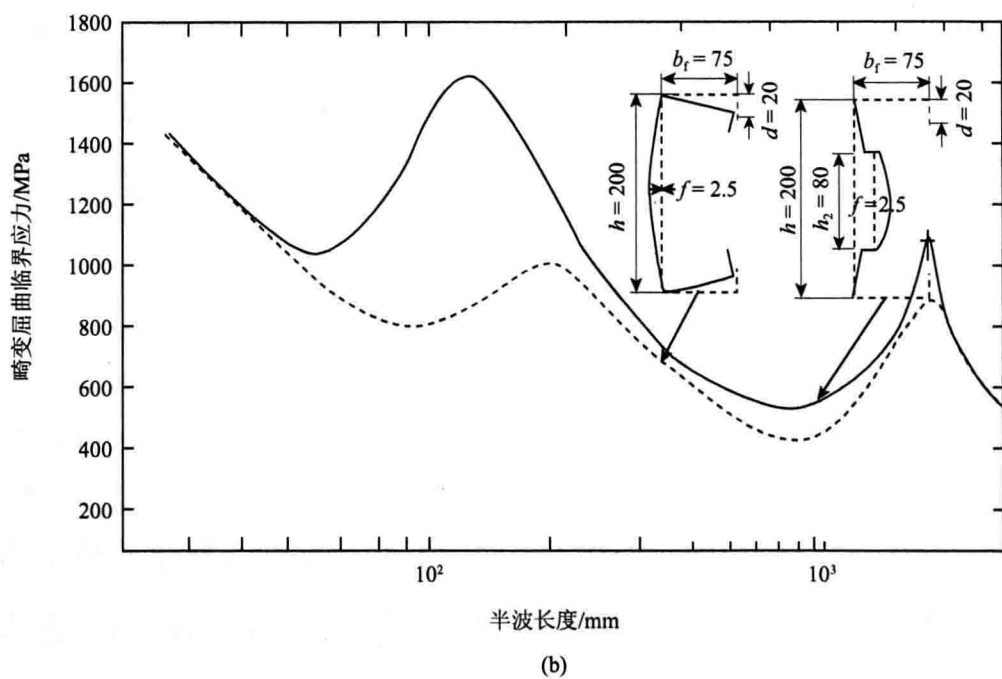
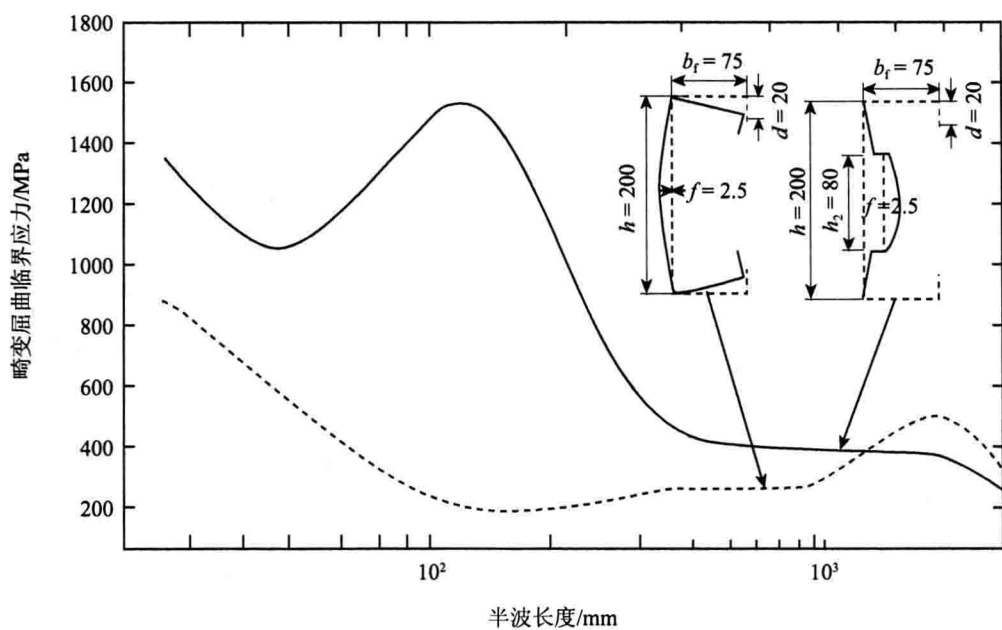


图 2.1 受扭的工型截面构件

(a)工型截面均匀受扭;(b)工型截面约束受扭

因功能要求不同,可以取用不同的冷弯开口薄壁截面构件,在 2008 年,Li L Y 和 Chen J K^[2,1]研究和比较了如图 2.2 (a)和(b)所示冷弯开口薄壁 Σ 形截面 和冷弯开口薄壁卷边槽钢的畸变屈曲理论分析。他们认为,冷弯开口薄壁 Σ 形截面 可以用与卷边槽钢相同的方法设计。

图 2.2 卷边槽钢截面和 Σ 形截面畸变屈曲曲线

(a) 受压畸变屈曲; (b) 受弯畸变屈曲

2.1 冷弯开口薄壁截面受扭的自由扭矩

自由扭矩的表达式为

$$M_u = GI_t \frac{d\varphi}{dz} \quad (2.1)$$

式中, G 为剪切弹性模量; $I_t = \frac{bt^3}{3}$ 为截面扭转常数; GI_t 称为自由扭转刚度。

对于由几个矩形板件组成的冷弯开口薄壁构件截面, 如工形、槽形、T 形和角形等截面, 总的截面扭转常数, 可近似地取诸板件的扭转常数 I_{it} 之和, 即

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_{it} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n b_i t_i^3 \quad (2.2)$$

式中, b_i 和 t_i 分别为每块板件的宽度和厚度; $i=1, 2, \dots$ 为矩形板件数。

对于轧制的工形和 H 形钢, 因在翼缘和腹板拐弯处圆角的存在, 对截面的扭转常数可增加至 1.3 倍, 但是槽钢只能增加 12%。对于极薄的冷弯薄壁开口截面, 此常数既不增加, 亦不减少。

冷弯薄壁工形截面受扭梁的剪应力

自由扭矩 M_u 和约束扭矩 M_w 都与剪应力有关, 而求解受扭梁的剪应力是十分困难的。冷弯薄壁工形截面受扭梁的剪应力如图 2.3 所示, 分为均匀受扭剪应力和翘曲受扭剪应力两种。

自由扭矩使截面只产生剪应力, 它在截面的壁厚范围内形成封闭的剪力流。1997 年, Trahair N S 和 Pi Y L^[2, 2] 指出此剪力流产生的剪应力分布如图 2.3 (a) 和 (b) 所示, 其方向与壁厚的中心线平行, 而且大小相等、方向相反, 成对地形成扭矩, 在其中心线处的剪应力为零, 在截面的外表面最大, 沿厚度按照线性变化, 板件的均匀扭转最大剪应力为