

铝合金

Investigation on the Structural Behaviour and
Design Methods for Aluminium Alloy Members

结构性能与设计方法 研究

朱继华 苏玫妮 杨立伟 | 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

铝合金结构性能与设计方法研究

朱继华 苏玫妮 杨立伟 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

铝合金结构性能与设计方法研究/朱继华,苏玫妮,杨立伟著. —武汉:武汉大学出版社,2017.4

ISBN 978-7-307-16149-8

I. 铝… II. ①朱… ②苏… ③杨… III. ①铝合金—轻金属结构—结构性能—研究 ②铝合金—轻金属结构—结构设计—研究
IV. TU395

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067195 号

责任编辑:李 晶 责任校对:邓 瑶 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:18 字数:343千字

版次:2017年4月第1版 2017年4月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16149-8 定价:80.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

Preface

I have known Ben Young for about fifteen years, and May Su and Jihua Zhu for about ten years, as friends, fellow researchers and co-authors, with May completing her PhD under the joint supervision of Ben and me in 2014. I was delighted when they told me that they were writing a book on aluminium alloy structures, following many years of research in this area, and very happy to be invited to write this foreword. The fact that the book is written in Chinese presented somewhat of a challenge, but with some very basic knowledge of the language and knowing the authors and their published works in this area well, enables me to contribute this piece.

Aluminium is a material with great potential for structural applications, but with many key differences from other metallic structural materials, like steel, aluminium offers advantages over steel in terms of weight, corrosion resistance and formability, but challenges in terms of reduced ductility, fire performance and weldability. This book draws together researches conducted by the authors over many years and presents a comprehensive overview of the subject. It covers a great deal of experimentations on the material, cross-sectional and member responses of aluminum profiles, together with complementary numerical studies, and a detailed explanation and evaluation of available design guidance from all over the world.

This book will serve as an invaluable reference point for researchers in this area and for those specifying aluminium alloys in structural applications. I congratulate the authors for the hard work and dedication required to produce such a publication.

L. Gardner

Professor of Structural Engineering
Imperial College London

April, 2017



Leroy Gardner is the professor of structural engineering at Imperial College London. His principal research interests lie in the areas of structural testing, numerical modelling and the development of design guidance for steel structures. He is a member of the European and BSI Committees responsible for Eurocode 3 and Fellow of both the Institutions of Civil Engineers (FICE) and Structural Engineers (FISE).

前 言

采用挤压工艺可以将铝合金迅速、经济地加工成各种截面形式,这是铝合金超越工程常用金属建筑材料——结构钢的最突出优点。铝合金的熔点约为钢的 $1/3$,其热传导系数约为钢的 2 倍,因此铝合金常常采用挤压工艺加工成型。由于钢材熔点较高,采用挤压工艺通常需要非常大的压力和能量,因此很不经济,从而难以应用于建构工程。挤压型材在铝合金用量中占有极大比例。采用挤压工艺生产的铝合金构件可以形成各种复杂、优化的截面,从而为公用、民用建筑提供灵活、优异的结构形式,而这些截面通常难以通过常见的钢材加工工艺(如热轧或冷弯工艺)生产。此外,铝合金的强度与钢相近,而其密度仅为钢的 $1/3$;同时,铝合金具有优异的耐腐蚀性,并且易于回收和循环使用。可见,铝合金是一种优秀的建筑材料,具备较好的应用前景。

铝合金结构是采用铝合金材料制造而成的结构,其基本构件的力学性能有很多在形式上与钢结构相似,因此在现代结构设计中得到了越来越广泛的应用。欧美国家早在 20 世纪中叶就建造了许多铝合金结构,而我国对铝合金结构的研究和应用起步较晚,应用研究较少,也无规范可循,这直接影响了国产铝合金结构在我国的推广应用。铝合金结构的破坏类型和特征的研究在国内几乎还是空白,因此设计时常常错误地套用中国的《钢结构设计规范》,在国内已屡屡造成建筑安全事故和诸多安全隐患。2007 年,我国第一部《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)经建设部正式发布,自 2008 年 3 月 1 日起实施,其后的十年时间里,铝合金设计的方法得到了更深入的研究,这表明我国建筑铝合金结构领域正处于一个重要的发展机遇时期。

准确了解结构基本构件的力学性能是进行结构设计与分析的重要基础。目前,中国和欧美国家的铝合金设计规范均主要参考各国的钢结构设计规范,尤其是冷弯钢结构规范,提出基于有效截面假定的结构设计准则。虽同为金属材料,铝合金与钢材的力学性能却有着明显的差异。同时,基于有效截面假定的传统设计方法对较为复杂的挤压截面设计并不友善,束缚了铝合金挤压截面的优化

设计,不利于铝合金结构的积极发展。鉴于此,铝合金挤压构件的设计方法仍有待进一步研究。

在铝合金结构的设计中,目前在国际上较常用的设计规范为:美国《铝合金设计手册》(以下简称“美国规范”)(*Aluminum Design Manual*, AA, 2015),澳大利亚/新西兰标准(*Aluminum Structures Part 1: Limit State Design*, AS/NZS, 1997)以及欧洲规范(*Eurocode 9: Design of Aluminum Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, BS EN 1999-1-1; 2007, 2007)。美国铝业协会于 2015 年完成了《铝合金设计手册》(AA, 2015)最新版本的修订工作。该手册主要采用许用应力法或抗力系数设计法设计,对于截面和超静定结构的设计,主要利用材料的弹性区域进行设计;而澳大利亚/新西兰标准(AS/NZS, 1997)的基本思路则与美国规范(AA, 2015)非常相似;欧洲标准组织(CEN)制定的欧洲规范(EC9, 2007)的最新版本在 2007 年出版。最新版欧洲规范的优点,是在规范附件中附加了考虑材料应变硬化的截面设计方法以及超静定结构的塑性铰设计方法。此外,还有两个应用较为广泛的铝合金设计方法:连续强度法(CSM)和直接强度法(DSM)。两者都是以截面为整体,提出了截面整体宽厚比的概念。其中连续强度法更进一步考虑并利用了材料应变硬化的特征。

本书著者长期从事铝合金结构的研究,具有丰富的海内外科研经验,与铝合金领域的著名专家学者长期合作。本书是著者对铝合金材料及铝合金结构设计方法多年研究工作的总结,通过铝合金构件试验、数值模拟来得到铝合金构件的力学性能,再以此来综合评价现有的铝合金结构设计方法(包括国际设计标准和其他设计方法),探索了当前较为先进的连续强度法(CSM)及直接强度法(DSM)在铝合金结构设计领域的应用,探讨了一些新型截面的设计要求和初步应用,为最终建设一套完整的铝合金结构先进设计方法、促进铝合金结构在我国的推广和应用起到了积极的作用。

全书共分为 9 章,从材料和力学等不同角度,深入浅出地对铝合金结构进行了比较全面的探讨。第 1 章简单介绍了铝合金材料及其结构发展史,铝合金结构的优缺点,铝合金构件的生产工艺以及由此产生的截面多样化优势,铝合金材料目前所占的市场份额和应用前景。第 2 章回顾了国内外关于铝合金或其他金属结构构件的研究。第 3 章综述了铝合金的材料特性和相关的材料试验,关于残余应力的讨论,以及横向焊缝和竖向焊缝附近的热影响区对铝合金构件强度的影响。第 4 章描述了铝合金柱、梁、组合梁柱以及连续梁的强度及性能的试验



研究,包括试验方法和试验结果。所有焊接和非焊接构件的材料性质均通过试样试验获得,测量的整体或局部上的几何误差也很详细。第5章通过有限元分析提出了铝合金构件的数值模型。有限元模型先被试验结果验证,再进行参数分析。第6章总结了现行美国规范(AA,2015)、澳大利亚/新西兰标准(AS/NZS,1997)、欧洲规范(EC9,2007)、直接强度法(DSM)、连续强度法(CSM)的铝合金结构构件的设计规则,同时将铝合金构件的试验强度与设计强度进行了对比。第7章论述了铝合金截面分类和有效厚度的相关概念。第8章对设计规范和设计方法进行了可靠度分析,并就欧洲规范和美国规范中的可靠度分析方法进行对比。第9章总结出结论,并对铝合金结构研究领域未来的研究方向提出了一些建议。

鉴于作者的水平有限,书中难免存在不当之处,敬请批评指正。

朱继华 苏玫妮 杨立伟

2017年3月

目 录

1 概述	(1)
1.1 铝合金材料和结构	(1)
1.2 铝合金的优缺点	(3)
1.3 生产过程	(5)
1.4 设计方法	(6)
1.5 本章小结	(8)
2 国内外研究现状	(9)
2.1 材料性能	(9)
2.2 铝合金构件的试验研究	(12)
2.3 铝合金构件的有限元分析	(17)
2.4 铝合金结构的国际规范与方法	(19)
2.5 本章小结	(23)
3 铝合金材料性能研究	(24)
3.1 常温条件下的狗骨拉伸试验	(24)
3.2 高温条件下的狗骨拉伸试验	(25)
3.3 残余应力	(28)
3.4 焊接-热影响区	(29)
3.5 热影响系数	(32)
3.6 韦氏(Webster)硬度测试	(36)
4 铝合金构件的试验研究	(38)
4.1 命名规则和构件截面类型	(38)
4.2 初始几何缺陷	(43)
4.3 铝合金轴心受压柱试验	(45)
4.4 简支梁试验	(60)

4.5 连续梁试验	(73)
5 有限元分析	(81)
5.1 概述	(81)
5.2 单元类型和网格尺寸	(82)
5.3 材料特性	(83)
5.4 初始几何缺陷	(83)
5.5 边界条件和加载方法	(84)
5.6 试验验证	(86)
5.7 参数研究	(106)
6 设计方法	(147)
6.1 轴心受压柱	(147)
6.2 简支梁	(191)
6.3 连续梁	(209)
7 截面分类	(224)
7.1 简介	(224)
7.2 欧洲规范的截面分类框架	(225)
7.3 CSM 截面分类框架	(233)
7.4 有效的厚度公式	(237)
7.5 结果对比	(239)
7.6 本章小结	(241)
8 可靠度分析	(243)
8.1 简介	(243)
8.2 一阶可靠度理论背景	(243)
8.3 欧洲规范分析方法(EN1990)	(245)
8.4 美国规范分析方法(AISC)	(254)
8.5 欧洲规范与美国规范的比较	(256)
8.6 结果和讨论	(258)
8.7 本章小结	(265)
9 结论	(267)
参考文献	(268)

1 概 述

1.1 铝合金材料和结构

铝是地球上含量较高的元素,但是铝的活性较强,一般以氧化物的形式存在。当人类不具备成熟、经济的将铝氧化物分解的能力时,铝是与银类似的贵金属材料。铝合金的现代商业用途起源于 1886 年,归功于一位法国人 Paul Louis Touissant Heroult 和一位美国人 Charles M. Hall(Mazzolani, 1995)。单纯的铝是一种强度相对低的金属,难以直接应用于工业。通过添加少量的其他元素,铝可以转变成成为铝合金,从而提高它的力学特性,满足应用需求。基于其优异性能,铝合金的工业需求一直处于快速增长状态,全球铝需求量已经从 2006 年的 3.45×10^7 t 增长至 2015 年的 5.77×10^7 t,其主要供应商分布在中国、俄罗斯、美国、日本、加拿大和澳大利亚等国。当前美国《铝合金设计手册》(AA, 2015)规定的铝合金类型多达上千种,并根据原材料和生产工艺进行分类,广泛地应用于航空工业(图 1-1)、电力系统(图 1-2)、铁路行业和航运业。其中适用于土木工程的主要是 T5 和 T6 系列的铝合金,其价格大概是相同质量不锈钢的一半。

铝合金结构是采用铝合金材料制造而成的结构,其基本构件的力学性能有很多在形式上与钢结构相似,因此在现代结构设计中得到了越来越广泛的应用。金属铝在 1886 年成为了一种工业材料,之后在 1897 年被应用到罗马 San Gioacchina 教堂的金属板圆顶屋面上(Dwight, 1999)。而铝合金的最早应用是在 20 世纪 50 年代的欧洲(Mazzolani, 1995)。从那时起,特别是在过去的 20 年中,铝合金构件被越来越广泛地应用于各种工程中,如建筑物的幕墙、屋顶系统、空间结构、移动桥梁以及位于潮湿环境的结构。类似应用的例子遍布世界各地,如世界上第一座铝合金桥梁——加拿大 Arvida 铝合金桥(图 1-3)和英国利物浦南车站(图 1-4)。卡塔尔的 Tornado 塔使用了 450 t 的铝合金,并在 2009 年赢得了中东和非洲的“最

佳高楼”奖(图 1-5)。我国对铝合金结构的研究和应用起步较晚,但发展迅猛。2007 年建设部出版了第一部《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007),2013 年建成了世界最大铝合金结构工程——重庆国际博览中心,该建筑东西宽约 800 m,南北长 1500 m,占地面积 1.3 km²(图 1-6)。近年来,铝合金模板也在钢筋混凝土结构施工中得到了较为广泛的应用。

总体而言,铝合金最突出的优点之一是可以通过挤压成型工艺,迅速、经济地将铝合金加工成各种复杂截面,从而为建筑提供灵活、优异的结构形式。此外,铝合金耐腐蚀性能好,一般经过表面阳极处理即可达到建筑防腐要求。在酸性环境下,硫化氢及硫醇都不会对铝合金造成损害,因此,铝合金非常适合在高温高湿、杆件外露、海边及重度污染的环境下使用,是绿色建筑材料的理想选择。



图 1-1 离岸直升飞机停机坪
(Mazzolani, 1995)

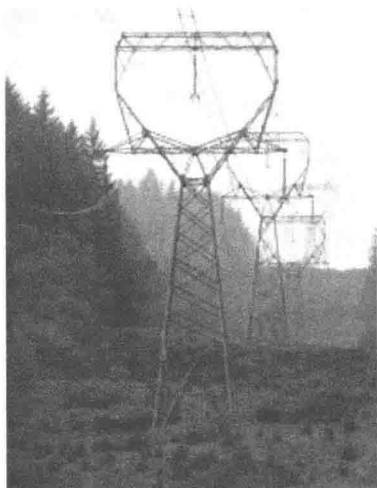


图 1-2 高压电塔 (EIS, 2013)



图 1-3 加拿大 Arvida 铝合金桥
(Aluminum Company of Canada Ltd., 1940)



图 1-4 利物浦南车站 (Badger, 2009)



图 1-5 卡塔尔 Tornado 塔
(The Aluminum Association, 2008)



图 1-6 重庆国际博览中心绿廊

1.2 铝合金的优缺点

铝合金强度与钢相近,是一种优秀的建筑材料。概括地说,铝合金作为结构材料的优势体现在以下几个方面。

(1) 高强重比:铝合金的密度大约为钢材的 $1/3$,而强度与普通钢材接近(图 1-7)。因此,铝合金在结构中的应用可以很大程度地减轻结构的自重,同时减少了制作、运输及安装的成本和费用。

(2) 易于挤压成型:铝合金的熔点很低,易于挤压。挤压型材可以通过模具推挤材料形成,几乎可以生产出各种形状的横截面(图 1-8)。铝合金型材并不是通过这种方法制作的唯一金属材料构件,但它却是最普遍且最容易被挤压成型的(Kissell, Ferry, 2002)。这是铝合金材料优于钢材的主要优点之一。

(3) 抗腐蚀性:在空气中,铝合金表面能迅速形成高度抗氧化膜。即使是在恶劣环境中,这种氧化膜也能为铝合金提供良好的抗腐蚀性。例如,铝合金桥的面板不需要油漆,只需要最低的保养费用,并且比钢筋或混凝土更适于使用除冰的化学物质。

(4) 耐低温:在较低温度下,铝合金仍能保持较高的强度。虽然大多数金属材料在低温下容易失去强度,但是铝合金在低温下的强度及韧性会增加(Mazzolani, 1995)。这一特点也使铝合金成为在低温环境下桥梁和公路结构最理想的材料。

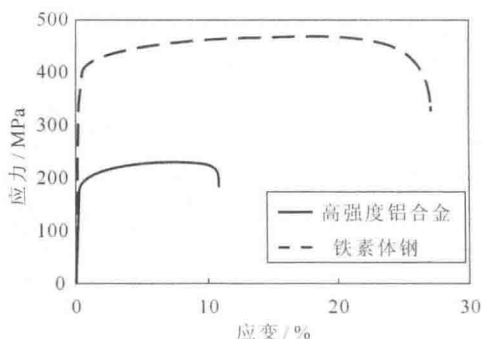


图 1-7 典型的铁素体钢和铝合金
应力-应变曲线的比较

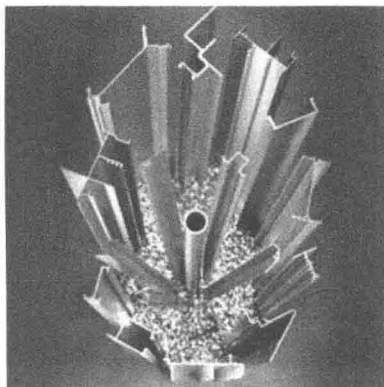


图 1-8 铝合金的多变截面

尽管前面讨论了铝合金的优点,但是结构用铝合金依然存在一些缺陷。比如,铝合金的弹性模量($E=70\text{ GPa}$)只有碳素钢($E\approx 200\text{ GPa}$)的三分之一,这导致铝合金构件容易发生屈曲破坏。另外,高热膨胀系数与低熔点固然使得铝合金易于挤压,但同时使铝材面临热影响区软化的问题。当对热处理铝合金进行焊接时,焊接产生的热量会大大地降低其局部区域的强度,这就是热影响区软化。一般来说,热影响区的范围大概在焊缝两侧的76.2 mm以内,在焊缝两侧25.4 mm内影响最大,如图1-9所示。对于6000牌号的铝合金,焊接时产生的热量会使局部位置的母材强度减少将近一半(Mazzolani, 1995)。

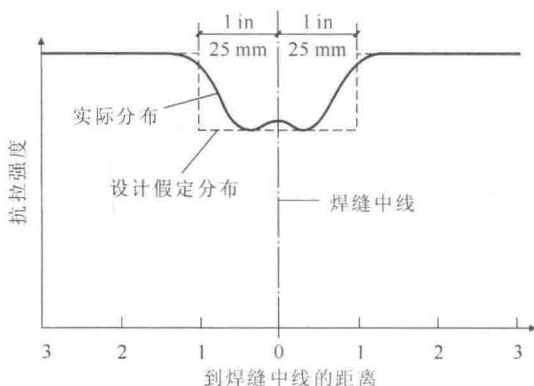


图 1-9 铝合金的热影响区示意图(AA,2015)

1.3 生产过程

铝合金构件的制造技术包括铸造、挤压、锻造和回火 (Mazzolani, 1995)。大部分结构用铝合金型材是挤压成型的,这也是目前的研究重点。因此,为了更好地理解铝合金的材料特性和结构行为,本书将通过示意图(图 1-10)对挤压过程进行简要介绍。

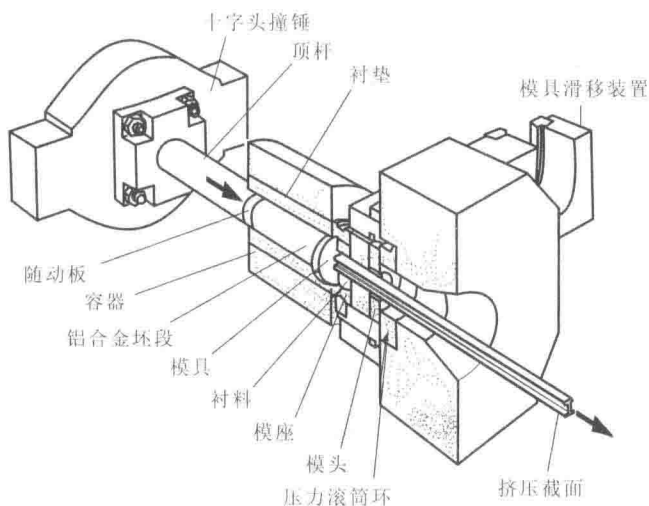


图 1-10 挤压过程的图解说明 (Dwight, 1999)

采用挤压成形技术生产的铝合金构件,其截面尺寸一般为 10~800 mm,且形状不限。具体的加工流程主要有如下几个步骤:

- ① 纯铝是一种强度较低的金属。为了改善其力学性能,通常添加少量的额外元素与铝融合,形成铝合金。
- ② 将熔融铝合金放进大小合适的钢坯中。
- ③ 预热坯放入挤压机的模体中,并挤压通过开口的起模板。起模板上的开口形状决定了挤压型材的截面形状。
- ④ 然后用压力杆施加高压,型材从挤压模挤出。
- ⑤ 不同的合金需要固溶退火(淬火)或空气淬火,接着是人为或自然老化。
- ⑥ 挤压成型之后,用高压拉力把管放在矫直台上调直。

由于铝合金构件的生产工艺是挤压成形,使得铝合金管的截面类型直接由起模板决定,因此其造型比较多变,而且制造复杂截面对铝合金材料来说就比钢材容易很多。常见的截面形式有 H 形、空心方管形、圆管形、槽形、角形,以及其他更加复杂的形状,等等。这是铝合金材料优于钢材的主要优点之一。

1.4 设计方法

美国规范(AA,2015)和澳大利亚/新西兰标准(AS/NZS,1997)是目前在铝合金结构的设计中,使用较广泛的设计规范。这两个规范在内容安排及设计方法上,基本思路一致,都是采用容许应力设计法或抗力系数设计法来进行设计。对于截面和超静定结构的设计,主要利用材料的弹性区域进行设计。澳大利亚/新西兰的标准参照了美国规范,主要区别在于澳大利亚/新西兰标准引入了系数 k_c 对屈服强度进行折减,而美国规范无此项要求。

欧洲规范(EC9,2007)根据板件的宽厚比系数将截面分成 4 类——延性截面、厚实截面、非厚实截面以及薄壁截面。若为薄壁截面,则采用有效截面法对板件厚度进行折减,以此考虑局部屈曲引起的承载力降低。最新版欧洲规范的优点,是在规范附件中附加了考虑材料应变硬化的截面设计方法以及超静定结构的塑性铰设计方法。由此可见,欧洲规范已经允许构件设计进入塑性阶段。

我国的《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)在编写过程中主要参考了国外的研究成果和欧洲规范,同样引入了有效截面的概念进行设计。规范编写组力求将铝合金构件、连接、板件等计算公式与《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)以及《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)中的相关公式在形式上统一起来,以便应用(张其林等,2009)。

此外,伦敦帝国理工大学的 Gardner 教授团队通过一系列的研究(Gardner, 2002; Gardner, 2008; Gardner, Theofanous, 2008; Gardner et al, 2011),提出了连续强度法(Continuous Strength Method, CSM)。CSM 最初是针对不锈钢和碳钢材料开发的,考虑了应变硬化和整体塑性的设计。CSM 还在 2013 年正式收录在最新版的《美国 AISC 不锈钢设计指南》(2013)中。最近,苏孜妮等(2014a, 2014b, 2014c)对 CSM 方法进行了发展和完善后,该方法现已适用于铝合金截面的受压和受弯设计,以及铝合金连续梁的整体塑性设计。CSM 最近已被纳入最新版的《美国 AISC 不锈钢设计指南》(2013)。

另外一种应用较为广泛的铝合金设计方法是直接强度法(Direct Strength

Method, DSM)。该方法是最早由 Schafer 和 Peköz (1998)提出的冷弯型钢的结构设计方法,后来由朱继华等(2008)进行进一步完善,逐步拓展到铝合金构件的设计范围。直接强度法主要是为了改进有效截面法的不足,以有限条法为基础提出的基于全截面分析的结构设计方法。该方法以构件全截面为对象研究其屈曲强度,同时考虑整体屈曲、局部屈曲和畸变屈曲的耦合效应。

当前基于有效截面假定的铝合金结构设计方法存在的主要问题如下。

(1) 铝合金弹性模量约为钢的 $1/3$,而铝合金挤压构件由于其工艺特点往往壁厚较小,这导致铝合金构(板)件的屈曲强度低于钢结构构(板)件。因此,铝合金结构设计方法必须着重考虑整体屈曲、局部屈曲和畸变屈曲对构件力学性能的影响。

(2) 有效截面法将截面分割为板件(如工字形截面可分割成腹板和翼缘板),以板件为研究对象确定有效截面和屈曲强度,进而以此为基础计算截面承载能力。由于钢结构加工工艺的局限性,钢结构构件通常的截面较为简单,截面仅包含较少的板件,采用此方法较为经济、有效。然而,铝合金挤压构件通常的截面较为复杂,包含较多的板件。这是铝合金挤压构件的优点,但也导致基于有效截面法的设计过程更为烦琐。

(3) 有效截面法在考虑各板件的有效面积及屈曲强度时,通常简化或者忽略了相邻板件间的耦合效应。这种假设对于截面形式较简单的热轧或冷弯构件误差较小,而对于较为复杂、包含较多板件的铝合金挤压构件却误差较大。

(4) 由于铝合金挤压构件通常截面较复杂,包含较多板件,因此,畸变屈曲是铝合金结构的设计与应用中不可忽视的重要问题。国内外对钢结构畸变屈曲机理已进行了大量研究,其研究成果已应用到欧美国家的冷弯钢结构设计规范中。然而铝合金结构畸变屈曲机理及相应设计要求仍为国内外科研领域的空白。

(5) 此外,以前关于铝合金结构的研究主要集中在简单的构件设计上,也就是静定结构;而超静定结构设计会涉及弯矩重分布的概念。当第一个塑性铰形成的时候,超静定结构可能可以进行内力重分布,最后因为形成塑性破坏机制而失效。在这种情况下,塑性设计可以应用到有足够转动能力的厚实截面构件上。在结构系统中考虑结构的连续性会带来很多的好处,比如可以提高结构的承载能力和减小挠度(Nethercot et al, 1995)等。