



“十二五”国家重点图书

材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

焊接工程实践教程

Welding engineering practice tutorial

主 编 郑光海
副主编 李柏茹
管晓光

院士专家著书 体现先进性 前瞻性 反映材料领域的研究成果

学科融合贯通 注重交叉性 学术性 立足材料科学的人才培养

内容丰富翔实 追求研究性 实用性 促进材料工程的创新发展

哈尔滨工业大学出版社

主 编 郑光海
副主编 李柏茹 管晓光

哈爾濱工業大學出版社

内 容 简 介

全书以焊接工艺实践为主线,系统全面介绍了典型焊接结构的特点、工况条件和工艺设计规范,讲解了焊接制造工艺流程和各工序的原理、方法、设备,选取典型焊接结构进行了工艺设计的要点介绍。全书共分为5章:焊接结构及其制造规程,焊接基本操作训练,建筑钢结构的焊接工艺设计与制作,压力容器的焊接工艺设计与制作,箱型结构的焊接工艺设计与制作。

本书可作为普通高等应用型院校焊接专业、材料成型及控制工程专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接工程实践教程/郑光海主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.2

ISBN 978-7-5603-3179-9

I. ①焊… II. ①郑… III. ①焊接-高等学校-教材
IV. ①TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 018037 号

策划编辑 张秀华 杨 桦 许雅莹
责任编辑 范业婷
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 9.75 插页 1 字数 220 千字
版 次 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3179-9
定 价 18.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

教育部 1998 年普通高等学校专业目录中,将原金属材料及热处理、铸造、焊接、热加工工艺及设备等专业合并设置了材料成型及控制工程专业。在这个专业目录下培养的学生具有加强基础,淡化专业界限,宽口径的知识结构特点,很适合研究型院校人才的培养需要。近年来,随着我国加入世界贸易组织,制造业领域国际合作的范围迅速扩大,促进了国内的产业结构调整,市场对各种专业人才的需求也有了明显变化,更加突出了对专业素质的要求,尤其是对基础理论扎实、工程实践能力强的应用型高级专门人才的需求日益加大。表现在船舶、汽车、电力装备、石化设备、重型制造装备、轨道车辆、建筑钢结构、桥梁等工业领域,焊接技术人才需求旺盛。

本书是为了适应应用型焊接专业人才培养而编写的。立足焊接专业人才培养体系,将专业工程实践作为一门必修课,以综合训练学生利用专业理论编制焊接制造工艺并检验工艺可行性的能力。全书共分 5 章:焊接结构及其制造规程,焊接基本操作训练,建筑钢结构的焊接工艺设计与制作,压力容器的焊接工艺设计与制作,箱型结构的焊接工艺设计与制作。编写中力求紧密结合生产实际,介绍焊接结构制造的基本工艺流程、用到的加工方法和操作要领;在综合训练部分,选取典型焊接结构,介绍它们的结构特点、技术要求、焊接技术规范等,供学生进行工艺实践。

本书适合做普通高等应用型院校焊接工程与技术专业、材料成型及控制工程专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

本书由黑龙江科技学院郑光海、李柏茹、管小光编写,郑光海任主编,李柏茹、管小光任副主编。第 1、3 章及绪论由郑光海编写,第 2、4 章由李柏茹编写,第 5 章由管晓光编写。

由于编者水平有限,难免有不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

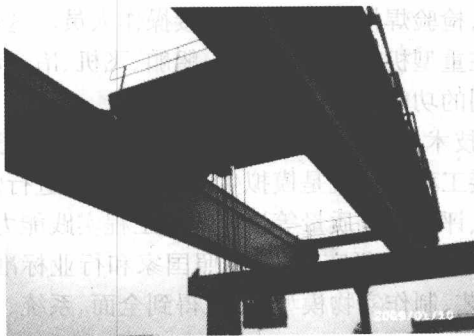
2010 年 10 月

目 录

绪论	1
第1章 焊接结构及其制造规程	3
1.1 焊接结构设计	3
1.2 焊接工艺设计	26
1.3 焊接生产安全规程	39
1.4 焊接质量检验	41
1.5 焊接工艺评定	52
第2章 焊接基本操作训练	56
2.1 下料	56
2.2 焊条电弧焊	63
2.3 气体保护电弧焊	70
2.4 钎焊	80
2.5 火焰焊接	83
第3章 建筑钢结构的焊接工艺设计与制作	87
3.1 建筑钢结构简介	87
3.2 梁结构	88
3.3 桁架结构	95
3.4 建筑钢结构的质量检验	96
3.5 典型建筑钢结构的制作	97
第4章 压力容器的焊接工艺设计与制作	98
4.1 压力容器简介	98
4.2 压力容器的生产制造工艺流程	104
4.3 典型压力容器的制作	136
第5章 箱型结构的焊接工艺设计与制作	138
5.1 箱型结构简介	138
5.2 箱型结构的生产制造工艺流程	139
5.3 箱型结构的焊接工艺编制	140
5.4 典型箱型结构的制作	142
参考文献	147

绪 论

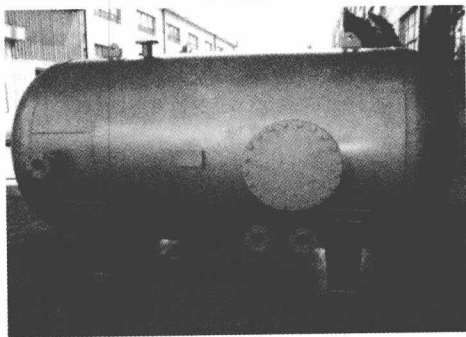
在现代工业领域,各种先进的制造技术发挥着越来越重要的作用,焊接技术就是其中之一。采用焊接技术制造的各种工业产品,在机器制造、汽车、轨道交通、桥梁、建筑、石油化工、能源开采、电子信息等领域的应用越来越广泛。按照结构形式和作用的不同,焊接结构大体可以分为梁型结构、桁架结构、壳型结构、箱型结构等。图 0.1 是几种典型焊接结构样式。



(a) 梁



(b) 桁架



(c) 壳型结构



(d) 箱型结构

图 0.1 几种典型的焊接结构

图 0.1(a) 所示的梁结构截面形式有工字型、矩形、箱型等样式,在服役中承受横向弯曲、纵向压缩等载荷,在起重机械、厂房、建筑钢结构等产品中应用广泛。图 0.1(b) 所示的桁架有三角形、梯形、多边形、平行弦形及空腹形等结构样式,在服役中由各个杆件联合承受轴向压缩、横向弯曲等载荷,广泛应用于桥梁、厂房、大跨度建筑物等产品中。梁结构、横加结构材料多选用优质低碳钢、低合金钢。图 0.1(c) 所示的壳型结构有圆筒形、球形等结构样式,服役时承受内部或外部的介质压力及其化学作用,广泛用于锅炉、管道、石化容器等产品中。压力容器材料主要有优质低合金钢、不锈钢、耐热钢等。图 0.1(d) 所示的箱型结构主要是各种尺寸的立方体空心结构,服役时主要承受来自内、外的静压力,

主要用于各种类型的车辆车厢。箱型结构材料主要有低碳钢、铝合金等。

随着制造业的发展和技术的进步,焊接技术早已摆脱了方法单一、技术含量低、用途有限的局面,先进的焊接技术、焊接材料、焊接控制手段不断涌现。焊接技术正向着自动化、多样化、高效率、可靠性方向发展。

在工程应用中,焊接结构设计、焊接热过程与力学过程的预见与评估需要依靠复杂而精准的理论基础,而焊接制造工艺、焊接缺欠的预防与消除、焊接质量的评定则主要依靠行业积累的经验。可以说焊接制造技术是一门既有丰富理论支持又需要丰富实践经验的应用技术。这就要求从事焊接技术工作的工程技术人员在掌握必要的科学理论的基础上,同时具备必要的工程实践能力,特别是具备编制焊接工艺、评定焊接结构可靠性方面的能力。在工程实际中,焊接工程师的任务主要有设计焊接结构,编制焊接制造工艺,制定焊接工艺评定方案,监督、指导焊接生产过程,检验焊接质量,培训焊接操作人员。这里说的焊接结构是指以焊接的形式形成的结构,在重型机械、建筑、桥梁、船舶、飞机、冶金动力设备、容器、管道、车辆等工业产品中发挥不同的功能。

作为焊接专业的在校学生需要接受焊接新技术及全过程方面的训练,并初步具备这方面的能力,达到焊接工程师的基本要求。焊接工程实践就是模拟生产实际,通过进行焊接结构设计、焊接工艺编制、制作结构实物模型、评定焊接质量等培养焊接工程实践能力。在训练内容方面,以选择工业生产中典型的焊接结构为研究对象,遵照国家和行业标准,参考各类文献资料,设计焊接结构、编制焊接工艺、制作实物模型,使之得到全面、系统、有针对性的实战训练。

第1章 焊接结构及其制造规程

1.1 焊接结构设计

1.1.1 结构设计概述

1. 焊接结构设计的基本要求

焊接结构设计要满足结构的实用性、可靠性、工艺性和经济性四个方面的要求。

(1) 实用性

实用性是指设计要达到产品的使用功能和预期效果。

(2) 可靠性

可靠性是指结构在使用中必须安全可靠,亦即结构受力要合理,满足强度、刚度、稳定性、耐蚀性等方面的要求。

(3) 工艺性

结构应该是适合焊接施工的结构,其中包括焊前热处理、焊后处理、所选用的金属材料具有良好的焊接性、具有焊接与检验的可达性等。此外,结构应易于实现机械化和自动化焊接。

(4) 经济性

制造结构时,所消耗的原材料、能源及工时比较少,综合成本低。

2. 焊接结构设计的基本原则

为达到上述的基本要求,设计时要把握如下设计原则。

(1) 合理选用和利用材料

所选用的材料必须同时满足使用性能和工艺性能的要求。使用性能包括强度、韧性、耐磨性、耐蚀性、抗蠕变性能等。工艺性能包括冷加工工艺性能和热加工工艺性能,其中的冷加工工艺性能包括冷成形性能、切削工艺性能,热加工工艺性能包括焊接性、热处理工艺性等。

在结构有特殊性能要求的部位可以选用特种材料或特殊工艺方法,比如在有耐蚀性要求的部位选用不锈钢耐蚀钢与碳钢进行异种钢焊接,或在碳钢表面堆焊不锈钢等。

尽可能选用轧制的型材,这样既容易采购又节省备料、下料的工时。

(2) 合理设计结构形式

能够满足前述要求的结构形式视为合理的结构形式。设计时要注意以下几点:

①根据强度、刚度要求,以最理想的受力状态设计结构的形状和尺寸。

②既要重视整体设计,也要重视细部设计。因为焊接是刚性连接,结构的整体性意味

着任何细部都同等重要,尤其对应力集中部位要特别注意。

③要有利于实现自动化焊接,结构设计时则要尽量设计成平直、简单的形状,减少长度短、不规则的焊缝,避免采用难以成形的具有复杂空间曲面的结构。

(3)减少焊接工作量

除了尽可能选用轧制型材外,还应在结构允许的情况下选用冲压件、铸件、锻件等作为结构的零部件,以尽可能减少焊缝长度,减少焊接工作量。对于角焊缝,在满足强度需求的前提下,尽量减小焊脚高度;对于坡口焊缝,尽量设计成填充金属少的坡口形式。

(4)焊缝布置合理

对有对称轴的结构,焊缝要对称布置,这样有利于控制变形,避免焊缝的交汇;对不可避免的焊缝交汇处,要使重要焊缝连续,次要焊缝间断;要尽可能使焊缝避开高应力部位、应力集中处、机械加工面等处。

(5)方便焊接施工

必须使每条焊缝便于施焊和质量检验。焊缝周围要留有足够的焊接和质量检验的空间。尽量使焊缝都在工厂内进行,减少工地施焊工作量。尽量提高自动焊工作量,减少手工焊工作量。尽量采用平焊位置焊接,减少立焊、仰焊焊缝。

(6)有利于生产组织与管理

生产实践中,大型焊接结构采用分部组装焊接的生产方式有利于减小和控制变形,也利于生产实现流水作业,简化工艺装备。因此在设计时要进行合理分段,分段时综合考虑起重运输条件、变形控制、焊后处理、切削加工、质量检验、总装等因素。

3. 焊接结构设计的一般程序

焊接结构设计的主要内容是根据设计任务书对设计对象进行结构设计与计算、必要的试验、绘制图样、编制设计文件等。而大型复杂的结构设计要经历初步设计、技术设计、工作图设计三个主要步骤。

(1)初步设计

初步设计又称方案设计。其核心任务是通过产品功能分析确定总体方案,提出技术任务书和产品草图。具体工作有:

①确定产品的技术参数和主要性能指标;

②确定总体布局及主要零部件的结构;

③确定各零部件的连接关系;

④对使用的新材料、新结构、新工艺提出试验验证方案。

(2)技术设计

技术设计的目的是将初步设计确定的方案具体化。通过设计和计算进一步确定具体构造、形状尺寸和所需材料。具体工作有:

①对关键零部件的结构、功能和可靠性进行校验,为设计提供依据;

②对重要零部件的强度、刚度和可靠性进行计算;

③进行技术经济分析,撰写分析报告;

④修正设计方案,绘制总装图。

(3) 工作图设计

工作图设计又称施工图设计,目的是完成全部生产用的图纸设计。主要工作有:

- ①从总装配图中拆分出部件图和零件图,在图纸上标注技术条件;
- ②编写设计说明书等一系列设计文件。

1.1.2 焊接结构设计要点

焊接结构设计的理论基础是工程力学,如材料力学、结构力学、弹性或弹塑性力学和断裂力学等。设计的任务是运用这些基础理论结合焊接结构和工艺的特点,解决结构设计中的选材、选型和连接等技术问题。

1. 材料的选择

焊接的材料包括母材和焊材。选择母材的基本原则应当是根据产品设计要求,综合考虑材料的使用性能、工艺性能和经济性,使所选材料来源容易,能达到结构质量轻、易于制造和服役期内安全可靠等要求。

母材选择时应注意如下原则。

(1) 考虑材料的使用性能

要紧密结合材料工作的载荷条件和环境条件考虑材料的使用性能。

① 考虑载荷条件

对于承受静载荷的结构,以满足强度要求来选材;对于承受交变载荷的结构,则要区分两种情况,一种情况是承受高应力低周循环的交变载荷,在保证强度的条件下,着重考虑材料的塑性和韧性;另一种情况是承受低应力高周循环的交变载荷,对材料的疲劳强度要求较高,应选择强度较高的材料。

按照刚度要求设计的结构,其工作应力一般比较小,但材料壁厚较厚,应选择塑性、韧性好的一般强度材料。

对于使用板材焊接的结构,如果材料厚度方向上承受拉应力,则应选择杂质元素含量低、塑韧性好的材料,以防出现层状撕裂。

② 考虑环境条件

环境条件主要有结构工作的环境温度、介质和辐照条件。

环境温度会引起材料组织和性能的变化,因此,高温下工作的焊接结构要选用有足够的高温强度、抗氧化性能和组织稳定性的材料;对高温刚度要求严格的结构应选用蠕变强度高的材料,对高温强度要求高的结构,应选用持久强度高的材料,而对于工作在 $-20^{\circ}\text{C} \sim -296^{\circ}\text{C}$ 的结构,应选用具有高的低温韧性和低温延展性的材料。

焊接结构的工作介质种类多样,对材料和结构的影响也较为复杂。介质的状态有气态、液态、固态。气态介质有大气、水蒸气、海洋湿气、天然气、氨气、氧气、氮气、氯气等,液态介质有海水、酸、碱、各种化学试剂等,固态介质有硫化物、溴化物、氟化物等。这些介质有时单独作用,有时会与温度、应力共同作用于焊接结构,造成均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀、气蚀等,这些腐蚀会降低结构的使用寿命,甚至会导致低应力脆断等极端破坏后果。因此,在结构选材时,必须综合考虑介质、温度、应力状态,有针对性地选择合适的材料。工程实际中,为了节约贵重的耐蚀材料,可以设计选择复合材料或者进行

表层堆焊等方法应对腐蚀环境。

(2) 考虑材料的工艺性能

所选材料必须容易加工,且不因加工而改变其使用性能。焊接结构用到的材料需要具有良好的焊接性、冷加工工艺性及热处理工艺性。

① 材料的焊接性

材料的焊接性包含工艺焊接性和使用焊接性。前者要求所选材料必须能焊,焊时不易产生焊接缺陷,尤其不能产生焊接裂纹。后者要求所选材料焊后其焊接接头或整个焊接结构能满足使用性能,如强度、韧性、耐疲劳、耐蚀或耐磨等的要求。因此,对焊后不再热处理的结构,应选择那些在焊接热的作用下,其焊缝金属和热影响区不会引起不利于使用性能变化的金属材料。

② 热处理工艺性

焊接结构制造过程中,若需要进行消除应力热处理或最终恢复性能的热处理时,则需注意热处理过程中的加热温度、保温时间、升温速度和冷却速度等工艺参数对材料性能的影响。焊后需热处理的金属结构要选用具有较低回火脆性倾向和较低再热裂敏感性的金属材料。

③ 其他冷、热加工工艺性

在焊前的备料过程中常对母材进行如矫平、调直、剪切、冲孔、铣、刨等冷机械加工,冷或热的冲压与弯曲成形以及热切割加工等。选材时一定要注意材料对这些冷、热加工的适应性。

(3) 考虑经济性

在满足结构工作性能和工艺性能的前提下,尽量选用来源容易,价格便宜的金属材料。但要注意,强度等级较低的钢材,其价格一般都较低,其焊接性能也较好,可是在重载情况下,会导致结构尺寸加大,耗材增多,其综合成本未必下降。而且大尺寸的结构,其工艺性和抗脆断性变差。而强度等级较高的钢材,虽然价格较高,焊接难度较大,但可省材料,减小产品尺寸和质量,其综合成本未必增高。

焊材选择时要注意如下原则:

① 焊条的选择

选用焊条的基本原则是在确保焊接结构安全使用的前提下,尽量选用工艺性能好和生产效率高的焊条。

确保焊接结构安全使用是选择焊条首先考虑的因素。根据被焊构件的结构特点、母材性质和工作条件(如承载性质、工作温度、接触介质等)对焊缝金属提出安全使用的各项要求。所选焊条都应使之满足。必要时通过焊接性试验来选定。

在现实生产中,同种钢焊接和异种钢焊接应依据不同的原则选择焊条。表 1.1 和表 1.2 分别列举了这两种条件下选择焊条的基本要点。

② 焊丝和焊剂的选择

a. 埋弧焊用焊丝与焊剂

埋弧焊焊丝的选择必须与焊剂合理搭配,以适应不同类型的母材。

(a) 合金钢焊丝与焊剂

低锰焊丝如 H08A 配高锰焊剂,焊接普通低碳钢和强度较低的低合金钢;中锰焊丝如

H08MnA 配中锰焊剂,焊接低碳钢、低合金钢;高锰焊丝如 H08Mn2SiA 配低锰焊剂,焊接低合金钢。

表 1.1 同种钢焊接时焊条选择要点

选择依据	选 择 要 点
力学性能和化学成分要求	①对于碳素结构钢,依据等强度原则,即熔覆金属抗拉强度等于或略高于母材; ②对于合金结构钢,要求焊缝熔覆金属力学性能与母材匹配,同时要求其化学成分与母材接近; ③在结构刚度大、接头应力高、焊缝易产生裂纹的条件下,应考虑选用强度比母材低一级的焊条; ④当母材金属中硫、磷等杂质元素含量较高时,应选用抗裂性能好的焊条。
焊件的使用性能和工作条件要求	①对承受载荷和冲击载荷的结构,除满足强度要求外,主要满足焊缝金属有较高的冲击韧性和塑性,可选用塑、韧性好的低氢型焊条; ②工作于腐蚀环境的结构,应根据母材性质选择相应的不锈钢焊条; ③工作于高温或低温环境的结构,应选择合适的耐热钢焊条或低温钢焊条。
焊件的结构特点和受力状况	①对于结构复杂、刚度大和厚板焊接结构,焊接过程中会产生较大的应力,容易产生各种裂纹,应选择抗裂性能好的低氢型焊条; ②对于焊接部位难以清理干净的结构,应选用氧化性强,对铁锈、氧化皮、油污不敏感的酸性焊条; ③对于受条件限制无法翻转的结构,有些焊缝处于非平焊位置,需要选择适合全位置焊接的焊条。
施工条件及设备条件	①在没有直流电源,而焊接接头又需要采用低氢型焊条时,应选用交直流两用的低氢型焊条; ②在狭小的通风条件差的环境施焊,选择酸性焊条或低毒低尘焊条。
工艺性能	在满足结构使用性能的前提下,尽量选用工艺性能好的酸性焊条。

表 1.2 异种钢焊接时焊条选择原则

异种金属	选 择 要 点
强度级别不同的碳钢、低合金钢	①熔覆金属抗拉强度不低于母材中强度较低的一种钢,而其塑韧性不低于母材中强度较高的一种钢; ②为防止裂纹等缺欠的产生,应按照焊接性差的一种钢来选择焊接工艺参数,包括焊前预热、焊后缓冷和焊后热处理。
低合金钢与不锈钢	以焊条化学成分为主要依据选择与不锈钢成分接近的焊条,且要考虑熔覆金属的塑性、抗裂性。

(b)低合金高强钢焊丝与焊剂

埋弧焊主要用于热轧正火钢的焊接,选用焊丝和焊剂时应保证焊缝金属的力学性能。因此一般选用与母材强度级别相当的焊接材料,并综合考虑焊缝金属的韧性、塑性和抗裂性能。

通常 590 MPa 级的焊缝金属多采用 Mn-Mo 系焊丝,如 H08MnMoA、H08Mn2MoA、

H10Mn2Mo 等;690 ~ 780 MPa 级的焊缝金属多用 Mn-Cr-Mo 系,或 Mn-Ni-Mo 系,或 Mn-Ni-Cr-Mo 系焊丝;当对焊缝韧性要求较高时,可采用含 Ni 的焊丝,如 H08CrNi2MoA 等,与之相配合的焊剂,焊接 690 MPa 以下钢种可采用熔炼焊剂或烧结焊剂;焊接 780 MPa 的高强钢,宜采用获得高韧性的焊剂,最好是烧结焊剂。

(c) 不锈钢焊丝与焊剂

对于焊接性较好的不锈钢(如铬-镍不锈钢)和焊接性虽不很好,但焊接时可以预热或焊后热处理的不锈钢(如铬不锈钢)焊件,一般都采用同质焊缝,即选用与母材化学成分基本一致的焊丝,如铬不锈钢可选用 H0Cr14、H1Cr13、H1Cr17 等焊丝;铬-镍不锈钢可选用 H0Cr19Ni9、H0Cr19Ni9Ti 等焊丝;焊接超低碳不锈钢时也相应采用超低碳的焊丝,如 H00Cr19Ni9 等。焊接性能较差又无法预热和焊后热处理的不锈钢焊件,一般采用异质焊缝。选用含铬、镍量都较高的奥氏体钢焊丝,如 H0Cr24Ni13、H1Cr26Ni21 等。与之配合的焊剂,无论是熔炼型还是烧结型,都要求焊剂的氧化性小,以减小合金元素的烧损。

b. 气体保护焊用焊丝

选择气保焊焊丝要注意与保护气配合。

(a) TIG 焊焊丝

纯氩气保护下,焊缝金属成分基本不发生变化,对焊缝金属无特殊要求时,选择同种成分的焊丝。

(b) MAG 和 MIG 焊丝

这两种焊法原则上都选择与母材成分一致的焊丝,MAG 焊时宜选用含硅、锰等脱氧元素的焊丝。

(c) 二氧化碳焊焊丝

二氧化碳是活性气体,具有较强的氧化性,因此,二氧化碳焊所用焊丝必须含有较高的 Mn、Si 等脱氧元素,通常是 C-Mn-Si 系焊丝,如 H08MnSiA、H08Mn2SiA、H04Mn2SiTiA 等。主要用于焊接碳钢和低合金结构钢。

2. 结构形状的选定

当结构材料选定之后,解决结构的强度、刚度和稳定等问题将取决于结构的几何形状和尺寸。在静载条件下,决定构件强度和刚度的因素,一是构件的材料性能,如抗拉强度或屈服点,抗弯和抗剪弹性模量;二是构件的截面性能,如由构件的工作截面形状和尺寸所形成的截面积、惯性矩和截面模量等。在材料已选定情况下,提高构件强度和刚度的措施就是正确地设计结构工作截面的几何形状和尺寸,以获得最佳的截面性能。

(1) 提高刚度的结构设计

刚度是指在恒定载荷或交变载荷作用下结构(材料)抵抗变形的能力,前者称静刚度,后者称动刚度。大型切削机床、锻压机床等机器设备要求的工作精度很高,对其承载结构刚度的要求比强度要求更严格,因此,这些构件通常是按照刚度要求设计的。通常所说的刚度设计是指按照静刚度设计。

广义的静刚度定义为

$$\text{静刚度} = \frac{\text{静载荷}}{\text{载荷方向的位移}} \quad (1.1)$$

在不同形式载荷作用下,静刚度有着不同的表达式,见表 1.3。

表 1.3 不同载荷条件下静刚度计算表达式

载荷类型	表达式	说 明
拉伸或 压缩	变形 $\Delta l = \frac{pl}{EF}$	Δl —长度方向变形量,mm; l —原始长度,mm; p —载荷,N; E —弹性模量,N/mm ² ; F —横截面积,mm ²
	静刚度 $K = \frac{p}{\Delta l} = \frac{EF}{l}$	K —受拉或受压时的静刚度
弯曲	变形 $f = \frac{pl^3}{CEI}$	f —纵向挠曲,mm; C —常数; I —惯性矩,mm ⁴
	静刚度 $K_B = \frac{p}{f} = \frac{CEI}{l^3}$	K_B —受弯时的静刚度
扭转	变形 $\varphi = \frac{M_t l}{GI_t}$	M_t —扭矩,N·mm; G —常数
	静刚度 $K_t = \frac{M_t}{\varphi} = \frac{GI_t}{l}$	K_t —受扭转时的静刚度

从表中可以看出,构件的静刚度与所用材料的弹性模量(E 或 G)和它的截面特性值(F 、 I 或 I_t)的乘积成正比,而与材料的强度无关。因此结构设计时应选用弹性模量高的钢材而不是强度高的钢材。实际上各种钢材的弹性模量相差不大,所以设计时主要是确定结构的截面形状和尺寸。尽可能用最少的材料达到最大的截面性能。

① 抗弯截面形状的设计

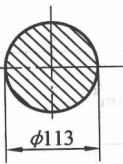
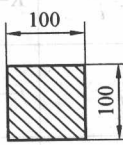
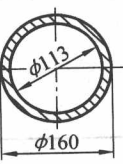
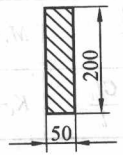
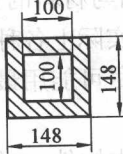
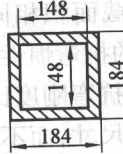
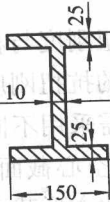
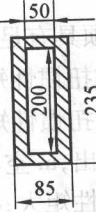
梁是焊接结构中的最基本构件,工作时主要承受弯曲载荷。梁的抗弯刚度与材料的弹性模量 E 和截面抗弯惯性矩 I 的乘积成正比。材料选定后,梁的抗弯刚度主要决定于截面抗弯惯性矩 I 的大小。在截面积相同的情况下可以设计出不同截面形状的梁,见表 1.4。从表中看出,空心截面的抗弯惯性矩比实心的大;方形截面的抗弯刚度比圆形的大;外形尺寸大而壁薄的截面,其抗弯刚度比外形尺寸小而壁厚的大。所以提高构件的抗弯刚度,首先应加大截面的轮廓尺寸,而不是壁厚,其次是尽可能把结构材料配置在远离中性轴处。工字梁和箱形梁的设计就是典型的例子。

② 抗扭截面形状的设计

承受扭转载荷的构件,必须具有足够的抗扭刚度。构件工作截面的抗扭刚度与材料的剪切弹性模量 G 和截面的抗扭惯性矩 I_t 乘积成正比。材料选定后,构件的抗扭刚度决定于抗扭惯性矩 I_t 的大小。抗扭惯性矩的计算比较复杂,不同的截面形状需采用不同的计算公式。从表 1.4 中可以看出,a. 空心截面比实心截面抗扭惯性矩大;b. 空心截面中,封闭截面比不封闭截面抗扭惯性矩大;c. 空心封闭的各种截面中,圆形截面比方形截面抗扭惯性矩大;d. 空心封闭矩形截面具有抗弯和抗扭惯性矩均较高的特点。因此,受扭转力矩的工件的截面形状应尽可能选择空心结构,且优先选择圆形截面,其次选择矩形截面。如果选择了矩形截面,这种结构在扭矩作用下在断面的四个拐角处可能发生变形——截

面畸变,为防止这种变形,需要在内侧合理设置筋板。

表 1.4 各种截面形状结构惯性矩比较 (截面积约为 10^4 mm^2)

序号	截面形状	抗弯惯性矩 $I_B / 10^4 \text{ mm}^4$	抗弯惯性矩相对值	抗扭惯性矩 $I_t / 10^4 \text{ mm}^4$	抗扭惯性矩相对值	序号	截面形状	抗弯惯性矩 $I_B / 10^4 \text{ mm}^4$	抗弯惯性矩相对值	抗扭惯性矩 $I_t / 10^4 \text{ mm}^4$	抗扭惯性矩相对值
1		800	1	1 600	1	6		834	1.04	1 400	0.88
2		2 420	3.03	4 833	3.02	7		3 333	4.17	703	0.44
3		4 030	5.04	8 074	5.05	8		3 164.9	3.96	4 576	2.86
4		—	—	108	0.07	9		5 554	6.94	8 234	5.15
5		15 520	19.4	143	0.09	10		5 860	7.32	2 647	1.65

③ 筋板的设计

本书为了叙述方便,把筋板、肋板、隔板等统称筋板。筋板之所以能提高结构的整体或局部刚度,在于它能把作用在结构上的局部载荷传递给其他构件,使它们能均衡地承载;也能把垂直于板壁的弯曲变形转化为筋板平面内的拉伸、压缩或弯曲变形,而这类变形的数值很小,因而可使主体壁板减薄;利用筋板可以把壁板的幅值从大的分隔成小的,因而能提高其抗屈曲性能;横向筋板可以连接箱型构件的四壁作为一个整体起作用,当扭转时,可以减少截面畸变。

筋板的作用效果主要不是依靠它的数量多少,而在于正确的配置。筋板能否发挥作用,要看它的受力方向,如果所设置的筋板受到垂直于板面方向的力或与板面成一定角度的力,则筋板发挥的作用极小。如图 1.1(a) 所示的力系作用在筋板的平面内,引起的是平面弯曲,恰好是筋板抗弯惯性矩 I 最大的方向,其抗弯能力最强,结果引起的弯曲变形很小,对提高结构刚度是有利的;图 1.1(b) 所示的筋板受到垂直于板平面的四个力作用,且构成扭矩,而该筋板的截面为开式截面,抗扭惯性矩 I_t 很低,因而引起很大的扭转变形,起不到提高刚度的作用。

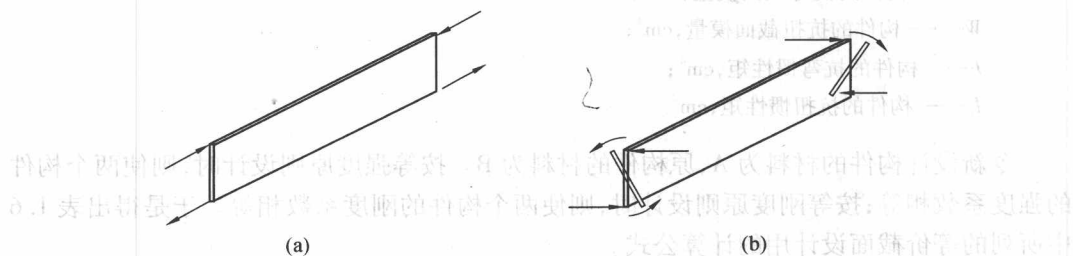


图 1.1 筋板受力分析

(2) 等价截面的结构设计

原有的机器零部件因变换材料而需要重新设计时,常用等价截面设计法。它是使新设计的构件截面具有与原构件截面相同强度或刚度的一种设计方法。当要求强度相同时,按等强度原则进行设计;要求刚度相同时,按等刚度原则进行设计。

采用等价截面设计法必须知道原构件所用材料及其性能,以及原构件工作截面的形状与尺寸。至于原构件承载性质及其大小知道与否并不重要,但原构件必须是一直安全可靠地使用着,并已经证明原构件具有足够的承载能力。

一个构件的强度可以用它的强度系数来表达,强度系数等于反映材料性能的许用应力和截面特性值的乘积;一个构件的刚度可以用它的刚度系数来表达,刚度系数等于反映材料性能的弹性模量和截面特性值的乘积。对于承受不同载荷类型的构件,其强度系数和刚度系数的表达式见表 1.5。

表 1.5 强度系数与刚度系数表达式

载荷类型	强度系数		刚度系数	
	材料性能	截面性能	材料性能	截面性能
拉伸或压缩	$[\sigma_1] \times F$		$E \times F$	
	$[\sigma_y] \times F$			
剪 切	$[\tau] \times F$		$G \times F$	
弯 曲	$[\sigma_1] \times W$		$E \times I$	
	$[\sigma_y] \times W$			
扭 转	$[\tau] \times W_t$		$G \times I_t$	

注: $[\sigma_1]$ 、 $[\sigma_y]$ 和 $[\tau]$ ——分别为材料的拉伸、压缩和剪切许用应力, 10^4 Pa ;

E ——材料的拉伸弹性模量, 10^4 Pa ;

G ——材料的剪切弹性模量, 10^4 Pa ;

F ——构件的截面积, cm^2 ;

W ——构件的抗弯截面模量, cm^3 ;

W_t ——构件的抗扭截面模量, cm^3 ;

I ——构件的抗弯惯性矩, cm^4 ;

I_t ——构件的抗扭惯性矩, cm^4 。

令新设计构件的材料为 A, 原构件的材料为 B。按等强度原则设计时, 则使两个构件的强度系数相等; 按等刚度原则设计时, 则使两个构件的刚度系数相等。于是得出表 1.6 中所列的等价截面设计用的计算公式。

表 1.6 等价截面设计计算公式

载荷类型	等强度设计	等刚度设计	
拉伸	$F_A = \frac{[\sigma_1]_B}{[\sigma_1]_A} F_B$	$F_A = \frac{E_B}{E_A} F_B$	
压缩	$F_A = \frac{[\sigma_y]_B}{[\sigma_y]_A} F_B$	短柱	$F_A = \frac{E_B}{E_A} F_B$
		长柱	$I_A = \frac{E_B}{E_A} I_B$
弯曲	$W_A = \frac{[\sigma_1]_B}{[\sigma_1]_A} W_B$	$I_A = \frac{E_B}{E_A} I_B$	
扭转	$W_{tA} = \frac{[\tau]_B}{[\tau]_A} W_{tB}$	$I_{tA} = \frac{G_B}{G_A} I_{tB}$	

注: 表中的 A、B 分别表示两种不同的材料。

等价截面设计的大体步骤是:

① 通过结构分析, 确定设计对象承受载荷的类型, 明确设计原则 (按照等强度原则或是等刚度原则);