

普通高等院校土建类应用型人才培养系列规划教材

钢管结构

主编 / 杨俊芬 田黎敏

主审 / 郝际平

Gangguan
Jiegou

非
外
借

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

钢管结构

主 编 杨俊芬 田黎敏

主 审 郝际平

内 容 提 要

本书共9章,分别是绪论、材料与成型、基本构件计算、连接与节点计算、管桁架结构、网架结构、网壳结构、输电线路钢管塔、钢管变电构架。

本书可作为土木工程、工程力学等专业研究生和本科生的教材,也可作为土建设计人员、建筑学专业人员等的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

钢管结构 / 杨俊芬, 田黎敏主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5682-3288-3

I. ①钢… II. ①杨… ②田… III. ①钢管结构 IV. ①TU392.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第258819号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 19

字 数 / 460千字

版 次 / 2016年10月第1版 2016年10月第1次印刷

定 价 / 49.00元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

钢管结构是随着近代钢管生产技术的成熟而逐渐发展起来的。首先是钢管生产工艺的发展,其次是焊接工艺的发展。随着钢管生产加工技术的不断发展,钢管结构在国内外得到了迅猛发展,在现代工业厂房、仓库、体育馆、展览馆、会场、航站楼、车站、办公楼、海洋平台、桥梁、变电构架等建筑物及构筑物中得到广泛应用。

钢管结构现在已发展成为一种独立的结构体系,对于它的研究也越来越广泛,但目前有关钢管结构的研究主要散见于各类期刊,暂未见钢管结构方面系统编撰的书籍。钢管结构从加工到安装,从连接到计算,从设计到施工都有别于普通钢结构中常用的如H形截面、箱形截面所组成的结构,因此,为使学生和工程技术人员更多地了解钢管结构的相关知识,特编写本书。

本书共9章,第1章介绍钢管结构的优点、发展历史及应用范围;第2章介绍钢管的成型方式、残余应力分布及钢管的选用;第3章介绍钢管构件设计原则和各类钢管构件的计算方法;第4章介绍钢管结构中常用连接和节点的计算与构造;第5章介绍管桁架结构的设计;第6章介绍网架结构的设计;第7章介绍网壳结构的设计;第8章介绍输电线路钢管塔的设计;第9章介绍钢管变电构架的设计。

本书由西安建筑科技大学钢结构教研室杨俊芬副教授和田黎敏副教授主编,杨俊芬负责第1、2、3、4、8、9章的编写工作,田黎敏负责第5、6、7章的编写工作。郝际平教授审定全书。

由于钢管结构涉及面广且在不断发展中,本书难免有所疏漏及偏颇,欢迎大家批评指正。

编者

目 录

1	绪 论	1
1.1	钢管结构的优点	1
1.2	钢管结构的发展历史	2
1.3	钢管结构的应用范围	2
2	材料与成型	4
2.1	材 料	4
2.2	钢管成型	5
2.3	残余应力	10
2.4	建筑结构用钢管的选用	12
3	基本构件计算	14
3.1	设计原则	14
3.2	轴心受拉构件	15
3.3	轴心受压构件	15
3.4	受弯构件	18
3.5	拉弯构件	22
3.6	压弯构件	22
4	连接与节点计算	27
4.1	节点分类	27
4.2	相贯节点	28

4.3	法兰节点	44
4.4	螺栓球节点	50
4.5	焊接空心球节点	56
4.6	插板节点	59
4.7	其他节点	63
4.8	典型节点设计实例	65

5 管桁架结构 72

5.1	管桁架结构简介	72
5.2	管桁架结构的计算方法	75
5.3	管桁架结构的杆件设计	78
5.4	管桁架结构的节点设计	79
5.5	管桁架结构的加工与制作	84
5.6	圆管截面平面桁架设计实例	100
5.7	空间桁架设计实例	108

6 网架结构 111

6.1	网架结构的形式和分类	111
6.2	网架结构的荷载和作用	117
6.3	网架结构主要几何尺寸的确定和选型	120
6.4	网架结构的计算方法	125
6.5	网架结构的杆件设计	130
6.6	网架结构的节点设计	133

7 网壳结构 141

7.1	网壳结构的分类和形式	141
7.2	网壳结构的荷载	153
7.3	网壳结构的稳定性问题	156
7.4	网壳结构的计算方法	159
7.5	网壳结构的杆件与节点设计	160

8 输电线路钢管塔 163

8.1 钢管塔的形式和分类	163
8.2 钢管塔的荷载	165
8.3 钢管塔的塔型选择	181
8.4 钢管塔的计算方法	188
8.5 钢管塔的杆件设计	189
8.6 钢管塔的节点设计	193
8.7 钢管塔的加工、制作与防腐	220
8.8 钢管塔设计实例	232

9 钢管变电构架 239

9.1 变电构架的形式与分类	239
9.2 变电构架的荷载与作用	244
9.3 变电构架的计算方法	251
9.4 变电构架的杆件设计	263
9.5 变电构架的节点设计	275
9.6 变电构架设计实例	280

参考文献 292



1 绪 论

1.1

钢管结构的优点

凡是两端开口并具有中空断面，且其长度与断面周长之比较大的钢材，都可以称为钢管。

钢管是一种经济钢材，是钢铁工业中的一项重要产品，通常占全部钢材总量的 10% 左右，它在国民经济中的应用范围极为广泛。钢管由于具有空心断面，因而适合作流体的输送管道；同时与相同重量的圆钢比较，钢管的断面系数大、抗弯抗扭强度大，因而成为各种机械和建筑结构上的重要材料，尤其在石油钻采、冶炼和输送方面需用较多，其次在地质钻探、化工、建筑业、机械工业、飞机和汽车制造以及锅炉、医疗器械、家具和自行车等方面，也需要大量的各种钢管。近年来，随着原子能、火箭、导弹和航天工业等新技术的发展，钢管在国防工业、科学技术和经济建设中的地位更加重要，有着“工业血管”之称。就用途来说，管道用管居多，结构次之。

钢管结构具有以下优点：

首先，从受力方面来看，钢管结构的优点是圆管和方管的对称截面形式使截面惯性矩对各轴相同，有利于单一杆件的稳定性设计；截面的闭合提高了抗扭强度；对板件局部稳定性而言，闭合截面也优于有悬挑板件的开口截面。以上这些无疑都是结构工程师所欢迎的。

其次，从建筑效果来看，钢管结构外观简洁，在一般情况下，合理地使用管截面会得到一个整洁和宽敞的结构。管截面能够提供细长而美观的柱子，具有不同的截面特性和平滑的外形。

最后，从经济方面来看，就材料单价而言，虽然钢管价格高于普通开口截面型钢，但钢管外表面积相对同样承载性能的开口截面钢构件往往较小，这就减少了防腐防火涂层的材料消耗和涂装工作量，加上钢管加工的便利性，其能够为制造商和业主带来明显的经济效益。

1.2

钢管结构的发展历史

很早之前人们就认识到了管形状的优越特点，古代有很多应用管状构件的例子。桥梁设计的一个杰出例子是建成于 1890 年、跨度为 521 m 的苏格兰 Firth of Forth 大桥，如图 1-1 所示。此桥是由轧制板经铆接制作的圆管构件组装而成的，因为当时还未出现用于这类尺寸的其他制作方式。



图 1-1 Firth of Forth 大桥

最早的无缝和焊接圆管截面的生产方法是在 19 世纪发展起来的。1886 年，Mannesmann 兄弟创造了斜辊道穿孔生产工艺，实现了厚壁短钢管的轧制；这一生产线连同数年后发展起来的皮尔格无缝轧制

工艺实现了薄壁无缝长管的加工。20 世纪初，英国人 Whitehouse 发明了圆管截面的火焊；然而直到 1930 年，美国人 Fretz Moon 使连续焊接工艺得到发展后，焊接圆管截面的生产才开始实用化。第二次世界大战以后，焊接工艺日益完善，管截面能够较容易地被焊接在一起。

把两个圆管截面装配起来所必需的端面切割工艺由于 Mueller 发明的特制切割设备而得到了简化。对于没有端面切割设备的制作厂，圆管截面的端面制作仍很困难。避免连接问题的一个方法是采用预制连接件。1937 年，Mengeringhausen 发明了米罗系统，这一系统实现了大跨度结构的工业化预制和拼装；1952 年，Stewarts 和 Lloyds 发展了矩形管截面，该截面具有与圆管几乎相同的特性，但其连接的制作只需进行平直的端面切割；20 世纪 50 年代，钢管的制作、端面切割以及焊接的问题均已得到解决，这意味着管结构的应用之门已经成功开启，有待解决的问题是未加劲管节点的强度确定。

第一个关于圆管截面桁架节点的初步设计建议是在 1951 年由 Jamm 提出的。其后，日本、美国以及欧洲一些国家对其进行了若干研究，矩形管截面之间的连接始于 20 世纪 60 年代的欧洲，其后有许多其他的试验和理论研究。其中许多是由 CIDET 资助的，除了在静力特性方面的研究外，最近 25 年人们又进行了许多疲劳特性和其他方面的研究，例如钢管混凝土抗火、防腐蚀以及风荷载作用下的性能研究等。

1.3

钢管结构的应用范围

圆钢管结构在我国使用得较早，建于 20 世纪三四十年代的鞍钢无缝钢管厂主厂房，其结构几乎全部采用圆钢管制作。圆钢管多数在局部结构的构件中采用，如屋盖结构中的屋架，支撑和空间网格结构以及柱子和柱间支撑等；其他大直径的圆管有烟囱、管道通廊和工业管道等。在我国，矩形钢管结构之前主要用于冷弯型钢和轻钢结构，现已用于工业与

民用建筑及矩形钢管混凝土结构。近 20 年来，钢管结构在国内外得到了迅猛的发展，在现代工业厂房、仓库、体育馆、展览馆、会场、航站楼、车站及办公楼、宾馆等建筑物中得到了广泛的应用，如图 1-2 所示。我国的钢管混凝土结构目前已用于工业厂房、民用高层建筑、塔桅结构和桥梁等，从某种意义上说，这也是圆钢管结构的一种特殊应用。

钢管结构从结构形式上分为梁式管结构和拱式管结构，从布置形式上可以分为平面管结构和空间管结构。管结构主要采用两种截面形式的钢管、圆管和方矩管。管与管之间通过相贯焊缝连接，因为这种连接不需要附加节点板，可以使结构更加整齐美观。管结构和拉索结合形成的混合结构体系充分发挥了不同材料或构件的优越性，是今后结构发展的一个方向。管桁架在体育馆、航站楼、会展中心等大跨度设施中得到了广泛应用。钢管结构在工程中的应用如图 1-2 所示。

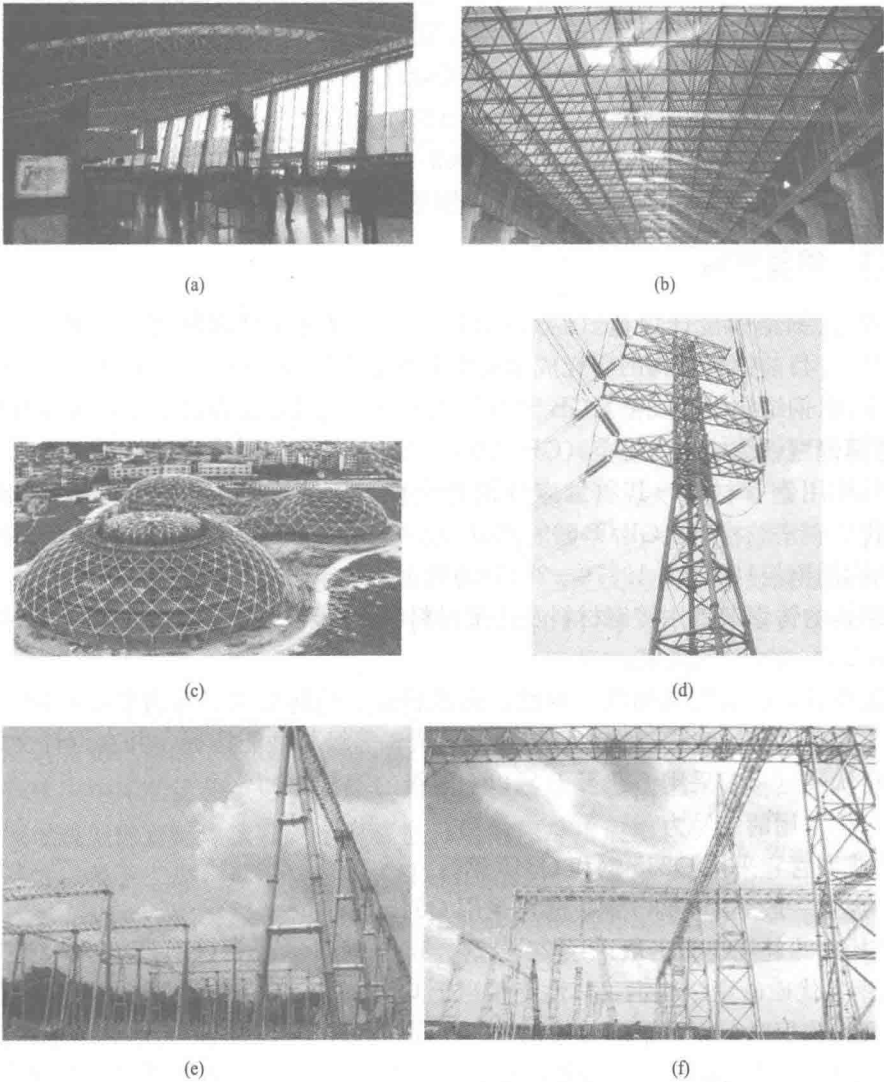


图 1-2 钢管结构在工程中的应用

(a)管桁架结构；(b)网架结构；(c)网壳结构；(d)钢管塔；(e)、(f)变电构架



2 材料与成型

2.1 材 料

2.1.1 钢管材料

我国现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)列出 4 种钢材牌号,即 Q235、Q345、Q390、Q420。目前钢管结构的研究成果基本上都来自屈服强度小于 345 MPa 的钢材。对热轧钢管,采用《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)的钢材强度设计指标;对冷弯成型钢管,采用《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)的钢材强度设计指标。

钢管结构用钢管材料,其质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)、《优质碳素结构钢》(GB/T 699—2015)、《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)和《建筑结构用钢板》(GB/T 19879—2015)的规定。

钢管结构的铸钢节点用铸钢材料及连接材料应符合现行协会标准《铸钢节点应用技术规程》(CECS 235—2008)的规定。

结构用钢管,应根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、应力状态、钢材厚度、成型方法和工作环境等因素合理选取钢材牌号、质量等级与性能指标,并在设计文件中注明。焊接钢管结构的钢材宜采用 B 级及 B 级以上等级的钢材。

承重结构常用的钢号为:

- (1)热成型管宜采用 Q235 钢和 Q345 钢;
- (2)炉焊管一般采用 Q235 钢,亦可采用 Q345 钢;
- (3)结构用热轧无缝管一般采用 20 号钢、35 号钢、45 号钢(GB/T 699—2015)和 Q345 钢。20 号钢是优质碳素结构钢,其性能相当于 Q235 钢,45 号钢性能相当于 Q345 钢。

当有可靠依据时,亦可采用其他钢号。在同一构件中可采用不同钢材牌号的管材。

管材所用的上述钢材牌号,其化学成分(主要指碳、硫、磷含量)及力学性能(屈服强度、抗拉强度、延伸率、冷弯等)均应符合相应的现行国家标准《结构用无缝钢管》(GB/T 8162—2008)的要求。厚度大于 6 mm 的钢管,应符合冲击韧性的要求,当厚度大于 25 mm 时宜采用“厚度方向性能钢板”。

力学试验的试样一般在钢管远离焊缝(或拐角)处切割。对小型管材,亦可以作整个截面的拉伸试验。

2.1.2 焊接材料

焊接材料应符合下列要求:

(1)手工焊接采用的焊条,应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》(GB/T 5117—2012)或《热强钢焊条》(GB/T 5118—2012)的规定。选择的焊条型号应与主体金属强度相适应。对直接承受动态荷载的钢管结构,宜采用低氢型焊条。

(2)自动焊接或半自动焊接采用的焊丝和焊剂,应与主体金属力学性能相适应。焊丝和焊剂应符合现行国家标准《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》(GB/T 5293—1999)和《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》(GB/T 12470—2003)的规定。

(3)气体保护焊焊丝(实心及药芯)和自保护焊药焊丝应分别符合现行国家标准《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》(GB/T 8110—2008)、《碳钢药芯焊丝》(GB/T 10045—2001)及《低合金钢药芯焊丝》(GB/T 17493—2008)的规定。

(4)当两种不同强度的钢材焊接时,宜采用与低强度钢材相适应的焊接材料。

2.2

钢管成型

钢管的种类繁多、用途不同,因此其技术要求各异,生产方法亦有所不同。

根据成型方式,钢管可以分为热成型钢管和冷成型钢管两大类。

其中,热成型钢管可以分为热轧钢管和热完成成型钢管。热轧钢管即热轧无缝钢管,包括在高温下辊轧挤压而成的热挤压管,以及利用已热轧成型的厚壁无缝钢管再次挤压扩张成型的热扩张管,热扩张管在扩张中的速度和温度的不均匀性会导致管壁厚度的不均匀增加。热完成成型钢管是在弯曲成型的大直径直焊缝焊接管的基础上对其进行热处理后得到的,该工艺能消除残余应力并提高塑性能力。

冷成型的管是在常温下通过钢板弯曲压制成管后再通过焊缝焊接而成的。

建筑钢管结构用圆管和矩形管,可采用热轧、热扩无缝钢管,或采用辊压成型、冷弯成型、热完成成型的直缝焊接管,矩形管也可用钢板焊接成型。焊接可采用高频焊、自动焊或半自动焊以及手工焊,焊接材料应与母材匹配。

下面主要介绍热轧钢管和冷成型钢管,并单独介绍冷弯矩形钢管。

2.2.1 热轧钢管

2.2.1.1 热轧无缝钢管的生产工艺

热轧无缝钢管的生产工艺流程包括坯料轧前准备、管坯加热、穿孔、轧制、定减径和钢管冷却、精整等几道基本工序。

当今热轧无缝钢管生产的一般主要变形工序有3个,即穿孔、轧管和定减径。各自的

工艺目的和要求为：

(1)穿孔。将实心的管坯变为空心的毛管，可以理解为定型，既将轧件断面定为圆环状，其设备被称为穿孔机。对穿孔工艺的要求是：首先要保证穿出的毛管壁厚均匀、椭圆度小、几何尺寸精度高；其次是毛管的内外表面要较光滑，不得有结疤、折叠、裂纹等缺陷；第三是要有相应的穿孔速度和轧制周期，以适应整个机组的生产节奏，使毛管的终轧温度能满足轧管机的要求。

(2)轧管。将厚壁的毛管变为薄壁(接近成品壁厚)的荒管，可以视其为定壁，即根据后续的工序减径量和经验公式确定本工序荒管的壁厚值，该设备被称为轧管机。对轧管工艺的要求：将厚壁毛管变成薄壁荒管(减壁延伸)时，首先要保证荒管应具有较高的壁厚均匀度；其次荒管具有良好的内外表面质量。三辊轧管机的工作流程如图 2-1 所示。

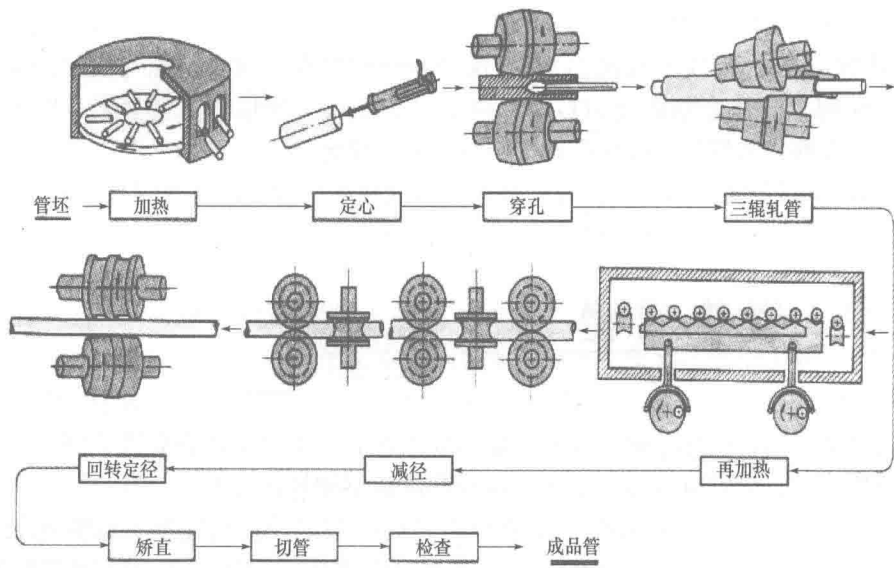


图 2-1 三辊轧管机的工作流程

(3)定(减)径(包括张减)。大圆变小圆，简称定径，相应的设备为定(减)径机，其主要作用是消除前道工序轧制过程中造成的荒管外径不一(同一支或同一批)，以提高热轧成品管的外径精度和真圆度。对定减径工艺的要求是：首先在一定的总减径率和较小的单机架减径率条件下达到定径目的，其次实现使用一种规格管坯生产多种规格成品管的任务，最后可进一步改善钢管的外表面质量。

2.2.1.2 热轧无缝钢管的特点

热轧无缝钢管的特点是可以破坏钢锭的铸造组织、细化钢材的晶粒，并消除显微组织的缺陷，从而使钢材组织密实、力学性能得到改善。这种改善主要体现在：沿轧制方向，钢材在一定程度上不再是各向同性体；浇注时形成的气泡、裂纹和疏松，也可在高温和压力的作用下被焊合。

(1)经过热轧之后，钢材内部的非金属夹杂物(主要是硫化物和氧化物，还有硅酸盐)被压成薄片，出现分层(夹层)现象。分层使钢材沿厚度方向抗拉的性能大大恶化，并且有可能在焊缝收缩时出现层间撕裂。焊缝收缩诱发的局部应变时常达到屈服点应变的数倍，比

荷载引起的应变大得多。

(2)不均匀冷却造成的残余应力。残余应力是在没有外力作用下内部自相平衡的应力,各种截面的热轧型钢都有这类残余应力,一般型钢截面尺寸越大,残余应力也越大。残余应力虽然是自相平衡的,但对钢构件在外力作用下的性能有一定影响,如对变形、稳定性、抗疲劳等方面都可能产生不利的作用。

(3)热轧的钢材产品,对于厚度和边宽均不好控制。我们熟知热胀冷缩,由于开始的时候热轧出来的钢材即使长度、厚度都达标,冷却后还是会出现一定的负差,边宽越宽、厚度越厚,表现得越明显,所以对于大号的钢材,对其边宽、厚度、长度、角度,以及边线都无法要求得太精确。

2.2.2 冷成型钢管

2.2.2.1 冷成型钢管的生产工艺

根据生产工艺的不同,冷成型钢管可分为三种:

(1)用高频电阻焊焊接的直缝焊管。这种管材一般不进行后续热处理即可交货使用。其生产工艺一般包括三个步骤:

- 1)钢带的开卷及整平;
- 2)辊轧成圆形并进行电阻焊焊接;
- 3)定型,即通过成型机组使圆管定径,或将初步成型的圆管再辊轧成矩形或方形。

在上述生产流程的每一个阶段,钢材中均将产生由变形和卸荷引起的残余应力。通过成型机组后,将在钢管成材中最终形成一组残余应力,称为变形残余应力。因为电阻焊焊接时热能量输入少,焊接残余应力亦小,故不必对焊接进行局部热处理。当订货有要求时,可对钢管进行消除残余应力的热处理。此时,该管材可称为已消除残余应力的冷成型钢管。

(2)用熔融焊(一般为埋弧焊)焊接的直缝焊管或螺旋焊管。这种管材必要时需对焊缝进行局部热处理。

(3)冷拔钢管。这种管材虽能提高受拉屈服强度,但不仅成本较高,且在受压时能产生使压缩屈服点和切线模量降低的包辛格效应,故冷拔钢管只限于小管径管材,且一般不被采用。

在建筑钢管结构中,一般采用高频电阻焊焊接的冷成型直缝焊管,对这种管材的性能已有较多的试验研究资料可供设计参考,且该类管材壁厚均匀,生产中便于定尺。而用埋弧焊焊接的钢管,因对其受力性能研究较少,除在钢管混凝土结构中曾采用外,很少在较小尺寸的管材中使用,对其力学性能应作进一步研究。

直缝焊管的生产工艺流程如图 2-2 所示。

螺旋焊管的生产工艺流程如图 2-3 所示。

螺旋焊管能用较窄的坯料生产较大管径的焊管或不同管径的焊管,因此大口径焊接圆管大多采用螺旋焊。其强度一般比直缝焊管高,与相同长度的直缝焊管相比,焊缝长度增加了 30%~100%,生产速度较低。螺旋焊管应用范围较窄,一般用于钢管桩、输送管等。

2.2.2.2 冷成型钢管的特点

这里主要介绍冷成型直缝焊管,其特点如下:



图 2-2 直缝焊管的生产工艺流程

- (1) 生产工艺简单、生产效率高、成本低；
- (2) 较小口径的焊管大都采用直缝焊接；
- (3) 圆形、方形、矩形等各种钢管都可采用直缝焊接；
- (4) 方管、矩形管焊缝布置在两角部的中间；
- (5) 焊接方式：电阻焊用于薄壁钢管，埋弧焊用于厚壁钢管。

2.2.3 冷弯矩形钢管

2.2.3.1 冷弯矩形钢管的生产工艺

冷弯矩形钢管的生产工艺有两种：

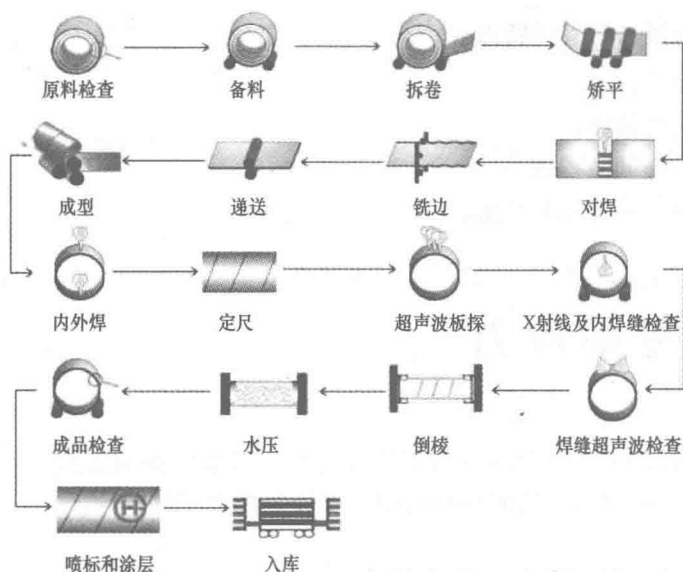


图 2-3 螺旋焊管的生产工艺流程

(1)直接成方(direct forming square): 对冷轧或热轧钢带直接进行连续弯角变形, 经高频焊接后形成矩形钢管的成型方式, 也称为方变方成型。

(2)先圆后方(round to square forming): 对冷轧或热轧钢带进行弯曲变形, 经高频焊接成圆钢管, 通过整形最终形成矩形钢管的成型方式, 也称为圆变方成型。

壁厚较大、冷成型加工设备能力有限时, 也可将冷成型圆钢管加热, 在高温($900\text{ }^{\circ}\text{C}$)下将其压成方管。

冷弯矩形钢管的生产工艺流程如图 2-4 所示。

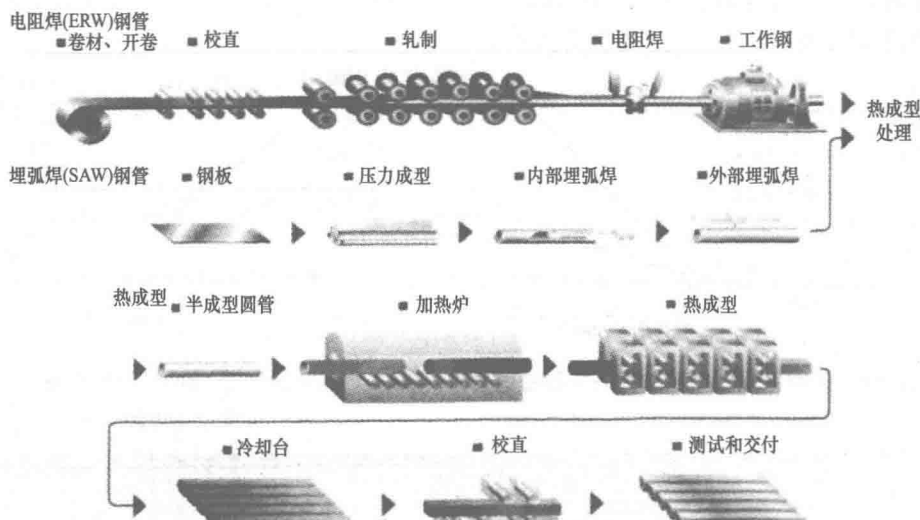


图 2-4 冷弯矩形钢管的生产工艺流程

2.2.3.2 冷弯矩形钢管的特点

- (1)良好的截面特性;
- (2)良好的耐锈蚀性能;
- (3)简化施工,降低工程成本;
- (4)材料的冷作硬化性能有缺陷。

2.3 残余应力

在钢管的使用过程中,残余应力与工作应力相互叠加,使钢管的实际受力情况变得复杂,对钢管的承压、抗疲劳、抗断裂和抗应力腐蚀等能力产生影响。

2.3.1 热轧无缝钢管残余应力分布

热轧钢管沿壁厚变化的残余应力分布如图 2-5 所示,它的内表面在冷却时因受到先已冷却的外表面约束而有残余拉应力,而外表面具有残余压应力。不过,热轧圆管的残余拉、压应力都比较小。

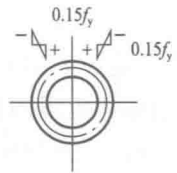


图 2-5 热轧钢管沿壁厚变化的残余应力分布

在定径时,无缝钢管的外表面残余应力为压应力,而内表面残余应力为拉应力。从外表面到内表面的残余应力变化过程是由压应力到拉应力的动态变化过程。在不同的温度条件下,随着定径量的增大,无缝钢管外表面的残余压应力都逐渐变大;在不同的定径量下,随着定径温度的升高,无缝钢管外表面的残余压应力都逐渐减小。无缝钢管的残余应力与定径量、定径温度的关系如图 2-6、图 2-7 所示。

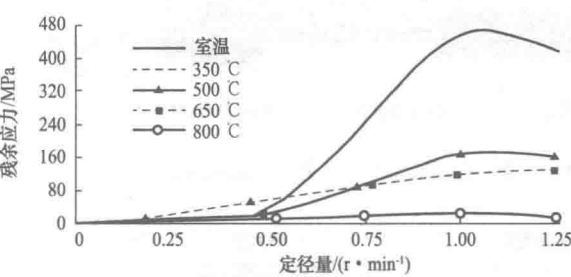


图 2-6 无缝钢管的残余应力与定径量的关系

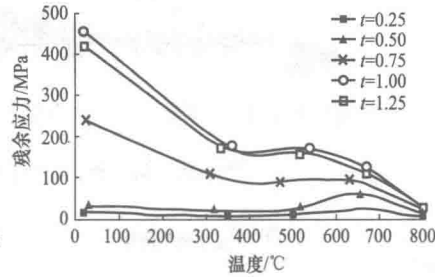


图 2-7 无缝钢管的残余应力与定径温度的关系

2.3.2 冷成型钢管残余应力分布

直缝焊管残余应力分布特点。焊接钢管的成型可以当作纯弯曲塑性变形来分析。在成型过程中要经过弹性变形阶段和弹性-塑性变形阶段。在弹性变形阶段,当外力消失时,弹