

HANJIE JIEGOU FENXI YU ZHIZAO

焊接结构分析与制造

陆亚珍 傅强 姚瑶 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

焊接结构分析与制造

陆亚珍 傅强 姚瑶 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书力求理论联系实际,突出基本问题,并适当反映国内外的最新研究成果和发展趋势。全书分为两部分:第一部分为焊接结构的理论基础与设计,介绍了焊接接头及其特性、焊接应力与变形、焊接结构的断裂及安全性分析、焊接接头和结构的疲劳失效分析;第二部分为焊接结构生产与管理、介绍焊接结构生产、焊接生产工艺装备,焊接结构现代生产管理,焊接结构的制造工艺,还介绍了焊接机器人和自动化焊接中心等最新成果。

本书可供焊接工程技术人员作为参考资料,也可作为高等院校本科生、高职高专材料成形及控制(焊接方向)、焊接工艺及设备、焊接技术及工程等专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构分析与制造 / 陆亚珍, 傅强, 姚瑶编著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-5084-8276-7

I. ①焊… II. ①陆… ②傅… ③姚… III. ①焊接结构—结构分析②焊接结构—焊接工艺 IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第264201号

书 名	焊接结构分析与制造
作 者	陆亚珍 傅强 姚瑶 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷
印 数	0001—1800册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

焊接是将材料形成永久性连接的工艺过程。自 1921 年美国将焊接技术用于轮船的焊接以来,焊接结构几乎在所有的金属结构产品中,从几十万吨巨轮到不足 1g 的微电子元件,都获得了广泛的应用。焊接已经渗透到制造业的各个领域,直接影响到产品的质量、可靠性和寿命以及生产的成本、效率和市场反应速度。

现在焊接结构已在锅炉、压力容器、发电设备、核设施、石油化工、管道、冶金、矿山、铁路、汽车、造船、港口设施、航空航天、建筑、农业机械、水利设施、工程机械、机器制造、医疗器械、精密仪器和电子等行业中广泛应用。我国经济建设的高速发展极大地推动了焊接技术的进步,与此同时,焊接技术的进步也大大地提升了工业生产水平。

本书在注重完整性和系统性的前提下,坚持少而精的原则,做到深入浅出,通俗易懂。书中十分注重理论联系实际,融合了作者多年的教学和科研经验,力求实用性强,能对读者的实际工作有所帮助。本书紧跟时代步伐,力求介绍国内外的最新研究成果和发展趋势。

本书主要内容:焊接接头的性能和工作应力分布,焊接接头的设计;焊接应力与变形的产生、条件和特点,焊接残余应力和变形的演变过程及分布规律、影响因素及防止措施;焊接结构的脆性断裂及影响因素,焊接结构的断裂分析,预防焊接结构脆断的措施;疲劳破坏的特征和类型,影响疲劳强度的因素,改善疲劳寿命的方法,腐蚀破坏和蠕变断裂;焊接结构的可靠性,生产工艺规程,生产工艺,焊接生产工艺评定和焊接技术方案的编写;焊接装配工艺装备,焊接变位机械和焊接机器人;焊接结构现代生产管理和典型焊接结构的制造工艺。

本书得到了许多同志的帮助和支持,姚河清教授提供了很多焊接自动化和机器人焊接方面的图片和资料,并提出许多建设性的意见;周建方教授和包晔峰教授在审稿过程中提出了许多改进的意见;朱天宇教授对于本书的出版提供了很大的帮助,在此表示衷心的感谢,并向本书所引用文献的作者深表谢意。

由于时间仓促，并限于作者的水平 and 经验，书中难免有疏漏和欠妥之处，
恳请同行专家和广大读者批评指正。

作者

2010 年 12 月



目 录



前言

第1章 绪论	1
1.1 焊接结构的发展与应用	1
1.2 焊接结构的特点	2
1.3 焊接结构生产需要注意的问题	3
第2章 焊接接头及其特性	5
2.1 焊接接头的一般性能	5
2.2 焊接接头的工作应力分布.....	12
2.3 电弧焊(熔焊)许用应力设计法.....	18
2.4 电阻点焊和钎焊的接头设计.....	26
2.5 焊接接头、节点构造与选择.....	28
2.6 焊接工程图样常识.....	34
第3章 焊接应力与变形	38
3.1 焊接应力与变形产生的原因、条件及特点.....	38
3.2 焊接应力.....	46
3.3 焊接变形.....	62
第4章 焊接结构断裂及安全性分析	75
4.1 金属脆断事故及其影响因素.....	75
4.2 焊接结构的断裂分析.....	83
4.3 预防焊接结构脆断的措施.....	98
4.4 用断裂力学方法评定焊接结构的缺陷.....	99
第5章 焊接接头和结构的疲劳失效分析	105
5.1 疲劳的基本知识	105
5.2 改善焊接接头的疲劳寿命	110
5.3 低周疲劳	112
5.4 焊接结构的腐蚀破坏	114
5.5 焊接结构的蠕变断裂	117
第6章 焊接结构生产	121
6.1 焊接结构的可靠性	121
6.2 焊接结构生产工艺规程	127

6.3	焊接结构生产工艺	134
6.4	焊接生产工艺评定	140
6.5	焊接技术方案的编写	152
第7章	焊接生产工艺装备	154
7.1	焊接工艺装备基本概述	154
7.2	装配工艺装备	156
7.3	焊接变位机械	163
7.4	焊接机器人	170
第8章	焊接结构现代生产管理	178
8.1	焊接生产及安全管理	178
8.2	焊接质量保证与成本估算	184
8.3	焊工培训考试与资质认证	187
第9章	典型焊接结构的制造(工艺)	191
9.1	钢结构概述	191
9.2	压力容器	192
9.3	典型的焊接工程实例	198
	参考文献	211

第1章 绪 论

1.1 焊接结构的发展与应用

焊接是将材料永久性连接的加工工艺。自 1921 年美国生产了第一艘焊接船以来,发展至今焊接结构几乎在所有的金属结构产品中,从几十万吨巨轮到不足 1g 的微电子元件,都获得了广泛的应用。焊接已经渗透到制造业的各个领域,直接影响到产品的质量、可靠性和寿命以及生产的成本、效率和市场反应速度。至 2007 年我国每年钢材用量已达到 4 亿 t,成为世界最大的钢材生产国和消费国。至今,钢材是工业应用中最主要的结构材料,可以预见在今后很长一段时间内,钢材仍将占有重要地位。

我国在改革开放 30 年以来,先后进行了很多重大工程。大型化的焊接结构不断获得新的发展与突破。从新疆维吾尔自治区塔里木盆地的轮南到上海的“西气东输”管线,全长约 4300km,采用 X70 钢,直径 1016mm (40in) 的焊接螺旋管和焊接直缝管。这是我国铺设的第一条高强度钢的长距离管线,并且在焊接中采用了一批新型的焊接方法,使用了大量的新型焊接材料和焊接工艺。在桥梁和高层建筑方面,焊接结构的应用也取得很大进步。例如:跨越长江的芜湖长江大桥,采用矮塔斜拉结构,全长 10km,主跨 312m,是我国目前跨度最大的公路、铁路两用桥,采用厚 50mm 的 14MnNbq 钢整体焊接箱型主桁。上海卢浦大桥,全长 3900m,跨度 550m,用 3.4 万 t 厚度为 30~100mm 的细晶粒钢焊接而成。上海的金茂大厦是我国目前最高的摩天大楼,采用焊接钢结构框架,共有 88 层,高 420m。北京建造的国家大剧院,其椭圆形穹顶长轴 212.2m,短轴 143.64m,高 46.28m,焊接钢结构的总重量达 6475t,为世界最大的穹顶。

我国的造船业在过去的 20 年里有了很大的发展,已成为世界第一造船大国。同时我国也制造了一些过去未曾建造过的大型和特殊功能的舰船。

在压力容器的焊接制造方面我国也取得很大进步。例如焊接制造了总重量达千吨级、壁厚 280mm 的大型热壁加氢反应器。随着我国航天事业的发展,近年建成了国内最大的空间环境模拟装置,它是一个大型不锈钢整体焊接结构,主舱是一个直径 18m、高 22m 的真空容器,辅舱直径 12m。我国发射的“神舟 4 号”载人飞船都曾在这个模拟舱中进行过试验。在铝合金、钛合金焊接方面的成就集中体现在航空、航天工业产品的发展。在国产 J-11 飞机上的全焊钛合金重要承力结构件的总重量达到飞机机体重量的 15%。

2008 奥运会的主体育馆鸟巢,钢结构重量达数万吨;三峡电站的水轮机转子,直径 10.7m,高 5.4m,重达 440t,为世界最大、最重的不锈钢焊接转子。转子分别由上冠、下环和 13 个或 15 个叶片焊接而成,每个转轮需要消耗 12t 焊丝。这些大型焊接钢结构的开发与应用创造了新中国成立以来的最高水平,有的已成为世界领先。

现在焊接结构已在锅炉、压力容器、发电设备、核设施、石油化工、管道、冶金、矿山、铁路、汽车、造船、港口设施、航空航天、建筑、农业机械、水利设施、工程机械、机器制造、医疗器械、精密仪器和电子等行业中广泛应用。我国经济建设的高速发展极大地推动了焊接技术的进步，与此同时，焊接技术的进步也大大地提升了工业生产水平。

1.2 焊接结构的特点

焊接结构之所以会得到如此高速的发展，主要是由于焊接结构具有以下突出优点。

(1) 节省材料，减轻结构的自身重量，提高生产效率，降低生产成本。焊接接头无需连接件，在同样承载条件下，焊接结构与铆接相比可以节省材料 10%~25%，重量减轻 10%~20%，其原因在于焊接结构不用打铆钉，材料截面积得到充分应用，此外可减少铆钉、角钢等辅助材料。

与铸造结构相比焊接结构的生产过程无需制作木模、砂型，也不需要专门的熔炼、浇铸设备，工艺简单、生产周期短，对于小批量或单件产品非常重要。焊接结构的材料消耗与铸钢相比可以节省 20%~30%，和铸铁相比节省 50%~60%。这是因为焊接结构的截面积可以直接按照设计的需求选取，不必像铸件那样受工艺限制加大尺寸，也不需过多筋板或过大的过渡圆角。焊接厂房和设备投资也要远低于铸造；焊接结构件通常为标准钢材拼焊而成，材料质量容易得到保证，与锻件质量大致相仿，比铸件质量的可靠性要好。以下通过几个实例说明不同加工工艺生产同样结构件的经济性比较。

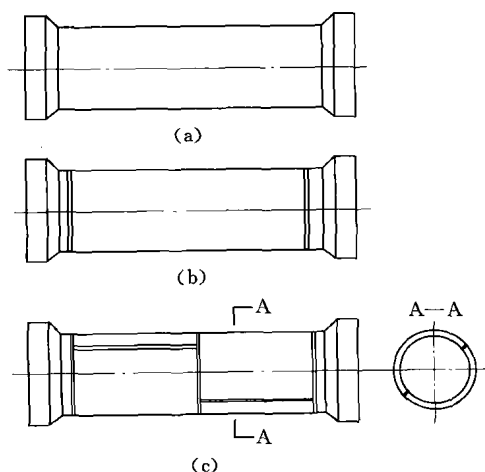


图 1-1 水轮机主轴的三种设计与加工方案

(a) 整锻；(b) 铸钢法兰与锻造筒体焊接；

(c) 铸钢法兰与焊接轴筒焊接

12000t 水压机的下横梁如果采用铸钢件重量为 470t，采用焊接件重量为 280t，重量可减轻 46%。一种大型水轮机空心主轴净重为 47.3t，可采用三种加工方案（图 1-1）：①整体锻造；②两个法兰为铸钢，与中间的锻造筒体焊接而成；③轴筒分为两段，每段由两个半圆弯板焊接而成，将两段焊接成轴筒，然后与两个法兰焊接。三种方案的原材料消耗、大型机床的加工工时、加工成本见表 1-1。整锻方案需要大钢锭，钢锭大则浇铸冒口大、材料消耗大；毛坯需要留的加工余量大，则占用大型机床的工作时间较长。自重的降低不仅结构的生产成本减少，而且可以提高结构的使用效率，如桥梁自重降低可以提高通行能力；汽车、列车及其他各种装载运行车辆、船舶等可以

以提高运载能力，降低能量消耗。因此，类似这些方面设备结构设计的一个重要原则就是在保证设备工作质量的前提下要尽可能减轻设备自重。这点也是焊接结构得以广泛应用的重要原因之一。

表 1-1

不同加工工艺生产同样结构件的经济性比较

方案	净重 (t)	毛重 (t)	钢材消耗 (t)	占用机床数 (台)	成本比较 (%)
整锻	47.3	110	200	1400	100
铸焊 1	47.3	66	132	1300	70.6
铸焊 2	47.3	53	102	1000	53.0

(2) 焊接结构尺寸和形状不受限制。现代焊接技术几乎可以实现任何板厚与结构形式的焊接, 焊接厚度最大可以达到数百毫米, 最小可以小至几个微米; 通过焊接可以实现各种复杂结构的生产和; 现代焊接技术的发展可以满足不同材料结构的焊接要求。

板厚在 50mm 以上时, 铆接困难, 而现代压力容器单层厚度达到 300mm 时, 焊接也不成问题。由此可见, 焊接的尺寸和形状是不受限制的。

(3) 接头构造合理、承载能力强。主要反映为接头系数高, 即接头工作效能较高。接头系数定义:

$$k_j = \frac{A_j}{A_m} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 A_j ——接头的断裂强度;

A_m ——母材的断裂强度。

通常对接焊的接头系数可达 100%; 传统铆接仅为 70% 左右。由于接头构造合理, 机器具有较高的承载与抗冲击的能力。

(4) 灵活方便、生产周期短、市场反应速度快。焊接与铸造、锻造及其他机械加工方法比较: 加工准备时间短; 可根据不同部位的不同要求使用不同材料; 可充分利用标准型材, 减少加工量。一般一艘自重为 20 万 t 的油船, 如采用焊接技术最多只需 3 个月时间就可以完工, 而铆接需要一年多。另外焊接可采取的结构形式多样化, 质量也更可靠。在致密性方面来说, 焊接结构无论在水密性还是气密性方面都比较好。焊接结构可以在同一个零件上根据不同要求采用不同的材料或分段制造来简化工艺。

1.3 焊接结构生产需要注意的问题

与工程应用的其他结构相比, 焊接结构除了具有以上突出优点之外也存在一些自身的问题, 主要问题可归纳为以下几点。

1. 焊接结构的应力集中

焊接结构无论是与铆接及其他机械连接相比, 或是与锻造、铸造等连续结构相比应力集中问题都显得尤为突出。与铆接不同, 焊缝不仅是作为连接元件, 还与母材金属连为一体, 在外力的作用下一同变形, 因此焊缝形状与焊缝布局必然会影响结构的应力分布, 在结构工作受力时很容易在焊缝或周边形成应力集中。应力集中对结构的脆性断裂与疲劳有很大影响, 从断裂力学角度分析, 应力集中区域内裂纹 (在焊缝及热影响区存在可能性较大) 的应力强度因子要比同样外载条件下平滑构件上同样的裂纹的应力强度因子要大 (图 1-2)。采用合理的接头设计和焊接工艺可以控制结构的应力集中状态, 提高结构的强度

及使用寿命。

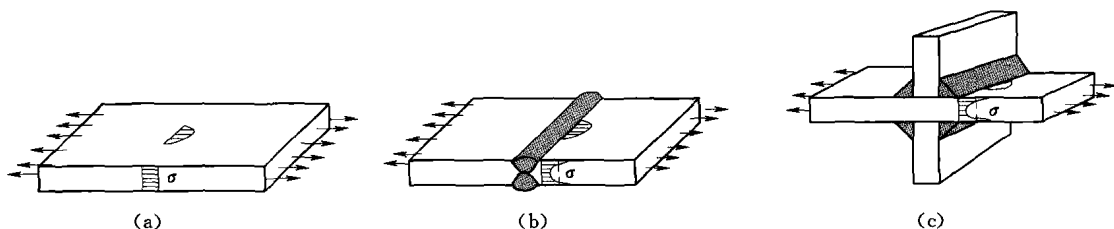


图 1-2 不同应力场中的裂纹

(a) 平板表面裂纹；(b) 对接接头焊趾裂纹；(c) 十字接头焊趾裂纹

2. 焊接结构有较大的焊接应力与变形

大多数的焊接方法都要采用局部加热，由于接头经不均匀加热，产生不均匀的塑性变形，不可避免地会产生焊接应力和变形，导致结构尺寸难以保证；焊接应力在一定条件下可能使结构的承载能力（结构强度、刚度及结构稳定性等）下降。

3. 焊接接头具有较大的性能不均匀性

通常焊缝金属的成分、组织与母材金属不尽相同，焊接过程使得焊接接头经历特殊的热循环及热塑性应变循环，导致焊接接头不同区域的性能差异。焊接结构不均匀性远大于铸件和锻件。这种不均匀性使得人们对结构力学行为特别是断裂行为必须予以高度重视。

4. 焊接结构的整体性

和铆接相比焊接结构的整体性具有很多优点，同时也可能带来一些问题。常见的问题之一就是裂纹扩展。焊接结构不易限制裂纹扩展，对此铆接结构就要好得多。

随着焊接结构的广泛应用，焊接在现代制造业中的地位不断加强和提高，同时现代工业的发展对焊接结构的设计与生产技术提出了更高要求，焊接技术只有不断的创新才能满足现代工业需求。

另外，还需加强可靠的无损检测技术去检测焊接结构内部存在的隐患。

第2章 焊接接头及其特性

2.1 焊接接头的一般性能

2.1.1 焊接接头的基本概念

焊接接头是指用焊接方法把金属材料连接起来的接头。它是组成焊接结构的最基本要素，在某些情况下，它又是焊接结构的薄弱环节，掌握焊接接头的构造特点和工作性能，对正确设计、制造和使用焊接结构具有重要意义。

1. 焊接接头的组成

现代化焊接方法不断涌现，接头类型繁多，但应用最广的焊接方法仍是熔化焊，本章重点讨论熔化焊接头。焊接接头是由焊缝金属、熔合区、热影响区和母材组成（图2-1）。焊缝起着连接金属和传递力的作用。它是在焊接过程中由填充金属（当使用时）和部分母材熔合后凝固而成。焊缝金属的性能取决于两者熔合后的成分和组织。

熔合区是接头中焊缝与热影响区相互过渡的区域，是焊缝边界上固液两相交错地共存的部分。此区很窄，低碳钢和低合金钢的熔合区约 $0.1\sim 0.5\text{mm}$ 。但却是接头中最薄弱地带，许多焊接结构破坏的事故，常因该处的某些缺陷而起，如冷裂纹、脆性相、再热裂纹、奥氏体不锈钢的刀状腐蚀等均源于此。

热影响区是母材在焊接过程中，由于加热引起的不均匀温度场的作用下，发生金相组织和力学性能变化的区域。它的宽度与焊接方法及热输入量大小有关。它的组织性能变化与材料的化学成分、焊前热处理状态以及焊接热循环等因素有关。焊后热影响区内有可能产生脆化、硬化和软化等不利现象。

2. 影响焊接接头性能的主要因素

焊缝金属存在裂纹、未焊透、夹杂、气孔、夹渣等缺陷；而热影响区则会出现裂缝、软化、脆化等现象（图2-2）。热影响区强度和塑性变化是不稳定的，在 1200°C 左右的粗晶区，其硬度和强度都比母材高，但塑性比母材低，这种现象主要是受冷却速度的影响。塑性的降低与钢材的含碳量和热循环时产生马氏体的多少有关。

另外，热影响区的韧性分布也是不均匀的，韧性低的部分有两个：一个是在 1200°C 以上的粗晶区到熔合线的部分；另一个是在焊缝附近的脆化区。脆化区的位置范围和焊接

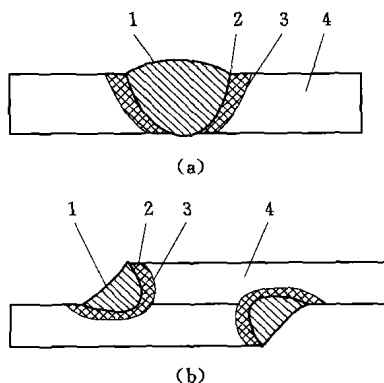


图 2-1 熔化焊焊接接头的组成

(a) 对接接头；(b) 搭接接头

1—焊缝金属；2—熔合区；3—热影响区；4—母材

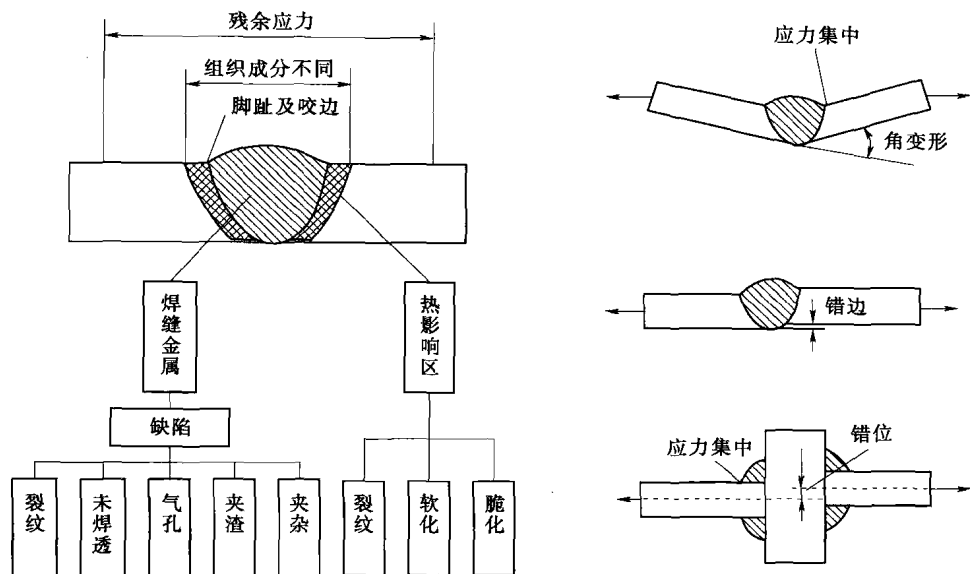


图 2-2 影响焊接接头性能的主要因素示意图

的线能量有关。低碳钢的脆化区常在近缝区的 $400 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，高强钢的脆化区常在靠近 $A_1 - A_3$ 的相变点之间。一般是线能量越大，高温时间越长，则越容易因晶粒粗大而韧性降低。韧性最低的位置是在熔合线上。

热影响区的热塑性变化所引起的韧性下降，大约发生在 $200 \sim 400^{\circ}\text{C}$ （蓝脆温度），称为热应变脆化。这种现象与钢中的碳、氮等溶质原子的活动状态有关，特别是自由氮原子较多的低碳钢最容易发生热塑变脆化现象。

3. 焊接接头的基本特点

(1) 几何不连续。当接头位于结构几何形状和尺寸发生变化的部位时，该接头是一个几何不连续体，工作时传递着复杂的应力。即使是对接接头，只要有余高存在，在焊趾处也会出现不同程度的应力集中。

(2) 性能不均匀。焊缝金属与母材在化学成分上常存在差异，在经受不同的焊接热循环和热应变循环，必然造成焊接接头各区域的金属组织存在不同程度的差异，导致了焊接接头在力学性能、物理、化学性能及其他性能的不均匀性。

(3) 有残余应力与变形。焊接过程热源集中作用于焊接的部位，不均匀的温度场作用下产生较高的焊接残余应力与变形，使接头的区域过早的达到了屈服点和强度极限，同时也会影响结构的刚度，尺寸稳定性及结构的其他使用性能。

2.1.2 焊缝及接头的基本型式

2.1.2.1 焊缝基本型式

表 2-1 为焊缝的基本符号，对接焊缝和角焊缝是焊缝的基本形式。

1. 对接焊缝与坡口

对接焊缝开坡口的目的是为了确保接头的质量及其经济性。

表 2-1

焊缝的基本符号

序 号	名 称	示 意 图	符 号
1	卷边焊缝 (卷边完全熔化)		
2	I 形焊缝		
3	V 形焊缝		
4	单边 V 形焊缝		
5	带钝边 V 形焊缝		
6	带钝边单边 V 形焊缝		
7	带钝边 U 形焊缝		
8	带钝边 J 形焊缝		
9	封底焊缝		
10	角焊缝		
11	塞焊缝或槽焊缝		
12	点焊缝		
13	缝焊缝		

基本坡口型式如图 2-3 所示。组合坡口型式如图 2-4 所示。其根本目的是确保接头的质量。坡口型式的选择需考虑：板厚、焊接方法、焊接材料的消耗量、可焊到性以及焊接应力与变形等条件。坡口的尺寸名称及代号如图 2-5 所示。

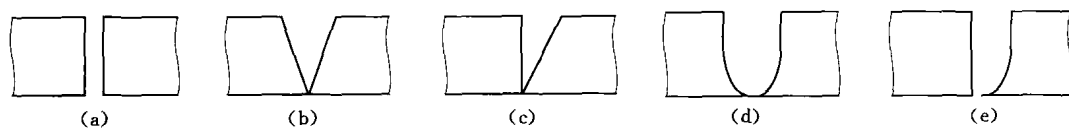


图 2-3 基本型坡口

(a) I 形坡口；(b) V 形坡口；(c) 单边 V 形坡口；(d) U 形坡口；(e) J 形坡口

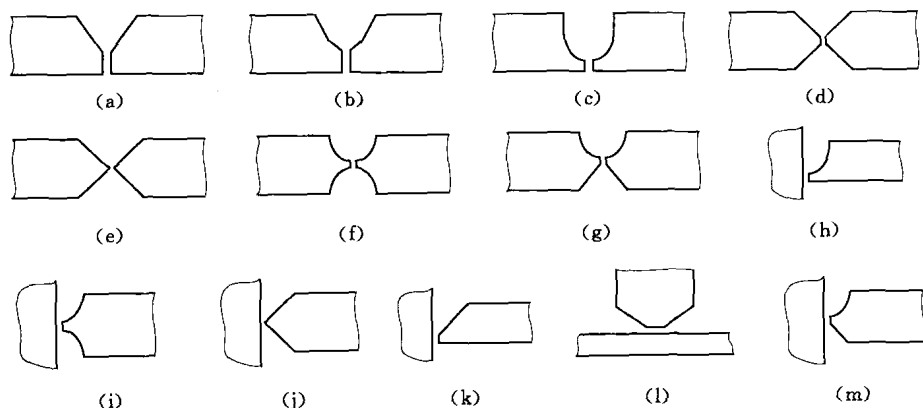


图 2-4 组合型坡口

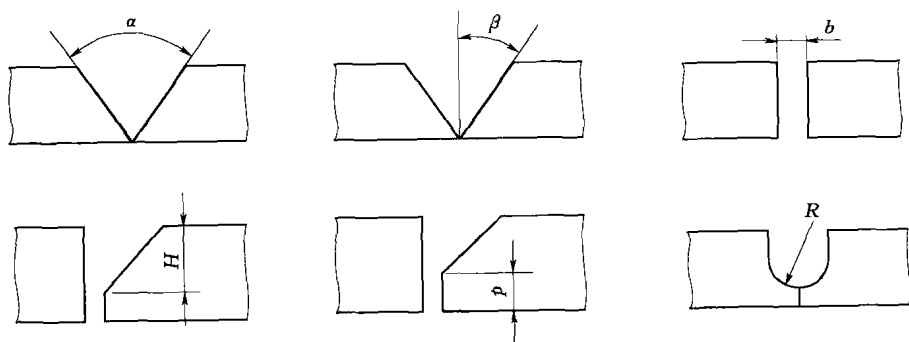


图 2-5 坡口尺寸名称及其代号

气焊、手工焊、气保焊坡口基本型式与尺寸遵照《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》(GB/T 985.1—2008)；埋弧焊坡口基本型式与尺寸遵照《埋弧焊的推荐坡口》(GB/T 985.2—2008) 即可。

2. 角焊缝

角焊缝按其截面形状如图 2-6 所示。以角焊缝构成的各种接头其几何形状都有急剧的变化，如图 2-7 为常用的熔焊接头的力流线，可见角焊缝的力流线的传递比对接焊缝复杂，焊缝的根部与趾部的应力集中，一般都比对接焊缝大。应用最多的角焊缝是截面为

直角等腰的，一般可用腰长 K 来表示其大小，所以在大多数情况下按直角等腰三角形计算，计算高度为：

$$a = K / \sqrt{2} = 0.7K$$

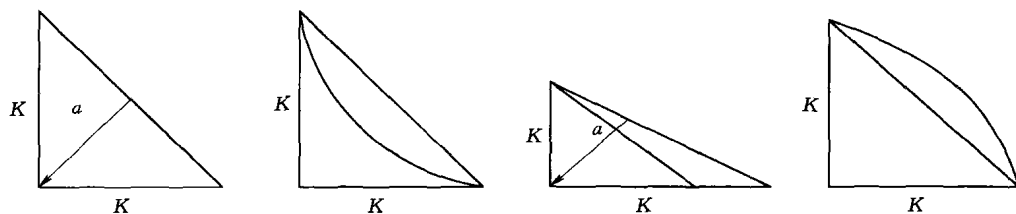


图 2-6 角焊缝截面形状及其计算断面

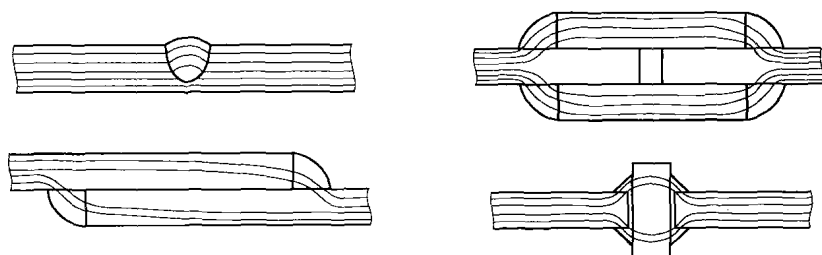


图 2-7 常用熔焊接头中力流线的偏转

正面角焊缝的破断面往往与受力方向成 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的角，但进行应力计算时，仍与受力方向成 45° 角的最小截面为计算断面，按切应力计算强度。正面角焊缝的强度比侧面角焊缝高 $20\% \sim 30\%$ ，侧面角焊缝沿焊缝长度上的应力分布不均匀；正面角焊缝的单位长度承载能力并不是随焊脚 K 的增加成正比增加的。单位面积的强度在 $K > 20\text{mm}$ 时，比 $K < 10\text{mm}$ 时约低 20% ，但屈服强度并不降低。正面角焊缝的强度与其截面形状有关，其强度随 θ 角增大而增大。不等边角焊缝，当长边平行于载荷时比长边垂直于载荷时强度大；各截面形状角焊缝的承载能力与载荷性质有关。角焊缝的实际受力情况在具体结构上是比较复杂的，但工程上为了安全可靠和计算简便，常假定角焊缝是在平均切应力作用下断裂的。并假设在角焊缝截面的最小高度 a 处，图 2-6 中也有角焊缝截面断裂在不同位置，但计算强度仍以 a 处计算。

角焊缝接头的基本型式有：角接头，T 形接头，搭接接头等。

2.1.2.2 工作焊缝和联系焊缝

焊接结构中的焊缝，按其所起的作用可分为工作焊缝和联系焊缝及两者的组合（双重焊缝），如图 2-8 所示。

工作焊缝又称承载焊缝，它与被连接材料是串联的，它承担着传递全部载荷作用，焊缝上的应力为工作应力，一旦焊缝撕裂，结构立即失效；联系焊缝又称非承载焊缝，它与被连接材料是并联的，它传递很小的载荷，主要起构件之间相互联系作用。焊缝上的应力为联系应力。焊缝一旦撕裂，结构不会立即失效。

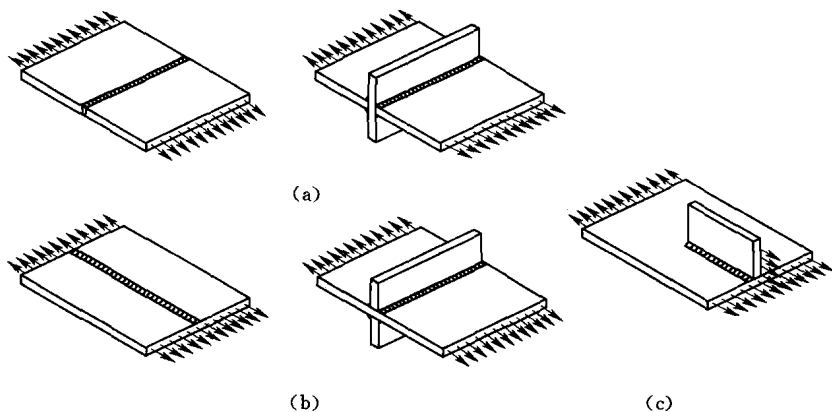


图 2-8 按作用分类的焊缝

(a) 工作（承载）焊缝；(b) 联系焊缝；(c) 双重焊缝

在设计焊缝时，工作焊缝必须进行强度计算，联系焊缝则不必计算。

2.1.2.3 接头的基本形式

接头按其结合形式分为对接接头、T形（十字）接头、角接接头、端接接头和搭接接头几类，如图 2-9 所示。

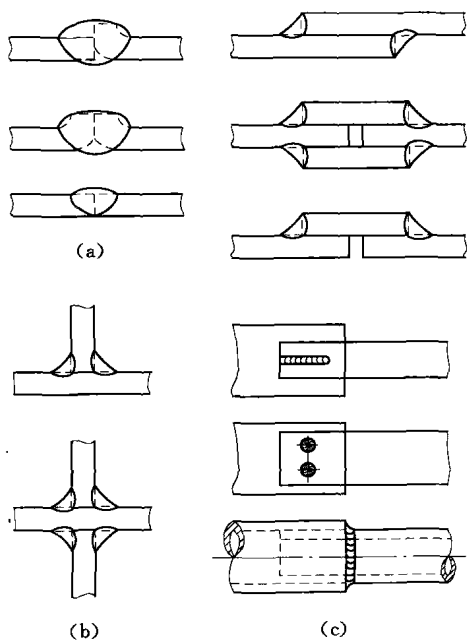


图 2-9 焊接接头的基本类型

(a) 对接接头；(b) T 形（十字）接头；
(c) 搭接接头

1. 对接接头

对接接头形式如图 2-9 (a) 所示。对接接头用于连接在同一平面的金属板。其传力效率最高，应力集中较低，并易保证焊透和排除工艺缺陷。具有良好的综合性能，是重要零件和结构连接的首选接头。其缺点是有时焊前准备量大，组装费工时，而且焊接变形也较大。

单面焊的对接接头，若采用保留垫板形式，虽然工艺上可以克服未焊透，但根部仍存在相当严重的应力集中，且易在垫板与母材的间隙中发生腐蚀。因此，这种接头不宜用于承受较大动载荷或腐蚀介质中。

2. T 形（十字）接头

T 形接头形式如图 2-9 (b) 所示。一板件的端面与另一板件的表面构成直角或近似直角的接头，称 T 形接头，又称丁字形接头。三件相交组成“十字”形的接头，称十字接头。这两种接头工作特性相似，焊缝向母材过渡急剧，接头在外力作用下力线扭曲很大，造成极不均匀的

应力分布，在角焊缝的根部和过渡处都有很大的应力集中。立板开坡口并焊透的接头，应力集中大大降低。这时焊缝由角焊缝转变为坡口焊缝，立板在轴向拉力作用下焊缝中的应