

继续工程教育焊接教材

焊接结构与生产

天 津 大 学 编著
中国石油化工总公司第四建设公司

机械工业出版社

继续工程教育焊接教材

焊接结构与生产

天 津 大 学
中国石油化工总公司第四建设公司 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本套教材是应继续工程教育之所需为从事锅炉、压力容器、钢结构的制造与安装、石油化工建设施工与检修等与焊接有关的非焊接专业中级工程技术人员编写的。本书是这套教材四册之一，主要内容有：焊接应力与变形的产生、影响焊接残余应力、焊接变形大小和分布的因素以及防止措施；焊接结构的脆性断裂、疲劳强度和应力腐蚀破坏；焊接接头和结构细节的设计、焊接生产工艺过程设计与焊接容器、梁、柱及桁架的设计和典型制造工艺等。书中列举了大量实例，每章末附有复习题。

本书适于具有大专以上文化水平的技术人员作为焊接继续工程教育之用，还可用作焊接大专函授班的教材，也适于从事焊接工作的工程师和技师自学。

本书由贾安东主编，编撰人有贾安东(绪论、第三章)、单平(第一章)、张玉凤(第二章)；由霍立兴教授主审。

焊接结构与生产

天津大学

编著

中国石油化工总公司第四建设公司

*

责任编辑：何月秋 责任校对：贾立萍

封面设计：姚毅 版式设计：冉晓华

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张15·字数365千字

1993年3月北京第1版·1993年3月北京第1次印刷

印数 0 001—4 300 定价：11.10元

*

ISBN 7-111-03467-8/TG·758

●继续工程教育焊接教材●

●工程焊接冶金学

杜则裕 主编

●金属结构的电弧焊

奚道岩 主编

●焊接结构与生产

贾安东 主编

●焊接质量管理与检验

王立君 主编

继续工程教育焊接教材编委会

主 任：秦伯雄

副主任：吴凯人

编 委：（以姓氏笔划为序）

王立君 杜则裕 刘志久

金晓玲 徐心志 贾安东

高可畏 奚道岩

前 言

随着科学技术的不断发展,焊接已形成一门独立学科,在现代化工业生产中有着广泛的应用。在中国石油化工总公司工程建设部的大力支持下,天津大学与中国石油化工总公司第四建设公司合作为非焊接专业毕业而从事锅炉、压力容器或钢结构制造与安装、石油化工建设施工与检修等与焊接有关的中级工程技术人员编写了这套焊接培训教材,以满足开展继续工程教育的需要。通过培训使学员在短期内掌握焊接学科的基本内容,重点培养学员分析和解决常见焊接生产问题的能力。

天津大学焊接教研室曾与中国石油化工总公司第四建设公司教育培训中心联合举办过多期继续工程教育焊接培训班,在教学过程中多次组织学员座谈,听取了学员的意见,收集了实践中的经验和实例,在原有讲稿的基础上编写了这套教材,其中有些章节是由实际从事焊接生产的同志亲自撰写的。各书取材少而精,具有针对性,讲求实用性,并列举了较多的金属结构焊接实例及焊接失效实例分析。

本套教材适于具有大专以上文化水平的技术人员作为焊接继续工程教育之用,讲授前应针对学员的实际情况补充必要的《金属学及热处理》知识。

在本套教材编写过程中,张清桂、田景峰、王长聚、平桂香、张方中、郁东键、杨桂华和陈英等同志提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。本套教材在编写过程中参考了全国高等院校焊接专业的有关教材及其他文献资料,在此对原作者表示谢忱。

这套教材还可用作焊接大专函授班的教材,也适合于工程技术人员自学,以及从事焊接工作的工程师和高等院校焊接专业的学生参考。

由于编撰者水平有限,缺点错误在所难免,敬请各界读者予以批评指正。

继续工程教育焊接教材

编委会

1992年5月

目 录

前 言

结 论	1
一、焊接结构及焊接生产的发展	1
二、焊接结构的特点	3
三、焊接生产的特点	4
参考文献	5

第一章 焊接结构中的应力与

变形

第一节 焊接应力与变形的产生	6
一、应力与变形的基本概念	6
二、构件中焊接应力与变形的产生	7
第二节 焊接残余应力	13
一、焊接残余应力的分布	13
二、焊接残余应力对焊接结构的 影响	21
三、预防和消除焊接残余应力的 措施	22
四、焊接残余应力的测定	30
第三节 焊接残余变形	34
一、焊接残余变形的分类及其影响	34
二、各种焊接残余变形的产生及变形 值的估算	36
三、预防和消除焊接残余变形的 措施	46
复习题	60
参考文献	61

第二章 焊接结构强度的基本

理论

第一节 焊接结构的脆性断裂	62
一、结构的脆性断裂事故及其特征	62
二、金属材料的断裂及其影响因素	63
三、金属材料和焊接结构断裂的评定 方法	67
四、焊接结构发生脆断的危险及防止 途径	77
第二节 焊接结构的疲劳强度	87
一、焊接结构的疲劳	87

二、疲劳断裂的过程和断口特征	96
----------------------	----

三、焊接结构的疲劳计算	92
-------------------	----

四、断裂力学在疲劳裂纹扩展研究中 的应用	106
-------------------------------	-----

五、应变疲劳	110
--------------	-----

六、影响焊接结构疲劳强度的因素	111
-----------------------	-----

七、提高焊接接头疲劳强度的措施	118
-----------------------	-----

第三节 焊接结构的应力腐蚀破坏	124
-----------------------	-----

一、应力腐蚀破坏概述	124
------------------	-----

二、应力腐蚀断裂的过程及断口 特征	126
----------------------------	-----

三、提高结构抗应力腐蚀破坏的 途径	129
----------------------------	-----

复习题	134
-----------	-----

参考文献	135
------------	-----

第三章 典型焊接结构的设计与

生产

第一节 焊接结构与焊接生产工艺过程 设计	137
-------------------------------	-----

一、焊接结构、焊接接头和结构细节 的设计	137
-------------------------------	-----

二、焊接生产工艺过程的设计	160
---------------------	-----

第二节 焊接容器	177
----------------	-----

一、焊接容器的结构、用途与种类	177
-----------------------	-----

二、焊接容器的设计计算	185
-------------------	-----

三、典型焊接容器的焊接生产	204
---------------------	-----

第三节 焊接梁、柱及桁架	213
--------------------	-----

一、焊接梁、柱、桁架及其结构 设计	213
----------------------------	-----

二、典型焊接梁、柱及桁架的焊接 生产	223
-----------------------------	-----

复习题	229
-----------	-----

参考文献	229
------------	-----

附录 A 焊接结构整体热处理生产 实例	230
------------------------------	-----

附录 B 焊接结构局部热处理生产 实例	232
------------------------------	-----

绪 论

一、焊接结构及焊接生产的发展

焊接结构随焊接技术的发展而产生,从本世纪20年代开始得到越来越广泛的应用。第一艘全焊远洋船是1921年建造的,但开始大量制造焊接结构是30年代以后。伴随焊接结构的发展也发生了一些事故,如30年代末有名的比利时全焊钢桥的断裂和二次世界大战期间紧急建造的EC2货轮的断裂等。随着冶金和钢铁工业的发展,一些新工艺、新材料、新技术不断涌现。焊接技术和理论的发展,更重要的是国民经济和军事工业发展提出的需要,大大推动了焊接结构及焊接生产,使其获得了迅猛的发展。

(1) 焊接结构的发展 焊接结构近20年来的发展趋势如下:

① 焊接结构获得进一步的推广和应用。与其他制造金属结构的工艺如锻造、铸造、铆接相比,只有焊接结构的占有率是上升的。在工业发达的国家中一般焊接结构占钢产量的45%以上^[1],如原苏联到80年代中期焊接结构已近80Mt,其用钢量占全苏联钢总产量的50%^[2]。焊接结构在重型机械中的比例一般要占70%左右^[3]。焊接结构已经运用于工业、交通、能源、农机、国防等几乎国民经济的一切部门,如用于建造冶金建筑、石油化工设备、各种锻压机械、起重运输机械、工业与民用钢结构;船体结构、机车车辆、汽车与拖拉机;锅炉及压力容器、水轮发电机全套设备的金属结构、汽轮机和核发电容器、长输管道;联合收割机及其他多种农机;常规和尖端武器、深潜设备等。

② 焊接结构向大型化和高参数方向发展^[4]。如长382m、宽68m、高27m的500000t级油轮;直径为33m、容积为20000m³的大型球罐;容积为200000m³的立式贮罐;工作压力为32.4MPa,温度为650℃的1.2GW电站锅炉;工作在热疲劳条件下,容积为5080m³的大型高炉;材质为铌合金,用真空电子束或特种TIG焊焊接,内表面涂耐高温抗氧化层,在1482℃以下工作达1000s以上,进出口直径分别为860mm和1499mm的阿波罗登月舱着陆发动机的延伸管;内径为2.1m,筒体部件长22m,在硫、硫化氢、石油介质下,在20.6MPa的压力和壁温300℃的参数下工作的国产加氢反应器等。

③ 焊接结构材料已从普通热轧钢转向采用低合金结构钢,工业发达的国家还采用了高强度细晶粒钢(如制造16m³挖掘机使用A514——T1钢)、精炼钢(如CF钢),制造海洋平台基础的导管架用Z向钢(如A537钢)。高强度和超高强度钢也开始广泛用于制造焊接结构,如低合金回火马氏体钢,包括HY-130~HY-180,日本的IN-100(相当于HY-140)屈服点在896~1241MPa之间;制造固体燃料火箭发动机壳的4340钢,抗拉强度可达1765MPa,而马氏体时效钢,如18Ni钢焊后时效处理可获得1373~2059MPa的高强度,并且有较高的抗脆断及应力腐蚀的能力,正被用来制造航空航天器的零件、冷冻机及船舶壳体等。

与焊接结构的使用条件日益复杂和苛刻相对应,一些抗高温、抗腐蚀、抗深冷及脆断的高合金钢及非钢铁合金也在焊接结构中获得了应用,如3.5Ni、5.5Ni及9Ni钢;不锈钢和耐热钢;铝及铝合金;钛及钛合金。如用防锈铝合金制造输送液化天然气的货船和球罐等。

④ 焊接结构的设计应依据其工作条件和要求分别按照有关的规范进行,接受有关部门

的监督,但共同的发展趋势是在计算机帮助下采用优化设计,从而使结构更加经济合理,并且减少了设计的工作量。一些重型机械的主要部件在设计时采用焊接件,已经突破了将其作为毛坯的传统概念,这些焊接件采用先进的切割和焊接方法,不经机械加工即可直接进行装配,并保证必要的安装装配精度和公差要求。

(2) 焊接生产的发展 与以上焊接结构的发展趋势相适应,必然有以先进的焊接工艺为基础的焊接生产的发展。近年来焊接生产的主要发展趋势如下:

① 先进的高质量的和廉价的气体保护焊获得了广泛的应用。在很多场合, CO_2 气体保护焊代替了手工电弧焊;用富氩的混合气体保护焊、氩弧焊(包括TIG焊)焊接高强度钢;在需要单面焊的压力容器和管道中常用TIG焊打底;药芯焊丝气体保护焊已用于诸如造船、重型机械、大型贮罐等焊接结构的空间焊缝;在航天航空、核设备的焊接中使用了氩弧焊。即使采用手工电弧焊的场合,也采用了高效焊接工艺,例如在长输管道的焊接中采用向下立焊方法对接;在造船焊接中采用重力焊;广泛应用铁粉焊条等。

② 包括上述先进焊接工艺在内的焊接的机械化和自动化得到推广,表中所示是目前国外一些工业先进国家按焊接填充金属重量计算已达到机械化、自动化的水平,我国与之相比差距较大。

一些工业先进国家焊接机械化、自动化的比例⁽²⁾

国 别	原 苏 联	美 国	日 本	德 国	中 国
机械化和自动化占百分比	40%	55%	45%	64%	25%

高效、优质的机械化和自动化是靠相应的自动化设备和焊接材料支持的。像大型化的焊接成套设备,具有自动跟踪焊缝、检测、调整等功能,这不仅可以大幅度提高焊接质量和生产率,也为改善工人的劳动强度,进而向无人化生产铺平道路。又如大型贮油罐壁焊缝自动焊机,特别是焊接机器人,目前在世界上所有的工业机器人中,50%为焊接机器人,在一些劳动条件十分恶劣的场合,为摆脱对高级熟练焊工的依赖,进一步提高劳动生产率和质量,选择焊接机器人是重要的途径。

③ 焊接生产中的下料工艺有了重大进步。这是使整个生产工艺现代化、自动化和短流程的一个重要环节。例如广泛采用数控热切割,目前主要采用数控氧-乙炔气割下料,有的工厂6mm以上的全部或大部分钢材都采用这种方法下料,使划线、下料实现了自动化,保证了零件的形状、尺寸正确,边缘光滑,不再需用边缘刨削来改善零件精度,80%以上的钣金零件只需这道下料工序和修磨即可进入装配。一些工厂根据产品特点还保留了部分剪床下料,但由剪切向热切割,由光电向数控切割过渡的趋向已十分明显。

与上述变化相对应,热切割工艺与设备得到了很大发展,机械的代替手工的,新的热切割工艺,如等离子切割、激光切割等获得应用。

④ 加强了基本金属如钢材、铝合金等的表面处理和边缘处理,以保证热切割的连续、焊接及装配质量和成品涂饰质量。

综上所述焊接结构与焊接生产的发展趋势,不难看出无论在结构设计、焊接工艺、焊接设备、各料工艺与设备和焊接材料方面均有较大的发展。在图样设计方面采用了先进的技术标准、高性能的材料,在制造时采用了与技术标准和材料相适应的高质、高效、低成本的工艺,制造出了一流的产品,而焊接生产是整个生产制造过程中主要的一环,占有极重要的地

位。在当今改革开放的年代,焊接生产的能力往往是产品打入国际市场,取代进口产品,能否成为与外商合作的伙伴,参与国际竞争的首要条件之一。

二、焊接结构的特点

(1) 焊接结构的优点 焊接结构之所以能有上述巨大的发展,是与焊接结构的一系列优点分不开的。

① 采用焊接结构可以减轻结构的重量,提高产品的质量,特别是大型毛坯的质量(相对铸造毛坯)。相对铆接结构其接头效能较高,节省金属材料,节约基建投资,可以取得较大的经济效益。如120000kN水压机改用焊接结构后,主机重量减轻20%~26%,上梁、活动梁减轻20%~40%,下梁减轻50%;大型鄂式破碎机改用焊接结构后,节约生产费用30多万元,成本降低了20%~25%^[1]。

② 焊接结构由于采用焊接连接,理论上其连接厚度是没有限制的(与铆接相比),这就为制造大厚度巨型结构创造了条件。采用焊接能使结构有很好的气密性和水密性,这是贮罐、压力容器、船壳等结构必备的性能。

③ 焊接结构多用轧材制造,它的过载能力、承受冲击载荷能力较强(和铸造结构相比);对于复杂的连接,用焊接接头来实现要比用铆接简单得多,训练有素的焊接结构设计人员可以灵活地进行结构设计,并有多种满足使用要求的可供选择,简单的对接焊和角焊就能构成各种焊接结构。

④ 节省制造工时,同时也就节约了设备及工作场地的占用时间,这也可以获得节约资金的效果。例如在现代化造船厂里,一个自重200000t的油轮,可在不到3个月的时间里下水,同样的油船如用铆接制造,需要一年多的时间才能下水。

(2) 焊接结构存在的问题 焊接结构也存在一些问题,这些问题正是本书要进行讨论的主要内容之一。

① 焊接结构中必然存在焊接残余应力和变形。绝大多数焊接结构都是采用局部加热的焊接方法制造,这样不可避免地将产生较大的焊接应力和变形。焊接应力和变形不仅将影响结构的外形和尺寸;在一定条件下,还将影响结构的承载能力,如强度、刚度和稳定性;对焊后加工也带来一些问题,如尺寸的稳定性和加工精度;同时还是导致焊接缺陷的重要原因之一。

② 焊接过程会局部改变材料的性能,使结构中的性能可能不均匀。一些金属材料焊接比较困难,这就导致了焊接缺陷,虽然焊接缺陷大多数能够修复,但是一旦漏检或修复不当则可能带来严重的问题,例如,形成应力集中,加之性能不均匀将更严重地影响结构的断裂行为,降低结构的承载能力。

③ 焊接结构是一个整体,这一方面是气密、水密的前提,另一方面刚度大,在焊接结构中易产生裂纹,使之很难像铆接或螺栓连接那样在零件的过渡处被制止,由于这个原因和上述原因(焊接应力和变形、缺陷、大应力集中、性能不均匀等)导致焊接结构对脆断和疲劳、应力腐蚀等的破坏特别敏感。

④ 由于科学技术的进步,无损检测手段获得了重大发展,但到目前为止,经济而十分可靠的检测手段仍感缺乏。

(3) 焊接结构的分类 广泛采用的焊接结构难于用单一的方法将其分类。有时按结构板件的厚度分为薄板、中厚板、厚板结构;有时又按最终产品分为飞机结构、油罐车、船体结

构、客车车体等等；按采用的材料，可分为钢焊结构，铝、钛合金结构等等。按结构工作的特征，并与其设计和制造紧密相连，结构的分类及其各自的特点可简述如下：

1) 梁、柱和桁架结构 分别工作在横向弯曲载荷下和纵向弯曲或压力下的结构可称为梁和柱。由多种杆件被节点联成承担梁或柱的载荷，而各杆件都是主要工作在拉伸或压缩载荷下的结构称为桁架。做为梁的桁架结构杆件分为上下弦杆、腹杆(又分竖杆和斜杆)，载荷作用在节点上，从而使各杆件形成只受拉(或压)的二力杆。实际上，许多高耸结构，如输变电钢塔、电视塔等也是桁架。

梁、柱和桁架结构是组成各类建筑钢结构的基础，如高层建筑的钢结构、冶金厂房的钢结构(屋架、吊车梁、柱等)、冶炼平台的框架结构等。它还是各类起重机金属结构的基础，如起重机的主梁、横梁，门式起重机的支腿、栈桥结构等等。用作建筑钢结构的梁、柱和桁架常常在静载下工作，如屋顶桁架。而作为起重机的金属结构，包括桥梁桁架和起重机桁架则在交变载荷下工作，有时还是在露天条件下(桥梁、门式吊车、栈桥等)工作，受气候环境与温度的影响，这类结构的脆断和疲劳问题应引起很大关注。

2) 壳体结构 它是充分发挥焊接结构水、气密特点，运用最广、用钢量最大的结构。它包括各种焊接容器、立式和卧式贮罐(圆筒形)、球形容器(包括水珠状容器)、各种工业锅炉、废热锅炉、电站锅炉的汽包、各种压力容器，以及冶金设备(高炉炉壳、热风炉、除尘器、洗涤塔等)、水泥窑炉壳、水轮发电机的蜗壳等。

壳体结构大多用钢板成形加工后拼焊而成，要求焊缝致密。一些承受内压或外压的结构一旦焊缝失效，将造成重大损失，因此对这类结构的设计和制造监察应按国家法规进行。

3) 运输装备的结构 它们大多承受动载，有很高的强度、刚度、安全性要求，并希望重量最小，如汽车结构(轿车车体、载重车的驾驶室等)、铁路敞车、客车车体和船体结构等。而汽车结构全部、客车体大部分又是冷冲压后经电阻焊或熔化焊组成的结构。

4) 复合结构及焊接机器零件 这些结构或零件是机器的一部分，要满足工作机器的各项要求，如工作载荷常是冲击或交变载荷，还常要求耐磨、耐蚀、耐高温等。为满足这些要求，或满足零件不同部位的不同要求，这类结构往往采用多种材料与工艺制成的毛坯再焊接而成，构成所谓的复合结构，常见的有铸-压-焊结构、铸-焊结构和锻-焊结构等。

复合结构的焊接可以在加工毛坯后完成，如挖掘机的焊接铲斗；而大多数是粗加工或未经机加工的毛坯焊接成结构后再精加工完成，如巨型焊接齿轮、鼓筒、汽轮发电机的转子和水轮机的焊接主轴、转轮和座环等。

三、焊接生产的特点

焊接生产过程是指采用焊接的工艺方法把毛坯、零件和部件连接起来制成焊接结构的生产过程。如上所述，各种各样的焊接结构都是焊接生产的产品，有许多就是最终的制成品，如大型球罐、全焊钢桥、热风炉、蒸煮球、尿素合成塔等；更多则是最终制成品的的主要部件或零件，如全焊船体、工业锅炉的炉体、起重机的金属结构、压力容器的承压壳、油罐车的油罐和底架、东风4型内燃机车柴油机(16240ZA型)的焊接机体及水轮机的转轴、转轮和座环等。

在工厂中负担焊接生产的车间，如金属结构车间、装焊车间、总装车间等是工厂的主要车间之一，在一些情况下，它是初级产品、半成品的准备车间(如汽车制造厂的车体车间或车身车间)，是工厂最终产品的总装车间、涂饰车间或成品库的“供应者”，同时它也是工厂互约束，这样就产生了焊接应力和变形。

的备料车间(切割下料与冲压成形、零件机加工等)、机加工车间、某些中间仓库的“消费者”,它还必须由动力车间(包括变电站、空压站、锅炉房、氧-乙炔站等)提供能源。总之,焊接生产和工业生产的其他部门有着紧密的联系,随着焊接结构和焊接生产的发展,焊接生产在工业生产中占有越来越重要的地位。

此外,焊接生产在工程建设和工程施工中也是最重要的环节之一,例如在石油化工企业的建设中,焊接工作量约占1/3;目前计划修建从新疆到内地的油气输送管线,按每根管长18m计算,长6000km的管线仅接头就有33万个,还未计入各种附属设施、闸阀门、加温装置等的焊接接头。可见焊接生产的水平是加快基本建设速度,提高工程质量,保证建成的工程和企业很快投产达产的重要保证。

参 考 文 献

- 1 杜详英,黄雷鸣.2000年我国机械科学技术展望.中国机械工程学会三十五周年年会论文集.武汉:1986
- 2 宋天虎.苏联与巴顿焊接研究所焊接技术的发展以及为促进我国焊接技术的进步的几点建议.第Ⅷ届全国焊接学术会议论文集:0~37.西安:1980
- 3 安琦.消化引进技术,改进工艺提高焊接产品质量.第Ⅷ届全国焊接学术会议论文集:1~1~①.哈尔滨:1986
- 4 孟广喆等著.焊接结构强度与断裂.北京:机械工业出版社,1986

第一章 焊接结构中的应力与变形

第一节 焊接应力与变形的产生

一、应力与变形的基本概念

在焊接结构的制造过程中，结构中不可避免地会产生焊接应力和变形，这是焊接生产所特有的问题。焊接应力和变形对焊接产品会产生影响，不仅影响结构尺寸的准确和外形美观，而且有可能降低结构的承载能力而影响其使用性能。所以必须较深入地分析焊接结构中应力与变形产生的原因及其规律，从而找出防止或减小焊接应力与变形的措施。

1. 内应力与焊接应力

内应力是在结构上无外力作用时保留于物体内部的应力。这种应力存在于许多工程结构中，如焊接结构、铸造结构等。内应力是在无外力作用下形成的，因此自身形成互相平衡的力系。如铆接结构中，当铆钉杆冷却收缩时，由于钢板的阻碍作用，在铆钉杆中就形成拉伸应力，而在钢板中形成压缩应力，这二者是相互平衡的。在焊接结构中存在的这种内部互相平衡的应力就称为焊接内应力，简称焊接应力。

应力按其分布范围可分为宏观内应力和微观内应力，宏观内应力的分布范围较大，内应力在这一较大范围内平衡，该范围一般与结构尺寸相当。微观内应力存在和平衡于相当于原子大小的范围内。本章只研究宏观内应力。

内应力按其产生的原因可分为温度应力和残余应力两种^[1,2,3]。温度应力又称为热应力，它是由于构件受热不均匀而存在着温度差异，各处膨胀变形或收缩变形不一致互相约束而产生的内应力。如果温度不均匀引起的应力低于金属材料的屈服点，变形均在弹性变形范围内，当温度均匀化后，温度应力将随之消失。反之，如果不均匀温度场造成的温度应力达到金属材料的屈服点，材料发生局部塑性变形，那么当物体温度恢复到原始的均匀状态后，构件中仍然有新产生的应力存在，这种应力即为残余应力。

在焊接过程中，由于极不均匀的局部加热和冷却会形成较大的温度应力，这一应力是在不断变化的。我们将焊接过程中构件存在的温度应力称为焊接瞬时应力，其峰值一般都达到屈服点，因此必然发生塑性变形，焊接终止，构件冷却后必然有残余应力保留下来，称该应力为焊接残余应力，焊接瞬时应力和焊接残余应力二者统称为焊接应力。焊接应力是在没有外力作用时的内应力，它在构件中自身平衡。构件在产生内应力的同时，将伴随着伸长、缩短、弯曲和翘曲等变形。所以变形和应力是互相联系的。

2. 焊接结构产生应力和变形的原因

结构在焊接的局部加热过程中，构件上的温度分布极不均匀，如焊缝及其附近区域的金属被加热至熔化，然后逐渐冷却凝固，再降至常温。近缝区的金属也要经历从常温到高温，再由高温降至常温的热循环过程。金属在加热时要膨胀，冷却时要收缩，由于结构各处的温度极不均匀，所以各处的膨胀和收缩变形也差别较大，这种变形不一致导致了各处材料的相

在焊接过程中，由于接头形式的不同，使得焊接熔池内熔化金属的散热条件有所差别，这样使得熔化金属凝固时产生的收缩量亦不相同。这种熔化金属凝固、冷却快慢不一引起收缩变形的差别也导致了焊接应力和变形的产生。

在焊接过程中，一部分金属在焊接热循环作用下发生相变，组织的转变引起体积变化，如对碳钢而言，奥氏体转变为铁素体或马氏体时，其体积将增大，这样也产生应力和变形，这种现象在焊接合金钢时尤为明显。

焊接时产生的应力和变形也受焊前加工工艺的影响，施焊前构件若经历冷冲压等工艺而具有较高的内应力，在焊接时由于应力的重新分布，则形成新的应力和变形。

以上所述的几种因素在焊接结构的制造中是不可避免的，因此焊接结构中产生应力和变形是必然的。

3. 研究金属材料焊接应力与变形的若干假设

焊接一般为局部加热，热源又同时移动，因此距热源不同点处的温度是不同的。温度的不均匀造成了变形的不均匀。局部塑性变形是产生焊接残余应力和变形的主要原因，因此研究焊接应力与变形的产生即演变过程，必须要探讨构件上各点温度的分布情况。在整个加热和冷却过程中构件上各处的温度是变化的，这种温度变化的过程又称为热过程。

由于焊接过程的复杂性，使得焊接应力和变形的研究较为困难，为了使问题简化，通常作出以下假定。

(1) 焊接温度场 通常将焊接过程中的某一瞬间焊接接头中各点的温度分布状态称为焊接温度场。在焊接热源的作用下，构件上各点的温度在不断地变化，这是一个复杂的热循环过程，但可以认为达到某一极限热状态时，温度场不再改变，这时的温度场称为极限温度场。例如用一固定点热源加热一半无限大钢块，钢块上各点将以不同的速度升温，当达到某一时刻后各点的温度不再上升，此时等温面为同心半球面。同样用点热源加热一无限大钢板，在某一时刻钢板上的温度场也会达到一热极限状态。此时如果热源作匀速直线运动，则 t 瞬时在某一截面上出现的温度分布，将在 $t+\Delta t$ 瞬时出现在邻近的截面上，这样除了构件两端外，每个截面上温度分布的变化过程均相同，也就是热循环过程相同。

图1-1为一极限温度场^[4]，由于构件较薄，可以认为构件在厚度方向上的温度分布是均匀的。图1-1c中虚线表示距 x 轴不同点处所达到的最高温度。

(2) 有关力学和物理性能的假定

1) 平截面假定 假定杆件在焊前所取的横截面焊后仍保持为平面。即杆件只发生伸长、缩短、弯曲，其横截面只发生平移或偏转等，永远保持为平面。

2) 金属性能的假定 材料的某些物理性能，如线膨胀系数(α)、热容(C)、热导率(λ)等均不随温度的变化而变化。

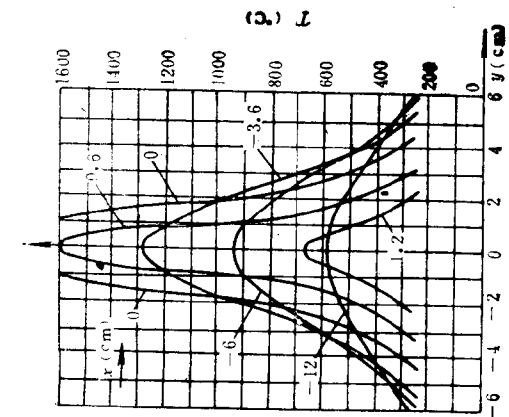
3) 金属屈服点的假定 低碳钢屈服点随温度的变化如图1-2中的虚线所示，简化假定为图中实线所示的关系，即在500℃以下时同常温时的屈服点，而500℃以上时呈完全塑性状态，即屈服点为零。

4) 应力应变关系的假设 材料呈理想弹-塑性状态，即材料屈服后不发生强化。

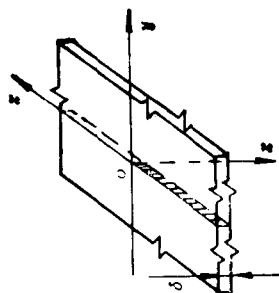
二、构件中焊接应力与变形的产生

1. 均匀加热时应力与变形的产生

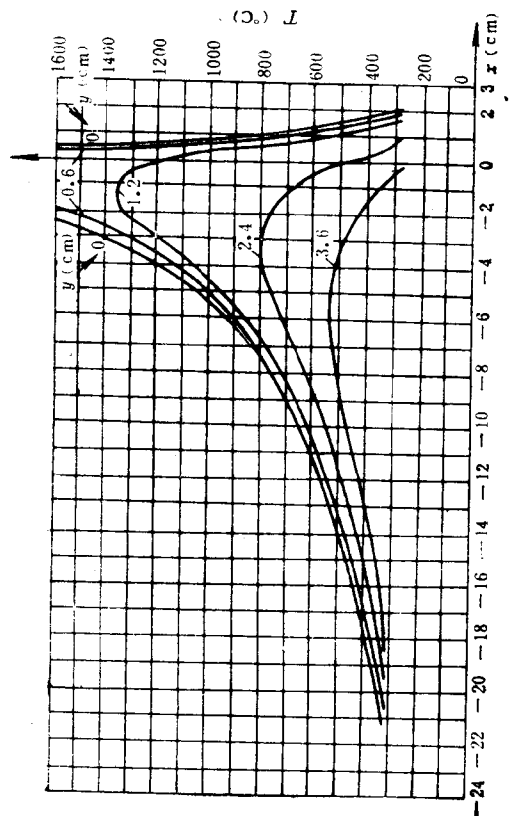
焊接时不均匀的加热是产生应力和变形的的主要原因，为了便于了解应力和变形的产生这



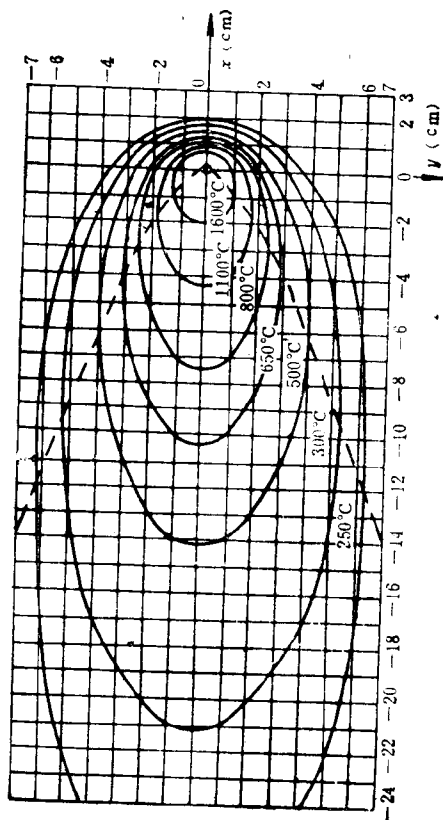
b)



d)



a)



c)

图1-1 焊接温度场 (a)

一复杂过程，我们首先对均匀加热时产生应力和变形这一简单过程进行讨论，通过讨论，定义几个新的概念。

(1) 不受约束的杆件在均匀加热时的应力与变形 当杆件的温度发生变化时，其尺寸将发生变化，如当温度为 T_0 时，其长度为 L_0 ，当温度升至 T_1 时，其长度为 L_1 ，这种不受任何约束自由产生的变形称为自由变形，该变形可由下式计算：

$$\Delta L_T = \alpha L_0 (T_1 - T_0)$$

式中 α ——金属的线膨胀系数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

其变形率 ε_T 称为自由变形率，可由下式计算：

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L_T}{L_0} = \alpha (T_1 - T_0)$$

(2) 受约束的杆件在均匀加热时的应力与变形

① 低碳钢热循环的最高温度小于 500°C 时，如图1-3a 图1-2 低碳钢屈服点与温度的关系 所示，杆长为 L_0 ，与两刚性壁之间留有间隙 b ，温度随时 间变化的关系为 $T=f(t)$ 。当杆件温度逐渐升高时，杆件将自由伸长变形，当自由变形量达到间隙量 b 时，自由变形开始受阻碍。若继续升温，杆件将受到压缩，压缩变形量为：

$$\Delta L = -(\Delta L_T - b)$$

式中 负号表示受压缩。

由于杆件在膨胀时受到阻碍，不能够完全自由地变形，表现出来的变形量正好就是间隙量 b ，称 b 为实际变形，用 ε_{sa} 表示实际变形率：

$$\varepsilon_{sa} = \frac{b}{L_0}$$

未表现出的那部分变形，即自由变形与实际变形的差值称之为内部变形，其变形率为：

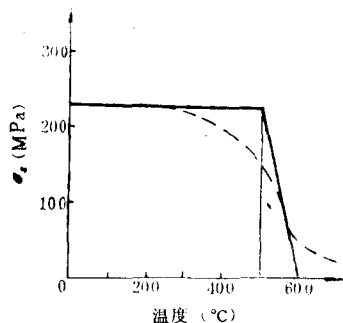
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{b - \Delta L_T}{L_0} = \varepsilon_{sa} - \varepsilon_T$$

如果加热温度较低，材料的变形仍在弹性范围内，由虎克定律可知，应力和应变为线性关系：

$$\sigma = E\varepsilon$$

当杆件的温度恢复到初始温度 T_0 ，杆件将自由收缩到原来的长度，这时压缩应力将全部消失。

如果加热温度较高，杆件的压缩变形量则增大，当压缩变形率超过材料的屈服变形率时，杆件将发生压缩塑性变形，这时的变形率将由弹性变形率 ε_e 和塑性变形率 ε_p 两部分组成，在杆件发生屈服的瞬间产生的弹性变形 ε_e 用 ε_s 表示，如图1-3b所示。在图示的 t_1 时刻，杆件开始发生压缩弹性变形，出现压应力；当温度升高到 t_2 时刻，压缩应力达到材料的屈服点，开始出现压缩塑性变形；在 t_3 时刻，温度达到峰值，塑性变形达到最大值，然后温度开始下降，杆件开始发生收缩变形。由于杆件已经产生了压缩塑性变形，因此在冷却开始时它的端面不再以2'点为起点，而从2点开始收缩。到达 t_4 时刻，虽然杆件的温度仍高于初始温度，但由于在冷却过程中压缩塑性变形一直被保存下来了，杆件却已经恢复到了初始长度。当温度达到初始温度时，杆件则比初始长度缩短了，这部分长度正好等于受热膨胀时所产生的压



缩塑性变形量。

② 低碳钢热循环的最高温度超过 600°C ，如图1-3c所示，杆件受完全约束时，杆件的应力和变形则与上述情况不同。由于杆件受到完全约束，杆件无论加热或冷却均没有自由变形，也就是说一开始受热，就立刻产生压缩弹性变形。随着温度的升高，在 t_1 时即达到屈服应变 ε_s ，开始出现压缩塑性变形。在 t_2 时，温度达到 500°C ，继续升温，弹性变形减小而塑性变形增大，温度升高，随屈服点 σ_s 的降低压应力降低。在 t_3 时温度达到 600°C ，此时材料的屈服点下降至零，材料处于全塑性状态，压应力消失，变形全部为塑性变形。在 t_4 时，杆件已经冷却到 600°C ，性能开始恢复，屈服点逐渐升高，而此时随杆件的冷却，杆端将不以 $4'$ 为起点而以 4 为起点收缩。由于收缩时又受到约束，杆内则必将产生拉伸变形和拉伸应力。在 t_5 时，温度已下降至 500°C ，材料完全恢复弹性，拉伸塑性变形不断增加，而拉应力达到屈服点 σ_s ，则不再增加。

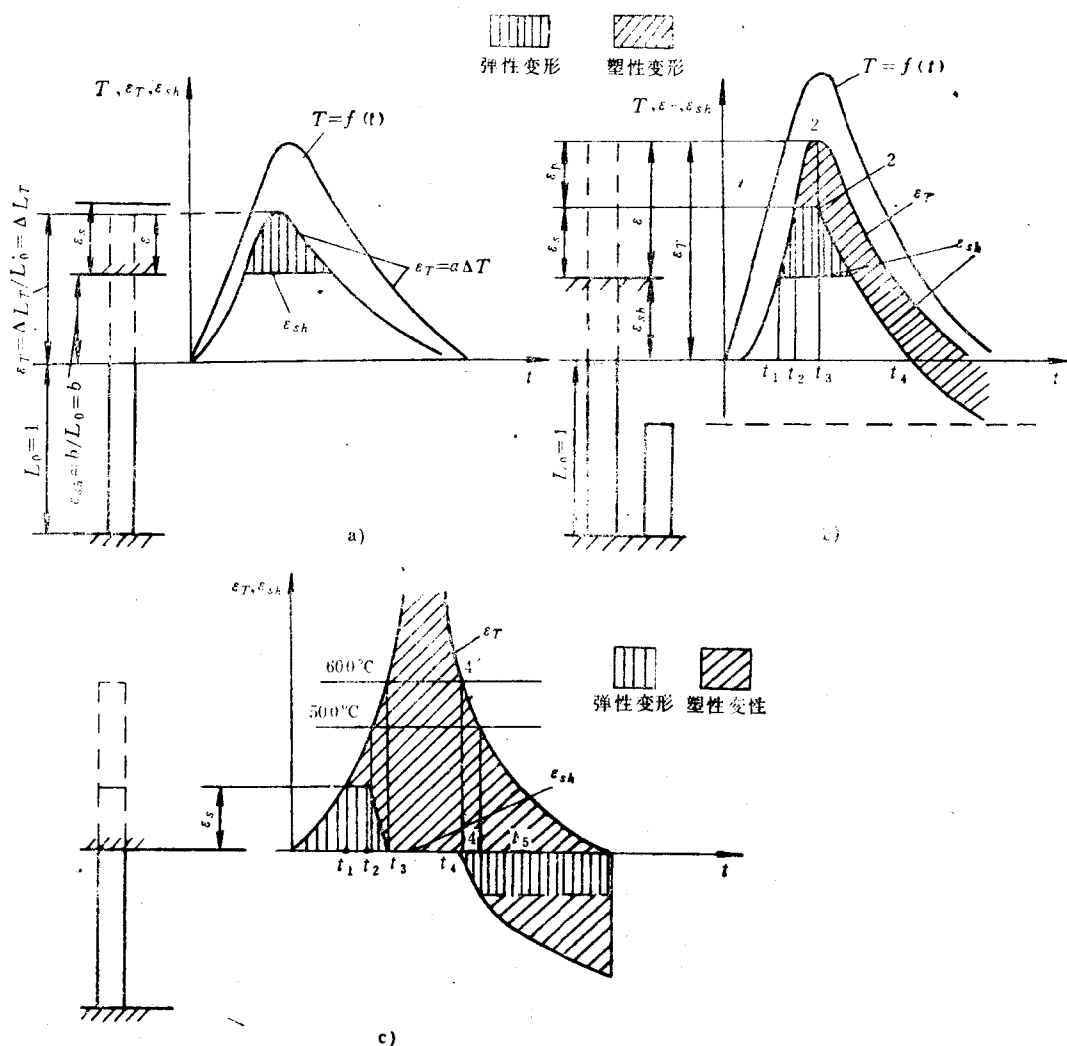


图1-3 均匀加热的杆件在热循环作用下的应力和变形