

陈裕川 主编

# 焊接工艺评定手册



机械工业出版社  
China Machine Press

ISBN 7-111-07446-7/ TG·1323

封面设计 / 电脑制作 : 李雨桥

ISBN 7-111-07446-7



9 787111 074465 >

定价:88.00元

TG44-62

C-9.4

# 焊接工艺评定手册

主编 陈裕川  
参编 王同芬 汪东明 张林  
主审 周昭伟



机械工业出版社

899983

本书围绕焊接工艺评定这一主题,首先概括介绍了焊接结构的制造工艺和各种材料的典型焊接工艺;系统而详细地论述了焊接工艺规程的内容、编制依据、程序和方法,焊接工艺评定的程序和各制造法规所规定的评定规则,焊接工艺评定中必须考虑的焊接工艺参数,焊接工艺评定的试验项目、方法和合格标准;列举了重要焊接结构部件焊接工艺评定的大量典型实例。此外,还客观地评述了国内外现行焊接工艺评定标准,对焊接生产企业焊接工艺的科学管理也作了必要的介绍。

本书可供从事焊接结构生产的初、中级以上技术人员和生产管理人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接工艺评定手册/陈裕川主编,王同芬等编. —北京:机械工业出版社,1999. 10  
ISBN 7-111-07446-7

I. 焊… II. ①陈…②王… III. 焊接工艺  
IV. TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第48347号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:俞逢英 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新  
封面设计:李雨桥 责任印制:何全君  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2000年1月第1版第1次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·57印张·插页2·1413千字  
0 001—3500册  
定价:88.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

# 前 言

近 20 年来,焊接技术的发展十分迅速。在我国,随着工业现代化的突飞猛进,焊接结构已广泛应用于锅炉、核能、电力设备、压力容器、管道、船舶、重型机械、桥梁、建筑结构、车辆和工程机械等重要工业部门。鉴于焊接结构不断向大型化、重型化和高参数方向发展,对产品的焊接质量提出了越来越严格的要求,并以设计规范、制造法规或规程等形式,对生产企业的焊接质量控制作出了全面而科学的强制性规定。其中,焊接工艺评定就是在法规中明确规定的控制产品焊接质量最重要和最有效的方法和程序之一。

自 80 年代初我国实行改革开放政策以来,上述各工业领域的生产企业,通过引进国外先进制造技术,贯彻国际公认先进的权威性工业标准,已逐步将焊接工艺评定作为企业保证焊接质量必不可少的重要环节,对控制产品焊接质量取得了十分显著的效果。但同时也必须看到,各生产企业在完成焊接工艺评定工作中也还存在着不少值得重视的问题。由于焊接工艺本身可变参数繁多,对焊接质量的影响因素也十分复杂。因此,在各生产企业中既要使焊接工艺评定工作不流于形式,使其成为控制产品焊接质量的有效手段,又要避免耗资可观的重复评定,使企业能在最经济的条件下完成必要的焊接工艺评定,确实是一项相当困难的任务。加之,我国现行的几份焊接工艺评定标准还不尽完善和合理,又进一步加大了这项工作的难度。因此编写出版全面系统论述焊接工艺评定内容实质和规则的实用性手册显得甚为必要。

本书是作者在总结近 10 余年来实际从事锅炉、压力容器、管道、船舶、钢结构等焊接工艺评定工作所积累的经验,并认真消化吸收国外先进的有关法规、标准的基础上编写而成的。

本书共分 7 章和 2 个附录。其中第 2 章由哈尔滨锅炉厂汪东明工程师编写;第 5、6 章由哈尔滨电力设备修造总厂王同芬高级工程师编写;第 7 章由江南造船(集团)公司张林工程师编写;其余各章及附录由本书主编陈裕川高级工程师编写;由哈尔滨焊接研究所周昭伟教授级高级工程师审阅。

本书在编写过程中得到了许多焊接专家的热情鼓励和支持。上海锅炉厂廖奎光副总工程师、江南造船(集团)公司黄海谷高级工程师为本书提供了宝贵的参考资料。大连北方焊接技术开发公司陆芝芳总经理为本书的编写和出版给予了大力支持。在本书出版之际,谨致以衷心的感谢。

希望本书对我国广大焊接工作者,在正确理解焊接工艺评定工作实质,以及合理执行评定规则方面有所帮助。恳请广大读者对本书的不足和错误之处提出批评指正。

陈裕川

# 目 录

## 前言 绪论

- 1 焊接工艺的发展概况 ..... 1
- 2 焊接工艺评定工作的重要性和必要性 ..... 2

### 第 1 章 焊接结构的制造工艺

- 1 焊接结构制造工艺概述 ..... 4
  - 1.1 材料的检验 ..... 5
  - 1.2 金属结构材料的预处理 ..... 5
  - 1.3 切割下料 ..... 5
  - 1.4 坡口加工 ..... 6
  - 1.5 成形加工 ..... 7
  - 1.6 装配与焊接 ..... 8
  - 1.7 焊后热处理 ..... 9
  - 1.8 焊件的质量检查 ..... 9
  - 1.9 焊接结构的后处理 ..... 13
  - 1.10 焊接结构的涂装 ..... 14
- 2 典型焊接结构制造工艺流程 ..... 14
  - 2.1 钢板卷焊式容器制造工艺流程 ..... 14
  - 2.2 船体焊接制造工艺流程 ..... 20
- 3 焊接方法及焊接工艺参数 ..... 24
  - 3.1 气焊 ..... 25
  - 3.2 焊条(手工)电弧焊 ..... 26
  - 3.3 埋弧焊 ..... 27
  - 3.4 熔化极气体保护电弧焊 ..... 29
  - 3.5 气电立焊 ..... 32
  - 3.6 钨极惰性气体保护电弧焊 ..... 34
  - 3.7 等离子弧焊 ..... 38
  - 3.8 电渣焊 ..... 44
  - 3.9 电子束焊 ..... 48
  - 3.10 激光焊 ..... 52
  - 3.11 电阻焊 ..... 56
  - 3.12 螺柱焊 ..... 67
  - 3.13 摩擦焊 ..... 69
  - 3.14 堆焊 ..... 71

- 4 焊接工艺要素 ..... 77
  - 4.1 焊接接头的设计 ..... 77
  - 4.2 焊接结构用材料 ..... 83
  - 4.3 焊接材料 ..... 88
  - 4.4 预热、层间温度和低温后热处理 ..... 94
  - 4.5 焊后热处理 ..... 99
  - 4.6 焊接能量参数 ..... 104
  - 4.7 焊接操作技术 ..... 104
  - 4.8 焊后检验 ..... 105

### 第 2 章 各种材料的焊接工艺

- 1 碳素钢的典型焊接工艺 ..... 112
  - 1.1 低碳钢的焊接 ..... 112
  - 1.2 中碳钢的焊接 ..... 115
  - 1.3 高碳钢的焊接 ..... 117
- 2 低合金结构钢的焊接工艺 ..... 117
  - 2.1 低合金结构钢的焊接特点 ..... 117
  - 2.2 低合金结构钢用焊接材料 ..... 118
  - 2.3 低合金结构钢的焊接方法选择 ..... 121
  - 2.4 低合金结构钢的焊前准备与焊接工艺参数的选择 ..... 121
  - 2.5 低合金结构钢的焊后热处理 ..... 123
  - 2.6 低合金结构钢的焊后检验 ..... 125
  - 2.7 常用低合金结构钢的典型焊接工艺 ..... 126
- 3 耐热钢的焊接工艺 ..... 127
  - 3.1 对耐热钢焊接接头性能的基本要求 ..... 129
  - 3.2 低合金耐热钢的典型焊接工艺 ..... 129
  - 3.3 中合金耐热钢的典型焊接工艺 ..... 133
  - 3.4 高合金耐热钢的典型焊接工艺 ..... 135
- 4 不锈钢的焊接工艺 ..... 140
  - 4.1 不锈钢焊接接头的耐蚀性 ..... 144
  - 4.2 不锈钢的典型焊接工艺 ..... 144



5 镍及镍合金的焊接工艺 .....	148	2 焊接工艺评定试验项目及 试验方法 .....	255
5.1 镍基合金的焊接特点 .....	148	2.1 锅炉与压力容器焊接工艺评定 试验项目 .....	255
5.2 镍基合金的典型焊接工艺 .....	149	2.2 焊接工艺评定试验方法及合格 标准 .....	261
6 钛及钛合金的焊接工艺 .....	153	2.3 钢结构焊接工艺评定试验项目 .....	272
6.1 钛及钛合金的焊接性 .....	158	2.4 钢结构焊接工艺评定试验方法和 合格标准 .....	277
6.2 钛及钛合金的典型焊接工艺 .....	160	3 焊接工艺评定报告的管理 .....	282
7 铝及铝合金的焊接工艺 .....	164	3.1 焊接工艺评定报告的管理程序 .....	282
7.1 铝及铝合金的焊接性 .....	164	3.2 焊接工艺评定报告的合法性 .....	282
7.2 铝及铝合金的典型焊接工艺 .....	168	3.3 焊接工艺评定报告的有效性 .....	283
8 铜及铜合金的焊接工艺 .....	173	3.4 焊接工艺评定及焊接工艺规程的 局限性 .....	283
8.1 铜及铜合金的焊接特点 .....	174	3.5 焊接工艺评定报告与焊接工艺规程 之间的关系 .....	284
8.2 铜及铜合金的典型焊接工艺 .....	177	3.6 焊接工艺守则示例 .....	285
<b>第 3 章 焊接工艺规程及焊接工艺评定</b>		3.7 产品焊接技术条件示例 .....	292
1 焊接工艺管理概述 .....	185	4 焊接工艺评定工作的完善化 .....	304
1.1 焊接工艺管理的程序 .....	185	4.1 修订完善现行焊接工艺评定 标准 .....	304
1.2 焊接工艺管理的主要环节 .....	186	4.2 借鉴美国 ASME 法规 .....	304
2 焊接工艺规程及其编制 .....	193	4.3 正确理解和贯彻工艺评定标准 .....	305
2.1 焊接工艺规程的定义 .....	193	5 焊接工艺评定的计算机管理 .....	306
2.2 焊接工艺规程的内容 .....	193	5.1 焊接工艺评定计算机管理的 必要性 .....	306
2.3 焊接工艺规程的编制程序 .....	194	5.2 焊接工艺评定计算机管理 系统功能 .....	306
2.4 焊接工艺规程的编写方法 .....	196	5.3 焊接工艺评定计算机管理的 局限性 .....	307
2.5 焊接工艺规程的可用性及 有效性 .....	200	5.4 数据库系统 .....	307
3 焊接工艺评定及其基本要求 .....	200	5.5 比较判断系统 .....	310
3.1 焊接工艺评定的定义 .....	200	<b>第 5 章 锅炉焊接工艺评定实例</b>	
3.2 焊接工艺评定的程序 .....	200	1 锅炉锅筒焊接工艺评定实例 .....	311
4 焊接工艺评定规则 .....	206	2 锅炉集箱焊接工艺评定实例 .....	372
4.1 锅炉与压力容器焊接工艺评定 规则 .....	206	3 锅炉受热面管焊接工艺评定 实例 .....	462
4.2 钢结构焊接工艺评定规则 .....	215	4 锅炉钢结构焊接工艺评定实例 .....	609
4.3 船体结构焊接工艺评定规则 .....	240	<b>第 6 章 压力容器焊接工艺评定实例</b>	
5 焊接工艺参数 .....	241	1 压力容器筒体接头的焊接工艺	
5.1 焊接重要参数、补加参数和次要 参数 .....	241		
5.2 焊接工艺参数的分类 .....	241		
6 焊接工艺评定报告的内容 .....	252		
6.1 焊接工艺设计书的内容 .....	253		
6.2 焊接工艺评定报告的各项目 内容 .....	253		
<b>第 4 章 焊接工艺评定试验</b>			
1 概述 .....	255		

评定实例 .....	640	评定实例 .....	846
2 厚壁压力容器接头的焊接工艺		附录 .....	883
评定实例 .....	697	附录 A 国内现行焊接工艺评定标准主要	
<b>第 7 章 船体结构的焊接工艺评定实例</b>		内容对比 .....	883
1 船体结构部件的焊接工艺评定		附录 B 德国劳埃德船建法规中关于船体结构	
实例 .....	791	焊接工艺评定的规定 .....	892
2 其它钢结构部件的焊接工艺		参考文献 .....	906



以加强制造过程的质量控制以及对焊接工艺参数的监控和记录。焊接接头的各种无损检测技术，如表面磁粉探伤、X 射线探伤、超声波探伤和渗透探伤法，得到了普遍的应用。在批量生产或连续生产线生产中，为加快无损检测的速度，射线图像数字分析和工业电视显示技术已开始实际应用。在超声波探伤中，智能化数字式超声波检测仪、计算机控制自动扫描超声波检测仪以及图像分析和信号处理系统已研制成功并投放市场。这些先进的检测仪不仅可提高缺陷检测精度，而且消除了超声波探伤仪缺陷信号波形无记录的弊病。这些检测仪可直接与计算机、打印机、终端、监视器和录像机连接，记录缺陷信号波形十分方便。

对于锅炉、压力容器和高压管道等重要焊接结构，为确保焊接接头的各项性能与母材金属基本相等，焊后热处理工艺在很大程度上起着决定性的作用。由于在这些焊接结构中广泛应用了高强度钢、耐热合金钢、高合金马氏体钢、不锈钢和沉淀硬化不锈钢等新型结构材料，焊后热处理已从简单的消除应力处理，发展到正火加回火处理，调质处理和固溶处理等较复杂的热处理工艺。

综上所述，焊接工艺的发展遵循着以下三个原则：第一，必须确保焊件的质量，焊缝不容许有超标的缺陷，接头的各项性能必须符合产品技术条件和相应标准的要求；第二，在确保焊接接头质量的前提下尽可能提高焊接效率；第三，最大限度地降低生产成本，获取最高的经济效益。同时，还应强调指出，焊接工艺过程较为复杂，影响接头质量的工艺参数繁多，焊接工艺的正确性和合理性必须通过相应的试验即所谓焊接工艺评定加以验证。

## 2 焊接工艺评定工作的重要性和必要性

在许多重要的焊接结构中，如锅炉、压力容器、高压管道、船舶、桥梁和高层建筑，其焊接接头都是按照等强原则设计的，焊接接头强度的减弱或韧性不足都会导致整个焊接结构的提前失效，甚至导致灾难性的后果。在各种腐蚀介质中运行的焊接结构，如焊缝的化学成分或接头的金相组织不符合要求，则会产生严重的选择性腐蚀而导致结构的破坏。因此，对于这样的焊接结构，在投产之前，通过在接近生产实际的条件下焊制试板，取样验证接头的各项性能是十分重要的。根据几十年积累的生产经验，国际焊接工程界逐步形成了一套焊接工艺评定规则。美国机械工程师学会（ASME）锅炉与压力容器委员会于 1940 年组织编写了世界上第一本《焊接与钎焊工艺评定及焊工与钎焊工技能考核标准》，并于 1962 年作了重大修改和补充，成为美国 ASME 锅炉与压力容器法规的第九卷，强制性地在美国和加拿大锅炉压力容器制造行业贯彻执行。后来被许多工业国所沿用而成为世界公认的权威性的标准。可以认为，它是目前世界上较科学、较完整、较合理和较系统的焊接工艺评定标准。该标准第二章总则明确规定，每家承担锅炉和压力容器生产任务的制造厂必须具备两个先决条件：其一是应当制定出能指导焊工焊接产品焊缝的焊接工艺规程；其二必须按标准通过焊接试板和试样的检验，证明按该焊接工艺规程焊接的接头完全符合产品设计规程的要求。焊接工艺评定报告应由企业管理者或管理者代表审查签字，以此保证该企业可完成的工艺评定程序的合法性以及试验结果的正确性。几十年的经验表明，美国 ASME 锅炉与压力容器法规第九卷，对焊接工艺评定的要求和规定是控制锅炉与压力容器产品焊接质量行之有效的程序和方法。我国劳动部颁发的《蒸汽锅炉安全技术监察规程》和《压力容器安全技术监察规程》，自 1987 年起都增加了有关焊接工艺评定的规定。如 1996 年 8 月颁发的《蒸汽锅炉安全技术监察规程》中第五章第 64 条规定“采用焊接方法制造、安装、修理和改造锅炉受压元件时，施焊单位应

制定焊接工艺指导书并进行焊接工艺评定，符合要求后才能用于生产”。第 71 条对焊接工艺评定的范围和试验程序及要求作出了如下的明确规定：“锅炉产品焊接前，焊接单位应按附录 A 的规定，对下列焊接接头进行焊接工艺评定：

1) 受压元件之间的对接焊接接头。

2) 受压元件之间或者受压元件与承载的非受压元件之间连接的要求全焊透的 T 形接头或角接接头。

因此，每家锅炉与压力容器制造厂都必须按照上述安全技术监察规程在产品投产之前，完成必需的焊接工艺评定工作，使焊接工艺评定成为锅炉与压力容器制造厂技术准备工作中一项不可缺少的内容。这也是劳动部监察机构对制造厂进行安全技术检查中必须检查的项目，以证实其焊接工艺评定报告的合法性和正确性。

在船舶、重型机械、桥梁和钢结构制造行业中，焊接工艺评定也都成为相应法规或规程中强制性执行的条款，这样就使焊接工艺评定工作具有普遍的重要意义并为广大焊接工作者所关注。如何正确理解焊接工艺评定的实质、宗旨、内容、试验程序、结果评定及适用范围，合理和合法地执行相关标准，既保证产品的焊接质量，又能简化评定程序，避免不必要的重复评定试验，节省大量人力物力，这是我国焊接工作者当前迫切需要解决的一项重要任务。

# 第 1 章 焊接结构的制造工艺

## 1 焊接结构制造工艺概述

焊接结构制造工艺取决于产品的结构形式。从原材料进厂复验入库到产品最终检验合格入库，其基本的加工工艺有：钢材矫正、钢材的表面预处理、按图划线剪切或数控切割机下料、冲压、成形、坡口加工、部件装配焊接、变形矫正、机械加工、总装焊接、热处理、无损检测、最终耐压、气密性及性能试验、成品后处理、涂装、包装入库等。典型的焊接结构制造工艺顺序示意图见图 1-1。

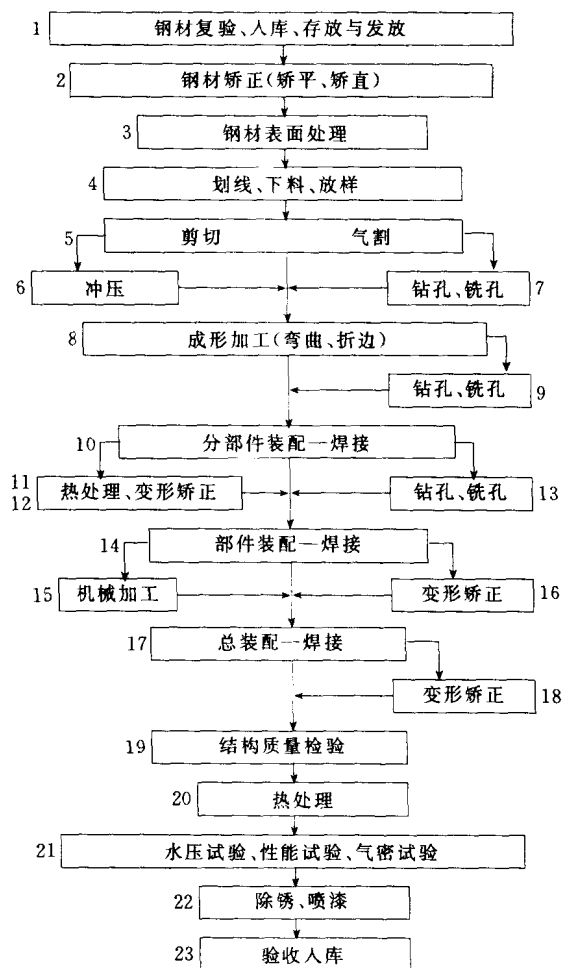


图 1-1 典型焊接结构制造工艺顺序示意图

对制造工艺过程各工序的技术要求应在产品或部件的综合工艺卡或工艺流程卡中加以说明，以保证各工序的加工质量。

## 1.1 材料的检验

制造焊接结构用材料包括：①金属结构材料，如各种钢材，耐蚀耐热合金，有色金属及其合金等；又分板材、型材和管材。②焊接材料，品种有焊条、实心焊丝、药芯焊丝、焊带及金属粉末、钎料和焊剂等。③辅助材料有燃气、保护气体、脱脂清洗剂等。由于金属结构材料和焊接材料的化学成分和性能直接影响到焊接结构的运行特性和使用寿命，材料生产单位必须提供内容齐全的质量证明书，各项理化性能必须符合相应的国家标准或行业标准的规定。对于制造受压部件和重要金属结构用材料，制造单位应按批进行理化性能的复验，确认材料各项性能指标符合相应标准要求后才能验收入库。

材料的验收项目应根据产品的设计要求而定，主要项目有材料炉批号、型号、牌号、化学成分、力学性能、耐蚀性、高温或低温韧性等。对于首次应用的结构材料还应按相应的标准进行金属的焊接性试验和焊接工艺评定试验。

对于尚未列入国家标准或行业标准结构材料和焊接材料，可按国际通用的相应标准或供需双方签订的技术协议进行验收。

## 1.2 金属结构材料的预处理

金属结构材料的预处理主要是指钢材的预处理，即将钢材在使用前进行矫正和表面清理。钢材在吊装、运输和存放过程中如不严格遵守有关的操作规程，往往会产生各种变形，如整体弯曲、局部弯曲、波浪形挠曲等，不能直接用于生产而必须加以矫正。

薄钢板的矫正通常采用多辊轴矫平机，卷筒钢板的开卷亦应通过矫平机矫平。厚钢板的矫平则应用大型水压机在平台上矫正，型钢的弯曲变形可采用专用的型钢矫正机矫正。

钢板和型钢的局部弯曲通常采用火焰矫正法矫正。加热温度一般不应超过钢材的回火温度。加热后可在空气中冷却或喷水冷却。

钢材表面的氧化物、铁锈及油污对焊缝的质量会产生不利的影 响，焊前必须将其清除。清理方法有机械法和化学法两种。机械清理法包括喷砂、喷丸、砂轮修磨和钢丝轮打磨等。其中喷丸的效果较好，在钢板预处理连续生产线中大多采用喷丸清理工艺。

化学清理法通常采用酸溶液清理，即将钢材浸入质量分数为2%~4%的硫酸溶液槽内，保持一定时间取出后放入质量分数为1%~2%的湿石灰液槽内中和，取出烘干。钢材表面残留的石灰粉膜可防止金属表面再次氧化，切割或焊接前将其从切口或坡口面上清除即可。

## 1.3 切割下料

焊件毛坯的切割下料是保证结构尺寸精度的重要工序，应严格控制。如采用机械剪切、手工热切割和机械热切割法下料，则应在待下料的金属毛坯上按图样和1:1的比例进行划线，划线用的卷尺、盘尺和钢直尺必须经计量部门鉴定合格。对于批量生产的工件，也可采用按图样的图形和实际尺寸制作的样板划线。每块样板都应注明产品合同号、图号、规格、图形符号和孔径等，并经检查员检查合格后才能使用。手工划线和样板的尺寸公差应符合标准规定，并考虑焊接的收缩量和加工余量。

钢材可以采用剪床剪切下料或采用热切割方法切割号料。常用的热切割方法有火焰切割、等离子弧切割和激光切割。激光切割多半用于薄板的精密切割。等离子弧切割主要用于不锈

钢及有色金属的切割，空气等离子弧切割由于成本低亦用于碳钢的切割。水下等离子弧切割用于薄板的下料，具有切割精度高且无切割变形的优点。

不锈钢板剪切下料时应注意切口附近的冷作硬化现象，此硬化带的宽度一般为 1.5~2.5mm。由于冷作硬化对不锈钢的性能有严重的不利影响，此硬化带应采用机械加工方法去除掉。

合金总的质量分数超过 3% 的高强度钢和耐热钢厚板热切割时，切割表面会产生淬硬现象，严重时会导致形成切割裂纹。切割裂纹形成的原因不外乎是切口的淬硬组织加上切割应力。厚板切割时钢板轧制的残余应力会加速表面切割裂纹向钢板的纵深方向扩展。因此，低合金高强度钢和耐热钢厚板切割前，应将切口的起始端预热 100~150℃，板厚超过 70mm 时，应在切割前将钢板作退火处理。

采用数控切割机下料，可以省去划线这道工序，同时还可提高切割的精度。通过计算机合理套裁，可大大提高材料的利用率，这是一种值得推广的现代化自动切割设备。

#### 1.4 坡口加工

为使焊缝的厚度达到图样规定的尺寸或获得全焊透的焊接接头，接缝的边缘应按板厚和焊接工艺方法加工成各种形式的坡口。最常用的坡口形式为 V 形、双 V 形、U 形及双 U 形坡口。坡口加工可以采用机械加工或热切割法。V 形坡口和双 V 形坡口可以在机械气割下料时，采用双割炬或三割炬同时完成坡口的加工，如图 1-2 所示。

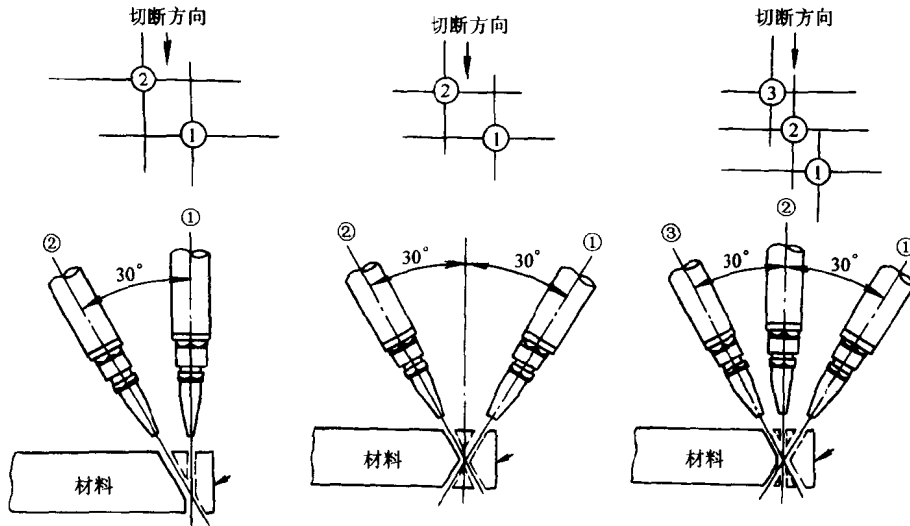


图 1-2 坡口切割方法

钢板边缘坡口的机械加工可采用专用的刨边机、铣边机，也可采用普通的龙门刨床加工。管子端部的坡口加工则可采用气动和电动的管端坡口机。大直径筒体（直径 600mm 以上）环缝的坡口加工可采用大型边缘车床。

坡口加工的尺寸公差对于焊件的组装和焊接质量有很大的影响，应严格检查和控制。坡口的尺寸公差一般不应超过  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

不锈钢、有色金属和淬硬倾向高的合金钢焊件边缘应采用机械加工方法加工坡口。具有

较高淬硬倾向的合金钢焊件，如采用热切割法加工坡口，则坡口表面在热切割后应作表面磁粉探伤。

### 1.5 成形加工

大多数焊接结构，如锅炉压力容器、船舶、桥梁和重型机械等，许多部件为达到产品设计图样的要求，焊接之前都经过成形加工。成形工艺包括冲压、卷制、弯曲和旋压等。

圆筒形和圆锥形构件，如压力容器的筒体和过渡段、锅炉锅筒、大直径管道等都是采用不同厚度的钢板卷制而成的。卷制通常在三辊筒或四辊筒卷板机上进行，厚壁筒体亦可采用特制的模具在水压机或油压机上冲压成形。筒体的卷制实质上是一种弯曲工艺。在常温下弯曲，即所谓冷弯时，工件的弯曲半径不应小于该种材料所特定的最小允许值，对于普通碳素结构钢（简称碳素钢），弯曲半径不应小于  $25\delta$ （ $\delta$  为板厚），否则材料的力学性能会大大降低。冷卷的筒体，当其外层纤维的伸长率超过 15% 时，应在冷卷后作回火处理，以消除冷作硬化引起的不良后果，通常板厚小于 50mm 的钢板可采用冷卷，大于 50mm 的钢板应采用热卷或热冲压成形。

正常的热卷和热冲压温度应选择在材料的正火温度，以保证热成形后材料仍保持标准规定的力学性能。但是，在许多情况下，往往由于设备功率不足等原因，将工件加热到超过材料正火温度的高温，而导致晶粒长大，力学性能降低。对于这种超温卷制或冲压的筒体，应在卷制或冲压完成后，再作一次常规的正火处理，以恢复其力学性能。当卷制某些对高温作用较敏感的合金钢板时，应制备母材金属试板，且随炉加热并随工件同时出炉，以检验母材金属经热成形后的力学性能是否符合标准的规定。

压力容器、锅筒、储罐等球形封头、椭圆形封头、顶盖、球罐的球瓣通常采用水压机或油压机在特制的模具上冷冲压或热冲压而成。冷冲压和热冲压对冲压件材料性能的影响类似于冷卷和热卷。当冲压后的工件冷变程度超过容许极限或冲压温度超过材料正常的正火温度时，冲压后工件应作相应的热处理，以恢复材料的力学性能。奥氏体不锈钢冷冲压件，冲压后应作固溶处理。

在未配备水压机或油压机的制造厂中，壁厚小于 32mm 的碳素钢封头和壁厚小于 25mm 的不锈钢封头可以采用旋压成形的方法制造。旋压成形是将工件在旋转过程中利用紧靠工件内外壁的两个辊轮加压，按预定的要求将工件旋压成形的工艺。与冲压相比，这种工艺具有设备功率小，适应性强，加工周期短，成形质量好，表面粗糙度值小等优点。

封头的旋压可按工件的壁厚采用冷旋压和热旋压法。冷旋压成形又分二步法和一步法两种。厚壁封头的热旋压通常采用冲旋联合成形法。二步冷旋压成形法首先是将毛坯在压鼓机上压成碟形，即把封头的中心圆弧部分压制成所要求的曲率，然后再在旋压机上翻边，把封头的周边旋压到所要求的球面。

现有旋压机可旋压的最小封头直径为 1500mm，最大封头直径为 5200mm。

在薄壁金属结构中，许多薄板元件为增加惯性矩而设计成

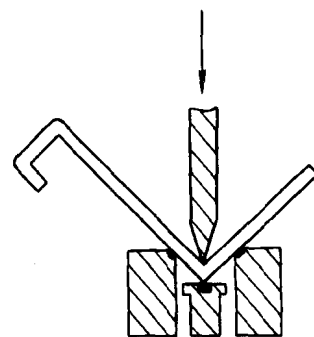


图 1-3 板料三点折弯原理

直角形、矩形和棱形截面，这些元件通常采用折边机或折弯机进行折弯成形。最常用的折弯

法为三点折弯法，即凹模槽口为2点，上柱销为1点，如图1-3所示。如要求较高的折弯精度，则可选用数控折弯机折弯成形。

在许多焊接结构中大量采用管件和型材，同时也要求其按设计图样弯曲成形。

管材的弯曲可按管子的直径、壁厚和成形精度要求分别采用手动、电动、液压传动以及数控液压弯管机。数控系统弯管机不仅可作平面弯曲，而且也能完成三维空间弯曲。最大弯曲角度可达 $195^\circ$ ，最小弯曲半径为 $1.2D$ （ $D$ 为管子外径）。大直径厚壁管通常在大型弯管机上热弯成形。热弯的加热温度不应超过材料正常正火温度的上限。

型材的弯曲可采用三辊或四辊型材弯曲机，其工作原理与三辊、四辊卷板机相似。三辊型材弯曲机的最小弯曲半径为400mm。

## 1.6 装配与焊接

装配与焊接是决定产品最终质量的关键性工序，工厂必须为每一部件编制装配工艺卡和焊接工艺规程。专职检查员应严格按上列工艺文件检查装配质量和焊缝质量。

焊件的装配不仅要求部件的尺寸符合设计图样的规定，而且要保证接头的装配及定位焊缝的质量符合产品焊接技术条件的要求。影响焊缝质量最重要的接头装配尺寸是：

1) 接头的间隙，间隙的大小与所采用的焊接工艺方法有关，间隙的装配尺寸允差不应大于焊接工艺规程规定值的 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

2) 接头错边，即两相接边缘偏离中心线的差值。以锅炉锅筒为例，纵缝或封头拼接缝两边钢板边缘的偏差不应大于名义板厚的10%，且不超过3mm，当板厚大于100mm时，不超过6mm；环缝两边钢板的边缘偏差不应大于名义板厚的15%，且不超过6mm，当板厚大于100mm时，则允差不超过10mm。

为保证装配的质量，在装配前应按图样和有关工艺文件严格检查待装配零部件的加工尺寸和焊缝坡口尺寸。在装配过程中应采用相应的装配工夹具组装定位，不应采取强制装配。当发现零部件装配尺寸不符合图样要求时，不容许用手工气割修正，应退回原定工序工位修正合格后再组装。

采用定位焊缝组焊时，尽量采用拉肋板定位焊，避免在焊接坡口内用定位焊加固。如因条件限制，必须在焊接坡口内用定位焊加固装配时，则应在焊接前，用电弧气刨或砂轮打磨清除定位焊缝。如将定位焊缝保留作为产品焊缝的一部分时，则定位焊应由考试合格的焊工担任，并采用与焊接产品焊缝相同的焊条焊接。

当组焊高强度钢和其它低合金钢焊件时，如采用拉肋板直接在焊件上进行定位焊时，则必须采用低氢型焊条，并在定位焊区加局部预热，预热温度不得低于焊接工艺规程对该种钢所规定的预热温度。

装配-焊接顺序可分整装-整焊，部件装配焊接-总装配-焊接和交替装焊三种类型。主要按产品结构的复杂程度和生产批量选定。整装-整焊方式是将所有零部件按图样要求组焊定位焊加固好，然后转入焊接工序，将全部焊缝焊完。这种装焊方式适用于结构简单、便于采用各种装配工夹具组焊定位、生产批量较大的焊接结构。

部件装配焊接-总装焊接方式是将整个结构分成若干部件，先将各部件装配焊好，然后再将各部件总装焊成产品。这种装焊方式适用于大型复杂的焊接结构，如车辆、船体和高层建筑等，分部件装焊方式也便于采用各种先进高效的焊接工艺方法和专用工艺装备。



交替装焊法是将部件、零件组装焊接，然后再将部件、零件装焊直至装焊成最终的产品。这种结构适用于特殊的复杂结构的单件小批量生产。

焊接结构的制造中，无论是零部件的焊接，还是总装焊缝的焊接，都应严格遵守评定合格的焊接工艺规程。焊工必须经专门的培训并按相应的技术监督机构制定的考试规则考试合格。这是保证焊接结构制造质量最重要的先决条件，关于焊接工艺规程的编写程序和具体内容将在第3、4章中详细论述。

### 1.7 焊后热处理

焊后热处理是焊接工艺的重要组成部分，它与焊件材料的种类、型号、板厚，所选用的焊接工艺焊接材料及对接头性能的要求密切相关，是保证焊件使用特性和寿命的关键工序。焊后热处理不仅可以消除或降低结构的焊接残余应力，稳定结构的尺寸，而且能改善接头的金相组织，提高接头的各项性能，如抗冷裂性、抗应力腐蚀性、抗脆断性、热强性等，对于某些合金钢和调质钢焊件，焊后热处理是决定接头性能的重要工序。

根据焊件材料的类别，可以选用下列不同种类的焊后热处理：

- 1) 消除应力处理。
- 2) 回火。
- 3) 正火+回火，亦称空气调质处理。
- 4) 调质处理（淬火+回火）。
- 5) 固溶处理（只用于奥氏体不锈钢）。
- 6) 稳定化处理（只用于稳定型奥氏体不锈钢）。
- 7) 时效处理（用于沉淀硬化钢）。

焊后热处理制度，如加热温度、加热速度、保温时间和冷却速度等对于常用钢种，在各种焊接结构制造规程中都有明确的规定。对于新钢种或工厂初次使用的钢种，应按钢种的类别，通过相应焊后热处理试验和接头性能检验来确定，关于焊后热处理的条件及工艺细则，将在《焊接工艺要素》所给出的具体条目中详细论述。

### 1.8 焊件的质量检查

焊件的质量主要应依靠生产全过程各工序、特别是关键工序的控制。长期的生产实践证明，这是焊件质量最可靠的控制方法，也是最经济的质量保证措施。焊件的最终质量检查，实际上是辅助性的质量控制手段。如果只强调最终的质量检查而忽视生产全过程的控制，很可能造成重大的经济损失。

不过，就目前企业的管理水平而言，焊件的最终质量检查仍然是保证焊接结构质量不可缺少的重要环节。

焊件的最终质量检查，可按产品的结构特点和技术要求，分为以下几项：

- 1) 焊接结构的外形尺寸检查。
- 2) 焊缝的外观检查。
- 3) 焊接接头的无损检查。
- 4) 焊接接头的密封性检查。
- 5) 结构整体的耐压检查。

## 6) 见证件检查。

### 1. 焊接结构的外形尺寸检查

焊接结构的外形尺寸检查是对任何形式焊接结构最基本的检查项目。结构的外形尺寸必须符合设计图样的规定。不容许存在各种结构形状的畸变，例如容器圆柱形筒体的凹陷、凸鼓、挠度超差，严重错边等；梁柱等金属结构的上拱度、旁弯量、腹板垂直度及波浪变形等。这些外形尺寸的超差都会对结构的使用特性产生不利的影 响，有的甚至会大大降低结构的使用寿命。因此，各种焊接结构的外形尺寸必须严格按图样要求进行检查。

### 2. 焊缝外观的检查

焊缝的外观检查亦称为目视检查。必要时可采用五倍以下放大镜检查。目视检查的项目主要是焊缝的外形尺寸，如焊缝宽度、余高、焊脚尺寸、焊缝有效厚度是否符合图样或标准规定，以及焊缝的外表缺陷，如咬边、焊瘤、下凹、气孔、裂纹、烧穿、溢流、未熔合和弧坑等缺陷是否超过标准规定。所有检查发现的外表缺陷，必须按相应的补焊工艺规程修正及补焊，并作重复检查，焊缝的外观检查对于任何焊接结构来说都是一项不可缺少的检查程序。因为表面缺陷是一种张开型缺陷，如裂纹、未熔合和咬边等容易在残余应力和工作应力的作用下扩展成危险性缺陷，故焊缝外观检查应仔细地进行。合格标准按有关国标或产品技术条件执行。

### 3. 焊接接头的无损检测

焊接接头的无损检测的目的是探测目视检查不能或无法发现的各种缺陷，如表层的微裂纹、夹渣以及各种内部缺陷。无损检测的方法有磁粉探伤、渗透探伤、涡流探伤、超声波探伤和射线探伤法（X 射线、 $\gamma$  射线）等。前三种方法用于表面和表层缺陷的检测，后两种方法用于接头内部缺陷的检测。

焊接结构无损检测的要求取决于结构的运行条件和重要性。承受高温高压的锅炉受压部件和容器，低温或腐蚀介质下工作的容器、管道以及重载焊接结构均要求作无损检测探伤。受检焊缝长度占产品焊缝总长度的比例，即所谓检查比率，取决于焊接结构运行参数的级别。焊接结构，如锅炉和压力容器安全技术监察规程或产品技术条件对此均有明确的规定。所检测缺陷的评定则可按相应的国家标准进行。射线探伤检测的缺陷应按 GB—3323—87《钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级》标准评定。超声波探伤则按 GB—11345《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果的分级》标准评定。磁粉探伤缺陷磁痕可按 JB/T 6061—92《焊缝磁粉检验方法和缺陷磁痕的分级》评定，渗透探伤缺陷痕迹可按 JB15G/T《焊缝渗透检验方法和缺陷痕迹的分级》评定。合格级别按相应的产品技术条件执行。

上述各种无损检测法由于其工作原理不同，对各种缺陷检测的能力和对各种材料的适用性不一，表 1-1、表 1-2 和表 1-3 对比了各种无损检测法的检测特性。对于各种不同的焊接结构，可按结构特性选择最合理的无损检测方法。例如为检查奥氏体钢焊缝的外观缺陷，选择渗透探伤法最合适。某些无损检测法虽然都适用于同一种结构材料，但对各种焊接缺陷的检测能力差别较大。例如射线探伤对裂纹、夹层的检测力较差，而对气孔、夹渣之类缺陷的检测相当灵敏。超声波探伤则相反，对裂纹和夹层之类缺陷的检测力很强，而对气孔和圆形夹渣反应都不灵敏。因此，对于要求严格控制缺陷的重要焊接结构，如核能容器和深低温容器等，往往对同一条焊缝采用两种或两种以上的无损检测法，以发现焊缝中任何不容许的缺陷。