

钢 结 构 焊 接 从 书



船舶钢结构 焊接技术

许小平 周飞霓 卢本 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

钢结构焊接丛书

船舶钢结构焊接技术

许小平 周飞霓 卢本 编著



机械工业出版社

本书全面阐述了船舶建造中的先进焊接工艺方法与自动化焊接设备的应用技术。从工艺特点与焊接设备的选用角度出发,重点介绍了双丝埋弧焊工艺与各种类型的双丝埋弧焊设备,CO₂垂直、横向气电自动焊工艺与设备,药芯焊丝CO₂气体保护焊接工艺与设备,气电立焊工艺与设备。还包括船体建造中的实用性单面焊双面成形焊接工艺方法、船舶管系中的全位置TIG填丝焊工艺与全位置TIG填丝焊机。本书还对核动力船舶中核动力装置结构的焊接工艺方法与自动化焊接设备作了重点介绍。

本书可供船舶建造业相关技术人员、工人参考,也可作为船舶工程技术专业、本科生及高职高专的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶钢结构焊接技术/许小平,周飞霓,卢本编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 11

(钢结构焊接丛书)

ISBN 978-7-111-28665-3

I. 船… II. ①许…②周…③卢… III. 船舶结构: 钢结构—焊接工艺
IV. U671. 83

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第200867号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:高依楠 版式设计:霍永明

封面设计:陈沛 责任校对:姜婷 责任印制:洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2010年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13.5印张·275千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28665-3

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

船舶制造业目前在我国是具有综合比较优势、较早参与国际竞争并取得优异成绩的产业之一，船舶制造业也是技术密集型、劳动密集型和资金密集型产业，发展造船业对于带动钢铁、电子、机械制造等相关产业的发展，对于提高装备制造业的总体素质以及促进就业都会产生深远的影响。

由于世界航运业对运输安全性更加重视，部分老旧船型报废速度加快，使得国际船舶市场对新船的需求正处于一个历史高峰期，船市价格看好，加上国家政策的支持，国内造船企业面临着又一个难得的发展机遇。2008年上半年，我国造船业就完成了1 024万t载重量，同比增长36%，约占同期全球造船总吨位的26%，说明我国已跨入世界造船大国行列。

我国造船企业已全面掌握油船、散货船、集装箱船三大主流船型的设计建造技术，并成功进入大型液化天然气船（LNG）、30万t级浮式生产储油船（FPSO）、大型自升式钻井平台等高端市场；我国船舶产品复杂度系数已高于日本；我国外高桥、大连船舶重工、江南长兴等三家造船企业已迈入世界造船十强行列。我国船舶出口已占造船总量的80%以上，船舶出口到100多个国家和地区，成为世界排名前列的船舶出口大国。

由于船厂的产品特点是多品种、小批量，产品结构和材料变化频繁。近年来随着转换现代造船模式，大力推进区域造船法，使船舶焊接技术也发生了较大的变化，其中比较突出的是一些重点骨干船厂先后都引进了国外先进的平面分段装焊流水线，采用了拼板工位多丝埋弧焊单面焊双面成形新工艺、新装备，同时在按区域造船的理论指导下，对船体的平面分段构架的装焊也采用了半自动或自动气体保护角焊工艺，使

焊接效率大大提高。

船舶焊接技术是船舶工业的主要关键工艺技术之一。目前世界各主要造船企业在 20 世纪 90 年代中期已普遍完成了一轮现代化改造，在此基础上又陆续启动了新一轮现代化改造计划。投资目标很显然集中于焊接高新技术，投资力度进一步加大，大量采用全新的造船焊接工艺流程、高度柔性的自动化焊接生产系统和先进的焊接机器人技术，以保证这些造船强国在国际竞争中具有独特的技术优势。

基于上述国内外造船业高速度发展现状，本书以图文并茂的形式，较为全面地阐述现代船舶建造工业中采用的先进、高效焊接工艺方法与设备，其中重点介绍的内容如下：

- 1) 双丝埋弧焊工艺与各种类型的双丝埋弧焊设备（特点与选用）。
- 2) CO₂ 垂直、横向气电自动焊工艺与设备（特点与选用）。
- 3) 药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊接工艺与设备（特点与选用）。
- 4) 气电立焊焊接工艺与设备（突出气电立焊工艺方法介绍与设备选用）。
- 5) 船体建造中的实用单面焊双面成形焊接工艺方法。
- 6) 船舶管系中的全位置 TIG 填丝焊工艺与全位置 TIG 填丝焊管机（特点与选用）。
- 7) 由于压水堆型核动力装置是核动力舰船建造的核心技术，而焊接技术又是核动力装置中重大结构（核反应堆结构、蒸汽发生器结构、稳压器结构、压水泵结构等）的关键技术，基于这一观点，本书中也重点介绍了船舶核动力装置重大结构的关键焊接技术：

① 船舶核动力装置的窄间隙埋弧焊工艺与设备。

② 船舶核动力装置的“马鞍形”焊缝的焊接工艺与设备。

本书的编著是几位作者在搜集大量国内外现代船舶焊接制造资料的基础上，对多年从事船舶焊接工艺设备教学与科研心得的总结。

本书的技术实用性强，为造船业的广大焊接技术人员和船厂的一线焊接工人开拓视野，了解世界造船业的先进焊接技术应用现状提供了一本具有较强综合性的资料，同时也可作为与造船和船舶核动力相关的大学本科专业及相关的职业技术学院的教学参考书。

编者

目 录

前言

第 1 章 船舶建造备料与加工	1
1.1 板、管材切割和焊接坡口加工	1
1.1.1 气体火焰切割	1
1.1.2 等离子弧切割	3
1.1.3 激光切割	6
1.1.4 焊接坡口加工	7
1.2 板材与型钢的辊压成形加工	10
1.3 弯管	11
1.4 特大铸件的锻造加工	12
第 2 章 现代弧焊设备与工艺	16
2.1 埋弧焊工艺方法	16
2.1.1 单丝埋弧焊	16
2.1.2 双丝埋弧焊	17
2.1.3 多丝埋弧焊	21
2.1.4 冷、热丝填充埋弧焊	23
2.1.5 窄间隙埋弧焊	23
2.1.6 窄间隙双丝埋弧焊	29
2.1.7 带状电极埋弧堆焊	29
2.2 现代埋弧焊设备	30
2.2.1 埋弧焊焊头	31
2.2.2 埋弧焊机的机架	39
2.2.3 现代埋弧焊接电源与控制系统	50
2.3 气电焊工艺与设备	54
2.3.1 现代 CO ₂ 气体保护焊设备选用要点	54
2.3.2 药芯焊丝 CO ₂ 气体保护焊工艺与设备特点	61
2.3.3 钨极氩弧焊 (TIG) 设备选用要点	62
2.3.4 等离子弧焊接、切割设备选用要点	67
2.3.5 气电立焊 (EGW) 工艺与设备要点	69
2.4 数字控制弧焊电源	73
2.4.1 数字控制弧焊电源概述	73

2.4.2	数字控制弧焊电源的优点	74
2.4.3	数字控制弧焊电源的结构	78
第3章	船体焊接技术	80
3.1	船体建造方法概述	80
3.1.1	船体的零部件	80
3.1.2	船体分段的焊装	81
3.1.3	船体建造方法	82
3.2	船体的现代焊接工艺方法与应用	91
3.2.1	埋弧焊工艺方法	91
3.2.2	CO ₂ 气体保护焊工艺方法	94
3.3	潜艇壳体的组装与焊接技术	103
3.3.1	潜艇壳体结构	103
3.3.2	潜艇压力壳体的焊接	107
3.3.3	潜艇艇体的总段组焊	111
3.3.4	潜艇艇体建造模型	115
第4章	船舶管系焊接技术	118
4.1	船舶管系工程概述	118
4.1.1	船舶管系焊接在船舶建造中的地位	118
4.1.2	船舶管系的分类	118
4.1.3	现代船舶管系建造模式	125
4.1.4	现代船舶对焊管的质量要求	126
4.2	船舶自动电弧焊管	128
4.2.1	船舶管道的车间焊接	128
4.2.2	船舶管道的现场焊接	131
4.3	全位置自动焊管机	131
第5章	船舶核动力结构焊接技术	148
5.1	船舶核动力推进系统原理	148
5.2	压水核反应堆一回路的结构	150
5.3	船用压水堆一回路结构	159
5.4	核动力结构的关键制造技术	168
5.4.1	特大件锻造技术	168
5.4.2	厚板热卷技术	170
5.4.3	厚板焊接坡口加工技术	170
5.5	核动力装置的厚板焊接技术	173
5.5.1	窄间隙埋弧焊技术要点	173
5.5.2	核动力厚板焊接设备	179

5.6 核动力装置的焊管技术	184
5.7 核电压力容器的结构材料	187
5.7.1 低合金耐热钢	187
5.7.2 镍基高温合金	188
5.7.3 不锈钢	190
5.7.4 核电典型结构材料图解	192
5.8 典型核电压力容器焊接实例	195
5.9 核电焊接重大问题	200
5.9.1 奥氏体不锈钢的焊接性问题	200
5.9.2 核电结构异种钢焊接问题	205
参考文献	207

第 1 章 船舶建造备料与加工

1.1 板、管材切割和焊接坡口加工

建造船体和船舶动力设备须将各种板材、型材、管材通过切割和机加工，制成几何形状和尺寸符合要求的焊接备料。船体建造备料加工时，工作量最大的是板材的切割和坡口加工。

现代船厂中，板材切割工艺与设备中应用最多的是气体火焰切割工艺与设备、等离子弧切割工艺与设备、激光切割工艺与设备。

1.1.1 气体火焰切割

气体火焰切割（图 1-1、图 1-2）是造船最常用的金属热切割方法。它是利用可燃气体同氧混合燃烧所产生的火焰来熔化、分离材料，属于热切割，又称气割或火焰切割。可燃气体一般用乙炔气，也可用石油气、天然气或煤气。用乙炔气的切割效率高、质量好，但成本较高。

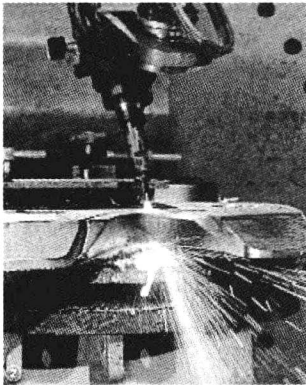


图 1-1 气体火焰切割

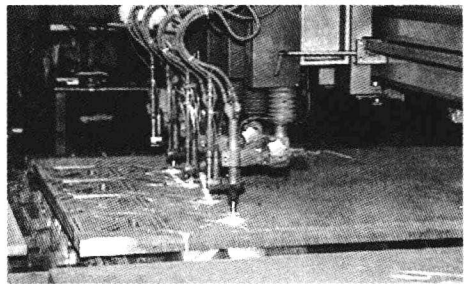


图 1-2 四头气体火焰切割机

气割时，火焰在起割点将材料预热到燃点，然后喷射氧气流，使金属材料剧烈氧化燃烧，生成的氧化物熔渣被气流吹除，形成切口。气割用的氧纯度应大于 99%。

气割设备主要是割炬和气源。割炬是产生气体火焰，传递和调节切割热能的工具，其结构影响气割速度和质量。

船体建造的大批量下料，多用装有多个割炬的计算机数字控制自动气割机

(图 1-3、图 1-4)。

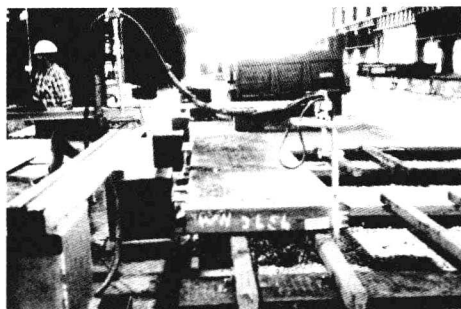


图 1-3 厚钢板的气体火焰切割

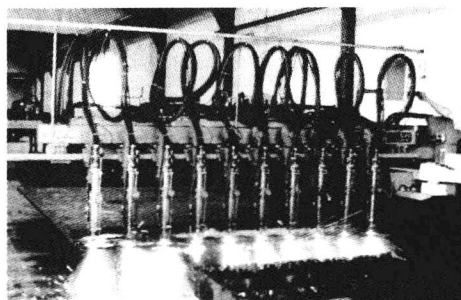


图 1-4 十头气体火焰切割机

通过精心设计气体火焰切割枪，现代的数控切割机可一次在钢板上开出 X 形焊接坡口（图 1-5、图 1-6），从而简化很多后续的钢板焊接坡口加工工作量。

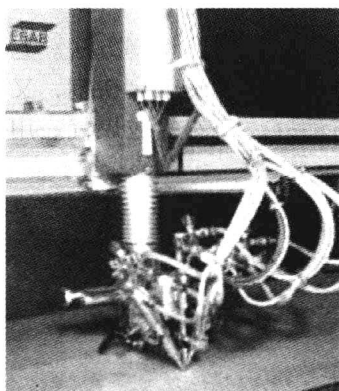


图 1-5 数控气体火焰 X 形坡口切割机

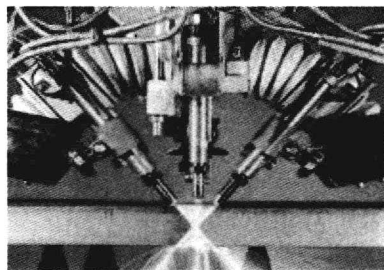


图 1-6 X 形坡口切割枪的布置

自动气割机的机构不仅常采用图 1-7 所示的龙门架 x - y 坐标驱动机构形式，还

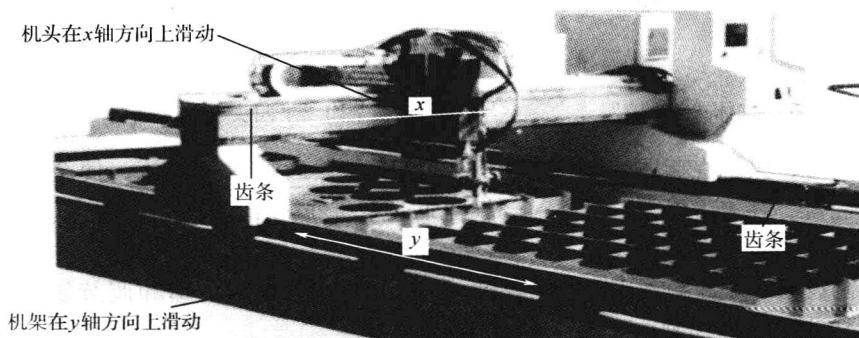


图 1-7 龙门架式 x - y 坐标驱动机构

有图 1-8 的轻便小车式，而后者的最大优点是轻便灵活，特别适用于船台或车间内需频繁更换工作场地的情况。

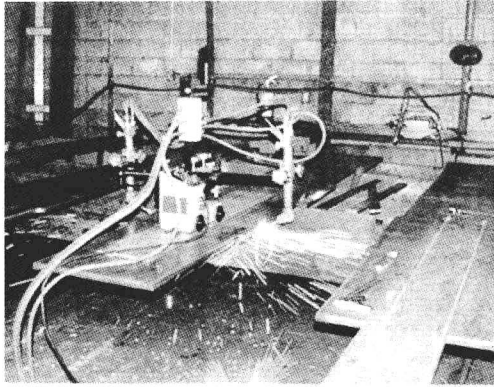


图 1-8 轻便小车式火焰切割机机构

除了自动气割工艺，手工气割由于使用灵活方便，也是造船零星下料、废料解体、安装和拆除工作中不可缺少的工艺方法。

气体火焰切割的主要缺点：一是切口质量不够高，二是一般只适用于低碳钢和低合金钢材料。

1.1.2 等离子弧切割

等离子弧切割（图 1-9）是一种热切割，是以高温、高速等离子弧焰流（图 1-10）为热源，以压缩空气或其他切割气体为工作气体，将被切割的金属局部熔化、并同时用高速气流将已熔化的金属吹走（图 1-11、图 1-12）形成狭窄切缝。

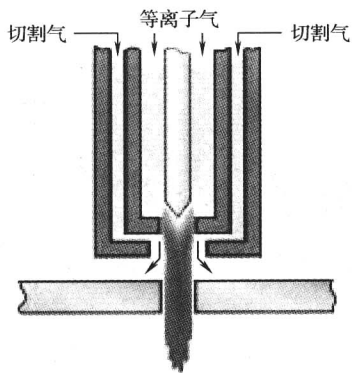


图 1-9 等离子弧切割原理图

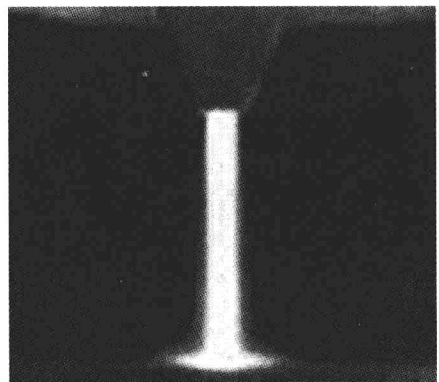


图 1-10 等离子弧焰流

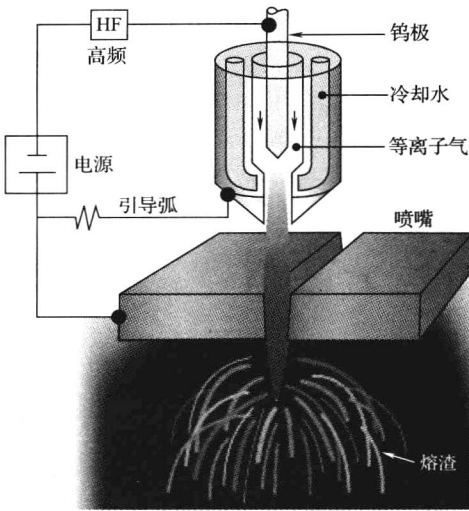


图 1-11 等离子弧的产生

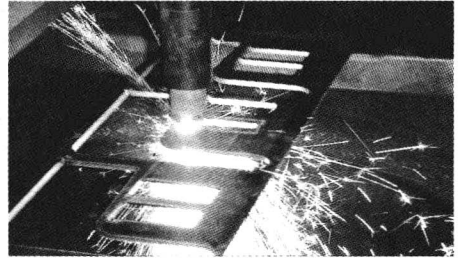


图 1-12 等离子弧切割实况

等离子弧柱的温度极高，可达 $10\,000 \sim 30\,000^{\circ}\text{C}$ ，远远超过了所有金属或非金属材料熔点，因此等离子弧的切割过程不是依靠氧化反应，而是靠熔化来切割材料的；因而其切割的适用范围比气体火焰切割大得多，几乎能切割所有的金属。

由于等离子弧柱的挺直度（图 1-13）是所有类型电弧中最好的，加之弧柱高温和等离子弧焰流高速的特点，使其切口窄（中薄板材）、切割面的质量好、切割速度快、热影响区小、工件变形小。因此在切割不锈钢、钛合金及有色金属材料时，选用等离子弧切割不但能达到满意的切割质量，还能获得比气体火焰切割增加数倍的经济效益，因此等离子弧切割广泛应用于造船业的中厚板不锈钢材料切割（图 1-14）。

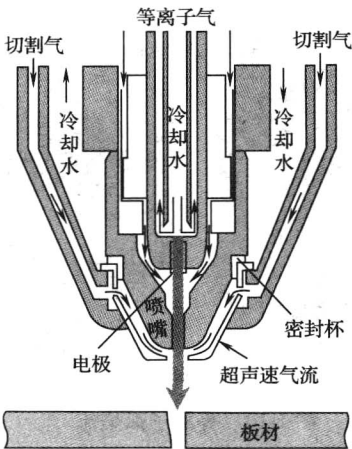


图 1-13 等离子弧柱的挺直度

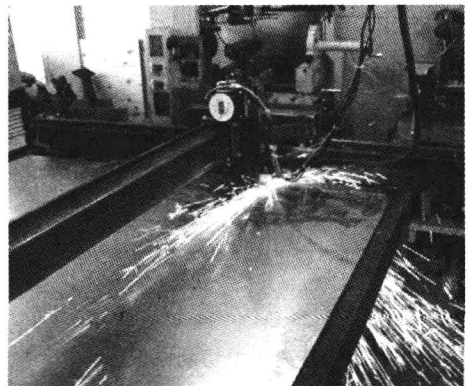


图 1-14 等离子弧切割不锈钢

在军用船舶建造中（战舰、航空母舰、潜艇），由于大量中厚板高质量的备料要求，等离子弧切割几乎成为板材切割的首选方法。例如，图 1-15 中，一艘美国航空母舰（CVN21）的甲板材料厚度为 70mm，就选择了伊萨公司的数控等离子弧切割。图 1-16 为等离子枪斜切坡口。

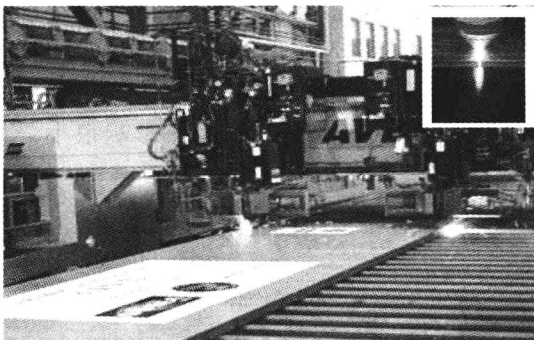


图 1-15 美航母 CVN21 甲板料
(厚度为 70mm) 的数控等离子弧切割 (伊萨)

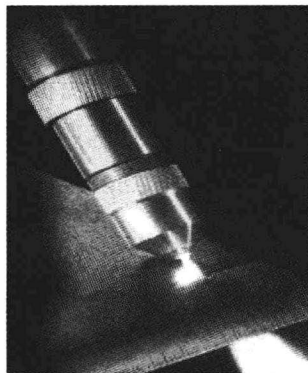


图 1-16 等离子枪斜切坡口

现代的数控等离子弧切割机，也多采用图 1-7、图 17 所示的龙门架式 $x-y$ 坐标驱动机构。等离子弧切割枪还可安装于工业机器人的手臂上，构成等离子弧切割机器人（图 1-18），成为一种更为灵活机动的自动化等离子弧切割设备。用等离子弧切割枪还可构成管孔或管接头切割设备。

等离子弧切割的一个主要缺点是切割时产生的粉尘大，对操作者的身体健康有一定影响，为此，对于大量应用等离子弧切割场合，宜采用水下等离子弧切割工艺（图 1-17）。



图 1-17 水下等离子弧切割 (ALENGER 公司)

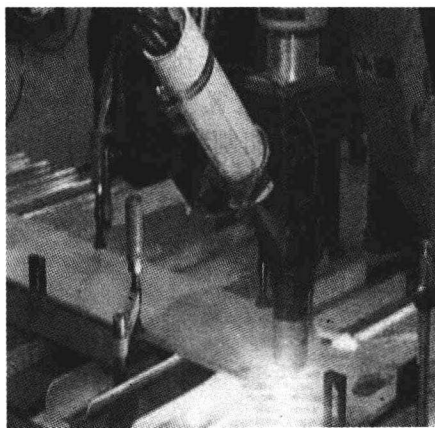


图 1-18 等离子弧切割机器人

1.1.3 激光切割

激光切割（图 1-19）是利用高功率密度的激光束扫描材料表面，在极短时间内将材料加热到几千至上万摄氏度，使材料熔化或汽化，再用高压气体将熔化或汽化物质从切缝中吹走（图 1-20），达到切割材料的目的。激光束聚焦成很小的光点后，使焦点处达到很高的功率密度。这时光束输入的热量远远超过被材料反射、传导或扩散的部分，材料很快加热至汽化程度，蒸发形成孔洞，随着光束与材料相对线性移动，使孔洞连续形成宽度很窄的切缝，因此切边受热影响很小，工件基本没有变形。

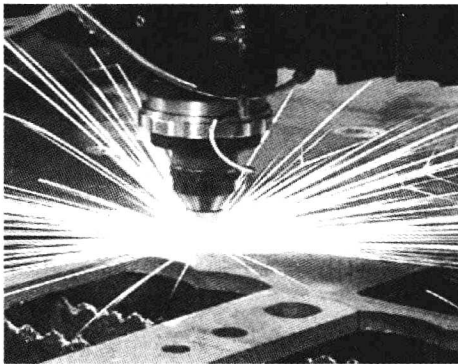


图 1-19 CO₂ 激光器（5kW）切割 8mm 厚钢板

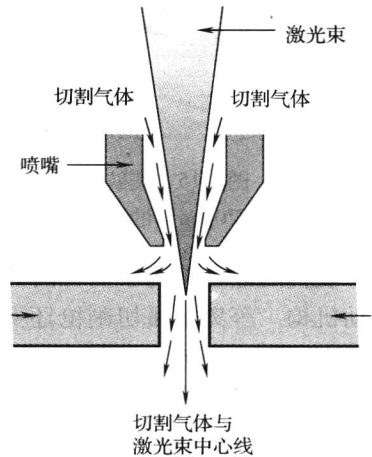


图 1-20 激光切割原理

激光切割具有以下特点：

- 1) 激光切割的切缝窄，工件变形小（图 1-21）。激光切割的切径宽度一般小于 0.5mm，但也有达到 1mm 左右的。切径宽度与工件的材料及厚度、激光束的功率、焦距及焦点位置、激光束的直径、喷吹气体的压力及流量等多种因素有关。
- 2) 因激光切割无毛刺、皱折，精度高（图 1-22），从而优于等离子弧切割、气体火焰切割等常规切割方法，而且切割后的工件无需清理。

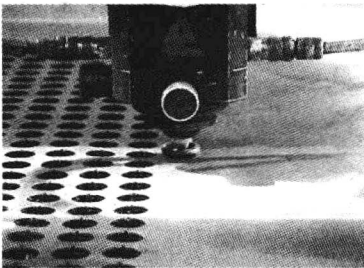


图 1-21 激光切割薄板变形小

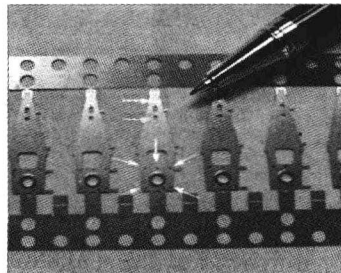


图 1-22 激光精密切割的工件

3) 容易实现自动化激光切割。对许多船舶配件制造行业来说, 由于现代微机数控三维激光切割系统(图 1-23)、激光切割机器人系统(图 1-24)可以高速度切割不同形状与尺寸的工件, 从而它往往比冲切、模压工艺更被优先选用。

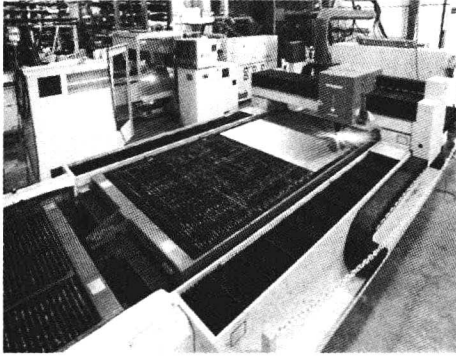


图 1-23 数控 CO₂ 激光切割机

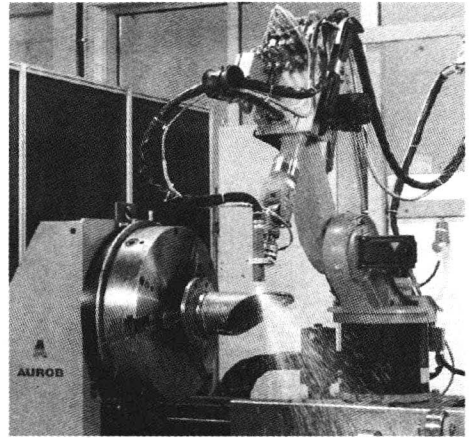


图 1-24 激光切割机器人系统

图 1-25 所示的方形管壁开孔与切坡口, 一般可采用数控等离子弧切割系统。如果采用激光切割机器人系统则会得到更高的切口质量。

现代的气体激光器的功率数量级已达到万瓦级, 其切割普通碳钢板的厚度可达 10 ~ 15mm, 可以预料激光切割在造船下料中会有越来越广泛的应用。

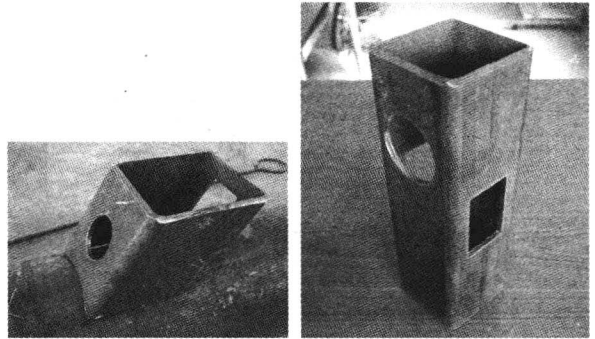


图 1-25 方形管壁开孔与切坡口

1.1.4 焊接坡口加工

焊接坡口加工是船舶焊接结构中的一项目大而繁琐的工程, 不论在船体焊接还是船舶动力焊接工程中, 都要保证高质量的焊接加工坡口。

1. 直坡口刨边机加工

长板刨边机(图 1-26)为船体拼板加工直缝焊接坡口最常用的设备; 图 1-27 所示的龙门式平厚板刨边机则是船舶动力压力容器制造的必需设备; 移动式刨边机(图 1-28)有灵活机动的特点; 如果是窄板条, 则简易式窄板刨边机(图 1-29)更适用。

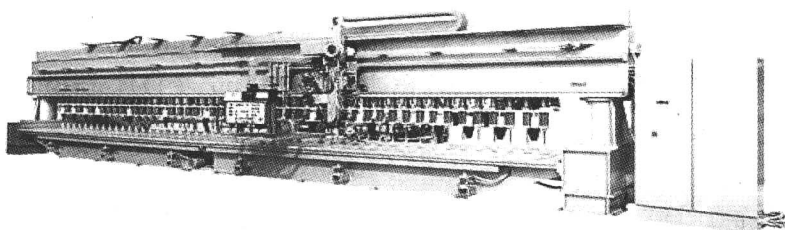


图 1-26 长板刨边机

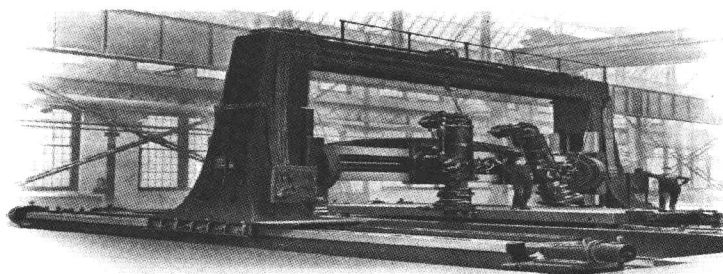


图 1-27 龙门式平厚板刨边机

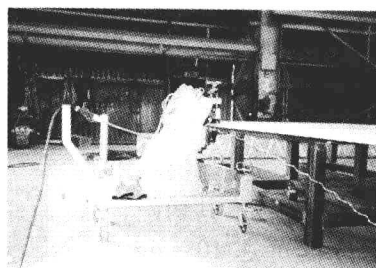
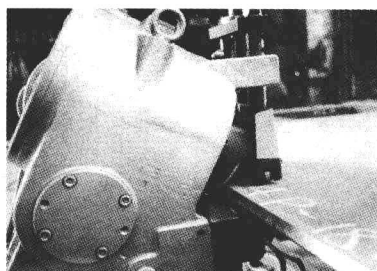


图 1-28 移动式刨边机

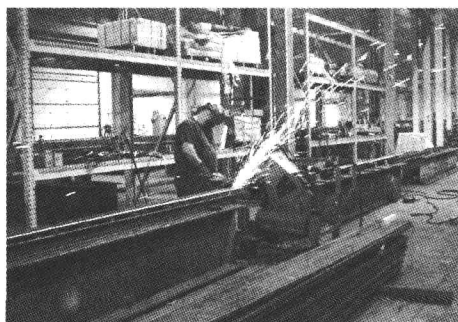


图 1-29 简易式窄板刨边机

2. 管坡口机加工

管坡口机加工中，几乎采用了所有的冷机加工方法，如车、刨、镗、铣、磨削等，如图 1-30 ~ 图 1-35 所示。

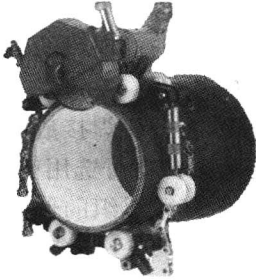


图 1-30 管头（直口）刨边机

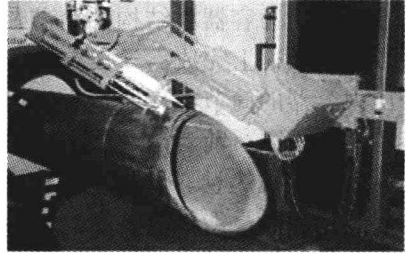


图 1-31 管头（斜口）刨边机

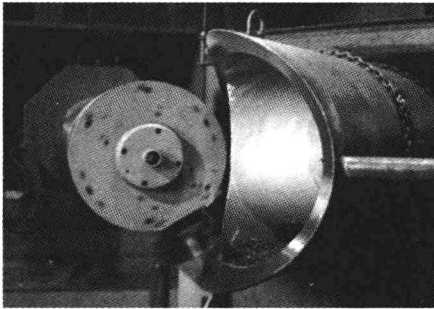


图 1-32 子管坡口的磨削加工

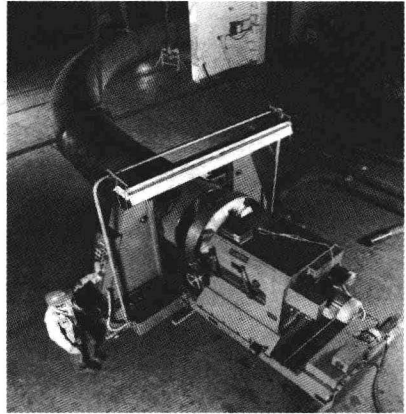


图 1-33 大管头的镗加工

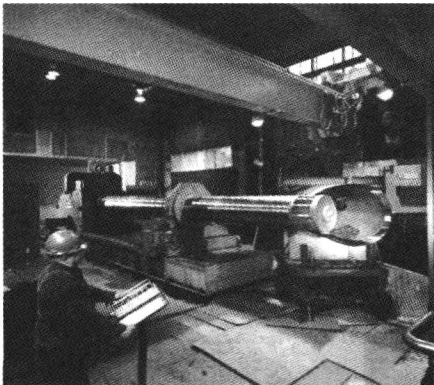


图 1-34 管坡口的铣加工

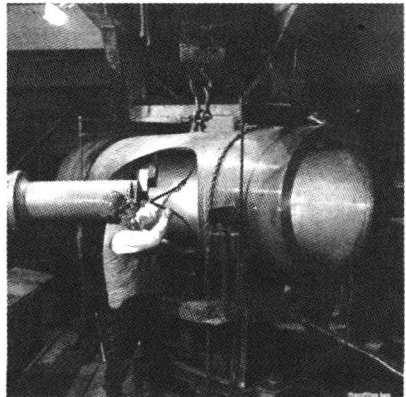


图 1-35 母管坡口的磨削加工