

高等学校教学用书

炼厂设备制造工艺学

王林征 编



石油工业出版社

资源
分享
PDG

内 容 提 要

本书为石油院校炼厂机械专业教学用书。全书按设备制造工艺过程分为毛坯的准备工序、切割及边缘加工、钢材的弯曲、封头成型、典型设备的制造、常用材料的焊接及质量检验等七章。内容着重基础理论,并适当反映设备制造的新技术。本书也可供从事设备制造的技术人员参考。

序 言

炼厂设备制造工艺学是高等石油院校炼厂机械专业的一门辅助性专业课程。本书按50学时的教学大纲编写，它包括炼厂设备制造过程的各个工序内容，并收集一些较为成熟的新的加工方法及工艺。全书内容按设备加工顺序安排。

本书手稿经华东石油学院赵正修、孙宏寿及北京化工学院郑海泉同志详细审阅，由赵正修副教授主审。

由于编者水平有限，本书还会有不少缺点。我们衷心地希望使用本书的教师、同学和读者多提意见，以便修正。

编者

一九八〇年二月

目 录

结 言	(1)
第一章 设备毛坯的准备工序	(4)
第一节 概述	(4)
第二节 净化工序	(5)
第三节 矫形	(8)
第四节 划线工序	(16)
第二章 切割及边缘加工	(25)
第一节 机械切割	(25)
第二节 氧乙炔切割	(30)
第三节 等离子切割	(35)
第四节 碳弧气刨	(40)
第五节 边缘加工	(43)
第三章 钢材的弯曲	(47)
第一节 钢板的弯卷	(47)
第二节 钢管的弯曲	(56)
第三节 型钢的弯卷	(63)
第四章 封头成型	(66)
第一节 钢板的加热	(66)
第二节 封头冲压工艺特点	(67)
第三节 冲压模具的设计	(69)
第四节 冲压力的计算	(71)
第五节 薄壁和厚壁封头的冲压	(72)
第六节 封头的旋压成型	(74)
第七节 封头的爆炸成型	(77)
第五章 炼油厂典型设备的制造	(81)
第一节 中低压设备的组对	(81)
第二节 列管式换热器的制造	(90)
第三节 球形储罐的制造安装	(98)
第四节 高压容器的制造	(103)
第六章 炼厂设备常用材料的焊接	(109)
第一节 金属材料的可焊性	(109)
第二节 焊接裂纹	(112)
第三节 焊接变形与应力	(117)
第四节 碳钢的焊接	(127)
第五节 普通低合金钢的焊接	(131)

第六节	铬钼耐热钢的焊接.....	(142)
第七节	不锈钢的焊接.....	(145)
第八节	异种钢的焊接.....	(152)
第九节	铝和钛的焊接.....	(156)
第十节	焊接结构的工艺性.....	(164)
第七章	炼厂设备的质量检验.....	(169)
第一节	焊缝的缺陷.....	(169)
第二节	焊接接头质量检验方法及内容.....	(172)
第三节	表面探伤(磁力、荧光和着色探伤).....	(174)
第四节	射线探伤.....	(176)
第五节	超声波探伤.....	(182)
第六节	声发射技术在探伤中的应用.....	(188)
第七节	全息照相在探伤中的应用.....	(189)

绪 言

一、炼厂设备制造工艺过程的特点

炼厂设备制造工艺学是研究炼厂金属设备(塔器、热交换器、储罐、金属构架及其他非标准设备)及其主要零件的制造工艺的。炼厂设备种类虽然很多,但大多是由各种尺寸的圆筒体、各种形状的封头、板式坯料以及各种杆件和弯头、弯管等构成。其他可大量生产的零件或成品,如回弯头、阀门、管件、配件等,则不属于本课研究的对象。

炼厂设备制造具有以下的特点:

(1)多属静止设备(如塔类和容器类设备)。它们与一般转动的机器的不同之处在于没有机件的运动。因此设备零部件及设备与设备之间没有相对运动的配合问题。设备的质量在很大程度上取决于焊接质量的优劣,所要求的公差往往主要是为了保证制造过程中的焊接质量,并不像一般机器制造要求零件必须具有互换性,因此,焊接是设备制造的关键。

(2)设备的外形庞大。随着设备制造技术及运输能力不断发展,制造厂预制工作量的比重已大幅度提高,这有利于设备制造质量的提高和成本的降低,但仍有些设备无法整体预制,如大形球罐直径可达16米,只能将容器的构件在工厂预制后再到现场安装和焊接。因此设备制造有现场拼装工作量大的特点。另外由于有些设备直径大而壁厚相对较薄,故在制造过程中为了保持筒体的稳定性,需加支撑。

(3)由于设备的操作条件(温度、压力及腐蚀性介质等)各式各样,故设备的用材品种较多,如在高温下工作的设备用材需要考虑抗蠕变性能,在低温下工作的设备要求材料具有高的低温韧性,对于中高压设备为了减少壁厚需要高强度钢等等。

(4)除了上述特点外,在设备制造中还必须对设备的可靠性有充分的保证。这是保证炼厂设备长周期正常安全操作的重要条件之一。为此在制造过程中及最后大多要求进行无损检验及压力试验以保证设备质量及生产安全。

二、国内外设备制造的发展概况

近年来炼厂设备制造,不但年产量有了很大的增长,而且在制造厂的布局、装备和成套水平上都有了改善和提高。现在,全国化工炼油机械制造厂有五十多个,较大的有十几个,各大区都有骨干厂,二十多年来装备了一批炼油厂、氮肥厂和化工厂等,为社会主义建设做出了应有的贡献。目前,我国已能成套制造15万吨/年、30万吨/年合成氨、1万吨/年高压聚乙烯设备。已经生产了年处理量为250万吨的炼油厂,1.5万吨/年的顺丁橡胶厂,1万吨/年维尼纶、500吨/年涤纶锦纶厂的大型设备。

目前我国设备制造厂已有的最大装备有:

冲压水压机	4000吨
卷板机	40/80×8000毫米
剪板机	30×4000毫米
矫平机	16×2500毫米
刨边机	80×12000毫米
热处理炉	4000×4000×21000毫米

滚轮架
变位器
起重吊车
检验设备

载重量400吨
载重量50吨
100吨
400千伏X光机,
15兆赫电子感应加速器,
1万大气压试验装置

自从六十年代国外工厂规模大型化以来,大型化工炼油装置不断出现,在生产中占据愈来愈大的比重。进入七十年代后,大型化的规模相对稳定。但总的趋势,仍是在稳定的基础上向更大的规模继续发展,以便降低成本。

目前,大型合成氨装置大多稳定在日产1000~1500吨(年产30~45万吨),个别的达到日产1700吨,美国正在建设日产2700吨的装置。大型乙烯装置的规模一般稳定在30~50万吨/年之间,76年10月投产的美国得克萨斯州昌奈维尤的乙烯装置,规模为59万吨/年,由鲁姆公司承建,据称是目前国外已开工的最大乙烯装置。新建大型单套炼油装置,大部分在500~800万吨/年之间,少数达1000万吨/年以上。美国埃克森石油公司炼厂在76年年底竣工投产的一套原油蒸馏装置的处理量达1225万吨/年。

目前,国外正在设计的化工炼油装置的最大规模是:合成氨90万吨/年,乙烯90万吨/年,原油常压蒸馏2500万吨/年。

70年代国外化工炼油设备制造工艺的发展以大型化为基点,具有以下特点:

(1)装备大型化 与工厂或装置规模的大型化相适应,单体设备也相应大型化。例如,大型换热器的管板厚度达550毫米,管板重量达20吨,管数超过一万根,单台重量达280吨。为适应制造大型设备的需要,容器制造厂的工艺设备也日趋增大。

(2)电子技术的应用 数控技术已在设备制造的许多工艺过程中获得应用,从而大大提高了自动化程度。例如,数控切割、数控焊接、加工管板孔的数控钻、封头的数控无胎旋压、电视监视和显象、自动跟踪、激光划线与定位、数控机械手以及焊接机械人等。

(3)焊接工艺的发展 气体保护焊由于优质、低耗、高效和全位置焊等特点,近年来发展很迅速。窄间隙气体保护焊和粗丝二氧化碳气体保护焊在厚壁容器焊接中取代了传统的埋弧焊。垂直和横向自动CO₂气体保护焊在大型储罐的现场焊接中取代了手工焊。埋弧焊最新的进展是采用多丝(双丝、三丝、四丝)、热丝、带极和大电流以提高效率,并用数控和遥控来控制电流、电压和焊接速度,用工业电视监视焊接过程。

(4)热切割比重增大 在切割和坡口加工方面的趋势是热切割(火焰切割和电弧切割)逐渐增多,机械切割逐渐减少。机械切割只限于薄板或高强度钢。热切割当前的发展方向主要是提高速度、精度和自动化程度(光电跟踪、数控、全位置)。其中尤以电弧切割发展最快,在某些领域有取代火焰切割之势。

(5)组装机械化 容器组装机机械发展较晚,1968年西德多伊策机器制造公司开始生产这种设备。近年来,美国、东德和苏联也在从事生产。西德制造的组装机机械的应用范围是:内径1.2~5.2米,长5米,壁厚6~100毫米。这种设备一般只需一人操作,机械化程度和生产率都很高。预计今后将会得到进一步发展。

(6)声发射检测技术已于生产 七十年代这一技术发展很迅速,现已进入实用阶段。美国成立了声发射技术公司,以多通道小型计算机和图象显示系统对压力容器焊缝作在用监控。日本有声发射探伤车,采用32通道系统,为用户流动服务。预计这一新技术今后将获得

更加迅速的发展。

(7)大型容器热处理有所进展 对于大型球罐的现场消除应力处理,西欧盛行容器内部直接火焰加热法,使用超声速旋转喷射火嘴,火焰喷速达360米/秒。每台球罐仅用一个火嘴,最大温差为60°C。较新的是红外和电红外加热器,通常以丙烷为燃料,以因康镍600作红外线发生体,最高温度可达1093°C。最近英国研制一种所谓表面燃烧器以磁铁固定在容器表面。据称,升温极为迅速,几秒钟内可达800~1000°C,且无需任何保温,现已在压力容器和海上采油井架的制造中获得应用。

第一章 设备毛坯的准备工作

第一节 概述

一、坯料准备包括的内容及意义

设备制造厂的任务是把金属材料或半成品制成成品。制造成品所需的一切活动和过程的综合，叫做制造过程。炼厂设备(压力容器)的制造过程可概括为备料、零件成形、组装焊接和质量检验等四个阶段。图1—1为一典型换热器壳体的制造工艺流程示意图。

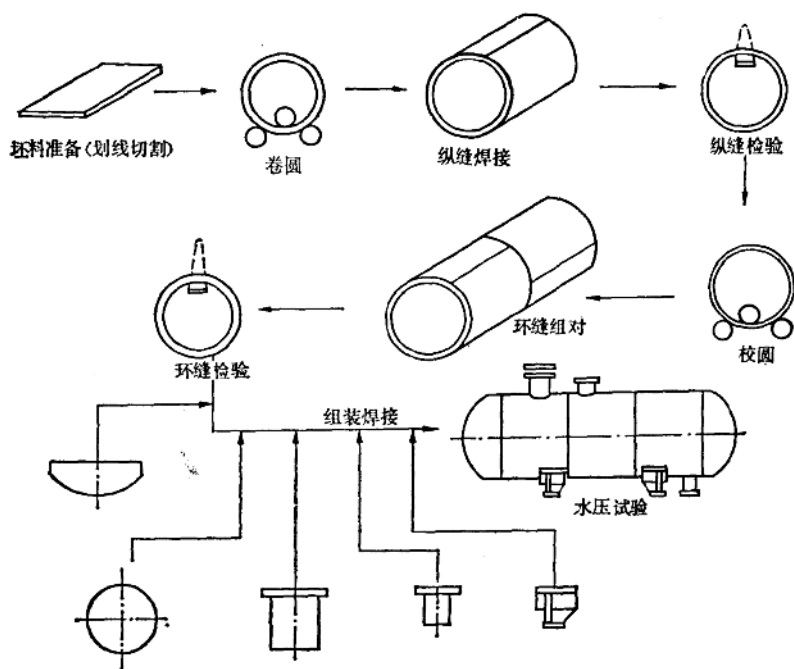


图1—1 设备制造工艺流程示意图

由图可知，制造一台设备首先遇到的问题便是根据施工图的要求，合理地进行坯料的准备工作。这项工作包括两个内容：金属坯料的初步加工，其中有钢板及型钢的矫形，焊前金属的净化及划线。

坯料的准备工作对于产品的质量、成本和以后各工序的进行都有影响。因为它是决定工序多少的关键，也是影响生产周期与成本的决定因素之一。在保证设备制造质量的前提下，有些准备工序有时也可以省去，如坯料的平直合乎要求，即可不矫形。但坯料常常由于运输、库存产生变形，局部凹凸不平。特别是我国生产的部分薄板，为了运输方便，出厂时已卷成卷状。使用前必须展开矫平。因此矫形工序，对于设备制造是一道重要工序。又如利用数字

控制切割机时,也可不必划线,或者设备的结构简单,就不必展开或排版。

坯料的选择,常与制造工艺过程有很密切的关系,它决定加工工序的多寡。如大直径的法兰,可由钢锭锻造,也可由钢板下料,还可利用扁钢弯制。如果从钢板上下料,可用大块钢板切下整体法兰,也可将法兰分成若干块,进行下料,然后焊接成一个整体法兰,如图1—2b所示。不过采用后者必将增加焊接工作量,而且制造程序也较繁。若用一块较大钢板下料则只用气割即可,但中心余料如不能再利用时就是浪费。若用扁钢弯制,则只有一个焊缝。由此可见法兰的坯料因选料不同,下料方法不同,则费用和成本也各不同。通常在满足图纸要求的条件下,坯料的选择应该根据具体条件和能否达到最高的劳动生产率,以及能否降低成本而定。

二、坯料选择中应注意的事项

在较完整的施工图中,对于设备制造所用的坯料应有规定,在制造厂可不必再行选择。

但在生产厂往往需要根据图纸技术要求、材料说明书、工厂的技术条件及供应情况综合考虑对坯料进行合理选择。准备坯料应从选用材料开始。坯料的材料必须符合使用要求。对代用材料,除要求坯料的几何尺寸,表面质量情况应符合设计要求外,还需对材料的机械性能、化学成分有确切了解。因为材料在生产过程中,有很多因素影响它的机械性能、化学成分、几何尺寸和表面质量等,所以在坯料准备工作中,要严格检查材料的机械性能和化学成分。按GB699-65的规定优质碳素结构钢材必保检验项目为:化学成分、 σ_b 、 σ_s 、 δ_5 、 ψ 、 α_k 等。按GB700-65规定普通碳素钢甲类钢必保检验项目为: σ_b 、 δ_5 、 $S \leq 0.055\%$ 、 $P \leq 0.045\%$ 、铜残余含量 $\leq 0.30\%$ 、转炉钢含氮量 $\leq 0.008\%$ 。根据用方要求可补充保证 σ_s 、冷弯、常温冲击值 α_k 。对于无缝钢管还应有涨口、压平或扳边等试验。总之,作为坯料的材料,其机械性能必须满足设备设计对材料的要求。在化学成分方面,如材料有质量证明书,则不必进行化学分析和机械性能检验,否则要做化学分析。主要是控制化学元素的含量,如P、S含量超过规定,易生冷裂和热裂纹,对焊接作业不利。对于耐热或耐腐蚀的合金钢,还应检查合金元素及其含量。对特殊设备还应做焊接试验及金相分析,或进行可焊性试验,以确保制造质量。

在坯料的选择中,应尽量使毛坯的形状接近零件的形状。在选择坯料尺寸时,要求在现有机具条件下,和充分运用标准规格钢板的条件下,尽可能地减少焊缝的数量。因为对整个设备来说,焊缝往往是一个薄弱环节,而且增加一条焊缝也增加许多生产准备工作和制造成本。尽可能避免十字形焊缝,以防应力集中。在满足这些要求的条件下,在选择坯料尺寸时,还要注意材料的节约。

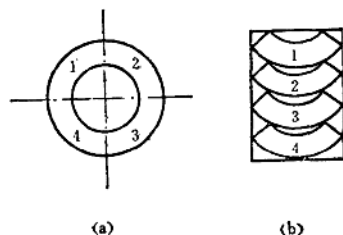


图1—2 法兰划线示意图

(a)整体下料;(b)分段下料拼焊法兰

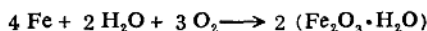
第二节 净化工序

一、净化对象

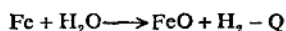
净化主要是除去材料表面的各种污物,如氧化皮(Fe_2O_3)、铁锈($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)、油污和砂子等。这些污物多是在轧制过程中或运输和存放期间产生的,因此是常见的。它们的存在

将影响设备的制造质量，尤其是影响焊缝的质量，所以必须净化。

(1) 铁锈——一种深褐色疏松物质。它是金属表面存在的主要污垢，其成分是铁的各种氧化物。铁遇到水分，受到氧化生成的产物即为锈，反应式如下



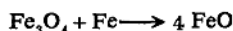
焊接时在电弧的高温作用下，锈中所含的水蒸发，而且可进一步分解。由于铁的存在，其反应如下



反应生成的氢(H_2)在电弧高温下进一步分解成原子氢(H)，原子氢溶于焊接熔池中，冷却时 H 又从液体金属中析出和聚集形成气孔。因为锈是产生氢的来源，因此可以认为锈是引起焊缝产生缺陷的重要因素，必须在焊接部分将锈清除。

(2) 氧化皮——一种黑灰色物质，其成分主要是 Fe_3O_4 ，它是在轧制或加热过程中生成的。

在焊接过程中，熔化的金属与液态的熔渣是两种不能互相混合的液态物质。在高温下， FeO 可熔解于液体的两相中，并存在以下反应



如果用 $[\text{FeO}]$ 表示熔化金属中所含的 FeO ，用 (FeO) 表示溶渣中所含的 FeO ，那么在金属中和溶渣中 FeO 数量上的分布规律是

$$\frac{[\text{FeO}]}{(\text{FeO})} = \text{常数}$$

因此，随着在溶渣中 FeO 的增多，可以预料在焊缝金属中的 FeO 量也要增加。这将会降低焊缝金属的冲击韧性。

(3) 油脂及 SiO_2 、 Al_2O_3 (砂子、矾土等)——油脂是有机物质，含有氢，在焊接时氢原子将会溶入焊缝中形成气孔。砂子和矾土在焊接过程中会变成熔渣，它使焊接熔渣的化学成分和物理性质受到影响，进而影响焊缝的质量。

总之，各种污物对焊缝质量有不同程度的影响，为了提高焊缝质量，焊前的净化工序是重要的，特别是焊缝附近区域的净化是必须的。制造设备时，除锈工作量很大，国外一些工厂常采用钢板予除锈工艺，即在钢板进厂后先进行除锈净化和涂漆，然后才转入生产流程。其优点是除锈过程便于自动化，且可做到文明生产。预除锈工艺的生产成本要比成品除锈低得多。

二、净化方法

目前净化钢材表面的方法较多。常用的有以下三种。

1. 机械净化方法

机械净化方法种类较多，其中有金属刷净化、砂轮净化、刨削净化及喷砂净化方法等。

金属刷净化是最常用的方法。这种方法用的工具简单，但劳动强度大，效率低，净化效果也不好。一般在焊补工作中使用较多。

砂轮净化是一种有效的方法，但人工掌握砂轮很不容易，劳动强度也大，可以设计简便易行的专用砂轮净化机具来代替手工打磨。这种方法净化效率也不高。

刨削加工仅用于坡口加工，若专为焊缝附近区域净化，进行刨削是很不经济的。

喷砂净化是较好的方法，尤其在大面积净化时它效率高，净化质量好。喷砂净化法是利用高速的带有棱角的石英砂对金属的冲击作用，把金属表面上的污物清除掉。

喷砂净化装置一般由四部分组成：高速送砂机构或称为喷砂枪；砂子回收设备；钢板输送设备及除尘设备。其中喷砂枪是整个喷砂装置的关键设备，它的优劣关系到净化质量和效率。

喷砂枪有两种型式。吸入式喷砂枪(图1—3)的工作原理是利用来自管1的3~5公斤/厘米²的压缩空气，在拉法尔喷嘴2处将入口压力的位能全部变为出口处的有效速度能，而使出口的气流超过音速，这时在超音速气流周围造成负压，从而使储砂器中的砂子经过管6进入吸砂室5，在砂气混合室3处砂子与压缩空气混合后以高速自喷枪口4喷出。在加压式喷砂机(图1—4)中石英砂或铁砂经阀1进入储砂器2中，压缩空气经阀3引入，并把从孔4进来的砂子(或铁砂)带走，阀5可以开闭孔4。砂子与压缩空气混合后经软管6进入喷嘴7喷出。

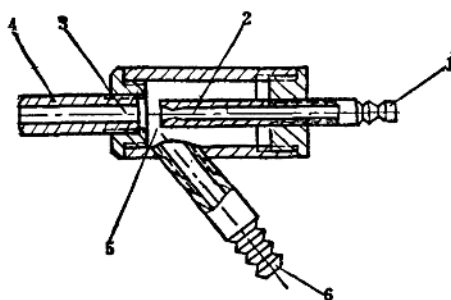


图1—3 吸入式喷砂枪示意图

1、6——管子；2——扩散式喷嘴；3——混合室；4——喷枪口；5——吸砂室

喷砂设备中压缩空气的压力约为2~3个表压。当压力超过3个表压时，石英砂将被粉碎，这时应使用铁砂。应用铁砂时，可使用5~6个表压的压缩空气。压力低于1个表压时，对于净化就不够用了。目前多用供给风动工具用的6公斤/厘米²的压缩空气作为喷砂净化的动力。空气的消耗量与压力、喷嘴直径及砂流中砂子和空气的比值等有关。图1—5为用5毫米直径的喷嘴时，空气消耗量与压力的关系。图1—6为石英砂用量及消耗量(变

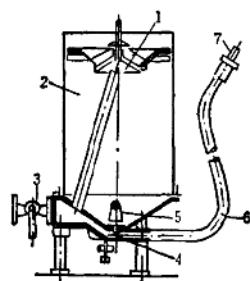


图1—4 加压式喷砂机示意图

1—阀门；2—储砂器；3—阀门；4—开孔；5—阀门；6—软管；7—喷嘴

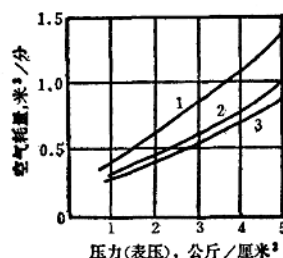


图1—5 喷嘴直径5毫米时空气消耗量曲线

1—不含砂的纯空气；2—石英砂和空气的混合物(约4公斤/米³空气)；3—金属砂和空气的混合物(约5公斤/米³空气)

为灰分)曲线。喷嘴与加工表面的距离以150~200毫米为合适。如距离过小则反而会降低生产率，原因是当加工面与喷嘴过于接近时，砂流的圆锥面积得不到充分利用而使生产率降低。

常用的石英砂与金属砂，都应选用有尖锐棱角的颗粒。在使用之前，须冲洗、干燥并过筛。砂粒的大小在0.75~2毫米之间为宜。铁砂是用白口铁制成的，它的硬度为HB500，直径为0.5~2毫米。按重量计，金属砂的消耗量，约为石英砂消耗量的 $\frac{1}{25}$ 到 $\frac{1}{35}$ 。可是石

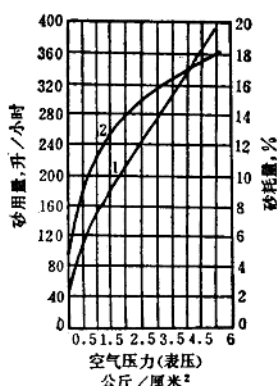


图 1—6 石英砂消耗曲线
1—石英砂用量；2—石英砂消耗量

英砂比金属砂的价格便宜。

喷砂净化能用于流水生产线上，此时将工件放在传送带上，不断地通过喷砂室。为了提高效率，可以在喷砂室内的各个位置上，设置许多喷嘴，这样使钢板一次通过喷砂室，便得到光洁的表面。喷砂在密闭的室内进行，可防止砂尘外扬，工人可在喷砂室外工作，因而大大改善了劳动条件。

近年来还采用了高压水加砂的净化方法。用200大气压的水喷射钢板，可以在短时间内除去污物，水中添加石英砂就成为高压水加砂净化，提高了表面的净化效果。

2. 化学净化方法

化学净化方法包括用有机溶剂擦洗、碱洗和酸洗。有机溶剂擦洗常用于衬里（如衬橡胶）设备表面喷砂后的清洗。碱洗主要用于各种金属表面的去油（如机油、矿物油、凡士林等）。酸洗是常用的净化方法，它可以除去金属表面的氧化皮，焊缝上的熔渣等污物。

通常采用的溶液是稀硫酸和盐酸并加入一定量的缓蚀剂。将被净化工作浸入酸液中，若尺寸过大不能放入酸槽内，则可用配成的酸膏涂刷在工作表面，一定时间后用石灰水中和，以消除残余酸对金属的影响，再用水冲洗并干燥之。酸洗时应特别注意劳动保护。

用于碳钢去氧化皮的配方是5~10%硫酸；10~15%盐酸；约0.5%若丁（邻苯二甲基硫脲）——缓蚀剂，其余是水。

3. 物理净化方法

火焰净化法属于物理净化法，它基于钢材表面的氧化皮和铁锈会因加热及冷却时的膨胀系数不同于钢本身而相继脱落。这是一种将氧化皮和锈从金属表面除去的好方法，是用安装在滚子支架上的若干个氧乙炔火焰喷嘴来进行的。火嘴沿被净化面往复移动，移动速度约为1.5~6米/分。喷嘴与表面的距离约50毫米，火焰对表面的倾角小于45°，加热温度不得高于150°C，即净化过程不应使金属内部组织发生变化。如需要两次净化时，应待第一次完全冷却后再进行第二次净化。

第三节 矫形

一、矫形的必要性

钢材（钢板、型钢等）常常出现不平、弯曲、扭曲及波浪等缺陷。这些缺陷如不予以消除即会给尺寸的测量、划线、切割及装配带来困难，也会影响成形后零件尺寸和几何形状的精度。产生以上缺陷的原因有：钢材在轧制过程中，受到不均匀的加热和冷却；轧制设备的磨损；钢材运输、装卸和储存不得当。

通常薄钢板的弯曲现象最为严重，所以薄钢板需要矫形的机会比较厚板为多。但当钢板的弯曲与波浪形的高度不影响划线或加工要求时，也可以不经过矫正而直接送去划线。根据资料统计，钢材需要矫形的百分比如表1—1所示。

矫形是消除波浪度和扭曲度。一般用每一米长度上残留的弯曲高度来检验矫形质量。若

表1-1 金属必须矫形的数量

金 属 种 类	厚 度, 毫 米	必须矫形的金属的百分比
板	<2	100
板	2~6	90
板	6~12	50
板	>12	≤10

根据个别相配的原则进行装配, 则零件的允许弯曲度为每米 2 毫米; 若是根据互换原则进行装配, 则板形零件的允许弯曲度为每米 1 毫米, 允许的波浪高度为 2 毫米。

除坯料在划线前需要矫形外, 用剪板机剪切下的钢板有翘曲现象, 焊接后的板料和型材沿焊缝可能有皱缩、弯曲等缺陷出现, 也需要进行矫形。

二、塑性变形特征

钢板的矫形、弯卷或冲压都属于金属的塑性变形。成形工作是在一定外力作用下使材料变形区的应力超过屈服极限, 而使板料产生塑性变形。塑性变形的几个基本概念如下。

(1) 变形是物体內各质点间相对微量位移连续积累的结果。金属受外力作用时, 最初发生弹性变形, 继而屈服, 产生塑性变形。在弹性变形阶段, 工件尺寸和形状的改变极小, 而在塑性变形阶段, 变形量可以在很大的范围内变化。当变形程度在 10% 以下时, 一般称之为小变形。钢板变形时, 变形区的应力分布规律决定于弯曲变形程度的大小。弯曲变形程度用相对弯曲半径 r 来表示, 其值越大, 弯曲变形程度越小。相对弯曲半径是一个可以用来进行比较的参数。

$$r = \frac{R}{h} \quad (1-1)$$

式中 R ——弯曲半径;

h ——钢板厚度。

当相对弯曲半径较小时, 中性层附近弹性变形区域极小(可忽略)绝大部分材料处于塑性变形阶段, 即均匀塑性变形阶段。这种弯曲变形过程称为线性纯塑性弯曲。纵向纤维间的挤压力可不计, 即可简化为平面应力状态。

(2) 塑性变形时, 金属体积不变。根据体积不变条件, 主应变间有着一定的关系。设沿变形体主轴的方向, 取出一平行六面体, 六面体各边之长为 H, L, B 。变形后, 各边之长为 h, l, b 。变形以前, 六面体的体积 $V_0 = H \times L \times B$, 变形以后, 六面体的体积为 $V = h \times l \times b$ 。塑性变形中, 体积不变, $V_0 = V$, 则

$$H \times L \times B = h \times l \times b, \quad \frac{h \times l \times b}{H \times L \times B} = 1$$

取对数

$$\ln \frac{h \times l \times b}{H \times L \times B} = 0$$

$$\ln \frac{h}{H} + \ln \frac{l}{L} + \ln \frac{b}{B} = 0$$

所以

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

ε 为真实应变, 它与一般应变 δ 的关系是 $\varepsilon = \ln(1 + \delta)$ 。

如果塑性变形程度很小时, $\delta \approx \varepsilon$, 故近似可得下列关系: $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$, 即塑性变形

时,三个主应变之间的代数和为零。不论应变状态如何,其中一个主应变的符号必然与其他两个主应变的符号相反,绝对值最大,称为最大主应变。当由应变求解应力,必须首先试验求得应力 σ 与应变 ϵ 之间的函数关系。由于应力与应变的函数关系具有普遍意义,与物体所处的应力状态无关,因此,往往选择比较简单的应力状态(如单向拉伸)进行试验所得到的 σ 与 ϵ 的函数关系完全可以推广于复杂的应力状态。

用一般的材料试验机测得的单向拉伸应力曲线(σ — δ 曲线)如图1—7所示。纵座标所示的应力值并不是变形瞬间的实际应力值,而是瞬时实际载荷 P 与试件原始截面面积 F_0 之比,即

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

实际上试件在拉伸过程中,除了轴向伸长外,还伴随有横截面的收缩,因此 $\sigma = \frac{P}{F_0}$ 并不能反映试件在各变形瞬间的真正应力。这种应力曲线多用于材料力学中,以描述变形程度极小时的应力与应变关系。在压力加工时,必须采用一种能够反映实际应力与真实应变 ϵ 关系的曲线。这时,应力以各加载瞬间之载荷 P 与该瞬间试件的截面面积之比 $\frac{P}{A}$ 表示。这种曲线如图1—8所示,我们称之为实际应力曲线或真实应力曲线。

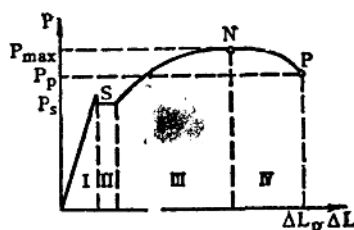


图1—7 应力曲线

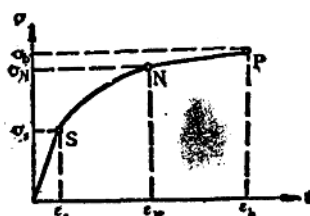


图1—8 实际应力曲线

在实际应力曲线上,也有几个特殊的点。这些点是:屈服点 S ,缩颈出现点 $N(\sigma_N, \epsilon_N)$ 以及拉断点 $P(\sigma_b, \epsilon_b)$ 。它们将全部塑性变形区分成原则上完全不同的两个阶段:均匀塑性变形阶段($S-N$),局部塑性变形阶段($N-P$),而缩颈出现点 N ,则可视作拉伸实际应力曲线中的一个重要的转折点。此点发生在最大拉伸载荷时,其应力 σ_N 与一般应力曲线中的强度极限 σ_s 相对应,但是 σ_N 与 σ_s 具有不同的数值。

在 $S-N$ 阶段内,应力与应变沿整个试件的分布都是均匀的。根据塑性变形时体积不变条件有: $A l = A_0 l_0$,但是 $l = (1 + \delta) l_0$,所以

$$A = \frac{A_0}{(1 + \delta)}$$

$$\text{而实际应力} \quad \bar{\sigma} = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \sigma (1 + \delta) \quad (1-2)$$

所以

$$\bar{\sigma} > \sigma$$

$$\text{而在缩颈点} N, \text{应力} \sigma_b \text{与实际应力} \sigma_N \text{之间关系为} \quad \sigma_N = \sigma_b (1 + \delta_N) \quad (1-3)$$

按照(1—3)式,将 σ 换成 $\bar{\sigma}$ 即可由一般应力曲线直接推得均匀塑性变形阶段的实际应

力曲线，因而不一定需要实地测量每一变形瞬间的断面面积。

(3) 利用实际应力曲线可以近似地确定强化模数。实际应力曲线(图1—9)的横座标表示材料的可塑性， ϵ_N 的值愈大，材料的可塑性愈好。

均匀变形阶段S—N愈平缓，强化作用愈不显著，材料的可塑性愈好。因此可以用曲线S—N的斜率表示材料的强化模数。由图1—9看出曲线S—N的斜率不是常数，随变形程度的不同而变化。为了计算方便，用折线近似地表示实际应力曲线，可以得到如图1—9所示的简化实际应力曲线。用简化的实际应力曲线的第II阶段即均匀塑性变形阶段的斜率表示材料在均匀塑性变形阶段的强化模数D。实质上就是近似地认为：材料在均匀塑性变形阶段的强化作用与变形程度的大小无关，强化模数是个定值，只取决于材料本身的性质。由图1—9可以看出

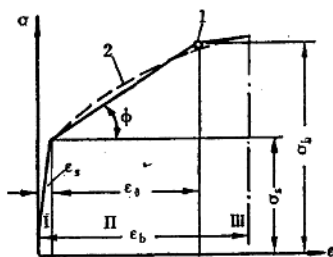


图1—9 当相对变形较小时碳钢的实际应力曲线

1—实线表示简化的实际应力曲线；2—虚线表示实际应力曲线；I—弹性阶段；II—小塑性变形阶段，强化较小；III—大塑性变形阶段

$$D = \operatorname{tg} \phi = \frac{\sigma_N - \sigma_s}{\epsilon_0} \quad (1-4)$$

设 $a = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_b}$ 则 $D = \frac{\sigma_N - \sigma_s}{a \epsilon_b}$ 碳钢 $a \approx 0.5$, $\sigma_N \approx 2.05 \sigma_s$

$$D = 2.1 \frac{\sigma_s}{\epsilon_b} \quad (1-5)$$

式中 σ_s ——屈服极限，

ϵ_b ——断裂时的相对变形量， $\epsilon_b = \ln(1 + \delta_b)$ ；

ϵ_0 ——均匀塑性变形阶段的相对变形量。

这样可以根据拉伸应力曲线的两个特殊点 σ_s 与 δ_b 近似地确定材料在均匀塑性阶段的强化模数D(表1—2)。

表1—2 强化模数

钢 类	钢 的 牌 号	平 均 值		D, 公斤/厘米 ²
		σ_s 公斤/厘米 ²	δ_b	
I	10, 15, A1和A2	21	0.21	210
II	20, 25, A3和A4	26	0.18	303
III	30, 35和A5	30	0.15	420
IV	40, 45和A6	34	0.12	595

塑性变形阶段的强化模数D与弹性变形阶段的弹性模数E一样，都可认为是材料物理性能的一个参数，可作为工程设计中的计算依据。

三、宽板弯曲时的应力应变分析

通常把宽度大于3倍厚度的板条，称为宽板。

宽板在弯曲过程中，板料的内侧与外侧经历着不同的塑性变形过程。内层金属纵向受到

压缩而缩短,外层金属纵向受到拉伸而伸长。在缩短的内层和伸长的外层之间存在着一个中性层,中性层的长度没有变化,仍然等于板料原来的长度。

弯卷过程是一种横向塑性弯曲变形的过程,在被弯曲的坯料中有剪力存在。但对卷板来说,钢板的弯曲过程通常可近似做纯弯曲来考虑。型钢与钢板都是在上、下辊的作用下发生塑性弯曲,如图1-10所示。对于钢板来说,由于载荷沿板宽集中作用,沿辊子长度均匀分布,产生一种柱状弯曲。板的柱状弯曲,可视为由许多窄梁所组成,但由于各窄梁中间的互相牵制与约束,沿钢板宽度方向不能变形,因此要出现应力。当弯曲曲率不大时,亦即其相对弯曲半径 r 较大时,沿梁高(板厚)方向的各纤维层之间的挤压应力较小,可以忽略不计。但随着弯曲曲率的增加,即随着 r 的减小,沿板厚方向各纤维层之间的挤压应力则不可忽略。宽梁的应力状态是三度空间的,而应变状态是平面的;窄梁则恰好相反,即应力状态是平面的而应变状态是三度空间的,如图1-11所示。

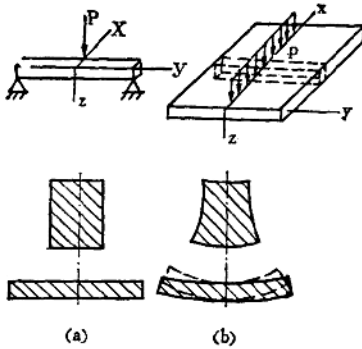


图1-10 钢板与型钢在辊子下的弯曲变形

(a)型钢; (b)钢板

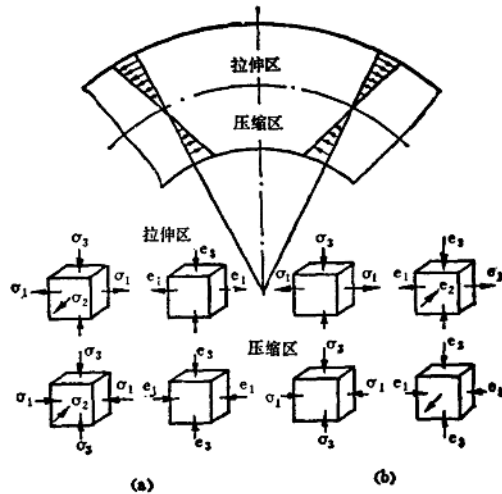


图1-11 塑性弯曲时的应力-应变状态图

(a)宽梁; (b)窄梁

对于设备来讲,除高压容器有着很小的相对弯曲半径 $r \leq 3 \sim 5$ 外,对一般常用设备 $r \geq 5$,故其纵向纤维间的挤压力可以不计,因而其应力状态不是三度空间的,对宽板为平面应力状态;对不太宽的梁,一般都可简化成线性应力状态,对普通碳钢或合金钢的钢板进行冷弯时,其应力与应变的关系按线性硬化规律变化,如图1-9所示。当钢板断面的变形进入全塑性状态时,其应力分布如图1-12所示。这时即为线性硬化纯弯曲。

从图1-12中可以看出塑性弯曲时的弯曲应力为

$$\sigma = \sigma_s + D\delta_y \quad (1-6)$$

式中 σ_s ——屈服极限;

D ——强化模数(如图1-9所示);

δ_y ——距中性层为 Y 处的相对变形度(图1-13)。

$$\delta_y = \frac{(R+Y)d\theta - Rd\theta}{Rd\theta} = \frac{Y}{R} \quad (1-7)$$