



# 焊接与化机焊接结构

王宽福 冯丽云 编

浙江大学出版社

# 焊接与化机焊接结构

王宽福 冯丽云 编

浙江大学出版社

# (浙)新登字 10 号

## 内 容 提 要

本书中对有关焊接与化工机械焊接结构作了简要、系统的阐述。全书共分八章,内容有焊接接头的性能,焊接变形和应力,焊接工艺,焊接材料,焊接缺陷及防治,化工机械焊接结构,焊接结构的断裂失效及防治等。除基础知识外,着重从工程实际出发讲述有关问题。

本书宜作为高校化工机械、石油化工机械等专业本科生的选修课教材和教学参考书,亦可供从事化工机械行业的广大工程技术人员、科研人员、教师和技师参考。

## 焊接与化机焊接结构

王宽福 冯丽云 编

责任编辑:徐宝澍

\*

浙江大学出版社出版

浙江大学出版社计算机中心排版

浙江煤田地质勘探公司制图印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9.25 字数 232 千

1992 年 9 月第 1 版 1992 年 9 月第 1 次印刷

印数 0 001—2 000

ISBN 7-308-01027-9/TH·039 定价 2.85 元

## 前 言

化工机械是化学工业部门的关键生产设备,其中典型的机器、容器与设备大多是焊接结构,从某种意义上讲,焊接接头的质量反映了化工机械产品的制造质量,并直接影响到结构使用的安全可靠。因此,作为化工机械专业的学生和工程技术人员,如果不掌握、熟悉最基本的焊接和焊接结构的知识,是不能适应化工机械行业发展形势的需要的,也是不能想象的。

本书以培养现代化化工机械行业工程师所需的素质为目标,对工程中有关焊接与化工机械焊接结构的一系列重要问题作了简明、系统的阐述,除了有关的基础知识外,着重从工程角度讲述了焊接接头的性能和控制、焊接变形和应力的分析,焊接工艺和工艺评定、焊接缺陷及防止、化工机械典型的焊接结构,还论述了焊接结构的断裂失效和防止的措施,以及用断裂力学来评定焊接结构安全性的方法,帮助读者掌握基本的焊接与化工机械焊接结构知识,并初步树立焊接与焊接结构的工程概念。

本书第一、二、三、四、七、八章由王宽福编写,第五、六章由冯丽云编写。全书由王宽福主编。在编写本书的过程中得到了浙江大学汪希萱教授、薛继良教授的支持和关怀,朱国辉教授、李铭棠教授在百忙中仔细地审阅了全部书稿,并提出了不少宝贵意见和修改建议,作者在此表示最诚挚的谢意。在编写本书的过程中,援引了不少国内外文献资料,谨向原作者致以深切的谢意。

限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

1991年9月

# 目 录

## 第一章 概 述

- § 1-1 焊接技术在化工机械制造中的应用 ..... 1
- § 1-2 化机焊接结构的发展趋势及对焊接技术的要求 ..... 4

## 第二章 焊接接头的性能

- § 2-1 焊接过程和焊接接头的特点 ..... 6
- § 2-2 焊缝的组织 and 性能 ..... 10
- § 2-3 熔合区、热影响区和热应变脆化区的组织和性能 ..... 22

## 第三章 焊接变形和应力

- § 3-1 焊接变形和应力产生的原因 ..... 27
- § 3-2 焊接变形的种类和危害 ..... 28
- § 3-3 影响焊接变形的因素和控制焊接变形的措施 ..... 32
- § 3-4 矫正焊接残余变形的的方法 ..... 40
- § 3-5 焊接应力的分类和对结构的影响 ..... 43
- § 3-6 焊接残余应力的分布 ..... 46
- § 3-7 减小和消除焊接残余应力的措施与方法 ..... 52

## 第四章 焊接工艺

- § 4-1 焊缝的符号及标注 ..... 60
- § 4-2 焊接接头及坡口的型式 ..... 66
- § 4-3 焊接工艺要素和规范的选择 ..... 73

|  |     |
|--|-----|
| § 4-4 金属的焊接性和焊接性试验 .....               | 85  |
| § 4-5 焊接工艺评定基本要求 .....                 | 92  |
| § 4-6 常用压力容器用钢的焊接工艺 .....              | 99  |
| <b>第五章 焊接材料</b>                        |     |
| § 5-1 焊接材料的分类与选择 .....                 | 111 |
| § 5-2 锅炉及压力容器焊条的选用原则 .....             | 125 |
| § 5-3 焊接材料的使用及保管 .....                 | 129 |
| <b>第六章 焊接缺陷及防治</b>                     |     |
| § 6-1 焊接缺陷的分类 .....                    | 132 |
| § 6-2 缺陷产生的原因、危害及防治措施 .....            | 133 |
| § 6-3 焊接裂纹 .....                       | 143 |
| § 6-4 焊缝缺陷的返修 .....                    | 154 |
| <b>第七章 化工机械焊接结构</b>                    |     |
| § 7-1 焊接结构设计 .....                     | 159 |
| § 7-2 压力容器的常用焊接接头 .....                | 164 |
| § 7-3 多层式压力容器的焊接节点 .....               | 196 |
| § 7-4 旋转体的焊接结构 .....                   | 200 |
| <b>第八章 焊接结构的断裂失效及防治</b>                |     |
| § 8-1 焊接结构断裂失效的类型及危害 .....             | 220 |
| § 8-2 焊接结构的脆性断裂及防治 .....               | 222 |
| § 8-3 焊接结构的疲劳断裂及防治 .....               | 228 |
| § 8-4 焊接结构的应力腐蚀断裂及防治 .....             | 236 |
| § 8-5 用断裂力学方法评定结构的安全性 .....            | 245 |
| 附表 1. 典型的焊接工艺细则卡格式 .....               | 249 |
| 附表 2. 各种焊接方法的焊接工艺评定重要因素和<br>补加因素 ..... | 250 |
| 附表 3. 焊接工艺指导书 .....                    | 252 |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 附表 4.  | 焊接工艺评定报告 .....         | 254 |
| 附表 5.  | ISO6520-1982 .....     | 255 |
| 附表 6.  | AWS 缺陷分类 .....         | 263 |
| 附表 7.  | 日本缺陷分类 .....           | 264 |
| 附录一    | 国内焊接标准.....            | 265 |
| 附录二    | 手工电弧焊焊接接头的基本型式与尺寸..... | 270 |
| 主要参考文献 | .....                  | 277 |

# 第一章 概述

## § 1-1 焊接技术在化工机械制造中的应用

焊接是 20 世纪初兴起的科学技术,几十年来进展、传播迅速,现已广泛地应用于航空、航天、原子能、化工、造船、海洋工程、电子技术、建筑、交通运输、电力、机械制造等工业部门。

根据焊接过程的特点,金属的焊接可以分为熔化焊和加压焊两大类。每类又可细分为许多方法,见表 1-1。

化工机械中典型的机器、容器与设备大多是焊接结构,而焊接是化工机械制造中的关键工艺,它直接影响产品的质量、生产率和成本。化工机械制造过程中,特别是压力容器的制造,应用的焊接方法以熔化焊为主,手工电弧焊、埋弧焊、电渣焊、气体保护焊、等离子焊尤其是目前压力容器焊接的常用方法。电子束焊和激光焊在化工机械制造中的应用尚处于研究与试用阶段。压力容器常用焊接方法的原理及用途见表 1-2。

焊接技术之所以能在化工机械制造中得到广泛应用,主要是因为它具有许多不同于其它制造工艺的特点。与铆接、铸造、锻造结构相比,焊接结构有以下明显的优点:

1. 构造合理,应力集中系数小,接头连接效率高,对接接头可达 100%,而铆接很难达到 70%。

2. 简化结构,减轻自重。由于焊接的强度较高,在同样承载条件下,可更轻、更薄,对交通运输工具来说还可因此而节约能量。

3. 密封性好。焊接结构对水、油、气的密封性都很好,是理想的



表1-1 金属焊接方法分类

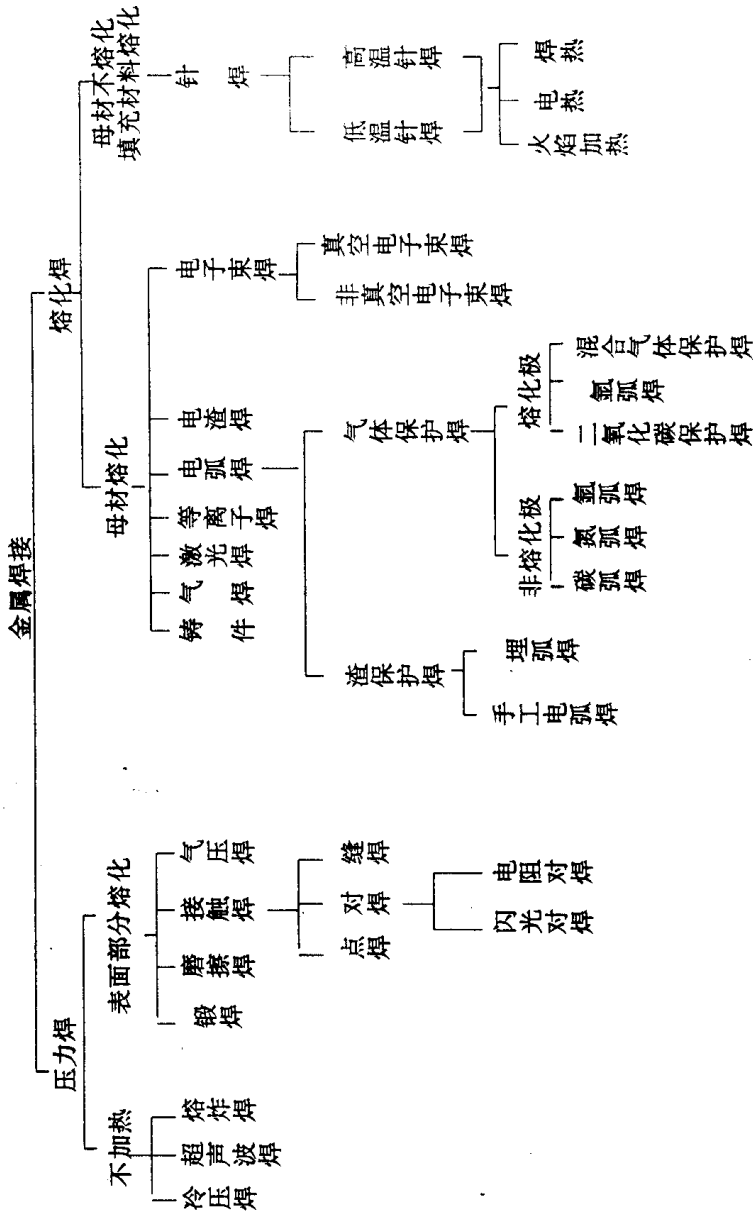


表 1-2 压力容器常用焊接方法的原理及用途

| 焊接方法  | 原 理                                    | 用 途                  |
|-------|--|----------------------|
| 手工电弧焊 | 利用电弧热量熔化焊条和母材,形成焊缝的一种焊接方法              | 应用范围广泛,可焊接各种位置       |
| 电渣焊   | 利用电流通过溶渣产生的电阻热来熔化金属,它的加热范围大,对厚的焊件能一次焊成 | 适于焊接大型和厚的工件          |
| 气体保护焊 | 采用氩气、氮气、二氧化碳、氢气等保护焊接熔池,使之与空气隔绝的焊接方法    | 用于合金钢、铜、铝、钛等有色金属的焊接  |
| 埋弧焊   | 电弧在焊剂层下燃烧,焊缝成型美观,质量好                   | 适用于长焊缝、深厚焊缝的焊接,生产率高  |
| 等离子焊  | 气体在电弧内电离后,再经热收缩效应和磁收缩效应产生能量密度大的高温热源    | 可焊接不锈钢、耐热钢、高强度钢及有色金属 |

密封结构,适合于制造各类容器。

4. 板厚限制小。铆接在板厚大于 50mm 时将会十分困难,而焊接结构高压容器的单层壁厚可达 300mm 以上。

5. 设计上简单、灵活。铆接结构的连接部分在设计上相当复杂,而焊接结构可将结构元件比较简单地对接、角接、T 形接或搭接起来,同时可制成任意结构,也较灵活,不像铸、锻工艺对工件形状有很多限制。

6. 制造周期短,成本低,经济效益好。焊接结构的制造工艺比铆接结构简单得多,可省钻孔和划埋头孔等工作。采用现代分部件制造工艺,很容易实现专业化和批量生产。

7. 可焊接不同金属材料。采用焊接工艺能把不同金属连接起来,有效利用材料。焊接结构还可在不同部位采用不同性能的材料。

料,充分发挥各种材料的特长,达到经济、优质。

当然焊接也有一些不可忽视的缺点,如会产生焊接变形,存在焊接残余应力,易产生裂纹等,其检查技术也比较复杂,正是这些不时引起结构的失效和破坏。

1968年,日本德山厂和千叶炼油厂两台大球罐(直径分别为16.1m和12.45m)在水压试验中发生脆性断裂,事故分别是由于焊接工艺不当和装配角变形、错边量过大而引起的。

1966年英国 Cokenize 电厂锅炉汽包(全长23m、内径1.7m、壁厚140mm、材料Mn—Cr—Mo—V钢),1969年西德 MnNiMoV 材料锅炉汽包(全长11.6m、内径1.6m、壁厚75mm)分别在水压试验中发生脆性断裂,裂源均在焊接接头处,是清除应力退火处理时产生的裂纹。

大多数事故表明:要保证化工机械产品的质量,关键在于控制焊接质量,只有这样才能大大降低事故率,保证设备安全、可靠地运行。

## § 1-2 化机焊接结构的发展趋势及 对焊接技术的要求

随着经济的发展,化工机械行业一方面要推出新技术和新的焊接结构形式来满足生产发展的需要,另一方面又针对本身高速、高压、高温、低温、腐蚀、易燃、易爆、有毒等特点,向着高参量、高寿命和大型化的方向发展,这种化机焊接结构的发展趋势对焊接技术提出了更高的要求:

1. 为满足低温、高温、高压、腐蚀的环境和大型化的要求,就必须采用某些特殊性能的材料,如高强钢、耐热钢、抗氢钢、低温钢等,这给焊接增加了困难,也促使一些新的焊接材料、焊接工艺方

法产生和发展。等离子焊、厚板窄间隙气体保护电弧焊等就是这样发展起来的。

2. 化工机械是各工业部门生产中的关键设备,工作条件、环境苛刻,又都要求长期运行,一旦出现故障和事故,不但造成严重的经济损失,还常常给人民的生命、财产带来不堪设想的后果,因而确保结构运行的安全可靠性是至关重要的,这就要求在制造过程中,特别是对焊接的质量要全面严格控制,焊接机械化、自动化,计算机和机器人的应用,也正是在确保焊接质量要求下形成的发展趋势。

目前 10 万立方米的储油罐,1 万立方米的球形容器,30 万吨/年合成氨和乙烯的配套设备,总重 540 吨、功率 120 万千瓦世界最大的原子能发电站的反应堆也全部是用焊接方法制成的。它们的发展都促进了焊接技术的进步,而焊接材料、焊接工艺方法、焊接设备、焊接基础理论的发展,反过来为满足化机设备质量起到了保证作用。

## 思 考 题

1. 金属的焊接是怎样分类的?
2. 焊接结构与铆接、铸造、锻造结构相比有哪些明显的优点?
3. 压力容器常用的焊接方法有哪些? 主要适用于哪些场合?
4. 化机焊接结构的发展趋势是什么? 对焊接技术提出了什么要求?

## 第二章 焊接接头的性能

### § 2-1 焊接过程和焊接接头的特点

#### 一、焊接过程的分析

认识焊接过程的物理本质对提高焊接质量、发展焊接技术具有重要意义。

从微观上讲可以这样定义焊接：两种或两种以上的材料(同种或异种)，通过加热或加压(或并用)，使接头处产生原子或分子间的结合和扩散，从而造成永久性联接的工艺过程叫做焊接。

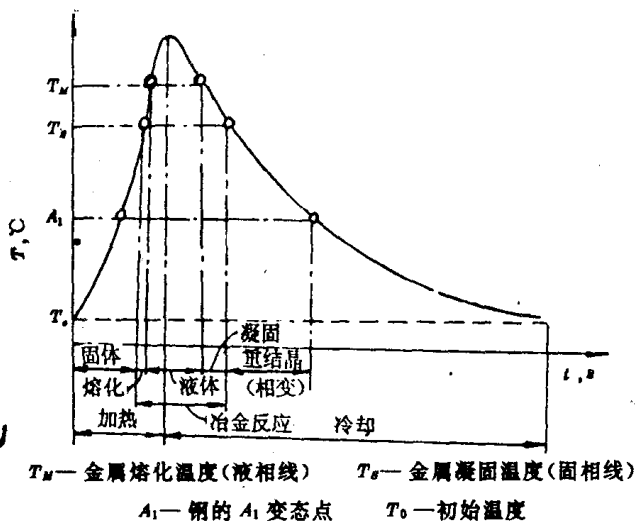


图 2-1 焊接过程示意图

由于焊接时所采用的能源和方式不同,各种焊接方法所经历

的过程也有很大的差别,本书以熔化焊为基础加以叙述。

对于钢铁材料的熔化焊来讲,一般要经历以下过程:加热—熔化—冶金反应—结晶—固态相变—形成接头。图 2-1 示出焊接过程各局部过程间的联系及所处情况,一般地说,焊接过程可以归纳为三个互相交错进行而又彼此联系着的局部过程。

### 1. 焊接热过程

熔化焊时,被焊金属在热源作用下被加热和局部熔化,此时在被焊金属中必然存在热量的传递和分布的问题,通常也称为焊接热过程。

焊接热过程将贯穿整个焊接过程的始终,因此也可以说一切焊接物理化学过程都是在热过程中发生和发展的。焊接温度场实际决定了焊接的应力场和应变场,它也与冶金、结晶、相变过程有着密切的联系,使其成为影响焊接质量和生产率的主要因素之一。

### 2. 焊接化学冶金过程

熔化焊时,熔化金属、熔渣、气相之间进行着一系列化学冶金反应,如金属的氧化、还原、脱硫、脱磷、焊缝金属氮化、渗合金、与氢的作用,等等。这些冶金反应将直接影响焊缝金属的成分、组织和性能,因此控制冶金过程是提高焊接质量的主要措施之一。

### 3. 焊接时金属的结晶和相变过程

随着热源的离开,熔化金属就开始结晶,金属原子由近程有序排列转变为远程有序排列,即由液态转变为固态。对于具有同素异构转变的金属,随着温度的下降还将发生固态相变。例如,钢将发生  $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  相的转变。由于焊接件是快速连续冷却,使焊缝金属的结晶和相变都具有各自的特点,并且有可能在这些过程中产生诸如偏析、夹杂、气孔、热裂纹、淬硬脆化、冷裂纹等缺陷。因此,控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

## 二、焊接冶金过程的特点

焊接冶金过程实质上是金属在焊接条件下的再熔炼过程,其中不仅包括化学变化,而且包括物质在作用相之间的迁移和分布过程。例如,手工电弧焊有下列冶金特点:

### 1. 电弧反应区温度高

电弧焊时,弧柱温度可达 6000K 以上,熔滴温度可达 1800~2400℃,由于焊接电弧的温度很高,能使液体金属强烈地蒸发,使气体分子( $N_2$ 、 $H_2$ 、 $O_2$  等)分解。分解后的气体原子或离子,其化学活性显著增加,很容易溶解到液体金属中去,这就增加了金属凝固后产生气孔的可能。

熔池的平均温度在 2000℃ 以上,而它被冷态的金属所包围,两者温差很大。因此,使焊接结构常常产生内应力,引起变形或产生裂纹。

### 2. 熔池体积小,冷却速度快

电弧焊时,熔池的体积很小,平均只有 2~10 $cm^3$ ,最大也只有 30 $cm^3$ ,重量不超过 100 克(铸锭可达几吨、几十吨),而加热及冷却速度很快,由局部金属开始熔化,形成熔池,到结晶完了的全部过程,一般只有几秒钟时间,而温度又在不断地变化,熔池周围被冷金属包围,冷却速度平均可达 4~100℃/秒,与铸锭的冷却速度相差几千倍(铸锭平均冷却速度为 3~150×10<sup>-4</sup>℃/秒)。因此整个冶金反应过程达不到平衡,化学成分在很小的金属体积内有较大的不均匀性,凝固后使合金元素存在偏析现象。液态时金属吸收的气体有时来不及逸出而形成气孔。一些非金属夹杂物也可能来不及浮出而留在焊缝金属中造成缺陷。

### 3. 熔池金属不断更新

随着焊接熔池的移动,新的钢水和熔渣加入到熔池中参加冶金反应,熔池金属不断更新。

#### 4. 金属液体以细滴状进入熔池

焊条熔化形成熔滴,由焊条顶端滴入熔池,而且熔化金属基本上暴露在空气中,这使得金属熔滴与气体、熔渣的接触面大大超过一般的炼钢过程。接触面加大可以加速冶金反应进行,但同时,气体侵入液体金属的机会也增多,因而使焊缝金属更易发生氧化、氮化以及产生气孔。

此外,熔池中心和边缘极大的温度梯度还使焊缝柱状晶得到发展。

### 三、焊接接头的组成和力学特点

焊接接头,应包括焊缝及基本金属靠近焊缝而组织和性能发生变化的区域。它在整个焊接结构中是一个关键性部位,其性能之优劣直接影响整个焊接结构的制造质量和使用安全性。

根据加热时金属所处的状态以及成分、组织和性能的变化情况,可将焊接接头分为四个区域:焊缝( $OA$ )、熔合区( $AB$ )、热影响区( $BC$ )和热应变脆化区( $CD$ ),如图 2-2 所示。

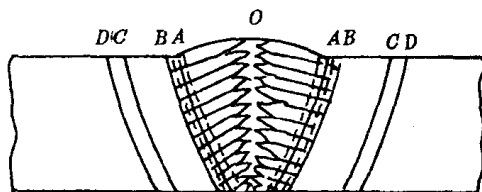


图 2-2 焊接接头组成示意图

总的说来,焊接过程使焊接接头具有以下力学特点:

1. 焊接接头力学性能不均匀。由于焊接接头各区在焊接过程中进行着不同的焊接冶金过程,并经受不同的热循环和应变循环的作用,各区的组织和性能存在较大的差异,焊接接头组织的不均匀,造成了整个接头力学性能的不均匀。

2. 焊接接头工作应力分布不均匀,存在应力集中。由于焊接接头存在几何不连续性,致使其工作应力是不均匀的,存在应力集



中。当焊缝中存在工艺缺陷,焊缝外形不合理或接头型式不合理时,将加剧应力集中程度,影响接头强度,特别是疲劳强度。

3. 由于焊接的不均匀加热,引起焊接残余应力及变形。焊接是局部加热的过程,电弧焊时,焊缝处最高温度可达材料沸点,而离开焊缝处温度急剧下降,直至室温。这种不均匀温度场将在焊件中产生残余应力及变形。焊接残余应力可能与工作应力叠加,导致结构破坏。焊接变形可能引起焊接结构的几何不完善性。例如,焊接接头的角变形和错边可以增加壳体的椭圆度,产生附加弯曲应力,直接影响强度。

4. 由于焊缝与构件组成整体,所以与铆接或胀接相比,焊接接头具有较大的刚性。

## § 2-2 焊缝的组织 and 性能

焊缝金属是由熔池的液态金属凝固而成,熔池从高温冷却到常温,通常要经过两次组织变化。第一次是从液态转变为固态(即奥氏体)时的结晶过程,称为一次结晶;第二次是当焊缝金属温度低于相变时发生的组织转变,称为焊缝的二次结晶。常温下焊缝组织是二次结晶。焊缝组织除与化学成分有关外,在很大程度上取决于焊接熔池的一次结晶和焊缝金属的二次结晶,而焊缝金属的性能又与焊缝金属的组织有着密切的联系。

### 一、焊接熔池的一次结晶组织

#### 1. 一次结晶的特点

熔池金属的结晶过程和一般的金属结晶一样,也是生核和晶核长大的过程,然而焊接时熔池的结晶也有它的特殊之处。

(1) 熔池冷却速度大。焊接熔池体积小,周围被冷却金属和环境介质所包围,故熔池的冷却速度很大,这使含碳高、合金元素较