

# 焊接金相分析

吕德林 李砚珠 编



机械工业出版社

# 焊 接 金 相 分 析

吕德林 李砚珠 编



机 械 工 业 出 版 社

焊接金相分析是试验与理论相结合的技术学科,是属于焊接与金相之间的边缘科学之一。它是基于焊接金属学原理,以金相分析方法研究接头组织和性能与焊接工艺条件之间的关系。

本书内容主要包括:焊接金相分析方法及任务;取样、制样方法;焊接缺陷的宏观分析;焊缝、热影响区的分析;焊接裂纹及焊接产品的失效分析。

本书既有焊接金相系统理论分析,又有具体试验举例。金相图片、数据、曲线齐备,内容丰富。本书对工厂及大专院校从事焊接或金相检验的技术人员及师生都有参考价值。

## 焊接金相分析

吕德林 李砚珠 编

责任编辑:董连仁

封面设计:方 芬

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $9^{5/8}$ ·字数 253 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001-5,490·定价, 3.05 元

统一书号: 15033·6902

## 前 言

随着焊接技术的不断发展,尤其大型焊接结构的出现,对焊接质量不断提出高的要求,因此,焊接质量检查和焊接结构质量分析工作必须日益加强。在焊接工艺制定时,为确定最佳焊接工艺提供更多的技术依据,选用更加合理可靠的焊接方法;为监督焊接试验过程,保证产品质量,焊接金相分析作为一个实验学科逐渐发展起来。

应用焊接金相分析方法取得的结果直观、准确,并有很多独到之处。焊接金相分析不同于一般的金相分析,它不仅与焊接金属学、焊接工艺学有密切关系,而且还与焊接力学、结构力学有关。然而,长期以来,在焊接金相分析方法上一直缺少完整系统的资料。

作者根据从事焊接金相分析工作的经验,总结归纳有关理论,在作者认识和理解的基础上,编写了“焊接金相分析”一书,并经彭日辉同志审阅,希望对从事焊接检验和焊接技术的工作者有所帮助。

由于有关焊接技术学科发展很快,在焊接金相分析方面的理论认识和分析方法上仍感落后,对某些问题看法也不一致。作者尽量按当前较公认的说法论述。

由于作者水平有限,难免内容上有偏颇和错误之处,敬请读者指正。

作者

一九八六年四月

# 目 录

## 前言

## 第一章 焊接金相的研究内容及特点 .....1

### 第一节 焊接金相分析的任务.....1

#### 一、焊接金相分析在焊接系统工程学中的地位.....2

#### 二、焊接金相的研究方法及手段.....2

### 第二节 焊接过程及接头特点.....4

#### 一、焊接过程的特点.....4

#### 二、不同焊接方法形成接头的特点.....5

#### 三、焊接接头的组合 .....11

## 第二章 焊接区金相试样制备方法..... 15

### 第一节 焊接区金相取样方法 .....15

#### 一、焊接金相样的取样原则 .....15

#### 二、试板上焊接裂缝金相样切取法 .....16

#### 三、其它焊接缺陷金相样的切取方法 .....23

#### 四、焊接区显微组织及粗晶样的切取方法 .....24

#### 五、焊接结构及焊接产品事故分析取样方法 .....25

### 第二节 焊接金相样的制样方法 .....26

#### 一、焊接金相样初步加工 .....26

#### 二、焊接金相样磨制和机械抛光 .....28

#### 三、焊接接头的电解抛光和电解浸蚀法 .....32

#### 四、焊接接头金相样化学抛光 .....37

### 第三节 焊接金相样的显示方法 .....39

#### 一、化学试剂显示的基本原理 .....40

#### 二、接头宏观组织的显示 .....40

#### 三、焊接显微组织的显示 .....44

#### 四、焊接接头几种复合显示方法 .....47

## 第三章 焊接接头宏观分析.....53

### 第一节 宏观分析方法 .....53

#### 一、焊接接头外观检查 .....54

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 二、焊接接头的低倍分析 .....               | 55  |
| 三、低倍试样的制备及浸蚀方法 .....            | 59  |
| 四、焊接接头中宏观偏析的分析 .....            | 61  |
| 第二节 焊接接头缺陷的宏观分析 .....           | 64  |
| 一、焊缝中的气孔 .....                  | 64  |
| 二、焊缝中的夹渣分析 .....                | 69  |
| 三、未焊透及未熔合 .....                 | 74  |
| 四、焊缝中夹杂物的来源和种类 .....            | 77  |
| 五、其它焊接缺陷 .....                  | 86  |
| 第四章 焊接热影响区分析 .....              | 91  |
| 第一节 焊接热影响区的金相分析方法 .....         | 91  |
| 一、焊接热影响区的形成及其组织特征 .....         | 91  |
| 二、不同钢种的焊接热影响区金相组织分析 .....       | 95  |
| 三、焊接热影响区组织分析要点 .....            | 105 |
| 四、焊接热影响区组织形态分析 .....            | 107 |
| 五、焊接热影响区的性能 .....               | 130 |
| 第二节 模拟焊接热循环 .....               | 134 |
| 一、模拟焊接热循环的研究与应用 .....           | 134 |
| 二、热模拟试验在科研中的应用 .....            | 136 |
| 三、模拟组织与实际焊接热影响区组织比较 .....       | 138 |
| 四、模拟试样与焊接热影响区显微组织断裂韧性的对比 .....  | 142 |
| 第三节 焊接CCT图及其应用 .....            | 143 |
| 一、焊接加热过程的相变特点 .....             | 143 |
| 二、焊接热影响区连续冷却相变特点 .....          | 145 |
| 三、热影响区连续冷却相变的研究方法——焊接CCT图 ..... | 151 |
| 第五章 焊缝金相组织分析 .....              | 170 |
| 第一节 焊缝的形成及一次组织特点 .....          | 171 |
| 一、焊缝金属的凝固结晶条件 .....             | 172 |
| 二、焊接工艺条件对一次组织结构的影响 .....        | 177 |
| 三、焊缝的宏观组织及一次组织形态 .....          | 182 |
| 第二节 焊缝金属的二次组织 .....             | 194 |
| 一、低合金钢焊缝常见金相组织 .....            | 195 |
| 二、焊缝金属的固态相变过程 .....             | 205 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 三、合金元素对焊缝金相组织的影响   | 210 |
| 四、低碳低合金钢焊缝中金相组织的分类 | 213 |
| 第三节 焊缝的组织与性能       | 216 |
| 一、多层焊缝组织分析         | 216 |
| 二、焊缝的M-A结构组织       | 221 |
| 三、焊缝金属中的二次晶界       | 224 |
| 四、低碳低合金钢焊缝机械性能     | 225 |
| 第六章 焊接裂纹金相分析       | 230 |
| 第一节 焊接裂纹的分类        | 230 |
| 一、焊接裂纹产生的条件        | 230 |
| 二、焊接裂纹的分类原则        | 231 |
| 第二节 各种焊接裂纹的形成机理    | 234 |
| 一、结晶裂纹             | 234 |
| 二、液化裂纹             | 238 |
| 三、高温低塑性裂纹          | 240 |
| 四、高温孔穴型开裂          | 241 |
| 五、再热裂纹             | 242 |
| 六、延迟裂纹             | 244 |
| 七、热应力裂纹            | 248 |
| 八、层状撕裂             | 248 |
| 第三节 各种焊接裂纹的金相形态特点  | 250 |
| 一、结晶裂纹的金相形态        | 250 |
| 二、液化裂纹的形态          | 252 |
| 三、高温低塑性裂纹形态        | 253 |
| 四、高温孔穴型开裂形态        | 255 |
| 五、再热裂纹金相形态         | 255 |
| 六、延迟裂纹的金相形态        | 258 |
| 七、热应力裂纹的金相形态       | 259 |
| 八、层状撕裂形态           | 261 |
| 第四节 焊接裂纹金相分析步骤     | 263 |
| 一、肉眼观察             | 264 |
| 二、焊接裂纹试样的抛光检查      | 264 |
| 三、焊接裂纹试样的显微分析      | 264 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 四、焊接裂缝的粗晶或低倍组织分析.....    | 265 |
| 第七章  焊接金相的综合分析 .....     | 268 |
| 第一节  焊接金相分析报告.....       | 268 |
| 一、焊接接头常规金相分析报告.....      | 268 |
| 二、一般焊接工艺试验的组织分析报告.....   | 271 |
| 第二节  焊接结构事故分析.....       | 278 |
| 一、焊接结构事故分析方法.....        | 279 |
| 二、30万kW水轮机涡壳焊接事故分析 ..... | 283 |
| 三、飞机发动机匣焊接接头质量分析.....    | 296 |
| 参考文献 .....               | 300 |

# 第一章 焊接金相的研究内容及特点

## 第一节 焊接金相分析的任务

焊接金相分析是以焊接金属学为理论基础，密切联系焊接工艺条件，以金相分析方法来研究焊接接头的组织变化，研究焊接缺陷和接头性能与焊接方法之间的关系，是保证和提高焊接接头质量的一门试验学科。因此，焊接金相分析，也是在掌握焊接工艺条件、母材及焊接材料原始状态情况下，为采用最佳焊接方法，获得优良焊接质量而对焊接接头进行一系列检查和试验的手段。

焊接金相分析经常做的工作，是对各种焊接试验结果的检查。包括在不同焊接工艺规范下对焊接区组织和性能变化的分析。由此来确定产生焊接缺陷的性质及产生原因，并提出消除的办法，以选定最佳焊接规范。然后，再进一步确认所得新焊缝的组织。

对于新材料采用新的焊接材料或新工艺时，焊接金相分析显得更为重要；对于焊接产品或在役的焊接构件，出现废品或产生事故时，通过焊接金相分析查找原因，也是焊接金相分析工作中的重要任务之一；对目前焊接工艺试验中出现的焊接裂缝及其它焊接缺陷，研究焊接裂缝性质，缺陷产生原因，焊接金相分析是简便、直接而又可靠的分析手段。如果能配合现代的精密仪器，尤其是超微观的精密仪器，能把焊接中发生的组织、性能变化分析清楚，以不断提高焊接工艺水平，改善焊接产品的质量。

在相当多的焊接生产中，应用焊接金相分析是能很好解决问题的，追求超微观手段是完全不必要的。

目前焊接金相分析的仪器也在不断完善，从实体显微镜到各

种大型精密的光学显微镜,并进一步配备超高温显微镜、各种显微硬度计,热差分析仪及热膨胀分析仪等。不但研究常温组织,而且研究高温组织。通过模拟焊接热循环过程,研究焊接相变过程,研究焊接裂缝的形态和产生机理,焊接缺陷与焊接工艺间的关系,合金元素对接头组织和性能的影响,焊缝的一次组织、二次组织与焊缝性能的关系等。因此,开展焊接材料和被焊母材化学成分、相变组织、接头性能、焊接缺陷与焊接方法和焊接工艺之间关系的研究,是焊接金相分析的主要任务。

### **一、焊接金相分析在焊接系统工程学中的地位**

随焊接技术的发展,出现了一系列大型焊接结构物,保证这些焊接结构的安全性和可靠性是非常重要的。

为了达到质量控制目的,要建立焊接结构物生产的技术系统化,重要地是要建立起一套规程和标准,并形成应用新焊接技术的程序。

焊接系统工程学的建立,是今后焊接技术中的主要课题。焊接工程学中有三个分支,即焊接金属学、焊接工艺学和焊接力学。它们分别进行系统研究并自成体系,但是它们的边界又是不明显的,焊接系统工程学就是上述问题的总括,如图 1-1 是焊接技术的系统化示意图。

焊接金相分析是基于焊接金属学理论,但是广泛涉及焊接工艺学及焊接力学内容。因此焊接金相分析又是一门边缘科学。随着大型焊接结构物的建造,新的焊接材料的应用,新的焊接工艺的出现。焊接金相分析作为一种试验科学分支,将越来越受到重视和发展。

### **二、焊接金相的研究方法及手段**

焊接金相的研究方法,主要是通过解剖试样直接在金相显微镜下进行观察、分析或者通过金属物理方法的测试检查。因此,焊接金相研究方法是采用了金相研究方法的一切可用的方法。金相分析时要经常制取大量的焊接接头金相磨片,结合焊接方法及工艺规范,进行对组织、性能作对比分析,确定接头组织和性能与

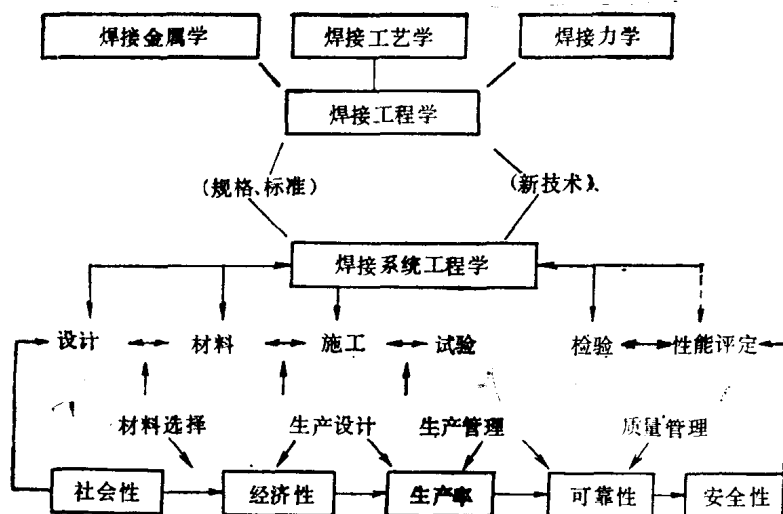


图1-1 焊接技术的系统化

焊接工艺条件之间的关系，为提高接头的质量提供信息或依据。

但是焊接金相的研究方法仍有着自己本身特点，由于焊接过程的复杂性，使焊接金相的研究比一般金相研究更困难。焊接金相试样的大小变化很大，尤其是焊接热过程是非平衡条件下的快速加热、快速冷却，焊接接头各部分组织变化大，形成非平衡组织。各组织区域相差悬殊，组织的变化除受焊接热作用之外，尚与焊接应力应变循环作用有关。在一个焊接试件上，焊缝是属于熔化凝固的连续冷却铸态组织，并伴随着焊缝中心的不同稀释率，造成化学成分和组织的不均匀性。焊接热影响区是母材在焊接热循环作用下形成的一系列连续变化的梯度组织区域。

焊接接头缺陷的分析，是焊接金相研究的一个重要内容。通过焊接金相可以准确地、直观检查出焊接、裂缝、夹杂物、夹渣、气孔、未焊透等。较之无损探伤检查准确可靠。尤其是微裂缝，在金相显微镜观察到的显微裂缝，比其它方法都清楚。

焊接金相的组织显示，要采用很多特殊方法，尤其是对异种钢焊接接头的组织分析、焊缝的一次组织分析等。近年，模拟焊

接热循环的研究，插销裂缝试验方法等的开展，为焊接金相研究方法引入新的内容，形成一个适应焊接试验研究，并与焊接工艺关系密切的试验学科。

焊接金相把金属材料分析与现代的一切最新研究手段联系起来。在焊接金相分析基础上，可以进一步应用扫描电镜、透射电镜、X射线分析，俄歇能谱分析等等超微观的分析方法，确定接头的化学成分、组织性能变化与焊接方法和焊接工艺的关系。为确定最佳焊接方法、最佳焊接工艺条件提供依据。

## 第二节 焊接过程及接头特点

近代焊接技术，从1882年出现碳弧焊开始直到本世纪三十年代，在生产上还只是应用气焊和手工电弧焊等简单的焊接方法。由于焊接方法具有节省金属，生产效率高，产品质量好和大大改善劳动条件等优点，在半个世纪内得到迅速发展。尤其在四十年代，出现了优质电焊条，使焊接技术得到一次飞跃。以后随着埋弧焊和电阻焊的应用，使焊接过程的机械化和自动化成为现实。后来又出现电渣焊、各种气体保护焊，直到六十年代发展起来的等离子弧焊、电子束焊、激光焊接等先进的焊接方法的涌现，使焊接技术达到了一个新的水平。近年又在研究能量束焊接，例如太阳能焊接、冷压焊接等更新的焊接方法。可以说焊接方法层出不穷。

### 一、焊接过程的特点

就熔化焊来说，是一个具有其特点的焊接冶金过程。

焊接时，焊缝和热影响区金属要经受很复杂又有规律的热过程。在焊接接头这小小范围内，几乎所有冶金现象都要出现，例如熔化、结晶、气相与金属反应、渣与金属的反应和固态相变等等。因而整个焊接过程是一个时间短、变化复杂而完整的物理冶金过程。焊接过程的特点如下：

#### 1. 温度高

以手工焊为例，电弧高温可达 $4000\sim 7000^{\circ}\text{C}$ ，使焊件与焊条

发生强烈熔化和蒸发。外界气体  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2$  大量分解，溶入熔池，其数量比炼钢时大很多倍。因此，焊缝金属凝固后有产生气孔的可能性，并降低机械性能。

## 2. 温差大

焊接是局部加热。从冷态开始到加热熔化，形成熔池的温度可达  $2000^\circ\text{C}$  以上。母材又是冷态金属，两者温差巨大，使接头产生很大内应力和变形，甚至可能产生裂缝和断裂。

## 3. 偏析现象严重

焊接熔池体积小，手工电弧焊时熔池约为  $3 \sim 10\text{cm}^3$ ，自动焊也不过  $9 \sim 30\text{cm}^3$ ，焊缝金属从熔化到凝固只有几秒钟时间。在这样短时间内，冶金反应是不平衡的，也是不完善的，使焊缝金属成分分布不均匀，有时区域偏析很大。

## 4. 组织差别大

焊接过程中，温度高，液体金属蒸发，化学元素烧损，有些元素在焊缝金属和基本金属之间相互扩散，近缝区各段所处温度又不同，冷却后焊接区的显微组织差别极大。焊缝金属是由柱状晶组成的铸态组织，母材热影响区是在不同峰值温度焊接热循环作用下产生的梯度性组织特征。明显的组织差异影响着接头的性能。

# 二、不同焊接方法形成接头的特点

焊接是把两块金属结合在一起的一种金属加工方法。由于焊接技术的发展，尤其是焊接方法的日益增多，给焊接接头组成带来新的变化。手工焊、埋弧焊的接头是由焊接材料（焊条或焊丝、焊剂）与母材组成焊缝。特种焊、等离子、电子束及摩擦焊，接头均由母材自身形成。常用的焊接方法接头形成过程及各组织区域上的特点，概述如下。

## 1. 手工电弧焊

其过程是利用焊条与工件间产生的电弧热，把工件和焊条共同熔化形成熔池，凝固后构成焊缝。所以，手工焊接头，是由焊条与母材共同形成的焊缝、不受热影响的母材及焊接热影响区组成。

手工电弧焊接头特点是，焊接接头是由焊条熔化与被焊母材共同构成焊缝金属。焊缝金属是熔化金属结晶凝固而成。被焊母材在焊缝两侧受焊接电弧热作用，形成一个连续变化的组织区域，称为焊接热影响区。两块金属是通过焊条熔化连接起来的。

手工电弧焊接头应用极为广泛，有单层焊、双面焊和多层焊接头，是熔化焊中最常用和常见的焊接接头。焊缝是铸态组织，接头两侧的热影响区有连续的梯度变化的组织，由于线能量小，热影响区宽度小。

## 2. 埋弧自动焊

手工电弧焊是由人工控制弧长和向前移动电弧形成焊缝，应用电焊条焊接的。埋弧自动焊，无论弧长还是形成焊缝的相对运动，都是由机器自动化完成。其焊接材料，由焊丝和焊药两部分组成。

埋弧自动焊，焊丝熔化量可以较大，形成又宽又深的大焊缝。焊剂覆盖厚度大，熔化焊剂形成的熔渣与液体金属间起有利的物理化学作用，熔渣壳呈封闭形状，具有一定粘度，能承受一定压力，使用大电流也不致引起金属滴向外飞溅，减少电弧热能损失。焊丝上无涂料，允许提高电流密度，电弧吹力随电流密度增大而增加，埋弧自动焊熔深比手工焊可大。埋弧自动焊工效高，可焊大焊缝、大厚板，采用大线能量。其焊缝与热影响区，随焊接线能量增加而加宽。多层埋弧自动焊，可以改善热影响区性能；双丝窄间隙埋弧自动焊可以焊接大厚板，并节省焊接材料，焊缝质量良好。

因此，各种埋弧自动焊仍是焊接发展方向。

## 3. 气体保护焊

(1) 氩弧焊 氩弧焊以氩气作为保护气体，电弧发生在电极和工件之间。电弧和熔化区由氩气流保护，容易实现全位置自动化焊接。明弧可见，便于操作。

电弧在气流压缩下燃烧，热量集中，熔池较小，焊接速度较快，热影响区较窄，焊后变形小。同时氩弧焊电弧稳定，飞溅

小，焊缝致密，表面无熔渣，成形美观。

(2) 二氧化碳气体保护焊 二氧化碳气体保护焊以  $\text{CO}_2$  作为保护气体，用焊丝作熔化电极，焊丝和焊件之间产生电弧熔化金属。焊接质量较好，电弧在气流压缩下燃烧，热量集中，焊接热影响区小，变形和裂缝倾向小。适于薄板焊接。生产效率高，由于焊丝送进自动化，电流密度大，热量集中，焊接速度快。焊后不渣，节省时间，比手工焊生产效率高 1 ~ 3 倍。

#### 4. 电渣焊

电渣焊利用电流通过液态熔渣所产生电阻热作热源来进行焊接。一般电渣焊总是在垂直立焊位置焊接。两工件相距 25 ~ 30mm 垂直位置，间距两侧装有冷却铜滑块。待固态焊剂熔化后形成渣池具有较大电阻，当电流通过时，产生大量电阻热，使渣池保持在 1700 ~ 2000℃ 高温。焊丝（或板极）和工件被渣池熔化形成熔池。熔池推渣池逐渐上升，下面金属逐渐凝固组成焊缝。从而使立焊缝一次形成。

电渣焊缝金属比较纯净。金属熔池上面覆盖着一定深度的渣池，基本上避免空气与熔化金属接触。金属熔池在液态下存在时间长，熔池中气体与杂质有充分时间逸出。焊缝金属结晶方向也有利于排出低熔点杂质。

正由于电渣焊应用于大厚工件焊接，一次焊成，焊缝高温停留时间长，冷却较慢，热影响区宽，过热区域大，晶粒粗大，产生较多过热组织。使电渣焊过热区和电渣焊缝机械性能有明显下降。对于重要结构件、焊后要进行正火处理，以改善性能。

图 1-2 是电渣焊接头的低倍组织图，由图可见，由于电渣焊工件厚大，冷却速度缓慢，焊缝晶粒粗大。为了改善焊缝的组织，尤其是提高电渣焊韧性，目前应用双相热处理，获得很好效果。

#### 5. 等离子弧焊接

利用装置使自由电弧的弧柱受压缩，就会使弧柱气体完全电离，产生温度比自由电弧高得多的等离子电弧。

等离子焊接，由于等离子弧能量密度大，弧柱温度高，穿透

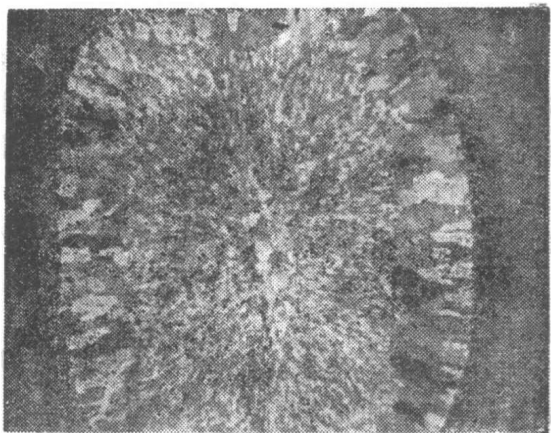


图1-2 19Mn5钢电渣焊接头横断面低倍组织

能力强，10~12mm厚的工件可不开坡口，能一次焊透双面成形，焊接速度快，生产效率高，应力变形小。

等离子焊当电流小到0.1A时，电流仍能稳定燃烧，保持良好挺度与方向性，可焊很薄的箔材。

等离子焊接在国防工业及尖端技术所用的铜合金、合金钢、钨、钼、钴、钛等金属的焊接。如钛合金的导弹壳体、波纹管、膜盒、微型继电器、电容器外壳封接及飞机上一些薄壁容器。

图1-3 为不锈钢管的等离子焊接接头的低倍照片。

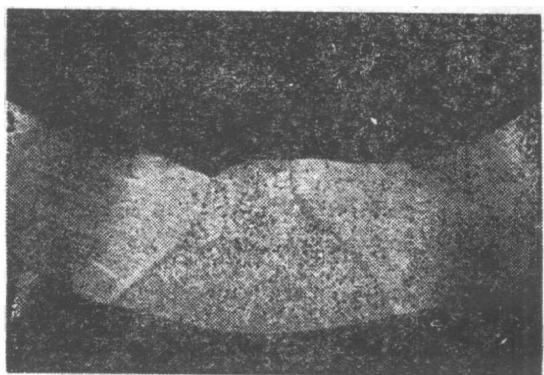


图1-3 18-8Ti不锈钢等离子焊接低倍照片

## 6. 电子束焊接

电子束焊接分为真空电子束焊和非真空电子束焊两种。

真空电子束焊接，是用电子枪，焊件及夹具全部装在真空室内。电子枪由加热灯丝、阴极、阳极及聚焦装置等组成。当阳极被灯丝加热到2600K时，能发出大量电子，这些电子在阴极和阳极间的高压作用下，经电磁透镜聚焦成电子流束，以极大速度，射向焊件表面，电子动能转变为热能，能量密度比普通电弧可大5000倍，它使焊件金属迅速熔化，甚至气化。

真空中焊接，金属不氧化，无电极污染，保证焊缝金属的高纯度。焊缝表面平滑洁净、无气孔，无夹渣，没有弧坑及其它表面缺陷。

电子束焊热源能量密度大，熔深大，焊速快，焊缝深而窄，深宽比可达20:1，可单道焊。焊接件热影响区也小，基本上不产生焊接变形。可以防止难熔金属焊接时产生的裂缝和泄漏。

电子束焊接一般不加填充金属。接口加工得平整清洁、装配紧密、不留间隙、任何厚度工件都不开坡口。电子束参数可在较宽范围内调节，控制灵活、精度高，适应性强。

## 7. 摩擦焊

摩擦焊是一种固态焊接方法，摩擦表面在用力压紧情况下做机械的相对运动，产生热而形成连接。摩擦焊的形式，多数是一个工件以比较高的并可控制的速度相对于另一个与其焊接的静止工件回转。

摩擦接触将接触表面加热到很高温度，并由于相互顶锻形成可靠的高强度接头。焊接是在接触的一秒到几秒间完成的，热影响区很窄。

摩擦焊所产生的金属组织，是由相互焊接同成分材料的时间—温度循环决定。对于受热时间短暂的摩擦焊，达到的温度往往低于熔点。如低碳钢，整个焊接区硬度，组织变化不明显。对淬硬钢来讲，热影响区发生明显的组织变化，较硬材料的摩擦焊也需要较长的焊接时间，产生较宽的热影响区。图1-4是45号钢摩