

# 航空钎焊技术

HANGKONG QIANHAN JISHU

张学军 主编

- 钎焊技术的基本原理和方法
- 实用航空钎焊材料及工艺
- 航空材料的钎焊设备与工装
- 钎焊缺陷与质量控制
- 操作中的安全与防护
- 航空钎焊应用实例



航空工业出版社

# 航空钎焊技术

张学军 主编

航空工业出版社

北 京

## 内 容 提 要

本书以航空材料和结构为对象,重点论述了钎焊的基本原理和方法,以及航空钎焊材料、钎焊工艺、钎焊设备与工装的特点,并介绍了部分钎焊应用实例。全书共计11章,主要内容包括钎焊概论、钎焊的基本原理、钎焊方法及设备、钎料、钎剂、钎焊工艺、航空材料的钎焊、钎焊缺陷及检验、钎焊质量控制、钎焊操作中的安全与防护,以及钎焊应用实例。

本书可作为航空航天工业钎焊专业技术人员和技工工人的学习和培训教材,同时也可作为其他行业工程技术人员的学习参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

航空钎焊技术/张学军主编. —北京:航空工业出版社,  
2008.6

ISBN 978-7-80243-135-5

I. 航… II. 张… III. 航空器—制造—钎焊 IV. V261.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第055251号

## 航空钎焊技术

Hangkong Qianhan Jishu

---

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2008年6月第1版

2008年6月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:10.75

字数:268千字

印数:1—3000

定价:48.00元

## 《航空钎焊技术》编审委员会

顾 问：李晓红

编写委员会：

主 编：张学军

委 员：毛 唯 程耀永 郭万林 马文利

审定委员会：

主 审：熊华平

委 员：（按姓氏笔画为序）

于文军 王 敏 甘武奎 曲 伸 刘元春

庄树军 李大斌 吴建科 吴家云 张田仓

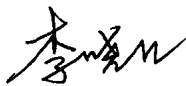
陈建平 武振林 郝俊明 梁养民 谢为刚

# 序

随着航空工业技术的不断提升和新机型的不断涌现,钎焊技术在飞机结构、发动机结构、机载设备、航空仪器仪表以及第二动力组合件上的应用越来越广泛,已经成为新型飞机和发动机构件制造的关键技术。例如,苏-27系列飞机和АЛ31Ф发动机钎焊结构设计新颖,工艺先进,选择了多种钎焊材料,配合感应、火焰、烙铁、真空等钎焊方法,连接各类高温合金、不锈钢、铜合金或钛合金的燃油和液压导管,以及机载设备中的多种零部件、机载电器导线接头等,其选用的钎焊材料30余种,由此可见,钎焊技术在苏-27飞机和АЛ31Ф发动机制造中的重要作用。РД33发动机除了空心涡轮叶片、蜂窝封严环、燃油总管等部件采用了钎焊连接外,在高压压气机无内环整流器以及导流窗的叶片和环体之间也全部采用钎焊连接,工作过程中压气机叶片所承受的各种载荷全部由钎焊缝承担,因此对钎焊质量提出了苛刻的要求。此外,F119、EJ200、АЛ41Ф等推重比10以上发动机均不同程度地采用了具有复杂内部冷却通道的空心气冷单晶、定向凝固高温合金、金属间化合物叶片,由于叶片内部型腔结构复杂、工作条件苛刻,因此对钎焊扩散焊技术也提出了更高要求。对于相控阵雷达天线、热交换器、宽弦空心风扇叶片等构件,钎焊扩散焊是其唯一可行的连接技术。

钎焊是一门技术,也是一门“手艺”。钎焊接头设计确定后,接头质量的好坏往往决定于具体操作的钎焊技术工人的技术水平,体现的是技术工人的“手艺”和经验。零件钎焊连接往往由于操作工人的更换造成接头缺陷增多,合格率下降,这在钎焊生产中是比较常见的。基于钎焊在航空工业中的重要性和工艺实施的特殊性,从2003年开始,由中航焊工技术考核委员会组织北京航空材料研究院的钎焊技术专家,对航空材料的钎焊工艺、钎焊材料、钎焊设备、质量控制等相关理论和实践经验进行了归纳整理,对航空工厂、空军修理厂、海军修理厂的钎焊技术人员和技能人员进行了两次培训,得到了各工厂钎焊技术人员的欢迎,同时在钎焊培训和教材编写方面也收集到了很多宝贵意见和建议,从2006年开始正式编写《航空钎焊技术》一书。

编书是为了知识、经验的继承和传播,是为了传道、授业、解惑。在我国航空工业快速发展的今天,在大力提倡技术创新的同时,更要注重技术的继承和共享。中航焊工技术考核委员会和北京航空材料研究院的钎焊专家们,怀着对我国航空工业的责任感和使命感,投入大量时间和精力来编写此书,以期对航空工业钎焊技术的发展贡献微薄之力。在本书出版之际,谨以此《序》,对参与教材编写和审阅的全体同志表示祝贺。



2008年4月

# 前 言

钎焊是一种金属热连接方法。在钎焊过程中,依靠熔化的钎料或依靠母材连接面与钎料之间的扩散而形成的液相,在毛细作用下填充母材之间的间隙,并且母材与钎料发生相互作用,然后冷却凝固,形成冶金结合。

钎焊具有悠久的历史,它是人类最早使用的材料连接方法之一。近年来,随着工业发展,钎焊技术在飞机、火箭、核电、车辆、家电、医疗器械、仪表等产品制造过程中得到了广泛应用。对于先进结构材料和复杂结构件的连接,钎焊显现出其独特的技术优势,甚至是某些新材料和复杂结构唯一的连接方法。随着新型热源的出现,钎焊加热方法也在不断增多,在传统的火焰加热、电阻加热和感应加热的基础上,又出现了电子束加热、光束加热、电弧加热等新型钎焊方法,这些方法的出现为构件的局部钎焊提供了更多的技术途径。

在航空航天领域,钎焊技术发挥了更大的作用。飞机机体上各种钛合金、不锈钢导管在组装过程中采用高频感应钎焊连接;机载设备上大量的导线、仪表也采用了钎焊连接;航空发动机的涡轮叶片、压气机叶片、整流器、导流窗、燃烧室部件、蜂窝封严结构、不锈钢热交换器、铝合金机箱、燃油总管及其他管路等构件的制造都涉及到钎焊技术。火箭发动机部件也广泛采用了钎焊技术。例如,为了提高大推力火箭发动机的喷管刚度和降低重量,在设计上采用了波纹板结构,波纹板与不锈钢面板之间采用真空钎焊连接;喷注器上的毛细管与盖板之间、小型火箭发动机复合材料喷管与金属座之间、大飞行马赫数飞行器的蒙皮蜂窝壁板等都采用了钎焊连接。

基于钎焊技术在航空领域应用的广泛性和重要性,中航焊工技术考核委员会组织行业内部钎焊专家,针对航空工业钎焊技术特点编写了本书。本书重点阐述了航空钎焊材料、钎焊工艺、钎焊设备与工装的基本原理和特点,融入了编写者大量的实践经验,有较强的针对性。本书适用于航空航天工业钎焊专业技术人员和技工工人的学习和培训,同时也可作为其他行业工程技术人员的学习参考书。

全书共11章,其中第1、2、7章由毛唯研究员编写,第3、6、11章由程耀永高级工程师编写,第4、5章由郭万林高级工程师编写,第8、9、10章由马文利高级工程师编写。全书由张学军高级工程师统编定稿。

本书在编写过程中得到了贵州红湖机械厂、沈阳飞机工业(集团)有限公司、哈尔滨东安发动机(集团)有限公司、云马飞机制造厂、成都飞机工业(集团)有限责任公司、西安飞机工业(集团)有限责任公司、洪都航空工业集团、中国南方航空工业有限责任公司、沈阳黎明发动机(集团)有限责任公司、西安航空发动机(集团)有限公司、贵州黎阳航空发动机公司、北京航空材料研究院、北京航空制造工程研究所、中国人民解放军第4723厂、中国人民解放军第5721厂等单位领导和专家的大力支持,在此一并致谢。

编 者

2008年4月

# 目 录

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第1章 概论 .....             | (1)  |
| 1.1 钎焊概述 .....           | (1)  |
| 1.2 钎焊分类 .....           | (2)  |
| 1.3 钎焊的发展历史 .....        | (2)  |
| 1.4 钎焊在航空航天领域的应用 .....   | (3)  |
| 第2章 钎焊的基本原理 .....        | (5)  |
| 2.1 钎料的润湿与铺展 .....       | (5)  |
| 2.1.1 润湿与铺展 .....        | (5)  |
| 2.1.2 影响钎料润湿铺展性的因素 ..... | (6)  |
| 2.2 液态钎料的填缝过程 .....      | (10) |
| 2.3 液态钎料与固态母材的相互作用 ..... | (11) |
| 2.3.1 固态母材向液态钎料的溶解 ..... | (11) |
| 2.3.2 钎料组分向固态母材的扩散 ..... | (12) |
| 2.4 钎焊时的去膜过程 .....       | (14) |
| 2.4.1 钎剂去膜 .....         | (15) |
| 2.4.2 自钎剂钎料去膜 .....      | (15) |
| 2.4.3 气体介质去膜 .....       | (16) |
| 2.4.4 机械去膜 .....         | (17) |
| 2.4.5 超声波去膜 .....        | (18) |
| 第3章 钎焊方法及设备 .....        | (19) |
| 3.1 钎焊方法概述 .....         | (19) |
| 3.2 一般钎焊方法简介 .....       | (20) |
| 3.2.1 烙铁钎焊 .....         | (20) |
| 3.2.2 火焰钎焊 .....         | (21) |
| 3.2.3 感应钎焊 .....         | (24) |
| 3.2.4 盐浴钎焊 .....         | (27) |
| 3.2.5 炉中钎焊 .....         | (29) |
| 3.2.6 再流钎焊 .....         | (32) |
| 3.2.7 波峰钎焊 .....         | (33) |
| 3.2.8 电阻钎焊 .....         | (34) |
| 3.2.9 其他钎焊方法简介 .....     | (35) |

|                                 |             |
|---------------------------------|-------------|
| 3.3 真空钎焊 .....                  | (36)        |
| 3.3.1 真空的概念 .....               | (37)        |
| 3.3.2 真空钎焊的基本原理 .....           | (38)        |
| 3.3.3 真空钎焊设备 .....              | (38)        |
| 3.3.4 真空钎焊工艺 .....              | (44)        |
| 3.3.5 真空钎焊应注意的问题 .....          | (45)        |
| <b>第4章 钎料 .....</b>             | <b>(48)</b> |
| 4.1 钎料的概念和分类 .....              | (48)        |
| 4.1.1 钎料的基本概念与作用 .....          | (48)        |
| 4.1.2 对钎料的要求 .....              | (48)        |
| 4.1.3 钎料的分类、牌号与标准 .....         | (48)        |
| 4.1.4 钎料的选用原则 .....             | (50)        |
| 4.2 软钎料 .....                   | (52)        |
| 4.2.1 锡铅类钎料 .....               | (52)        |
| 4.2.2 无铅类软钎料 .....              | (54)        |
| 4.2.3 其他软钎料 .....               | (54)        |
| 4.3 硬钎料 .....                   | (55)        |
| 4.3.1 铝基钎料 .....                | (55)        |
| 4.3.2 银基钎料 .....                | (56)        |
| 4.3.3 铜基钎料 .....                | (58)        |
| 4.3.4 镍基钎料 .....                | (60)        |
| 4.3.5 锰基钎料 .....                | (61)        |
| 4.3.6 金基钎料 .....                | (62)        |
| 4.3.7 钼基钎料 .....                | (63)        |
| 4.3.8 钛基钎料 .....                | (64)        |
| 4.3.9 钴基钎料 .....                | (65)        |
| 4.4 钎料的使用形式 .....               | (65)        |
| 4.4.1 丝状钎料 .....                | (65)        |
| 4.4.2 带状钎料 (连续箔带、片材) .....      | (65)        |
| 4.4.3 粉末钎料 (钎料粉末、钎料膏) .....     | (65)        |
| 4.4.4 黏带钎料 .....                | (65)        |
| 4.4.5 非晶态箔带钎料 .....             | (66)        |
| 4.4.6 复合板钎料 (单面复合板、双面复合板) ..... | (66)        |
| 4.4.7 镀层钎料 (纯金属镀层、合金镀层) .....   | (66)        |
| 4.4.8 预制钎料 .....                | (66)        |
| 4.4.9 钎料铸锭 (规则形状、锭坯) .....      | (66)        |
| <b>第5章 钎剂 .....</b>             | <b>(67)</b> |
| 5.1 钎剂的概念和分类 .....              | (67)        |

|            |                |             |
|------------|----------------|-------------|
| 5.1.1      | 钎剂的基本概念与作用     | (67)        |
| 5.1.2      | 对钎剂的一般要求       | (67)        |
| 5.1.3      | 钎剂的分类与编号       | (68)        |
| 5.1.4      | 钎剂的组成          | (69)        |
| 5.1.5      | 钎剂的选用原则        | (69)        |
| 5.2        | 软钎剂            | (70)        |
| 5.2.1      | 有机软钎剂          | (70)        |
| 5.2.2      | 无机软钎剂          | (72)        |
| 5.3        | 铝用钎剂           | (73)        |
| 5.3.1      | 铝用软钎剂          | (73)        |
| 5.3.2      | 铝用硬钎剂          | (74)        |
| 5.4        | 硬钎剂            | (75)        |
| 5.5        | 气体钎剂           | (77)        |
| <b>第6章</b> | <b>钎焊工艺</b>    | <b>(79)</b> |
| 6.1        | 表面准备           | (79)        |
| 6.1.1      | 零件表面油脂及有机物的去除  | (79)        |
| 6.1.2      | 表面氧化膜的去除       | (80)        |
| 6.1.3      | 表面镀覆           | (81)        |
| 6.1.4      | 表面制备后零件的保存     | (82)        |
| 6.2        | 零件装配及钎料添加      | (83)        |
| 6.2.1      | 夹具及工装设计        | (83)        |
| 6.2.2      | 零件的定位与固定       | (84)        |
| 6.2.3      | 钎焊间隙控制与补偿      | (84)        |
| 6.2.4      | 钎料及钎剂添加        | (85)        |
| 6.2.5      | 防止粘连与钎料阻流      | (88)        |
| 6.3        | 钎焊热循环          | (88)        |
| 6.3.1      | 钎焊工艺参数的确定      | (88)        |
| 6.3.2      | 钎焊操作及工艺过程的监控   | (91)        |
| 6.4        | 钎焊后处理          | (91)        |
| 6.4.1      | 残余钎剂的去除        | (91)        |
| 6.4.2      | 阻流剂的去除         | (92)        |
| 6.4.3      | 钎焊后热处理         | (92)        |
| <b>第7章</b> | <b>航空材料的钎焊</b> | <b>(93)</b> |
| 7.1        | 结构钢和不锈钢的钎焊     | (93)        |
| 7.1.1      | 结构钢和不锈钢的钎焊性能   | (93)        |
| 7.1.2      | 钎焊前表面准备和焊后处理   | (93)        |
| 7.1.3      | 结构钢与不锈钢的软钎焊    | (95)        |
| 7.1.4      | 结构钢与不锈钢的硬钎焊    | (95)        |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 7.2 高温合金的钎焊 .....             | (103)        |
| 7.2.1 高温合金的钎焊性能 .....         | (103)        |
| 7.2.2 钎焊前表面准备和焊后处理 .....      | (104)        |
| 7.2.3 高温合金用钎料 .....           | (105)        |
| 7.2.4 高温合金钎焊工艺 .....          | (106)        |
| 7.2.5 大间隙钎焊 .....             | (110)        |
| 7.2.6 过渡液相扩散焊 (TLP 扩散焊) ..... | (113)        |
| 7.3 铝及铝合金的钎焊 .....            | (114)        |
| 7.3.1 铝及铝合金钎焊前表面准备和焊后处理 ..... | (114)        |
| 7.3.2 铝及铝合金的软钎焊 .....         | (115)        |
| 7.3.3 铝及铝合金的硬钎焊 .....         | (116)        |
| 7.4 钛及钛合金的钎焊 .....            | (119)        |
| 7.4.1 钛及钛合金钎焊性能 .....         | (119)        |
| 7.4.2 钎焊前表面准备和焊后处理 .....      | (119)        |
| 7.4.3 钎焊工艺 .....              | (120)        |
| 7.4.4 钛合金钎焊新技术 .....          | (122)        |
| 7.4.5 钛铝金属间化合物材料的钎焊 .....     | (123)        |
| 7.5 铜及铜合金的钎焊 .....            | (125)        |
| 7.5.1 铜及铜合金的钎焊性 .....         | (125)        |
| 7.5.2 钎焊前准备和焊后处理 .....        | (126)        |
| 7.5.3 钎焊工艺 .....              | (127)        |
| <b>第8章 钎焊缺陷及检验 .....</b>      | <b>(131)</b> |
| 8.1 钎焊缺陷的种类及其特点 .....         | (131)        |
| 8.2 常见钎焊缺陷的产生原因及其防止措施 .....   | (131)        |
| 8.2.1 钎缝的外部缺陷 .....           | (131)        |
| 8.2.2 钎缝的内部缺陷 .....           | (132)        |
| 8.2.3 母材的自裂和接头裂纹 .....        | (135)        |
| 8.3 钎焊缺陷的检验 .....             | (137)        |
| 8.3.1 焊接检验的意义和作用 .....        | (137)        |
| 8.3.2 检验过程与内容 .....           | (137)        |
| 8.3.3 焊件质量检验的依据 .....         | (138)        |
| 8.3.4 成品检验方法 .....            | (138)        |
| <b>第9章 钎焊质量控制 .....</b>       | <b>(143)</b> |
| 9.1 质量控制的作用 .....             | (143)        |
| 9.2 质量控制的主要内容 .....           | (143)        |
| 9.2.1 设计输入控制 .....            | (143)        |
| 9.2.2 工艺控制 .....              | (144)        |

第 10 章 钎焊操作中的安全与防护 ..... (146)

10.1 不安全及不卫生因素 ..... (146)

10.1.1 钎焊材料中的有毒物质 ..... (146)

10.1.2 有毒蒸气和烟尘 ..... (147)

10.1.3 易燃易爆物 ..... (147)

10.1.4 高频电磁场 ..... (148)

10.1.5 噪声 ..... (148)

10.2 常用钎焊方法的安全操作和健康保护 ..... (148)

10.2.1 火焰钎焊安全操作与防护 ..... (148)

10.2.2 浸渍钎焊安全操作与防护 ..... (148)

10.2.3 感应钎焊安全操作与防护 ..... (149)

10.2.4 炉中钎焊安全操作与防护 ..... (149)

10.2.5 通风 ..... (149)

10.2.6 对有毒物品的管理与防护 ..... (150)

第 11 章 钎焊应用实例 ..... (151)

11.1 航空发动机涡轮叶片的钎焊 ..... (151)

11.2 铝合金雷达平板缝阵天线的钎焊 ..... (152)

11.3 不锈钢列管式热交换器芯体的钎焊 ..... (153)

11.4 不锈钢毛细管喷丝头结构的钎焊 ..... (153)

11.5 铝合金浮子结构的火焰钎焊 ..... (154)

11.6 导管接头的安装式感应钎焊 ..... (154)

11.7 铝合金航空燃油 - 液体热交换器的钎焊 ..... (156)

11.8 铝合金板翅式机箱的炉中钎焊 ..... (157)

11.9 不锈钢金属软管感应钎焊 ..... (159)

参考文献 ..... (160)

# 第1章 概 论

## 1.1 钎焊概述

钎焊是金属材料连接的重要方法之一，它同电子束焊、激光焊、摩擦焊一起被认定为先进飞机和发动机的关键焊接技术。

钎焊同电子束焊、激光焊、摩擦焊一样，目的是使被焊材料形成冶金连接；但钎焊又同其他焊接方法在原理、设备、工艺过程方面存在明显差异。电子束焊是利用高能电子束流轰击被焊材料，使被焊材料迅速熔化而形成连接，焊接时一般不添加焊接材料；该方法在航空工业领域应用广泛，可以焊接多种结构材料和规格的构件。激光焊是利用高能量密度光束照射材料表面，使被焊材料迅速熔化并汽化而实现连接，焊接时可以添加焊接材料，通过焊接材料同母材的匹配来调整焊接接头的综合性能；该方法也适用于多种材料焊接，由于不受真空室限制，因此在航空领域主要用于焊接大型铝合金薄壁构件。摩擦焊是利用被焊母材表面或者母材同搅拌头之间高速摩擦产生的热量来加热待焊区域，使之达到半熔化状态，在压力作用下形成连接，在航空领域主要应用于发动机轴类件、叶盘焊接。而钎焊可以采用电阻加热、火焰加热、感应加热、光束加热等多种加热方式加热焊接组件，钎焊时需要添加钎料，在外加热源作用下使钎料熔化，而被焊母材不熔化，熔化的钎料在母材表面润湿铺展，填充到被焊母材的间隙中，冷却凝固后形成冶金连接。钎焊在航空航天领域应用广泛，适用于多种材料和结构，对于一些复杂构件来说，钎焊是唯一可行的连接方法。目前钎焊已经成为先进飞机和发动机制造不可缺少的焊接方法。

钎焊方法很多，不同的钎焊方法在具体实施中存在差异，但钎焊接头形成的原理是基本相同的。因此，可以对钎焊做出如下定义：钎焊是一种金属热连接方法。在钎焊过程中，依靠熔化的钎料或依靠母材连接面与钎料之间的扩散（接触反应钎焊）而形成的液相，在毛细作用下填充母材之间的间隙，并且母材与钎料发生相互作用，然后冷却凝固，形成冶金结合。

由于钎焊在原理、设备、工艺过程方面与其他焊接方法不同，因此钎焊技术在工程应用中表现出以下独特的优点。

(1) 钎焊加热温度一般远低于母材的熔点，因而对母材的物理和化学性能通常没有明显的不利影响。

(2) 钎焊技术具有很高的生产效率，可一次完成多缝多零件的连接。例如，前苏联制造的推力为 750N 的液体火箭发动机，其燃烧室内的钎缝长度达 750m，可通过钎焊一次完成。

(3) 钎焊温度低，可对焊件整体均匀加热，因此引起的应力和变形小，容易保证焊件的尺寸精度。

(4) 钎焊技术可用于结构复杂、精密、开敞性和接头可达性差的焊件。例如，采用真

空钎焊技术可实现多层复杂结构铝合金雷达天线和微波器件的精密钎焊。又如,具有复杂内部冷却通道的航空发动机高压涡轮工作叶片和导向叶片也只有采用钎焊方法才能实现优质连接。

(5) 钎焊技术适用于多种材料连接,该技术不但可以连接常规金属材料,对于其他一些焊接方法难以连接的金属材料,以及陶瓷、玻璃、石墨和金刚石等非金属材料也可实现连接。此外,钎焊还较易实现异种金属、金属与非金属材料的连接。

因此,许多采用其他焊接方法难以连接甚至无法连接的结构或材料,采用钎焊方法却可以解决,而且钎焊能保证焊件具有更高的可靠性。

钎焊技术有很多优点,同时也存在不足:(1) 钎焊接头的强度一般较低,特别是没有通过特殊工艺处理的接头强度更低;(2) 耐热能力较差;(3) 由于较多地采用搭接接头,因而增加了母材的消耗量和结构的重量<sup>①</sup>;(4) 镍基、铜基等高温钎料通常含有 Si、B 等降熔元素,致使钎焊接头脆性大。因此应根据产品的材质、结构特点和工作条件等因素,合理选择焊接方法和焊接材料。对于那些精度要求高、尺寸微小、结构复杂、接头可达性差,以及涉及异种材料连接等问题的工件,应优先考虑采用钎焊方法焊接。

## 1.2 钎焊分类

按照不同的特征和标准,可将钎焊方法进行分类,归纳起来有以下几种分类方式。

(1) 按照钎料的熔点分类。按照美国焊接学会推荐的标准,可将钎焊分为两类:所使用钎料液相线温度在 450℃ 以上的钎焊称为硬钎焊,在 450℃ 以下的钎焊称为软钎焊。

(2) 按照钎焊温度的高低分类。可将钎焊分为高温钎焊、中温钎焊和低温钎焊,但是这种分类不规范,高、中、低温的划分是相对于母材的熔点而言的,其温度分界标准也不十分明确,只是一种通常的说法。例如,对于铝合金来说,加热温度在 500 ~ 630℃ 范围内称为高温钎焊,加热温度在 300 ~ 500℃ 时称为中温钎焊,而加热温度低于 300℃ 时称为低温钎焊。铜及其他金属合金的钎焊有时也有类似情况,但温度划分范围不尽相同。通常所说的高温钎焊,一般是指温度高于 900℃ 的钎焊。

(3) 按照热源种类和加热方式分类。可将钎焊分为烙铁钎焊、火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊、电阻钎焊、电弧钎焊、浸渍钎焊、红外钎焊、激光钎焊、电子束钎焊、气相钎焊和超声波钎焊等。

(4) 按照环境介质及去除母材表面氧化膜的方式分类。可将钎焊分为有钎剂钎焊、无钎剂钎焊、自钎剂钎焊、刮擦钎焊、气体保护钎焊和真空钎焊等。

此外,随着材料科学和焊接技术的不断发展,出现了一些新的钎焊方法或由钎焊方法派生出一些新的焊接方法,如接触反应钎焊(又称共晶钎焊或 LID 焊接)和过渡液相扩散焊(TLP 扩散焊)等。

## 1.3 钎焊的发展历史

钎焊具有悠久的历史,它是人类最早使用的材料连接方法之一。人类历史上,当人类

---

<sup>①</sup> 本书“重量”系指“质量”,单位为千克(kg)。

尚未开始使用铁器时，就已发明用钎焊来连接金属。在埃及出土的古文物中，就有用银铜钎料钎焊的管子，用金钎料连接的护符盒，据考证分别是 5000 年前和近 4000 年前的物品。公元 79 年被火山爆发埋没的庞贝城的废墟中，残存着用钎焊连接的家用铅制水管的遗迹，使用的钎料具有  $\text{Sn}:\text{Pb}=1:2$  的成分比，类似现代使用的钎料成分。我国在公元前 5 世纪的战国初期也已经使用锡铅合金钎料，在秦始皇兵马俑青铜马车中也大量采用了钎焊技术。我国最早见诸于文献记载的钎焊是汉代班固所撰《汉书》中云：“胡桐泪盲似眼泪也可以汗金银也今工匠皆用之”。1637 年出版的明代宋应星科技巨著《天工开物》中有“中华小钎用白铜末，大钎则竭力挥锤而强合之”的记载。明代方以智所撰《物理小识》云：“焊药以硼砂合铜为之，若以胡桐汁合银，坚如石。今玉石刀柄之类焊药，加银一分其中，则永不脱。试以圆盆口点焊药于其一隅，其药自走，周而环之，亦一奇也”。这一记述明确指出了铜钎焊应以硼砂做钎剂而银钎焊则可以胡桐树脂为钎剂，并且对钎料的填缝行为做了精彩的描述。

尽管钎焊技术出现较早，但很长时间没有得到大的发展。进入 20 世纪后，其发展也落后于熔焊技术。直到 20 世纪 30 年代，在冶金和化工技术发展的基础上，钎焊技术才有了较快发展，并逐渐成为一种独立的工业生产技术。尤其是第二次世界大战后，由于航空、航天、核能、电子等新技术的发展，新材料、新结构形式的采用，对连接技术提出了更高的要求，钎焊技术因此受到高度重视，并迅速发展，出现了许多新的钎焊方法，其应用也越来越广泛。例如，制造机械加工用的各种刀具，特别是硬质合金刀具，钻探、采掘用的钻具，各种导管和容器，汽车、拖拉机的水箱，各种用途的不同材料、不同结构形式的换热器，电机部件，以及汽轮机的叶片和拉筋等构件的制造广泛采用钎焊技术。在轻工业生产中，从医疗器械、金属植入假体、乐器到家用电器、炊具、自行车，都大量采用钎焊技术。对于电子工业和仪表制造业，在很大范围内钎焊是唯一可行的连接方法。如在元器件生产中大量涉及金属与陶瓷、玻璃等非金属的连接问题，在布线连接中必须防止加热对元器件的损害，这些都有赖于钎焊技术。在核电站和船舶核动力装置中，燃料元件定位架、换热器、中子探测器等重要部件也常采用钎焊结构。

随着新型热源的出现，钎焊加热方法也在不断增多，在传统的火焰加热、电阻加热、感应加热的基础上，又出现了电子束加热、光束加热、电弧加热等新型钎焊方法，这些方法的出现为构件的局部钎焊提供了更多的技术途径，也推动了钎焊技术的发展。

## 1.4 钎焊在航空航天领域的应用

在航空航天领域，钎焊技术发挥了更大的作用。飞机基体上各种钛合金、不锈钢导管在组装过程中采用高频感应钎焊连接，起到了明显的减重作用。机载设备上大量的导线、仪表也采用了钎焊连接。飞行马赫数大于 2.5 的飞机，由于蒙皮要承受与空气摩擦引起的高温，越来越多地采用了不锈钢、钛合金或高温合金的钎焊蜂窝壁板。

航空发动机的很多重要部件，如涡轮叶片、压气机叶片、燃烧室部件、蜂窝封严结构、不锈钢热交换器、铝合金机箱、燃油总管及其他管路等构件的制造都涉及到钎焊技术。发动机整流器、导流窗叶片与机匣之间采用钎焊连接，既满足了设计要求，又达到了减重效果。据统计，某型航空发动机的核心机钎焊面积超过  $14000\text{cm}^2$ 。

火箭发动机部件也广泛采用了钎焊技术。大推力火箭发动机的喷管尺寸很大，为了提

高刚度和降低重量，在设计上采用了波纹板结构，即两层不锈钢板中间加入波纹板，波纹板与不锈钢面板之间采用真空钎焊连接，长度超过 1000mm 的上百条焊缝一次钎焊完成。火箭发动机喷注器上的毛细管与盖板之间也采用了真空钎焊连接。为了减重，小型火箭发动机喷管采用了复合材料，复合材料喷管与金属座之间采用了钎焊连接。

随着航空科学技术的发展，在未来航空装备中将越来越多地采用新材料、新结构 and 新的制造技术，钎焊及其派生的连接技术，如 TLP 扩散焊和 LID 焊接，对于新材料的连接及复杂精细结构件的制造具有独特的优越性和灵活性，因此钎焊技术在航空工业及其他工业领域中的应用将越来越广泛，并将更多地用于重要部件的连接。

## 第2章 钎焊的基本原理

钎焊时，只有液态钎料流入并致密地填满全部钎缝间隙，且与母材发生相互作用，才能获得优质的接头。钎焊包含两个过程：一是钎料填满钎缝的过程；二是钎料与母材相互作用的过程。具体来说，加热到钎焊温度时，钎料熔化填缝并与母材表面发生物理化学作用。熔化的钎料填满钎焊接头间隙，经过一定时间保温后开始冷却、凝固，形成钎焊接头。

并非任何熔化的钎料都能顺利填入接头的间隙中，即填缝必须具备一定的条件。液态钎料对固态母材的润湿铺展以及钎焊接头间隙的毛细作用是熔化钎料填缝的基本条件，而液态钎料要与母材发生润湿，必须要清除金属表面的氧化膜。

本章主要讨论钎焊接头形成过程所涉及的一些物理化学现象和冶金反应，包括润湿与铺展、液态钎料的填缝过程、液态钎料与固态母材之间的相互作用以及钎焊时的去膜过程。

### 2.1 钎料的润湿与铺展

#### 2.1.1 润湿与铺展

要使液态钎料填满钎焊接头间隙，其前提条件是液态钎料必须能良好地润湿母材。由物理化学知识可知，将某液滴置于固体表面，若液滴和固体界面的变化能使液固体系自由能降低，则液滴将沿固体表面流动并铺开，呈图 2-1 所示的状态，这种现象称为铺展。图中， $\theta$  称为润湿角， $\sigma_{sg}$ 、 $\sigma_{lg}$ 、 $\sigma_{sl}$  分别表示固-气、液-气、固-液相界面间的界面张力。液滴在固体表面铺展后的最终形状可由杨氏（Young）方程（或称润湿平衡方程）描述

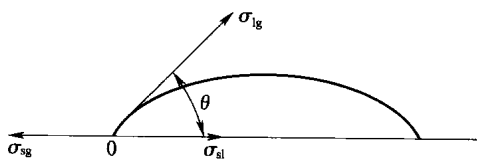


图 2-1 铺展时界面张力平衡示意图

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} \cos \theta \quad (2-1)$$

由杨氏方程可以推导出润湿角与各界面张力的关系

$$\cos \theta = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lg} \quad (2-2)$$

润湿角的大小表征了体系润湿与铺展能力的强弱。由式（2-2）可知，润湿角  $\theta$  的大小与各界面张力的数值有关。 $\theta$  大于还是小于  $90^\circ$  取决于  $\sigma_{sg}$  与  $\sigma_{sl}$  数值的大小。若  $\sigma_{sg} > \sigma_{sl}$ ，则  $\cos \theta > 0$ ，即  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ，此时认为液体能润湿固体， $\theta$  越小，则液体对固体润湿效果越好，其极限情况是  $\theta = 0^\circ$ ，即液体能完全润湿固体，如水滴在清洁的玻璃表面可完全铺开；若  $\sigma_{sg} < \sigma_{sl}$ ，则  $\cos \theta < 0$ ，即  $180^\circ > \theta > 90^\circ$ ，这种情况称为液体不润湿固体，其极限情况是  $\theta = 180^\circ$ ，即完全不润湿，如在玻璃表面滴一滴水银，则水银将会形成一个球体在玻璃板上滚动。钎焊时液态钎料在母材上的润湿角应小于  $20^\circ$ 。

2.1.2 影响钎料润湿铺展性的因素

由式(2-2)可以看出,任何可使固-气相界面张力 $\sigma_{sg}$ 增大,或使固-液相界面张力 $\sigma_{sl}$ 以及液-气相界面张力 $\sigma_{lg}$ 减小的因素都可使润湿角 $\theta$ 减小,从而改善钎料对母材的润湿性。 $\sigma_{lg}$ 减小意味着液体内部原子对表面原子的吸引力减弱,液体原子有趋于表面并使表面增大的趋势,从而促进润湿; $\sigma_{sl}$ 下降意味着固体原子对液体原子的吸引力增加,使液体原子被拉向固-液相界面,因此也促进润湿。

表2-1~表2-3分别列出了一些液态金属在其熔点时的表面张力 $\sigma_{lg}$ 、固态金属的表面张力 $\sigma_{sg}$ 和金属体系界面张力的数据。除液态金属的表面张力数据比较齐备外,后两项数据为数很少。至于钎料(通常均为多元合金的),上述各项数据更为稀少,因此无法借助式(2-2)指导生产实践。

表 2-1 一些液态金属的表面张力

| 金属     | $\sigma_{lg}/(\text{N/m})$ | 金属     | $\sigma_{lg}/(\text{N/m})$ | 金属     | $\sigma_{lg}/(\text{N/m})$ | 金属     | $\sigma_{lg}/(\text{N/m})$ |
|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|
| 银 (Ag) | 0.93                       | 铬 (Cr) | 1.59                       | 锰 (Mn) | 1.75                       | 铋 (Sb) | 0.38                       |
| 铝 (Al) | 0.91                       | 铜 (Cu) | 1.35                       | 钼 (Mo) | 2.10                       | 硅 (Si) | 0.86                       |
| 金 (Au) | 1.13                       | 铁 (Fe) | 1.84                       | 钠 (Na) | 0.19                       | 锡 (Sn) | 0.55                       |
| 钡 (Ba) | 0.33                       | 钙 (Ca) | 0.70                       | 铌 (Nb) | 2.15                       | 钽 (Ta) | 2.40                       |
| 铍 (Be) | 1.15                       | 锗 (Ge) | 0.60                       | 钕 (Nd) | 0.68                       | 钛 (Ti) | 1.40                       |
| 铋 (Bi) | 0.39                       | 铪 (Hf) | 1.46                       | 镍 (Ni) | 1.81                       | 钒 (V)  | 1.75                       |
| 镉 (Cd) | 0.56                       | 铟 (In) | 0.56                       | 铅 (Pb) | 0.48                       | 钨 (W)  | 2.30                       |
| 铈 (Ce) | 0.68                       | 锂 (Li) | 0.40                       | 钯 (Pd) | 1.60                       | 锌 (Zn) | 0.81                       |
| 钴 (Co) | 1.87                       | 镁 (Mg) | 0.57                       | 铑 (Rh) | 2.10                       | 锆 (Zr) | 1.40                       |

表 2-2 一些固态金属的表面张力

| 金 属    | 温度/℃ | $\sigma_{sg}/(\text{N/m})$ | 金 属    | 温度/℃ | $\sigma_{sg}/(\text{N/m})$ |
|--------|------|----------------------------|--------|------|----------------------------|
| 铁 (Fe) | 20   | 4.0                        | 铝 (Al) | 20   | 1.91                       |
|        | 1400 | 2.1                        | 钨 (W)  | 20   | 6.81                       |
| 铜 (Cu) | 1050 | 1.43                       | 锌 (Zn) | 20   | 0.86                       |

表 2-3 一些金属体系的界面张力

| 金属体系  | 温度/℃ | $\sigma_{sg}/(\text{N/m})$ | $\sigma_{lg}/(\text{N/m})$ | $\sigma_{sl}/(\text{N/m})$ |
|-------|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Al-Sn | 350  | 1.01                       | 0.60                       | 0.28                       |
|       | 600  | 1.01                       | 0.56                       | 0.25                       |
| Cu-Ag | 850  | 1.67                       | 0.94                       | 0.28                       |
| Fe-Cu | 1100 | 1.99                       | 1.12                       | 0.44                       |
| Fe-Ag | 1125 | 1.99                       | 0.91                       | >3.40                      |
| Cu-Pb | 800  | 1.67                       | 0.41                       | 0.52                       |