“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列（应用型院校用书）

钎焊

QIAN HAN

主　编　朱　艳
副主编　赵　霞
　　钱兵羽

院士专家著书　体现先进性　前瞻性　反映材料领域的研究成果
学科融合贯通　注重交叉性　学术性　立足材料科学的人才培养
内容丰富翔实　追求研究性　实用性　促进材料工程的创新发展

哈爾濱工業大學出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

钎　　焊

主　编　朱　艳
副主编　赵　霞　钱兵羽

哈爾濱工業大學出版社

内容提要

本书的主要内容包括三部分:第一部分(第1~6章)为有关钎焊的基础理论,包括钎焊的基本原理、钎焊方法及设备、钎料及钎剂的种类及使用、钎焊工艺的选择等;第二部分(第7~10章)为各种材料的钎焊,包括铜、铝等常用金属、硬质合金与金属、金属与非金属、复合材料的钎焊工艺、钎焊与钎剂的选择;第三部分(第11、12章)为钎焊的缺陷及检验以及钎焊过程中的安全与防护。本书力求理论联系实际,突出基本问题,注重工程实际能力的培养,并适当反映国内外的最新研究成果和发展趋势。

本书可作为高等院校材料成形及控制工程专业(或焊接方向)的主干课教材,亦可供从事钎焊工艺及设备等领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钎焊/朱艳主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.11

ISBN 978-7-5603-3858-3

Ⅰ.①钎… Ⅱ.①朱… Ⅲ.①钎焊-高等学校-教材 Ⅳ.①TG454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第283351号

材料科学与工程 图书工作室

责任编辑 许雅莹
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社　　址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号　邮编150006
传　　真 0451-86414749
网　　址 http://hitpress.hit.edu.cn
印　　刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开　　本 787mm×1092mm　1/16　印张15.25　字数343千字
版　　次 2012年11月第1版　2012年11月第1次印刷
书　　号 ISBN 978-7-5603-3858-3
定　　价 29.00元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前　言

钎焊作为一种材料连接方法，具有悠久的历史，它是最早的材料连接方法之一。近年来，随着科学技术的发展，钎焊在飞机、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。

但是自从焊接专业纳入“材料成型及控制工程”专业以后，钎焊作为焊接方法的一个分支，很多院校都将其归入焊接方法的教学中。由于课时及大纲要求等原因，钎焊部分的课时相对较少，又没有专门的教材。随着钎焊技术应用的广泛性和重要性，目前迫切需要大专院校的毕业生系统地掌握钎焊的基本原理及工艺要求、操作技术和各种常用材料的钎焊要求，因此需要将钎焊作为一门课程单独授课。编写《钎焊》一书正是为了满足目前没有专用的钎焊教材这种需求。

全书共 12 章，其中第 1、2 章由钱兵羽编写，第 7、8、9、10 章由朱艳编写，第 3、4、5、6、11、12 章由赵霞编写。全书由朱艳统编定稿。

本书可作为高等学校焊接专业本科生的教材，也可供从事钎焊工作的研究人员和技术人员参考。

由于作者的专业知识和水平有限，书中难免存在不足，请广大读者批评指正。

编　者

2012 年 8 月

目　录

第1章　绪　论 …… 1
1.1　钎焊及其特点 …… 1
1.2　钎焊分类 …… 2
1.3　钎焊的发展及应用 …… 2
第2章　钎焊原理 …… 4
2.1　钎料的润湿与铺展 …… 4
2.2　液态钎料的填缝 …… 10
2.3　液态钎料与固态母材的相互作用 …… 12
2.4　钎焊时的去膜过程 …… 18
第3章　钎焊方法及设备 …… 24
3.1　火焰钎焊 …… 24
3.2　感应钎焊 …… 32
3.3　炉中钎焊 …… 38
3.4　电阻钎焊 …… 47
3.5　浸沾钎焊 …… 51
3.6　其他钎焊方法 …… 55
3.7　各种钎焊方法的比较 …… 59
第4章　钎　料 …… 60
4.1　概　述 …… 60
4.2　软钎料 …… 63
4.3　硬钎料 …… 77
4.4　钎料的选择 …… 98
第5章　钎　剂 …… 101
5.1　概　述 …… 101
5.2　软钎剂 …… 105
5.3　铝用钎剂 …… 109
5.4　硬钎剂 …… 112
5.5　气体钎剂 …… 114
5.6　真　空 …… 115

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

第 6 章　钎焊接头设计及钎焊工艺 …… 120
6.1　钎焊接头设计 …… 120
6.2　表面准备 …… 127
6.3　工件装配和钎料添加 …… 131
6.4　钎焊热循环 …… 137
6.5　钎焊后处理 …… 139
第 7 章　常用金属材料的钎焊 …… 141
7.1　铝及铝合金的钎焊 …… 141
7.2　铜及铜合金的钎焊 …… 150
7.3　碳钢、低合金钢和不锈钢的钎焊 …… 155
7.4　钛及钛合金的钎焊 …… 161
7.5　高温合金的钎焊 …… 164
7.6　异种金属的钎焊 …… 169
第 8 章　硬质合金的钎焊 …… 176
8.1　概　述 …… 176
8.2　钎料与钎剂 …… 179
8.3　硬质合金钎焊工艺 …… 183
第 9 章　金属与非金属的钎焊 …… 186
9.1　金刚石工具的钎焊 …… 186
9.2　石墨与金属的钎焊 …… 188
9.3　陶瓷与金属的钎焊 …… 191
第 10 章　复合材料的钎焊 …… 196
10.1　复合材料的分类、特点及应用 …… 196
10.2　金属基复合材料的钎焊 …… 198
10.3　碳/碳复合材料的钎焊 …… 203
10.4　陶瓷基复合材料的钎焊 …… 208
第 11 章　钎焊缺陷及检验 …… 213
11.1　常见钎焊接头的缺陷及防止 …… 213
11.2　钎焊接头破坏性检验方法 …… 219
11.3　钎焊接头无损检验方法 …… 223
第 12 章　钎焊操作中的安全与防护 …… 229
12.1　不安全及不卫生因素 …… 229
12.2　常用钎焊方法的安全操作和健康防护 …… 232
参考文献 …… 236

第1章 绪 论

1.1 钎焊及其特点

钎焊是采用(或过程中自动生成)比母材熔化温度低的钎料,采取低于母材固相线而高于钎料液相线的操作温度,通过熔化的钎料将母材连接在一起的一种焊接技术。钎焊时钎料熔化为液态而母材保持为固态,液态钎料在母材的间隙中或表面上润湿、毛细流动、填充、铺展、与母材相互作用(溶解、扩散或产生金属间化合物),冷却凝固形成牢固的接头,从而将母材连接在一起。钎焊是一项比较精密的连接技术,与熔焊、压焊共同构成了现代焊接技术的三大主要组成部分。

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,因而对母材的物理化学性能影响较小;焊件整体均匀加热,引起的应力和变形小,容易保证焊件的尺寸精度。

(2)钎焊技术具有很高的生产效率,钎焊可一次完成多缝多零件的连接。例如,苏联制造的推力为750 N的液体火箭发动机,其燃烧室内的钎缝长度达750 m,可通过钎焊一次完成;火箭发动机不锈钢面板/波纹板芯推力室壳体,采用钎焊连接,数百条焊缝一次钎焊完成。

(3)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。而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。

(4)钎焊技术特别适用于多种材料组合连接。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、石墨及金刚石等非金属材料也适用,此外,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进行甚至无法进行连接的结构或材料,采用钎焊方法便可以解决。

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;

(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。

随着钎焊材料及钎焊技术的发展，钎焊的不足之处在不断地改善中，钎焊技术越来越多地用于重要承力构件以及和复杂构件的制造，在新型特种材料的连接中显示出重要的作用，对于某些材料、某些构件甚至是唯一可行的连接方式。

1.2 钎焊分类

按照不同的特征和标准，钎焊有如下分类：

(1)按照钎料的熔点分

按照美国焊接学会推荐的标准，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

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

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

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 钎焊的发展及应用

钎焊是一种古老的连接方法，已知最早的钎焊现象出现在美索不达米亚地区苏美尔文明的乌贝德时期(公元前3000年)的一件铜制嵌板上，其上饰有两只雄鹿，它们的牙齿和主干由钎焊连成一个整体。公元79年被火山爆发埋没的庞贝城的废墟中，残存着由钎焊连接的家用铅制水管的遗迹，使用钎料的成分为$\omega(Sn):\omega(Pb)=1:2$，类似现代使用的钎料成分。

中国古代的钎焊技术起源很早，约发明于西周晚期，但使用量较少，到了春秋战国时期，钎焊技术逐渐推广开来。在湖北曾侯乙墓出土的大量精美青铜器中，钎焊技术得到了广泛应用，其中最精美的尊盘在制造时大量使用了钎焊技术，钎料为铅锡合金。我

国最早见诸于文献记载的钎焊是汉代班固所撰《汉书》，书中记载："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》中记载"中华小钎用白铜末，大钎则竭力挥锤而强合之"。清朝郑复光《镜镜詅痴》中记载"锡工小焊，低锡不可宜也，高亦不可，何也？盖焊，必较本身易化；故金银工焊用银参铜及硼砂；铜铁焊用焊药参硼砂。…… 咸取其易化也，焊药之锡过高，则焊药未化而本身先化矣。"和"锡大焊方，先用锡化大著松香，屡捞搅之，以去其灰。再逼出净锡，离火稍停，再参水银，自不飞。汞视锡六而一，不可过多，锡内水银过多则易碎。"加入松香是为了去除锡料杂质和防止焊料氧化，经充分搅拌，去除渣滓，得到纯净的锡铅合金熔液。而松香至今仍在作为钎剂使用，同时用做钎剂的还有硼砂、盐胆、胡桐泪等。加入汞是为降低焊料的熔点，这样可以用于低熔点金属的焊接。

钎焊技术虽然发明较早，且较早就达到了较高的水平，但是它的发展历程也经历了时代的考验。从19世纪初，英国的戴维斯发现电弧和氧乙炔焰两种能局部熔化金属的高温热源开始，熔化焊进入了发展的快车道，而钎焊步入了发展的困难期。在很长的历史时期中，钎焊技术没有得到很大的发展。进入20世纪后，其发展也远落后于熔化焊技术。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。尤其是二次世界大战后，由于航空航天、电子和核能工业的迅速发展，为满足构件的轻质量、高强度、高刚度、高导电性和导热性等，以及某些恶劣的工况条件（如高温、高压、抗疲劳、耐腐蚀等）和低制造成本的需要，采用了大量的新材料、新结构、新工艺和新设备，对连接技术提出了更高的要求，钎焊技术因能满足这些要求，而受到更大的重视，也推动钎焊技术以前所未有的速度发展起来，同时促进了钎焊技术在民用产品，如家电、汽车、轻工等行业的大量应用。

目前钎焊的基体材料主要有碳钢、不锈钢、铝合金、铜合金、高温合金、钛合金、硬质合金、陶瓷和金刚石等；所用钎料主要有锡基、铝基、银基、铜基、锰基、镍基、钛基和金基等；采用的钎焊方法主要有软钎焊（如波峰焊、再流焊等）和硬钎焊（如炉中钎焊、高频感应钎焊、火焰钎焊等）。

由于钎焊技术是一种近无余量的加工制造技术，它可以连接各种复杂、精密的零部件，并使焊件质量和制造成本显著降低。因此广泛应用于航空航天、电子、核工业、机械、汽车、家电、轻纺、石油、煤炭、仪器、仪表、交通、建筑等行业，已成为许多工业产品优先选择的连接技术。例如，机械制造业中各种硬质合金刀具、硬质合金钻头、采煤机上的截煤齿、压缩机叶轮，汽车工业中各种铝制的蒸发器、冷凝器、换热器、水箱等电机部件，以及大型发电机转子线圈等构件都广泛采用钎焊技术。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，如各种不同电子元器件的引线（或无引线的焊球）与印制电路板（PCB）焊盘的连接，制造不同类型的集成电路器件。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。在航空航天领域，钎焊技术更发挥了重要的作用，如航空发动机中的导流叶片、高压涡轮导向器叶片、燃油总管等部件使用的结构材料多为不锈钢、钛合金和铝、钛含量较高的高温合金，它们的熔焊性能一般很差，因此主要依靠真空或气体保护钎焊连接。

第2章　钎焊原理

钎焊生产主要包括钎焊前准备、零件装配和固定、钎焊、钎焊后清理及质量检验等工序。钎焊工序是形成优质的钎焊接头的决定性工序。钎焊接头是在一定的条件下，液态钎料自行流入固态母材之间的间隙，并依靠毛细作用力保持在间隙内，经冷却后钎料凝固形成的。显然，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。但是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，而且液态钎料要与母材发生润湿，必须要清除金属表面的杂质及氧化膜。

本章主要讨论钎焊接头形成过程所涉及的液态钎料的润湿和填缝过程、液态钎料与固态母材之间的相互作用以及钎焊时的去膜机制。

2.1　钎料的润湿与铺展

2.1.1　固体金属的表面结构

固体金属的表面结构如图2.1所示，最外层表面有一层0.2～0.3 nm的气体吸附层。随着金属性质的不同，吸附气体的种类和厚度有一定差别，一般主要吸附的是水蒸气、氧、二氧化碳和硫化氢等气体。在吸附层之下有一层3～4 nm厚的氧化膜层，一般情况下这一层并不是单纯的氧化物，而常常是由氧化物的水合物、氢氧化物和碱式碳酸盐等成分组成。有的呈低结晶态，这种形态的膜结构比较致密，能保护基底金属免于进

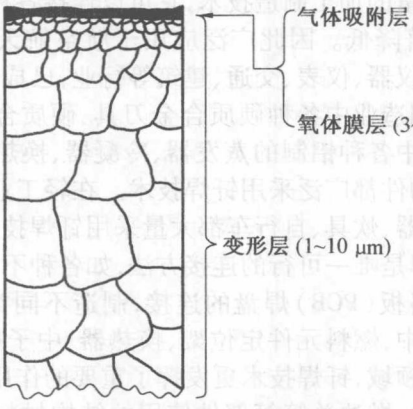


图2.1　固体金属的表面结构

一步的氧化，如 γ-Al_2O_3、Cu_2O（红色）等；有的则较为疏松多孔，如 Fe_2O_3、CuO 等。在氧化膜之下是一层厚度为 1～10 μm 的变形层，这一层是由于金属在成形加工（如压力加工）时所形成的晶粒变形的结构。在氧化膜与变形层主体之间还有 1～2 μm 厚的微晶组织。

由于合金表面结构复杂得多，通常表面能较低的亲氧组元在固态情况下也会扩散并富集于表面，形成复杂多元组成的表面膜。随着存储期的延长，这层膜还会进一步增厚。

在实际钎焊过程中，所涉及的母材表面都会有一层前述的表面结构。为使钎焊过程得以顺利进行，要根据膜的基本性质，采用还原性酸（如 HCl、HF、稀硫酸、有机酸）、氧化性酸（如 HNO_3）或碱（如 NaOH、KOH）等去除。经过酸洗的表面仍不是理想表面或清洁表面，它在钎焊前还可能氧化，并形成一层较薄的氧化膜，钎焊过程通常就是在这样的表面上进行的。

2.1.2 润湿与铺展

钎焊时，熔化的钎料与固态母材接触，液态钎料必须很好润湿表面才能填满钎缝。所谓润湿是液相取代固相表面气相的过程，按其特征可分为附着润湿、浸渍润湿和铺展润湿。附着润湿是指固体与液体接触后，将液气相界面和固气相界面变为固液相界面的过程（见图 2.2）；浸渍润湿是指固体浸入液体的过程，在此过程中固气相界面为固液相界面所取代，而液相表面没有变化（见图 2.3）；铺展润湿是液滴在固体表面上铺开的过程，即以液固相界面和新的液气相界面取代固气相界面和原来的液气相界面的过程（见图 2.4）。

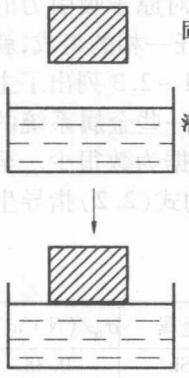


图 2.2 附着润湿示意图

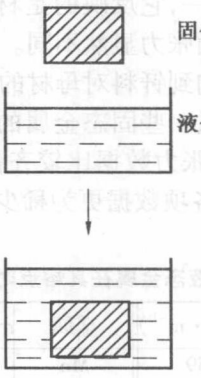


图 2.3 浸渍润湿示意图

图 2.4 铺展润湿示意图

实际钎焊过程多为铺展润湿，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 2.5 所示的状态，这种现象称为铺展。图 2.5 中，θ 称为润湿角，σ_{sg}、σ_{lg}、σ_{sl}

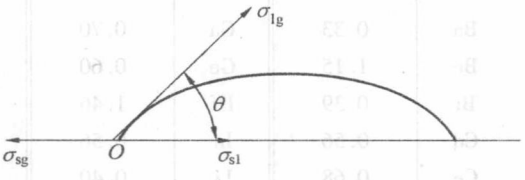


图 2.5 铺展时界面张力平衡示意图

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

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

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg}\cos\theta \tag{2.1}$$

由杨氏方程可以推导出润湿角与各界面张力的关系

$$\cos\theta = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl})/\sigma_{lg} \tag{2.2}$$

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 θ 与各界面张力的关系,θ 大于还是小于 90° 取决于 σ_{sg} 与 σ_{sl} 数值的大小。若 $\sigma_{sg} > \sigma_{sl}$,则 $\cos\theta > 0$,即 $0° < \theta < 90°$,此时认为液体能润湿固体,θ 越小,则液体对固体润湿效果越好,其极限情况是 $\theta = 0°$,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 $90° < \theta < 180°$,这种情况称为液体不润湿固体,其极限情况是 $\theta = 180°$,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°。

2.1.3 影响钎料润湿铺展性的因素

由杨氏方程可知,任何使 σ_{sl}、σ_{lg}、σ_{gs} 发生变化,从而使接触角 θ 发生变化的因素都将影响到钎料对母材的润湿性。从热力学观点来看,界面张力与各相的物性、成分、温度有关,所以润湿角必然受这些因素的影响。从动力学观点来看,润湿角必然受时间的影响。并且,在实际钎焊过程中,常常不可避免地发生母材向钎料中溶解及钎料与母材之间的扩散,而溶解过程及扩散过程都与母材及钎料的物性、成分、温度和时间有关。

(1)钎料和母材成分的影响

界面张力是材料本身的特性之一,它反映的是材料内部的原子对原子吸引力的强弱,因此,对不同的材料来说,其界面张力显然不同。改变三相物质任一相的组成,就相应地改变了界面张力,这必然要影响到钎料对母材的润湿性。表 2.1 ~ 2.3 列出了主要液态纯金属在其熔点时的表面张力、一些固态金属的表面张力以及一些金属系统的界面张力的数据。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 一些液态金属在其熔点时的表面张力

金属	σ_{lg}/(N·m^{-1})	金属	σ_{lg}/(N·m^{-1})	金属	σ_{lg}/(N·m^{-1})	金属	σ_{lg}/(N·m^{-1})
Ag	0.93	Cr	1.59	Mn	1.75	Sb	0.38
Al	0.91	Cu	1.35	Mo	2.10	Si	0.86
Au	1.13	Fe	1.84	Na	0.19	Sn	0.55
Ba	0.33	Ga	0.70	Nb	2.15	Ta	2.40
Be	1.15	Ge	0.60	Nd	0.68	Ti	1.40
Bi	0.39	Hf	1.46	Ni	1.81	V	1.75
Cd	0.56	In	0.56	Pb	0.48	W	2.30
Ce	0.68	Li	0.40	Pd	1.60	Zn	0.81
Co	1.87	Mg	0.57	Rh	2.10	Zr	1.40

表 2.2 一些固态金属的表面张力

金属	温度 t/℃	σ_{sg}/(N·m^{-1})
Fe	20	4.0
Fe	1 400	2.1
Cu	1 050	1.43
Al	20	1.91
Mg	20	0.70
W	20	6.81
Zn	20	0.86

表 2.3 一些金属系统的界面张力

系 统	温度 t/℃	σ_{sg}/(N·m^{-1})	σ_{lg}/(N·m^{-1})	σ_{ls}/(N·m^{-1})
Al-Sn	350	1.01	0.60	0.28
Al-Sn	600	1.01	0.56	0.25
Cu-Ag	850	1.67	0.94	0.28
Fe-Cu	1 100	1.99	1.21	0.44
Fe-Ag	1 125	1.99	0.91	>3.40
Cu-Pb	800	1.67	0.41	0.52

一般来说,如果钎料与母材在液态和固态下均无相互作用,则它们之间的润湿性就很差;若钎料和母材之间能相互溶解或形成金属间化合物,则液态钎料就能较好地润湿母材。例如:Fe-Ag 在液态和固态下均无相互作用,在 1 125 ℃下,Ag 在 Fe 上润湿时,体系的界面张力值分别为:σ_{sg}=1.99 N/m、σ_{lg}=0.91 N/m、$\sigma_{ls}\geqslant$2.48 N/m,由杨氏方程可求出接触角 $\theta\approx$122.5°>90°,故不发生钎料铺展。而 Cu 和 Sn 在液态下可互溶,在固态下可形成金属间化合物,当其在 300 ℃下,Sn 在 Cu 上润湿时,体系的界面张力值分别为:σ_{sl}=1.54 N/m、σ_{lg}=0.55 N/m、σ_{sg}=1.67 N/m,由杨氏方程求出接触角 $\theta\approx$76°<90°,因此可以铺展。

图 2.6 给出了在真空中 300 ℃下 Sn-Pb 钎料在 Cu 母材上的润湿情况。由图可见,当钎料成分变化时,其润湿角也发生变化,其基本趋势是接近共晶成分时的接触角较小,而高 Pb 含量时接触角明显增大,并会出现不润湿的情况。这是 Pb 与 Cu 在固态下无互溶,其相互作用较弱的缘故。

此外,钎料中添加表面活性物质时,可明显减少液态钎料的表面张力,改善钎料对母材的润湿性。所谓表面活性物质,即液态钎料中表面张力小的组分将聚集在液体表面层呈现正吸附,使液体表面张力显著减小。表面活性物质的这种有益作用已在实际钎焊中得到应用,表 2.4 是一些钎料中应用表面活性物质的实例。

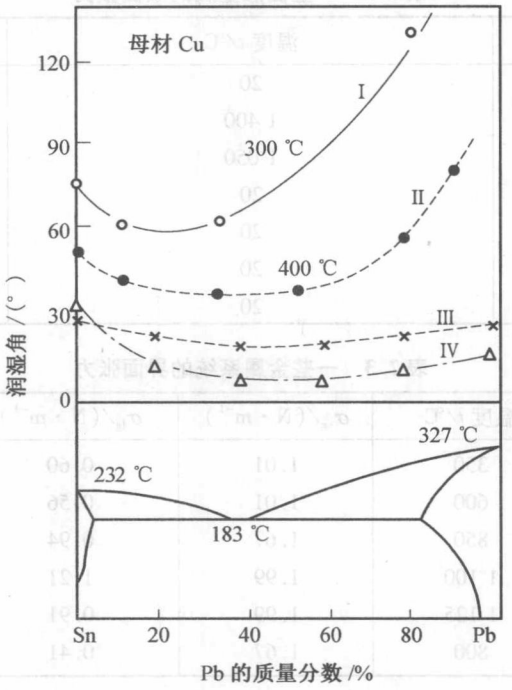


图 2.6 润湿角与 Sn-Pb 钎料成分的关系

表 2.4 钎料中表面活性物质的含量

钎料	表面活性物质		母材	钎料	表面活性物质		母材
	化学式	质量分数/%			化学式	质量分数/%	
Cu	P	0.04~0.08	钢	Ag	Ba	1	钢
Cu	Ag	<0.6	钢	Ag	Li	1	钢
Sn	Ni	0.1	铜	Ag-28.5Cu	Si	<0.5	钢,钨
Ag	Cu_3P	<0.02	钢	Cu-37Zn	Si	<0.5	钢
Ag	Pd	1~5	钢	Al-11.3Si	Sb,Ba,Br,Bi	0.1~2	铝

(2)金属表面氧化物的影响

在常规条件下,大多数金属表面都有一层氧化膜。氧化物的熔点一般都比较高,在钎焊温度下为固态。它们的表面张力值很低,因此,钎焊时将导致 $\sigma_{sg}<\sigma_{sl}$,所以产生不润湿现象,表现为钎料成球,不铺展。

另外,许多钎料合金表面也存在一层氧化膜。当钎料熔化后被自身的氧化膜包覆,此时其与母材之间是两种固态的氧化膜之间的接触,因此产生不润湿。例如:当用 Al-Si 共晶钎料(熔点 577 ℃)置于 Al 母材(熔点 660 ℃)上加热到 600 ℃时,钎料熔化但不在母材表面上铺展。液态钎料因受固态氧化膜的制约而成为不规则球形,此时用钢

针刺入钎料并刺破母材表面的氧化膜，钎料就会在母材 Al 与其表面的 Al_2O_3 膜之间铺展，从而将 Al_2O_3 膜“抬起”，形成“皮下潜流”现象。所以在钎焊过程中必须采取适当的措施去除母材和钎料表面的氧化膜，以改善钎料对母材的润湿。

(3)钎剂的影响

钎剂对液态钎料润湿性的影响，主要表现在两个方面：当用钎剂去除了母材和钎料表面的氧化膜后，液态钎料就可以和母材金属直接接触，从而改善润湿。另外，当母材和钎料表面覆盖了一层液态钎剂后，系统的界面张力就发生了变化(见图 2.7)，当铺展达到平衡时，由杨氏方程有：

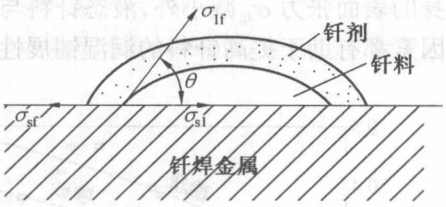


图 2.7 使用钎剂时界面张力平衡示意图

$$\sigma_{sf}=\sigma_{sl}+\cos\theta\cdot\sigma_{lf} \tag{2.3}$$

$$\cos\theta=\frac{\sigma_{sf}-\sigma_{sl}}{\sigma_{lf}} \tag{2.4}$$

式中 σ_{sf}——母材与钎剂间的界面张力；

σ_{sl}——母材与钎料间的界面张力；

σ_{lf}——钎剂与钎料间的界面张力。

与无钎剂时的情况相比，要满足 $\sigma_{lf}<\sigma_{lg}$ 或 $\sigma_{sf}>\sigma_{sg}$，就可以增强钎料对母材的润湿性。钎剂除了能清除母材表面氧化物，使 σ_{sf} 增大外，还可以减小液态钎料的界面张力 σ_{lf}，改善钎料的润湿铺展性能。

(4)母材表面粗糙度的影响

由于母材的实际表面并不是可以满足杨氏方程的理想表面，因而，母材的表面状态必然影响钎料的润湿行为。曾有人做过如下试验：把紫铜片和 LF21 铝合金圆片分成四等分，分别采用抛光、钢丝刷刷、砂纸打磨和化学清洗四种方法清理这四等分表面。然后在紫铜片和 LF21 片的中心分别置放相同体积的 S-Sn60Pb40 和 S-Sn80Zn20 钎料，分别加热到各自的钎焊温度，保温 5 min，冷至室温后测量钎料的铺展面积。结果表明，紫铜片上，S-Sn60Pb40 钎料在钢丝刷刷过的区域铺展面积最大，在抛光区域铺展面积最小；而在 LF21 铝合金片上，S-Sn80Zn20 钎料在不同方法处理的区域铺展面积几乎相同。Ag-20Pd-5Mn 钎料在不锈钢上的铺展与 S-Sn60Pb40 钎料在紫铜片上有类似的现象：分别采用酸洗、喷砂和抛光方法清理不锈钢表面，然后放置 Ag-20Pd-5Mn 钎料，加热到 1 095 ℃，冷却后测量钎料的铺展面积，发现钎料在酸洗过的表面铺展面积最大，在抛光表面上铺展面积最小，如图 2.8 所示。

以上试验现象说明，当钎料与母材的相互作用弱时(如 S-Sn60Pb40 钎料与紫铜母材，Ag-20Pd-5Mn 钎料与不锈钢母材)，母材表面粗糙度对钎料的润湿铺展性有明显影响，这是因为较粗糙的母材表面布满纵横交错的细槽，对液态钎料起到特殊的毛细管作用，从而促进钎料在母材表面的铺展，改善润湿性。但当钎料与母材相互作用较强时(如 S-Sn80Zn20 钎料与 LF21 铝合金母材)，较粗糙母材表面所存在的细槽会迅速被液态溶解而不复存在，因此母材表面粗糙度的影响不明显。

(5)温度的影响

液体的表面张力随着温度升高而降低(见图 2.9),因此升高温度有助于提高钎料的润湿铺展性能。钎料的润湿铺展性随温度提高而改善的原因,除了由于液态钎料本身的表面张力 σ_{lg} 减小外,液态钎料与母材间的界面张力 σ_{sl} 降低也有较大作用,这两个因素都有助于提高钎料的润湿铺展性。

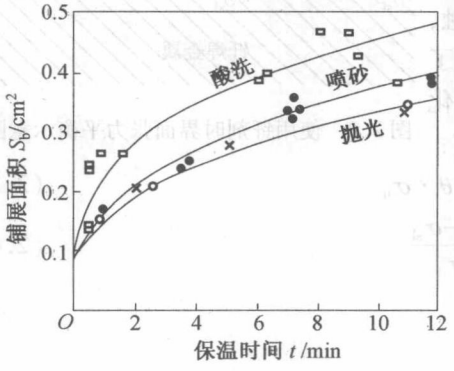


图 2.8 表面处理方法对 Ag-20Pd-5Mn 钎料在不锈钢上铺展面积的影响(1 095 ℃)

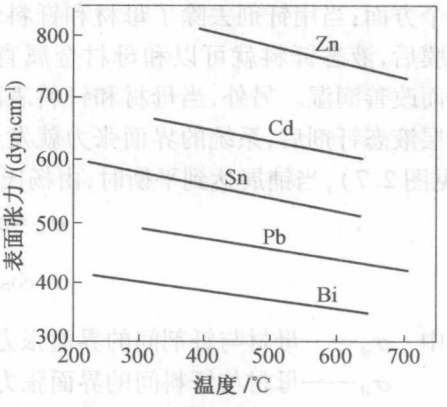


图 2.9 部分熔态金属的表面张力与温度的关系

总之,温度越高,液态钎料对母材的润湿性越好,在母材表面的铺展面积也越大。但并非钎焊温度越高越好,温度过高,钎料铺展能力过强,会造成钎料流失,即钎料流散到不需要钎焊的部位,而不易填满钎缝。同时温度过高还可能造成母材晶粒长大、过热、过烧及钎料溶蚀母材等问题。因此必须综合考虑钎焊温度的影响,在实际钎焊过程中,通常钎焊温度较钎料液相线高 30 ~ 80 ℃。

2.2 液态钎料的填缝

钎焊时,当把钎料放在钎缝间隙附近,钎料熔化后有自动填充间隙的能力,即钎料填缝,这是由液态钎料对母材润湿而产生弯曲液面所致。如果将金属细管插入液态钎料中,管子的半径足够小,则在管壁处的液面就呈现连续的弯曲液面,因而产生附加压力,使钎料沿细管上升,这就是毛细现象。由于钎缝间隙通常都比较小,因此具有明显的毛细作用,这是钎料自动填缝的原因。毛细现象对于钎焊过程具有实际的意义。

2.2.1 液态钎料在垂直放置的平行间隙中的填缝

当将两互相平行的金属板垂直插入液态钎料中时,假设平行金属板无限大,钎料量无限多,由于存在毛细作用,如果钎料可以润湿金属板,则会出现图 2.10(a)所示的情形,否则会出现图 2.10(b)所示的情形。

设两平行板所构成的间隙为 a,液体在两平行板的间隙中上升或下降的高度 h 由下式确定

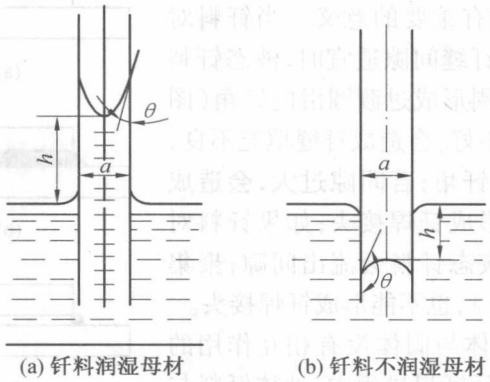
$$h=\frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{a\rho g}=\frac{2(\sigma_{sg}-\sigma_{ls})}{a\rho g} \tag{2.5}$$

式中 a——平行板的间隙，钎焊时即为钎缝间隙；

ρ——液体（钎料）的密度；

g——重力加速度。

由式(2.5)可见，当固气相界面张力 σ_{sg} 大于固液相界面张力 σ_{sl} 时（此时 $\theta<90°$），有 $h>0$，即液态钎料可以填缝，并且随着接触角 θ 减小，上升高度 h 值增大。此外，由于上升高度 h 与间隙 a 成反比，即间隙越小，毛细作用越强，钎料填缝能力也就越强；而当固气相界面张力 σ_{sg} 小于固液相界面张力 σ_{sl} 时（此时 $\theta>90°$），有 $h<0$，即液态钎料不能填缝。



(a) 钎料润湿母材　　(b) 钎料不润湿母材

图 2.10　两平行板间液体的毛细作用

从上述分析可知，液体钎料对母材的润湿性越好，间隙值越小，液态钎料的爬升高度越大，因此钎料填充间隙的好坏取决于其对母材的润湿性。同时，以小间隙为佳，即为使液态钎料能填满间隙，在接头设计和装配时必须保证小的间隙。

2.2.2　液态钎料在水平位置的平行间隙中的填缝

液态钎料在水平位置的平行间隙中的填缝更接近于实际钎焊时的情况。由于间隙是处于水平位置，液态钎料填缝时的附加压力与重力垂直，所以重力不起抵消附加压力的作用。液态钎料在水平位置的平行间隙中的填缝长度为

$$L^2=a\sigma_{lg}\cos\theta\cdot t/2\eta \tag{2.6}$$

式中 a——平行板的间隙，钎焊时即为钎缝间隙；

t——钎焊时间；

η——液态钎料的黏度。

由式(2.6)可知，钎料在水平位置的平行间隙中的填缝长度随着间隙 a 的增大而增加，而黏度增加会使填缝长度减小。但是，由于在水平间隙内填缝时附加压力与重力垂直，造成无平衡态存在，也就是说，当钎料量无限多时，填缝过程可以一直进行下去。因此，液态钎料在水平位置的平行间隙中的填缝能力无法用填缝长度来衡量，所以常用

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com