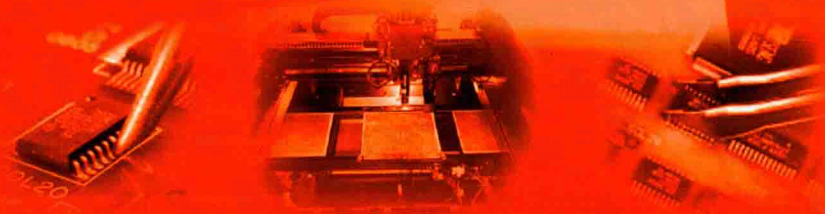




高等职业教育“十二五”规划教材



钎焊技术

许芙蓉 张胜男 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等职业教育“十二五”规划教材

钎焊技术

许芙蓉 张胜男 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要介绍钎焊的原理、钎焊材料、钎焊方法、钎焊生产过程及各种常用金属材料的钎焊工艺。全书共分11章:第1章介绍了钎焊定义、原理、分类及应用等内容;第2章和第3章介绍了钎料和钎剂的种类、特点及应用等内容;第4章至第8章介绍了各种常用钎焊方法、钎焊接头设计及生产过程;第9章介绍了各种常用金属材料的钎焊工艺;第10章和第11章介绍了钎焊接头的质量检验方法和钎焊工程应用实例。每一章均附有习题。本书在内容编排上,突出应用性和实践性,注重对学生实际能力的培养。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校的二级职业技术学院焊接及相关专业的教材,也可作为五年制高职、中职相关专业及企业培训教材,亦可供相关专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

钎焊技术 / 许芙蓉, 张胜男主编. —北京: 中国石化出版社, 2015. 1
高等职业教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-3053-3

I. ①钎… II. ①许… ②张… III. ①钎焊-高等职业教育-教材 IV. ①TG454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 277634 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 294 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定价: 25.00 元

前 言

本书是高等职业教育“十二五”规划教材，是根据最新高等职业教育人才培养目标以及焊接专业教学要求而编写的。编写本书遵循的原则是适应当前对人才的需要，强化工程实践能力的培养，提高学生的应用能力和综合素质。

本书对钎焊基本原理、材料、工艺方法及常用金属材料的钎焊工艺特点作了全面介绍。依据钎焊的工作过程进行编写，首先介绍钎焊定义、原理、分类及应用；其次介绍钎焊焊前准备相关内容，包括钎料、钎焊去膜方法及钎焊接头设计；再次介绍钎焊过程和钎焊方法，包括钎焊生产过程、火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊及其他常用钎焊方法、各种常用金属材料的钎焊工艺；最后介绍钎焊接头的质量检验等知识，同时配有大量有价值的钎焊工程应用实例。全书在内容编排上，注重理论与实践相结合，突出基础训练和操作技能的培养，内容丰富，重点突出。

本书从高等职业教育的特点出发，以“应用”为主旨和特征构建内容，突出应用性、实践性的原则，在阐述问题时力求深入浅出，揭示其机理和规律性，可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校的二级职业技术学院焊接及相关专业的教材，也可作为五年制高职、中职相关专业及企业培训教材，亦可供相关专业技术人员阅读参考。

本书由兰州石化职业技术学院许芙蓉、张胜男担任主编，蔡建刚主审。全书共分为11章，张胜男编写绪论、第1章、第2章、第6章、第7章和第9章的9.3、9.4、9.5小节；许芙蓉编写第3章、第4章、第5章、第8章和第9章的其余小节；中石油第二建设公司赵文斌编写第10章和第11章。

本书在编审过程中得到许多兄弟院校有关同志的大力支持，在此向他们表示衷心的感谢。此外，编写时参阅了大量的参考文献，也在此向原作(编)者表示感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 钎焊基础知识	(3)
1.1 钎焊加工原理	(3)
1.2 钎料润湿性评定方法及影响因素	(6)
1.3 液态钎料与母材的相互作用	(12)
1.4 钎焊方法的分类及应用	(18)
【综合训练】	(20)
第 2 章 钎料	(21)
2.1 对钎料的基本要求	(21)
2.2 钎料的分类和编号	(21)
2.3 常用钎料成分与性能	(23)
2.4 钎料的选择	(44)
【综合训练】	(46)
第 3 章 钎焊去膜方法	(47)
3.1 钎焊去膜的必要性	(47)
3.2 钎焊去膜	(48)
3.3 其他去膜方法	(64)
3.4 钎剂的选择	(68)
【综合训练】	(69)
第 4 章 钎焊接头设计及生产工艺	(71)
4.1 钎焊接头设计	(71)
4.2 钎焊生产工艺	(77)
【综合训练】	(86)
第 5 章 火焰钎焊	(87)
5.1 火焰钎焊的特点及应用	(87)
5.2 火焰钎焊用燃气	(87)
5.3 火焰钎焊设备	(88)
5.4 火焰钎焊用钎料和钎剂	(90)
5.5 火焰钎焊工艺	(91)
【综合训练】	(91)
第 6 章 炉中钎焊	(92)
6.1 炉中钎焊的特点及应用	(92)
6.2 炉中钎焊工艺	(94)

6.3 钎焊炉的安全操作	(98)
【综合训练】	(101)
第7章 感应钎焊	(102)
7.1 感应钎焊的特点及应用	(102)
7.2 感应钎焊设备	(104)
7.3 感应钎焊工艺	(107)
【综合训练】	(109)
第8章 其他钎焊方法	(110)
8.1 烙铁钎焊	(110)
8.2 电阻钎焊	(111)
8.3 浸沾钎焊(液体介质中钎焊)	(112)
8.4 特种钎焊	(115)
【综合训练】	(117)
第9章 常用金属材料的钎焊工艺	(118)
9.1 材料的钎焊性	(118)
9.2 碳钢和低合金钢的钎焊	(118)
9.3 铝及其合金的钎焊	(120)
9.4 铜及其合金的钎焊	(132)
9.5 镁及其合金的钎焊	(136)
9.6 不锈钢的钎焊	(139)
9.7 工具钢及硬质合金的钎焊	(143)
9.8 铸铁的钎焊	(147)
9.9 活性金属的钎焊	(148)
9.10 难熔金属的钎焊	(151)
9.11 陶瓷与金属的钎焊	(154)
9.12 高温合金的钎焊	(157)
9.13 其他材料的钎焊	(161)
【综合训练】	(164)
第10章 钎焊接头的质量检验	(165)
10.1 钎焊接头的缺陷及防止	(165)
10.2 钎焊接头的质量检验方法	(167)
【综合训练】	(175)
第11章 钎焊工程应用实例	(176)
参考文献	(182)

绪 论

一、钎焊技术的重要性及应用

钎焊是人类最早使用的连接方法之一，它是采用比母材熔点低的金属材料作钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的方法。早在几千年前，人类就开始使用钎焊来连接金器首饰以及一些日常用品，它是现代焊接技术的三大主要组成部分之一。

钎焊虽是一门古老的技艺，但是，在很长的历史时期中，钎焊技术并没有得到大的发展。进入 20 世纪后，它的发展也远远落后于熔焊技术。20 世纪 30 年代以来，在冶金和化工技术发展的基础上，钎焊技术才有了较快的发展，从作坊匠人的技艺成长为工业生产技术。尤其是第二次世界大战后，由于航空、航天、核能、电子等新技术的飞速发展，新材料、新结构形式的采用，对连接技术提出了更高的要求，钎焊技术因此受到更大的重视，开始以前所未有的速度发展起来，出现了许多新的钎焊方法，钎料品种日益增多，因此，钎焊的应用范围日益扩大。例如，钎焊已广泛用于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的连接等。在轻工业生产中，从医疗器械、乐器到家用电器、炊具、自行车，都大量采用了钎焊技术。一台彩色电视机上就有几百个钎焊点。自行车架，就是一个全钎焊结构。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，而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。至于在航空、航天和核能工业等尖端技术部门，钎焊技术发挥了更大的作用。例如，航空燃气涡轮发动机的大量重要部件，诸如涡轮导向器、压气机静子、导向叶片、扩散器、蜂窝夹层密封圈等都是用钎焊方法制造的。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，越来越多地采用不锈钢、钛合金或超级合金的钎焊蜂窝壁板。据统计，在某型火箭上钎缝总长超过 3000m。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。

二、钎焊技术的特点

钎焊技术之所以在各工业部门得到越来越多的应用，是由于它与熔焊和压焊相比具有一些独特的优点，即：

(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通常没有明显的不利影响，施工性能良好。

(2) 钎焊温度低、可对焊件整体均匀加热，引起的应力和变形小，容易保证焊件的尺寸精度，可进行精密连接。

(3) 具有对焊件整体加热的可能性，使钎焊可以用于结构复杂、开敞性差的焊件，并可一次完成多缝多零件的连接，容易实现异种金属、金属与非金属材料的连接。

(4) 对热源要求较低，工艺过程较简单，容易实现机械化和自动化。

因此，有不少用其他焊接方法难以甚至无法进行连接的结构，采用钎焊却可以解决。而且，在不少情况下，钎焊能保证焊件具有更高的可靠性。

但是，这决不意味着钎焊可以取代熔焊和压焊技术。与它们相比，钎焊也有不足之处。例如，钎焊接头的强度一般比较低、耐热能力较差；较多采用搭接接头形式，增加了母材消耗和结构重量。因此，必须根据产品的材料、工作条件和结构特点，选用合理的连接方法。钎焊较适宜于连接精密、微型、复杂、多钎缝、异类材料的焊件。

三、本课程的性质、任务和要求

本课程应使学生掌握钎焊的基本原理及其接头的形成过程、钎焊工艺、钎焊方法及钎焊整个生产过程等基本理论、基本知识和实验技能，从而使使学生具有从事该方面工艺工作的基本能力。它是焊接专业理论性和实践性较强的一门专业课。

学生在学完本课程后，应能达到以下要求：

- (1) 掌握钎焊方法的定义、基本加工原理、特点、分类及其应用。
- (2) 了解钎料的相关知识。
- (3) 熟悉钎焊的去膜方法、接头设计及生产过程。
- (4) 明确各种常用钎焊方法的特点、工艺、设备及应用，并具有根据实际需要选择合适钎焊方法的能力。
- (5) 熟悉各种常用金属材料的钎焊性和钎焊工艺，能进行简单材料的钎焊操作。
- (6) 深入了解钎焊接头的常见缺陷及防止方法，能对已完成的钎焊接头进行质量检验。
- (7) 具有从事钎焊工艺工作的基本能力。

第 1 章 钎焊基础知识

【学习目标】

- (1) 深入理解钎焊的基本过程和加工原理;
- (2) 了解钎料润湿性评定方法并熟悉影响钎料润湿性的因素;
- (3) 重点掌握液态钎料与母材间的相互作用;
- (4) 明确钎焊方法的分类、原理及应用。

为了在钎焊过程中得到性能优良的接头,钎焊以前,部件必须被彻底清理,在含有氧的环境中钎焊,必须使用钎剂或靠控制气氛进行保护;钎焊过程中,必须保证液态钎料能充分地流入并致密地填满全部钎缝间隙,同时又与母材很好地相互作用。显然,钎焊可分为三个基本过程:一是钎剂的熔化及填缝过程,即预置的钎剂在加热熔化后流入母材间隙,并与母材表面氧化物发生物理化学作用,从而去除氧化膜,清洁母材表面,为钎料填缝创造条件;二是钎料的熔化及填满钎缝的过程,即随着加热温度的继续升高,钎料开始熔化并润湿、铺展,同时排除钎剂残渣;三是钎料与母材相互作用的过程,即在熔化的钎料作用下,小部分母材溶解于钎料,同时钎料扩散进入到母材当中,在固液界面还会发生一些复杂的化学反应。当钎料填满间隙,经过一定时间保温后就开始冷却、凝固形成钎焊接头,完成整个钎焊过程。钎焊过程如图 1-1 所示。在不用钎剂的场合,如真空钎焊和保护气氛钎焊,当然就没有钎剂填缝过程。

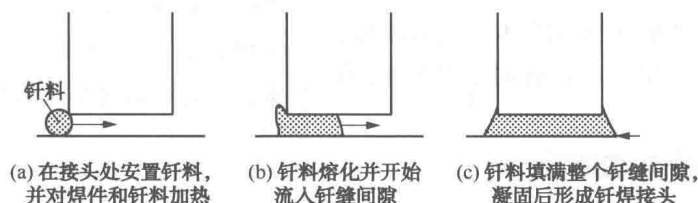


图 1-1 钎焊过程示意图

并不是任何熔化的钎剂或钎料都能顺利地填入任何焊件间的间隙中去的。也就是说,填缝必须具备一定的条件。由于熔化的钎剂和钎料均系液体,所以液体对固体的润湿以及钎缝间隙的毛细作用是熔化钎剂或钎料填缝的基本条件。本章主要讨论液态钎料的润湿和填缝过程,以及钎料与母材的相互作用。

1.1 钎焊加工原理

1.1.1 钎料的润湿与铺展

钎焊时,熔化的钎料与固态母材接触,液态钎料必须很好地润湿母材表面才能填满钎

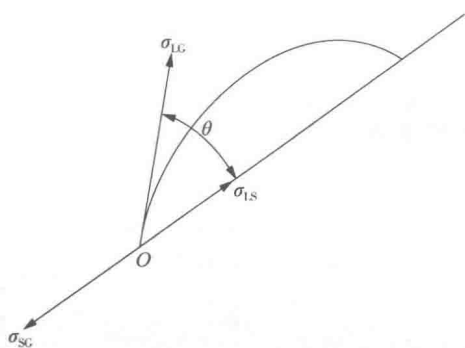


图 1-2 气-液-固界面示意图

缝。简单地说,润湿性就是液态钎料对母材浸润和附着的能力。理想状态下,在固体、液体、蒸气相之间没有化学反应,并且重力因素被忽略(相当于小的液滴),从物理化学得知,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自动流开铺平,呈图 1-2 所示的状态,这种现象称为铺展。铺展终了时,在 O 点处这几个力应该平衡,即

$$\sigma_{SG} = \sigma_{LS} + \sigma_{LG} \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LG}} \quad (1-1)$$

式中 θ ——平衡状态下的润湿角, ($^{\circ}$);

σ_{SG} ——固-气界面间的表面张力, N/m ;

σ_{LG} ——液-气界面间的表面张力, N/m ;

σ_{LS} ——液-固界面间的表面张力, N/m 。

通常将 $\cos \theta$ 作为描述液体润湿能力的润湿系数。 θ 的大小是液体对固体润湿程度的量度。润湿与不润湿的分界线是 $\theta = 90^{\circ}$, 当 $\theta < 90^{\circ}$ 时发生润湿, 而 $\theta > 90^{\circ}$ 时不发生润湿。这两种状态的极限情况是: $\theta = 0^{\circ}$, 称为完全润湿; $\theta = 180^{\circ}$, 称为完全不润湿。

由式(1-1)可见, 润湿角 θ 的大小与各表面张力的数值有关。 θ 角大于还是小于 90° , 应根据 σ_{SG} 与 σ_{LS} 的大小而定。若 $\sigma_{SG} > \sigma_{LS}$, 则 $\cos \theta > 0$, 即 $0^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$, 此时我们认为液体能润湿固体, 如水对于玻璃等; 若 $\sigma_{SG} < \sigma_{LS}$, 则 $\cos \theta < 0$, 即 $90^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$, 这种情况称为液体不润湿固体, 如水银在玻璃上就是如此。钎焊时希望钎料的润湿角小于 20° 。

小知识



所谓润湿, 是指由固-液相界面取代固-气相界面, 从而使体系自由能降低的过程。也就是液态钎料与母材接触时, 钎料将母材表面的气体排开, 沿母材表面铺展, 形成新的固体与液体界面的过程。

1.1.2 钎料的毛细流动

把两根粗细不同的小直径玻璃管插入液体中, 液体会沿着玻璃管自动上升到高于液面的一定高度, 但也可能下降到低于液面的一定高度, 直径越小的管子液体上升或下降

的高度越高, 这种现象称为毛细作用, 如图 1-3 所示。钎焊时, 对液态钎料的要求除了要沿固态母材表面自由铺展外, 还要能够填满钎缝的全部间隙。通常钎缝间隙很小, 如同毛细管, 钎料是依靠毛细作用在钎缝间隙内流动的。因此, 钎料能否填满钎缝取决于它在母材间隙中的毛细流动特性。

液体在玻璃管中上升或下降的高度可由下式确定:

小知识



毛细现象在自然界、科学技术和日常生活中都起着重要作用。大量多孔性的固体材料在与液体接触时即出现毛细现象。纸张、纺织品、粉笔等物体能够吸水就是由于水能够润湿这些多孔性物质产生毛细现象。人们在工程技术中, 常常利用毛细现象使润滑油通过孔隙进入机器部件中去润滑机器。

$$h = \frac{2\sigma_{\text{LG}}\cos\theta}{a\rho g} = \frac{2(\sigma_{\text{SG}} - \sigma_{\text{LS}})}{a\rho g} \quad (1-2)$$

式中 a ——玻璃管直径，钎焊时即为钎缝间隙，mm；

ρ ——液体的密度，kg/L；

g ——重力加速度，9.8m/s²。

当 h 为正值时，表示液体在玻璃管内上升；当 h 为负值时，表示液体玻璃管内下降。由式(1-2)可以看出：

(1) 当 $\theta < 90^\circ$ 、 $\cos\theta > 0$ 时， $h > 0$ ，液体沿玻璃管上升；当 $\theta > 90^\circ$ 、 $\cos\theta < 0$ 时， $h < 0$ ，液体沿玻璃管下降。因此，钎料填充间隙的好坏取决于它对母材的润湿性。钎焊时只有在液态钎料能充分润湿母材的条件下，钎料才能填满钎缝。

(2) 液体沿玻璃管上升的高度 h 与玻璃管直径 a 成反比，随着玻璃管直径的减小，液体的上升高度增大。即钎焊时钎缝间隙越小，毛细管作用越强，填缝也越充分。但并不是说间隙越小越好，因为钎焊时焊件金属受热膨胀，如果间隙过小，反而使填缝困难。因此，钎焊时为使液态钎料能填满钎缝间隙，必须在接头设计和装配时保证合理的小间隙。若钎料是预先安放在钎缝间隙内的[见图 1-4(a)]，润湿性和毛细作用仍有重要意义。当润湿性良好时，钎料填满间隙并在钎缝四周形成圆滑的钎角[见图 1-4(b)]；若润湿性不好，钎缝填充不良，外部不能形成良好的钎角；在不润湿的情况下，液态钎料甚至会流出间隙，聚集成球状钎料珠[见图 1-4(c)]。

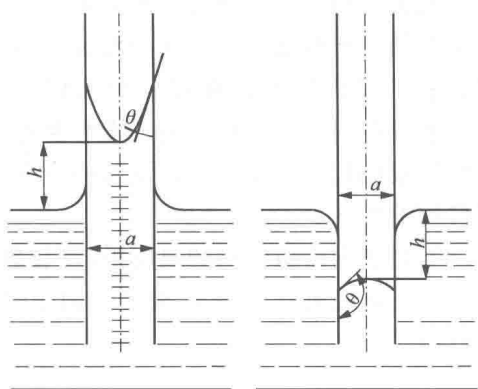


图 1-3 在玻璃管内液体的毛细作用

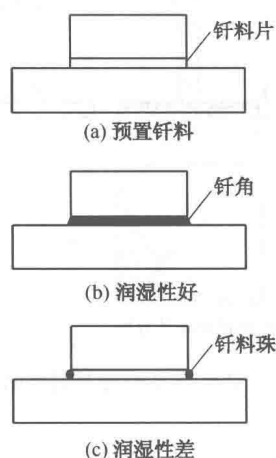


图 1-4 钎料预先安置在间隙内的润湿情况

液态钎料在毛细作用下的流动速度，可用下式表示：

$$v = \frac{\sigma_{\text{LG}}\cos\theta}{4\eta h} \quad (1-3)$$

式中 η ——液体的黏度，Pa·s。

从式(1-3)可以看出：

(1) 润湿角越小，即 $\cos\theta$ 越大，流动速度就越大。所以，从迅速填满间隙考虑，也以钎料润湿性好为佳。

(2) 流动速度 v 与液体的黏度成反比，液体的黏度 η 越大，流速越慢。

(3) 流动速度 v 又与 h 成反比，即液体在间隙内刚上升时流动快，以后随 h 增大而逐渐变慢。因此，为了使钎料能填满全部间隙，应有足够的钎焊加热保温时间。

需要指出的是，上述规律是在液体与固体间没有相互作用的条件下得到的，而在实际钎焊过程中，液态钎料与母材或多或少地存在相互扩散，致使液态钎料的成分、密度、黏度和熔点等发生变化，从而使毛细填缝现象复杂化。甚至出现这种情况：在母材表面铺展得很好的液态钎料竟不能流入间隙，这往往是由于钎料在毛细间隙外时就被母材饱和而失去了流动能力。

1.2 钎料润湿性评定方法及影响因素

1.2.1 钎料润湿性的评定

钎料对母材的润湿性是钎料的重要工艺性能指标，因此常常需要予以评定。目前尚无法从理论上完全确定润湿性的好坏，只能借助试验方法来评定。用得较多的是下述几种方法：

(1) 利用钎料的润湿角评定钎料的润湿性。将一定体积的钎料放在母材上，采取相应的去膜措施，在规定的温度下保持一定时间。冷凝后截取钎料的横截面，测出钎料的润湿角，以其大小来评定润湿性的好坏。 θ 角越小，润湿性越好。

(2) 利用钎料的铺展面积评定钎料的润湿性。试验方法同上，但以测出的钎料铺展面积的大小作为评定的尺度。铺展面积越大，钎料的润湿性越好。

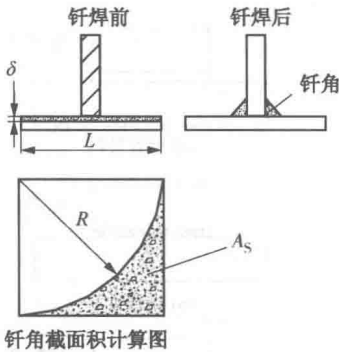


图 1-5 双层板 T 形接头钎焊时的流动系数

(3) 利用 T 形试件评定钎料的润湿性。取一定体积的钎料放在 T 形试件一端的一侧，采取相应的去膜措施，将试件在规定的温度下保持一定时间，钎料熔化后沿接头流动。冷凝后测量钎料流动的距离，按其长短来评定润湿性。流动性距离越长，钎料的润湿性越好。试件尺寸可根据具体情况确定，试验中应保持各个试件间隙相同。

(4) 对表面涂覆钎料的双层板(覆钎料板) T 形接头，可用流动系数 K 来表示润湿性(见图 1-5)：

$$K = \frac{V_f}{V} = \frac{A_s n}{l \delta} \quad (1-4)$$

式中 V_f ——单位长度的钎缝钎角的总体积， mm^3 ；

V ——单位长度双层板上的钎料总体积， mm^3 ；

A_s ——钎角的截面积 $= (1 - \frac{1}{4}\pi) R^2 = 0.125 R^2$ ， mm^2 ；

n ——钎角数；

l ——覆钎料板的宽度， mm ；

δ ——钎料层的厚度， mm 。

流动系数大者表示钎角半径 R 大，润湿性好。

以上评定润湿性的方法所得出的数据与试验条件有密切关系，只有相对比较的意义，因此应根据具体条件选用。

1.2.2 影响钎料润湿性的因素

由式(1-1)可以看出，钎料对母材的润湿性取决于具体条件下三相间的相互作用，但不论情况如何， σ_{SG} 增大、 σ_{LG} 或 σ_{LS} 减小，都能使 $\cos\theta$ 增大， θ 角减小，即能改善液态钎料对母材的润湿性。从物理概念上说， σ_{LG} 减小，意味着液体内部原子对表面原子的吸引力减弱，液体原子容易克服本身的引力趋向液体表面，使表面积扩大，钎料容易铺展； σ_{LS} 减小，表明固体对液体原子的吸引力增大，使液体内层的原子容易被拉向固体-液体界面，即容易铺展。上述分析给改善钎料对母材的润湿性指出了方向。

表1-1~表1-3分别提供了主要的纯液态金属在其熔点时的表面张力 σ_{LG} 、某些固态金属的表面张力 σ_{SG} 和一些金属系统的表面张力的数据。除液态纯金属的表面张力数据比较齐备外，后二项数据目前为数很少。至于通常均为多元合金的钎料，上述各项数据更为稀少，因此，无法借助式(1-1)来指导生产实践。

表 1-1 一些液态金属的表面张力

金属	$\sigma_{LG}/(N/m)$	金属	$\sigma_{LG}/(N/m)$	金属	$\sigma_{LG}/(N/m)$	金属	$\sigma_{LG}/(N/m)$
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	Ca	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 1-2 一些固态金属的表面张力

金属	温度 $t/^{\circ}C$	$\sigma_{SG}/(N/m)$	金属	温度 $t/^{\circ}C$	$\sigma_{SG}/(N/m)$
Fe	20	4.0	Mg	20	0.70
	1400	2.1	W	20	6.81
Cu	1050	1.43	Zn	20	0.86
Al	20	1.91			

表 1-3 一些金属系统的表面张力

系统	温度 $t/^{\circ}C$	$\sigma_{SG}/(N/m)$	$\sigma_{LG}/(N/m)$	$\sigma_{LS}/(N/m)$
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	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

大量研究表明，影响钎料润湿性的因素主要包括以下方面。

1. 钎料和母材的成分

钎料和母材的成分对润湿性的影响很大。由于不同的材料具有不同的表面自由能，所以

当钎料和母材成分变化时，其表面张力值必然发生变化，这将直接影响到钎料对母材的润湿和铺展。一般来说，如钎料与母材在液态和固态均不相互作用，则它们之间的润湿性很差；若钎料能与母材相互溶解或形成化合物，则液态钎料能较好地润湿母材。例如 Fe-Ag 系，1125℃时液态银与固态铁间的表面张力大于 3.40N/m(见表 1-3)，致使 $\cos\theta$ 为负值， $\theta > 90^\circ$ ，故不发生润湿。就物理概念来讲，银和铁在固、液态下均不相互作用，故银在铁上的润湿性极差。属于此种情况的还有 Fe-Bi、Fe-Cd、Fe-Pb 等系统。然而，在 1000~1200℃时银稍溶于镍($\omega_{Ag} = 3\% \sim 4\%$)，银对镍的润湿性比起它对铁的润湿性来说就有所改善；779℃时银在铜中的溶解度为 $\omega_{Ag} = 8\%$ ，因而银在铜上的润湿性极好。这种关系也反映在表面张力的数值上，例如，液态银与铁的表面张力极大(3.40N/m，见表 1-3)，而与铜的表面张力则不大(0.28N/m，见表 1-3)，故在铜表面的润湿性增加。所以，同样以银为钎料，对于不同的母材，随着它们之间相互作用的加强，液-固表面张力减小，润湿性提高。

当母材为合金时也有相似的情况。例如，银在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢和 GH30 镍基合金上的铺展面积如图 1-6 所示。它表明，在相同温度下，银对镍基合金的润湿性比对铁基合金的润湿性好得多。

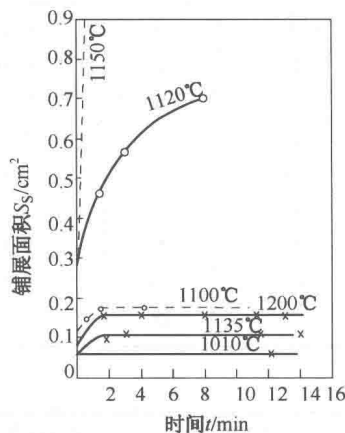


图 1-6 银在不锈钢和镍基合金上的润湿性
——在不锈钢上；·····在镍基合金上

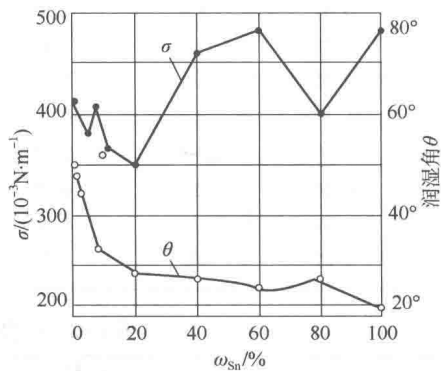


图 1-7 锡铅钎料的表面张力和它在钢上的润湿角与钎料成分的关系

对同一母材，如果改变钎料成分，也会产生同样的结果。例如，用铜或银来钎焊钢时，因液态铜与铁的表面张力比液态银与铁的表面张力小得多(见表 1-3)，所以铜对钢的润湿性更好。但应指出，并不总是要靠根本变换钎料成分才能取得改善润湿性的效果。图 1-7 为锡铅钎料的表面张力和它在钢上的润湿角与钎料成分的关系。纯铅与钢基本上不形成共同相，故铅对钢润湿性很差，但铅中加入能与钢形成共同相的锡后，在钢上的润湿角减小。这主要是依靠加锡使液态钎料与钢的表面张力 σ_{ls} 得以减小所致。含锡量越多，润湿性越好。图 1-8 为银钯钎料在镍铬合金上的润湿角与钎料含钯量的关系曲线。随着含钯量的提高，润湿角大大减小。这是因为钯与镍能形成固溶体的缘故。上述例子说明，对于那些与母材无相互作用因而润湿性差的钎料，凭借在钎料中加入能与母材形成共同相的合金元素，可以改善它对母材的润湿性。

为了考察合金元素对提高钎料润湿性的作用强弱，进行了以下试验：在银铜共晶钎料中加入不同数量的钯、锰、镍、硅、锡、锌等元素，考察钎料对钢的润湿性的变化。试验结果见图 1-9。

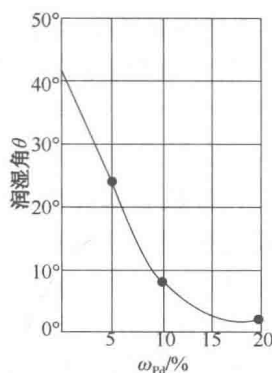


图 1-8 润湿角与银钎料含钯量的关系

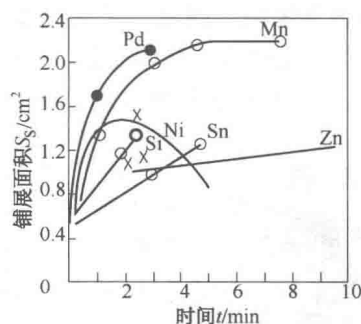


图 1-9 合金元素对银铜共晶钎料在钢上的铺展面积的影响

由图 1-9 可见，上述元素对钎料润湿性的影响具有不同的特点：锌、锡、硅虽可提高钎料的润湿性，但作用较弱；钯、锰则作用很强，添加少量即可得到明显效果；镍含量少时与钯、锰效果相近，但超过一定数量后反使润湿性变坏。从它们对钎料表面张力 σ_{LG} 的影响分析，银铜共晶 1000℃ 时表面张力约为 0.97N/m，各元素在其熔点温度的表面张力值见表 1-1，锌、锡、硅均低于此值，钯、锰、镍则大大高于此值。即加入前三种元素可能使钎料表面张力减小，而加入后三者反而会使之增大。因此，元素对钎料表面张力的影响不是判断它们对钎料润湿性影响的决定因素。由这些元素与铁的相互作用证明：锌、锡、硅均与铁形成金属间化合物；钯、锰、镍与铁形成无限固溶体。由此看来，合金元素改善钎料润湿性的作用，主要取决于它们对液态钎料与母材表面张力 σ_{LS} 的影响。合金元素与母材存在相互作用时均能使此力减小，但对与母材形成金属间化合物的元素，其减小表面张力的作用有限，故虽有助于提高钎料润湿性，但作用较弱；能与母材无限固溶的合金元素可显著地减小此表面张力，从而使钎料润湿性得到明显的改善。至于含镍量高时对钎料润湿性的不利影响是由于它可使钎料熔点提高造成的。

2. 温度的影响

液体的表面张力 σ 与温度 T 呈下述关系：

$$\sigma A_m^{2/3} = K(T_0 - T - \tau) \quad (1-5)$$

式中 A_m ——1mol 液体分子的表面积， mm^2 ；

K ——常数；

T_0 ——表面张力为零时的临界温度，℃；

τ ——温度常数。

由式(1-5)可知，随着温度的升高，液体的表面张力不断减小。一般来说，钎焊温度的提高有助于提高钎料对母材的润湿性。图 1-10 是锡铅钎料的表面张力与温度的关系。可见，随着温度的升高，锡铅钎料的表面张力降低，钎料的润湿性得以提高。

但是，并非加热温度越高越好。如果钎焊温度过高，可能造成母材晶粒过分长大，以及过热、过烧等问题。而且钎料的润湿性太强，

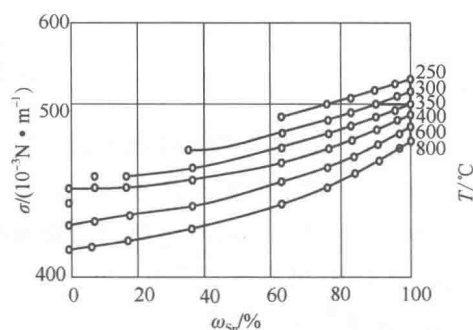
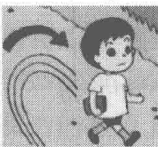


图 1-10 Sn-Pb 钎料的表面张力与温度的关系

往往会造成钎料过分流失，即钎料流散到不需要钎焊的地方去，不易填满钎缝，同时也容易造成溶蚀等缺陷。因此，必须全面考虑钎焊加热温度的影响。一般常取为钎料液相线以上20~40℃，或取为钎料熔点的1.05~1.15倍。

3. 金属表面氧化物的影响

小知识



目前，钎焊技术中常采用钎剂去膜、气体介质去膜、机械和物理去膜等方法去除金属表面的氧化膜。具体的操作过程将在本教材第3章中进行详细的阐述。

在常规条件下，大多数金属表面都存在着一层氧化膜。氧化膜的熔点一般都比较低，在钎焊温度下为固态，其表面张力值比金属本身的要低得多。如前所述， $\sigma_{SG} > \sigma_{LS}$ 是液体润湿固体的基本条件，覆盖着氧气膜的母材表面比起无氧化膜的洁净表面来，表面张力显著减小，钎焊时将导致 $\sigma_{SG} < \sigma_{LS}$ ，所以会产生不润湿现象，表现为液态钎料凝聚成球状，不铺展。表1-4列出了某些金属氧化物的表面张力，对照表1-2可以明显看出这种差别。所以，在钎焊过程中必须采取适当的措施来清除钎料和母材表面的氧化物，以改善钎料对母材的润湿。

表 1-4 某些金属氧化物的表面张力

氧化物	Fe ₂ O ₃	CuO	Al ₂ O ₃
$\sigma_{SG}/(N/m)$	0.35	0.76	0.56

4. 钎剂的影响

钎焊时使用钎剂可以清除钎料和母材的表面氧化膜，改善润湿。当钎料和钎焊金属表面覆盖了一层熔化的钎剂后，它们之间的表面张力将发生变化，如图1-11所示。

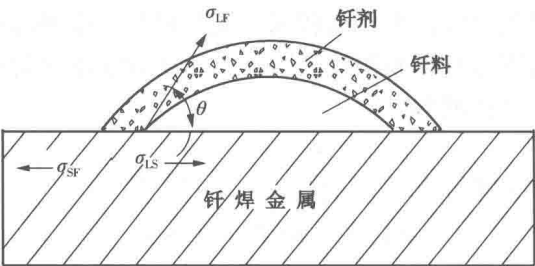


图 1-11 使用钎剂时母材表面上的液态钎料所受的表面张力

液态钎料终止铺展时的平衡方程为：

$$\sigma_{SF} = \sigma_{LS} + \sigma_{LF} \cos \theta$$
$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SF} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LF}}$$

(1-6)

- 式中 σ_{SF} ——固体与液态钎剂界面上的表面张力，N/m；
 σ_{LF} ——液态钎料与液态钎剂的表面张力，N/m；
 σ_{LS} ——液态钎料与母材间的表面张力，N/m。

由式(1-6)可看出，要提高润湿性，即减小 θ 角，必须增大 σ_{SF} 或减小 σ_{LF} 及 σ_{LS} 。钎剂的作用，除能清除表面氧化物使 σ_{SF} 增大外，另一重要作用即是减小液态钎料的表面张力 σ_{LF} 。例如，用锡铅钎料钎焊时常用的一种钎剂是氯化锌水溶液。

锡铅钎料同氯化锌界面的表面张力就比钎料本身的表面张力小得多(见图 1-12), 即 $\sigma_{LF} < \sigma_{LG}$, 因而有助于提高润湿性。因此, 选用适当的钎剂有助于保证钎料对母材的润湿。

5. 母材表面状态的影响

母材的表面粗糙度在许多情况下会影响到钎料对它的润湿。曾做过如下的试验: 把铜和 LF21 铝合金的圆片分成四等份, 分别用下列方法之一清理表面: 抛光、钢刷刷、砂纸打光和化学清洗。然后在铜片中心放上体积为 0.5cm^3 的锡铅钎料 H1SnPb58-2; 在铝合金片的中心放上同体积的 Sn-20Zn 钎料。加上钎剂后在炉中加热到各自的钎焊温度, 保温 5min。试件冷却后, 分别测出钎料在扇形块上的铺展面积。结果表明, 钎料在钢刷刷过的铜扇形块上的铺展面积最大, 而在抛光的铜扇形块上铺展面积最小。但在铝合金的各扇形块上钎料的铺展面积几乎相同。Ag-20Pd-5Mn 钎料在不锈钢上的铺展与锡铅钎料在铜上的铺展有类似的现象(见图 1-13)。在酸洗过的表面上铺展面积大, 在抛光表面上铺展最小。

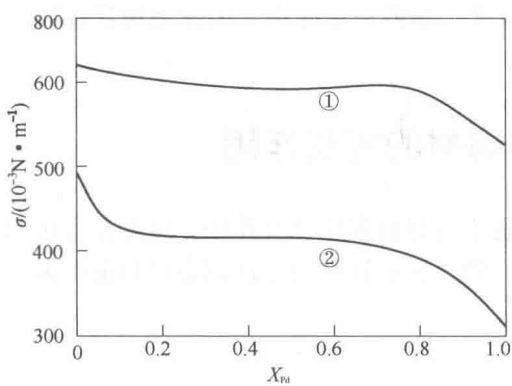


图 1-12 锡铅钎料的表面张力①及它同氯化锌接触时的界面张力②(400℃)

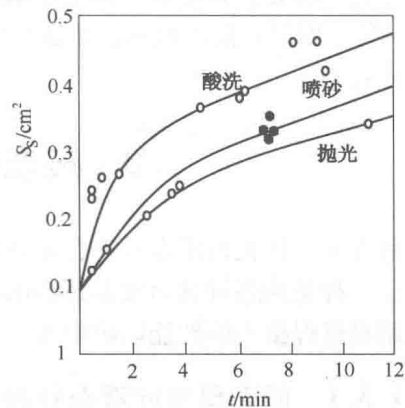


图 1-13 表面处理对 Ag-20Pd-5Mn 钎料在不锈钢上铺展面积的影响(1095℃)

由此可见, 母材的表面粗糙度对与它相互作用弱的钎料(如 H1SnPb58-2、Ag-20Pd-5Mn)的润湿性有明显的影响。这是因为较粗糙表面上的纵横交错的细槽, 对液态钎料起了特殊的毛细作用, 促进了钎料沿母材表面的铺展, 改善了润湿。但是, 表面粗糙度的特殊毛细作用在液态钎料同母材相互作用较强烈的情况下不能表现出来(如 Sn-20Zn 钎料与铝合金), 因为这些细槽迅速被液态钎料溶解而不复存在。

6. 表面活性物质的影响

由物理化学得知, 溶液中表面张力小的组分将聚集在溶液表面层呈现正吸附, 使溶液的表面自由能降低。凡是能使溶液表面张力显著减小因而发生正吸附的物质, 称为表面活性物质。因此, 当液态钎料中加有它的表面活性物质时, 它的表面张力将明显减小, 母材的润湿性因而得到改善。表 1-5 列举了钎料中应用表面活性物质的某些实例。表面活性物质的这种有益作用已在生产中加以利用。

表 1-5 钎料中的表面活性物质

钎料成分	表面活性物质	表面活性物质含量 $\omega/\%$	母 材
Cu	P	0.04~0.08	钢
Cu	Ag	<0.6	钢