

高等学校交流讲义

熔化焊工艺学

下 册

西安交通大学焊接教研组编著

只限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校交流讲义



熔化焊工艺学

下 册

西安交通大学焊接教研组编著

中国工业出版社

本書比較全面地介紹了釐接工藝的科學研究成果和生產實際經驗。內容包括：概述、釐接過程的本質，釐料和溶劑、釐接接頭的設計，各種釐接方法以及各種金屬材料的釐接工藝等。

本書為高等學校焊接專業的交流講義，也可供焊接工作者參考。

熔 化 焊 工 藝 學

下 冊

西安交通大學焊接教研組編著

*

中國工業出版社出版(北京佟麟閣路丙10號)

(北京市書刊出版事業許可証出字第110號)

地質印刷廠印刷

新華書店科技發行所發行·各地新華書店經售

*

開本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $7^{1/2}$ ·字數173,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印數0001—2,637·定價(10-5)0.93元

統一書號：15165-874 (總-135)

前 言

“熔化焊工艺学”是焊接专业中一门主要的专业课程。现有的有关熔化焊工艺的一些教学参考书，基本上只是针对某一种熔化焊工艺或某一种金属材料焊接进行阐述，不能满足该门课程的教学需要。根据上述具体情况，全国焊接专业教材会议曾作出编著“熔化焊工艺学”一书的决议，以满足该门课程教学的需要。会议并对该课程编写工作，作了如下的分工：

第一篇 各种熔焊方法，由哈尔滨工业大学焊接教研室编著；

第二篇 各种金属材料的熔焊，由清华大学焊接教研组主编，哈尔滨工业大学焊接教研室与西安交通大学焊接教研组参加部分编著工作；

第三篇 钎接，由西安交通大学焊接教研组编著。

本书为“熔化焊工艺学”。第三篇——钎接，在以往的专业教学计划中，钎接是作为气焊课程的一部分进行讲授的，在内容上和讲授时数上都是比较少的。近几年来，随着钎接在各工业部门中日益广泛的应用，世界各国对钎接的研究工作有了较大的开展，发表的著作和论文也日益增多起来。这种情况要求适当提高钎接在焊接专业教学计划中的地位。事实上在我国已出现了增加“熔化焊工艺学”中钎接部分讲授时数的趋向。这次全国焊接专业教材会议也建议钎接的讲授时数增为12—14学时。有些学校已将钎接从“熔化焊工艺学”中分出来，单独开课。但是和“熔化焊工艺学”其它部分相比，适用于钎接的教材（中译本）更加稀缺。故本书在编写过程中大部分是翻译现有的有关钎接的外国文献，其中主要是译自：A. B. Лакеемонский И В. Е. Храпин “Паяние И Припой” 和 Н. Ф. Лашко И С. В. Лашкоавякин “Пайка Металлов” 二书，少数部分是剪辑于 Н. Ф. 雅科甫列夫著“钎焊”（孙辉译）；Н. Ф. 拉实柯和 С. В. 拉实柯—阿瓦坎的“焊接金属学（若干问题）”（席聚奎译）；В. Л. В. 沃洛格金著“高频钎焊”（周纪新译）；W. 布尔斯丁著“附着焊接”（徐植译）和 А. А. 阿洛夫，Ю. С. 多尔哥夫，А. С. 波波夫合著“关于焊接和钎接过程的本质问题”（徐宿宇译）等译本或译文。

本篇是根据全国焊接专业教材会议讨论通过的“钎接”大纲进行编写的，该大纲是以西安交通大学焊接教研组单独开设“钎接”课程的大纲为基础。

本篇阐述了以下几方面的内容：钎接概述，钎接过程的本质，钎料与熔剂，钎接接头的設計，各种钎接方法，各种金属材料的钎接工艺。

本篇各章的篇幅和讲授时数相比都显得偏多些，但由于时间仓促，来不及进一步提炼和調正。因此各校在使用上应加以注意。为便于各校使用本篇教材，兹提出几点意见仅供参考：

1. 讲授重点放在第一、四、六章。
2. 第二章着重讲解对钎料和熔剂的要求及其选择，也可适当介绍常用钎料和熔剂的特性、一般内容可供学生自学。
3. 第三章只須原則上提一下不必細讲，供学生自学。

4. 第五章钎接方法可考虑重点介绍几种先进的优质的钎接方法，例如第6、8、10节一般常用方法着重介绍该方法的实质、特点及应用范围。

如果说，“熔化焊工艺学”一书由于初次编写不够成熟的话，则本篇存在的问题可能更多一些，这无论在内容上和篇幅上都是如此。为此恳切地希望各校在使用过程中给予批评与指正，供再版时修改和补充。有关本书在内容上和出版上各种宝贵意见请逕自寄往西安交通大学焊接教研组。

編 者

一九六一，六

目次

前言	3
----	---

概論	6
----	---

第一章 钎接过程的本质	9
-------------	---

第一节 钎接的工艺过程	9
第二节 钎料对固体金属表面的湿润	10
第三节 钎料沿金属表面漫流	13
第四节 钎接时的毛细管现象	15
第五节 钎接的结合形式	17
第六节 钎接时金属组织的变化	19
第七节 金属的钎接性	22

第二章 钎料和熔剂	23
-----------	----

第一节 钎料的要求和分类	23
第二节 软钎料	24
第三节 硬钎料	29
第四节 钎料的选择	36
第五节 熔剂的功用、要求和分类	37
第六节 软钎接和硬钎接用的熔剂	40
第七节 钎接后熔剂的去除	43
第八节 熔剂的选择	44

第三章 钎接前零件准备	46
-------------	----

第一节 金属表面的机械清理	46
第二节 脱脂	47
第三节 浸蚀	48
第四节 钎接前的镀锡	50

第四章 钎接接头的設計	51
-------------	----

第一节 钎接接头的型式	51
-------------	----

第二节 钎接时钎料在钎缝中的配置	56
------------------	----

第三节 钎接前零件的装配和固定	57
-----------------	----

第四节 在钎缝中最适宜的間隙	59
----------------	----

第五节 钎接接头的强度	60
-------------	----

第六节 钎接接头中的缺陷及檢驗	62
-----------------	----

第五章 钎接方法	64
----------	----

第一节 烙铁钎接	64
----------	----

第二节 气焰钎接	68
----------	----

第三节 在液体介质中钎接 (浸沉钎接)	71
------------------------	----

第四节 在电弧中钎接	75
------------	----

第五节 电接触钎接	76
-----------	----

第六节 高频钎接(感应加热钎接)	79
------------------	----

第七节 在气体介质中钎接	88
--------------	----

第八节 在炉中钎接	96
-----------	----

第九节 超声波钎接	100
-----------	-----

第十节 反应钎接	105
----------	-----

第十一节 钎接方法的选择	108
--------------	-----

第六章 各种金属和合金的钎接工艺	109
------------------	-----

第一节 低碳钢和低合金钢的钎接	109
-----------------	-----

第二节 高碳钢和工具钢另件的钎接	109
------------------	-----

第三节 铸铁另件的钎接	109
-------------	-----

第四节 不锈钢另件的钎接	110
--------------	-----

第五节 耐热合金另件的钎接	111
---------------	-----

第六节 金属陶瓷硬质合金的钎接	111
-----------------	-----

第七节 铜及其合金的钎接	113
--------------	-----

第八节 铝及其合金的钎接	114
--------------	-----

第九节 镁及其合金的钎接	116
--------------	-----

第十节 镍合金另件的钎接	117
--------------	-----

第十一节 其它材料的钎接	117
--------------	-----

概 論

当基本金属处于固体状态时，用熔点比它低的熔化状态的填充金属将基本金属联接的过程称为钎接。上述填充金属称为钎料。钎接——我国过去曾称为“鐵焊”。这种工艺方法的譯名有“钎焊”，“低溫焊接”、“附着焊接”。从这些譯名可以看出过去人們认为“钎接”和“焊接”是一回事，只是钎接的加热溫度比較低，經过研究証明，钎接虽然和熔化焊接在許多方面相似，但钎接以下列三方面的特点区别于熔化焊接：

1. 钎接时基本金属被加热到熔点以下。

2. 填充金属——钎料是熔化的。钎料在成分和性能方面和基本金属是有明显的区别。钎料的熔点总是低于基本金属。钎料和基本金属常常是異质的。例如，焊接銅时用銅焊条，而钎接銅时可以用錫钎料。

用易熔钎料钎接的另件不同于焊接另件，能够利用加热方法使另件拆卸和重新钎接，借以更換旧的另件。

3. 在毛細管压力的参与下，熔化的钎料填满被連接的金属另件的間隙。

钎接的任务是連接和复涂。前者和焊接一样連接金属另件成为不可拆的接头，后者是使金属表面增长一层金属，借以提高金属另件表面抗腐蝕，抗氧化和改善别的性能，如鍍錫、鍍鋁等，复涂是通过钎料和钎接金属之間的溶解和扩散作用形成表面金属层，电鍍层的形成乃是电化学反应的結果。复涂既可以成为整个工艺过程中的独立工序，也可以成为钎接前另件的准备工序。

钎接不但必須溶解基本金属，湿润它使易于在它表面流动，同时必須滿足一系列技术上及經濟上的要求，它應該是便宜的，不是稀有的。一般钎料是各种不同有色金属的合金，其成份有时相当复杂。共晶成分的合金在钎料中有很重要的意义，因共晶成分的合金具有許多钎接所必需的特点。如熔点低，熔化开始的溫度及終了溫度差小。要使熔化了了的钎料与基本金属密切接触同时使钎料湿润基本金属，必須要后者表面完全清洁才可能。

为了溶解及除去金属表面上的氧化物及其他脏物，保护金属不受氧化，减少钎料的表面张力；改进它的湿润能力以及流动性，在钎接时要使用熔剂。熔剂在钎接中使用得极广而且起了极大的作用。在很多情况下，如果不用适当的熔剂，钎接工作将无法进行。各种不同成分的钎接熔剂必須具有比钎料更低的熔点，而且能起活跃的化學及物理作用。

钎接的热源随着技术的进步日益增多。主要有以下四种：

1. 气体火焰加热。

2. 电加热：

- (a) 高頻感应加热。

- (b) 电接触加热。

3. 浸在液体解质中加热。

4. 炉內加热。

前二者为局部加热即用在只須要在連接处部分加热时。后二者为整体加热即用在钎接时整个工件需要加热时。

钎接可分类为二种。

1. 按钎料的熔点来分：硬钎接和软钎接。

硬钎接为使用硬钎料的钎接。硬钎料的熔点在 600°C 以上。硬钎料的强度较高，其强度极限可达 50公斤/毫米^2 。

软钎接即使用软钎料的钎接。软钎料的熔点在 450°C 以下。软钎料的强度极限往往不超过 $5-7\text{公斤/毫米}^2$ ，

对熔点在 $450-600^{\circ}\text{C}$ 的钎料如 Zn-Cu-Al 合金国际焊接协会将它属于软钎接。

必须指出划分硬钎接和软钎接的温度界限不是固定的和公认的，它不止一次改变过。

在英美代替硬钎接的专门名词为“Brazing”，代替软钎接的专门名词为“Soldering”。

2. 按钎接时熔化过程、特点来分

1) 钎焊 (Пайко-сварка)

钎焊时从外面加入熔化状态的钎料。钎缝是在没有毛细管压力参与下形成的。

毛细管钎接。这时从外面进入的钎料被熔化，钎缝的形成是在毛细管压力参与下进行的。

2) 反应钎接。没有钎料加入钎接另件的间隙，接合金属的钎料的形成乃是钎接加热时钎接金属间物理化学反应的结果，钎接加热低于钎接金属的熔点，由于接触熔化的结果。在钎接金属结合处形成液相——共晶合金即钎料。

钎接过程不需要高的温度，这已为大家所熟知而在实际中被广泛地应用着，近年来不论在钎接方法上。以及钎料和熔剂成分上都不断有新的改进，这些改进提供了把钎接更进一步地推广到各工业部门中去的可能性。有许多地方已开始代替其他连接金属的方法，有时其中也包括焊接。这一切和钎接的优点有关，和焊接铆接相比，钎接有以下的优点：

1. 外表美观。
2. 由于加热温度低，大大减少了工件的变形。
3. 钎接从重量来看钎接接头比铆接接头轻得多。
4. 由于加热温度低，金属和合金的机械性能不会变坏。
5. 在装配时不需要特殊的余量来补偿。
6. 从工艺上看钎接设备简单。
7. 不需要特殊设备能保证构件的气密性。
8. 工艺过程简单容易实现机械化和自动化。

近代的钎接方法很多，它可以钎接各种牌号的碳钢和合金钢（包括工具钢及不锈钢）硬质合金、灰口铸铁、可锻铸铁，各种有色金属及其合金、贵金属及稀有金属等，此外，它还可以钎接异质金属，金属和非金属。由于钎接的优点，运用钎接来连接小而薄的另件和要求尺寸精确度较高的另件具有很大的成效。

目前钎接在各工业部门中的应用日益广泛。

在机械制造中应用于切削刀具，采矿用钻具，汽车拖拉机的散热器、冲头，汽轮机叶片和叶轮的连接，柴油机汽缸头、自行车、摩托车的制造。

在电气技术中应用于电动机、发电机、变压器、电容器、触头、电缆、汇流排等制造。

在无綫电及电真空制造业中釐接用于电气控制綫路的装配，电子管制造和电真空技术裝置金属和非金属的熔封等。

在仪表仪器制造中釐接用于装配和某些小另件的制造。

在航空工业中釐接用于制造散热用的蜂窝結構、煤油箱、汽油箱、噴气发动机的叶片和叶輪的連接，导輪和噴射器的制造。

在制冷設備中釐接用于保証气密性的反应塔类的制造。

第一章 钎接过程的本质

第一节 钎接的工艺过程

钎接的工艺过程。

钎接的工艺过程如下：

- 1) 准备另件。
- 2) 装配并确定必要的间隙。
- 3) 钎接。
- 4) 清除残留的熔剂。
- 5) 检验钎缝。

准备另件是指清理另件表面，即用机械方法，化学方法或电化学方法清理钎接处或整个表面，除掉不洁的物质——灰尘，油脂，污垢，铁锈，油漆等。

装配就是用型框，螺丝，铆钉和点焊等办法把各接合另件相互联接起来，同时调整另件，使其间隙最小。这种调整造成毛细管现象，它能促进钎料均匀填充钎缝，并给钎料和基本金属的相互扩散造成有利条件。

往往装配和加钎料同时进行，所谓加钎料就是把钎料做成一定的形状（丝，棒，片，管子等），加到钎接处或钎接处特殊制出的槽里。

钎接过程是比较简单的，但其物理化学反应却是相当复杂的，为了更好地了解钎接本身所发生的变化，也可以象焊接一样划分为几个阶段：

- 1) 将钎接金属加热，使其达到钎料熔化的温度。
- 2) 钎料熔化。
- 3) 钎料沿钎接金属表面漫流，有时在毛细管力作用下流入接合另件的间隙。
- 4) 钎接缝附近的基本金属熔解到液体钎料中去，液体钎料的元素向基本金属扩散。
- 5) 钎料在钎接缝中冷却和结晶，得到钎接接头。

应该指出，以上几个阶段不是截然分开的，而是交叉进行的。在钎接过程中对钎接金属加热的目的，是为了使钎接金属获得足够的能量进行反应——钎接金属熔解到液体钎料中去。若对钎接金属加热不足，钎料就无法湿润它。大工件如用铬铁来加热尚须进行预热。要得到牢固的钎接接头，应使钎料均匀分布在钎接缝中。为此，必须使钎料具有良好的流动性，对钎接来讲这叫做漫流性。要使钎料在钎接金属表面上漫流，必须具备以下三个条件：

1) 钎料本身要有一定的湿润性和漫流性。

2) 使钎接接头具有毛细管作用。

3) 钎料要和钎接金属相互直接作用——这是钎接最基本的工艺要求；为保证钎料和钎接金属相互直接作用，必须去除金属表面上的氧化物和油脂等类物质。使用熔剂是清除在钎接过程中生成的氧化物的主要方法。故在一般情况下，使用有效而合适的熔剂便成为获得优良钎接接头的必要的工艺措施。

使用酸性熔剂时, 钎接后必须立即清除残留的熔剂, 以免残留的酸性熔剂, 使基本金属和接头受到强烈的腐蚀, 从而削弱接头的机械性能。

检验钎缝的方法则和焊缝检验基本上相同。

第二节 钎料对固体金属表面的湿润

自由状态的任何液滴, 为使其本身处于稳定状态而消耗最小的能量, 力图保持球形的表面。当液滴和固体表面相接触时, 这种状况就可能会改变。这种变化取决于液滴内部的凝聚力 and 液固二相之间的附着力的相互关系。当液固二相之间的附着力小于液滴内部的凝聚力时, 液滴在固体表面上仍然保持为球体, 如图 1—1 a 所示。这种情况叫做液滴不能湿润固体表面。这在自然界中也有类似的例子, 例如水滴掉在荷叶上成为水珠, 水银滴在桌子上也成为球体。当液固二相之间的附着力大于液滴内部的凝聚力时, 则液滴在固体表面上就要改变其形状, 如图 1—1 b 所示, 这种情况叫做液滴湿润了固体表面。

钎接时, 钎料是熔化的, 钎接金属是不熔化的, 而处在固态下。熔化了钎料作用到钎接金属表面上的情况犹如上述。液体钎料在钎接金属表面上保持其球体的外形时, 表示液体钎料不能湿润钎接金属。反之, 称为液体钎料能够湿润钎接金属。



图 1—1 液滴的湿润和非湿润

为了进一步了解湿润的机构, 可作如下的分析。假使在钎接金属表面上安放钎料液滴, 在液滴内取一水滴 A, 则 A 点将处在三个力的作用下, 如图 1—2 所示。

图中 F_{TK} ——固体钎接金属原子对 A 点的作用力 (附着力);

F_{KK} ——与 A 点邻近的液体原子对 A 点的作用力 (内聚力);

F_{KT} ——气体介质原子对 A 点的作用力;

θ ——从 A 点作液滴表面的切线、此切线和钎接金属表面的夹角, θ 角称为接触角或边角。

由于液滴尺寸很小, 可不考虑液滴重量的影响。因为液滴和气体介质之间的作用力通常是很小的, 也可以略去不计。在这样的前提下就有二种可能出现:

(1) $F_{TK} < F_{KK}$, 即液体钎料不能湿润钎接金属。

在水平面上, 液滴不能湿润钎接金属而呈球体, 如图 1—3 所示。

在垂直面上, 液滴不能湿润钎接金属而呈凸形, 如图 1—4 所示。

从图 1—3 和 1—4 看出, 液滴不能湿润钎接金属时 θ 为钝角。

(2) $F_{TK} > F_{KK}$, 即液滴钎料可以湿润钎接金属表面。此时, 在水平面上液滴的形状如图 1—5 所示。

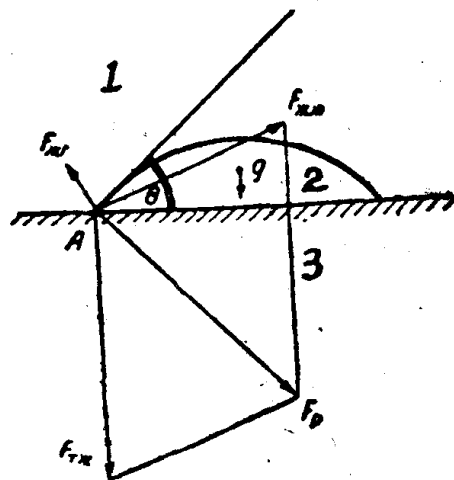


图 1—2 在固体表面上液滴的平衡

- 1——气体介质 (以 Γ 表示);
- 2——液体钎料 (以 Δ 表示);
- 3——固体钎接金属 (以 T 表示)。

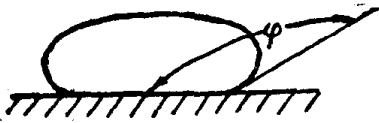


图 1—3 在水平面上的非湿润液滴

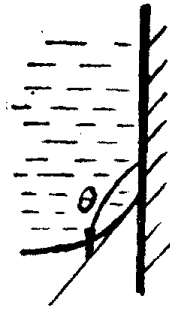


图 1—4 在垂直面的非湿润液滴

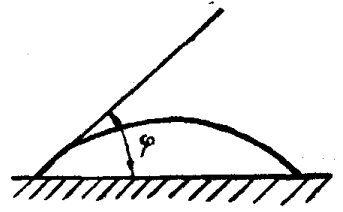


图 1—5 在水平面上湿润的液滴

在垂直面上液滴湿润时呈凹形，如图 1—6 所示。

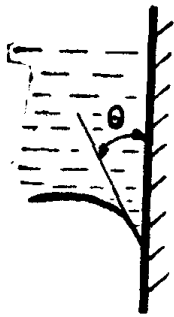


图 1—6 在垂直面上湿润的液滴

从图 1—5 和 1—6 可以看出，液滴湿润钎接金属时 θ 为锐角。

由此，钎料液滴在钎接金属表面上的 θ 角就成为钎接湿润性的标志。

$90^\circ < \theta < 180^\circ$ 湿润性不好；

$0^\circ < \theta < 90^\circ$ 有湿润性；

$\theta = 0^\circ$ 完全湿润；

$\theta = 180^\circ$ 完全不能湿润。

液体钎料湿润金属的结果，总是形成金属间的结合——固溶体或化合物。非金属液体在固体表面上仅是一种附着作用，这是金属湿润和非金属湿润的不同点。相互不形成固溶体或化合物的金属彼此不能湿润，它们不相互混合成液体，而只是熔化了了的金属在另一固体金属上集聚成滴状。

属于这种性质的金属系有 Fe—Ag, Fe—Pb, Cu—Pb, Fe—Cd, Fe—Bi, Cu—Bi, Cu—Mo, Cu—W, Cd—Al, Pb—Al。在选择钎料成分时应避免这样的金属系。

金属的湿润性和其表面张力有关。在液体内部，原子处于平衡状态，如图 1—7 所示。在液体表面的原子处于不平衡状态，一边受到气相的作用力 F_r ，另一边是液相内部邻近的原子对它的作用力 F_k 。通常 F_k 大于 F_r ， $F_k - F_r$ 之差总是力图使液体表面的原子向内拉，以保持最小的表面积。

要增加液体的表面积即增加液体表面的原子数，必须有一部分液体分子从液体内部走向表面，这时这些原子必须克服 $F_k - F_r$ 的吸引力才能从内部走向表面。所以表面分子的能量总是大于内部分子的能量。这个能量差可称为表面张力。表面张力又可以认为是液体表面单位长度上的力，这个力恰好抵消在相反方向上使液体表面积增加的外拉力，所以液体表面张力的方向如图 1—8 所示：

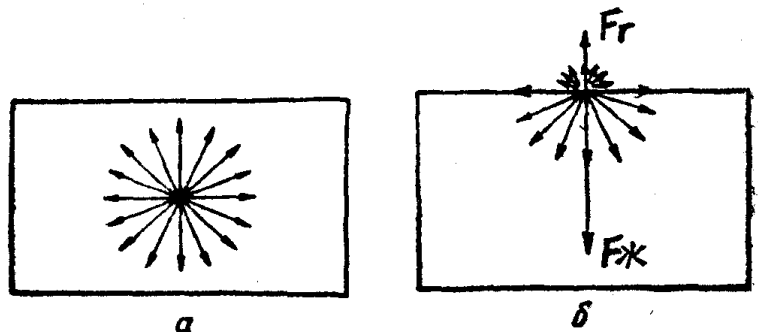


图 1—7 金属液体中原子的平衡：

a 在液体内部 b 在液体表面。

这样，钎料的湿润性就和其表面张力联系起来了。钎料湿润钎接金属意味着钎料和钎

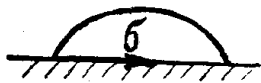


图 1—8 液滴与固体金属交界处的表面张力

接金属之间的接触表面积有所增加。钎料表面积增加意味着有部分钎料的液体原子从内部走向表面，这些液体原子必须先克服本身的表面张力才能走向表面。钎料的表面张力越小，钎料内部的原子越容易走向表面，钎料和钎接金属的相互接触的表面积也就增加，因而钎料的湿润性越好；反之，钎料的表面张力越大，钎料的湿润性越差。所以钎料的表面张力，也是衡量其湿润性的标志。

θ 角是衡量钎料湿润性的标志，表面张力也是衡量钎料表面张力的标志，钎料的 θ 角和表面张力有着内在的联系。二者之间的关系如下：

钎料液滴和钎接金属的相互作用是在空气、真空、中性与还原性介质或熔剂层下进行的。由此可见，钎接过程是三相过程，在上述情况下钎接金属和钎料液滴之间建立了平衡，它是由钎接金属和钎料边界上的表面张力 σ_{TK} ，气体介质或熔剂与钎接金属边界上的表面张力 σ_{TR} ，气体介质或熔剂与液体钎料边界上的表面张力 σ_{KR} 所决定的，如图 1—9 所示。

当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时， $\sigma_{\text{TK}} < \sigma_{\text{TR}}$ ， $\sigma_{\text{TR}} - \sigma_{\text{TK}} = \text{压力差}$ ，此压力差称为漫流压力，钎料在此漫流压力下向左流动， θ 减小， σ_{KR} 的方向右倾斜。当钎料漫流到一定程度，在 A 点的合力等于零时，即停止漫流，并在钎接金属和液体钎料间建立起平衡。

平衡方程式为： $\sigma_{\text{TR}} - \sigma_{\text{TK}} - \sigma_{\text{KR}} \cos \theta = 0$ ，

或

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{TR}} - \sigma_{\text{TK}}}{\sigma_{\text{KR}}}$$

上式为钎料的 θ 角和表面张力间的关系，由此得出几点结论：

1. $\sigma_{\text{TR}} > \sigma_{\text{TK}}$ $\cos \theta$ 值为正数， $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 可以湿润。
2. $\sigma_{\text{TR}} < \sigma_{\text{TK}}$ $\cos \theta$ 值为负数， $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 不能湿润。
3. 在 $\sigma_{\text{TR}} > \sigma_{\text{TK}}$ 前提下， σ_{KR} 降低时， $\cos \theta$ 数值增加， θ 角降低从而改善了湿润。在钎接过程中使用熔剂时， σ_{KR} 就会降低，因而有利于改善钎料的湿润条件。

4. 在 $\sigma_{\text{TR}} > \sigma_{\text{TK}}$ 的前提下降低 σ_{TK} 时， $\cos \theta$ 数值增加， θ 角减少，有利于湿润。去除钎接金属表面的氧化物等杂质就能降低 σ_{TK} ，故钎接前对钎接金属表面进行清理有利于改善钎料对钎接金属的湿润条件，从而有利于提高钎接质量。

$\cos \theta$ 为衡量湿润性的尺度，故称为湿润系数。

液体锡和铅锡共晶沿铜漫流时，测出接触角的数值列于表 1—1，实验时采用 90% 氯化锌和 10% 氯化铵作为熔剂。

这个试验说明了二个问题：

(1) 钎料的湿润性与加热温度成正比。

随着加热温度的增加，钎料的 σ_{TK} 减少， $\cos \theta$ 的数值增加，接触角减少，因而有利

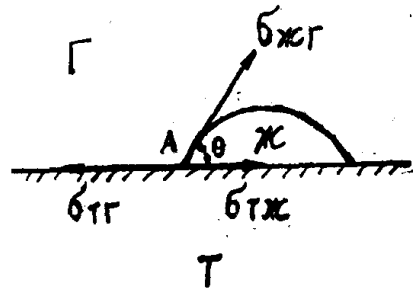


图 1—9 表面张力和接触角之间的关系

表 1—1 液体锡和铅锡共晶与铜的接触角

金 属	温 度 $^\circ\text{C}$	接 触 角 度
锡	250	50
锡	300	40
铅 锡 共 晶	200	35
铅 锡 共 晶	260	0

于钎料的湿润性。

这个结论和某些学者的研究成果是一致的。苏联 Ю. А. Клячко 和 Л. Л. Кунин 测定了锡的表面张力，其数据列于表 1—2。

苏联 В. К. Семенченко 和 Н. Л. Покровский 根据实验数据，提出下列方程式用以计算锡的表面张力：

$$\sigma = 531 - 0.080(t - 232),$$

式中 σ ——锡的表面张力达因/厘米；
 t ——加热温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 共晶成份的钎料比纯金属具有较小的接触角，即共晶成份的钎料具有最好的湿润性。这是和共晶成份熔点最低，表面张力最小分不开的。

Ю. А. Клячко 和 Л. Л. Кунин 测定了铅锡二元合金的表面张力，其结果列于图 1—10。

表 1—2 金属锡的表面张力和温度的关系

温 度 $^{\circ}\text{C}$	表面张力 达因/厘米
240	527
280	523
340	520

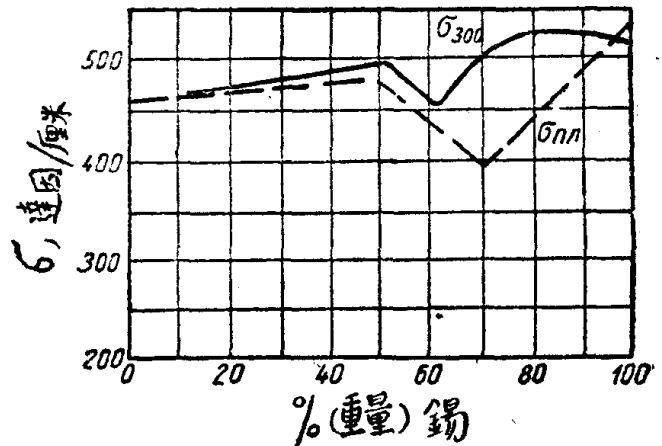


图 1—10 铅锡二元合金的表面张力

第三节 钎料沿金属表面漫流

为了得到牢固和匀称的钎缝，必须要求钎料在钎接金属表面上很好地漫流。这是钎料应具有的重要性质。

所谓漫流性就是钎料液滴在钎接金属表面上变为薄层的现象。实际上也是液体钎料在钎接金属表面上或钎接金属之间的缝隙中改变自己形状的性能。

钎料的漫流性是以钎接金属被钎料液滴所复盖的面积来衡量的。当然，钎料液滴复盖的表面积越大，钎料的漫流性也越好。

但是漫流性是一个极其复杂的问题，影响因素很多。确定漫流性的主要因素之一是固体——气体、固体——液体、液体——气体，交界处的表面张力数值的相互关系。由此可见，钎料的漫流性与其湿润性有关。

漫流的速度很大程度上取决于溶液的粘度。若钎料的漫流发生在低于开始结晶的温度（液相线），则钎料的漫流性也取决于它的流动性。流动性的影响仅在采用具有宽大的结晶温度范围的钎料时才出现。力求减少钎料液滴高度的重力以及钎料表面的氧化膜，对漫流性也具有明显的影响。

上述影响因素表明漫流性直接取决于钎料的成分和钎接的温度（图 1—11）。

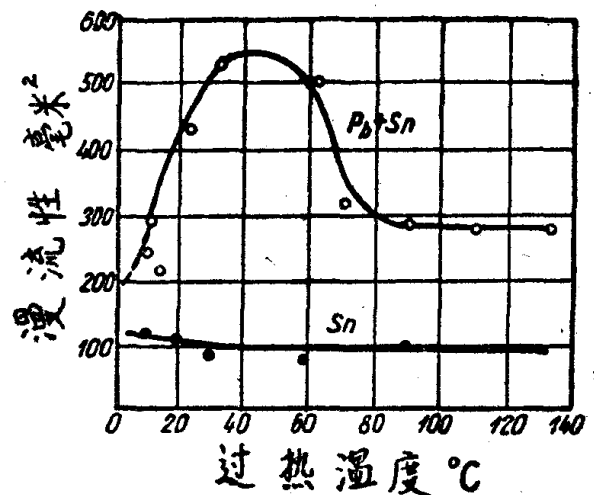


图 1—11 纯锡和铅锡共晶的漫流性和温度的关系

漫流的速度通常是不大的；实际上是粗糙的金属表面的毛细管作用提高了这个速度。表面粗糙度对漫流性的影响与钎料的湿润性有关：

(1) 当钎料湿润金属表面，即 $\theta < 90^\circ$ ，而 $\cos \theta > 0$ 时，增加金属表面的粗糙度，可改善湿润。

(2) 当钎料不湿润金属表面，即 $\theta > 90^\circ$ ，而 $\cos \theta < 0$ 时，增加金属表面的粗糙度，相反使漫流性更坏。

漫流性的物理化学标准称为漫流系数，它由吸附功和内聚功的相互关系来确定。

若固体金属表面和液体钎料相接触，则将其沿交界处分开时要求消耗一定的功；这个功的大小称为吸附功 ($A_{адг}$)。吸附功是表示由原先存在的液固相分界面重新形成两个表面时需要增大多少自由能。这样，吸附功的大小可以通过表面张力的数值来计算：

$$A_{адг} = \sigma_{тг} + \sigma_{жг} - \sigma_{тж}, \quad (1)$$

但由固体表面上液滴平衡条件已知

$$\sigma_{тг} - \sigma_{тж} - \sigma_{жг} \cos \theta = 0. \quad (2)$$

解 (1) 与 (2) 求得

$$A_{адг} = \sigma_{жг} (\cos \theta + 1). \quad (3)$$

当固体与液体原子间的相互作用大于液体原子间的相互作用时，则不在液固相的分界面上分开，而在液体内部分开。在这种情况下，形成两个新的表面所作的功称为内聚功 $A_{ког}$ ：

$$A_{ког} = 2 \sigma_{жг}. \quad (4)$$

要使液体钎料自由地漫流在固体金属表面上，必须使

$$\theta = 0^\circ \text{ 及 } \sigma_{тг} \geq \sigma_{тж} + \sigma_{жг}. \quad (5)$$

解 (1) 与 (5) 式得

$$A_{адг} \geq 2 \sigma_{жг}; \quad (6)$$

比较 (4) 与 (5) 式，则要求完全漫流时必须使

$$A_{адг} \geq A_{ког}.$$

$A_{адг} - A_{ког}$ 之差愈大，则漫流性越好。这个差值的大小称为漫流系数 $K_{рст}$ ，

$$K_{рст} = A_{адг} - A_{ког}. \quad \text{即 (7)}$$

由 (4) 及 (7) 式得

$$K_{рст} = A_{адг} - 2 \sigma_{жг}. \quad (8)$$

以 (1) 式之 $A_{адг}$ 代入 (8) 式中：

$$K_{рст} = \sigma_{тг} - \sigma_{жг} - \sigma_{тж}. \quad (9)$$

解 (3) 与 (8) 式得

$$K_{рст} = \sigma_{жг} (\cos \theta - 1). \quad (10)$$

由 (10) 式可知，钎料的漫流性和其湿润性成正比，也和钎料与气相或熔剂交界处的表面张力成正比。当 $\theta > 0^\circ$ 时， $K_{рст}$ 为负值。由此可见，钎料完全任意漫流只有当 $\theta = 0^\circ$ 时才有可能。

曾在下列条件下进行漫流性实验：

钎接金属，退过火的 CT3 号钢片，尺寸为 40×40 毫米，试验前用砂纸磨光；

钎料：铅、锡、铅锡共晶合金；

熔剂：50%氯化鋅水溶液；

加热：在电炉中鋼垫板上进行，用热电偶测定加热温度，加热温度高于钎料熔点 20°C ， 60°C ， 150°C 。

漫流面积是用刻有千分網的賽璐珞測得。

試驗結果见图 1—12。

由图 1—12可知：

(1) 錫和鉛本身的漫流性不大，随着鉛和錫成分的增加，漫流性增加，到共晶浓度时漫流性最大，超过共晶浓度时漫流性又要下降。这是因为共晶成分的 θ 角最小，漫流系数最大，同时合金元素要扩散分布，表现为扩散能动性，它有利于漫流性，純金属的扩散性等于零，合金有扩散能动性，合金中共晶成分时的扩散能动性最大漫流性最好，故共晶钎料的应用是有更大的意义。

(2) 从过热温度来看，过热 20°C 时漫流性最大。从过热温度 20°C 开始，随着过热温度进一步增加，钎料的漫流性下降，过热 60°C 次之，过热 150°C 最小。

在一般情况下，加热温度增加时钎料的表面张力减少，湿润系数增加，漫流系数也随之增加，但漫流系数随温度升高而增加有一个临界值。不同的钎料成分有不同的临界值，对鉛錫合金来讲是在过热温度 20°C 处。对于这个现象可作如下的解释：

在超过熔点不多的温度下，液体结构保持着固体原子排列的相似性，原子的能动性不大。此时表面张力起作用，使漫流性保持一定的程度。当温度增加时，液体组织逐步破坏，丧失了固体结晶时原子排列的相似性，这时原子能动性随之大大增加，这种原子能动性使原子从一个节点跳到另一个节点，从而带来了能量的波动。这种现象使液体产生了附加的漫流性，有利于液体改变自己的形状。显然，漫流性的最大值是在液体组织变化最大的时候；对鉛錫合金来讲是在熔点以上 20°C 的时候。

当温度继续增加时，钎料的表面张力产生作用，使其漫流性下降。

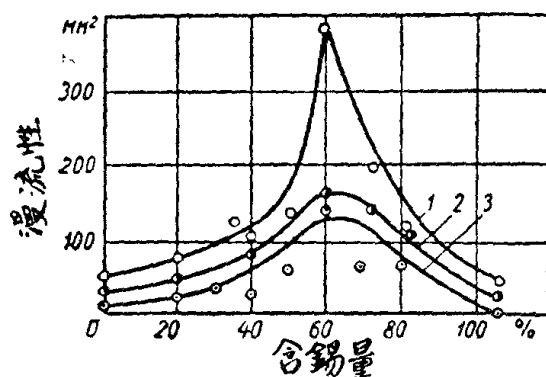


图 1—12 加热高于熔点时鉛錫合金沿鋼表面的漫流性变化

第四节 钎接时的毛细管现象

为了得到良好的钎接接头，钎料必须完全填满钎缝，钎料填满钎缝是取决于它的毛细管性质。

在盛有液体的容器中插入直径很小的管子（毛细管），这时液体在管子中升起的水平面高于或低于容器的水平面取决于液体是否湿润管壁材料。更确切说，当液体和毛细管内表面接触时，二者之间能量相互作用的结果形成了平衡的湿润接触角 θ ；随 θ 角的变化，毛细管中的液体表面或处于水平位置，或向下弯曲，或向上凸

$$\Delta p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$$

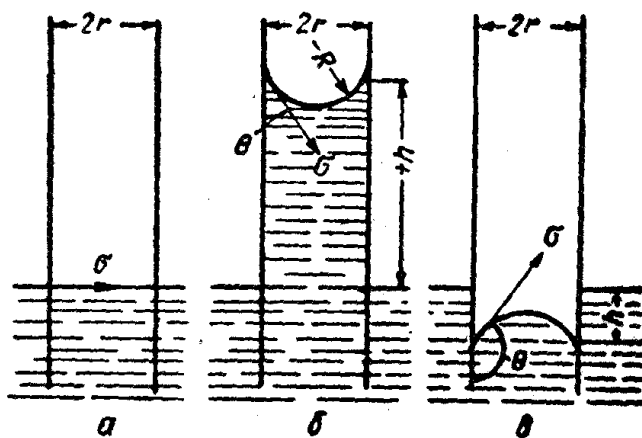


图 1—13 毛细管中液体的平衡：
a— $\theta = 90^{\circ}$ ；b— $\theta < 90^{\circ}$ ；c— $\theta > 90^{\circ}$ 。

起(图1—13)。

由毛细管理论可知,毛细管内凸形表面和凹形表面的液体压力是不相等的。根据拉普拉斯方程式,这个压力差 ΔP_k 为:

$$\Delta P_k = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

式中 σ —液体的表面张力;

R_1 及 R_2 —在二个相互垂直的平面中液弯面的曲率半径。

对于圆柱体的毛细管,

$$R_1 = R_2 = R. \quad (2)$$

当毛细管半径 r 很小时,液弯面可看作球形,在此情况下, r 与 R 的关系为

$$R = \frac{r}{\cos \theta}, \quad (3)$$

式中 θ —湿润接触角。

解方程式(1),(2),(3)得

$$\Delta P_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}. \quad (4)$$

若 $\theta < 90^\circ$,由于压力差的影响,液体沿毛细管升高。与此同时产生了过剩的流体静压力 ΔP_r 。

$$\Delta P_r = hg(D-d), \quad (5)$$

式中 h —液体在毛细管中的高度;

g —重力加速度;

D —液体密度;

d —气体密度。

当液体在毛细管中升高结束之后,即达到平衡时,

$$\Delta P_r = \Delta P_k,$$

即

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{r} = hg(D-d). \quad (6)$$

由(6)式可得液体在毛细管中升起的高度

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \cdot g(D-d)}, \quad (7)$$

$$\text{同样可得液体的表面张力 } \sigma = \frac{h \cdot g \cdot r(D-d)}{2 \cos \theta}. \quad (8)$$

由(7)可知,当 $\theta = 90^\circ$ 时(图1—13a), $h = 0$,即液体不能湿润金属表面。

当 $\theta < 90^\circ$ 时(图1—13b), h 为正值,即液体将沿毛细管升高。

当 $\theta > 90^\circ$ 时(图1—13c) h 为负值,即液体从毛细管中被排出。

公式(8)可用于试验时确定表面张力的值。

公式(7)中 r 即钎接时钎接金属之间的间隙。二个间隙很小的互相配合的钎接金属即构成毛细管,因此上述分析的情况完全适用于钎接另件。由(7)式可知,在已经确定钎料成分的情况下,为使钎料很好地填满钎接接头, r 愈小, h 就愈大,所以在实际生产中设计钎接接头时必须保持很小的间隙。

由(7)式还可以看出,钎料的表面张力越大,它对钎接金属的湿润性越好,钎料必