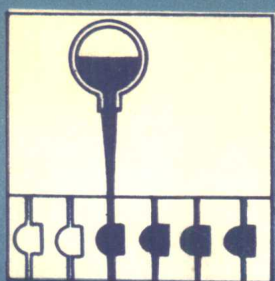


高等学校试用教材

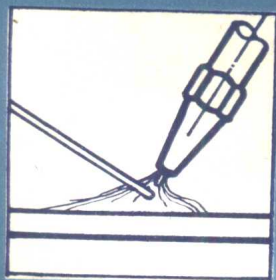


焊接方法及设备

第四分册

钎焊和胶接

北京航空学院 邹 僖 编著
哈尔滨工业大学 魏月贞



机械工业出版社

高等学校试用教材

焊接方法及设备

第四分册

钎焊和胶接

北京航空学院 邹 僊
哈尔滨工业大学 魏月贞 编著



机械工业出版社

本书系全国统编的高等院校焊接专业教材。全书分上、下两篇，共十五章。前九章为钎焊部分，后六章为胶接部分。书中较全面、系统地介绍了钎焊和胶接的基本原理；钎焊和胶接所用的主要材料，如钎料、钎剂、胶粘剂；主要工艺方法；接头设计；接头质量及钎焊和胶接技术在工业上的应用等。

本书着重从理论角度阐述有关问题，同时也收入了较多的实用资料。除供作高等院校焊接专业教材外，也可供从事这方面工作的科技人员和工人参考。

焊接方法及设备

第四分册 钎焊和胶接

北京航空学院邹 僖 编著
哈尔滨工业大学魏月贞

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $9^{1/4}$ · 字数 225 千字

1981年7月北京第一版·1981年7月北京第一次印刷

印数 0,001—6,800 · 定价 1.00 元

*

统一书号: 15033·4838

前 言

本书系全日制大学焊接工艺及设备专业的专业课程《焊接方法及设备》教材的第四分册，内容包括钎焊与胶接两部分。

本书是根据高等学校一机部对口专业座谈会的安排，焊接专业教材编写会拟定的钎焊和胶接教学大纲编写的。但在编写中对钎焊部分原大纲作了局部变动，即把第三章的内容由原来的单一地讲述钎剂扩展改为全面介绍钎焊中所采用的各种去膜方法。这一改变在审稿会上得到认可，大家认为这样做加强了教材内容的系统性，有助于教学。书中对钎焊和胶接的基本原理、钎焊和胶接用的材料与设备、主要工艺方法以及它们在工业上的应用作了全面介绍；在阐述这些问题时力求深入浅出，揭示其机理和规律，希望能给学生以初步分析钎焊和胶接技术问题、选用钎焊和胶接材料、确定钎焊和胶接工艺的必需知识。目前，由于钎焊和胶接技术在我国不同工业部门中的应用范围不同，因此反映在不同学校的焊接专业教学计划中对钎焊和胶接的讲授要求也就很不一致，学时安排相差甚远，本书的内容和份量是按学时数多的类型确定的。对钎焊和胶接学时安排少的焊接专业，可根据自己的教学特点选讲其中的一些章节。

考虑到目前国内缺少系统的钎焊和胶接资料的情况，本书在全面介绍钎焊和胶接的基本原理和工艺的同时，还较多地收集了有关的技术实用数据。因此，除可作为焊接专业的教材外，也可供从事这方面工作的科技人员和工人参考。

本书的钎焊部分由北京航空学院邹僖主编，庄鸿寿、邹僖编写；西北工业大学钱聚瑛主审。胶接部分由哈尔滨工业大学魏月贞主编，魏月贞、张志谦编写；北京航空学院郭忠信主审。由一机部教材编辑室董连仁为责任编辑。由于我们的水平不高，加以编写时间仓促，书中必然会存在不足和错误之处，恳切希望读者给予批评指正。参加本书审稿工作的还有哈尔滨工业大学、西北工业大学、上海交大、西安交大、三机部六二一所、六二五所、四三〇厂和一一五厂的有关同志，他们提供了许多很好的意见和建议，谨向这些同志表示深切的谢意。

目 录

前 言

上篇 钎焊部分

绪 言 1

第一章 钎焊接头的形成过程 2

§ 1-1 钎料的润湿与铺展 2

§ 1-2 钎料的毛细流动 2

§ 1-3 钎料润湿性的评定 4

§ 1-4 影响钎料润湿性的因素 4

§ 1-5 液态钎料同钎焊金属的相互作用 10

第二章 钎料 19

§ 2-1 对钎料的基本要求 19

§ 2-2 钎料的分类和编号 19

§ 2-3 锡铅钎料 20

§ 2-4 铅基钎料及其它锡基钎料 21

§ 2-5 镉基钎料 22

§ 2-6 钎焊铝用软钎料 22

§ 2-7 铝基钎料 23

§ 2-8 银基钎料 24

§ 2-9 铜基钎料 27

§ 2-10 自钎剂钎料 29

§ 2-11 锰基钎料 32

§ 2-12 镍基钎料 33

§ 2-13 贵金属钎料 35

第三章 钎焊时的去膜过程 37

§ 3-1 金属表面的氧化膜 37

§ 3-2 钎剂去膜 37

§ 3-3 气体介质及其作用 48

§ 3-4 机械与物理的去膜方法 52

第四章 钎焊方法 54

§ 4-1 烙铁钎焊 54

§ 4-2 火焰钎焊 54

§ 4-3 电阻钎焊 55

§ 4-4 感应钎焊 56

§ 4-5 浸沾钎焊 (在液体介质中钎焊) 58

§ 4-6 炉中钎焊 59

第五章 钎焊接头设计 63

§ 5-1 钎焊接头型式 63

§ 5-2 钎焊接头的强度 64

§ 5-3 钎焊接头设计 68

第六章 铝及其合金的钎焊 70

§ 6-1 铝和铝合金的软钎焊 70

§ 6-2 铝和铝合金的硬钎焊 74

§ 6-3 铝的浸沾钎焊 75

§ 6-4 干燥空气炉中钎焊 77

§ 6-5 铝的真空钎焊 78

§ 6-6 铝同其它金属的钎焊 79

第七章 碳钢、不锈钢和高温合金的

钎焊 80

§ 7-1 碳钢和低合金钢的钎焊 80

§ 7-2 不锈钢的钎焊 81

§ 7-3 高温合金的钎焊 86

第八章 其它材料的钎焊 91

§ 8-1 铜及其合金的钎焊 91

§ 8-2 钛及其合金的钎焊 94

§ 8-3 高速钢和硬质合金的钎焊 96

§ 8-4 难熔金属的钎焊 97

§ 8-5 陶瓷与金属的钎焊 99

第九章 钎焊缺陷的若干问题 100

§ 9-1 钎缝的不致密性 100

§ 9-2 钎焊金属的自裂 102

参考文献 103

下篇 胶接部分

绪言 105

第十章 胶接接头 107

§ 10-1 胶接的基本原理 107

§ 10-2 胶接接头的形成 108

§ 10-3 胶粘剂的组成及分类 110

第十一章 胶粘剂 112

§ 11-1 化学反应固化胶粘剂 112

§ 11-2 热熔胶粘剂 119

IV

§ 11-3 热塑性树脂溶液胶粘剂	120	§ 13-2 常见的几种接头形式	132
§ 11-4 压敏胶粘剂	121	第十四章 胶接质量的检验	134
§ 11-5 磷酸——氧化铜胶粘剂	122	§ 14-1 胶接件强度的测定	134
第十二章 胶接工艺	123	§ 14-2 胶接接头耐介质性能的测定	136
§ 12-1 胶接件的表面处理	123	§ 14-3 胶接结构的非破坏性检查	137
§ 12-2 胶粘剂的准备	125	第十五章 胶接技术的应用	140
§ 12-3 涂胶与合拢	126	§ 15-1 在结构连接方面的应用	140
§ 12-4 固化	127	§ 15-2 在旧件修复方面的应用	142
§ 12-5 安全技术	129	§ 15-3 机械设备的密封	143
第十三章 胶接接头的设计	130	参考文献	144
§ 13-1 胶接接头的受力形式及设计原则	130		

上篇 钎焊部分

绪 言

钎焊是连接金属的一种方法。借钎焊方法来连接金属时，零件常以搭接形式装配好，钎料安放在间隙旁或间隙内。钎料成分与焊件不同，熔点比焊件材料的熔点低。当它们一起被加热到稍高于钎料熔点的温度后，钎料熔化并填满零件间的间隙。钎料冷凝后形成牢固的接头，把零件连接起来。因此，钎焊与焊接相比主要具有下列不同之处：钎焊时只有钎料熔化，而钎焊金属处于固体状态；熔化的钎料依靠润湿和毛细作用吸入或保持在零件的间隙内；依靠液态钎料和固态钎焊金属的相互扩散而形成金属结合。因此，钎焊是依靠液态钎料填满固态钎焊金属的间隙并与之形成金属结合而连接金属的一种方法。

在连接金属的方法中，钎焊也许是人类最早使用的方法之一。几千年前，当人类尚未开始使用铁器时，就已经发明用钎焊方法来连接金器或铜器。在埃及出土的古文物中，就有用银铜钎料钎焊的管子，估计它是五千年前的物品。我国古籍上也有“中华小钎用白铜末”的记载。这说明，我国古代也已掌握了用铜合金作钎料来钎焊金属的技术。

但是，在很长的历史时期中，钎焊技术没有得到大的发展，与焊接相比处于十分落后的境地。直到本世纪三十年代，出于科学技术发展的需要，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。尤其是二次世界大战后，由于航空、航天、原子能、电子技术等的飞速发展，对连接技术提出了新的要求，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，钎料的品种日益增多，钎焊技术的应用范围因此日益扩大。例如，在机电制造业中，钎焊技术已用于制造硬质合金刀具、钻探钻头、换热器、自行车架、列车车厢、导管、各类容器、电机、变压器、触头、电缆、汇流排以及汽轮机的叶片和拉筋的连接等；在电子工业和仪表制造业中，在许多情况下钎焊甚至是唯一的连接方法，如在制造微波波导、电子管、电真空器件和无线电接线等，其中牵涉到许多金属与非金属的连接；在国防和尖端技术部门中，诸如喷气发动机、火箭发动机、原子能设备制造中也大量采用了钎焊技术。

钎焊技术之所以得到如此广泛的应用，在于与焊接相比，它有一些独有的特点：实现连接的温度可以借选用不同的钎料在从室温到接近钎焊金属熔点的广阔范围内变化；由于加热温度较低，焊件的应力和变形小，对材料的性能影响不大，并易保证焊件的尺寸；可以一次完成多零件的连接，且实现连接往往不受结构开敞性的影响；可以连接不同金属、金属与非金属。因此，有不少用焊接方法难以甚至无法进行连接的结构，采用钎焊可以解决。

但是，这决不意味着可以用钎焊来取代焊接。钎焊与焊接相比也有不及之处，例如：钎焊接头的强度一般比较低，耐热能力较差；较多采用搭接接头型式，增加了结构重量。因此，必须根据产品的材料、工作要求和结构特点，选用合理的连接方法。钎焊较适宜于连接精密、微形、复杂、多钎缝、异类材料的焊件。

钎焊技术在近几十年内虽然取得了巨大的进展，但与别的技术相比，仍然是一门年青的不成熟的技术科学，还没有来得及建立起自己的系统的理论基础，许多问题的本质也还有待于今后的努力研究。

第一章 钎焊接头的形成过程

钎焊的根本问题是如何能够得到一个优质的接头，这样的接头只有在液态钎料能充分地流入并致密地填满全部钎缝间隙，又与钎焊金属很好地相互作用的前提下才可能获得。显然，钎焊包含着两个过程：一是钎料填满钎缝的过程；二是钎料同钎焊金属相互作用的过程。为了保证钎焊接头的质量，有必要了解和研究这些过程的规律性。

§ 1-1 钎料的润湿与铺展

钎焊时，熔化的钎料以液态与固态钎焊金属接触，液态钎料必须很好润湿钎焊金属表面才能填满钎缝。

从物理化学得知，将某液滴置于固体表面，若液—固体系通过液滴和固体界面的变化能使其自由能降低，则液滴沿固体表面会自动流开铺平，呈图 1-1 所示的状态，这种现象称为铺展。图中 θ 称为润湿角； σ_{gq} 、 σ_{yq} 、 σ_{yg} 分别表示固—气、液—气、液—固界面间的界面张力。铺展終了时，在 O 点处这几个力应该平衡，即：

$$\begin{aligned}\sigma_{gq} &= \sigma_{yg} + \sigma_{yq} \cos \theta \\ \cos \theta &= \frac{\sigma_{gq} - \sigma_{yg}}{\sigma_{yq}}\end{aligned}\quad (1-1)$$

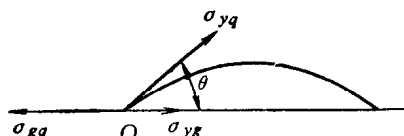


图1-1 气—液—固界面示意图

由式 (1-1) 可见，润湿角 θ 的大小与各界面张力的数值有关。 θ 角大于还是小于 90° ，须视 σ_{gq} 与 σ_{yg} 的大小而定。若 $\sigma_{gq} > \sigma_{yg}$ ，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；若 $\sigma_{gq} < \sigma_{yg}$ ，则 $\cos \theta < 0$ ，即 $180^\circ > \theta > 90^\circ$ ，这种情况称为液体不润湿固体，水银在玻璃上就是如此。这两种状态的极限情况是： $\theta = 0^\circ$ ，称为完全润湿； $\theta = 180^\circ$ ，为完全不润湿。因此，润湿角是液体对固体润湿程度的量度。钎焊时希望钎料的润湿角小于 20° 。

§ 1-2 钎料的毛细流动

钎焊时，对液态钎料的要求主要不是沿固态钎焊金属表面的自由铺展，而是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对钎焊金属的毛细作用。

液体对固体的毛细作用表现为如下的现象：把间隙很小的两平行板插入液体中时，液体在平行板的间隙内会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，如图 1-2 所示。液体在两平行板的间隙中上升或下降的高度可由下式确定：

$$h = \frac{2\sigma_{yq} \cos \theta}{a\rho g} = \frac{2(\sigma_{gq} - \sigma_{yg})}{a\rho g} \quad (1-2)$$

式中 θ ——润湿角；
 a ——平行板的间隙，钎焊时即为钎缝间隙；
 ρ ——液体的密度；
 g ——重力加速度。

当 h 为正值时表示液体在间隙中上升； h 为负时表示液体下降。

由式(1-2) 可以看出：

1. 当 $\theta < 90^\circ$ 、 $\cos\theta > 0$ 时， $h > 0$ ，液体沿间隙上升；若 $\theta > 90^\circ$ 、 $\cos\theta < 0$ ，则 $h < 0$ ，液体沿间隙下降。因此，钎料填充间隙的好坏取决于它对钎焊金属的润湿性。显然，钎焊时只有在液态钎料能充分润湿钎焊金属的条件下，钎料才能填满钎缝。

2. 液体沿间隙上升的高度 h 与间隙大小 a 成反比。随着间隙的减小，液体的上升高度增大。图 1-3 是铜或黄铜板间钎料的填缝高度同间隙的关系〔1〕*。从上升高度看，是以小间隙为佳。因此，钎焊时为使液态钎料能填满间隙，必须在接头设计和装配时保证小的间隙。

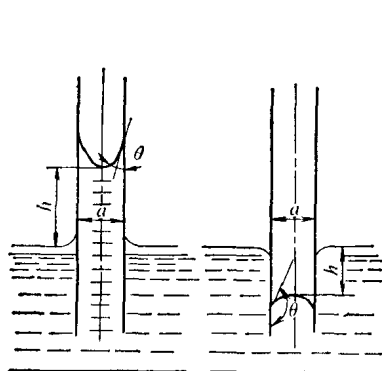


图1-2 在二平行板间液体的毛细作用

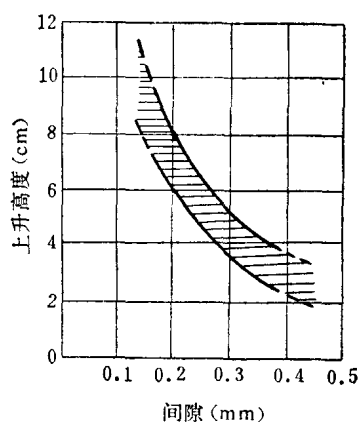


图1-3 钎料上升高度与间隙大小的关系

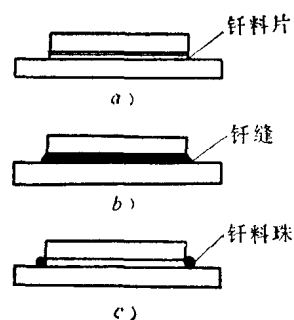


图1-4 钎料预先安置在间隙内的润湿情况

a) 预置钎料 b) 润湿性好 c) 润湿性差

若钎料是预先安放在钎缝间隙内的 (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圆角 (图1-4 b)；若润湿性不好，钎缝填充不良，且外部不能形成良好的圆角，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 (图1-4 c)。

液态钎料在毛细作用下的流动速度 v 可用下式表示：

$$v = \frac{\sigma_{yg} a \cos\theta}{4\mu h} \quad (1-3)$$

式中 μ ——液体的粘度。

从此式可以看出：润湿角越小，即 $\cos\theta$ 越大，流动速度越大。所以，从迅速填满间隙考虑，也以润湿性好为佳；其次，液体的粘度越大，流速越慢；最后，流速 v 又与 h 成反比，亦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

*〔 〕内数字为参考文献编号。

隙，应保证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没有相互作用的条件下得到的。其实，在钎焊过程中，液态钎料与钎焊金属或多或少地存在相互扩散，致使液态钎料的成分、密度、粘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：在钎焊金属表面铺展得很好的液态钎料竟不能流入间隙，这往往是由于在毛细间隙外钎料已被钎焊金属饱和而失去了流动能力。

§ 1-3 钎料润湿性的评定

钎料对钎焊金属的润湿性既然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：

一、将一定体积的钎料放在钎焊金属上，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 θ ，以其大小来评定润湿性的好坏。

θ 角越小，润湿性越好。

二、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。

三、利用丁字形试件评定钎料的润湿性。取一定体积的钎料放在丁字形试件的一端的一侧，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。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。

四、对表面涂复钎料的双层板（钎焊板）的丁字接头，可用流动系数 K 来表示润湿性（图1-5）：

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

式中 V_f ——单位长度的钎缝圆角的总体积；

V ——单位长度双层板上的钎料总体积；

A_s ——圆角的截面积 $= \left(1 - \frac{1}{4} \pi \right) R^2 = 0.125 R^2$ ；

n ——圆角数；

l ——钎焊板的宽度；

δ ——钎料层的厚度。

流动系数大者表示圆角半径 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。

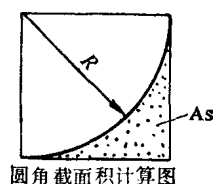
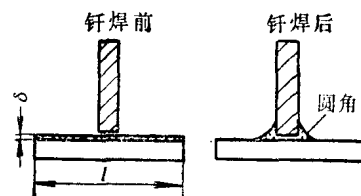


图1-5 双层板丁字接头钎焊时的流动系数

§ 1-4 影响钎料润湿性的因素

由公式（1-1）可以看出，钎料对钎焊金属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_{gq} 增大、 σ_{yq} 或 σ_{yg} 减小,都能使 $\cos\theta$ 增大、 θ 角减小,即能改善液态钎料对钎焊金属的润湿性。从物理概念上说, σ_{yq} 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_{yg} 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钎焊金属的润湿性指出了方向。

在表1-1~3中分别提供了主要的纯液态金属在其熔点时的表面张力 σ_{yq} 、某些固态金属的表面张力 σ_{gq} 和一些液态金属—固态金属的界面张力 σ_{yg} 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,无法借助公式(1-1)来指导生产实践。

表1-1 一些液态金属的表面张力(牛/米)[2]

金 属	表 面 张 力	金 属	表 面 张 力	金 属	表 面 张 力	金 属	表 面 张 力
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
Ea	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1-2 一些固态金属的表面张力[3]

金 属	温 度 (°C)	表 面 张 力 (牛/米)
Fe	20	4.0
	1400	2.1
Cu	1050	1.43
Al	20	1.91
Mg	20	0.70
W	20	6.81
Zn	20	0.86

表1-3 一些金属系统的界面张力(牛/米)

系 统	温度(°C)	σ_{gq}	σ_{yq}	σ_{yg}
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

实践经验表明,下述因素对钎料润湿性影响甚大。

一、钎料和钎焊金属的成分

钎料和钎焊金属的成分对润湿性的影响存在以下的规律性:如钎料与钎焊金属在液态和固态均不相互作用,则它们之间的润湿性很差;若钎料能与钎焊金属相互溶解或形成化合物,则液态钎料能较好地润湿钎焊金属。属于前一种情况的有Fe-Ag、Fe-Bi、Fe-Cd、Fe-Pb等系统,如Fe-Ag系,1125°C时液态银与固态铁间的界面张力大于3.40牛/米(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,说明铁对银原子的吸引力极小,不足以将银液内的原子拉到银液表面,因此无法扩大其表面积,润湿性差。然而,在1000~1200°C时银稍溶于镍(3~4%),银对镍的润湿性比起它对铁的润湿性来就有所改善;779°C时银在铜中的溶解度为8%,因而银在铜上的润湿性极好。这种关系也反映在界面张力的数值上,例如,液态银与铁的界面张力极大,而与铜

的界面张力则不大于 0.28 N/m (表1-3), 润湿性增加。所以, 同样以银为钎料, 对于不同的钎焊金属, 随着它们之间相互作用的加强, 液-固界面张力减小, 润湿性提高。

当钎焊金属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。

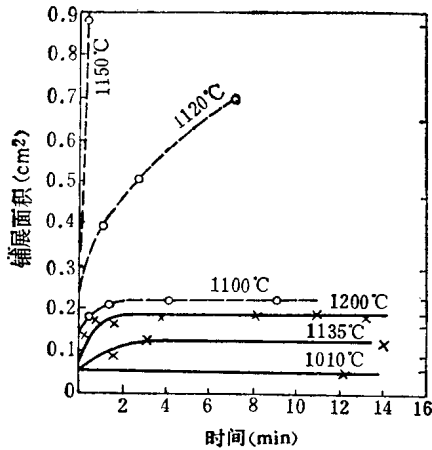


图1-6 银在不锈钢和镍基合金上的润湿性〔5〕

——在不锈钢上 ---在镍基合金上

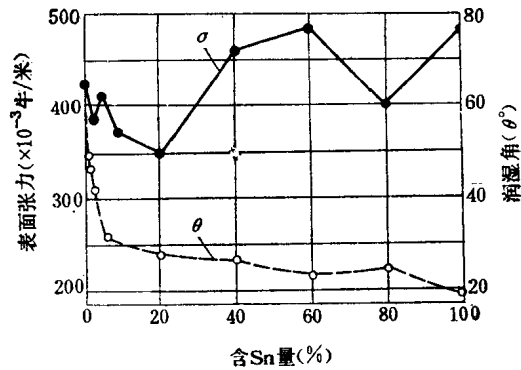


图1-7 锡铅钎料的表面张力和它在钢上的润湿角

对同一钎焊金属, 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, 因为在钎焊温度下铜中能溶解3~4%铁, 因此液态铜与铁的界面张力比液态银与铁的界面张力就小得多 (表1-3), 润湿性很好。但应指出, 并不总是要用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、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, 钎料在钢上的润湿角减小。含锡量越多, 润湿性越好。但从图上可以看出, 钎料本身的表面张力在加锡后是提高的, 这不利于润湿性的改善。然而仍取得了润湿角显著减小的效果, 主要是依靠加锡使液态钎料与钢的界面张力 σ_{yg} 得以减小。图1-8为银钯钎料在镍铬合

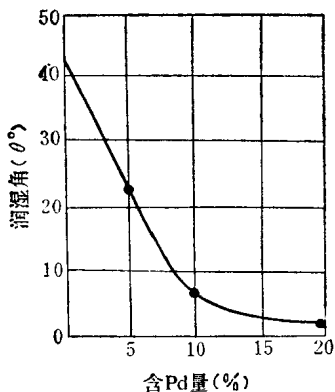


图1-8 润湿角与银钎料含钯量的关系〔4〕

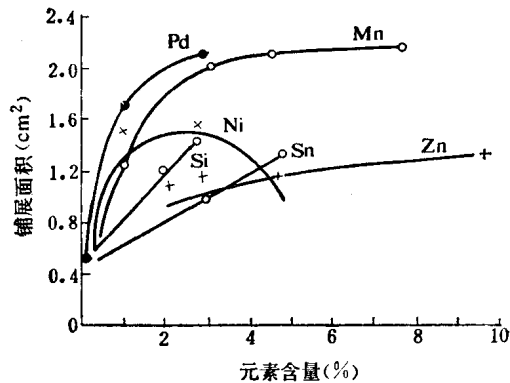


图1-9 合金元素对银铜共晶钎料在钢上的铺展面积的影响

金上的润湿角与钎料含钼量的关系曲线。随着含钼量的提高，润湿角大大减小。这是因为钼与镍能形成固溶体的缘故。上述例子说明，对于那些与钎焊金属无相互作用因而润湿性差的钎料，借在钎料中加入能与钎焊金属形成共同相的合金元素，可以改善它对钎焊金属的润湿性。

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钼、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。由图可见，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；钼、锰则作用很强，添加少量即可得到明显效果；镍含量少时与钼、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_{yq} 的影响分析，银铜共晶 1000℃ 时表面张力约为 0.97 牛/米，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；钼、锰、镍则大大高于它。即加入前三种元素可能使钎料表面张力减小；而后三者反会使之增大。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根据。由这些元素与铁的相互作用考察：锌、锡、硅均与铁形成金属间化合物；钼、锰、镍与铁形成无限固溶体。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钎焊金属界面张力 σ_{yq} 的影响。合金元素与钎焊金属存在相互作用时均能使此力减小；但对与钎焊金属形成金属间化合物的元素，其减小界面张力的作用有限，故虽有助于提高钎料润湿性，但作用较弱；能与钎焊金属无限固溶的合金元素可显著减小此界面张力，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使钎料熔点提高造成的。

上述规律为探索新钎料开拓了广阔前景。

二、温度的影响

液体的表面张力 σ 与温度 T 呈下述关系：

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

式中 ρ ——液体的密度；

K ——常数，等于 2.12；

T_0 ——表面张力为零时的临界温度；

τ ——常数，约 6~9。

由此式可知，随着温度的升高，液体的表面张力不断减小。图 1-10 是锡铅钎料的表面张力与温度的关系。温度升高，钎料的表面张力降低，有助于提高钎料的润湿性。

图 1-11 是一些硬钎料在不同温度下在不锈钢上的铺展面积。此图同样表明，随着钎焊温度的提高，钎料的铺展面积显著增大。钎料铺展面积随温度提高而增大的原因，除了钎料本身的表面张力减小外，液态钎料与钎焊金属界面张力的降低有着较大作用，这两个因素均有助于提高钎料的润湿性。

为使钎料具有必要的润湿性，选择合适的钎焊温度是很重要的，但并非加热温度越高越好。温度过高，钎料的润湿性太强，往往造成钎料流失，即钎料流散到不需要钎焊的地方去。温度过高还会引起钎焊金属晶粒长大、溶蚀等现象。因此，必须全面考虑钎焊加热温度的影响。

三、金属表面氧化物的影响

金属表面总是存在着氧化物。在有氧化膜的金属表面上，液态钎料往往凝聚成球状，不

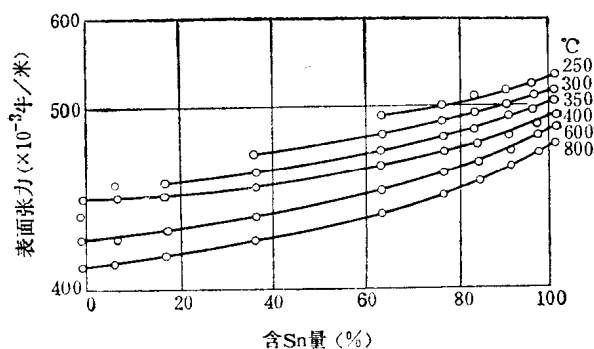


图1-10 Sn-Pb钎料的表面张力
同温度的关系

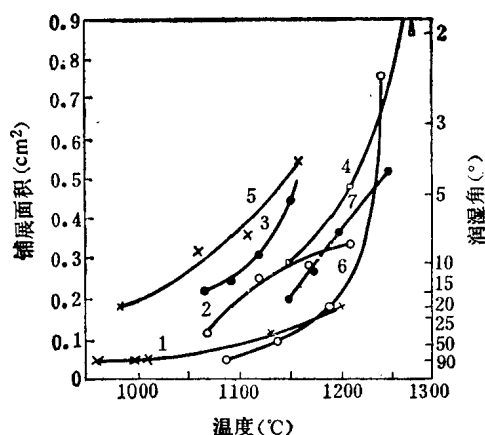


图1-11 各种硬钎料在不锈钢上的铺展性
同温度的关系〔5〕

1—Ag 2—Ag-5Pd 3—Ag-20Pd-5Mn 4—Ag-33Pd-4Mn
5—Ag-21Cu-25Pd 6—Cu 7—Ni-15Cr-4.5Si-3.75B-4Fe

与金属发生润湿。氧化物对钎料润湿性的这种有害作用是由于氧化物的表面张力比金属本身的要低得多所致。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。如前所述， $\sigma_{gq} > \sigma_{yg}$ 是液体润湿固体的基本条件。覆盖着氧化膜的钎焊金属表面比起无氧化膜的洁净的表面来，表面张力显著减小，致使 $\sigma_{gq} < \sigma_{yg}$ ，出现不润湿现象。所以，在钎焊工作中必须十分注意清除钎料和钎焊金属表面的氧化物，以改善润湿。

四、钎剂的影响

钎焊时使用钎剂可以清除钎料和钎焊金属的表面氧化膜，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，它们之间的界面张力发生了变化(图1-12)。液态钎料终止铺展时的平衡方程为：

$$\sigma_{gj} = \sigma_{yg} + \sigma_{yj} \cos \theta \quad (1-6)$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{gj} - \sigma_{yg}}{\sigma_{yj}}$$

式中 σ_{gj} ——固体同液态钎剂界面上的界面张力；

σ_{yj} ——液态钎料与液态钎剂界面张力；

σ_{yg} ——液态钎料与钎焊金属界面张力。

由此式可看出，要提高润湿性，即减小 θ 角，必须增大 σ_{gj} 或减小 σ_{yj} 及 σ_{yg} 。钎剂的作用，除能清除表面氧化物使 σ_{gj} 增大外，另一重要作用即为减小液态钎料的界面张力 σ_{yj} 。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界面张力就比钎料本身的表面张力小得多(图1-13)，即 $\sigma_{yj} < \sigma_{yq}$ ，因而有助于提高润湿性。再如以锡作钎料时，在氯化锌中加入氯化铵作钎剂，锡与钎剂的界面张力显著减小。如加入氯化亚锡，界面张力没有明显变化(图1-14)。故使用氯化锌—氯化铵二元钎剂比起单独使用氯化锌来， σ_{yj} 又有所降低，润湿性可得到进一步的提高。因此，选用适当的钎剂有助于保证钎料对钎

表1-4 某些金属氧化物的表面张力

氧化物	表面张力(牛/米)
Fe_2O_3	0.35
CuO	0.76
Al_2O_3	0.56

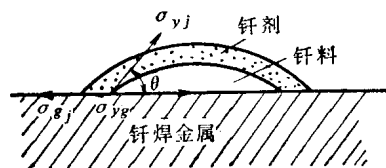


图1-12 使用钎剂时钎焊金属表面上的
液态钎料所受的界面张力

焊金属的润湿。

五、钎焊金属表面状态的影响

钎焊金属的表面粗糙度在不少情况下都能影响到钎料对它的润湿。曾作过如下的试验：

把铜和 LF21 铝合金的圆片分成四等分，分别用下列方法之一清理表面：抛光；钢刷刷；砂纸打光；化学清洗。然后在铜片中心放上体积为 0.5厘米^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，保温五分钟。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

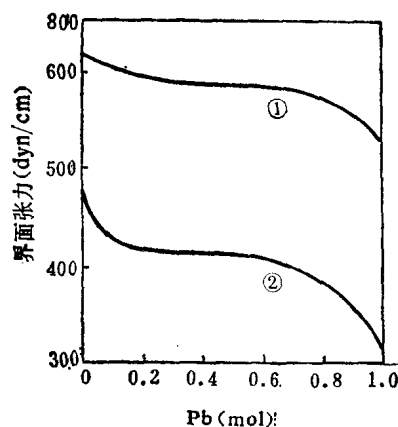


图1-13 锡铅钎料的表面张力

①及它同氯化锌接触时的界面张力②。 400°C [1]

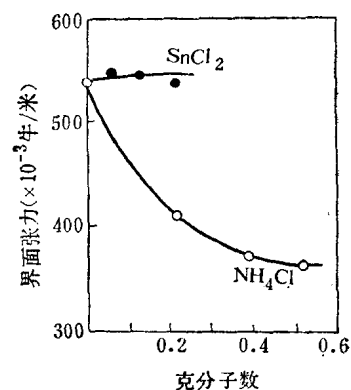


图1-14 锡同混合物钎剂的界面张力 [1]

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有类似的现象（图1-15）。在酸洗过的表面上铺展面积大；在抛光表面上铺展最差。

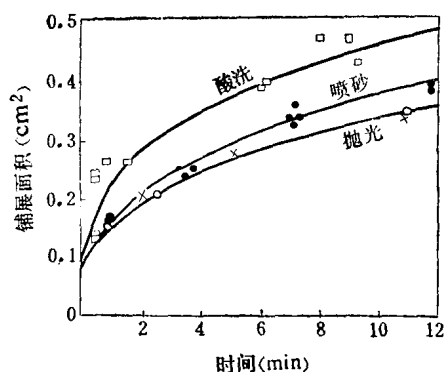


图1-15 表面处理对Ag-20Pd-5Mn钎料在不锈钢上铺展面积的影响。 1095°C [5]

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(%)	钎焊金属
Cu	P	0.04~0.08	钢
Cu	Ag	<0.6	钢
Cu-37Zn	Si	<0.5	钢
Ag-28.5Cu	Si	<0.5	铜，钨
Ag	Cu_3P	<0.02	钢
Ag	Pd	1~5	钢
Ag	Ba	1	钢
Ag	Li	1	钢
Sn	Ni	0.1	铜
Al-11.3Si	Sb, Ba, Br, Bi	0.1~2	铝

由此可见，钎焊金属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。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管作用，促进了钎料沿钎焊金属表面的铺展，改善了润湿。但是，表面粗糙度的特殊毛细管作用在液态钎料同钎焊金属相互作用较强烈的情况下不能表现出来，因为这些细槽迅速被液态钎料溶解而不复存在。

六、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,对钎焊金属的润湿性因而得到改善。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 列举了钎料中应用表面活性物质的某些实例。

§ 1-5 液态钎料同钎焊金属的相互作用

液态钎料在毛细填缝的同时与钎焊金属发生相互扩散作用。这种扩散作用可以归结为两种:一种是钎焊金属向液态钎料的扩散,即通常说的溶解;一种是钎料组分向钎焊金属的扩散。这些相互扩散作用对钎焊接头的性能影响很大,有必要研究它们的规律性。

一、钎焊金属向钎料的溶解

钎焊时一般都发生钎焊金属向液态钎料的溶解过程。钎焊金属向钎料的适量溶解,可使钎料成分合金化,有利于提高接头强度。但是,钎焊金属的过度溶解会使液态钎料的熔点和粘度提高、流动性变坏,往往导致不能填满钎缝间隙。同时也可能使钎焊金属表面出现溶蚀缺陷(图 1-16 a),即加钎料处或圆角处的钎焊金属因过分溶解而产生凹陷。严重时甚至出现溶穿(图 1-16 b)。

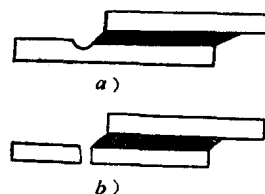


图1-16 溶蚀缺陷
a) 溶蚀 b) 溶穿

钎焊金属向钎料溶解的具体过程,有些人认为是:液态金属与固态金属接触时,首先固态金属晶格内的原子结合被破坏,它们同液态金属的原子形成新的键,发生溶解;然后交界面旁的液态金属同其它部分的液态金属间发生扩散。另有人认为:液态金属与固态金属接触时,液体的组分首先向固体表面扩散,在厚度约 10^{-7} 毫米的表面层内(液相稳定成核尺寸)达到饱和溶解度,此时固体表面层不需耗费能量即可向液相溶解[6]。

钎焊金属在液态钎料中的溶解量可用下式表示[6]:

$$G = \rho_y C_y \frac{V_y}{S} \left(1 - e^{-\frac{a S t}{V_y}} \right) \quad (1-7)$$

式中 G ——钎焊金属的溶解量;

ρ_y ——液态钎料的密度;

C_y ——钎焊金属在液态钎料中的极限溶解度;

V_y ——液态钎料的体积;

S ——液、固相的接触面积;

a ——钎焊金属的原子在液态钎料中的溶解系数;

t ——接触时间。

由此式可见:随着液态钎料数量的增多,钎焊温度的提高、钎焊保温时间的延长以及钎焊金属在钎料中的极限溶解度的增大,钎焊金属在液态钎料中的溶解量都将增多。

下面对某些影响因素作具体分析。

1. 溶解量同状态图的关系 钎焊金属向钎料的溶解同它们之间的状态图密切相关。例如,对 Ag-Fe、Pb-Cu 系来说,由于在固、液态下都不相互作用,所以不发生铁向银、铜向铅的溶解。

若钎焊金属 A 和钎料 B 在液态下能互溶,并形成图 1-17 所示状态图,则在温度 T 下钎焊

时, A 在 B 中的溶解量取决于 A 在 B 中的极限溶解度 (线段 L), 极限溶解度越大, 溶解量也越多。共晶点 E 的位置对 A 的溶解量有很大影响: E 点越靠近 A , 则液相线 DE 越倾斜, L 线段将越长, A 的溶解量越多。但若用共晶成分的 $A-B$ 合金钎料钎焊 A , 则 A 在共晶钎料中的溶解量取决于线段 $L-L_1$ 的长度, A 的溶解减少。且共晶点 E 越靠近 A , $L-L_1$ 线段越短, A 的溶解量也越小。因此为了减少钎焊金属的溶解, 可在钎料中加入钎焊金属组分。例如, 用铝硅钎料 ($Al-11.7Si$ 、 $Al-10Si$ 、 $Al-7.5Si$) 钎焊铝时 (图1-18), 钎料中的含铝量越多, 铝向钎料中的溶解越少。

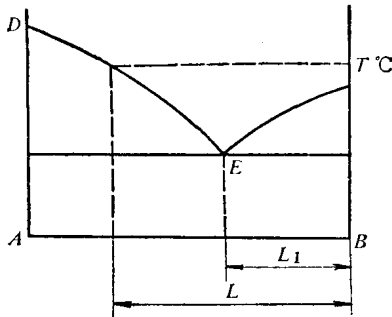


图1-17 A, B 形成简单共晶的状态图

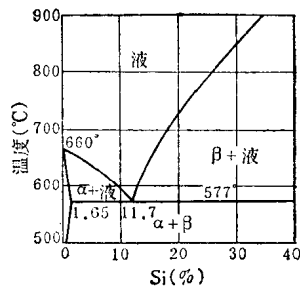


图1-18 $Al-Si$ 状态图

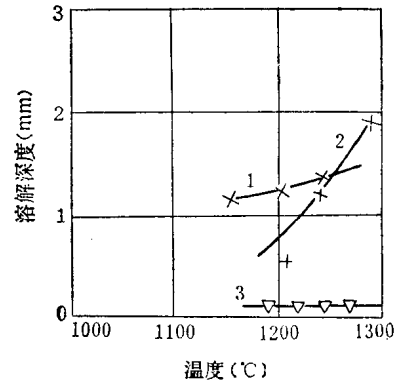


图1-19 钎缝圆角处镍的溶解深度。保温20分钟〔6〕

1—Ni-4B 2—Ni-4Be 3—Ni-11Si

若 A, B 不但在液态下能互溶, 在固态下也能局部互溶, 则 A 在 B 中的溶解量除受 A 在 B 中的极限溶解度影响外, 还为 B 在 A 中的极限溶解度所影响。图1-19是以 $Ni-4B$ 、 $Ni-4Be$ 和 $Ni-11Si$ 作钎料, 在 $1200^{\circ}C$ 钎焊镍时钎缝圆角处的溶解深度。可以看出, 镍向 $Ni-4B$ 钎料中溶解最多, 而向 $Ni-11Si$ 钎料中溶解最少。为了便于分析, 我们把 $Ni-B$ 、 $Ni-Be$ 、 $Ni-Si$ 状态图的富镍部分示意地归纳于图1-20中。由图可知, $1200^{\circ}C$ 时镍在硅、铍、硼中的溶解度分别为 90.5% 、 95.5% 、 96.5% ; 硅、铍、硼在镍中的溶解度各为 7.5% 、 2.5% 、 $<0.5\%$ 。因此, 镍在 $Ni-11Si$ 钎料中溶解少, 一则是由于镍在硅中溶解度较小, 二来是由于硅在镍中的溶解度较大所致。然而, 镍与硼之间的相互溶解度恰好与之相反, 所以镍在 $Ni-4B$ 钎料中溶解也最多。钎料组分在钎焊金属中的溶解度对钎焊金属的溶解量的影响是基于: 溶解过程首先是钎料组分向钎焊金属扩散, 达到饱和溶解度后, 钎焊金属才向钎料中溶解。因此, 若钎料组分在钎焊金属中溶解度大, 如硅在镍中, 则达到饱和所需时间长, 消耗的钎料量也多, 钎焊金属的溶解就少; 反之, 溶解就多。故如以 B 为钎料钎焊 A , 在 A 中加入一些钎料元素 B , 则 B 向 A 扩散达到饱和溶解度的时间缩短, A 向 B 的溶解增多。

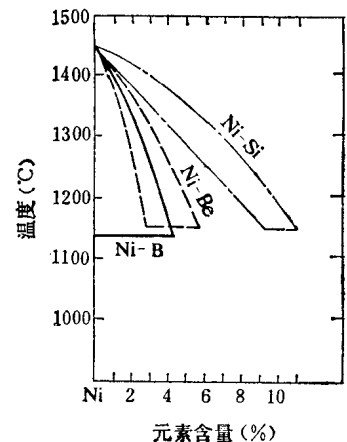


图1-20 $Ni-B$ 、 $Ni-Be$ 和 $Ni-Si$ 状态图的富镍部分示意图

2. 温度的影响 钎焊金属向液态钎料的溶解速度与温度的关系如图1-21所示。图a) 是