

钎焊及扩散焊技术

QIANHAN JI KUOSANHAN JISHU

王娟 刘强 等编著



YZLI0890169107



化学工业出版社

钎焊及扩散焊技术

王 娟 刘 强 等编著



YZLI0890169107



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从理论与实践相结合的角度,对钎焊及扩散焊方法、各种材料的钎焊及扩散焊特点及工艺要点等做了系统的阐述,注重科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来钎焊及扩散焊技术的新进展,特别是一些新工艺、新型焊接用材料的开发。此外,本书包含了钎焊及扩散焊技术在航空航天、电子、汽车制造、石油化工、家用电器等领域大量的应用实例,突出了其实用性。

本书内容反映了当前钎焊及扩散焊技术的应用现状,主要供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研院(所)和企事业单位的科研人员参考,还可作为高等学校材料成形及控制工程、材料加工工程专业(焊接方向)师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钎焊及扩散焊技术/王娟,刘强等编著. —北京:化学工业出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-122-16007-2

I. ①钎… II. ①王…②刘… III. ①钎焊②扩散焊 IV. ①TG454
②TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 295497 号

责任编辑:周 红

文字编辑:陈 喆

责任校对:洪雅姝

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17 字数447千字 2013年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着航空、航天、核能和电子等新技术的飞速发展，以及新材料、新结构的采用，对连接技术提出了更高的要求，钎焊及扩散焊技术因此受到人们更多的关注，开始以前所未有的速度发展并出现了许多新的钎焊及扩散焊工艺，钎料品种日益增多，有力地促进了国家经济建设事业的腾飞。

钎焊及扩散焊技术作为实现材料连接的重要方法，以其独有的特点在难以熔焊材料的构件焊接中得到了广泛的应用，获得了优质或与母材相匹配的高性能接头。与此同时，也面临着许多新的技术难题，这些难题成为促进其进一步发展和应用，并在各行业领域发挥更大作用的巨大动力。

本书从理论与实践相结合的角度，对钎焊及扩散焊方法、各种材料的钎焊及扩散焊特点及工艺要点等做了系统的阐述，注重科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来钎焊及扩散焊技术的新进展，特别是一些新工艺、新型焊接用材料的开发。此外，本书包含了钎焊及扩散焊技术在航空航天、电子、汽车制造、石油化工、家用电器等领域大量的应用实例，突出了其实用性。

本书内容反映了当前钎焊及扩散焊技术的应用现状，主要供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用，也可供高等院校师生、科研院（所）和企事业单位的科研人员参考，还可作为高等学校材料成形及控制工程、材料加工工程专业（焊接方向）师生的教学参考书。

参加本书编写和提供信息的人员还有：李文娟、刘鹏、马海军、蒋庆磊、夏春智、陈茂爱、孙俊生、刘如伟、高进强、秦国梁、吴娜、沈孝芹、黄万群、张蕾、李嘉宁、郑德双、许有肖、刘毅、杜红燕、赵康培、兰亚洲、张鹏飞、孙建雄、马群双、王继腾、艾铭杰、许红等。

本书编写过程中参阅了相关文献资料，在此，表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 钎焊的特点及接头形成	1
1.1.1 钎焊的特点	1
1.1.2 钎料与母材的相互作用	1
1.1.3 影响钎焊过程的因素	4
1.1.4 钎焊方法的分类	4
1.2 扩散焊原理及分类	7
1.2.1 扩散焊的原理	7
1.2.2 扩散焊的特点	7
1.2.3 扩散焊的分类	8
1.3 钎焊及扩散焊技术的新发展	9
1.3.1 钎焊技术的新发展	9
1.3.2 扩散焊技术的发展现状	10
1.3.3 钎焊及扩散焊技术的应用	12
第 2 章 钎料与钎剂	14
2.1 钎料的类型及特点	14
2.1.1 对钎料的基本要求	14
2.1.2 钎料的类型及化学成分	14
2.2 钎料的选用及特性	22
2.2.1 钎料的选用原则	22
2.2.2 常用钎料的特性及用途	24
2.3 钎焊用钎剂	28
2.3.1 对钎剂的基本要求	28
2.3.2 钎剂的类型及特性	28
2.3.3 钎剂与钎料的搭配	33
2.4 钎焊材料的使用及安全	34
2.4.1 钎焊材料的使用	34
2.4.2 钎焊材料的安全注意事项	35
第 3 章 火焰钎焊	36
3.1 火焰钎焊的特点及设备	36
3.1.1 火焰钎焊的特点及应用	36
3.1.2 火焰钎焊设备	37
3.2 火焰钎焊用气体及钎料	45
3.2.1 火焰钎焊用气体	45
3.2.2 钎料及钎剂	47
3.3 火焰钎焊工艺	48
3.3.1 接头设计及表面处理	48
3.3.2 钎焊火焰的控制	48
3.3.3 火焰钎焊操作要点	50
3.3.4 管路构件的火焰钎焊	51
3.4 火焰钎焊的安全与防护	54
3.4.1 乙炔的燃烧爆炸特性	54
3.4.2 液化石油气的燃烧爆炸特性	56
3.4.3 电石和乙炔发生器的安全要求	57
3.4.4 气瓶的安全使用	59
第 4 章 感应钎焊	62
4.1 感应钎焊的特点及应用	62
4.1.1 感应钎焊的特点	62
4.1.2 感应钎焊的应用	63
4.2 感应钎焊设备	65
4.2.1 感应设备的组成及作用	65
4.2.2 感应钎焊机	68
4.3 感应钎焊工艺	69
4.3.1 感应钎焊接头设计	69
4.3.2 感应钎焊用钎料和钎剂	70
4.3.3 钎焊工艺参数	72
4.3.4 导管接头的安装式感应钎焊	74
4.4 感应钎焊操作安全与防护	75
4.4.1 高频电磁场对人体的危害及防护	75
4.4.2 感应钎焊操作的安全事项	76
第 5 章 真空炉中钎焊	77
5.1 真空钎焊接头的形成及设备	77
5.1.1 真空钎焊接头的形成	77

5.1.2 真空钎焊的特点	78	5.3.2 钎焊前清理和表面准备	89
5.1.3 常用的真空钎焊设备	78	5.3.3 焊件的装配与定位	92
5.2 真空钎焊用钎料	82	5.3.4 钎焊工艺参数的选择	94
5.2.1 真空钎焊对钎料的要求	82	5.3.5 真空扩散钎焊	97
5.2.2 真空钎焊常用钎料	82	5.4 真空钎焊质量控制	98
5.2.3 钎料的工艺性能	85	5.4.1 影响钎缝质量的因素	99
5.3 真空钎焊工艺	86	5.4.2 钎缝常见缺陷的防止措施	100
5.3.1 钎焊接头设计	86	5.4.3 钎焊接头的质量检验	102
第6章 不同材料的钎焊	106		
6.1 有色金属的钎焊	106	6.3.1 高温合金的类型及应用	146
6.1.1 铝及铝合金的钎焊	106	6.3.2 高温合金的钎焊特点	149
6.1.2 铜及铜合金的钎焊	116	6.3.3 高温合金钎焊用钎料	150
6.1.3 钛及钛合金的钎焊	124	6.3.4 高温合金的钎焊工艺	152
6.1.4 镁及镁合金的钎焊	131	6.3.5 高温合金的大间隙钎焊	155
6.2 钢铁材料的钎焊	136	6.4 高硬度耐磨材料的钎焊	157
6.2.1 碳钢和低合金钢的钎焊	136	6.4.1 陶瓷与金属的钎焊	157
6.2.2 不锈钢的钎焊	138	6.4.2 硬质合金与钢的钎焊	164
6.2.3 铸铁的钎焊	144	6.4.3 石墨及金刚石的钎焊	171
6.3 高温合金的钎焊	146		
第7章 真空扩散焊	179		
7.1 真空扩散焊设备及工艺	179	7.3.4 镁合金与钛合金的瞬间液相 扩散焊	214
7.1.1 真空扩散焊设备	179	7.3.5 DD3 单晶合金航空发动机叶片的 扩散焊	215
7.1.2 扩散焊工艺及主要参数	180	7.3.6 冷作模具钢与弹簧钢的 扩散焊	217
7.1.3 扩散焊接头常见缺陷及防止	183	7.3.7 35CrMo 石油钻杆的瞬时液相 扩散焊	218
7.2 不同材料的真空扩散焊	184	7.3.8 TP304 钢管的瞬时液相 扩散焊	220
7.2.1 同种材料的扩散焊	184	7.3.9 不锈钢多层薄壁零件的 扩散焊	221
7.2.2 异种材料的扩散焊	187	7.3.10 石墨与 Q345 钢复合板的 扩散焊	223
7.2.3 金属间化合物的扩散焊	195	7.3.11 铝-不锈钢导管过渡接头的 扩散焊	223
7.2.4 复合材料的扩散焊	198		
7.2.5 陶瓷与金属的扩散焊接	203		
7.3 真空扩散焊应用实例	209		
7.3.1 TC4 钛合金板与 304L 不锈钢网的 扩散焊	209		
7.3.2 TA3 多层钛板与 TC4 底座的 扩散焊	211		
7.3.3 $Al_2O_3/TA1$ 复合加速管的 扩散焊	213		
第8章 钎焊技术应用实例	225		
8.1 在航空航天领域的应用	225	钎焊	227
8.1.1 液体火箭发动机推力室的 钎焊	225	8.1.3 航空压缩机扩压器的炉中 钎焊	228
8.1.2 钛合金蜂窝壁板结构的真空 钎焊	225	8.1.4 7715D 钛合金喷注器的真空 钎焊	228

钎焊	229	钎焊	250
8.1.5 航空发动机燃油总管的感应		8.4.3 K_u 波段微带天线的炉中	
钎焊	230	钎焊	251
8.1.6 发动机涡轮叶片的真空钎焊	230	8.4.4 测井陶瓷探头的真空扩散	
8.1.7 航空发动机压气机静子环的炉中		钎焊	252
钎焊	231	8.5 在家电工业中的应用	252
8.2 在电力能源领域的应用	232	8.5.1 电磁换向阀的感应钎焊	252
8.2.1 百万千瓦核电发电机部件的		8.5.2 冰箱压缩机的火焰钎焊	253
钎焊	232	8.5.3 空调器四通阀的钎焊	254
8.2.2 大型发电机定子绕组线棒的感应		8.5.4 电热管的钎焊	255
钎焊	233	8.5.5 空调冷凝器和蒸发器的钎焊	255
8.2.3 500MW 汽轮发电机水盒的		8.6 在机械加工刀具中的应用	255
钎焊	235	8.6.1 硬质合金刀具的火焰钎焊	255
8.2.4 电站汽轮机顶轴油管的火焰		8.6.2 金刚石薄壁钻的感应钎焊	257
钎焊	236	8.6.3 聚晶金刚石复合片切削齿钻头的	
8.2.5 HT-7 装置纵场线圈超导线接头的		钎焊	258
火焰钎焊	237	8.6.4 聚晶金刚石车刀的钎焊	259
8.2.6 水轮发电机定子线圈端部的感应		8.6.5 盾构掘进机用特种刀具的感应	
钎焊	239	钎焊	259
8.3 在汽车制造中的应用	240	8.6.6 矿用截齿的感应钎焊	260
8.3.1 铝制板翅式换热器的钎焊	240	8.7 在其他行业中的应用	261
8.3.2 大型热交换器的埋丝钎焊	243	8.7.1 低温医疗设备探针的感应	
8.3.3 转向油罐的火焰钎焊	245	钎焊	261
8.3.4 发动机基准轴的感应钎焊	247	8.7.2 真空保温杯的真空钎焊	262
8.4 在电子工业中的应用	248	8.7.3 内燃机车叶轮的炉中钎焊	262
8.4.1 波导器件的钎焊	248	8.7.4 不锈钢过滤毡的钎焊	263
8.4.2 铜/铝合金 CPU 散热器的		8.7.5 眼镜架的感应钎焊	264
参考文献	265		

第 1 章 概 述

钎焊是依靠钎料的熔化、流动和凝固形成致密焊缝、牢固接头的连接方法，在钎焊过程中仅依靠钎料的熔化与母材形成结合；扩散连接是依靠界面原子的相互扩散实现两侧母材结合的精密连接方法。钎焊及扩散连接都属于固态焊接，特别适用于熔焊方法难以焊接的材料，如高硬度材料、热物理性能差别较大的异种材料（如金属与陶瓷、有色金属与钢、金属与玻璃）等，在航空航天、机械工业、汽车制造、核工业、电子电器等部门得到广泛应用。

1.1 钎焊的特点及接头形成

1.1.1 钎焊的特点

钎焊是采用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焊接温度，通过熔化的钎料将母材连接在一起的焊接技术。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、扩散或冶金结合），冷却凝固形成牢固的接头。钎焊接头示意图如图 1.1 所示。

与熔焊方法最大的不同是，钎焊时工件常被整体加热（如炉中钎焊）或钎缝周围大面积均匀加热，因此工件的相对变形量以及钎焊接头的残余应力都比熔焊小得多，易于保证工件的精密尺寸。并且钎料的选择范围较宽，为了防止母材组织和特性的改变，可以选用液相线温度相对低的钎料进行钎焊。钎焊过程中，只

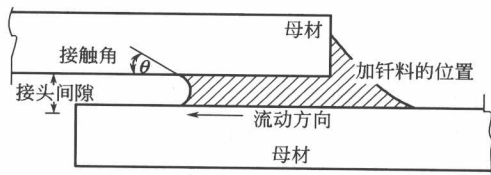


图 1.1 钎焊接头示意图

要钎焊工艺选择得当，可使钎焊接头做到无需加工。此外，只要适当改变钎焊条件，还有利于多条钎缝或大批量工件同时或连续钎焊。

由于钎焊反应只在母材数微米至数十微米以下界面进行，一般不牵涉母材深层的结构，因此特别有利于异种金属之间，甚至金属与非金属、非金属与非金属之间的连接。这也是熔焊方法做不到的。

钎焊还有一个优点，即钎缝可作热扩散处理而加强钎缝的强度。当钎料的组元与母材存在一定的固溶度时，延长保温时间可使钎缝的某些组元向母材深层扩散，提高钎缝母材间的结合强度。

钎焊的缺点主要在钎料与母材的成分和性质多数情况下不可能非常接近，有时相差较大，例如用重金属钎料钎焊铝，这就难免产生接头与母材间不同程度的电化学腐蚀。此外，钎料的选择和界面反应的特点都存在一定的局限，在钎焊大多数材料时，钎焊接头与母材不能达到等强度，只能用增加搭接面积来改善。

1.1.2 钎料与母材的相互作用

钎焊过程中母材被钎料润湿是保证它们紧密接触并形成良好连接所必需的。润湿条件建立后，毛细现象导致液体钎料流动，起到了使液态金属填充接头间隙的作用。无论润湿性，还是流动性，都受界面间的化学反应和钎料的影响，也受接头形状的影响。钎焊实际上是一

个破膜-溶解-渗透-润湿-铺展-凝固复杂交错的过程。

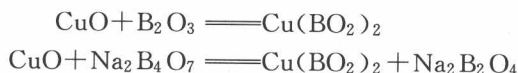
(1) 表面膜及其去除机制

熔态钎料和固体母材表面总是覆盖一层厚度不等的表面膜，熔态钎料要与母材发生润湿并有效铺展，必须要排除这层表面膜。对于纯金属，该金属与周围气氛所产生的结合产物（膜）的稳定性取决于膜的结构和存在的条件。亲氧的金属铝、钛、铍、镁等，它们的表面膜主要是氧化物。另一些金属如铜、铁等，它们除与氧结合外，还与 CO_2 有相当的亲和力，表面层中常发现有碱式碳酸盐存在。两性金属如锡、锌等表面层常存在 $\text{Sn}(\text{OH})_2$ 或 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 等。

表面膜的结构决定膜的致密度。一般情况下，结晶度低或者无定形结构的表面膜具有较大的致密度，这种情况下，加热可促进表面膜的增厚。用酸或碱能有效地溶去这层表面膜。但干净表面与周围气氛反应速度如果很大，新的表面膜又会立即生成，例如铝、镁、钛等活泼金属。铜的氧化反应速度较低，清洗后则可以保持较长时间的赤裸表面。因此从钎焊角度来说，用酸或碱清洗金属表面，主要是为了除去因长时间储存留下的厚氧化皮。过度的清洗将使表面出现微坑。

母材表面膜的脱落或去除是钎焊过程的一个重要环节。在钎剂的作用下，表面膜脱除的机制有溶解、剥落、松动或被流动的钎料推开等过程。对于不同的母材，表面膜的去除机制会有所侧重，有的是两种并重，有的甚至四种作用兼而有之，使钎焊过程最终得以完成。

在较高温度下钎焊铜合金或铁合金时，其钎剂的主成分是硼酸酐 B_2O_3 。熔融态硼酸酐对过渡金属的氧化物有很大的溶解度，并且溶后呈现不同的颜色。在钎焊铜合金时，表面膜与硼酸酐或硼砂产生下列反应：



并溶于过量的硼酸酐之中，依靠溶解作用去除表面氧化膜。

多数合金表面膜的脱除不是一个简单溶解机制，在一些含 Cr、Ti、W、Mo 的合金钢或耐热钢钎焊时，尽管在 B_2O_3 中加入氟化物增强钎剂的活性也不足以脱除表面膜。在钎焊高铬合金时，甚至在钎剂中加入 Al-Cu-Mg 合金以增强活性。

在钎剂的作用下，一旦钎焊过程开始，往往在几秒至几十秒钟内便完成，除非表面膜在钎剂中以极快的速度溶解（例如高温下 CuO 在 B_2O_3 中的溶解）。一些不用钎剂而在空气中进行的钎焊，往往靠钎料中的挥发组元在加热时与表面膜反应，将其还原破坏或从母材表面膜的破隙渗入膜下，再由它和母材的互溶与润湿以及钎料的流动来推开氧化膜。例如用 Cu-P 钎料钎焊铜、锌基钎料钎焊铝合金等。

真空钎焊时金属表面膜的破坏，对不同的金属合金其机制是不同的。微量还原性气氛的存在对纯铜表面氧化膜起到了还原作用。在真空条件下，钛的氧化膜在温度高于 700°C 时强烈地溶入钛中，有效去除了氧化膜。另一些情况是金属表面膜在真空中加热时发生破裂，熔态钎料由裂缝渗入而润湿母材。真空钎焊不锈钢时，温度超过 900°C ，其本身所含的碳即足以使氧化膜被还原而破坏；而真空钎焊铝时，微量 Mg 蒸气对铝氧化膜可以起到置换与破坏的作用。

(2) 熔态钎料与固体母材的润湿

一滴液体在固体表面润湿时，如图 1.2 所示。理想情况下，在固体、液体和蒸气相之间没有化学反应，并且重力因素被忽略。液滴被假定处于表面自由能条件下所确定的平衡状态，这些液滴的形状是由润湿角 θ 唯一特征值决定。在液体蒸汽压 (γ_{LV})、固体蒸汽压 (γ_{SV}) 和固液相蒸汽压 (γ_{SL}) 的条件下，润湿角与表面自由能的关系如下：

$$\cos\theta = (\gamma_{\text{SL}} - \gamma_{\text{SV}}) / \gamma_{\text{LV}}$$

润湿与不润湿的分界线是 $\theta = 90^\circ$ ，当 $\theta < 90^\circ$ 润湿发生，而 $\theta > 90^\circ$ 不发生润湿。 $\theta = 0^\circ$ 表

示液固完全润湿； $\theta=180^\circ$ 视为完全不润湿。对于大多数钎焊，润湿角 θ 取 $10^\circ\sim 45^\circ$ 。

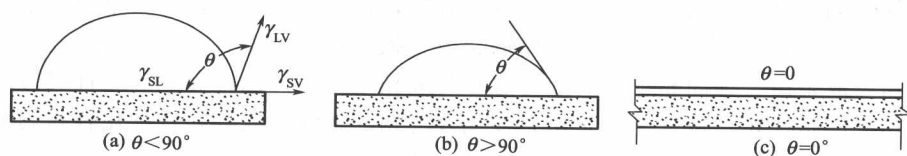


图 1.2 液体在固体表面的润湿

熔态钎料与母材间如有一定的反应性，通常能够很好地润湿，反之则较难润湿。然而影响润湿最主要的因素是互溶度。例如液态 Zn 和固体的 Al 在 500°C 有近 30% 的溶解度，它们润湿得很好。液态 Pb 和固态 Al 在 500°C 时几乎完全没有互溶度，它们极难润湿。类似的情况如液态 Ag 在 1200°C 时与 Fe 的互溶度几乎为零，而 Cu 在同样的温度下能溶解 5% 的 Fe。但如在 Ag 中加入一定比例的、能与 Fe 互溶的 Cu 或 Zn 形成合金，则大大改善了这种银合金与母材 Fe 间的润湿性。特别是加入 Pd，由于它和 Fe、Co、Ni、Cu、Ag、Au 等金属不但在液相，而且在固相也有完全的互溶度，能增加润湿性。

(3) 熔态钎料在固体母材上的铺展

熔态钎料润湿母材以后，它们之间应该有适当的物理的或化学的反应性，才有利于熔态钎料在母材上的后续铺展。否则尽管用了活性很强的钎剂，并不一定会很好地在母材上铺展。例如纯 Sn 在钎剂作用下润湿 Cu 母材以后就很难再顺利铺展，其原因在于熔态钎料与母材之间特殊的相关系。这种难再铺展的现象往往发生在熔态钎料与母材间产生过渡和快速的相间反应，如生成金属间化合物，从而阻碍了熔态钎料向前流动和铺展。显然，要想增加 Sn 在 Cu 上的铺展性，就必须抑制 Cu-Sn 金属间化合物的生长。一个有效的办法就是往 Sn 中添加能与 Sn 合金化的元素，如 Pb、Bi 等。这些元素既能与 Sn 合金化形成熔化温度更低的合金，同时此元素还要与 Cu 之间在一定的温度区间内是惰性的，不产生物理或化学反应。这样，由于这些元素的加入降低了 Sn 在整个合金中的浓度，合金的铺展性因而会大大提高。

有些情况下，仅仅从合金的角度考虑钎料在母材上的铺展性，因受到金属本性的约束，可以控制的余地实在不大，重要的是还应该从钎剂的作用进行考虑。归根结底，提高熔态钎料在母材上的铺展性就是要控制熔态钎料和母材之间应该具有适当的反应性。

(4) 钎料的凝固和钎缝的组织

熔态的钎料在母材狭缝中作毛细流动并形成钎缝时，钎缝的结构是不均匀的。特别是熔态钎料作较长距离流动时尤为突出。对于共晶钎料，因为钎焊温度比共晶点高许多，当熔态钎料一旦润湿母材，母材就开始迅速溶解，钎料的成分也会向母材纵深渗透，在钎料流动过程中，这种作用就依次沿流动的方向发展。最终的钎缝是钎料流入处较宽，终了处钎缝较窄。当采用与母材互溶度较小的钎料钎焊时，钎缝两端宽窄不一的现象并不明显，但常出现钎料中的高熔点组元留在钎料的流入端、低熔点的共晶则流至远端的现象。

为了减少钎焊时钎料的熔化区间，通常总是尽可能选择熔化温度合适、成分接近共晶点或连续固溶体最低熔点的合金当做钎料，例如：用 Ni-Cr 或 Ni-Cr-Si 共晶；用 Cu-Mn、Ni-Mn 连续固溶体最低熔点成分钎料钎焊不锈钢和高温合金；有时也常用纯金属当钎料，例如用纯铜钎焊碳钢等。

为了改善钎料的各种性能，也会在其中添加一些其他少量元素。如果熔态钎料和母材之间的反应性很弱，钎焊后的钎缝常会存在和钎料本身相同的结构。如果熔态钎料和母材有共同的主组元或液相有较大的互溶度，则根据温度的高低和钎焊时间的长短而会出现共晶或亚共晶的钎缝。

钎料中一个组元如果含量较大又能与母材生成金属间化合物,则在钎缝中会出现这些化合物的特征。如果这些金属间化合物是固液异分的,在钎焊条件下常常会呈笋状生长,例如用纯锡或含 Sn 量较高的锡合金钎料钎焊铜、银、铁、钴、镍时,均可看到这种生长方式。这种化合物生成是由一个固相组元(如母材)与液相(钎料)反应生成的,钎焊短时间内生成的化合物都不是纯相,这就减少了作为纯化化合物相的属性。此外,这种化合物的笋状生长方式使得它像钉子一样嵌入钎缝,更增加了钎缝的强度。

钎料中一个主要成分组元与母材生成固液同分化合物时,这个化合物往往以层状或连片地生长。这些固液同分化合物通常较脆,又呈层状,会降低钎焊接头强度。这就使选择钎料时,需要特别注意避免生成这类层片状化合物,除非这些化合物能溶入母材,形成组分很宽的固溶体。

1.1.3 影响钎焊过程的因素

影响钎焊过程的因素有接头的设计,钎料、钎剂的选择,以及为了获得所要求特性而采取的工艺参数。这些因素主要影响钎焊接头的外观成形和微观结构,实际上决定了接头的特性。

(1) 接头设计

接头设计的变化对钎焊接头特性的影响充分表现在接头间隙对钎焊接头强度的影响。小的接头间隙,接头强度相当高,钎缝的强度甚至超过母材的强度。接头强度比钎料自身强度高许多的原因是薄的钎料层的截面收缩被抑制。因此,钎料处于非常高的三向应力状态,这将增加它的强度值。但随着接头间隙的增加,抑制收缩的能力减弱或消失,接头强度接近于钎料的自身强度。

(2) 钎料

钎料是复杂的合金,它的熔点在一个温度范围内。如 Ag-Cu 合金,除共晶成分 72% Ag-28% Cu 外,其他如 50Ag-50Cu 合金的熔点在一个温度范围内发生,即温度升至 780℃ 时钎料开始熔化,只有当温度超过 850℃ 时钎料才能全部熔化。因此,在 780~850℃ 温度范围内,有一个液体与固体共存区域,其润湿和流动性与完全液体的合金在某种意义上截然不同。当钎料金属处于部分熔化的状态时,流动性降低。而低熔点液相在混合状态下,润湿性和扩散行为导致低熔点相具有从固体成分中分离的趋势。这种不充分或不均匀填充接缝的现象会导致缺陷接头的产生。

除了与钎焊钎料熔化特点有关外,钎焊过程中合金化能够出现在液体钎料和母材之间,钎料的润湿性和流动性明显受到合金化的影响。合金化取决于钎料的熔点、母材被影响的程度以及新相形成的趋势。改变钎料成分,可以改变它的熔化特点,靠近接缝表面钎料元素的扩散也会改变母材有效成分。影响母材合金化程度的因素有钎料元素在母材中的溶解度、时间和温度、固态扩散的动力学、母材的晶粒尺寸以及它的成分。母材与钎料的相互作用影响着其润湿性和接头的力学性能。

(3) 残余应力

当必须将两种不同的母材(如碳钢和奥氏体钢、奥氏体钢和陶瓷)钎焊连接在一起时,因为两种材料热膨胀系数的差别,在最终组件中会形成很大的残余应力。从钎焊温度上冷却时,由于接头中一个组件收缩速度与另一个不同,会产生残余应力。当被连接材料的热膨胀系数存在很大差别时,这些残余应力足以在材料上引起局部变形或裂纹,或引起钎焊组件的变形。残余应力可以通过规范钎焊温度和冷却方式来控制,促进应力松弛。

1.1.4 钎焊方法的分类

钎焊有以下几种分类方法。

① 按照所采用钎料的熔点可将钎焊分为两类,钎料熔点低于 450°C 时称为软钎焊;高于 450°C 时称为硬钎焊。

② 按照钎焊温度的高低可分为高温钎焊、中温钎焊和低温钎焊,温度的划分是相对于母材熔点而言。例如:对钢件来说,加热温度高于 800°C 称为高温钎焊, $550\sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间称为中温钎焊,加热温度低于 550°C 称为低温钎焊;但对于铝合金来说,加热温度高于 450°C 称为高温钎焊, $300\sim 450^{\circ}\text{C}$ 之间称为中温钎焊,加热温度低于 300°C 称为低温钎焊。

③ 按照热源种类和加热方法的不同可分为:火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊、电阻钎焊、浸渍钎焊、烙铁钎焊及超声波钎焊等。

④ 按照去除母材表面氧化膜的方式可分为:钎剂钎焊、无钎剂钎焊、自钎剂钎焊、气体保护钎焊及真空钎焊等。

⑤ 按照接头形成的特点可分为:毛细钎焊和非毛细钎焊。液态钎料依靠毛细作用填入钎缝的情况称为毛细钎焊;毛细作用在钎焊接头形成过程中不起主要作用的称为非毛细钎焊。接触反应钎焊和扩散钎焊是最典型的非毛细钎焊过程。

⑥ 按照被连接的母材或钎料的不同可分为:铝钎焊、不锈钢钎焊、钛合金钎焊、高温合金钎焊、陶瓷钎焊、复合材料钎焊、银钎焊、铜钎焊等。

常用钎焊方法分类、原理及应用见表 1.1。

表 1.1 常用钎焊方法分类、原理及应用

钎焊方法	分 类		原 理	应 用
火焰钎焊	氧-乙炔焰		用可燃气体与氧气(或压缩空气)混合燃烧的火焰来进行加热的钎焊,火焰钎焊可分为火焰硬钎焊和火焰软钎焊	主要用于钎焊钢和铜
	压缩空气雾化汽油火焰或空气液化石油火焰或煤气等			适用于铝合金的硬钎焊
炉中钎焊	空气炉中钎焊		把装配好的焊件放入一般工业电炉中加热至钎焊温度完成钎焊	多用于钎焊铝、铜、铁及其合金
	保护气氛炉中钎焊	还原性气氛	加有钎料的焊件在还原性气氛或惰性气氛的电炉中加热进行钎焊	适用于钎焊碳素钢、合金钢、硬质合金、高温合金等
		惰性气氛		
	真空炉中钎焊	热壁型	使用真空钎焊容器,将装配好钎料的焊件放入容器内,容器放入非真空炉中加热到钎焊温度,然后容器在空气中冷却	钎焊含有 Cr、Ti、Al 等元素的合金钢、高温合金、钛合金、铝合金及难熔合金
		冷壁型	加热炉与钎焊室合为一体,炉壁作成水冷套,内置热反射屏,防止热向外辐射,提高热效率,炉盖密封。焊件钎焊后随炉冷却	
感应钎焊	高频(150~700kHz)		焊件钎焊处的加热是依靠在交变磁场中产生感应电流的电阻热来实现	广泛用于钎焊钢、铜及铜合金、高温合金等具有对称形状的焊件
	中频(1~10kHz)			
	工频(很少直接用于钎焊)			
浸渍钎焊	盐浴浸渍钎焊	外热式	多为氯盐的混合物作盐浴,焊件加热和保护靠盐浴来实现。外热式由槽外部电阻丝加热;内热式靠电流通过盐浴产生的电阻热来加热自身和进行钎焊。当钎焊铝及铝合金时应使用钎剂作盐浴	适用于以铜基钎料和银基钎料钎焊钢、铜及其合金、合金钢及高温合金。还可钎焊铝及其合金
		内热式		
	熔化钎料中浸渍钎焊(金属浴)		将经过表面清洗,并装配好的钎焊件进行钎剂处理,再放入熔化钎料中,钎料把钎焊处加热到钎焊温度实现钎焊	主要用于以软钎料钎焊铜、铜合金及钢。对于钎缝多而复杂的产品(如蜂窝式换热器、电机电枢等),用此法优越、效率高

续表

钎焊方法	分 类		原 理	应 用	
电阻钎焊	直接加热式		电极压紧两个零件的钎焊处,电流通过钎焊面形成回路,靠通电中钎焊面产生的电阻热加热到钎焊温度实现钎焊	主要用于钎焊刀具、电机的定子线圈、导线端头以及各种电子元器件的触点等	
	间接加热式		电流或只通过一个零件,或根本不通过焊件。前者钎料熔化和另一零件加热是依靠通电加热的零件向它导热来实现。后者电流是通过并加热一个较大的石墨板或耐热合金板,焊件放置在此板上,全部依靠导热来实现,对焊件仍需压紧		
烙铁钎焊	外热式烙铁		使用外热源(如煤气、气体火焰等)加热	适用于以软钎料钎焊不大的焊件,广泛应用于无线电、仪表等工业部门	
	电烙铁	普通电烙铁	靠自身恒定作用的热源保持烙铁头一定温度		
		带陶瓷加热器			
		可调温度			
	弧焊烙铁		烙铁头部装有炭头,利用电弧热熔化钎料		
超声波烙铁		在电加热烙铁头上再加上超声波振动,靠空化作用破坏金属表面氧化膜	适用于铝、铝合金(含 Mg 多的除外),不锈钢、钴、锗、硅等钎焊		
特种钎焊	红外线钎焊	红外线钎焊炉	用红外线灯泡的辐射热对钎焊件加热钎焊	适于钎焊电子元器件及玻璃绝缘子等	
		小型红外线聚光灯		连接磁线存储器、挠性电缆等	
	氙弧灯光束钎焊		用特殊的反光镜将氙弧灯发出的强热光线聚在一起,得到高能量密度的光束作为热源	适于钎焊半导体、集成电路底板、大规模集成电路、磁头、晶体振子等小型器件以及其他微型件高密度的插装端子	
	激光钎焊		利用原子受激辐射的原理使物质受激而产生波长均一、方向一致以及强度非常高的光束,聚焦到 $10^5\text{W}/\text{cm}^2$ 以上的高功率密度的十分微小的焦点,把光能转换为热能实现钎焊	适用于钎焊微电子元器件、无线电、电信器材以及精密仪表等零部件	
	气相钎焊		利用高沸点的氟系列碳氢化合物饱和蒸气的冷凝汽化潜热来实现钎焊	往印刷电路板上钎焊绕接用的线柱,往陶瓷基片上钎焊陶瓷片或芯片基座外部引线等	
	脉冲加热钎焊	平行间隙钎焊法		利用电阻热原理进行软钎焊的方法,以脉冲的方式在短时间(几毫秒至 1s)供给钎焊所需热量	往印刷电路板上装集成电路块及晶体管等元件
		再流钎焊法	通过脉冲电流用间接加热的方法在被焊的材料上涂一层钎料或在材料间放入加工成适当形状的钎料,并在其熔化瞬间同时加压完成钎焊		在印刷电路上装集成电路块、二极管、片状电容等元器件,以及挠性电缆的多点同时钎焊等
			热压头式再流钎焊法		采用了热压头方式同时吸收了脉冲加热法的优点来实现钎焊
	波峰式钎焊法		钎焊时,印刷电路板背面的铜箔面在钎料的波峰上移动,实现钎焊		作为印刷电路板批量生产钎焊方法
	平面静止式钎焊法		钎焊时,使印刷电路板沿水平方向移动而同时使钎料槽或印刷电路板作垂直运动来完成钎焊		

1.2 扩散焊原理及分类

1.2.1 扩散焊的原理

原子间的相互扩散是实现扩散连接的基础。固态中的扩散有以下几种机制：空位机制、间隙机制、轮转机制、双原子机制等。空位机制、轮转机制、双原子机制的扩散可以形成置换式固溶体；间隙机制可以形成间隙式固溶体，只有原子体积小的元素（如 H、B、C、N 等）才有这种扩散形式。

扩散焊时在外界压力的作用下，被连接界面靠近到距离为 $2\sim 4\text{nm}$ ，形成物理吸附。加工表面微观有一定的不平度，在外力作用下，表面微观凸起部位形成微区塑性变形，被连接表面的局部区域达到物理吸附，这一阶段被称为物理接触形成阶段。

随着扩散焊时间延长，被连接表面微观凸起变形量增加，物理接触面积进一步增大，在接触界面的某些点形成活化中心，这个区域可进行局部化学反应。当原子间相互作用间距达到 $0.1\sim 0.3\text{nm}$ 时，则形成原子间相互作用的反应区域达到局部化学结合。在界面上完成由物理吸附到化学结合的过渡。在金属材料扩散焊时，形成金属键，而当金属与非金属连接时，此过程形成离子键与共价键。

随着时间的延长，局部的活化区域沿整个界面扩展，最终导致整个结合面出现原子间的结合。连接材料界面结合区中再结晶形成共同的晶粒，接头区由于应变产生的内应力得到松弛，使结合金属的性能得到改善。异种金属扩散焊界面附近可以生成无限固溶体、有限固溶体、金属间化合物或共析组织的过渡区。当金属与非金属扩散焊时，可以在连接界面区形成尖晶石、硅酸盐、铝酸盐及其他反应新相。

1.2.2 扩散焊的特点

扩散焊是在固态下实现材料的焊接，属于压焊的一种。与常用压焊方法（冷压焊、摩擦焊等）相同的是在连接过程中要施加一定的压力。扩散焊与熔焊、钎焊方法的加热温度、压力及过程持续时间等工艺条件的对比见表 1.2。

表 1.2 扩散焊与熔焊、钎焊方法的比较

工艺条件	扩散焊	熔焊	钎焊
加热	局部、整体	局部	局部、整体
温度	$0.5\sim 0.8$ 倍母材熔点	母材熔点	高于钎料熔点
表面准备	严格	不严格	严格
装配	精确	不严格	不严格
焊接材料	金属、合金、非金属	金属合金	金属、合金、非金属
异种材料连接	无限制	受限制	无限制
裂纹倾向	无	强	弱
气孔	无	有	有
变形	轻微	强	轻
接头施工可达性	有限制	无限制	有限制
接头强度	接近母材	接近母材	取决于钎料的强度
接头抗腐蚀性	好	敏感	差

一些特殊的高性能构件的制造，往往要求把性能差别较大的异种材料连接在一起，这用传统的熔焊方法也难以实现。为了满足上述要求，作为固相连接方法之一的扩散焊引起人们

的重视。与熔焊、钎焊方法相比,扩散焊在某些方面具有明显的优点,主要表现在以下几个方面。

① 扩散焊接头的显微组织和性能与母材接近或相同,不存在各种熔化焊缺陷,也不存在具有过热组织的热影响区。工艺参数易于控制,在批量生产时接头质量稳定。

② 可以进行内部及多点、大面积构件的连接,以及电弧可达性不好或用熔焊方法不能实现的连接。可焊接其他焊接方法难以焊接的材料。

③ 它是一种高精密的连接方法,工件不变形,可以实现机械加工后的精密装配连接,可获得较大的经济效益。

④ 对于塑性差或熔点高的同种材料,或对于不互溶或在熔焊时产生脆性金属间化合物的异种材料,扩散焊是一种可靠的方法,适合于耐热材料(耐热合金、钨、钼、铌、钛等)、陶瓷、磁性材料及活性金属的连接,在扩散焊研究与实际应用中,有70%涉及异种材料的连接。

扩散焊也存在着被连接表面的制备和装配质量的要求较高、焊接加热时间长易产生晶粒长大、设备一次性投资较大等缺点。

1.2.3 扩散焊的分类

(1) 同种材料扩散焊

通常指不加中间层的两种同种金属直接接触的扩散连接。这种类型的扩散焊,一般要求待焊表面制备质量较高,要求施加较大的压力,焊后接头的成分、组织与母材基本一致。Ti、Cu、Zr、Ta等最易焊接;铝及其合金,含Al、Cr、Ti的铁基及钴基合金则因氧化物不易去除而难以焊接。

(2) 异种材料扩散焊

通常指两种不同的金属、合金或金属与陶瓷、石墨等非金属材料的扩散连接。异种材料的化学成分、物理性能等有显著差异。两种材料的熔点、线胀系数、电磁性、氧化性等差异越大,扩散焊接难度越大。因两种材料扩散系数不同,在扩散结合面上由于冶金反应产生低熔点共晶或者形成脆性金属间化合物,易使界面处产生显微孔洞、裂纹,甚至断裂。

(3) 过渡液相扩散焊

也被称为瞬间液相扩散焊(TLP),是指在扩散焊过程中界面处短时出现微量液相的扩散焊方法。在扩散焊过程中,中间层与母材发生共晶反应,形成一层极薄的液相薄膜,此液膜填充整个接头间隙后,再使之等温凝固并进行相互扩散,从而获得均匀的扩散焊接头。

瞬态液相扩散焊是用一种特殊成分、熔化温度较低的薄层合金作为中间层,放置在焊接面之间,施加小的压力或不施加压力,并在真空条件下瞬间加热到中间层合金熔化,在焊接面间形成均匀的液态薄膜并润湿母材;经过一定的保温时间,中间层合金与母材之间进一步扩散,形成牢固的连接。这种方法尤其适用于焊接性较差的铸造高温合金。

中间合金的成分应保证瞬态液相扩散焊工艺过程顺利进行,即应有合适的熔化温度(为母材熔点 T_m 的0.8~0.9倍),应能使接头区在连接温度下达到等温凝固,不产生新的有害相。

(4) 加中间层的扩散焊

也被称为共晶反应扩散焊,是利用在某一温度下待焊异种金属之间会形成低熔点共晶的特点加速扩散焊过程的方法。在被焊材料之间加入一层金属或合金(称为中间层),这样就可以焊接很多难焊的或冶金上不相容的异种材料,可以焊接熔点很高的同种材料。

中间层合金成分应保证接头性能与母材相近,达到使用要求。一般中间层合金以Ni-Cr-Mo或Ni-Cr-Co-W(Mo)为基,加入适量B(或Si)而构成。如DZ22定向凝固高温合金的

中间层合金 Z2P 和 Z2F; DD3 单晶合金的 D1F 均是这样设计和生产的。有时中间层合金中也适当加入或调整固溶强化元素 Co、Mo、W 的比例。中间层合金的品种有粉状和非晶态箔料, 非晶态箔料的厚度为 0.02~0.04mm。

(5) 超塑性成形扩散焊

它是一种将超塑性成形与扩散焊接组合起来的工艺, 适用于具有超塑性的材料, 如钛、铝及其合金等的焊接。在高温下具有超塑性的金属材料, 可以在高温下用较低的压力实现成形和连接。采用此方法的条件之一是材料的超塑性成形温度与扩散焊温度接近, 在低真空度下完成。在超塑性状态下进行扩散焊有助于焊接质量的提高, 这种方法在航空航天工业中得到应用。

(6) 等静压扩散焊

它是将工件放置在密封的真空盒中利用热等静压原理完成焊接的一种扩散焊工艺。焊前将组装好的工件密封在真空盒或薄的软质金属包中并将其抽真空, 封焊抽气口, 然后将整个密封盒或包置于加热室中进行加热, 利用高压气体与真空盒或包中的压力差对工件施加各向均衡的等静压力, 在高温高压下完成扩散焊过程。这种方法因加压均匀、不易损坏被焊接件, 适合于脆硬性材料的扩散焊。

扩散焊是正在不断发展的一种焊接技术, 有关其分类、机理、设备和工艺都在不断完善和向前发展。

1.3 钎焊及扩散焊技术的新发展

1.3.1 钎焊技术的新发展

钎焊是人类最早使用的材料连接方法之一。除了机械连接方法外, 钎焊或许是最古老的连接技术, 但随着人们不断对自然的了解, 以及材料性能对工艺的影响和科学技术的进步, 尤其是第二次世界大战以后, 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, 这就大大推动了钎焊技术的新进展。

(1) 无铅软钎焊技术

2003 年, 欧洲议会和欧盟委员会公布了《报废电子电气设备指令》和《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》, 要求成员国确保从 2006 年 7 月 1 日开始, 投放于市场的新电子和电气设备不包含铅、汞、镉、六价铬、聚溴二苯醚和聚溴联苯六种有害物质。这一指令的生效在世界范围内引起广泛的响应, 全球同步实现无铅电子组装已经是不可逆转的发展趋势。世界范围内已开发出的无铅钎料合金的种类繁多, 并且已经申报了九百多种无铅钎料成分专利, 这些钎料的成分主要集中在 Sn-Zn、Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Bi、Sn-In 等系列。研究表明, 现有的印刷板电路材料可以与上述无铅钎料兼容; 现有的电子设备经过适当的改造之后可以适用于无铅电子组装; 无铅钎料的力学性能及焊点的热疲劳可靠性亦优于或相当于 Sn-Pb 共晶钎料。无铅钎焊的普及已经是大势所趋, 已经有很多大的公司将无铅钎焊技术使用到了产品中, 例如 Epson 公司、摩托罗拉公司、微软公司等。

(2) 接触反应钎焊技术

利用共晶反应原理进行钎焊的工艺称为接触反应钎焊。近年来, 接触反应钎焊作为一种先进的材料连接工艺而得到越来越广泛的应用。例如, 为了去除 Al 合金散热器等构件生产中烦琐的复合钎料板加工工序, 加拿大 ALCON 公司提出了一种新型的 Al 合金接触反应钎

焊技术,在至少一个被连接基体的表面涂覆 Si 粉和氟铝酸钾的混合物作为钎焊材料,然后将焊件在氮气气氛下加热到 600℃ 左右并保温。加热过程中钎剂在 562℃ 首先发生熔化并溶解 Al 基体表面的氧化膜,从而使得 Si 颗粒与干净的 Al 表面发生紧密接触。当温度超过 577℃ 时, Si 颗粒将迅速溶入 Al 基体并形成一层接近共晶成分的 Al-Si 液相。液相在毛细作用下填充接头间隙形成钎缝和圆角,最后在冷却时凝固形成冶金接头。

(3) 熔钎焊新技术

与普通电弧熔化焊相比,熔钎焊电弧热量集中,对薄板及薄壁容器进行钎焊时变形量很小,焊接热影响区小,操作方便,节能高效又易于实现自动化。同时又因其电弧特有的去除氧化膜作用,带电离子、电子的冲击活化作用,因此可以克服钎剂对母材的腐蚀副作用,焊后不用清洗,在生产中得到了广泛应用。

例如奥迪汽车车身框架及零部件制造中使用 MIG 熔钎焊和等离子电弧熔钎焊,不但成形美观,而且解决了镀锌钢板电阻焊电极的粘锌问题和焊核周围锌层的破坏问题。福特公司也使用 MIG 电弧熔钎焊连接镀锌钢板材质的汽车车身、车门以及车门铰链与车身的连接,并开展了镀锌钢板 MIG 熔钎焊工艺优化和钎焊部件的变形试验及分析。美洲豹汽车公司使用 MIG 熔钎焊和 TIG 熔钎焊连接汽车构件,并用此工艺修复撞坏的汽车车身,还利用此工艺连接用于真空密封的法兰盘。除汽车行业外,国内外还将 MIG 熔钎焊应用于中央空调薄壁镀锌管板连接以及薄壁钢管与波纹管的连接。

(4) 新型钎焊材料的开发

随着我国电工业、汽车工业、电子工业的高速度发展,钎焊技术应用越来越广,使得钎焊材料的产量也以每年 20%~30% 的速度递增。钎焊材料的迅速发展主要体现在钎焊材料的研究、开发机构不断增加,生产厂家逐年增多;钎料的品种增多,钎料年产量逐年增加以及钎焊材料标准化工作取得了很大进展。

① 非晶态技术的新突破 钎料的高度合金化,使部分钎料无法按常规方法加工成丝材或带材,限制了这些钎料的应用范围。20 世纪 70 年代中期,非晶态技术在工业发达国家由实验室已走向工业应用,为无法用常规方法加工成形的钎料开辟了新的加工途径。20 世纪 80 年代中期,我国将非晶态钎料应用于生产。近年来在生产技术上有突破,已具备了中小批量生产能力,可以生产出 100mm 宽、0.03~0.05mm 厚的箔带。目前已有 Ni 基、Cu 基、Cu-P、Al 基及 Sn-Pb 五大类 30 多个品种的钎料,可以通过非晶态技术生产。

② 粘带钎料研制成功 粘带钎料是将一些无法用常规方法加工成带材的钎料粉用胶黏剂制备而成的钎料。我国已研制成功粘带钎料的生产技术,通过选用新的胶黏剂及改进制造工艺,提高了黏结性和使用质保期,特别适合于 Ni 基高温钎料的大面积钎焊。

③ Cu-P 系钎料的加工成形技术有突破性进展 Cu-P 系列钎料虽然具有良好的钎焊工艺性能,但是在常温下非常脆,长期以来都是以铸棒使用,给钎焊工作带来诸多不便。经过多年研究,20 世纪 80 年代中期已能拉拔成 $\phi 0.5\text{mm}$ 的丝材。目前这项加工工艺逐渐成熟,许多钎料生产厂家都能生产 Cu-P 系列钎料丝材,这一加工技术的突破为 Cu-P 系列钎料的应用拓宽了市场。

④ 膏状钎料的研究与生产取得多项成果 用于电子行业表面组装技术的软钎焊膏以及用于硬钎焊的膏状钎料近年来已有许多单位陆续研制成功,并有少量产品投放市场。这一领域的市场前景也将十分广阔,因为无论是大量使用的移动电话、计算机还是制冷配件行业,都在大量使用膏状钎料,目前部分还需从国外进口。

1.3.2 扩散焊技术的发展现状

扩散焊是在一定的温度和压力下将两种待焊金属件的焊接表面相互接触,通过微观塑性