



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

钎焊与扩散焊

王娟 李亚江 等编著



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制

系列规划教材



钎焊与扩散焊

QIANHAN YU KUOSANHAN

王娟 李亚江 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《钎焊与扩散焊》系统阐述了钎焊与扩散焊基本原理和接头形成过程,钎料和钎剂的特性,常用钎焊方法及设备,钎焊工艺工程以及钢铁材料、有色金属、高温合金、高硬度耐磨材料的钎焊与扩散焊的特点等。书中内容反映出近年来钎焊与扩散焊技术研究的新进展,焊接生产和研究中一些先进的技术成果和成功的经验,特别是一些新工艺、新型焊接用材料的开发。

《钎焊与扩散焊》主要供高等学校材料成型及控制工程、材料加工(焊接方向)和焊接技术与工程等专业的师生使用,也可供从事与焊接材料开发和焊接技术相关的科研院(所)和企事业单位的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钎焊与扩散焊/王娟等编著. —北京:化学工业出版社, 2016.6
普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材
ISBN 978-7-122-26989-8

I. ①钎… II. ①王… III. ①钎焊-高等学校-教材
②扩散焊-高等学校-教材 IV. ①TG45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 095407 号

责任编辑:陶艳玲

文字编辑:张绪瑞

责任校对:边涛

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:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 字数388千字 2016年8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:38.00 元

版权所有 违者必究



前 言

目前,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,钎焊与扩散焊技术以其独有的特点在有色金属、钢铁材料、难熔金属、异质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。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,性能涉及面更加广泛,有力地促进了国家经济建设事业的腾飞。与此同时,钎焊与扩散焊也面临着许多新的技术疑难和本质问题。例如,提高接头的结合强度、增加接头结构的适应性等。这些问题的解决必将促进其进一步发展和应用,并使其在各行业领域发挥更大作用。基于以上状况,近年来钎焊与扩散焊的教学也越来越受到重视,但目前有关这方面的教材较为缺乏,因此,在参考了大量文献的基础上,我们总结了本校多年的教学经验,编写了本教材,供兄弟院校参考使用。

本书的特点是系统阐述钎焊与扩散焊的基本原理和概念,介绍了各种材料的钎焊与扩散焊的特点及工艺要点。书中引用了焊接生产和研究中一些先进的技术成果和成功的经验,力求注重科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来钎焊与扩散焊技术研究的新进展,特别是一些新工艺、新型焊接用材料的开发。

本书主要供高等学校材料成型及控制工程、材料加工(焊接方向)和焊接技术与工程专业的师生使用,也可供从事与焊接材料开发和焊接技术相关工作的科研院(所)和企事业单位的科研人员参考。

参加本书撰写和提供信息的其他人员还有魏守征、李文娟、刘强、马群双、刘坤、刘鹏、马海军、蒋庆磊、夏春智、陈茂爱、吴娜、沈孝芹、黄万群、李嘉宁、刘毅、杜红燕。

本书编写过程中参阅了同行大量参考文献,在此,谨向这些文献资料的作者表示诚挚的谢意。

由于我们水平所限,书中错误或不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2016年1月

目 录

第1章 概述	1
1.1 钎焊的特点及分类	1
1.1.1 钎焊的特点	1
1.1.2 钎焊方法的分类	2
1.2 扩散焊原理及分类	4
1.2.1 扩散焊的原理	4
1.2.2 扩散焊的分类	4
1.2.3 扩散焊的特点	6
1.3 钎焊及扩散焊的应用	8
1.3.1 钎焊及扩散焊的应用领域	8
1.3.2 钎焊技术的发展及应用	10
1.3.3 扩散焊技术的发展及应用	12
复习思考题	13
第2章 钎焊接头的形成	14
2.1 钎料的润湿与铺展	14
2.1.1 钎料的润湿性	14
2.1.2 钎料的毛细流动	14
2.1.3 影响钎料润湿性的因素	16
2.2 钎料与母材的相互作用	20
2.2.1 母材向钎料的溶解	20
2.2.2 钎料组分向母材的扩散	21
2.3 钎焊接头的不均匀性	22
2.3.1 钎缝的成分和组织	22
2.3.2 钎缝的不致密性缺陷	24
2.3.3 影响钎焊过程的因素	25
复习思考题	26
第3章 钎料与钎剂	27
3.1 钎料的类型及特点	27
3.1.1 对钎料的基本要求	27
3.1.2 钎料的型号与牌号	27
3.1.3 钎料的类型及化学成分	28
3.2 钎料的特性及选用	36

3.2.1 常用钎料的特性	36
3.2.2 钎料的工艺性能	45
3.2.3 钎料的选用原则	46
3.3 钎剂的类型及特性	48
3.3.1 钎剂的作用及组成	48
3.3.2 钎剂的型号与牌号	49
3.3.3 钎剂的类型及特性	50
3.3.4 钎剂与钎料的搭配	57
3.4 钎料与钎剂的使用安全	58
3.4.1 钎料与钎剂的使用及保管	58
3.4.2 钎料与钎剂的安全注意事项	59
复习思考题	59

第4章 钎焊方法及设备

60

4.1 火焰钎焊	60
4.1.1 火焰钎焊的特点及应用	60
4.1.2 火焰钎焊设备	61
4.1.3 钎焊火焰的控制	66
4.2 感应钎焊	68
4.2.1 感应钎焊的特点及应用	69
4.2.2 感应钎焊设备	71
4.3 真空炉中钎焊	75
4.3.1 真空钎焊接头的形成	75
4.3.2 真空钎焊的特点	76
4.3.3 常用的真空钎焊设备	77
4.4 其他钎焊方法	79
4.4.1 烙铁钎焊	79
4.4.2 电阻钎焊	80
4.4.3 浸渍钎焊	81
4.4.4 波峰焊与再流焊	83
4.4.5 真空扩散钎焊	84
复习思考题	86

第5章 钎焊工艺过程

87

5.1 钎焊接头设计	87
5.1.1 钎焊接头的基本形式	87
5.1.2 钎缝间隙的控制	89
5.1.3 特殊钎焊接头的设计	91
5.2 钎焊前的准备	95
5.2.1 表面清理及制备	95
5.2.2 钎料用量及放置	99
5.2.3 焊件的装配和定位	101

5.3 钎焊工艺参数	103
5.3.1 加热温度的选择	103
5.3.2 保温时间的确定	104
5.3.3 其他工艺参数	105
5.4 钎焊后处理	107
5.4.1 钎焊后热处理	107
5.4.2 钎焊后清除	108
5.5 钎焊质量检验	109
5.5.1 钎焊缺陷及防止	109
5.5.2 钎焊质量检验方法	110
复习思考题	113

第6章 有色金属的钎焊

114

6.1 铝及其合金的钎焊	114
6.1.1 铝及其合金的钎焊特点	114
6.1.2 钎料与钎剂	116
6.1.3 铝及其合金的钎焊工艺	118
6.2 铜及其合金的钎焊	126
6.2.1 铜合金的分类及钎焊特点	126
6.2.2 钎料与钎剂	128
6.2.3 铜及其合金的钎焊工艺	129
6.2.4 铜与铝及其合金的钎焊	132
6.3 钛及钛合金的钎焊	134
6.3.1 钛及钛合金的分类及性能	134
6.3.2 钎焊特点及钎料	136
6.3.3 钛合金的钎焊工艺	138
6.4 镁及镁合金的钎焊	142
6.4.1 镁及镁合金的钎焊特点	142
6.4.2 钎料与钎剂	143
6.4.3 镁及镁合金的钎焊工艺	146
复习思考题	147

第7章 钢铁材料及高温合金的钎焊

148

7.1 碳钢和低合金钢的钎焊	148
7.1.1 碳钢和低合金钢的钎焊特点	148
7.1.2 钎料和钎剂	148
7.1.3 碳钢和低合金钢的钎焊工艺	149
7.2 不锈钢的钎焊	150
7.2.1 不锈钢的钎焊特点	150
7.2.2 不锈钢的钎料、钎剂和保护气体	151
7.2.3 不锈钢的钎焊工艺	154
7.3 铸铁的钎焊	156

7.3.1 铸铁的钎焊特点	156
7.3.2 钎料和钎剂	156
7.3.3 铸铁的钎焊工艺	157
7.4 高温合金的钎焊	158
7.4.1 高温合金的类型	158
7.4.2 高温合金的钎焊特点	161
7.4.3 高温合金钎焊用钎料	162
7.4.4 高温合金的钎焊工艺	164
复习思考题	168

第8章 高硬度耐磨材料的钎焊

170

8.1 陶瓷与金属的钎焊	170
8.1.1 陶瓷与金属的钎焊特点	170
8.1.2 钎料	171
8.1.3 陶瓷与金属的钎焊工艺	173
8.2 硬质合金与钢的钎焊	177
8.2.1 硬质合金与钢的钎焊特点	177
8.2.2 钎料与钎剂	177
8.2.3 硬质合金与钢的钎焊工艺	180
8.3 其他高硬度材料的钎焊	185
8.3.1 石墨的钎焊	185
8.3.2 金刚石的钎焊	189
8.3.3 难熔金属的钎焊	193
复习思考题	195

第9章 扩散焊

196

9.1 扩散焊原理及扩散机制	196
9.1.1 扩散焊原理	196
9.1.2 扩散焊的三个阶段	197
9.1.3 扩散焊界面结合机制	199
9.1.4 瞬间液相扩散焊原理	205
9.2 扩散焊设备与工艺	207
9.2.1 扩散焊设备的组成	207
9.2.2 表面处理及中间层合金	209
9.2.3 扩散焊工艺参数	212
9.2.4 接头的质量检验	217
9.3 各种材料的扩散焊	218
9.3.1 同种材料的扩散焊	218
9.3.2 异种材料的扩散焊	221
9.3.3 陶瓷与金属的扩散焊	225
复习思考题	229

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实现结合；扩散焊是依靠两被连接母材之间界面原子的相互扩散实现材料结合的精密连接方法。钎焊及扩散焊技术应用广泛，在航空航天、机械工业、汽车制造、核工业、电子电器等部门都得到大量应用。特别对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）之间的焊接等，较多采用钎焊和扩散焊技术。

1.1 钎焊的特点及分类

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。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。

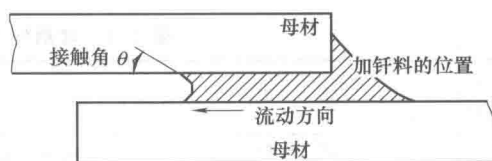


图 1.1 钎焊接头示意图

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，甚至金属与非金属之间，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。

钎焊的缺点主要在于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℃ 时称为软钎焊；高于 450℃ 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的。例如：对钢件来说，加热温度高于 800℃ 称为高温钎焊，550~800℃ 之间称为中温钎焊，加热温度低于 550℃ 称为低温钎焊；但对于铝合金来说，加热温度高于 450℃ 称为高温钎焊，300~450℃ 之间称为中温钎焊，加热温度低于 300℃ 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的	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	多用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		

续表

钎焊方法	分 类		原 理	应 用
浸渍钎焊	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
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的。后者是电流通过并加热一块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较小尺寸的焊件，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，靠净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、锆、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光光线聚在一起，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封装端子
	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（几毫秒到一秒）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	适于将大型的大规模集成电路或漆包线等钎焊到各种基板上

续表

钎焊方法	分 类	原 理	应 用
特种钎焊	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的钎焊方法
	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

扩散焊是指在一定的温度和压力下,被连接表面紧密贴合,通过使局部发生微观塑性变形,或通过被连接表面产生的微观液相而扩大被连接表面的物理接触,然后结合层原子之间经过一定时间的相互扩散,形成结合界面可靠连接的过程。

一些特殊高性能构件的制造,经常要求把特殊合金或性能差别很大的异种材料,如金属与陶瓷、铝与钢、钛与钢、金属与玻璃等连接在一起,这些难焊材料用传统的熔焊方法难以实现可靠的连接。为了适应这种要求,作为固相连接方法之一的扩散连接技术引起了人们的重视,成为连接领域新的热点。

原子间的相互扩散是实现扩散焊的基础。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2~4nm,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0.1~0.3nm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 扩散焊的分类

可根据不同的准则对扩散焊方法进行分类。一般可分为固相扩散连接和液相扩散连接两大类。固相扩散连接所有的界面反应均在固态下进行;液相扩散连接是在异种材料之间发生相互扩散,使界面组分变化导致连接温度下液相的形成。在液相形成之前,固相扩散连接和液相扩散连接的原理相同,而一旦有液相形成,液相扩散连接实际上就变成钎焊+扩散焊。

也可以按连接时是否填加中间层、连接气氛等来分类。

根据扩散连接的定义,各种材料扩散连接接头的组合可分为如图 1.2 所示的四种类型。

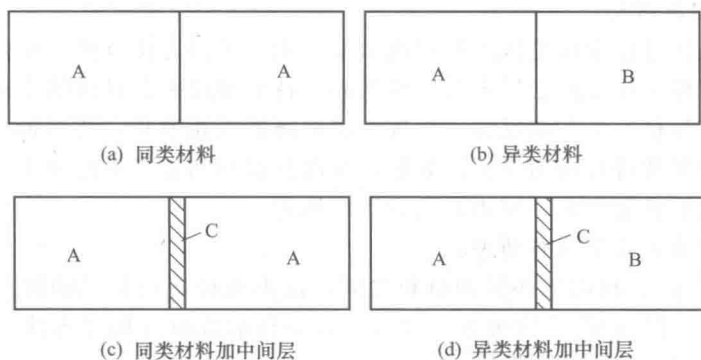


图 1.2 扩散焊接头的四种组合类型

一般地,扩散焊有两种分类方法(见表 1.2),每类扩散连接的特点如下。

表 1.2 扩散连接的分类

分类法	划分依据	类别名称	
第一种	按被焊材料的组合形式	无中间层	同种材料扩散焊
			异种材料扩散焊
		加中间层	同种材料扩散焊
			异种材料扩散焊
第二种	按连接过程中接头区是否出现液相或其他工艺变化	固相扩散连接(SDB)	
		瞬间液相扩散焊(TLP)	
		超塑性成形扩散连接(PF-DB)	
		热等静压扩散焊(HIP)	

(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。这种类型的扩散连接,一般要求待焊表面制备质量较高,焊接时要求施加较大的压力,焊后扩散接头的化学成分、组织与母材基本一致。对于同种材料来说,Ti、Cu、Zr、Ta 等最易实现扩散连接;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于实现扩散焊。

(2) 异种材料扩散焊

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。异种金属的化学成分、物理性能等有显著差异。两种材料的熔点、线膨胀系数、电磁性、氧化性等差异越大,扩散连接难度越大。异种材料扩散连接时可能出现的问题:

① 由于线膨胀系数不同而在结合面上产生热应力,导致界面附近出现裂纹。

② 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,易使界面处产生裂纹,甚至断裂。

③ 因为两种材料扩散系数不同,可能导致扩散接头中形成扩散孔洞。

(3) 加中间层的扩散焊

对于采用常规扩散连接方法难以焊接或焊接效果较差的材料,可在被焊材料之间加入一层过渡金属或合金(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或异种材料。

(4) 固相扩散连接

在扩散连接过程中,母材和中间层均不发生熔化或产生液相的扩散连接方法,是常规的

扩散连接方法。固相扩散连接通常在扩散焊设备的真空室中进行。被焊材料或中间层合金中含有易挥发元素时不宜采用这种方法。

(5) 瞬间液相扩散焊

是指在扩散连接过程中接缝区短时出现微量液相的扩散连接方法。换句话说,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过程的连接方法。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均匀化扩散处理,从而获得均匀的扩散焊接头。微量液相的出现有助于改善界面接触状态,允许使用较低的扩散压力。

获得微量液相的方法主要有两种:

① 利用共晶反应 利用某些异种材料之间可能形成低熔点共晶的特点进行液相扩散连接(称为共晶反应扩散连接)。这种方法要求一旦液相形成应立即降温使之凝固,以免继续生成过量液相,所以要严格控制温度。

将共晶反应扩散连接原理应用于加中间层扩散连接时,液相总量可通过中间层厚度来控制,这种方法称为瞬间液相扩散连接(或过渡液相扩散连接)。

② 添加特殊钎料 采用与母材成分接近但含有少量既能降低熔点又能在母材中快速扩散的元素(如 B、Si、Be 等),用此钎料作为中间层,以箔片或涂层方式加入。与普通钎焊相比,此钎料层厚度较薄,钎料凝固是在等温状态下完成,而钎焊时钎料是在冷却过程中凝固的。

(6) 超塑性成形扩散连接

这种扩散连接工艺的特点是:扩散连接压力较低,与成形压力相匹配,扩散时间较长,可长达数小时。在高温下具有相变超塑性的材料,可以在高温下用较低的压力同时实现成形和扩散连接。用此种组合工艺可以在一个热循环中制造出复杂的空心整体结构件。采用此方法的条件之一是材料的超塑性成形温度与扩散连接温度接近,该方法在低真空度下完成。在超塑性状态下进行扩散连接有助于焊接接头质量的提高,这种方法已在航空航天工业中得到应用。

(7) 热等静压扩散焊

在热等静压设备中实现扩散连接。焊前应将组装好的工件密封在薄的软质金属包裹中并将其抽真空,封焊抽气口,然后将整个包裹置于加热室中进行加热,利用高压气体与真空气囊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连接过程。

由于压力各向均匀,工件变形小。当待焊表面处于两被焊工件本身所构成的空腔内时,可不用包裹而直接用真空电子束焊等方法将工件周围封焊起来。这种方法焊接时所加气压压力较高,可高达 100MPa。当工件轮廓不能充满包裹时应采用夹具将其填满,防止工件变形。这种方法尤其适合于脆性材料的扩散连接。

1.2.3 扩散焊的特点

(1) 扩散焊的工艺特点

一些新材料(如陶瓷、金属间化合物、复合材料、非晶态材料及单晶等)采用传统的熔焊方法很难实现可靠的连接。一些特殊的高性能结构件的制造,往往要求把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)连接在一起,这用传统的熔焊方法也难以实现。为了满足上述种种要求,作为固相连接方法之一的扩散连接日益引起人们的重视。

扩散连接是正在不断发展的一种焊接技术,其分类、机理、设备和工艺都在不断完善和

向前发展。根据被焊材料的组合和连接方式的不同,几种扩散连接方法的工艺特点见表1.3。

从广义上讲,扩散连接属于压焊的一种,与常用压焊方法(冷压焊、摩擦焊、爆炸焊及超声波焊)相同的是在连接过程中要施加一定的压力。扩散连接与其他焊接方法在加热温度、压力及过程持续时间等工艺条件方面的对比如表1.4所示。

(2) 扩散焊的优缺点

1) 优点 扩散连接与熔焊方法、钎焊方法相比,在某些方面具有明显的优点,主要表现在以下几个方面:

① 可以进行内部及多点、大端面构件的连接(如异种复合板制造、大端面圆柱体的连接等),以及电弧可达性不好或用熔焊方法不能实现的连接。不存在具有过热组织的热影响区。工艺参数易于精确控制,在批量生产时接头质量和性能稳定。

② 是一种高精密的连接方法,用这种方法连接后的工件精度高、变形小,可以实现精密配合,一般不需要再进行机械加工,可获得较大的经济效益。

③ 可以连接用熔焊和其他方法难以连接的材料,如活性金属、耐热合金、陶瓷和复合材料等。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会产生脆性金属间化合物的异种材料,扩散连接是一种可靠的方法。在扩散连接的研究与实际应用中,70%涉及到异种材料的连接。

表 1.3 扩散焊方法的工艺特点

类 型	工 艺 特 点
同种材料扩散焊	是指不加中间层的两同种金属直接接触的一种扩散连接。对待焊表面制备质量要求高,焊时要求施加较大的压力。焊后接头组织与母材基本一致 对氧溶解度大的金属(如 Ti、Cu、Fe、Zr、Ta 等)最易焊,而对容易氧化的铝及其合金,含 Al、Cr、Ti 的铁基及钴基合金则难焊
异种材料扩散焊	是指异种金属或金属与陶瓷、石墨等非金属之间直接接触的扩散连接。由于两种材质上存在物理和化学等方面的性能差异,焊接时可能出现: ① 因线胀系数不同,导致结合面上产生热应力 ② 由于冶金反应在结合面上产生低熔点共晶或形成脆性金属间化合物 ③ 因扩散系数不同,导致接头中形成扩散孔洞 ④ 因电化学性能不同,接头可能产生电化学腐蚀
加中间层的扩散连接	是指在待焊界面之间加入中间层材料的扩散连接。该中间层材料通常以箔片、电镀层、喷涂或气相沉积层等形式使用,其厚度 $<0.25\text{mm}$ 。中间层的作用是:降低扩散焊的温度和压力,提高扩散系数,缩短保温时间,防止金属间化合物的形成等。中间层经过充分扩散后,其成分逐渐接近于母材。此法可以焊接很多难焊的或在冶金上不相容的异种材料
瞬间液相扩散焊(TLP法)	是一种具有钎焊特点的扩散连接。在焊件待焊面之间放置熔点低于母材的中间层金属,在较小压力下加热,使中间层金属熔化、润湿并填充整个接头间隙成为过渡液相,通过扩散和等温凝固,然后再经一定时间的扩散均匀化处理,从而形成焊接接头的方法,又叫扩散钎焊
超塑性成形扩散连接(PF-DB)	是一种将超塑性成形与扩散连接组合起来的工艺,适用于具有相变超塑性的材料,如钛及其合金等的焊接。薄壁零件可先超塑性成形然后焊接,也可相反进行,次序取决于零件的设计。如果先成形,则使接头的两个配合面对在一起,以便焊接;如果两个配合面原来已经贴合,则先焊接,然后用惰性气体充压使零件在模具中成形
热等静压扩散焊(HIP)	是利用热等静压技术完成焊接的一种扩散连接。焊接时将待焊件安放在密封的真空盒内,将此盒放入通有高压惰性气体的加热釜中,通过电热元件加热,利用高压气体与真空盒中的压力差对工件施以各向均衡的等静压力,在高温与高压共同作用下完成焊接过程。此法因加压均匀,不易损坏构件,适合于脆性材料的扩散连接。可以精确地控制焊接构件的尺寸

表 1.4 扩散连接与其他焊接方法的比较

工 艺 条 件	扩 散 连 接	熔 焊	钎 焊
加热	局部、整体	局部	局部、整体
温度	0.5~0.8 倍母材熔点	母材熔点	高于钎料熔点

续表

工 艺 条 件	扩 散 连 接	熔 焊	钎 焊
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	无	强	轻
接头施工可达性	无限制	有限制	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

2) 缺点

- ① 零件被连接表面的制备和装配质量的要求较高，特别对接合表面要求严格。
- ② 连接过程中，加热时间长，在某些情况下会产生基体晶粒长大等副作用。
- ③ 生产设备一次性投资较大，且被连接工件的尺寸受到设备的限制；无法进行连续式批量生产。

近年来扩散连接技术仍发展很快，已经被应用于航空航天、仪表及电子、核工业等部门，并逐步扩展到机械、化工、电力及汽车制造等领域。

1.3 钎焊及扩散焊的应用

1.3.1 钎焊及扩散焊的应用领域

(1) 在航空航天领域的应用

航空发动机是钎焊应用最广泛的领域之一。航空发动机推力大，燃油温度高，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，特别是高温合金，它们的熔焊性能一般很差，因此，主要依靠真空扩散焊或气体保护钎焊进行连接。例如，发动机导流叶片、高压涡轮导向器叶片、转子叶片、整流器、扩压器、燃烧室燃油喷嘴、高压压气机冠环组件、燃烧室头部转环阶段、发动机下舱、机舱加热器、高压涡轮轴承座等都是采用真空炉中钎焊或扩散焊方法制造的。燃油总管、动力轴、压力机静子环、液压和气压导管等大都采用气体保护感应加热钎焊。

钎焊及扩散焊技术在卫星制造中的应用也很多，包括波导微波器件、卫星姿控系统用来输送液体推进剂和高压气体的钛导管、卫星姿控发动机头部的毛细管等。其中波导微波器件是一种高精度、形状复杂、焊缝精细的部件，过去大多用铜合金或铝合金制造，采用火焰钎焊或盐浴钎焊制备；现在已有相当数量的铜波导被铝波导取代，并且越来越多的波导采用了真空钎焊代替火焰钎焊或盐浴钎焊。钎焊在空间站上主要用于管道系统的接头连接。例如，美国天空实验室的加工车间水管、冷却系统、姿控系统的导管接头均是采用感应钎焊连接的。

钎焊及扩散焊技术在航空航天领域的应用还有很多，例如美国 YF-12 飞机，它采用 Al-Ti 蜂窝芯复合板做机翼蒙皮，它是由 Al-Ti 上下面板、Ti-3Al-2.5V 蜂窝芯、TC4 框架和加强板四部分经真空钎焊组合而成的。美国 GE 公司还采用扩散技术成功修复了 50 万件以上的高压涡轮部件，包括各种高、低压涡轮导向器裂纹及磨损的修复等。

(2) 在电子工业中的应用

钎焊及扩散焊的发展史,特别是近几十年在电子工业的广泛应用说明,钎焊、扩散焊技术及与之相应的合金的发展长期以来都具有优势。其中软钎焊技术由于具有以下几方面的特点使其始终并将继续居于主导地位。

首先,软钎焊具有应力匹配能力。软钎料在室温下通常是塑性优良的自退火合金,能吸收应力,没有加工硬化等问题。这种独特的性能使软钎焊技术能将不同膨胀系数、不同刚度水平和不同强度等级的材料连接在一起。

其次,软钎焊具有显著的经济性、高效性和可靠性。由于连接是在相对较低的温度下进行的,使得许多常规有机高分子材料和电子元件因受热而改变性能和破坏等问题得以有效避免;相对低成本的材料、简单的工具盒和可控的工艺使软钎焊具有特别明显的经济性和高效性;对一般民用产品,在自动化软钎焊操作中,已达到接头返修率低于1%的水平,而在北美航空部门,已有每小时钎焊150亿个焊点而无失败的报道。这些都充分说明了软钎焊方法高效和可靠的特点。

最后,软钎焊具有制造和修理的方便性。与其他冶金连接方法相比,软钎焊对操作工具要求相对简单和易于操作,并且由于软钎焊接头是可以拆卸的接头,或者说软钎焊过程是可逆的,因而使软钎焊修补简单方便。

软钎焊主要用于各种不同电子元器件的引线与印刷电路板焊盘的连接,制造不同类型的集成电路器件,如集成电路、芯片载体、多芯片组件和封装件等。硬钎焊广泛用于电真空器件、雷达的波导器件和天线的制造。真空扩散焊主要用于金属与陶瓷、金属与玻璃等的连接,如大功率发射器、同轴磁控管、连续波磁控管高频输出窗、高压真空电容器外壳、磁控管阳极座等都是采用真空扩散连接的典型产品。

(3) 在汽车工业中的应用

随着钎焊技术的发展,特别是气体保护钎焊炉和半连续真空钎焊炉的广泛应用,使采用钎焊方法大批量、低成本地生产结构复杂的汽车部件成为可能,目前钎焊已成为汽车工艺不可缺少的连接技术。例如,用Nocolok钎焊炉已能大批量生产汽车的各种铝质蒸发器、冷凝器、中冷器、油冷器、水箱等。

液态氮分解连续钎焊炉已广泛用于汽车不锈钢部件的钎焊,例如,燃油分配器、机油冷却器、散热器等。高纯氮与少量氢的气体保护钎焊也已大量用于碳钢部件的钎焊,例如变速器齿轮、水泵泵架等。真空钎焊和扩散焊主要用于汽车热交换器管路连接,如U形弯头、汇集总管、接管与接头体、异径三通、接管与膨胀阀等部位的连接,客车门、铝合金窗框也开始采用火焰钎焊制造。

(4) 在家电工业中的应用

钎焊及扩散焊技术对家电工业的发展有着至关重要的作用。电冰箱的压缩机、空调的蒸发器和冷凝器、燃气热水器都离不开钎焊或扩散焊技术。例如冰箱压缩机壳体上的排气管、工艺管和吸气管,其材质为铜管,而壳体材料为低碳钢。管与壳体的接头形式为插接,所焊钎缝外观要求光滑、无裂纹、缩孔和未焊透,目前大多采用多工位转盘式自动火焰钎焊。

计算机、彩电、手机和音响等家电设备的印刷电路板有几万个焊点,印刷电路板与电子元器件的焊接通常采用自动化程度很高的软钎焊,如波峰焊、再流焊,在焊点很少的情况下可采用电烙铁焊接。印刷电路板与电子元器件的焊点质量往往会直接影响这些家电产品的质量,严重的会影响到它们的使用性能。

此外,钎焊及扩散焊技术在家电工业中的应用还有很多,如空调和冰箱压缩机储液、分液器壳体与铜管的自动火焰钎焊,空调消声器的真空钎焊,空分机用铝板式换热器的真空