

钎焊填缝机理的研究

—不等间隙钎焊时钎料填缝过程研究

陈定华 钱乙余 李 严

(哈尔滨工业大学)

摘 要

钎焊接头的主要缺陷是夹气和夹渣。在六十年代初期,作者曾经指出:夹气、夹渣的形成是与钎料、钎剂的流动形式和过程有关。为了提高钎缝的钎着率,生产实践已证明,采用不等间隙钎焊是有效的。在本文所提及的试验中,采用X射线及工业电视观察钎料的动态过程并用摄影机将其记录。为了增强X射线图象的反差,试验中主要采用S₁-P₁钎料钎焊铜合金试件。钎焊是在水平位置下进行的。

引 言

钎焊致密性是钎焊生产中的重要问题,它直接影响钎焊产品的接头强度、抗腐蚀性、密封性及导电性等。国内外有关钎焊文献一般都承认,完全致密的钎缝是很难获得的。钎焊致密性缺陷包括有:夹气、夹渣、夹气—夹渣、气孔、未钎透及疏松等,其中以夹气、夹渣为主。在六十年代初期,我们就针对钎焊致密性问题进行了钎焊填缝机理的研究,提出钎焊致密性缺陷夹气、夹渣的形成与钎焊时钎剂、钎料流动路线有关。钎料、钎剂填缝时的流动前沿是不整齐的,填缝流动路线是紊乱的,其结果造成钎料对气体或钎剂的包围,这是钎缝中大量夹气、夹渣产生的主要原因。通过在玻璃平板间隙中能润湿它的液体填缝的模拟试验,以及利用X射线图象增强器、工业电视、电影记录的方法,观察和拍摄了平板平行间隙时钎料填缝的动态过程,对钎焊致密性缺陷形成的原因做了充分的验证。为提高和解决某些产品钎焊致密性问题,曾提出不等间隙钎焊,在生产实践中取得很好的效果^{[1][2]}。

在以往试验研究的基础上,本文利用X射线及工业电视研究钎焊时钎料填缝的动态

过程,用摄影机记录了钎焊致密性缺陷形成的特点,不等间隙钎焊时夹气、夹渣自动排除的某些规律,对不等间隙钎焊能够提高钎焊致密性的工艺原理做了论证。

一、试验方法

用X射线工业电视和摄影机进行钎焊填缝动态过程的观察和试验。为增强X射线下钎料流动的印象反差,试验中主要采用锡铅钎料钎焊铜合金,同时也进行了银基钎料钎焊铜合金的硬钎焊试验。

试验材料:

(1) 软钎焊

母材	H96 黄铜
钎料	料 604
钎剂	ZnCl ₂ 25% + NH ₄ Cl 25% 水溶液

(2) 硬钎焊

母材	H96 黄铜
钎料	料 312
钎剂	剂 102

试验形式:水平位置搭接接头

试验方法:管式电阻炉炉中钎焊

试验装置如图1所示。试件由铝或不锈钢制的夹具固定,钎料、钎剂预先配置于试

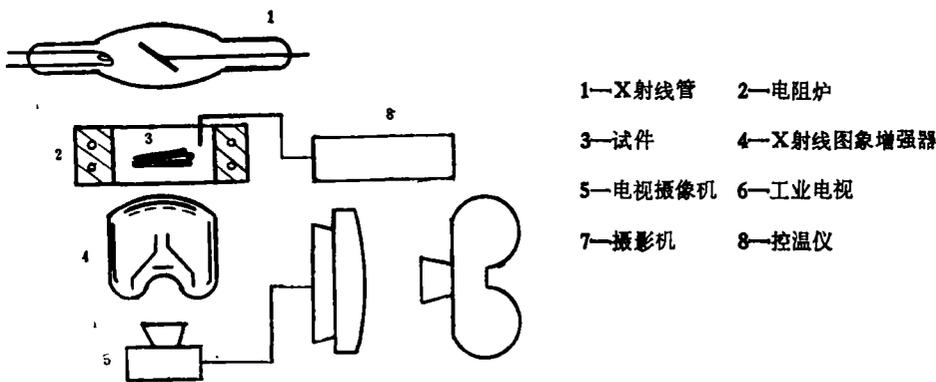


图1 试验装置示意图

件上。当达到钎焊温度时,炉温由控温仪保持恒温。X射线透过试件,经X射线图象增强器,由摄像机拍摄,在工业电视屏上显示钎料填缝过程,整个动态情况用35mm电影摄影机记录。

二、平行间隙时钎料填缝特点及其对致密性的影响

理想情况下液体在平行平板毛细间隙中的填缝是自动进行的过程,即填缝过程中扩大固液界面积、减少固气界面积是释放能量的自发过程,而且液体填缝速度应是均匀的,流体流动前沿形状应是规则的。实际钎焊时,钎料在平行的毛细间隙内的填缝情况则与其完全不同。图 2 (图版 1) 是间隙 $d=0.05\text{mm}$ 和 0.15mm 时,钎料填缝过程动态记录的片断。分析电影记录可知:平行间隙钎焊时,钎料填缝速度是不均匀的,沿试件宽度方向填缝各点的速度相差可达几倍至十几倍,不仅在前进正方向会有流速不均现象,且还受钎料侧向流动的影响。因此,钎料填缝前沿不整齐,流动路线紊乱,其结果出现许多“小包围”现象,钎料围住气体或钎剂而形成夹气、夹渣等缺陷。钎料填缝不均匀性与下列因素有关:平行间隙的显微不均匀和局部平整度的影响、母材表面氧化膜均匀程度和清洁度的影响、钎焊热规范参数的影响、钎剂去膜过程及钎料与母材间溶解和扩散作用的影响等等。这些因素任何细小的变化都可能导致填缝速度不均匀,造成缺陷。间隙大小对钎焊致密性也有一定影响,有时调整间隙大小使缺陷有所减少,但仍不能有效地提高致密性。

在平行间隙钎焊时已形成的夹气、夹渣,在钎焊过程中其形状、大小是不断变化的,如图 3 (图版 1)。但无论在钎料填缝过程中或钎料填满缝后,在钎缝结晶前,不管钎焊保温时间多长,甚至继续提高温度,这些缺陷绝大部分都不能从钎缝间隙中逸出或排除。

由于钎料填缝的不均匀性和夹气、夹渣在平行间隙中难以排除的特点,完全致密的钎焊接头是很难获得的。针对钎焊生产中某些产品对钎缝致密性的要求,采用不等间隙钎焊可以在一定程度上控制钎料流动路线及排除已生成的缺陷,提高钎焊致密性。

三、不等间隙钎焊时钎料填缝特点及缺陷的排除

不等间隙即不平行间隙,包括采用部分平行间隙,其平行小间隙部分是便于保证产品装配精确度。

1. 不等间隙钎焊时控制钎料流动路线的可能性

不等间隙钎焊时钎料填缝加入方式有大端加钎料、小端加钎料及侧端加钎料。试验中分别进行了钎料动态过程观察及电影记录,并通过电影记录对沿平板宽度方向填缝速度的分布进行了分析。图 4 (图版 1) 是不等间隙钎焊钎料填缝的记录片断。在填缝长度较短时,它的钎料填缝前沿比图 2 的情况较平整,流动路线很紊乱的现象有明显改善。图 5 (a)、(b) 分别是平行间隙与不等间隙钎焊时,前 4 秒中钎料填缝的速度分布。由图可见,钎料在平行间隙中填缝时的速度很不均匀,而在不等间隙中填缝速度相对比较均匀,从而减少了钎料的“包围”的可能性,减少了缺陷的产生。

(1) 钎料在不等间隙中运动特点 液态钎料在不等间隙中有自行先填满小间隙端

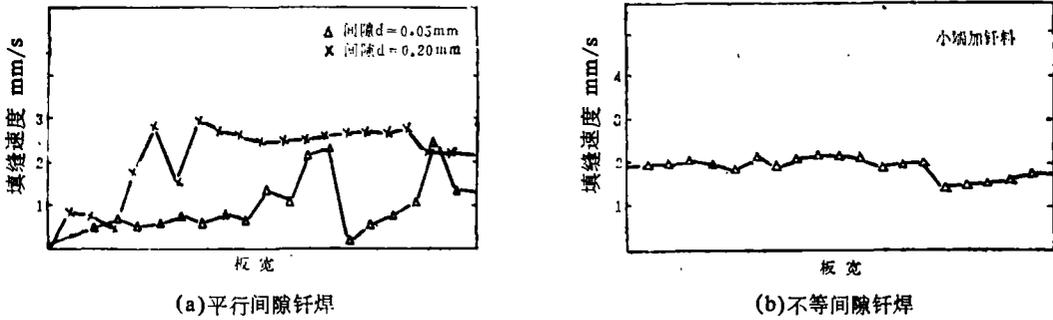


图5 钎料填缝速度分布

的特点,控制了钎料的流动方向,减缓了钎料紊乱的流动前沿,有利于致密的填缝。因为当液体体积不变时,液体向小端侧运动是扩大固液面积,减少气液面积的方向,是界面能释放的过程,是自发进行的过程。由分子物理学可知,毛细间隙内液体弯月面上的附加压强为^[3]:

$$p = \frac{2\sigma_{液气} \cdot \cos\theta}{d}$$

式中 $\sigma_{液气}$ 为液-气相间的界面张力, θ 为润湿角, d 为间隙。在其它条件相同情况下, p 随

d 的增大而减小。由液体的弯月面曲率半径 $R = \frac{d}{2 \cdot \cos\theta}$

可知,靠近小间隙端液气相界面的曲率较大,产生的附加压强也较大,对一片液态钎料,其各向附加压强总和将指向小间隙端,液体会自行向小端方向运动,如图6示。

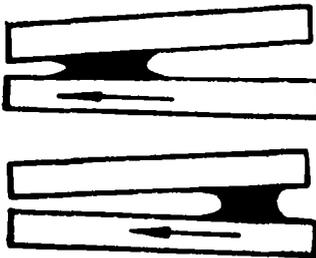


图6 在不等间隙中液体自行趋向小端

(2) 钎料在不等间隙中自行控制流动路线和调整填缝前沿 由于不等间隙作用原理,液态钎料具有自行定向运动的特点,无论自小端加钎料或从大端、侧端加钎料,钎料都首先填向附近较小间隙,见图7。例如自小端加钎料时(图7a),钎料向

图7 钎料在不等间隙内填缝示意图

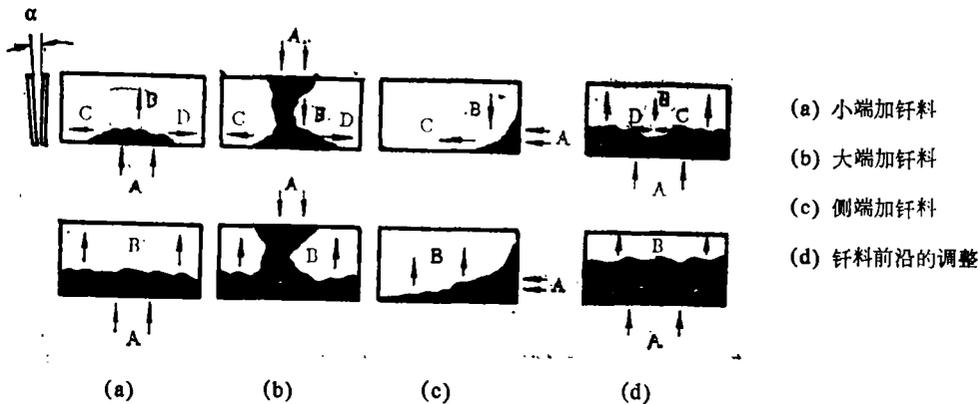


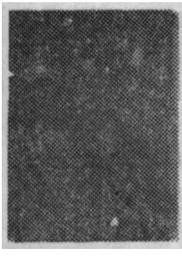
图7 钎料在不等间隙内填缝示意图
A: 加料方向, B、C、D、E: 钎料填充方向

C和D方向的填缝趋势大于向B方向的填缝,有可能先填满C和D方向后,钎料前沿较平整地向B方向运动,减少和克服了象平行间隙时不均匀填缝的情况,控制了钎料填缝流动路线,使钎缝较致密。另外,当局部地方由于某些因素而阻碍钎料填缝而出现前沿不整齐时(图7b),因间隙大小、前后不同,钎料先填向小间隙的趋势能自行调整前沿。

2. 不等间隙钎焊时夹气、夹渣自动排除的可能性

不等间隙钎焊在夹角较小,填缝较长,加钎料的方式,方法不同时,也会出现流动紊乱,形成大量夹气、夹渣的缺陷。不同的则是夹气、夹渣中的大部分能从钎缝中自动排除。

表1 不等间隙钎缝中缺陷分布比例(面积单位 mm^2)

加钎料方向	钎缝照片	部位*	各部位面积	缺陷面积	缺陷比例%
小端		上部	231	53	22
		中部	230	8	3
		下部	143	4	3
大端		上部	250	21	11
		中部	250	8	4
		下部	250	2	1
侧端		左部	229	25	11
		中部	229	11	4
		右部	229	4	2

* 将试件沿间隙变化方向平均分为三等份

(1) 夹气、夹渣的特点及分布 致密性缺陷主要是夹气、夹渣(关于气孔,未钎透及疏松等另文分析)。不等间隙钎焊接头断口缺陷形貌如图8(图版2)。不等间隙钎焊的夹气、夹渣的形状较多的是规则的“梨”形及椭圆形(而平行间隙钎焊的缺陷大多是不规则的形状)。夹气有两类,一类是钎剂填缝时包围气体而形成的夹气,缺陷的顶底部呈露出金属未去膜的氧化状,另一类是经钎剂去膜的地方,由于钎料填缝时的包围现象所形成的夹气,其顶底部呈钎料润湿漫流状。夹渣是钎料填缝时包围钎剂而形成的,图8(图版2)中缺陷周围呈“水痕”,即夹渣中氯化物(指软钎焊试件断口)残渣吸潮引起的。一般情况下,夹气中常伴有夹渣,但X射线并不能分辨。不等间隙钎焊时缺陷分布特点是:大端少,小端多且细小缺陷较多,表1说明在不等间隙钎焊接头各部位缺陷的分布比例。从电影记录中,试件大间隙部位缺陷在钎料刚填满钎缝时,数量并不

比小间隙端部位少,但最终结果,大端部位因夹气、夹渣自动排除较多,钎缝较致密。

(2) 夹气、夹渣自动排除的必要条件 夹气、夹渣在不等间隙中具有各向附加压强

不平衡的特点,因而夹气、夹渣具有定向运动的能力。从电影记录中可清楚地看到大量的夹气、夹渣从钎缝中自动向外排除。在小端和侧端加钎料时,在钎料填缝过程中就有缺陷的排除。在大端加钎料时,钎料填缝结束后,缺陷开始排除,图9(图版2)是缺陷排除时的影片片断。不等间隙中夹气、夹渣自动排除的必要条件是:夹气或夹渣两侧(沿间隙渐变方向)应具有足够的附加压强差。根据Laplace公式^[4]:

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

而夹气或夹渣大间隙和小间隙之间的附加压强差为:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \sigma \left(\frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2} \right)$$

$\frac{1}{R_1}$ 、 $\frac{1}{R_2}$ 、 $\frac{1}{R'_1}$ 、 $\frac{1}{R'_2}$ 分别是大间隙端及小间隙端弯液面的两正交平面的曲率。实际上小端曲率总是大于大端曲率^[5],小端处附加压强较大。所以夹气或夹渣上附加压强的总和,总是指向大间隙端,促使缺陷具有向大端运动的动力而予以排除(图10)。试验是在水平位置进行,如试件处于垂直位置,大间隙端向上时,加上浮力的作用,缺陷可能更易排除。

3. 影响夹气、夹渣排除的因素

(1) 缺陷形式的影响 归纳电影记录中夹气、夹渣运动规律可发现三种情况:可能完全排除的夹气(夹渣)、可能部分排除的夹气(夹渣)、不可能排除的夹气(夹渣)。完全排除的夹气,其特点是形状规则,大多呈

“梨”形或椭圆形,夹气的顶底部呈钎料润湿漫流状,即使有钎渣残留也能顺利排除。部分排除的夹气,它的起始形状有时是不规则的,夹气的顶底部总有部分未去膜的地方,有时还有钎渣的残留。分析残留在试件钎缝内缺陷的断口形貌,看到在缺陷顶底部位至少有50%面积未去膜。由流体动力学可知^[6],夹气的排除过程可以认为是它在不等间隙中相对于液态金属绕流移动的过程,即夹气的“梨头”前及左右表面的液态金属沿气液界面切向运动,形成液态金属与夹气间的绕流。如果在已形成的夹气处钎料金属不能润湿漫流,这就阻止了绕流过程的进行,夹气不能排除,或者至少是不能全部排除。不可能排除的夹气(或夹渣)除上述原因以外,还可能由于其体积过小,两侧(沿间隙渐变方向)的附加压强差不足以推动它。试验结果也证明,不能被排除的夹气内一般都有相当面积的未去膜或钎渣的残留(图8)或者夹气较小。

(2) 缺陷内部气体压力的影响 电影记录中可发现由于分散的气孔和夹气的集聚而造成某一夹气体积变大,促使附加压强差增加,加速夹气排除,这种特点在软钎焊试验中尤为明显。在软钎焊试验中,由于钎剂不断分解气体,缺陷有时由于内部气体不断膨胀能接连不断地“发射”数次夹气。如有一缺陷断续地“发射”14次,其面积累计约达155mm²。可以想象,这个缺陷如果是在平行间隙钎缝中至少要膨胀变大的。一般说,易释放气体的钎渣残留,对夹气排除的影响较大。采用“剂102”钎剂的硬钎焊的

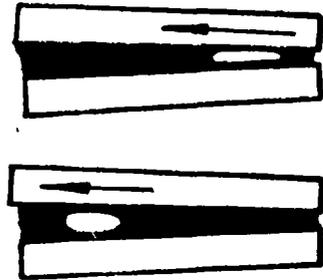


图10 在不等间隙内夹气移动方向

试验中发现缺陷几乎没有连续“发射”的现象，一般只是一次排除。

(3) 保温时间的影响 试件到达钎焊温度后的保温时间长短，既要保证钎料充分填缝，对不等间隙钎焊，保温时间又要使夹气、夹渣有足够时间向外排除。图11是不等间隙钎焊时缺陷比例随钎焊时间的变化情况。若要保证不等间隙钎焊提高致密性的效果，钎后的保温是很有必要的。

(4) 不等间隙夹角 α 的影响 不同夹角的不等间隙对相同尺寸的夹气、夹渣会造成不同的附加压强差，而没有足够大的附加压强差就不能有夹气、夹渣排除的动力。但太大的夹角又易失去毛细作用。应该指出，不同金属不等间隙钎焊所选夹角大小也应不同。

(5) 其它 钎料填缝是较复杂的物理、物理化学过程，不等间隙钎焊时夹气、夹渣的自动排除更是个复杂问题，影响因素很多，如钎剂、钎料的粘性；钎料与母材间的界面状态及物化反应；钎剂的去膜情况等等都有影响，这些有待于进一步试验研究。

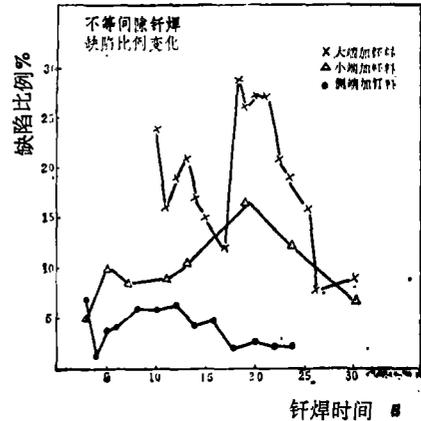


图11 钎焊时间与缺陷比例的变化

四、结 论

1. 平行间隙钎焊时，钎料填缝速度是不均匀的，填缝时钎料流动路线紊乱而产生包围现象，形成夹气、夹渣等致密性缺陷，这些缺陷常常难以从钎缝中排除。

2. 不等间隙钎焊时，钎料将自行首先填满附近较小间隙，因而在一定程度上能控制流动路线，提高钎缝致密性。

3. 不等间隙钎焊时，大部分夹气、夹渣能从钎缝中自动向外排除，是其主要优点。

4. 影响夹气、夹渣自动排除的主要因素有：缺陷的形式、缺陷内部的气体压力、保温时间及不等间隙夹角等等。

(1980年6月14日收到)

参加试验研究工作先后有：张鼎勋、高瑞琪、陈志高、吴希孟、王孙力、翟宗仁及王天军等同志。对潘炳勋、徐峰等同志给予的支持和帮助谨致谢意。

参 考 文 献

- (1) 陈定华、钱乙余, 气焊、切割及钎焊(钎焊部分), 1964年。
- (2) 陈定华、张鼎勋, 钎缝致密性研究, 1966年。
- (3) С.Э.Фриш, Курс общей физики, (1951).
- (4) Л.Л.Кунин, Поверхностные явления в металлах, (1951).
- (5) Е.А.史特劳夫, 分子物理学(下册)。
- (6) В.Ф.Левиц, Физико-химическая гидродинамика, (1959).

THE MECHANISM OF FLOW OF FILLER METAL INTO BRAZING
SPACE—INVESTIGATING THE FLOW CHARACTERISTICS OF
LIQUID FILLER METAL IN AN UNPARALLEL CLEARANCE

Chen Dinghua, Qian Yiyu, Li Yen

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

The main defects in brazed joints are enclosed gas (void) and flux. In the early nineteen sixties the authors noticed that the mode of the flow of filler metal and flux had much effect on the formation of voids and enclosures. It has already been proved by practice that the adoption of unparallel clearance brazing technique enhances the ultimate banded area of the brazed joint. In the experiments mentioned in this paper, X-ray with industrial TV aid and cine-camera for recording has been employed to observe the dynamic behaviour of liquid filler metal. Mainly Sn—Pb filler metal and copper alloy specimens are used in order to get an intensified X-ray film contrast. Brazing is done in the horizontal position.