

铜磷锡钎料钎焊黄铜接头组织及性能

李书珍¹ 吕登峰² 龙伟民² 刘亦贤¹ 陈永¹ 刘胜新¹

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001;

2. 郑州机械研究所 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 郑州 450001)

摘要 采用 B-Cu90PSn 钎料钎焊黄铜板获得对接接头, 并测试其抗拉强度, 利用扫描电镜及能谱仪对钎焊接头组织和断口形貌进行分析。结果表明, B-Cu90PSn 钎料与母材实现良好的冶金结合, 钎缝区主要由亮白色相和灰黑色相组成; 其中灰黑色相呈小黑片状胞晶形貌, 亮白色相由 α 固溶体和 $(\alpha + \delta)$ 共析体组成并呈树枝状相间分布; 对钎焊接头进行抗拉强度测试试验, 结果表明, 钎焊接头起裂源为焊缝相界面, 断口由大量高密度短而弯曲的撕裂棱和浅而较大的准解理区域组成。

关键词: 铜磷锡 钎焊接头 显微组织 抗拉强度 断口形貌

中图分类号: TG425+.2

0 序言

铜磷钎料由于熔点低、自钎性好、价格低且钎焊接头强度较高, 因此在钎焊铜和铜合金方面得到广泛的应用^[1-3]。铜磷钎料中, 磷能显著降低铜的熔点且有很好的自钎作用, 工业生产应用中的磷含量一般在 5 (质量分数, %) 以上。由于钎料中易形成大量 Cu_3P 脆性相, 导致合金在室温下呈脆性, 使铜磷钎料的韧性远远低于银基钎料, 且只能在热态下挤压和轧制, 因而限制了它的应用。为了优化铜磷钎料, 采用合金化的策略来改善 Cu-P 钎料的物理性能和钎焊力学性能。向铜磷钎料中添加银元素能有效降低铜磷合金的熔化温度、改善其加工韧性。但是, 银属于贵金属且资源有限, 随着银价格上涨和生产用量的增加, 铜磷银钎料的成本也不断攀升, 生产成本急剧增加。近年来, 节银钎料越来越引起人们的关注。锡在铜磷钎料中被认为是替代银最有效的元素。为了降低成本, 在铜磷钎料中添加锡元素替代银来降低铜磷钎料的熔点和成本, 提高钎料的焊接性能^[4-5]。

国内外对铜磷锡钎料的研究着重于 Sn 元素对铜磷钎料组织及性能等方面的研究^[6]。文中采用铜磷锡钎料钎焊黄铜板对接接头, 测量其接头的抗拉强度, 观察接头显微组织结构和拉伸断口形貌, 以期对铜磷钎

料成分的优化设计提供依据。

1 试验设计及方法

试验钎料为郑州机械研究所生产的铜磷锡钎料, 钎料的形态为丝状, 直径为 $\phi 1.6 \text{ mm}$, 铜磷锡钎料的化学成分及特性如表 1 所示。试验的母材为黄铜板 (Cu 质量分数为 60%, Zn 的质量分数为 40%), 尺寸为 $1.5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。黄铜板抗拉强度为 357 MPa。

表 1 B-Cu90PSn 钎料化学成分及固液相线

化学成分(质量分数, %)			固相线温度	液相线温度
Cu	P	Sn	$T_s / ^\circ\text{C}$	$T_L / ^\circ\text{C}$
90	6	4	652.2	683.6

根据 GB 11363—2008《钎焊接头强度试验方法》, 采用上述钎料钎焊黄铜板对接接头。钎焊前, 首先在酸性清洗剂中超声波清洗试件表面的氧化物及杂质, 其后用清水冲洗、砂纸打磨, 将打磨后的试件和钎料放入酒精中超声波清洗, 最后用吹风机吹干备用。

按图 1 所示的组装示意图装配钎焊接头, 黄铜板对接放置, 中间留约 0.1 mm 的自然间隙。将钎料放置在黄铜对接缝隙上方, 添加少量 J201 焊剂, 采用高频感应钎焊机在空气中焊接。钎焊后, 清除试件表面残留的钎剂和多余钎料, 其后将试样处理成标准拉伸试样。

采用 MTS C45.105 万能材料试验机测量钎焊接头的抗拉强度。利用 JSM-7500F 型扫描电镜 (SEM) 观

收稿日期: 2017-08-11

基金项目: 河南省科技攻关项目 (162102210005); 郑州大学大学生创新创业训练计划项目 (2017xcxy 217)。

察钎焊接头组织和拉伸断口形貌,并利用其自带的能谱分析仪(EDS)测试界面物相中各元素含量和分布。

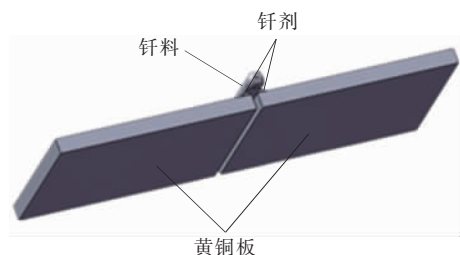


图1 黄铜板对接方式示意图

2 试验结果及分析

2.1 钎焊界面组织结构

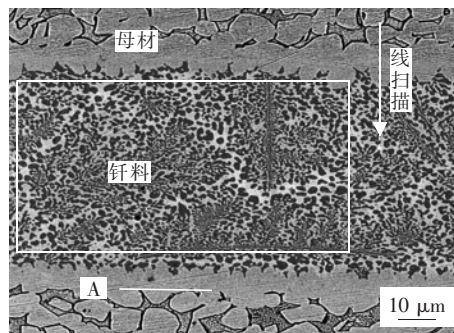
图2a是焊接接头界面结构,扫描电镜下在界面区没有观察到裂纹及孔隙的出现,说明试验中黄铜板与铜磷锡钎料已实现了良好结合。

仔细观察发现,钎焊焊缝区主要有白色相和灰黑色相组成。图2b为图2a中白色方框区域的微观组织形貌,表2为钎焊接头中相关位置的能谱分析。根据测试点A,B,C,D,E分析结果可知,接头中白色为富Sn相,灰黑色为富Cu相。

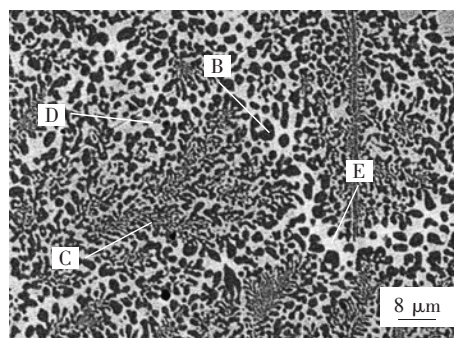
图2c是图2a中经过母材、扩散区一直到焊缝区的线扫描元素分布,可以看出钎料侧和母材侧发生了元素的相互扩散。母材侧Zn元素首先向扩散区聚集,Zn元素在扩散区达到最大值后急剧下降,Cu元素向钎料侧有较明显的扩散。结合测试点A到E的成分分析结果可知,母材中的Zn元素向钎料侧发生了溶解扩散。钎料中只有Cu元素向母材侧发生扩散,而Sn,P元素没有向母材扩散。根据Cu-Sn,Cu-Zn,Sn-Zn和Sn-P二元相图可知,钎焊温度下,Zn可完全固溶于Cu中,而Sn在Cu中的固溶度受Cu中Zn含量影响较大,当Cu中的Zn质量分数含量由零增加到38%时,Sn在Cu中的溶解度由15%(质量分数)下降至0.7%(质量分数),在Zn饱和的 α -Cu固溶体中Sn的溶解度很小,但当Zn含量增加到出现 β 相时,Sn的溶解度又会增加。

由于焊接过程中温度在较短时间内急剧升高到焊接所需温度,温度越高原子活动能力越强。此时,原子的活动能力足够强而发生长程扩散型相变,使新相成分明显改变,如共析转变等。

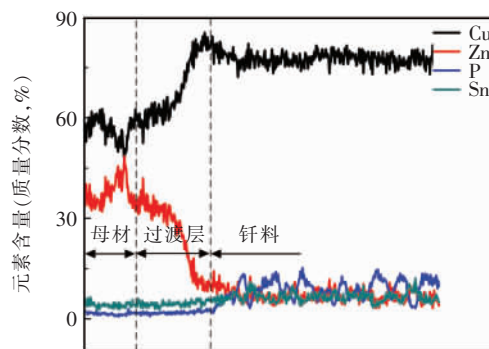
根据A点的成分测试和经过扩散区的线扫描数据分析可知,在钎缝的扩散层为钎料中合金元素与母材



(a) 钎焊对接接头 SEM



(b) 图a中钎料区域



(c) 接头 EDS 分析

图2 钎焊接头界面结构

表2 钎焊接头物相能谱分析(质量分数,%)

测试点位置	Cu	P	Zn	Sn
A	71.7	0.4	17.8	0.5
B	82.6	8.6	2.9	2.4
C	82.3	8.7	2.6	2.6
D	78.0	9.0	2.2	3.1
E	77.0	12.3	0.9	3.7

发生作用使母材表面熔解后与焊料中的元素发生反应生成的固溶体组织,主要相组成为 α -Cu固溶体,在扫描电子显微镜下看到的是灰色区域。焊缝区基体为呈树枝状偏析的 α 固溶体,由图2a可知, α 相存在严

重的晶内偏析。如图 2b 中 B 点所示,在凝固过程中 Cu_3P 为先析出相,由于结晶潜热的释放,当界面偶尔有凸起部分而深入温度较高的液体中时,其凸起部分就被再次熔化,从而使 Cu_3P 相在焊缝中呈现为黑色“豆点”状。抑制 Cu_3P 相长大的另一个因素是钎料中存在 Sn 元素,在钎焊温度下,部分 P、Cu 和 Sn 生成三元共晶组织,减少了基体中的 P 含量,进而阻止了 Cu_3P 相的生成。Sn 在 Cu 中的扩散困难,合金组织难以达到平衡,枝晶偏析严重在电镜下呈亮白色的片状,如图 2b 中 E 点所示。由 Cu-Sn-Zn, Cu-P-Zn, Cu-P-Sn 三元相图^[7]以及 E 点的 EDS 分析结果可推测出在钎焊温度下,可能发生三元共晶反应,生成 $\alpha\text{-Cu}$ 固溶体 + Cu_3P + $\text{Cu}_{17}\text{Sn}_3$ 三元共晶相,其中少量的 Zn 固溶于 $\alpha\text{-Cu}$ 相中。

图 2b 中 C 点附近呈灰黑色和灰白色相间分布的树枝状组织,其中灰黑色相为 Sn 含量较低的 α 固溶体, α 晶粒粗大有偏析;灰白色为富 Sn 相由 α 固溶体和 $(\alpha + \delta)$ 共析体组成。图 2b 中 D 点黑色相的边界区域为固溶了 Sn 元素的 Cu 基固溶体和 CuZn 为基的固溶体(β 相),晶内白色为从 β 相中析出的 $\alpha(\text{Cu})$ 相, α 和 β 相分布均匀,Sn 在 β 相中相对含量比 α 相稍高,在晶界处 Sn 含量较高,而 Cu 和 Zn 的含量较低。

根据对上述钎焊接头中各元素分布情况的分析及相关资料的查询,钎焊接头的组织形成过程可做如下解释:钎焊过程中,高温的液态钎料可溶解少量的母材表面,使靠近界面的液态钎料中含有一定浓度的 Zn 元素,在浓度梯度下,母材与钎料之间相关元素进行相互扩散,由于高频感应焊接加热时间很短,元素之间的相互扩散距离很窄。焊接结束后,界面首先形成一定的过冷度,液态钎料开始凝固,界面附近液态钎料中有大量的 Cu 富集,形成富 Cu 团簇,富 Cu 团簇容易首先在界面处形核,垂直于界面向焊缝区生长。由于钎料中含有 Sn 元素,焊缝中富 Cu 相具有较高的 Sn 含量,使焊缝中富 Cu 相固液相线温度降低,由于铜板导热速度快,从而抑制了界面和焊缝区富 Cu 相的树枝状长大,最终在界面和焊缝区形成小块状富 Cu 相。焊料熔化,在焊缝区形成树枝状分布的 α 相初晶,枝晶间形成 $(\alpha + \delta)$ 共析体和少量 $(\alpha + \delta + \text{Cu}_3\text{P})$ 共晶体。

2.2 钎焊接头的力学性能

B - Cu90PSn 钎料钎焊黄铜焊接接头的抗拉强度值见表 3,与平均抗拉强度值接近的对接接头拉伸试验应力 - 位移曲线如图 3 所示。从表 3 可以看出 B - Cu90PSn 钎料对接接头平均抗拉强度数值相对稳定。

由图 3 可以看出,在对接接头拉伸过程中,钎料焊接接头发生弹性变形后,发生一定程度的塑性变形。由于母材的屈服强度大于钎料,所以可以判断出应力 - 位移曲线中塑性变形来源于钎料的作用,这表明用 B - Cu90PSn 钎料钎焊黄铜焊接接头具有较好的力学性能。

表 3 B - Cu90PSn 钎料对接接头的抗拉强度

钎料	抗拉强度 R_m /MPa
B - Cu90PSn	307,303,289/300

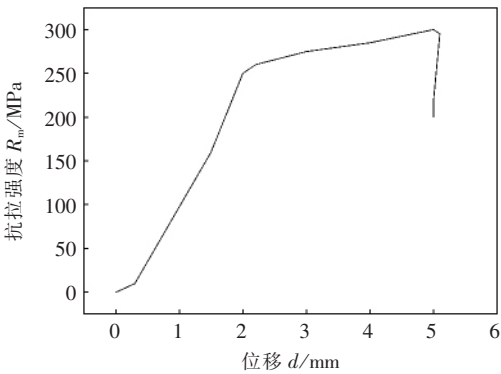


图 3 对接接头抗拉强度的应力 - 位移曲线

3 断口形貌分析

拉伸断口微观形貌如图 4 所示,断口较平整,断裂位置发生在钎缝区,断裂类型为准解理断裂。钎焊接头的力学性能与接头的组织结构密切相关,从图中可以看出断口由大量高密度短而弯曲的撕裂棱和较大的准解理区域组成。在断口拉伸过程中,不同部位产生许多解理小裂纹即为小平面,随着拉伸的进行解理裂纹不断的长大,最后以塑性方式撕裂残余连接部分,形成韧窝和韧窝带。研究认为^[8],韧窝的深浅与试样拉伸过程中经历的应力应变有关,B - Cu90PSn 钎料钎焊接头断口中韧窝带深浅均匀,由于所受的应力应变较大韧窝带有明显的撕裂痕迹。

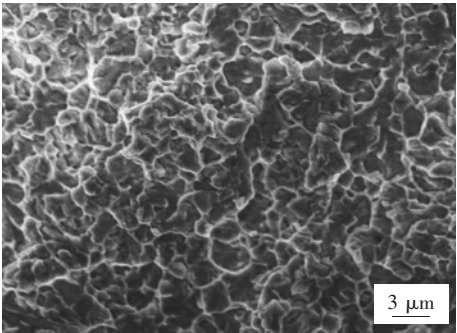


图 4 钎焊接头断口微观形貌

4 结论

(1) 钎焊接头中钎料和母材实现良好的冶金结合, 界面区发生 Cu, Sn 等元素的短距离扩散。

(2) 接头界面区和焊缝区组织由亮白色相和灰黑色相组成, 焊缝中局部出现的灰白色与灰黑色相间分布的树枝状组织为偏析的 α 固溶体和枝晶间 ($\alpha + \delta$) 共析体。

(3) B - Cu90PSn 钎料接头的平均抗拉强度为 300 MPa, 钎料中 Sn 元素在富 Cu 相中起到固溶强化的作用, 提高焊接接头抗拉强度。B - Cu90PSn 钎料断口为准解理断裂, 由解理小裂纹和韧窝带组成, 且韧窝较均匀。

参考文献

- [1] 黄杰, 薛松柏, 王博. 合金元素对 Cu-P 系钎料性能影响的研究现状[J]. 焊接, 2014(11): 14 - 19.
- [2] 龙伟民, 何鹏, 顾敬华, 等. 中国有色金属焊接材料的发展

现状及展望[J]. 焊接, 2011(11): 7 - 10.

- [3] 龙伟民, 张青科, 马佳, 等. 浅谈硬钎料的应用现状与发展方向[J]. 焊接, 2013(1): 18 - 20.
- [4] Long W M, Zhang G X, Zhang Q K. In situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during induction brazing process[J]. Scripta Materialia, 2015, 110: 41 - 43.
- [5] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 101 - 110.
- [6] 黄俊兰, 龙伟民, 张冠星. Sn 元素对铜磷钎料性能和组织的影响[J]. 焊接, 2012(3): 2 - 6.
- [7] 张启运, 庄鸿寿. 三元合金相图手册[M]. 北京: 机械工业出版社 2011: 430 - 438.
- [8] 孙茂才. 金属力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.

作者简介: 李书珍, 1988 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为新型钎料及其先进制造技术的研究。

30 mm 厚钛合金 TC4 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接接头组织及力学性能研究

李双^{1,2} 徐望辉² 李锋¹ 张宇鹏² 易耀勇²

(1. 沈阳工业大学, 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院), 广州 510650)

摘要 对 30 mm 厚钛合金 TC4 板材进行磁控电弧窄间隙 TIG 焊接试验, 并对其接头组织与力学性能进行检测分析, 包括金相组织、拉伸强度、冲击韧性及显微硬度。通过优化焊接工艺试验, 得到了外观成形美观、保护效果好, 未见宏观缺陷的窄间隙焊接接头。焊缝显微组织主要由片状 α 相、 β 相及细针状马氏体 α' 相组成。磁控电弧窄间隙 TIG 焊接中电弧在窄间隙坡口中进行周期性摆动, 能够降低焊接热输入的同时保证侧壁充分熔合, 得到的热影响区与常规 TIG 焊接方法相比要窄, 宽度大约为 1 ~ 2 mm。对接头进行拉伸试验, 断裂位置均在焊缝处, 断裂方式为韧性断裂, 接头抗拉强度可达到母材的 96% 以上。接头热影响区硬度值最高, 焊缝中心区显微硬度最低, 整个接头的硬度峰值出现在热影响区的粗晶区, 但未见明显的硬化及软化区域。

关键词: 钛合金 磁控电弧 窄间隙 TIG 焊 组织 力学性能

中图分类号: TG442

0 序言

钛合金因具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好等诸多

优点被广泛应用于航空、船舶、海洋工程、压力容器等领域^[1]。随着海洋工程装备向适用于深、远海环境方向发展, 钛合金厚板的应用也日趋广泛, 对于钛合金厚板的高效率、高质量、低成本的焊接工艺需求十分迫切。

窄间隙焊接技术采用较小间隙的 I 形或小角度 V 形坡口, 因而具有填充材料少、焊接效率高、焊接变形

收稿日期: 2017 - 04 - 13

基金项目: 广东省科技计划项目(2017A070701026; 2016B070701025); 广州市科技计划项目(201508030023; 201704030068); 广东省科技计划项目(2015B050502008)。