

微量Al元素添加对Sn-9Zn无铅钎料润湿性及焊点可靠性的影响

张晓敏¹, 张知航², 杨健², 肖皓月³

1. 海军装备部 四川成都 610000

2. 北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083

3. 重庆交通大学土木工程系 重庆 400074

摘要: 在电子封装领域, 无铅钎料的润湿性及焊点的可靠性对电子设备的质量起着至关重要的作用。研究了微量Al元素的添加对Sn-9Zn无铅钎料润湿性及焊点可靠性的影响。结果表明: 添加质量分数为0.01%和0.02%的Al元素, 使Sn-9Zn钎料的润湿角从37.26°下降至31.57°和27.22°。但质量分数为0.05%的Al添加量, 使润湿角上升到42.52°。这是由于Al元素富集于液态钎料表面, 优先与Zn元素形成致密性更高、缺陷更少的含Al氧化膜, 阻碍了O元素与液态钎料发生反应, 提升了钎料的抗氧化性。含Al氧化膜的厚度较薄, 有利于液态钎料的铺展。但Al元素添加过多时, 会使氧化膜形成过快, 劣化钎料的润湿性。质量分数为0.01%和0.02%的Al元素添加提升了Sn-9Zn/Cu焊点的可靠性, 但质量分数为0.05%的Al元素添加后, 恶化焊点的可靠性。最终得出, Sn-9Zn钎料中Al元素的最优添加量为质量分数0.02%。

关键词: Sn-Zn无铅钎料; 润湿性; 抗氧化性; 氧化膜; 剪切强度

Effect of minor addition of Al on the wettability and joint reliability of Sn-9Zn lead-free solder

ZHANG Xiaomin¹, ZHANG Zhihang², YANG Jian², XIAO Haoyue³

1. Naval Equipment Department, Chengdu 610000, Sichuan, China

2. University of Science and Technology Beijing, School of Materials Science and Engineering, Beijing 100083, China

3. Chongqing Jiaotong University, Department of Civil Engineering, Chongqing 400074, China

Abstract: In the field of electronic packaging, the wettability of lead-free solder and the reliability of solder joints play crucial roles in the quality of electronic devices. The effect of minor Al addition on the wettability of Sn-9Zn lead-free solder and solder joint reliability was investigated. The results indicate that 0.01wt.% and 0.02wt.% Al additions decrease the wetting angle of Sn-9Zn solder from 37.26° to 31.57° and 27.22°, respectively. However, 0.05wt.% Al addition increases the wetting angle to 42.52°. This is attributed to the fact that the Al is enriched on the surface of liquid solder, preferentially forming an Al-containing oxide film with higher density and fewer defects compared to Zn. This film hinders the reaction between O and the liquid solder, thereby enhancing the oxidation resistance of the solder. The thickness of the Al-containing oxide film is thin, facilitating the spreading of the

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075035)。

第一作者: 张晓敏, 本科, 高级工程师, 主要从事焊接相关研究工作, E-mail: 1056868079@qq.com。

通信作者: 杨健, 教授, 主要从事表面涂层技术、电子封装微连接技术等研究工作, E-mail: j.yang@ustb.edu.cn。

liquid solder. However, excessive addition of Al leads to rapid oxide film formation, which deteriorates the solder's wettability. 0.01wt.% and 0.02wt.% Al additions improve the reliability of Sn-9Zn/Cu solder joint, but the reliability of the joint is deteriorated by the addition of 0.05wt.% Al. The optimum addition of Al to Sn-9Zn solder is 0.02wt.%.
Keywords: Sn-Zn lead-free solder; wettability; oxidation resistance; oxide film; shear strength

1 序言

电子封装是一种用Sn基钎料将电子器件或导线连接到金属镀层基板上的焊接技术^[1, 2]。Sn-Pb钎料作为代表性Sn基钎料被广泛应用于电子封装领域^[3]，但由于Sn-Pb钎料有毒且不可生物降解，严重限制了其在工业应用中的使用^[4]，迫切寻找一种可以替代Sn-Pb钎料的新型钎料，近些年一直是电子封装领域的重点工作之一^[5]。

当前，在寻找新型无铅钎料方面已取得了显著成果。Sn基二元钎料如Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Zn、Sn-Bi^[6-9]系钎料及Sn基三元钎料如Sn-Ag-Cu^[10]钎料均被广泛报道。其中，Sn-Zn系钎料因其低成本，以及与Sn-Pb钎料相近的熔点和优秀的力学性能而拥有独到的优势^[11]。然而，Sn-Zn钎料在实际应用中仍面临一些挑战，尤其是其抗氧化性能差和润湿性能不佳等问题，限制了其在电子产品中的广泛应用^[12]。

Sn-Zn钎料的润湿性差主要归因于液态钎料表面多孔性Zn的氧化膜迅速增厚，导致其在Cu基板上的铺展受到限制^[13]。为了改善这一问题，研究者们普遍采用合金化方法，通过调整液态钎料表面氧化膜的结构或成分来改善其抗氧化性能，进而提升其润湿性。例如，杨娇娇^[14]通过添加质量分数为2%的In元素在熔融钎料表面形成In₂O₃氧化膜，使Sn-9Zn钎料的铺展率增加了6.31%。肖正香^[15]研究发现，添加0.08%的Pr元素，可以降低液态钎料的流动性，从而减少Zn元素与O元素反应的速率，使氧化膜的厚度变薄，从而提升Sn-9Zn钎料的润湿性。陈文学等^[16, 17]认为，添加微量Al元素也可以改善Sn-Zn钎料的抗氧化性与润湿性。这可能是由于Al元素与O元素具有较高的亲和性，使Al元素在液态钎料表面优先形成致密的Al₂O₃氧化膜，阻碍了Zn与O的反应。然而，这些研究中均未能给出合金元素对氧化膜的结构或成分影响的直接证据。

另外，焊点的可靠性也是评价无铅钎料综合性能的另一重要指标^[18]。因此，有必要综合考虑合金

化元素对Sn-Zn钎料润湿性与Sn-Zn/Cu焊点可靠性的影响，进而筛选出最优的合金化元素添加量。基于此，本文研究了Al元素添加量对Sn-9Zn钎料润湿性的影响，特别是Al元素对液态钎料表面氧化膜的影响进行表征与分析。此外，文中还基于Al元素添加量对Sn-9Zn/Cu焊点可靠性的影响，给出了最优的Al元素添加量。此研究可以为合金化元素对Sn-Zn系钎料抗氧化性、润湿性和焊点可靠性的研究提供新的方法与思路，为国内电子封装软钎焊技术的发展奠定基础。

2 试验材料和方法

试验所用钎料为采用盐浴法（质量比KCl：NaCl=1：1）制备的Sn-9Zn-xAl（x=0、0.01、0.02、0.05）钎料合金，盐浴所用金属原材料均为纯度>99.95%的Sn、Zn、Al颗粒。按钎料理论成分分别称取各个金属颗粒，经酸洗并用去离子水清洗后，在金属颗粒表面浇盖熔融盐，且在750℃下保温1h并不断搅拌金属与熔融盐的混合物，随后在空气中冷却至室温。重复熔化-冷却步骤3次，以确保钎料合金成分均匀。使用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，Agilent 7800）检测了钎料合金的成分，见表1。

表1 Sn-9Zn-xAl钎料成分（质量分数）（%）

钎料	Sn	Zn	Al
Sn-9Zn	90.680	9.320	—
Sn-9Zn-0.01Al	90.693	9.299	0.008
Sn-9Zn-0.02Al	90.654	9.327	0.019
Sn-9Zn-0.05Al	90.643	9.305	0.052

使用差示扫描量热仪（DSC，TA-DSC 25）在氩气氛围下测定了Sn-9Zn-xAl钎料的熔化特性。润湿性测试在SCI-1700高温接触角测量仪上进行。将尺寸为2.5mm×2.5mm×2.5mm的钎料除去表面氧化膜后，放置在尺寸为10mm×10mm×10mm的

Cu基板（经抛光处理）中心。钎料和基板上均覆盖松香基助焊剂。使用高纯度（99.999%）氩气对样品室进行3次洗气后，以10℃/min的速度将样品室加热到260℃，并保持在260℃直到润湿角不再变化为止。使用高温接触角测量仪的摄像头拍摄润湿角形貌，并利用内置软件测量润湿角。润湿角的测量方法为量高法^[5]。使用扫描电子显微镜（SEM，GerminiSEM 500）结合能量色散光谱仪（EDS）观察润湿界面的微观形貌和成分。

使用热重分析法（TGA，Pyris TGA）测试钎料的抗氧化性能，以20℃/min的升温速率加热至260℃，然后保温10min，测试钎料质量随时间的变化，测试气氛为空气。使用SEM观察合金表面氧化膜的形貌，并利用X射线光电子能谱仪（XPS，Thermo Scientific ESCALAB 250 Xi）对氧化膜的成分进行测定。

在去除氧化膜后，将覆盖有松香基助焊剂的钎

料（20mm×10mm×0.15mm）放在两个多晶Cu基板（20mm×10mm×3mm）之间。焊接过程在回流焊炉中进行，通入氩气后以10℃/min的速度将样品室加热到260℃并保温120s。剪切试验使用AG-X Plus电子万能试验机在常温下进行，加载速度为1mm/min。此外，为了确保测量结果的准确性，每个剪切样品均测试了3次。

3 试验结果和分析

3.1 Al元素添加量对Sn-9Zn-xAl钎料润湿性的影响

众所周知，金属熔点的上升会导致在相同温度下液态金属的流动性变差^[19]。因此，首先研究了Al元素添加量对Sn-9Zn钎料熔点的影响。不同Al含量的Sn-9Zn-xAl钎料的DSC曲线如图1所示。从图1可看出，Sn-9Zn钎料的熔点为199.3℃，当添加0.01%的Al元素后，钎料熔点下降到198.6℃，但添加0.02%和0.05%的Al元素，会使钎料的熔点分别上升

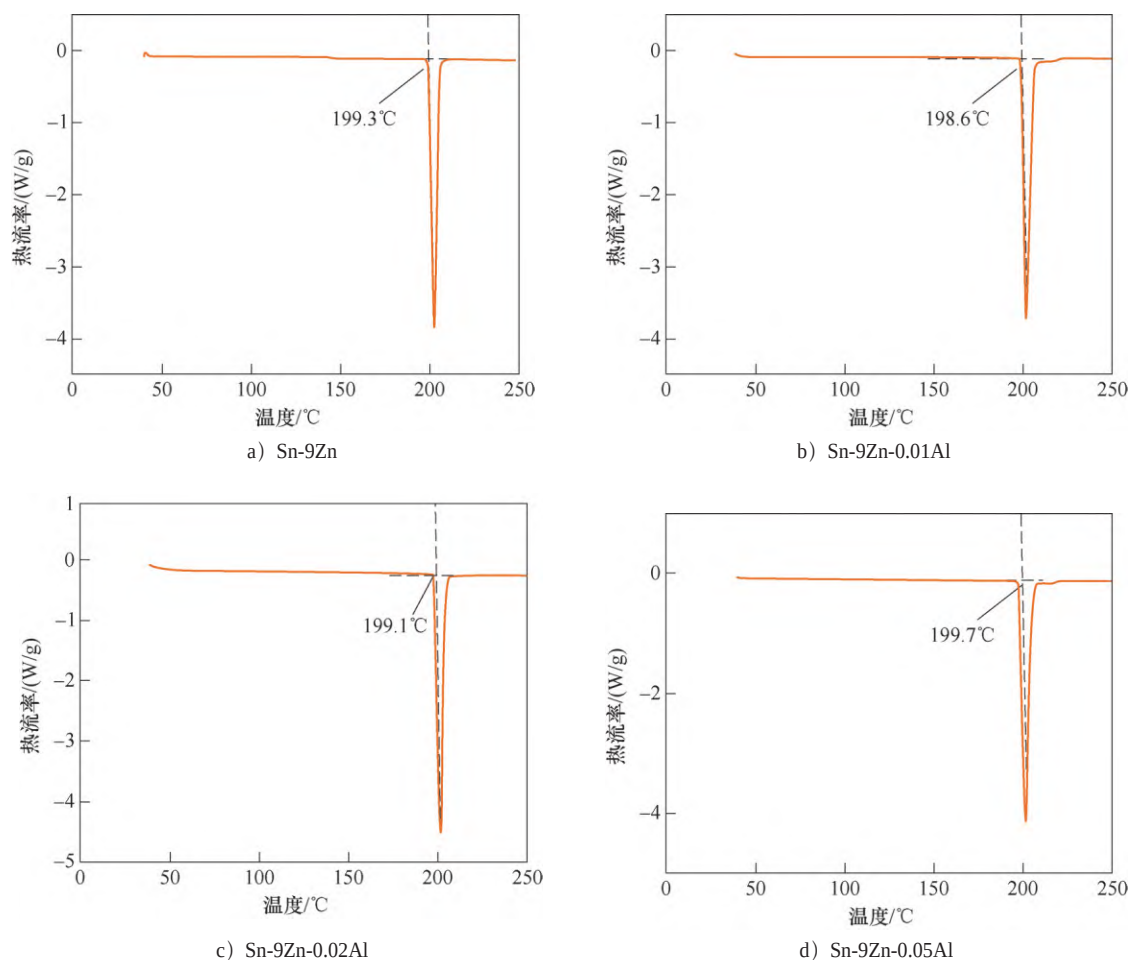


图1 Sn-9Zn-xAl钎料DSC曲线

到199.1℃和199.7℃。总体来看,微量Al元素的添加对Sn-9Zn钎料的熔点影响较小,不会对钎料的流动性产生显著的影响。

在260℃下,不同Al含量的Sn-9Zn-xAl钎料润湿角形貌如图2所示,铺展面积见表2。从图2和表2中可发现,Sn-9Zn、Sn-9Zn-0.01Al、Sn-9Zn-0.02Al

和Sn-9Zn-0.05Al钎料在Cu基板上的润湿角分别为37.26°、31.57°、27.22°和42.52°,铺展面积分别为40.7mm²、45.3mm²、48.8mm²和37.2mm²。说明添加0.01%和0.02%的Al元素后,可以改善Sn-9Zn钎料的润湿性,但添加过量(x=0.05)的Al元素后,反而恶化Sn-9Zn钎料的润湿性。

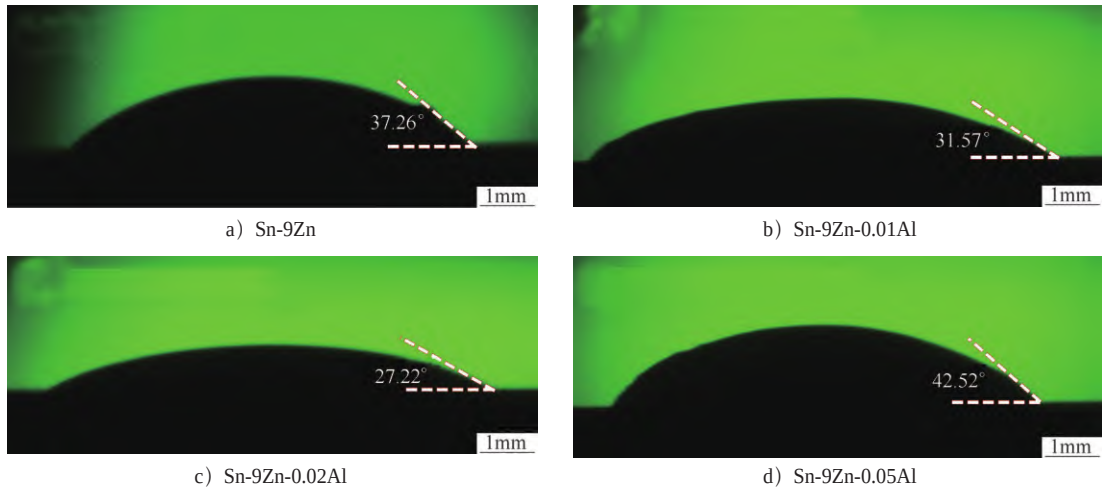


图2 Sn-9Zn-xAl钎料在Cu基板上的润湿角形貌

表2 Sn-9Zn-xAl钎料在Cu基板上的铺展面积 (mm²)

钎料	铺展面积
Sn-9Zn	40.7
Sn-9Zn-0.01Al	45.3
Sn-9Zn-0.02Al	48.8
Sn-9Zn-0.05Al	37.2

图3所示为Sn-9Zn-xAl钎料与Cu基板的界面显微形貌。由图3可看出,所有界面均表现出相似的层状结构。上方灰色部分为Sn-9Zn-xAl钎料中的Sn基体,伴随着少量的黑色针状富Zn相弥散分布于Sn基体中。在钎料与基体中间生成了一层界面金属间化合物(IMC)。对4个界面的IMC进行EDS分析,结果见表3。由表3可发现,4个界面中Cu与Zn原子比均接近5:8,说明4个界面中金属间化合物均为Cu₅Zn₈。值得注意的是,当Sn-9Zn钎料中添加Al元素后,Cu₅Zn₈中并未发现Al元素存在,说明微量Al元素的添加并不会对IMC的成分产生影响。此外,从图3中还可发现,Sn-9Zn钎料与Cu基板界面中Cu₅Zn₈的厚度为2.06μm。当Al元素添加量分别为0.01%、0.02%和0.05%时,Cu₅Zn₈的厚度分别为1.92μm、2.14μm和2.1μm。因此,可以认为添加Al元素并不会因改变固-液表面张力,或影响界面反应

的剧烈程度而对钎料的润湿性产生影响^[20]。

如前所述,Sn-9Zn钎料的润湿性与其抗氧化性有着重要的联系,因此对不同Al元素添加量下Sn-9Zn-xAl钎料的抗氧化性展开了研究,不同Al添加量下Sn-9Zn-xAl钎料的熔化TGA曲线如图4所示。从图4中可看出,Sn-9Zn、Sn-9Zn-0.01Al、Sn-9Zn-0.02Al和Sn-9Zn-0.05Al钎料在空气中氧化10min后,质量分别增长到102.51%、101.83%、101.57%和101.15%。结果表明,Al元素的添加有助于提升Sn-9Zn钎料的抗氧化性,且钎料的抗氧化性随着Al元素添加量的增多而不断提高。值得注意的是,氧化初期TGA曲线的斜率在添加Al元素后表现出了明显的增高趋势,且Al添加量越多时,斜率越大。以钎料的质量增加到氧化前的100.5%为例,Sn-9Zn钎料需要氧化0.329min,而添加Al元素的Sn-9Zn-0.01Al、Sn-9Zn-0.02Al和Sn-9Zn-0.05Al钎料仅需0.083min、0.057min和0.047min。但是,Sn-9Zn-0.01Al、Sn-9Zn-0.02Al和Sn-9Zn-0.05Al钎料的TGA曲线反而在氧化后期表现出更小的增长速率。特别是对于Sn-9Zn钎料,其TGA曲线在后期的斜率远大于添加Al元素的Sn-9Zn-xAl钎料。这说明Al元素的添加促进了液态钎料熔化后与氧气的快速反应,更

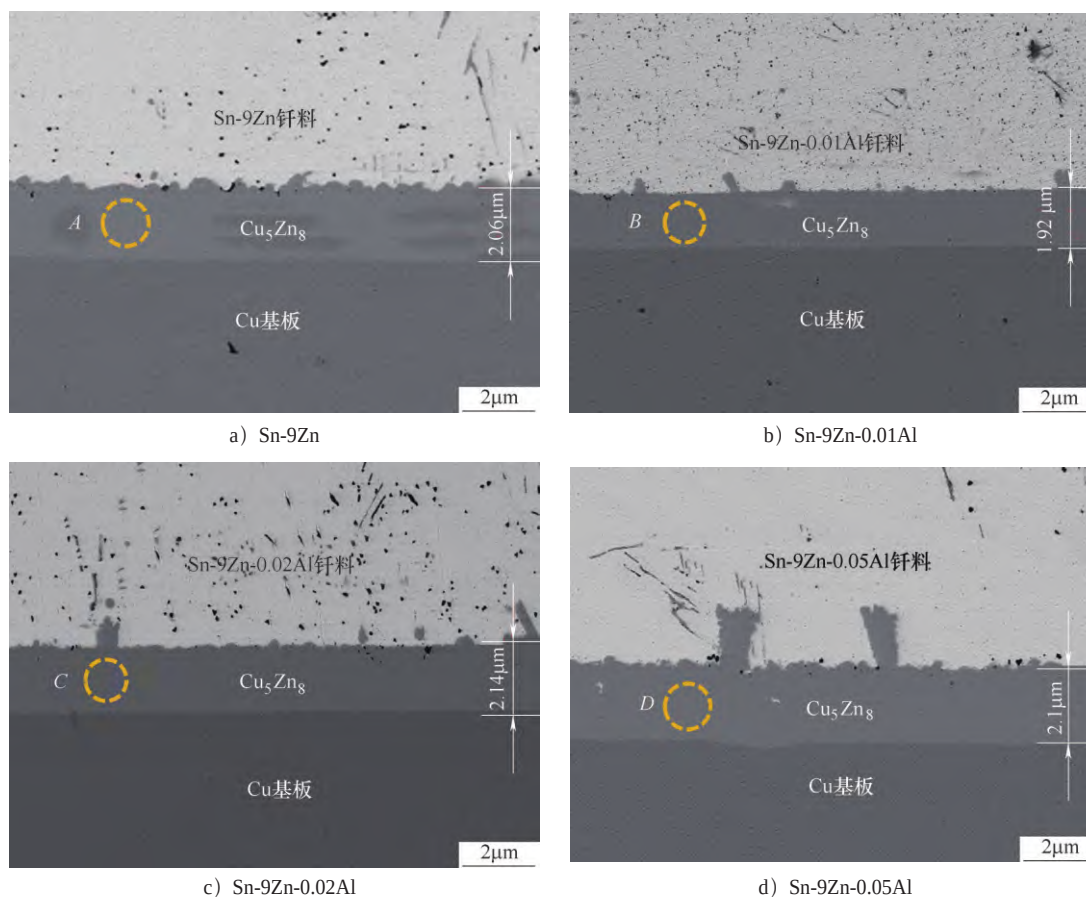


图3 Sn-9Zn-xAl钎料与Cu基板焊点界面组织形貌

表3 图3中不同润湿界面IMC成分
EDS分析结果(原子比) (%)

元素		Sn	Zn	Cu	Al
检测位置	A	1.1	59.7	39.2	—
	B	1.5	60.0	38.5	0.0
	C	1.4	59.8	38.8	0.0
	D	1.1	59.9	39.0	0.0

快地生成了氧化膜,该氧化膜可以抑制随后液态钎料与氧气的反应,减缓了钎料整体的增重速率,提

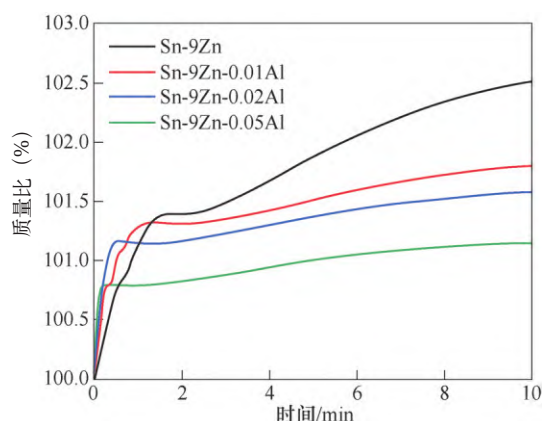


图4 Sn-9Zn-xAl钎料的熔化TGA曲线

升了钎料的抗氧化性。这种特性随着Al元素添加量的增多而表现得更为显著。

为探究Al元素添加对Sn-9Zn钎料抗氧化性影响的原因,使用SEM观察了不同Al添加量下Sn-9Zn-xAl钎料氧化后表面的氧化膜形貌,如图5所示。图5a所示为不添加Al元素时Sn-9Zn合金氧化膜形貌。由图5a可知,大部分区域分布着大小不一的凸起,这些凸起区域总体纹路呈水平分布,同时不规则分布有黑色凹孔。图5b~d是分别添加0.01%、0.02%、0.05%Al元素含量时合金钎料氧化后表面的氧化膜形貌。由图5b可知,氧化膜整体较光滑,主要由高低分布的片状区域组成,在这些片状区域交接边缘处分布有少量黑色凹孔和少量粗糙条状区域。由图5c可知,区域较平滑,整体纹路呈竖直,只有少数区域交界处有细长条状粗糙区域。从图5d观察到,在平整的氧化膜表面分布着大小不一的颗粒球状物质。这种球状物质会阻碍液态钎料的铺展,对钎料的润湿性带来负面影响。总体来看,开始添加Al元素后,钎料氧化膜表面上分布着的黑色

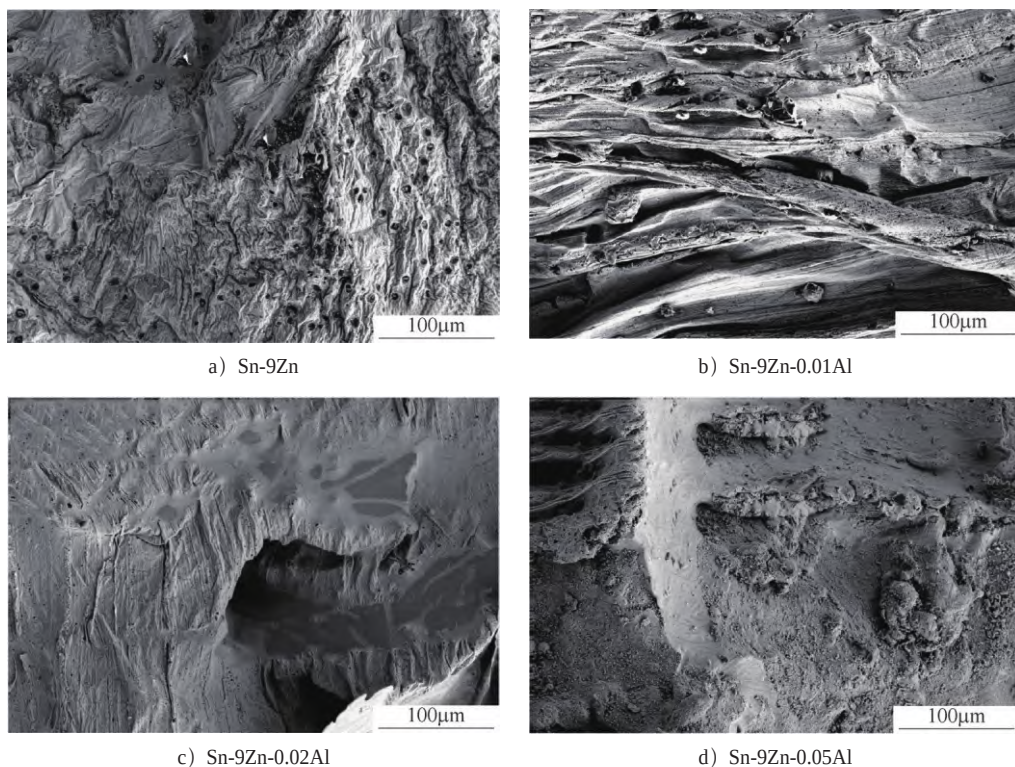


图5 Sn-9Zn-xAl钎料表面氧化膜形貌

凹孔数量减少,且表面开始变为光滑片状组织。继续添加Al元素,氧化膜表面逐渐变为一块整体光滑区域,黑色凹孔几乎消失。因此,Al元素的加入使Sn-9Zn钎料的氧化膜更为致密,缺陷显著减小,减少了O元素通过缺陷直接进入氧化膜内部,从而与液态钎料直接接触的机会。这一现象导致添加Al元素后的Sn-9Zn-xAl钎料后期的氧化增重速率明显小于Sn-9Zn钎料。

为探究Al元素加入后使氧化膜致密性增加的原因,对不同Sn-9Zn-0.02Al和Sn-9Zn-0.05Al钎料表面氧化膜进行XPS分析,其总谱如图6所示。从图6可看出,检测到了Al、Zn、O、Sn和C峰。检测到的C与样品暴露于环境大气期间吸附在表面上的杂质有关。通常利用C 1s峰结合能(Binding Energy, BE) = 284.8eV为参考,校正峰位偏移^[21]。显然,Al、Zn、Sn元素均可能与O氧元素结合形成氧化膜,因此为准确测定氧化膜成分,需对O元素峰进行分峰拟合,分峰拟合结果如图7所示。

图7a、b所示分别为Sn-9Zn-0.02Al和Sn-9Zn-0.05Al钎料的O 1s分峰拟合结果。在图7a中分别于BE = 531.6eV和BE = 533.6eV观察到了两个峰值,分别对应Zn-O峰与Al-O峰^[22, 23]。结果表明,在氧化膜

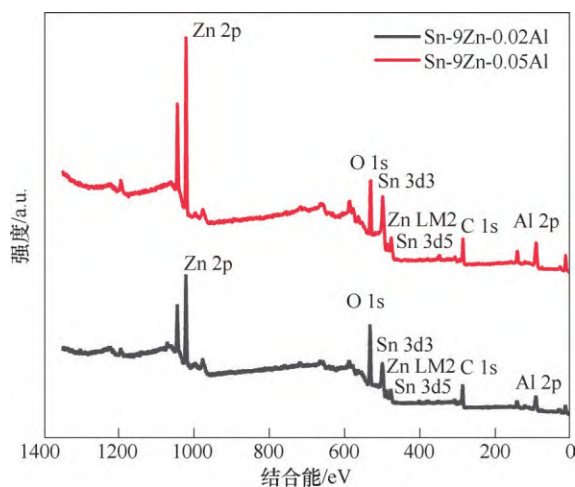


图6 Sn-9Zn-xAl钎料表面氧化膜XPS总谱

的成分中包含Zn元素与Al元素,但未检测到Sn的氧化物。相似地,在图7a中分别于BE = 531.1eV和BE = 532.0eV观察到了Zn-O峰与Al-O峰,同样没有检测到Sn的氧化物存在。因此,总谱中检测到了Sn的峰值可能是因为氧化膜厚度较薄,导致检测到钎料中的Sn基体。根据图6与图7的结果,计算了氧化膜中Zn元素与Al元素的含量,结果见表4。根据表4的结果,Sn-9Zn-0.02Al钎料氧化膜中Al元素与Zn元素的比例约为1:9,而Sn-9Zn-0.05Al钎料的氧化膜中Al元素与Zn元素的比例约为2:8。显然,当Al的添

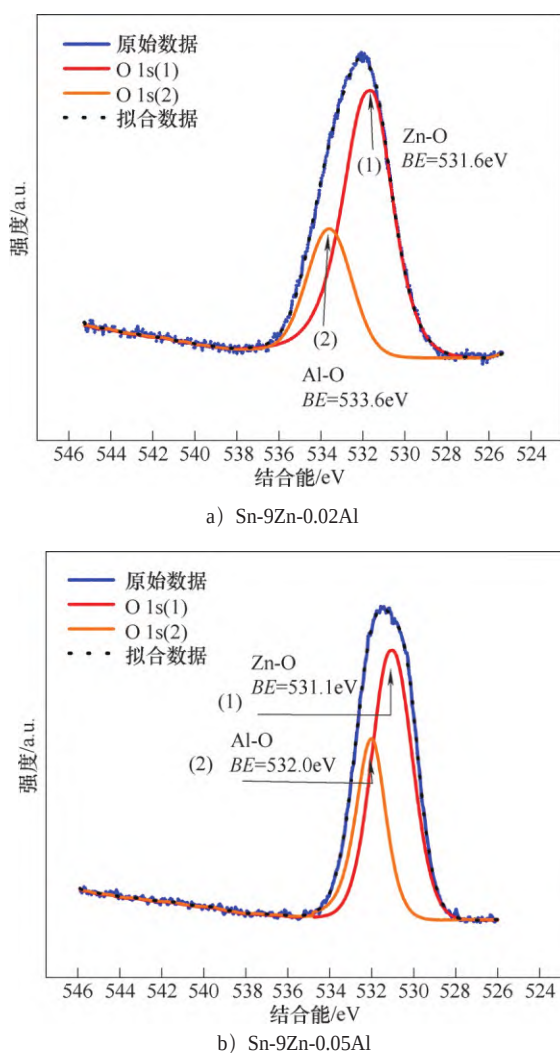


图7 Sn-9Zn-xAl钎料表面氧化膜XPS分析中O 1s的分峰拟合结果

表4 Sn-9Zn-0.02Al和Sn-9Zn-0.05Al钎料表面氧化膜XPS分析结果

钎料	元素	BE / eV	峰面积 / (CPS·eV)	原子比 (%)
Sn-9Zn-0.02Al	Al	73.37	7480.11	10.31
	Zn	1021.71	1994321.8	89.69
Sn-9Zn-0.05Al	Al	74.01	8929.55	18.57
	Zn	1022.02	1200748.84	81.43

加量更大时,氧化膜中的Al元素含量也较高。值得注意的是,这一比例远大于钎料成分中两元素的比例,说明液态钎料表面在形成氧化膜的过程中,Al元素倾向于向液态钎料表面扩散。由于Al元素比Zn元素更高的活泼性,Al元素会优先Zn元素与O元素发生反应而形成氧化膜,因此导致含Al元素的Sn-9Zn-xAl钎料熔化后氧化增重更快,此时TGA曲线

斜率较大。此外,由于Al的氧化膜致密性高于Zn的氧化膜,因此Al含量较高的氧化膜表现出了更高的致密性和更少的缺陷(见图5),这会导致与液态金属发生反应的O元素含量下降,在提高抗氧化性的同时生成了厚度较薄的氧化膜,利于液态钎料的铺展,提高了其润湿性。然而,过多的Al元素添加也会使氧化初期在钎料表面富集的Al元素过多,快速形成了Al含量更多的氧化膜。虽然此时氧化膜的缺陷更少,钎料的抗氧化性更强,但氧化膜的迅速生成反而阻碍了液态钎料的铺展,给钎料的润湿性带来不良影响。

3.2 Al元素添加量对Sn-9Zn-xAl/Cu焊点可靠性的影响

如前所述,焊点的可靠性也是评价无铅钎料综合性能的另一重要指标。因此,研究了Al元素添加量对Sn-9Zn-xAl/Cu焊点可靠性的影响。

图8所示为钎焊后Sn-9Zn-xAl/Cu焊点的剪切力。从图8可看出,Sn-9Zn/Cu、Sn-9Zn-0.01Al/Cu、Sn-9Zn-0.02Al/Cu和Sn-9Zn-0.05Al/Cu焊点的剪切力,分别为4216N、4521N、5106N和3987N。说明添加0.01%和0.02%的Al元素后,可以改善Sn-9Zn/Cu焊点的可靠性,但添加过量(0.05%)的Al元素时,将对Sn-9Zn/Cu焊点的可靠性产生负面影响。

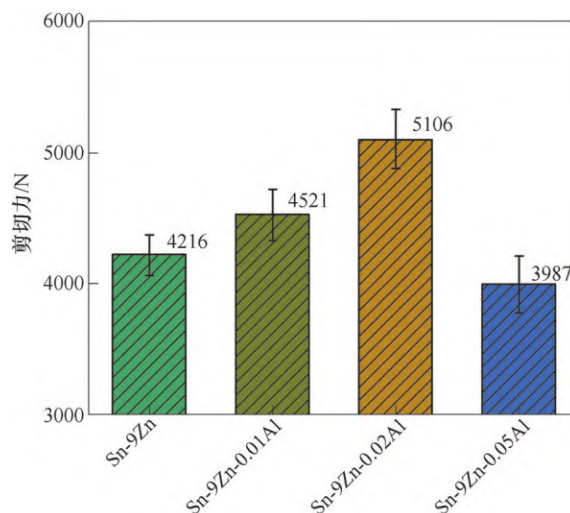


图8 Sn-9Zn-xAl/Cu焊点剪切力

大量研究表明,断裂机制对焊点的剪切强度起着重要作用^[24, 25]。因此,研究了不同Al元素添加量下Sn-9Zn-xAl/Cu焊点的断口形貌,如图9所示。从图9a可发现,在未添加Al的情况下,Sn-9Zn/Cu焊

点的断口大部分呈清晰的韧窝状结构,焊点部分断裂在钎料内部,呈现典型的韧性断裂特征。图9所示断口上不同位置的EDS分析结果见表5。但根据表5中的EDS结果,在断口处发现了少量的 Cu_5Zn_8 化合物,说明焊点有部分区域断裂在 $\text{Sn}/\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ 界面附近,断口表现为韧脆混合断裂模式。当添加0.01%和0.02%的Al元素后(见图9b、c),断口的韧窝状结构更为明显,完全断裂于Sn基体中,呈现完全的韧性断裂模式。此时,焊点被认为具有良好的抗剪强度^[26]。然而,在添加0.05%的Al元素后(见图9d),断口的形貌出现了显著的变化。该断口形貌表现为裸露的 Cu_5Zn_8 分布在Sn基体网格中的结构,呈现韧脆混合断裂的特征,说明焊点的断裂发生在

$\text{Sn}/\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ 界面处^[27]。这可能是由于 $\text{Sn}-9\text{Zn}-0.05\text{Al}$ 钎料在Cu基板上的润湿性较差,导致焊点的界面在钎焊后出现了大量的缺陷。在受剪切力条件下,裂纹首先在这些缺陷处形成,然后扩展到钎料中,因此焊点断裂在 $\text{Sn}/\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ 界面附近^[28]。基于以上试验结果,可以发现在相同的钎焊工艺参数下,当 $\text{Sn}-9\text{Zn}-x\text{Al}$ 钎料的润湿性较差时,焊点的剪切抗性较差,这是由于润湿性较差时钎焊界面处缺陷浓度更高,使焊点的断裂模式从韧性断裂(断裂在钎料内部)逐渐转变为韧脆混合断裂(断裂在 $\text{Sn}/\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ 界面处)。因此,考虑到润湿性较差时将对接点可靠性产生严重的负面影响,认为 $\text{Sn}-9\text{Zn}$ 钎料中Al的最优添加量为0.02%。

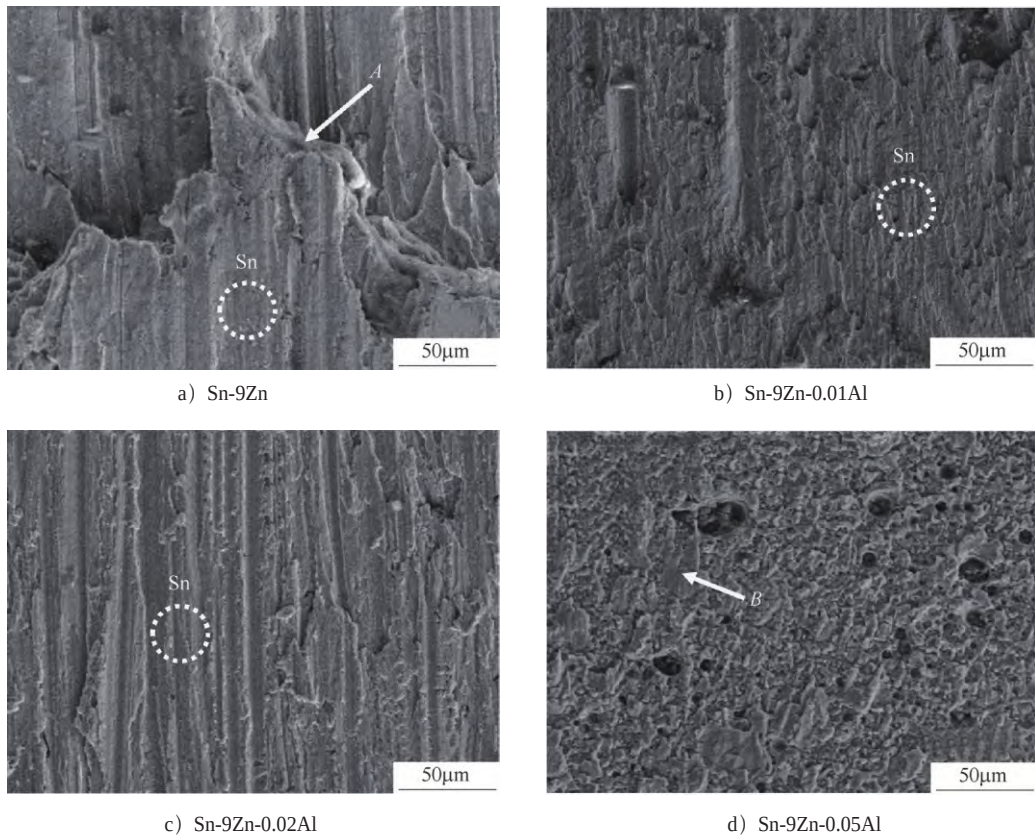


图9 $\text{Sn}-9\text{Zn}-x\text{Al}/\text{Cu}$ 焊点断口形貌

表5 图9中断口上不同位置的EDS分析结果(原子比)(%)

位置	Sn	Zn	Cu	Al
A	0.8	59.9	39.3	0.0
B	2.1	57.2	40.7	0.0

4 结束语

1) 添加0.01%和0.02%的Al元素,可以改善Sn-

9Zn钎料的润湿性,润湿角从 37.26° 分别下降至 31.57° 和 27.22° 。但添加0.05%的Al元素,将使润湿角上升到 42.52° ,劣化 $\text{Sn}-9\text{Zn}$ 钎料的润湿性。

2) 添加Al元素可以改善 $\text{Sn}-9\text{Zn}$ 钎料的抗氧化性,且随着Al元素添加量的不断提高,钎料的抗氧化性逐渐增强。这是由于Al元素富集于液态钎料表面,优先于Zn元素形成致密性更高、缺陷更少的含

Al氧化膜,阻碍了O元素进入氧化膜内部进而于液态钎料发生反应。

3) 含Al氧化膜的厚度较薄,有利于液态钎料的铺展,因此添加微量Al元素改善了Sn-9Zn钎料的润湿性。但添加Al元素过多时,会使氧化膜形成过快,不利于液态金属的铺展,劣化钎料的润湿性。

4) 添加0.01%和0.02%的Al元素,可以使Sn-9Zn/Cu焊点完全断裂于Sn基体中,呈现完全的韧性断裂模式,使剪切力从4216N提升到4521N、5106N。但添加0.05%的Al元素后,焊点的断裂发生在Sn/Cu₅Zn₈界面处,使剪切力下降到3987N,这可能是因为润湿性较差时钎焊界面处缺陷浓度更高。因此,Sn-9Zn钎料中Al元素的最优添加量为0.02%。

参考文献:

- [1] 高子旋, 屈敏, 康博雅, 等. Ag-GNSs/Sn-Ag-Cu复合钎料焊点的润湿性能及界面生长特征研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53 (13) : 50-54.
- [2] ZHANG Z H, LIU Y J, MA T, et al. Influence of Pt addition on corrosion resistance of Sn-9Zn-0.02Al-xPt solder alloys[J]. Corrosion Science, 2024, 240: 112430-112430.
- [3] LI F, PU C J, LI C J, et al. Study on the effects of Ag addition on the mechanical properties and oxidation resistance of Sn-Zn lead-free solder alloy by high-throughput method[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34 (4) : 322.
- [4] 刘亚光, 陈磊, 胥晓晨, 等. Sn-3Ag-0.5Cu合金与金属Cu的润湿性研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (17) : 41-43.
- [5] 张知航, 杨健, 杨震, 等. Cu基板粗糙度对SnAgCu无铅钎料润湿性的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43 (1) : 22-28, 114.
- [6] YANG A C, LU Y P, DUAN Y H, et al. Tuning the growth of intermetallic compounds at Sn-0.7Cu solder/Cu substrate interface by adding small amounts of indium[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 182: 246-259.
- [7] HOU Z Z, ZHAO X C, GU Y, et al. Enhancement mechanism of Te doping on microstructure, wettability and mechanical properties of Sn-Bi-based solder[J]. Journal of Materials & Engineering A, 2022, 848: 143445.
- [8] 马一鸣, 储继君, 吕晓春, 等. Ag和Sb对Sn58Bi钎料组织的影响[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (9) : 32-35.
- [9] BHAVAN S J, KADAVATH G, HONECKER D, et al. Small-angle neutron scattering analysis in Sn-Ag lead-free solder alloys: A focus on the Ag₃Sn intermetallic phase[J]. Materials Characterization, 2024, 217: 114385.
- [10] HUO F P, JIN Z, HAN D L. Novel interface regulation of Sn1.0Ag0.5Cu composite solders reinforced with modified ZrO₂: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 125: 157-170.
- [11] 刘广柱, 岳迪, 康宇, 等. 含Bi、Ga元素的Sn-9Zn低温无铅钎料研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50 (23) : 36-40.
- [12] ZHAO N, ZHONG Y, HUANG M L, et al. In situ study on interfacial reactions of Cu/Sn-9Zn/Cu solder joints under temperature gradient[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 682: 1-6.
- [13] CANYOOK R, FAKPAN K. Effect of Cu and Ni addition on microstructure and wettability of Sn-Zn solders[J]. Key Engineering Materials, 2017, 426: 39-14.
- [14] 杨娇娇. In、Al元素对Sn-9Zn焊料合金组织及性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [15] 肖正香. 稀土Pr对Sn-9Zn无铅钎料组织和性能的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [16] 陈文学. Ag、Ga、Al及Ce对Sn-9Zn无铅钎料性能的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [17] ZHANG L, XUE S, GAO L, et al. Development of Sn-Zn lead-free solders bearing alloying elements[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2010, 21 (1) : 1-15.
- [18] GONG S L, CHEN G Q, QU S T, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Sn-9Zn-2.5Bi-1.5In solder joints with aging treatment under various conditions[J]. Materials Characterization, 2023, 205: 113319.
- [19] 孙春静. 金属熔体的黏滞特性及相关物性的研究

- [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [20] ZHANG Z H, YANG Z, QU J W, et al. Magnetron sputtering preparation of Cu_6Sn_5 preferred-orientation coating and its influence on wettability of Sn-based lead-free solder[J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 450: 129014.
- [21] KUMAR A, PATNAIK A, DANGAYACH S G. Parametric optimization corrosion erosive wear and XPS response of FeCrCoAlTiB and FeCrCoNiSiB coatings on Q235 steel substrate by HVOF spraying using taguchi method[J]. Engineering Research Express, 2024, 6 (1) : 015513.
- [22] DONG K X, HUANG S, WANG X H, et al. Insight into the suppression mechanism of bulk traps in Al_2O_3 gate dielectric and its effect on threshold voltage instability in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ metal-oxide-semiconductor high electron mobility transistors[J]. Applied Surface Science, 2023, 638: 158000.
- [23] LIU S S, JIANG J H, JIANG C Z, et al. Enhanced photocatalytic activities of $\text{ZnO}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ hollow composites via the Z-scheme mechanism through p-n heterojunctions[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2023, 969: 172312.
- [24] WAN S B, YAO Y, WANG W J. Microstructure and size effect of interfacial intermetallic on fracture toughness of Sn3.0Ag0.5Cu solder interconnects[J]. Engineering Fracture Mechical, 2018, 202: 259-274.
- [25] EL-DALY A A, SWILEM Y, MAKLED M H, et al. Thermal and mechanical properties of Sn-Zn-Bi lead-free solder alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 484: 134-142.
- [26] WAN Y Q, LI S, HU X W, et al. Shear strength and fracture surface analysis of $\text{Sn58Bi}/\text{Cu}$ solder joints under a wide range of strain rates[J]. Microelectronics Reliability, 2018, 86: 27-37.
- [27] YAZZIE K E, FEI H E, JIANG H, et al. Rate-dependent behavior of Sn alloy-Cu couples: Effects of microstructure and composition on mechanical shock resistance[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 4336-4348.
- [28] KUNWAR A, GUO B F, SHANG S Y, et al. Roles of interfacial heat transfer and relative solder height on segregated growth behavior of intermetallic compounds in Sn/Cu joints during furnace cooling[J]. Intermetallics, 2018, 93: 186-196.

(收稿日期: 20241030)

(上接第48页)

- 学版), 2022, 36 (6) : 15-22.
- [6] 张迪, 王鑫, 马传平. 热处理对P355NL1钢不同焊接工艺接头残余应力及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (3) : 22-24, 30.
- [7] 申超男, 陈相飞, 王江超. 固定热源长度对T型接头焊接变形及残余应力精确预测的影响[J]. 船舶工程, 2022, 44 (11) : 132-139.
- [8] 孙志鹏, 卢玉秀, 翟永军. T形接头焊接过程的数值模拟[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (2) : 38-41.
- [9] TAO T, ZHOU D, LIU J, et al. Improvement of laser welded joint properties of AZ31B magnesium alloy to DP590 dual-phase steel produced by external magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 270-283.
- [10] 文学, 汪宏辉, 范德华, 等. 基于回归分析的钛合金T型接头激光焊接焊缝成形尺寸预测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (19) : 272-279.
- [11] 刘艳梅, 史吉鹏, 张桐源, 等. Ti60钛合金T型接头双激光焊接组织与力学性能研究[J]. 应用激光, 2023, 43 (11) : 71-77.
- [12] 刘雪, 钟史放, 徐连勇, 等. 不同应力幅下X65管线钢焊接接头的腐蚀疲劳行为[J]. 焊接学报, 2023, 44 (7) : 24-31, 78, 130.
- [13] 门进杰, 高睿祥, 李然, 等. 不同焊接工况焊接效应对箱板装配式钢结构加劲墙板的影响[J]. 工业建筑, 2023, 53 (1) : 41-49, 134.
- [14] ABE T, ARAKAWA J, AKEBONO H, et al. Analysis of fatigue crack propagation behavior of structures with one-sided welding in fillet welded joint for load-carrying type[J]. Materials Transactions, 2022, 63 (7) : 1037-1045.
- [15] 隋远, 卜凡洋, 邵子龙, 等. 基于区域中心温度场预测的回流焊接优化仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40 (5) : 299-303, 340.

(收稿日期: 20241202)