

Zn-Al-Si 钎料钎焊铜 / 铝接头显微组织及性能研究^{*}

Research on Microstructure and Property of Cu/Al Joint Brazed by Zn-Al-Si Filler Metal

北京科技大学材料科学与工程学院 羊 浩 黄继华 陈树海 赵兴科
 珠海格力电器股份有限公司 王 奇 李德华

[摘要] 采用 Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 两种钎料钎焊获得铜 / 铝接头,研究了 Cu/Zn-Al-Si/Al 接头 Cu 母材 / 钎缝界面结构、钎缝中心区显微组织、接头抗剪切性能和断口形貌。研究发现, Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头界面结构均为 Cu/扩散层/Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7},其中 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物层厚度分别为 1~2 μm 和 3~4 μm。2 种铜 / 铝接头钎缝中心区均由 α-Al 固溶体, η-Zn 固溶体, Zn-Al 共晶和 Si 单质组成,未发现脆性 CuAl₂ 化合物。由于具有较薄的界面化合物层,在剪切力作用下, Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头断裂一部分起源于 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物层,另部分起源于界面扩散层,而 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头断裂均起源于较厚的 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物层。因此, Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头的抗剪切强度高于 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头,分别为 60.1MPa 和 55.6MPa。

关键词: Zn-Al-Si 钎料 钎焊 铜 / 铝接头 界面结构 抗剪切强度

[ABSTRACT] The Cu/Al joints are brazed by Zn-14.1Al-0.9Si and Zn-21.5Al-1.5Si filler metal. Interface structure near Cu substrate, microstructure of the filler metal zone, shear strength and fracture morphology of the Cu/Al joints are investigated successively. It can be found that the interface structure of the Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al and Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al both are Cu/diffusion layer/Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} layer, and the thickness of the Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} layer is 1~2 μm and 3~4 μm, respectively. Moreover, the filler metal zone of the Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al and Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al both are composed of α-Al solid solution, η-Zn solid solution, Zn-Al eutectic and Si, the CuAl₂ IMCs that is often observed in the Cu/Al joint is not discovered. For a thinner Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} layer, the fracture of the Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al joint partly originates from the Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} layer, another part originates from the diffusion layer. However, the fracture of the Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al originates from the thicker Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} layer.

So the shear strength of the Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al joint (60.1MPa) is higher than that of the Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al joint (55.6MPa).

Keywords: Zn-Al-Si filler metal Brazing Cu/Al joint Interfacial structure Shear strength

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.07.064

铜 / 铝异种金属接头具有铜、铝 2 种金属高导电、高导热的特点,并能有效降低产品的生产成本和重量,是一种综合性能优异的复合构件,在航空航天、电工电子、空调制冷等领域有着广阔的应用前景^[1-4]。在众多连接方法中,由于钎焊方法具有高效率、高精度、低成本和低残余应力等优点,是目前较为常见的铜 / 铝异种金属连接方法^[1,3-4]。

Zn-Al 钎料(特别是 Zn-15Al 和 Zn-22Al)钎焊 Cu/Al 接头具有较高的抗剪切强度,被认为是目前较为理想的铜 / 铝钎焊用钎料^[1,3,5]。但是,由于 Al-Cu 之间冶金的不相容性及 Al-Cu 原子间较大的化学亲和力,采用 Zn-Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头时, Cu 母材 / 钎缝界面处易形成以 Al-Cu 化合物(CuAl, CuAl₂ 等)为主的脆性界面层^[1,3,6]。在外力作用下,该脆性界面层易萌生裂纹,接头往往断裂在该界面层处。减小铜 / 铝接头脆性界面层的厚度,可以有效抑制界面处裂纹的产生,显著提高接头的力学性能^[3,7]。但是,目前缺少这种能有效抑制界面化合物生长,改善铜 / 铝接头界面结构的方法。

降低铜 / 铝接头的钎焊温度,可以降低接头界面处金属间化合物形成的可能性^[8]。所以,选择一种熔点较低的钎料进行铜 / 铝接头的钎焊,是降低钎焊温度、抑制界面化合物生长的最直接方法。Zn-Al-Si 钎料的主要组元与 Zn-Al 钎料相近,具有与 Zn-Al 钎料相近的机械加工性能,可以方便地制成丝或带的形式。更重要的是,由于适量 Si 元素的加入, Zn-Al-Si 钎料较 Zn-Al 钎料具有更低的熔点^[8-9]。所以, Zn-Al-Si 钎料是一种潜在的铜 / 铝钎焊用钎料。但是,目前对 Zn-Al-Si 钎料钎焊铜 / 铝接头的显微组织、界面结构和力学性能的研究还未见报道。

本文选用 Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 两种

^{*} 广东省重大科技专项项目(2010A080402014)支持。

钎料,采用火焰钎焊方法获得铜/铝接头。研究了铜/铝接头 Cu 母材/钎缝界面结构,钎缝中心区显微组织,抗剪切强度和断口形貌,并阐释了钎缝界面结构与接头力学性能的关系,对新型铜/铝钎焊用钎料的研制有着重要的意义。

1 试验材料及方法

试验选用 Zn-Al-Si 钎料的成分分别为 Zn-14.1Al-0.9Si (1[#])和 Zn-21.5Al-1.5Si (2[#]),两种钎料的成分点均位于 Al-Zn-Si 三元相图^[10]中的共晶线上。钎料采用 99.995% 纯铝、99.999% 纯锌和 99.999% 的纯硅在坩埚熔炼炉中熔炼而成。同时,为了防止钎料合金在熔炼过程中被氧化,采用质量比 NaCl:KCl = 1:1 熔盐进行覆盖保护。

2 种钎料熔点采用型号为 CR-G 型高温 DTA 差热分析仪进行测试,升温速度为 15 °C/min,采用氩气保护。钎料与铜、铝母材的润湿性按照 GB/T11364-2008《钎料润湿性试验方法》进行测试,试板为 40mm×40mm×3mm 的 1060 纯铝板和 40mm×40mm×2mm 的 TP 纯铜板。钎焊试验母材采用尺寸为 60mm×20mm×3mm 的 1060 纯铝板和尺寸为 60mm×20mm×2mm 的 TP 纯铜板。试验前,先对母材进行化学处理,去除表面油污和氧化膜,清洗干净后风干备用。

铜/铝钎焊接头采用搭接方式装配,搭接长度为 2mm,搭接间隙为 0.3±0.5mm,接头装配方法见图 1。钎焊过程中使用钎剂为无腐蚀 CsF-AlF₃ 钎剂,熔化区间为 415 °C~488 °C。钎焊试验采用氧气—液化石油气火焰钎焊,钎焊完成后将接头空冷至室温。

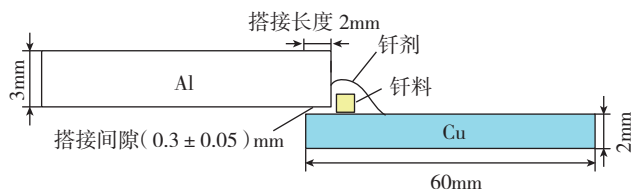


图1 钎焊装配示意图
Fig.1 Diagram of brazed specimen

铜/铝钎焊接头的显微组织、界面结构及断口形貌采用 FEIQuanta 250 型扫描电子显微镜进行观察分析。铜/铝钎焊接头的抗剪切强度按照国家标准 GB/T11363-2008《钎焊接头强度试验方法》,采用 MTS810 型万能材料试验机进行测试。

2 结果与讨论

2.1 Zn-Al-Si 钎料的熔化特性

图 2 为 Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料的 DTA 曲线。根据 Zn-Al 二元^[8]和 Zn-Al-Si 三元相图^[10],在 287 °C~300 °C 之间,2 种 Zn-Al-Si 钎料存在共析转变,而在 390 °C 左右,2 种钎料发生共晶转变。Zn-14.1Al-0.9Si 钎料的熔化区间为 386 °C~440 °C,Zn-21.5Al-1.5Si 钎料的熔化区间为 390 °C~483 °C,Zn-14.1Al-0.9Si 钎料的熔点较 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料低 43 °C。

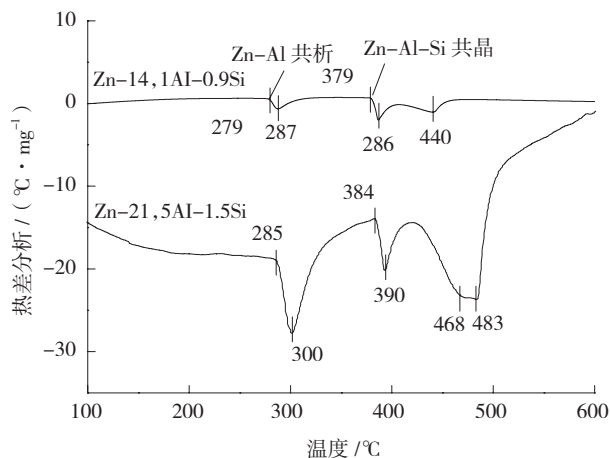


图2 Zn-Al-Si钎料的DTA曲线
Fig.2 DTA analysis of Zn-Al-Si filler metals

2.2 Zn-Al-Si 钎料与母材的润湿性

Zn-14.1Al-0.9Si (1[#])和 Zn-21.5Al-1.5Si (2[#])钎料在铜、铝两母材上的铺展面积如图 3 所示。Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料在铝母材上的铺展面积分别为 567mm²和 601mm²,而在铜母材上的铺展面积仅为 68mm²和 64mm²,2 种钎料在铝母材上的铺展面积明显大于在铜母材上的铺展面积,这与 Zn-Al 钎料在铜、铝两母材上的铺展规律极为相似^[11]。从图 3 中还可看出,Al 含量较高的 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料在 Cu 母材上的铺展面积略小于 Zn-14.1Al-0.9Si 钎料,而在 Al 母

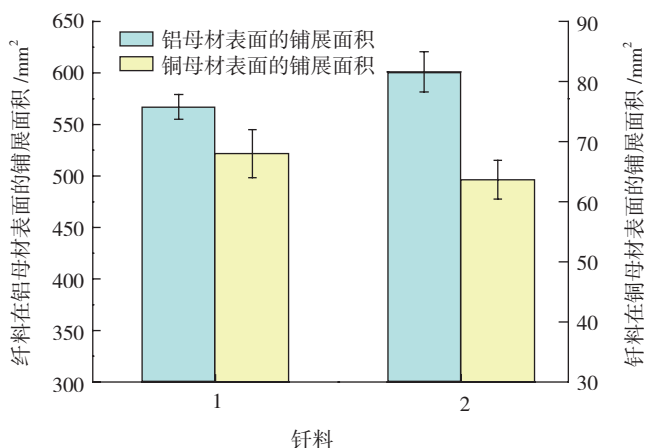


图3 Zn-Al-Si钎料在母材上的铺展面积
Fig.3 Spreadability of Zn-Al-Si filler metals

材上的铺展面积大于 Zn-14.1Al-0.9Si 钎料。这是由于, Zn-21.5Al-1.5Si 钎料中较高的 Al 元素含量, 促进钎料与 Cu 母材间形成 Al-Cu 金属间化合物, 抑制了钎料在铜母材上的铺展^[7]; 同时, 钎料中含量较高的 Al 元素, 也抑制了钎料中 Zn 元素向铝母材中晶间渗透, 进而促进了钎料在 Al 母材表面的铺展^[8]。

2.3 Zn-Al-Si 钎料钎焊铜/铝接头的显微组织分析

2.3.1 火焰钎焊 Cu/Zn-Al-Si/Al 接头中 Cu 母材/钎缝界面结构

图 4 为 Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料钎焊铜/铝接头的 Cu 母材/钎缝界面结构, 两种钎料均能与 Cu 母材形成良好的冶金结合, 界面处无明显孔洞、裂纹缺陷。图 4 (a) 为 Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 钎焊接头 Cu 母材/钎缝界面结构的显微组织。从图中看出, 接头 Cu 母材/钎缝界面处存在一个极薄的连续界面区。图 4 (b) 为该界面区中 P 区放大图, 可进一步观察到, 该界面区由浅灰色连续界面层 A (2 μm 左右) 和带有细小突起的深灰色界面层 B (1~2 μm) 共同组成。根据之前文献 [7, 12] 的研究结果和 A、B 界面层的能谱分析结果(见表 1), 界面层 A 是由 Cu 母材中的 Cu 原子与钎料中 Al 原子相互扩散而形成的扩散层, 而界面层 B 是在 Cu 母材表面析出的 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物。可见, Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头的界面结构为 Cu/扩散层/Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 层。

图 4 (c) 为 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 钎焊接头中 Cu 母材/钎缝界面结构的显微组织。从图中看出, 接头

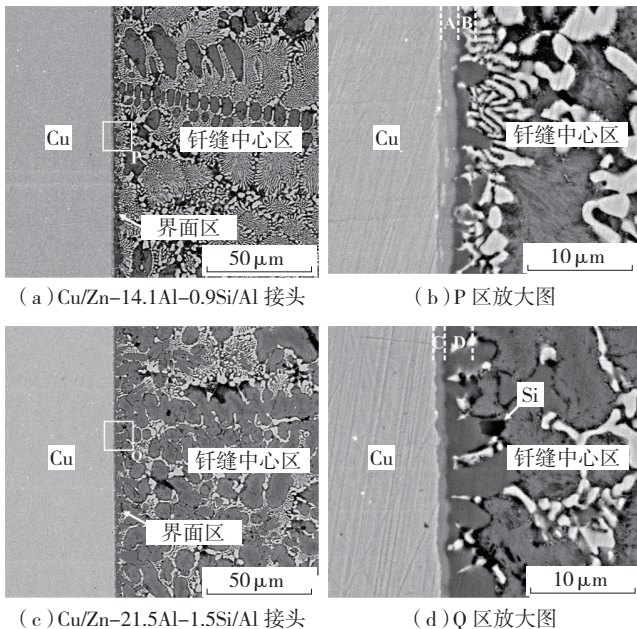


图4 Cu/Al接头中Cu母材/钎缝界面结构

Fig.4 Interface structure near Cu substrate of Cu/Al joint brazed by torch brazing

表1 火焰钎焊Cu/Al钎焊接头界面物相分析结果

钎料	位置	元素成分 / %			相组成
		Al	Cu	Zn	
Zn-14.1Al-0.9Si	A	32.53	45.41	22.07	扩散层 Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn _{0.7}
	B	52.50	32.54	14.96	
Zn-21.5Al-1.5Si	C	34.19	46.27	19.54	扩散层 Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn _{0.7}
	D	54.71	35.28	10.01	

界面区仍主要由一种深灰色物相组成, 但界面区的厚度明显增大。图 4 (d) 为该界面区中 Q 区放大图, 进一步观察到, 接头界面区由浅灰色界面层 C (≤ 1 μm) 和带有突起的深灰色界面层 D (3~4 μm) 共同组成。根据能谱分析结果, 界面层 C 和 D 仍分别为扩散层和 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 层, 接头的界面结构仍为 Cu/扩散层/Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}。界面处 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物层厚度增大是由于 Zn-14.1Al-0.9Si 钎料熔点较高, 钎焊 Cu/Al 接头时需要更高的钎焊温度, 且钎料中 Al 元素含量较高, 加剧了 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物在 Cu 母材表面析出^[7]。

Zn-14.1Al-0.9Si 和 Zn-21.5Al-1.5Si 钎焊接头的界面结构均为 Cu/扩散层/Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}, 这与成分极为接近的 Zn-15Al 和 Zn-22Al 钎料钎焊接头的界面结构差异较大。根据文献 [3, 6, 11] 研究结果, Cu/Zn-15Al/Al 和 Cu/Zn-22Al/Al 接头中 Cu 母材/钎缝界面界面结构为 Cu/CuAl₂, 且脆性 CuAl₂ 化合物层的厚度较大。显然, 由较薄 Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7} 化合物层的界面结构更有利于提高 Cu/Al 接头的性能。

2.3.2 Cu/Zn-Al-Si/Al 接头中钎缝中心区显微组织

图 5 为 2 种 Zn-Al-Si 钎料钎焊 Cu/Al 接头钎缝中心区显微组织。Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头钎缝中心区显微组织如图 5 (a) 所示, 从图中看出, 接头钎缝中心区由灰色物相 E、亮白色物相 F、层片状共晶组织 G 和细小的颗粒 H 组成。根据表 2 中的能谱分析结果和之前文献的研究结果^[6, 11], 灰色物相 E 为 α-Al 固溶体, 亮白色物相 F 为 η-Zn, 共晶组织 G 为 Zn-Al 共晶, 颗粒 H 为 Si 单质。

图 5 (b) 为 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头中心区显微组织。从图中看出, 接头组织由灰色物相 I、亮白色物相 J、层片状共晶组织 K 和细小颗粒 L 组成。根据能谱分析结果, Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头中心区物相组成与 Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头一致, 灰色物相 I 为 α-Al 固溶体, 亮白色物相 J 为 η-Zn, 共晶组织 K 为 Zn-Al 共晶, 颗粒 L 为 Si 单质。但是, 由于 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料较 Zn-14.1Al-0.9Si 钎料中 Al 元素含量高, Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头钎缝中 α-Al 固溶体的含量

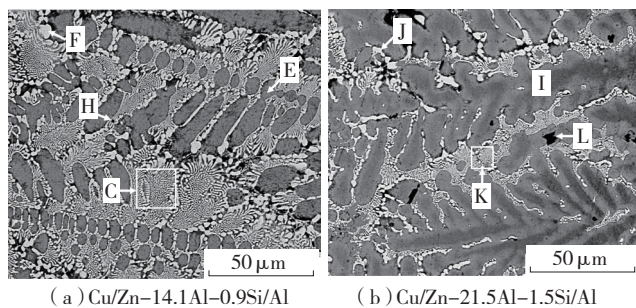


图5 Cu/Al接头钎缝中心区显微组织

Fig.5 Microstructure of filler metal central zone of Cu/Al joint

表2 火焰钎焊Cu/Al钎焊接头钎缝中心区物相分析结果

钎料	位置	元素成分 / %				相组成
		Al	Cu	Zn	Si	
Zn-14.1Al-0.9Si	E	54.80	3.54	41.66	0	α -Al
	F	4.91	16.71	78.38	0	η -Zn
	G	34.44	10.89	54.67	0	Zn-Al 共晶
	H	30.34	9.02	44.42	16.23	Si
Zn-21.5Al-1.5Si	I	62.10	4.17	33.72	0	α -Al
	J	16.74	13.21	70.05	0	η -Zn
	K	32.90	11.13	55.11	0.85	Zn-Al 共晶
		6.72	0.86	4.91	87.51	Si

较高,而 η -Zn 和 Zn-Al 共晶的含量较低。

值得注意的是, Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头中心区未发现 CuAl_2 化合物。根据之前的研究结果,采用 Zn-Al 钎料(Zn-15Al 和 Zn-22Al)钎焊的 Cu/Al 接头中均存在块状脆性 CuAl_2 化合物, CuAl_2 化合物增加了接头的脆性,恶化接头的力学性能^[6,11]。Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头中由固溶体和共晶组织组成的钎缝,更有利改善接头的韧性,提升接头的力学性能。

2.4 Zn-Al-Si 钎料钎焊铜 / 铝接头的抗剪切强度

图 6 为 2 种 Zn-Al-Si 钎料钎焊 Cu/Al 接头的抗剪切强度。Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头的抗剪切强度分别为 60.1MPa 和 55.6MPa, Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头的抗剪切强度较 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头高 8%。2 种 Zn-Al-Si 钎料钎焊 Cu/Al 接头的强度均达到了 Al 母材强度的 80%,均具有较好的抗剪切性能。

图 7 为 2 种 Zn-Al-Si 钎料钎焊 Cu/Al 接头的断口形貌。图 7 (a) 为 Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头的断口形貌,从图中看出,该接头断口组织较为细小,由 2 种解理面 M 和 N 组成。通过能谱分析发现,解理面 M 的

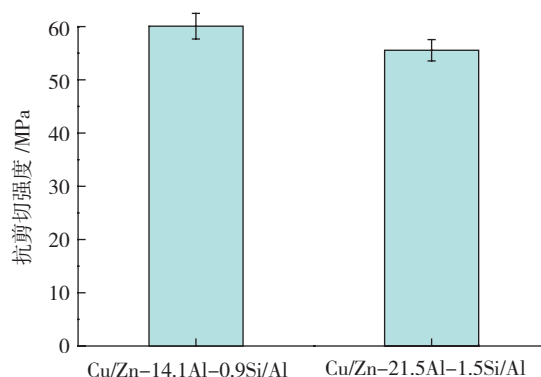


图6 Cu/Al接头的抗剪切强度

Fig.6 Shear strength of Cu/Al joint

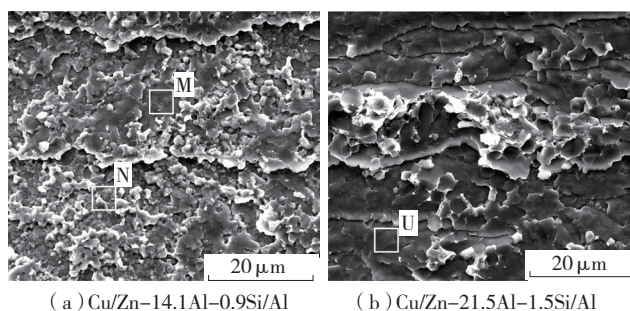


图7 Cu/Al接头的断口形貌

Fig.7 Fracture morphology of Cu/Al joint

成分为 48.78Al-37.37Cu-13.85Zn,解理面 N 的成分为 22.12Al-54.06Cu-23.82Zn。根据 2.3.1 节中对 Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头界面结构的分析,可以确定解理面 M 为 Cu 母材 / 钎缝界面处 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 层发生断裂而形成,而解理面 N 为界面处扩散层发生断裂而形成。

图 7 (b) 为 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头的断口形貌。从图中看出,该接头的断口明显为脆性穿晶断裂,且断口组织较为粗大。对断口中解理面 U 进行能谱分析发现,该解理面成分为 46.13Al-43.37Cu-10.5Zn,根据 2.3.1 节中 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头界面结构的分析结果,可以确定该接头断裂主要发生在界面 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 化合物层处。

3 结论

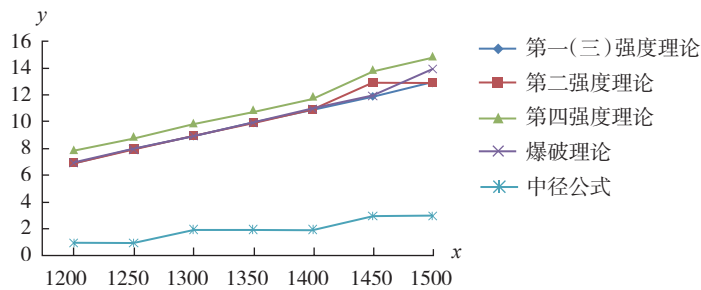
(1) Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头具有较优的界面结构,均为 Cu / 扩散层 / $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 。且 2 种接头界面处金属间化合物 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 层的厚度较小,厚度仅为 1~2 μm 和 3~4 μm 。

(2) Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头钎缝中心区由 α -Al 固溶体, η -Zn 固溶体, Zn-Al 共晶和 Si 单质组成,钎缝中心区未发现 CuAl_2

(下转第 71 页)

表6 不同许用应力 $[\sigma]$ 下的可靠度值

$[\sigma]$ MPa	第一(三)强度理论	第二强度理论	第四强度理论	爆破理论	中径公式
1200	0.99999996366	0.9999999638	0.9999999746	0.99999998621	0.95683
1250	0.99999995604	0.99999995624	0.9999999736	0.99999998249	0.97932
1300	0.99999995341	0.99999995364	0.9999999762	0.99999998028	0.990979
1350	0.99999995674	0.999999956991047	0.9999999998161	0.9999999998029	0.996423
1400	0.9999999996483	0.9999999996505	0.99999999998735	0.99999999998253	0.9987127
1450	0.99999999997496	0.99999999997514	0.9999999999992440	0.999999999998627	0.9995799
1500	0.999999999998446	0.999999999998458	0.9999999999996606	0.9999999999990495	0.9998758



注: x 坐标为 $[\sigma]$ 的值, y 坐标为 $-\lg(1-n)$, n 为表 5 第 2、3、4 和 5 列中的数值。

图3 可靠度值随许用应力 $[\sigma]$ 的变化曲线Fig.3 Changing curve of reliability values with allowable stress $[\sigma]$

计理论,由于极限状态的差异,尽管设计工况相同,可靠度值仍具有较大的分散性。

(3) 参数敏感性分析表明,中径公式理论最为保守,第四强度理论最不保守,故对重要设备应采用中径公式进行设计,而对一般设备可采用第四强度理论进行设计。

(4) 考虑经济、合理、安全等因素,建立压力气瓶可靠性设计准则,具有极大的工程应用价值。

参考文献

- [1] 戴树和. 压力容器可靠性工程 90 年代技术展望. 压力容器, 1991,8(6):1-8.
- [2] Tsai C H. Wu W F. On the application of probabilistic fracture mechanics to the reliability and inspection of pressure vessels. Int J Pres Ves&Piping, 1994(59):323-333.
- [3] 余国琮. 化工容器及设备. 北京: 化学工业出版社, 1991:62-66.
- [4] 魏铎. 压力容器设计知识. 北京: 化学工业出版社, 2005:40-47.
- [5] 左民. 承受内压的薄壁压力容器圆筒计算公式. 核工程研究与设计, 2009(2):4-7.
- [6] Hibbeler R C. Mechanics of Materials. Beijing: Publishing House

of Electronics Industry, 2006: 65-85.

[7] 季维英. 压力容器的可靠性设计. 南通职业大学学报, 2005(19): 69-71.

[8] 郝静茹. 机械可靠性工程. 北京: 国防工业出版社, 2008:40-43. (责编 小城)

(上接第 67 页)

化合物。

(3) Cu/Zn-14.1Al-0.9Si/Al 接头和 Cu/Zn-21.5Al-1.5Si/Al 接头的抗剪切强度分别为 60.1MPa 和 55.6MPa, 均具有较好的抗剪切强度。Zn-14.1Al-0.9Si 较 Zn-21.5Al-1.5Si 钎料是理想的 Cu/Al 异种金属钎焊用钎料。

参考文献

- [1] Carlos B, Goni A A, Azpilicueta P B, et al. Study and selection of the most appropriate filler materials for an Cu/Al brazing joint in cooling circuits. Mater. Materials and Manufacturing Processes, 2011(26): 236-41.
- [2] Di Z, Hu S S, Shen J Q, et al. Intermediate layer characterization and fracture behavior of laser-welded copper/aluminum metal joints. Materials and Design, 2014(58): 357-362.
- [3] Ji F, Xue S B, Dai W. Effects of Ti on the brazability of Zn-22Al-xTi filler metals as well as properties of Cu/Al brazing joints. Rare Metal Materials and Engineering, 2013(42): 2453-2457.
- [4] Koyoma K, Shinozaki K J, Ikeda Kenji, et al. Evaluation of brazing properties using Al-Si-Mg-Bi brazing alloy. Development of Brazing Technique for Al-Cu Dissimilar Joint(Part1). Journal of Light Metal Welding and Construction, 2002(40): 403-410.
- [5] Yan X Q, Liu S X, Long W M, et al. Stress corrosion crack of ZnAl15 alloys in hot and humid environment. Materials Letters, 2013(93):183-186.
- [6] 张满, 薛松柏, 姬峰, 等. CuAl2 相对铜铝钎焊接头组织与性能的影响. 焊接学报, 2011, 2(2): 93-96.
- [7] Yong X, Ji H J, Li M Y, et al. Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn-3Al filler metal. Materials and Design, 2013(52): 740-747.
- [8] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 羊浩, 杨文静, 黄继华, 等. 铝 / 铝钎焊用 Al-Si-Zn 系钎料的研究. 焊接, 2014(5): 31-35.
- [10] 张启运, 庄鸿寿. 三元合金相图手册. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [11] 张满, 薛松柏, 戴玮, 等. Al 元素含量对 Zn-Al 钎料性能的影响. 焊接学报, 2010, 31(9): 93-96.
- [12] Huang M L, Kang N, Zhou Q, et al. Effect of Ni content on mechanical properties and corrosion behavior of Al/Sn-9Zn-xNi/Cu Joints. Journal of Materials Science and Technology, 2012(28): 844-852.

(责编 亿霖)