

文章编号: 1004-0609(2006)10-1653-07

Bi-Sn-In 控温易熔合金的设计与性能^①

王吉会, 杨亚群, 李群英, 李顺成, 刘振华

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 在 Bi-Sn、Bi-In、Sn-In 二元相图的基础上, 设计出系列 Bi-Sn-In 控温易熔合金, 并对合金的熔点、相组成和钎焊接头的力学性能进行了研究。结果表明: 低锡含量的 Bi-Sn-In 合金由 Bi、 β -Sn 和 InBi 相组成; 随 Sn、In 含量的增加, 易熔合金的相组成向 BiIn、BiIn₂ 和 γ (InSn₄) 转化; 合金的固相线、液相线随 Bi 含量或 Bi/In 的增大而提高, 且当 Sn 含量(质量分数)为 17% 时合金的液相线最低; 易熔合金的硬度随 Bi 含量或 Bi/In 的增加而线性增大, 但随 Sn 含量、In 含量的增加而降低; 提高合金的 Sn 含量和 Bi/In, 可使合金钎焊接头的剪切和抗拉强度得到明显的改善; 42.6Bi-17.0Sn-40.4In 合金的熔点、熔程和钎焊接头的力学性能与 50.0Bi-25.0Pb-2.5Sn-12.5Cd 伍德合金相当, 符合 72 ℃自动灭火洒水喷头感温元件的要求。

关键词: 无铅焊料; 易熔合金; 熔点; 力学性能; 感温元件

中图分类号: TG 132.21

文献标识码: A

Design and properties of Bi-Sn-In ternary fusible alloys

WANG Ji-hui, YANG Ya-qun, LI Qun-ying,

LI Shun-cheng, LIU Zhen-hua

(School of Materials Science and Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Series of Bi-Sn-In ternary fusible alloys were designed based on Bi-Sn, Bi-In and Sn-In phase diagrams, and the melting temperature, phase composition and mechanical properties of these alloys were measured and determined. The results show that Bi-Sn-In ternary fusible alloy with low content of indium consists of Bi, β -Sn and InBi phases. With increasing content of indium and tin in fusible alloy, the phase components turn to BiIn, BiIn₂ and γ (InSn₄) phases. The solidus and liquidus of alloys increase linearly with increasing content of bismuth or the ratio of Bi to In, and there is a minimum solidus at 17% Sn(mass fraction). Fusible alloys with higher content of bismuth or higher ratio of Bi to In have a higher hardness, whereas the contents of indium and tin have opposite effect. Meanwhile the shear and tensile strengths of soldering joints can be improved by the promotion of tin content and the Bi/In ratio in Bi-Sn-In alloy. The melting temperature and mechanical properties of 42.6Bi-17.0Sn-40.4In alloy are comparable to those of 50.0Bi-25.0Pb-2.5Sn-12.5Cd Wood alloy, and can be used as the material for 72 ℃ thermal actuator in automatic sprinkler instead of Wood alloy.

Key words: lead-free solder; fusible alloy; melting temperature; mechanical property; thermal actuator

控温易熔合金是指熔点低于 232 ℃(Sn 的熔点)、熔化范围窄且具有钎焊能力的合金, 广泛用于制作电器、消防、火灾报警装置中的保险丝、熔断器等感温和热敏组件。一般情况下, 低熔点控温

易熔合金常是由 Bi、Pb、Sn、Cd、In 等低熔点金属组成的多元共晶合金^[1]。但由于 Pb、Cd 元素的毒性很大, 长期使用会给环境和人身安全带来较大的危害, 因此从保护环境和人类安全的角度出发, 人

① 基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(413175)

收稿日期: 2006-04-11; 修订日期: 2006-08-25

通讯作者: 王吉会(1966-), 男, 副教授, 博士, 电话: 022-27890010; E-mail: jhwang@tju.edu.cn

们要求限制甚至禁止使用含 Pb、Cd 的焊料^[2]。自 20 世纪 80 年代以来,在替代 183 °C Sn-Pb 共晶合金的高温无铅焊料方面取得了一定的进展,如 Sn-Bi、Sn-Ag、Sn-Zn 基无铅焊料等^[3~5];但对应用于电器、消防、报警等装置中的低熔点无铅易熔合金方面,很少进行过系统的研究。

在消防、报警装置中,要求自动灭火洒水喷头的动作温度为 72 °C^[6];其感温元件常由熔点为 70 °C 的 50Bi-26.7Pb-13.3Sn-10Cd 共晶合金、50Bi-25Pb-12.5Sn-12.5Cd 的非共晶伍德合金和 Bi-30Pb-15Sn-9Cd 合金制成^[7~9]。而不含铅镉、熔点为 72 °C 的材料仅有 34Bi-66In 合金^[10],但该合金中的 In 含量较多,其成本远高于 Bi-Pb-Sn-Cd 合金,因此到目前为止尚没有利用无铅无镉易熔合金制作的洒水喷头。

本文作者拟从灭火洒水喷头感温元件的要求(熔点、剪切和抗拉强度)出发,基于熔点 79 °C 的 57Bi-17Sn-26In、60 °C 的 32.5Bi-16.5Sn-51In 和 59 °C 的 31.6Bi-19.6Sn-48.8In 等 3 种 Bi-Sn-In 共晶合金的成分^[11,12],以期研制出能替代 Bi-Pb-Sn-Cd 合金的、无铅无镉的控温易熔合金。

1 实验

1.1 合金设计

结合 Bi-Sn、Bi-In、Sn-In 二元相图^[10]、Bi-Sn-In 三元共晶合金的组成^[11,12],及 In 的价格因素,设计的控温易熔合金为 Bi-Sn-In 三元体系,合金成分位于 Bi-Sn-In 三元相图的 4 个截面上(图 1),即 I (Bi/In= 61.8/28.2)、II (Bi/In= 54.2/35.8)、III (Bi/In= 46.2/43.8) 和 IV (Bi/In= 34.7/55.3),且 Sn 含量(质量分数)分别选择为 10%、17%、22%、27%。合金的具体成分如下:截面 I 上的 61.8Bi-10.0Sn-28.2In (1 号)、57.0Bi-17.0Sn-26.0In (2 号)、53.6Bi-22.0Sn-24.4In (3 号)、50.1Bi-27.0Sn-22.9In (4 号);截面 II 上的 54.2Bi-10.0Sn-35.8In (5 号)、50.0Bi-17.0Sn-33.0In (6 号)、47.0Bi-22.0Sn-31.0In (7 号)、44.0Bi-27.0Sn-29.0In (8 号);截面 III 上的 46.2Bi-10.0Sn-43.8In (9 号)、42.6Bi-17.0Sn-40.4In (10 号)、40.0Bi-22.0Sn-38.0In (11 号)、37.5Bi-27.0Sn-35.5In (12 号);截面 IV 上的 34.7Bi-10.0Sn-55.3In (13 号)、32.0Bi-17.0Sn-51.0In (14 号)、30.1Bi-22.0Sn-47.9In (15 号)、28.1Bi-27.0Sn-44.9In (16 号)。

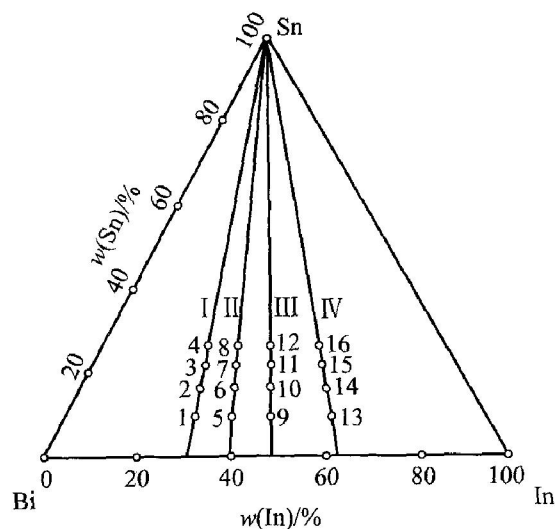


图 1 三元 Bi-Sn-In 易熔合金的成分设计

Fig. 1 Compositions for designed Bi-Sn-In ternary fusible alloys

1.2 合金熔炼

采用高纯铋、锡、铟等原料,按图 1 中设计的合金成分称量、放入坩埚内,并采用高频加热炉,在预抽真空、随后充填氩气的条件下进行合金熔炼,熔化温度控制在 360 °C 左右。

1.3 测试方法

利用 XWT-464DTA 型差热分析仪测量合金的固相线 t_s 、液相线 t_l 和熔程 Δt ;利用 D/MAX 2500V/PC 型 X 射线衍射仪对易熔合金进行物相分析;测试过程中加速电压为 40 kV、Cu K α 、扫描速度为 2(°)/min,扫描范围为 20°~100°。

采用 MH-6 型显微硬度计测定铸态易熔合金的显微硬度,实验中施加的载荷为 25 g,载荷保持时间为 30 s。利用 LJ-5000A 型拉力试验机测量以易熔合金为焊料的钎焊接头的抗拉强度和剪切强度,加载速度为 2 mm/min。用于剪切强度测试的钎焊试样基材为厚 1 mm、面积为 20 mm×2 mm 的黄铜片;用于抗拉强度测试的钎焊试样基材为面积 d 12 mm×30 mm 的黄铜棒;将易熔合金加工成等面积、厚 0.2~0.5 mm 的薄片以作为焊料,并在高于熔点 30 °C 的条件下进行钎焊。力学性能测试的平行试样数为 5 个;实验结束后,利用应力-应变曲线计算钎焊接头的平均抗拉强度和剪切强度。

2 实验结果

2.1 物相分析

Bi-Sr-In 易熔合金的 X 射线衍射谱如图 2 所示。分析表明, Bi-Sr-In 易熔合金随合金成分的变化可形成 Bi、 β -Sn、InBi (BiIn)、BiIn₂、 β (In₃Sn) 和 γ (InSn₄) 等物相, 与文献[12]的结果一致。

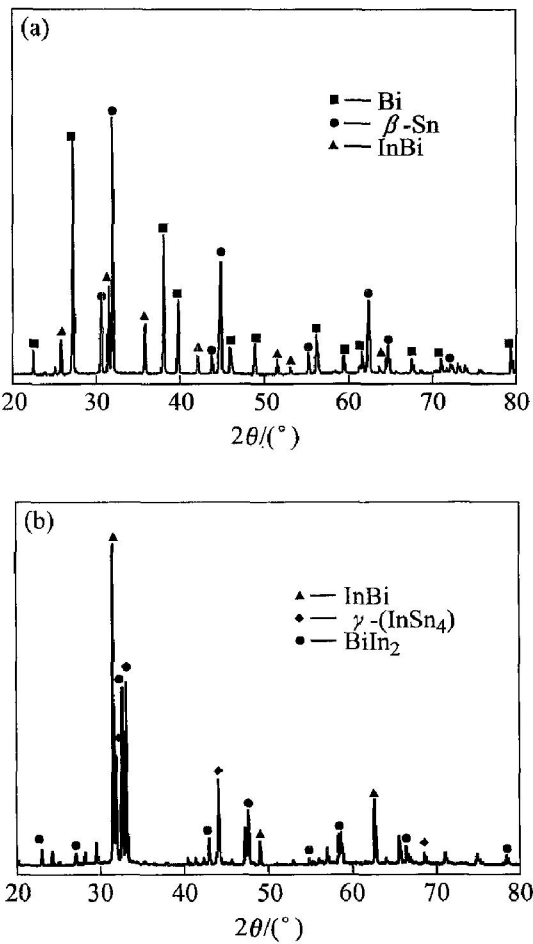


图 2 Bi-Sr-In 易熔合金的 X 射线衍射谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of Bi-Sr-In fusible alloys

(a) —No. 2; (b) —No. 14

截面 I 上的 1~ 4 号易熔合金, 由 Bi、 β -Sn 和 BiIn (InBi) 相组成(图 2(a)); 截面 II 上的 5 号、6 号合金, 虽仍由 Bi、 β -Sn 和 BiIn (InBi) 相组成, 但 BiIn 相的衍射强度因合金中 In 含量的增加而增大。在 Sn 含量较高的 7 号、8 号合金中, 除含 Bi、BiIn 相外, Sn 以 γ (InSn₄) 相的形式出现。截面 III 上的 9~ 12 号合金由 Bi、BiIn₂ 或 Bi₃In₅、 γ (InSn₄) 相组成; 而处于截面 IV 的 13~ 16 号合金, 因 Bi 含量降低、In 含量增大, 其相组成转化为 BiIn、BiIn₂ 和 γ (InSn₄) (图 2(b)); 且随 In 含量的增加, γ (InSn₄) 相的衍射强度逐渐增大, Bi 相的衍射强度逐渐减少、甚至消失。

2.2 固相线、液相线和熔程

Bi-Sr-In 易熔合金的固相线、液相线温度和熔

程, 如表 1 所示。Bi-Sr-In 易熔合金的固相线、液相线分别位于 58.8~ 80.5 °C 和 63.2~ 91.8 °C 之间、而熔程在 1.7~ 13.2 °C 间变化。熔程最小的 2 号和 14 号合金, 分别与 57Bi-17Sr-26In (79 °C) 和 32.5Bi-16.5Sr-51In (60 °C) 两种共晶合金的成分相近。成分为 42.6Bi-17Sr-40.4In 的 10 号合金, 其固相线为 70.2 °C、液相线为 75.1 °C、熔程仅为 4.9 °C, 与灭火洒水喷头用易熔合金的要求相吻合。

从整体看, 合金的固相线、液相线温度随合金中 Bi 含量的增加而逐渐提高(图 3)。除截面 II 中的 6、7 号合金外, 合金的固相线基本上与 Sn 含量的变化无关; 但合金的液相线均在 17% Sn 含量处出现极小值。与此同时, 合金的固相线、液相线均随 Bi/In 比的减小(即依 I、II、III、IV 截面的顺序)而降低(图 4)。

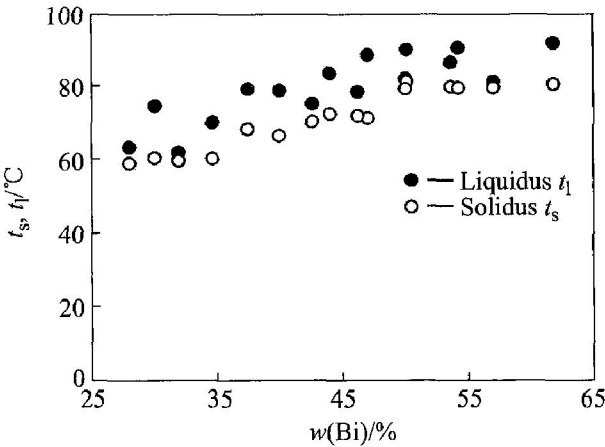


图 3 Bi-Sr-In 合金的固相线、液相线温度与 Bi 含量的关系

Fig. 3 Variation of solidus and liquidus of Bi-Sr-In fusible alloys with content of Bi

2.3 硬度

Bi-Sr-In 三元易熔合金的硬度, 如表 1 所示; 合金的硬度与 Bi、Sn 含量的变化关系, 如图 5。由表 1 和图 5 可见, 随 Bi 含量的增加, Bi-Sr-In 合金的硬度线性增大(图 5(a)); 而随 Sn 含量的增大、及 Bi/In 比的减小(即 In 含量的增加)而降低。因而在 1~ 16 号合金中, 1 号合金的硬度最高、16 号合金的硬度最低。

2.4 剪切强度

Bi-Sr-In 易熔合金钎焊接头的剪切强度, 如表 1; 钎焊接头的剪切强度随 Sn、In 含量的变化关系

表 1 Bi-Sn-In 合金的 t_s 、 t_l 、 Δt 、硬度、钎焊接头的剪切强度和抗拉强度

Table 1 Solidus, liquidus, melting range, hardness, shear and tensile strength of Bi-Sn-In alloys

Section	Sample No.	$t_s/^\circ\text{C}$	$t_l/^\circ\text{C}$	$\Delta t/^\circ\text{C}$	Hardness, HV	Shear strength of joint/MPa	Tensile strength of joint/MPa
I	1	80.5	91.8	11.3	13.2	51.0	42.1
	2	79.5	81.2	1.7	12.5	52.9	44.9
	3	79.8	86.5	6.7	12.3	52.2	43.6
	4	81.2	90.0	8.8	12.0	49.4	44.3
II	5	79.5	90.5	11.0	11.8	37.4	40.2
	6	79.2	82.0	2.8	11.3	42.9	39.6
	7	71.2	88.5	17.3	10.5	47.5	42.2
	8	72.3	83.5	11.2	10.4	48.2	41.6
III	9	71.8	78.4	6.6	10.0	32.2	35.5
	10	70.2	75.1	4.9	9.2	34.1	34.9
	11	66.4	78.8	12.4	8.8	36.7	38.2
	12	68.2	79.2	11.0	8.7	38.5	40.1
IV	13	60.1	70.0	9.9	8.2	21.2	32.4
	14	59.6	61.8	2.2	7.5	22.0	34.2
	15	60.3	74.5	13.2	7.2	24.5	35.8
	16	58.8	63.2	4.4	7.1	27.6	35.3

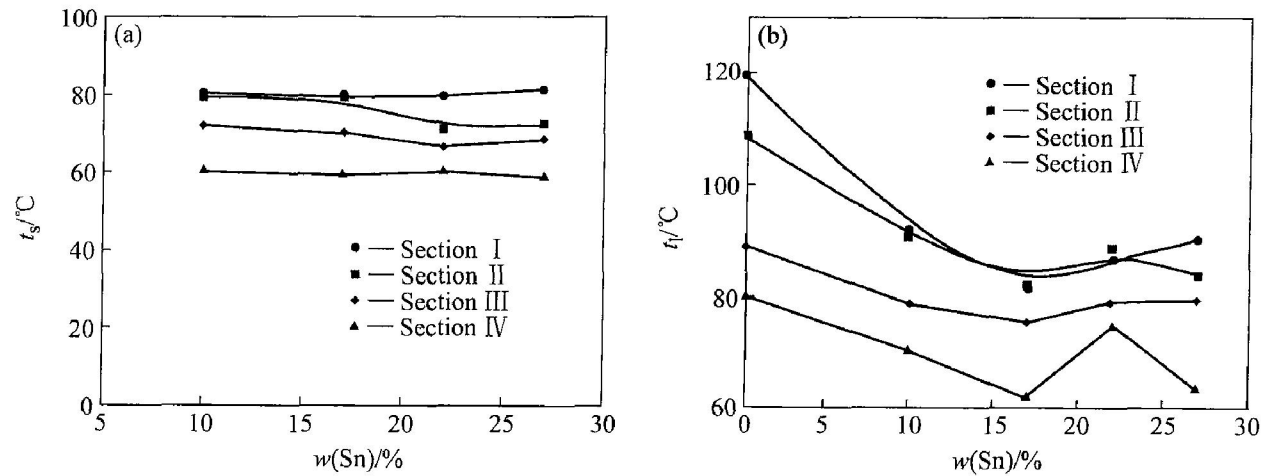


图 4 Bi-Sn-In 合金的固相线(a)、液相线(b)与 Sn 含量、Bi/In 的关系

Fig. 4 Dependence of solidus (a) and liquidus (b) of Bi-Sn-In fusible alloys on content of Sn and ratio of Bi to In

如图 6 所示。随 Sn 含量的增加，合金钎焊接头的剪切强度基本呈上升的趋势(3 号和 4 号合金除外)；但随 Bi/In 的降低(即依 I、II、III、IV 截面的顺序)，合金钎焊接头的剪切强度逐渐下降。从 In 含量看，合金钎焊接头的剪切强度先升高后降低；当 In 含量为 27% 时，合金钎焊接头的剪切强度最大。

在 16 种 Bi-Sn-In 合金中，2 号合金接头的剪切

强度最高；13 号合金接头的剪切强度最低。对照合金的化学成分发现，增加 Bi、Sn 含量，尤其是 Bi 含量可提高合金接头的剪切强度。

2.5 抗拉强度

Bi-Sn-In 易熔合金钎焊接头的抗拉强度，如表 1 所列。在 16 种 Bi-Sn-In 合金中，2 号合金接头的抗拉强度最高，13 号合金接头的抗拉强度最低，这

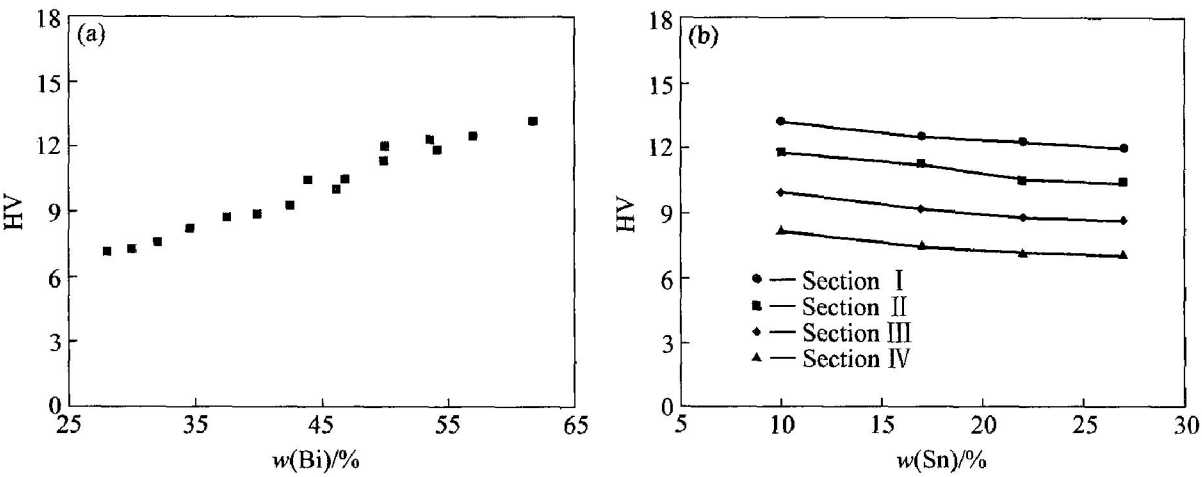


图 5 Bi-Sn-In 合金的硬度与 Bi 含量(a)、Sn 含量及 Bi/In(b) 的关系

Fig. 5 Dependence of hardness of Bi-Sn-In fusible alloys on content of Bi (a), content of Sn and ratio of Bi to In (b)

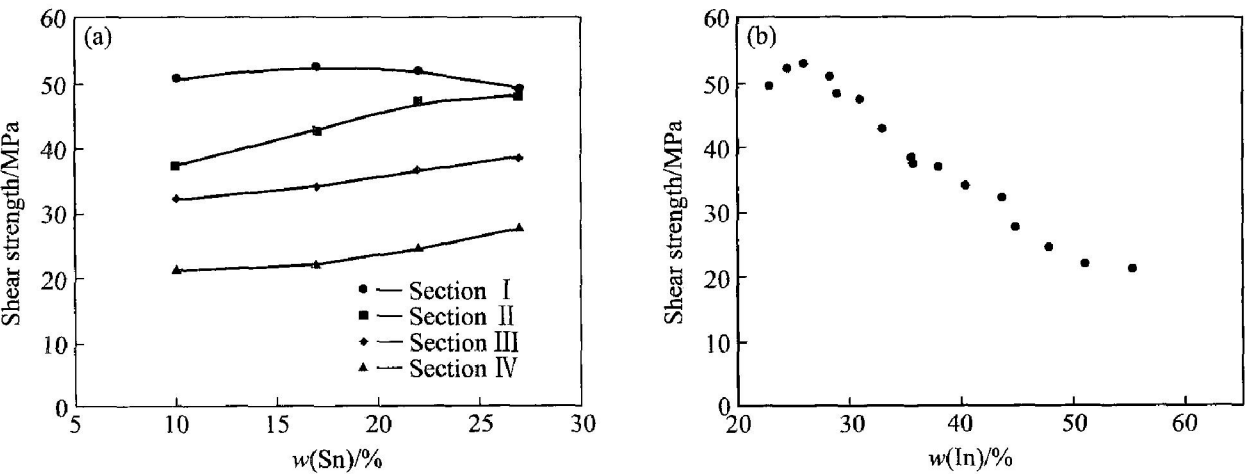


图 6 Bi-Sn-In 合金钎焊接头的剪切强度与 Sn 含量及 Bi/In(a)、In 含量的关系(b)

Fig. 6 Variation of shear strength of Bi-Sn-In soldering joints with content of Sn and ratio of Bi to In(a), and content of In(b)

与剪切强度的变化规律一致。合金接头的抗拉强度随 Sn 含量的增加而略有上升; 但随 Bi/In 的降低而变小(图 7(a))。另外, 合金接头的抗拉强度随 In 含量的增加而线性降低(图 7(b))。这同样说明, 增加合金中的 Bi、Sn 含量, 尤其是 Bi 含量会提高合金钎焊接头的抗拉强度。

3 讨论

3.1 合金元素的作用

由 Bi-Sn、Bi-In、Sn-In 二元相图可知, Bi-Sn 合金的物相组成为 Bi 和含少量 Bi 的 β -Sn^[13]; 随 In 含量的增加, Sn-In 合金可依次形成 β -Sn、 γ (In-Sn₄)、 β (In₃Sn) 和 In 相^[13]; 依 In 含量的增加, Bi-

In 合金可形成 Bi、BiIn、Bi₃In₅、BiIn₂ 及 In 相^[14]。对 Bi-Sn-In 三元易熔合金, 经实验分析发现, 随 Sn、In 含量的增加可在合金中形成 Bi、 β -Sn、BiIn、BiIn₂、 β (In₃Sn) 和 γ (InSn₄) 等物相^[12, 15], 没有其它新物相出现(图 1)。

对 Bi-Sn-In 三元易熔合金, 由于 Bi 相的熔点高(271.3 °C)、硬度和强度大, 因而易熔合金的固相线、液相线、硬度、钎焊接头的剪切强度和抗拉强度随 Bi 含量的增加而增大(图 3、图 5(a)、图 6(a)、图 7(a)); 而 In、BiIn、BiIn₂、 β (In₃Sn) 和 γ (InSn₄) 相的熔点相对较低(156.2 °C、110 °C、90 °C、130 °C、180 °C 左右)、且硬度和强度较小^[16, 17], 因而易熔合金的固相线、液相线、硬度、钎焊接头的剪切强度和抗拉强度随 In 含量的增加

或 Bi/In 的减小而降低(图 4、图 5(b)、图 6 和图 7)。Sn 含量的作用较复杂,对合金固相线的影响较小,但却使液相线在 17% Sn 处出现极小值(图 4b);增大 Sn 含量会使合金的硬度降低(图 5(b)),但反而提高了合金接头的的剪切强度和抗拉强度(图 6(a)和图 7(a))。

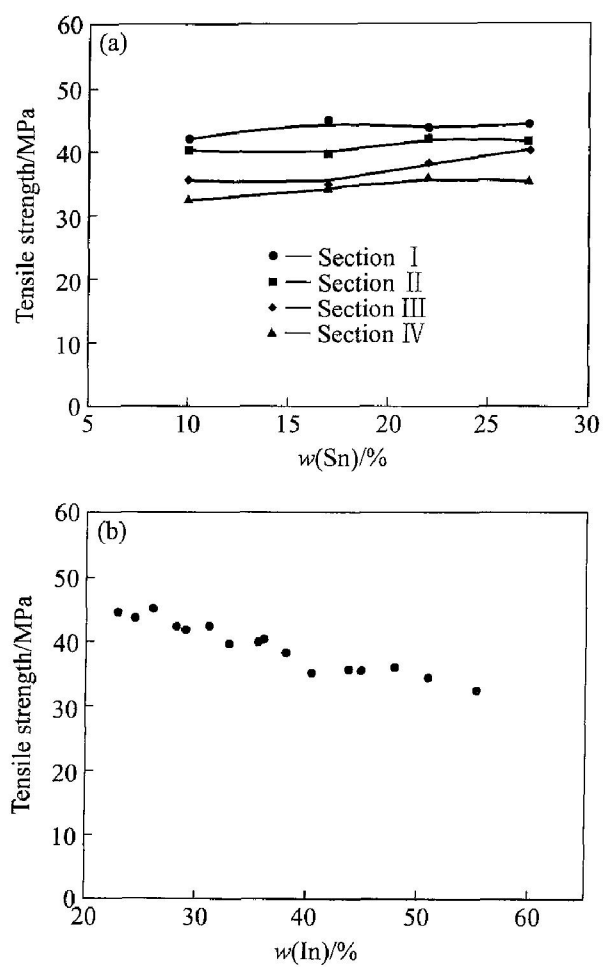


图 7 Bi-Sn-In 合金钎焊接头的抗拉强度与 Sn 含量及 Bi/In(a)、In 含量的变化关系(b)
Fig. 7 Dependence of tensile strength of Bi-Sn-In soldering joints on content of Sn and ratio of Bi to In (a), and content of In (b)

3.2 与 Bi-Pb-Sn-Cd 易熔合金的比较

易熔合金感温元件的重要性能指标是合金的熔化温度和钎焊接头的力学性能,前者决定了易熔合金元件的工作温度,而后者在很大程度上决定了易熔元件使用的可靠性^[1, 18]。表 2 列出了 42.6Bi-17.0Sn-40.4In 合金(10 号合金)与 50.0Bi-25.0Pb-12.5Sn-12.5Cd 伍德合金的各种性能指标。由表可见,10 号 Bi-Sn-In 易熔合金的固、液相线温度分别为 70.2℃、75.1℃,熔程仅为 4.9℃,符合消防用 72℃易熔合金感温元件的要求;且其硬度、钎焊接

头的剪切强度和抗拉强度与伍德合金相当。因此用 10 号的 42.6Bi-17.0Sn-40.4In 控温易熔合金代替现行的 Bi-Pb-Sn-Cd 易熔合金是可行的。

表 2 42.6Bi-17.0Sn-40.4In 与 50.0Bi-25.0Pb-12.5Sn-12.5Cd 伍德合金的性能
Table 2 Properties of 42.6Bi-40.4In-17.0Sn and 50.0Bi-25.0Pb-12.5Sn-12.5Cd Wood alloy

Alloy	$t_s/^\circ\text{C}$	$t_l/^\circ\text{C}$	$\Delta t/^\circ\text{C}$
42.6Bi-17.0Sn-40.4In	70.2	75.1	4.9
Wood alloy	68.5	72.0	3.5

Alloy	Hardness, HV	Shear strength of joint/MPa	Tensile strength of joint/MPa
42.6Bi-17.0Sn-40.4In	9.2	34.1	34.9
Wood alloy	9.0	36.7	41.0

4 结论

- 1) 低铟含量的 Bi-Sn-In 易熔合金由 Bi、 β -Sn 和 InBi 相组成;随 Sn、In 含量的增加,易熔合金的相组成向 BiIn、BiIn₂ 和 γ (InSn₄) 转化。
- 2) Bi-Sn-In 易熔合金的固相线、液相线随 Bi 含量或 Bi/In 的增大而提高,且当 Sn 含量为 17% 时合金的液相线最低。
- 3) 易熔合金的硬度随 Bi 含量或 Bi/In 比的增加而线性增大;但随 Sn、In 含量的增大而明显降低。提高合金的 Sn 含量和 Bi/In,可改善合金钎焊接头的的剪切强度和抗拉强度。
- 4) 42.6Bi-17.0Sn-40.4In 三元易熔合金的熔点、熔程、硬度、钎焊接头的剪切和抗拉强度与 50.0Bi-25.0Pb-12.5Sn-12.5Cd 伍德合金相当,符合 72℃自动灭火洒水喷头感温元件的要求。

REFERENCES

[1] 美国焊接学会钎焊委员会. 软钎焊手册[M]. 崔殿亨, 译. 北京: 机械工业出版社, 1987: 15-18, 206.
American Welding Society Committee on Brazing and Soldering. Soldering Manual[M]. CUI Dianheng, transl. Beijing: China Machine Press, 1987: 15-18, 206.

[2] Abtew M, Selvaduray G. Lead-free solders in microelectronics[J]. Materials Science and Engineering R: Reports, 2000, 27(5-6): 95-141.

[3] Yoon S W, Choi W K, Lee H M. Calculation of sur-

- face tension and wetting properties of Sn-based solder alloys[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(3): 297-302.
- [4] Ohnuma I, Miyashita M, Anzai K, et al. Phase equilibria and the related properties of Sn-Ag-Cu based Pb-free solder alloys[J]. J Electron Mater, 2000, 29(10): 1137-1144.
- [5] Igoshev V I, Kleiman J I. Creep phenomena in lead-free solders[J]. J Electron Mater, 2000, 29(2): 244-250.
- [6] 蒋永琨. 中国消防工程手册: 设计、施工、管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 422.
- JIANG Yong-kun. Handbook of China Fire Engineering: Design, Construction and Management[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 422.
- [7] 美国金属学会. 金属手册(第9版, 第6卷)[M]. 包芳涵译. 北京: 机械工业出版社, 1994: 1395.
- American Society for Metal. Metals Handbook, 9th edition, Vol. 6[M]. BAO Fang-han, transl. Beijing: China Machine Press, 1994: 1395.
- [8] 邓键. 钎焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979: 40.
- DENG Jian. Brazing[M]. Beijing: China Machine Press, 1979: 40.
- [9] 王吉会, 杨亚群, 李群英, 等. Bi-Pb-Sn-Cd 易熔合金的设计与性能研究[J]. 材料开发与应用, 2005, 20(1): 1-3, 8.
- WANG Ji-hui, YANG Ya-qun, LI Qun-ying, et al. Design and properties of Bi-Pb-Sn-Cd fusible alloys[J]. Development and Application of Materials, 2005, 20(1): 1-3, 8.
- [10] 长崎诚立, 平林真. 二元合金状态图集[M]. 刘安生译, 北京: 冶金工业出版社, 2004: 87, 92, 187.
- Nagasaki S, Hirabayashi M. Binary Alloy Phase diagrams[M]. LIU An-sheng, transl. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 87, 92, 187.
- [11] 凯尔 A, 默尔 W A, 维纳里库 E. 电接触和电接触材料[M]. 赵华人译, 北京: 机械工业出版社, 1993: 331-334.
- Keil A, Merl W A, Vinaricky E. Elektrische Kontakte und Ihre Werkstoffe[M]. ZHAO Hua-ren, transl. Beijing: China Machine Press, 1993: 331-334.
- [12] Kabassis H, Rutter J W, Winegard W C. Microstructure of one of the ternary eutectic alloys in the Bi-In-Sn system[J]. Metall Trans A, 1984, A15(8): 1515-1517.
- [13] Morris J W, Goldstein J L F, Mei Z. Microstructure and mechanical properties of Sn-In and Sn-Bi solders[J]. Journal of Metals, 1993, 45(7): 25-27.
- [14] Kabassis H, Rutter J W, Winegard W C. Phase relationships in Bi-In-Sn alloy systems[J]. Mater Sci Technol, 1986, 2(10): 985-988.
- [15] Lee B J, Oh C S, Shim J H. Thermodynamic assessments of the Sn-In and Sn-Bi binary systems[J]. J. Electron Mater, 1996, 25(6): 983-991.
- [16] Glazer J. Microstructure and mechanical properties of Pb-free solder alloys for low-cost electronic assembly: a review[J]. J Electron Mater, 1994, 23(8): 693-700.
- [17] Al-Ganainy G S. Effect of heat treatment on the work-hardening parameters of a new Pb-free solder Sn-9.8% In alloy[J]. Phys Stat Sol (A): Applied Research, 2003, 199(2): 169-176.
- [18] 王吉会, 杨亚群, 李群英, 等. 易熔合金型自动喷水灭火喷头的设计与发展[J]. 消防技术与产品信息, 2004, 6: 21-24.
- WANG Ji-hui, YANG Ya-qun, LI Qun-ying, et al. Design and development of automatic sprinkler with fusible alloy[J]. Fire Technique and Products Information, 2004, 6: 21-24.

(编辑 何学锋)