

# Bi-Sn 熔体在高熵合金上的润湿行为及界面特征

马国峰<sup>1</sup>, 张鸿龄<sup>1</sup>, 孙丽娜<sup>1</sup>, 贺春林<sup>1</sup>, 张波<sup>2</sup>, 张海峰<sup>3</sup>

(1. 沈阳大学, 辽宁 沈阳 110044)

(2. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136)

(3. 中国科学院金属研究所 沈阳国家联合实验室, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 采用传统座滴法研究了低熔点合金 (Bi-Sn) 和高熵合金 (AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr) 之间的润湿行为及界面特征。借助扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 分析了 Bi-Sn/AlCoFeNiCr 和 Bi-Sn/CuCoFeNiCr 界面微观结构。结果表明: AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 高熵合金都是结构单一的固溶体, 但 Bi-Sn 熔体在 CuCoFeNiCr 高熵合金基体上的润湿性明显地优于 Bi-Sn 熔体在 AlCoFeNiCr 高熵合金基体上的润湿性; Bi-Sn/CuCoFeNiCr 界面发生剧烈的化学反应, 有大量的界面反应物生成, Bi-Sn 熔体中的原子 Sn 主要是沿着 CuCoFeNiCr 高熵合金中的富铜相扩散, 而 Bi-Sn/AlCoFeNiCr 界面平直, 且随着润湿温度的升高, Bi-Sn 熔体中的原子向 AlCoFeNiCr 高熵合金基体的扩散程度加强并伴随化学反应, 出现类似“皮下潜流”现象; 由于 CuCoFeNiCr 高熵合金中富铜相的存在, 为 Bi-Sn 在 CuCoFeNiCr 高熵合金基体上的铺展提供了“润湿通道”。

**关键词:** 高熵合金; Bi-Sn 熔体; 润湿; 界面特征; 润湿机制

中图分类号: TG139

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)08-2500-06

高熵合金 (HEA) 是近年来发展起来的新型材料, 国内外关于高熵合金的制备方法、力学性能、热稳定性及其相关领域开展了大量的研究工作<sup>[1-5]</sup>。近年的研究表明, 高熵合金可能同时具有一种或者多种极佳的性能, 如高强度和韧性<sup>[6]</sup>、耐磨性好<sup>[3]</sup>、高硬度<sup>[7,8]</sup>、优异的抗回火软化特性<sup>[9]</sup>和耐蚀性强<sup>[5]</sup>, 这些优越的性能使得高熵合金具有广阔的工业应用前景。

金属熔体在固体金属上的润湿行为及界面特性是金属材料制备和加工过程中的一种常见的物理化学现象, 在许多材料制备和处理过程中起关键作用<sup>[10-12]</sup>。目前报道的有关金属熔体在固体金属上的润湿性研究, 其固态金属大多是常规的晶态材料, 高熵合金作为亚稳材料近年来受到了越来越多的关注, 但金属熔体在高熵合金上的润湿性研究还是很少涉及。

虽然高熵合金组元多, 但是结构单一 (fcc 和 bcc 固溶体), 同时由于异类原子种类众多, 高熵合金表现为扩散迟缓和严重晶格畸变等效应<sup>[13-15]</sup>, 使其具有一些传统合金无法比拟的特性, 这有可能导致金属熔体在高熵合金上的润湿行为及界面特性不同于传统合金材料。因此, 从科学和实用角度出发, 对高熵合金

与金属熔体的润湿性研究是必要的。

为了探究金属熔体/高熵合金润湿性的本质, 首先需要研究一些简单的润湿体系。本实验选择了常用的低熔点 Bi-Sn 作为熔体合金, 利用性能好的 AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 高熵合金作为基体, 通过传统座滴法研究了它们的润湿行为及界面相互作用特点。

## 1 实验

在氩气保护下利用感应熔炼获得共晶成分的 Bi-Sn 合金; 所用的原料均采用纯度不低于 99.9% (质量分数) 的单质 Al、Co、Cr、Fe、Ni 和 Cu 按原子摩尔比名义成分进行配制。配置好的单质原料通过 WCE 300 型钨极磁控电弧炉熔炼成合金锭, 为保证合金锭的化学成分均匀性, 每个合金锭至少需要翻炼 5 次。将合金锭线切割成 12 mm×12 mm×2 mm 的试样, 然后经 400#~2000#砂纸多道次磨平后, 再用金刚石研磨膏进行抛光至表面没有划痕为止。采用 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪 (Cu-K $\alpha$  辐射, 波长 1.540 56 nm) 对合金进行物相分析; 采用日立 S-4800 扫描电子显微镜观察高熵合金组织形貌。

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51401131); 中国博士后基金(2016M601333); 辽宁省自然科学基金(201602518); 辽宁省教育厅项目(L2014476); 开发基金(2016-Z06)

作者简介: 马国峰, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 沈阳大学, 辽宁 沈阳 110044, 电话: 024-62269805, E-mail: guofma@163.com

利用座滴法研究 Bi-Sn 合金与高熵合金的润湿行为, 实验所用设备为自行设计的 STMD300 型液态金属表面张力与润湿性测试装置。润湿实验前, Bi-Sn 合金表面研磨去氧化皮, 切成质量大约 60 mg 的小块, 放在石油醚中超声波清洗去油污, 再经无水乙醇清洗、吹干后用岛津 AEL-160 电子精密天平称重, 记录合金的质量。润湿实验时, 将 Bi-Sn 合金放在研磨好的高熵合金基片中间, 一起放入钼丝炉等温区的陶瓷基片上, 用水平仪调整基片到水平位置。密封炉体, 通冷却水, 抽真空。真空度达到  $10^{-3}$  Pa 时开始升温, 在一定温度下记录时间, 采集图像, 最后用软件进行润湿角的测量。利用带有能谱分析的扫描电子显微镜对界面进行形貌和成分分析。

## 2 实验结果

### 2.1 合金的组织与结构

图 1 是铸态 AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 合金的 X 射线衍射谱。铸态 AlCoFeNiCr 合金 X 射线衍射谱显示合金主要是由单一的 bcc 结构固溶体组成的。当用 Cu 元素替代 AlCoFeNiCr 合金中的 Al 元素, CuCoFeNiCr 合金具有单一的 fcc 固溶体结构, 实现合金由 bcc 结构向 fcc 结构的转变。

图 2 是铸态 AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 高熵合金

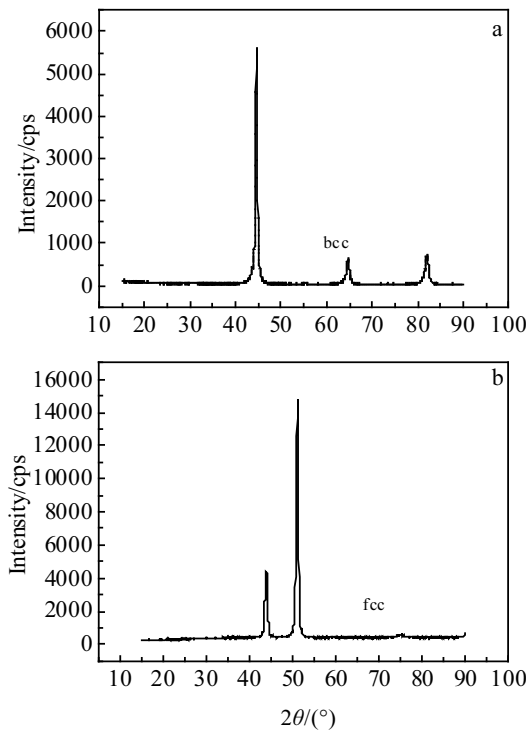


图 1 铸态 AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 合金的 X 射线衍射谱  
Fig.1 XRD patterns of as-cast AlCoFeNiCr (a) and CuCoFeNiCr (b) alloys

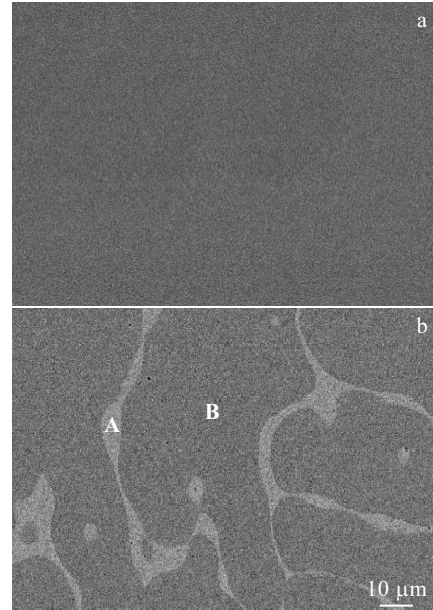


图 2 铸态合金的扫描电子显微镜背散射电子图片  
Fig.2 Back-scattering electron images of as-cast alloys:  
(a) AlCoFeNiCr and (b) CuCoFeNiCr

的扫描电子显微镜背散射电子图片。从图 2a 中可以发现 AlCoFeNiCr 合金具有单一的形貌, 这与 X 射线衍射分析结果相一致, 并进一步证实 AlCoFeNiCr 合金主要是由 bcc 结构固溶体组成的。虽然 X 射线衍射分析结果显示 CuCoFeNiCr 合金具有单一的 fcc 结构, 但图 2b 扫描电子显微镜背散射电子图片却显示 CuCoFeNiCr 合金中存在 2 种明显不同的组织, 分别为图中的 A 组织和 B 组织, 表 1 的能谱分析结果显示 Cu 元素在 A 组织中偏聚, 说明 A 组织为富铜相, 而 B 组织为贫铜相。

### 2.2 润湿行为

图 3 是 Bi-Sn 熔体在 AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 高熵合金基片上连续升温过程中润湿角随润湿时间和温度的变化曲线。从 473 K 开始计时, 可以看出, 2 种润湿体系的润湿动力学曲线基本都包括主要以下 3 个阶段: (1) 孕育阶段, 铺展速度比较慢; 润湿角随着时间的延长、温度的升高基本没有变化; (2) 快速减小阶段, 润湿角随着接触时间的延长、温度的升高而

表 1 图 2b 中铸态 CuCoFeNiCr 高熵合金不同区域的元素含量  
Table 1 EDS analyses of A and B zones of as-cast CuCoFeNiCr HEA in Fig.2b (at%)

| Element | Zone A | Zone B |
|---------|--------|--------|
| Cu      | 12.61  | 87.29  |
| Fe      | 21.87  | 3.12   |
| Ni      | 18.39  | 6.05   |
| Co      | 21.22  | 2.53   |
| Cr      | 25.91  | 1.01   |

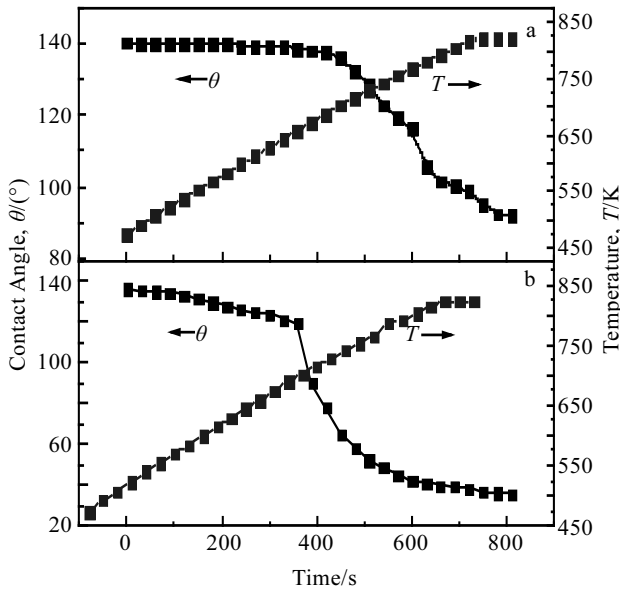


图 3 Bi-Sn 熔体在 AlCoFeNiCr 和 CuCoFeNiCr 高熵合金基片上连续升温过程中润湿角随时间和温度的变化曲线

Fig.3 Variation curves of contact angle with time and temperature of the Bi-Sn molten on AlCoFeNiCr HEA (a) and CuCoFeNiCr HEA (b) substrate at continuous by rising temperature

迅速降低；(3) 趋于平衡阶段，润湿角随时间和温度的变化不明显，达到一个相对稳定的值，也就是通常所说的平衡润湿角。从曲线可以看出，随着润湿温度的升高，润湿角逐渐减小，说明润湿温度对 2 种体系的润湿性都有很大影响。

一般认为润湿角  $\theta$  的大小反应润湿性的好坏<sup>[16]</sup>：非常好的润湿性( $0^\circ < \theta < 30^\circ$ )，好的润湿性( $30^\circ < \theta < 55^\circ$ )，差的润湿性( $55^\circ < \theta < 70^\circ$ )，非常差的润湿性( $\theta > 70^\circ$ )。因此，从图 3 中我们可以发现，Bi-Sn/AlCoFeNiCr 高熵合金润湿体系的润湿角  $\theta$  随接触时间的延长、温度的升高都大于  $90^\circ$ ，说明其体系的润湿性非常差，而 Bi-Sn/CuCoFeNiCr 高熵合金润湿体系的润湿角  $\theta$  随接触时间的延长、温度的升高逐渐达到  $36^\circ$ ，其体系的润湿性逐渐改善，从而进一步说明 Bi-Sn 熔体在 CuCoFeNiCr 高熵合金上的润湿性要优于 Bi-Sn 熔体在 AlCoFeNiCr 高熵合金上的润湿性。

### 2.3 界面特征

熔体在基片上的润湿过程宏观上表现为润湿角的变化，而微观上表现为润湿样品冷凝后界面处微观组织和形貌的变化，并且界面状态对润湿性也有直接的影响。图 4 是 2 种润湿体系非等温润湿样品的界面微观形貌。从图中可以看出，2 种润湿体系的界面处都出现不同程度的扩散和化学反应：Bi-Sn/AlCoFeNiCr

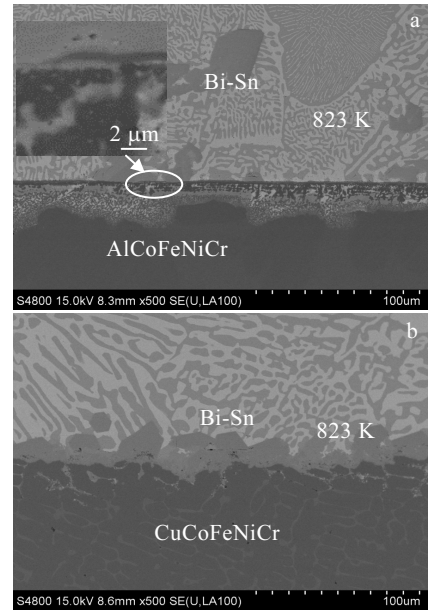


图 4 2 种润湿体系非等温润湿样品中界面处的形貌

Fig.4 Micrographs of interface in the two wetting systems after non-isothermal wetting: (a) Bi-Sn/AlCoFeNiCr and (b) Bi-Sn/CuCoFeNiCr

高熵合金润湿体系的界面比较平直，而且明显发现 Bi-Sn 熔体中的活性原子是从 AlCoFeNiCr 高熵合金基体表面裂缝潜入基体内部，并和基体内部的活性原子发生了化学反应，导致界面处出现了类似人们所熟知的“皮下潜流”现象；而 Bi-Sn/CuCoFeNiCr 高熵合金润湿体系的界面呈凸凹不平的锯齿状，界面反应非常剧烈，同时发现 Bi-Sn 熔体中的活性原子主要是沿着富铜相向 CuCoFeNiCr 高熵合金基体中扩散。

通过图 4 可以看出，2 种润湿体系界面反应生成物非常复杂。为了确定界面反应生成物，分别在每个生成物中选择相对较大点进行成分分析 (EDS)，在图 5a 中选择了 2 个点 (1, 2)，在图 5b 中也选择了 3 个点 (3~5)，点 1~5 对应的成分为： $(\text{CuNi})_6\text{Sn}_5$ ， $(\text{CuNi})_3\text{Sn}$ ， $(\text{FeNi})\text{Sn}_2$ ，Al-Fe-Co-Cr-Sn-Bi，Al-Fe-Co-Cr-Ni。

### 3 分析与讨论

Bi-Sn 熔体和高熵合金基体表面均不可避免地存在微弱的氧化膜，在挣脱氧化膜的束缚之前，固-液间原子不能发生相互作用，润湿体系在此时的情形与非反应体系相似，不能发生铺展行为。当原子挣破氧化膜，固-液原子之间产生相互作用甚至发生反应，导致界面能差值发生变化，产生润湿驱动力，Bi-Sn 熔体才能铺展开。因此，在实验温度范围内，破除氧化膜是润湿过程的决定步骤，但是，从上述实验结果可以

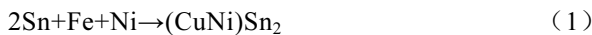
得出 Bi-Sn 熔体在 2 种高熵合金基体上的润湿机制是不完全相同的。

### 3.1 Bi-Sn/AlCoFeNiCr 高熵合金体系的润湿机制

AlCoFeNiCr 高熵合金中由于存在 Al、Cr 等活性元素,其抛光后的表面很容易形成一层薄的氧化膜,而且大部分都是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,由于 Al 和 O 的结合能力更强。由于 AlCoFeNiCr 高熵合金基体表面存在着氧化膜,因此在孕育阶段 Bi-Sn 熔体中的活性原子与 AlCoFeNiCr 高熵合金中的活性原子不能发生相互作用,很难发生铺展,从而导致润湿角很大,与金属在氧化铝陶瓷上的润湿角大小相近。

通常认为,界面反应是破除氧化膜的最好的方式,然而,理论上,Bi-Sn 熔体中的活性原子 Sn 不能置换出 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的 Al 原子。因此,在本实验条件下 Bi-Sn 熔体与氧化膜发生反应的可能性不大。相反,在当前的加热温度下熔体中的 Sn 原子与高熵合金中的 Ni、Fe 原子都能发生反应,这将能大大降低系统的能量。这将是 Bi-Sn 熔体选择性地 AlCoFeNiCr 高熵合金基体表面铺展的热力学条件。

从图 4a 中,发现了类似人们所熟知的“皮下潜流”现象。“皮下潜流”现象是钎料通过破裂的氧化膜通道潜入到了氧化膜底下并把它抬起,进而在“新鲜”的母材表面润湿铺展的结果<sup>[17]</sup>。“皮下潜流”现象在 Ni-Si-B/NiAl<sup>[16]</sup>、Al/TiAl<sup>[18]</sup>等体系中也发生,这些润湿体系共同的特点就是母材一般都含有 Al。同时从能谱分析(图 5b 中点 5)发现,Bi-Sn 熔体和 AlCoFeNiCr 高熵合金基体之间的界面处确实有一层不含 Sn 原子的中间层,成分为 Al-Fe-Co-Cr-Ni,而在图 5b 中点 3 处出现含新相(FeNi)Sn<sub>2</sub> 的“潜流”层,结合图 4a 进一步证明体系出现了“皮下潜流”现象。而本体系中“皮下潜流”现象发生的主要原因是:在加热过程中,由于 AlCoFeNiCr 高熵合金基体(金属)与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化膜的热膨胀系数不同,导致氧化膜产生开裂。Bi-Sn 熔体中的 Sn 原子在氧化膜的热裂缝处与新鲜的 Ni、Fe 等原子发生接触,并在一定温度下,发生了化学反应,所涉及的化学反应很复杂,根据图 5b 其主要化学反应为:



“潜流”层中发生的化学反应,促进了 Bi-Sn 熔体在 AlCoFeNiCr 高熵合金基体表面铺展。

由于高熵合金的高混合熵使得合金中的原子非常混乱,合金中的扩散需要多种不同种类原子的协同扩散,扩散所需要的能量和越过的势垒要比传统合金中大得多,所以合金中的原子扩散变得非常困难,抑制了合金中结构复杂的金属间化合物形成<sup>[15]</sup>。从理论上来说,Bi-Sn 熔体中的原子向高熵合金基体中扩散是

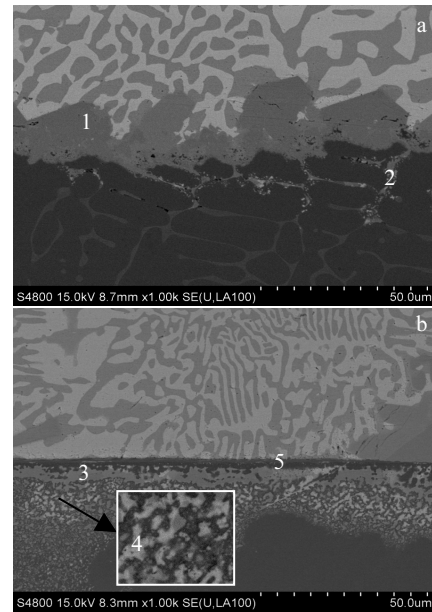


图 5 2 种润湿体系非等温润湿样品界面 EDS 分析  
Fig.5 EDS analysis of interface in two wetting systems after non-isothermal wetting: (a) Bi-Sn/CuCoFeNiCr and (b) Bi-Sn/AlCoFeNiCr

很困难的,但是由于 Sn 原子与 AlCoFeNiCr 高熵合金中的 Ni、Fe 等原子发生反应,破坏了结构单一的 bcc 固溶体,形成了结构相对复杂的金属间化合物(如图 5b 中点 4 所示),形成的这些金属间化合物之间存在着晶界,从而将进一步促进 Bi-Sn 熔体中的原子向高熵合金基体中扩散,正如图 4a 和图 5b 所示。

非反应性润湿在时刻  $t$  的润湿驱动力是其净界面能差,可以表述为:

$$F_d(t) = \sigma_{sv}^0 - \sigma_{sl}^0 - \sigma_{lv}^0 \cos \theta(t) \quad (2)$$

其中,  $F_d(t)$  是时刻  $t$  的润湿驱动力,  $\sigma_{ij}^0$  ( $i, j = s, l, v$ ) 是体系的界面能,  $\theta(t)$  是瞬时接触角。达到平衡时,  $F_d = 0$ , 结果就是经典的杨氏方程。

由实验结果可知, Bi-Sn/AlCoFeNiCr 高熵合金润湿体系的界面反应并不剧烈,界面处没有形成大量反应物,并且与 Bi-Sn 熔体接触的高熵合金基体表面结构基本上没有变化。众所周知,润湿行为不仅由基板表面结构决定,而且受原子扩散和界面反应的影响。由于发生了“皮下潜流”,使 Bi-Sn 熔体中的原子通过氧化膜的缺口潜入基体中,并伴随着化学反应,从而导致润湿角的减小。但当接触角减小到一定值,表、界面能基本达到平衡状态,加上界面反应比较微弱和基板表面结构变化不大,不能继续为润湿提供足够的驱动力  $F_d(t)$ , 因此铺展速度减缓,润湿角随时间的延长和温度的提高变化不大。

由以上分析, Bi-Sn/AlCoFeNiCr 高熵合金体系的润湿机制可以归纳为以下几个步骤:

(1) 随着润湿温度的升高, AlCoFeNiCr 高熵合金基体的氧化膜发生破裂, 出现缺口, Bi-Sn 熔体中的活性原子通过氧化膜的缺口潜入到氧化膜/基体界面, 发生类“皮下潜流”现象;

(2) “潜流”层的 Bi-Sn 熔体原子和高熵合金中的原子相互溶解扩散, 并发生了化学反应, 化学反应的发生, 破坏高熵合金内部单一的 bcc 固溶体结构, 生成了复杂的金属间化合物, 从而又进一步促进了 Bi-Sn 熔体中原子向基体中扩散;

(3) 随着温度的升高, Bi-Sn 熔体中的原子向基体中扩散程度增强, 并伴随着化学反应, 从而导致润湿角的减小, 但由于界面反应比较微弱并且基板表面结构变化不大, 因此并没有从本质上提高体系的润湿性。

### 3.2 Bi-Sn/CuCoFeNiCr 高熵合金体系的润湿机制

本课题组以前研究发现<sup>[19]</sup>, CuCoFeNiCr 高熵合金表面在抛光后, 表面形成一层薄的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的氧化膜, 根据热力学分析 Bi-Sn 熔体中的活性原子 Sn 不能和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发生反应, 从而导致在孕育阶段 Bi-Sn 熔体在 CuCoFeNiCr 高熵合金上的润湿性很差。

对于 CuCoFeNiCr 高熵合金来说, 虽然也是单一的 fcc 固溶体结构, 但是合金中存在 2 种明显不同的相, 分别是富铜相和贫铜相。根据表 1, 可以看出富铜相中 87.29% (原子分数) 是铜元素, 而 Cr 的含量只有 1.01% (原子分数)。因此在富铜相表面的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜非常疏松, 而当润湿温度达到一定程度时, Bi-Sn 熔体中的活性原子 Sn 很容易通过疏松的氧化膜和富铜相中的 Cu、Ni 原子发生如下化学反应:



通过上述的化学反应破除富铜相表面的氧化膜, 而且从图 4b 和图 5a, 可以发现 Bi-Sn 熔体中的 Sn 原子是沿着富铜相向 CuCoFeNiCr 高熵合金基体扩散的。因此, 我们认为 CuCoFeNiCr 高熵合金中的富铜相为 Bi-Sn 熔体在基体上铺展提供了一个“润湿通道”。

大量的 Sn 原子沿着富铜相扩散, 不但和富铜相中的活性原子发生反应, 而且还侵蚀了临近的拥有新鲜界面的贫铜相, 侵蚀区域沿着基体表面方向扩大, 发生剧烈的反应, 并逐渐破除了贫铜相表面的氧化膜, 使氧化膜漂浮在熔体合金中。在润湿实验完成后, 在凝固的 Bi-Sn 熔体表面发现有 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜存在, 如图 6 所示。

从热力学角度分析, 系统内自发进行的反应必然导致整个体系自由能的降低。因此 Aksay 等人认为剧烈的界面反应是获得良好润湿性的必要条件, 界面反应越剧烈润湿性越好<sup>[20]</sup>。他们把固/液界面能表示如下<sup>[20]</sup>:

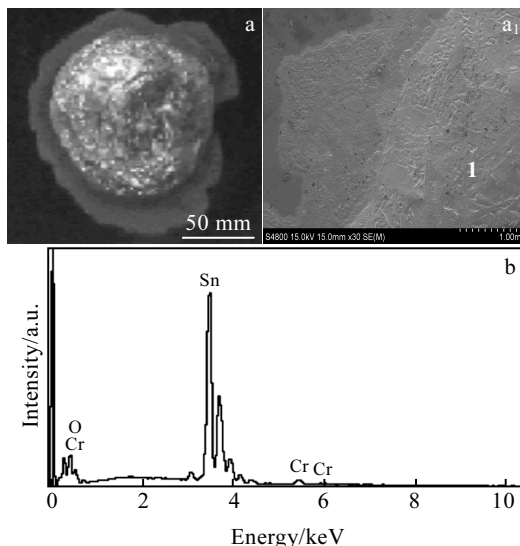


图 6 润湿实验后 Bi-Sn 熔体表面形貌及相应的 EDS 分析  
Fig.6 SEM images (a, a<sub>1</sub>) and EDS spectrum of zone 1 marked in Fig.6a (b) for Bi-Sn molten surface after wetting experiment

$$\sigma_{sl}(t) = \sigma_{sl} + \Delta G(t) \quad (4)$$

式中  $\sigma_{sl}(t)$  是  $t$  时刻的固/液界面能,  $\Delta G(t)$  是通过固液界面反应每单位面积的吉布斯自由能变化。由于固-液反应一旦发生, 固-液间的原子键结合加强, 并且界面反应为润湿提供了额外的驱动力  $\Delta G(t)$ , 因此固-液界面自由能  $\sigma_{sl}$  便会显著减小, 在固体和液体表面能都不变的情况下, 由表、界面自由能差产生的润湿驱动力  $F_d(t)$  迅速增大, Bi-Sn 熔体便能在基板上迅速铺展, 润湿角逐渐减小, 体系的润湿得到极大的改善。

由以上分析, Bi-Sn/CuCoFeNiCr 高熵合金体系的润湿机制可以归纳为以下几个步骤:

(1) 随着润湿温度的升高, Bi-Sn 熔体中的活性原子 Sn 和 CuCoFeNiCr 高熵合金中的富铜相发生相互溶解扩散, 并发生化学反应。随着熔体合金扩散量的增大和化学反应的加剧, 导致临近的拥有新鲜界面的贫铜相被侵蚀;

(2) 随着侵蚀区域沿着基体表面方向扩大, 伴随着化学反应, 并逐渐破除了贫铜相表面的氧化膜, 使氧化膜漂浮到熔体合金表面;

(3) 基体表面的氧化膜被彻底破除, 更多的熔体合金和合金中原子相互扩散溶解并发生剧烈的化学反应, 熔体与基体的结合面变成凹凸不平的锯齿状结合面, 同时导致润湿角逐渐变小。

## 4 结 论

1) AlCoFeNiCr 高熵合金和 CuCoFeNiCr 高熵合金

虽然都是单一的固溶体结构, 但 Bi-Sn 熔体在 CuCoFeNiCr 高熵合金的润湿性优于 Bi-Sn 熔体在 AlCoFeNiCr 高熵合金的润湿性。

2) Bi-Sn/AlCoFeNiCr 高熵合金体系的界面比较平直, 界面反应不剧烈, 但在界面处出现了类似人们所熟知的“皮下潜流”现象, 而 Bi-SnCuCoFeNiCr 高熵合金体系的界面呈凸凹不平的锯齿状, 界面反应比较剧烈。

3) Bi-Sn 熔体在 2 种高熵合金基体上存在着 2 种不同的润湿机制, 主要是由于 CuCoFeNiCr 高熵合金中的富铜相为 Bi-Sn 熔体在 CuCoFeNiCr 高熵合金上润湿提供了“润湿通道”。

#### 参考文献 References

- [1] Wang Z W, Baker I, Guo W *et al. Acta Mater*[J], 2017, 126: 346
- [2] Stepanov N D, Shaysultanov D G, Ozerov M S *et al. Mater Lett*[J], 2016, 185: 1
- [3] Liu X T, Lei W B, Ma L J *et al. Rare Mater Materials and Engineering*[J], 2016, 45(9): 2201
- [4] Liu B, Wang J S, Liu Y *et al. Intermetallics*[J], 2016, 75: 25
- [5] Ye Q F, Feng K, Li Z G *et al. Applied Surface Science*[J], 2017, 396: 1420
- [6] Tsai K Y, Tsai M H, Yeh J W. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(13): 4887
- [7] Wang R, Zhang K, Davies C *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 694: 971
- [8] Chuang M H, Tsai M H, Wang W R. *Acta Materialia*[J], 2011, 59(16): 6308
- [9] Salemi F, Abbasi M H, Karimzadeh F. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 685: 278
- [10] Liashenko O Y, Hodaj F. *Scripta Materialia*[J], 2017, 127: 24
- [11] Ma G F, Ye H, Zhang H L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 690: 903
- [12] Niu X, Lin K L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 646: 852
- [13] Otto F, Yang Y, Bei H *et al. Acta Mater*[J], 2013, 61(7): 2628
- [14] Shahmir H, He J Y, Lu Z P *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 676: 294
- [15] Qiu X W. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 555: 246
- [16] Gale W F, Fergus J W, Ingram W M. *Journal of Materials Science*[J], 1997, 32(18): 4931
- [17] Okamoto I, Ohmori A, Fukada Y. *Transaction of JWR*[J], 1980, 9: 19
- [18] Shen Y, Gale W F, Fergus J W *et al. Materials Science and Technology*[J], 2001, 17(10): 1293
- [19] Ma G F, Li Z K, Ye H *et al. Applied Surface Science*[J], 2015, 356: 460
- [20] Aksay I A, Hoge C E, Pask J A. *Journal of Physical Chemistry*[J], 1974, 78: 1178

## Wetting Behavior and Interfacial Characteristics in the Molten Bi-Sn/High-Entropy Alloy System

Ma Guofeng<sup>1</sup>, Zhang Hongling<sup>1</sup>, Sun Lina<sup>1</sup>, He Chunlin<sup>1</sup>, Zhang Bo<sup>2</sup>, Zhang Haifeng<sup>3</sup>

(1. Shenyang University, Shenyang 110044, China)

(2. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(3. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** The wetting behavior and the interfacial characteristics of the molten Bi-Sn on the AlCoFeNiCr HEA (high entropy alloy) and the CuCoFeNiCr HEA substrate were investigated by a sessile drop method. Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS) were used to analyze the microstructure of the Bi-Sn/AlCoFeNiCr HEA and Bi-Sn/CuCoFeNiCr HEA interface. The results show that the AlCoFeNiCr HEA and the CuCoFeNiCr HEA form with a single solid solution structure. However, Bi-Sn molten alloy on CuCoFeNiCr HEA substrate has better wetting characteristics than Bi-Sn molten alloy on AlCoFeNiCr HEA substrate. With increasing wetting temperature, a number of intermetallic compounds are generated at the interface between the molten Bi-Sn and the CuCoFeNiCr HEA substrate, and the diffusion of Sn atom along the Cu-rich solid-solution phase in CuCoFeNiCr HEA is much more intense. On the contrary, the interface of the Bi-Sn/AlCoFeNiCr HEA system is still the straight interface, and there are new intermetallic compounds on the Bi-Sn/AlCoFeNiCr HEA interface with increasing wetting temperature. It is found that the Cu-rich phase in CuCoFeNiCr HEA provides a “wetting channel” for the wetting process between the molten Bi-Sn and CuCoFeNiCr HEA substrate, which result in the two wetting systems with different wetting mechanisms.

**Key words:** high entropy alloy; Bi-Sn molten alloy; wettability; interface; wetting mechanism

Corresponding author: Zhang Hongling, Ph. D., Professor, Shenyang University, Shenyang 110044, P. R. China, Tel: 0086-24-62269805, E-mail: zh119792002@163.com