微重力环境及地基的高温熔体润湿特性

袁章福^{1,2*}, 王容岳¹, 谢珊珊¹, 徐秉声², 于湘涛¹, 刘敬霞²

1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083;

2. 北京大学工学院, 北京 100871

*联系人, E-mail: zfyuan@pku.edu.cn

收稿日期: 2019-05-22; 接受日期: 2019-07-24; 网络出版日期: 2019-12-06

国家自然科学基金(编号: U1738101)和中国科学院空间科学战略性先导科技专项(编号: XDA04020400, XDA04020202)资助

摘要 经典材料表面与界面的一些实验现象被重力效应覆盖, 影响人们对材料本质物理特性的深入了解. 因此, 微重力对熔体的润湿行为和固/液界面反应的作用机理研究具有重要的意义. 本文综合前人对高温熔体特别是高温锡基合金的润湿行为及与基板间的界面反应特性的研究, 通过与微重力条件下相关研究及实验结果对比, 总结了卫星微重力环境及地基环境下的高温熔体润湿特性, 为以后的空间实验及分析提供理论参考.

关键词 润湿性, 锡基合金, 微重力, 固/液界面反应

PACS: 81.05.Bx, 81.05.Zx, 81.10.Mx, 82.65.+r

1 引言

人们日常观察到的大部分物理现象都受重力影响, 但是在微重力条件下这些物理现象可能截然不同, 比如失重条件下的火焰呈半圆形、熔化的金属液滴形状呈绝对球形、Marangoni对流等. 随着空间科学的发展, 越来越多的学者聚焦于微重力科学. 为了探究被重力条件所掩盖的科学现象与规律, 在微重力环境下对物质特性的研究必不可少. 对于高温熔体而言, 地基条件下由重力作用引起的对流、沉降等效应对熔体凝固后材料的质量、结构都有影响, 微重力条件下可以避免重力作用产生的沉浮、对流以及流体静压力对熔体的影响, 从而可以观察到被重力效应所掩盖的材料性质, 进而解决地面条件下材料制备中的一些问题,

获得高性能复合材料^[1-3]. 美国国家航空航天局(NASA)及欧洲航天局(ESA)对非晶合金的形成、热物理性质、形核动力学及晶体生长方面进行了空间微重力实验研究^[4-9], Hofmann等人^[1]进行了非晶复合材料中枝晶生长的地基实验, 并计划在国际空间站进行W和Ta的增强非晶复合材料研究.

焊接是电子工业中封装交互技术的关键, 焊料的物理化学性质直接关系到焊接质量. 电子工业中普遍使用锡基合金作为焊料. 空间飞行器在实际暴露环境下电子电路中焊盘镀锡层及锡基焊料表面的晶须自发生长行为, 可能导致电子器件短路, 引发空间飞行器的电路系统故障, 甚至会导致空间飞行器的损毁, 因此需要研究微重力条件下锡基合金的物化特性. 另外, 脱焊或开焊会引起短路, 损坏电子产品. 钎焊工艺中多使用

引用格式: 袁章福, 王容岳, 谢珊珊, 等. 微重力环境及地基的高温熔体润湿特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 047004

Yuan Z F, Wang R Y, Xie S S, et al. Wettability of high-temperature melts under microgravity and ground gravity conditions (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 047004, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0175

Sn-Pb合金作为焊接材料, Sn-Pb合金具有熔点低、力学性能优良、润湿性及铺展性能良好等特点, 但是Pb具有毒性, 对人们的身体健康以及环境都存在较大的危害^[10]. 目前尚未开发出新的材料可以完全替代Sn-Pb合金, 开发无铅焊锡材料, 实现无铅化焊接是电子制造业发展的必经之路^[11].

焊接过程中, 焊料能否与基板形成良好的润湿一定程度上可以反映该焊料的可焊性. 润湿是一种常见的界面现象, 合金熔体与固体相接触处所发生的润湿行为和液/固界面上所发生的原子交互作用, 是金属材料表面与界面研究经典的科学问题. 十九世纪初Young^[12]提出的Young氏方程是研究材料润湿性的一个重要理论依据. 近年来学者们对润湿机理以及润湿行为的研究结果表明, 润湿性与液/固界面上发生的原子交互作用密切相关, 并将其分为反应性润湿和非反应性润湿即物理润湿^[13]. 研究不同成分的合金焊料在基板上的润湿特性对提高焊接稳定性、开发新型复合无铅焊锡材料具有指导意义. 对于高温熔体, 地基条件下由于器壁作用及重力作用的影响, 很难获得准确的热物性参数, 空间微重力环境是获得准确参数的重要途径.

2 高温熔体的润湿性研究现状

2.1 高温熔体润湿行为

润湿是一种常见的界面现象, 在热力学上被定义为相界面吉布斯自由能变化. 润湿性的好坏最直接的表征是接触角的大小. 接触角是指液滴在基板上达到静止平衡状态时固/液/气三相界面交点处的气/液界面切线与固/液界面切线之间的夹角 θ . 根据接触角的大小将润湿行为分为润湿与不润湿. 液滴在基板上的润湿行为与其表面张力有关, 表面张力的方向及大小不同, 液滴会呈现出不同的润湿现象. 除此之外, 基板的表面粗糙度、倾斜角度对液滴的润湿行为也有影响.

高温熔体润湿过程主要分为基板溶解、界面吸附及界面化学反应产生金属间化合物三个阶段, 润湿机制可分为溶解驱动润湿、吸附驱动润湿、化学反应驱动润湿^[14]. 一般情况下反应性润湿首先是基板溶解, 即基板元素通过固/液界面扩散到焊料内部, 温度一定的情况下, 给定溶解体系在三相线处达到化学及几何

平衡, 即熔体中各成分均匀分布且达到饱和, 三相界面张力处于平衡状态. Yost等人^[15,16]在研究Sn-Bi合金与Bi基板的润湿特性时, 根据三相界面处几何关系估算了固/液界面能, 发现随着Bi溶解量的增加熔滴体积逐渐增大, 而接触角与体系的尺寸无关. Warren等人^[17]根据溶解驱动润湿原理, 基于连续扩散模型建立了Sn-Bi合金在Bi上的铺展动力学, 认为三相线的移动受基板元素在熔体中浓度梯度的影响. 界面吸附是焊料与基板发生化学反应的重要前提, 参与界面反应的焊料中, 金属元素在界面富集并吸附, 当其吸附量超过临界浓度时在界面处发生反应, 生成金属间化合物并在界面上形核析出. Saiz等人^[18]认为参与反应的金属元素在界面处的吸附能驱使三相线的移动. 反应驱动润湿意味着界面反应自由能变化及界面反应产物决定了合金在基板上的润湿特性.

2.2 锡基合金熔体润湿行为的研究

影响锡基合金熔体润湿行为及铺展性能的主要因素有温度、熔体特性、基板材料、基板表面结构、氧分压等^[19-21]. 当高温熔体与基板金属元素发生化学反应时, 基板会发生局部熔损, 同时在界面层生成金属间化合物. 在焊接过程中这种化合物反应层是影响合金焊接强度的重要因素^[22]. 生成金属间化合物的种类与界面处元素的扩散及发生的化学反应有关^[23,24]. 在对高温熔体的润湿行为研究中, 最常用的方法是座滴法, 其测量原理如图1所示. 将待测合金切割成高度与直径相同的圆柱体, 置于基板中央. 将样品与基板置于管式炉中加热, 通入脱氧后的高纯Ar, 管式炉一侧有平行光源, 另外一侧设置拍摄相机, 拍摄合金熔化过程的照片经过软件处理得到接触角等数据.

润湿性是衡量焊料质量好坏的重要标准之一, 国内外关于无铅焊料合金润湿性的研究也取得了一些成果. 目前常用的无铅焊料合金主要有Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Bi, Sn-Zn四大体系以及添加Bi, In, Ni, Cu, Ag, Al等元素后构成的三元或四元合金焊料. 在通过研究它们对铜基板的润湿过程发现^[25], Sn-Zn合金的润湿性最差, 并且随着温度的上升其接触角始终保持在116°, 这是因为Zn极易被氧化, 而Cu被大量溶解, 界面反应较差; Sn-Ag-Cu合金及Sn-Bi-Cu合金的铺展时间短, 其接触角随着温度的上升而减小, 润湿性较好.

在地面实验时, 控制基板缓慢倾斜, 熔融金属会沿

图 1 座滴法测量高温熔体润湿性装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of molten metal wettability measurement device by sessile drop method.

着基板平面滑动, 熔滴产生滞后行为, 阻止熔滴在基板表面自由铺展. 图2是倾斜过程中静止形态下Sn-3.0Ag-0.5Cu合金的熔滴形貌^[26]. 随着基板倾斜角度的增加, 熔滴在基板上的滑动行为分为两个阶段. 第一阶段前三相点不动, 后三相点移动, 当前三相点处的表面张力与重力分力无法达到平衡时进入第二阶段, 前三相点开始向前移动, 三相接触线变长. 在对冷却后的熔滴及基板的微观形貌观察中发现, 熔滴与基板间有两层金属间化合物反应层生成, 靠近合金侧的反应层为扇贝状的金属间化合物, 其主要成分是 Cu_6Sn_5 , 靠近铜基板侧的较薄的反应过渡层为 Cu_3Sn .

图 2 (网络版彩图) 490 K下Sn-3.0Ag-0.5Cu在倾斜Cu基板上的熔滴形貌^[26]

Figure 2 (Color online) The droplet morphology of Sn-3.0Ag-0.5Cu on tilted Cu substrate at 490 K [26].

图3是不同组元锡基合金接触角滞后性和温度的关系^[25,27]. 前后接触角差异越明显, 熔滴在惰性基板上的铺展能力越弱, 在反应性基板上的结合强度越强. Sn-3.5Ag合金在倾斜铜基板上的接触角随温度升高而降低, 490 K左右其与铜基板的接触角为 141° ; 在到达熔点温度时的接触角滞后为 92° , 接触角滞后也随温度升高而降低. 该润湿过程为反应性润湿, 铜基板与Sn-3.5Ag合金界面处的反应相对剧烈, 生成了大量的 Cu_6Sn_5 , 阻碍了熔融合金在基板上的铺展^[27]. 相比之下Sn-Ag-Cu合金更容易在Cu基板上润湿. 向锡基合金中增加合金组元可以改善合金润湿性能.

对Sn-30Bi-0.5Cu合金在铜基板上的润湿动力学进行了详细研究^[28], 结果表明Sn-30Bi-0.5Cu合金熔滴在铜基板上的铺展分为三个阶段: 在孕育期铺展半径

图 3 (网络版彩图) 不同组元锡基合金接触角滞后性与温度的关系^[25,27]

Figure 3 (Color online) Relationship between contact Angle hysteresis and temperature of different Sn-base alloys [25,27].

不明显; 准静态下降阶段中合金与基板之间有强烈的化学反应, 铺展半径迅速增加, 接触角快速降低; 而后到达趋势渐稳阶段, 铺展半径和接触角变化缓慢, 直到平衡状态. 在493–523 K温度范围内, 铺展速率与Genes^[29]提出的铺展模型符合程度较好, 温度越高Sn-Bi-Cu与Cu的润湿性越好. 对于反应性润湿, 其铺展过程与反应过程同时进行, 界面处合金中的Sn元素与基板中的Cu元素相互扩散形成 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 两种化合物, 有利于提高三相线的移动速率.

锡基合金与Cu之间的润湿反应、Sn-Ag-Cu与Ni-P化学涂层钎焊过程中界面反应控制^[26,30–32]、Cu/钢、Cu/Fe、Ag/钢、Al/Fe等界面反应, 液态金属在钢、Fe和Ni上的铺展动力学的研究^[33]中也得到了类似的规律, 在适宜的温度和时间条件下, 液/固界面上将有一定厚度的界面反应层形成并扩展, 其反应过程为熔体向固相中扩散, 固相向熔体中溶解, 在反应区域形成相应的反应产物, 对熔体与基板的润湿行为有着重要影响.

2.3 锡基合金在不同基板上的铺展模拟研究

数值模拟研究能够对探寻微重力条件下熔体行为进行预测, 地基条件下的模拟为其奠定了基础. 通过能量最小化原理及有限元分析法, 结合实验结果对高温熔体的铺展行为进行模拟^[26], 研究了熔滴在不同倾角基板上的理论形貌和三相线移动规律. 合金在水平基板上熔化, 熔滴形貌呈对称性, 当基板发生倾斜时在

平行于基板的方向受到重力分力的作用, 熔滴形貌的对称性发生改变. 图4为模拟的Sn-3.0Ag-0.5Cu合金熔滴在不同基板上的形貌及用Surface Evolver软件模拟的三相线移动情况^[34]. 从图4(a)对熔滴形貌的模拟中可以看出, 随着基板倾斜角度的增加, 熔滴中心沿基板向前移动, 边缘横向距离变长, 熔滴高度降低; 在图4(b)中对三相线变化情况模拟中可以看出, 前三相点附近的三相线几乎没有发生位移而后三相点附近的三相线沿基板向下收缩, 底面轮廓不再是对称圆形.

2.4 重力对高温熔体润湿性的影响

在地面条件下, 由重力引起的对流将改变液相中的温度场与溶质浓度分布. 研究表明, 重力对润湿性有很大影响. 王超英等人^[35]在Ga-Sb熔滴界面交互作用的研究中发现, 重力场下Ga-Sb与基板的液/固界面的相互作用较强, 且存在较宽的过渡区. Nagai等人^[36]利用落塔等短时微重力研究了熔体In在石英玻璃上的润湿性, 结果表明, 在重力条件下, 熔体In的润湿形状是椭圆形的, 而在微重力条件下熔体In的润湿形状是球形的, 并且在微重力条件下的接触角小于重力条件下的接触角.

3 微重力条件下锡基合金的润湿性研究

研究微重力条件下锡基合金的流动特点对揭示锡晶须自生长机理及开发无铅焊锡合金材料有重要意

图4 (网络版彩图) 不同倾角基板上的Sn-3.0Ag-0.5Cu合金熔滴形貌模拟及三相线移动模拟^[26,34]. (a) 理论形貌模拟; (b) 熔滴三相线移动模拟

Figure 4 (Color online) Morphology simulation and three-phase line movement simulation of Sn-3.0Ag-0.5Cu alloy droplets on different tilted substrates^[26,34]. (a) Theoretical morphology simulation; (b) three-phase line movement simulation.

义. 并且微重力条件下没有浮力对流和密度分层, 排除了重力因素的影响, 对物质的热物性参数测量更为可靠. 润湿性是熔体的基本物理参数, 对研究空间材料的晶体生长行为, 开发复合材料基的空间焊接方面都有重要作用. 在空间微重力条件下, 熔滴形貌不再受重力影响. 日本在1991年利用TR-1A型火箭进行了弥散强化合金粒子和基体间的润湿性研究. 研究表明, 重力对熔滴的润湿性存在显著影响, 空间微重力条件下Ag-Cu-Ti合金在铝基板上的接触角比地面上要小很多. 但是Warren等人^[17,36-39]的研究认为接触角的变化是由于弛豫造成的, 并非受重力影响. 重力对润湿性的影响仍然有待进一步研究.

空间微重力实验技术难度大, 成本高, 实验机会少, 落塔和飞机抛物线实验微重力时间短, 样品尺寸受限, 因而国内外在微重力条件下材料性能的研究方面都做了大量的地基实验, 空间实验研究很少.

3.1 微重力条件下Ag-Cu-Sn对铁基板的润湿性研究

1990年中国科学院金属研究所利用我国返回式科学实验卫星研究了不同润湿性合金熔体在空间微重力条件下的润湿及凝固行为^[38]. 结果表明在空间微重力环境和地基重力环境下Ag-Cu-Sn合金与铁基板的接触角明显不同, 如图5(a)和(d)所示, 微重力环境下Ag-Cu-Sn合金的接触角明显大于地基环境下, 这是由于重力作用使液滴形貌发生了变化, 固/液界面形貌不同, 界面处所发生的反应也不同. 在对界面处的微观形貌进行观察发现, 地基重力场环境下的液滴组织比较细小, 空间微重力环境中的液滴组织比较粗大, 如图5(b)和(e)所示; 在重力场中液态Ag-Cu-Sn合金会向固态铁基片中扩散, 但是微重力环境中恰恰相反, 与基片相连位置存在许多黑色圆形小颗粒, 如图5(c)和(f)所示, 经检测小黑点的成分为纯Fe.

3.2 卫星微重力条件下Sn-Ag-Cu合金在铜环基板上的界面特性分析

作者研究团队在2016年发射的实践十号(SJ-10)卫星上进行了空间材料科学微重力实验, 研究锡基合金在微重力条件下发生固/液相变时的界面现象, 并将微重力环境下锡基合金焊料的熔化实验研究与地基环境下焊料润湿特性进行比较, 解释微重力环境对熔融锡基合金焊料铺展行为的影响, 研究了锡基合金微重力

图5 空间微重力(返回式卫星)和地面重力场环境中Ag-Cu-Sn合金与Fe基片之间的液/固界面及表面形貌^[38]. (a), (b), (c) 微重力环境中; (d), (e), (f) 重力环境中

Figure 5 Liquid/solid interface and surface morphology between Ag-Cu-Sn alloy and Fe substrate in space microgravity (Recoverable satellite) and ground gravity field environment^[38]. (a), (b), (c) In a microgravity environment; (d), (e), (f) in a gravitational environment.

条件下凝固过程的界面现象与组织形成规律.

空间实验样品被封装在安瓿瓶中, 其封装结构如图6所示. 将高度与直径均为5 mm的两个不同成分的样品置于内径为5 mm, 厚度为1 mm的Cu环内, 将组合好的样品安置于图6(a)所示的安瓿瓶中后置于加热炉内, 在SJ-10返回式卫星上进行润湿性实验. 对返回卫星中回收的样品进行分析, 沿样品中两种合金的垂直剖面切割, 如图6(b)中左图红色虚线所示, 观察锡基合金熔滴及锡基合金/铜基板界面处的微观形貌. 由于失去重力作用, 合金熔体中的气泡不能及时溢出, 因而在凝固后的合金样品内部分散着很多细小的气孔. 对微重力条件下合金元素的扩散分布和合金/基板界面反应层的物相成分进行研究, 结果发现安装在无氧铜环内部的Sn-3.5Ag和Sn-17Bi-0.5Cu合金熔化后, Ag元素均匀分布在合金本体中, 而由于Sn元素由合金本体向界面扩散并参与界面反应, 合金相中剩余的Bi元素形成块状聚集物并主要偏聚于界面层金属间化合物反应层体侧外缘; 合金中铜元素主要来自铜基板溶解和向合金中的扩散. 经过对合金/基板界面处的成分物相分析发现, 在合金与基板界面有双层金属间化合物生成, 分别是靠近基板一侧的Cu₃Sn及靠近合金一侧的Cu₆Sn₅层, 如图7(a)所示; Sn-3.5Ag和Sn-Sb合金熔化后在Cu基板上发生界面反应并生成了三层物质, 分别为靠近基板一侧较薄的Cu₄₁Sn₁₁, 中间层Cu₃Sn及靠近焊

图 6 (网络版彩图) 样品封装示意图. (a) 安瓿瓶封装示意图; (b) 样品安装及切割示意图; (c) 空间多功能材料合成炉示意图

Figure 6 (Color online) Sample packaging diagram. (a) Diagram of ampoule bottle packaging; (b) sample installation diagram; (c) space multifunctional material synthesis furnace diagram.

料一侧的浅色的 Cu_6Sn_5 层, 如图7(b)所示. Sb元素在合金Sn中比在其它地方富集的多, 但是, 在体相中的支晶内部没有检测到Sb元素.

4 结语

高温熔体在基板上的润湿性、铺展性、滞后性是表征其自身物理化学特性的重要参数. 微重力条件可避免由于重力引起的浮力对流、密度分层、流体静压力等因素对物质物理化学特性的影响. 基于国内外研究者做过的大量地基研究以及丰富的前期准备工作, 完成了空间微重力条件下以锡基合金为代表的高温熔体润湿特性及界面行为的研究工作. 结合前人的研究结果, 总结了重力作用对高温熔体的润湿行为及界面反应的影响规律.

(1) 重力能够显著影响高温熔体的熔滴形貌、接

图 7 (网络版彩图) Sn-3.5Ag和Sn-17Bi-0.5Cu, Sn-3.5Ag和Sn-Sb界面层金属间化合物分布. (a) Sn-3.5Ag和Sn-17Bi-0.5Cu; (b) Sn-3.5Ag和Sn-Sb

Figure 7 (Color online) Distribution of intermetallic compounds in Sn-3.5Ag and Sn-17Bi-0.5Cu, Sn-3.5Ag and Sn-Sb interfacial layers. (a) Sn-3.5Ag and Sn-17Bi-0.5Cu; (b) Sn-3.5Ag and Sn-Sb.

触角. 空间微重力条件下熔滴呈球形, 而地基重力场中熔滴呈椭球形; 微重力条件下的Ag-Cu-Sn合金与铁基片的接触角大小比地基重力条件下大约 29° .

(2) 重力对高温熔体在基板上润湿过程中的界面反应有显著影响. 空间微重力条件下合金元素Ag, Bi扩散比较均匀; 微重力与重力条件下, Sn-3.5Ag和Sn-17Bi-0.5Cu合金与铜环基板界面处生成的中间产物均为 Cu_3Sn 及 Cu_6Sn_5 , 但其形态与分布同地面相比略有差别.

(3) 空间微重力条件下的凝固合金内部存在许多小气泡, 而地基重力条件下凝固合金内部平整, 无小气泡生成.

现有的研究对重力作用对熔体固/液界面处的影响机理研究取得了一定的成果, 但是对微重力条件下表现出的行为机制及机理分析仍不明确, 重力因素对熔体润湿行为和界面交互作用的影响机制有待进一步探究.

参考文献

- 1 Hofmann D C, Roberts S N. Microgravity metal processing: From undercooled liquids to bulk metallic glasses. *NPJ Microgravity*, 2015, 1: 15003
- 2 Walter H U. Fluid Sciences and Materials Science in Space. Berlin-Heidelberg: Springer, 1987 [瓦尔特·H. U., 主编. 空间流体科学与空间材料科学. 葛培文, 王景涛, 等译. 北京: 中国科学技术出版社, 1991]
- 3 Kang Q, Hu W R. Microgravity experimental satellite—SJ-10 (in Chinese). *CAS Bull*, 2016, 31: 574–580 [康琦, 胡文瑞. 微重力科学实验卫星——“实践十号”. 中国科学院院刊, 2016, 31: 574–580]
- 4 Kozachkov H, Kolodziejska J A, Roberts S, et al. Study of mushy-zone development in dendritic microstructures with glass-forming eutectic matrices using electrostatic levitation. *ISRN Mater Sci*, 2013, 2013(12): 1–7
- 5 German R M. Lower sintering temperature tungsten alloys for space research. *Int J Refractory Met Hard Mater*, 2015, 53: 74–79
- 6 Torres A, Ganley J, Maji A. Experimental and analytical techniques for studying ZBLAN crystallization in microgravity. *Exp Tech*, 2016, 40: 501–512
- 7 German R M, Johnson J L. Replication experiments in microgravity liquid phase sintering. *Metall Mat Trans A*, 2016, 47: 2286–2299
- 8 Zimmermann G, Sturz L, Nguyen-Thi H, et al. Columnar and equiaxed solidification of Al-7 wt.% Si alloys in reduced gravity in the framework of the CETSOL project. *JOM*, 2017, 69: 1269–1279
- 9 Tourret D, Karma A. Multiscale dendritic needle network model of alloy solidification. *Acta Mater*, 2013, 61: 6474–6491
- 10 Lai H L, Duh J G. Lead-free Sn-Ag and Sn-Ag-Bi solder powders prepared by mechanical alloying. *J Elec Materi*, 2003, 32: 215–220
- 11 Li Y, Moon K, Wong C P. Electronics without lead. *Science*, 2005, 308: 1419–1420
- 12 Young T. An essay on the cohesion of fluids. *Proc R Soc London*, 1800, 1: 171–172
- 13 Kumar G, Prabhu K N. Review of non-reactive and reactive wetting of liquids on surfaces. *Adv Colloid Interface Sci*, 2007, 133: 61–89
- 14 Heine D R. Wetting and spreading dynamics. *Plasma Process Polym*, 2008, 5: 206
- 15 Yost F G, O'Toole E J. Metastable and equilibrium wetting states in the Bi-Sn system. *Acta Mater*, 1998, 46: 5143–5151
- 16 Yost F G, Sackinger P A, O'Toole E J. Energetics and kinetics of dissolutive wetting processes. *Acta Mater*, 1998, 46: 2329–2336
- 17 Warren J A, Boettinger W J, Roosen A R. Modeling reactive wetting. *Acta Mater*, 1998, 46: 3247–3264
- 18 Saiz E, Tomsia A P. Kinetics of high-temperature spreading. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2005, 9: 167–173
- 19 Cazabat A M, Stuart M A C. Dynamics of wetting: Effects of surface roughness. *J Phys Chem*, 1986, 90: 5845–5849
- 20 Volpe C D, Maniglio D, Morra M, et al. The determination of a “stable-equilibrium” contact angle on heterogeneous and rough surfaces. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2002, 206: 47–67
- 21 Starov V M, Zhdanov S A, Kosvintsev S R, et al. Spreading of liquid drops over porous substrates. *Adv Colloid Interface Sci*, 2003, 104: 123–158
- 22 Wang C, Shen H. Effects of Ni addition on the interfacial reactions between Sn-Cu solders and Ni substrate. *Intermetallics*, 2010, 18: 616–622
- 23 Zeng G, Xue S, Zhang L, et al. A review on the interfacial intermetallic compounds between Sn-Ag-Cu based solders and substrates. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2010, 21: 421–440
- 24 Xu B S, Chen J W, Yuan Z F, et al. Simulation analysis on the profiles of droplets wetting on the substrates. *J Dispersion Sci Tech*, 2015, 36: 1816–1824
- 25 Wang C L, Zhao H X, Li J Q, et al. Wettability of Sn-Zn, Sn-Ag-Cu and Sn-Bi-Cu lead-free solder alloys with copper substrate (in Chinese). *Chin J Process Eng*, 2009, 9: 829–832 [汪春雷, 赵宏欣, 李建强, 等. Sn-Zn, Sn-Ag-Cu 和 Sn-Bi-Cu 无铅焊锡合金与铜的润湿性. 过程工程学报, 2009, 9: 829–832]
- 26 Xu B S, Wu H, Han L, et al. Simulation analysis on the surface morphology of Sn-3.0Ag-0.5Cu melting on the inclined Cu substrate (in Chinese). *Nonfer Metals Sci Eng*, 2014, 5: 7–12 [徐秉声, 吴湖, 韩琳, 等. 熔融 Sn-3.0Ag-0.5Cu 在倾斜铜基板上表面形貌的模拟. 有色金属科学与工程, 2014, 5: 7–12]
- 27 Zhan Y P, Xu H Y, Wang C Y, et al. Wettability and interface layer characteristics of Sn-3.5Ag solder alloy with tilting copper and nicker substrates (in Chinese). *Comput Appl Chem*, 2011, 28: 680–684 [战亚鹏, 徐红艳, 王晨钰, 等. Sn-3.5Ag 合金在 Cu, Ni 倾斜基板的润湿及界面特性. 计算机与应用化学. 2011, 28: 680–684]
- 28 Zang L K, Yuan Z F, Zhan Y P, et al. Spreading kinetics of a Sn-30Bi-0.5Cu alloy on a Cu substrate (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 42–46 [臧丽坤, 袁章福, 战亚鹏, 等. Sn-30Bi-0.5Cu 合金在 Cu 基板上的铺展动力学. 科学通报, 2012, 57: 42–46]

- 29 Zhao Y P. Surface and Interface Physics and Mechanics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012. 214–218 [赵亚溥. 表面与界面物理力学. 北京: 科学出版社, 2012. 214–218]
- 30 Gong J, Liu C, Conway P, et al. Initial formation of CuSn intermetallic compounds between molten SnAgCu solder and Cu substrate. *Scripta Mater*, 2009, 60: 333–335
- 31 Xu B, Wu Y, Zhang L, et al. Wettability and spreadability study of molten Sn-3.0Ag-0.5Cu wetting on V-shaped substrate. *Soldering Surf Mount Tech*, 2016, 28: 133–140
- 32 Kang H B, Bae J H, Lee J W, et al. Control of interfacial reaction layers formed in Sn-3.5Ag-0.7Cu/electroless Ni-P solder joints. *Scripta Mater*, 2009, 60: 257–260
- 33 Xu B, Chen J, Yuan Z, et al. Spreading dynamics and interfacial characteristics of Sn-3.0Ag-0.5Cu-xBi melting on Cu substrates. *Microgravity Sci Tech*, 2016, 28: 115–122
- 34 Xu B, Yuan Z, Wu Y. Simulation analysis on surface morphology and hysteresis characteristics of molten Sn-3.0Ag-0.5Cu sitting on the inclined Ni substrate. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2014, 441: 217–225
- 35 Wang C Y, Zhai G J, Wu L S, et al. Effect of gravity on the wetting behavior of molten GaSb drop (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2000, 49: 2094–2100 [王超英, 翟光杰, 吴兰生, 等. 重力对GaSb熔滴和液/固界面交互作用的影响. 物理学报, 2000, 49: 2094–2100]
- 36 Nagai H, Nakata Y, Tsurue T, et al. Wetting of molten indium under short-time microgravity. *Mater Sci Eng-A*, 1998, 248: 206–211
- 37 Fujii H, Nakae H. Effect of gravity on contact angle. *Philos Mag A*, 1995, 72: 1505–1512
- 38 Li H. Wettability and Liquid/Solid Interface between Ag-Cu-Sn Alloy and Fe Substrate in Gravity and Microgravity Environment (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 1999 [李宏. 重力和微重力环境中Ag-Cu-Sn合金与Fe基片之间的润湿性及液/固界面研究. 博士学位论文. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1999]
- 39 Herzberg W J, Marian J E. Relationship between contact angle and drop size. *J Colloid Interface Sci*, 1970, 33: 161–163

Wettability of high-temperature melts under microgravity and ground gravity conditions

YUAN ZhangFu^{1,2*}, WANG RongYue¹, XIE ShanShan¹, XU BingSheng²,
YU XiangTao¹ & LIU JingXia²

¹ Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

² College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

The physical characteristics of the material could not be accurately observed due to the effect of gravity which hides some experimental phenomena of the material surface and interface. So, it is greatly significant to study the influence mechanism of microgravity on the melt wetting behavior and solid/liquid interface reaction. In this paper, the wetting behaviour of high-temperature melts, especially of Sn-based alloys, and the reaction properties on the melt/substrate interface were summarized. Comparing with related research and experimental results under normal gravity and microgravity conditions, the high-temperature melt wetting characteristics in both satellite microgravity environment and ground environment are summarized. This paper provides a theoretical reference for future space microgravity experiments and analysis.

wettability, Sn-based alloys, microgravity, solid/liquid interface reaction

PACS: 81.05.Bx, 81.05.Zx, 81.10.Mx, 82.65.+r

doi: 10.1360/SSPMA-2019-0175