空间微重力条件下偏晶合金凝固研究进展

江鸿翔, 黎旺, 张丽丽, 何杰, 赵九洲*

中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

*联系人, E-mail: jzzhao@imr.ac.cn

收稿日期: 2019-05-22; 接受日期: 2019-07-31; 网络出版日期: 2020-01-10

国家自然科学基金(编号: 51771210, 51471173, 51501207)和中国载人空间站项目(编号: TGJZ800-2-RW024)资助

摘要 偏晶合金种类很多, 若能将其制成具有理想组织结构的原位复合材料, 则它们之中许多均具有优异的性能和重要的工业应用前景. 然而, 当均匀、单相的偏晶合金熔体冷却进入液态组元不混溶区间时会发生液-液相变, 生成互不混溶的两个液相. 在地面常规重力条件下冷却凝固时, 熔体内往往存在较强的对流且两个液相间通常具有较大的密度差, 这使得该类合金非常容易形成相偏析严重、甚至两相分层的组织. 在微重力条件下冷却凝固时, 由重力对流和组元间密度差引起的两相分离现象得到明显减弱, 有利于该类合金凝固理论的研究和弥散型偏晶基复合材料的制备. 近年来, 有关微重力条件下偏晶合金凝固理论及组织控制的研究受到了材料科学领域的高度关注, 人们在空间微重力条件下和地面模拟微重力条件下开展了大量的研究工作. 本文综述了近年来微重力条件下偏晶合金凝固研究的进展.

关键词 偏晶合金, 组织, 微重力, 凝固

PACS: 64.70.Ja, 81.05.Bx, 81.30.Fb

1 前言

偏晶合金是指具有液-液相变温度区间的合金^[1-3], 其代表性相图如图1所示. 这类合金非常广泛, 如能将其制备成具有壳/核结构的复合材料、第二相均匀弥散分布于基体的复合材料或第二相呈现纤维状排列于基体中的复合材料, 那么它们之中许多都将体现出优异的物理和力学性能并具有重要的工业应用前景. 例如, 较软的Bi相或Pb相弥散分布于较硬的Al或Cu基体中的Al-Bi和Cu-Pb合金可用作自润滑汽车轴瓦材料^[4]; 当较硬的Cr相或Ni相均匀分布在Cu或Ag基体中时,

Cu-Cr合金和Ag-Ni合金是优良的电接触材料^[5]; 当外层为耐磨性较好的富Fe相, 内层为导电性能优异的富Cu相时, Cu-Fe合金线材可以作为理想的高铁电缆^[6]; 当富In相或富(Bi, Pb)相呈纤维状规则排列于Al基体时, Al-In合金或Al-Bi-Pb合金分别体现出了优异的软磁性能和超导性能^[7-10]. 然而, 在偏晶合金相图中存在一个液态组元不混溶区间, 当温度高于组元互溶温度的单相偏晶合金熔体冷却进入液态组元不混溶温度区间时会生成一个与基体熔体不混溶的液相^[11-13], 在地面重力条件下凝固时非常容易形成图2所示的两相分层的凝固组织^[3], 这严重限制了偏晶合金的工业开发

引用格式: 江鸿翔, 黎旺, 张丽丽, 等. 空间微重力条件下偏晶合金凝固研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 047005

Jiang H X, Li W, Zhang L L, et al. Progress in the solidification of monotectic alloys under the microgravity condition of space (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2020, 50: 047005, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0176

图 1 二元偏晶合金示意相图

Figure 1 Schematic phase diagram of binary monotectic alloys.

图 2 地面常规条件下Bi-24wt%Cu-16wt%Sn合金的凝固组织^[3]

Figure 2 Microstructure of Bi-24wt%Cu-16wt%Sn alloy solidified in gravity field [3].

与应用.

早期, 科学家们认为, 液-液相变过程中生成的两液相间的密度差是偏晶合金在地面重力条件下冷却时易于形成偏析型凝固组织的主要原因, 如果可以消除由两液相间密度差引起的相沉积与上浮现象, 则可以获得第二相均匀弥散分布于基体的凝固组织. 20世纪70年代初, Lacy等人^[14], Ahlborn等人^[15]和Potard^[16]在Apollo和Skylab上开展了空间微重力条件下偏晶合金的凝固实验. 但起初的几次实验结果完全超出了人们的预期, 尽管偏晶合金熔体在空间微重力条件下凝固后不再存在由两相间密度差导致的比重偏析, 但仍然呈现出两相分离的组织. 此后, 科学家们对空间微重力条件下偏晶合金凝固过程及组织演变规律进行了大

量的研究, 如: Fujii等人^[10], Carlberg等人^[17-21]在Texus探空火箭和“空间实验室”等微重力条件下开展了实验研究; 姜万顺等人^[22-26]利用返回式卫星、神舟飞船以及天宫二号空间实验室研究了Al-Pb, Zn-Pb, Al-Bi及Al-Bi-Sn等偏晶合金的凝固组织形成过程. 此外, 人们也在地面模拟微重力条件对偏晶合金的凝固过程开展了大量研究^[27-39], 本文将综述相关研究工作的进展情况.

2 空间微重力条件下偏晶合金凝固过程研究

20世纪70年代早期, Lacy等人^[14]率先研究了空间微重力条件下Zn-Pb偏晶合金的凝固行为, 结果表明, 微重力条件下凝固的样品中Zn与Pb两相仍然呈现两层分布, 此结果令他们难以置信, 分析认为可能是所使用Zn-Pb合金相图存在问题, 致使实验过程中对合金进行加热的温度未达到组元互溶温度, 因而在开始冷却时合金熔体内便存在相偏析. Ahlborn和Loehberg^[15]在Lacy研究结果的基础上, 对Al-In合金相图进行了详细的考察以确保实验过程中加热温度高于合金的组元互溶温度, 但最终仍获得了In包围Al的两相分离的组织. 他们认为这可能是因为In与刚玉坩埚的润湿性较好造成的. Potard^[16]采用碳化硅为坩埚材料, 对Al-In合金进行了实验, 得到试样的组织不再是In包围Al, 而是Al包围In. 分析认为, 这是由于铝熔体与碳化硅坩埚间的润湿性较好造成的. 上述研究结果清楚地体现出了合金组元与坩埚材料间的润湿行为对合金凝固组织的影响. Gelles等人^[20]在探空火箭飞行期间也对Al-In合金开展了凝固实验, 发现即使避免了基体或第二相对坩埚的优先润湿问题, 合金仍然会形成两相分层组织. 他们认为, 微重力条件下熔体的流动以及相间界面能趋于最低是导致该组织形成的原因. 这些早期的实验结果并没有很好的体现出微重力环境的优点.

Carlberg和Fredriksson^[17]借助于TEXUS探空火箭飞行过程中形成的微重力条件对不同成分Zn-Bi合金开展了凝固实验. 结果表明: Zn-17at%Bi和Zn-9at%Bi合金样品均被较厚的富Bi相所包围, 如图3(a)和(b)所示. 而Zn-2at%Bi样品中富Bi相颗粒较为均匀地分布于基体中, 仅有很薄的富Bi层覆盖在试样表面, 如图3(c)所示. 比较冷却速度为3.6°C/s和2.4°C/s, 成分为Zn-2at%Bi

图 3 不同成分 Zn-Bi 合金微重力下的凝固组织. (a) Zn-17at%Bi; (b) Zn-9at%Bi; (c) Zn-2at%Bi^[17]

Figure 3 Effect of compositions on the space experimental results of Zn-Bi alloy solidified under the condition of the microgravity. (a) Zn-17at%Bi; (b) Zn-9at%Bi; (c) Zn-2at%Bi^[17].

的样品凝固组织发现, 随着冷却速度的降低, 富 Bi 相颗粒在基体中分布的均匀性提高. 分析认为: 冷速越低, 熔体内温度梯度越小, 富 Bi 相液滴的 Marangoni 迁移越弱, 从而促使富 Bi 相粒子分布的均匀性增加. 此外, 他们分别采用纯扩散长大理论和 Ostwald 熟化理论对合金样品中第二相粒子的尺寸进行了计算, 结果表明, 无论是用纯扩散长大理论还是用 Ostwald 熟化理论对第二相粒子尺寸进行计算, 其结果均与实验结果存在一定的差别. 分析认为这主要是由于微重力条件下的残余重力及 Marangoni 对流导致的液滴迁移所引起的.

Walter^[18]在微重力条件下对 Al-Pb 合金进行了径向冷却凝固, 发现在合金试样的表层区域分布着较多小尺寸富 Pb 相粒子, 而在试样中部存在一大尺寸粒子. 分析认为这是第二相液滴在径向温度梯度下发生 Marangoni 迁移的结果. 为了深入研究液滴的 Marangoni 迁移对偏晶合金液相分离过程的影响, 他们从理论上计算了熔体中第二相液滴的 Marangoni 迁移及 Stokes 迁移速度, 结果表明, 当熔体内温度梯度仅为 1 K/m 时, 液滴的 Marangoni 迁移速度便可与重力加速度为 $10^{-4}g_0$ (g_0 为地面重力加速度) 时液滴的 Stokes 迁移速度相比拟. 在较大的温度梯度下, 液滴的 Marangoni 迁移速度则可与地面重力条件下液滴的 Stokes 运动速度相比拟. 这表明第二相液滴的 Marangoni 运动对偏晶合金凝固组织有着重要的影响.

Kneissl 和 Fischmeister^[19]首先在地面上通过淬火获得了第二相均匀弥散分布于基体的 Zn-Pb 合金样品, 然后在 TEXUS 及 Spacelab-1 上对其进行保温实验, 探

索了第二相液滴的 Ostwald 粗化过程. 对比实验结果和 Ostwald 粗化理论的计算结果, 他们发现当第二相液滴尺寸较小时, 二者吻合很好, 但随着第二相液滴尺寸的增大, 实验结果与用 Ostwald 粗化理论所预测结果的偏差增大. 分析认为这可能与冷却凝固过程中合金熔体内第二相液滴 Marangoni 迁移导致液滴间发生碰撞合并有关.

Otto^[21]在探空火箭上对 Hg-Ga 偏晶合金进行了降温冷却和等温处理实验, 用 X 射线透射技术原位观察了第二相液滴的沉淀析出和生长过程, 并测量了液滴的长大速率, 与根据纯扩散理论计算的结果进行了比较发现: 当合金熔体通过液态组元不混溶区间的冷却速度较慢时, 实验测量结果与理论计算结果一致; 当冷却速度较快时, 实验结果大于理论计算值.

1992 年, Fujii 等人^[10]在 Space Lab-3 上对 Al-Pb-Bi 偏晶合金进行了长时间的微重力实验, 实验过程中, 他们通过减小合金熔体内的温度梯度来抑制第二相液滴的 Marangoni 迁移, 有效地避免了两相分层组织的出现, 但凝固后的合金样品仍存在着一定程度的相偏析现象, 且试样内存在大量的孔洞, 如图 4 所示. 此外, 他们将空间凝固后的直径为 6 mm 的 Al-2at%Pb-2at%Bi 合金试样加工成直径为 0.35 mm 的细线, 发现在温度低于 ~ 9 K 时该线材体现出了超导性能, 如图 5 所示.

1987 年, 姜万顺等人^[22,23]利用返回卫星对 Al-Pb 和 Zn-Pb 合金进行了凝固实验, 结果表明, 在空间微重力条件下, 第二相液滴的 Marangoni 迁移是液滴聚集、凝并以及出现宏观偏析的主要原因. 随后, Huang^[24]利用返回式卫星对 Al-In 偏晶合金开展了凝固实验研究, 结

图 4 不同成分Al-Pb-Bi偏晶合金在空间微重力条件下凝固后的组织形貌. (a) Al-1at%Pb-1at%Bi; (b) Al-2at%Pb-2at%Bi; (c) Al-3at%Pb-3at%Bi. 其中, 黑色相为Al基体, 白色相为富(Pb,Bi)相粒子^[10]

Figure 4 Backscattering electron images of the longitudinal cross section of (a) Al-1at%Pb-1at%Bi, (b) Al-2at%Pb-2at%Bi and (c) Al-3at%Pb-3at%Bi ingots. Dark and bright phases are the Al matrix and (Pb, Bi) particles, respectively [10].

图 5 空间凝固的Al-2at%Pb-2at%Bi合金样品电阻率随温度的变化关系^[10]

Figure 5 Resistivity (ρ) of the Al-2at%Pb-2at%Bi alloy sample solidified in space versus temperature (T) [10].

果表明相间界面能对两相分离组织的形成影响很大. 2003年, Huang等人^[25]借助于神舟三号飞船开展了Al-Bi偏晶合金的定向凝固实验, 发现在微重力条件下凝固的试样整体呈现出较为均匀弥散的组织, 但在试样边缘仍然存在由Marangoni对流引起的相偏析现象. 近来, 赵九洲研究组^[40-46]对偏晶合金的凝固过程开展了大量的地基研究, 探索了合金成分、凝固工艺、微合金化元素以及电场、磁场、离心离场等对偏晶合金凝固过程及组织的影响, 在此基础上, 优化设计了合金成分及空间凝固工艺, 于2016年10月借助天宫二综合材料实验装置开展了微重力条件下Al-Bi-Sn偏晶合金的凝固实验, 获得了少量相均匀、弥散分布于基体的偏晶合金复合材料, 如图6和7所示^[26].

3 地面模拟微重力条件下偏晶凝固过程研究

除了通过空间微重力环境探索偏晶合金的凝固过程及组织演变机理, 学者们也在地面上利用正交电磁场^[27-32]、落塔^[33]及落管^[35-39]等来模拟微重力环境, 研究偏晶合金凝固过程. 20世纪80年代初, Abramov等人^[27]利用正交电磁场模拟微重力环境研究了偏晶合金的凝固行为. 随后, 科学家们对正交电磁场作用下偏晶合金的凝固过程开展了广泛研究^[28-32]. 例如, 赵九洲等人^[28]研究了正交电磁场对Al-Pb偏晶合金的凝固过程的影响, 发现当选取的电磁场参数合适时, 可以减少合金的比重偏析; 郝维新等人^[29]研究了Cu-Pb偏晶合金在正交电磁场中的凝固行为, 发现施加电磁场能够使合金熔体获得准失重状态, 显著降低合金熔体中第二相液滴的Stokes迁移速度, 从而抑制重力偏析的发生. 通过使用正交电磁场来模拟微重力环境的基本原理: 在正交电磁场中, 具有不同电导率的各相中电磁力密度不同, 因此, 可以找到一个合适的电磁场参数, 使合金熔体中两相的重力密度与它所受的电磁力密度的矢量和相等, 即

$$\rho_D \mathbf{g} + \mathbf{j}_D \times \mathbf{B} = \rho_M \mathbf{g} + \mathbf{j}_M \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, ρ_D 和 ρ_M 分别为第二相和基体的密度, $\mathbf{j}_D$ 和 $\mathbf{j}_M$ 分别为第二相和基体熔体中的电流密度. 当所施加的电磁场参数满足公式(1)时, 正交电磁场的作用将使合金熔体处于与空间微重力相似的状态, 消

图 6 (网络版彩图) Al-Bi-Sn偏晶合金在地面重力和空间微重力条件下凝固后不同轴向和径向位置的光学显微组织(I), X射线投影图(II: (a)–(c))以及沿试样轴向(III: (a)–(c))和径向的扫描组织(IV: (d)–(f)). (II)–(IV)的分析位置见图(I), 下标g和 μ g分别表示地面样品和空间样品^[26]

Figure 6 (Color online) Optical microscope images (I), X-ray tomography images (II: (a)–(c)), scanning electron microscope images of the microstructures along the axial direction (III: (a)–(c)) and along the radial direction (IV: (d)–(f)) of the Al-Bi-Sn samples solidified on ground and in space. The corresponding positions are schematically shown in (I). The subscripts g and μ g represent respectively the ground and space samples^[26].

除由重力导致的第二相的上浮或沉降现象。

此外, 人们也通过将试样放置于落管或落塔中让其自由下落来研究模拟微重力环境下偏晶合金的凝固行为。例如, 赵九洲^[33]让装有均质偏晶合金熔体的坩埚从50 m高的落塔塔顶自由下落, 使合金熔体在下落过程中产生的失重状态下凝固, 得到了第二相均匀弥散分布的Zn-5%Pb和Al-4%Pb合金。Ozawa等人^[34]利用

1000 m的竖井开展了Al-Pb合金的凝固实验, 结果表明, 与重力条件下凝固的试样相比, 模拟微重力条件下凝固的样品中第二相分布更加均匀、弥散。近年来, Wu等人^[35–39]采用3 m落管对Fe-Sn-Si/Ge, Fe-Sn和Ni-Pb等偏晶合金凝固过程中第二相液滴的形核、生长以及相分离等行为开展了广泛深入的研究, 并探讨了其组织形貌的演化规律。

图 7 (网络版彩图) Al-Bi-Sn合金样品中第二相粒子体积分数(ϕ_d)和平均直径($\langle D_d \rangle$)沿样品轴向 h 和径向 r 的分布(a)以及距离合金样品顶端5 mm处第二相粒子体积分数和平均直径沿试样径向的分布(b). 上标Experi和Calcula分别表示实验结果和计算结果, 下标g和 μg 分别表示地面样品和空间样品 [26]

Figure 7 (Color online) Volume fraction (ϕ_d) and average diameter ($\langle D_d \rangle$) of the minority phase particles along the central axial position h (a) and along the radial direction r at the position of 5 mm from the top end (b) of the samples. The subscripts Experi and Calcula represent respectively the experimental results and calculated results. The subscripts g and μg represent respectively the ground and space samples [26].

4 结论

偏晶合金凝固组织演变十分复杂, 是第二相液滴形核、长大、粗化、空间迁移、碰撞合并以及熔体对流等因素共同作用的结果. 在微重力条件下, 重力导致的熔体对流和第二相液滴的Stokes运动明显减弱, 这为偏晶合金凝固过程的研究以及均质偏晶合金复合材料的制备创造了良好的条件. 然而, 以往大量的研究结果表明, 即使在空间微重力条件下对偏晶合金熔体进

行凝固, 合金试样通常仍呈现出具有严重相偏析的组织, 这说明有关偏晶合金凝固理论的研究还有待进一步深入; 此外, 以往研究主要针对二元偏晶合金, 对工业应用背景较强的多元偏晶合金凝固过程及组织控制方法的研究相对较少. 因此, 在后续的研究中, 借助于微重力条件减弱/消除重力及其导致的熔体对流对偏晶合金凝固过程的影响, 实验与模拟相结合, 深入研究偏晶合金, 尤其是多元偏晶合金凝固组织形成机理及控制方法具有重要的科学与实际意义.

参考文献

- Zhao J Z, Ratke L, Feuerbacher B. Microstructure evolution of immiscible alloys during cooling through the miscibility gap. *Model Simul Mater Sci Eng*, 1998, 6: 123–139
- Sun Q, Jiang H, Zhao J, et al. Microstructure evolution during the liquid-liquid phase transformation of Al-Bi alloys under the effect of TiC particles. *Acta Mater*, 2017, 129: 321–330
- Jiang H X. Study of the Continuous Solidification of Monotectic Alloys Under the Effect of Electric Current (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2014. 1–2 [江鸿翔. 电流作用下偏晶合金连续凝固过程研究. 博士学位论文. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2014. 1–2]
- Ratke L, Diefenbach S. Liquid immiscible alloys. *Mater Sci Eng-R-Rep*, 1995, 15: 263–347
- Li W S, Li Y M, Zhang J, et al. Progress in the research and application of silver-based electrical contact materials (in Chinese). *Mater Rev*, 2011, 25: 34–39 [李文生, 李亚明, 张杰, 等. 银基电接触材料的应用研究及制备工艺. 材料导报, 2011, 25: 34–39]
- Shi R P, Wang Y, Wang C P, et al. Self-organization of core-shell and core-shell-corona structures in small liquid droplets. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 204106
- Terzieff P, Lück R. Magnetic investigations in liquid Al-In. *J Alloys Compd*, 2003, 360: 205–209
- Liu Y, Guo J J, Su Y Q, et al. Microstructures of rapidly solidified Al-In immiscible alloy. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2001, 11: 84–89
- Cui H B, Guo J J, Bi W S, et al. The evolution of unidirectional solidification microstructure of the Al-In monotectic alloys in high temperature gradient. *Acta Metall Sin*, 2004, 40: 1253–1256
- Fujii H, Kimura T, Kitaguchi H, et al. Fabrication of uniform Al-Pb-Bi monotectic alloys under microgravity utilizing the space shuttle:

- Microstructure and superconducting properties. *J Mater Sci*, 1995, 30: 3429–3434
- 11 Wang H P, Wei B. Positive excess volume of liquid Fe-Cu alloys resulting from liquid structure change. *Phys Lett A*, 2010, 374: 4787–4792
- 12 Wang H P, Wei B B. Understanding atomic-scale phase separation of liquid Fe-Cu alloy. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 3416–3419
- 13 Wang H P, Wei B. Theoretical prediction and experimental evidence for thermodynamic properties of metastable liquid Fe-Cu-Mo ternary alloys. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 171904
- 14 Lacy L L, Otto G. The behavior of immiscible liquids in space. In: Proceedings of the Thermophysics and Heat Transfer Conference. Boston: AIAA, 1974. 74–668
- 15 Ahlborn H, Loehberg K. Aluminium-indium-experiment SOLUOG-A sounding rocket experiment on immiscible alloys. In: Proceedings of the 17th Aerospace Sciences Meeting. New Orleans: AIAA, 1979. 79–172
- 16 Potard C. Directional solidification of Al-In alloys at microgravity results of basic preparatory investigations. In: Proceedings of the 17th Aerospace Sciences Meeting. New Orleans: AIAA, 1979. 79–1012
- 17 Carlberg T, Fredriksson H. The influence of microgravity on the solidification of Zn-Bi immiscible alloys. *Metall Trans A*, 1980, 11: 1665–1676
- 18 Walter H U. Preparation of dispersion alloys-component separation during cooling and solidification of dispersions of immiscible alloys. In: Effect of Gravity on the Solidification of Immiscible Alloys. Noordwijk: ESA Scientific & Technical Publications Branch, 1984. 47–67
- 19 Kneissl A, Fischmeister H. Particle coarsening in immiscible zinc lead alloys under microgravity. In: Proceedings of the 5th European Symposium on Material Science under Microgravity: Results of Spacelab 1. Noordwijk: ESA Scientific & Technical Publications Branch, 1984. 63–68
- 20 Gelles S H, Mark worth A J. Microgravity studies in the liquid-phase immiscible system: Aluminum-indium. *AIAA J*, 1978, 16: 431–438
- 21 Otto G. Stability of metallic dispersions. In: Proceedings of the 5th European Symposium Material Science under Microgravity: Results of Spacelab 1. Noordwijk: ESA Scientific & Technical Publications Branch, 1984. 379–388
- 22 Jiang W S, Da D A, Zhang Y W, et al. Research on Pb-Al and Al-Pb alloys below critical temperature in space (in Chinese). In: Proceedings of the First Chinese Symposium on Microgravity Science and Space Experiments. Beijing: China Science and Technology Press, 1988. 71–79 [姜万顺, 达道安, 张彦伟, 等. 空间微重力条件下低于临界温度的Pb-Al和Al-Pb合金的行为研究. 见: 中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1988. 71–79]
- 23 Jiang W S, Da D A, Zhang Y W, et al. Research on Zn-Pb alloy processing in space (in Chinese). In: Proceedings of the First Chinese Symposium on Microgravity Science and Space Experiments. Beijing: China Science and Technology Press, 1988. 80–87 [姜万顺, 达道安, 张彦伟, 等. 微重力下Zn-Pb合金的加工和研究. 见: 中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1988. 80–87]
- 24 Huang Z. Microstructural feature in metallic alloy solidified under microgravity. *Scripta Metall Mater*, 1991, 25: 149–152
- 25 Huang Q, Luo X H, Li Y Y. An alloy solidification experiment conducted on Shenzhou spacecraft. *Adv Space Res*, 2005, 36: 86–91
- 26 Li W, Jiang H, Zhang L, et al. Solidification of Al-Bi-Sn immiscible alloy under microgravity conditions of space. *Scripta Mater*, 2019, 162: 426–431
- 27 Abramov O V, Bushe N A, Gel'fgat Y M, et al. Aluminum-lead antifriction alloys produced under conditions of compensation of gravitational segregation by electromagnetic forces. *Met Sci Heat Treat*, 1982, 24: 239–243
- 28 Zhao J Z, Chen Y Y, Zhang J H, et al. An experimental study of lightening the gravity segregation of alloy Al-Pb by application of electric and magnetic field (in Chinese). *Metal Sci Techn*, 1990, 9: 77–81 [赵九洲, 陈玉勇, 张景辉, 等. 用电磁场减轻Al-Pb合金比重偏析的实验研究. 金属科学与工艺, 1990, 9: 77–81]
- 29 Hao W X, Yang G C, Xie H, et al. Solidification simulation of Cu-40Pb hypermonotectic alloy in microgravity electromagnetic condition (in Chinese). *Special-cast and Non-ferrous Alloys*, 2004, 3: 22–23 [郝维新, 杨根仓, 谢辉, 等. 微重力电磁模拟过偏晶Cu-Pb合金的凝固. 特种铸造及有色合金, 2004, 3: 22–23]
- 30 Ratke L, Uffellmann D. Coarsening processes in liquid dispersions. *Mater Sci Forum* 1991, 77: 69–84
- 31 Zhong Y, Wang J, Zheng T, et al. Homogeneous hypermonotectic alloy fabricated by electric-magnetic-compound field assisting solidification. *Mater Today-Proc*, 2015, 2: S364–S372
- 32 Zheng T X, Zhong Y B, Sun Z Q, et al. The effect of electromagnetic compound field on the solidified microstructure of Zn-10wt%Bi hypermonotectic alloy (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 238501 [郑天祥, 钟云波, 孙宗乾, 等. 电磁复合场对Zn-10wt%Bi过偏晶合金凝固组织的影响. 物理学报, 2012, 61: 238501]
- 33 Zhao J Z. Solidification Behavior of Zn-Pb Alloy under Microgravity (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1989 [赵九洲. 微重力条件下Zn-Pb合金的凝固行为. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1989]

- 34 Ozawa S, Motegi T. Solidification of hyper-monotectic Al-Pb alloy under microgravity using a 1000-m drop shaft. *Mater Lett*, 2004, 58: 2548–2552
- 35 Wu Y H, Wang W L, Yan N, et al. Experimental investigations and phase-field simulations of triple-phase-separation kinetics within liquid ternary Co-Cu-Pb immiscible alloys. *Phys Rev E*, 2017, 95: 052111
- 36 Wang W L, Wu Y H, Li L H, et al. Homogeneous granular microstructures developed by phase separation and rapid solidification of liquid Fe-Sn immiscible alloy. *J Alloys Compd*, 2017, 693: 650–657
- 37 Xia Z C, Wang W L, Wu Y H, et al. Solidification pathways of ternary $\text{Cu}_{62.5}\text{Fe}_{27.5}\text{Sn}_{10}$ alloy modulated through liquid undercooling and containerless processing. *Appl Phys A*, 2016, 122: 985
- 38 Wu Y H, Wang W L, Wei B B. Experimental investigation and numerical simulation on liquid phase separation of ternary Fe-Sn-Si/Ge monotectic alloy (in Chinese). *Acta Phy Sin*, 2016, 65: 106402 [吴宇昊, 王伟丽, 魏炳波. 液态三元Fe-Sn-Si/Ge偏晶合金相分离过程的实验和模拟研究. *物理学报*, 2016, 65: 106402]
- 39 Wang W L, Wu Y H, Li L H, et al. Liquid-liquid phase separation of freely falling undercooled ternary Fe-Cu-Sn alloy. *Sci Rep*, 2015, 5: 16335
- 40 He J, Zhao J Z, Wang X F, et al. An experimental study of the rapid continuous solidification of Al-Bi immiscible alloy (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2006, 42: 67–72 [何杰, 赵九洲, 王晓峰, 等. Al-Bi难混溶合金快速连续凝固的实验研究. *金属学报*, 2006, 42: 67–72]
- 41 Li H, Zhao J. Directional solidification of an Al-Pb alloy in a static magnetic field. *Comput Mater Sci*, 2009, 46: 1069–1075
- 42 Zhao J Z, Li H L, Li H Q, et al. Microstructure formation in centrifugally cast Al-Bi alloys. *Comput Mater Sci*, 2010, 49: 121–125
- 43 Jiang H X, He J, Zhao J Z. Influence of electric current pulses on the solidification of Cu-Bi-Sn immiscible alloys. *Sci Rep*, 2015, 5: 12680
- 44 Jiang H, Zhao J, He J. Solidification behavior of immiscible alloys under the effect of a direct current. *J Mater Sci Tech*, 2014, 30: 1027–1035
- 45 Sun Q, Jiang H, Zhao J, et al. Effect of TiC particles on the liquid-liquid decomposition of Al-Pb alloys. *Mater Des*, 2016, 91: 361–367
- 46 Sun Q, Jiang H X, Zhao J Z. Effect of micro-alloying element Bi on solidification and microstructure of Al-Pb alloy (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2016, 52: 497–504 [孙倩, 江鸿翔, 赵九洲. 微量元素Bi对Al-Pb合金凝固过程及显微组织的影响. *金属学报*, 2016, 52: 497–504]

Progress in the solidification of monotectic alloys under the microgravity condition of space

JIANG HongXiang, LI Wang, ZHANG LiLi, HE Jie & ZHAO JiuZhou^{*}

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Monotectic alloys or alloys with a miscibility gap in the liquid state are a broad kind of materials. They are especially suitable for the manufacturing of either the in-situ particle composite materials or the composite materials with a core/shell structure and, thus, have a strong industry application background. These alloys, however, have an essential drawback that just the miscibility gap poses problems during solidification. When a single-phase melt of these alloys is cooled into the miscibility gap, it decomposes into two liquids enriched with different components. Generally, the convection flow caused by the gravity and the liquid-liquid phase transformation cause the formation of a phase segregated microstructure when these alloys are solidified under the normal gravitational conditions. Under microgravity condition, the convection flow caused by the gravity and the sediment or floating of the second phase due to the density difference between the components are obviously weakened, it is beneficial for the study of solidification theory of monotectic alloy and the preparation of monotectic alloys composited with a well dispersed microstructure. In recent decades, plenty of efforts have been made to investigate the solidification of monotectic alloys under microgravity conditions, this article will review the research work in this field during the last few decades.

monotectic alloy, microstructure, microgravity, solidification

PACS: 64.70.Ja, 81.05.Bx, 81.30.Fb

doi: 10.1360/SSPMA-2019-0176