0254-6124/2016/36(4)-455–04 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Xiaodong. Influence of microgravity and electromagnetic field on the solidification of metallic alloys (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 455-458. DOI:10.11728/cjss2016.04.455

微重力与电磁场对凝固过程的影响*

王晓东

(中国科学院大学材料科学与光电技术学院 北京 101408)

摘 要 欧洲空间局两项材料领域课题 MICAST 和 CETSOL 均涉及微重力科学相关研究. 通过等轴晶柱状晶转变 (CET) 分析了微重力环境对材料凝固过程的影响; 介绍了一项在地面施加行波电磁场的标准 (Benchmark) 凝固实验, 其温度场演化及微观凝固组织和浓度偏析均展示了磁控受迫对流对金属材料凝固过程的显著作用.

关键词 凝固, 微重力, 自然对流, 受迫对流, 电磁场, 偏析

中图分类号 V 524

Influence of Microgravity and Electromagnetic Field on the Solidification of Metallic Alloys

WANG Xiaodong

(*College of Material Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 101408)

Abstract Solidification or crystal growth of metallic alloys is crucially determined by flow, heat and mass transfer, whilst the external imposed fields like electromagnetic field or gravitational environment can significantly influence these transfer processes. In this paper, two experiments are briefly presented to exhibit above influence on the microstructure evolution of metallic alloys, particularly on the Columnar-Equiaxed Transition (CET). Firstly, a sound rocket-based experiment demonstrates the effect of microgravity by comparison with that of ground-based experiment, and the quite different microstructure reveals that the natural convection plays an essential role in the solidification. Secondly, a quasi-two-dimensional solidifying experimental benchmark is presented to exhibit the natural and forced convection on the micro/macro segregation of the metallic alloys. The natural convection has been observed through the evolution of temperature field measured in real time, and this experiment exhibit the solute segregation naturally formed in the liquid and mushy zones. The forced convection driven by a traveling electromagnetic field interferes with solute segregation directly. Lastly, their influence mechanisms are analyzed and perspective of China's research strategy for material science in space is addressed.

Key words Solidification, Microgravity, Natural convection, Forced convection, Electromagnetic field, Segregation

* 空间科学预先研究项目 (XDA04078400) 和中国科学院百人计划项目共同资助

2015-11-10 收到原稿, 2016-04-12 收到修定稿

E-mail: xiaodong.wang@ucas.ac.cn

0 引言

欧洲空间局 (ESA) MICAST (Microstructure Formation in Casting of Technical Alloys under Diffusive and Magnetically Controlled Convective Conditions) 和 CETSOL (Columnar-Equiaxed Transition in Solidification Process) 两项课题中均涉及有微重力科学相关研究. MICAST[1] 总体目标是研究扩散和磁控对流条件下凝固组织的形成过程, 实验与数值模拟结果用于优化冶金工业中的铸造工艺; CETSOL[2] 通过实验及数值模型确立和改善柱状晶与等轴晶的转变过程 (CET). 为达到上述研究目的, 进行了一系列地面和微重力环境下的实验以及大量数值模型研究, 内容涉及扩散与重力驱动的自然对流以及外场控制下的受迫对流等系统性实验, 其中外场包括电磁场和微重力环境. 项目取得了良好的研究成果, 自 1999 年实施后得到不断的支持并延长至今 [1−2]. 本文利用探空火箭开展的微重力下的凝固实验 [2] 和地面标准凝固实验 [3−7] 即是这两项课题的组成部分.

1 微重力凝固实验中的 CET 过程

微重力实验平台的发展可提供在微重力环境下开展材料科学与技术实验的手段有地面落塔、探空火箭、国际空间站等. CETSOL 项目利用探空火箭 MAXUS 7 提供的微重力环境开展了一项凝固实验 [2]. 图 1 给出了利用探空火箭进行微重力材料凝固实验的装置 [2]. 探空火箭实物如图 1(a) 所示, 其实验参数为: 有效载荷 777 kg; 载荷长度 6.4 m; 载荷从助推器分离的时间为 86 s; 最大加速度 12.9 g, 平均加速度 6.2 g; 微重力实验窗口时间 12.5 min; 远地点距离 703 km. 该探空火箭上搭载的凝固实验装置如图 1(b) 所示, 这是在一定凝固梯度 ($4\,\mathrm{K\cdot cm^{-1}}$) 和速率 ($6\,\mathrm{K\cdot min^{-1}}$) 下进行的柱状试样凝固实验 [2].

图 2 给出了铝硅合金 (Al-7.0wt%Si) 的凝固组织 [2], 其中图 2(a) 为地面实验结果, 图 2(b) 为微重力环境下的实验结果, 在试样横截面和纵剖面上展示了凝固组织显示 CET 过程. 在地面实验中, 凝固组织经过初始阶段后, 柱状晶区开始稳定生长, 在最后区域里由于热力学条件的不断变化, 温度梯度逐步变小, 凝固速率变慢, 由拉长的柱状晶过渡到等轴晶, 图 2 中的过渡区域清晰分明. 在微重力条件下, 纵向剖面上先是出现了粗大的柱状晶区, 并且一部分柱状晶一直延伸下去, 在凝固的最后阶段, 试样横截面显示柱状晶在边缘极为发达, 并且呈现沿径向辐射分布的趋势. 显然所获得的凝固组织与微重力环境下熔质的对流过程被强烈抑制密切相关 [2].

2 电磁场作用下的标准凝固实验

2.1 实验装置与实验方法

标准合金凝固实验是在一个长方体不锈钢薄壁坩埚 (厚度 1 mm) 内进行的, 实验金属为 Sn-3wt% Pb 二元合金, 试样长 10 cm, 宽 1 cm, 高 6 cm. 在其竖直窄面上通过两个换热器控制热量 (潜热和显热) 的释放, 坩埚两端温度梯度的变化范围为 0~40 K, 冷却速率为 $0.02\sim0.04\,\mathrm{K\cdot s^{-1}}$ [3]. 在此实验方式下能形成显著的浓度偏析. 在坩埚容器竖直宽面壁上设置了由 50 个热电偶组成的测温阵列, 用来记录温度场的演化过程 (包括相变). 同时, 在坩埚底部安装一台线性电机以产生行波磁场, 根据麦克斯韦电磁场理论可知, 在熔体中由于磁感应可产生洛伦兹力, 该体积

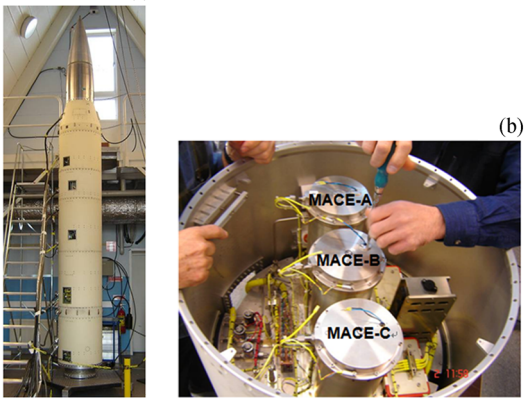


图 1 MAXUS 7 探空火箭 (a) 及所搭载的凝固实验装置 MACE (b)

Fig. 1 Sounding rocket MAXUS 7 (a) and its microgravity metallic alloys solidification experiment device MACE (b)

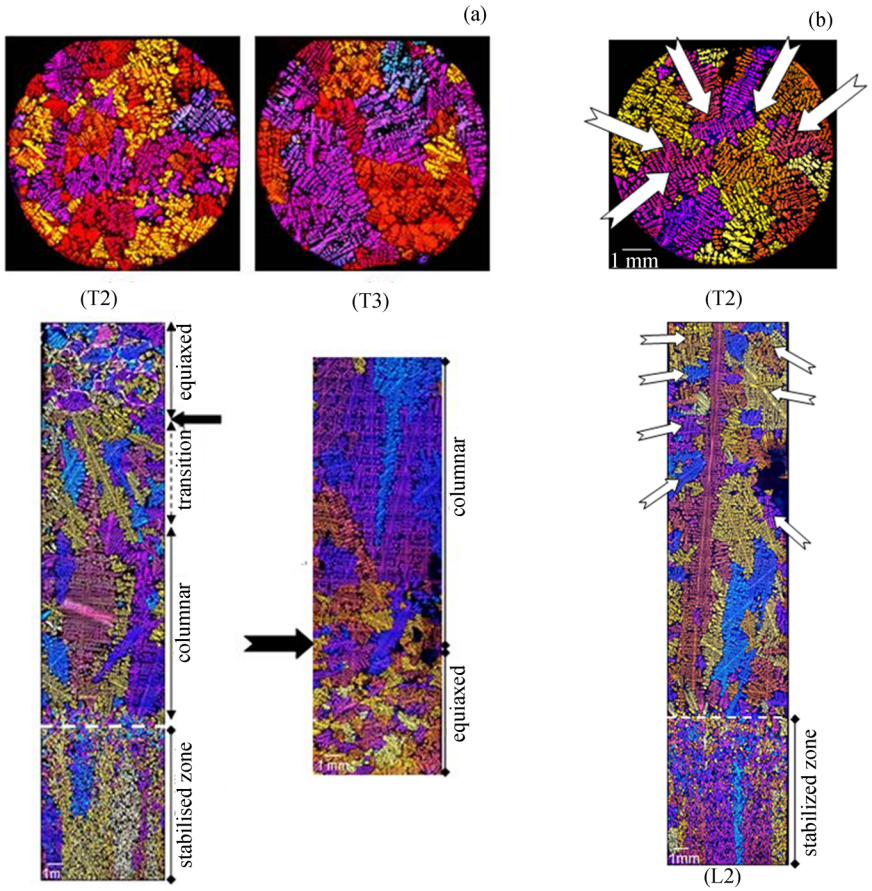


图 2　采用 MACE-C 凝固方式的铝硅合金 (Al-7.0wt%Si) 地面实验 (a) 与微重力环境下 (b) 的凝固组织与 CET 过程比较. 温度梯度 $4\,\mathrm{K\cdot cm^{-1}}$, 凝固速率 $6\,\mathrm{K\cdot min^{-1}}$

Fig. 2　Solidifying microstructure and CET process of Al-7.0wt%Si in the MACE-C under ground (a) and microgravity (b) conditions. The temperature gradient is $4\,\mathrm{K\cdot cm^{-1}}$ and the solidification rate is $6\,\mathrm{K\cdot min^{-1}}$

力对凝固过程能起到显著干涉作用.

2.2　实验结果

图 3 给出的是标准凝固实验获得的结果 [3−5]. 水平方向上两端温差为 40 K, 凝固速率为 $0.03\,\mathrm{K\cdot s^{-1}}$. 行波磁场频率为 50 Hz, 极距 85 mm, 波数 0.074 $\mathrm{mm^{-1}}$, 磁感应强度 $B_0 = 30\,\mathrm{mT}$ [4−5]. 从图 3 中可以清楚看出热质传输对凝固过程的影响以及自然对流和磁控受迫对流对凝固过程的显著作用. 图 3(a) 是在凝固某一时刻由热电偶阵列测得的实时温度场 (已经过插值处理), 等温线显示了自然对流的作用, 其中虚线圆圈和箭头给出了热对流的趋势, 左边等温线更为密集, 表明这里已经发生相变, 开始凝固. 图 3(b) 显示出在一定温度梯度和凝固速率条件下发生的 CET 过程, 板条状的柱状晶几乎贯穿了整个试样, 在最后凝固区域则形成了等轴晶. 图 3(c) 为试样采用 X 射线分析技术获得的铅元素浓度偏析分布, 显示了左侧下方的白亮区以及右下角条纹状的偏析 (均为浓度偏析), 这些都是在自然凝固条件下形成的. 图 3(d) 显示出在施加行波磁场条件下凝固组织发生的变化 (与图 3b 比较), 这里行波磁场的运动方向与自然对流趋势方向相反, 即受迫对流与自然对流作用的方向相反, 导致微观凝固组织迥异, 表明施加电磁场对凝固组织及 CET 过程有直接显著影响.

3　结论

地面合金和半导体材料的凝固以及晶体生长的大量实验表明, 液固相的扩散与对流对晶体组织和成分偏析具有重要影响. 通过施加电磁场导致磁控受迫对流对上述过程可进行有效干预, 例如改变 CET 过程, 改善浓度偏析 [6−7]. 其作用机制包括两相区里的热动力学平衡以及由温度梯度决定的自然对流, 电

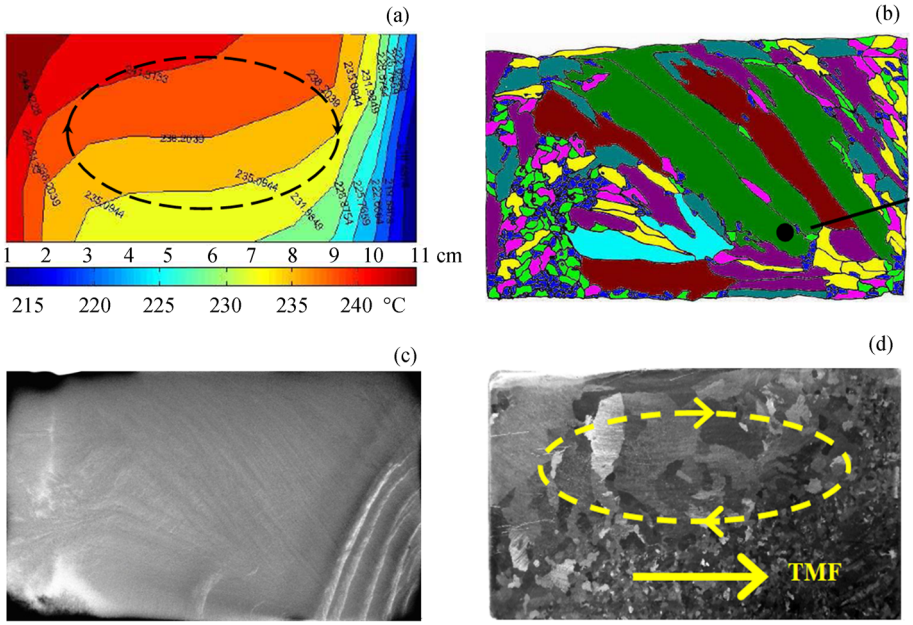


图 3 准二维标准凝固实验结果. (a) 热电偶阵列测得的实时温度场, (b) CET 过程, (c) 利用 X-射线测得的凝固偏析和条纹状偏析, (d) 洛伦兹力作用于凝固过程引起的微观凝固组织变化

Fig. 3 A quasi-2D experimental benchmark demonstrating the evolution of heat and mass transfer during a binary Sn-3wt% Pb alloy solidification process. (a) Measurement results of the temperature field implying the action of natural convection, (b) morphology of the grain contour, (c) post-Mortem X-ray of the solidified ingot showing lead segregation (in white), with freckles visible in the right, (d) Lorentz force acting upon the solidification process

磁力直接驱动液相和凝固前沿的流动, 以及液相流动在凝固前沿形成的压力变化对两相区施加的影响.

但是目前地面实验还不能区分对流与扩散效应在材料凝固过程中各自所起的作用, 其影响机制尚有待深入分析. 微重力环境为材料科学提供了独特的环境, 研究表明材料凝固特征在微重力条件下与地面实验结果有所不同 [8], 预期在空间微重力的特殊环境中能够获得相关基础及应用研究成果.

近年来随着中国空间技术的快速发展, 特别是空间站的建立将提供长时、优越的微重力环境, 为空间材料科学发展提供机遇, 为材料科学基础研究及一些高端材料和新材料相关研究创造更好的条件.

参考文献

[1] RATIKE L, MUELLER G, ZIMMERMANN G, *et al.* Microstructure formation in casting of technical alloys under diffusive and magnetically controlled convection conditions [R]. ESA AO-1999-031 (MICAST), 1999

[2] GANDIN A, BILLIA B, FAUTRELLE Y, *et al.* Columnar-Equiaxed Transition in Solidification Processing [R]. ESA AO-1999-117 (CETSOL), 1999

[3] WANG X D, FAUTRELLE Y. An investigation of the influence of natural convection on tin solidification using a quasi-two-dimensional experimental benchmark [J]. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2009, **52**: 5624-5633

[4] WANG X D, CIOBANAS A, BALTARETU F, *et al.* Control of the macrosegregations during solidification of a binary alloy by means of a AC magnetic field [J]. *Mater. Sci. Forum*, 2006, **508**: 163-168

[5] HACHANI L, SAADI B, WANG X D, *et al.* Experimental analysis of the solidification of Sn-3 wt%Pb alloy under natural convection [J]. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, **55**: 1986-1996

[6] WANG X D, FAUTREELE Y, ETAY J, *et al.* A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: part I. Experiments with GaInSn [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2009, **40**: 82-90

[7] WANG X D, MOREAU R, ETAY J, *et al.* A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: part II. Theoretical model [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2009, **40**: 104-113

[8] WILLERS B, ECKERT S, NIKRITYUK P A, *et al.* Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: part II. Application to solidification of Al-Si alloys [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2008, **39**: 304-16