

专论与综述

定向凝固过程中固液界面稳定性的研究现状

李茂

(武汉理工大学华夏学院,湖北 武汉 430223)

摘要:界面稳定性是金属定向凝固过程中一个很重要的问题,关于它的研究也层出不穷。综述了这一领域的主要进展,着重讨论了基于MS理论研究的各种界面稳定性理论,并指出电磁场对界面稳定性的影响,同时分析了需进一步研究的主要方向。

关键词:定向凝固;界面稳定性;电磁场

中图分类号:TG111.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4620(2012)04-0010-03

1 界面稳定性理论的研究进展

单相凝固条件下,随着凝固速度的增加,晶体生长方式是:平面晶-胞晶-枝晶-细枝晶-细胞晶-平面晶。界面稳定性是指晶体生长中平面晶形态遭到破坏后出现失稳演变为不完全胞晶这一现象,是金属凝固形成复杂界面形状和组织的起点,针对界面稳定性的研究也一直是研究者们非常关心的问题。近年来,将电流^[1-2]、磁场^[3-5]、超声波^[6]等物理场作用于金属凝固过程,用以控制和改善金属凝固组织,极大地改善和提高了金属材料的性能,更是影响了凝固过程中的界面稳定性。

界面稳定性较为系统的理论分析最早起源于成分过冷理论^[7],简单地说就是液相线温度的分布曲线高于液相内的实际温度分布线时,就会在固-液界面的前沿液相中形成成分过冷区。成分过冷准则只考虑了温度梯度和浓度梯度这两个具有相反效应的因素对界面稳定性的影响,没有考虑晶体生长过程中运动着的界面出现干扰时的情况,而干扰因素不可避免都是存在的。

目前,更为全面且为大多数研究者广泛接受并使用的当属Mullins和Sekerka提出的界面稳定性理论(MS理论)^[8]。它将扰动振幅与时间的关系引入到判断平界面的稳定性,并得到了精确解析。MS理论已成为人们认识从低速平界面到绝对稳定性之间凝固亚结构演化的一个重要基础。表面上看,低速平界面稳定性似乎已经由MS理论很好地解释,然而,MS理论的分析是建立在界面前沿稳态溶质扩散场的基础上,而凝固界面在生长过程中,其界面前沿的溶质扩散场不可能迅速达到稳态,其达到稳态所用的时间近似与凝固速度的平方成反比。特别是在低速平界面发展时,很可能直到界面失稳

时,还无法建立界面前沿的稳态溶质扩散场。基于此,Warren和Langer于1993年首次通过分析界面前沿初始溶质扩散场的发展过程对平界面的稳定性进行了时间相关的半解析数值分析,从理论上提出了界面稳定性的时间相关特性,并描绘出空间扰动尺度的时间发展行为^[9]。不过这一分析仅限于溶质的纯扩散过程,忽视了对流对初始溶质再分配的影响。之后,杨爱民^[10]等人又给出了MS平界面稳定性的新判据,发现MS界面绝对稳定性速度仅在温度梯度为0时才是界面稳定的临界速度。当温度梯度 >0 时,实际的界面稳定性临界速度要更小些。

随着非线性理论的出现和日趋成熟,人们对晶体生长现象及本质有了更为深刻的理解,认为晶体生长过程中凝固界面形态演化涉及到相当复杂的热力学和动力学行为^[11]。固液界面是一个远离平衡的开放体系,受非线性微分方程控制。Wollkin和Segel给出了在扰动振幅很小条件下的非线性微分方程^[12]。从20世纪80年代初期到90年代中期,人们采用了两种方法来研究晶体生长过程中凝固界面形态的演变,一种是借用MS理论和L-MK的准则来研究稳定后界面形态特征,如胞晶、枝晶尖端浓度、温度、一次枝晶间距等。另一种是从实验上来研究凝固界面形态特征从非稳定到稳定态的演变过程,以此来揭示晶体生长过程中凝固界面形态的演变规律。1997年,基于界面稳定动力学理论的基础上,王自东等人建立了不同凝固条件下,固液界面前沿干扰波振幅随时间变化的非线性方程,并由此得出固液界面失稳和新的有序结构形成的临界条件^[13]。而在对纯扩散和存在对流情况下的非稳态溶质再分配进行系统分析的基础上,林鑫等人对凝固界面形态稳定性进行了统一的时间相关的非稳态分析^[14]。进一步地,在假设界面生长速率是界面过冷度及界面动力学的函数的基础上,何国等人进行了平界面线性稳定性的研究,并由此得出了界

收稿日期:2012-07-04

作者简介:李茂,女,1985年生,2010年毕业于上海大学钢铁冶金专业,硕士。现为武汉理工大学华夏学院助教,从事教学及科研工作。

面张力和界面动力学对平界面稳定性影响的关系式^[15]。而在不考虑界面张力和界面动力学条件时,稳定性判据接近成分过冷限,引入界面张力和界面动力学因素,对扰动长波和短波,稳定性判据偏离成分过冷限都较大。Sato 等人通过对 Al-0.1%Cu (质量分数)定向凝固过程中的温度梯度、固相的生长速度和界面的移动速度进行计算,并对淬火后的试样固液界面前沿的液体进行成分分析,比较了成分过冷判据和 MS 理论,发现实验结果与 MS 线性理论稳定性判据更为符合^[16]。Schaefer 等人研究了在琥珀腈-乙醇体系中,定向凝固过程中界面的稳定性^[17]。对应的界面稳定性与成分和温度梯度的关系见图 1。从界面失稳的临界速度与临界浓度之间的关系可知,产生失稳的临界溶质浓度随临界速度的增加而减小,即溶质的浓度越大,界面失稳所需要的临界速度越小。在不同的温度梯度下,其对失稳临界速度有着很大的影响。一定组分条件下,温度梯度的升高导致失稳临界拉速的升高。温度梯度足够高时,体系达到绝对的稳定。这是界面能的稳定化效应完全克服溶质扩散的不稳定性效应而出现的新现象。

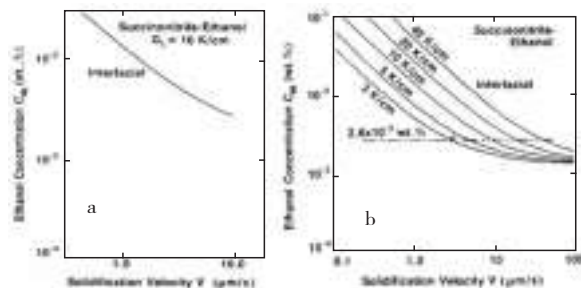


图1 琥珀腈-乙醇体系中界面失稳对应的浓度(a)和温度梯度(b)的关系

2 电磁场对界面稳定性的影响

近年来,人们在利用各种手段控制凝固过程的研究和生产实践中发现,综合利用电磁场技术控制金属的凝固过程有着明显的优越性,并由此形成了材料电磁加工(EPM)这一极具发展前途的新技术。材料电磁加工是指将电磁场应用于材料制备、加工及处理过程中,从而实现对材料工艺过程的控制及组织性能的改善。20世纪50年代末和60年代初,随着连续铸钢技术的发展,人们将电磁搅拌技术应用于连铸过程之中,利用抑制流体流动来控制凝固过程,将电磁场控制技术与冶金技术相结合,形成了专门的电磁冶金技术。80年代以后,各国学者陆续地对磁场作用下的流体行为开展了一系列广泛研究,从此掀起了磁流体力学在材料凝固领域内的研究热潮。

2.1 磁场对界面稳定性的影响

磁场能通过对液体流动的影响来改变凝固组织和材料性能,从而成为研究的热点。但从理论上理解磁场如何影响固液界面稳定性及由此影响组织形态的这一环节,目前还并不很明确。目前普遍认同的强静磁场对金属合金定向凝固过程的影响机理主要集中在两个方面:一是磁阻尼(Magneto-hydrodynamic Damping, MHD)效应;二是热电对流(Thermoelectro-magnetic Convection, TEMC)效应。由于磁场的这两种效应,人们在凝固过程中加入磁场,从而对界面稳定性及形貌组织都产生了很明显的变化。Collie 等人研究了对流的线性机制和二元合金定向凝固中的界面不稳定性^[18],结果显示,在垂直磁场存在的条件下,对流不稳定所需的临界浓度必将增大。任忠鸣等人^[19]通过在磁场作用下定向凝固 Al-0.85%Cu,发现随着磁场强度的增加,界面失稳程度先减小后变大,最后又减小,在 0.4 T 时,界面失稳程度达到最小。

2.2 电流对界面稳定性的影响

近年来,国内外许多学者把电流作为一种新的技术手段引入到金属凝固过程的研究中。凝固过程中,施加电场是控制晶体生长形态的一种有效手段是一种无污染、操作简便的工艺。基于 MS 理论的基本思路,常国威等人建立了电流作用下凝固界面稳定性的动力学理论关系式,并由此得出稳定性的判据^[16]。电流强度通过对固液界面张力、固液两相产生的热量差、有效扩散系数等因素对凝固界面形态的稳定性产生影响。陈文杰^[20]等人通过在 Al-4.5Cu 定向凝固过程中加入脉冲电流,发现随着脉冲电流峰值和频率的增大,Al-Cu 合金柱状晶形态由细条状变为不连续,且细化和失稳趋势趋于增大。廖希亮^[21]脉冲电流提高了固液界面生长形态的稳定性,增大了由平面晶向胞状晶、胞状晶向胞状树枝晶转变的临界生长速度。

3 结论

迄今为止,生长中界面的形态稳定性由于影响因素众多及生长过程的不确定性,是不能用经典热力学的定义加以确定的,当前对平衡热力学的引伸还未能提供一种完全可接受的替代方法。为了对生长形态进行理论分析,有必要采用建立在试探基础上的稳定性判据。加上外场之后,对界面稳定性产生一定的影响,但其影响界面稳定性的机制并不是十分明确。所以建立在各种条件下控制凝固过程中凝固界面形态稳定性动力学微分方程具有重要意义。

参考文献:

- [1] Taniguchi S, Yasuda H, Takatani K. Preface to the special issue on advanced application of electromagnetic force to materials processing[J]. ISIJ Int, 2003, 43: 799-800.
- [2] Feonychev A I, Bondareva N V. Effect of a Rotating Magnetic Field on Convection Stability and Crystal Growth in Zero Gravity and on the Ground [J]. J. Eng. Phys. Thermophys, 2003, 77: 731-742.
- [3] Uhlmann D R, Seward T P, Chalmers B. The effect of magnetic fields on the structure of metal alloy casting [J]. Trans. Metal. Soc. AIME, 1966, 236: 527-531.
- [4] Abramov V, Bulgakov V, Sommer F. Solidification of aluminum alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator [J]. Mater. Lett., 1998, 42: 27-34.
- [5] Qi F P, Zhong H B, Zhai Q J. Microstructure Refinement of Sn-Sb Peritectic Alloy under High-Intensity Ultrasound Treatment [J]. J. Shanghai Univ., 2005, 9: 74-77.
- [6] Jian X, Xu H, Han Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy [J]. Mater. Lett., 2005, 59: 190-193.
- [7] Tiller W A, Jackson K A, Rutter J W, et al. The redistribution of solute atoms during the solidification of metals [J]. Acta Metall., 1953, 1: 428-437.
- [8] Mullins W W, Sekerka R F. Stability of a Planar Interface during Solidification of a Dilute Binary Alloy [J]. J. Appl. Phys., 1964, 35: 444.
- [9] Warren J A, Langer J S. Prediction of dendritic spacings in a directional-solidification experiment [J]. Phys. Rev. E, 1993, 47: 2 702-2 712
- [10] 杨爱民, 刘林. MS界面稳定性判据新探 [J]. 材料研究学报, 2001, 15(6): 703-707
- [11] 胡汉起. 金属凝固原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 128-129.
- [12] Wollkind D J, Segel L A. A Nonlinear Stability Analysis of the Freezing of a Dilute Binary Alloy [J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1970, 268: 351-380.
- [13] 王自东, 胡汉起. 单相合金凝固界面形态稳定非线性动力学理论 [J]. 中国科学(E辑), 1997, 27: 102-107.
- [14] 林鑫, 李涛, 王琳琳, 等. 单相合金凝固过程时间相关的界面稳定性(I)理论分析 [J]. 物理学报, 2004, 53: 3 971-3 977.
- [15] 何国, 李建国, 毛协民, 等. 界面动力学对界面稳定性的影响 [J]. 材料研究学报, 1995, 9(1): 7-12.
- [16] 常国威, 王建中, 薛庆国, 等. 电流作用下凝固界面形态稳定性与对组织形态的影响 [J]. 辽宁工学院学报, 1998, 18(3): 1-4.
- [17] Schaefer R J, Coriell S. R. Convection-Induced Distortion of a Solid-Liquid Interface [J]. Metal. Trans. A, 1984, 15: 2 109-2 115.
- [18] Coriell S R, Cordes M R, Boettinger W D. Convective and Interfacial Instabilities during Unidirectional Solidification of a Binary Alloy [J]. J. Cryst. Growth, 1980, 49: 13-28.
- [19] 李茂, 任维丽, 任忠鸣, 等. 纵向强磁场对 Al-0.85%Cu 合金定向凝固界面稳定性和形态的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1 292-1 298.
- [20] 陈文杰, 廖希亮, 甘长江, 等. 脉冲电流对 Al-4.5Cu 合金定向凝固组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(8): 523-525.
- [21] 廖希亮. 脉冲电流对金属凝固组织的影响 [D]. 上海: 上海大学出版社, 2007.

Progress of Solid-liquid Interface Stability during Directional Solidification

LI Mao

(Wuhan University of Technology Huaxia College, Wuhan 430223, China)

Abstract: Interface stability is a very important issue during the process of metal directional solidification, which has been investigated widely. In this paper, the progress of the interface stability has been reviewed, especially the field based on MS theory, and the effect of electro-magnetic field are also put forward. In the end, the research prospects of interface stability are proposed.

Key words: directional solidification; interface stability; electro-magnetic field

信息园地

莱钢烧结余热发电合同能源管理项目投产

由山东省冶金设计院股份有限公司旗下的山东耀华鲁信节能投资有限公司投资实施,国内最大的单体合同能源管理项目——莱钢型钢炼铁烧结机余热发电项目于2012年7月6日建成投产,7月28日,热能回收发电率达产设计负荷的90%以上,吨矿发电量达到了国家工信部要求的18 kW·h的先进指标。该项目设计年发电量1.6亿 kW·h,年节约标准煤5.76万t,年减少CO₂排放15万t。不仅达到了排放指标,而且使以前白白放散的蒸汽变成了实实在在的效益,将为莱钢降低吨钢成本300元,全年降本增效30亿元目标做出重要贡献。

该发电项目包括1台400 m²烧结机、2台265 m²烧结机,以及12 MW和15 MW汽轮机发电机组各1台。根据多台烧结机同时发电的要求,采用了独创“保安”、“联

通”、“过热”、“密封”、“稳定”等新工艺、新技术,保证了烧结余热回收段的烟气温度稳定,保证多产生高品质蒸汽,保证汽轮发电机有效运转。还采用热风循环、弹簧式高效密封技术等先进技术,提高冷却风的热利用率;采用补气式汽轮机组,将高、低压不同品质的蒸汽通过一机实现做功,提高发电效率。

靠着合同能源管理,山东省冶金设计院股份有限公司再一次抓住了新一轮发展的市场机遇,他们紧紧贴近市场、研究市场、开发市场,用多赢的思路和整套的运用团队,引起了钢铁企业在降本增效和节能减排方面的高度关注。目前,山东冶金设计院的合同能源管理的投入已经达到4.5亿元,他们将与钢铁企业共同分享在节能减排和降低生产成本方面的收益。(高峰)