

2017 中国材料大会

E04. 凝固科学与技术

分会主席：李金山、翟启杰、苏彦庆、王同敏、李建国、王海鹏、陈玉勇、陈光、赵九洲、惠希东

E04-01

小平面生长合金凝固的择优取向和组织调控

蒋成保

北京航空航天大学

E04-02

定向凝固铝合金中羽毛状孪生枝晶的凝固与生长

李双明, 杨鲁岩, 钟宏, 傅恒志

西北工业大学 710072

铝合金凝固中发现的羽毛状枝晶, 呈现层状生长特征, 与目前铸造中两大类组织 (柱状枝晶和等轴枝晶) 不同, 并称为第三类组织形态。一直以来, 羽毛状枝晶生长方向和形成条件有较大的争议, 近年来 EBSD 分析技术的发展, 明确了羽毛状枝晶为孪生枝晶, 其生长方向为 [110], 并给出了其形成的条件为 ($G \sim 100\text{K/cm}$, $V \sim 1\text{mm/s}$, $G \times V \sim 10\text{K/s}$, 较强的对流), 由于传统的 Bridgman 定向凝固, 对流条件较弱, 认为该凝固下不会出现孪生枝晶的生长。而近来我们采用 Bridgman 定向凝固, 不仅生长出了羽毛状孪生枝晶, 且发现存在两类孪生枝晶: 孤立生长的孪生枝晶和团簇扇形孪生枝晶, 通过实验界定了这两类孪生枝晶出现的参数范围, 即在 Al-4.5%Cu 合金中有: (a) G/V 大于 2000 和 GV 乘积小于 2K/s , 凝固组织为常规枝晶的生长; (b) G/V 在 2000 和 20000 和 GV 乘积在 $2\text{-}10\text{K/s}$ 之间, 凝固组织为孤立孪生枝晶和常规枝晶生长; (c) G/V 小于 20000 和 GV 乘积大于 10K/s , 凝固组织为团簇孪生枝晶或常规枝晶、以及它们混合组织生长。另外由于羽毛状孪生枝晶生长呈现团簇扇形形貌, 枝晶生长各向异性较大。可以看到, 团簇羽毛状孪生枝晶一旦出现就会很快超越并淹没常规枝晶, 生长动力学优势十分明显, 但这种优势是什么, 目前尚不清楚。我们采用三维连续切片实验技术, 首次定量给出了定向凝固下铝合金中团簇扇形孪生枝晶侧向生长速率的大小, 结果发现孪生枝晶侧向生长速率大约为凝固抽拉速率的 $1/3$, 如凝固抽拉速率 $500\ \mu\text{m/s}$ 下, 测得其侧枝生长速率为 $148\text{-}177\ \mu\text{m/s}$, 而以前报道一般侧向枝晶生长速率要比凝固抽拉速率小一个数量级, 为此我们认为团簇羽毛状孪生枝晶这种动力学生长优势可能来源于其侧向枝晶快速生长行为, 造成其一旦出现就会很快超越并淹没常规枝晶。

关键词: 定向凝固; 铝合金; 孪生枝晶; 竞争生长

E04-03

Solidification of Al alloys investigated by advanced electron microscopy

Priv.-Doz. Dr. Jiehua Li

Institute of Casting Research, Montanuniversität Leoben, A-8700, Leoben, Austria

Advanced electron microscopy, including high angle annular dark field scanning transmission electron microscope (HAADF-STEM) imaging and electron energy loss spectroscopy (EELS) as well as atom probe tomography (APT), can provide information about the structure and composition at the atomic scale, which have been widely used in the field of solidification of metal and alloys. In this talk, I will present three aspects of research works: (1) Grain refinement of Al alloys (via TiB_2 , AlB_2 and Al_2O_3) and Si poisoning effect of Al-Si

based alloys, (2) Modification of eutectic Si in Al-Si based alloys, (3) Refinement of eutectic grains in Al-Si based alloys with a focus on the interaction between the modifying agents and heterogeneous nucleus particles (AIP). These three examples strongly indicate that HAADF-STEM, EELS and APT play a very important role to elucidate key issues in the field of solidification of metal and alloys.

E04-04

柱状晶-等轴晶转变的熔断机制研究

徐贲, 吴凌康

清华大学材料学院 100084

凝固过程中的柱状晶-等轴晶转变机制,是长期以来困惑材料研究者和工程技术人员的难题。本文通过理论推导和计算机模拟,提出了一种可能的转变机制,即:由界面涨落导致的熔断机制。首先,根据经典行核理论和转变态理论,推导出了过冷熔体中柱状晶的界面涨落微分方程,并在分子动力学模拟中得到验证。研究发现,界面涨落导致柱状晶表面产生随机的凹槽,随着时间的延长,凹槽扩展并导致柱状晶熔断。文中还推导出了柱状晶熔断时的界面演化形貌和熔断时间,并在有限差分模拟中得到证实。

关键词: 分子动力学模拟; 液固界面; 凝固过程

E04-05

强磁场对 Co 基合金过冷熔体形核过程的影响

王军¹, 李金山¹, Eric BEAUGNON^{2, 3}

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072

2. Univ. Grenoble Alps, LNCMI, F-38000 Grenoble, France

3. CNRS, LNCMI, F-38000 Grenoble, France

强磁场是调控材料组织和性能的有效手段,将强磁场用于材料处理,具有广阔的应用前景。目前,强磁场对过冷熔体的形核温度的影响规律,磁场对过冷熔体内形核过程的作用机制仍不明确。

本文以 Co 基合金为主要研究对象,通过在强磁场内构建玻璃净化和循环过热技术实现合金的大过冷,系统研究了强磁场(均质磁场、梯度磁场)对 Cu、Co、Co-Sn 等合金形核过程的影响规律。

研究表明强静磁场能够影响过冷熔体的形核温度,且不同的金属和合金表现出不同的行为。对于抗磁性金属纯 Cu 熔体,强磁场可以提高其过冷度,且当熔体稳定后强磁场对过冷度的影响减弱;纯 Co 熔体在强磁场作用下过冷度不变,其再辉度得到抑制;对于 Co-Sn 合金,在强磁场下凝固时过冷度不变,再辉度降低,随着合金中 Co 含量的提高,磁场对再辉过程的影响增强,再辉温度降低,且析出的 Co 铁磁性相含量增加。在梯度磁场作用下,纯 Cu 熔体与磁场强度的变化没有稳定的关系;纯 Co 熔体在梯度磁场内其过冷度和再辉度均不受磁场变化;梯度磁场可以降低 Co-Sn 合金的过冷度,而提高其再辉度。

关键词: 强磁场; 形核; 过冷度; 再辉

E04-06

气动悬浮熔炼试样温度梯度控制及 BaTi2O5 陶瓷深过冷凝固组织

葛璇, 胡侨丹, 李建国

上海交通大学 200240

本文通过建立气动悬浮无容器熔炼过程的热输运模型研究了温度梯度对二钛酸钡 (BaTi2O5, BT2) 连续冷却过程凝固行为的影响。结果表明:气动悬浮熔炼过程试样中的温度梯度受到试样的热导率、尺寸,气流大小,激光功率等因素的影响。由于试样中存在较大的温度梯度,BT2 在连续冷却过程中表现出典型的深过冷定向凝固特征:BT2 开始结晶的温度远低于液相线温度,熔体处于深过冷状态,并且随着冷速的

提高过冷度增大。试样凝固组织受到热流的显著影响，形核的位置在迎向气流一侧，晶体呈放射状向激光加热端定向生长。BT2 最终的凝固相受到冷速的调控：当冷速较小时，凝固相为 β -BT2 与 γ -BT2 的两相混合， γ -BT2 分布于 β -BT2 板条之间；随着冷速的提高， γ -BT2 含量减少；当冷速超过 85K/s 时，试样为单相的 β -BT2。通过控制试样中温度梯度的影响，更为准确的 BT2 连续转变曲线（CCT 曲线）被测量得到。结果显示 BT2 在连续冷却过程中的玻璃化转变的临界转变速率为 300K/s，转变温度(T_{gc})为 858K，其与升温阶段的玻璃化转变温度 (T_{gh}) 960K 之间的较大差别预示着 BT2 的玻璃化转变受阻碍晶化动力学因素影响更大。

关键词：气动悬浮；温度梯度；二钛酸钡；深过冷；冷速；凝固；玻璃化

E04-07

定向凝固与钛铝单晶

陈光

南京理工大学

E04-08

层状铝合金复合材料连铸坯制备过程的模拟与实验研究

王同敏

大连理工大学

E04-09

轻合金二次复合挤压铸造技术及应用

侯华, 陈利文, 闫峰, 赵宇宏

中北大学 材料科学与工程学院, 太原 030051

本文主要基于自主研发的多功能挤压铸造成型系统，开发了轻合金二次复合挤压铸造技术，并对该技术的成型理论与应用进行了较系统的研究。运用二次复合挤压铸造技术探索了最佳的铝/镁基准晶增强铝镁基复合材料的成型方案，揭示了复合材料在压力下的凝固行为与规律，铸件的强化机制与断裂机理，以及热处理工艺对微观组织结构与性能的影响规律，实现了铝镁基复合材料挤压铸造制备过程的较精确控制。

E04-10

定向凝固铝合金枝晶生长取向的演变

陈忠伟, 高建平

西北工业大学 710072

铝合金的凝固组织一般由等轴晶和柱状枝晶组成。初生 α -Al 相枝晶主干通常沿着方向生长，但是不同的生长条件会导致生长取向发生转变，从而使合金性能改变。

本文采用背散射电子衍射技术（EBSD）技术，研究了 Al-Zn、Al-Sn、Al-Mg 三种铝合金在定向凝固条件下生长取向的演变，发现枝晶生长取向随合金元素含量的变化而变化，同时枝晶类型也由常规枝晶向孪生枝晶转变。

定向凝固 Al-89wt%Zn 合金枝晶主干和二次枝晶臂的生长取向由 Al-9.8wt%Zn 合金常规枝晶的取向演变为取向。定向凝固 Al-32wt%Zn 合金中初生孪生枝晶的取向为而非通常的或者取向。Al-Sn 合金中 Sn 含量从 4wt% 逐渐增加，常规枝晶的晶体学取向由向方向演变，Al-8wt%Sn 合金既有也有取向，并且生长方向平行于温度梯度的方向。同时，孪生枝晶始终保持取向，且与温度梯度的方向夹角为 30° 。Al-Mg 合金中低 Mg 含量合金促进了孪生枝晶的生成，并且初生枝晶主干和二次枝晶臂沿取向生长。

枝晶生长取向的演变可能是由于低的固液界面能各向异性造成的。

关键词：定向凝固；铝合金；EBSD；枝晶生长取向

E04-11

Al/Ni-液/固界面反应体系中氢气泡的同步辐射动态实时表征

丁宗业，胡侨丹，卢温泉，孙思宇，夏明许，李建国

上海交通大学 200240

目的：Al/Ni-液/固界面反应体系中氢气泡的形貌演变、生长行为及长大模型。

方法：利用同步辐射相位衬度成像技术对 Al/Ni-液/固扩散偶反应过程进行实时观察。

结果：分析了加热过程中单个气泡的形态变化及生长模式，统计了不同尺寸下群体气泡的频率分布，研究了熔体中气泡的群体生长行为，并对凝固过程中气泡的形态演变与长大行为进行模型描述。

结论：在加热过程中，Al/Ni 界面处未生成金属间化合物与氢气泡，但在远离界面的 Al 熔体中形成大量球状气泡。对于单个气泡，由于氢扩散性与溶解性的综合作用，将导致气泡半径随时间变化曲线符合 Gaussian 统计分布。在长大过程中，其扩散边界层厚度逐渐减小，氢浓度梯度增加，将加速气泡长大；局部熔体温度陡增将引起气液界面的移动速率低于气泡的长大速率，促使个别气泡发生破裂，且局部熔体流动产生的拖拽力将诱发个别气泡由球形转变为椭球形；在气泡缩小过程中，其扩散边界层厚度增加，氢浓度梯度减小，减缓气泡缩小速率。对于群体气泡，其尺寸分布前期遵循 Gaussian 分布，但后期符合 Lifshitz-Slyozov-Wagner (LSW) 扩散控制分布。在保温过程中，Ni 基体逐渐向 Al 熔体中溶解，反应体系中未生成金属间化合物与氢气泡。在凝固过程中，Al₃Ni₂ 与 Al₃Ni 金属间化合物相继在界面处生成并长大；球形氢气泡在邻近界面处优先生成，且长大受阻于两侧 Al₃Ni 相，形态转变为椭球形，其生长行为可用修正的扩散控制模型进行描述。

关键词：Al/Ni-液/固界面；氢气泡；长大行为；扩散控制模型

E04-12

铝合金半固态浆料微观组织元胞法模拟研究

屈文英，张帆，李大全，罗敏，杨志宇，张永忠

北京有色金属研究总院 101407

半固态成形技术中铝合金晶粒的形核与长大主要发生在半固态坯料制备阶段，坯料组织将直接影响成形零件的组织形貌和力学性能。因此，半固态浆料微观组织的预测对半固态成形工艺优化及零件力学性能的提高具有重要意义。热平衡法制备铝合金半固态浆料工艺中影响其微观组织的关键技术参数有浇注温度、坩埚温度、制坯时间、坩埚与浆料间的界面换热系数，以及坩埚与空气间的换热系数等。本研究采用元胞有限元方法对 357.0 铝合金在热平衡法制备半固态浆料过程中的组织演变进行了模拟研究，并用实验进行了验证。研究结果显示，建立的元胞法微观组织预测模型可直观的展现铝合金半固态浆料制备过程中的组织演变，且与实验结果吻合较好。研究表明，随浇注温度的降低，浆料晶粒组织逐渐细化；坩埚温度影响细晶边界层的宽度，坩埚温度越低，细晶边界层越宽，边部与心部浆料间的传质传热受阻，越不利于组织的均匀化；制坯时间越长，坯料晶粒数目越多，固相分数越高；坩埚与坯料间的界面换热系数主要取决于浇注温度和坩埚温度，坯料与坩埚之间的温差越大，换热系数越大，坯料内部的组织大小分布越不均匀；坩埚与空气间的换热系数通过改变坩埚表面材质进行改变，换热系数低的材质可明显改善高温浇注下的浆料组织分布均匀性。本文还根据模拟的组织演变过程分析了热平衡条件下的晶粒形核与长大规律，得到了半固态浆料制备过程的控制机制，为后续热平衡法半固态制浆技术的推广应用打下了坚实基础。

关键词：半固态；铝合金；微观组织模拟；元胞法；形核机制；长大机制

E04-13

29T 强静磁场下 Al-Cu 合金的凝固及其压缩性能强化

郑天祥¹，钟云波¹，任忠鸣¹，Debray Francois²，Beaugnon Eric²

1. 上海大学, 高品质特殊钢冶金国家重点实验室, 上海 200072, 中国

2. LNCMI, CNRS, 格勒诺布尔, 38042, 法国

目的:

室温条件下, 由于金属间化合物自身脆性的特征, 经常以裂纹以及无明显塑性的弹性变形的方式失效。一般情况下, 我们期望通过与其它具有延展特性的相之间的合金化实现材料塑性能力的提升, 如 Al-Cu 合金。如今, 利用强静磁场获得金属间化合物的细化和取向是一种新的制备方法。在磁场凝固领域中, 是否是由于热电磁力导致析出相 (金属间化合物) 的细化及其作用范围一直存在争议。

方法:

本文采用工业 CT 实现对 29T 强静磁场下体凝固得到的 Al-40wt.%Cu 合金组织的 3D 可视化和 Al₂Cu 初出相尺寸及形貌的量化分析。利用 EBSD 检测手段对晶粒取向进行研究。最后对合金试样进行压缩性能测试获得应力应变曲线。

结果:

在 29T 强静磁场作用下, Al₂Cu 初生相的形貌由小平面相 (0T) 转变成非小平面相, 其尺寸也得到了显著地细化。经计算得知, 热电磁力导致的热电磁流动的作用范围小于 670nm, 基体共晶组织中的层片间距由 6.3 μm (0T) 细化至 2-3 (μm)。并且, 强磁场下获得的合金组织中无棒状共晶组织出现。在 50°C/min 的冷速下, 合金组织中 Al₂Cu 初出相的晶向几乎都沿着外加强静磁场的方向产生显著地取向现象。通过压缩实验发现, 经强静磁场处理后, Al-40wt.%Cu 合金的压缩强度和最大应变分别提高了 73.79% 和 38.89%。

结论:

强静磁场消除了共晶组织在凝固过程中的 Rayleigh 不稳定性。合金在强静磁场下凝固过程中固液界面前沿形成的热电磁力和强静磁场对溶质原子扩散的抑制作用是导致 Al₂Cu 初生相形貌变化和尺寸细化的主要原因。本文的研究结果揭示了强静磁场对 Al₂Cu 初生相的影响过程, 提出了一种新的细化理论机制, 同时也为制备具有优异力学性能的脆性材料提供了一条新的途径。

关键词: 强静磁场; Al-Cu 合金; 凝固; 取向; 压缩性能

E04-14

基于有序-无序竞争的液-固转变路径判据

李建国

上海交通大学

E04-15

Synchrotron X-ray observation of cracking during high speed solidification of steel

Hongbiao Dong

University of Leicester

Solidification cracking, also known as hot cracking, is an important issue in fusion welding, casting and some of the additive manufacturing processes. If undetected, the cracking defects can act as stress concentration sites which lead to premature failure via fatigue, as well as offer favourable sites for hydrogen assisted cracking and stress corrosion cracking. Because of this, the defects are widely studied and have been the subject of investigation for several decades. Early experimental efforts to observe the phenomenon were focussed on favourable organic alloys because of the technical problems involved with metallic alloys. Recent in situ observations of semi-solid deformation and solidification cracking in metallic alloys has been born from the interesting new fields of experimental research created by the development of third generation synchrotron sources. The X-ray beams produced at third generation synchrotron radiation facilities exhibit a high degree of coherence. This arises from the small source size σ (in the 50 μm range) and the large source to sample distance L (in the 100 m range). Although revealing, the studies described so far have been biased in their applicability to

cast binary and aluminium alloys in slow solidification rate experiments. The remaining challenge lies in the in situ observation of solidification cracking during high solidification rate manufacturing processes such as welding and additive manufacture when using industrial relevant materials such as commercially available steel. In this research, a novel small-scale Vrestraint test rig (ADW test rig) has been developed and embedded into the European Synchrotron Radiation Facilities (ESRF) high resolution imaging beamline, ID19. The beamline is installed on a low-beta section of the storage ring. ID19 has a small source size (30 μm vertical x 120 μm horizontal) and long 145 m straight section from the source to experimental hutch. This allows for the coherence properties of the beam to be exploited. Solidification cracking during welding of steel is observed in situ using high-speed, high-energy radiography. Ex situ tomography is then implemented to rebuild and analyse the 3D crack network. A propagation-controlled failure mechanism is identified. Damage initiates at relatively low true strain of about 3.1% in the form of micro-cavities at the weld subsurface where peak volumetric strain and triaxiality are localised. The initial micro-cavities, with sizes from 10 x10⁻⁶ m to 27 x10⁻⁶ m, are mostly formed in isolation as revealed by synchrotron X-ray micro-tomography. The growth of micro-cavities is driven by increasing strain induced to the solidifying steel. Cavities grow through coalescence of micro-cavities to form micro-cracks first and then through the propagation of micro-cracks. Cracks propagate from the core of the weld towards the free surface along the solidifying grain boundaries at a speed of 2-3 x10⁻³ m s⁻¹.

Keywords: Solidification; cracking; synchrotron; X-ray; high; speed; solification

E04-16

非晶合金中凝固缺陷对力学性能的影响

王刚

上海大学 200444

非晶合金的结构缺陷模型，如自由体积、剪切转变区、变形单元、核-壳模型等，为解释非晶合金的变形机制提供了理论基础。本文通过应力、温度、离子辐照对非晶相缺陷结构进行激发并观察其响应行为，探索缺陷结构的演化对非晶合金宏观机械性能的作用机理。引入数学和统计方法表征不同强度非晶合金在点加载过程中间歇性的塑性变形过程，揭示了特征剪切崩塌与变形单元的大小呈正相关关系。重离子辐照能够增加非晶合金的自由体积分数，降低屈服强度，增强塑性变形能力。低温处理诱导第一近邻原子层发生反常膨胀，导致变形单元的起源从中程序转变为短程序，使得非晶合金更强更韧。裂纹前端原位引入纳米晶，可有效抑制裂纹尖端孔洞的形成，阻碍裂纹的扩展。

关键词：非晶合金；凝固缺陷；离子辐照；力学性能

E04-17

铝硅合金熔体中诱导形核机制的探索

田学雷，张勇，于文慧，颜廷亮，姜奥雷，郑洪亮

山东大学材料科学与工程学院，材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 250061

近年来，研究者发现某些无机盐从其水溶液中析出之前，溶体中出现了前驱体——不具有周期性的结构体，这些前驱体是在团簇的诱导下形成的，进而有效地促进形核和长大过程，为此探讨金属熔体中是否存在类似的团簇，并诱导形成形核前驱体进而促进形核。

分别以过共晶铝硅合金、亚共晶铝硅合金为研究对象，以富含 β 富铁相的 Al-10Si-2Fe 合金作为向铝硅合金熔体中引入 AlFeSi 原子团簇的中间合金，探索 AlFeSi 原子团簇是否能够成为诱导形成形核前驱促进铝硅合金熔体的形核。

以高纯铝（4N）和高纯硅（5N）、工业纯铝（99.7%）和工业纯硅（99.3%）分别配制高纯和工业纯过共晶（Al-15Si）铝硅合金，使用 Al-10Si-2Fe 中间合金分别对其熔体进行处理，发现在初生硅中均有纳米

颗粒存在。对于高纯铝硅合金的初生硅没有起到细化效果，而对于工业纯或加微量 P 的高纯过共晶铝硅合金的初生硅具有明显的细化效果，说明形成了前驱体，促进了形核。对于亚共晶 Al-10Si 合金来说，Al-10Si-2Fe 中间合金与 Sr 配合能显著细化共晶团尺寸，可以显著提高延伸率。在实际生产条件下，利用 Al-10Si-2Fe 中间合金与 Sr 配合，对 A356 熔体进行，显著提高其延伸率，亦证明了该中间合金在 A356 合金熔体的形核过程中 AlFeSi 原子团簇诱导形成了形核前驱体，促进了形核。

关键词：铝硅合金；熔体；诱导；形核

E04-18

Al 的形核路径及其调控

夏明许，王璐，葛璇，王双，卢温泉，胡侨丹，李建国

上海交通大学 200240

经典形核理论认为形核界面是明锐的、具有固定的界面能，依靠单原子或分子附着形核长大；而非经典形核理论则认为形核具有动态扩散的界面、温度相关的界面能，通过团簇或亚稳相迁移长大。从凝固过程中原子结构的变迁历史可以推测熔体内部的团簇结构、分类及其尺寸大小以及外部的热动力学因素均会影响形核路径的选择。本研究以纯 Al 和 Cu 液体的异质形核过程为研究对象，选用单晶 Al₂O₃、MgO 和 MgAl₂O₄ 为形核基底，通过调控熔体的团簇结构、改变形核基底的晶体和表面结构以及向形核界面引入化学反应等多种手段控制熔体形核过程。针对熔体凝固过程及凝固后的试样，采用 SEM、HAADF-STEM、EELS 及高能 X 射线衍射等多种分析测试手段，分析熔体形核过程中的原子团簇演化，获得其形核路径信息。研究发现：纯 Al 再辉时在熔体中预先形成纳米晶，但大部分 Al 仍保持熔体状态，再辉结束后形成纳米晶发展成为多晶固体。而单晶基底可诱导熔体形成取向晶体，最终获得具有明显择优取向多晶凝固组织。合金元素 Cu 可促进再辉时 Al 纳米晶的形成，并在形核界面形成一层 1~2nm 厚的富 Cu 吸附层。该吸附层可降低 Al/Al₂O₃ 之间的晶格错配度和形核过冷度，进一步促进 Al 熔体的形核。Al 熔体与 MgO 和 MgAl₂O₄ 在 750℃ 以上的化学反应，生成 Al₂O₃。反应层阻隔了 Al 熔体与原始基底的直接接触，抑制了基底对 Al 熔体的形核作用；而在 700℃ 以下 Al 熔体与 MgAl₂O₄ 基底不发生反应，此时 MgAl₂O₄ 促进 Al 的形核。综合以上研究，并结合形核界面的结构特征提出新的能量-错配模型：当 3.1% < f < 13% 时，引入新的混合位错来计算界面能，提出重合错配模型的能量计算方法，完善了位错模型；当 f > 13% 时，提出层错模型来计算微孪晶等堆垛层错缺陷来调适界面错配的界面能。该模型可根据不同体系的形核特征，进一步拓展应用到其他相关领域。

关键词：形核路径；熔体结构调控；基底调控；受控形核凝固法

E04-19

非平衡凝固 CoSb₃ 基热电材料的显微组织分析

宋广生，彭国胜

安徽工业大学，材料科学与工程学院

CoSb₃ 属于方钴矿结构，由于在高温 (> 300oC) 具有较高的能量转换效率 (ZT > 1.5)，可望成为最有希望的热电材料。采用单辊甩带技术在不同快速凝固条件下形成薄带，研究冷速对包晶凝固过程中相选择的影响，并阐明平衡凝固包晶形成相 CoSb₃ 在冷速较高的条件下，以初生相直接从液体形核的成因。

E04-20

一种新的测量液态金属原子扩散的滑动剪切技术

张博，胡金亮，钟浪祥

合肥工业大学材料科学与工程学院液态金属扩散实验室 230009

作为一个表征液态金属动力学的重要物理参量，液态金属的扩散系数既是设计材料过程中的重要参数

之一，也是凝聚态物理领域研究物质输运性质的重要内容。但由于理论计算及实验测量上的困难，相关研究尚还很不成熟。本文主要介绍了当前测量熔体扩散系数的几种常用技术，包括长毛细管技术，X射线成像技术及切单元技术等，并在此基础上，系统的介绍了本课题组自主开发的滑动剪切技术。该技术基于长毛细管和切单元技术，能够有效消除加热阶段的扩散，显著地提高测量互扩散系数的精度。利用该技术，我们在 Ce-Al, Ce-Ni, Ce-Cu 等众多金属熔体体系进行了互扩散测量，并获得了相应的互扩散系数，实验结果表明该技术能方便快捷的进行互扩散系数测量，并获得相对精确的互扩散系数，是测量熔体扩散系数的有效方法之一。

关键词：液态金属；互扩散；滑动剪切技术

E04-21

基于气动悬浮和同步辐射的深过冷二钛酸钡 (BaTi₂O₅) 熔体相选择机制研究

胡侨丹, 葛璇, 卢温泉, 夏明许, 李建国

上海交通大学 200240

本文利用气动悬浮熔炼和同步辐射高能 XRD 技术研究了深过冷二钛酸钡 (BaTi₂O₅, BT₂) 熔体的相选择机制。通过计算获得了 BT₂ 的临界过冷度，约为 405K。结果表明：BT₂ 的深过冷凝固过程受到过冷度的显著调控：当过冷度小于临界过冷度时，凝固之后的试样呈蓝黑色，凝固相为单相 γ -BT₂，显微组织表现为小平面生长的颗粒状、板条状；当过冷度大于 575K 时凝固之后的试样呈乳白色，凝固相为单相 β -BT₂，显微组织非小平面生长的树枝状；而当过冷度在二者之间时，凝固之后的试样呈现出蓝黑色到乳白色的过渡转变，凝固相为 β -BT₂ 和 γ -BT₂ 的混合。通过对实时高能 XRD 结果的解析，发现 BT₂ 在深过冷凝固时 β -BT₂ 衍射峰首先在熔体的第一峰位处出现，随着凝固的进行， β -BT₂ 衍射峰发生向 γ -BT₂ 衍射峰的转变，这说明在 BT₂ 深过冷凝固过程中存在 melt \rightarrow β -BT₂ \rightarrow γ -BT₂ 凝固步进规则。进一步比较 BaTi₂O₅ 深过冷熔体结构与 β -BT₂, γ -BT₂ 晶体相的结构，表明熔体与 β -BT₂ 的 Ti-O 多面体结构在配位数和最近邻原子半径上相近而与 γ -BT₂ 差异更大，这预示着结构的近似性与上述的凝固步进规则有密切联系。

关键词：深过冷；相选择；同步辐射；气动悬浮；二钛酸钡

E04-22

液-液相变对形成非晶结构的影响

张世良, 王利民, 张新宇, 威力, 张素红, 马明臻, 刘日平

燕山大学 066004

液-液相变是指发生于液体中的一种结构相变。由于非晶是被称为冻结的液体，那么液-液结构相变是否会对快速冷却过程形成的非晶结构产生影响呢？

使用经典分子动力学模拟的方法，通过调整冷却速度，对比液体中的配位数、密度、扩散等参数，找出存在液-液结构相变的证据，并且使用 voronoi 指数方法来标定液态结构中的团簇状况。

结果表明，在从高温到低温的快速冷却过程中，液-液相变是必然发生的。首先高温下和低温下的液态团簇种类发生了较大的变化，发生液-液相变后的团簇更的聚集。在冷却过程中的配位数分析也出现了明显不同的趋势。

因此，通过快速冷却的方法获得的非晶，遗传了低温液相的结构特征。在分子动力学方法能够模拟的范围内，暂时尚无法通过快速冷却的方法来获得具有高温液相结构的非晶。

关键词：液-液相变；非晶；分子动力学模拟

E04-23

基于同步辐射成像技术的 Al-Bi(In)难混溶合金液相分离及偏析形成原位研究

卢温泉, 胡侨丹, 李建国

上海交通大学材料学院先进材料凝固实验室 200240

难混溶合金是一类具有独特性能的材料, 在自润滑、电触头、电子封装用焊球以及相变储能材料等方面应用广泛。由于金属合金的不透明性以及熔体的高温环境等特点, 目前缺乏有效手段控制难混溶合金液相分离以及偏析形成过程, 对此过程所涉及的理论也没有形成清晰的认识。鉴于此, 我们采用同步辐射成像技术, 选择 Al-10 wt.% Bi 和 Al-20 wt.% In 难混溶合金作为研究对象, 借助自主建立的金属凝固过程实时观测装置, 观察了 Al-10 wt.% Bi 和 Al-20 wt.% In 难混溶合金的凝固组织演变过程。结果表明: 大尺寸的 Bi 液滴和 In 液滴可直接从过饱和基体熔体中析出, 其并不仅仅是源于液滴之间的碰撞聚合。Bi 溶质偏聚到气泡表面降低了系统自由能, 改变了基体熔体的液相分离行为, 甚至会阻碍液相分离过程的发生。与 Al-10 wt.% Bi 难混溶合金相比, Al-20 wt.% In 难混溶合金样品底部至样品顶部逐渐析出的 In 液滴的大小和位置在后续的凝固过程中均没有改变, 主要原因是由于其发生液相分离过程的温度区间跨度仅有 20 °C。所以, 在慢冷条件下, Al-20 wt.% In 难混溶合金最终也能得到 In 液滴弥散分布的凝固组织。

关键词: 难混溶合金; 同步辐射成像; 液相分离; 偏析

E04-24

枝晶状等轴晶-柱状晶四相混合模型在钢锭凝固过程中的多缺陷同步预测

李军, 蔡端星, 葛鸿浩, 李建国

上海交通大学 200240

大型钢锭的凝固过程具有时间长、钢液流动紊乱不可控的特点, 因此凝固缺陷如: 宏观偏析、夹杂、缩孔/疏松等等的产生难以避免。基于多相流技术的数值模拟技术的发展对凝固缺陷机理的揭示以及大型钢锭的制备提供了有力手段。然而, 目前已发表的模型均只能预测单一缺陷, 而实际情况是多种缺陷在同一铸锭中会同时存在并且各缺陷之间相互影响。

本文在前期混合三相凝固模型基础上, 耦合 Eulerian 与 VOF 模型同时引入空气相并进一步考虑凝固收缩对凝固过程的影响。当前模型不仅考虑了枝晶状等轴晶的形核、生长、沉积、柱状晶-等轴晶转变 (CET), 还考虑了凝固收缩对金属液流动的影响。

模型在 55 吨钢锭中得到应用, 成功预测了包括铸锭上部正偏析区、底部锥形负偏析区、A 型偏析、热顶处大缩孔、铸锭中心疏松等结果, 与实验测量值接近, 模型具备同步预测宏观偏析、缩孔/疏松多种缺陷的能力。

同时也进行了三维的数值模拟研究, 首次成功预测了大型钢锭中的层片状三维 A 偏析。最后, 详细讨论了钢锭中 A 偏析可能存在的形成机理。

关键词: 数值模拟; 宏观偏析; 多相耦合; 铸造缺陷

E04-25

基于同步辐射 X 射线研究镁合金凝固过程三维微观结构演化

帅三三¹, 王江¹, 任忠鸣¹, 荆涛²

1. 上海大学, 材料科学与工程学院

2. 清华大学, 材料学院

镁合金由于质量轻, 具有优良的综合性能, 广泛应用于航天航空、汽车和电子产品等领域。Mg 作为一种典型的 hcp 结构金属, 其凝固过程形成的枝晶形貌和生长取向受到多种因素的影响, 目前针对镁合金 α -Mg 枝晶生长模型描述以及多样性的起源等问题的研究都比较缺乏。

本文借助同步辐射 X 射线微观断层扫描技术, 研究了镁合金凝固过程中 α -Mg (X) 枝晶生长选择多样性的形成机理以及固溶合金元素 (Al, Ca, Zn 和 Sn 等)、固溶元素含量 (溶质浓度) 等因素对 α -Mg 枝晶生长选择和演化的影响; 同时基于快速 X 射线成像技术率先开展了镁合金凝固过程三维微观结构演化原位表

征研究。

通过实验表征获得了不同条件下镁合金三维枝晶形貌和枝晶生长取向信息，建立了相应的镁合金枝晶生长模型。基于原位观察实验，获得了镁合金凝固过程三维枝晶生长过程，定量化表征了镁合金凝固过程三维微观结构的演化。

研究表明，固溶元素、固溶元素含量等因素都会对镁合金中 α -Mg 三维枝晶形貌和择优取向产生重要影响。在 Mg-Ca 和 Mg-Al (hcp-fcc)合金中，枝晶倾向于以 或 为择优方向生长；在 Mg-Sn (hcp-bct)合金中，等轴生长的枝晶沿着基面上 和偏离基面的 ($X \approx 2$)方向形成 18 次分支的结构，在 Mg-Zn (hcp-hcp)合金中， α -Mg 枝晶的择优取向随着 Zn 含量的增加，从 方向朝偏离基面的 方向发生连续转变，并在转变的过渡区发现了超支化藻状枝晶结构，其原因可能是高各向异性 Zn 元素的引入带来的固/液界面自由能各向异性的变化。研究结果从一定程度上揭示了镁合金凝固过程中 α -Mg 枝晶生长形貌和分支结构选择多样性的规律。

关键词：镁合金；凝固；三维枝晶形貌；枝晶生长取向；X 射线微观断层扫描

E04-26

Undercooled solidification interface of Ni-B alloy

Junfeng Xu, Yaling Wang, xin Wang, Zengyun Jian

西安工业大学，光电功能材料与器件重点实验室

Eutectic solidification of undercooled Ni-3.51wt% B alloy melt was investigated by glass fluxing. The cooling curves and the solidification interface were measured. The cooling curves show that the recalescence peak deduces with the rise of undercooling. High-speed video images show that the solidification interface of primary solidification changes from single dendritic shape to spherical shape with increasing undercooling; the interface of eutectic solidification changes from many small “dendrites” to a single large one with increasing undercooling. The growth velocity of eutectic solidification was measured. It can be fitted by classical dendritic growth model. All those results suggests a coupled growth at small and moderate undercoolings and decoupled growth at large undercooling.

Keywords: undercooling; solidification; Ni-B; alloy

E04-27

电流作用下难混溶合金凝固过程研究

江鸿翔, 赵九洲, 何杰

中国科学院金属研究所 110016

电流对合金凝固过程具有重要影响，电流作用下合金凝固行为是材料科学领域的重要研究内容之一。本文以 Al-Pb、Cu-Bi-Sn 等合金为对象，实验与模拟相结合，研究了直流电流、脉冲电流对难混溶合金凝固组织演变的影响。结果表明，1) 直流电流主要通过改变液-液相变过程中弥散相液滴（以下简称“液滴”）的空间迁移来影响合金凝固过程及组织。当液滴的电导率小于基体熔体的电导率时，液滴在电流作用下由试样中心向表面迁移。当液滴的电导率大于基体熔体的电导率时，液滴在电流作用下由试样表面向中心迁移。可以利用直流电流作用下的连续凝固技术控制难混溶合金凝固过程，制备具有壳/核结构的特种合金线/棒材料；2) 脉冲电流主要通过改变液-液相变过程中液滴的形核能垒来影响合金凝固过程及组织。当液滴电导率小于基体熔体电导率时，脉冲电流提高液滴的形核能垒，降低液滴形核率，促进偏析型凝固组织的形成；当液滴电导率大于基体熔体电导率时，脉冲电流降低液滴的形核能垒，提高液滴形核率，促进弥散型凝固组织的形成。可以利用脉冲电流作用下的合金凝固技术控制难混溶合金凝固过程，制备弥散型难混溶合金复合材料。

关键词：难混溶合金；电流；凝固；组织演变

E04-28

铝熔体凝固过程团簇竞争和演化机制的模拟研究

侯兆阳¹, 刘让苏², 彭平³

1. 长安大学理学院
2. 湖南大学物理与微电子科学学院
3. 湖南大学材料科学与工程学院

金属的凝固起始于过冷熔体中晶核的形成、长大, 并最终转化为非晶或晶化固体。不同凝固条件下金属熔体中团簇结构将呈现不同的转变路径, 因此深入研究凝固过程不同团簇结构之间竞争和演化机制, 是从本质上理解金属熔体凝固液-固转变微观机理的关键。

为此, 我们对包含 100 万个铝原子大规模体系的凝固过程进行了模拟计算, 采用课题组建立起来的团簇类型指数法和团簇跟踪分析技术, 对凝固过程不同结构类型的原子团簇进行了表征, 并跟踪分析了不同团簇结构的演化过程。

结果表明, 金属铝熔体中包含大量不同结构类型的团簇结构, 其中与二十面体结构相关的原子团簇占主体地位; 这些团簇结构处于不断地相互转化过程, 并且随着温度的降低向着局域对称性较高的团簇类型转化。在凝固过程不但存在非晶相团簇与晶相团簇之间的竞争, 还存在亚稳晶相团簇与稳定晶相团簇之间的竞争; 冷却速率对凝固过程微观结构的影响只有在液-固转变温度以下才显现出来, 冷却速率对不同相结构的选择机制起关键作用。结果还表明, 在一定的冷却速率区间 ($0.2 \text{ K/ps} \leq R \leq 4 \text{ K/ps}$), 通过快速凝固获得了纳米晶结构, 而且纳米晶粒呈现各种不同的孪生形貌, 生长动力学对孪晶形貌其决定性作用。

关键词: 原子团簇; 快速凝固; 相选择机制; 分子动力学模拟

E04-29

航空航天铝合金结构件的致密化铸造研究进展

介万奇

西北工业大学材料学院, 凝固技术国家重点实验室

大型铝合金铸件是航空航天制造不可或缺的技术。传统的铸造工艺生产的铸件致密度低, 力学性能远不能企及合金的设计性能。在较早的航空航天结构设计中, 常常按照合金力学性能 60%到 70%的折扣作为结构设计标准。作者所在的研究团队近年来进行了大型复杂结构件致密化铸造技术研究, 开发出以压力可控的浇注补缩为特色的两项铸造技术, 在实现铸件精密成型的同时, 解决了铸件致密度和卷入性缺陷控制难题, 铸件的本体性能接近了合金设计性能的极限。本文介绍了大型铝合金铸件铸造过程控制原理和方法, 其中包括熔体的结构调控原理, 熔体中气体含量与缩松的关系, 缩松与偏析的相关性和耦合分析方法, 基于浇注系统补缩的浇注系统设计方法, 铝合金结构件精铸过程的尺寸误差累积效应与尺寸精度控制原理, 热处理反变形与矫形技术。最后介绍两种铸造新技术的实际应用情况。

E04-30

静磁场下金属凝固研究

任忠鸣

上海大学

E04-31

钛铝合金精密热成形基础研究

陈玉勇

金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨工业大学

TiAl 合金是一种新型轻质耐热结构材料，具有低密度、高比强度和比模量，良好的高温抗氧化性以及蠕变抗力等优点，使其在航空航天和汽车发动机等领域的高温结构零部件应用方面得到了广泛的关注，然而 TiAl 合金室温塑性低，高温变形能力差等因素制约了 TiAl 合金的工程化应用。本报告从钛铝合金熔模精密铸造、锻造及轧制等方面介绍近年来哈尔滨工业大学在钛铝合金精密热成形基础研究方面的进展。

在 TiAl 金属间化合物精密铸造技术方面，针对典型构件熔模精密铸造过程中的关键技术，开展了 TiAl 金属间化合物熔模精密铸造用复合氧化物陶瓷型壳制备、TiAl 熔体与氧化物陶瓷型壳的界面相互作用机理、TiAl 金属间化合物铸造性能、浇注系统的数值模拟及工艺优化和铸件最终凝固组织调控等方面的研究。提出了适于 TiAl 金属间化合物熔模精密铸造的复合氧化物陶瓷型壳制备方法，解决了复杂薄壁 TiAl 金属间化合物铸件的成形和凝固组织控制问题，并研制了多种 TiAl 金属间化合物薄壁铸件。在 TiAl 金属间化合物铸锭冶金技术方面，近年来，采用真空自耗电极电弧熔炼 (VAR) 技术成功研制出成分均匀、最大尺寸达到 $\Phi 290\text{mm}$ TiAl 金属间化合物铸锭。系统研究了大尺寸 TiAl 金属间化合物铸锭在约束条件下的热变形行为和显微组织演变规律，已经研制出最大尺寸超过 $\Phi 700\text{mm}$ 的大尺寸锻坯。在 TiAl 金属间化合物热机械处理技术的基础上，解决了 TiAl 合金构件加工难题，成功制备出结构复杂的 TiAl 合金构件。目前，采用上述 TiAl 金属间化合物铸锭、锻坯和板材，已经研制出多种新型航天器构件。

E04-32

钙/氧化钙对商用纯镁凝固晶粒细化的对比研究

彭国胜¹，宋广生¹，王云²

1. 安徽工业大学材料科学与工程学院，马鞍山，24002，中国

2. The EPSRC Centre-LiME, BCAST, Brunel University, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, UK

采用标准 TP-1 测试，结合金相、扫描透射电镜和 XRD 表征，开展钙/氧化钙对商用纯镁凝固晶粒细化的对比研究。研究表明：当纯钙浓度从 0.1 wt.% 增加到 1 wt.% 时，镁凝固晶粒为典型等轴晶且晶粒尺寸递减；加入氧化钙的折算含钙量同样从 0.1 wt.% 增加到 1 wt.% 时，镁凝固晶粒为等轴晶且晶粒尺寸基本不变。对比钙和氧化钙对镁凝固晶粒尺寸的细化效果可知，加入同等折算含钙量的氧化钙镁凝固晶粒细化效果明显好于纯钙。进一步研究发现，氧化钙在纯镁熔体中容易被还原成钙和氧化镁；在钙/氧化钙加入的镁熔体中均发现钙元素在原生氧化镁颗粒表面的偏聚现象。据此，开展钙/氧化钙对纯镁凝固晶粒细化机理的讨论。

E04-33

相分离合金凝固组织及其调控与新材料设计

何杰¹，王中原¹，刁瑶瑶¹，孙小钧¹，Ivan Kaban²，江鸿翔¹，赵九洲¹

1. 中国科学院金属研究所，沈阳 110016，中国

2. Leibniz Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Germany

液-液相分离是一种由单一均匀液相 L 发生分解，形成两个具有不同化学成分液相 (L1 + L2) 的过程，即 $L \rightarrow L1 + L2$ 。液-液相分离（或两液相共存）是自然界中常见的现象，如油-水分离结构。在材料与冶金领域，存在诸多的液-液相分离系统。就金属材料而言，已知的二元合金相图中就存在 500 多个具有液-液相分离特征的合金系。这些合金系在某一温度和成分范围内 (Miscibility gap)，展现出两液相共存的现象。通常，液-液分离形成的两液相在重力水平、温度梯度、界面润湿等因素共同作用下，极易产生偏析甚至两相分层。近些年来，为了获得第二相均匀分布的凝固组织，国内外开展了大量实验和模拟计算研究。液态形核-长大和液态 Spinodal 分解是液-液相分离的两种机制。近来，我们发现利用液-液相分离原理，可设计新型高性能金属材料 and 用于复杂二次金属资源分离以及金属提纯/净化等领域。在通常凝固条件下，二元液-液相分离合金最终形成晶态/晶态的凝固组织，即第二相以晶态相形式分布于晶态基体中。在本次汇报中，我们利用合金液-液相分离现象，通过合金优化设计，采用快速凝固技术成功制备了晶态粒子/非晶基体、

非晶粒子/非晶基体等新材料。以典型的 Al 基和 Zr 基等相分离合金为研究对象,开展了合金凝固实验,研究了液-液相分离形成两液相的过程;在二元液相分离合金的基础上添加第三组元,并探讨了添加元素在两液相中的分配特征及其控制;通过合金优化设计,采用快速凝固技术制备了含有球晶粒子的 Al 基非晶合金材料,以及 Zr 基双非晶相合金;考察了元素添加量、相似元素以及关键原子比等对相分离合金快速凝固组织的影响,并探索了相的形成机理。

关键词:液-液相分离;偏晶合金;快速凝固;凝固组织控制;非晶合金

E04-34

Microstructure evolution during solidifying and solutionizing of Al-Cu-Mn alloys

Soban Muddassir Dar, Hengcheng Liao, Qu Liu, Haichao Xu

Southeast University

Al-Cu-Mn alloys are used in automotive and aircraft applications. In this study, effect of Cu and Mn content on microstructure evolution during solidifying and solutionizing of two Al-Cu-Mn alloys is investigated by optical microscopy, x-ray diffraction, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. Results show that as-cast microstructure of both the alloys consists of α -Al, θ -Al₂Cu phase and a locally Cu-rich zone around α -Al dendrite trunks. An icosahedral quasicrystalline phase (i-phase) is detected by XRD. Its stability is studied by solution treatment at 530 °C for 16, 32 and 48 hrs. In alloy-2 (having high Cu/Mn content ratio), i-phase simultaneously transforms to T1-Al₂₀Cu₂Mn₃ phase and T3-Cu₃Mn₂Al phases during solution treatment. In alloy-1 (having low Cu/Mn content ratio), i-phase first transforms to T1-Al₂₀Cu₂Mn₃ phase and then completely transforms to T3-Cu₃Mn₂Al phase after 48 hrs of solution treatment.

Keywords: Al-Cu-Mn; alloy; microstructure; i-phase; solution treatment; electron; microscopy

E04-35

宽冷速范围内细晶镁合金异质形核及热稳定性行为

杨伟, 殷海咪, 余欢

南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室 330063

采用铜模喷铸、单辊甩带与 SiC 颗粒添加相结合,制备出宽冷速范围内非平衡凝固 AZ91 镁合金,对比研究了异质颗粒与非平衡效应协同影响下的镁合金细晶组织形成及热稳定性行为。结果表明,随冷速提高,镁合金晶粒尺寸不断降低。由于 SiC 颗粒可有效促进凝固过程中异质形核,有利于细化镁合金非平衡凝固组织,且高冷速条件下纳米 SiC 粒子的细化效果比微米颗粒更加明显,平均晶粒尺寸可细化到 5 μ m 以内。经 400°C 等温固溶处理,镁合金组织形貌由细小粒状晶向多边形等轴晶发生转变,其中 SiC 颗粒可有效钉扎晶界,抑制晶粒长大,快冷镁合金细晶组织热稳定性得到显著提高。

关键词:非平衡凝固;组织细化;异质形核;晶粒长大;镁合金

E04-36

内生纳米 TiC 颗粒强化 Al-Cu-Mg 合金高温拉伸性能和蠕变抗力机制

王磊, 邱丰, 赵庆龙, 姜启川

吉林大学材料科学与工程学院 130025

燃烧合成+热压+热挤压制备 5-9 vol. % 纳米 TiC_x/2009Al 复合材料。原位合成纳米尺寸 TiC_x 颗粒在基体中的分散均匀,复合材料强度和塑性显著提高。原位合成 9 vol.% 纳米尺寸 TiC_x/2009Al 复合材料的屈服强度,抗拉强度,断裂应变分别为: 404MPa, 601MPa, 8.1%。复合材料 220°C、260°C 和 300°C 温度下随着试验温度升高,2009Al 和复合材料的屈服强度,抗拉强度逐渐降低。复合材料的断裂应变随着温度升高而增大。在同一温度下,复合材料的屈服强度,抗拉强度随着纳米尺寸 TiC_x 含量的增加而增大,断裂应

变降低。9 vol. % 纳米尺寸 TiC_x/2009Al 复合材料的 220℃ 屈服强度为 259MPa, 抗拉强度为 348MPa, 断裂应变为 14.1%, 比 2009Al ($\sigma_{0.2}$:160, σ_b :251MPa, ϵ_f :13.4%) 的屈服强度, 抗拉强度、断裂应变分别提高 61.9%, 38.6% 和 5.2%。300℃ 屈服强度为 139MPa, 抗拉强度为 157MPa, 断裂应变为 17.2%, 比 2009Al ($\sigma_{0.2}$:107, σ_b :124MPa, ϵ_f :9.9%) 的屈服强度、抗拉强度, 断裂应变分别提高 29.9%, 26.6% 和 73.7%。原位纳米 TiC_x 颗粒强化的复合材料蠕变抗力提高了 4-15 倍。凝固过程中, 纳米颗粒异质形核并吸附在固液界面阻止晶粒长大, 细化晶粒。应力下 α -Al 晶粒内的纳米颗粒阻碍位错, 强化复合材料, 大量晶界处的纳米陶瓷颗粒钉扎晶界, 延缓 α -Al 的再结晶, 并阻止再结晶晶粒的长大, 强化高温性能和抗蠕变性能。
关键词: 纳米颗粒; 铝合金; 钉扎晶界; 蠕变抗力

E04-37

强制均匀凝固 7055 合金铸锭组织和热加工性能研究

罗亚君, 张志峰, 高明伟, 李豹, 陈春生

北京有色金属研究总院 101407

大规格高强铝合金铸锭在航空航天、轨道交通、船舶等大型装备领域的作用举足轻重。但是采用传统铸造方法生产大规格高强铝合金铸锭不可避免地存在组织粗大不均匀、偏析严重、易开裂等问题, 导致产品质量的稳定性和一致性差, 无法满足高端制造业对优质铝材的需求。电磁搅拌无污染、可控性高, 作为一种有效的熔体处理方法, 已经成功应用于铝合金半固态铸锭工业生产。但是由于交变电磁场的集肤效应, 随着铸锭尺寸增加, 搅拌作用在铸锭边部和心部差别较大, 铸锭组织和成分均匀性难以控制, 无法制备大规格铝合金铸锭。

为此, 北京有色金属研究总院发明了高强铝合金强制均匀凝固铸造新技术 (Uniform Direct Chill Casting, 简称 UDC 法), 通过将结晶器内强制冷却工艺和结晶器外电磁搅拌方法巧妙结合, 改变了单一的从外到内的传热模式, 实现了铸锭多维度强制均匀凝固调控, 显著改善温度场和成分场的均匀性, 铸锭液穴深度变浅, 铸造速度大幅度提高, 从根本上解决了高合金化高强铝合金铸锭组织粗大不均匀、偏析严重、易开裂等难题。

本文以超高强 7055 铝合金为研究对象, 开展直径 584mm 铸锭强制均匀凝固铸造技术试验研究。采用金相分析与热模拟试验方法, 研究了施加环缝强电磁搅拌和内部强制冷却耦合处理对铸锭的微观结构及后续热加工变形性能的影响规律。

研究表明, 与普通半连续铸造方法相比, 施加环缝强电磁搅拌和心部强制冷却耦合处理后, 7055 合金铸锭的微观组织明显细化, 均匀化退火后具有更好的热塑性变形能力。

关键词: 7055 铝合金; 半连续铸造; 电磁搅拌; 内部冷却; 晶粒细化; 热变形

E04-38

Mg-xGd(x=1, 2, 4, 6, 8) 铸造镁合金组织与热裂倾向性研究

杨光昱, 罗时峰, 邹震, 肖磊, 介万奇

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 710072

本文研究了 Mg-xGd (x=1, 2, 4, 6, 8, wt. %) 二元铸造镁合金的微观组织和热裂倾向性。

采用临界长度法和 Clyne-Davies 模型评估和预测了实验合金的热裂倾向性, 运用光学金相分析、扫描和能谱分析等材料研究方法, 分析了该合金的热裂机理。

结果表明, 随着 Gd 含量的增大, 实验合金组织中的等轴晶比例逐渐增多, α (Mg) 晶粒尺寸逐渐减小。实验合金的热裂倾向性与 Gd 含量之间呈典型的 “ λ ” 型关系曲线, 当 Gd 含量为 2% 时, 实验合金的热裂倾向性最大。实验结果与 Clyne-Davies 模型的预测结果基本吻合。

探明了实验合金的热裂机理: 当 Gd 含量小于 2% 时, 晶间低熔点共晶对晶间结合力的破坏作用为主导机制; 当 Gd 含量超过 2% 时, 低熔点共晶对分离枝晶的补缩作用占主导地位。同时, Gd 含量增加引起的

晶粒细化也在一定程度上降低了合金的热裂倾向性。

关键词: Mg-Gd 铸造镁合金; 显微组织; 热裂倾向性; Clyne-Davies 模型; 热裂机理

E04-39

Cu/Nb 元素的添加对 TbDyFe 合金磁性能及力学性能的影响

王乃娟^{1,2}, 张恒^{1,2}, 刘源^{1,2}, 李言祥^{1,2}

1. 清华大学材料学院, 北京 100084
2. 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084

本文运用高真空电弧熔炼炉, 在氩气保护气氛中对合金 (Tb_{0.3}Dy_{0.7})_{0.36}Fe_{0.54}Cu_{0.1}, (Tb_{0.3}Dy_{0.7})_{0.3}Fe_{0.6}Nb_{0.1} 进行了熔炼, 并系统地研究了合金化对两种合金微观组织、力学性能及磁性能的影响。研究表明, (Tb_{0.3}Dy_{0.7})_{0.36}Fe_{0.54}Cu_{0.1} 合金由三相组成, 分别是(Tb,Dy)Fe₂ 相, (Tb,Dy)Fe₃ 相, 以及(Tb,Dy)Cu 相。(Tb_{0.3}Dy_{0.7})_{0.3}Fe_{0.6}Nb_{0.1} 合金也由三相组成, 分别为(Tb,Dy)Fe₂ 相, NbFe₂ 相, 以及 RE-rich 相。相比于 Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金来说, 添加了 10at% Cu、Nb 元素的两种合金, 其韧性显著改善, 但是由于生成的顺磁性相所占的组分过多, 降低了磁性相 REFe₂ 相的组分, 从而降低了合金的磁致伸缩性能。所以可通过进一步调控元素的添加量来平衡合金的磁致伸缩和韧性之间的关系。

关键词: Terfenol; 合金; 微观组织; 本征磁致伸缩系数; 力学性能

E04-40

液态金属深过冷快速凝固过程中初生固相的重熔

李金富, 韦修勋, 卢书媛, 周尧和

上海交通大学材料科学与工程学院 200240

深过冷液态金属凝固时伴随有显著的温度再辉, 初生固相因此不可避免部分被重熔, 从而影响到最终凝固组织形态。基于现代晶体生长理论模型, 对深过冷快速凝固阶段初生固相的重熔情况进行了理论分析, 结果表明: 具有一定结晶温度范围的单相合金凝固时, 随着熔体过冷度的增大, 初生固相的重熔分数先增大, 后减小, 并在临界过冷值后降至零; 共晶合金凝固时, 初生固相的重熔分数基本随熔体过冷度的增大而上升。结合众多合金的凝固实验结果, 得到下述结论: 单相合金在中等过冷度凝固时的晶粒细化源于初生固相的重熔熟化, 大过冷度下的晶粒细化则源于凝固收缩应力作用下的再结晶; 深过冷共晶合金凝固时, 反常共晶的形成源于初生固相的重熔。

关键词: 深过冷; 快速凝固; 固相重熔; 微观组织

E04-41

非晶态合金液固转变中结构与性质的演化规律

惠希东

北京科技大学 100083

材料的结构决定了其性能和服役行为及寿命。对原子排列结构这个核心科学问题的研究, 关系到能否揭示非晶合金玻璃转变和非晶合金性能的本质。长时间以来, 非晶合金的原子排列结构一直是该领域的“黑箱”。非晶合金三维空间的原子排列和液固转变中的动力学性质目前仍然不清楚。尽管已提出许多结构模型和理论, 但还缺乏统一认识。为此, 我们利用第一性原理分子动力学、拟蒙特卡洛、同步辐射和高分辨电镜技术, 在非晶态合金玻璃转变、液固态结构和动力学性质等方面, 对非晶合金的中、短程有序结构及有序化机制、液体脆性与结构弛豫等进行了研究。具体研究工作和结果主要有:

(1) 研究了二元系 (Al-Cu, Al-Ni, Mg-Cu, Mg-Y, Cu-Zr), 三元系 (Mg-Cu-Y, Cu-Zr-Al, Mg-Zn-Ca), 四元系 (Cu-Zr-Al-Ag, Zr-Al-Ni-Cu, Co-Fe-Ta-B), 五元系 (Zr-Ti-Cu-Ni-Be, Zr-Al-Ni-Cu-Nb) 合金的液态和非晶态原子排列结构, 获得了具有高非晶形成能力的多组元合金的原子排列局域结构特征。研究了非

晶态合金中的短程序、中程序和纳米尺度的原子排列特征，研究了非晶合金原子排列结构的表征方法，探索了设计与调控这些原子排列结构的方法。

(2) 研究了非晶合金的过热和过冷液体的扩散、粘度和脆性性质及其随化学成分、原子有序结构的变化规律，研究了熔体微观结构-热力学和动力学性质-玻璃形成能力之间的内在联系。

(3) 研究了非晶合金及深过冷液体的结构弛豫，探索了结构弛豫相关联的动力学特征参量及其与时间和时间的关系，探索了非晶态合金及其母相过冷液体的结构弛豫的普遍性。

关键词：非晶态合金；液固转变；有序结构；动力学

E04-42

关于成分、熔体过冷及形核与金属玻璃的形成机理

潘明祥^{1,2}

1 中国科学院物理研究所，北京 100190

2 中国科学院大学，北京 100049

块体金属玻璃的获得、金属间化合物成分的合金熔体转变成金属玻璃、单质金属元素形成玻璃态结构，这些发现既对已有的凝固理论提出了挑战，也应为凝固和非平衡相变理论的发展提供了新的科学结果和研究方向。然而，到目前为止，凝固理论的发展好像严重滞后于实验的发现，而新的发现又迫切需要合适的理论予以诠释。本报告希望通过对这方面实验结果的介绍来燃起业界对非平衡凝固研究的更多热情，以为揭示块体金属玻璃的形成机理，进一步促进非平衡凝固理论的发展。

关键词：成分；熔体过冷；形核；金属玻璃；形成机理

E04-43

金属熔体局域原子结构的表征与应用

彭平，文大东，李媛媛

湖南大学 410082

鉴于快凝固体的结构与性能与合金熔体密切相关，而熔体又呈现出无序体系的结构特征，本报告拟针对目前存在的3种技术，即键取向序参数、Voronoi嵌块分割技术和Honeycutt-Andersen键性指数方法，比较分析它们在表征合金熔体及快凝固体时的差异与优劣。然后重点介绍本课题组基于H-A键性指数发展的团簇类型指数法，特别是以此表征合金熔体与非晶固体局域原子结构时所取得的部分结果、及其在非晶合金成分设计方面的应用。

关键词：熔体；快速凝固；团簇

E04-44

受限空间熔体的液液相变及润湿性

李辉

山东大学 250061

研究了受限空间内熔体的液液相变。探讨了受限空间、压力以及墙体作用力对碳化硅熔体结构的影响以及对液液相变的诱导作用。受限熔体的液液相变表现为受缝隙尺寸和侧向压力控制的层相转变，这一转变过程中伴随着密度的突变。在层相转变过程中，不同配位结构的分布会随缝隙尺寸和侧向压力变化而改变。硅原子以三配位结构、四配位结构和五配位结构为主，而碳原子的主导结构为三配位结构。液液相变在高压下主要受缝隙尺寸诱导，而在低压下，液液相变则主要受侧向压力诱导。

研究了金属液滴在不同衬底上的反润湿性及融合过程，发现纳米凸起结构能增强铜液滴的反润湿性，并阐明了反润湿性增强的机理。

发现了液滴出现反常融合现象。融合过程中液桥的断裂和融合是随机的。在受限空间中，随着受限空

间距离的减小，融合过程越困难，所需要的时间越长，合金形状也由半球型变成圆鼓型。

关键词：液液相变；润湿；融合

E04-45

Application of the thermodynamic extremal principle to phase-field modeling of non-equilibrium solidification in multi-component alloys

Haifeng Wang

State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, P.R. China

Modeling of non-equilibrium solidification in multi-component alloys is of singular importance in microstructure control, which however owing to the complex systems with complex additional constraints is still an open problem. In this work, the thermodynamic extremal principle was applied to solve the complex additional constraints self-consistently in thermodynamics. Consequently, short-range solute redistribution and long-range solute diffusion that share the same mobility are integrated naturally into the solute diffusion equations, thus avoiding the introduction of additional kinetic coefficients (e.g. interface permeability) to describe solute redistribution. Application to non-equilibrium solidification of Al-Si-Cu alloys shows that anomalous solute trapping and anomalous solute profiles within the diffuse interface could occur, thus highlighting the important effect of interaction among the component elements on the interface kinetics. The current phase-field model is preferred for simulations not only because of its simplest formula of evolution equations but also its feasibility to increase the simulation efficiency by the "thin interface limit" analysis.

Keywords: Phase-field; model; Thermodynamic; extremal; principle; Multi-component; alloys; Solidification; Kinetics

E04-46

非平衡条件下 Ni-Al 熔体结构转变及动力学特性的从头计算分子动力学研究

唐健, 王毅, 王军, 唐斌, 寇宏超, 薛祥义, 李金山

西北工业大学 710072

金属熔体的动力学和热力学性质对其固液结构转变和凝固组织结构的遗传性具有重要的作用。强磁场科学与技术的发展为利用热、电、磁、力多场耦合作用调控金属材料组织和性能提供了一种新途径。

本文通过从头计算分子动力学 (AIMD) 研究了平衡与非平衡条件下 Ni₅₀Al₅₀ 熔体的结构转变和动力学特性。

其中, 利用 4 参数 Birch-Murnaghan (BM4) 状态方程获得其平衡态基本物理特性, 包括体积、密度、扩散系数、黏度、对关联函数 (PCF)、结构因子 (SF) 等。一方面, 结合 PCF、SF、键对分析和 Voronoi 多面体分析, 揭示力场作用对 Ni₅₀Al₅₀ 熔体结构转变的影响规律。另一方面, 通过动力学特性的分析 (例如, 扩散系数), 阐明力场作用对 Ni₅₀Al₅₀ 熔体体系自由能和扩散激活能的影响。

研究表明, (1) 由 BM4 状态方程确定的平衡态展示出与实验相吻合的基本物性参数, 例如熔体的体积、密度和扩散系数; (2) 平衡条件下, 理论预测的扩散系数随温度的变化符合 Arrhenius 关系, 与实验测定值和文献报道值一致; (3) 非平衡条件下, 力场作用将降低 Ni₅₀Al₅₀ 熔体扩散系数, 但仍满足由扩散活化体积和压强修正的扩散激活能表示的 Arrhenius 关系; (4) 通过比较平衡态和非平衡态熔体 PCF、SF、键对、多面体及其键合电子密度的变化, 揭示其非平衡态结构转变和动力学特性变化的电子和原子本质。

关键词: Ni-Al 熔体; 非平衡态; 力场; 扩散; 结构转变

E04-47

小平面生长合金凝固的择优取向和择优取向

Dazhuang Kang, Chengbao Jiang, Yuye Wu, Huibin Xu

School of Materials Science and Engineering, Beihang University

多数具有高熔化熵的材料，为了满足热力学上的稳定状态，在其凝固过程中呈现微观平滑的界面，统称为小平面生长材料。许多合金，金属间化合物，半导体，氧化物等均呈现这种凝固特质，例如 Si, Ge, AlSi, TbDyFe 等，广泛应用于现代社会生活的方方面面。小平面生长材料往往具有强烈的晶体学各向异性，需要通过定向凝固技术制备单晶或者特定轴向取向的取向多晶，才能实现最优性能。然而，有别于非小平面材料，为了降低生长过冷度，小平面材料往往采取孪晶生长的模式，导致其择优取向和组织形态复杂多变，生长控制难度很大。

本文以 TbDyFe 合金为实验对象，在平衡态和近平衡态的条件下，分别研究了单晶和取向多晶的生长过程。在单晶生长部分，研究了宏观固液界面形态和相应的样品径向成分分布。获得了两组控制方程并在实验中实现了单晶生长控制。在取向多晶生长部分，研究了晶粒轴向再取向和组织形态转变的机制，证明了二者均为孪晶生长模式导致的结果。理论上推算出了轴向取向为 θ 和 $\theta + \pi$ 的晶粒共有 7 种轴向再取向的可能结果，实验中直接观察到其中 4 种。理论上推算出轴向取向为 θ 和 $\theta + \pi$ 的晶粒共有 5 种基本组织形态，实验中直接观察到其中 3 种。基于以上结果，研究了取向多晶轴向择优取向转变的机制。轴向择优取向转变是由组织形态转变导致的。在以孪晶生长模式长大时，随着偏离平衡态程度的加深，不同轴向取向的晶粒会呈现不同的组织形态转变过程并展现出不同的空间占据能力。具备较多伸展方向的组织竞争优势大，其轴向取向最终成为该条件下的轴向择优取向。

关键词：小平面生长；择优取向；择优取向；TbDyFe

E04-48

合金等温凝固过程初始形核成分的理论分析

康逊，张利军

中南大学 粉末冶金国家重点实验室，长沙 410083

形核是合金凝固的第一步，决定着晶核的析出顺序、数目和分布，极大程度上影响凝固甚至后续热处理过程微观结构的演化。与纯金属的形核过程相比，合金熔体中晶胚能否稳定存在并长大不仅取决于晶胚的尺寸，还与晶胚的成分有关。当前形核理论或基于局部平衡假设或基于准平衡近似来获得凝固初始形核的成分。但凝固的初始形核过程为强烈非平衡过程，偏离所谓的局部平衡或准平衡，因而通过这些传统热力学假设所获取的初始形核成分会与实际值存在偏差，本工作拟结合热力学与动力学分析来获取更精确的初始形核成分。

本文选择二元合金等温凝固的初始形核过程为研究对象，基于 Mats Hillert 对偏离局部平衡移动固-液界面的热力学分析，通过引入界面渗透系数这一用于衡量液固-液界面上溶质重排速率的动力学参数来确定初始形核过程体系偏离热力学平衡的程度。

随后得到了界面渗透率与初始形核过程固-液界面上溶质重排所需的能量耗散及界面移动驱动力之间的定量关系。

由以上分析即可获得不同动力学条件下的初始形核成分以及体系随机涨落时晶核的优先析出位点。将此理论分析结合相场模拟，实现了 Al-Si 合金等温凝固过程的形核及后续枝晶生长过程的三维模拟。

关键词：等温凝固；形核；热力学；形核率；Al-Si

E04-49

原位研究直流电场作用下 Sn-Pb 合金凝固过程中的形核及生长行为

杨芬芬，曹飞，王同敏

由于细晶材料优良的力学性能，金属凝固组织的细化一直是金属材料领域的一个重要研究方向。通过在金属及合金凝固过程中施加电场，可以有效的细化凝固组织。但由于金属及合金熔体的高温和不透明性，其凝固过程中的形核、生长等动力学信息很难直接观察，从而限制了研究者对金属凝固组织电场细化机制的进一步理解。

本文采用同步辐射 X 射线成像技术研究了 Sn-50%Pb 合金在直流电密度分别为 0, 1, 1.5 和 1.8 A/mm² 时的晶粒形核及枝晶生长行为，凝固过程中的冷却速度为 1 K/min。

研究表明随着直流电密度的增大，形核孕育期明显延长，形核过冷度增大。当电流密度小于 1.5 A/mm² 时，凝固过程中施加直流电场显著增强形核，枝晶生长受到抑制，晶粒尺寸从 1632 降低至 567 μm；而当电流密度进一步增大至 1.8 A/mm² 时，形核率降低，枝晶生长速度急剧增大，显微组织出现粗化现象，晶粒尺寸上升至 1189 μm。

通过在 Sn-50%Pb 合金的凝固过程中施加直流电，可以有效调控其凝固组织。直流电对 Sn-50%Pb 合金凝固组织的细化存在一个临界值，当电流密度超过临界值时，凝固组织开始出现粗化现象。施加的直流电场主要通过焦耳热的作用影响形核过冷度，从而影响合金的形核及生长行为。

关键词：Sn-Pb 合金；同步辐射 X 射线成像；凝固；晶粒细化；电场

E04-50

外场凝固下的成分偏析及第二相析出

杨院生

中国科学院金属研究所

E04-51

Nb-Si 基超高温合金的整体定向凝固组织及性能

郭喜平，郭海生，方欣，乔彦强

西北工业大学 710072

Nb-Si 基超高温合金因其熔点高，密度适中以及具有优良的高温强度和高温抗蠕变性能而受到广泛关注，有望成为新一代航空发动机的叶片材料。

在熔体温度 θ_s (1950, 2000, 2050 和 2100°C)下对 Nb-Si 基超高温合金进行了有坩埚整体定向凝固，分析了熔体温度对合金定向凝固稳态区相组成、组织及固/液界面形貌的影响规律；在 2050°C 的熔体温度下，以不同的抽拉速率 Rd(2.5, 5, 10, 20, 50 和 100 μm/s)对合金进行了有坩埚整体定向凝固，研究了抽拉速率对定向凝固合金稳态生长区组织和固/液界面形貌的影响规律，并对定向凝固过程中的溶质再分配和凝固路径进行了研究。

合金的整体定向凝固组织主要由沿试棒轴向挺直排列的横截面呈花瓣状的共晶胞 Nb_{ss}/α(Nb,X)5Si₃、树枝状 Nb_{ss} 以及分布于共晶胞周围的沿试棒轴向耦合生长的层片状共晶组织 Nb_{ss}/γ(Nb,X)5Si₃ 组成。在共晶胞 Nb_{ss}/α(Nb,X)5Si₃ 中，Nb_{ss} 为领先相；而在共晶组织 Nb_{ss}/γ(Nb,X)5Si₃ 中，γ(Nb,X)5Si₃ 为领先相。随着熔体温度的升高，定向凝固组织中初生 Nb_{ss} 枝晶尺寸减小，数量减少并消失；共晶组织含量增多，共晶胞的平均直径减小。固/液界面随着熔体温度的升高经历了树枝状→胞枝状的演化。随凝固速率增大，共晶胞 Nb_{ss}/α(Nb,X)5Si₃ 的平均直径以及层片状共晶组织 Nb_{ss}/γ(Nb,X)5Si₃ 的层片间距均逐渐减小，固/液界面经历了胞枝状→树枝状→胞枝状的演化过程。

有坩埚整体定向凝固显著提高了合金的室温断裂韧性。随着抽拉速率的提高，合金的室温断裂韧性值逐渐增加，其最大 K_Q 平均值达到了 23.8 MPa·m^{1/2}。断口分析表明合金的室温断裂机制由电弧熔炼试样的脆性解理断裂转变为定向凝固合金的准解理断裂。有坩埚整体定向凝固大幅度提高合金的高温拉伸持久性能。

关键词：Nb-Si 基超高温合金；定向凝固；共晶组织；室温断裂韧性；高温持久

E04-52

模具预热温度对 A357 铝合金微观组织与缩松缺陷的影响

李龙飞^{1,2}，李大全¹，郜俊震¹，张永忠¹，康永林²

1. 北京有色金属研究总院
2. 北京科技大学

合适的模具预热温度对合金液充型及凝固过程至关重要。在国家推荐(GB/T)标准中，并没有明确规定标准模具的预热温度范围。因此本研究中采用实验和模拟方法，对比研究不同模具预热温度对 A357 铝合金液凝固过程中微观组织及铸造缺陷的影响规律。实验中采用不同的模具预热温度(150,250,350 度)，使用 GB/T1173-2013 标准模具进行 A357 铝合金浇注，并观察铸件充型情况及标准拉伸试棒标距位置微观组织，分析不同模具预热温度下凝固过程。实验发现，当模具预热温度为 350 度时，在拉伸试棒断口和组织中均存在严重的缩松缺陷。随着模具预热温度降低至 150 度时，组织中缩松缺陷大幅减少。模拟计算及组织分析得到，低模具预热温度可以增加 A357 铝合金在凝固过程中冷却速率，从而可以减小初晶铝相二次枝晶臂间距及硅颗粒大小，促进凝固过程中初晶铝枝晶间金属液的补缩，从而得到较少缩松缺陷的组织及铸件。此外，模拟结果可以较准确地预测出实验样品缩松产生的位置，并适用于判定随模具预热温度变化组织中缩松产生的倾向性。

关键词：模具预热温度；A357 铝合金；凝固过程；微观组织；缩松缺陷

E04-53

铝合金异质形核晶粒细化

韩延峰，戴永兵，张佼，邢辉，东青，孙宝德
上海交通大学 200240

熔体质量的改进对于提高金属材料的冶金质量和内在性能具有重要作用。长期以来，受制于对熔体加工原理的研究不够深入，变质细化等熔体加工技术难有大的突破。仅用异质核心与形核相间的固-固晶格错配判定异质核心诱导形核相异质形核能力存在局限性，具备固-固晶格小错配度不是异质核心能高效诱导形核相形核的充要条件；从液-固相变角度出发，研究熔体原子有序结构如何在质点表面的萌生及外延生长，将比固-固晶格匹配的唯一分析方法更直接、更真实地反映异质形核的物理过程，据此对异质核心诱导形核相异质形核的难易程度进行判定将更为有效。本研究采用第一性原理分子动力学模拟及原位加热的同步辐射 X 射线衍射实验，详细分析了含有 TiB₂ 颗粒与 Ti 溶质的 Al 熔体在异质形核过程中有序结构的形成及演变规律。结果表明：即使 Al 熔体温度高于液相线温度几十度，在 Ti 终止型 TiB₂ 表面仍然会形成纳米厚度的 Al 原子有序结构；受限于 TiB₂ 表面结构，有序结构中的 Al 原子排布方式由本征 Fm-3m 空间群变为 R-3m 空间群；界面区 Al 有序结构与其本征结构间的结构错配产生畸变能，从而导致界面区 Al 有序结构存在极限扩展尺寸；界面区存在的 Ti 溶质原子会诱导有序结构中的 Al 原子形成局域正方堆垛结构，有序结构通过这种二维结构“自适应”调整，实现由 R-3m 准固相结构向 Fm-3m 本征结构的过渡，促进有效异质形核。此研究揭示的“熔体/异质质点间液-固界面模板效应”和“界面区溶质原子”诱导形核相“二重适应”微结构自调节的异质形核机制为寻找 Al 熔体强异质形核液-固界面调控新手段提供了指导。同时，基于形核相在基底集群上的时空竞争生长概念，在国际上率先开展了形核核心尺寸控制研究，发明了利用高能超声振动制备具有窄尺寸跨度形核核心的高效铝合金晶粒细化剂的新方法，在解决传统 Al-Ti-B 晶粒细化剂细化水平瓶颈难题方面取得了突破性进展。

关键词：铝合金；异质形核；晶粒细化；形核界面

E04-54

An investigation on failure mechanisms of Ti-Al₃Ti Metal-Intermetallic Laminate Composites

Yuan Meini^{1,2}, Li Yao¹, Li Lizhou¹, Chen Hehe¹, Huang Bin²

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, P.R. China

2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P.R. China

The Ti-Al₃Ti Metal - Intermetallic Laminate (MIL) composites were fabricated by vacuum hot pressing. The failure mechanisms of Ti-Al₃Ti MIL composites under the bending load and high-speed impact were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), three points bending test and finite element analysis, respectively. The results indicated that the Ti-Al₃Ti MIL composites existed the vertical crack in the Al₃Ti layers resulting by the thermal residual stress. The three points bending load- displacement curves of the Ti-Al₃Ti MIL composites embrace a long plateau region, which indicate that Ti-Al₃Ti MIL composites possess superior energy absorption and impact resistance. Ti-Al₃Ti Metal-Intermetallic laminate composites under high-speed impact was mostly under the tensile stress. In the high-speed impact period, the transverse, inclined, and vertical cracks formed in Al₃Ti phase, and these transverse, inclined, and vertical cracks dramatically absorb the projectile kinetic energy.

Keywords: Metal-Intermetallic; Laminate; Composites; Three; points; bending; Finite; element; method; High-speed; impact

E04-55

B 在镍单晶高温合金 DD90 中的作用研究

余竹焕, 张洋, 翟亚楠, 王盼航

西安科技大学材料科学与工程学院

以四种不同 B 含量的镍基单晶高温合金 DD90 为研究对象, 采用差示扫描量热法 (DSC) 分析了不同 B 含量试样的凝固特征温度, 采用金相显微镜 (OM) 和扫描电镜 (SEM) 等手段, 分析了不同 B 含量试样的显微组织。利用电子探针 (EPMA) 分析了合金的元素的偏析程度。结果表明, B 的添加降低了合金的固、液相线温度; B 的添加对合金的枝晶组织及一次枝晶间距没有明显影响; 随着 B 含量的增大, 合金中共晶组织的体积分数增大, 而碳化物的体积分数略呈下降趋势; Re、W 元素的偏析程度随 B 含量的增加而严重, Ta、Mo 元素在 B 含量为 0.005% 时, 偏析严重程度最严重, B 的添加对 Co、Cr 元素的偏析程度没有明显影响。

E04-56

磁场对 Nd-Fe-B 磁体快速凝固组织影响的相场法研究

冯子康, 王刚, 洪源, 伍雪花, 曾德长

华南理工大学材料科学与工程学院 510640

目的: 研究不同强度外磁场对 Nd-Fe-B 合金凝固组织中硬磁相 T₁、软磁相 α -Fe 和非晶相形核长大的竞争与演化的影响。

方法: 相场法结合微磁学模拟。

成果: 外磁场提高铁磁相 T₁ 和 α -Fe 相形核; 易轴与外磁场夹角越小的晶粒形核率越大; 磁场对非晶相的形成具有抑制作用。

结论: 外磁场能有效细化组织晶粒, 磁场下晶粒细化是由形核功 ΔG 降低和激活能 Q 减小两者共同作用的结果; 磁场能提高凝固组织晶粒的各向异性; 磁场对凝固组织的影响 (晶粒细化、软磁相分布分散化、取向优化及非晶相体积减小等) 有利于矫顽力的提升。

关键词: Nd-Fe-B 磁体; 相场法; 外磁场; 组织演化

E04-57

抽拉速率对 Nb-Ti-Si 基超高温合金定向凝固组织演化以及微观偏析的影响

方欣, 郭喜平

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 710072

Nb-Ti-Si 基超高温合金作为新型高温结构材料, 具有低密度、高熔点以及良好的高温力学性能。但是, 较低的室温断裂韧性是它最主要的缺点之一。定向凝固技术可以改善 Nb-Ti-Si 基超高温合金的组织, 能有效提高合金的室温断裂韧性。抽拉速率是定向凝固过程中的重要工艺参数, 其对合金组织演化以及微观偏析有重要影响。因此, 研究抽拉速率对合金组织演化以及微观偏析的影响对进一步优化合金组织以及性能具有重要意义。

本文利用液态金属冷却定向凝固法, 对名义成分为 Nb-15Si-22Ti-5Cr-3Hf-3Al (at.%) 的 Nb-Ti-Si 基超高温合金在抽拉速率为 100-1000 $\mu\text{m/s}$ 范围内进行定向凝固, 研究抽拉速率对合金的组织演化和微观偏析的影响。

当抽拉速率为 100-300 $\mu\text{m/s}$ 时, 合金的固液界面为胞状界面, 其定向凝固组织主要由初生 γ -(Nb, X)5Si₃ 以及层片状 NbSS/ γ -(Nb, X)5Si₃ 共晶组成。合金凝固的生长方向平行于热流方向, 随着抽拉速率的提高合金凝固组织发生显著细化。当抽拉速率提高到 500 $\mu\text{m/s}$ 后, 合金的固液界面转变为树枝状界面, 共晶形貌由片层状转变为棒状。同时, 合金凝固组织的生长方向开始偏离热流方向。此外, 在不同抽拉速率下 Hf 和 Al 在胞/枝晶中的分布都较为均匀, 但是 Ti 和 Cr 主要偏析在胞/枝晶界处。当抽拉速率为 100-300 $\mu\text{m/s}$ 时, 随着抽拉速率的提高, Ti 和 Cr 的偏析逐渐增大, 并且在胞界处析出的 Cr₂Nb 和 TiSS 逐渐增多; 当抽拉速率为 500-1000 $\mu\text{m/s}$ 时, Ti 和 Cr 的偏析逐渐减小, 在枝晶界处析出的 Cr₂Nb 和 TiSS 逐渐减少。

随抽拉速率提高, Nb-Ti-Si 基超高温合金的固液界面由胞状向树枝状转变, 并且 NbSS/ γ -(Nb, X)5Si₃ 共晶形貌由片层状转变为棒状; 随抽拉速率提高, Ti 和 Cr 在胞/枝晶界中的偏析经历了先增大后减小的过程。

关键词: Nb-Ti-Si 基超高温合金; 定向凝固; 组织演化; 微观偏析

E04-58

偏晶合金凝固过程研究

赵九洲, 江鸿翔, 何杰

中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016

偏晶合金十分广泛, 其中许多具有重要的工业应用背景, 但该类合金凝固时首先发生液-液相变, 极易形成偏析严重乃至两相分离的凝固组织, 其凝固过程研究与工业制备技术研发受到了严重限制。近年来偏晶合金凝固理论受到材料科学领域的高度重视, 人们先后在地面、空间和外场作用下开展了大量实验研究, 并开展了广泛的建模与模拟研究。本文综述了有关偏晶合金凝固研究的进展, 介绍了本研究团队相关研究工作, 展望了未来偏晶合金凝固研究的方向。

关键词: 偏晶合金; 凝固; 组织演变; 建模; 模拟

E04-59

超声场中复相合金凝固机理研究

翟薇, 魏炳波

西北工业大学 710072

超声场中合金凝固过程研究已经有上百年的历史。研究者多从实际应用角度出发, 以 Al/Mg 基单相合金为研究对象, 发现功率超声能够除气、细化晶粒和抑制偏析等, 从而有效地提高了合金力学性能。从研究方法上来说, 长期采用简单的一维超声施加方式, 具有能量衰减快、作用范围小等局限性。

本文重点研究了超声场中不同类型复相合金, 包括共晶、包晶和偏晶合金的凝固机理。对于共晶合金,

超声场能够改变共晶相之间的竞争形核和协同生长规律。形成有别于静态条件下的新颖组织形态。对于包晶合金，超声作用能够细化初生相并加速包晶转变，显著提高凝固组织中包晶相的体积分数。特别地，当空化效应引发的局域过冷度超过某一临界值时，超声场甚至能够改变包晶合金的凝固路径。此时，初生相形核和包晶反应均被抑制，包晶相能够从过冷熔体中直接形核并生长。对于偏晶合金，超声场能够抑制第二相液滴由于与母液相的密度差异而引起的上浮或下沉，从而在超声场的有效作用范围内，形成第二相均匀弥散分布的组织形态。超声凝固后的共晶、包晶和偏晶合金的力学性能相比于静态凝固条件下均有显著提高。

在一维超声凝固的基础上，创新性提出了采用 X、Y 和 Z 三束正交超声波作用于合金凝固过程的新思路。数值计算表明，三维超声场能够提高合金熔体内部的声压和声流，有效扩大空化效应区域，显著增强超声场对材料凝固过程的作用效果。基于此，设计了三维超声场中合金凝固实验装置，并制备出三维大体积 Al 基均匀弥散偏晶合金，为后续高强超声场中液态合金凝固过程的优化设计和主动调控奠定了基础。

关键词：高强超声；空化效应；三维超声场；复相合金

E04-60

氧化物共晶陶瓷激光悬浮区熔定向凝固熔区温度分布及其演化规律

任群，苏海军，张军，刘林，傅恒志

西北工业大学凝固技术国家重点实验室，陕西西安，710072

氧化物共晶自生复合陶瓷由于具有优异的高温力学性能、组织稳定性和化学稳定性，被认为是 1400-1600°C 温度下长期服役的理想高温结构材料。激光悬浮区熔定向凝固技术具有超高温温度梯度和快速熔凝高熔点、难熔材料的能力，是制备氧化物共晶自生复合陶瓷的重要方法。在定向凝固过程中自由表面熔区的温度分布特征和稳定性对制备凝固组织均匀分布的共晶自生复合陶瓷具有至关重要的意义。在 $4\ \mu\text{m/s}$ 时，熔区附近温度分布呈周期为 300s 的波动，轴向温度梯度在 $4\times 10^3\text{K/cm}$ 到 $6\times 10^3\text{K/cm}$ 之间震荡，平均值为 $5.3\times 10^3\text{K/cm}$ 。随着凝固速率的提高，熔区温度和界面温度梯度的波动减弱，平均轴向温度梯度逐渐减小并在 $200\ \mu\text{m/s}$ 时降低至 $4.1\times 10^3\text{K/cm}$ 。结合界面高度和轴向温度梯度随凝固速率的变化，给出了径向温度梯度随凝固速率的演化。径向温度梯度随凝固速率增大而减小，在 $50\ \mu\text{m/s}$ 时温度梯度降至 10^3K/cm ，凝固组织的径向和轴向均匀性均随速率的提高得到了有效的改善。

关键词：激光悬浮区熔；定向凝固；共晶自生复合陶瓷；温度梯度

E04-61

冷却速度对异质形核效率影响的原位研究

贾义旺，疏达

上海交通大学材料学院 200240

本文在上海光源成像线站原位观察了 Al-15wt.%Cu 合金在不同冷却速度下的等温凝固过程。选择了 2k/min, 4k/min, 8k/min, 16k/min 和 60k/min 5 个冷却速度，观察晶粒的形核和长大过程。定量统计了不同冷速下形核率和晶粒生长速度的变化。根据 X 射线照片灰度值的变化，计算了相应的溶质浓度的变化。统计了晶粒生长前沿溶质富集区域的长度，计算相应的成分过冷度的大小，跟相互关联模型的计算结果进行了对比。结果显示，随着冷却速度变大，形核效率变大，晶粒生长速度也变大，晶粒前沿的溶质富集抑制形核区域变小。

关键词：铝合金；异质形核；溶质富集；晶粒长大；形核率

E04-62

快速凝固规则共晶层片的失稳机理：实验及理论建模

董浩，陈豫增，张震任，单贵斌，刘峰

限制微晶/纳米晶规则共晶合金结构和功能应用的一个重要因素是其在高温条件下的层片组织失稳。这种失稳现象也出现在共晶熔体的过冷快速凝固过程中：当超过某一临界过冷度时，初生细小规则共晶层片组织往往在再辉时发生重熔进而转变为相对粗大的反常共晶。本文通过实验和理论模型相结合研究了初生规则共晶层片的重熔机理。实验研究通过玻璃覆熔与铜模喷铸相结合实现了 Ag-39.9 at.%Cu（固溶体-固溶体）、Ni-18.7 at.%Sn（固溶体-金属间化合物）和 Ni-56.2 at.%Si（金属间化合物-金属间化合物）三种不同组成相类型的共晶合金在不同过冷度及不同冷却速率下的快速凝固。其中通过铜模喷铸将凝固释放的结晶潜热迅速导出，实现对初生层片组织的保留。对喷铸样品在不同时间下退火以模拟再辉过程中初生层片的碎断行为。通过光学显微镜，扫描电子显微镜，X 射线衍射和电子背散射衍射分析，观测了退火过程中两相的形态演变、成分变化和位向分布。结果显示：共晶层片组织的碎断受瑞利不稳定性控制，遵循层片→棒状→粒状的基本过程，转变驱动力为界面能，而转变动力学受控于原子沿界面的扩散。最终两相位向分布由体积分数控制：体积分数较小的相形成粒状，包裹在体积分数较大的相形成的网状结构中。理论研究基于瑞利不稳定性原理建立了规则共晶层片碎断、粒化的数学模型。利用所建立的模型与上述合金的实验结果进行了对比，模型计算与实验结果吻合良好。

关键词：共晶；层片组织；稳定性；快速凝固；过冷

E04-63

热力学极值原理在非定比化合物快速凝固中的应用：模型与实验

张建宝，王海丰，况望望

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 710072

金属间化合物长程有序结构使其具有高温强度、高熔点、高热导率等许多优异的机械性能，作为潜在的高温结构材料在航空航天领域中有广泛的应用前景。快速凝固技术是制备传统材料，开发新材料的重要方式，随着枝晶生长速度增加，金属间化合物长程有序结构发生急剧变化，在这个过程中可能会形成由于界面失稳，表现出与固溶体的许多不同特征，例如无序截留，逆向分配和缓慢生长。本文基于热力学极值原理得到了一个尖锐界面模型，其考虑了热力学中出现的复杂额外约束条件，并遵循 Onsager 的倒易关系，可用于预测非定比化合物的枝晶生长。在 B2 相的形成范围内，进行了各个成分的 Co-Si 熔体深过冷实验研究，计算结果表明实验测得的界面速度被本模型很好地预测。此外，通过考虑溶质拖拽作用的模型获得的预测曲线与实验数据具有较好的一致性，而不是没有溶质拖拽的模型，表明溶质拖拽在快速凝固中的重要作用不可忽略。最后，结合计算结果讨论了金属间化合物枝晶生长过程中的控制机理。

关键词：金属间化合物；快速凝固；深过冷枝晶生长；热力学极值原理

E04-64

深过冷液态 Ni-Zr 包晶合金的相选择研究

吕鹏，王海鹏

西北工业大学应用物理系 710129

采用电磁悬浮和落管无容器处理技术实现了液态 Ni_{83.25}Zr_{16.75} 包晶合金的深过冷与快速凝固。电磁悬浮实验获得样品最大过冷度为 198 K，对不同过冷度下的枝晶生长速度进行了测定，发现生长速度在临界过冷度 $\Delta T_{crit}=124$ K 时出现突变，进一步研究表明，当 $\Delta T < \Delta T_{crit}$ 时，初生相 Ni₇Zr₂ 领先生长，随后发生包晶反应 $L+Ni_7Zr_2 \rightarrow Ni_5Zr$ ；而当 $\Delta T > \Delta T_{crit}$ ，包晶相 Ni₅Zr 直接从过冷熔体中形核和生长。在落管实验中发现当粒子直径较小时，凝固组织中只含包晶相 Ni₅Zr，说明深过冷和高冷速完全抑制了初生相 Ni₇Zr₂ 的形核和生长。

关键词：深过冷；Ni-Zr 包晶合金；相选择；枝晶生长；快速凝固

E04-65

多尺度热电磁流对 Al-7wt%Si 合金定向凝固组织的影响

杜大帆¹, 董安平¹, 疏达¹, 李喜²

1. 上海交通大学, 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海, 200240

2. 上海大学, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海, 200072

进行了横向静磁场下 Al-7wt%Si 合金的定向凝固实验, 研究了多尺度热电磁流对 Al-7wt%Si 合金定向凝固组织的影响。实验结果显示: 在试样尺度, 磁场导致固/液界面的倾斜, 糊状区长度的改变, 同时共晶偏析区在试样一侧出现; 在枝晶尺度, 磁场减少枝晶间断裂枝晶数量。试样尺度热电磁流导致溶质原子向试样一侧迁移, 改变了糊状区的热量和溶质传输。枝晶间热电磁流将枝晶间富集的溶质原子迁移至试样一侧, 减少了枝晶间由于溶质富集而熔断的枝晶数量。进一步地, 数值模拟了不同坩埚尺度和枝晶尺度下热电磁流随磁场强度的变化规律, 模拟结果与实验结果基本吻合。

关键词: 多尺度热电磁流; 定向凝固; 组织形貌; Al-7wt%Si 合金

E04-66

多元少量超塑性镁合金设计及亚快速凝固制备技术

王慧远, 马趁义, 查敏, 王琨, 姜启川

由于镁合金的塑性变形能力差, 极大的限制了镁合金的应用范围; 而超塑性变形方式对镁合金的成型非常有利。目前具有超塑性的镁合金种类较少, 如 AZ 系和 ZK 系镁合金等, 且主合金元素的含量比较高, 如在 AZ91 超塑性镁合金中, 其主合金元素 Al 的质量分数高达 9%, 就导致了该合金轧制变形后出现大量的第二相。基于合金元素在镁基体中的固溶度研究, 通过添加较低质量分数的多种合金元素, 即多元少量合金化, 能够有效减少合金中共晶析出相的数量。此外, 亚快速凝固是一种冷却速度较高的非平衡凝固方式, 能够提高合金元素在基体中的固溶度。本研究基于多元少量的超塑性镁合金设计新思路, 采用亚快速凝固获得过饱和的镁固溶体, 通过后续的控制轧制变形处理, 期望能够为开发新型低成本超塑性镁合金提供借鉴思路。

E04-67

自由落体金属微液滴的传热与快速凝固研究

王海鹏, 魏炳波

西北工业大学应用物理系 710072

采用落管实验装置, 在自由落体条件下, 实现了金属微液滴的快速凝固。作者采用有限差分方法计算了微液滴的温度场, 发现液滴直径越小温度下降越快, 冷却速率越大, 内部温度场呈球对称分布, 由于热量传输的延迟使得液滴中心温度高于表面温度。研究了液态合金的密度、表面张力、比热等热物理性质, 用以分析自由落体金属微液滴球化度、尺寸分布等, 并通过液滴雾化分散的共性物理参数, 研究了 Ni-Zr 包晶合金、Cu-Zr 共晶合金、Fe-Cu 不混溶合金的快速凝固过程, 发现了微重力、深过冷、大冷速作用于微观组织形成的规律。

关键词: 自由落体; 金属微液滴; 深过冷; 快速凝固

E04-68

电磁冷坩埚熔化和凝固硼硅酸盐玻璃

陈瑞润

哈尔滨工业大学

E04-69

稀土-铁基磁致伸缩材料凝固组织及磁致伸缩性能的强磁场控制

刘铁, 董蒙, 高鹏飞, 王强

东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室 110819

稀土-铁基磁致伸缩材料具有应变大、能量密度高、换能效率高等优点, 是实现电-磁-机械能量转换的理想材料。该类材料中的磁性相(RFe_2)具有极强的磁晶各向异性, 易磁化方向为, 而易生长方向为, 因此制备取向的材料是提高磁致伸缩性能的有效途径, 同时也是材料制备的难点所在。本研究将强磁场同凝固技术相结合, 利用强磁场的多种力和能效控制材料的凝固过程, 进而控制凝固组织、提高磁致伸缩性能。

在不同磁场条件和凝固条件下进行了 Tb-Dy-Fe 和 Tb-Fe 合金的自由凝固和定向凝固实验, 利用 SEM、XRD、EBSD、磁力显微镜等方法对合金的凝固组织进行了表征, 利用 VSM 和应变仪对合金的磁性能和磁致伸缩性能进行了检测。考察了强磁场对合金的凝固组织演变和磁致伸缩性能的影响规律。

研究表明将强磁场施加到 Tb-Dy-Fe 和 Tb-Fe 合金的自由凝固和定向凝固过程后, 随着磁感应强度的增加磁性相(Tb,Dy) Fe_2 和 $TbFe_2$ 的取向行为发生了从向、再向方向的转变; 通过优化磁场和凝固条件, 得到了沿方向取向的合金, 且合金的磁致伸缩性能显著提高; 在梯度强磁场作用下得到了合金的凝固组织及磁致伸缩性能沿磁场梯度方向呈连续变化的梯度磁致伸缩功能材料。

本研究通过控制材料凝固过程中的熔体流动、溶质迁移和扩散、晶体取向等实现对材料微观组织的有效控制, 制备出了具有高取向度、磁致伸缩性能显著提高的稀土-铁基磁致伸缩材料。

关键词: 合金凝固; 强磁场; 稀土-铁基磁致伸缩材料; 晶体取向; 磁致伸缩性能

E04-70

定向凝固钛铝单晶中 Nb 元素的 3D-APT 分析

郑功, 陈光

南京理工大学 材料评价与设计教育部工程研究中心 210094

TiAl 金属间化合物合金是一种新型轻质高温结构材料, 具有优异的耐腐蚀、抗蠕变、高比强等特性, 被认为是取代 Ni 基高温合金实现航空航天发动机减重的理想材料。在现有 TiAl 合金体系中, 具有平行全片层(Fully Lamellar)组织的定向凝固 TiAl 单晶(又称 PST 晶体)具有最佳的强塑综合性能, 适用于发动机涡轮叶片等一维受力场合。本工作以一种定向凝固的高 Nb-TiAl 单晶为研究对象, 采用 FIB 原位加工技术和 LEAP 原子探针层析技术, 分析了合金中的 Nb 元素在 ($\alpha_2 + \gamma$) 两相片层组织中的分布规律。结果显示, 铸态合金中的 Nb 元素在相界面处呈现出周期性富集的现象, 证明相邻 α_2 和 γ 相是通过 Ti 原子和 Al 原子的相互扩散同时形成——贫 Nb 界面为 Ti 和 Al 原子的扩散提供了通道, 富 Nb 界面则阻碍 Ti 原子和 Al 原子的相互扩散, 由此揭示了 α_2/γ 两相共生生长的形成机制, 并建立了片层组织形成的模型。此外, Nb 在相界面处的周期性富集可以通过退火热处理消除。

关键词: TiAl 合金; 定向凝固; 片层组织; 原子探针

E04-71

Cu 含量对 Al-Si-Cu-Mg 合金组织和力学性能的影响

张传正, 白月龙, 张志峰, 李豹, 陈春生

北京有色金属研究总院 101407

采用模铸法制备了 Al-7Si-xCu-0.5Mg 合金, 并通过金相观察、拉伸试验、断口扫描等表征方法, 研究了 Cu 含量 (0.2-2.5%) 对合金铸态、T6 热处理态的组织、拉伸性能及断裂行为的影响规律。

研究表明, 随着 Cu 含量的增多, Si 周围的 Al_2Cu 增加, Si 相也随 Cu 的增多而增多, Si 呈现分布不均匀的趋势。随着 Cu 含量的增加, 合金的抗拉强度和屈服强度先增加后降低, 硬度增加, 延伸率降低。当 Cu 含量达到 1.5% 时抗拉强度和屈服强度达到峰值, 分别为 300MPa 和 250MPa, 合金具有良好的

综合力学性能。随着 Cu 元素的增加，韧窝逐渐减少，解理面增大，解理程度增加，断裂方式为准解理断裂。

关键词：Cu 含量；Al-Si-Cu-Mg；组织；性能

E04-72

环缝强电磁熔体处理对 Al-11%Zn-3%Mg-1%Cu-0.13%Zr 合金组织和性能的影响

关天洋^{1,2}，张志峰¹，白月龙¹，陈春生¹，王平²

1. 北京有色金属研究总院
2. 东北大学

7xxx 系高强铝合金通常属于可热处理强化的变形铝合金，以其密度低、强度高、热加工性能好等优点，是航空航天、国防军工、交通运输等领域的轻量化结构部件材料的首选。但是其铸造性能差，凝固过程中组织粗大不均匀，偏析严重、热裂倾向性大，大量处于非平衡凝固状态下的低熔点共晶相和多余脆性相富集在晶界，依靠后续热处理也无法消除，直接影响到合金的最终性能。因此，采用传统铸造方法很难实现产品的近终成型，大量需求的高强铝合金结构部件仍然不得不采用工序复杂、生产周期长、成本高的锻造方法来制造。

本文基于课题组开发的先进环缝强电磁搅拌熔体处理方法，以高合金化的 Al-11%Zn-3%Mg-1%Cu-0.13%Zr 合金作为研究对象，通过热力学计算和扫描电镜分析方法，研究了施加环缝强电磁搅拌熔体处理对合金凝固组织和性能的影响规律。

结果表明，施加环缝强电磁搅拌熔体处理后，合金的凝固组织明显细化，平均晶粒尺寸由 245 μm 减小至 147 μm ，且第二相分布也显著细化、分布均匀；经过 450 $^{\circ}\text{C}/1\text{h} + 475^{\circ}\text{C}/1.5\text{h} + 120^{\circ}\text{C}/24\text{h}$ 制度进行热处理后，性能大幅度提高。

本文研究的环缝强电磁搅拌技术通过对合金熔体施加物理外场，影响液态金属的凝固成型，精确控制熔体的温度场与成分场，进而达到有效改善组织和性能的目的。

关键词：超高强铝合金；电磁搅拌；熔体处理；晶粒细化

E04-73

内部电磁搅拌法对 2219 铝合金组织和成分的影响

邱阳，张志峰，高明伟，李豹，陈春生，罗亚君

北京有色金属研究总院 101407

2219 铝合金作为火箭推进剂贮箱的常用材料，性能的稳定性和对火箭的安全服役起到非常关键的作用。但随着铸锭规格的增大，铸锭不同部位冷却强度的差异越来越显著，从而出现组织、成分不均匀以及由此引起的性能不稳定等一系列问题，并最终削弱产品的服役性能。研究发现，采用传统铸造方法制备的大规格 2219 铝合金铸锭晶粒粗大，组织不均匀，成分偏析严重，且存在大量粗大的网状脆性共晶化合物，而通过均匀化热处理和常规锻造变形并不能轻易地将其完全消除。因此，作为后续变形加工的基础，制备细晶均质的大规格 2219 铝合金铸锭至关重要。

针对这个问题，本文提出了一种内置电磁搅拌熔体处理新方法，即连续铸造过程中将电磁熔体处理器沿热顶或结晶器中心位置插入熔体内部，从合金熔体内部施加电磁搅拌和强制冷却，加速超大规格铸锭内部熔体的传热与传质，均匀熔体的温度场和成分场，提高铸锭冷却强度和铸造速度，减少或消除铸造缺陷，实现超大规格铝合金铸锭细晶均质铸造。

试验结果表明，与普通半连续铸锭相比，内置电磁搅拌半连铸 2219 铝合金铸锭的晶粒更加细小，组织更加均匀，从边部到心部的晶粒直径均在 127~151 μm 范围之内，且疏松缺陷大量减少；铸锭的表面偏析层大幅度减小，Cu 元素在铸锭整个横断面上分布均匀，径向的变化波动较小，最大偏差小于 5%。

内部电磁搅拌可以有效改善大规格 2219 铝合金铸锭的组织并减轻宏观偏析。

关键词：2219 铝合金；半连续铸造；内部电磁搅拌；熔体处理；晶粒细化；宏观偏析

E04-74

激光悬浮区熔法制备 Al₂O₃-ZrO₂ 共晶生物陶瓷的力学性能和细胞毒性

樊光尧, 苏海军, 张军, 郭敏, 刘林, 傅恒志

西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西西安, 710072

氧化锆及其复合材料凭借优异的力学性能和美学性能, 在牙科领域受到了广泛的关注。本文通过激光悬浮区熔法制备了可用作牙科修复材料的 Al₂O₃-ZrO₂ 共晶生物陶瓷, 研究不同抽拉速率对材料凝固组织和力学性能的影响。采用 X 射线衍射仪、显微硬度计、万能试验机和扫描电子显微镜(SEM)对材料进行了表征。结果表明, 材料主要是由 Al₂O₃ 和 ZrO₂ 两相组成, 室温下 ZrO₂ 以四方相的形式存在。随着抽拉速率的增加, 微观组织由均一层片状变为共晶胞状且层片间距逐渐减小。材料的硬度和断裂韧性受抽拉速率影响较小, 分别为 15-16 GPa 和 6.9 MPam^{1/2}。弯曲强度受抽拉速率的影响显著, 随着抽拉速率的增加, 弯曲强度先增加后减小, 抽拉速率为 100 μm/s 时达到最大值 1.3 GPa。此外, 采用 MTT 法测试材料的细胞毒性水平, 结果表明该材料无细胞毒性。适中的硬度和断裂韧性, 优异的弯曲强度及良好的生物相容性使 Al₂O₃-ZrO₂ 共晶生物陶瓷可以作为合适的牙科种植材料。

关键词：定向凝固；激光悬浮区熔；共晶陶瓷；生物特性

E04-75

制浆工艺对 Al-Zn-Mg 合金半固态浆料组织的影响规律

罗敏, 李大全, 屈文英, 梁小康, 樊建中

北京有色金属研究总院 101407

Al-Zn-Mg 7000 系铝合金具有较高的强度, 同时拥有较好的阳极氧化性等优良的综合性能而倍受重视。但是由于 7000 系铝合金热裂倾向严重, 不能用传统铸造方法直接成形。半固态压铸能有效减小热裂倾向, 这使得 7000 系合金的铸造成形成为可能。但是 7000 系铝合金的半固态加工温度窗口窄, 很难获得均匀的半固态浆料。本文采用旋转热平衡法, 以 Al-5Zn-1.3Mg 为例, 针对 7000 系铝合金半固态制浆的问题, 基于其凝固特性, 通过调整制浆工艺, 成功获得了均匀的半固态浆料, 并成功制备了半固态压铸件。本文主要研究了冷却速度、Al-5Ti-1B 细化剂的添加量对该合金半固态浆料组织的影响规律。结果表明: 一、降低冷却速度可以减小温度梯度, 使浆料组织更均匀; 二、添加细化剂主要有两个作用: 1、改变组织形貌, 使晶粒组织由枝晶向球晶转变, 减小浆料的心部和边部组织的形貌差异; 2、细化浆料组织, 且细化效果随添加量的增加而加强。本文研究结果表明 7000 系的半固态压铸是可行的。

关键词：半固态制浆；Al-Zn-Mg 铝合金；冷却速度；Al-5Ti-1B；微观组织

墙展

E04-P01

硅对 Ni-C 合金凝固组织球形石墨的形核与生长过程的影响规律

孟迪, 王雪涛, 郑洪亮, 田学雷

山东大学 250061

采用等离子刻蚀, 扫描电子显微镜以及金相定量分析技术研究了硅对 Ni-C 合金凝固组织球形石墨的形核与生长过程的影响规律。

通过向 Ni-C 熔体中加入纯硅, Ni-Si 合金和 Fe-Si 合金, 采用电子显微镜对其凝固组织进行定量表征, 研究了硅的含量及加入方式对球形石墨的数量, 大小以及圆整度的影响规律。采用等离子刻蚀对 Ni-C 合

金进行刻蚀，并通过扫描电子显微镜 (SEM) 和电子能谱分析(EDS)对石墨核心的形貌和成分进行了表征。

研究表明，硅的加入使熔体出现剧烈的成分起伏和温度起伏，熔体中高 Si 区会强烈地促进石墨富集和析出，这种作用既促进了石墨的形核又促进了其生长。

Si 含量的改变对石墨球圆整度影响较大，Si 含量越高，石墨球圆整度越好。

关键词：Ni-C 合金；Si 元素；微观组织；石墨形核；石墨生长

E04-P02

共晶 Al-Si 合金凝固过程微观组织演变的实验研究和数值模拟

吴冰, 姜奥雷, 陆皓, 郑洪亮, 田学雷

山东大学 250061

基于元胞自动机 (CA) 方法建立了一套共晶 Al-Si 合金凝固过程微观组织演变的数学物理模型并进行了实验验证。

本文通过测量同一铸件上不同位置处的冷却曲线，通过 SEM 分析了不同冷却速度对 Al-Si 共晶组织的影响规律，在此基础上基于元胞自动机方法建立了 Al-Si 不规则共晶凝固过程的多相形核生长模型。共晶 Al 和共晶 Si 采用交叉形核方式，对两相的临界形核的临界值对微观组织的影响规律进行了研究。根据共晶铝和共晶硅的晶体结构差异，对两种共晶相采用了不同的界面单元捕获规则。该模型耦合了温度场和浓度场，考虑溶质再分配、成分过冷和曲率过冷等因素。

模拟了不同热过冷度条件下的 Al-Si 共晶组织演变过程。

模拟结果与实验结果的对比说明，该模型可以对 Al-Si 共晶合金的微观组织演变进行准确定量预测。

关键词：元胞自动机 (CA)；共晶 Al-Si 合金；微观组织；数值模拟

E04-P03

铝镍合金凝固过程中气泡生长行为的同步辐射成像研究

孙思宇, 胡侨丹, 卢温泉, 李建国

上海交通大学 200240

本文借助同步辐射成像技术对 Al-12wt.%Ni 合金定向凝固过程中氢气泡的生长行为以及气泡与 Al₃Ni 金属间化合物的相互作用进行了原位观察研究。结果表明，影响气泡生长的主要因素包括氢的扩散速率、与金属间化合物的相互作用、气泡的内压及气泡尺寸。通过对凝固过程中气泡的尺寸随时间的变化关系分析发现，气泡的生长主要分为三个阶段：第一阶段气泡在铝镍合金熔体中随机生长，且其生长速率主要由氢的扩散速率决定；第二阶段气泡由于受到了金属间化合物的挤压而发生局部变形，使得气泡内压显著增加，当气泡内压高达一定程度时，气泡失稳破裂，尺寸急剧减小；当气泡与金属间化合物分离之后，若气泡内的压强保持相对稳定则气泡能稳定存在且发生球化现象即第三阶段，反之，若气泡内的压强急剧下降则气泡于第二阶段末期消失。

关键词：同步辐射成像；气泡；金属间化合物；铝镍合金

E04-P04

利用非接触式高温涡流传感器对非晶合金凝固过程的电阻率测量

吴泽霖, 刘春婷, 魏代坤, 韩小涛, 谌祺

华中科技大学 430074

作为一种力学性能和物化性能优异的新型金属材料，块体非晶合金的制备工艺以及各种性能与合金熔体的凝固过程息息相关，尽管传统的热分析法也可以反映凝固过程中一些相变相关的信息，但由于测量原理和仪器精度的原因，可能对某些重要的相变点无法分辨。电阻率普遍被认为是反映液态金属结构的敏感物理量，因此通过测量非晶合金熔体在凝固过程中的电阻率变化是研究非晶合金熔体液-固相变的重要途径。

径。传统的直流四线法由于会直接与样品接触造成污染，不利于高温下金属熔体的电阻率测量。

本文研制了一种基于电磁感应的非接触式高温涡流传感器，其原理将通以一定频率的交变激励信号的检测线圈置于被测试件附近，被测样件电阻率的变化将引起检测线圈的阻抗变化，那么检测线圈阻抗变化将直接反映样品电阻率的变化。为提高传感器精度，检测线圈以及与之匹配的隔热陶瓷已被 Comsol 优化设计以度消除温度对检测线圈阻抗的影响，同时带有温度补偿的 LabVIEW 软件以被开发用于控制高精度 RLC 电表实时采集检测线圈阻抗。

测量结果表明，该高温涡流传感器可以精确和连续地测量非晶合金熔体在凝固过程中电阻率随温度的变化过程，且操作简单、测试速度快。

本文的非接触式电阻率测量方法为进一步地研究液态金属特别是过冷液态金属电阻率与其结构相关性提供了一种重要工具，对促进块体非晶合金的制备工艺优化具有重要的意义。

关键词：涡流检测；电阻率；过冷液态区

E04-P05

K4169 高温力学性能与铸件变形数值模拟研究

汪东红，董安平，祝国梁，疏达，孙宝德

上海交通大学 200240

合金的高温力学性能决定了其在高温下所能承受的载荷和临界应变大小，与铸件凝固过程的裂纹形成与尺寸变形有直接关系。在铸件凝固、冷却过程应力场数值模拟中，一般采用热弹塑性模型，根据凝固过程中的组织变化与塑性模量变化计算铸造过程的应力场与位移场。

本研究应用 Gleeble3800 热模拟实验机测定了高温合金 K4169 零塑性温度，应用熔化凝固法对试样进行高温拉伸实验，来模拟铸件凝固过程中的受力性能参数变化情况，实验得到不同温度下的应力-应变曲线。

对曲线进行分析研究，得到了 K4169 在不同温度下的高温塑性模量与应变的关系，进而得到不同温度和应变条件下的高温塑性模值。可以为铸件凝固过程弹塑性应力应变仿真计算提供重要参考。

分析了不同温度下铸件的高温塑性模量随应变的变化值，高温塑性模量值基本上是随温度的升高而降低的。对环套环铸件的尺寸变形进行了数值模拟，基于热弹塑性模型预测的铸件尺寸更接近铸件实际尺寸，更能准确的预测薄壁铸件裂纹的形成机制。

关键词：塑性模量；零塑性温度；铸件变形；数值模拟

E04-P06

Nb-Si 基超高温合金熔体与氧化钨基坩埚的相互作用

王寅，郭喜平

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 710072

为了探寻最适宜 Nb-Si 基超高温合金熔模铸造的型壳，有必要对该合金与不同氧化物制备的型壳坩埚之间的相互作用进行相应的研究。

利用非自耗电弧炼技术制备了名义成分为 Nb-20Ti-15Si-5Cr-3Hf-3Al(at%) 的 Nb-Si 基超高温合金，设计并制备了面层为纯 ZrO₂，面层未掺杂以及分别掺杂了 CaO+ZrO₂、MgO+ZrO₂、La₂O₃+ZrO₂ 和 CeO₂+ZrO₂ 等氧化物的 6 种氧化钨基坩埚。将该合金在具有碳气氛的真空高温热处理炉中加热至 1780℃ 并保温 30min 重熔后分别制得 Nb-Si 基超高温合金熔体与氧化钨基坩埚的界面，继而借助 SEM 等分析测试手段，对 Nb-Si 基超高温合金重熔后的组织形貌、相组成及与氧化钨基坩埚高温反应后的界面组织形貌、元素分布以及界面产物的相组成进行了研究，并探讨了在碳气氛中 Nb-Si 基超高温合金熔体与氧化钨基坩埚间的界面反应机理。

研究表明，所制备的合金主要由 Nbss(钨基固溶体)、 γ -Nb₅Si₃、HfO₂ 三相组成。在有碳气氛的重熔实验中，各试样在坩埚处均有重熔合金液渗入，且该合金均未能完全熔化。在合金内部存在重熔区与

未熔区的界面,在其附近有明显的 HfO_2 相的偏聚,且在重熔区中出现大量的新相 Tiss (钛基固溶体)。合金重熔区与掺杂及未掺杂氧化物的氧化钇基坩埚的接触界面主要由 Y_2O_3 、 Al_2O_3 及少量 TiO 的混合物构成。而合金重熔区与面层为纯 ZrO_2 的氧化钇基型壳的界面几乎未有其它产物生成。

在碳气氛条件下氧化钇基坩埚中进行 Nb-Si 基超高温合金的熔炼对合金的微观组织形貌、相组成及分布都影响较大,而不同氧化物的掺杂对其影响的差别并不大。

关键词: Nb-Si 基超高温合金; 氧化钇基型壳坩埚; 熔模铸造; 相互作用

E04-P07

元素添加对激光选区熔化过共晶铝硅合金组织和物相的影响

贾延东, 王刚, 易军

上海大学 200444

过共晶铝硅合金因轻质、低膨胀、抗疲劳、耐腐蚀性能好、高的比强度和优异的综合力学性能,在航空、航天、汽车、电子等领域具有很广泛的应用。研究发现 Fe 元素的添加能够提高合金的热稳定性, Cu、Mg 元素的添加能够提高合金的室温强度。但是传统制备技术生产的合金中 Al 晶枝和初晶硅的组织粗大,共晶硅呈长针状严重恶化了材料的室温和高温性能。基于此,本文通过激光增材制造技术研究元素的添加对过共晶铝合金组织和物相的影响。分析表明, Fe 元素的添加在合金中形成针状的金属间化合物 Al-Si-Fe 相,对硅相有一定的细化作用,但是针状的 Al-Si-Fe 相在快速凝固过程中产生大量的内应力,严重恶化了合金的性能,导致在制备过程中呈现宏观开裂。XRD 分析表明激光熔化 Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg 合金主要由 Al、Si、 Al_2CuMg 和 δ - Al_4FeSi_2 相构成,没有发现明显的 β - Al_5FeSi 相析出。随着热处理温度的升高,共晶硅相有纤维状转变为颗粒状,初晶硅和 Al-Si-Fe 相尺寸没有明显变化。

关键词: Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg 合金; 激光选区熔化; 微观组织; 力学性能

仅发表论文

E04-PO01

Ni-Mn-In-Mg 记忆合金中马氏体相变和动力学计算

周珍妮

上海交通大学 200240

本研究的目的是研究 Ni-Mn-In 合金中马氏体相变和动力学特征。Ni-Mn-X (X=In, Sn, Sb)是一种同时具有一级马氏体相变和二级磁性转变的新型多功能材料。磁场可以直接诱导该系列合金从马氏体到奥氏体相变,是一种真正意义上的磁形状记忆合金,因此这些合金具有神奇的性能,如巨大的磁热效应,巨磁阻效应,巨大的输出应力,因此,在过去十年中得到广泛的研究。然而,对该系列合金中马氏体相变和动力学研究却很少,尤其是 Ni-Mn-In 合金中的动力学研究,目前仅见到一篇学位论文中对该合金的相变激活能进行过计算。

实验方法是采用额外添加微量 Mg 元素的方式而非原子替代的目的在于防止第四元素在合金中大浓度地固溶从而影响合金的本来结构和功能特性。实验采用高纯度金属原料,电弧炉熔炼技术制成铸态合金并经过等温处理。

实验结果发现,添加微量 Mg 以后,合金的晶粒明显细化,马氏体相变温度明显升高,并析出较基体硬度低的第二相,均匀分布在晶内和晶界。采用不同的方法计算了合金的相变激活能,发现随着 Mg 的添加,逆马氏体相变激活能越来越高;接着测试了不同加热速度下相变特征温度,深入分析了加热速度对相变动力学的影响,发现加热速度明显影响相变能垒的大小,要在相同加热速度下激活能的比较才有意义。

本研究为 Ni-Mn-In 合金的马氏体相变动力学研究提供了参考。

关键词：记忆合金；马氏体相变；动力学

E04-PO02

定向凝固过程中偏离热流方向生长的枝晶形态研究

宇红雷¹，坚增运¹，林鑫²，李俊杰²，黄卫东²

1. 西安工业大学 710021
2. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室，710072

在研究定向凝固过程中枝晶间的竞争生长问题时，偏离热流方向生长的枝晶形态演化对竞争淘汰结果具有重要的影响。

本文利用类金属透明模型合金丁二腈-丙酮（SCN-2.0wt.%）研究了在定向凝固过程中偏离热流方向生长的枝晶的形态特征。

研究表明，定向凝固过程中枝晶的实际生长方向由其晶体学优先生长方向和热流方向共同决定，实际生长方向介于后两者之间，并随抽拉速度的增大而更接近其晶体学优先生长方向。相比于平行于热流方向生长的枝晶，偏离热流方向生长的枝晶具有更大的一次间距。枝晶偏离热流方向生长时，其尖端仍然是对称的，可以用抛物线进行拟合，对称轴平行于枝晶的晶体学优先生长方向，与枝晶实际生长方向无关。

关键词：定向凝固；枝晶生长；枝晶形态；特征参数

E04-PO03

凝固方式对 Al-25Si-2Fe-2Mn 的显微组织影响研究

肖帆¹，李璐^{1,2}，周荣锋^{1,2}，李永坤¹，蒋业华¹，卢德宏¹

1. 昆明理工大学材料科学与工程学院
2. 昆明理工大学分析测试研究中心

目的：研究不同凝固条件下 Al-25Si-2Fe-2Mn 合金的显微组织及富 Fe 相的析出行为、晶体结构。

方法：采用电磁搅拌、倾斜板过流冷却、和喷射沉积工艺处理 Al-22Si-2Fe-2Mn 合金熔体；利用 SEM、EDS、XRD 及 TEM 等手段分析不同条件下 Al-25Si-2Fe-2Mn 合金凝固显微组织。

结果：电磁搅拌处理的连续冷却 Al-22Si-2Fe-2Mn 合金凝固组织中初生 Si 颗粒平均直径约为 50 μm，主要以块状为主，富 Fe 相为块状平均直径约为 30 μm 且部分富 Fe 相依附在初生 Si 颗粒凹陷处，与初生 Si 颗粒粘结分布在其周围；倾斜板过流冷却下的 Al-22Si-2Fe-2Mn 合金组织中初生 Si 颗粒平均直径约为 30 μm，富 Fe 相为块状平均直径约 40 μm，部分富 Fe 相围绕在初生 Si 颗粒周围，此外，大量细小的汉字状富 Fe 相均匀分布在合金凝固组织中。喷射沉积下的 Al-22Si-2Fe-2Mn 合金组织中初生 Si 颗粒为团块状平均直径约为 2 μm，块状富 Fe 相为平均直径约 3 μm，部分富 Fe 相依附在初生 Si 颗粒凹陷处。

结论：1、三种凝固方式下，Al-25Si-2Fe-2Mn 组织中的硬质相均能得到不同程度细化，喷射沉积细化效果最好，初生 Si 颗粒和富 Fe 相为团块状，有少量富 Fe 相依附在初生 Si 颗粒凹陷处。分段式倾斜板过流冷却细化效果其次，初生 Si 颗粒和富 Fe 相为块状且均匀分布；电磁搅拌细化效果最差，部分富 Fe 相与初生 Si 颗粒粘结分布在其周围，将二者视为整体，平均直径约 100 μm。2、三种凝固方式下的富 Fe 相虽然均为稳定的 α-Al15(Fe,Mn)3Si2 相，但其富 Fe 相的析出行为不同；倾斜板过流冷却处理后的有大量细小的汉字状富 Fe 相均匀分布在合金凝固组织中；喷射沉积过程中的沉积阶段发生离异共晶使得显微组织中没有共晶组织出现。

关键词：电磁搅拌；过流冷却；过共晶铝硅合金；富铁相；晶体结构

E04-PO04

Nb 元素对时效强化型 Cu-9Ni-6Sn 合金组织和力学性能的影响

高民强，王同敏，康慧君，陈宗宁

由于 Cu-Ni-Sn 合金时效中存在调幅强化、 γ' 亚稳相强化、 γ 稳定相强化, 使 Cu-9Ni-6Sn 合金是最具潜力的铍铜替代品。为了进一步提高 Cu-9Ni-6Sn 的力学性能, 微量的合金元素 Nb 被加入。结果表明: 随着 Nb 含量从 0 wt.%~0.35 wt.% 的变化, 由于金属间化合物 Ni₃Nb 的生成, 导致 Cu-9Ni-6Sn 合金的晶粒逐渐被细化; 此外, Nb 的加入有效地抑制时效初期的析出, 但对峰值强度 (~350 Hv) 影响较小; 随着时效时间的增长, Cu-9Ni-6Sn 合金的电导率逐渐升高, 并且在时效后期 Nb 的含量越多对应的导电越高; 析出强化与细晶强化共同作用使得 Cu-9Ni-6Sn-0.35Nb 合金在 375℃ 时效 8h 的抗拉强度为 913.6MPa, 延伸率为 4.2%。

关键词: Cu-9Ni-6Sn 合金; Nb 元素; 细晶强化; 力学性能

E04-PO05

钴含量对因瓦合金结晶形态及凝固组织性能的影响

陈翠欣^{1, 2, 3}, 马宝军¹, 苗赛男¹

1. 河北工业大学材料科学与工程学院
2. 天津市材料层状复合与界面控制技术重点实验室
3. 河北工业大学能源装备材料技术研究院

目的: 低膨胀系数, 高塑性和韧性的特点, 使因瓦合金广泛运用于天然气运输船和长距离输电线等领域中。但目前工业使用的因瓦合金普遍存在晶粒粗大、硬度较低等问题, 限制了因瓦合金的进一步应用。本研究针对此问题, 利用真空电弧炉制备不同 Co 含量的因瓦合金, 研究了较高冷却速度下 Co 含量对因瓦合金凝固过程及结晶组织及性能的影响, 分析了电弧及铜坩埚水冷条件下因瓦合金的结晶形态。

方法: 采用真空电弧熔炼制备试样, 并通过金相显微镜, 扫描电镜, 显微硬度计等对试样进行检测。

实验结果: 不添加 Co 的因瓦合金, 其结晶组织为粗大的柱状晶, 晶粒平均尺寸为 $288.91 \mu\text{m} \times 189.12 \mu\text{m}$, 但组织大小分布不均匀, 最小晶粒尺寸大约为 $97.69 \mu\text{m} \times 54.53 \mu\text{m}$; 添加 0.2%Co 后, 因瓦合金凝固组织柱状晶尺寸有所减小, 晶粒平均尺寸为 $259.92 \mu\text{m} \times 166.49 \mu\text{m}$, 分布较为均匀。当 Co 的含量为 4% 时, 结晶组织由细晶、柱状晶和等轴晶组成。另外柱状晶内部有大量的胞状晶, 而且胞状晶内部出现了较多的三角形、方形等形状的位错坑, 添加 Co 后位错密度均有所提高; Co 的添加使材料的硬度有所提高, 当 Co 的含量为 0.2% 和 4% 时试样的显微硬度分别为 192.5HV 和 169.5HV, 相比于未添加 Co 的提高了 24.59% 和 9.71%

结论: 在快速冷却条件下, 通过控制钴的含量可以有效控制因瓦合金的组织类型及位错密度, 改善因瓦合金的力学性能。

关键词: 因瓦合金; 真空电弧熔炼; 结晶组织; 晶粒尺寸; 显微硬度

E04-PO06

连续冷却条件下半固态高硅铝合金的流变性能

肖帆¹, 李璐^{1, 2}, 周荣锋^{1, 2}, 李永坤¹, 蒋业华¹, 卢德宏¹

1. 昆明理工大学材料科学与工程学院
2. 昆明理工大学分析测试研究中心

目的: 研究连续冷却条件下半固态高硅铝合金的流变性能, 为半固态高硅铝合金成形的计算机模拟提供了依据。

方法: 通过差示扫描量热法(DSC)确定半固态高硅铝合金温度与固相分数的关系; 采用自制的 Searle 型同轴双筒流变仪测量高硅铝合金连续冷却状态下的表观粘度; 利用幂率方程: $\eta = A \exp(Bfs)$, 通过 Origin 数据分析软件对数据进行分析, 得出半固态高硅铝合金的粘度方程。

结果: 在连续冷却条件下, 随着温度的降低, 高硅铝合金熔体的表观粘度不断增大; 当剪切速率($\dot{\gamma}$)

不变时, 冷却速率(v)越大, 相同温度下半固态高硅铝合金的表观黏度(η_a)越大。当冷却速率一定, 剪切速率一定时, Al-25Si-2Fe-2Mn 铝合金浆料的表观黏度最大, 而且随着温度的降低, 表观粘度的变化速率最大; Al-25Si 铝合金浆料的表观黏度最小, 随温度的降低, 表观粘度的变化速率最为缓慢; Al-25Si-2Fe 铝合金浆料的表观粘度和变化速率在二者之间。当剪切速率=20.944s⁻¹ 时, Al-25Si、Al-25Si-2Fe 和 Al-25Si-2Fe-2Mn 的表观粘度公式如下。

结论: 1、在连续冷却条件下, 当剪切速率不变时, 半固态高硅铝合金浆料的表观黏度随冷却速率的增加而增加。例如当剪切速率=20.944s⁻¹ 时, Al-25Si、Al-25Si-2Fe 和 Al-25Si-2Fe-2Mn 的表观粘度公式依次为 $\eta_a = (0.11 + 0.16v)\exp(2.11fs)$ 、 $\eta_a = (0.281 + 0.52v)\exp(6.21fs)$ 和 $\eta_a = (0.36 + 0.18v)\exp(13.66fs)$ 。 2、在连续冷却条件下, 半固态高硅铝合金浆料中的初生 Si 和富铁相等硬质相的体积分数和形状因子对浆料的表观粘度有显著影响。

关键词: 高硅铝合金; 半固态; 连续冷却; 表观粘度

E04-PO07

热处理对 Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.6Zr 合金显微组织和力学性能的影响

侯华, 丁志兵, 鲁若鹏, 赵宇宏

中北大学 030051

采用光学显微镜(OM), 扫描电子显微镜(SEM), X 射线衍射仪(XRD), 透射电镜(TEM)和拉伸实验等研究了热处理对 Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.6Zr(wt%)合金的显微组织和力学性能的影响。结果表明: 铸态下, Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.6Zr 合金组织由 α -Mg 基体, Mg₂₄(Gd,Y,Zn)₅ 相, (Mg,Zn)₃(Gd,Y)相和 Mg₁₂(Gd,Y)Zn 相 (LPSO 相) 组成, 共晶相呈网络状分布在晶界处, 且 LPSO 相为 14H 结构呈层片状分布在晶界处。固溶处理后, 合金组织中只有 α -Mg 基体, Mg₁₂(Gd,Y)Zn 相和一些富含 Gd 和 Y 元素的小方块相, 共晶相明显变少, 晶内析出大量的层片状 LPSO 相, 部分层片状相长大变粗转变为杆状相。时效处理后, 晶内有大量的 β' 相析出, 这也是合金力学性能提高的主要原因。从力学性能上看, Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.6Zr 合金在 220℃时效处理 56h 时达到时效峰, 表现出最佳的力学性能, 它的抗拉强度 (UTS), 屈服强度 (YS) 和延伸率分别为 304MPa, 198MPa 和 4.8%。

关键词: Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金; 显微组织; 力学性能; LPSO

E04-PO08

Ce 元素对 AZ91 镁合金热裂行为的影响

刘文君¹, 蒋斌^{1,2}, 余晓伟³

1. 重庆大学
2. 重庆市科学技术研究院
3. 长安福特汽车有限公司

适量的稀土可显著提高材料力学性能。通过研究稀土 Ce 元素对 AZ91 热裂倾向的影响, 从而探索镁合金热裂的特征、可控因素和形成机理, 为合金的进一步开发和研究提供理论和实践依据, 为合金在非平衡条件下凝固行为的计算机数值模拟提供理论基础。

采用约束热裂棒法对合金热裂倾向进行测试, 用扫描电镜对热裂断口附近组织进行观察与分析, 结合热裂区域的相分布, 综合分析 Ce 元素在 AZ91 合金热裂过程中的作用机理。

当 Ce 添加量在 0-1.0%之间时, 随着 Ce 含量的增加, 合金的热裂倾向逐渐增加, 并在 Ce 含量为 0.6% 时达到一个最大值, 而后 Ce 含量的继续增加则使合金热裂倾向减小到一个稳定值, 但这个稳定的合金热裂倾向值依然比 Ce 量处于 0-0.2%之间的合金热裂倾向大。

在 Mg-9Al-1Zn-xCe (x 在 0-1.0%之间) 中, 合金的热裂倾向随 Ce 含量的增加表现为先增加而后减小至一个基本稳定的值。Ce 添加量的增加使第二相中的 Mg₁₇Al₁₂ 被持续增加的 Al₁₁Ce₃ 稳定相所替代而逐

渐减少。Al₁₁Ce₃ 稳定相的析出形式逐渐由针状的不连续网状析出向块状的成对团聚析出转变。分布于枝晶间的针状 Al₁₁Ce₃ 一方面堵塞补缩通道，增加补缩难度，另一方面由于其与基体不同的凝固收缩率产生了收缩应力，因而合金的热裂倾向增加。团聚为块状的 Al₁₁Ce₃ 阻碍了凝固过程中的原子扩散，细化了合金的显微组织，且不连续的网状 Mg₁₇Al₁₂ 第二相的量减少，减小了凝固后期液膜的数量和存在的时间，延长了合金液补缩通道的开通时间，提高了合金液的补缩能力，因而合金的热裂倾向减小。由此，形成的热裂断口主要由自由枝晶面、枝晶间最后凝固阶段由剩余液相形成的富溶质的第二相和裂纹组成。

关键词：AZ91；热裂；断口形貌；第二相

E04-PO09

立式离心铝合金铸件的宏观偏析及组织性能研究

徐琴¹，吴士平²，王星¹

1. 河南工业大学 机电工程学院
2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院

本文对立式离心铝铜合金铸件的宏观偏析及凝固组织与力学性能进行了研究，获得了铸型的离心转速、离心半径以及铸件壁厚对立式离心铝铜合金铸件的宏观偏析及组织性能的影响规律，探讨了立式离心铝铜合金铸件的宏观偏析形成机制。研究表明，立式离心铸件的宏观偏析与铸件的壁厚、铸型的离心转速以及铸件的径向尺寸有着重要的关系。随着铸型离心转速的提高，铸件的晶粒尺寸减小，力学性能提高，宏观偏析严重。随着离心半径的增加，铸件的晶粒尺寸变小，力学性能得到提高。另外，相同的铸型转速下，铸件的壁厚越大则铸件的宏观偏析趋势变大。立式离心铸造过程中，合金熔体初生相中合金元素的含量对于立式离心铸件宏观偏析起着决定性的作用，而与元素的密度大小无直接关系。初生相中合金元素的含量对于立式离心铸件宏观偏析的性质有着决定性的作用，而与元素的密度没有直接的关系。当熔体中初生相的合金元素含量大于初始液相中合金元素的含量时，铸件形成正偏析。当初生相中合金元素的含量小于初始液相中合金元素的含量时，铸件形成负偏析。

关键词：铝铜合金；离心铸造；宏观偏析；凝固组织；力学性能

E04-PO10

二元合金定向凝固过程中内生热电流估算新方法

沈喆，钟云波，董立城，范丽君，王怀，李传军，任维丽，雷作胜，任忠鸣
上海大学 200072

目的：

在磁场下合金定向凝固过程中内生热电流和静磁场相互作用会产生一个显著的热电磁力。该力会在液相中诱发热电磁流动，改变糊状区内析出溶质的分布，使试样出现宏观偏析。若要量化计算该力，重点在于量化凝固过程中的热电流。目前热电流的计算主要是通过查阅合金的绝对热电势后换算所得，但文献中特定成分、温度等条件下的合金绝对热电势并不全面，故研究一种方便的估算合金定向凝固过程中热电流的方法具有非常大的意义。

方法：

本文研究主要包括以下两点：

一、以 Sn-10wt.%Bi 二元合金作为研究对象，通过研究不同电流密度的外加电流 ($5 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 、 $1 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ 和 $2 \times 10^4 \text{ A/m}^2$) 和 1 T 外加横向磁场复合作用下，凝固组织中偏析的变化情况，估算该实验条件下 Sn-10wt.%Bi 合金的内生热电流密度。

二、通过测定该合金成分下绝对热电势随温度的变化规律，估算凝固过程中内生热电流密度，以验证凝固实验结果的准确性。

结果：

横向磁场下二元合金定向凝固过程中，由于热电磁力的作用，溶质会单侧富集，试样一侧会出现宏观偏析。在外加电流和横向磁场复合作用下，试样单侧的偏析会随外加电流的增大而逐渐减弱、消失并再次出现在另一侧。以偏析消失时的外加电流密度作为该实验条件下 Sn-10wt.%Bi 合金的内生热电流密度，其值大约为 $1 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ 。测定该合金成分下绝对热电势随温度变化的规律，并换算凝固过程中内生热电流密度，其值约为 $9.9 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ ，与凝固实验结果基本吻合。

结论：

内生热电流和外加电流在与磁场复合作用于定向凝固过程时，在糊状区内产生电磁流动并使溶质富集、产生偏析等现象的物理过程是一致的，故可以通过调整外加电流的方向和大小来控制试样内宏观偏析的情况。当外加电流与内生电流方向相反，大小相等时，试样内宏观偏析被抑制。其外加电流的电流密度可以估算作为合金在该凝固条件下的内生热电流的电流密度。

关键词：热电流；宏观偏析；横向磁场；二元合金；定向凝固

E04-PO11

挤压铸造 Mg-6xZn-xY 合金微观组织和力学性能的研究

王冰，赵宇宏，侯华

中北大学 030051

本文采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)等方法，研究了富镁区且 Zn/Y 原子比为 6 的 Mg-Zn-Y 系合金，旨在找出准晶的形成规律。实验采用挤压铸造的方法，研究了不同的挤压压力对 Mg-Zn-Y 合金微观组织和力学性能的影响。研究表明：在相同的挤压压力下，不同 Zn、Y 含量的 Mg-Zn-Y 合金的微观组织均由基体 α -Mg 相和准晶 I 相组成，随着合金中准晶含量的增加，合金的抗拉强度增加，延伸率降低。Mg-Zn-Y 合金系中的混合相 (α -Mg +I-phase) 主要是层片状共晶结构，呈网状分布在 α -Mg 基体之间。在相同 Zn、Y 含量下，随着挤压压力的增加， α -Mg 基体和层片状的共晶组织都明显细化，合金的抗拉强度和延伸率都随之增加，合金的细晶强化和第二相强化是合金力学性能增加的主要原因。Mg-Zn-Y 合金的断口形貌主要由细小的韧窝和撕裂棱组成，呈现准解理断裂特征。

关键词：Mg-Zn-Y；准晶；挤压铸造；微观组织；力学性能

E04-PO12

采用数值模拟方法分析影响钛合金铸锭表面质量的因素

赵小花，何永胜，刘鹏，樊彦杰，罗文忠，赖运金，王凯旋

西部超导材料科技股份有限公司 710018

目的：钛合金以其优异的性能广泛应用于航空航天领域，目前真空自耗电弧熔炼(Vacuum Arc Remelting, VAR)是钛合金铸锭的主要生产方法，由于受到各种因素的影响，在铸锭表面会形成冷隔、夹杂、气孔等缺陷，恶化铸锭的表面质量，降低铸锭成品率，提高了生产成本。本文的目的是采用数值模拟软件，通过模拟 VAR 熔炼过程的温度场以及各个工艺参数，在此基础上分析出影响铸锭表面质量的因素，以期达到指导熔炼工艺的优化，降低生产成本的目的。

方法：本文采用数值模拟方法，利用 VAR 熔炼专用软件 MeltFlow VAR4.3b 分析熔炼过程不同阶段温度场的变化，将高温液相与坩埚壁的接触长度与铸锭表面质量建立联系，从而分析表面质量的影响因素。

结果：分析得出，从工艺角度考虑，熔炼电流、稳弧电流以及稳弧周期这三个因素对铸锭表面质量有影响。

结论：结合实验验证结果，铸锭规格确定的情况下，工艺窗口范围内采用较大的熔炼电流、较低电压、大稳弧电流以及短稳弧周期有利于表面质量提高。

关键词：VAR；数值模拟；钛合金；表面质量

E04-PO13

Zn 含量对铸态 Mg-10Gd-3Y-0.6Zr 合金显微组织和力学性能的影响

丁志兵, 鲁若鹏, 侯华, 赵宇宏

中北大学 030051

采用光学显微镜(OM), 扫描电子显微镜(SEM), 透射电镜(TEM), X 射线衍射仪(XRD)和拉伸实验等研究 Mg-10Gd-3Y-xZn-0.6Zr(x=0, 0.5, 1, 1.5, 2, 质量分数, %)合金的显微组织、力学性能和断口形貌。结果表明: 不含 Zn 的合金组织由 α -Mg 和 Mg₂₄(Gd,Y)₅ 组成, 而 Zn 元素的添加能促使 Mg₁₂(Gd,Y)Zn 和 (Mg,Zn)₃(Gd,Y)相的形成, 且这两种相的体积分数随着 Zn 元素的增加而增加。此外, 在含 Zn 的合金中发现了堆垛层错和层片状 14H 长周期堆垛有序结构。拉伸实验表明, 含 0.5% 锌的合金表现出最佳的力学性能, 它的抗拉强度 (UTS), 屈服强度 (YS) 和延伸率分别为 233MPa, 194MPa 和 5.2%。通过断口分析表明, 含 0% 和 0.5% 锌的合金的断裂方式是典型的穿晶断裂, 而在含 1%, 1.5% 和 2% 锌的合金中既有穿晶断裂也有沿晶断裂。

关键词: Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金; 显微组织; LPSO; 力学性能

E04-PO14

基于 Thermo-Calc 的三元 Al-Fe-Si 共晶合金凝固路径计算

赵光伟, 叶喜葱, 黄才华

三峡大学 443002

基于作者前期建立的三元共晶凝固微观偏析解析模型及 Thermo-Calc 热力学软件, 编写了能够计算三元 Al-Fe-Si 共晶类合金凝固路径的 Fortran 模拟程序。本文针对 Al-Fe-Si 三元合金, 研究了成分、固相反扩散系数、凝固速率等对凝固路径、共晶相含量、溶质分配系数的影响规律。

计算结果表明: 五种不同成分 Al-Fe-Si 合金的凝固路径共分为三类: 合金 Al-1.0Fe-10Si (wt. % 下同) 的凝固路径为: $L \rightarrow L + AlFeSi_{\beta} \rightarrow L + \alpha - Al + AlFeSi_{\beta} \rightarrow L + \alpha - Al + AlFeSi_{\beta} + Diamond_A4$, 合金 Al-0.6Fe-8.5Si 的凝固路径为: $L \rightarrow L + \alpha - Al \rightarrow L + \alpha - Al + AlFeSi_{\beta}$, 而合金 Al-0.1Fe-10Si、Al-0.2Fe-11Si、Al-0.4Fe-10Si 的凝固路径为: $L \rightarrow L + \alpha - Al \rightarrow L + \alpha - Al + AlFeSi_{\beta} \rightarrow L + \alpha - Al + AlFeSi_{\beta} + Diamond_A4$ 。

研究了不同凝固速率、固相反扩散参数等对 Al-Fe-Si 合金共晶相生成量的影响。对 Al-0.3Fe-11Si 合金的计算结果表明, 在不同假设条件下, 不同凝固阶段的相生成量是不同的。速率越快, 固相反扩散系数越大, 共晶相含量越多, 但对于该合金系来说, 共晶相含量对凝固速率的变化并不敏感。

研究了 Al-Fe-Si 合金凝固过程中溶质分配系数随固相体积分数的变化规律。对 Al-0.4Fe-10Si 合金的计算结果表明, 随着凝固过程进行, Fe 和 Si 的分配系数不是保持一致的, 而在不断发生变化, 并且变化幅度较大, 并且合金溶质含量越高, 凝固时分配系数的变化越显著。对合金 Al-0.3Fe-11Fe 合金不同凝固速率下的计算结果表明, 凝固速率会对溶质的分凝产生较大影响, 这种影响在凝固速率较小时并不明显, 但是当凝固速率较大时, 这种影响会变得越来越显著。

关键词: 凝固路径; Al-Fe-Si; 数值模拟; Thermo-Calc

E04-PO15

铸铁水平连铸技术及铸铁型材的应用

徐春杰¹, 徐信锋¹, 赵振¹, 刘永辉², 张忠明¹

1. 西安理工大学材料科学与工程学院
2. 陕西华安铸铁型材有限公司

铸铁水平连续铸造技术在我国发展已经近 30 年, 技术和装备在日臻完善, 铸铁型材的应用领域和数量在不断扩大, 如何生产更大或更小截面尺寸的铸铁型材, 解决其相关关键技术和装备难题, 进一步丰富铸铁型材产品类型, 发挥铸铁型材的优点, 提升我国装备制造业的水平已成为热点问题。

本文在综述铸铁型材特点和我国与国际知名企业之间的差距基础上，提出了水平连铸技术和铸铁型材应用的发展趋势和方向。

关键词：水平连铸；铸铁型材；组织与性能；应用与发展趋势

E04-PO16

Microstructures and properties of high performance cast irons applied in automobile flywheels

Xian-fei Ding¹, Xiao-zheng Li², Warkentin Matthias³, Shi-yao Huang⁴, Qiang Feng^{2,5}

1. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3. Ford Res

High performance cast iron (HPCI) with improved mechanical properties and balanced thermal conductivity is a strong candidate to replace ductile iron in the application of automobile flywheel. In this work, the relationship between microstructures and properties, including mechanical and thermal properties, of the grey cast iron were investigated by analysing some commercial flywheels. The results show that the content of graphite is dependent on the content of carbon in the grey cast irons, and the simulation results show that most of carbon directly formed into graphite at room temperature (RT). High ultimate tensile strength (UTS) is caused by low area fraction and short length of the graphite. Thermal conductivity increases with increase of the area fraction of graphite. Short length of graphite would also contribute to thermal conductivity since a large number of the short graphite flakes can be formed under the circumstance of the similar area fraction of graphite. In order to get HPCI, microstructures with a moderate area fraction and short length of graphite should be controlled.

Keywords: High; Performance; Cast; Iron; (HPCI); Grey; Cast; Iron; Microstructure; Type A Graphite; Thermal; Conductivity; Ultimate; Tensile; Strength