

铸造有色合金研究进展与展望

——第75届世界铸造会议有色合金论坛评述

袁晓光^{1, 2}, 王云霞^{1, 3}, 郑博文⁴

- (1. 中国机械工程学会铸造分会, 辽宁沈阳 110022;
2. 沈阳市复杂构件精密成形与智能化重点实验室, 辽宁沈阳 110870;
3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022;
4. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

摘要: 随着装备制造业的不断发展, 铸造有色合金应用越来越广泛, 对铸件性能的要求也越来越高, 促进了对铸造有色合金研究工作的不断深入。2024年10月25—30日, 第75届世界铸造会议在四川省德阳市顺利召开。铸造有色合金作为铸造最有活力的研究领域之一, 这次大会设置了铸造有色合金论坛, 收录了来自9个国家的97篇相关论文, 国内外18位著名专家学者应邀出席论坛并作专题报告。本文梳理了本次论坛相关报告, 从铝、镁和钛等合金, 在外力场作用下的凝固及其他相关研究工作等5个主要方面进行了总结和评述, 并对未来发展进行了展望。本次会议有色论坛的研究报告基本体现了当前本领域研究热点, 为进一步推动铸造有色合金技术进步指明了方向, 进而将推动铸造有色合金的进一步应用。

关键词: 第75届世界铸造会议; 综述; 有色合金; 展望

铸造有色合金是航空、航天、汽车、轨道交通、工程机械、石油和化工等行业高端装备零部件制造的重要材料, 获得了广泛应用。随着节能减排对轻量化的需求日益增长, 合金和铸件性能面临更高要求, 这促使铸造有色合金在成分优化、组织性能与凝固过程调控、结构与功能综合化和加工性能预测等研究方向深入发展, 力求契合先进装备对高性能铸件的需求。

第75届世界铸造会议于2024年10月25—30日在四川德阳举办, 全球30多个国家1 500余名铸造行业知名专家、学者和企业界代表参会。本次会议铸造有色合金论坛收录了来自9个国家的97篇相关学术论文, 涵盖了全球科研工作者在铝合金、镁合金和钛合金等方面的综述与研究进展, 并有18位国内外著名专家学者作了报告。

本文针对第75届世界铸造会议铸造有色合金论坛学术报告与论文的主要内容(不涉及复合材料、高熵合金、成形技术), 梳理了相关研究成果, 针对具有代表性的报告和论文, 从铸造铝合金、镁合金和钛合金等在外力场作用下的凝固技术及相关研究工作进行了总结和评述, 并展望了铸造有色合金发展方向, 以供相关技术人员参考。

1 铸造铝合金

铸造铝合金是当今应用量最大和应用范围最广的有色合金, 在各类装备制造中发挥着重要作用。特别是随着节能减排的需要, 替代黑色金属减轻结构件重量更加促进了其应用范围的扩大。同时, 发展先进装备, 例如航空航天器、交通运输和电子器件结构材料等领域, 对铸造合金也提出了更高的性能要求。因此, 如何通过成分优化和组织调控不断提高铸造铝合金的力学及物理性能是当今铸造铝合金的重要发展方向。本次会议, 诸多学者的研究工作充分体现了这一发展趋势。

作者简介:

袁晓光(1963-), 男, 工学博士, 教授, 从事铸造有色合金及成形技术研究工作。E-mail: yuaxg@sut.edu.cn

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

08-1013-16

收稿日期:

2025-02-12 收到初稿,

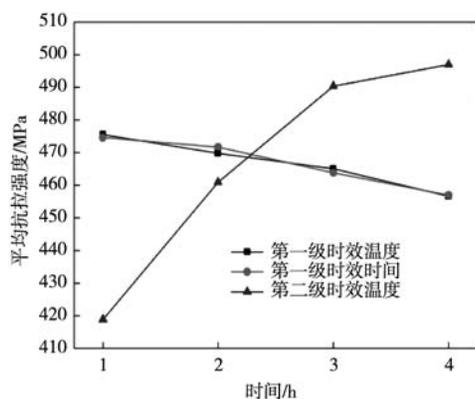
2025-04-28 收到修订稿。

1.1 铸造铝合金热处理及优化技术

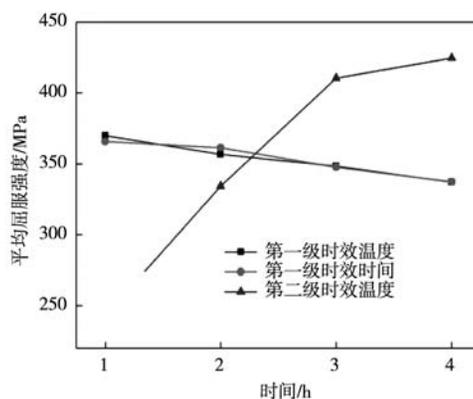
热处理是提高铝合金力学性能的重要途径，特别是通过优化热处理工艺可以进一步挖掘合金的性能潜力。LI Xiangping等人针对AlCu5Mn铸造合金开展了优化热处理工艺研究^[1]。他们采用不同双级固溶/时效工艺，探究了工艺参数对AlCu5Mn合金性能的影响。固溶处理工艺借鉴了固溶工艺为538 ℃/15 h时，基体 α -Al晶格常数的研究结果，采用528 ℃/2 h-538 ℃/13 h的双级固溶处理工艺。研究发现，双级固溶处理和单级固溶处理相比，试棒组织中轻微过烧和严重的针孔缺陷得到有效改善，针孔度从3级降为1级，抗拉强度和屈服强度分别提高2.1%和6.8%，伸长率降低了12.8%，但硬度值的影响不大。双级时效处理工艺采用固定总时效时间9 h，设计了三因素四水平正交试验，系统地研究了一级和二级时效温度与时间对合金硬度、强度和伸长率的影响。发现一级时效温度和时间的增加均会导致合金强度的降低，而二级时效温度的升高会显著提高合金的强度，见图1，并借助正交试验确定了较优的双级时效工艺，即60 ℃/1 h+175 ℃/8 h。研究工作最终确定了合金双级固溶/时效热处理工艺为528 ℃/2 h+538 ℃/13 h—60 ℃/1 h+175 ℃/8 h，在该工艺条件下合金抗拉强度达到501 MPa、屈服强度达到431 MPa、伸长率为10%、布氏硬度为151。与单级固

溶/时效热处理工艺相比，AlCu5Mn铸造合金的强度得到显著提高。

虽然优化热处理工艺可以显著改善铸造铝合金的力学性能，但工艺优化空间存在一定局限，往往会以增加能耗和延长生产周期为代价，且对合金性能提高也是有限的。这使得诸多学者尝试用外场辅助优化热处理工艺。对此，SHI Dequan等人研究了Al-Cu-Mn-Zr-V合金时效阶段施加电脉冲对合金组织和力学性能的影响^[2]。他们采用固溶时效与电脉冲同步的工艺。固溶处理有两种：(495±5) ℃，(5±0.5) h；(530±5) ℃，(24±0.5) h。时效处理为(190±2) ℃，(26±0.5) h。电脉冲于时效时间施加，每5 min施加10 s，密度设为0、5、10、15、20、25 A/mm²，占空比1%，频率100 Hz。研究表明，施加电脉冲后，随着电流密度的增加，沉淀物的大小和数量在晶界处逐渐从连续聚集向扩散过渡，见图2，力学性能得到了提高，见图3。当电流密度为15 A/mm²时，沉淀物最小，力学性能最好；抗拉强度达到443.5 MPa，伸长率为8.1%，分别比常规时效处理提高51.7%和42.1%。分析认为，电脉冲可以在时效温度为190 ℃时使第二相快速成核，进而生长后的沉淀物尺寸相对较小。该研究结果对借助电脉冲改进铝合金热处理工艺具有借鉴作用。



(a) 抗拉强度系数指标



(b) 屈服强度系数指标

图1 不同阶段时效时间的影响曲线

Fig. 1 Influence curves of aging time at different stages

1.2 铸造铝合金性能调控

高硅铝合金具有低热膨胀性和高耐磨性，是一种极具应用潜力的轻质功能性材料，如何控制初晶硅相形态是提升力学性能的核心，而改变传统生长方式可推动问题解决。LIAO Hengcheng等人利用合金组织离异生长原理，开展过共晶Al-18Si-5Cu-0.1P合金共晶生长方式的研究，其目的是通过改变工艺条件实现过共晶合金的共晶生长，从而解决初晶硅相粗大的问题^[3]。

研究工作采用的工艺方法是将720、700、680和650 ℃温度的熔体，保持10~15 min后重力倒入砂型中，热处理工艺为T6热处理(520 ℃/8 h+180 ℃/5 h)。该研究实现了Al-18Si-5Cu合金在砂型铸造中共晶凝固的分离生长。研究表明，浇注温度对离异程度起着重要作用。在浇注温度为720 ℃时，共晶凝固没有分离，而在700 ℃时基本分离，但在680 ℃和650 ℃时完全分离，硅相颗粒显著细化，形状因子明显改善，见图4。与未

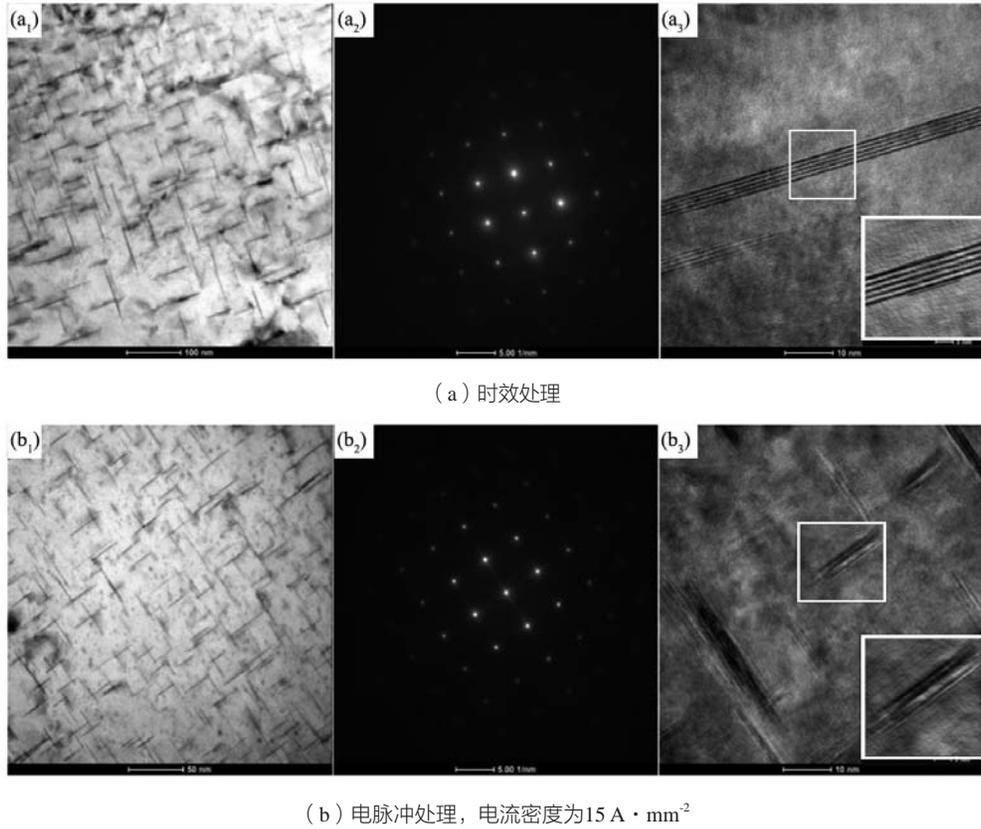


图2 时效和电脉冲处理对Al-Cu-Mn-Zr-V合金组织影响

Fig. 2 Influences of aging and electric pulse treatment on the microstructure of Al-Cu-Mn-Zr-V alloy

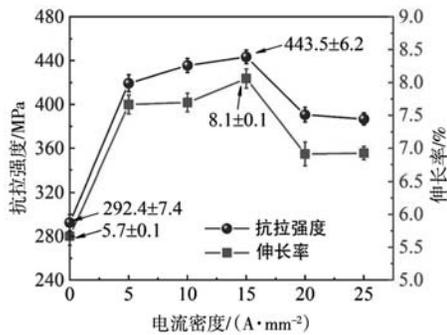


图3 电流密度对Al-Cu-Mn-Zr-V合金力学性能的影响

Fig. 3 Influence of current density on the mechanical properties of Al-Cu-Mn-Zr-V alloy

离异凝固合金相比，铸态完全离异合金的极限抗拉强度和伸长率分别增加了60.0%和92.3%，在T6状态下分别增加了113.9%和64.7%。

针对过共晶Al-Si合金离异共晶凝固问题，HAN Chengcheng等人借助反重力铸造方法实现了A390合金离异共晶凝固。他们用玻璃、黄铜和304不锈钢吸管制备合金试样，经凝固曲线检测与组织分析，明确了工艺条件对离异共晶生长规律的影响^[4]。研究表明，反重力铸造在将A390合金熔体吸入具有不同吸管模具过

程中，实现了共晶生长分离，层状共晶硅相消失，吸管材质不同，离异共晶程度不同，见图5。其原因在于A390合金熔体在低温和对流影响下，初晶硅相颗粒细化且分布均匀。铜管吸铸的铸件，初晶硅相平均等效直径最小，约5.3 μm，分离共晶与细小初生硅相增强了合金耐磨性。这些研究成果为简单高效细化过共晶Al-Si合金初晶及共晶硅相提供了新思路。

半固态成形技术是一种提高合金性能的有效工艺，但工艺实施往往与压铸或挤压铸造方法相配合。是否可以利用半固态过程形成的浆料直接用于常规重力铸造，从而在保留原球状组织特点的情况下实现工艺过程简化，是一种新尝试。HU Lijun等人以A356.0合金为研究对象，通过制备半固态浆料，然后进行重力浇注的工艺方法，研究了在结构复杂薄壁铝合金阀体铸件上的应用^[5]。试验采用两种工艺对比：一是用有一定固相比的铝液进行液体倾斜重力铸造，二是传统液体倾斜重力铸造。分析了铸件表面流痕、微观组织及内部质量。结果表明，利用半固态重力浇注技术，铸造产品的综合合格率较高，铸件表面流痕和误流明显减少，缩松较小，晶粒得到细化，具有更高的力学性能。该研究为半固态技术用于重力铸造奠定了基础，具有借鉴价值。

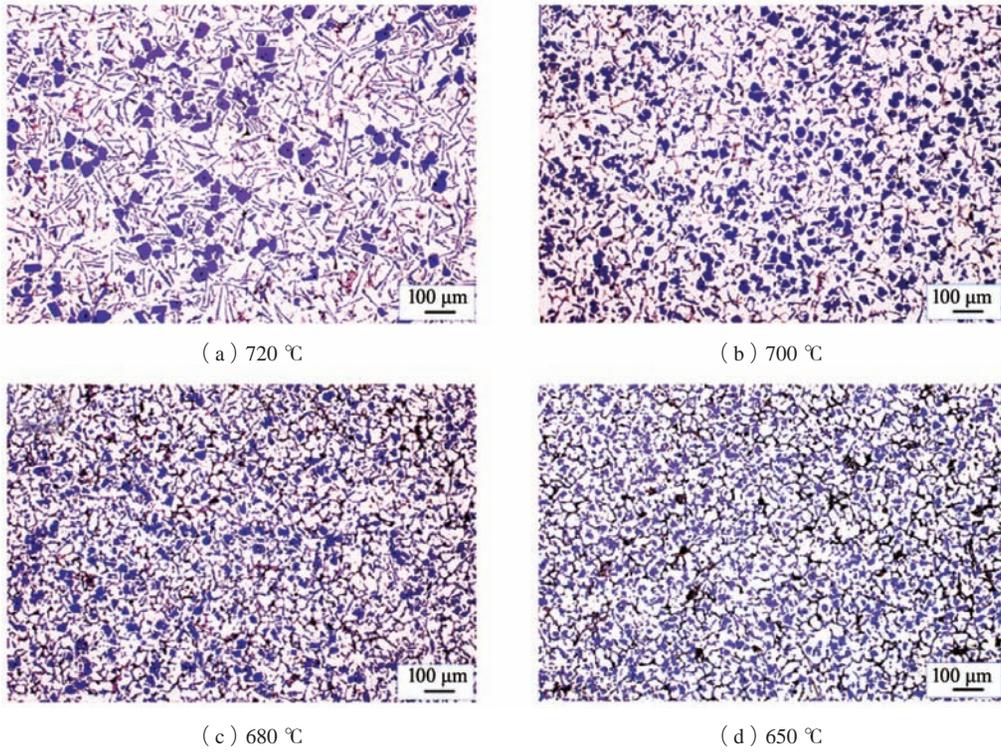


图4 不同浇注温度下Al-18Si-5Cu-0.1P合金铸造组织

Fig. 4 Casting microstructures of Al-18Si-5Cu-0.1P alloy at different pouring temperatures

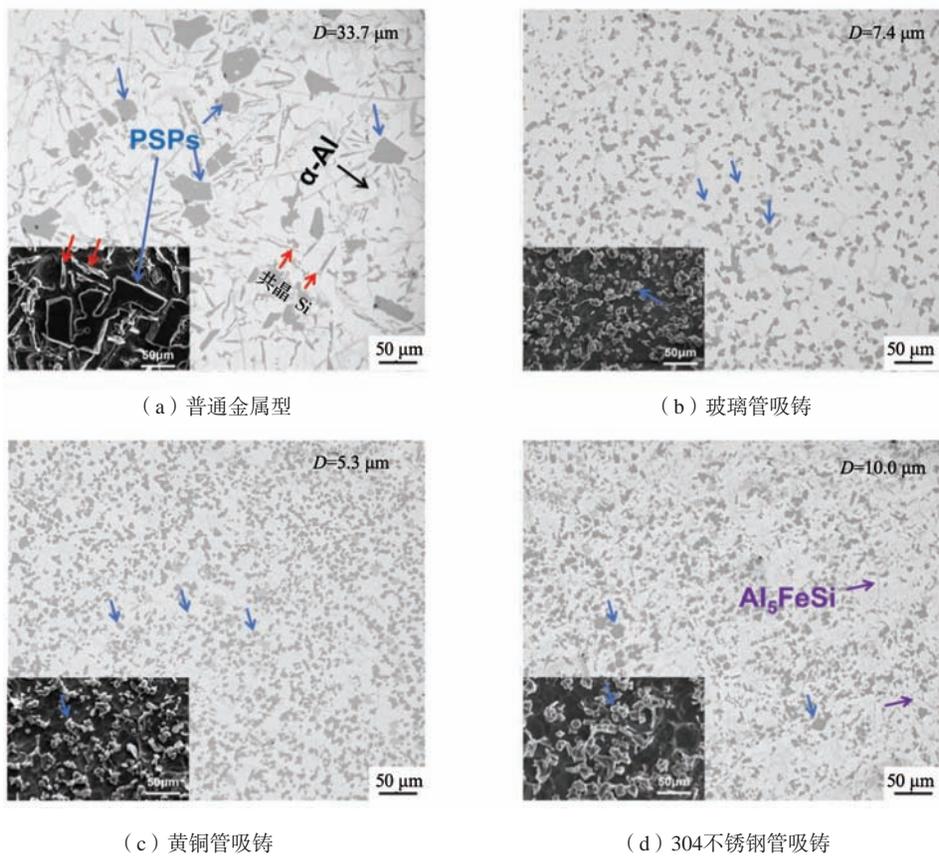


图5 不同铸造方法铸件组织

Fig. 5 Microstructures of the castings produced by different casting methods

铸造铝合金在导电和传热等工况下也具有广泛的应用，但是如何改善铝合金力学性能与物理性能相适配的问题，一直备受关注。KAYANI Saif Haider等人采用阶梯式铸造技术，研究了铸件微观结构对Al-7Si-0.35Mg合金沉淀行为和热导率的影响，通过设计不同厚度的阶梯试样，获得不同的凝固冷却速率，分析了不同冷却速率（2~50 K/s）和不同冷却时间（5.0~152.2 s）下合金在T5热处理过程中的沉淀演化行为及对热导率的影响^[6]。研究表明，冷却速率增至50 K/s时，合金不同阶梯部位的热导率从174.1 W/mK提升至178.9 W/mK。这是因为冷却速率改变了沉淀相析出情况，影响合金基体晶格畸变程度，最终致使热导率变化。该研究指出，在较慢的冷却速率下沉淀硬化和热导率之间能够实现更好的平衡，为优化Al-Mg-Si合金的性能提供了有价值的见解。

1.3 废铝再生应用基础研究

铝合金铸造余料与废弃铸件是废铝的主要来源。废铝再生利用既能节约资源、降低能耗、减少污染和推动循环经济，也是冶金和铸造行业新的经济增长点。然而，废铝中的Fe元素含量往往较高，形成不同形态的富铁相，导致铸件性能严重恶化，这也是当前用于废铝再生生产铸件的瓶颈之一。因此，研究Fe元素含量及工艺条件对富铁相的影响，对加速铸件废铝再生应用具有推动作用。

YANG Dongyang等人针对再生A356铝合金中Fe元素含量对T6处理组织和性能的影响开展了研究工作，目的是探索Fe元素含量与合金组织性能的关系^[7]。研究工作采用的合金为Al-7Si-0.3Mg-xFe（0.15wt.%~0.58wt.%），熔化过程中加入了Al-8Sr-8Ce中间合金，热处理工艺为T6。研究结果表明，随着Fe元素含量的增加，富铁相的尺寸和体积分数均有所增加；颗粒状和短棒状富铁相转化为粗的和针状的汉字状相；合金的抗拉强度变化不大，而屈服强度则逐渐增大。然而，伸长率却因此而显著降低，见图6。

NIU Yunxia等人也针对冷却速率对再生废铝中富铁相影响开展了研究工作，目的是探讨Fe元素含量和冷却速度对A356合金组织与性能的影响^[8]。研究工作设计了0.18 wt.%和0.36wt.%的A356合金，通过调整铜模具的空腔尺寸，获得不同熔体冷却速率的凝固条件，并采用热等静压工艺降低铸造缺陷，最后采用T6工艺进行热处理。研究结果表明，冷却速率不仅影响合金的

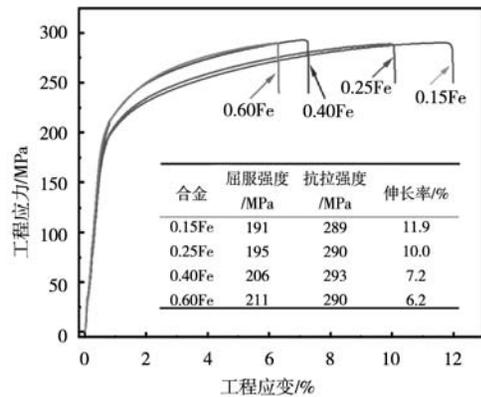


图6 不同Fe元素含量的合金拉伸曲线

Fig. 6 Tensile curves of the alloys with different Fe contents

微观结构，还影响富铁相的形核和生长，且富铁相含量随着合金中铁含量的增加而增加。在相同的冷却速率下，A356-0.18Fe和A356-0.36Fe合金的屈服强度、抗拉强度和断裂伸长率基本相同，屈服强度和抗拉强度分别在160 MPa和260 MPa左右波动，而断裂伸长率随冷却速率的增加而增大；在相同的冷却速率下，当Fe元素含量分别为0.18wt.%和0.36wt.%时，合金的屈服强度、拉伸强度和断裂伸长率不受Fe元素含量的影响，见图7。此外，当Fe元素含量低于0.36wt.%时，对A356在室温下的屈服强度、抗拉强度、断裂伸长率和冲击韧性影响不大。该研究对于深入认识富铁相对A356合金性能影响具有指导作用。

1.4 铸造铝合金热裂缺陷机制

热裂是典型的铸造缺陷，围绕热裂机制研究备受关注。在当前提出的热裂形成机制中，凝固后期液膜被公认是影响热裂形成的重要因素。然而，由于凝固后期液膜难以进行直接检测，其作用也无法通过试验得到验证，导致现有与液膜相关的热裂纹形成判据只能是定性描述。为此，YUE Chunyu等人以Al-Cu合金为研究对象，采用半固态技术制备试样，经过二次重熔获得具有连续液相包覆的球状组织，实现了没有枝晶结构影响的凝固后期液膜再现，并设计了相应的检测装置，实现了液膜直接检测^[9]。利用这种方法和装置，成功地检测了凝固后期液膜收缩及应力变化规律，并建立了基于液膜的热裂形成定量化判据，见式（1）。与RDG和Kou判据预测结果对比表明，该判据预测结果与试验结果更加吻合。该研究为揭示热裂形成中液膜作用、完善热裂液膜机制提供了新方法。

$$\text{判据} \begin{cases} \frac{4}{3} \pi a_0 b_0^2 \{1 - [(1-\alpha) \Delta T]^3\} + \left(4a_0 b_0 L_0 - \frac{4}{3} \pi a_0 b_0^2\right) - \left(4a_0 b_0 L_0 - \frac{4}{3} \pi a_1 b_1^2\right) > -n \frac{\pi r^{*4}}{8\eta t^*} \Delta P^* t & \text{会出现热裂} \\ \frac{4}{3} \pi a_0 b_0^2 \{1 - [(1-\alpha) \Delta T]^3\} + \left(4a_0 b_0 L_0 - \frac{4}{3} \pi a_0 b_0^2\right) - \left(4a_0 b_0 L_0 - \frac{4}{3} \pi a_1 b_1^2\right) \leq -n \frac{\pi r^{*4}}{8\eta t^*} \Delta P^* t & \text{不会出现热裂} \end{cases} \quad (1)$$

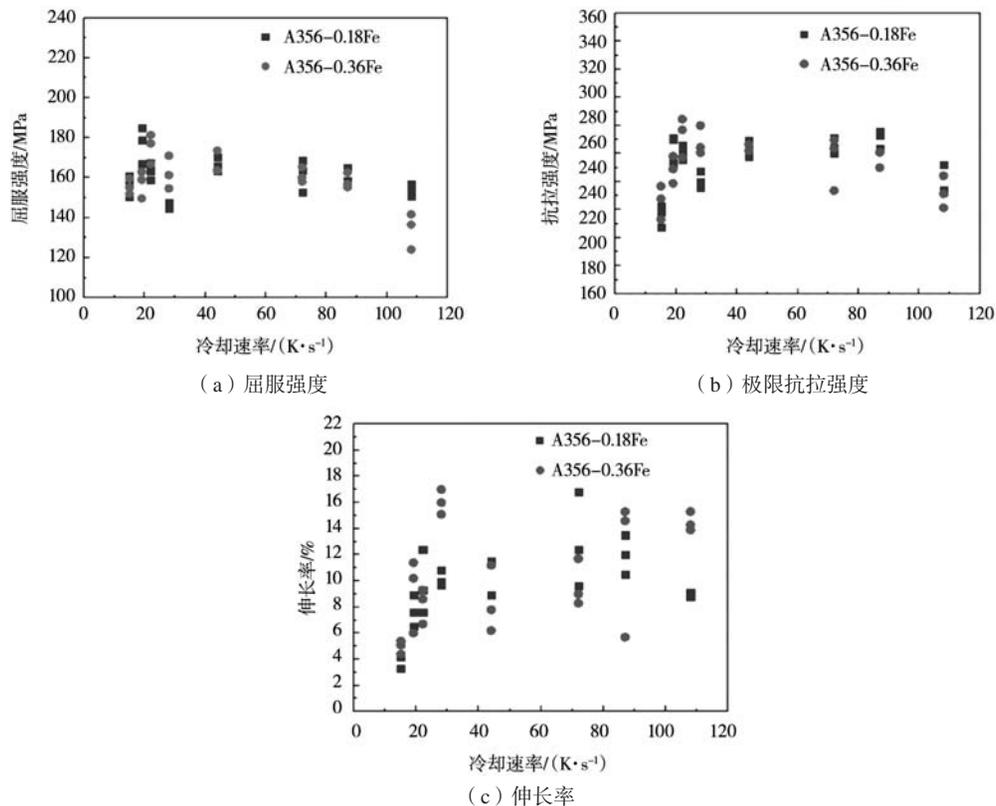


图7 A356铝合金的拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties of A356 Al alloy

其中,凝固前后椭圆形晶粒的大径分别为 a_0 和 a_1 ,小径分别为 b_0 和 b_1 。 α 为线膨胀系数, ΔT 为温度梯度, L_0 为两个固相晶粒中心之间的距离, c 为凝固后液相表面距晶粒中心的距离。 ΔP^* , l^* , r^* 分别表示为液膜补缩入口和出口之间的压差、液膜补缩通道长度和液膜补缩通道半径, t 为液膜补缩时间, n 为两个相邻固相晶粒之间液膜补缩通道数量, η 为动力学粘度。

Al-Li合金由于其低密度和高刚度,在航空航天和军事工业中具有无与伦比的优势。同时,铸造Al-Li合金比锻造合金更适合制造大型复杂形状的部件和薄壁部件。然而,这些合金在铸造过程中存在严重热裂性(HCS),限制了其更广泛的应用。尽管近些年几种降低铝合金HCS的方法被证明是可行的,但铸造Al-Li合金高HCS仍然是一个长期存在的问题,特别是裂纹形成机理更是亟待探明。ZHANG Liang等人通过调整Li、Cu元素含量,配制了Al-1Li-3Cu-0.5Mg(合金1)、Al-2.5Li-1.5Cu-0.5Mg(合金2)、Al-2.5Li-3Cu-0.5Mg(合金3)和Al-4Li-1.5Cu-0.5Mg(合金4)4种合金,通过测定凝固曲线、裂纹形貌分析等,发现与窄凝固温度区间合金应具有高抗热裂性相比,高Li含量或高固溶性合金元素含量,不应该表现出较低的热裂,见图8^[10]。分析其原因是:凝固过程中多种富Li元

素夹杂物分布在枝晶间,这些夹杂物颗粒是与O₂、CO₂和H₂O自发反应形成的,包括Li₂O、LiAlO₂、Li₂CO₃和LiH在内的氧化物,从而降低了界面结合能力;同时,含有这些氧化物的剩余液体填充到补缩通道内,增加了引发微裂纹的风险。这些不利因素促进了裂纹从铸件表面向内的快速传播,最终形成灾难性的裂缝。该研究有助于深入认识铸造Al-Li合金热裂形成过程,丰富合金热裂机制。

2 铸造镁合金

镁合金具有密度小、比强度高和比刚度、阻尼性能好的优点,应用越来越广泛,研究工作也越来越深入。这些工作包括:合金成分优化、力学性能提升和物理性能调控等,其目标是不断满足航空航天、汽车、电子信息、医疗器械和军事领域不断发展的需求。本次会议的有色论坛收到众多学者关于铸造镁合金的研究报告,内容聚焦于铸造稀土镁合金、铸造镁合金性能及组织调控等方面。

2.1 铸造镁稀土合金

近年来,镁稀土(Mg-RE)合金因其低密度、高比强度、抗蠕变和良好的耐点火性能、耐腐蚀性而越

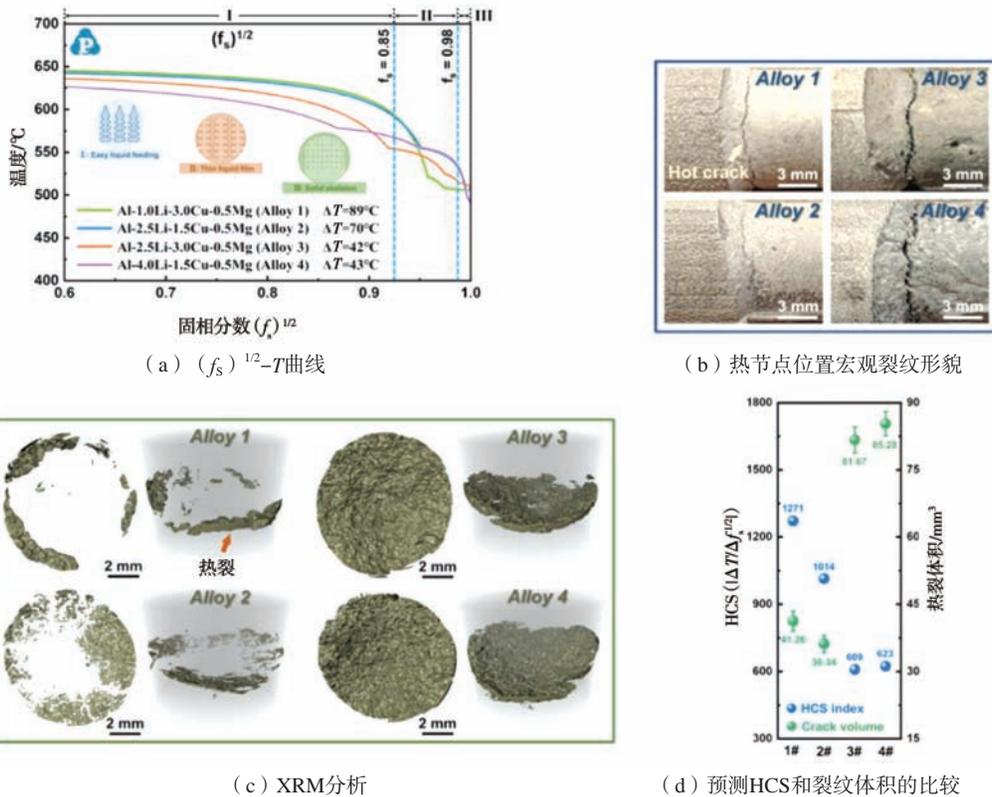


图8 4种合金HCS预测与试验结果比较

Fig. 8 Comparison of predicted and experimental results of HCS for four alloys

来越受到关注,在航天、军工、铁路和3C产品领域有着广泛的应用前景。WU Guohua等人以《铸镁稀土合金的研究与应用进展与前景》为题,对当前铸造稀土镁合金研究进行全面评述,从熔体纯化和晶粒细化角度,总结了优质镁稀土合金熔体制备进展,探讨了熔体处理对制备质量的影响^[11]。在高强度铸造镁合金方面,介绍了总稀土含量高的Mg-Gd系列合金,包括Mg-Gd-RE-Zr、Mg-Gd-Zn-Zr、Mg-Gd-Ag-Zr、Mg-Gd-Re-Zn-Zr和Mg-Gd-RE-Ag-Zr系列,这类合金的强化机制与析出相种类和分布密切相关,并评价了RE、Zn和Ag等元素的作用。其中铸造Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr合金的拉伸强度达到了423 MPa,伸长率还保持在2.6%。在镁稀土合金熔体制备方面,综述了晶粒细化和熔体纯化技术。重点阐述Zr元素细化晶粒的机制与效果,介绍了采用含RECl₃、ZrCl₄及JDMJ新型化合物减轻RE元素氧化,实现熔体纯化与晶粒细化的方法,该方法显著简化了熔体制备过程。在镁合金铸造工艺上,介绍了镁稀土合金零部件的高压压铸、低压铸造、挤压铸造和半固态成形等方法,以及不同工艺下合金在晶粒细化、铸件内部质量、尺寸精度与充型能力等方面的特性提升。据此可与与会者多视角了解铸造镁稀土合金的研究进展与发展趋势。铸造镁稀土合金常用于铸造大型零部件。由于稀土合金元素的高氧亲和力极易被

氧化,在铸件中形成夹杂物,且砂型腔内小的温度梯度引起糊状凝固不可避免地形成缩孔和微裂纹缺陷。因此,发展砂铸镁稀土合金缺陷修复技术具有重要意义。TONG Xin等人评述了砂铸镁稀土合金TIG补焊的最新进展,并进行了展望^[12]。指出TIG焊接是一种具有高实用性和经济性的焊接技术,在修复一些内部结构和凸轮表面方面具有独特的优势。结合TIG焊接技术修复砂铸Mg-RE合金,探讨了镁稀土合金可焊性、修复焊接时微观结构演变,以及焊前和焊后热处理对修复焊缝微观组织与力学性能的影响。特别是系统分析了镁稀土合金接头焊后固溶处理中出现的异常晶粒粗化及其调节方法。在此基础上,根据实际应用,总结了铸造镁稀土合金补焊存在的问题和发展趋势。

随着镁合金应用范围的不断扩大,对其性能要求也越来越高。如何进一步改善铸造镁稀土合金性能是当今研究热点之一。WANG Yamin等人为了降低Zr元素细化晶粒成本,开展了Al元素含量对铸造稀土镁合金组织和力学性能影响的研究^[13]。他们以Mg-6Gd-2Y-2Yb-1Zn-xAl合金为研究对象,设计了Al元素含量(质量分数)分别为0、0.5%、1%、1.5%、2.0%、3.0%的系列合金,系统探究了Al元素含量对合金组织和性能的影响。研究表明,Al元素的加入改变了第二相形态,平均直径从300 μm 减至41 μm ,见图9,并

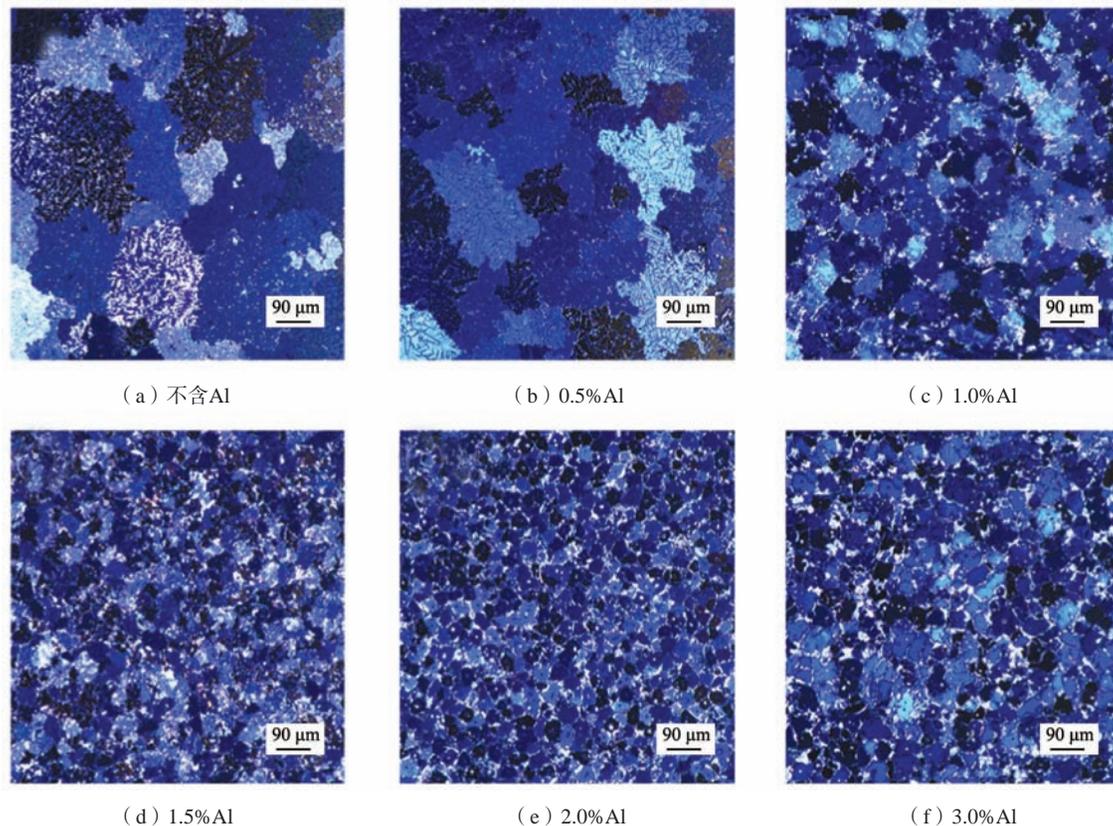


图9 不同Al含量的Mg-6Gd-2Y-2Yb-1Zn合金组织

Fig. 9 Microstructures of Mg-6Gd-2Y-2Yb-1Zn alloys with different Al contents

随着Al元素含量从0增加到2.0%，合金力学性能不断提高。Al元素最佳加入量为2.0%，此时合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到169.0 MPa、265.0 MPa和23.75%，与不含Al元素的合金相比，分别提高了8.3%、61.3%和125.9%。该研究成果为提升铸造镁合金性能，提供了借鉴途径。

2.2 铸造镁合金组织性能调控

在航空航天和军事领域，迫切需要具有足够强度的超轻镁合金来提高能源利用率，其中Mg-Li合金就是典型代表。BAI Guoning等人开展了Al含量对Mg-Li合金强度和塑性影响研究。他们运用第一性原理计算，分析Al元素含量与合金固溶和沉淀行为的关系^[14]。发现随着Al含量增加，Mg-Li-Al合金的弹性模量和抗拉强度显著提高，对伸长率影响不明显；Al含量在3%~4%时，降低固溶体堆积断层能量，提升塑性变形能力；另外，沉淀物中Li含量越低，Al含量越高，合金强度越高。该研究为Mg-Li-Al合金成分设计提供理论指导。

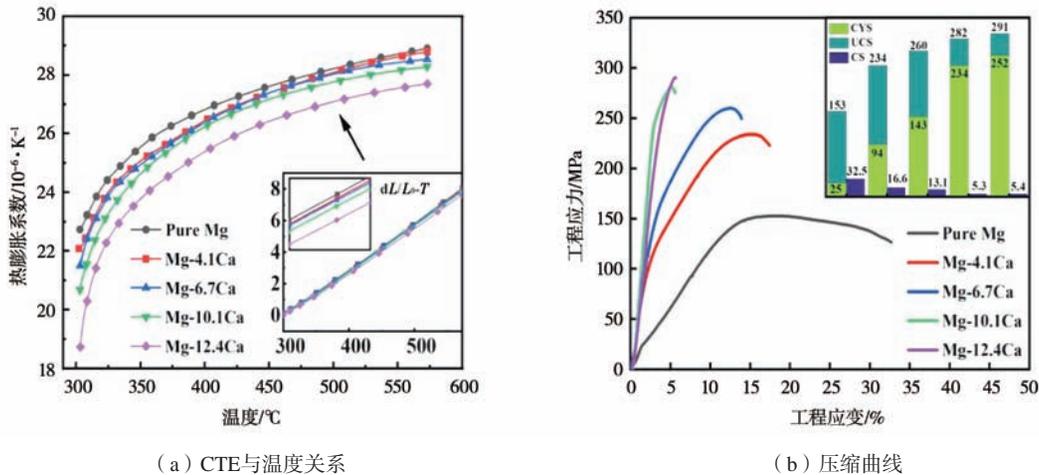
偏析是铸件常见的缺陷，直接影响性能潜力的发挥。AZ91镁合金性能优异，但砂铸时易出现与含锰相关的宏观偏析。明确含Mn相偏析机理与影响因素，

对优化大型镁合金铸件工艺，提升性能极为关键。XIN Shiwei等人开展了相关研究工作，采用不同浇注温度和Mn元素含量进行了系列试验，经过分析确定了锰相偏析机制^[15]。研究表明，为了避免形成Mn元素偏析，Mn元素含量必须降低到合金成分范围所允许的下限；在680~510 °C的温度范围内，缩短合金在缺陷部位的凝固时间，提高冷却速率，可以减少Al₁₈Mn₅相的形成；适当提高浇注温度可以防止局部过早形成Al₁₈Mn₅相。基于上述结果，提出AZ91镁合金Mn元素偏析机制，并明确解决措施。该研究对解决AZ91合金砂铸中含锰相偏析，提升大型镁合金铸件力学性能具有指导意义。

镁合金通常具有相对较高的热膨胀系数（CTE），在制备大型复杂的结构件时，高的CTE引起的热应力和体积变化可能导致凝固和冷却过程中的热开裂。因此，开发具有改进力学性能的低热膨胀系数的镁合金具有重要意义。WANG Cuihong等人针对Ca元素对镁合金热膨胀和力学性能的影响开展了研究工作，研究对象是Mg-xCa二元合金，目的是探索Ca元素对合金热膨胀系数的影响规律^[16]。试验中采用的Ca元素含量（质量分数）分别为0、4.1%、6.7%、10.1%和12.4%，分别检测了不同Ca元素含量对合金热膨胀系数

和抗压性能的影响。研究表明, Ca元素可以显著降低合金热膨胀系数, 提高强度, 见图10, 最低热膨胀系数约为 $18.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 同时高极限抗压强度达到了

291 MPa。分析认为Ca元素降低热膨胀系数和提高强度的主要原因是 Mg_2Ca 相体积分数的增加。该研究为低膨胀高强镁合金研发提供了可借鉴的方法。



(a) CTE与温度关系

(b) 压缩曲线

图10 不同Ca元素含量的Mg-xCa合金

Fig. 10 Mg-xCa alloys with different Ca element contents

2.3 镁合金铸锭生产技术

铸锭生产是进一步扩大镁合金应用需要重点解决的问题之一, 特别是大型铸锭。半连铸是稳定生产镁合金锭的有效方法。镁合金热容量、熔化热量及导热系数均较低, 凝固时散热难, 铸件中心与边缘温差大, 致使组织粗大不均, 偏析严重, 表面质量欠佳, 切割量大且凝固开裂倾向高。随着对镁合金铸锭产品规格与质量要求提升, 传统铸造技术无法满足生产细晶粒度和微观组织均匀铸锭的需求。LE Qichi等人评述了镁合金半连铸工艺的研究进展, 针对镁合金热容量低、熔化热量低、热导率低等特点, 围绕凝固过程中散热难导致大型镁合金铸锭生产出现的系列问题, 介绍了外场作用下的半连铸镁合金相关技术, 总结了外场辅助铸造工艺的技术原理, 包括电磁场、超声波场和组合物理场等, 并重点阐述了镁合金凝固过程中不同类型外场的细化机理, 以及对不同镁合金的作用效果。该报告有助于进一步发展外场辅助制锭技术^[17]。

SCHENDERA Christoph等人针对涉及镁合金铸锭和粉末的生产装备问题, 从镁坯生产的水平连铸生产线和液态镁雾化制备粉末装备等两个方面介绍了相关进展。德国GmbH公司推出新型连续水平铸造生产线(HPI)^[18]。该生产线配备浇注温度检测与控制系统, 能优化凝固条件, 保证材料性能分布更均匀, 最大程度减少边缘区域剥离损失。它可生产直径42 mm至110 mm, 表面质量高的铝合金铸锭, 将水平连铸工艺提升到新水平。在此基础上开发了第一套水平铸造线

生产镁坯或锭生产线, 用于高质量镁合金锭生产。在液态镁合金雾化制粉和球状颗粒方面, 介绍了GGG公司与合作伙伴开发的新型用于直接从液体镁中生产粉末和球状颗粒的雾化工业设备, 这种装备的雾化器对不同粒径分布的镁合金具有高度的灵活性, 可用于化合物、钢/钛、添加剂, 以及用于镁硫酸化工业。

3 铸造钛合金

3.1 钛合金组织性能调控

钛合金具有高强度、低密度、耐高温、耐腐蚀和生物相容性高等性能特点, 在航空航天、生物医学工程、海洋工程、能源工程和军工等领域得到了广泛应用, 而且具有进一步发展的潜力。本次会议铸造有色合金论坛收到了多篇相关研究报告, 研究工作多聚焦在钛合金的组织调控与性能改善等方面。

近 β 型钛合金具有较高的拉伸、剪切和屈服强度, 具有很好的热加工性能和强度-塑性匹配潜力, 适合作为变形加工原料。HAO Jiaqi等人针对一种粗粒度近 β 型钛合金热变形行为及协同再结晶机理开展研究工作, 目的是进一步提高钛合金强度和塑性。研究工作设计了Ti-4Al-6Cr-5Mo-5Nb-1.6Ta (T4655x)合金作为研究对象, 采用变形温度为1 123 K、1 173 K、1 223 K和1 273 K, 变形速率为 0.001 s^{-1} 、 0.01 s^{-1} 、 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 的工艺条件, 进行了热模拟正交试验, 分析了热变形性和组织特征^[19]。结果表明, 合金室温组织只有大型 β 颗粒, 变形活化能仅128.63 kJ/mol, 低于纯 β -Ti; 在

低应变速率下, 耗散效率系数 η 值较高, 变形的组织被充分软化, 性能较好。获得 η 最高的微观结构工艺分别为变形温度1 223 K和变形速率 0.001 s^{-1} , 其中CDRX和DDRX细粒共存, 且存在协同过程, 并给出了合金热加工图, 见图11。

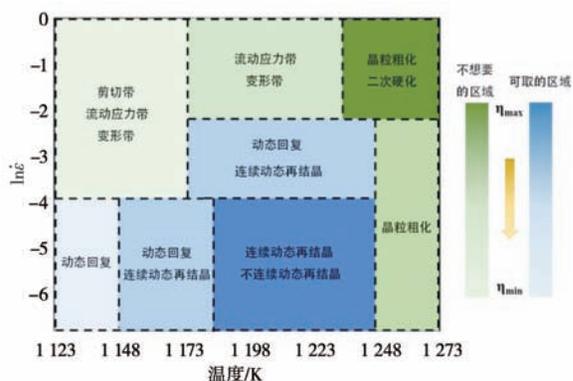


图11 Ti4655x合金热加工图

Fig. 11 Hot processing map of Ti4655x alloy

α 相是钛合金中最基本和最重要的相。尺寸较大的 α_p 晶粒可以承受更多的塑性变形, 以保证其塑性, 而尺寸较小的 α_s 薄片可以减小残余 β 基体中的位错滑移长度, 有利于提高强度。因此, 合金的最终性质由 α_p 相和 α_s 相的尺寸和体积分数决定。LI Yili等人根据Mo[eq]和d电子理论制备了5种不同Mo元素含量的Ti-xMo-4Al-4Zr-3Nb-2Cr-1Fe合金, 通过控制Mo元素含量优化了 $(\alpha+\beta)$ 相, 得到高强度韧性匹配的合金^[20]。研究表明, 通过调节Mo元素含量, β 相的相对含量增加, 随着Mo元素含量从5%增加到6%, α_p 相的长宽比从8.8减少到6, α_s 相从10.8减少到9.1; 位错密度在6%Mo时达到最大值; 合金的抗拉强度先增大后减小, 在6%Mo时达到最大值1336 MPa, 合金的韧性为 $85 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 强度增加了12%, 而韧性仅降低了4%, 见表1。并提出 $(\alpha+\beta)$ 微观结构优化引起的沉淀增强和位错增加是强度与韧性权衡的决定机制。该研究为改善钛合金铸锭后续变形加工性能提供了可行方法。

随着航空发动机性能的进一步提高, 高温钛合金

表1 Ti-xMo-4Al-4Zr-3Nb-2Cr-1Fe合金的力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of Ti-xMo-4Al-4Zr-3Nb-2Cr-1Fe alloy

合金	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	韧性/ $(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
5Mo	1 178	1 012	5.6	90
6Mo	1 336	1 233	6.9	85
7Mo	1 314	1 198	6.5	80
8Mo	1 288	1 135	6.1	76
9Mo	1 255	1 101	5.8	70

零件要求的工作温度升高, 研制耐600 °C以上的新型高温钛合金迫在眉睫。然而, 采用固溶与时效强化技术很难达到600 °C的使用温度极限。为此, LIU Tianyu等人开展了铸造高温钛合金微观组织及性能设计的研究工作, 基于团簇加原子吸附模型设计了一系列高温钛合金, 计算出理想的Ti-6Al-4V合金团簇结构和合金成分, 并试验研究了合金元素Mo、Nb、Ta和W等对铸造高温钛合金微观组织、力学性能和铸造性能的影响^[21]。结果表明, 随着[Mo]eq的增加, 合金强度在室温下增加, 但在650 °C时合金强度逐渐降低; 在Mo、Nb、Ta和W四种合金元素中, Mo元素含量的增加显著拓宽了合金的凝固范围, 导致Mo元素对高温钛合金流动性的影响最大, 其次是Ta、Nb和W等元素。该研究为高温钛合金成分优化设计提供关键指导。铸造钛合金变形加工性能并不理想, 因此通过成分设计改善其热变形性, 从而实现降低生产过程能耗和缩短周期是一项有意义的研究工作。SUN Shichen等人开展了Nb元素对钛合金超塑性和力学性能影响的研究工作^[22]。研究中配制了不同Nb元素含量的Ti-5Al-5Mo-5Cr-2Zr-xNb (wt.%, $x=3, 6, 9, 12$)合金, 对合金组织和650 °C下的高温性能进行了检测。结果表明, 随着Nb元素含量在3 wt.%~9 wt.%范围内的增加, 微观组织中的晶粒内层状 α 相和晶界 α 相体积分数和长径比降低; 合金的应力从158.6 MPa增加到307.2 MPa, 伸长率从75%增加到106%, 表现为不仅具有较高的力学性能, 而且具有超塑性。出现超塑性的主要原因是Nb元素的加入降低了 α 相体积分数, 降低了位错运动阻力。该研究阐述了Nb元素影响钛合金塑性的机理, 为制备超塑性钛合金提供了可选途径。

3.2 大型复杂结构钛合金铸造技术

目前, 轻质钛合金铸件需求走向多样化、高标准, 尤其对超大尺寸、极端重量、结构复杂、超薄壁(厚度近1 mm)及卓越服役性能有要求。市场急需可生产大型外轮廓结构、含多流动通道与多层扭曲狭窄空腔、满足承载需求的钛合金铸件, 这推动了大型复杂结构钛合金铸造技术的发展。LOU Yanchun等人针对大型复杂钛合金高性能精密铸造, 围绕大容量钛合金净化熔炼、大型复杂结构件高精度成形、大型复杂铸件的冶金缺陷控制和超大容量钛合金真空熔化设备开发四大关键技术, 介绍了中国机械研究总院沈阳铸造所有限公司开展的研究和生产工作^[23]。

在大容量钛合金悬浮净化熔化及精确成分控制方面, 该公司针对Ti-6Al-4V和Ti-5Al-2.5Sn合金, 通过研究微调主要成分间隙杂质元素, 实现了-253 °C强度与韧性的合理匹配, 发明了一种超低间隙相铸造钛合

金,同时开发了一种大容量钛合金真空悬浮+自耗性电弧混合熔融技术。

在大型复杂薄壁结构件整体精密成形及高致密凝固组织结构控制方面,该公司研究复合稀土氧化物陶瓷壳制备工艺,开发出钇与稀土复合表面层、防反溶粘结剂、柔性加固等模壳制备新工艺,解决了界面污染、型壳变形、热冲击开裂等问题。应用该技术,开发大型复杂薄壁钛合金铸件的最大尺寸超过2 700 mm,污染层厚度为 $\leq 6 \mu\text{m}$,尺寸精度为CT6-7级,粗糙度 R_a 为 $\leq 3.2 \mu\text{m}$ 。

在钛合金熔模铸造中,该公司聚焦高强度、耐热型壳/芯制备及薄壁复杂型腔变形控制难题。通过探究模具热性能对钛合金填充、凝固过程的影响,研发出低导热、高稳定性的石墨模具涂层。这一成果有效克服了石墨冷却与碳污染导致的填充能力不足,攻克了壁厚差大及截面流道变化时凝固率控制难题,实现复杂狭窄型腔的精确充型与表面清洁,成功开发并生产出最大尺寸达3.6 m、单件重量超2 000 kg且带有狭窄型腔的钛合金铸件。

在钛合金大容量真空熔炼与装备开发上,该公司携手合作伙伴开展技术研究。构建大功率真空电弧熔化数学物理模型,达成抗电弧波动与自动调节,攻克大型真空室抗压、抗振、防爆难题,研制出钛熔能力3 t、内腔4 m的超大型真空自耗熔铸炉。凭借大功率/高频感应电源技术突破及大容量冷坩埚开发,化解多站功率干扰和悬架匹配等问题,研制出世界首款100 kg悬浮炉,实现钛合金高均匀、高纯度熔融与浇注。面向未来,作者提出推动多工艺、多技术组合铸造设备技术的一体化制造、数字化与智能化的铸造工艺,以及绿色、低成本制造的钛合金铸造技术发展趋势。

3.3 TiAl 金属间化合物

TiAl金属间化合物合金因其高比强度、低密度和良好的抗蠕变性而受到广泛关注,但其固有的脆性和高温性能严重限制了在更多领域的应用。为进一步提升TiAl合金利用率,研究人员通过合金化来优化其结构与性能。其中含有较高Ta元素的TiAl合金,在800 °C以上高温下表现出良好的抗蠕变性,非常具备应用前景。LIANG Jiangshan等人开展了Ta元素对TiAl合金组织和性能影响的研究,研究对象选用具有不同Ta元素含量的Ti-46Al-8Nb-1.5Cr-xTa合金^[24]。结果表明,Ti-46Al-8Nb-1.5Cr-xTa合金由 γ 相、 α_2 相和 B_2 相组成;随着Ta含量的增加和 B_2 相的增加,微观结构呈细化的趋势;当Ta元素含量为0.2at.%时,合金的抗压应变达到最大值39%,抗压强度为1 956 MPa,而Ta元素含量为0.4at.%时,合金的抗压强度达到最大值2 316 MPa,抗

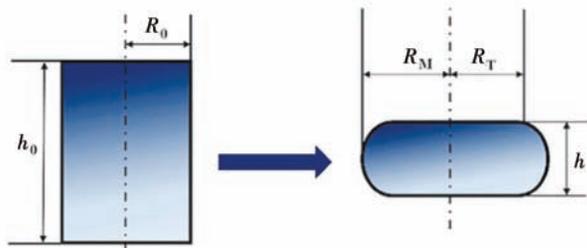
压应变为31%。分析表明,Ta元素主要通过影响合金的微观组织来改变性能,其中微观组织的细化是提高合金力学性能最重要的强化途径。

缺陷工程旨在人为地改变材料中缺陷形状、分布和数量,从而优化材料的电性性能、抗氧化性、催化性能和力学性能。目前,缺陷工程在调节材料性能的应用中仍存在一些潜在的问题,主要体现在制造和使用过程中引入缺陷的稳定性方面。为此,YANG Xiaokang等人开展了在 γ 相中引入表面缺陷,从而提高TiAl合金力学性能的研究工作^[25]。研究对象为Ti-47Al-6Nb-0.1C-xTa合金。结果表明,加入Ta元素后,层状 γ 相间形成了堆积缺陷、孪生边界和120 °C旋转边界,合金在900 °C条件下的抗拉强度和伸长率分别达到520.2 MPa和9.4%。其原因是加入Ta元素后,堆积断层能和RB形成能降低,促进了堆叠缺陷和120 °C旋转边界的形成;堆叠断层将形成双原子厚度,并将其扩大到纳米尺度,而堆叠缺陷对位错的分解,其界面会阻碍位错滑移,最终提高合金的高温性能。该研究工作阐明了Ta元素诱导表面缺陷的形成机理和强化机理,为缺陷工程在TiAl合金中应用提供了指导。

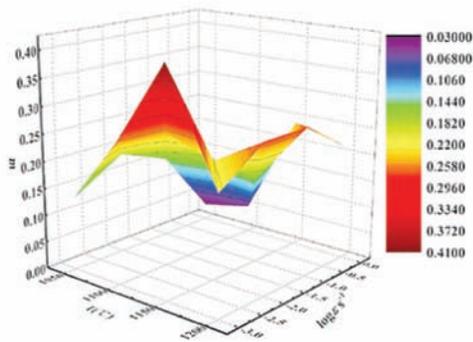
为满足TiAl合金实际应用的形状、尺寸以及性能要求,须对合金进行热变形加工,为此,首先应弄清热变形规律,进而为变形工艺制定提供依据。LIN Xuejian等人针对一种层片组织Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr-0.2Zr合金进行了热压缩试验,建立了该合金的本构方程和热加工图,并结合变形理论模型和微观结构表征,研究了变形行为和变形机理,见图12^[26]。结果表明,随着应变速率减小和温度升高,合金组织中的片层结构减少,形成更多的再结晶结构,且尺寸有所变大;根据建立的热加工图,合金最佳热加工参数区域的变形温度和应变率分别为:1 132~1 185 °C和0.001~0.002 s^{-1} ;热变形机制以DRX为主,同时位错的增值将导致亚晶界的产生;除了位错诱导再结晶晶粒形成,孪晶变形也是典型的变形机制。据此认为该TiAl合金热变形机制主要包括位错、孪晶和再结晶,其中以再结晶为主要的软化机制热变形。该研究为认识TiAl合金热变形机制、制定工艺提供理论指导。

4 外场作用下凝固技术

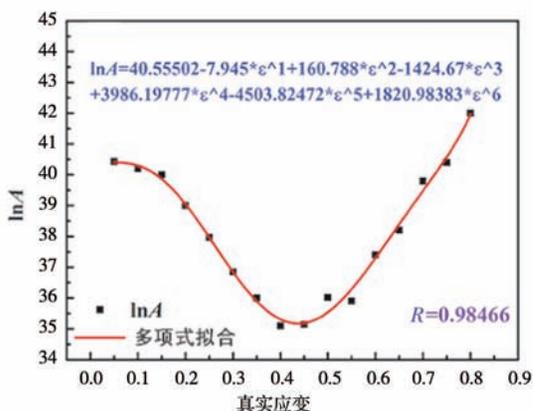
随着铸造有色合金向高性能发展,传统单一合金化手段难以满足需求,这推动了借助辅助外场提升合金化效果技术的进步。通过施加外场如:电磁场、电场和超声波等,可以改变合金凝固时的形核与长大过程,细化组织、减少偏析,达到提高合金性能的目的。本次会议的铸造有色合金论坛收到多篇外场作用下合金制备技术研究报告。报告既全面梳理了外场作



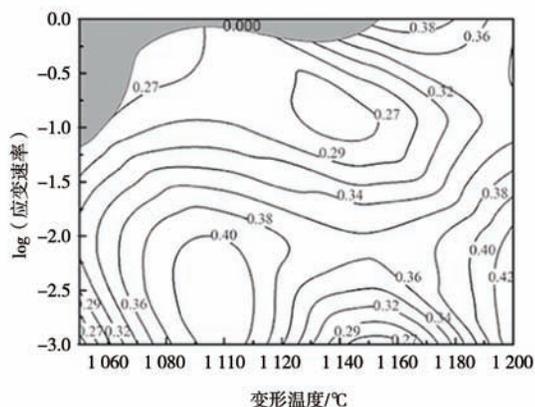
(a) 压缩变形示意图



(b) 应变速率与敏感性指数的变化情况



(c) 材料常数与真实应变的关系



(d) 应变为0.2时的加工图

图12 Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr-0.2Zr合金
Fig. 12 Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr-0.2Zr alloy

用下合金凝固的研究进展，又针对不同外场对合金凝固的影响展开研究，目的是改善合金组织、提高力学性能。不混溶合金固化时的液-液相分离现象，会形成两种特性独特甚至相反的液相，为制备具有分散或核/壳微观结构的原位金属基体复合材料，提供了独特途径。JIANG Hongxiang等人开展了外场作用下Pb-Al合金凝固组织演化研究，采用施加电场和磁场复合外场，作用于Pb-0.4wt.% Al不混溶合金凝固过程^[27]。结果表明，复合外场不但实现了液-液相分离，少数（Al）颗粒尺寸随外场强度而减小，且分布更均匀，并依此建立了描述不混溶合金冷却过程中微观组织演化理论模型。通过模拟与分析，提出了电场与磁场复合外场借助改变熔体对流和少数相液滴的成核行为来影响凝固过程的复合外场作用机制，见图13。电场与磁场复合外场是控制不混溶合金微观结构的极具潜力的方法。

ABEDUL D.等人利用研制的一种新型低频电磁脉冲波装置，制备了Al、Al+TiBAl和Al+7%Si+Sr三种合金，研究了磁场发生装置置于模具底部对试样组织的影响^[28]。结果表明，新型低频电磁脉冲波实现了试样组织的细化，脉冲磁场强度和合金成分不同，细化效果也不同，试样底部晶粒细化强于顶部，电压越高细

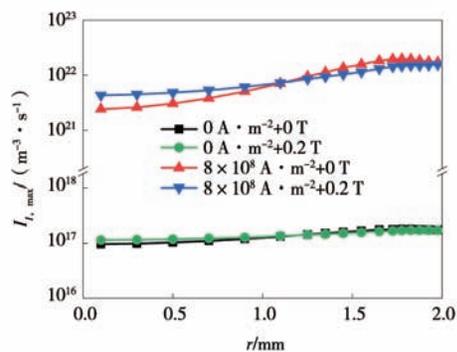
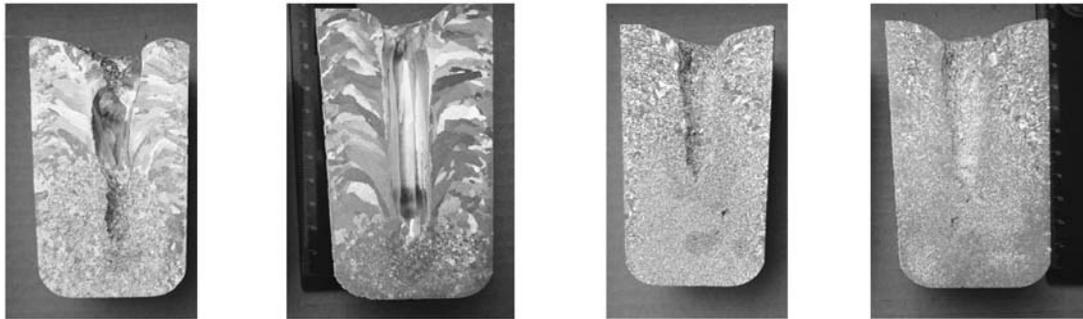


图13 不同电、磁场作用下Al液滴的峰值形核率 ($I_{l, \max}$) 沿径向位置 (r) 的变化

Fig. 13 The variation of the peak nucleation rate ($I_{l, \max}$) of Al droplets along the radial position (r) under different electric and magnetic fields.

化效果越好；当纯Al中加入TiBAl后，细化效果更明显；而对于Al+7%Si+Sr可以实现共晶组织的细化，见图14。该工作提供了无物理接触细化晶粒尺寸与控制形态的工艺方法。

YU Jichang等人开展了超声辅助熔铸制备原位TiB增强钛合金的研究工作，研究对象是Ti-4Al-6Cr-5Mo-



(1) 纯铝, 高电压 (2) 纯铝, 低电压 (3) Al+TiBAl合金, 低电压 (4) Al+TiBAl合金, 高电压

图14 3 Hz低频磁场脉冲装置置于底部不同条件和合金成分的铸锭宏观组织

Fig. 14 Macrostructures of ingots with different conditions and alloy compositions with a 3 Hz low-frequency magnetic field pulse device placed at the bottom. For pure aluminum

8Nb-xB ($x=0$ 和1.6wt.%, 称为0-1.6B), 所使用的超声波处理频率为20.5 kHz, 处理时间为120 s^[29]。研究表明, 超声波施加后, 合金中的初生 β 相粒径从1 070.8 μm 显著细化到86.9 μm , 减少了91.9%, 合金的屈服强度从809.5 MPa提高到1 070.4 MPa, 提高了32.2%, 见图15。初生 β 相细化的原因主要超声空化、声流和硼引起的结构过冷, 屈服强度提高的原因是初生 β 相细化和TiB相在承重中的支持作用。该研究为提高颗粒增强钛合金强化效果提供了新思路。

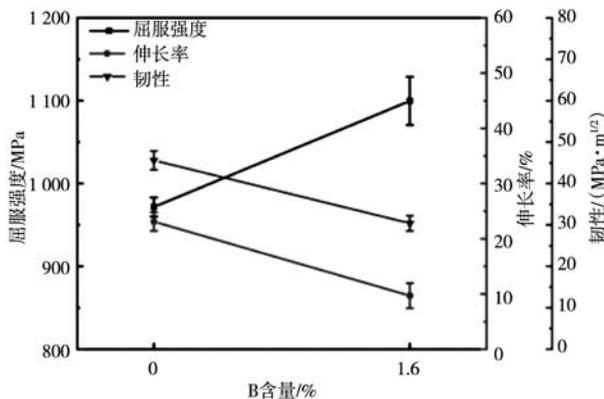


图15 超声对Ti-4Al-6Cr-5Mo-8Nb-xB合金屈服强度、断裂韧性和伸长率影响

Fig. 15 Influence of ultrasound on the yield strength, fracture toughness and elongation of Ti-4Al-6Cr-5Mo-8Nb-xB alloy

5 其他相关研究工作

本次会议铸造有色合金论坛的报告和论文还涉及其他铸造有色合金和相关技术。

YANG Wenchao等人研究了对流凝固对锌铝合金晕环形成的影响^[30]。凝固过程的强制对流是利用一种双螺杆挤出机, 在不同温度和不同时间下对熔体进行剪切而实现的。报告结果显示, 常规凝固条件下, 在Al>5wt.%的过共晶Zn-Al合金中, 富铝初生相周围存

在富锌晕环, 而在亚共晶和共晶Zn-Al合金没有出现。当施加对流后, 过共晶Zn-Al合金富锌晕环也从富铝相周围完全消失。出现这一现象的原因被认为是强制对流的温度均化作用, 使共晶生长的两个相同时形核, 相互抑制作用小, 进而阻止了形成晕环的第三种相出现。据此, 研究者提出的观点是: 所有系统在强对流下的凝固过程中, 无论其在常规条件下的物理性质如何, 均会导致凝固过程中先前富铝相上的晕环消失。

BRUDNY A.等人开展了轴承壳滑动层轴承合金熔铸工艺条件优化研究, 旨在探明不同熔炼和铸造工艺条件对添加Cu和Sb元素的商业锡基合金组织和硬度影响, 目的是消除脆性相对合金塑性敏感性的负面作用, 同时保持合金适当的承重性能^[31]。结果表明, 在Sb11Cu6合金的凝固过程中, 采用不同熔炼和凝固散热条件, 可以控制SnSb和Cu₆Sn₅相沉淀物的形貌和尺寸, 改变脆性Sb-Sn相的比例和形态, 实现细化和均匀分布, 而脆性相的细化和分布均匀化, 没有导致布氏硬度的增加。该研究工作对于改善轴承合金的性能具有工程价值。

ZHANG Jingyu等人针对Zr元素含量对K4169合金组织及性能影响开展研究工作, 目的是通过Zr元素改善合金铸造组织与性能^[32]。试验中Zr元素含量分别为0.03wt.%、0.05wt.%和0.09wt.%, 采用标准的热处理工艺。研究表明, 在K4169合金中加入Zr元素后, 铸造合金的沉淀相与合金组织的原始组成虽然没有变化, 但热处理后的合金组织更均匀、偏析少、相形成范围更窄, 且随着Zr元素含量增加, 典型热处理合金的硬度和屈服强度先增加后减小, 伸率先减小后增大。该研究工作对于改善K4169合金组织与性能具有一定的参考价值。

随着现代航空航天器和其他先进装备设备性能要求的不断提高, 对铸件内部质量的要求也越来越受到重视。小尺寸氧化物双膜缺陷也从被忽视到备受关

注。ZHANG Lunyong等人在Al、Mg和Cu等多种合金的铸造产品中都观察到了这种氧化物双膜缺陷，发现其具有复杂的结构组成及不同的形态，其形成机制也存在差异，但均与铸造相关材料和过程有关，并揭示了氧化物双膜缺陷形成与凝固过程温度场和充型过程流场的关系。这些观点对认识氧化物双膜缺陷形成和制定消除工艺有指导意义^[33]。NiTi形状记忆合金是用于各种行业的重要功能材料，但塑性有限，对变形参数敏感，加工成形困难。为此，FU Chunzhe等人开展了NiTi合金中加入Hf元素对其热变形性影响研究，目的是改善合金性能，获得热变形规律^[34]。研究工作采用的合金是56Ni-32Ti-12Hf (wt.%)，研究内容包括热变形过程中的合金微观组织演化、机器学习方法构建本构关系，旨在通过变形本构关系建立，为热加工参数选择提供指导。研究工作通过对56Ni-32Ti-12Hf合金进行热模拟试验、组织分析和机器学习方法研究，建立了一种基于改进机器学习算法的预测流动应力模型，并绘制了热加工图谱。热加工图谱表明，合金最佳热加工参数范围为：温度在875~975 ℃，应变速率0.001~1 s⁻¹；在最佳加工区间内，软化机制为不连续动态再结晶和连续动态再结晶。这为该合金变形工艺制定提供了一定参考。

铸造生产常使用石墨材料，用于制造结晶器、坩埚或加热器等部件，这就要求这些石墨材料应具有高硬度、高弯曲和抗压强度、抗磨料磨损、耐液态金属腐蚀和抗氧化等性能。为了进一步提高铸造过程使用的石墨部件性能，JUSZCZYK B.等人对采用浸渍苯酚-甲醛树脂与添加氮化硼的石墨结晶器和浸渍氮化硼悬浮液的石墨加热器，分别进行了应用评估^[35]。结果表明，当浸渍苯酚-甲醛树脂与添加氮化硼的石墨用于制造CuNi2Si合金结晶器时，与原来的相比，结晶器的内外表面没有观察到过度的损伤，而即使出现磨损的地方有金属痕迹，也不会导致铸棒表面质量恶化或尺寸变化，可以继续使用；在用于制造直径为21 mm的CuNi2Si合金棒材生产的结晶器时，铸造拉拔速度比标准提高了12%，铸棒内外质量也未发生变化；当浸渍氮化硼悬浮液的石墨用于制造加热器时，可使用时间延长了31%。这表明新型处理工艺能提升石墨部件生产效率，延长其使用寿命。

6 展望

在第75届世界铸造会议铸造有色合金分论坛中，

各位专家学者展示了他们对某一领域研究现状的评述和研究成果，充分反映了当今铸造有色合金研究工作进展和焦点。然而，随着先进装备的发展和节能减排要求的不断提升，铸造有色合金的研究工作必将持续深入，从而进一步推动其应用。通过对本次会议报告和论文回顾，笔者认为，未来铸造有色合金及组织及性能调控应围绕以下三大方面开展工作。

(1) 合金性能的强韧化。面对航空航天和汽车高性能发动机等对材料性能要求极为苛刻的领域需求，未来将不断研发出具有更高强度和韧性的铸造有色合金。例如：通过优化合金成分、改进热处理工艺、凝固过程控制技术和特种成形技术等，开发出新型高强韧铝、镁、钛等合金和TiAl金属间化合物，使合金强度和韧性比传统合金显著提高，能够承受更大的载荷和冲击，满足后续变形加工成形性要求，进一步实现轻量化，以及扩大铸造有色合金在极端服役环境下的应用等。

(2) 结构功能一体化。面对先进装备部件对力学性能和物理性能一体化需求，应进一步解决合金力学与物理性能匹配问题，以满足部件在高性能的前提下，兼顾耐磨、耐热、耐腐蚀、导电和导热等功能性要求。例如：通过成分优化、微合金化、热处理和制备技术创新等，对合金组织进行调控，在提高合金导热性、导电性、耐高温性、耐磨性和耐腐蚀性的同时，确保合金力学性能损失小或进一步提高，实现铸造有色合金力学与物理性能的更佳匹配，从而进一步扩大有色合金在飞行器、信息技术和军事装备等领域元器件上的应用。

(3) 绿色可持续发展。面对环保和资源循环利用等要求，未来铸造有色合金将在节能减排方面发挥更重要的作用。例如：通过完善的废铝回收体系，提高废铝的回收利用率，有效节约铝资源及减排；通过优化合金成分，减少贵重稀土元素在镁合金中的加入量，节约稀土资源，以及发展新的熔体保护技术，降低镁合金生产过程的氧化烧损，提高镁合金利用率；通过对钛及钛铝合金成分设计与优化，以及新型铸造技术与材料研发，逐步实现减少或替代重金属元素和消除铸造过程表面污染等目标，降低原材料成本和提高材料利用率等，实现生产成本的进一步降低。这些研究必将进一步提升铸件的市场竞争力，促进铸造生产低碳绿色化发展。

参考文献:

- [1] LI Xiangping, MA Juncheng, XIA Shaohua, et al. Research on double stage solid solution/aging heat treatment process of high strength AlCu5Mn alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [2] SHI Dequan, YU Wenbo, GAO Guili. Effect of electro-pulse on microstructure of Al-Cu-Mn-Zr-V alloy during aging treatment [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [3] LIAO Hengcheng, YAN Tianrui, WU Yuna. Divorced growth of eutectic solidification of hypereutectic Al-Si alloy in sand casting and its influence on mechanical properties [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [4] HAN Chengcheng, HUANG Hao, WU Yuna, et al. Al-Si divorced eutectic solidification in hypereutectic Al-Si alloy by counter-gravity casting [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [5] HU Lijun, ZHU Yuxiao, ZHANG Haichao. Research on the application of A356.0 aluminum alloy semi solid slurry technology in gravity casting [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [6] KAYANI Saif Haider, EUH Kwangjun, LEE Jung-Moo, et al. Effect of as-cast microstructure on precipitation behavior and thermal conductivity of Al-Si-Mg alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [7] YANG Dongyang, SONG Dongfu, TANG Chuanyao, et al. The effect of Fe content on the microstructure and properties of T6-treated A356 aluminum alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [8] NIU Yunxia, ZHANG Lizhi, WAN Jie, et al. Cooling rate dependence of iron-rich phase in A356 aluminum alloy and its effect on mechanical properties [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [9] YUE Chunyu, ZHENG Bowen, SU Ming, et al. Effect of alloying elements and liquid film in late solidification stage on hot tearing of Al-Cu alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [10] ZHANG Liang, GUO Youjie, WU Guohua. Unveiling the origin of severe hot cracking susceptibility in Al-Li alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [11] WU Guohua, TONG Xin, DING Wenjiang. Recent developments and prospects on the research and application of cast magnesium rare-earth alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [12] TONG Xin, WU Guohua, DING Wenjiang. Latest advancements and prospects in TIG repair welding of sand-cast magnesium rare-earth alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [13] WANG Yamin, FENG Yicheng, FU Yuanke, et al. Effect of Al content on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Gd-Y-Yb-Zn alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [14] BAI Guoning, HOU Hua, ZHAO Yuhong. Effect of Al solution and precipitation on strength and plasticity in Mg-Li-Al [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [15] XIN Shiwei, LI Zehua, FENG Zhijun, et al. Analysis and solution of macroscopic segregation of Mn-containing phase in sand casting of AZ91 magnesium alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [16] WANG Cuihong, DONG Zhihua, JIANG Bin. Influence of Ca on thermal expansion and mechanical properties of Mg [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [17] LE Qichi, LIAO Qiyu, ZHAO Dazhi, et al. Research progress on semi-continuous casting of magnesium alloys under external field [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [18] SCHENDERA Christoph, GEISHÜTTNER Gerhard, KRALY Andreas. Magnesium on the brink or beginning of a new area [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [19] HAO Jiaqi, YU Jichang, FANG Hongze, et al. Study on the thermal deformation behavior and collaborative recrystallization mechanism for a coarse-grained near- β titanium alloy Ti6455x [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [20] LI Yili, SUN Shichen, XUE Xiang, et al. A novel β -Ti alloy with both strength and toughness designed based on mo equivalent and d-electron theory [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [21] LIU Tianyu, LI Xinqi, QIU Weichen Qiu, et al. Study on the microstructure and properties of cast high-temperature titanium alloy based on cluster model design [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [22] SUN Shichen, FANG Hongze, LI Yili, et al. Influence of Nb modification on the superplastic behavior and mechanical properties of titanium alloy at 650 °C [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [23] LOU Yanchun, ZHAO Jun, LIU Shibing, et al. Research on high-performance precision casting technology for large and complex titanium alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [24] LIANG Jiangshan, MI Liao, ZHOU Lingyan, et al. Influence of tantalum on the microstructure and properties of Ti-46Al-8Nb-1.5Cr alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [25] YANG Xiaokang, ZHOU Linyan, LIANG Jiangshan, et al. Introduction of surface defects in the γ phase improves the mechanical

- properties of TiAl alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [26] LIN Xuejian, HUANG Hongjun, YUAN Xiaoguang, et al. Study on high temperature deformation behavior and deformation mechanism of a Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr-0.2Zr alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [27] JIANG Hongxiang, LI Yanqiang, ZHAO Jiuzhou, et al. Microstructure evolution of immiscible alloy solidified under the effect of composite electric and magnetic fields [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [28] ABEDUL D, HURTATO I, HERRERO N, et al. Microstructural modification in aluminum alloys by means of a low frequency electromagnetic field applied during the solidification [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [29] YU Jichang, LI Yili, SUN Shichen, et al. Preparation of in-situ TiB reinforced titanium alloys with fine TiB phase via ultrasound-assisted fusion casting [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [30] YANG Wenchao, JI Shouxun. Effect of convection solidification on the halo formation in Zn-Al alloys [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [31] BRUDNY A, MALETA M, CWOLEK B, et al. Research and optimization of the conditions of the melting and casting process of bearing alloys intended for sliding layers of bearing shells [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [32] ZHANG Jingyu, DU Qian, ZHANG Qinrui, et al. Effect of trace mounts of Zr on microstructure and properties of K4169 alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [33] ZHANG Lunyong, CAO Fuyang, SUN Jianfei. New viewpoints on the oxide film defects in advanced alloy casting [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [34] FU Chunzhe, HUANG Hongjun, ZHOU Ge, et al. Exploring microstructure evolution and machine-learning method during hot deformation of 56Ni-32Ti-12Hf alloy [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.
- [35] JUSZCZYK B, BRUDNY A, KULASA J, et al. Investigation of the properties of carbon product prototypes in real conditions conducted in the process of melting and continuous casting of non-ferrous metals simulating real conditions [C]// The 75th World Foundry Congress, Deyang, 2024.

Research Progress and Prospect of Casting Nonferrous Alloy —— Non-Ferrous Alloy Forum of the 75th World Foundry Congress

YUAN Xiao-guang^{1,2}, WANG Yun-xia^{1,3}, ZHENG Bo-wen⁴

(1. Foundry Institution of China Mechanical Engineering Society, Shenyang110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Key Laboratory of Precision Forming and Intelligence for Complex Components, Shenyang110870, Liaoning, China; 3. China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang110870, Liaoning, China)

Abstract:

With the continuous development of the equipment manufacturing industry, cast non-ferrous alloys are being applied more and more widely. The requirements for the performance of the castings are also getting higher and higher, which promotes the continuous in-depth research on the cast non-ferrous alloys. From October 25th to 30th, 2024, the 75th World Foundry Congress was successfully held in Deyang City, Sichuan Province. As one of the most dynamic research fields in foundry, a forum on cast non-ferrous alloys was set up at this congress. A total of 97 relevant papers from 9 countries were collected, and 18 famous experts and scholars at home and abroad were invited to give special reports. This paper collates the relevant reports of this forum, summarizes and comments from five main aspects, including Al, Mg, Ti and other alloys, solidification under the action of external force fields, and other related research work, and looks forward to the future development. The research reports of the non-ferrous forum at this conference basically reflect the current research hotspots in this field, point out the direction for further promoting the technological progress of the cast non-ferrous alloys, and will thus promote the further application of the cast non-ferrous alloys.

Key words:

the 75th world foundry congress; review; non-ferrous alloys; prospect