

真空离心铸造细晶 K418 高温合金的组织与力学性能

陈斗南¹ 陈奕帆¹ 吴岱霖¹ 王怡然² 王宇航¹ 刘国怀³

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 沈阳理工大学环境与化学工程学院, 沈阳 110159; 3. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

摘要 采用真空离心铸造技术制备了 K418 高温合金细晶铸环, 并对其微观结构、力学性能及断裂行为进行了研究。该离心铸坯晶粒度达 4 级, 并均匀分布着尺寸为 200~300 nm 的 γ' 相。结合数值模拟结果, 分析了高速旋转产生的梯度流场和快速冷却条件对充型凝固过程和晶粒组织的影响。等轴晶区表现出优异的力学性能, 抗拉强度达 1 115.5 MPa, 伸长率为 12.4%。断口分析揭示了以微孔聚合为主的断裂机制, 裂纹沿晶界、 γ/γ' 界面、碳化物周围及 γ/γ' 共晶相扩展。

关键词 K418 高温合金; 真空离心铸造; 微观组织; 力学性能; 数值模拟

中图分类号 TG146.1+5; TG244⁺.3; TG249.4

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240429

Microstructure and Mechanical Properties of Fine-crystalline K418 Superalloy by Vacuum Centrifugal Casting

CHEN Dounan¹, CHEN Yifan¹, WU Dailin¹, WANG Yiran², WANG Yuhang¹, LIU Guohuai³

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819; 2. College of Chemical Engineering and Environment, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159; 3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: The microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of fine-crystalline K418 superalloy ring prepared by vacuum centrifugal casting technology were investigated. The cast ring exhibits grain size of ASTM 4, with uniformly distributed γ' precipitates with diameter of 200~300 nm. Numerical simulation was employed to elucidate the effects of gradient flow fields induced by high-speed rotation and rapid cooling on the solidification process and microstructure. Superior mechanical properties are achieved in equiaxed region, where the tensile strength and elongation reach up to 1 115.5 MPa and 12.4%, respectively. Fractographic analysis reveals that fracture mechanism is dominated by microvoid coalescence, with crack propagation along grain boundaries, γ/γ' interfaces, carbide peripheries, and γ/γ' eutectic phase.

Key Words: K418 Superalloy, Vacuum Centrifugal Casting, Microstructure, Mechanical Properties, Numerical Simulation

收稿日期: 2024-10-23; 修订日期: 2024-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071065); 中央高校基本科研业务费资助项目(N2007007); 国家重点研发计划资助项目(2016YFB-0301201); 工信部重点新材料研发及应用国家科技重大专项(2025ZD0610001)

第一作者简介: 陈斗南, 男, 2004 年出生, 本科生, E-mail: 17873325458@163.com

通信作者: 刘国怀, 男, 1985 年出生, 副教授, E-mail: liugh@ral.neu.edu.cn

引用格式: 陈斗南, 陈奕帆, 吴岱霖, 等. 真空离心铸造细晶 K418 高温合金的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(11): 1 715-1 721.

CHEN D N, CHEN Y F, WU D L, et al. Microstructure and mechanical properties of fine-crystalline K418 superalloy by vacuum centrifugal casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(11): 1 715-1 721.

- [14] WOYDE M, MOHRBACHER H. The use of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear resistant tribosystems[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 49: 212-218.
- [15] NEDFORS N, TENGSTRAND O, LEWIN E, et al. Structural mechanical and electrical-contact properties of nanocrystalline-NbC/amorphous-C coatings deposited by magnetron sputtering[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206(2-3): 354-359.
- [16] GENG R M, CORNISH L A, WOYDT M, et al. Microstructure mechanical and machining properties of LPS and SPS NbC cemented carbides for face-milling of grey cast iron[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2018, 73: 111-120.
- [17] 刘玉宝, 李麟, 张先恒, 等. 碳化铌的合成方法及应用研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(1): 66-69.
- [18] 肖冬明, 张振华, 陈正乾, 等. 羰基铁粉生产工艺及用途概述[J]. 山西冶金, 2024, 47(7): 91-92, 110.
- [19] 吴小贤, 李红霞, 刘国齐, 等. 高能球磨合成纳米碳包覆 α - Al_2O_3 复合物[J]. 无机材料学报, 2013, 28(3): 261-266.
- [20] HUANG J Y. HRTEM and EELS studies of defects structure and amorphous-like graphite induced by ball-milling[J]. Acta Materialia, 1999, 47(6): 1 801-1 808.
- [21] 齐效文, 张瑞军, 杨育林. 高能球磨时间对碳质中间相结构及其高温摩擦磨损特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(2): 142-146.
- [22] 汤春峰, 潘峰, 曲选辉, 等. 超固相线液相烧结 Inconel 718 合金[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(12): 1 366-1 368.
- [23] 耿文霞, 王秋林, 万斌, 等. TiC_p/Fe 复合材料的界面反应[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(4): 51-56.
- [24] 于淞百, 闵凡路, 姚占虎, 等. 烧结保温时间对超粗晶 WC-10Co 硬质合金微观结构及性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49(10): 89-95.
- [25] MARINCA F T, CHICINĂȘ I, PRICĂ C V, et al. Nickel ferrite powder obtained by high energy reactive ball milling[J]. Materials Science Forum, 2011, 672: 145-148.

(编辑: 彭瑾)

K418 是镍基沉淀硬化型等轴晶铸造高温合金, 以 γ' 相为沉淀强化相, 具有良好的综合性能、长期组织稳定性和铸造工艺性能^[1-2], 适用于制作在 900 °C 以下工作的热端转动和静止精密铸件, 如涡轮工作叶片、导向叶片、导向器和整铸涡轮等^[3]。合金成分简单, 密度较低, 通常在铸态下使用^[4-5]。然而, K418 高温合金的铸造过程中经常面临如组织不均匀、缺陷形成等挑战, 这直接影响合金的最终性能和使用寿命^[6]。

离心铸造具有工艺简单、金属液利用率高、无需砂芯即可获得中空铸件、铸件组织致密等特点^[7-9]。随着工艺的不断改进, 离心铸造已能应用于中高合金钢、镁合金、钛合金等多种材料的制备, 甚至可用于制备梯度材料和复合材料等新型材料^[10-11]。真空铸造技术的引入进一步提高了铸件的质量。在隔绝空气的环境下进行浇注, 可避免气孔等常见铸造缺陷的形成^[12]。将离心铸造与真空铸造相结合, 不仅继承了两种工艺的优点, 还能获得质量更高、缺陷更少的铸件, 为高性能合金的制备提供了新的可能性^[13-14]。对于 K418 高温合金, 真空离心铸造技术为制备大型铸件中的细晶结构提供了独特的优势。

本研究旨在探讨真空离心铸造技术在制备细晶 K418 高温合金铸坯中的应用, 重点关注晶粒细化、力学性能提升, 以及凝固过程中温度场、流场对最终组织形成的影响。通过试验研究与数值模拟相结合, 深入分析真空离心铸造的充型凝固过程, 等轴晶区的形成机制及其对性能的影响, 旨在为 K418 高温合金的性能优化和工艺改进提供参考。

1 试验材料和方法

K418 高温合金的化学成分见表 1。在自行研制的真空离心铸造设备上制备 K418 高温合金铸环, 见图 1, 离心铸造设备包括感应加热炉、浇注装置、氧化铝坩埚、离心电机、45 号金属模具、保温包以及机械真空泵等。

表 1 K418 高温合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of K418 superalloy							
w_B							
C	Cr	Fe	Mo	Al	Ti	Nb	Ni
0.12	12.8	18.9	4.32	6.12	0.86	2.12	余量

将 K418 高温合金原料投入熔炼坩埚内, 待抽真空至 10 Pa 以下时, 开启感应加热炉进行加热, 使合金熔液升温至 1 420 °C, 保温 10 min 后, 启动离心电机, 调整转速至 600 r/min 后, 将坩埚内的金属液平稳浇注至旋转的模具中; 待完全凝固后, 停止旋转模具; 冷却至室温后, 打开真空泵, 取出模具进行脱模, 得到 K418 离心

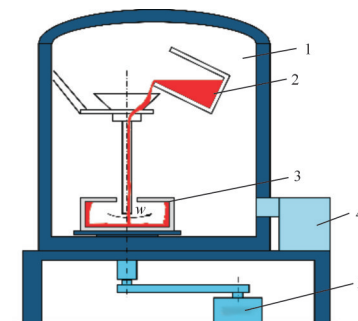


图 1 真空离心铸造工艺装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of vacuum centrifugal casting process device

1. 氧化铝坩埚 2. 浇注装置 3. 离心模具 4. 真空泵 5. 离心电机
铸环, 见图 2。得到的离心铸造环坯尺寸为: 外径 $D_0=320$ mm、内径 $d_0=260$ mm、高度 $h=80$ mm、壁厚 $B_0=30$ mm。



图 2 K418 真空离心铸环

Fig.2 K418 vacuum casting ring

真空离心铸造获得的 K418 合金铸环沿径向采用线切割机截取金相试样, 使用 SiC 砂纸依次进行 240、400、800、1 200、2 000 号逐级研磨, 再采用 2.5 μ m 和 1.0 μ m 金刚石悬浮液在绒布抛光盘上抛光。使用 BX53M Olympus 光学显微镜(OM)观察铸造环的径向显微结构, 金相试样腐蚀剂为 30 mL 的 HCl+10 mL 的 HNO₃。利用 Image-Pro 软件在光学组织图上进行定量分析。用 Zeiss Ultra 55 扫描电镜观察断口的显微组织和形貌。拉伸试样按照 GB/T228.1-2021 中推荐的 R7 圆截面比试样设计, 从铸环沿弦向切割试样, 在 SHIMADZU AG-X plus 万能试验机上以 0.1 mm/min 的应变速率进行试验。

在 Solidworks 软件中绘制铸造环和模具的 3D 模型, 并在 ProCAST 软件中执行网格划分, 见图 3。在 ProCAST 软件中设置工艺条件, 并根据表 1 设置合金的材料类型。通过计算得到 K418 高温合金热物性参数随温度的变化, 见图 4。

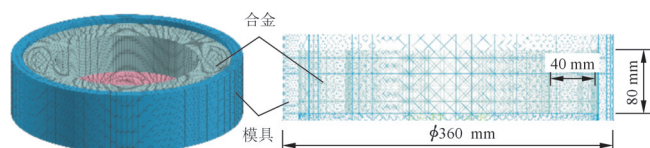


图 3 铸造环和模具的模拟模型

Fig.3 Simulation model of casting ring and mold

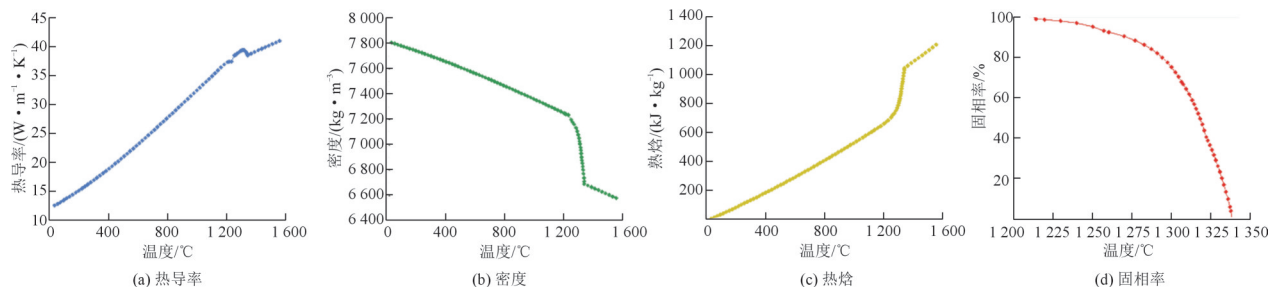


图4 K418高温合金的热物性参数

Fig.4 Thermophysical parameters of K418 superalloy

2 试验结果分析

2.1 微观组织

图5为K418高温合金真空离心铸造件的整体纵截面结构,呈现出两个主要区域:外层等轴晶区和内层柱状晶区。其中,等轴晶区约占铸环横截面积的73%。在靠近铸件外侧的区域,等轴晶粒最为细小和均匀,平均晶粒尺寸为 $68 \mu m$ 。随着向内部移动,等轴晶的形态和尺寸保持相对稳定,仍然维持着细小均匀的特征,平均晶粒尺寸为 $74 \mu m$ 。这种等轴晶结构在整个外层区

域保持一致,显示了良好的组织均匀性。内层柱状晶区位于铸件的最内部,其微观结构以粗大的柱状晶为主。在靠近等轴晶区的过渡区域,可以观察到等轴晶向柱状晶过渡的现象,柱状晶的比例随着向内部移动而显著增加,其树枝晶一次枝晶间距平均为 $721.2 \mu m$,二次枝晶间距为 $112.8 \mu m$ 。

图6为K418铸环坯中的析出相形貌。从图6a可以看到, γ 基体中分布着大量细小的 γ' 析出相,呈规则的立方体形态,平均尺寸为 $200 \sim 300 nm$,在 γ 基体中高度均匀分布。从图6b中可以看到,合金中存在的碳

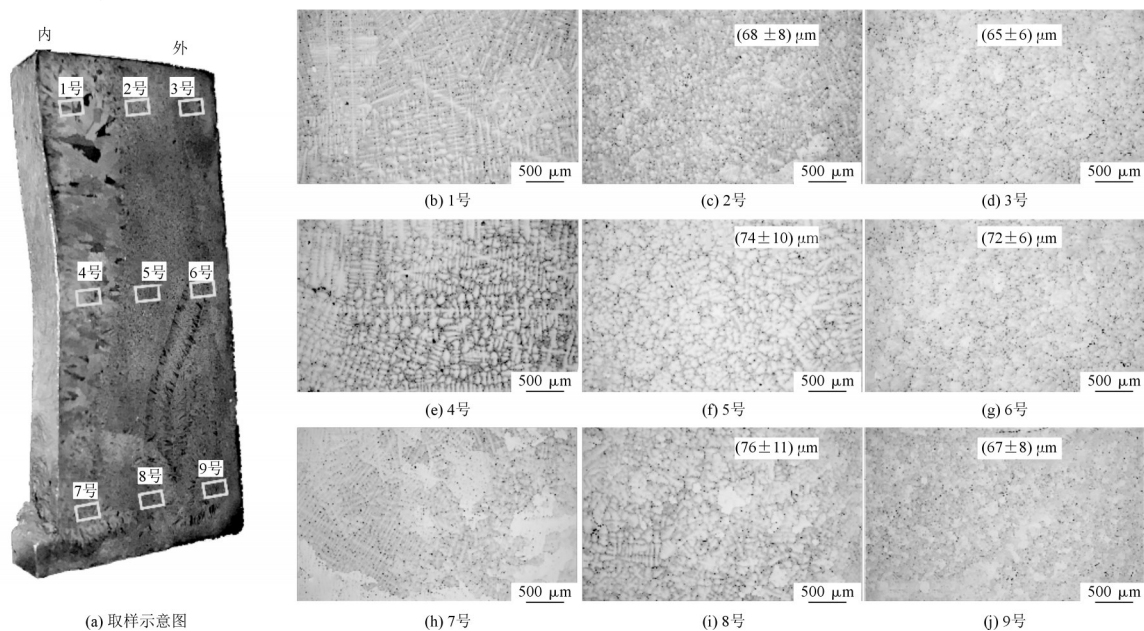


图5 K418合金宏观与微观形貌

Fig.5 Macrostructure and microstructure of K418 alloy

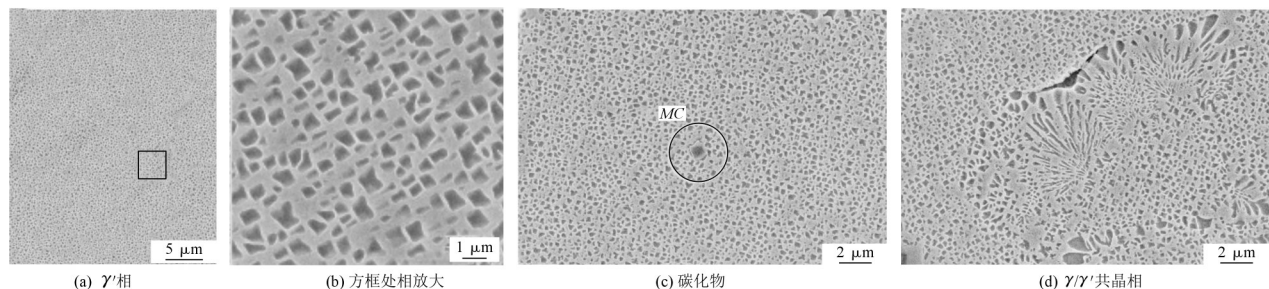


图6 K418铸环坯的析出相形貌

Fig.6 Morphologies of precipitated phase of K418 ring billet

化物呈不规则的块状,尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。在图6c中出现了 γ/γ' 共晶相,其同样呈现不规则的块状或长条状,尺寸为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$,主要分布在枝晶间区域。

2.2 力学性能

分别对铸环内中外部分进行拉伸性能测试,拉伸曲线见图7。可以看出,外层区域表现出最优的力学性能,抗拉强度达到 $1\ 115.5\ \text{MPa}$,伸长率为 12.4% 。中层区域的性能略低,但仍保持在较高水平,抗拉强度为 $1\ 018.6\ \text{MPa}$,伸长率为 10.8% 。内层区域的应力-应变曲线呈现显著不同的特征。内层试样的曲线在较低应变($820\ \text{MPa}$)下即终止,表明其发生了过早失效。

图8为K418高温合金等轴晶区在室温条件下进行拉伸试验后的断口形貌。从图8a观察到明显的起伏表面形貌,表明材料在断裂过程中经历了一定程度的塑性变形。断口表面还可观察到多条二次裂纹,其通常与主裂纹呈一定角度,反映了材料在受力过程中应力分布的复杂性。在高倍率下(见图8b和图8c),断口表

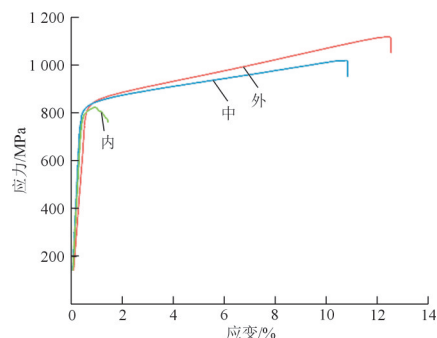


图7 铸环的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of casting ring

面可以看到大量尺寸为 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ 的微孔,呈现出近似等轴的形态,深度适中,边缘较为圆滑。微孔的尺寸分布相对均匀,未观察到明显的尺寸梯度或区域性差异。微孔底部可以观察到细小的颗粒,这可能是作为微孔形核的第二相粒子,如碳化物或其他强化相。微孔的均匀分布和形态特征表明微孔形核、生长和聚合是该材料的主要断裂机制。这种机制通常发生在具有一定塑性的金属材料中,与 12% 的伸长率相符。

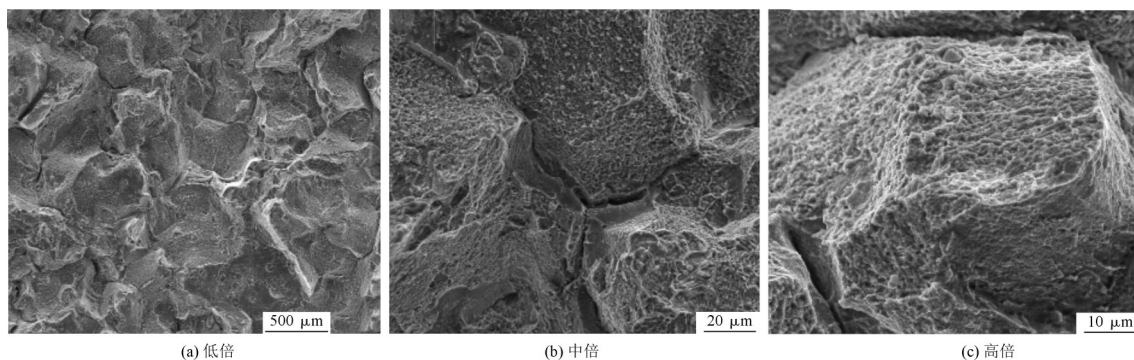


图8 K418高温合金的室温拉伸断口形貌

Fig.8 Fracture morphologies of K418 super alloy

图9为K418高温合金等轴晶区的裂纹形貌。从图9a和图9b可以清晰看到晶界开裂,裂纹沿着晶界传播,形成了典型的“之”字形路径。在裂纹附近可以观察到MC型碳化物的分布,呈块状或不规则形态,见图9b,说明这种不均匀碳化物容易成为应力集中源,促进裂纹的形核和扩展。从图9c可以看出, γ/γ' 共晶通常形成于枝晶间最后凝固的区域,其形貌特征为 γ 相基体中嵌入粗大的 γ' 相。裂纹倾向于沿着 γ/γ' 界面传播,这表明这些区域可能是材料中的另一个薄弱环节。由图9d可知,

靠近裂纹边缘的 γ' 相不再保持完美的立方体形状,许多 γ' 相颗粒呈现出轻微的变形或扭曲。 γ/γ' 界面变得模糊或不连续,这表明在变形过程中发生了界面滑移或局部塑性变形。尽管 γ' 相经历了变形,但大多数 γ' 相颗粒仍然保持相对完整,未观察到大量 γ' 相颗粒被直接切断或完全破碎的现象。在一些 γ' 相颗粒周围可以观察到微小的裂纹或空洞,特别是在 γ' 相的角落或边缘处。 γ 基体在 γ' 相颗粒间显示出明显的塑性变形特征,表现为基体区域的不规则形貌和局部拉长。结果表明,在

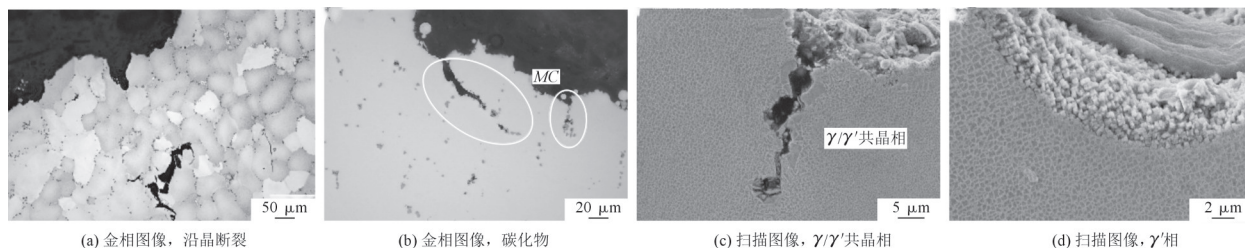


图9 K418高温合金等轴晶区的断口截面形貌

Fig.9 Cross-sectional morphologies of fracture of K418 super alloy at equiaxed region

拉伸过程中, γ' 相并非直接断裂, 而是经历了复杂的变形过程。裂纹的传播主要通过 γ/γ' 界面和 γ 基体的变形来实现, 而 γ' 相本身则表现出较高的抗断裂能力。

3 讨 论

3.1 晶粒细化分析

从凝固动力学的角度来看, 离心铸造过程中的高冷却速率和强剪切力场共同作用, 创造了一个独特的晶粒形核和生长环境, 其中, 金属型的高热传导率和离心力场增强的散热效果共同创造了一个显著的大范围过冷区域, 高过冷度是晶粒细化和等轴晶形成的主要驱动力。根据异质形核理论^[15], 异质形核率 I 计算为:

$$I = f_1 N_L \exp \left[- \frac{Bf(\theta)}{\Delta T^2} \right]$$

式中, f_1 为频率因子, 表示液态金属原子达到临界形核状态的有效碰撞频率; N_L 为单位体积熔体中的潜在形核位点数; B 为与固/液界面能和体积自由能变化有关的常数; $f(\theta)$ 为基底润湿角 θ 的函数, 表征异质形核的几何修正因子; ΔT 为过冷度。过冷度的增加会导致形核率 I 显著提高。金属型的快速散热能力和离心力增强的热传递效果大幅提高了过冷度 ΔT , 从而极大地促进了形核过程。图 10 为充型过程中的温度场与固液相场。由图 10a 中外层区域可以观察到急剧的温度梯度, 这直接导致了高过冷度的形成。图 10b 揭示了离心铸造的另一个关键特征: 窄小的糊状区, 其有助于提高凝固前沿的稳定性, 抑制枝晶的侧向生长, 从而促进更加细小和均匀的晶粒结构形成。其次, 窄小的糊状区表明液相到固相的转变发生在一个很小的空间范围内, 这不仅加速了凝固过程, 还有利于抑制溶质的宏观偏析, 进一步细化晶粒结构^[16]。与常规铸造中宽泛的糊状区相比, 离心铸造的窄小糊状区显著减少了枝晶间孤立液池的形成机会, 从而降低了分散性缩松的风险。这种结构特征与离心力的协同作用进一步增强了

补缩效果。离心力不仅提供了额外的压力来促进补缩, 还能在凝固过程中持续作用于剩余液相。由于糊状区窄小, 液相的流动阻力相对较小, 在离心力作用下, 残余液体能够更有效地向凝固收缩区域流动, 从而改善补缩效果, 特别是在铸件的中心区域, 这有助于减少大型缩孔的形成^[17]。在常规铸造方法中, 表面等轴晶粒区只有几个晶粒厚。然而, 在离心铸造中, 由于溶质偏析和熔体流动程度较大, 等轴晶粒区的体积分数增加, 离心铸环的等轴晶区宽度为 22 mm (占比约 73%)。中间层细小等轴晶的存在则揭示了离心铸造中一个关键的动力学过程: 持续的熔体冲刷作用。等轴晶区的形成不仅受到高冷却速率的影响, 还与离心力场及科氏力作用下的独特流动和传热特性密切相关。图 11 为充型过程中的流场模拟, 图 11 中的速度场分布证实了复合力场对形核过程的影响。在离心铸造过程中, 离心力驱动径向流动, 而科氏力诱导周向流动, 两者的耦合产生了复杂的三维流动场。特别是在充型阶段, 外层区域的高速流动不仅增强了热量传递, 还可以通过机械剪切作用促进晶粒的破碎。这种剪切作用主要源于周向速度梯度与径向温度梯度的正交配置, 随转速的增加而增强。科氏力产生的强烈剪切流导致枝晶断裂, 产生大量的晶体碎片, 这些断裂的枝晶碎片在高过冷度的熔体中充当新的形核中心, 进一步促进了等轴晶的形成。强对流不仅导致枝晶断裂, 还促进了这些断裂的枝晶碎片在熔体中的传播和分布, 为等轴晶的形成提供了大量的异质形核点^[18]。从图 5a 可以看到细长的柱状晶带, 表明冲刷作用并非完全均匀。这种局部的柱状晶结构可能是由于流动模式的变化或热量传递的不均匀性, 导致凝固速度过快, 形成了这种局部的柱状晶结构。这一现象进一步证实了冲刷作用的存在, 同时也揭示了离心铸造过程中流动和热传递的复杂性。

内层柱状晶区的形成则反映了从等轴晶区到内壁的热传导过程。图 10 中的温度场分布清晰地显示了从

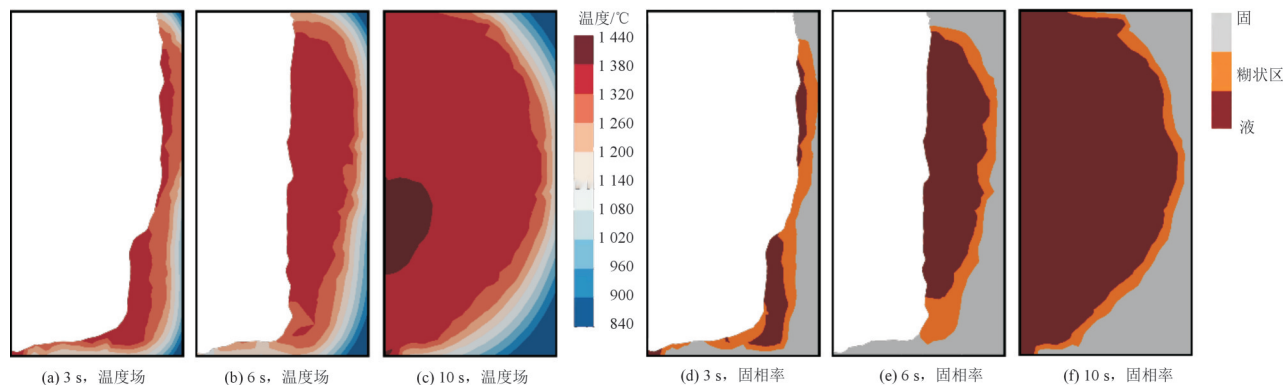


图 10 充型过程中的温度场与固液相场模拟

Fig.10 Temperature and solid-liquid phase fields during the filling process

外层到内层的温度梯度变化,与观察到的晶粒结构变化高度一致。内环区域温度梯度小,液相和固相间的温度差减小,促进了晶粒沿热流方向的定向生长,有利于柱状晶结构的形成。这种温度场特征与外层区域形成显著对比,反映了凝固过程中的动态演变。同时,内层熔

体的流动强度显著减弱,见图 11。这种流动的减弱不仅降低了熔体对生长中晶粒的冲刷作用,减少了晶粒破碎的概率,还抑制了异质核心的输运,且失去了后续熔体的冲刷。这些因素共同作用为已形成晶粒的持续生长创造了有利条件,进一步促进了内环柱状晶的发展。

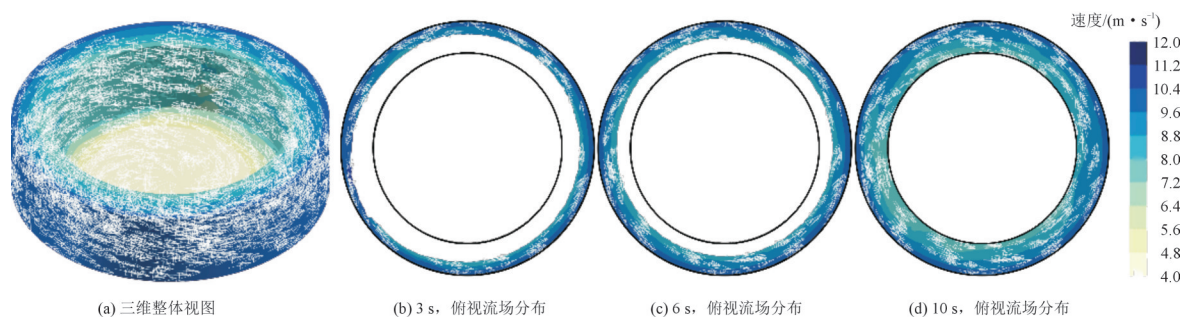


图 11 充型过程中的流场模拟
Fig.11 Flow field during the filling process

3.2 力学性能分析

真空离心铸造 K418 高温合金铸环的等轴晶区表现出远超普通铸造标准的力学性能,其抗拉强度达 1 115.5 MPa,伸长率达 12.4%,这极大地拓展了 K418 合金的应用范围。显著的性能提升可以归因于真空离心铸造工艺所带来的微观结构优化。细小均匀的等轴晶组织是高强度和良好延展性的关键基础。等轴晶结构提供了更多的晶界,有效阻碍了位错运动,同时也为裂纹传播提供了更多的障碍,从而提高了材料的强度和韧性。图 6 进一步解释了材料优异性能的来源。均匀分布的 γ' 相(图 6a)是 K418 合金强化的主要机制。这些纳米级的 γ' 相颗粒有效阻碍了位错运动,提高了材料的屈服强度。同时,从图 9d 中可以观察到,在变形过程中 γ' 相并未发生大规模断裂,而是通过界面滑移和局部变形来适应外加应力,这种行为不仅提供了强化效果,还保证了材料的一定塑性变形能力。这与近年来对高温合金强化机制的研究结果相符,即 γ' 相的尺寸、形态和分布对材料性能起着决定性作用^[19]。MC 型碳化物的存在(图 6b)是另一个值得关注的强化机制。

研究表明,适量均匀分布的细小碳化物($<1\ \mu\text{m}$)可以通过 Orowan 机制提供有效的弥散强化效果^[20]。这些细小碳化物能够钉扎位错,增加位错运动的阻力,从而显著提高材料的强度。然而,图 9b 中也观察到了一些较大尺寸的碳化物($>5\ \mu\text{m}$),这些粗大碳化物往往容易成为应力集中源^[21]。在外加载荷作用下,由于基体与碳化物之间的弹性模量差异,容易在界面处产生应力集中,导致微裂纹的萌生和扩展,在一定程度上降低了材料的延展性。这表明在未来的工艺优化中,

控制碳化物的尺寸和分布将是提高材料综合性能的关键点之一。 γ/γ' 共晶组织(图 6c)的存在反映了真空离心铸造过程中的快速冷却特征。这种组织虽然在一定程度上增加了材料的不均匀性,但其细小的尺寸和均匀的分布实际上可能有助于提高材料的整体韧性。由于测试方向垂直于柱状晶生长方向,拉伸应力主要作用于柱状晶的横截面。这种情况下,晶界成为了材料中的薄弱环节。柱状晶的长轴方向通常具有较少晶界,而横截面方向则存在大量的晶界。当应力垂直于晶粒生长方向时,这些晶界容易成为裂纹起源和传播的路径,导致材料在较低应力下失效。

4 结 论

(1)通过真空离心铸造工艺成功制备出了具有独特微观结构的 K418 高温合金铸环,其特征是外层大面积细小均匀的等轴晶区(占比约 73%)和内层的柱状晶区。这种微观结构的形成归因于离心铸造过程中的高冷却速率、强剪切力场和持续的熔体冲刷作用的共同影响。

(2)K418 铸环等轴晶区表现出优异的力学性能,抗拉强度达 1 115.5 MPa,伸长率为 12.4%。这主要得益于细小均匀的等轴晶组织、纳米级 γ' 相的均匀分布,以及适量细小碳化物的弥散强化效果。

(3)断口分析揭示了材料的主要断裂机制为微孔形核、生长和聚合。裂纹传播路径多样,包括沿晶界、 γ/γ' 界面、碳化物以及 γ/γ' 共晶。 γ' 相在变形过程中表现出良好的抗断裂能力,碳化物和共晶相成为应力集中源和裂纹起始点。

参 考 文 献

- [1] CHEN Z, WEI P, CHEN H F, et al. Laser powder bed fusion of K418 superalloy: Process, microstructure, texture feature, and mechanical property[J]. *Metals*, 2022, 12(4): 611.
- [2] YANG F, WANG J, YU J B, et al. Microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy K418 produced by the continuous unidirectional solidification process[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(10): 6 483-6 491.
- [3] 任维彬, 周金宇, 张锁荣, 等. K418高温合金叶轮脉冲激光再制造形状与性能控制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(10): 3 315-3 319.
- [4] CHEN Z, XIANG Y, WEI Z Y, et al. Thermal dynamic behavior during selective laser melting of K418 superalloy: Numerical simulation and experimental verification[J]. *Applied Physics*, 2018, A124(4): 313.
- [5] CHEN Z, CHEN S G, WEI Z Y, et al. Anisotropy of nickel-based superalloy K418 fabricated by selective laser melting[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018, 28(4): 496-504.
- [6] 蒲永亮, 寇生中, 董天文, 等. 水冷铜坩埚重熔吸铸高温合金K418的成分、组织和力学性能[J]. *金属功能材料*, 2018, 25(4): 22-26.
- [7] LI Y, WANG Y, QIAN X M, et al. Ellipsoidal equiaxial grain of 7055 aluminium alloy in vacuum centrifugal casting[J]. *Materials Science and Technology*, 2023, 39(3): 362-368.
- [8] MA Z D, PENG Q, WEI G B, et al. Improvement of microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Mg-9Li-3Al-1Ca alloy through centrifugal casting[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27(11): 4 498-4 509.
- [9] LI F, WANG D H, JIANG Y, et al. Effect of centrifugal casting process on mold filling and grain structure of K418B turbine guide[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5-8): 3 065-3 072.
- [10] KUMAR B, JOSHI A, MER K, et al. The impact of centrifugal casting processing parameters on the wear behaviour of Al alloy/Al₂O₃ functionally graded materials[J]. *Materials Today Proceedings*, 2022, 62: 2 780-2 786.
- [11] VAJD A, SAMADI A. Optimization of centrifugal casting parameters to produce the functionally graded Al-15Mg₂Si composites with higher tensile properties[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14(4): 937-948.
- [12] BIAN W D, ZHANG H R, GAO M, et al. Influence of yttrium and vacuum degree on the purification of K417 superalloy[J]. *Vacuum*, 2018, 152: 57-64.
- [13] 宋静思, 王春钢, 黄瀚川, 等. 用于等轴晶铸造的真空感应精密铸造炉主流结构及未来发展[J]. *真空*, 2023, 60(5): 92-97.
- [14] 薛松海, 龚磊, 史昆, 等. K4169合金叶轮真空自耗电极熔壳离心铸造工艺研究[J]. *铸造*, 2022, 71(4): 458-461.
- [15] XIN M L, WANG Z D, LU B, et al. Effects of different process parameters on microstructure evolution and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy during vacuum centrifugal casting[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 54-68.
- [16] 王胤, 李勇, 钱晓明, 等. 真空离心铸造冷却速率对7055铝合金组织和力学性能的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(12): 1 769-1 776.
- [17] SILVA A S, SOUSA S M, GOUVEIA G L, et al. The influence of NbB inoculation on dendritic spacing and grain size of an aluminum 2017 alloy at different cooling rates[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(11-12): 5 681-5 696.
- [18] SEN S, REDDY S, MURALIDHARA B K, et al. Study of flow behaviour in vertical centrifugal casting[J]. *Materials Today Proceedings*, 2020, 24: 1 392-1 399.
- [19] KIM D H, JIANG R, SINCLAIR I, et al. Microstructural influences on fatigue crack initiation and early propagation in Ni-based superalloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2022, 38(14): 1 081-1 094.
- [20] YU W, WANG Y, LI Y, et al. Texture evolution, segregation behavior, and mechanical properties of 2060 Al-Li (aluminium-lithium) composites reinforced by TiC (titanium carbide) nanoparticles[J]. *Composites*, 2023, B255: 110 611.
- [21] SONG X Q, WANG Y X, ZHAO X X, et al. Analysis of carbide transformation in MC-M₂₃C₆ and its effect on mechanical properties of Ni-based superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 911: 164 959.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

