

FeCoNiCrC 共晶高熵合金铸造过程的数值模拟

王叶青^{1,2} 徐哲¹ 陈烜¹ 时晓¹ 陈正¹

(1. 中国矿业大学材料与物理学院; 2. 中国矿业大学安全工程学院)

摘 要 设计了螺旋流动性模型、薄壁充型模型和凝固应力框模型 3 种模型, 基于 ProCAST 软件分析比较了 FeCoNiCrC_{0.45} 和 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金材料的热物性能、流动性、金属液充型过程、凝固过程以及铸造工艺参数, 研究了近共晶高熵合金材料的铸造性能。结果表明, Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金具有更加优越的铸造性能。合适的浇注速度和浇注温度可有效提升浇注速率; 结构复杂铸件在交界处的应力最大, 易产生缩松、缩孔缺陷。

关键词 共晶高熵合金; 重力铸造; 铸造性能; 数值模拟

中图分类号 TG244; TG245

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Casting Process for FeCoNiCrC Eutectic High-entropy Alloy

Wang Yeqing^{1,2}, Xu Zhe¹, Chen Xuan¹, Shi Xiao¹, Chen Zheng¹

(1.School of Materials and Physics, China University of Mining and Technology;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology)

Abstract: Models of spiral fluidity, thin-walled filling and solidification stress frame were designed, and thermo-physical properties, fluidity performance, filling process, and solidification process as well as casting process parameters of both FeCoNiCrC_{0.45} and Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} high entropy cast iron were mainly analyzed comparatively based on the ProCAST software. The casting properties of near-eutectic high entropy cast iron were determined. The results indicate that the properties of Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} high entropy cast iron is superior to the others. Moreover, the pouring rate can be improved effectively by taking desirable pouring speed and pouring temperature. The greatest stress occurs at the junction of the complex casting, where the defects of shrinkage and porosity are easily generated.

Key Words: Eutectic High Entropy Cast Iron, Gravity Casting, Casting Properties, Numerical Simulation

高熵合金具有独特的组织结构和多主元协同作用, 因而具有高强度、高硬度、延展性好、耐磨和耐腐蚀等特性, 工业应用前景非常广阔^[1-5]。高熵合金开拓了金属材料的设计范围, 引起了研究者的关注, 成为当前金属材料的研究热点。然而, 大多数高熵合金主要以固溶体结构为主, 其结晶过程是在铸件截面上一定宽度区域内进行的, 固-液界面粗糙, 流动阻力大, 导致其铸造流动性较差。另外, 由于高熵合金的组成元素较多, 合金在凝固过程中容易发生宏观和微观偏析, 导致铸造性能较差, 不利于以铸造方式大规模生产高熵合金铸锭。

为解决高熵合金铸造性能差的问题, 同时实现其强

度和塑性相平衡的目标, LU Y P 等^[6]提出了一种采用共晶合金的思想设计高熵合金的方法, 首先设计并通过常规铸造方法制备了 2.5 kg 的 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金大块铸锭。该合金具有优异的可铸性, 其微观组织是由细小的 FCC/B2 共晶片层结构组成。这种共晶片层结构使得 AlCoCrFeNi_{2.1} 铸锭没有显著的铸造缺陷, 同时提高了合金的拉伸塑性和断裂强度, 断裂应力为 944 MPa, 伸长率达到 25.6%^[7-12]。JIANG H 等^[7]设计并制备了 2.5 kg 的 CoCrFeNiNb_{0.45} 共晶高熵合金大块铸锭, 发现该共晶高熵合金在 1 100 ℃ 高温下具有很好的热稳定性和硬度。ZHU Y C 等^[8]采用增材制造

收稿日期: 2023-03-11; 修改稿收到日期: 2023-04-15
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52201055); 国家自然科学基金资助项目(52274401); 中国矿业大学材料科学与工程学科引导基金资助项目(CUMTMS202209); 中煤科工集团上海有限公司科研开发项目(02090804822Y)
第一作者简介: 王叶青, 女, 1991 年出生, 博士, 江苏徐州(221116), E-mail: yeqingwang@cumt.edu.cn
通信作者: 陈正, 男, 1980 年出生, 教授, 江苏徐州(221116), E-mail: chenzheng1218@163.com
引用格式: 王叶青, 徐哲, 陈烜, 等. FeCoNiCrC 共晶高熵合金铸造过程的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(8): 1 049-1 054.
WANG Y Q, XU Z, CHEN X, et al. Numerical simulation of casting process for FeCoNiCrC eutectic high-entropy alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8): 1 049-1 054.

技术制备了尺寸较大的块状 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金(42 mm×34 mm×3 mm),该合金是由层片共晶组织组成,表现出强的塑韧性。LU Y P 等^[9]采用增材制造技术将重约 50 kg 的 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金粉末制备成大块铸锭。发现该合金具有优异的力学性能,其屈服强度达到 1 040 MPa,伸长率达到 24%。研究认为,这种优异的力学性能主要是由于熔融的共晶高熵合金具有良好的流动性,使合金在凝固过程中形成了致密的结构。因此,采用共晶合金的理念制备高熵合金能够获得流动性和力学性能优异的合金材料^[10-11]。

在共晶高熵合金的设计理念下,一些研究者^[13-18]通过将 C 元素引入高熵合金(特别是 Fe-Co-Ni-Cr-C 系列)和共晶高熵合金,并对其微观组织与力学性能进行了相关研究,发现铸铁中 C 含量对高熵合金的组织与性能有较大的影响。在 C 含量较低时,FeCoNiCrC 高熵合金的微观组织由单相 FCC 相组成,材料表现出优良的韧性但是强度较低^[14]。当 C 含量增加时,FeCoNiCrC_x 高熵合金的微观组织由 FCC 相和 M₇C₃ 碳化物相组成,晶粒从粗大的柱状晶转变为等轴晶,材料表现出优良的强韧性和高硬度^[17-18]。因此,通过设计优化高熵

合金的合金成分,可以获得比传统铸铁材料性能更加优异的新型铸铁材料。然而,目前对于高熵合金的研究报道很少,而且主要集中于研究 C 含量对合金组织与性能的研究。

前期对 Fe_{2-y}CoNiCr_yC_x 高熵合金的合金成分和组织性能进行了研究,发现了 FeCoNiCrC_{0.45} 共晶高熵合金成分和 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 过共晶高熵合金成分表现出优异的力学性能。为了揭示这类高熵合金材料的铸造性能,本研究采用 ProCAST 软件^[19-20]对 FeCoNiCrC_{0.45} 和 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 两种近共晶高熵合金的流动性、充型能力和凝固过程进行了模拟分析,研究了共晶高熵合金的铸造性能,旨在为高熵合金件的生产提供参考。

1 铸造工艺设计与数值模型的建立

设计了螺旋流动性模型、薄壁充型模型和凝固应力框模型,见图 1。3 种模型均采用重力浇注方式进行浇注,设置铸型材料为树脂粘结砂,金属液和砂型之间的传热系数为 500 W/(m²·K),砂型和外界环境的传热方式为空冷,环境温度为 20 ℃。

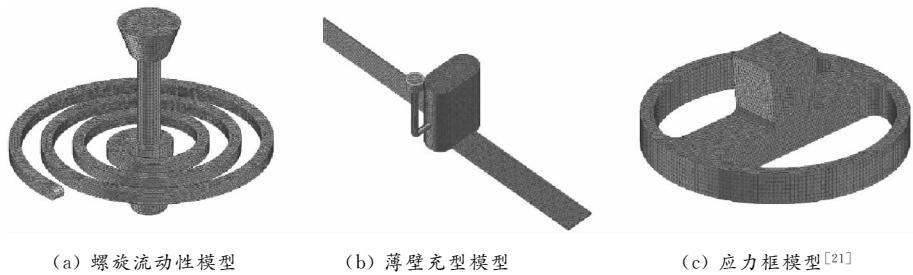


图 1 3 种模型网格划分示意图

Fig.1 Meshing diagram of three kinds of models

通过螺旋流动性模型对共晶高熵合金的流动性进行评估,其模型与划分结果见图 1a,最终的面网格数为 8 128 个,体网格数为 63 938 个。通过分析金属液凝固之后的螺旋线长度来评估材料的流动性。根据前期研究结果,选择 FeCoNiCrC_{0.45} 和 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 两种近共晶高熵合金以及 QT500-7 球墨铸铁作为研究对象。根据材料模拟模块得出合金液相线,设置 3 种材料均过热 33 ℃,具体浇注温度和浇注速度见表 1。

表 1 3 种材料螺旋流动性试验参数设置

Tab.1 Parameter settings of various materials for spiral fluidity test

合金	液相线温度/℃	浇注温度/℃	过热度/℃	浇注速度/(kg·s ⁻¹)
QT500-7	1 165	1 198	33	0.5
FeCoNiCrC _{0.45}	1 260	1 293	33	0.5
Fe _{1.2} CoNiCr _{0.8} C _{0.45}	1 268	1 301	33	0.5

薄壁结构作为传统工业中常见的结构,金属液在填充过程中阻力较大,导致成形难度大,对材料的铸造流

动性和铸造技术要求很高。选择薄壁充型模型来评估高熵合金的薄壁充型能力,分析相关参数对充型过程的影响。薄壁充型模型网格划分结果见图 1b。选择 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 过共晶高熵合金作为研究对象,其浇注温度和浇注速度见表 2。

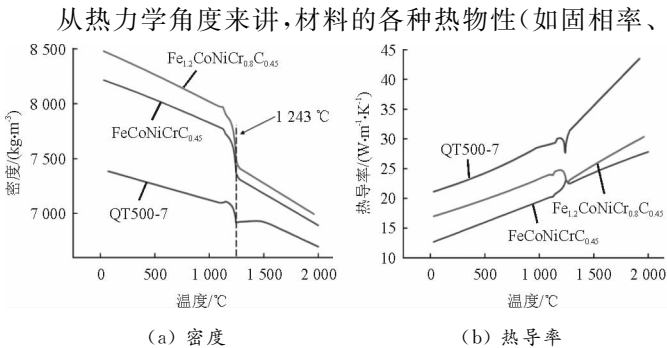
表 2 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 薄壁充型能力试验的参数设置
Tab.2 Parameter settings of Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} for thin-walled filling test

水平	因素		
	液相线温度/℃	浇注温度/℃	浇注速度/(kg·s ⁻¹)
1	1 268	1 300	0.50
2		1 320	0.75
3		1 340	1.00
4		1 360	1.50

选择典型的应力框模型^[21]研究高熵合金的凝固特性。采用 3 mm 网格单元,面网格数量为 61 376 个,体网格数量为 791 543 个,见图 1c。选择 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 过共晶高熵合金作为研究对象。浇注温度为 1 320 ℃,浇注速度为 1.0 kg/s。

2 模拟结果分析

2.1 FeCoNiCrC 高熵合金热物性分析



热导率等)对铸件材料的充型能力起关键作用。采用 ProCAST 软件的材料模拟模块计算材料的热物性,建立材料的热物理数据库。输出 FeCoNiCrC_{0.45}、Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 和 QT500-7 球墨铸铁 3 种材料随温度变化的热物性数据对比,见图 2。

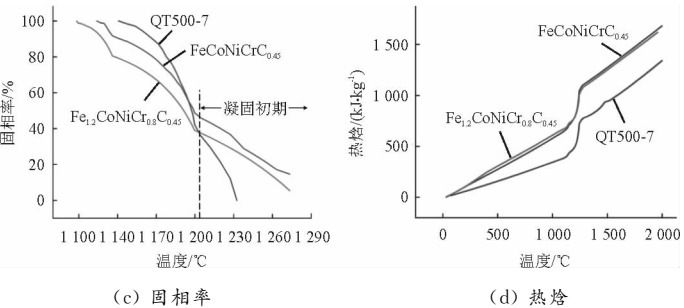


图 2 3 种材料的热物性能随温度变化的数据对比图

Fig.2 Variation of thermophysical properties with temperature for various materials

2.2 流动性能结果分析

图 3 为基于螺旋流动性模型获得的 3 种材料的流动性结果。可以看出,浇注速度为 0.5 kg/s、浇注 10 s 后,Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金金属液的流动距离最

长,约为 FeCoNiCrC_{0.45} 的 1.4 倍,是 QT500-7 球墨铸铁流动距离的 1.7 倍。这说明这两种近共晶高熵合金的流动性都优于传统球墨铸铁的流动性。

为了更清楚地描述流动过程,对 3 种金属液在流动

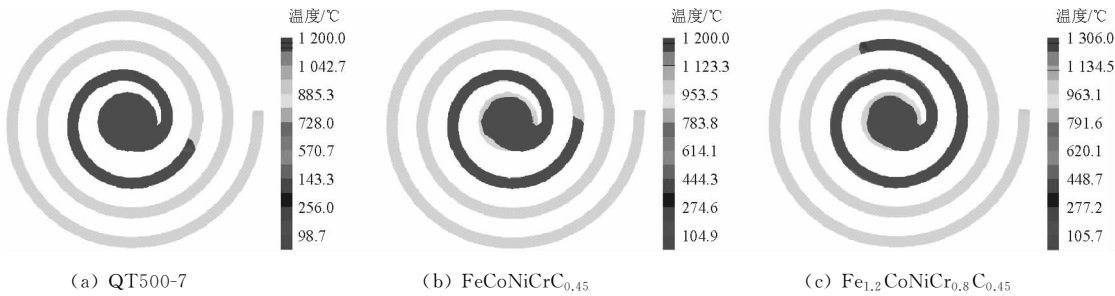


图 3 3 种材料的螺旋流动性试验结果

Fig.3 Spiral fluidity test results for various materials

前沿的平均流动速度进行了分析,结果见图 4。根据流动速度与浇注时间的关系和螺旋流动性模型结构,可以将浇注过程分为两个阶段。在浇注初期,高温金属液首先进入圆柱形浇道(见图 1a),3 种材料的平均流动速度都非常高;当金属液充满浇道底部后,金属液前沿的流动速度开始减小,当到达螺旋形浇道开口处时,流动速度降到最低(0.15 m/s)。随后,流动速度显著提升,后不同程度地降低。值得注意的是,在螺旋形

浇道浇注过程中,由于热导率的差异,球墨铸铁热量散失更快,导致其平均流动速度比两种高熵合金的流动速率下降更快。以上结果表明,FeCoNiCrC_{0.45} 和 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金的铸造流动性较好,可以保证充型过程平稳进行。

另外,由图 2a 可知,当温度降低到熔点以下时,Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 过共晶高熵合金的密度总是比 FeCoNiCrC_{0.45} 共晶高熵合金的密度高约 200 kg/m³。这表明 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 比 FeCoNiCrC_{0.45} 液态保留时间更长。图 2d 中的热焓也说明了这一点。当两种高熵铸铁固相率都为 80 % 时,Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 金属液的温度比 FeCoNiCrC_{0.45} 低 27 °C,间接表明了 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 具有更优的流动性,这和螺旋流动性模拟结果一致^[22]。

2.3 薄壁充型能力结果分析

通过改变浇注温度和浇注速度对合金充型能力进行了评估。

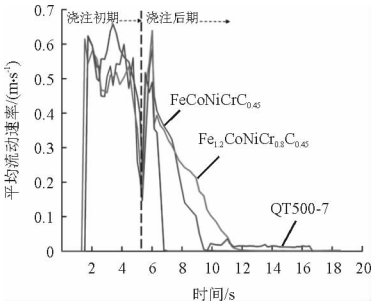


图 4 3 种材料的平均流动速率

Fig.4 Average flow velocity of various materials

(1)浇注温度的影响 在浇注速度为 0.5 kg/s 时,设置浇注温度分别为 1 300、1 320、1 340 和 1 360 ℃,分析浇注温度对于共晶高熵合金充型过程的影响,结果见图 5 和表 3。当温度从 1 300 ℃升高到 1 320 ℃时,水平薄壁的充型率从 78.3%增加到 83.5%,而竖直薄壁的充型率从 16.7%显著提升到 77.4%。可见,水平薄壁

的充型率总是高于竖直薄壁的充型率。这是由于水平薄壁的充型压力大于竖直放置的薄板所致,表明浇注温度提高可显著提升高熵合金在竖直薄壁的充型率。当浇注温度为 1 340 ℃和 1 360 ℃时,充型完成时间分别为 74 s 和 44 s,这说明浇注温度的提高还可大幅缩短充型时间。

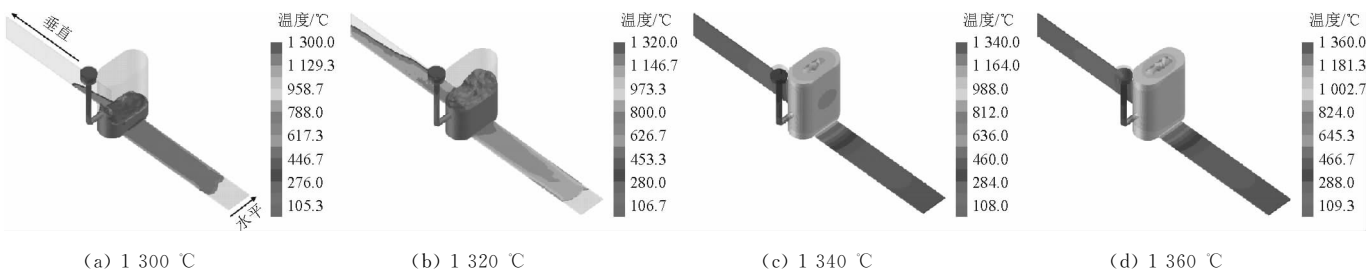


图 5 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金在不同浇注温度下的薄壁充型结果(充型 100 s 时)

Fig.5 Thin-walled filling results of Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} high entropy cast iron at different temperatures

表 3 不同温度下薄壁充型模型的充型率

Tab.3 Filling rate of thin-walled filling models at different temperatures

方向	温度/℃				%
	1 300	1 320	1 340	1 360	
水平	78.3	83.5	100	100	
竖直	16.7	77.4	100	100	

(2)浇注速度的影响 在 1 300 ℃下,设置浇注速度分别为 0.5、0.75、1.0 和 1.5 kg/s,充型结果见图 6 和表 4。可以看出,当浇注速度从 0.5 kg/s 提高到 0.75 kg/s 时,竖直薄壁的充型率从 16.7%提高到 68.4%,水平薄壁的充型率从 78.3% 提高到 94.8%。当浇注速度分别提高到 1.0 kg/s 和 1.5 kg/s 时,两种条件下的竖直

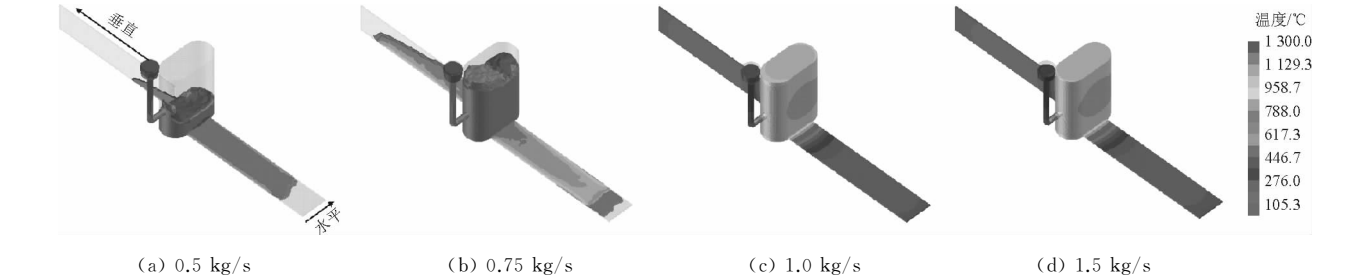


图 6 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金在不同浇注速度下的薄壁充型结果

Fig.6 Thin-walled filling results of Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} high entropy cast iron at different pouring rates

表 4 不同浇注速度下薄壁充型模型的充型率

Tab.4 Filling rate of thin-walled filling models at different pouring rates

方式	浇注速度/(kg · s ⁻¹)				%
	0.5	0.75	1.0	1.5	
水平	78.3	94.8	100	100	
竖直	16.7	68.4	100	100	

薄壁和水平薄壁充型完成时间分别为 28 s 和 12 s。与改变浇注温度相比,改变浇注速度更能提高充型效率。

2.4 凝固过程结果分析

浇注速度为 1.0 kg/s 下合金的充型过程见图 7。可以看出,当充型 20% 时,金属液充型平稳,首先充满模型中间的长方体底部;当充型 40% 时,金属液开始向

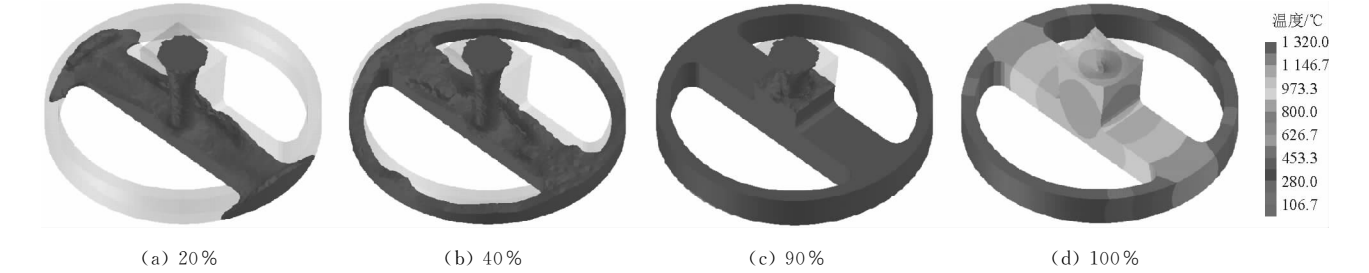


图 7 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金的充型过程

Fig.7 Filling process of Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} high entropy cast iron

四周的圆形框流动并完成整个模型的底部充型;当充型 90% 时,金属液开始向上充型并将中间的长方体和圆形框填满;当充型 100% 后,充型结束并开始凝固。在凝固过程中,圆形框区域降温较快,其次是圆形框与长方体的交界处,最后是长方体的中间区域以及模型的顶部。在交界处周围区域,金属液的冷却速度不同,导致温度相差过大。又由于收缩速率存在差异,导致在交界处产生铸造应力,最终形成缩松、缩孔缺陷^[23]。

为了确定凝固过程中铸造应力的分布特征,对模型的位移场和应力场进行了分析,结果见图 8。由图 8a 可知,靠近圆形框与长方体相交区域的圆形框区域的位移较大(见点 B),这表明该区域的收缩程度较大。而长方体流道最末端(见点 C),其所处的流道体积比圆形框区域大 2.4 倍,金属液存储更多,冷却速度较慢,所以该区域的收缩程度较小。由图 8b 可知,A 点处的有效应力为 1 381.4 MPa。这是由于圆形框上 A 点两侧(如 B 点和 C 点)的冷却速率不同,导致该区域发生热应变,产生了较大的应力,从而产生变形缺陷。对 A 点附近区域(B 点和 C 点)的温度-时间曲线和应力-时间曲线进行分析,见图 9。可以看出,B 点和 C 点的冷却速率相差较大,最大的温差为 180 ℃。B 点的有效应力值比 C 点高出 484 MPa,这导致 A 点具有较大的铸造应力。

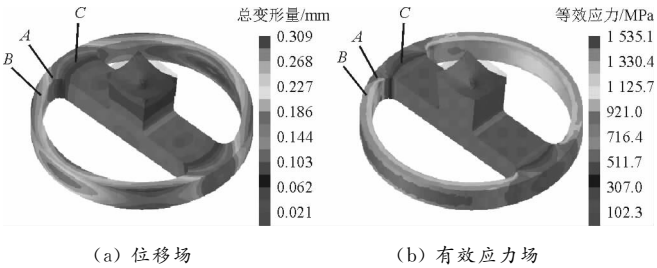


图 8 位移场和有效应力场的分布

Fig.8 Distribution of displacement field and effective stress field

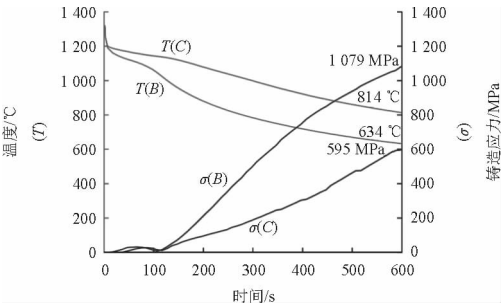


图 9 B 点和 C 点处温度和应力随时间的变化

Fig.9 Variation curves of temperature and stress with time at point B and C

3 结 论

(1)材料热物性模拟和流动性能模型分析表明,FeCoNiCrC_{0.45}和 Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 高熵合金的流动性

均优于 QT500-7 球墨铸铁的流动性。其中,Fe_{1.2}CoNiCr_{0.8}C_{0.45} 过共晶高熵合金的流动性最优。

(2)薄壁充型模型分析表明,提高浇注温度和浇注速度均可以提高高熵合金金属液的充型率,且提高浇注速度效果更显著。

(3)应力框模型分析表明,高熵合金应力最大的位置是应力框模型中间长方形臂与四周圆形框相交处,最大应力达 1 381.4 MPa。

参 考 文 献

[1] LI Z, PRADEEP K G, DENG Y, et al. Metastable high-entropy duAl-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off[J]. Nature, 2016, 534(7 606): 227-230.

[2] TANG Z, YUAN T, TSAI C W, et al. Fatigue behavior of a wrought Al_{0.5}CoCrCuFeNi two-phase high-entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2015, 99: 247-258.

[3] TRACY C L, PARK S, RITTMAN D R, et al. High pressure synthesis of a hexagonal close-packed phase of the high-entropy alloy CrMnFeCoNi[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15 634.

[4] 周航, 杨少锋, 杨亚男, 等. 高熵合金的研究进展及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (18): 5-9.

[5] 鲁一获, 张骁勇, 侯硕, 等. 高熵合金的发展及工业应用展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (1): 333-341.

[6] LU Y P, DONG Y, GUO S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: Eutectic high-entropy alloys[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 1-5.

[7] JIANG H, QIAO D, LU Y, et al. Direct solidification of bulk ultrafine-microstructure eutectic high-entropy alloys with outstanding thermal stability[J]. Scripta Materialia, 2019, 165: 145-149.

[8] ZHU Y C, ZHOU S C, XIONG Z P, et al. Enabling stronger eutectic high-entropy alloys with larger ductility by 3D printed directional lamellae[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38: 101 901.

[9] LU Y P, WU X X, FU Z H, et al. Ductile and ultrahigh-strength eutectic high-entropy alloys by large-volume 3D printing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 126(1): 15-21.

[10] 焦文娜, 卢一平, 曹志强, 等. 共晶高熵合金的研究进展及展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (3): 265-274.

[11] 孙元昊, 韩露娜, 高睿盈, 等. 铸态共晶高熵合金的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(1): 27-37.

[12] 李肖逸, 高绪杰, 史程程, 等. 共晶高熵合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 32-37.

[13] NAGASE T, KAKESHITA T, MATSUMURA K, et al. Development of Fe-Co-Cr-Nn-Ni-C high entropy cast iron (HE cast iron) available for casting in air atmosphere[J]. Materials & Design, 2019, 184: 108 172.

[14] CHEN J, YAO Z H, WANG X B, et al. Effect of C content on microstructure and tensile properties of as-cast CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 210: 136-145.

[15] LIU X W, LIU L, LIU G, et al. The role of carbon in grain refinement of cast CrFeCoNi high-entropy alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2018, A49(6): 2 151-2 160.

HPSLM 工艺参数对高氮不锈钢氮含量及组织的影响

王书桓 孙 鑫 赵定国 王亚超 任建彪
(华北理工大学冶金与能源学院)

摘 要 通过高压选区激光熔化制备高氮不锈钢,研究工艺参数对不锈钢中 N 含量、组织与硬度的影响。结果表明,合金中 N 含量与腔内熔炼压力成正比,N 含量最高可达 1.05%,腔内熔炼压力促进 N 的渗入并抑制氮的逸出;显微组织主要由细小等轴晶组成,晶粒尺寸为 10~25 μm;随着腔内熔炼压力增大,晶粒尺寸逐渐变小,显微硬度增大,主要是由于腔内熔炼压力增大,固溶 N 含量增加,晶粒细化,使显微硬度提高。

关键词 高压选区激光熔化;N 含量;微观组织;晶粒尺寸

中图分类号 TG665;TG142.71 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of HPSLM Process Parameters on Nitrogen Content and Microstructure of High Nitrogen Stainless Steel

Wang Shuhuan, Sun Xin, Zhao Dingguo, Wang Yachao, Ren Jianbiao

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology)

Abstract: The effects of process parameters on nitrogen content, microstructure and hardness of high nitrogen stainless steel prepared by high-pressure selective laser melting(HPSLM) were investigated. The results indicate that the nitrogen content in alloy is proportional to the luminal pressure, which can reach up to 1.05%, and the luminal pressure promotes the infiltration and inhibits the escape of nitrogen. The microstructure is mainly composed of fine equiaxed grains with grain size of 10~25 μm. With the increase of luminal pressure, the grain size is gradually decreased and the microhardness is increased, which is mainly attributed to the increase of solid nitrogen content, resulting in the grain refinement.

Key Words: High-pressure Selective Laser Melting, Nitrogen Content, Microstructure, Grain Size

高 N 不锈钢是一种具备优异的力学性能和良好的耐腐蚀性能的工程材料,在生物能源行业、航空航天、石油化工行业、海洋工程、生物医用等多个领域应用广

泛^[1-2]。SPEIDEL H J 等^[3]发现在常压下,N 质量分数为 0.40%是钢中的极限值。通常,制备高氮不锈钢方式有 N₂ 加压熔炼、粉末冶金及表面渗氮等^[4]。加压熔炼

收稿日期:2022-12-03;**修改稿收到日期:**2023-01-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074128);河北省自然科学基金资助项目(E2020209014,E2019209597);河北省高校基本科研业务费研究资助项目(JYG2021004)
第一作者简介:王书桓,男,1964 年出生,教授,河北唐山(063210),E-mail:wshh88@163.com
通信作者:赵定国,男,1972 年出生,教授,河北唐山(063210),E-mail:zhao dingguo@ncst.edu.cn
引用格式:王书桓,孙鑫,赵定国,等. HPSLM 工艺参数对高氮不锈钢氮含量及组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 054-1 059.
WANG S H,SUN X,ZHAO D G, et al. Effects of HPSLM process parameters on nitrogen content and microstructure of high nitrogen stainless steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 054-1 059.

[16] HUANG T D, JIANG L, ZHANG C L, et al. Effect of carbon addition on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy[J]. Science China-Technological Sciences, 2017, 61(1):117-123.

[17] ZHOU R, LIU Y, ZHOU C S, et al. Microstructures and mechanical properties of C-containing FeCoCrNi high-entropy alloy fabricated by selective laser melting[J]. Intermetallics, 2018, 94: 165-171.

[18] ZHANG L J, YU P F, FAN J T, et al. Investigating the micro and nanomechanical properties of CoCrFeNi-C_x high-entropy alloys containing eutectic carbides[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A796: 140 065.

[19] 徐超,季德生,李嘉倩. 基于 ProCAST 的行星架铸造模拟及工艺优化[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56 (4): 41-46.

[20] 张孝元,王孝国,杨光印.基于 ProCAST 的压壳铸造工艺设计及优化[J].特种铸造及有色合金, 2022, 42(7):823-826.

[21] 廖敦明,刘瑞祥,陈立亮,等. 基于有限差分法的铸件凝固过程热应力场数值模拟的研究[J]. 铸造, 2003, 52 (6): 420-425.

[22] 王金国,黄恺,闫瑞芳,等. 元胞自动机-有限元法模拟碳当量元素对亚共晶球墨铸铁流动性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(3): 11.

[23] 姜巨福,匡君,张颖,等.A356.2 铝合金轮毂局部增压铸造过程数值模拟[J].中国有色金属学报, 2022, 32(2): 313-321.

(编辑:刘晨辉)