

定向凝固大模组螺旋选晶器温度场演化和晶粒生长

张朝威¹ 孟祥斌^{2,3} 李金国¹ 刘雅咏⁴ 姚刚⁴ 黄瀚川⁴ 向位⁴ 刘纪德¹ 梁静静¹
赵乃仁¹ 邹明科¹ 王猛¹ 姜卫国^{2,3} 李强²

(1. 中国科学院金属研究所;2. 潍坊科技学院;

3. 潍坊市先进动力系统用热端材料及单晶部件制备技术重点实验室;4. 贵阳航发精密铸造有限公司)

摘要 针对高速凝固法(HRS法)定向凝固设备的现有问题,集成了中心加热系统和底部水冷散热系统,在原有HRS单晶炉基础上改进了加热冷却方式,设计了一种新型高效的大模组单晶叶片生长设备。通过商业建模软件UG和有限元模拟软件ProCAST,对新型单晶炉在定向凝固过程中,螺旋选晶器的温度场演化过程和晶粒生长行为进行了研究。结果表明,新设备显著提高了固液界面前沿的温度梯度及其稳定性,有效解决了单晶铸件生长过程中的阴影效应问题,减少了单晶叶片的铸造缺陷,提高了单晶品质和叶片合格率。

关键词 大模组;螺旋选晶器;温度场演化;晶粒生长

中图分类号 TG302;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temperature Field Evolution and Grain Growth of Large-module Spiral Crystal Selector during Directional Solidification

Zhang Chaowei¹, Meng Xiangbin^{2,3}, Li Jinguo¹, Liu Yayong⁴, Yao Gang⁴, Huang Hanchuan⁴, Xiang Wei⁴, Liu Jide¹, Liang Jingjing¹, Zhao Nairen¹, Zou Mingke¹, Wang Meng¹, Jiang Weiguo², Li Qiang²

(1. Institute of Metal Research, Chinese Science Academy;2. Weifang University of Science and Technology;

3. Weifang Key Laboratory of High-temperature Materials and Single Crystal Components Fabrication

Technology for Advanced Engine System; 4. Guiyang AECC Power Precision Casting Co., Ltd.)

Abstract: Aiming at the existing weakness of high rate solidification (HRS) equipment, the central heating system and the bottom water cooling system were integrated, and the heating and cooling mode was modified based on original HRS furnace to design a new large-module high-efficiency single crystal blade growth equipment. The commercial modeling software UG and the finite element simulation software ProCAST were utilized to investigate the temperature field evolution and grain growth of the spiral crystal selector of the novel single crystal furnace during directional solidification process. The results indicate that the new equipment can significantly improve the temperature gradient and stability at the front of the solid-liquid interface, effectively solve the problem of shadow effect in the growth process of single crystal casting, and reduce the casting defects of blade, improving the quality of single crystal and the qualification rate of blade.

Key Words: Large-module, Spiral Selector, Temperature Field Evolution, Grain Growth

推重比是衡量航空发动机性能的重要指标,而涡轮前燃气温度则是影响推重比的关键因素。随着航空发动机推重比和涡轮前温度不断提高,涡轮叶片需要在更为严苛的条件下长期服役,承受复杂的热应力和离心力的交互作用。单晶高温合金由于消除了晶界这一高温薄弱结构,具有较高的高温强度,优异的抗蠕变和疲劳

性能以及良好的抗氧化、抗热腐蚀性能,高温组织稳定性和使用可靠性,已成为先进发动机涡轮叶片的首选材料^[1~3]。

现阶段通常采用定向凝固技术制备单晶高温合金涡轮叶片。VERSNEYDER F L等^[4,5]首先提出了发热剂法(EP法)和功率降低法(PD法),这两种定向凝固

收稿日期:2022-03-01;修改稿收到日期:2022-03-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1508213,51771190,51601102,51871221);国家科技重大专项资助项目(J2019-VI-0023-0139,2017-VI-0003-0073);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME110);德阳市开放式校市合作技术研发资助项目(2018CKJ001)
第一作者简介:张朝威,男,1985年出生,工程师,沈阳(110016),E-mail: cwzhang@imr.ac.cn
通信作者:孟祥斌,男,1984年出生,副教授,济南(250021),E-mail: mengxiangbin84@163.com
引用格式:张朝威,孟祥斌,李金国,等. 定向凝固大模组螺旋选晶器温度场演化和晶粒生长[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):7-11.
ZHANG C W, MENG X B, LI J G, et al. Temperature field evolution and grain growth of large-module spiral crystal selector during directional solidification[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):7-11.

工艺的主要特点是在铸件上部添加发热剂或者调节加热器功率,下部采用水冷的方式实现热流的单向传递。但是,上述方法无法获得稳定的温度梯度,散热条件较差,无法获得结构较好的定向柱晶,没有得到广泛应用。HARRIS K 等^[6]、ERICKSON G L^[7]在采用水冷的基础上,创造性地增加了传动系统,并利用隔热挡板将加热区和冷却室分离从而提高温度梯度的高速凝固法(见图 1a 的 HRS 法)。由于 HRS 法采用了水冷铜盘进行冷却,并通过隔热挡板隔离加热区和冷却室,因而避免了加热区对已凝固合金的影响,可以获得相对较高和相对稳定的温度梯度。这一方法的出现和推广使定向凝固技术得以大规模应用。基于高速凝固法的思路,研究者采用液态金属作为冷却剂的液态金属冷却法^[8~10](见图 1b 的 LMC 法)。现阶段,HRS 法和 LMC 法是制备单晶高温合金涡轮叶片最常用的两种工艺。不过,相对于 LMC 法的液态金属(Sn 液或者 Al 液)冷却,采用水冷铜盘冷却的 HRS 法操作更为简便,不会对合金产生污染,更适于工业化生产。

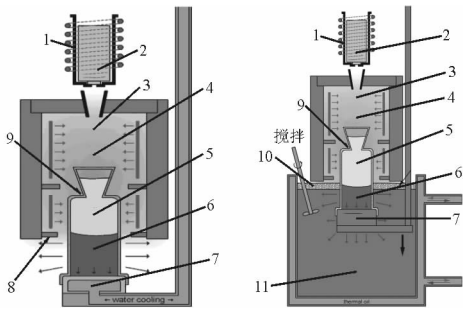


图 1 高速凝固法(HRS)和液态金属冷却法(LMC)示意图
Fig.1 Schematic diagram of high rate solidification(HRS) and liquid metal cooling(LMC)

1.感应熔炼 2.铸锭 3.模具加热器 4.辐射加热 5.熔体 6.固相
7.激冷盘 8.挡板 9.模具 10.浮动挡板 11.液态金属冷却液

但是,传统 HRS 工艺也存在一定局限性^[11~24]。首先,在定向凝固过程中,随着固液界面与水冷盘距离增加,HRS 工艺的主导散热方式从热传导逐渐变为辐射散热,固液界面前沿的温度梯度迅速下降,从 30~50 K/cm 下降至 10~20 K/cm。此外,常用的 HRS 法单晶炉,主要通过向内的径向辐射实现型壳及其内部的金属熔体的加热和冷却(见图 2),造成靠近炉体一侧加热和冷却速度快,具有较高的温度梯度,而远离炉体的一侧加热和冷却速度慢,温度梯度低,存在显著的阴影效应。此外,由于 HRS 法定向凝固过程中温度梯度的限制,国内 HRS 单晶炉的水冷结晶器尺寸只能达到 $\phi(100\sim300)$ mm,炉体加热区高度为 400~500 mm,导致每炉制备的叶片数量有限,生产效率低,无法生产大尺寸燃机叶片,严重制约了单晶叶片的应用和推广。由于 HRS 法的局限性,国内单晶涡轮叶片制备过程中

普遍存在选晶失败、取向偏离、小角晶界、杂晶等多种铸造缺陷,合格率低于 50%,这一现状已成为我国新型航空发动机热端部件发展的一大瓶颈。因此,迫切需要设计温度梯度更高、稳定性更好、尺寸更大、生产效率更高的单晶生产设备。

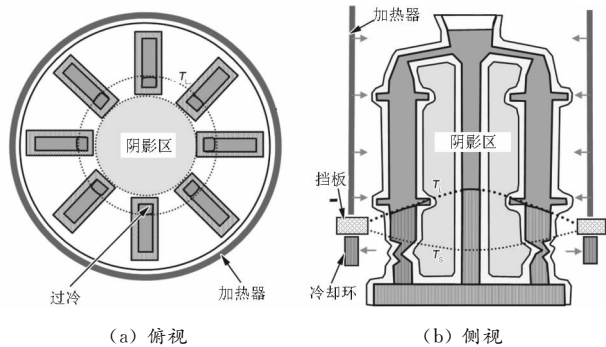


图 2 定向凝固炉结构示意图^[25]

Fig.2 Schematic diagram of directional solidification furnace^[25]

针对现有 HRS 定向凝固设备存在的薄弱环节,本课题在传统 HRS 法单晶设备的基础上,根据定向凝固技术的基本原理,集成了中心加热系统和底部水冷散热系统,设计了一种新型单晶叶片生长设备。通过在模组中心增加石墨发热体,以减少铸件靠近中心内侧和靠近发热体外侧之间的温度差异,提高定向凝固过程中的温度梯度和稳定性,减轻阴影效应的影响。为了验证新型单晶叶片生长设备的可行性,模拟了单晶生长过程中螺旋选晶器温度场的演化和晶粒生长过程,验证中心石墨加热系统对定向凝固过程中温度场和晶粒生长的作用。

1 试验材料与方法

1.1 定向凝固过程的建模

利用 UG 软件建立三维单晶炉和铸件的模型,采用 ProCAST 软件模拟定向凝固过程中螺旋选晶器温度场的演化,主要包括保温和抽拉两个过程^[11, 12]。模拟过程中的边界条件和材料属性的选取则根据实际测温结果进行对比和修正。图 3 为真空单晶炉和铸件及单晶

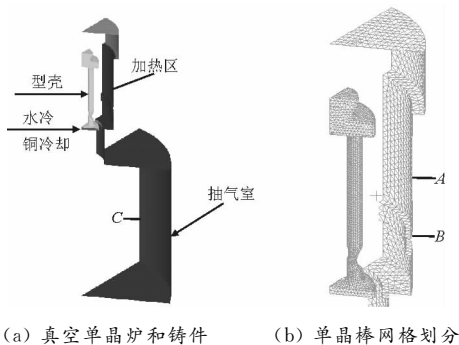


图 3 真空单晶炉和铸件及单晶棒网格划分示意图
Fig.3 Meshing of vacuum single crystal furnace, casting and single crystal rod

棒网格划分示意图。可以看出,采用轴对称模型建模,铸件置于炉体加热区域。炉体被划分为上加热区(A),下加热区(B)和真空室(C)。定向凝固过程中,上加热区和下加热区加热温度分别设置为 1 500 ℃和 1 600 ℃,真空室为 20 ℃。合金浇注温度为 1 500 ℃,浇注后保温 10 min,铸件以 5 mm/min 的速度开始抽拉。

1.2 模拟参数选取

所有接触界面之间的传热系数设为 500 W/(m² · K),炉体和型壳表面之间的辐射率(ε)也设为固定值。经过初步计算,选晶器的冷却速率过快,在保温阶段起始段已全部凝固,这与实际情况不符。因此,调整不同材料之间的界面热导率,模拟温度场,并与实测温度场结果对比,直到模拟结果与实测温度场一致。合金与型壳、合金与水冷铜盘的传热系数分别调整至 300 和 1 000 W/(m² · K)。优化后的炉体和型壳表面之间的辐射率见表 1。

表 1 优化后的辐射率
Tab.1 Optimized emissivity

温度/℃	ε
20	0.95
1 000	0.90
1 200	0.85
1 400	0.75
1 600	0.60

获得与实测温度场相符的结果后,与元胞自动机方法进行耦合,模拟定向凝固过程中选晶过程和晶粒演化。

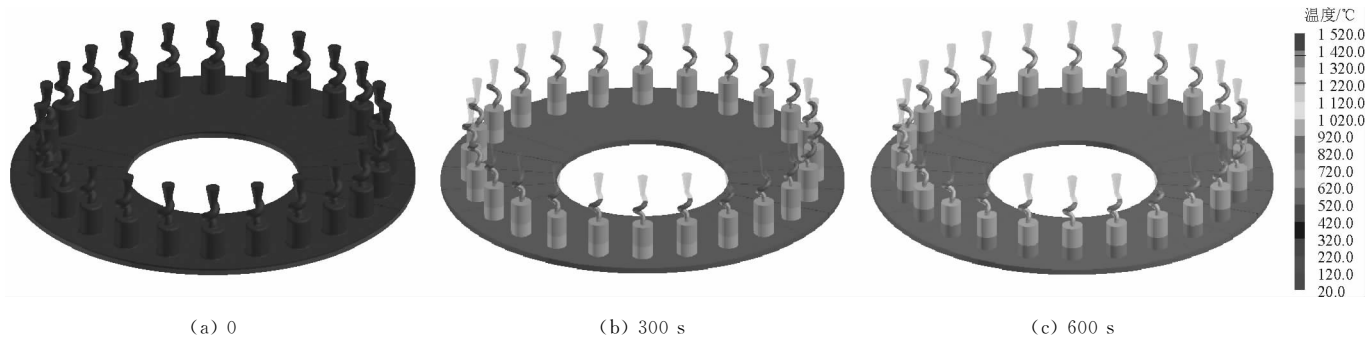


图 5 φ400 mm 水冷盘大模组选晶过程温度场的演化
Fig.5 Temperature field evolution of large module water-cooled disk with φ400 mm

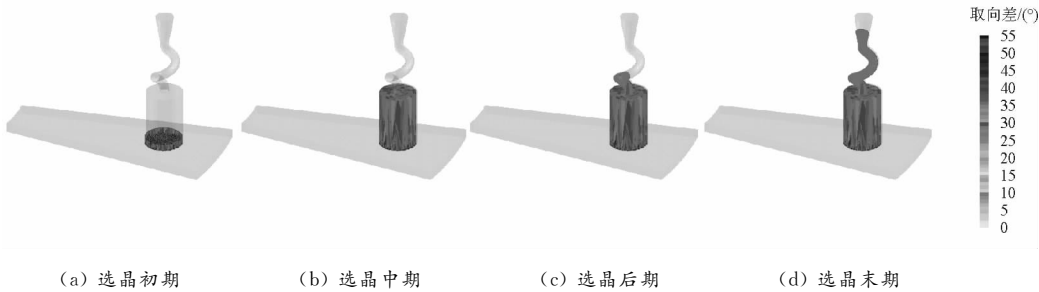


图 6 φ400 mm 水冷盘大模组的选晶行为
Fig.6 Grain selection of large module water-cooled disk with φ400 mm

2 试验结果与分析

2.1 传统大模组螺旋选晶器选晶过程的温度场演化和选晶行为

图 4 为 φ400 mm 水冷盘大模组的三维模型及网格划分图。可以看出,与生产现场原有的 φ163 mm(放置 6 个螺旋选晶器)和 φ160 mm(放置 9 个螺旋选晶器)的水冷盘模组相比,φ400 mm 水冷盘可放置 24 个相同尺寸的螺旋选晶器。因此,与原有模组相比,在大模组放置选晶器获得单晶组织的效率可达原来的 250% ~ 400%。

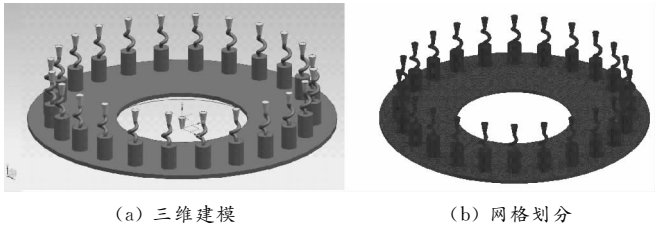


图 4 φ400 mm 水冷盘大模组三维模型与网格划分
Fig.4 3D modeling and mesh generation of large module water-cooled disk with φ400 mm

φ400 mm 水冷盘大模组在定向凝固过程中螺旋选晶器的温度场分布见图 5。0、300、600 s 分别为初始阶段、开始抽拉阶段和完全凝固阶段选晶器中温度场的演化过程。

定向凝固过程中,φ400 mm 水冷盘大模组螺旋选晶器中晶粒生长行为见图 6。由图 6a 可见,选晶初期,

大量细小、随机取向的晶粒在接触水冷盘的选晶器底部形核。随后,这些晶粒在起始段中沿着抽拉(热流)相反的方向迅速生长,逐渐形成<001>取向的定向柱晶,见图 6b。最后在螺旋段中 0.5~1 圈处(见图 6c)获得单晶结构。

2.2 中心圆柱形石墨发热体对温度场和选晶过程的影响

使用 UG 软件对中心圆柱形石墨发热体大模组进行建模,随后进行有限元网格划分,结果见图 7。理论上,与普通 $\phi 400$ mm 水冷盘大模组相比,增加了中心圆柱形石墨发热体的大模组可以更好地实现蓄热,解决单晶生长过程中远离炉体一侧的阴影效应。

增加了中心圆柱形石墨发热体大模组凝固过程中螺旋选晶器的温度场分布见图 8。0、300、600s 分别为

初始阶段、开始抽拉阶段和最后完全凝固阶段选晶器中温度场的演化过程。

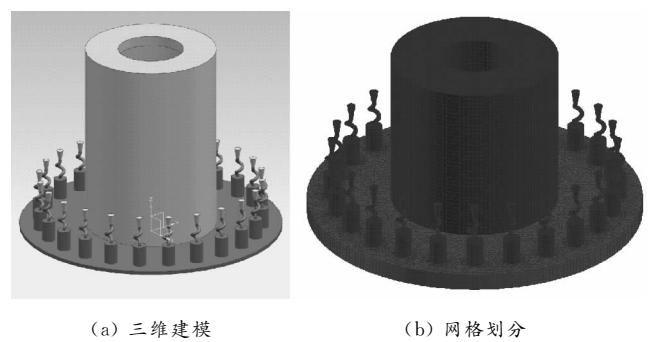


图 7 中心圆柱形石墨发热体大模组三维建模与网格划分
Fig.7 3D modeling and mesh generation of large module graphite heater with central cylinder

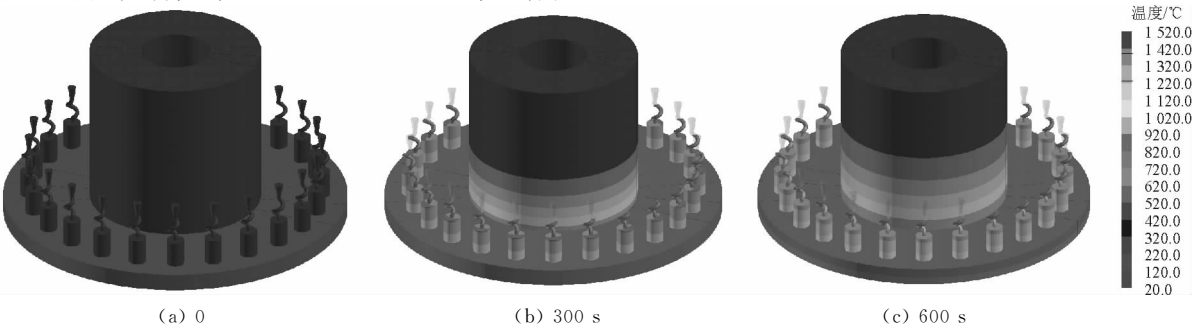
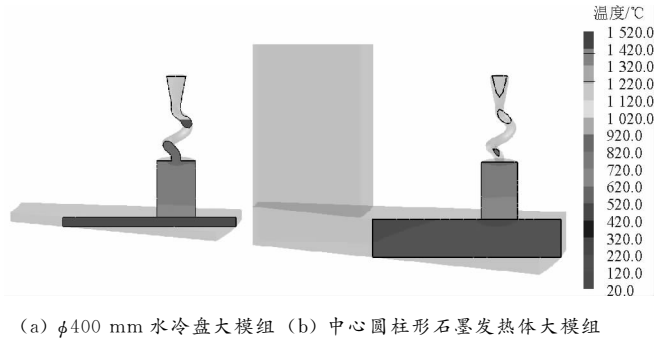


图 8 中心圆柱形石墨发热体大模组选晶过程温度场的演化
Fig.8 Temperature field evolution of large module graphite heater with central cylinder

图 9 为固相线进入螺旋段时的温度场分布。可以看出,增加了中心圆柱形石墨发热体大模组中螺旋选晶器从等温线向靠近炉体一侧倾斜转变为接近水平,即靠近炉体一侧加热和冷却速度更快逐渐变为靠近炉体一侧和远离炉体的一侧加热和冷却速度接近,这显著改善了远离炉体一侧的阴影效应。然而由于增加了中心圆柱形石墨发热体,螺旋选晶器的凝固时间大幅延后,从图 9a 的 250 s 延后至图 9b 的 650 s。

定向凝固过程中,中心圆柱形石墨发热体大模组螺旋选晶器中晶粒生长行为见图 10。可以看出,选晶初期,大量取向随机的细小晶粒在接触水冷盘的选晶器底



(a) $\phi 400$ mm 水冷盘大模组 (b) 中心圆柱形石墨发热体大模组
图 9 固相线进入螺旋段时温度场分布
Fig.9 Temperature field distribution at the moment of solid phase line entering the spiral segment

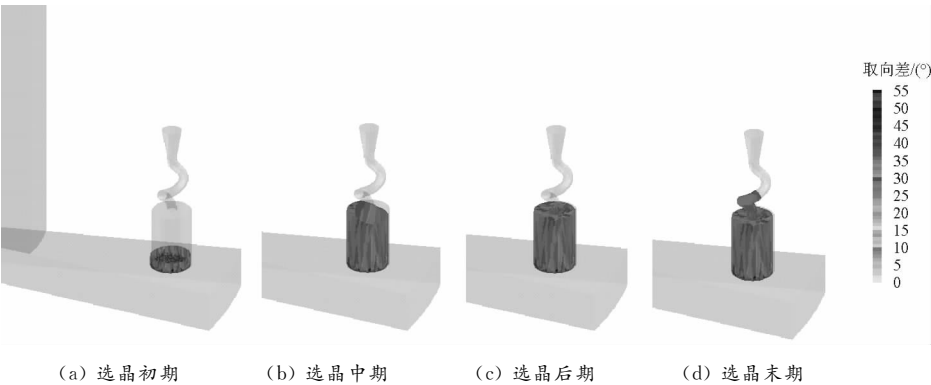


图 10 中心圆柱形石墨发热体大模组的选晶行为
Fig.10 Grain selection of large module graphite heater with central cylinder

部形核。随后,这些晶粒在起始段沿着热流相反的方向生长,逐渐形成<001>取向的柱状晶。最后在螺旋段中约1圈处获得单晶结构。值得注意的是,当增加了中心圆柱形石墨发热体后,不仅晶粒凝固时间大幅延后,螺旋段选出单晶的位置也有所提升,这对更高效地获得单晶结构不利。

3 结 论

(1)中心圆柱形石墨发热体大模组单晶生长效率可达原来传统水冷盘大模组的250%以上,考虑到大模组定向凝固抽拉速度降低和凝固时间延长,实际生产效率可提高1~2倍。

(2)在大模组中间增加中心圆柱形石墨发热体可使靠近炉体一侧和远离炉体一侧的等温线从倾斜转向平行,有效抑制远离炉体一侧的阴影效应。

(3)增加中心圆柱形石墨发热体后,选晶器中晶粒凝固时间会显著延后,螺旋段选出单晶的位置也会提高。

参 考 文 献

[1] 陈荣章. 单晶高温合金发展现状[J].材料工程, 1995(8): 3-12.

[2] 胡壮麒,刘丽荣,金涛,等.镍基单晶高温合金的发展[J].航空发动机, 2005, 31: 1-7.

[3] CHEN Q Z, JONES N, KNOWLES D M. The microstructures of base/modified RR2072 SX superalloys and their effects on creep properties at elevated temperatures[J]. Acta Mater., 2002, 50: 1 095-1 112.

[4] VERSNYDER F L,SHANK M E. Development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification[J]. Mater. Sci. Eng., 1970(6): 213-247.

[5] VERSNYDER F L, BARLOW B R, SINK W L, et al. Directional solidification in the precision casting of gas-turbine part[J]. Modern Casting, 1967, 52: 68-75.

[6] HARRIS K, ERICKSON G L. Single crystal alloy technology[P]. USP: 4643782, 1987-02-17.

[7] ERICKSON G L. Single crystal nickel-based superalloy[P]. USP: 5366695, 1994-11-22.

[8] GIAMEI A F, TSCHINKEL J G. Liquid metal cooling: A new solidification technique[J]. Metall. Trans., 1976, A7: 1 427-1 434.

[9] 傅恒志. 铸钢和铸造高温合金及其熔炼[M].西安:西北工业大学出版社, 1985.

[10] ZHANG J, LOU L H. Directional solidification assisted by liquid mateal cooling[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2007, 23: 289-300.

[11] MENG X B, LI J G, JIN T, et al. Evolution of grain selection in spiral selector during directional solidification of nickel-base superalloys[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(2): 118-126.

[12] MENG X B, LU Q, LI J G, et al. Modes of grain selection in spiral selector during directional solidification of nickel-base superalloys[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2012, 28(3): 214-220.

[13] DAI H J, SOUZA N D, DONG H B. Grain selection in spiral selectors during investment casting of single-crystal turbine blades: Part I. Experimental investigation [J]. Metall. Mater. Trans.,

2011, A42(11): 3 430-3 438.

[14] DAI H J, DONG H B, SOUZA N D, et al. Grain selection in spiral selectors during investment casting of single-crystal components: Part II. Numerical modeling[J]. Metall. Mater. Trans., 2011, A42 (11): 3 439-3 446.

[15] MA D X, POLACZCK A B. Application of a heat conductor technique in the production of single-crystal turbine blades[J]. Metall. Mater. Trans., 2009, B40: 738-748.

[16] 赵代银,何建,伍林,等. 陶瓷型芯在高温合金熔模铸造中的应用技术[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(9): 999-1 003.

[17] 贾志宏,马奥林,赵玉涛,等. 单晶高温合金螺旋选晶器选晶行为的模拟和试验研究[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 242-246.

[18] 雷四雄,杨伟,郑行,等. 精铸工艺对 K438 合金组织及高温力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2019, 39(3): 306-309.

[19] 郭钊,周建新,殷亚军,等. 基于改进差分网格的高温合金定向凝固数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2019, 39(6): 613-618.

[20] 赵金乾,李嘉荣. 单晶高温合金小角度晶界组织演化[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(2): 122-125.

[21] 孟祥斌,李金国,张朝威,等. 镍基单晶高温合金竞争生长机制的研究及其发展[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41 (11):1 328-1 333.

[22] 李金国,孟祥斌,张朝威,等. 单晶高温合金涡轮叶片的常见凝固缺陷及控制方法[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(11):1 321-1 327.

[23] 薛庆增,赵成磊,刘纪德,等. 激光增材制造镍基高温合金拉伸性能研究[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(11):1 350-1 354.

[24] ELLIOTT A J, TIN S, KING W T, et al. Directional solidification of large superalloy castings with radiation and liquid-metal cooling: A comparative assessment[J]. Metall. Mater. Trans., 2004, A35: 3 221-3 231.

[25] MA D X. Novel casting processes for single-crystal turbine blades of superalloys[J]. Front. Mech. Eng., 2018, 13(1): 3-16.

(编辑:刘晨辉)

长安新能源汽车零部件产业园开工

近日,兵装集团中国长安智能网联新能源汽车零部件产业园项目开工仪式在西部(重庆)科学城璧山片区举行。同时,现场还举行了中国兵装传动技术研究院揭牌仪式。

据了解,该项目总投资额超过50亿元,主要致力于真空压铸和复合材料产品的开发,提升超高强钢、铝合金、复合材料在车身、底盘、动力系统等全领域、全过程的轻量化全服务能力,解决线控底盘“卡脖子”技术问题,实现对线控底盘及汽车轻量化产品研、产、供、销全栈式能力,确保供应链安全。预计该园区于2024年全面建成并投产后,将成为自主品牌中高级轿车和长安新能源汽车零部件的重要生产基地。

中国兵装传动技术研究院,是兵器装备集团全国布局的重点专业研究院之一,将围绕新能源传动系统集成、软件开发、核心零部件设计、基础研究和先期技术进行研发,加大传动系统领域发明专利申报和产业转化力度,旨在打造西南片区具有影响力的新能源传动系统试验中心。

(摘自压铸周刊)