

航空发动机高温合金铸件质量智能控制

刘雅辉, 余慧澎, 张珺荟, 高海燕, 王 俊, 董安平, 孙宝德

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 随着全球制造业工业数字化转型进程加速, 航空发动机用高温合金精密铸造迎来数字化智能化发展时代。为了实现高温合金精密铸造少缺陷、低成本和短生产周期, 本文基于高温合金结构件熔模铸造研制及生产实践, 提出高温合金精密铸造关键工序的工业物联网和数字孪生体融合设计新思路。阐明高温合金精铸工艺中的凝固缺陷、尺寸超差、组织和性能不达标等普遍性质量问题的影响因素, 通过数字化解决方案提升高温合金铸件的质量, 从而为航空发动机高温合金精铸工业数字化转型提供参考依据。

关键词: 高温合金; 熔模铸造; 工艺优化; 质量控制; 工业数字化转型

大推力、高性能、高燃油效率的发展需求, 给航空发动机零件的设计和制造带来了前所未有的挑战。航空发动机用高温合金热端部件如涡轮叶片和机匣的主要成形工艺是真空熔模铸造, 复杂的内部通道和大面积薄壁结构导致这类铸件的微观组织、内部冶金缺陷和尺寸变形控制困难, 进而严重制约着航空发动机铸件的合格率、使用性能和服役寿命^[1-3]。

高温合金真空熔模铸造是典型的高温热加工工艺。由于其大面积区域没有机加工余量, 因此也称为精密铸造, 其加工温度达到高温合金的熔点以上, 通常在 1 500~1 600 ℃, 这远高于锻造工艺, 其熔体质量通常在 20~100 kg, 远大于焊接工艺, 其合金元素十多种 (Ni、Fe、Co、Cr、Al、Ti、Nb、Mo、Re、C、B、Zr 等), 远多于其他合金 (铝合金、镁合金、钛合金等), 其工艺链包括制蜡、制壳、预热、浇注、后处理等几十道工序, 初步估算有近百种工艺参数。产品质量问题包括微裂纹和宏观裂纹、显微疏松和中心缩松、局部变形和宏观变形、微观组织 (晶粒度、夹杂物) 和力学性能不达标等, 尺度横跨纳观、微观、介观和宏观, 这是典型的多尺度问题。因此, 高温合金精密铸造是一个突出的高温、多物理、多组元、多工序和多尺度的过程, 加之航空发动机用高温合金铸件结构的复杂性 (薄壁面积大、空间曲面造型、异形空心通道、壁厚渐变比大等), 高温合金精密铸件生产必然面临诸多的难题。随着研究的深入和生产实践的积累, 还会有更多深层问题被发现, 这为高温合金精密铸造带来了巨大挑战^[4-10]。

本文基于航空发动机用高温合金精密铸件科研积累和生产实践经验, 分析高温合金精密铸造的痛点所在, 结合当前全球制造业工业数字化转型的大背景, 探讨高温合金精密铸造工业数字化转型的方案可行性和具体技术路线, 通过试点产品关键工序的数字化解决方案设计和应用, 尝试阐明高温合金精铸工艺中凝固缺陷、尺寸超差、组织和性能不达标等普遍性质量问题的关键因素, 通过数字化解决方案控制高温合金铸件的质量问题, 从而为航空发动机高温合金精铸工业数字化转型提供参考依据。

1 工业数字化转型概述

随着工业技术的进步, 全球制造企业掀起了一场声势浩大的“工业数字化转型”浪潮, 从世界五百强企业到万千中小企业纷纷加入其中, 其主要目的是发展数

作者简介:

刘雅辉 (1988-), 男, 博士, 研究方向为高温合金精密液态成形工艺。E-mail: jtdx9999@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

07-0932-07

基金项目:

国家自然科学基金青年科学基金项目 (52201045); 国家重点研发计划 (2022YFB3706804)。

收稿日期:

2025-06-15。

字经济、促进数字赋能、实现数字增益，这期间必然导致生产力的发展和生产方式的革新。例如，电器行业的通用电气（GE）、西门子、施耐德电气率先进行了大胆尝试。美国通用电气公司较早提出了数字化的概念，并于2012年1月推出工业互联网概念，即结合了软件、硬件和数字分析的制造业解决方案，并成立了通用数字公司，发展“数字工厂”（Digital Factory）的业务流程的数字化和自动化，为工业数字化智能化提供了大量参考。西门子公司自2013年将“工业4.0”的概念引入其电器工业制造和软件开发领域中，继而在2019年9月17日的第21届中国国际工业博览会（上海）推出机器手臂数字孪生技术，并实现了信息物理系统（Cyber-Physical System, CPS）在制造业数字化智能化转型中的初步应用。施耐德电气（中国）于2019年5月组建数字化团队，并基于判断率先在其全球供应链（Global Supply Chain, GSC）中国区开展工业数字化转型，挖掘企业内部的数字化智能化应用场景，推出不同制造场景的数字化智能化解决方案，探索实现其供应商、物流、仓储和制造车间等领域的数字化转型，成功在其武汉、上海、北京、无锡等的灯塔工厂和一般工厂落地。上述企业案例为高温合金铸造企业工业数字化转型提供了参考依据。

随着全球制造业工业数字化转型进程的加快，在数字化和智能化方面涌现出大量的通用型新技术，主要包括工业物联网（Industrial Internet of Things, IIoT）、虚拟现实（Virtual Reality, VR）、人工智能（artificial intelligence, AI）、数字孪生（Digital Twin, DT）、5G、区块链（Blockchain）等，这些技术正在飞速深入融合进一般工业场景，包括整体装配、零部件制造和原材加工等领域^[11-19]。其中，工业物联网和AI的结合应用最为成熟且成功，主要用于车间、仓库、物流中的工序和流程的自动化和数字化，例如，通过工业物联网+AI实现产品“在线监测”和“闭环控制”，极大程度地提高自动化水平和产品质量检测效率。工业物联网主要用于实现设备端和控制中心的通讯、信号采集、模数转换、数据预处理和存储、信号反馈等任务，AI结合传统建模方法（例如物理机理模型、线性模型、统计模型等）实现数据驱动建模和数据分析等任务。虚拟现实的工业应用有限，主要集中在产品的虚拟装配、虚拟参观等领域，例如微软开发的虚拟装配产品，能够实现复杂工业设备的装配指导等。数字孪生概念被密歇根大学的 Michael Grieves提出并被定义为物理空间和虚拟空间（模型空间）的信息交互，数字孪生体则被定义为物理空间的信息等价模型。由于工业实体和工业产品的多样性，数字孪生和数字孪生体也存在多样性，目前行业

对数字孪生的定义已出具标准文件，但对于实体企业而言，开发适合具体生产场景的数字孪生体仍是其工业应用的难点和重点。另外，更重要的是对数字孪生等数字化技术的数字赋能和数字增益的客观衡量，这是企业是否接纳和推广数字化技术的主要前提。

在全行业数字化转型背景下，铸造工业的数字化转型主要突出了绿色、环保和节能等字眼，这主要是传统铸造是一个高污染、高耗材和高耗能的行业。例如，在航空发动机用高温合金精密铸造中，蜡模制造、型壳制造、铸件浇注和铸后处理等均存在突出的环保问题，更关键的铸造缺陷导致的铸件合格率低下带来巨大的材料浪费、能源浪费和生产成本。基于生产经验和模流分析的传统工艺优化正在面临着使用成本高、工作效率低、模型规模膨胀和预测精度差等困难，这限制了其实际效果。因此，高温合金精密铸造工业数字化转型的提出和实行势在必行。

依照工业数字化转型的基本路线，发展高温合金精密铸造工业数字化转型需要考虑数字赋能和数字增益，最终实现数字经济。在数字赋能方面，工业数字化转型着重解决高温合金精密铸造过程的共建问题，例如，铸造缺陷带来的质量控制难、合格率低、成本较高、生产效率低和交货期长等问题，这是工业物联网、AI和数字孪生等技术擅长的领域，因此建设高温合金精密铸造关键工序的工业物联网、应用数字建模技术挖掘铸件质量问题的根源和控制方法、通过数字孪生反馈控制铸件生产等成为关键技术开发方向。通过工业物联网+AI+数字孪生的有机结合和应用，有助于实现高温合金熔模铸件产品研制和批量生产的质量控制、成本控制、生产周期控制等数字增益。例如，通过工业物联网采集产品的设计数据、生产数据和质量数据，进而通过数据驱动建模感知产品铸造缺陷的来源和控制途径，这不仅有利于降低产品/工艺的优化对人员的依赖，也有利于解决产品质量难以闭环控制的问题。通过工业数字化转型最终实现自动化水平的提升，也可以给铸件稳定批产的成本控制和生产周期压缩提供基础。

2 高温合金精密铸造工业数字化转型

由于高温合金精密铸造是一个高温、多物理、多材料、多工序和多尺度的过程，因此高温合金精密铸件生产必然面临诸多的难题，其工艺优化和质量控制仍然严重依赖人员经验和通用经验公式，然而传统的建模和优化方法很难获得有效的线性最优

解，这亟待从解决方法的模式上予以革新。通过数字化技术的开发和应用，不仅有助于探索高温合金质量控制新途径，也有助于实现高温合金精密铸造工艺数字化转型。

2.1 高温合金精密铸造工业物联网设计

根据实践总结，影响高温合金精密铸造铸件质量的关键工序主要包括压蜡、制壳和浇注，通过建立工业物联网，可实现设备硬件的连网、检测和信号监

控。

首先，建立压蜡工序的物联网，主要包括压蜡设备的监控和报警，并通过摄像头检测蜡模的表面质量和工艺损坏问题，如图1所示。采用热电偶实时监控蜡模模具和压蜡机工作平台模具固定座的温度，避免了模具过冷过热导致的蜡模尺寸不合格。在压蜡之后，蜡模通过人工安装组装为整体蜡模，对整体蜡模的尺寸扫描可以获得蜡模的正式尺寸精度，三坐标和精光扫描仪的连网实现了对整体蜡模的精确控制。

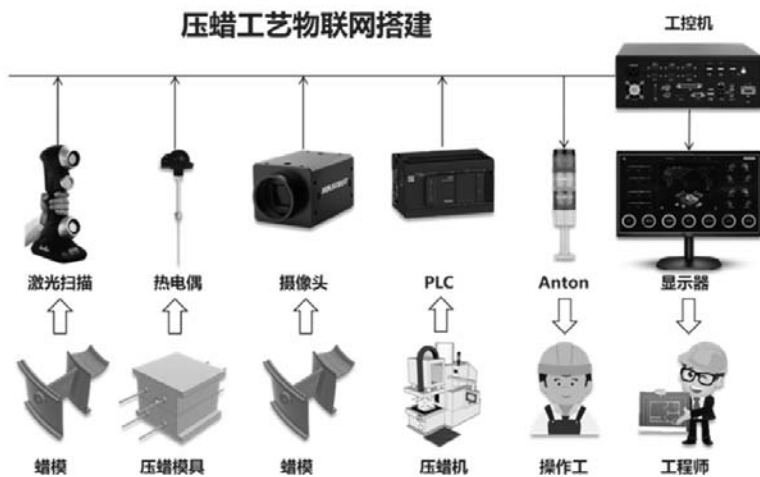


图1 压蜡工序的物联网平台

Fig. 1 IoT platform for wax pressing process

构建制壳工序的物联网平台，如图2所示。由于机械手臂是执行沾浆淋砂的主要单元，因此通过PLC和位移传感器检测机械手臂的运动轨迹，防止机械手臂加

速不当或失速导致蜡模损坏，其次，采用摄像头监控沾浆淋砂前蜡模的表面质量，以及沾浆淋砂后型壳的表面开裂，避免问题型壳流入下个工序。

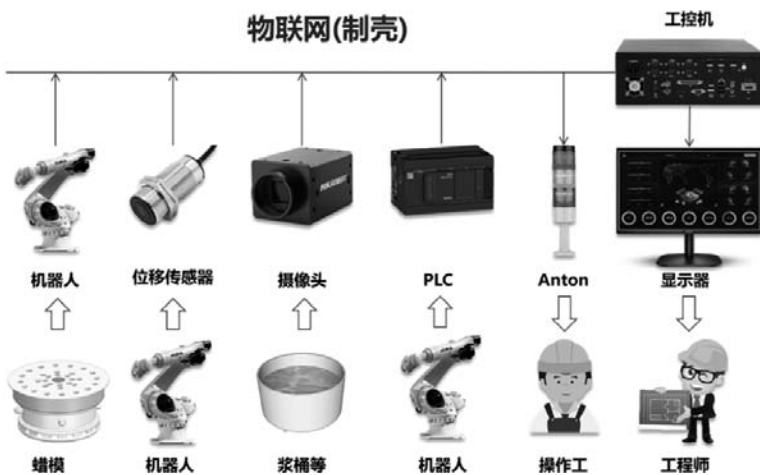


图2 制壳工序的物联网平台

Fig. 2 IoT platform for shell making process

最后，构建浇注工序的物联网平台，如图3所示。通过热电偶监控型壳焙烧和出炉转壳过程中的温度变化曲线，通过非接触式红外测温计测量型壳浇注过程

的温度变化曲线，通过流速计测量浇注速度，实现对浇注过程的监控，相关数据保存在数据终端进行实时仿真和缺陷预测；通过收集无损检测建立浇注工艺参

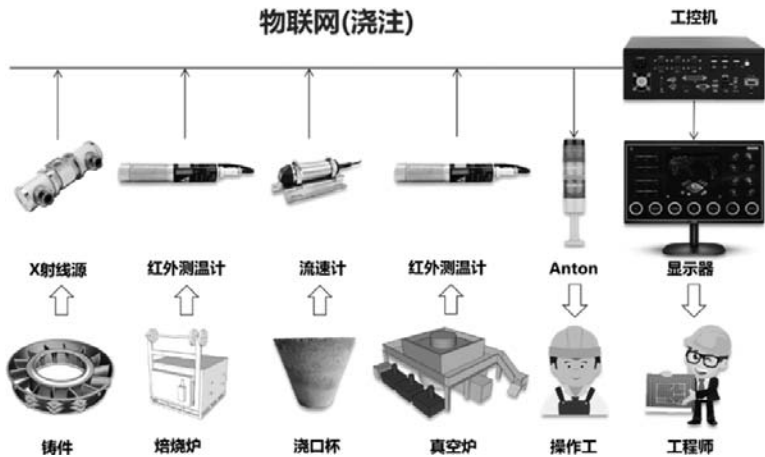


图3 浇注工序的物联网平台

Fig. 3 IoT platform for pouring process

数和铸造缺陷、尺寸变形的数字驱动模型。

2.2 高温合金精密铸造数字孪生体设计

建设高温合金熔模铸造数字孪生的目的是通过采集铸造关键参数实现对关键过程的检测、建模和控制。具体做到关键铸造参数的监测和可视化，基于设计数据和检测数据的建模和仿真，基于仿真的铸件和工艺的优化设计，控制铸件孔洞缺陷和尺寸变形。由于高温合金熔模铸造工序较多，实现全工序流程的数字孪生难度较大。同时，由于铸件的孔洞缺陷和尺寸变形的影响因素主要分布在压蜡、制壳和浇注等三个工序，因此只需重点建设这三个工序的数字孪生体。

(1) 压蜡工序的数字孪生体设计。高温合金铸件分体蜡模具有尺寸大、薄壁和结构强度差的特点，尺寸精度控制难，这是解决铸件尺寸精度的首要问题。除此之外，分体蜡模组装为整体蜡模后，由于蜡

模尺寸增倍、重量增倍，因重力产生的变形是整体蜡模的首要问题。基于工业物联网建立压蜡工艺的监控平台，同时将三坐标等仪器通过物联网系统集成联网，实现对蜡模变形的跟踪和监控，其基本流程如图4所示。

(2) 制壳工序的数字孪生体设计。建立制壳工序的数字孪生模型，通过对制壳工序的准备工作、沾浆淋砂和产品的表面质量机器学习视觉检测，实现对制壳工序的过程控制和铸件表面质量的检测与控制，其基本原理如图5所示。在制壳准备工作中，蜡模的表面质量是制壳前必须判断的过程，通过摄像头实时监测蜡模表面缺陷，已达到对蜡模的基本筛选，在沾浆淋砂过程中，机械手臂的刚体运动通过固定的程序严格地执行运动角度和速度，避免蜡模产生严重的尺寸变形，降低制壳对铸件尺寸精度的影响；在沾浆过程中，蜡模在浆料中处于固液气三相流动状

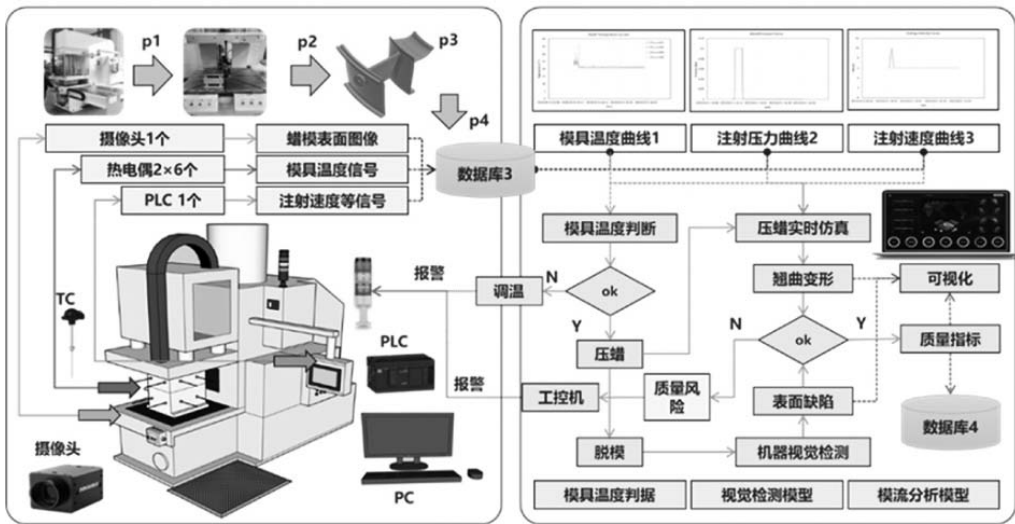


图4 压蜡工序数字孪生体设计

Fig. 4 Design of digital twin for wax pressing process

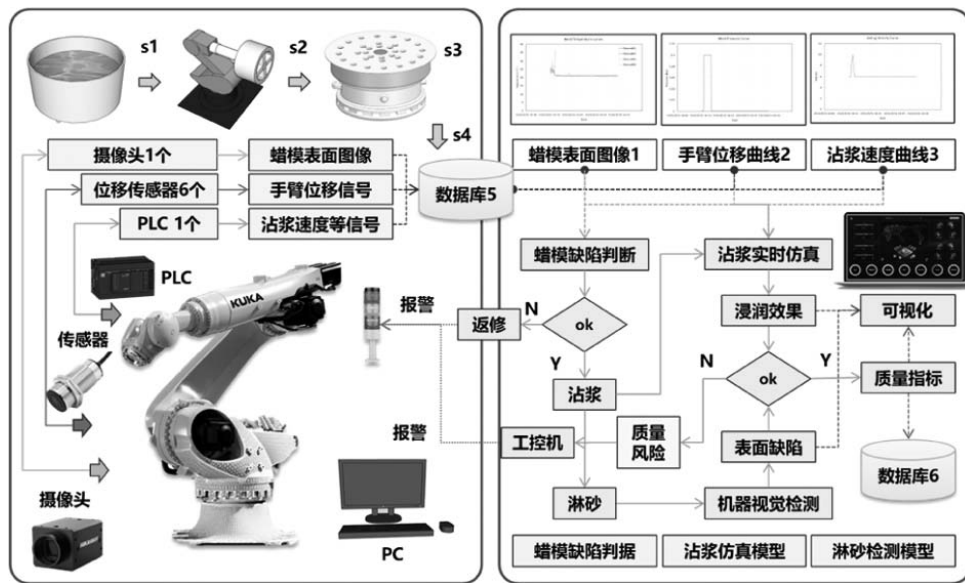


图5 制壳工序数字孪生体设计

Fig. 5 Design of digital twin for shell making pressing process

态，该过程中流体流动控制方程的求解是典型的非线性问题，因此借助数字孪生可以避开求解复杂的非线性流体力学问题，进而能够高效地解决制壳的实时在线监控问题。

(3) 浇注工序的数字孪生体设计。建立浇注工序的数字孪生，如图6所示。浇注过程是复杂的物理过程，按照浇注工艺的特点，分为三段控制，实现对复杂工业过程的实时监控，从而实现铸件产品孔洞缺陷和尺寸变形的控制。首先，浇注前的准备工作是型壳加热至设定温度，并通过人员转运至真空熔炼炉进行浇注，该过程影响铸件质量的重要物理参数是型

壳温降，这体现在转运时间的控制。通过测温计实时测量型壳出炉后的温度变化曲线，实现对型壳温度的监控，设定判据以判断型壳浇注前的温度是否达到浇注条件，当型壳温度低于阈值时，型壳将回炉重新加热，或者增加保温棉以降低型壳热流失速度。其次，在型壳处于真空炉中，真空设备运行，真空炉中处于一定的强制对流状态，这加速了型壳的热量流失速率，因此当真空度达到浇注标准但型壳温度不达标时，依然不进行浇注，避免型壳温度过低导致铸件凝固过快，产生大量内部缺陷和严重的尺寸变形。最后，在浇注后，型壳和铸件处于凝固阶段，温度降速

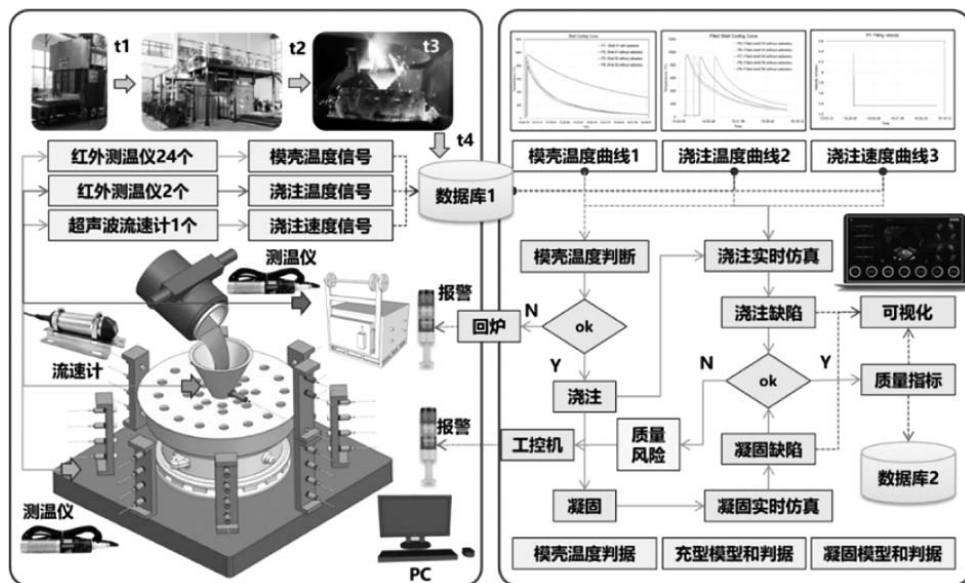


图6 浇注工序数字孪生体设计

Fig. 6 Design of digital twin for pouring process

将会影响铸件的晶粒度等指标,因此需要监控两者的温度变化曲线,通过检测熔体和型壳的温度控制铸件的晶粒度和力学性能。同时,当型壳降温过于缓慢时,可适当促进其降温,但当降温速度过快时,需要冒口进行及时的保温措施。该操作均在数字系统的监控下完成。如果出现温度异常,则系统显示报警信号,及时通知人员处理。

2.3 高温合金精密铸件质量在线检测

孔洞缺陷是高温合金铸件的主要缺陷,建立孔洞缺陷的计算机视觉检测模型和评估方法,可实现对高温合金精密铸件的力学性能控制^[20-21]。高温合金航空铸件所采用的标准和检测结果包括:按照 GB/T 36589—

2018检测铸件缩孔/缩松缺陷;按照 GB/T228.1金属材料拉伸试验标准,测试高温合金精铸件试棒力学性能,包括室温屈服强度、抗拉强度和伸长率等。

首先,采用金相观察缩松孔洞、枝晶结构、枝晶间析出相和显微疏松等,采用X射线数字DR图片检测缩松的部位。通过图像分割技术获得铸件的孔隙率。此外,通过先进表征技术获得了显微疏松图像文件,采用机器学习建立显微疏松的视觉识别模型。其次,采用卷积神经网络(CNN)建立机器学习视觉识别模型,解决铸件表面荧光缺陷的智能识别和标定问题,如图7所示^[22]。最后,采用力学实验测试高温合金随炉试棒的力学性能,测得拉伸性能符合指标要求。

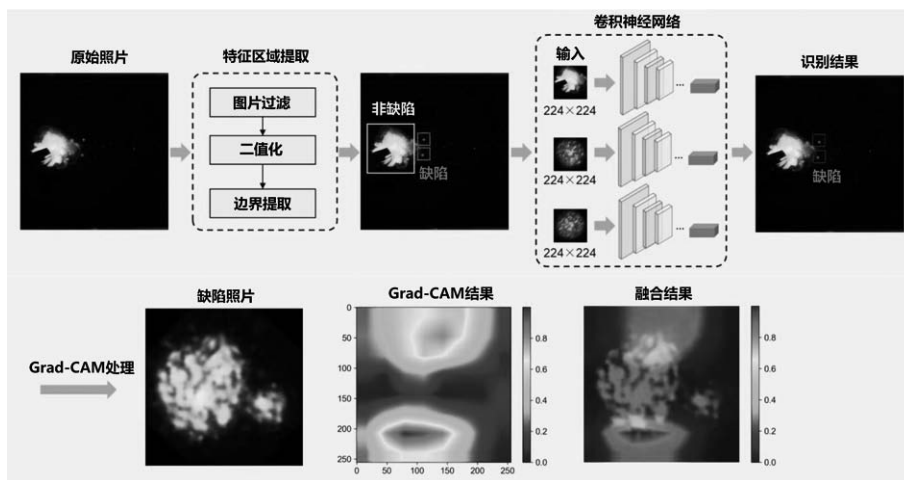


图7 基于卷积神经网络模型的表面缺陷检测

Fig. 7 Surface defect detection based on CNN model

3 总结和展望

本文基于航空发动机高温合金精密铸件的液态成形实践,提出航空发动机高温合金精密铸造工业物联网和数字孪生体设计思路,旨在解决航空发动机高温合金结构件精密液态成形质量控制问题,包括对铸件显微疏松和尺寸超差的智能控制,以及对大型复杂薄壁高温合金铸件生产成本和生产周期的控制。下一步的研究包括。

(1) 在工业数字化方面,采用5G技术搭建数据

传输和信号发射网络,用于车间生产数据的快速传递和存储,搭建数字驱动模型所需的高性能服务器,实现数字孪生体和企业管理系统的融合。

(2) 在显微疏松缺陷机理和控制研究方面,建立高温合金铸件显微疏松缺陷与工艺参数的AI模型,为显微疏松的在线预测提供基础。

(3) 在高温合金大铸件尺寸变形机理方面,建立铸件变形模型,并通过物联网采集准确的工艺参数,解决目前大铸件变形预测不准确的问题。

参考文献:

- [1] SUN Baode, WANG Jun, SHU Da. precision forming technology of large superalloy castings for aircraft engines [M]. Shanghai Jiao Tong University Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021.
- [2] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势 [J]. 金属学报, 2022, 58 (4): 412-427.
- [3] 李朝阳, 刘雅辉, 王国祥, 等. 高温合金环形件整体铸造工艺设计优化 [J]. 铸造, 2023, 72 (8): 1042-1045.
- [4] 孟祥斌, 邹明科, 张朝威, 等. 数值模拟在单晶高温合金熔模铸造中的应用 [J]. 精密成形工程, 2024, 16 (4): 180-189.
- [5] 鄯宇, 隋大山, 麻晋源, 等. K439B高温合金变截面铸件缩孔缩松数值模拟与试验 [J]. 铸造, 2023, 72 (12): 1560-1567.
- [6] 刘俊钊, 孙渊君, 贾金凤, 等. 铁基高温合金叶片精密铸造工艺数值模拟研究 [J]. 机械研究与应, 2023, 36 (5): 9-11, 19.

- DOI: 10.16576/j. ISSN. 1007-4414. 2023. 05. 003.
- [7] 王倩, 吴亚夫, 吴剑涛, 等. PROCAST数值模拟在高温合金精密铸造中的应用 [J]. 金属功能材料, 2019, 26 (6): 32-36. DOI: 10.13228/j. boyuan. Issn 1005-8192. 2019052.
- [8] 曹陆一. Ni基金薄壁环形铸件熔模精密铸造成型工艺的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018. DOI: 10.27061/d. cnki. ghgdu. 2018. 000340.
- [9] 任占友, 吴亚夫, 谢秋峰, 等. 高温合金某薄壁铸件铸造缺陷工艺控制 [J]. 铸造, 2015, 64 (12): 1231-1233.
- [10] 张贺, 韩大平, 张向明, 等. 浇注系统对高温合金薄壁熔模铸件质量的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (4): 389-391. DOI: 10.15980/j. tzzz. 2014. 04. 020.
- [11] 薛栋, 杜文莉. 面向石化化工行业数字化转型的新型工业操作系统浅析 [J]. 数字化转型, 2025, 2 (3): 62-70.
- [12] 李斌. “5G+工业互联网”助力企业数字化转型 [J]. 通讯世界, 2025, 32 (1): 32-34.
- [13] 吴双, 谢人超, 唐琴琴, 等. 面向工业生产的算力孪生网络数据处理优化方法 [J/OL]. 通信学报, 1-12 [2025-03-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2102.TN.20250318.1656.012.html>.
- [14] 雷浩, 周德义. 基于工业物联网传感器数据的噪声消除方法研究 [J]. 物联网技术, 2025, 15 (5): 44-46, 51. DOI: 10.16667/j. issn. 2095-1302. 2025. 05. 011.
- [15] 李松, 李一鸣, 李顺. 数字孪生辅助的工业物联网边缘计算任务卸载和资源分配策略 [J/OL]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 1-9 [2025-03-23].
- [16] 吉顺平. 工业物联网的智能交互模型的研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (24): 156-159. DOI: 10.19769/j. zdhy. 2024. 24. 047.
- [17] 赵宇. 5G+物联网在工业数据采集领域的应用 [J]. 物联网技术, 2024, 14 (11): 62-64. DOI: 10.16667/j. issn. 2095-1302. 2024. 11. 016.
- [18] 姚江云, 黄宁. 基于PLC及云平台的生产线监控系统设计 [J]. 物联网技术, 2024, 14 (10): 13-17. DOI: 10.16667/j. issn. 2095-1302. 2024. 10. 003.
- [19] 朱群强, 肖文君, 张宇舟, 等. 基于物联网技术的智能厂房控制系统设计 [J]. 物联网技术, 2024, 14 (10): 43-44, 50. DOI: 10.16667/j. issn. 2095-1302. 2024. 10. 012.
- [20] 黄玉裕. 基于机器学习的镍基单晶高温合金蠕变寿命预测模型及其应用 [D]. 中国科学技术大学, 2023. DOI: 10.27517/d. cnki. gzkju. 2023. 001002.
- [21] 郭慧文. 基于视觉的镍基高温合金表面凹坑检测及后处理系统研究 [D]. 南京航空航天大学, 2022. DOI: 10.27239/d. cnki. gnghu. 2022. 001638.
- [22] YU Huipeng, KANG Maodong, DING Chenyang, et al. Low cost and highly sensitive automated surface defects identification method of precision castings using deep learning [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2024, 43 (4): 105. <https://doi.org/10.1007/s10921-024-01121-5>.

Intelligent Quality Control of Superalloy Castings for Aircraft Engines

LIU Ya-hui, YU Hui-peng, ZHANG Jun-hui, GAO Hai-yan, WANG Jun, DONG An-ping, SUN Bao-de
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:

With the acceleration of digital transformation in the global manufacturing industry, precision casting of superalloys for aircraft engines has ushered in an era of digital and intelligent development. In order to achieve precision casting of superalloys with fewer defects, lower costs, and shorter production cycles, this paper proposes a new design concept for the integration of industrial Internet of Things and digital twins in key processes of superalloy precision casting based on the development and production practice of investment casting for superalloy structural components. This article elucidates the influencing factors of common quality problems such as solidification defects, dimensional deviations, and substandard microstructure and properties in the precision casting process of superalloys. Through digital solutions, the quality of superalloy castings can be improved, providing a reference for the digital transformation of the superalloy precision casting industry for aircraft engines.

Key words:

superalloy; investment casting; process optimization; quality control; industrial digital transformation