

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.03.001

## 基于数字孪生的热处理智能化技术研究进展

沈以赴<sup>1</sup>, 胡涨泉<sup>2</sup>, 周益民<sup>3</sup>, 李发亮<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106; 2. 盐城工学院机械工程学院集优学院, 盐城 224007;  
3. 盐城辉途科技有限公司, 盐城 224005)

**摘要:** 为减少热处理智能化技术数据孤岛的状态, 数字孪生的运用被广泛关注。数字孪生技术是智能化制造领域的先进智能技术, 也是解决数据孤岛的重要方法之一。本文介绍了数字孪生技术与基于数字孪生的热处理研究现状。以车间数字孪生框架为基础, 从物理车间、虚拟车间、车间服务系统、孪生数据 4 个方面介绍数字孪生的研究现状, 分析了各部分中存在的主要问题。针对基于数字孪生为基础的热处理技术, 结合传统热处理技术与特殊热处理的智能化研究进展, 分析数字孪生技术在热处理中的应用与进展。

**关键词:** 热处理; 数字孪生; 智能制造; 车间控制技术

**中图分类号:** TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)03-0375-12

## Research Progress of Intelligent Technology of Heat Treatment Based on Digital Twin

SHEN Yifu<sup>1</sup>, HU Zhangquan<sup>2</sup>, ZHOU Yimin<sup>3</sup>, LI Faliang<sup>3</sup>

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Mechanical Engineering UGS College, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224007, China;  
3. Yancheng Huitu Technology Co. Ltd., Yancheng 224005, China)

**Abstract:** To reduce the state of data silos in heat treatment intelligence technology, the application of digital twin is widely concerned. Digital twin, as an advanced intelligence technology in the field of intelligent manufacturing, is also one of the important ways to solve data silos. This paper presents the current status of research on digital twin and heat treatment based on digital twin. The current research status of digital twin is introduced on the basis of the workshop digital twin framework from four aspects: Physical workshop, virtual workshop, workshop service system, and twin data. In addition, the main problems in each part are analyzed. The application and progress of the digital twin technology in heat treatment are analyzed for digital twin-based the heat treatment technology in combination with the intelligent research progress of the traditional heat treatment technology and special heat treatment.

**Key words:** heat treatment; digital twin; intelligent manufacturing; factory control technology

**收稿日期:** 2023-09-25; **修订日期:** 2024-03-12

**作者简介:** 沈以赴, 男, 教授, 博士生导师, 中国有色金属学会连接与焊接专业委员会委员, 中国机械工业教育协会焊接技术与工程专业委员会委员, 全国物流标准化技术委员会托盘分技术委员会委员, 江苏省博士后协会常务理事。长期从事航空金属材料特种工艺技术、搅拌摩擦焊接与加工、激光 3D 打印及表面工程技术研究。先后主持完成国家自然科学基金面上项目 4 项, 获美国联合技术公司(UTC)“容闳科技教育奖”, 江苏省科学技术一等奖 1 项、二等奖 1 项、高等学校科学研究优秀成果二等奖 1 项。在国内外学术期刊发表论文 300 余篇, 其中 SCI 收录期刊论文 200 余篇, 获授权发明专利 20 项, 2020 年入选中国高被引学者(Highly Cited Chinese Researchers)榜单。出版研究生、本科生教材 2 部, 主持江苏省研究生教育教学改革重点课题 1 项, 获江苏省高等教育教学成果奖二等奖 2 项。已培养了博士、硕士 100 余人, 其中 2 名博士生的学位论文获江苏省优秀博士学位论文。

**通信作者:** 沈以赴, E-mail: yfshen\_nuaa@hotmail.com。

**引用格式:** 沈以赴, 胡涨泉, 周益民, 等. 基于数字孪生的热处理智能化技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 375-386. SHEN Yifu, HU Zhangquan, ZHOU Yimin, et al. Research progress of intelligent technology of heat treatment based on digital twin[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(3): 375-386.

热处理是工业生产中至关重要的环节之一,传统的热处理工艺需要高度依赖人工操作,存在很多不便,如操作失误、温度控制不准确等问题,影响产品质量与生产效率。为此,智能技术被应用于热处理中。在实现了自动化、智能化的生产的同时,不仅减少了人工操作导致的损失,而且可以优化调控相关的热处理工艺,有助于企业提高竞争力和可持续发展能力。

当前,热处理智能技术在计算机网络、大数据、物联网和人工智能等技术的支持下,初步实现了高精度高效率的智能化热处理。然而,传统的热处理智能技术存在很多问题,如各设备的系统仍互相独立,数据存在滞后性、分析手段不够及时难以实现各系统的紧密配合等,因此很难显著提升车间的生产效率。

数字孪生是一种实现信息物理融合的重要技术,它通过创建虚拟模型来实现物理世界和数字世界的交互<sup>[1-3]</sup>。这种技术可以用于仿真、控制、预测和优化等应用服务需求,为各行各业提供更准确的数据和更高效的管理方式。此外,数字孪生技术还可以满足虚实交互和数模驱动的需求,显著提高产品设计和生产效率,提高资源利用率和风险管理能力,同时为预测维护和优化设计提供更准确的数据。本文面向当前热处理智能化发展需求,综述了数字孪生技术及其发展现状,进而分析了基于数字孪生的热处理智能化技术存在的问题及发展趋势。

## 1 数字孪生技术

数字孪生技术集成多个学科,实现数字与实物的交互和协同工作,提高生产效率和质量。通过虚拟系统对物理车间进行复现和同步生产过程,促进工业互联网的发展,实现虚拟模型与生产数据完美融合<sup>[4-6]</sup>。车间数字孪生技术是在数字孪生技术的基础上以物理车间为对象所提出的,最早由陶飞等<sup>[7]</sup>提出数字孪生车间基本概念,其将数字孪生技术与车间生产管理技术相结合总结出该车间数字孪生模型由物理车间、虚拟车间、车间服务系统、车间孪生数据这4部分组成整体框架,如图1所示。

### 1.1 物理车间

物理车间是企业内部实体的集合,由机械设备、传感器、人、生产物料组成。通过接收生产任务,根据生产指令执行生产活动并完成任务<sup>[8-9]</sup>,物理车间是数字孪生车间三大基础模块之一。物理车间通过感知接收多样化的实时数据,将其与自身融合,协调生产要素进行共同协作来适应复杂的环境。具有这种功能的物理车间更具有灵活性、适应

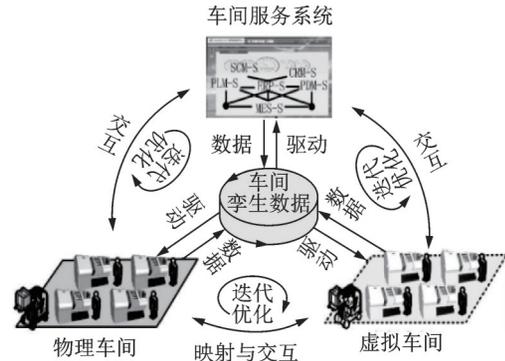


图1 车间数字孪生框架

Fig.1 Framework of digital twin workshop

性、鲁棒性和智能性<sup>[7]</sup>。物理车间是数字孪生车间的构成基础,物理车间与虚拟车间的关系如图2所示。物理车间是虚拟车间运行的真实再现,物理车间与虚拟车间实时交互将数据传输于虚拟车间实现数据可视化。

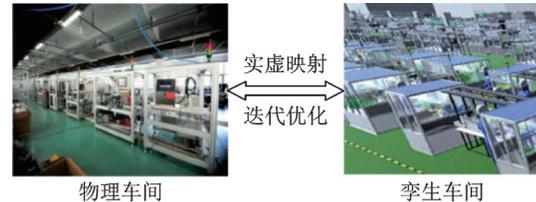


图2 物理车间与虚拟车间的关系

Fig.2 Physical versus virtual workshops

2016年,姜康等<sup>[10]</sup>将虚拟现实技术与信息集成技术相结合,构建了车间监控系统,实现了物理车间生产可视化。通过建立数据描述模型对生产相关数据进行采集与储存,并运用Unity3D平台设计与数据描述模型两者相结合,实现了三维制造车间虚拟监控系统。

巫兴寰等<sup>[11]</sup>以板式定制家具智能车间为基础运用数字孪生车间技术构建了数字孪生模型,总结物理车间由物料、设备、人员、传感器组成。传感器与设备构建的车间感知框架,实现物理车间感知生产要素和任务流程,达到与虚拟车间实现数据交互,执行孪生服务系统的任务决策。这些技术提升了物理车间对“人-机-物-环境”互联与共融的能力。

将物理车间进行分析并运用智能化技术运用于物理车间中,实现了物理车间相关参数数据化,更有利于构建数据库及其评价分析,为整个数字孪生系统的搭建提供了强有力的物理支撑;同时可以将机器学习及大数据分析优化结果与先进的传感器技术结合,为新产品、新工艺提供智能化服务。此外,还可将车间相关设备内部与车间外部传感器数据相结合,使整个车间的物理车间信息更加详细具体,从而构建更为丰富的基于数字孪生的热处理系统。

### 1.2 虚拟车间

虚拟车间是一种将物理车间通过技术手段进行数字化的映射模型。能够对车间的生产要素进行精确地刻画,通过对物理车间的实时数据分析,运用可视化技术能够直观地展示物理车间的生产状况<sup>[12-13]</sup>。虚拟车间通过物理车间的几何参数、相关的物理属性、约束和特征等信息以及外界环境、干扰因素和历史关联数据的规则构建的模型,具备实时判断、评估、优化和预测的能力,从而实时控制和指导物理车间的运行<sup>[14]</sup>。

生产前,虚拟车间是物理车间的完全数字化的映射,接受车间服务系统的生产计划进行评估、优化与预测,实现生产过程可视化。生产中,虚拟车间与物理车间的实时数据交互,使得虚拟车间在大量数据为支撑的基础上实现物理车间的优化调控,提升车间生产效率。虚拟车间在整体框架作用如图 3 所示<sup>[7]</sup>。

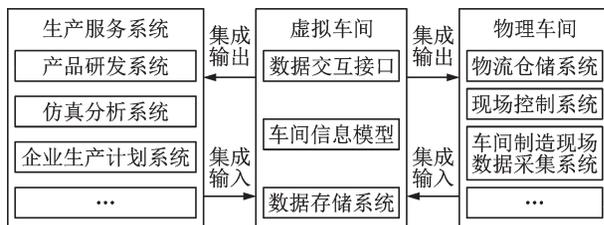


图 3 数字孪生模型与生产服务系统、物理车间的关系图  
Fig.3 Diagram of the digital twin model in relation to the production service system and the physical workshop

刘怀兰等<sup>[15]</sup>通过对不同复杂度的虚拟车间构建分层模型,再以 VDEVs 为基础构建分层模型的行为模型,两者模型相互耦合实现了对虚拟车间的行为描述。使得虚拟车间的行为模型得到精确、清晰层次化的描述,从而提升了虚拟车间的建模效率和可扩展性。

以上可知,目前基于数字孪生技术在热处理车间智能化方面,还仅限于将虚拟车间分层化,并对分层结构进行分析,虽然有利于对整个虚拟车间行为进行建模,但用于构建实际的物理车间及其真实数据进行分层分析等还远远不够,对种类繁多的热处理工艺数据还没有建立应有的智能化分析和管理的,特别是利用大数据分析及机器学习方面还远远不足。

### 1.3 车间服务系统

车间服务系统是多样化的服务类系统相融的总称,其主要由物联网平台、三维建模软件等虚拟现实开发软件来实现<sup>[16]</sup>。常见的车间服务系统会以产品数据管理系统(Product data management, PDM)、企业资源计划系统(Enterprise resource

planning, ERP)、高级计划系统(Advanced planning system, APS)等智能化车间管理系统为平台相融合,实现生产车间的应用管理<sup>[17]</sup>。车间服务系统以孪生数据为驱动力,通过系统的支持与服务实现车间智能化管理,常见的车间服务系统框架如图 4 所示。车间服务系统通过对服务类系统的相融给以用户最为直观的交互,是数字孪生数字化的展现。

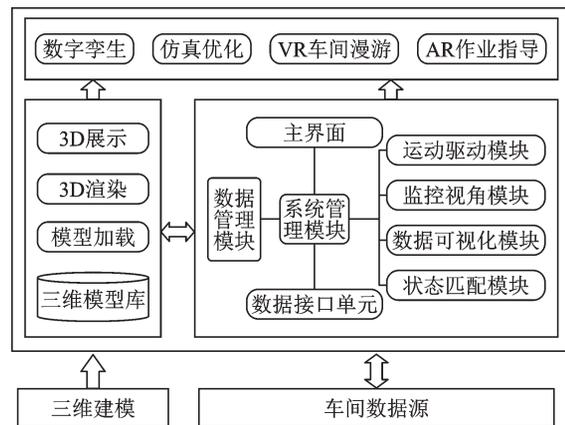


图 4 车间服务系统框架

Fig.4 Framework of workshop service system

车间服务系统是直接联系与改变虚拟车间的服务集合,是物理车间与虚拟车间实现实时交互与智能操作的桥梁<sup>[18]</sup>。车间服务系统提供的服务受到数字孪生车间的规则模型所约束,由于规则的约束实现车间服务系统与虚拟车间紧密的联系。根据需求的不同,车间服务系统可分为功能性服务和业务性服务,业务性服务的实现与运行离不开功能性服务的支撑<sup>[19-21]</sup>。

#### 1.3.1 功能性服务

功能性服务主要实现数字孪生车间的运行、模拟、优化等功能。以虚拟车间为对象时车间服务系统会提供模拟服务,如实现模型的构建、虚拟场景的搭建等。Schleich等<sup>[22]</sup>为解决数字孪生虚拟模型建模缺乏基础性概念问题,以及数字孪生建模的局限性进行了讨论,构建了一种以皮肤模型为基础的虚拟建模模型。该参考模型明确区分数字孪生的概念模型及其虚拟表示,以及在集合变化管理中的运用,提供了数字孪生在制造业的可行性依据。

郭东升等<sup>[23]</sup>为强化物理车间与虚拟车间连接服务,解决在航天结构件制造车间物理空间与信息空间缺乏实时交互的问题,提出了一种建模方案,该方案加强了物理车间与虚拟车间的交互连接。

以车间孪生数据为对象时提供数据管理服务方面,目前的研究对于连接交互数据的分化仍在模

型建立上,且较为粗糙,须进一步进行细致化的区分乃至进行分层、分类建模技术,从而实现物理车间与虚拟车间的交互,将有利于指导工程应用。

### 1.3.2 业务性服务

业务性服务通过整合数字孪生数据和其他数据源,进行分析和决策。业务性服务一般以可视化服务为基础,如提供多样化的车间监控模式,为车间管理人员提供可操作行为干涉。

现阶段的车间服务系统是对不同功能进行封装后的统一结合。结合服务的车间服务系统,明确了如何将数字孪生的各种组件封装到服务中并以服务的形式加以使用。但现阶段车间服务系统的运用还处于起步阶段,其建模方法和服务化方法还需要进一步完善和丰富<sup>[24]</sup>。

张南等<sup>[25]</sup>针对车间生产过程中实时数据采集及监控的实时性不足问题,提供了一种车间生产过程可视化的监控方法,如图5所示。该方法运用三维可视化技术与数字孪生模型相结合,运用在某一生产车间,验证了该系统方法的可行性,实现了车间生产过程可视化和实时数据交互过程。该车间系统使得车间数据更为明确化、透明化,数据与虚拟模型融合问题得到了一定的成果,但在热处理质量监测智能化方面仍需进一步努力。

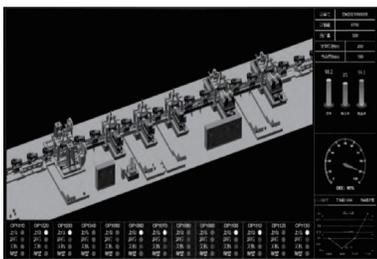


图5 生产车间可视化监控界面

Fig.5 Interface of production plant visualization and monitoring

## 1.4 车间孪生数据

车间孪生数据是车间数字孪生的核心驱动力,物理车间与虚拟车间是相互独立的,孪生数据使得两者相互联系,实现物理车间、虚拟车间和车间服务系统三者之间两两实时交互<sup>[26]</sup>。

其中,物理车间数据包含车间生产过程数据和车间要素数据,例如生产设备、人员、物料等在生产活动中产生的数据、工艺参数以及生产状况等数据。虚拟车间数据主要包括运行数据、行为数据、要素数据和仿真多模型的数据,这些数据可以用于车间生产计划的优化预测。车间服务数据则包括生产资源管理数据和车间服务数据等。当这3种数据相互兼容的同时不可避免地会产生衍生数

据。这些融合运用的数据是车间数字孪生动力来源,不断的数据交融使平台实现自我进化与完善。显然,车间孪生数据主要是由物理车间数据、虚拟车间数据、车间服务系统数据和三者数据实时交互相融合后形成的数据4部分组成<sup>[27-29]</sup>。图6所示为孪生数据在可视化中的作用。

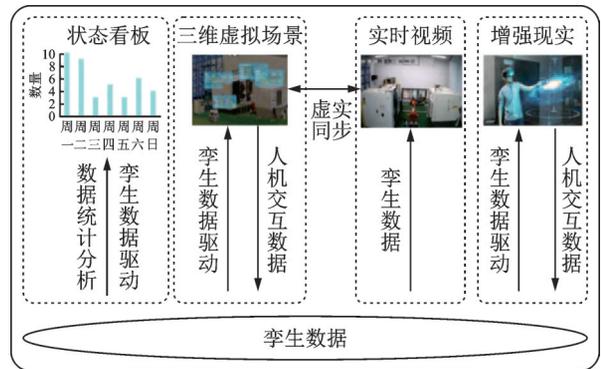


图6 可视化中孪生数据作用

Fig.6 Role of twin data in visualization

韩伊凡<sup>[30]</sup>提出一种算法任务自适应分配方案,运用到以数字孪生为基础的边云协同生产调度方案,实现了对生产过程中海量的数据进行快速处理分配,同时对不同特征的数据实现快速的分配与传输。张桐瑞<sup>[31]</sup>提出了以孪生数据驱动的动态调度决策方法,该方法实现了实时数据与历史生产数据深度运用,以实时数据的变化改变对生产调度的调整,并运用历史生产数据加以配合优化完善整体调度方法。

孪生数据在车间数字孪生中存在两个特点:绝对的不完整性和相对的完整性,绝对的不同步性和相对的同步性<sup>[32]</sup>。熊伟杰等<sup>[33]</sup>通过运用开放性生产控制和统一架构(OLE for process control unified architecture, OPC UA)与虚拟车间相结合,实现了车间服务系统与虚拟车间的实时数据高效交互,同时实现了物理车间层面的生产要素数据相互协调以及物理车间数据的信息融合,提升了车间数据交互的实时性和有效性。孪生数据的不完整性仍然是构建数字孪生的核心问题,虽然有相对的任务自适应分配算法与动态调度决策方法减少了这一特性的影响,但仍然无法消除,需要更为先进的技术对此问题进行研究。

## 1.5 数字孪生车间运行机制

数字孪生车间的运行机制涵盖了数字孪生车间整个生命周期。数字孪生车间的运行机制如图7所示,由图可见,数字孪生车间的运行必须发挥物理车间、虚拟车间、车间服务系统和车间孪生数据4部分在不同阶段的作用。

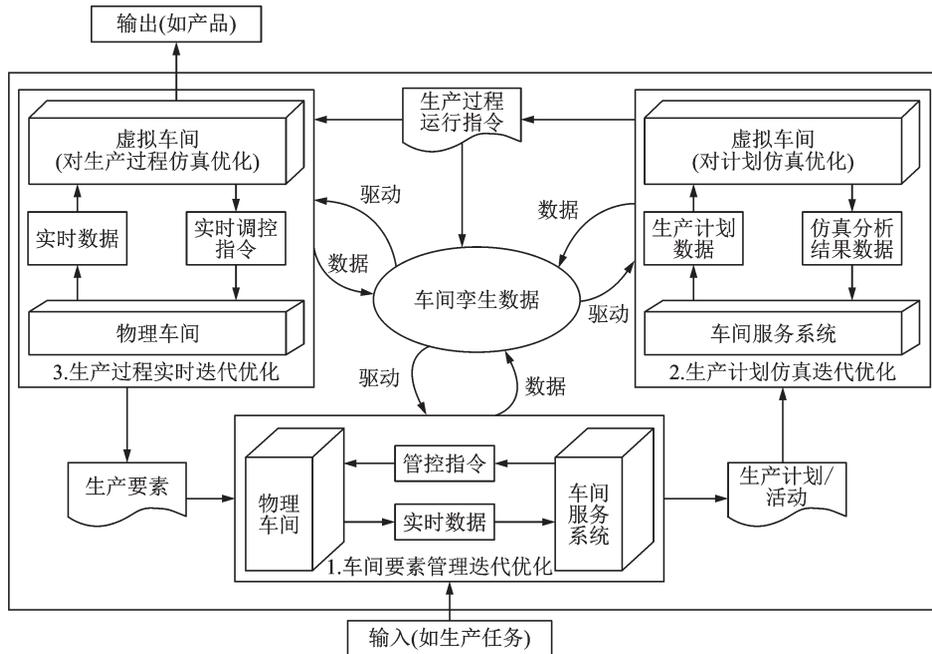


图7 数字孪生车间的运行机制

Fig.7 Operational mechanisms of the digital twin workshop

数字孪生车间运行贯穿于车间要素管理、生产计划仿真迭代、生产过程实时迭代3阶段<sup>[7]</sup>。

**第一阶段：**数字孪生车间接收到生产任务，车间服务系统对车间数字孪生历史数据进行分析，得到满足车间约束条件的初始生产方案。同时，对物理车间要素的实时数据进行分析，对初始方案进行优化，以管理指令反馈给物理车间。物理车间以此调节自身要素参数，并将数据实时反馈给车间服务系统，车间服务系统再次对生产方案进行优化，经过多次的优化迭代得到最优的初始生产方案，同时将迭代过程的数据全部储存并与车间孪生数据相融合，作为下一次的生产驱动力。

**第二阶段：**是对初始生产方案的进一步迭代优化。虚拟车间通过接收初始生产方案，将车间孪生数据与初始生产方案结合分析，运用自身仿真模型与结论结合进行的仿真分析。将仿真分析结果实时反馈于车间服务系统，车间服务系统以此为基础对初始生产方案再次优化，经过多次的迭代优化后实现初始生产方案最优化，通过虚拟车间的可视化技术实现最优生产方案的预生产并以生成生产指令传输给物理车间。通过对生产方案的预生产，实现车间的生产成本的降低并提升车间企业的生产效率。

**第三阶段：**物理车间与虚拟车间的虚实映射。物理车间接收虚拟车间产生的生产指令，对物理车间的生产设备物料等进行调整并按照生产指令进行生产活动，将物理车间的实时数据传送给虚拟车间，虚拟车间通过可视化技术展现物理车间实时状

况，当出现误差时，虚拟车间将根据车间孪生所有数据进行对比优化，以实时调控指令对物理车间进行调控。

经过3个阶段的不断迭代优化，实现生产最优的生产产品、数字孪生车间的自我完善以及自我调控与进化；实现物理车间、虚拟车间的实时交互与生产车间的实时调度，从而掌控管理车间生产，提升车间生产效率，减少车间损耗。3个阶段的完美交合是实现数字孪生实时传输运行的核心支撑。

## 2 热处理工艺研究

热处理工艺是一种通过加热、保温和冷却等步骤改变材料内部物相和显微组织结构的技术，它可以改善材料的物理、力学和化学性能，提高材料的可加工性、延展性和零件的耐久性，满足不同工程领域对材料特性的要求。此外，热处理工艺还能改善材料表面的质量，提高表面的硬度、耐磨性和抗疲劳性能。

目前，热处理工艺与数字孪生的研究正在迅速发展，数字孪生技术的出现使得热处理工艺的优化和控制更加高效和精确。数字孪生技术可以通过将物理系统数字化，建立数学模型，模拟和预测实际系统的行为和性能，为热处理工艺的优化和调控提供强大的工具和支持。利用数字孪生技术，可以优化热处理工艺的方案和参数，提高热处理质量和效率；同时，数字孪生技术还可以实时监测和控制热处理过程中的温度、保温时间、冷却速度等因素，使得热处理过程更加精确和可控。

### 2.1 数字孪生在传统热处理工艺中的应用

#### 2.1.1 基于数字孪生的智能化退火与正火技术

正火和退火是金属材料热处理比较常用的两种工艺技术。随着智能化技术的快速发展,相关的仿真模拟技术在正火、退火方面已经取得了一定的进展。Niederer等<sup>[34]</sup>设计了一种非线性模型预测控制器,运用到退火炉模型如图8所示。通过控制退火工艺的燃料供应与钢材的传输速度,实现钢材退火温度的调控,结合工业退火炉的高度仿真模型与控制器的相结合验证了该控制器的性能。Yildiz等<sup>[35]</sup>对连续退火工艺进行了研究,对连续退火炉进行了建模并分为加热与冷却两部分,并运用玻璃高脚杯模型填充于整个连续退火工艺过程中,运用对流求解法对炉内空气温度进行计算并运用到运动参照系中,实现了对连续热处理过程准确分析,从而得到材料在连续退火处理中的准确温度。

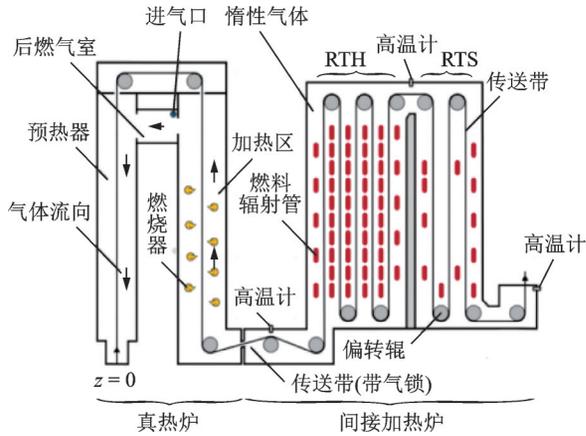


图8 直接和间接组合式退火炉模型

Fig.8 Combined direct and indirect annealing furnace models

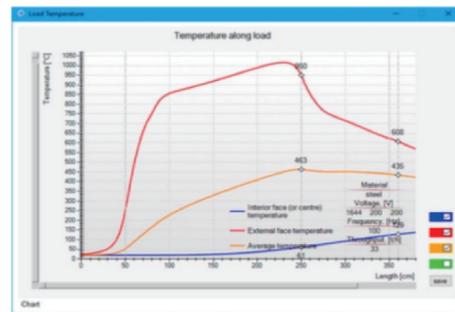
数字孪生技术作为工业4.0中的前沿智能化技术,已经在诸多领域受到了大量的关注。Dou等<sup>[36]</sup>运用数字孪生对3D线圈铁芯的退火过程进行了建模与优化,构建3D线圈铁芯与退火炉内对流热辐射的数字模型,将这两个模型相互联系在一起,通过流体力学进行相关参数的计算,同时实验证明了该数字模型与实际误差小于±2.5%。Zhang等<sup>[37]</sup>在此基础上进一步将数字孪生模型与热-力耦合模型相结合,通过数字孪生对晶粒电工钢进行退火,模拟实验得到相关应力曲线图,并运用热-力耦合模型对退火过程进行优化和模拟,缩短了钢材在材料性能不变的情况下的总退火时间。

不同的智能化技术对热处理的应用存在着很大差异,正火和退火工艺虽然比较简单,但不同材料、不同结构的产品及要求不同,关键工艺参数也不同。怎样将数字孪生技术与不同工艺方法及相

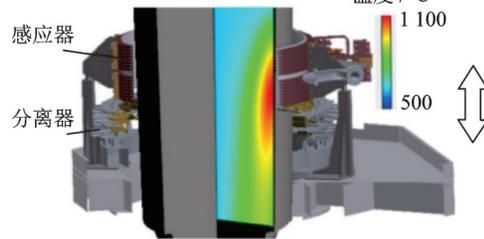
关参数结合,且以数字化可视化的方式展现,使得数据透明化更有利于生产车间的技术、管理要求仍需进一步努力。现阶段的数字孪生与智能化技术的结合都是对数字孪生片面化的展示,主要运用虚拟模型与其自我优化的特点运用于热处理中。

#### 2.1.2 基于数字孪生的智能化淬火与回火技术

Perevalov等<sup>[38]</sup>开发了一种新型大型轧辊感应热处理工艺,该工艺运用了相关的数字孪生技术进行了设计。运用数字孪生的自我优化与实时映射的特点,该系统可以显示淬火过程中的关键特征从而实现相关人员对系统的操作,同时运用以自我优化为主的数字化设计感应系统模块,实现自我调整设计、设备组成和热处理模式,以实现最高质量和最大限度地降低能源成本,如图9所示。



(a) Roll quenching calculation window



(b) Induction system model

图9 轧辊淬火仿真数字软件计算窗口及感应系统模型

Fig.9 Roll quenching simulation digital software calculation window and induction system model

Künne等<sup>[39]</sup>为解决在工业生产中无法准确地检测生产温度分布,提出了一种工业窑炉淬火加热的数字孪生模型,该模型记录每个钢件的数字孪生数据,并记录了钢件在淬火过程中的温度分布,同时根据钢件的数据提供最佳的工艺为后续处理提供相关的方案。Khalaj等<sup>[40]</sup>将机器学习技术与数字孪生技术相结合运用于42SiCr合金中,机器学习相结合的数字孪生技术在42SiCr中的运用反应出该方法对复杂性合金的分析更为准确,同时制作者可以运用虚拟材料在虚拟模型中进行金属构建。

现阶段淬火工艺与数字孪生的结合已经较为成熟,但由于数字孪生在工业制造方面的应用更为突出,淬火工艺的数字孪生常常为车间数字孪生体

中的一部分,且根据不同的产生要求,数字孪生体的整体构造也是大同小异,主要特点展示于虚拟模型与车间服务系统中。同时数字孪生将多种智能化技术的熟练运用与融合,是其实现对热处理车间完美掌控的依据,若存在的数字孪生系统缺少对自我优化、实时数据传输方面的问题,可结合智能化技术中的仿真模拟技术、智能传感器等智能化技术,从而实现数字孪生的完成。

在数字孪生理论技术早期,相关的智能化技术在回火工艺中已经有了一定的应用,Tang等<sup>[41]</sup>建立了定制回火过程的数值模型运用于22MnB5钢中。该模型通过运用带有加热区与冷却区的热成型U形槽进行验证。模型模拟该U形槽的回火过程并根据结果加以分析,证明了该模型可以调控对零件回火控制的最终性能,保证了零件的硬度变化。Yaparova等<sup>[42]</sup>对初始热状态未知的圆柱形温度场进行了测定方法精度的研究,经过实验测算出了温度场中足够精度的温度值,并运用于热处理过程数字孪生的开发中。

Rudskoy等<sup>[43]</sup>介绍了数字孪生在钢热处理中的运用。通过运用数字孪生技术对钢在热轧及热处理过程进行计算分析,同时包括回火工艺对钢的物理性能的相关计算。Liu等<sup>[44]</sup>构建了一种四联体CMCO模型的数字孪生设计框架,并以中空玻璃智能制造系统为例,结合数字孪生相关技术验证了该设计框架的可行性与高效性。运用Unity 3D引擎构建了该智能制造系统的数字孪生系统,实现了生产可视化。并通过对智能系统中的设计制造过程、回火过程进行分析,将数字孪生的自我优化相结合,展现了该框架的可行性。

数字孪生在回火中的运用仍然处于基础研究阶段,以虚拟模型为核心,进行对回火热处理的仿真分析,以可视化的形式展现出来。在以物理实体等为基础的核心部分运用较为薄弱,现阶段的数字孪生可运用传感器等智能传输技术运用于物理实体部分,将虚拟模型数据传输到物理实体中,通过与物理实体的实际效果对比,来优化数字孪生虚拟模型及仿真分析的正确性。

## 2.2 数字孪生在特殊热处理工艺应用

特殊热处理工艺相对于传统热处理工艺而言,是在传统热处理工艺的基础上进行的深入探索和发展,可以理解为是对传统热处理工艺的升级和扩展。根据环境运用的不同,相对应的特殊热处理工艺也存在着差异,数字孪生在表面热处理、低温热处理与真空热处理中的研究与应用取得了较好的进展。

### 2.2.1 基于数字孪生的智能化表面热处理技术

表面热处理技术是一种通过改变材料表面化学成分和微观组织结构来提高工件性能的方法。最为常见的表面热处理为化学热处理和表面淬火。

相关智能化技术在渗碳、渗氮工艺运用为实现数字孪生在该工艺领域中的运用提供了强有力的基础。智能化控制方面Ratajski等<sup>[45]</sup>实现了气体氮化过程的智能化控制,如图10所示,通过创建新的专业数据系统与特殊结构的传感器两种方法相结合实现操作员智能化控制气体氮化过程。仿真建模中Wołowicz-Korecka<sup>[46]</sup>对气体淬火、低压渗碳和低压渗氮技术进行了建模,通过对低压热处理过程的研究讨论,运用智能化数学建模技术实现了对低压热处理过程的设计与预测。

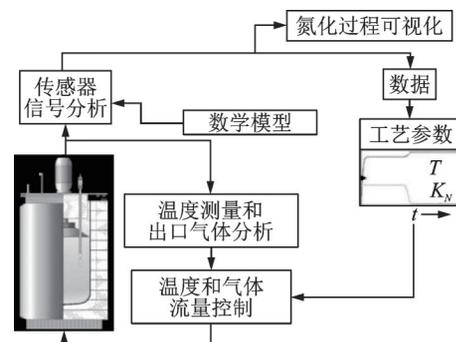


图10 氮化过程智能化控制系统

Fig.10 Intelligent control system for nitriding process

Rajaei等<sup>[47]</sup>提出了高性能烧结齿轮粉末冶金生产链的数字孪生模型,生产链模型如图11所示。该模型描述了材料在整个生产过程中的机械载荷与工艺条件。由于渗碳工艺对齿轮的孔隙率有影响,因此构建了渗碳模型。该模型对齿轮在渗碳淬火过程的相关应力进行了预测,并以可视化的方式展现整个齿轮渗碳淬火过程,实现了数据透明化,更有利于对工艺过程的监测。Hong等<sup>[48]</sup>运用实验模型与数字孪生模型构建了物质流动与影响晶粒的表面生成机制。该动态曲面的数字孪生模型揭示了磨削表面微渗碳效应及渗碳辅助磨削对加工表面性能的影响规律。

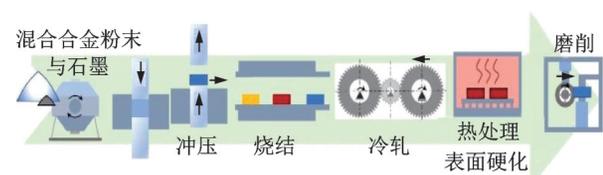


图11 高性能烧结齿轮粉末冶金生产链模型

Fig.11 Powder metallurgical production chain model for high performance sintered gears

智能化技术在激光淬火与电子束淬火中存在着大量的应用。Zhang等<sup>[49]</sup>对35CrMo钢构建了有限元分析模型,并对整个电子束表面淬火过程进行了温度场的仿真模拟,探讨了电子束光斑直径对温度场及钢材硬度低的影响。通过调整电子束的束流直径,仿真分析对应的温度场与钢材硬度。该模型验证了电子束光斑直径对钢材的脆化过程有着严重的影响。Li等<sup>[50]</sup>构建了一种预测模型运用于GCr15轴承钢中,该模型将激光淬火温度与钢材显微组织相结合,通过模拟激光淬火过程的温度变化与钢材显微组织的演变进行分析,根据模拟结果提出激光淬火工艺的优化工艺参数。

Knapp等<sup>[51]</sup>开发了一种运用于增材制造工艺的数字孪生构建模块,该模块运用激光熔融增材制造的冷却速率、凝固参数等工艺数据构建瞬时三维模型进行增材制造过程的计算,实现了在已有的数据提供下快速制造简易数字孪生体的方法。Aminzadeh等<sup>[52]</sup>提出运用数字孪生与激光焊接智能化监控技术相结合,构建新型数字化模型,整体模型如图12所示,提升焊接效率、保证焊接质量的设想。通过运用不同的几何检测技术构建了原始数字孪生模型,实现了远程监控流程的人为操控,并能完成自我反馈与维护。相关的激光数字孪生技术的运用为在表面淬火工艺的数字孪生运用提供了有力的理论基础。

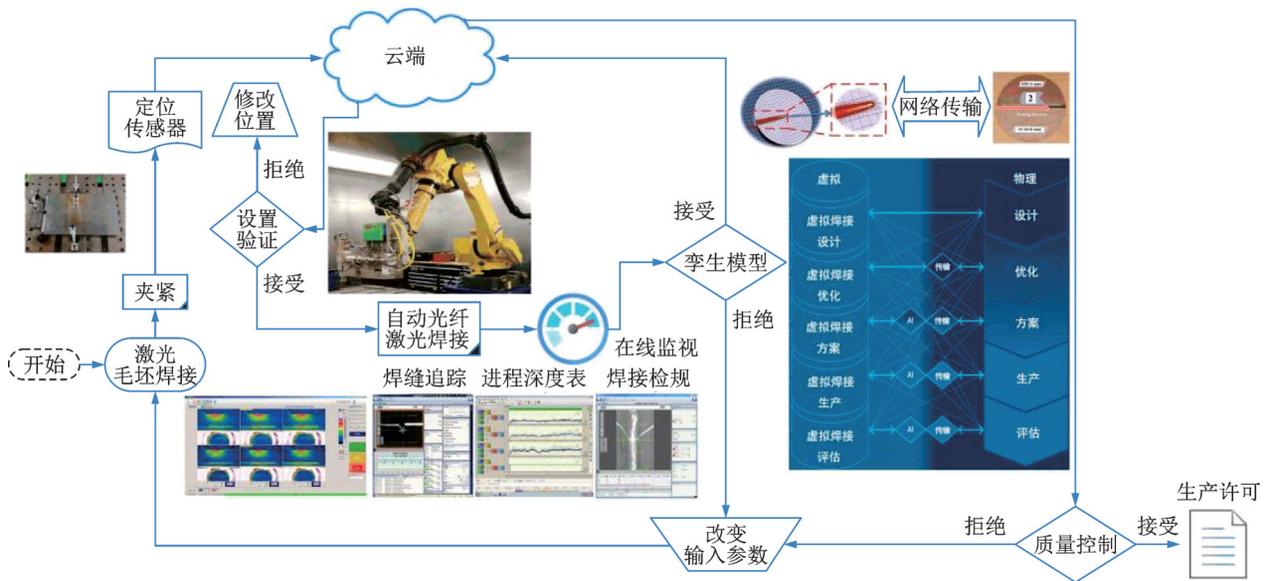


图12 智能化激光焊接监控系统数字孪生模型

Fig.12 Digital twin model for intelligent laser welding monitoring systems

2.2.2 基于数字孪生的智能化低温热处理技术

低温热处理是一种将金属材料加热或冷却至一定的低温范围,然后保持一定时间,再冷却或回升至室温的过程。其中最为常见的低温热处理工艺以低温淬火、液氮处理为主<sup>[53]</sup>。低温淬火通常略高于临界点,并运用空气或者油来进行冷却,从而减少金属的变形与开裂,提升金属基体的韧性和强度。液氮处理以液氮作为介质,将金属急速冷却到低温,避免材料发生非马氏体相变,提高淬透性。

Wang等<sup>[54]</sup>运用智能控制的低温箱与电阻炉进行低温热处理工艺,运用于2A11铝合金中,并运用智能化控制技术对温度进行了精准控制,保证了工艺的完美运行,实现了低温处理对铝合金的稳定性提升。Katoch等<sup>[55]</sup>运用优化算法对H13钢材的低温热处理工艺进行了优化,该算法对低温热处理中的保温温度与低温处理周期进行探讨,以工具钢的磨损量、平均摩擦因数与最大局部接触温度为

依据,并根据相关实验测算得出最优的保温温度与低温处理周期对H13钢材的热处理方案;运用智能控制技术精确掌控低温热处理的温度,并运用相关优化算法得出冷却曲线,可实现对整个低温热处理过程的控制。

Erkoyuncu等<sup>[56]</sup>通过低温二次生产的运行模式构建智能代理技术,以实现数字孪生的自我优化与迭代。Silvia等<sup>[57]</sup>综合整理了整个冷却剂辅助有限元模拟的发展过程,描述了切削过程中低温热处理系统对加工的影响,运用低温热处理技术的有限元模拟数据库与数字孪生技术可以更为准确地预测优化加工过程。将智能化的技术与数字孪生结合,进一步提升对低温热处理的掌控精度,并将数字孪生自我优化特点结合,可实现低温热处理工艺的进一步优化。

在低温热处理中,智能化技术能够将这一整体过程进行分化,对温度及冷却曲线等核心参数进行

管理并对热处理后的结果进行分析,从而实现整个低温热处理的智能化。而数字孪生的加入使各个碎片化的智能技术实现整合,从而实现更高精度的掌控与更快速度的优化。

### 2.2.3 真空热处理技术

Hao等<sup>[58]</sup>构建了三维数值模型与比例-积分-微分(PID)温度控制程序结合,应用于真空热处理炉中,对典型负载加热过程进行计算仿真,并得出结论负载最大温差和热滞后时间随着预热温度的提升而减少。在此基础上提出了指导真空热处理设计的定性关系,以此确定最优加工工艺。Wang等<sup>[59]</sup>运用模糊控制算法实现对真空热处理炉的智能化温度控制。Wołowicz-Korecka<sup>[60]</sup>提出了对低压热处理的建模数据进行深度挖掘的方法,运用计算机辅助设计优化技术,对低压渗碳和渗碳过程的建模过程进行详细分析,结果表明热处理建模方法应遵从数据质量、数据量、实施速度、关系复杂性等因素。智能控制技术、仿真分析技术等智能化技术的运用在真空热处理中能够更为有效的确定相关工艺,并对整个真空热处理进行实时掌控,并以此为基础进一步进行深入计算,实现真空热处理过程的自我优化。总之,智能化热处理技术在模拟数据仿真的运用为真空热处理数字孪生的虚拟模型提供了强有力的依据,同时相关的智能控制系统的运用为构建数字孪生服务系统提供了基础、相似数字孪生模型为真空热处理数字孪生模型提供了模板基础。

智能化技术在热处理中以智能控制技术精确控制温度、时间等核心参数,实现材料热处理的完美运行,减少材料不必要的相变发生,控制组织和变形。以仿真分析技术对相关热处理过程、温度、时间等进行模拟计算,从而确定最为精准的核心参数,实现最优的热处理过程。现阶段的热处理数字孪生技术是将上述技术进行结合,侧重点的不同,相应的功能也不同,都是以仿真分析功能为核心实现对数字孪生的搭建。然而该技术孪生仍侧重模型建立及仿真,无法实现有效的实时传输、分析,数据库的建立及机器学习应该是未来发展的重点。

## 3 总结与展望

本文详细介绍了基于数字孪生的热处理技术研究进展,一方面,通过分析数字孪生中基于车间数字孪生框架的数字孪生模型,阐述了车间数字孪生框架各部分模块的工作原理与特点,并对各个模块现阶段的研究工作进行分析与总结,指出了数字孪生模型在工业车间中的应用优点;另一方面,目

前基于数字孪生的热处理技术的研究,国内仍处于起步阶段,相关的智能化热处理技术为热处理数字孪生模型的构建提供了基础。

现阶段的数字孪生模型由于不同的数字孪生环境存在着不同的侧重点与需求,例如,一些关键技术的运用,如实时监控、预测分析或云计算,在相关性方面会有所不同,但数据挖掘的主要概念和基本架构仍然在所有领域普遍存在。数字孪生仍处于早期阶段,现阶段的数字孪生应对复杂的物理模型与多元化的数据处理依然是现阶段关注的重点。

相关的智能化热处理技术其核心本质是实现热处理中的各参数控制及分析。随着模拟和建模技术、5G技术、物联网技术的日益成熟,仿真、建模、分析和可视化软件的熟练运用,将智能化监控技术与虚拟仿真技术等结合,建立数据库及机器学习模型,将有助于更好地评估、优化工艺技术,正是数字孪生技术在热处理行业中的发展方向。

### 参考文献:

- [1] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.  
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Exploration of digital twins and their applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [2] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing[J]. Procedia manufacturing, 2017, 10: 1031-1042.
- [3] 刘大同,郭凯,王本宽,等.数字孪生技术综述与展望[J].仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.  
LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Overview and prospects of digital twin technology[J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39(11): 1-10.
- [4] TAO Fei, ZHANG Meng. Digital twin shop-floor: A new shopfloor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.
- [5] JONES D, SNIDER C, NASSEHI A, et al. Characterising the digital twin: A systematic literature review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36-52.
- [6] 杨林瑶,陈思远,王晓,等.数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J].自动化学报,2019,45(11):2001-2031.  
YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: Development status, comparison, and prospects[J]. Journal of Automation, 2019, 45(11): 2001-2031.

- [7] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.  
TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: A new model for future workshop operation[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(1): 1-9.
- [8] KONG T, HU T, ZHOU T, et al. Data construction method for the applications of workshop digital twin system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 323-328.
- [9] 刘义, 刘晓冬, 焦曼, 等. 基于数字孪生的智能车间管控[J]. 制造业自动化, 2020, 42(7): 148-152.  
LIU Yi, LIU Xiaodong, JIAO Man, et al. Intelligent workshop control based on digital twins[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(7): 148-152.
- [10] 姜康, 柯榕, 赵小勇, 等. 数字化车间虚拟监控系统研究[J]. 航空制造技术, 2016(20): 97-100, 104.  
JIANG Kang, KE Rong, ZHAO Xiaoyong, et al. Research on digital workshop virtual monitoring system [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(20): 97-100, 104.
- [11] 巫兴寰, 朱剑刚. 板式定制家具智能车间数字孪生模型探讨[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 25-32.  
WU Xinghuan, ZHU Jiangang. Discussion on the digital twin model of intelligent workshop for panel customized furniture[J]. Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 25-32.
- [12] 王建民, 宋庆奎, 彭莹莹, 等. 工业互联网支持下的数字孪生车间[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(9): 87-89.  
WANG Jianmin, SONG Qingkui, PENG Yingying, et al. Digital twin workshop supported by industrial internet[J]. Digital Technology and Applications, 2022, 40(9): 87-89.
- [13] ZHANG Q, ZHANG X, XU W, et al. Modeling of digital twin workshop based on perception data[C]// Proceedings of Intelligent Robotics and Applications: 10th International Conference (ICIRA 2017). Wuhan, China: Springer International Publishing, 2017: 3-14.
- [14] JONES D, SNIDER C, NASSEHI A, et al. Characterising the digital twin: A systematic literature review [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36-52.
- [15] 刘怀兰, 岳鹏, 閻辰皓, 等. 基于VDEVS的离散制造车间虚拟实体行为模型描述方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2950-2960.  
LIU Huailan, YUE Peng, HE Chenhao, et al. A VDEVS based description method for virtual entity behavior models in discrete manufacturing workshops [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2950-2960.
- [16] 周成, 孙恺庭, 李江, 等. 基于数字孪生的车间三维可视化监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(3): 758-768.  
ZHOU Cheng, SUN Kaiting, LI Jiang, et al. A workshop 3D visualization monitoring system based on digital twins[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2022, 28(3): 758-768.
- [17] 桂勇. 基于数字孪生的车间动态调度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.  
GUI Yong. Research on dynamic workshop scheduling based on digital twins[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [18] TAO F, CHENG Y, XU L D, et al. CCIoT-CMfg: Cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1435-1442.
- [19] 宋微. 基于数字孪生的Z公司装备制造车间现场管理辅助系统设计[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.  
SONG Wei. Design of on-site management assistance system for equipment manufacturing workshop of Z company based on digital twins[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2021.
- [20] YAN J, LIU Z, ZHANG C, et al. Research on flexible job shop scheduling under finite transportation conditions for digital twin workshop[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 72: 102198.
- [21] 孙恺廷. 基于数字孪生的车间三维虚拟监控系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
SUN Kaiting. Research on a 3D virtual monitoring system for workshop based on digital twins[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [22] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 141-144.
- [23] 郭东升, 鲍劲松, 史恭威, 等. 基于数字孪生的航天结构件制造车间建模研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 578-585, 607.  
GUO Dongsheng, BAO Jinsong, SHI Gongwei, et al. Modeling of aerospace structural parts manufacturing workshop based on digital twins[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2018, 44(4): 578-585, 607.
- [24] QI Q, TAO F, ZUO Y, et al. Digital twin service towards smart manufacturing[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 237-242.
- [25] 张南, 张顺, 刘利勋, 等. 基于数字孪生的车间生产过程监控方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(7): 156-159.

- ZHANG Nan, ZHANG Shun, LIU Lixun, et al. A workshop production process monitoring method based on digital twins[J]. *Modular Machine Tool and Automation Processing Technology*, 2022(7): 156-159.
- [26] LATIF H, STARLY B. A simulation algorithm of a digital twin for manual assembly process[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 48: 932-939.
- [27] 张洁. 断路器检测线中数字孪生模型的碰撞检测及其动力学控制方法研究[D]. 温州: 温州大学, 2021.  
ZHANG Jie. Research on collision detection and dynamic control methods of digital twin models in circuit breaker detection lines[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [28] 陈振, 丁晓, 唐健钧, 等. 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(12): 46-50, 58.  
CHEN Zhen, DING Xiao, TANG Jianjun, et al. Exploration of production control mode in aircraft assembly workshops based on digital twins[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2018, 61(12): 46-50, 58.
- [29] 宗学妍. 基于数字孪生的车间作业仿真与监控系统的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2021.  
ZONG Xueyan. Design and implementation of workshop operation simulation and monitoring system based on digital twin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences), 2021.
- [30] 韩伊凡. 基于数字孪生的边云协同生产调度研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.  
HAN Yifan. Research on edge cloud collaborative production scheduling based on digital twins[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [31] 张桐瑞. 基于数字孪生的柔性车间调度方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
ZHANG Tongrui. Research on flexible workshop scheduling method based on digital twins[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [32] 裴爱根, 戚绪安, 刘云飞, 等. 基于五维模型的数字孪生树状拓扑结构[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(S1): 240-243.  
PEI Aigen, QI Xu'an, LIU Yunfei, et al. Digital twin tree topology structure based on five dimensional model[J]. *Computer Application Research*, 2020, 37(S1): 240-243.
- [33] 熊伟杰, 郭宇, 黄少华, 等. 基于 OPC UA 的数字孪生车间实时数据融合与建模研究[J]. *机械设计与制造*, 2022(7): 143-148.  
XIONG Weijie, GUO Yu, HUANG Shaohua, et al. Research on real time data fusion and modeling of digital twin workshop based on OPC UA [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2022(7): 143-148.
- [34] NIEDERER M, STROMMER S, STEINBOECK A, et al. Nonlinear model predictive control of the strip temperature in an annealing furnace[J]. *Journal of Process Control*, 2016, 48: 1-13.
- [35] YILDIZ E, BAŞOL A M, MENGÜÇ M P. Segregated modeling of continuous heat treatment furnaces [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 249: 106993.
- [36] DOU R, ZHAO H, ZHAO P, et al. Numerical model and optimization strategy for the annealing process of 3D coil cores[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 178: 115517.
- [37] ZHANG K, DOU R, ZHAO P, et al. Annealing process optimization of 3D coil core based on annealing simulation experiment and thermal mechanical coupling model[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 216-229.
- [38] PEREVALOV Y, DEMIDOVICH V. Simulation of physical fields in induction hardening technology — From digital twin to new technology[C]//Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Chelyabinsk, Russian Federation: IOP Publishing, 2020, 969(1): 012051.
- [39] KÜNNE S, MODY K, VALDER W S G. Digitalisation in industrial furnace manufacturing[J]. *Aluminium International Today*, 2020, 33: 23-24.
- [40] KHALAJ O, JAMSHIDI M, HASSAS P, et al. Metaverse and AI digital twinning of 42SiCr steel alloys[J]. *Mathematics*, 2023, 11(1): 4.
- [41] TANG B T, BRUSCHI S, GHIOTTI A, et al. Numerical modelling of the tailored tempering process applied to 22MnB5 sheets[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, 81: 69-81.
- [42] YAPAROVA N, KORYAGIN Y. Method for determining the thermal state of the body during complex heat treatment[C]//Proceedings of 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia: IEEE, 2020: 423-428.
- [43] RUDSKOY A I, KOLBASNIKOV N G. Digital twins of processes of thermomechanical treatment of steel[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, 62: 3-10.
- [44] LIU Q, LENG J, YAN D, et al. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 52-64.

- [45] RATAJSKI J, OLIK R, TACIKOWSKI J, et al. Intelligent control system for gaseous nitriding process [J]. *La Metallurgia Italiana*, 2006, 98(7): 21-27.
- [46] WOŁOWIEC-KORECKA E. Modeling methods for gas quenching, low-pressure carburizing and low-pressure nitriding[J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 489-505.
- [47] RAJAEI A, DENG Y, SCHENK O, et al. A digital twin of the powder metallurgical manufacturing chain of high strength sintered gears[J]. *Research Square*, 2020. DOI:10.21203/rs.3.rs-95131/v1.
- [48] HONG Y, SUN C, XIU S, et al. Strengthening surface generation mechanism of carburizing-assisted grinding[J]. *Tribology International*, 2023, 180: 108300.
- [49] ZHANG C, LI S, WEI H, et al. Analysis of electron beam surface quenching performance and simulation and verification of temperature field of 35CrMo steel [C]//Proceedings of MEMAT 2022; 2nd International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing and Automation Technology. Guilin, China: VDE, 2022: 1-5.
- [50] LI Z, WEN Z, SU F. Modeling research on laser quenching process of GCr15 bearing steel basing on material properties obtained with experimental methods[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(9): 096516.
- [51] KNAPP G L, MUKHERJEE T, ZUBACK J S, et al. Building blocks for a digital twin of additive manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2017, 135: 390-399.
- [52] AMINZADEH A, SATTARPANAH KARGANROUDI S, MEIABADI M S, et al. A survey of process monitoring using computer-aided inspection in laser-welded blanks of light metals based on the digital twins concept[J]. *Quantum Beam Science*, 2022, 6(2): 19.
- [53] KALSIN S, SEHGAL R, SHARMA V S. Cryogenic treatment of tool materials: A review[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(10): 1077-1100.
- [54] WANG J J, XUE X D, YANG Z Q, et al. Effect of cryogenic treatments on mechanical properties of 2A11 aluminum alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 146/147: 1646-1650.
- [55] KATOCH S, SEHGAL R, SINGH V, et al. Improvement of tribological behavior of H-13 steel by optimizing the cryogenic-treatment process using evolutionary algorithms[J]. *Tribology International*, 2019, 140: 105895.
- [56] ERKOYUNCU J A, FARSI M, ARIANSYAH D. An intelligent agent-based architecture for resilient digital twins in manufacturing[J]. *CIRP Annals*, 2021, 70(1): 349-352.
- [57] SÍLVIA R C, LAURO C H, ANA H, et al. Development of FEM-based digital twins for machining difficult-to-cut materials: A roadmap for sustainability[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 739-766.
- [58] HAO X, GU J, CHEN N, et al. 3-D numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(14/15): 1925-1931.
- [59] WANG X Y, ZHOU Z W. Research on fuzzy control in vacuum heat treatment furnace temperature control system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 397/398/399/400: 1236-1240.
- [60] WOŁOWIEC-KORECKA E. Methods of data mining for modelling of low-pressure heat treatment[J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2017, 85(1): 31-40.

(编辑: 胥橙庭)