

面向超塑成形工艺的数字孪生系统研究

李运硕¹, 周雨威^{1,2}, 袁傲明^{1,2}, 刘晨枫^{1,2}, 董琬婷^{1,2}, 李永兵^{1,2},
熊成悦^{1,2,3}, 孙慕齐¹

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司 先进成形技术与装备全国重点实验室, 北京 100083;
2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083; 3. 清华大学 材料学院, 北京 100084)

摘要: 为解决超塑成形工艺中热-力-气多物理场集成控制的难题, 提升轻量化多层复杂结构件的成形质量、生产效率和产品一致性, 通过信息技术与材料、工艺及设备的融合, 开发了一种超塑成形工艺数字孪生系统。研究了超塑成形生产单元的物理模型、基于工艺流程的数字孪生体建模、基于边缘网关的多源异构数据采集存储、工艺数据库和数据可视化等关键技术。最后, 在自主研发的 8000 kN 超塑成形/扩散连接设备上开展了实验验证, 完成了 TC4 钛合金半球成形全过程, 实现了对超塑成形设备和工艺的可视化监测与控制。为实现超塑成形工艺的数字化、自动化、智能化提供了途径和方法。

关键词: 数字孪生; 超塑成形; 系统架构; 工艺可视化; 异步存储

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.029

中图分类号: TP271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0192-08

Research on digital twin system for superplastic forming process

Li Yunshuo¹, Zhou Yuwei^{1,2}, Yuan Aoming^{1,2}, Liu Chenfeng^{1,2}, Dong Wanting^{1,2}, Li Yongbing^{1,2},
Xiong Chengyue^{1,2,3}, Sun Muqi¹

(1. National Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China; 3. School of Materials Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the problem of thermal-force-gas multi-physics integrated control in superplastic forming process and improve the forming quality, production efficiency and product consistency of lightweight multi-layer complex structural parts, a digital twin system was developed by the integration of information technology with material, process and equipment. Then, the key technologies such as physical model of superplastic forming production unit, digital twin modeling based on process flow, multi-source heterogeneous data collection and storage based on edge gateways, process database and data visualization were studied. Furthermore, the experimental verification was carried out on the independently developed 8000 kN superplastic forming/diffusion joining equipment, and the entire process of TC4 titanium alloy hemispherical forming was completed, achieving visual monitoring and control of the superplastic forming equipment and process, which provided ways and methods to realize the digitization, automation and intelligence of superplastic forming process.

Key words: digital twin; superplastic forming; system architecture; process visualization; asynchronous storage

超塑成形技术是基于材料在细晶、高温、低应变速率条件下的高伸长率特性, 具有成形性能好、型面精度高、设计自由度大、无残余应力和无回弹等优点, 其与扩散连接工艺复合, 被广泛应用于异

形曲面结构、多层中空结构和空间点阵结构等航空航天领域中轻量化复杂结构件的成形, 被誉为现代航空航天工业生产的开创性技术^[1-3]。

超塑成形工艺在热-力-气耦合加载环境中进行, 传统的工艺与设备通常采用独立控制的方式, 而超塑成形工艺的控制系統较为分散。此外, 其成形过程在闭合的模具内进行, 无法进行实时的可视化观测, 因此, 其耦合控制往往依赖于生产经验, 这就导致成形质量、生产效率和产品一致性难以提升, 难以满足飞行器关键零部件更加严苛的质量和效率要求。随着智能制造理念和技术的不断深入,

收稿日期: 2023-01-31; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 中国机械总院技术发展基金(912202Q9); 燃烧、热结构与内流场重点实验室基金(SY41YYF202209054)

作者简介: 李运硕(1997-), 男, 硕士

E-mail: lys813914@163.com

通信作者: 李永兵(1967-), 男, 博士, 研究员

E-mail: lybustb@163.com

如何通过信息技术为生产单元赋能，实现工艺的精准控制、科学决策和精益管理，已成为超塑成形技术转型升级的重要挑战。

数字孪生技术通过动态连接物理空间和虚拟空间，促进了新一代信息技术和传统工艺的融合^[4]，已在产品生命周期（包括设计、制造和运营）管理中被广泛研究^[5]。其中，面向制造加工领域，Polini W 等^[6]在复合材料组件轻量化设计中引入数字孪生技术，建立了零件从设计到装配的清晰数据流，从而减少了产品的几何偏差。Zhang X Q 等^[7]提出了一种数字孪生驱动产品智能制造系统的应用框架，并在航空发动机风扇叶片制造中应用。Liu J F 等^[8]通过引入数字孪生技术，提出了一种用于模拟加工过程的多维建模方法，并以柴油机部件为实验对象，验证结果显示材料的去除率提高了 5.1%，变形率降低了 30.13%。Dvorak J 等^[9]研究了一种用于混合制造的数字孪生系统，通过模型识别、刀具路径扫描，从而预测被加工零件的几何尺寸、结构力学特点和表面光洁度。Chakraborty S 等^[10]提出辅助代理模型，用于数字孪生系统中的实时仿真。周程辉^[11]基于数字孪生技术研究了一个冲压成形的动态监控系统，解决了特定曲率船板冲压成形过程信息交互障碍的问题。张俊涛^[12]在数字孪生系统中引入了神经网络的方法，对薄壁加工件提供了变形预测模型。Zhu Z X 等^[13]提出了一种数字孪生驱动的薄壁零件制造框架，使操作人员的操作管理更加准确，减少了生产成本，缩短了生产周期。汤鹏等^[14]针对锻造液压的虚实映射搭建了锻造液压机的数字孪生框架，将锻造过程可视化，提高了锻压机的工作可靠性。彭宇升等^[15]在数字孪生技术的基础上提出了智能航空锻造单元概念，并将其应用于航空锻造生产中。然而，上述研究主要聚焦于构建数字孪生模型理论框架，或利用数字孪生系统进行车间级的生产调度和工艺流程管理，缺乏结合材料、工艺、装备的特点，针对具体的成形工艺开展数字孪生系统的研究，无法有效支撑工艺过程的自主学习和优化迭代等智能制造过程。

因此，本文基于课题组的相关研究成果^[16-20]，在超塑成形材料、工艺、装备研究的基础上，提出了面向超塑成形生产单元的数字孪生系统架构，搭建了生产单元与工艺过程多维物理实体孪生模型，设计了基于现场网关和异步存储的数据采集传输存储模式，构建了基于现场数据、历史数据、模拟仿真数据的工艺数据库，实现了数据可视化交互，最

后采用本课题组自主研发的 8000 kN 超塑成形/扩散连接设备进行了应用验证，实现了对设备和工艺的可视化监测与控制，推动了超塑成形工艺向数字化、自动化和智能化方向发展。

1 超塑成形工艺数字孪生系统架构

超塑成形工艺具有多场耦合、工艺控制集成度低、无法直接观测成形过程的特点，为方便可视化监控系统的设计，结合数字孪生五维模型^[21]，通过功能层、模型层、数据层、物理层共 4 层建立超塑成形工艺数字孪生系统架构，如图 1 所示，各层之间通过数据流链接，实现“感知-分析-控制”的超塑成形工艺闭环优化。

图 1 中，物理层是整个数字孪生系统的基础，主要由实际生产中超塑成形生产单元的温控系统、机械系统、液压系统、气控系统、物流系统、冷却系统、模具、工件和现场环境组成，其工艺逻辑关系和采集的参数是构建数字孪生模型的关键。模型层采用“模型+数据驱动”的建模方法，通过还原物理实体的几何尺寸、装配关系和动态运动关系进行三维建模，并且利用数据层传输的实时工艺数据搭建数据驱动的工艺参数优化模型。数据层是连接下层物理层和上层模型层的枢纽。数据来源包括物理层的实时工艺数据（如压力传感器、热电偶、气压计等传感器采集的工艺信息参数）以及模型层的模拟仿真数据和工艺决策数据等。通过物理层采集的数据经过消息中间件传输进本地服务器中的数据库，经过数据融合与处理传送至模型层；通过模型层优化处理得到的工艺控制指令则实时传送至物理层，实现超塑成形工艺的动态控制。功能层包括超塑成形生产单元中的设备可视化动态监控与运维、工艺的实时交互、工艺流程管控与产品质量管理等。用户可以在客户端实时监测生产单元的设备状态、工艺流程、工艺数据、产品数据等，也可以通过对孪生体的数据交互实现对设备的动态控制。

2 超塑成形生产单元的数字孪生建模

2.1 超塑成形设备多维孪生模型的搭建

超塑成形设备的分系统较多，且存在相互耦合的关系，需要从几何、机械、电气、液压、温度、气路等多维度搭建设备的孪生模型，其孪生模型的场景树如图 2 所示。

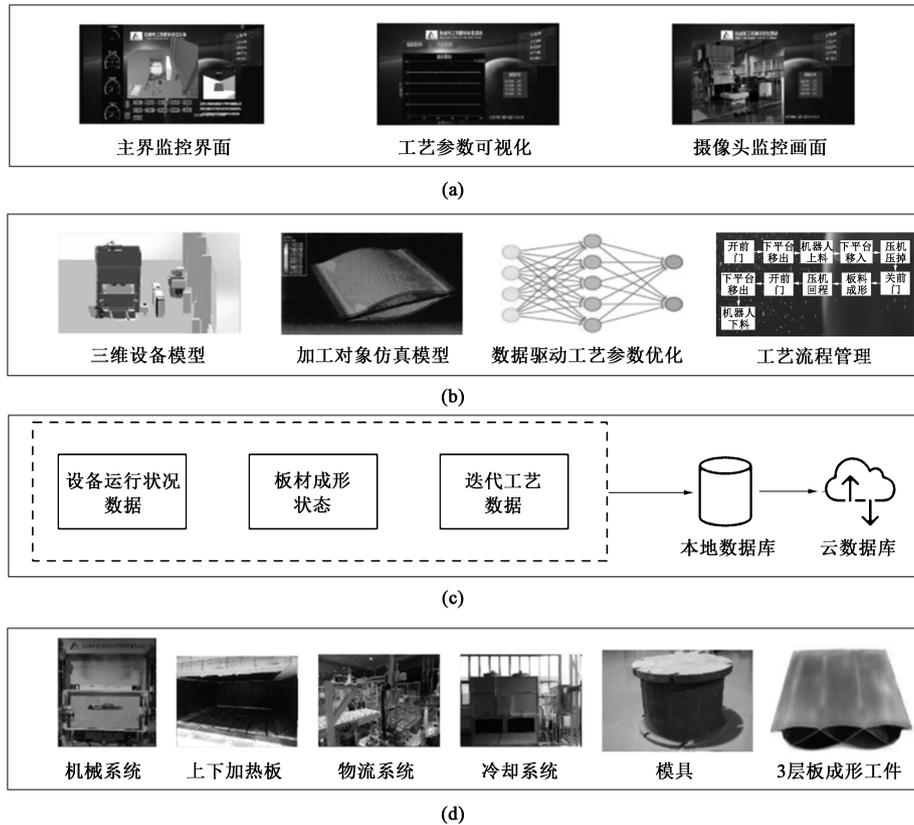


图 1 超塑成形工艺数字孪生系统架构

(a) 功能层 (b) 模型层 (c) 数据层 (d) 物理层

Fig. 1 Digital twin system architecture of superplastic forming process

(a) Functional layer (b) Model layer (c) Data layer (d) Physical layer

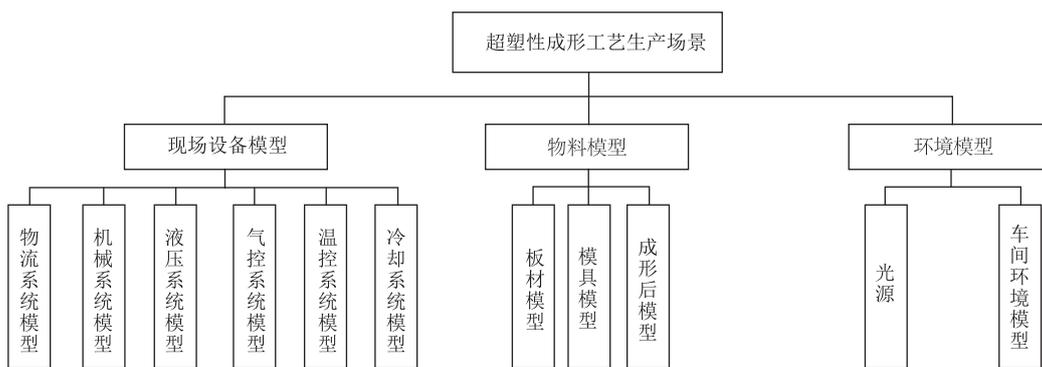


图 2 超塑成形工艺的场景树

Fig. 2 Scenario tree of superplastic forming process

在几何模型部分，使用三维建模软件完成超塑成形工艺生产场景的建模，并进行渲染和轻量化处理，在不同的尺度下对模型进行适当简化，提高系统的流畅性。在机械、电气、液压、气路模型部分，分别根据设备设计和运行的原理，建立对应的物理模型，并加以可视化展示。

2.2 基于工艺流程的数据驱动物料模型的建立

由于超塑成形过程是在闭合模具中完成，无法可视化，难以实时获得精确可靠的孪生体模型。此外，超塑成形零件的成形质量（如强度、型面尺寸精度、壁厚均匀性等）受原材料组织性能、温度、气体加载压力、压边力、模具结构、润滑条件等参数影响，通过传统的拟合手段无法准确描述和

建模。因此，本文采用数据驱动的工艺流程建模方法，依据超塑成形工艺流程来设计模型脚本，其脚本与数据库接口连接，数据库的改变引起脚本的改变，进而实现孪生系统中模型的实时映射和数据的实时显示。

3 超塑成形工艺数字孪生系统数据信息处理

3.1 基于边缘网关的现场数据的采集和存储

考虑到超塑成形生产单元各模块输出的数据结构不同、接口协议不同，本文选用边缘现场网关进行多源异构数据的采集。其中，内置的多种主流 PLC 协议和外置的多种接口，可以解决不同接口协议设备、不同数据结构设备之间的数据流通问题，具有可拓展性高、采集架构简单的优点，同时，也有效降低了数据维护成本和孪生系统的复杂程度，并增加了系统的安全可靠性。在本文的超塑成形生产单元中，使用 TCP/IP 接口协议传输各控制模块的 PLC 数据，对于温度巡检仪、压力变送器传感器数据，则使用 RS485 接口进行获取，并通过 MQTT 协议对接私有云输出 json 格式数据结构，将获取的多源异构数据在网关内部进行整合。

另外，由于传统数据存储架构过于依赖现场超塑成形设备，无法满足基于数据驱动的孪生模型对温度、气压等工艺参数上传及下发的高精度、低时延要求，所以本文在数字孪生系统的服务端部署了数据库。考虑到数据库中需要针对工艺数据进行大量实时的 CRUD 操作（Create、Retrieve、Update、Delete），传统的关系型数据库存读过程需要反复链接数据库，容易导致运行效率过慢、负载过高。因此，本文根据超塑成形工艺的数据采集需求，采用 Redis+MySQL 的数据异步存储设计架构，如图 3 所示。使用 Redis 作为 MySQL 的缓存数据库，将现场的实时数据与需要反复调用的历史工艺数据和仿真数据放在 Redis 中，历史工艺数据和仿真数据则放在 MySQL 中，从而加快数据库的实时访问速度。

3.2 超塑成形工艺数据库的搭建

超塑成形工艺通常针对于钛合金、高温合金、Ti-Al 系金属间化合物的多层复杂结构，形成成本较高，因此需要严格把控成形质量，依赖经验生产模式难以满足产品质量需求。此外，针对高熵合金、金属基复合材料等新材料，其不同温度和加载状态下的材料性能参数和工艺窗口范围尚不明确，需

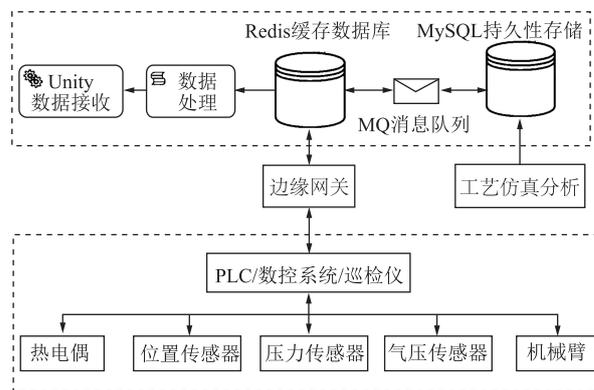


图 3 数据传输-存储架构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of data transport-storage architecture

要基于实验数据和仿真数据进行新工艺的探索和生成。因此，本文搭建了基于现场数据、多维历史数据与模拟仿真数据的超塑成形工艺数据库，以强度、型面精度、壁厚均匀性作为目标，对成形温度、成形气压、压边力、模具使用次数、润滑条件、冷却条件等参数进行分析，并基于数据驱动的机器学习模块对超塑成形的工艺参数进行优化迭代，以获得不同零件超塑成形工艺参数数据库，对以后的生产和研究具有进一步的指导作用。

4 超塑成形工艺数字孪生系统的应用验证

本文采用自主研发的 8000 kN 超塑成形/扩散连接设备，最高加热温度为 950 °C，工作台面尺寸为 1600 mm×1400 mm，常用于钛合金、铝合金和高温合金超塑成形产品的加工制造，并用以 Al-Li 合金、镁合金和高熵合金等轻量化新材料的超塑成形工艺的研发，服务于航空航天、国防军工、先进交通装备等领域，且配备了具有高温端拾器的机器人上下料系统，实现了自动化上下料。由于设备开发时间较长，其主机系统、温控系统、气控系统、物流系统均为独立的控制单元，分系统之间缺乏耦合，面对科研和生产的高端任务需求，亟需提升设备的数字化程度和成形零件的质量。

因此，根据本文所述的方法，将此超塑成形工艺数字孪生系统应用于 TC4 钛合金半球零件的生产验证。具体实现过程如下。

(1) 虚拟实体及工艺场景的搭建：首先获取车间设备和物料模型信息，在超塑成形生产单元装备数字孪生体的基础上，建立 TC4 半球零件的板料

和模具数字孪生模型,半球零件直径为 $\Phi 521$ mm,成形初始坯料为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的 TC4 钛合金板料,其化学成分如表 1 所示。通过在软件中建立可变形网格模型对成形的钛合金板料进行实时展示。模具为球墨铸铁材料,其实物和孪生模型如图 4 所示。在超塑成形工艺开始前,将板料的材料成分和力学性能,零件的几何尺寸及公差,切割、清洗前的处理工艺数据,模具润滑条件以及使用次数

等信息输入系统,完成工艺场景搭建。

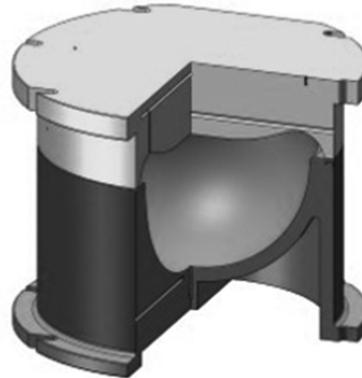
表 1 TC4 钛合金化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy (% , mass fraction)

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~6.8	0.30	0.10	0.10	0.05	0.015	0.015	余量



(a)



(b)

图 4 模具实体 (a) 和孪生模型 (b)

Fig. 4 Mold entity (a) and twin model (b)

(2) 基于边缘网关的数据采集和存储: 该验证实例的数字孪生系统的数据采集和存储是基于半球

零件的超塑成形工艺流程的,其工艺流程和期间提取的主要数据如表 2 所示。

表 2 TC4 钛合金半球零件超塑成形工艺流程和采集的数据

Table 2 Flow and collected data for superplastic forming process of TC4 titanium alloy hemispherical part

序号	工艺内容	采集数据
1	升温: 通过温控系统将炉体内的上下加热平台升温, 使炉腔内温度升至 $875\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并保温, 温度均匀性 $\leq \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温曲线如图 5a 所示。	上下平台和模具中所有的加热管电流、热电偶温度。
2	上料: 打开炉门, 利用机械臂抓取板料, 将板料由码垛位置放至下模指定位置, 关闭炉门。	6 轴机械臂的姿态数据、端拾器温度传感器数据、炉门及左右围挡位置状态。
3	合模: 利用液压机控制上模下行至合模位置, 并设定压边力使模腔处于完全封闭状态。	滑块位置、下压速度、压边力。
4	反向气胀成形: 将氩气通过下模进气孔进入型腔, 控制充入的氩气压强使板料贴合上模, 并动态调整压边力, 实现板料厚度重新分配, 压强曲线如图 5b 所示。	气体加载压强、压边力。
5	正向气胀成形: 将氩气通过上模进气孔进入型腔, 控制充入的氩气压强使板料贴合下模, 并动态调整压边力, 保压一段时间, 实现半球零件的最终成形, 压强曲线如图 5c 所示。	气体加载压强、压边力。
6	冷却: 卸压、滑块上行, 关闭加热系统, 待平均温度降至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后开启炉门。	热电偶温度、滑块位置、上行速度、炉门、左右围挡位置状态。
7	下料: 机械臂取出成形的半球零件放置到物流床, 由传送带转送至成品放置区。	6 轴机械臂的姿态数据、端拾器温度传感器数据、传送带状态。

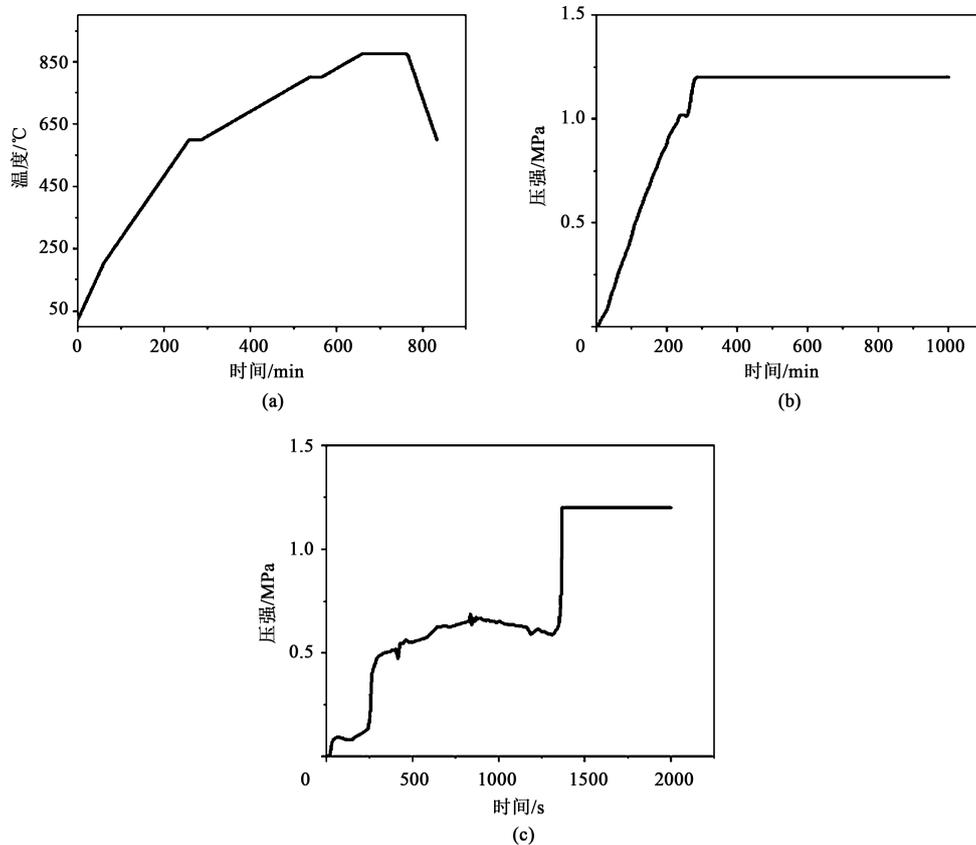


图 5 升温曲线和反/正向气胀成形压强曲线

(a) 升温曲线 (b) 反向气胀成形压强曲线 (c) 正向气胀成形压强曲线

Fig. 5 Temperature rise curves and reverse/forward gas bulging forming pressure curves

(a) Temperature rise curve (b) Reverse gas bulging forming pressure curve (c) Forward gas bulging forming pressure curve

针对半球零件超塑成形工艺，通过物理层传感器等数据采集装置提取机械臂位姿信息、炉内气压、上下加热平台平均温度和保压时长等工艺数据，结合材料信息、工件信息、润滑条件、模具使用次数等模型输入数据，通过边缘网关配置 RabbitMQ 消息队列存储进数据库，并在下一步脚本接口调用其驱动孪生模型，在孪生系统中展示完整的工艺流程和数据信息。

(3) 完成工艺数据库搭建和数字孪生系统人机交互设计：针对 TC4 钛合金半球零件的正反向超塑成形过程，数字孪生系统实现直观观测当前工艺的完成度、加热系统的温度场和腔内气压，实现对整个工艺流的自动控制，并在主画面中进行同步。由于零件的超塑成形过程在模具内部完成，无法进行实际观测，数字孪生系统根据现场采集的数据及模拟仿真结果，动态预测零件成形过程，并通过 Unity3D 中的网格渲染功能，将模具内的成形过程进行模拟展示。针对成形完成后的半球零件，每生产批次选取 1 个半球零件，分别取距离半球中心弧长为

1、50、100、150 和 200 mm 这 5 个位置的成形壁厚进行测量，和该批次零件在步骤 (2) 中取得的生产信息作为样本录入工艺数据库进而优化模型和指导生产。数字孪生系统的数据可视化面板、工艺数据库、现场监控和警告状态提示窗等功能的人机交互流程如图 6 所示。

数字孪生系统在 8000 kN 超塑成形/扩散连接设备的总控计算机上进行测试，计算机的系统配置为 CPU: i5-10200H, 显卡: GTX1650, 内存: 16 GB。超塑成形工艺孪生系统运行时的 FPS 稳定在 50 以上，并保持从物理空间到孪生系统空间的映射的低延迟运行，能够实现 TC4 钛合金半球成形工艺的数字孪生功能。

5 结语

本文为提升轻量化多层复杂结构件产品的质量和生产效率，针对目前超塑成形工艺数字化程度低和集成控制难的问题，设计了基于数字孪生系统的

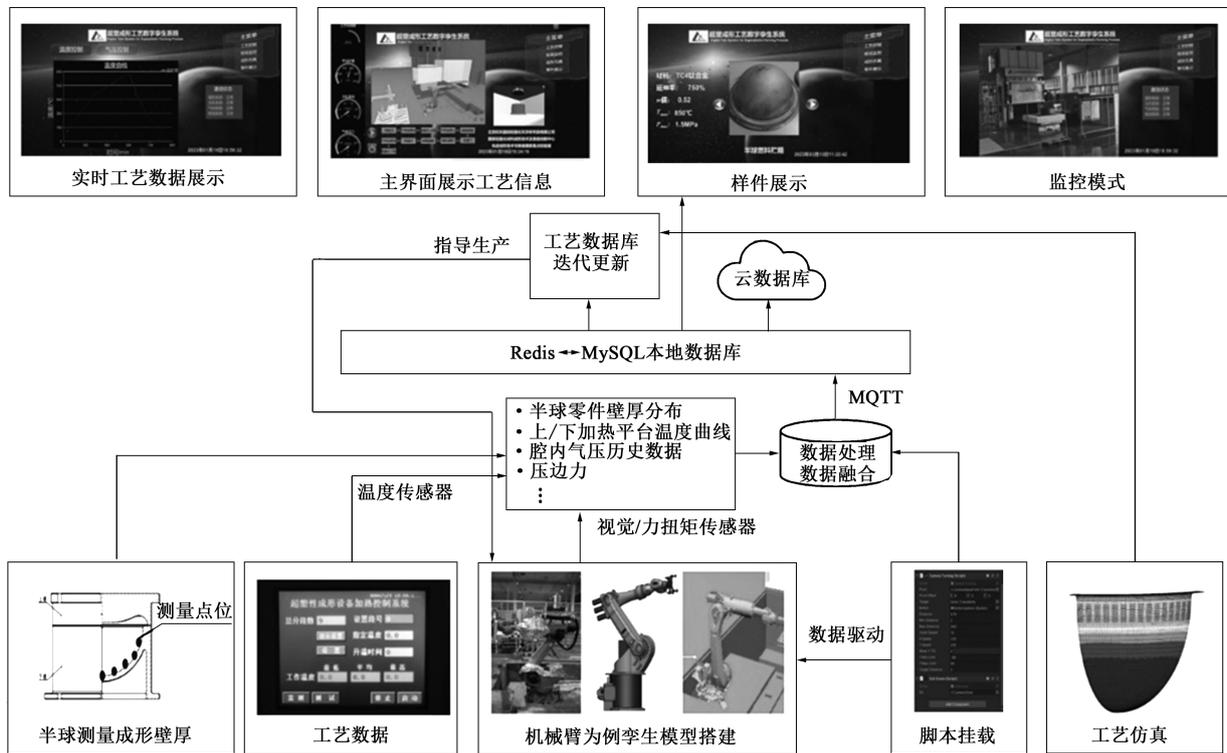


图 6 半球零件数字孪生生产实例

Fig. 6 Digital twin production example for hemispherical parts

超塑成形工艺监控系统的架构, 搭建了超塑成形设备的多维孪生模型和基于工艺流程的数据驱动模型, 针对基于边缘网关的多源异构数据采集传输、数据异步存储和数据可视化处理进行框架研究, 最后采用自主研发的 8000 kN 超塑成形/扩散连接设备验证了该系统的可行性。后续工作会进一步通过机理模型和数据驱动的混合建模方法, 提高孪生体的建模精度, 推动超塑成形工艺向数字化、自动化和智能化方向发展。

参考文献:

- [1] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2010, (8): 32-35.
Li Z Q, Guo H P. Application progress and development trend of superplastic forming/diffusion bonding technology [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2010, (8): 32-35.
- [2] 杨磊. 超塑成形技术在航空中的应用 [J]. 科技视界, 2017, (12): 26-27.
Yang L. Application of superplastic forming technology in aviation. science and technology vision [J]. Science & Technology Vision, 2017, (12): 26-27.
- [3] 于卫新, 李森泉, 胡一曲. 材料超塑性和超塑成形/扩散连接技术及应用 [J]. 材料导报, 2009, 23 (11): 8-14.
Yu W X, Li M Q, Hu Y Q. Material superplasticity and superplastic forming/diffusion joining technology and application [J]. Materials Esports, 2009, 23 (11): 8-14.
- [4] 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 F, Zhang M, Cheng J F, et al. Digital twin workshop-A new mode of future workshop operation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23 (1): 1-9.
- [5] Fei T, Cheng J F, Qi Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94 (9-12): 3563-3576.
- [6] Polini W, Corrado A. Digital twin of composite assembly manufacturing process [J]. International Journal of Production Research, 2020, 58 (17): 5238-5252.
- [7] Zhang X Q, Zhu W H. Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: A case study of aeroengine blade manufacturing [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16 (5): 1100-1108.
- [8] Liu J F, Wen X J, Zhou H G, et al. Digital twin-enabled machining process modeling [J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 54: 1-13.
- [9] Dvorak J, Cornelius A, Corson G, et al. A machining digital twin for hybrid manufacturing [J]. Manufacturing Letters, 2022, 33: 786-793.
- [10] Chakraborty S, Adhikari S, Ganguli R. The role of surrogate models in the development of digital twins of dynamic systems [J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 90: 662-681.
- [11] 周程辉. 基于数字孪生的渐进弯曲成形系统的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.

- Zhou C H. Research on Progressive Bending Forming System Based on Digital Twin [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [12] 张俊涛. 基于数字孪生的薄壁件铣削加工变形控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- Zhang J T. Research on Deformation Control of Thin-walled Parts Milling Based on Digital Twin [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [13] Zhu Z X, Xi X L, Xu X, et al. Digital twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 59: 453-466.
- [14] 汤鹏, 撒国栋, 刘振宇, 等. 锻造液压机数字孪生系统设计 [J]. *图学学报*, 2022, 44 (3): 609-615.
- Tang P, Sa G D, Liu Z Y, et al. Design of digital twin system for forging hydraulic press [J]. *Journal of Graphics*, 2022, 44 (3): 609-615.
- [15] 彭宇升, 孙勇, 凌云汉. 航空锻造单元数字孪生系统构建及应用 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (4): 51-61.
- Peng Y S, Sun Y, Ling Y H. Construction and application of digital twin system for aviation forging unit [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (4): 51-61.
- [16] 齐飞, 陈东, 李蕙宇, 等. 5083 铝合金气胀成形恒应变速率压力加载方式研究 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (3): 89-95.
- Qi F, Chen D, Li H Y, et al. Research on constant strain rate pressure loading method of 5083 aluminum alloy inflatable forming [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (3): 89-95.
- [17] 张臣, 齐飞, 李永兵, 等. Ti2AlNb 合金高温拉伸性能研究及本构方程的建立 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (1): 212-217.
- Zhang C, Qi F, Li Y B, et al. Study on tensile properties of Ti2AlNb alloy at high temperature and establishment of constitutive equation [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25 (1): 212-217.
- [18] 齐飞, 张臣, 周永松, 等. 退火工艺制度对 5083 铝合金板材超塑性的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (2): 196-201.
- Qi F, Zhang C, Zhou Y S, et al. Effect of annealing process system on superplasticity of 5083 aluminum alloy sheet [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25 (2): 196-201.
- [19] 齐飞. 高速列车 5083 铝合金车窗超塑气胀成形工艺研究 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
- Qi F. Research on Superplastic Inflatable Forming Process of 5083 Aluminum Alloy Window for High-speed Train [D]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 2018.
- [20] 刘晓飞, 刘晨枫, 李永兵, 等. 超塑成形设备加热平台升温过程模拟 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24 (2): 134-140.
- Liu X F, Liu C F, Li Y B, et al. Simulation of heating platform heating process of superplastic forming equipment [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24 (2): 134-140.
- [21] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25 (1): 1-18.
- Tao F, Liu W R, Zhang M, et al. Digital twin five-dimensional model and application in ten fields [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25 (1): 1-18.
-
- (上接第 181 页)
- [6] 杨纯梅, 王燕, 曹海龙, 等. 7055 铝合金的热变形行为及挤压工艺研究 [J]. *铝加工*, 2020, (3): 52-57.
- Yang C M, Wang Y, Cao H L, et al. Study on hot deformation behavior and extrusion process of 7055 aluminum alloy [J]. *Aluminium Fabrication*, 2020, (3): 52-57.
- [7] 张训, 高智勇, 叶茂, 等. 7055 超高强铝合金的时效工艺 [J]. *金属热处理*, 2015, 40 (10): 181-186.
- Zhang X, Gao Z Y, Ye M, et al. Aging process of 7055 ultra high strength aluminum alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40 (10): 181-186.
- [8] 王建国, 王祝堂. 航空航天变形铝合金的进展 [J]. *轻合金加工技术*, 2013, 41 (8): 1-6, 32.
- Wang J G, Wang Z T. Advance on wrought aluminium alloys used for aeronautic and astronautic industry [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2013, 41 (8): 1-6, 32.
- [9] 徐春杰, 杨怡, 马东, 等. 轧制及热处理对 7055 铝合金组织与性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (2): 191-196.
- Xu C J, Yang Y, Ma D, et al. Effect of rolling and heat treatment on microstructure and properties of 7055 aluminum alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2023, 43 (2): 191-196.
- [10] 王姝俨, 吴道祥, 龙帅, 等. 基于 GA 优化的 7055 铝合金 Johnson-Cook 流变本构建模及其 FEA 应用 [J]. *精密成形工程*, 2023, 15 (3): 105-111.
- Wang S Y, Wu D X, Long S, et al. GA optimized Johnson-Cook constitutive model for 7055 aluminum alloy and its application in FEA [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15 (3): 105-111.
- [11] 杨兴旺, 陶志伟, 袁凯, 等. 基于响应面法的喷射成形 7055 铝合金飞机轮毂锻造工艺优化 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (10): 23-28.
- Yang X W, Tao Z W, Yuan K, et al. Optimization on forging process for spray formed 7055 aluminum alloy aircraft wheel hub based on response surface method [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (10): 23-28.
- [12] 刘光祖, 李俊峰, 杨延涛, 等. 7055 铝合金筒形件强力旋压成形规律研究 [J]. *轻合金加工技术*, 2022, 50 (11): 55-61.
- Liu G Z, Li J F, Yang Y T, et al. Study on the high-strength spinning forming of 7055 aluminum alloy cylindrical parts [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2022, 50 (11): 55-61.