

# 铜管三辊行星旋轧工艺数字孪生系统构建

练魏正辉<sup>1</sup>, 岳峰丽<sup>1</sup>, 蔡玲<sup>1</sup>, 崔海涛<sup>1</sup>, 刘劲松<sup>1,2</sup>, 陈传来<sup>2</sup>

(1. 沈阳理工大学 汽车与交通学院, 沈阳 110159; 2. 常州润来科技有限公司, 江苏 常州 213149)

**摘要:** 针对三辊行星旋轧工作环境密闭、铜管形变及缺陷无法实时感知等局限性, 提出了基于数字孪生技术的 TP2 铜管轧制状态全景感知系统构架, 将三辊行星旋轧轧机、柔性水冷系统和超声检测设备等映射到虚拟环境中。通过对铜管三辊行星旋轧工艺数据的实时采集与分析, 准确地反映设备的运行状态, 在线监控轧后管坯的壁厚变化与裂纹数量, 并对异常信息进行报警, 实现了对三辊行星旋轧工序实际生产情况的完整复现与智能监控。研究结果可为高精度铜管材智能制造提供指导。

**关键词:** TP2 铜管; 三辊行星旋转轧制; 数字孪生; 实时监控; 智能制造

**中图分类号:** TH166 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.02.013

## Construction of Digital Twin System for Three-roll Planetary Rolling Process of Copper Tube

LIAN Weizhenghui<sup>1</sup>, YUE Fengli<sup>1</sup>, CAI Ling<sup>1</sup>, CUI Haitao<sup>1</sup>, LIU Jinsong<sup>1,2</sup>, CHEN Chuanlai<sup>2</sup>

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Changzhou Enreach Copper Co., Ltd., Changzhou 213149, China)

**Abstract:** In view of the limitations of closed working environment of three-high rotary rolling, such as the copper tube deformation and defects can not be sensed in real time, a panoramic sensing system framework of TP2 copper tube rolling state based on digital twin technology was proposed, and the three-high planetary rotary rolling mill, flexible water cooling system and ultrasonic detection equipment were mapped to the virtual environment. Through real-time acquisition and analysis of the data of TP2 copper tube three-roll planetary spin rolling process, the operation status of the equipment can be accurately reflected, the wall thickness change and crack number of the tube billet after rolling can be monitored online, and abnormal information can be reported to the alarm, which realizes the complete reproduction and intelligent monitoring of the actual production situation of the three-roll planetary spin rolling process. The research results lay a foundation for the research of intelligent manufacturing of high precision copper tube.

**Key words:** TP2 copper tube; three-roll planetary rotary rolling; digital twin; real-time monitoring; intelligent manufacturing

铜管材具有导热性和导电性好、耐腐蚀性强等优点, 在航空航天、空调制冷、新能源汽车等领域应用广泛。铜管材在生产过程中易出现质量一致

性差的问题, 这是铜管材在复杂工况下应用的瓶颈难题。智能制造是提高铜等金属材料生产质量与效率的有效措施之一, 数字孪生作为智能制造

的新兴技术,其优势体现在数据、模型、映射和交互等各个方面<sup>[1]</sup>,在工业生产中应用前景极为广阔。

很多学者对数字孪生框架模型、模块化组装、通信网络智能监控和产线调控体系数据感知等方面进行了深入研究。Zhang等<sup>[2]</sup>建立了面向数字孪生车间的一致性评估框架模型。Sommer等<sup>[3]</sup>通过对车间进行扫描和识别,生成了数字孪生体。Panarotto等<sup>[4]</sup>由可重复使用的数字孪生模块创建了数字孪生体,使数字孪生与车间工厂紧密结合。Javaid等<sup>[5]</sup>综述了工业4.0时代数字孪生研究现状及其必要性。Semeraro等<sup>[6]</sup>把数字孪生技术与电池系统无缝集成到智能电网中,提高了电池系统的效率。Koo等<sup>[7]</sup>提出了数据驱动的数字孪生模型,并在实际管道上进行了验证。陶飞等<sup>[8-10]</sup>提出了数字孪生五维模型,再由数字孪生五维模型提出数字孪生的标准体系架构,对数字孪生连接交互理论进行了研究。Semeraro等<sup>[11]</sup>总结归纳了数字孪生在储能领域的应用。唐健钧等<sup>[12]</sup>提出了基于数字孪生的飞机总装生产线管控新模式。薛瑞娟等<sup>[13]</sup>构建了数控机床数字孪生的体系框架。Jia等<sup>[14]</sup>探讨了数字孪生多场景下与车间结合的应用。Attaran等<sup>[15]</sup>探讨了数字孪生技术对简化智能化在车间的应用。Torzoni等<sup>[16]</sup>使用贝叶斯网络和深度学习构建了土木工程结构的数字孪生框架。高心成等<sup>[17]</sup>以板形控制的物理系统和数学模型为基础研发了冷轧铜带板形控制数字孪生系统。

在铜管智能制造方面,王守权等<sup>[18]</sup>对三辊行星旋轧上道工序中的铜管坯石墨结晶器冷却水量自动控制进行了研究。刘劲松等<sup>[19]</sup>总结了国内三辊行星旋轧宏观研究现状及采用有限元模拟时需要关注的重点问题。臧雪颖等<sup>[20]</sup>经过实验验证了精密铜管涡流探伤装置伤点标记技术中铜管表面激光刻蚀技术可以替代喷墨技术。龙海生等<sup>[21]</sup>对磷脱氧铜(TP2)铜管水平连铸工序中一次水冷进行了优化。

综上所述,数字孪生技术为制造行业提供了智能高效的解决方案。然而,目前数字孪生技术尚未应用在铜管加工领域。三辊行星旋轧作为铜管生产的关键工序,对铜管产品质量起重要作用,轧制过程的远程感知和相关工艺参数的实时监测是亟待解决的难题。本文提出了基于数字孪生技术的TP2铜管轧制状态全景感知系统构架,基于各工艺的功能与逻辑关系,将超声检测、柔性水

冷、三辊旋轧等各个模块映射到虚拟环境中,实现TP2铜管生产过程的全流程状态感知。

## 1 系统架构

TP2铜管生产过程包括熔铸、轧制、盘拉和退火等工艺,具体生产线加工流程如图1所示。

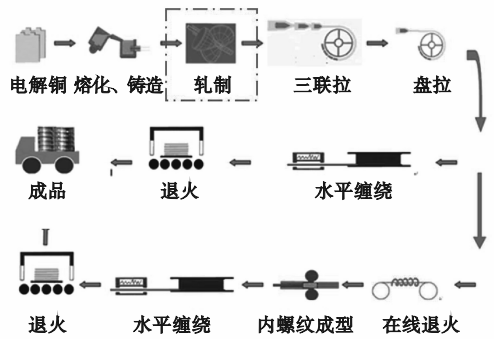


图1 生产线加工流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of production line processing flow

轧制作为铜管生产中极为重要的一环,工艺较为复杂,涉及铜管坯的多个变化阶段,轧制过程温度高且在封闭空间进行,难以直接观测到具体细节。本文将数字孪生技术与三辊行星旋轧工艺结合,通过访问轧制制造执行系统(manufacturing execution system, MES),读取可编程逻辑控制器(PLC)和加装传感器,对轧机主辅电机电流和冷却水温度等工艺参数进行采集。复现三辊行星旋轧工序设备的实际工作情况,采集相关工艺参数,对提高铜管质量具有重要意义。三辊行星旋轧数字孪生架构包括功能结构、数据处理和虚实互动三个模块。

### 1.1 功能结构

三辊行星旋轧数字孪生系统主要包括复现三辊行星旋轧工序工况、采集工艺参数并进行储存整理分析、超声检测结果并预警三部分,其框架结构如图2所示。

工况复现模块包含模拟轧机和水冷等设备的运行情况。本文依据实际生产工艺过程建立三辊行星轧机、柔性水冷设备、超声检测设备和铣面机等设备的三维模型,将设备模型导入开发引擎,创建生产环境,并将模型整合编排复现出车间工序的实际情况。

数据处理模块的功能是采集和分析设备运行数据、设备更换维修数据、铜管轧制前后尺寸、上道工序生产质量结果和轧后质量等数据。

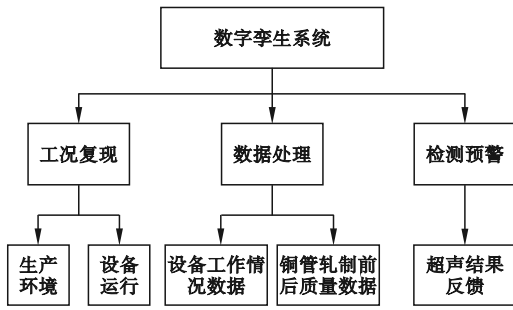


图 2 数字孪生系统框架结构

Fig. 2 Digital twin system frame structure

检测预警模块的功能是通过超声检测设备对轧后铜管进行检测并将检测结果整理分析得出轧后铜管的质量,对轧制工艺参数调整和工人生产操作起到一定的指导作用。

## 1.2 数据处理

数据处理是数字孪生技术的基础与支撑,三辊行星轧数字孪生系统需要采集的数据主要有设备运行情况、设备更换维修情况、铜管轧制前后尺寸、上道工序铜管坯生产质量和轧后铜管质量等。依据所获数据建立包含轧机、冷却系统和超声检测系统等设备运行情况的数据库,具体数据项目如表 1 所示。

表 1 数据项目

Table 1 Data items

数据模块	具体参数
轧机	轧制速度,已轧铜管坯长度,轧制时间,主辅电机的电流、转速、扭矩,轧辊头使用寿命及轧制铜管坯对应轧辊头使用时长,轧制芯棒寿命,轧制氮气流量、压力
铜管坯	铸坯号,铜管坯熔铸成型到轧制存放时间,管坯长度、内外径、壁厚、重量
冷却系统	冷却水的温度、流量、压力,氮气流量、压力,油泵压力
超声检测	轧后铜管壁厚、裂纹
人工取样测量	轧后铜管外径、壁厚

### 1.2.1 数据提取

三辊行星轧数字孪生系统通过访问 MES 系统获得铜管坯数据。通过设备 PLC 通信提取设备工况数据。数据提取的方法为:将轧机的 PLC 作为服务器,计算机和轧机 PLC 处于同一网络,设置网络直接互联的协议 IP 和端口号。采用 C#作为编程语言,选用 NModbus4 通信库并进行编程。确定 PLC 的 IP 和工业控制数据交换协议 (MODBUS-TCP) 的端口号,确定温度和电流等数据在 MODBUS 设备中的寄存器地址,读取寄存器,接收 PLC 的

响应并提取信息,实现 PLC 中数据获取。

针对现有水冷设备的局限性,自主研发设计了柔性水冷系统。根据层流冷却机理,冷却水落到高温表面立刻汽化,并在冷却水与被冷却物体表面上生成一层汽膜,由于汽膜的换热系数小,影响冷却水的换热效率。因此本文提出通过破坏被冷却铜管表面的汽膜,使冷却水直接作用于铜管表面,提高冷却效率。柔性水冷设备设计了环形多喷嘴,通过增加出水口数量、提高冷却水压力等措施,保证冷却水流有足够的能量击破汽膜,提高铜管表面的换热效率。

柔性水冷系统的数据采集部分使用流量传感器、温度传感器和压力传感器等对数据进行采集,传感器与 PLC 输入模块相连,采集冷却系统状态信号。确定冷却水温度和压力等变量并记录对应的数据信息,将 PLC 内部变量映射到 MODBUS-TCP 的寄存器,配置 IP、端口号和最大连接数等 MODBUS-TCP 参数,实现柔性水冷系统数据采集。

为方便本地数据访问和远程数据访问,三辊行星轧数字孪生系统分别建立了本地数据库和云端数据库,本地数据库访问可以直接在局域网内进行,远程数据访问通过繁易系统云端进行,通过将轧机参数和水冷参数等数据存储到本地数据库和云端数据库,使用 MODBUS-TCP 接口协议和现场 PLC 进行通信,实现远程读取 PLC 内部储存的数据。

### 1.2.2 数据应用

三辊行星轧数字孪生系统通过采集在线超声检测设备中壁厚和缺陷数据的变化,实时监测轧机设备的工作情况和轧后铜管的质量情况。在正常生产条件下,轧后铜管的壁厚是  $2.8 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ 。当设备检测到壁厚连续处于标准值范围之外或者铜管壁厚波动剧烈时超声检测设备警报灯亮起,发出预警。

铜管壁厚均匀度是轧后铜管质量的重要指标之一。目前现场测量壁厚是通过轧后铜管进行取样,由工人手动测量获得,存在较大误差和偶然因素。在三辊行星轧数字孪生系统中,通过超声检测模块可以实时观测铜管壁厚的变化情况,并且能够将超声检测的壁厚结果转化为直观的壁厚趋势,如图 3 所示。

## 1.3 虚实互动

在三辊行星轧数字孪生系统中设置有各设备的操控功能,实现对三辊行星轧工序设备在操作、监测、检修和数据四个方面的操控和调取。

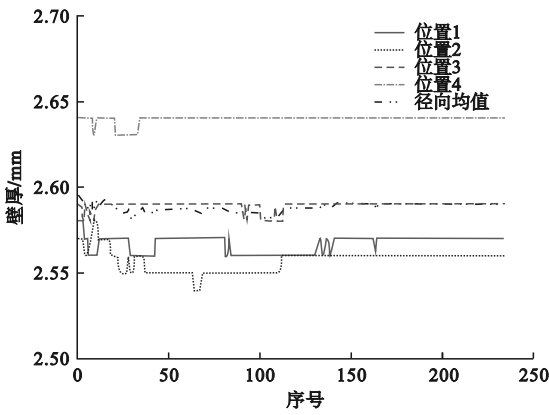


图3 壁厚趋势

Fig. 3 Trend of wall thickness

操作功能可实现三辊行星旋轧工序的可视化,在虚拟空间对各设备的每个功能进行复现,完成设备的实际功能操作流程。铣面机主要模拟铜管矫直功能和铣面功能,可以实现电机开关、补充润滑油和补充切削液等功能;轧机以复现轧辊轧制和送料小车推送铜管坯为基础,显示铜管轧制前后形态和表面的变化情况;超声检测可以控制设备检测位置,操作各气缸与水泵启闭等;柔性水冷系统复现铜管的三个冷却段,显示每一路水管和气管管路状况,并控制调节各管路阀门开度。

三辊行星旋轧监测功能实现对工序各个设备工作情况的监测。轧机监测模块可以显示轧制管坯的连铸号和轧制铜管数等加工跟踪信息,还可以显示轧机的电机电流和转速等设备运行信息。超声检测模块可以监测铜管壁厚检测的波形是否正常,每个探头是否处于正常工作状态等。柔性水冷模块可以监测三段水冷的冷却水温度、压力和流量,氮气的压力和流量以及各管路阀门的开度等主要检测数据,有利于保证生产的稳定和安全。

三辊行星旋轧检修帮助功能提供常见问题的解决方法。如正确更换铣面机铣刀,废屑堵塞吹削阀疏通操作,轧机的轧辊头和轧制芯棒的更换操作,以及更换完成之后的测试调试等,超声检测过程中水箱水的更换和过滤器的检查等操作,以尽快解决生产中出现的问题,提高生产效率。

三辊行星旋轧数据功能实现对各设备主要数据的记录和调取,是支撑数字孪生数据库的基础。其中轧机工作参数、超声检测数据和冷却水情况是需要关注的重点数据对象。后期通过数学模型分析可以发现这些数据对铜管加工质量的影响和规律。记录每一次的检修数据,尤其是消耗磨损

类零件的使用寿命,做到能够复核查看。最终实现管材质量分级,提供是否进入下一工序或废料的建议,起到节约成本的功能。

## 2 三辊行星旋轧工序数字孪生建模

对三辊行星旋轧数字孪生建模需要模型和实际工序反复对比改进。数字孪生建模流程如图4所示。

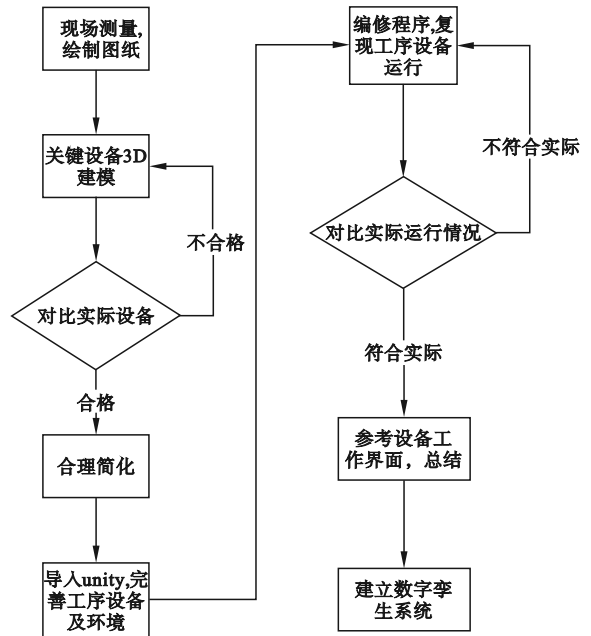


图4 数字孪生建模流程图

Fig. 4 Flow chart of digital twin modeling

### 2.1 设备孪生体建模

通过三维建模软件,参照设备图纸和现场测量的真实数据,按照1:1对三辊行星旋轧工序各个设备完成建模,如图5所示。

通过对三维模型的构建实现去图纸化,将数字化的图纸储存在数字孪生系统中。

通过C#编程模拟设备运行情况,使用多个设备运行脚本程序和一个操作逻辑管理脚本,共同控制整个工序各设备的运行,先实现各模型设备的运动,再根据生产实际对送料小车速度、轧辊转速和铜管轧制前后变化等重点部分进行修正,完成对三辊行星旋轧工序各设备运行的模拟。

三辊行星旋轧实际运行中轧机是太阳轮,进行公转,轧辊作为子级对象,进行自转。送料小车和进入轧制的铜管坯一同前进,轧出铜管以另一速度出来,模拟轧制前后铜管的变化,完成模拟轧辊轧制的过程。设备模型运行与车间实际轧制情况对比如图6所示。

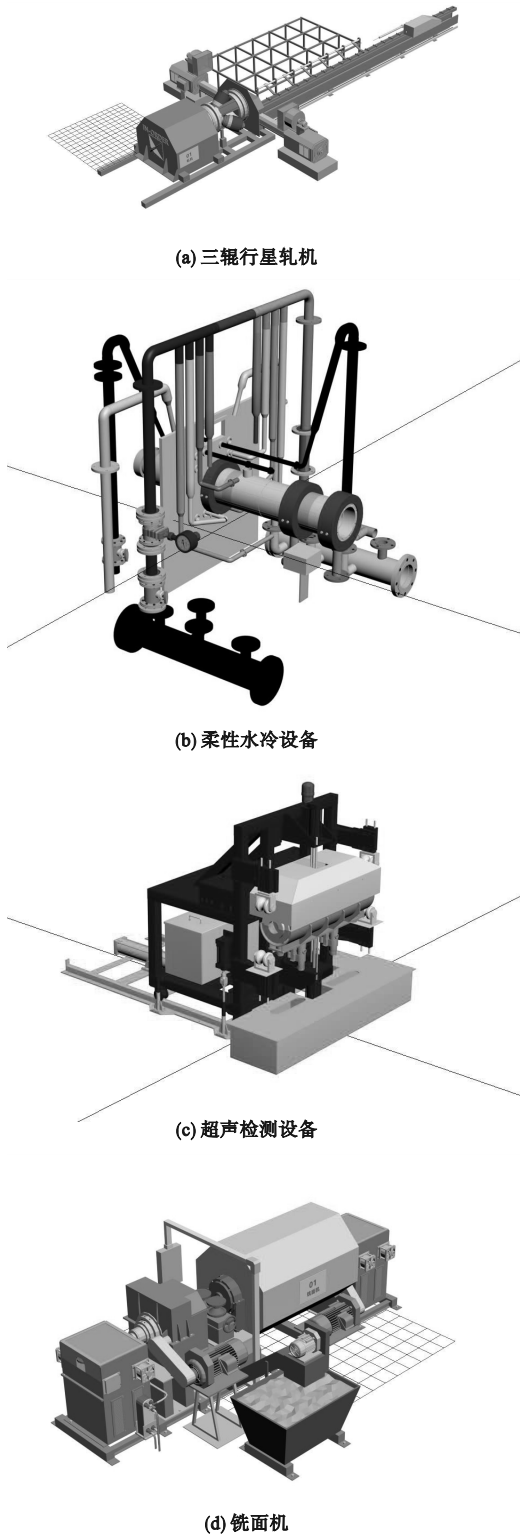


图 5 三辊行星轧工序各设备模型

Fig. 5 Equipment models of three-roll planetary spinning mill section

## 2.2 设备与工艺参数互联

三辊行星轧工序工艺参数主要分为管型数据、设备数据和检测数据等。选取其中坯料尺寸、轧机工作参数、冷却水情况和轧后铜管尺寸等较为重要的数据作为采集对象,建立对应的数据库

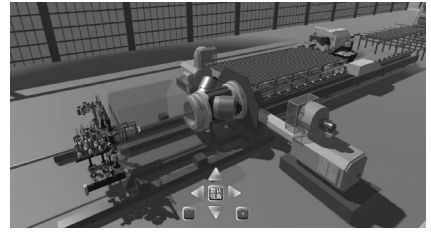


图 6 模拟轧制和车间实际轧制对比

Fig. 6 Comparison between virtual rolling and actual rolling in workshop

进行记录储存,在此基础上建立轧后铜管质量的数学模型。通过对模型进行优化,实现工艺参数的优化与轧后铜管质量的分级。

## 3 系统运行效果展示

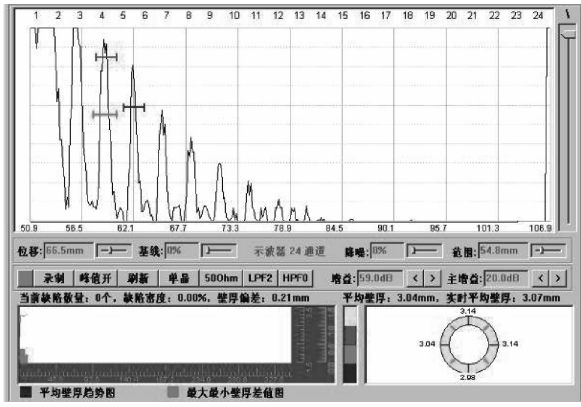
### 3.1 超声检测系统

三辊行星轧数字孪生系统中超声检测系统实现对轧后铜管的壁厚和缺陷进行检测。在数字孪生系统中可以查看超声检测的情况,包括超声检测界面和检测到的铜管壁厚变化趋势,如图 7 所示。

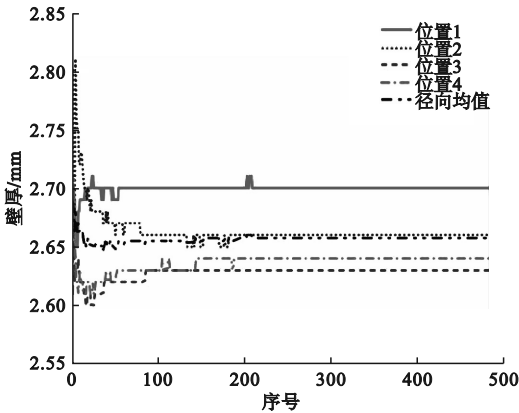
### 3.2 柔性水冷系统

柔性水冷系统是对目前铜管轧后冷却设备的改进。采用环形缝隙喷嘴设计,有效避免喷嘴堵塞问题。介质通过喷嘴以特定角度射向管坯,可大幅度提高冷却效率、冷却均匀性和控温精度。柔性水冷系统分为三次冷却区域,Ⅰ区冷却装置可与轧制状态联动,进行轧辊精确冷却,有利于提高轧制稳定性、延长轧辊使用寿命。Ⅱ区冷却装置冷却速率可调,冷却方式可选,可参与轧后再结晶控制,有利于提高轧后管坯质量。Ⅲ区冷却装置可大幅提高冷却效率,精确控制管坯出口温度。

三辊行星轧数字孪生系统柔性水冷模块具备水冷数据的采集功能,对铜管生产质量影响较大的冷却水参数和氮气参数可以实时显示在系统中,如图 8 所示。



(a) 超声壁厚检测界面



(b) 壁厚趋势图

图7 超声检测情况

Fig. 7 Ultrasonic detection

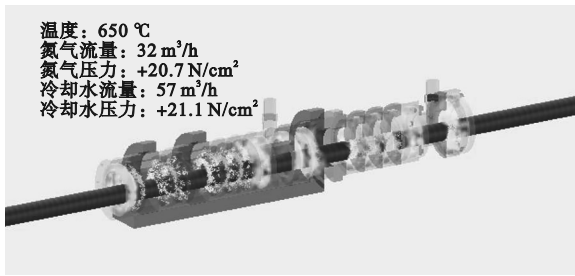


图8 柔性水冷显示界面

Fig. 8 Flexible water-cooling display interface

系统设置有预警提示,在监测到数据超过阈值时发出警报,提醒操作人员注意异常情况。

## 4 结论

1)将铜管轧制和数字孪生技术相结合,建立了三辊行星旋轧数字孪生系统,为高精度铜管材智能制造提供解决方案。

2)利用网络技术和云端服务,实现了数据传输、储存和调取功能,为数字孪生技术落地铜管加工行业奠定基础。

3)实现了对三辊行星旋轧工序实际生产情况的复现;实现了三辊行星旋轧工艺参数的在线采集。三辊行星旋轧系统通过与超声检测系统和柔性水冷系统结合,实现对设备工作情况和铜管轧制质量的监测,为生产过程中对铜管质量进行监控提供了新方法。

## 参考文献 (References):

- [1] WEI R, YANG R Z, LIU S J, et al. Towards an extensible model-based digital twin framework for space launch vehicles [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 41: 100641.
- [2] ZHANG H, QI Q L, TAO F. A consistency evaluation method for digital twin models [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 65: 158 - 168.
- [3] SOMMER M, STJEPANDIĆ J, STOBRAWA S, et al. Automated generation of digital twin for a built environment using scan and object detection as input for production planning [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 33: 100462.
- [4] PANAROTTO M, ISAKSSON O, VIAL V. Cost-efficient digital twins for design space exploration; a modular platform approach [J]. Computers in Industry, 2023, 145: 103813.
- [5] JAVAID M, HALEEM A, SUMAN R. Digital twin applications toward industry 4.0: a review [J]. Cognitive Robotics, 2023, 3: 71 - 92.
- [6] SEMERARO C, ALJAGHOUB H, ALI ABDELKAREEM M, et al. Digital twin in battery energy storage systems: trends and gaps detection through association rule mining [J]. Energy, 2023, 273: 127086.
- [7] KOO B, CHANG S, KWON H. Digital twin for natural gas infrastructure operation and management via streaming dynamic mode decomposition with control [J]. Energy, 2023, 274: 127317.
- [8] 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.
- [9] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405 - 2418.
- [10] 陶飞, 马昕, 戚庆林, 等. 数字孪生连接交互理论与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 1 - 10.
- [11] TAO F, MA X, QI Q L, et al. Theory and key technologies of digital twin connection and interaction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 1 - 10. (in Chinese)
- [12] SEMERARO C, OLABI A G, ALJAGHOUB H, et al. Digital twin application in energy storage: trends and challenges [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106347.
- [13] 唐健钧, 金筑云, 石芹芹, 等. 基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式探索与实践 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 34 - 41, 65.
- [14] TANG J J, JIN Z Y, SHI Q Q, et al. Study and realization of production line control mode based on digital twins for aircraft

- final assembly [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(6): 34–41, 65. (in Chinese)
- [13] 薛瑞娟, 黄祖广, 王金江, 等. 数控机床数字孪生标准体系研究 [J]. *制造技术与机床*, 2023(3): 39–50.  
XUE R J, HUANG Z G, WANG J J, et al. Research on digital twin standards system of CNC machine tool [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023(3): 39–50. (in Chinese)
- [14] JIA W J, WANG W, ZHANG Z Z. From simple digital twin to complex digital twin part II: multi-scenario applications of digital twin shop floor [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2023, 56: 101915.
- [15] ATTARAN M, CELIK B G. Digital Twin: benefits, use cases, challenges, and opportunities [J]. *Decision Analytics Journal*, 2023, 6: 100165.
- [16] TORZONI M, TEZZELE M, MARIANI S, et al. A digital twin framework for civil engineering structures [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024, 418: 116584.
- [17] 高心成, 刘宏民, 王东城, 等. 冷轧铜带板形控制系统数字孪生研究 [J/OL]. *中国有色金属学报*, 2024: 1–11 [2024–06–29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20240522.1131.013.html>.  
GAO X C, LIU H M, WANG D C, et al. Research on the digital twins of the flatness control system for cold rolled copper strip [J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024: 1–11 [2024–06–29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20240522.1131.013.html>. (in Chinese)
- (上接第 78 页)
- [9] 曾琪皓, 张松, 胥永刚, 等. Hf 含量对 NbMo<sub>0.5</sub>Hf<sub>x</sub>TiZrCrAl 难熔高熵合金组织及力学性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(3): 1024–1030.  
ZENG Q H, ZHANG S, XU Y G, et al. Effects of Hf content on microstructure and mechanical properties of NbMo<sub>0.5</sub>Hf<sub>x</sub>-TiZrCrAl refractory high-entropy alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(3): 1024–1030. (in Chinese)
- [10] SONG W L, MA Q, ZENG Q L, et al. Experimental and numerical study on the dynamic shear banding mechanism of HfNbZrTi high entropy alloy [J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(8): 1808–1818.
- [11] 王开心, 全永刚, 陈永雄, 等. 高熵合金动态力学行为研究进展 [J]. *材料工程*, 2024, 52(1): 57–69.  
WANG K X, TONG Y G, CHEN Y X, et al. Research progress in dynamic mechanical behavior of high-entropy alloys [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(1): 57–69. (in Chinese)
- [12] HE Q F, WANG J G, CHEN H A, et al. A highly distorted ultraelastic chemically complex Elinvar alloy [J]. *Nature*, 2022, 602(7896): 251–257.
- [13] ZHANG F X, SONG H Q. Effect of atomic size mismatch and chemical complexity on the local lattice distortion of BCC solid solution alloys [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104367.
- [14] LI J, CHEN Y, HE Q F, et al. Heterogeneous lattice strain strengthening in severely distorted crystalline solids [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(25): e2200607119.
- [15] CHEN X F, WANG Q, CHENG Z Y, et al. Direct observation of chemical short-range order in a medium-entropy alloy [J]. *Nature*, 2021, 592(7856): 712–716.
- [16] ZHANG R P, ZHAO S T, DING J, et al. Short-range order and its impact on the CrCoNi medium-entropy alloy [J]. *Nature*, 2020, 581: 283–287.
- [17] LI Q J, SHENG H, MA E. Strengthening in multi-principal element alloys with local-chemical-order roughened dislocation pathways [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3563.
- [18] SHI P J, REN W L, ZHENG T X, et al. Enhanced strength-ductility synergy in ultrafine-grained eutectic high-entropy alloys by inheriting microstructural lamellae [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 489.
- [19] LI Y, LI W, LI S L, et al. Ensuring the strength and ductility synergy in an austenitic stainless steel: single-or multi-phase hetero-structures design [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 193: 81–85.
- [20] LI Y, LU Y F, LI W, et al. Hierarchical microstructure design of a bimodal grained twinning-induced plasticity steel with excellent cryogenic mechanical properties [J]. *Acta Materialia*, 2018, 158: 79–94.
- [21] SENKOV O N, SCOTT J M, SENKOVA S V, et al. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(20): 6043–6048.

(责任编辑:徐淑姣)