

# 新一代高效连铸数字化发展思考

朱苗勇·罗森

东北大学冶金学院，沈阳 110819

## Considerations for Digitization of New Generation High-efficiency

### Continuous Casting

\*

Zhu Miaoyong\* Luo Sen

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China

## 1. 前言

2021 年，我国连铸比为 98.6%、连铸坯产量突破了 10 亿 t。发展以高拉速、无缺陷为核心内涵的高效连铸是实现连铸坯热装和直接轧制的重要基础，是实现钢铁行业低碳绿色发展的重要途径。以“美国工业物联网”、“德国工业 4.0”和“中国制造 2025”为代表的全球引领性工业智能化纲要的实施，为未来数字化智能钢厂建设指明了方向。在现代钢铁制造流程中，连铸具有中心地位，是数字化智能钢厂建设的重要环节。国外相关冶金企业对此已进行了探索实践，以普锐特<sup>[1]</sup>、西马克<sup>[2]</sup>等为代表的国际冶金技术服务公司提出了数字连铸机概念，其基本思想就是以冶金过程大数据为基础，构建基于数据驱动的高精度数学模型控制的数字连铸机，实现连铸工序在整个钢铁生产流程中的自学习和闭环控制。国内在数字化连铸建设方面还处于起步阶段，连铸过程信息化向数字化转型还面临着相当大的困难，特别是智能传感器和高精度过程控制模型大多依赖于国外。本文基于国内外连铸数字化发展现状和未来方向<sup>[3]</sup>，提出了数字化连铸机的构想及其系统构架，并针对数字化连铸建设所涉及的状态感知和高精度数字孪生模型开发两个重要方面进行阐述，指出我国高效连铸数字化发展亟需攻克的关键技术。

## 2. 连铸数字化平台系统架构

新一代高效连铸对现有工序高效运行、快速响应、精准执行和上下游动态衔接提出了更高要求。图 1 所示为基于信息物理系统的数字连铸机系统架构，主要由工业大数据平台、知识数据平台、离线复现系统、在线控制系统四部分构成，其目的在于建立与物理连铸机完全对应的数字连铸机，在物理连铸机与数字连铸机之间形成闭环数据反馈体系，同时具备状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的功能。一方面，根据实时工业大数据，依靠高精度数字孪生模型，实现连铸过程状态的实时分析和决策，并向连铸机终端设备下达指令，最终完成连铸过程的精准控制。另一方面，根据工业大数据平台提供的历史数据，通过模型自学习功能，进一步优化模型参数，提高模型精度，同时更新知识和冶金案例数据库，以及为连铸新工艺技术开发提供服务。

## 3. 连铸状态感知

目前越来越多的专用传感器被应用到连铸生产过程的检测与控制之中，使连铸生产效率和连铸坯质量得到了不断提升，同时，也为连铸生产由自动化向数字化转型奠定了坚实的基础。如图 2 所示，可以看出连铸工艺过程时空范围跨度较大、工艺复杂程度高、涉及环节多。因此，现代连铸机各重要组成部分均安装

了大量的检测传感器，对连铸浇铸过程工艺和设备状态进行实时监控，为连铸工艺顺行和铸坯质量控制提供前提保障。发展数字化连铸机，中间包钢液连续测温、结晶器铜板温度检测、结晶器液位检测、连铸坯凝固进程检测、连铸坯表面质量检测等连铸状态检测传感器不可或缺，面临更大的挑战和发展空间。

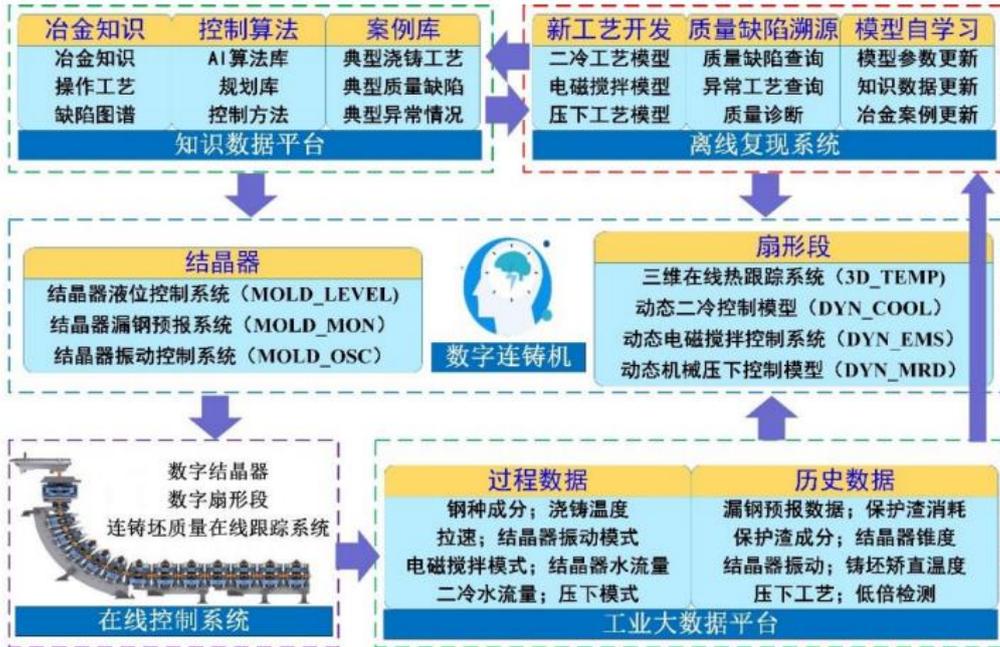


图1 数字连铸机架构示意图



图2 连铸机重要传感器及检测信息

#### 4. 连铸高精度数字孪生模型

连铸数字化就是基于冶金工业大数据构建与物理连铸机相一致的数字连铸机，由大量的高精度数字孪生模型构成，各模型之间有机结合、高效联通，共同构成数字连铸机的大脑中枢神经，能够实现连铸过程的实时监控和自愈控制，如图3所示。

连铸高精度数字孪生模型由数字结晶器（包括结晶器液位控制模型、结晶器漏钢预报模型）、数字扇形段（包括三维在线热跟踪模型、动态二冷控制模型、动态压下控制模型、动态电磁搅拌控制模型）和连铸坯质量在线跟踪模型构成。

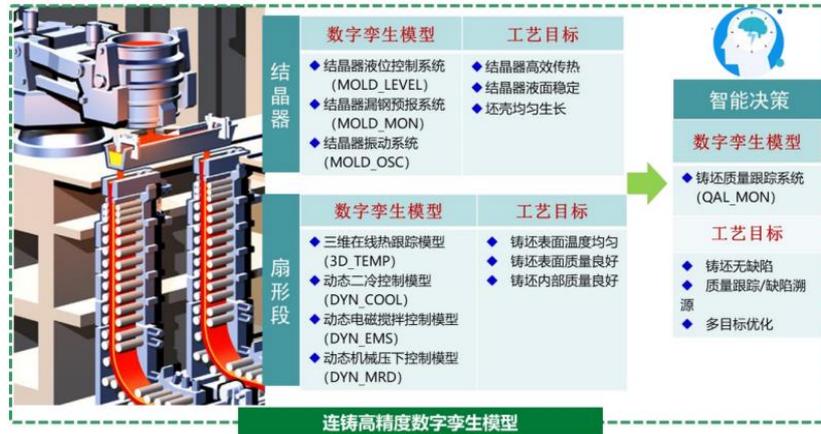


图3 连铸高精度数字孪生模型

## 5. 数字化连铸机虚拟现实平台

采用虚拟现实和增强现实技术构建连铸坯虚拟现实平台，高逼真实时显示连铸过程，突破传统视觉盲区，实现连铸全过程无死角、安全监控。同时集成现有连铸二级过程控制，主要包括“数字结晶器+数字扇形段”核心模型，实现连铸虚拟现实平台与传统连铸二级控制系统的互联互通，共享数据。集成连铸坯质量在线跟踪系统，实现连铸虚拟现实平台的质量监控、报警等功能。并结合 3D 增强显示技术实现连铸过程的透明化，以及 5G 网络通信技术突破传统连铸操控空间限制，实现远程集控管理或者移动终端办公。

## 6. 结论

发展以高拉速、高质量为核心内涵的新一代高效连铸对钢铁绿色制造意义重大。连铸数字化是高效连铸的重要内容和其实现的必由之路。随着连铸向更高效化方向发展，目前主要面临着连铸状态感知能力不足、连铸工艺数据与铸坯质量之间的关联性差以及连铸仿真模型的滞后性等问题，这正是连铸数字化发展亟待解决和努力的方向。随着连铸工艺技术和连铸坯的质量的不断提升，数字化连铸可获取不同连铸工序海量数据的同时，充分打通上下游工艺数据链，深度挖掘数据之间的关联性信息，整体感知连铸状态，并通过人工智能模型及高精度数字孪生模型对连铸坯质量进行精准预测和过程复现，为新一代高效连铸发展提供了强有力的技术支撑。

## 参考文献

- [1] Herzog K, Leitner R, Kuehas T, et al. CCM 4.0—Digitalization for intelligent production in continuous casting[C]//Proceedings of European Continuous Casting Conference. Vienna, Austria: [s.n.], 2018: 413.
- [2] Sena R O, Fischer L, Hullen I. Future-oriented modernization concepts with proven technology for continuous casting plants[C]//Technical contribution to the 49<sup>th</sup> Seminario de Aciaria. Sao Paulo, SP, Brazil: [s.n.], 2017:47.
- [3] 朱苗勇, 罗森. 高效连铸数字化发展思考[J]. 冶金自动化, 2023, 47(1):68-85.