

浅析铸造电弧炉熔炼数字化转型发展

江涛¹, 徐贵宝², 常有余¹, 何氢玲¹, 解澄剑¹

(1. 中车长江铜陵车辆有限公司, 安徽铜陵 244142; 2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 熔炼作为铸造过程的关键环节, 对成本、质量、安全、环保等方面影响很大, 依赖传统经验的生产管理模式工作效率低, 质量波动大, 变得越来越跟不上时代的发展。鉴于此, 本文阐述了铸造电弧炉熔炼数字化管理与控制的问题和难点, 从确立熔炼数字化技术路线、构建熔炼数学模型、提高数据传输集成、强化数据处理技术等方面介绍了数字化转型提升的思路, 为铸造熔炼技术的发展提供参考和借鉴。

关键词: 铸造熔炼; 数字化; 信息化; 电弧炉; 转型发展

铸造是国民经济的基础产业, 也是制造业的重要基础, 素有“工业之母”美誉, 铸件在航空发动机、火箭发动机、燃气轮机、汽车发动机、各型金属结构等装备中占有相当大的比例, 对提高装备主机性能至关重要, 是众多主机产品和高端装备创新发展的重要支撑和基础保障, 关乎装备制造业产业链和供应链的安全稳定。我国铸件生产约占全球产量的50%, 近三年铸件产量见表1, 但是与欧美、日本等发达国家采用高新技术, 主要生产高附加值铸件相比, 我国铸件虽然产量大, 但附加值低, 能耗和原材料消耗高, 其中熔炼能耗及成本约占50%。伴随我国装备制造业发展模式的转变, 对铸造相关的产品质量、成本、环境等方面的要求不断提升, 因而, 铸造数字化转型发展迫在眉睫。

表1 中国近三年按主要材质分铸件产量
Table 1 Casting production by main materials in China in the past three years /万t

材质	2020年	2021年	2022年	近两年增幅
灰铸铁	2 175	2 255	2 120	-6.0
球墨铸铁	1 530	1 595	1 490	-6.6
铝镁合金	680	720	755	4.9
铸钢	635	660	635	-3.8
铜合金	87	90	90	-
其他	85	85	80	-
合计	5 195	5 405	5 170	-4.3

电弧炉炼钢是世界主要炼钢方法之一, 以废钢为主要原料, 具有流程短、能耗低等特点^[1-3]。电炉炼钢技术水平比较高的是德国、意大利、日本等, 且拥有大量专利技术, 我国尚无具有自主知识产权的电炉装备。近年来, 随着废钢资源的逐步释放及节能环保的需要, 电弧炉炼钢得到迅速发展^[4-5]。铸造企业关键铸钢件的生产一般采用3~30 t (小型) 电弧炉, 产量规模及生产连续性与钢铁行业区别较大, 且产品结构复杂呈现多样化, 目前主要依靠人工操作, 依赖操作人员的经验实现对各个环节的控制, 极易导致熔炼质量不稳定及熔炼过程能源的浪费。

对比钢铁工业的发展历程来看, 通过分析建模、数值模拟、在线检测、工业大数据、人工智能等先进新技术应用, 能够提高设备自动化水平、新工艺应用和智能制造水平, 建立数据平台积累工业数据, 实现生产组织和工艺优化, 打造高效、安

作者简介:

江涛(1988-), 男, 工程师, 研究方向为钢铁冶金工艺。电话: 13856226825, E-mail: 807144900@qq.com

中图分类号: TG232.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1653-04

收稿日期:

2023-08-03 收到初稿,
2023-10-16 收到修订稿。

全、智能的数字化企业^[6-8]，因此基于信息化、数字化、智能化的熔炼设备改造技术和自动化控制技术，必将成为未来铸造熔炼发展的重点方向。

1 数字化发展存在的主要问题

我国尚未有数字化转型的成熟技术范式，数字化转型是通过深化数字技术与价值链环节的全面深度融合，不断释放数字技术对企业和经济发展的放大、叠加、倍增作用^[9-11]。目前新一代计算机信息技术正加速向制造业各领域渗透，网络化、数据化和智能化程度持续加深，制造业数字化转型步伐明显加快^[12-13]，数字原生企业正试图改造传统铸造企业，但是“渗透”和“赋能”速度缓慢，尤其是熔炼数字化发展更为步履维艰。钢铁工业通过引进国外先进技术和自主开发进行数字化升级，并将数字化发展分为6个层级，如图1所示，目前国内重点冶金企业已达L3级水平，而铸造企业起步较晚，现状难以满足配套生产与质量提升的市场发展要求。

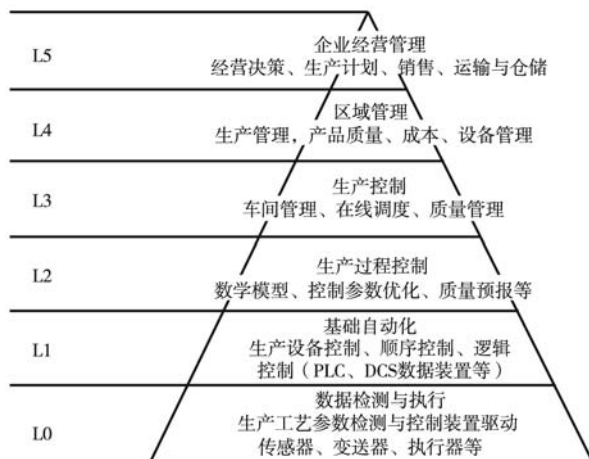


图1 冶金企业数字化发展层级图

Fig. 1 Level diagram of the digital development of the metallurgical enterprises

1.1 基础管理落后

国内传统的铸造生产流程属于非数字化的工艺控制模式，核心工艺存在经验判断，生产过程及结果预判高度依赖技师和技术人员的经验和能力，没有形成行业知识沉淀。现阶段铸造企业对熔炼过程的质量控制大多建立在事后检测，同时熔炼、浇注、热处理工序存在相互影响、相互制约，工艺、原料和质量之间无法形成有机闭环，现场管理粗放，物料浪费严重，指标体系缺乏数据化管理，在生产管理和质量控制存在较多问题。

1.2 数据采集能力不足

铸造设备种类及过程控制参数繁多、应用场景复

杂，工业数据通讯协议不同，数据格式差异大，数据标准缺乏统一性，前端数据自动采集、传输、存储能力不足。多数铸造企业仍采用手工抄写、纸质记录、人工传送的方式，熔炼配料不称量或不进行准确称量，物料杂乱一致性差、批次成分波动大，工艺参数通过工艺卡片传递，但缺乏过程关键参数（时间、重量、温度、成分等）的自动采集管控，过程人工记录的数据失真、滞后、不完整，致使熔炼过程不稳定且问题追溯难。

1.3 设备自动化水平低

铸造熔炼设备自动化程度较低，设备故障诊断和健康管理难，虽然已配置光谱分析仪、测温枪等检测监控设备，但加配料、吹氧、吹氩、配电等关键过程控制均为人工控制执行，分析决策与执行完全依靠技能经验，关键设备缺乏信息集成能力和自动控制执行能力，无法满足生产过程的精细化管理，极大地影响了生产效率和生产成本。

1.4 技术创新能力弱

铸造企业作为市场和技术创新主体，有转型意愿但能力严重不足，中小企业驱动力不强，也难以支持信息技术的改造。作为主机配套产业，基础设施薄弱，缺少数据处理方法、数字技术和人才支撑，数据分析和挖掘能力不足，工业软件及其操作系统、工业控制系统、嵌入式芯片、开发工具等技术领域被国外垄断，工业传感与控制的高端产品依赖进口，缺乏行业突破性的工艺、装备、材料、软件等关键技术，企业同质化竞争严重，面向行业的共性技术服务能力和自主开发创新能力明显不足。

2 熔炼数字化转型技术路线

2.1 确立电弧炉熔炼数字化技术思路

熔炼数字化技术路线为：调研装备、检测、数据处理技术→实现实时数据采集传输→数据预处理（依据基础理论和经验公式）→开发机理模型→实现实时参数调整自动控制执行→数据采集传输及反馈（建立数据平台）→数据深度处理（依据工业大数据）→开发智能控制模型。在工艺和设备方面，主要解决和应用下列关键技术：

- (1) 废钢高效破碎与分选技术；
- (2) 高效供电、低电极消耗、废钢预热技术；
- (3) 抑制二噁英排放环保技术；
- (4) 余热回收、废气利用技术；
- (5) 智能配料、多功能炉门机器人作业技术；
- (6) 连续测温、炉气在线分析技术。

智能化控制方面，通过应用先进的监测手段和可靠的整体优化控制方案以及两者的有机结合，基于专家系统、模糊控制、人工智能神经网络控制的信息技术和工业大数据技术，开发一系列先进的监测技术和控制模型，如电极智能调节技术、自动判定废钢熔清技术、冶炼在线检测技术、质量分析监控及成本控制系统等。

2.2 进行广泛的数据采集

熔炼过程实现关键信息自动采集和自动传输，主要包括：班组、炉号、铸钢牌号、设备号、电炉炉龄、钢铁投料重量（料次及料重）；初炼出钢温度、出钢时间、出钢重量；精炼通电时长、出钢温度、成分数据、吊包温度、引流钢液量；冷却水进出水压，进出水温；电极、合金、石灰、矿石等消耗量；初炼与精炼用电量、初炼吹氧用量、精炼吹氩用量、天然气消耗量。

2.3 构建熔炼数学模型

（1）从熔炼材料成本方面分析，可以构建炉料配比数学模型、合金计算数学模型，通过分析原材料市场价格，进行复合新材料替代，扩大原材料采购范围，选择当前市场条件下的高性价比炉料和合金，同时进行精细化称量使用，能够综合降低熔炼材料成本。

（2）从熔炼过程控制方面分析，可以开发电炉炉控制数学模型和精炼炉控制数学模型，通过对不同控制阶段的操作需求进行精细化管理，对氧气压力和流量、氩气压力和流量及配电参数等进行自动执行控制，能够提高标准化操作水平并促进节能降耗。

（3）从熔炼安全控制方面分析，可以开发各型关键设备的预测诊断数学模型，通过对设备关键运行参数、环境检测参数进行监控，长期在线分析设备运行状态进行预测性诊断，采取安全联锁自动执行措施，能够提高安全生产保障能力并预防重大安全事故发生。

2.4 提高数据传输集成

筑牢熔炼数字化转型基础，建设熔炼数字化基础架构，如图2所示，打造一款集成生产计划、过程参数采集、工艺参数控制、数据统计分析等为一体的数字化控制与管理系统，生产过程的数据采集应尽可能自动获取，减少人工参与。根据熔炼生产计划，按照同牌号产品最大炉容量配炉的生产原则，提供最优排产计划，使产能最大化。自动获取相应牌号的熔炼工艺标准，实时控制生产过程关键节点的温度、成分等参数，合格后方能进行下一步操作，从而有效控制过程质量。以时间作为唯一维度，以炉号作为标识追溯生产过程，将熔炼前设备、原材料检验、生产过程中的

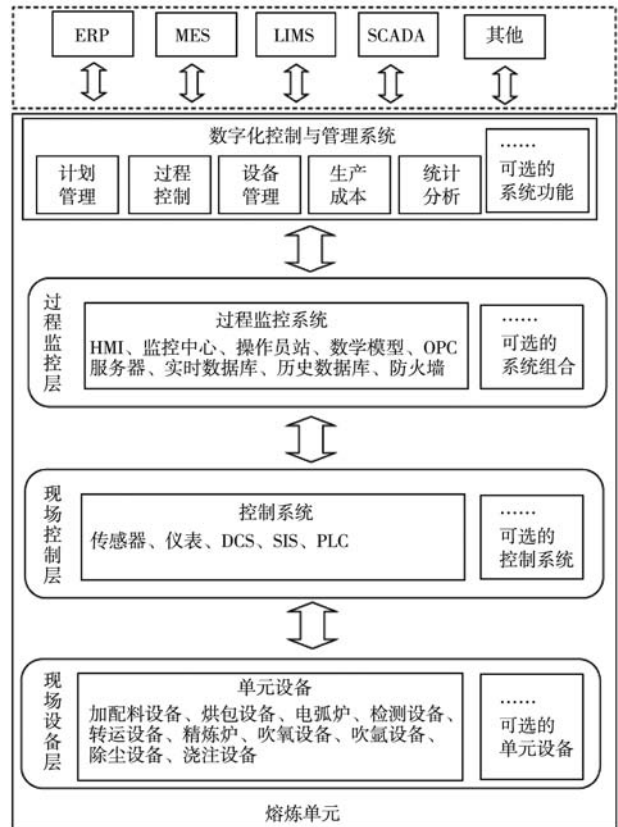


图2 熔炼数字化基础架构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the digital smelting architecture

时间、温度、重量、成分等关键质量参数，以及炉后的性能等参数进行存储与展示，实现整个熔炼过程的全面质量追溯。

2.5 强化数据处理技术

以数据中台架构技术为基础，数据处理和算力为支撑，形成汇集和分析企业数据的“工业大脑”，借助数据赋能促进企业寻找新的价值增长点，不断推动数字化系统的升级和扩展，形成“微前台+大中台+强后台”为特征的数字化新体系。数字化本质是以“数据”为生产要素，将数据收集和处理作为核心竞争力，利用大数据、人工智能等新一代数字技术进行分析、决策、优化，创新应用最小二乘法、BP神经网络、支持向量机、微粒群优化算法等新算法技术，从海量的数据中提取有用的知识，从大量无意义的数据中发现有用的信息，利用机器学习来解决越来越复杂的问题。借助数据获取和存储量的快速增长，不断演化迭代，基于算力能力的积累和提升，让机器深度学习，探索开发控制模型、工业软件或工业APP，控制模型开发流程如图3所示。将长期积累的隐性知识显性化、规范化、代码化，通过“工业大脑”指导或者替代人力进行决策与执行，辅助或替代人员进行熔炼车间生产、成本、设备等管理与监控，促进全流程的协同优化，推动信息系统架构再升级。

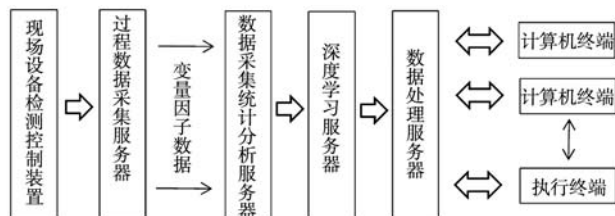


图3 控制模型开发示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the control model development

3 结语

综上所述，铸造电弧炉熔炼数字化技术具有重要的意义，也是铸造企业数字化转型的主要发展方向和关键技术难点，铸造电弧炉熔炼数字化的关键技

术为精准度高的智能化检测传输技术和以大数据、物联网、算法模型为基础的数据处理技术，难度在于解决底层硬件的技术支持和模型研发过程中情况不确定最大、逻辑最复杂的技术问题。在完善现有熔炼智能化和绿色化关键技术基础上，进一步构建熔炼全流程集操作、工艺、质量、成本、环保为对象的大数据分析优化平台，实现全流程优化执行与数据反馈监控，从而奠定数字化技术的重要基石。根据企业特点和目标需求，实现业务的持续创新和发展，最终形成科学先进的绿色智能生产技术，以提高产品质量和降低生产成本，提升企业工艺水平和核心竞争力，在实现高效工作的同时，还能进一步提升节能减排效果和对环境的保护力度，对参与行业、国家、国际的标准化活动具有积极意义。

参考文献:

- [1] 森井廉. 电弧炉炼钢法 [M]. 朱果灵译. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [2] 阎立懿. 现代超高功率电弧炉的技术特征 [J]. 特殊钢, 2001, 22 (5): 1-4.
- [3] ALZETTA F, GROSSMANN E, SCHROEDER J. Latest breakthrough technologies in industrial operation [J]. Stahl Undsen, 2011, 131 (11): 92-108.
- [4] MEMOLIF, GIAVANIC, GRASSELLIA. Consteel EAF and convention EAF: a comparison in maintenancepractices [J]. La Metallurgia, 2010 (7-8).
- [5] BUTCHERB, ENGINEERP, LAROYB, et al. Single-charge EAF Modification-installation and experience [J]. Iron and Steel Technology, 2011, 14 (1): 42-48.
- [6] 李士琦, 郁健, 李京社. 电弧炉炼钢技术进展 [J]. 中国冶金, 2010 (4): 1-7, 16.
- [7] 朱荣, 吴学涛, 魏光升, 等. 电弧炉炼钢绿色及智能化技术进展 [J]. 钢铁, 2019, 54 (8): 9-20.
- [8] 张豫川, 杨宁川, 黄其明, 等. 中冶赛迪绿色电弧炉高效智能控制技术 [J]. 冶金自动化, 2019, 43 (1): 53-58, 72.
- [9] 赵剑波. 推动新一代信息技术与实体经济融合发展: 基于智能制造视角 [J]. 科学学与科学技术管理, 2020, 41 (3): 3-16.
- [10] 戚聿东, 褚席. 数字经济发展、经济结构转型与跨越中等收入陷阱 [J]. 财经研究, 2021, 47 (7): 18-32.
- [11] 陈剑, 黄朔, 刘运辉. 从赋能到使能——数字化环境下的企业运行管理 [J]. 管理世界, 2020, 36 (2): 117-128.
- [12] 肖静华. 从工业化体系向互联网体系的跨体系转型升级模式创新 [J]. 产业经济评论, 2017 (2): 55-66.
- [13] 张晓, 吴琴, 余欣. 互联网时代企业跨界颠覆式创新的逻辑 [J]. 中国工业经济, 2019 (3): 156-174.

Analysis on the Development of Digital Transformation of Casting EAF Melting Process

JIANG Tao¹, XU Gui-bao², CHANG You-yu¹, HE Qing-ling¹, XIE Cheng-jian¹

(1. CRRC YangtzeTongling Co., Ltd., Tongling, Tongling 244142, Anhui, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

Smelting, as a key link in the casting process, has a great impact on cost, quality, safety, environmental protection, etc., and the production management mode that relies on traditional experience has low efficiency, large quality fluctuations, and has become more and more behind the development of the times. In view of this, this paper describes the problems and difficulties in the digital management and control of casting electric arc furnace melting, and introduces the ideas of digital transformation and upgrading from the aspects of establishing the digital technology route of melting, constructing the smelting mathematical model, improving the data transmission integration, strengthening the data processing technology, etc., so as to provide a reference for the development of casting melting technology.

Key words:

casting melting; digitalization; informatization; electric arc furnace; transformation development