

金属材料锻造和热处理行业的节能研究进展

温保鹏¹, 陈民涛², 豆瑞锋¹, 高超平², 张四宗¹, 刘训良¹, 温治¹

1. 北京科技大学能源与环境工程学院 北京 100083

2. 太原重工股份有限公司 山西太原 030024

摘要: 金属材料锻造和热处理工艺具有高污染、高能耗的生产特征, 对现有工艺进行节能优化是产业绿色升级的关键。众多学者从试验方法、数值模拟和人工智能等角度提出了一些优化方案, 这些成果在帮助企业提升生产效率的同时也提高了能源利用率, 实现了低碳发展。对金属材料的锻造和热处理工艺进行了系统的阐述, 将节能优化方案分为试验方法、数值模拟和人工智能等三类, 并分析讨论了每种方案的优缺点。其中数值模拟可通过全面分析对生产过程进行优化, 但具有计算时间长的缺点。同时数值模拟技术近年来不断向数字孪生方向发展, 能够使预测结果与实际生产实时交互, 实现动态优化。

关键词: 节能; 金属锻造; 热处理; 优化算法

Research progress on energy-saving in metal material forging and heat treatment industry

WEN Baopeng¹, CHEN Mintao², DOU Ruifeng¹, GAO Chaoping², ZHANG Sizong¹, LIU Xunliang¹,
WEN Zhi¹

1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China

2. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract: The forging and heat treatment processes of metallic materials are characterized by high levels of pollution and energy consumption. Optimizing these processes for energy efficiency is of great importance for promoting green industrial upgrading. Numerous scholars have proposed optimization strategies from various perspectives, including experimental methods, numerical simulations, and artificial intelligence. These advancements have not only enhanced production efficiency for enterprises but also improved energy utilization, contributing to low-carbon development. This paper provides a systematic overview of the forging and heat treatment processes for metallic materials, categorizing energy-saving optimization strategies into three main approaches: experimental methods, numerical simulations, and artificial intelligence. The advantages and limitations of each approach are analyzed and discussed. Among them, numerical simulations enable comprehensive analysis to optimize production processes but are limited by the long computation time. In recent years, numerical simulation techniques have increasingly evolved toward digital twin applications, allowing real-time interaction between predictive results and actual production processes, thereby achieving dynamic optimization.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52306066); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (FRF-TP-22-077A1)。

通信作者: 豆瑞锋, 教授, 主要从事工业热过程仿真模型、工艺优化算法与节能减排技术的开发工作, E-mail: douruifeng@ustb.edu.cn。

Keywords: energy-saving; metal forging; heat treatment; optimization algorithm

1 序言

改革开放近五十年来,中国经济实现了高速增长,GDP增长了328.8倍,人均GDP增长了234.6倍^[1],能源消费总量从1978年的5.71亿t标准煤增长到2023

年57.2亿t标准煤^[2],能源消费总量变化趋势及增长率如图1所示。然而,在经济增长实现量变的同时,资源约束力增大、环境污染日益严重,以及单位GDP能耗较高等问题也不容忽视^[3]。

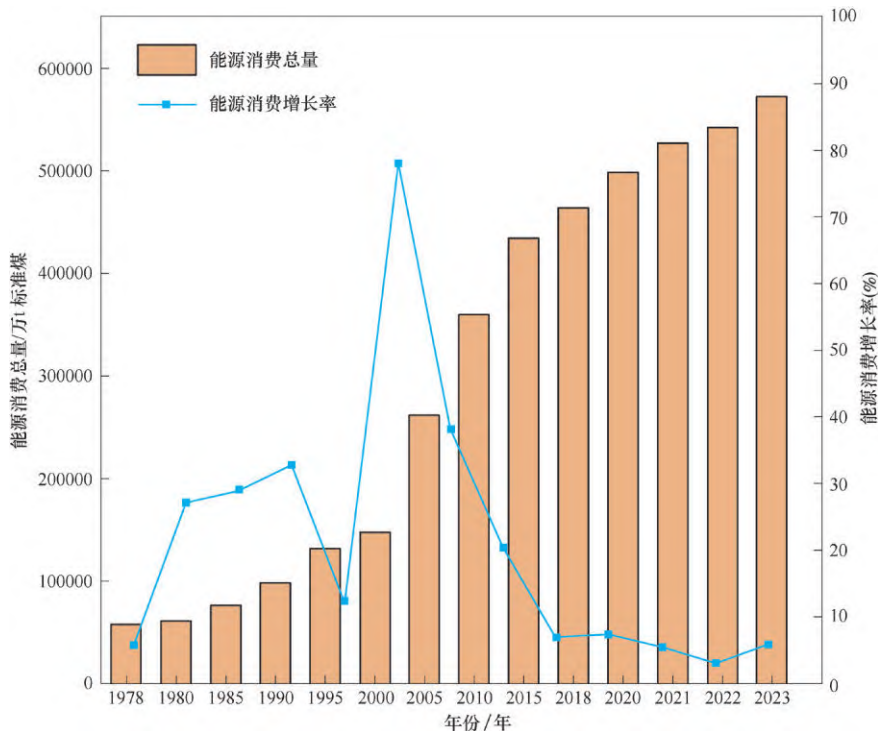


图1 1978—2023年我国能源消费总量与增长率变化趋势^[1]

热加工是指将金属或合金材料加热到一定温度后,通过塑性变形、热处理或铸造等工艺手段,来改变其形状、尺寸、内部微观组织结构和力学性能,以满足特定使用要求的加工方法^[4]。

大型锻件热加工通常包括加热、锻造、焊接和热处理等工艺。热处理是能源消耗的大户,消耗基数大,其中加热过程是主要的能源消耗环节,占总能耗的35%~50%^[5]。节能减排在热处理工艺中处于重要的地位^[6],若实现节约能耗、提高生产效率、降低成本,则生产与技术管理水平的提高是重要措施。

绿色节能方案最初以提高能源效率为主要目标,然后逐步发展为以获得经济效益为主要目标。经过国内外学者对节能方案的不断探索,技术创新对节能减排的内推作用愈发显现,因此通过技术创

新来推动节能事业发展是经济转型的必由之路。节能技术的改革与创新一直存在于生产实践中,众多学者对于绿色节能这一研究课题也做了大量工作,提出了试验方法、数值模拟、人工智能等多种解决方案和应用场景,形成了众多节能技术路径及典型案例,如图2所示。本文对已有的工作成果进行初步的分类和归纳,能够形成对节能技术的总体认识,对于实现技术融合发展具有一定的意义。

近年来,物联网、大数据和人工智能等技术不断与绿色制造相融合,通过生产设备的互联互通、智能调度、智能预测等方式有力推动了传统产业的高质量发展。本文旨在通过系统梳理和整合已有的研究成果,为读者提供一个全面、系统的热加工领域的节能路径,并尝试探究各种技术方案存在的内在联系。

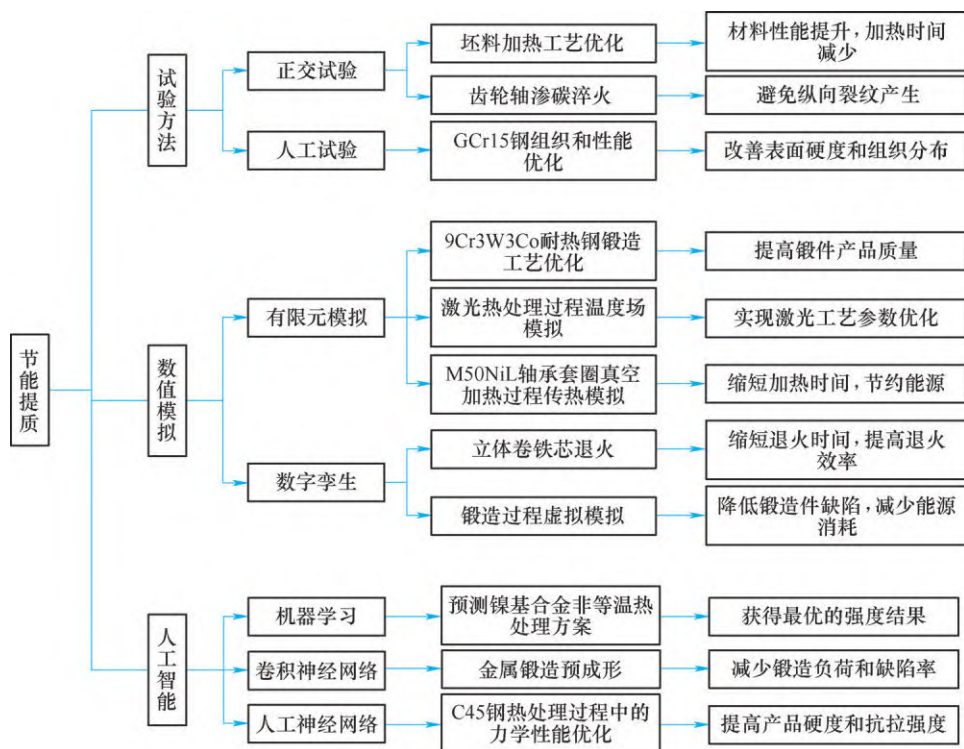


图2 节能技术路径及典型案例

2 试验方法

工艺参数规定了产品的加工过程并对产品的质量提供了初步保障, 涉及到诸如设计、生产及监测等环节。工艺参数一般通过大量的生产数据和试验积累确定, 而工艺参数随产品批次、生产节奏的不同可能会出现差异, 因此工艺参数并不是固定的。采用试验的方法对工艺参数进行优化, 可以提高产品的质量, 降低生产成本^[7], 进而提高能源的利用率。徐芳芳^[8]通过热处理工艺优化试验、力学性能检测和显微组织分析、以及冲击试样断口形貌的扫描电镜观察, 研究了不同的热处理工艺对35CrMo截齿钢组织和性能的影响, 进而得出优化后的工艺流程。徒玉龙等^[9]对GCr15钢活塞件原始组织、加热时表面状态、淬火冷却介质冷却能力等问题进行逐一分析后, 更新了淬火工艺, 改善了活塞件淬火后表面硬度的均匀性, 提高了产品质量。

正交试验法^[10]可大幅度减少试验次数, 因此被广泛应用于试验设计中。针对锻后热处理工艺, 黄冬等^[11]为了改善10CrNiCu低合金铸钢的力学性能, 通过正交试验和方差分析研究了正火次数、回火温度及回火时间对合金性能的影响。吴华林等^[12]利用

正交试验极差分析的方法, 通过分析金相及回火后的析出相得出热处理工艺参数对60Si2CrVAT弹簧钢力学性能的影响, 确定了其最佳热处理工艺, 提升了提速铁路转向架用弹簧钢的生产质量。李章芬^[13]通过试验分析了17Cr2Ni2Mo钢齿轮轴渗碳淬火后放置过程中纵向开裂的原因, 并对其热处理工艺进行了优化。结果表明, 通过严格控制锻坯正火质量, 改进渗碳淬火及回火工艺, 可获得理想的金相组织, 避免纵向裂纹产生。蔡志超^[14]对变速箱齿轮进行结构与力学的有限元分析, 并引进正交试验, 找出影响齿轮传动动态性能的最主要因素, 最终进行深入研究并优化齿轮钢的热处理工艺。蒋炜彤^[15]以42CrMo4钢偏航轴承为研究对象, 对坯料加热工艺进行了试验优化, 该研究将总加热时间、氧化层、脱碳层厚度作为优化目标并建立响应面模型, 优化后的加热时间与未优化前相比下降约0.7%, 同时锻件的材料性能也得到了不同程度的提升, 优化结果见表1。

与传统试验相比, 利用模拟软件可以设置多组工艺条件, 并且在短时间内可获得大量数据, 便于正交试验的开展, 且提升了优化效果。

表1 42CrMo4钢偏航轴承优化前后工艺对比^[15]

对比因素	优化前工艺	优化后工艺
总加热时间/min	773.33	768.33
峰值温差/℃	521.49	456.36
理论计算氧化层厚度/ μm	1631.9	1187.3
理论计算脱碳层厚度/ μm	2381.5	2067.4

针对锻造过程的工艺与优化,采用与上述学者相似的研究方式,RATHI等^[16]通过设计试验,控制坯料重量、加热温度和加热时间,使用正交试验法来分析不同参数组合对最终产品重量的影响,通过信噪比分析确定最优参数组合。得出最佳工艺参数是:坯料重量6.3kg,加热温度1200℃,加热时间50min。这项研究有效地提高了锻造件的质量和一致性,减少了加工过程中的能源浪费。OMIDI等^[17]研究了不同工艺参数对H13钢抗拉强度的影响,选取出不同试验工况下最优的锻造工艺。潘明明^[18]通过人工试验对CW6200曲轴锻造流程进行人工筛选,结合产品锻造结果得出:减小曲拐半径及曲柄外圆余量,减少外圆加工余量可提高曲轴的成品质量。OBIKO等^[19]对X20钢进行了锻造模拟试验,采用三水平三参数的正交试验进行Deform-3D仿真,同时进行方差分析,以确定参数对锻造(最大拉伸应力和锻造力)的重要性。统计分析结果表明,提高产品质量的最佳参数为变形温度1000℃、模具速度20mm/s、摩擦系数0.2。LIU等^[20]、YANG等^[21]同样采用正交试验的方式对所研究的热处理工艺过程进行优化,总体优化目标为缩短热处理时间或提高产品的力学性能,进而达到提高成品率和节约能源的目的。通过设计正交试验,并结合模拟软件获得试验结果,得出优化工艺方案,在提高产品质量的同时降低了生产成本,实现了节能减排。

在传统制定大型锻件的加热工艺时,难免会经过若干次人工试错过程,依托人工经验进行工艺优化会造成大量人力、资源的浪费,难以满足绿色低碳发展的需求。采用上述学者提出来的优化工艺,一方面可以减少人工优化的试错过程,另一方面可以提升产品性能,有利于提升企业的产品竞争力。上述工艺优化过程可为工艺制定提供一种可供参考的节能路径。首先确定工艺优化需满足的前提

条件,利用现有的制造流程模拟软件(如Deform-3D、ANSYS、COMSOL等)得出在不同工艺条件下的优化目标值(加热时间、材料特性等),再通过得到的模拟结果来搭建响应界面模型,最后利用响应界面模型对不同工艺条件下的目标值进行优化,得出最优的工艺参数,比较优化工艺后的产品是否符合质量要求,最终得出优化后的工艺路线,从而实现降本增效的最终要求。

综上所述,加热工艺通常以加热时间为待优化目标,在满足质量要求的前提下寻找加热的最短时间,通过搭建响应界面模型的方式对不同工艺下的优化目标进行寻优,得出最优加热工艺,减少了能源的直接消耗。锻造与加热工艺优化略有不同,锻造工艺优化的主要目的在于减少锻件缺陷,提高锻件成品率,因此待优化目标注重于产品质量,从另一角度实现能源的充分利用。试验方法虽能够提供较为直观的结果,但其准确性可能受到试验条件的影响,如环境条件、设备精度、操作人员经验等因素可能导致试验结果的差异。与采用数值模拟方法相比,试验方法无法对高度复杂和动态变化的生产场景进行精确预测^[22],而数值模拟方法可对实际生产进行模拟,弥补了试验方法的部分不足。

3 数值模拟方法

数字经济具有知识密集程度高、创新资源丰富、创新程度高等特点,可有效推动产业结构向低碳清洁、环境友好转变。一方面,利用数字技术,企业能够更加准确地挖掘消费者需求偏好并预判需求规模^[23],按需生产,减少能源浪费;另一方面,数字经济可推动高耗能产业链向智能化、高端化发展。在过去几年中,通过应用数值模拟对热处理和锻造工艺进行优化来达到节能的目标,已成为制造业的一个重要研究方向。这些研究主要集中在通过改进热处理过程的参数、提升金属材料的锻造成品率等方面来提高能效和生产效率。

数值模拟一般通过大型专业软件来进行,如有限元模拟软件ANSYS、Deform-3D、Abaqus和COMSOL等,此类模拟软件可对实际物理过程进行仿真,对热处理过程设计、离线仿真优化有极大优势。ANSYS适合需要进行结构分析、热分析和流体动力学的工程问题,尤其是在复杂结构的力学分

析方面表现优秀。Deform-3D是专为金属加工（如锻造、冲压）设计的软件，适用于材料流动和大变形问题的高精度模拟。Abaqus可提供强大的非线性分析能力，适合复杂材料行为和大规模计算环境下的工程分析。COMSOL在处理多物理场耦合问题时具有优势，适用于跨学科的复杂研究，但计算资源需求较大。KORKMAZ等^[24]利用计算材料工程（CME）方法、模拟技术和试验研究等方法对 $AlSi_5Mg_x$ 合金进行了热处理工艺优化，并将CME方法的分析结果与试验结果进行了对比，验证了软件模拟的准确性。赵学智等^[25]以5CrNiMo模具钢为研究对象，在保证钢锭心部和表面温差低于40℃前提下，对总加热时间进行优化，通过Deform-3D软件模拟和正交试验的方式，得出钢锭在满足工艺要求前提下的最优加热方案。

张晋刚等^[26]针对某新型产品的设计开发，引入SYSWELD虚拟仿真技术对动臂的焊接工序进行模拟及优化，在减少物理试错和前期开发成本的前提下创新了工艺流程。王云海等^[27]通过Deform-3D模拟了9Cr3W3Co耐热钢连续多道次锻造工艺，分析了等效应力、等效应变场和温度场的分布规律，并基于模拟结果，优化了锻造工艺。刘振威等^[28]以圆柱滚子轴承套圈为研究对象，使用Deform-3D软件对套圈在不同锻造设备上的成形过程进行数值模拟，设计不同的工艺方案，得出套圈在锻造过程中流线变化及碳化物带状分布情况。WANG等^[29]对弧齿锥齿轮的热锻工艺进行了研究，基于刚塑性有限元法利用Deform-3D软件进行数值模拟，建立了弧齿锥齿轮的锻造加工的仿真模型，探讨热锻过程中不同工艺参数对齿轮成形质量的影响，并通过正交试验获得了工艺参数与最小锻造力的最佳组合。该研究为弧齿锥齿轮精锻成形工艺的优化设计提供了理论依据，也为其他复杂零件精锻成形工艺的研究提供了新的思路。PARK等^[30]通过设计试验、数值模拟对感应加热系统的操作参数进行了优化。研究表明，通过过程参数优化，能够节省约6%的能源，但在数值模拟的基础之上，PARK还将遗传算法应用到数值模拟的结果中，使优化结果得到了进一步改善。李玉琦^[31]基于Abaqus软件建立了7CrSiMnMoV钢激光热处理过程的有限元分析模型，模拟研究了激光热处理过程中温度场的变化规

律，以及激光热处理过程的升温速度，实现了激光工艺参数的优化。GU等^[32]基于有限元软件及其二次开发功能，建立了三维热-力耦合有限元模型。该模型分析了局部热处理过程中板材表面的温度分布。窦存超^[33]利用Deform-3D的二次开发接口将建立的微观组织模型集成到该软件中，对42CrMo4钢的热模拟压缩试验过程进行数值模拟计算，得出了正火温度、保温温度及保温时间等工艺参数的优化结果。

在新能源材料领域，三元正极材料广泛应用于锂电池^[34]中，烧结工艺在其生产中发挥着至关重要的作用。MA等^[35]通过自主开发数学模型的方法，建立了三元正极材料烧结过程的预测模型。该预测模型结合了化学反应、材料内部的热传导，以及炉内的对流和辐射传热，全面分析了炉温与物料温度的关系。此模型使用蒙特卡洛方法和计算流体动力学模拟来计算炉内的辐射和对流热传递属性。通过参数优化显著提升了机组的生产能力。LIU等^[36]利用COMSOL建立了M50NiL轴承套圈真空加热过程的瞬态辐射传热模型，研究了加热工艺参数对真空炉辐射传热的影响，发现降低加热速率或提高预热温度可改善温度的均匀性，提出了一种优化后的高预热温度、低升温速率的加热工艺。

通过商业软件对热处理和锻造过程进行模拟，具有稳定性高、用户界面友好、精度高等优点，但由于其计算时间较长，很难应用到以在线控制为目的系统中。随着计算机技术的发展，以数字孪生为特征的模拟技术得到了多角度发展^[37]，同时也渗透到了金属热处理行业中。数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型，通过虚实交互反馈、决策迭代等手段为物理实体扩展新能力的一种模型^[38]。工业中通常采用退火的方式来减少立体卷铁芯的铁损，同时退火也是消除立体卷铁芯残余应力的唯一方法^[39]。DOU等^[40]建立了考虑卷铁芯内部各向异性热传导和炉内对流、辐射传热的数字孪生模型，将炉内温度与三维立体卷铁芯温度联系起来，以辐射热流密度和对流换热系数为边界条件，采用有限体积法求解三维立体卷铁芯内部各向异性传导问题。该模型考虑了三维立体卷铁芯的尺寸、位置、摆放、方向和数量对温度演变的影响。现场试验验证了该数字孪生模型在实际应用中的精度，仿真误

差小于 $\pm 2.5\%$ 。在数字孪生模型的基础上, DOU等^[40]提出了一种直接优化策略, 现场试验表明, 在保证生产质量不降低的前提下, 该优化方法可以有效缩短退火时间, 提高退火过程的效率。优化后的工艺中, 立体卷铁芯最大温差 $< 80^\circ\text{C}$, 总退火时间缩短了300min以上, 整体退火时间缩短了15%, 工艺优化结果如图3所示。

为了提高均热炉炉温控制的精度, 通常采用传热模型对加热过程进行优化, 最终达到节能降耗

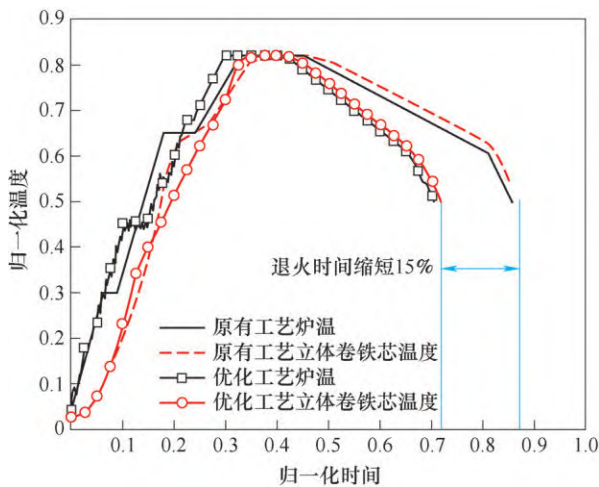


图3 立体卷铁芯和炉温在优化前后温度对比曲线

的目的^[41]。坯料的加热质量对后续的锻造工艺和节能起着至关重要的作用, XU等^[42]开发了一个三维数学模型来模拟钢坯在加热炉中的加热过程, 该模型同样可实现在线实时监控, 具备数字孪生模型的特征。通过模型和试验数据的对比分析, 提出了直接的优化策略, 如图4所示。由图4可看出, 上述优化方案有效节省了24%的加热时间, 加速了钢坯内部温度均匀化的过程, 提高了整体加热效果。这种方法展示了在多种材料加热过程优化中的广泛应用潜力。在金属锻造行业, 某大型锻造企业通过构建锻造过程的数字孪生模型, 结合实时传感器数据与有限元模拟软件, 动态监控温度、压力及变形参数, 并基于预测结果调整工艺参数。该方法通过虚实交互实现了工艺参数的实时优化, 有效降低了传统试错成本。研究表明, 应用数字孪生技术后, 锻造件的缺陷率降低了15%, 能源消耗减少了10%^[43]。WANG等^[29]采用数字孪生技术构建了锻造过程的虚拟模型。通过实时采集锻造过程中的温度、压力和变形数据, 结合有限元模拟和机器学习

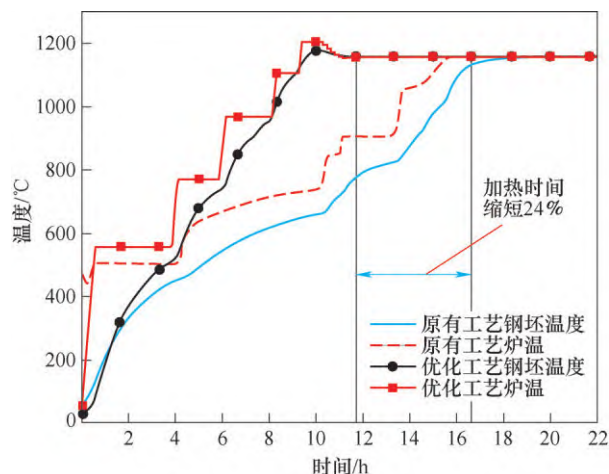


图4 优化前后钢坯和炉温温度变化曲线^[42]

算法, 动态预测锻件的温度场和应力场分布, 并优化锻造工艺参数。研究表明, 数字孪生技术的应用使锻件温度均匀性提高了20%, 锻造力降低了12%, 同时减少了能源消耗和材料浪费。

由上述研究可知, 数值模拟不仅降低了工艺优化中的试错成本, 避免了重复的人工试验, 而且能直观展示优化结果, 便于筛选最佳工艺方案, 但数值模拟需要大量的计算资源, 尤其对复杂的三维模型和多物理场耦合的问题, 计算时间较长, 而模拟结果的准确性高度依赖模型的精度和边界条件的设置, 若模型简化不当或边界条件设置不准确, 则可能导致模拟结果与实际情况偏差较大。数值模拟方法不仅提升了产品质量, 也实现了资源的有效节约。近年来, 数值模拟技术不断向数字孪生方向发展, 能够实现预测结果与实际生产实时交互, 逐步发展为在线动态模型。

4 人工智能方法

人工智能(AI)是计算机科学的一个分支, 涉及到能够执行需要人类智能任务的机器和软件^[44]。这些任务包括学习、推理、自我修正及理解语言。在现有大量数据的前提下, AI系统通过分析大量数据和识别数据的模式来工作。在热处理和锻造行业, 人工智能技术的应用主要集中在优化生产流程、提高材料性能, 以及减少能源消耗和增强质量控制等方面^[45]。AI不仅帮助热处理和锻造行业提高了生产效率, 还通过精细管理生产过程中的每一个环节, 提升了产品的整体质量和生产的可持续性。人工智能技术主要包括机器学习(Machine Learning,

ML)、卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)和人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)等算法。这些算法在不同场景中展现出独特的优势,为工艺优化提供了多样化的解决方案。

热处理和锻造工艺优化方案可通过机器学习的方法来进行,通过优化工艺参数来提高生产效率,进而达到降本增效的目的。机器学习通过从历史数据中学习规律,能够自动识别模式并进行预测,适用于处理大量工艺数据。在金属加工领域,机器学习主要用于工艺参数优化、质量预测和故障诊断。例如, VICKY等^[46]探索了使用机器学习技术预测镍基合金^[47]的非等温热处理(non-IHT)方案,该研究旨在提高0.2%抗压应力。在该研究中, AI与计算 workflow 整合模拟了微观结构演变并评估了不同热处理方案,实现了比传统等温热处理(IHT)更优的强度结果,这种AI的应用使得发现最佳热处理方案成为可能。杨累等^[48]采用面向性能的机器学习设计系统(MLDS)并结合试验优化,实现了具备超高强度和良好塑性的新型弹簧钢化学成分及热处理工艺参数的快速设计。焊接可能会引起残余应力、脆化和增加碳化物含量^[49],因此焊后热处理可减少残余应力,提高强度和其他力学性能,以及减少工件开裂的风险。对于焊后热处理, PINMANEE等^[50]、利用机器学习技术和元启发式优化焊后热处理工艺参数的新方法,目的是确定单目标和多目标视角下的最优热处理参数。UZUN等^[51]结合人工智能原理和特征应变理论分析了Inconel合金740H焊后热处理残余应力松弛现象,通过人工智能原理开发了一种新的模糊有限元模型,该模型通过演化过程确定特征应变-蠕变模型参数,分析了Inconel合金740H焊接件的残余应力松弛现象,并提出了优化工艺。机器学习算法的优势在于其能够处理复杂的非线性关系,并通过数据驱动的方式优化工艺参数,但其对数据质量和数量的依赖性较强,且模型的解释性较差,可能导致“黑箱”问题。

卷积神经网络擅长处理图像数据,能够自动提取图像中的特征^[52],适用于锻造工艺中的预成形设计和缺陷检测。在KIM^[53]的研究中,开发了一种使用卷积神经网络^[54]设计的金属锻造预成形的新技术,该CNN模型将设计过程进行自动化升级,从

输入的锻造产品几何形状中提取特征,生成相应的预成形形状,这种方法显著减少了锻造负荷和缺陷率,极大地提高了金属锻造的操作效率。工具钢性能的优化和相应的热处理主要是基于试错法,这需要大量的试验工作和资源消耗^[55]。因此,对工具钢的力学性能、热处理工艺优化方面具有较强的需求。利用神经网络对不同的奥氏体化温度和回火温度进行建模,可以帮助调整热处理参数,以获得最佳的力学性能和微观结构。在PODGORNIK等^[56]的研究中,使用基于神经网络的模型来优化工具钢的真空热处理工艺。这项研究专注于根据钢的成分和所需性能来选择优化热处理条件。CNN在图像处理和模式识别方面的优势使其在复杂几何形状的工艺优化中表现出色,但其训练过程需要大量标注数据,且计算资源消耗较高。

人工神经网络通过模拟人脑的神经元网络,能够处理多输入、多输出的复杂系统,广泛应用于热处理工艺中的温度控制和力学性能预测。LAOUISSI等^[57]应用人工神经网络结合遗传算法对C45钢在热处理过程中的力学性能进行多响应优化。这种方法精确控制诸如淬火温度和淬火冷却介质等工艺变量,在提高硬度和抗拉强度的同时优化了材料的延展性,提升了产品质量。同样采用智能算法, KHALAJ等^[58]针对42SiCr合金淬火过程中的冷却速度提出了优化方案,使用先进的人工智能和机器学习技术将物理模型和数据驱动模型相结合,模型内部采用了一种称为多层感知器(MLP)的特定类型的神经网络,使得42SiCr钢的力学性能得到了显著改善,神经网络的内部结构如图5所示。在钢铁冶炼行业中,通过人工智能算法对能源进行精准调配和管理对于节约资源有重要的意义,耿治胜^[59]基于某钢铁厂高炉运行数据,通过人工智能算法优化模型可以降低能耗 4.06×10^{11} kJ/年,实现了高炉节能减排。在FANG等^[60]的研究中,开发了一个用于预测和调节钢液运输过程中温度的人工神经网络模型,并更有效地对温度进行管理和调节。

机器学习、卷积神经网络和人工神经网络在工艺优化中各有侧重:机器学习适用于数据驱动的全局优化,卷积神经网络擅长处理图像和几何数据,而人工神经网络则更适合复杂的非线性系统建模。尽管这些算法在应用场景和数据处理方式上存在

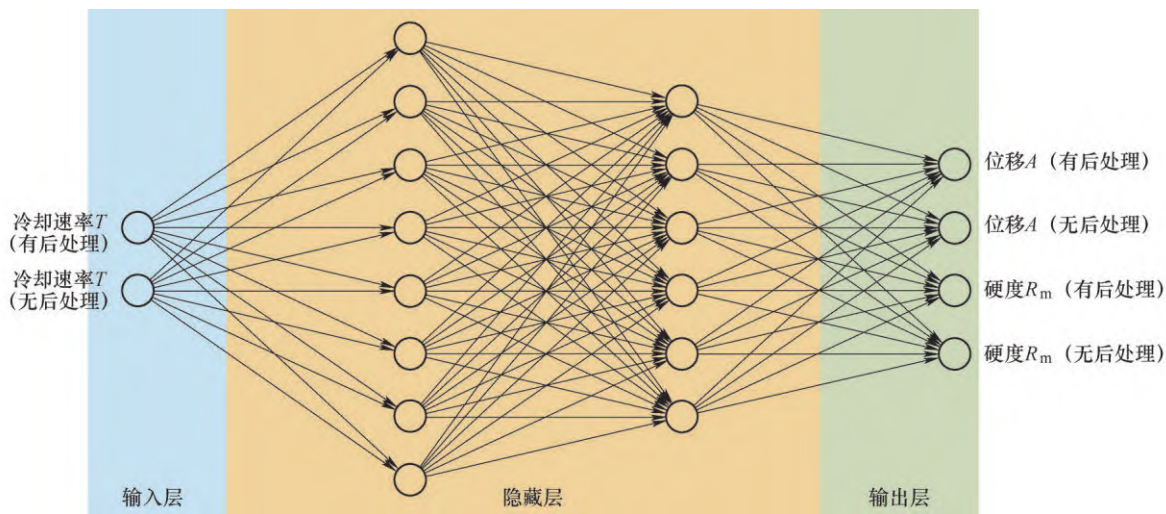


图5 优化冷却速度的人工神经网络配置

差异，但它们都依赖于大量数据进行训练，并通过不断优化模型参数提高预测精度。未来，结合多种算法的混合模型可能会成为工艺优化的新方向，进一步提升金属加工行业的智能化水平。以上研究表明，AI和神经网络在金属锻造和热处理等行业中的应用具有变革性的影响。它们突显了这些技术在提高过程效率、改善材料性能以及减少能源消耗方面的能力。但人工智能算法需要大量的高质量数据进行训练，若数据不足或质量不高可能导致模型预测不准确。同时不同算法的适用场景和优化目标不同，选择合适的算法进行参数调优需要较高的专业知识，这对从业人员提出了更高的专业要求。AI与传统制造过程的整合代表了更智能、更可持续的工业实践方向的重要进步。

5 结论与展望

节能减排是实现高质量发展的重要途径，为了加深对绿色节能不同方案的理解，本文以节能减排为切入点，从试验方法、数值模拟方法、人工智能方法出发，对金属锻造和热处理行业中现有的节能减排技术进行系统阐述。

对已有的工艺参数进行节能优化，可在不更新生产设备的前提下，提升能源的利用效率和生产效率，有广泛的应用场景，该节能方式具有低成本、操作简单、灵活性高等优点。金属材料的锻造、热处理及铸造等工艺需要大量能源，因此对金属加工制造的全流程进行节能优化有重要意义。工艺优化可以从多种角度出发，由于传统通过人工多次试验

的方法具有资源浪费严重、优化效果有限等缺点，因此正逐渐被数值模拟方法取代。利用数值模拟方法对工艺参数优化已成为当下的主流趋势，数值模拟具有灵活性高、操作简便、成本低廉等优点，但模拟参数的设置对模拟结果的准确性有较大影响。数字孪生技术的发展为数值模拟提供了一种新的思路，数字孪生模型可实现实际工况和模拟结果实时交互，能够对生产过程的关键参数进行实时预测，通过这种交互模式可对优化方案提出更加具有针对性的指导意见。数值模拟技术的不断进步推动了工艺流程的节能优化，同时也可提高企业的生产效率，提升能源的综合利用率。

在金属锻造和热处理领域中，人工智能的应用对于实现节能和优化工艺具有重要意义。通过具体案例分析可知，数值模拟和AI技术可在帮助减少能源消耗的同时提高生产效率。例如，利用数值模拟对弧齿锥齿轮的锻造过程进行优化，不仅减少了能源消耗，还通过精细控制工艺参数提高了成形质量。在预测和调节生产过程中关键变量（如温度和压力）的方案中，AI的引入减少了试错的成本，提高了操作的精确性和效率。总体来讲，人工智能技术使金属加工行业向更高的自动化和智能化水平迈进，显著提升了能源使用的效率和产品的质量。

参考文献：

- [1] 李明华，王晓东. 中国改革开放以来的能源消费变化与经济增长关系研究[J]. 中国能源政策与管理，2022，38（5）：45-53.
- [2] 国家能源局，国家统计局能源统计司. 中国能源

- 统计年鉴 (2023) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [3] 张艳霞. 我国技术进步与能源利用率关系研究[D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2011.
- [4] 王连铮, 李晓东. 金属热加工工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [5] International Energy Agency. Research on energy saving and emission reduction technologies in industrial heating processes[R]. IEA, 2021.
- [6] 王陆军, 马楠. 优化工艺, 精益生产, 保质促产, 节能降耗[J]. 金属加工 (热加工), 2014 (S2): 4-7.
- [7] 王亮. 制造工艺与机械设备加工工艺研究[J]. 中国设备工程, 2024 (12): 141-143.
- [8] 徐芳芳. 35CrMo截齿材料热处理工艺优化研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- [9] 徒玉龙, 王玲玲. GCr15钢活塞件真空热处理工艺优化[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (12): 79-83.
- [10] 王学深. 正交试验设计法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [11] 黄冬, 杨超飞, 张宝伟, 等. 基于正交试验的 10CrNiCu低合金铸钢热处理工艺优化[J]. 金属热处理, 2023, 48 (10): 151-157.
- [12] 吴华林, 王福明, 李长荣, 等. 提速列车用弹簧钢 60Si2CrVAT的热处理工艺优化[J]. 材料热处理学报, 2011, 32 (9): 35-41.
- [13] 李章芬. 17Cr2Ni2Mo材料热处理工艺优化[J]. 金属加工 (热加工), 2015 (S2): 133-137.
- [14] 蔡志超. 变速箱齿轮机加工和热处理工艺优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [15] 蒋炜彤. 42CrMo4环件坯料加热工艺和氧化脱碳行为研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [16] RATHI M G, JAKHADE N A. Optimization of forging process parameters by using taguchi method: an industrial case study[J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2014, 4 (6): 135-146.
- [17] OMIDI N, ILTAF A, HOURIA M, et al. Enhancing mechanical properties of additively manufactured H13: a two-step approach integrating processing parameters optimization and a tailored heat treatment[J/oL]. Metals and Materials International: 1-27[2025-03-17].DOI:10.1007/s12540-024-01808-4.
- [18] 潘明明. CW 6200曲轴RR法锻工艺优化[J]. 金属加工 (热加工), 2014 (23): 68-70.
- [19] OBIKO J O, MWEMA F M, SHANGWIRA H. Forging optimisation process using numerical simulation and Taguchi method[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2 (3): .
- [20] LIU H, ZHANG H, MENG L, et al. Heat treatment optimization for a high strength Al-Mn-Sc alloy fabricated by selective laser melting[J]. Materials, 2023, 16 (11): 121-136.
- [21] YANG W, CHEN Y, YANG L, et al. Optimization of mechanical and antibacterial properties of SLM-fabricated TC4-5Cu alloy by annealing heat treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024: 971: 12.
- [22] TAO F, CHENG Y. Challenges in using traditional experimental methods for real-time process optimization[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106 (7): 2531-2543.
- [23] 温馨, 杨洋. 数字经济发展对节能减排效率的影响研究——基于超效率SBM和Tobit模型[J]. 科技创业月刊, 2024, 37 (1): 77-83.
- [24] KORKMAZ A, YAĞCI T, ÇULHA O. Optimization of T6 heat treatments for AlSi₅Mg_x alloys via computational materials engineering and experimental validation for automotive applications[J/oL]. Journal of Materials Engineering and Performance: 1-10[2025-03-17]. DOI:10.1007/s11665-024-10160-y.
- [25] 赵学智, 范燕波, 夏琴香, 等. 5CrNiMo热作模具钢锻前加热规范研究及优化[J]. 热加工工艺, 2013, 42 (17): 110-113, 116.
- [26] 张晋刚, 刘世权, 朱海涛, 等. 基于SYSWELD的新型动臂构件焊接工艺仿真优化[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (9): 52-55.
- [27] 王云海, 龚志华, 赵吉庆, 等. 9Cr3W3Co耐热钢锻造工艺数值模拟及实验研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (10): 17-26.
- [28] 刘振威, 杨会超. 基于Deform的圆柱滚子轴承套圈锻造工艺仿真优化[J]. 锻造与冲压, 2024 (19): 40-43.
- [29] WANG Z, JIANG C, WEI B, et al. Numerical

- simulation and process parameter optimization of warm forging near-net forming for spiral bevel gear[J]. Applied Sciences, 2024, 14 (3) .
- [30] PARK H S, DANG X P. Optimization of the in-line induction heating process for hot forging in terms of saving operating energy[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13 (7) : 1085-1093.
- [31] 李玉琦. 7CrSiMnMoV钢的激光热处理实验与数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [32] GU S, ZHAO J, MA Y, et al. Numerical simulation of electron beam welding and local heat treatment of TC4 titanium alloy sheet[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2775 (1) : 012037.
- [33] 窦存超. 42CrMo4钢的热变形行为及热处理工艺研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
- [34] 罗亚婷, 石哲, 陆楚, 等. 锂离子电池高镍三元层状正极材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52 (S2) : 7-10, 15.
- [35] MA B, DOU R, PENG H, et al. Mathematical model and parameter analysis of the sintering process for ternary cathode materials[J]. Advanced Theory and Simulations, 2023: 2300473.
- [36] LIU J, LI J, WANG Z, et al. Optimization of heating process for bearing rings in a vacuum furnace based on numerical analysis[J]. ISIJ International, 2021 (1) .
- [37] 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.
- [38] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017 (5) : 20418-20427.
- [39] LEUNING N, STEINES S, HAMMERER K, et al. Effect of material processing and imposed mechanical stress on the magnetic, mechanical, and microstructural properties of high-silicon electrical steel[J]. Steel Research International, 2016, 87 (12) : 1638-1647.
- [40] 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.
- [41] GU M Y, CHEN G, LIU X, et al. Numerical simulation of slab heating process in a regenerative walking beam reheating furnace[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 76 (6) : 405-410.
- [42] XU K, LI D, DOU R, et al. Numerical and experimental studies on the heat transfer characteristics and process optimization of the billet soaking furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253: 123847.
- [43] TAO F, ZHANG M, LIU Y. Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2018: 20418-20427.
- [44] 李颖博, 李朝, 段玉聪, 等. 物理人工智能: 下一代人工智能 (英文) [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24 (8) : 1231-1239.
- [45] 石芬. 热处理炉温度智能控制方法研究[J]. 工业加热, 2024, 53 (11) : 37-40.
- [46] VICKEY N, SAE D, DMITRY S, et al. Artificial intelligence inspired design of non-isothermal heat treatments for γ - γ' two-phase Ni-based alloys[J]. Applied Sciences, 2023: 12660.
- [47] TRESA, M, POLLOCK, et al. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (2) : 361-374.
- [48] 杨累, 赵帆, 姜磊, 等. 机器学习辅助2000MPa级弹簧钢成分和热处理工艺开发[J]. 金属学报, 2023, 59 (11) : 1499-1512.
- [49] DAHAL D R, KHATRI K. Heat treatment optimization of 13Cr4Ni stainless alloy used as hydro turbine materials[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1079 (1) : 221-243.
- [50] PINMANEE I, WASAWAT N, WARISA W. Post weld heat treatment optimization of dissimilar friction stir welded AA2024-T3 and AA7075-T651

(下转第19页)

得强度和低温韧性的最佳组合。

综合本研究结果, S460-1工艺参数条件下获得的热轧板性能最优, 同时满足了高强度要求, 具有良好的低温韧性。这一优化工艺实现了显微组织的细化, 且具有合理的强韧性匹配, 为海上风电用S460钢的工业化生产应用提供了工艺设计依据。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况[R]. (2025-01-27) .
 - [2] SONG D, FAN T, LI Q, et al. Advances in offshore wind[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12 (2) : 359.
 - [3] 黄传清, 毛凌波, 胡战. 海上风电用S460钢焊接性能研究[J]. 金属加工 (热加工) 2024 (9) : 69-73.
 - [4] HE Y, LIU J H, HUANG G Y, et al. Elemental segregation, microstructure, and mechanical properties of TMCP-treated high-manganese wear-resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024: 1-16.
 - [5] KUMAR P, MAITY K P, DASGUPTA A, et al. Innovations in thermo-mechanical processing to develop high strength steel plates[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2022, 75 (8) : 2069-2076.
 - [6] 孙震, 高朋, 刘振宇. 终冷温度对风电用S460级钢组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33 (7) : 635-641.
 - [7] LI D, DONG H, WU K, et al. Effects of cooling after rolling and heat treatment on microstructures and mechanical properties of Mo-Ti microalloyed medium carbon steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 773: 138808.
 - [8] WANG S, YU H, ZHOU T, et al. Effects of non-recrystallization zone reduction on microstructure and precipitation behavior of a ferrite-bainite dual phase steel[J]. Materials & Design, 2015, 88: 847-853.
-
- (上接第10页)
- using machine learning and metaheuristics[J]. Materials, 2023, 16 (5) : 2081-2081.
 - [51] UZUN F, KORSUNSKY A M. On the analysis of post weld heat treatment residual stress relaxation in Inconel alloy 740H by combining the principles of artificial intelligence with the eigenstrain theory[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 752 (APR.3) : 180-191.
 - [52] ZHANG Y, LI X, WANG H. Application of convolutional neural networks in defect detection for metal forging[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 1-10.
 - [53] KIM N. A new approach to preform design in metal forging processes based on the convolution neural network[J]. Applied Sciences, 2021, 11.
 - [54] MORAIS H. Electrical load demand forecasting using feed-forward neural networks[J]. Energies, 2021, 14.
 - [55] EAYSIN A, KABIR S, GUNISTER E, et al. Process parameter optimization of laser beam machining for AISI -P20 mold steel using ANFIS method[J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2025 (18) : 100357.
 - [56] PODGORNIK B, BELIČ, IGOR, et al. Tool steel heat treatment optimization using neural network modeling[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2016, 47 (11) : 5650-5659.
 - [57] LAOUISSI A, BLAOUI M M, ABDERAZEK H, et al. Heat treatment process study and ANN-GA based multi-response optimization of C45 steel mechanical properties[J]. Metals and Materials International, 2022, 28 (12) : 3087-3105.
 - [58] KHALAJ O, HASSAS P, MAŠEK B, et al. Optimization of cooling rate of Q-P treated 42SiCr steel using AI digital twinning[J]. Heliyon, 2024, 10 (11) : 32101.
 - [59] 耿治胜. 基于人工智能高炉节能减排算法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
 - [60] FANG L, SU F, KANG Z, et al. Artificial neural network model for temperature prediction and regulation during molten steel transportation process[J]. Processes, 2023, 11 (6) .

MW 20250308

MW 20250116