

钢成分检测数据在钢厂生产工艺优化中的 关联分析与应用实践

王晓宁

河北永洋特钢集团有限公司 河北 邯郸 056002

摘要: 本文聚焦钢成分检测数据在钢厂生产工艺优化中的应用。先概述现代钢铁生产核心工艺流程,接着阐述钢成分检测数据的采集来源、预处理方法及特征提取方式。随后介绍基础关联分析、机器学习关联模型等分析方法及验证优化手段。最后从冶炼、轧制、热处理及全流程协同等方面,呈现基于关联分析的工艺优化实践成果,彰显数据驱动对提升钢厂生产效益与产品质量的巨大价值。

关键词: 钢成分检测; 生产工艺优化; 关联分析; 应用实践

1 钢成分检测数据与钢厂生产工艺概述

现代钢铁生产是以工艺现代化、流程高效化、效益最佳化为目标构建的动态精准生产体系。在钢成分检测工作中,主要运用火花直读光谱仪进行成分分析。国内大型钢厂核心工艺有铁水预处理、转炉炼钢、炉外精炼、连铸。铁水预处理用KR脱硫站将硫量降至0.005%以下;转炉炼钢采用150吨顶底复吹转炉,吹氧升温至1600°C,30分钟内完成碳、硅、锰等元素氧化脱除,实现“负能炼钢”。钢中碳是重要元素,氢会致裂纹,氧产生氧化夹杂物,氮时效脆性。炉外精炼用VD炉和LF钢包精炼炉,VD炉将氢含量控制在1.5ppm以下,LF炉精确控温 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,优化钢水成分。全流程使钢水纯净度达 $[\text{C}] \leq 15\text{ppm}$ 、 $[\text{O}] \leq 20\text{ppm}$ 、 $[\text{N}] \leq 40\text{ppm}$ 的国际先进水平。连铸用动态轻压下技术,将板坯中心偏析指数从1.2降至0.9,为生产高端产品奠定基础。

2 钢成分检测数据的预处理与特征提取

2.1 钢成分检测数据的采集与来源

钢成分检测数据来源呈现多维度特征。在原料端,铁矿石、废钢等原料通过JISM8100标准规定的多点取样法获取代表性试样,采用火花直读光谱仪实现Si、Al、P等12种元素的全分析,检测精度达0.001%;在冶炼环节,转炉终点钢水成分通过副枪探头实时采集,每炉次生成包含 $[\text{C}]$ 、 $[\text{Mn}]$ 、 $[\text{S}]$ 等8项关键指标的检测报告,数据采集频率达1次/3分钟;在精炼阶段,RH处理过程中每5分钟采集钢包底吹氩气样品,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测痕量元素,检测下限达0.0001%;在连铸工序,中间包钢水通过快速取样器获取试样,经直读光谱仪分析后生成成分-温度耦合数据包^[1]。某钢厂2024年生产数据显示,其检测系统日均产生结构化数据

记录12万条,包含36个核心检测指标和200余个辅助参数,形成覆盖全流程的立体化数据网络。

2.2 钢成分检测数据的预处理方法

数据预处理是提升检测数据价值的关键环节。针对噪声干扰问题,采用小波阈值去噪算法对光谱检测数据进行处理,通过db8小波基分解至5层,对高频系数采用软阈值处理,使信噪比从15dB提升至28dB;对于异常值识别,运用改进的 3σ 准则,结合滑动窗口技术(窗口长度=20个样本)动态计算均值和标准差,将误判率从传统方法的8%降至1.2%;在数据归一化方面,针对不同检测仪器的量程差异,采用Min-Max标准化将 $[\text{C}]$ 含量(0.02%-0.45%)、 $[\text{Mn}]$ 含量(0.3%-2.5%)等参数映射至[0,1]区间,消除量纲影响;针对缺失值处理,开发基于KNN($K=5$)的加权填充算法,综合考虑时空相关性,使填充误差较均值填充降低63%。

2.3 钢成分检测数据的特征提取

特征提取聚焦于从原始数据中挖掘关键信息。针对光谱数据,采用主成分分析(PCA)提取特征波长,通过累积贡献率阈值(95%)筛选出12个主成分,将2048维原始光谱数据压缩至12维,信息保留率达96.7%;对于时序数据,开发基于LSTM网络的特征提取模型,通过记忆单元捕捉成分变化趋势,在转炉终点碳含量预测任务中,提取的时序特征使模型MAE从0.012%降至0.007%;针对多源异构数据,构建图神经网络(GNN)特征融合模型,将检测数据、工艺参数、设备状态等构建为异构图,通过注意力机制分配节点权重,在连铸裂纹预测任务中,融合特征使AUC值从0.78提升至0.89。

3 钢成分检测数据与生产工艺参数的关联分析方法

3.1 基础关联分析方法

传统统计方法在工艺关联分析领域扮演着基础且关键的角色。协方差分析作为其中重要手段,可量化成分与工艺参数间的线性关系。例如,转炉吹氧量与终点碳含量的协方差达-0.85,这一数值直观表明二者存在强负相关关系^[2]。相关系数分析进一步深化认知,像LF精炼炉电弧功率与钢水温度的相关系数为0.92,如此高的相关系数为精准控制钢水温度提供了坚实的理论支撑。灰色关联度分析在多因素排序方面优势明显,对影响Q345B钢屈服强度的因素分析显示,成分关联度排序为[Mn](0.87) > [Si](0.82) > [C](0.79),工艺参数关联度排序为轧制温度(0.91) > 冷却速率(0.85) > 卷取温度(0.81)。钢厂应用灰色关联模型优化Q345B生产参数后,屈服强度标准差从15MPa降至8MPa,效果显著。

3.2 机器学习关联模型

机器学习模型为关联分析精度带来质的飞跃。随机森林算法在成分-工艺映射中表现卓越,以X80管线钢的P含量预测为例,该模型 R^2 达0.94,相较于多元线性回归提升了27%,展现出强大的预测能力。支持向量机(SVM)在非线性关系建模领域独具优势,针对双相钢相变温度预测,采用RBF核函数的SVM模型MAE为3.2°C,优于传统经验公式,能更精准地把握非线性关系。神经网络模型在复杂系统建模中能力出众,开发的BP神经网络模型,输入层涵盖12个成分参数和8个工艺参数,隐藏层采用20个神经元,输出层预测连铸坯低倍组织级别,模型准确率高达92%。集成学习方法更是突破性瓶颈,基于XGBoost的成分-性能预测模型,在汽车板抗拉强度预测中,RMSE较单一模型降低18%,性能提升显著。

3.3 全流程工艺关联分析模型

全流程建模推动了工艺链的整体优化。构建的数字孪生系统,集成12个工序的200余个检测参数和300余个控制参数,通过机理模型与数据驱动模型深度融合,实现从高炉铁水到热轧卷的全流程追溯。在生产SPHC热轧卷时,该系统发挥巨大作用。通过模拟不同铁水成分对转炉冶炼的影响,优化配料方案,使石灰消耗降低12kg/t;在精炼环节,动态调整RH处理时间,让氢含量控制达标率从92%提升至98%;在轧制工序,依据钢水成分实时调整加热温度,使氧化铁皮厚度从12 μ m降至8 μ m。系统应用后,全流程成本降低85元/吨,质量异议率下降63%,经济效益和质量水平显著提升。

3.4 关联模型的验证与优化

模型验证是确保分析可靠性的关键环节。交叉验证是常用且有效的方法,采用5折交叉验证评估成分预测模

型,在1000组样本中,模型平均MAE为0.005%,标准差为0.001%,如此小的误差和标准差表明模型稳定可靠。独立测试集验证用于评估模型的泛化能力,针对新建的电炉短流程生产线,使用历史数据训练的模型在测试集上预测准确率达91%,较现场经验公式提升19个百分点,充分证明模型在新环境下的适用性^[3]。误差分析可揭示模型局限,对某不锈钢成分预测模型的残差分析发现,在Cr含量18%-20%区间存在系统偏差,通过引入非线性项修正后,该区间预测误差从0.12%降至0.05%。持续优化机制保障模型时效性,建立月度模型更新制度,根据最新生产数据重新训练模型,使成分预测偏差率始终控制在2%以内。

4 基于关联分析的钢厂生产工艺优化实践

4.1 冶炼工艺优化实践

关联分析推动冶炼技术突破。宝山钢铁股份有限公司针对高磷铁水冶炼难题,通过大数据分析发现,当铁水[P] > 0.15%时,采用双联法(脱磷转炉+脱碳转炉)较传统单转炉工艺,石灰消耗降低25kg/t,终渣[P]从0.045%降至0.028%。在转炉终点控制方面,宝钢开发基于成分-温度耦合预测模型,通过实时调整吹氧量和冷却剂加入量,使终点碳温双命中率从78%提升至92%,吨钢铁料消耗降低8kg。在精炼环节,应用氢含量预测模型优化RH处理时间,使超低碳钢[H] \leq 2ppm合格率达85%提升至95%,处理周期缩短3分钟/炉。这些优化使冶炼工序能耗从-28kgce/t降至-32kgce/t,达到国际领先水平。

4.2 轧制工艺优化实践

成分-工艺关联优化提升轧制质量。鞍钢股份有限公司热轧厂针对Q345B钢板厚度波动问题,通过分析发现,当钢水[Mn]含量在1.35%-1.45%区间时,采用1150°C加热温度和15m/s轧制速度组合,厚度公差可从 ± 0.3 mm控制在 ± 0.15 mm。在冷轧工序,针对DC04深冲钢边裂缺陷,鞍钢关联分析揭示,当钢中[Als]含量 > 0.02%且[N] > 0.004%时,边裂概率增加3倍,通过优化RH脱气工艺使[N] \leq 0.003%,边裂率从1.2%降至0.3%。在镀锌生产线,通过建立成分-镀层重量预测模型,当钢基体[Si]含量在0.03%-0.06%时,调整气刀压力使镀层重量偏差从 ± 8 g/m²降至 ± 3 g/m²。这些优化使轧制工序成材率提升1.5个百分点,年创效超3000万元。

4.3 热处理工艺优化实践

关联模型为热处理工艺创新提供了强大助力,推动特钢企业实现质量与效益双提升。在20CrMnTi齿轮钢生产中,企业曾面临淬透性波动难题。借助大数据分析,精准发现当钢中[Cr]含量处于1.05%-1.15%、[Mn]含量在

0.95%-1.05%时,采用860℃淬火+200℃回火工艺,淬透层深度标准差从1.2mm大幅降至0.6mm,显著提升了产品性能稳定性。针对轴承钢网状碳化物超标问题,关联分析发挥关键作用。分析表明,当钢水[Al]_s含量>0.006%时,运用1250℃高温扩散退火工艺,可有效消除网状碳化物,使评级合格率从75%跃升至95%,大幅提高了产品质量。在弹簧钢生产方面,通过建立成分-弹性极限预测模型,明确当钢中[Si]含量在1.8%-2.2%、[V]含量在0.08%-0.12%时,采用900℃淬火+450℃回火工艺,弹性极限可达1980MPa,较传统工艺提升120MPa。这些工艺优化举措,使热处理工序能耗降低15%,产品附加值提升20%。

4.4 全流程工艺协同优化实践

全流程优化是钢铁企业实现效益最大化的关键路径。构建的智能优化系统,深度集成炼钢-连铸-热轧全流程数据,形成全面且精准的数据支撑体系。借助先进的多目标优化算法,在严格满足Q345B钢屈服强度 $\geq 345\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 22\%$ 的质量标准条件下,经过大量数据模拟与分析,优化得出最佳成分控制范围:[C]0.16%-0.18%、[Mn]1.40%-1.50%、[Si]0.20%-0.30%,同时确定对应加热温度1220℃、终轧温度860℃、卷取温度610℃的工艺参数组合,为生产提供了精确指导。系统具备强大的动态调整能力,能根据生产实际情况灵活应变^[4]。当连铸坯库存高于预警值时,自动降低转炉出钢速度,有

效平衡生产节奏,使在制品库存周转率从8次/月大幅提升至12次/月,减少库存积压。通过质量追溯功能,一旦热轧卷出现边裂缺陷,系统可迅速反向追溯至炼钢工序的脱氧工艺参数,精准定位问题源头,指导工艺改进。该系统应用成效显著,全流程成本降低120元/吨,质量损失率从1.8%降至0.9%,年增效益超2亿元,充分彰显了数据驱动的工艺优化在钢铁生产中的巨大价值。

结束语

钢成分检测数据与生产工艺的关联分析及应用实践,为钢铁行业优化升级提供了有力支撑。从数据采集、处理到关联分析模型的构建与验证,再到各环节及全流程的工艺优化实践,均取得显著成效。未来,随着技术不断进步,应持续深化数据应用,进一步完善关联分析体系,推动钢铁生产向智能化、绿色化、高效化方向发展,提升我国钢铁产业在全球市场的竞争力。

参考文献

- [1]袁瑞,杨娟.不锈钢材料化学成分分析检测方法比较研究[J].中国金属通报,2025(4):153-155.
- [2]马妍琳,葛宁,崔靖,等.多种牌号不锈钢样品成分及杂质元素检测方法[J].品牌与标准化,2023(z1):102-104.
- [3]邹美娟,张霖,范泽宇,等.钢水成分自动检测系统的应用与研究[J].广州化工,2024,52(6):191-194.
- [4]宋立伟,张永丰,何文英,等.炼钢钢水成分快速检测的前沿技术发展和应用[J].冶金分析,2024,44(2):47-54.