

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，氮致时效脆性。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±2°C，优化钢水成分。全流程使钢水纯净度达[C]≤15ppm、[O]≤20ppm、[N]≤40ppm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[C]、[Mn]、[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[C]含量（0.02%-0.45%）、[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R²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能瓶颈，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12μm降至8μm。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] ≤ 2ppm合格率从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±0.3mm控制在±0.15mm。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] ≤ 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±8g/m²降至±3g/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°C淬火+200°C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°C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°C淬火+450°C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°C、终轧温度860°C、卷取温度610°C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与应用[J].冶金分析,2024,44(2):47-54.