

# 新时期冶金转炉炼钢自动化控制技术的应用

况增光

中冶东方工程技术有限公司 山东 青岛 266555

**摘要：**在“双碳”目标驱动下，我国钢铁行业正经历从规模扩张向质量效益转型的关键阶段。本文聚焦新时期冶金转炉炼钢自动化控制技术的应用。首先阐述其发展背景与重要意义，强调自动化控制对转炉炼钢的推动作用。接着分析该技术在提升生产效率与质量、降低能耗与成本、保障生产安全等方面的作用。详细介绍检测技术、供氧控制、原料控制、出钢控制等具体应用。最后展望未来发展趋势，包括智能化、绿色化以及与工业互联网深度融合，为转炉炼钢自动化控制技术发展提供参考。

**关键词：**新时期；冶金转炉；炼钢自动化；控制技术；应用

引言：在新时期，冶金行业作为国家基础产业，持续追求高效、优质、绿色生产。转炉炼钢是冶金生产的关键环节，传统炼钢方式在效率、质量、能耗等方面面临诸多挑战。随着科技飞速发展，自动化控制技术为转炉炼钢带来变革契机。通过引入先进的自动化控制技术，能够实现对炼钢过程的精准监测与调控，有效解决传统炼钢中的难题，提升整体生产水平，增强企业在市场中的竞争力，推动冶金行业向现代化、智能化方向迈进。

## 1 转炉炼钢自动化控制技术的发展背景与意义

### 1.1 发展背景

转炉炼钢自动化控制技术的发展源于钢铁行业转型升级的迫切需求。传统转炉炼钢依赖人工经验与机械操作，存在生产效率低、能耗高、质量波动大等问题。随着全球钢铁产能过剩加剧，市场竞争从规模扩张转向效率与质量竞争，倒逼企业通过技术创新降低成本。同时，中国“双碳”战略对钢铁行业提出更高节能减排要求，传统高耗能模式难以为继。此外，信息技术革命为自动化控制提供了技术支撑，工业互联网、大数据、人工智能等技术的成熟，使实时监测、动态调控成为可能。国内外钢铁企业纷纷投入研发，如宝钢、武钢等通过引进副枪系统、动态模型等技术，逐步实现转炉炼钢的数字化控制，为自动化控制技术的普及奠定了基础。

### 1.2 重要意义

转炉炼钢自动化控制技术的推广具有多重战略价值。首先，它显著提升生产效率与质量稳定性。通过动态模型与反馈机制，可实时调整氧枪位置、供氧量及辅料配比，使终点碳温命中率提升至95%以上，缩短冶炼周期10%-15%，同时降低废钢率与能耗。其次，自动化技术推动绿色转型。精准控制减少铁水与添加剂消耗，降低废气排放，助力钢铁企业实现“超低排放”标准。再

者，它增强企业市场竞争力。自动化生产线减少人工干预，降低操作失误率，提升设备利用率与产品一致性，满足高端制造业对优质钢材的需求。最后，该技术为钢铁行业智能化升级奠定基础，通过与工业互联网深度融合，可实现全流程数据互联，推动“黑箱”冶炼向透明化、可预测化演进，引领行业向高效、低碳、智能方向迈进<sup>[1]</sup>。

## 2 自动化控制技术在转炉炼钢中的作用

### 2.1 提升生产效率与质量

自动化控制技术通过实时数据采集与动态模型优化，显著提升转炉炼钢效率。例如，副枪检测系统可在冶炼末期快速获取熔池温度、碳含量等关键参数，结合动态模型自动调整供氧强度与冷却剂添加量，将终点命中率提升至95%以上，减少复吹次数与补吹时间，单炉冶炼周期缩短10%-15%。同时，自动化投料系统根据铁水成分与目标钢种精准计算辅料配比，减少人为误差，使钢水成分波动范围缩小至±0.02%，显著提升产品一致性，满足高端制造业对优质钢材的需求。

### 2.2 降低能耗与成本

自动化控制技术通过精准调控实现资源高效利用，直接降低生产成本。例如，动态供氧模型根据铁水硅含量实时调整氧枪枪位与供氧流量，减少过量供氧导致的铁损与能源浪费，使吨钢氧气消耗降低5%-8%。同时，智能配料系统结合废钢价格与铁水成分，动态优化废钢与铁水比例，在保证钢水质量的前提下，降低铁水消耗3%-5%。此外，自动化设备故障预警系统可提前识别设备异常，减少非计划停机时间，设备综合效率（OEE）提升8%-12%，进一步压缩维护成本。

### 2.3 保障生产安全

自动化控制技术通过隔离高危操作与实时风险预

警，构建本质安全型生产环境。例如，远程操控系统将氧枪操作、炉前投料等高危环节转移至控制室，减少人员与高温、高压环境的接触，降低烫伤、爆炸等事故风险。同时，智能监测系统集成氢气浓度、炉体温度等传感器，结合AI算法实时评估炉体状态，当检测到炉衬侵蚀超标或炉内压力异常时，自动触发紧急停机程序，避免重大安全事故。

### 3 自动化控制技术在转炉炼钢中的具体应用

#### 3.1 检测技术

##### 3.1.1 炉气定碳法

炉气定碳法是转炉炼钢中基于炉气成分分析的动态碳控技术。其原理是通过连续监测转炉炉口排出的废气中CO、CO<sub>2</sub>的浓度变化，结合碳氧反应热力学平衡模型，间接推算熔池内的碳含量。冶炼过程中，随着碳含量降低，CO生成量减少、CO<sub>2</sub>比例上升，系统通过实时捕捉这一变化趋势，动态修正碳含量预测值。该技术优势在于无需中断冶炼流程即可实现连续检测，减少了人工取样频次与等待时间，尤其适用于中高碳钢种的冶炼控制。然而，其精度受炉气流量波动、炉口密封性及烟气净化系统影响较大，需结合炉气流量计、压力传感器等辅助设备进行数据校正。目前，通过引入多变量补偿算法与机器学习模型，炉气定碳的误差已从早期的±0.03%缩小至±0.015%以内，成为副枪检测的重要补充手段，为转炉动态控制提供了低成本、高时效的碳含量数据支持。

##### 3.1.2 副枪检测技术

副枪检测技术是转炉炼钢终点控制的核心手段，通过一次性探头直接插入熔池获取关键参数。其探头集成热电偶、取样器及氧电池，可在3-5秒内同步测量钢水温度、碳含量及氧活度，检测精度达温度±5℃、碳含量±0.007%、氧活度±10ppm。操作时，副枪在冶炼末期（吹炼结束前2-3分钟）快速下降至熔池，探头与高温钢水接触后瞬间熔化，数据通过无线传输至控制系统，结合静态模型与动态补偿算法，实时修正氧枪枪位、供氧流量及冷却剂添加量，将终点碳温双命中率提升至95%以上。此外，副枪还可采集钢样用于成分复验，避免因探头故障导致的控制偏差。近年来，随着探头材料与信号处理技术的升级，副枪检测周期缩短至90秒以内，且支持多次插入连续监测，进一步增强了转炉对高合金钢、低碳钢等复杂钢种的生产适应性，成为现代转炉自动化控制的“眼睛”与“标尺”<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 供氧控制

供氧控制是转炉炼钢自动化控制的核心环节，直接

影响冶炼效率、钢水质量及能耗水平。其核心是通过动态调节氧枪枪位、供氧流量与压力，精准控制碳氧反应速率，实现熔池温度与成分的协同优化。自动化供氧系统集成流量计、压力传感器及氧枪定位装置，实时采集供氧参数并与模型计算值对比，结合副枪检测或炉气定碳反馈的碳含量数据，通过PID控制算法或专家系统自动调整氧枪高度（通常控制在1.2-3.5米范围）与供氧强度（每分钟数百至数千立方米）。例如，在冶炼初期，采用高枪位低氧压促进早期脱磷；中期降低枪位、增大氧压以加速碳氧化；末期根据终点目标动态微调，避免过氧化或碳含量偏高。此外，智能供氧模型还融入铁水成分、废钢比例及冷却剂用量等变量，实现全流程供氧策略的动态优化。

#### 3.3 原料控制

原料控制是转炉炼钢自动化控制中保障生产稳定与成本优化的关键环节。其核心是通过精准计量、智能配比与动态调整，实现铁水、废钢、合金及辅料的高效利用。自动化原料系统集成电子秤、皮带秤及激光测厚仪等设备，实时采集原料重量、成分及粒度数据，结合生产计划与钢种目标成分，通过数学模型自动计算各类原料的最优配比。例如，根据铁水硅含量动态调整石灰加入量，避免炉渣过黏或过稀；依据废钢价格波动与铁水成本，智能优化废钢与铁水的比例，在保证熔池热平衡的前提下降低铁水消耗3%-5%。此外，系统还具备异常预警功能，当原料成分超标（如硫、磷含量过高）或设备故障（如称重误差过大）时，自动触发报警并切换备用方案，确保冶炼过程连续性。

#### 3.4 出钢控制

##### 3.4.1 自动出钢技术

自动出钢技术通过集成机械控制、传感器监测与智能算法，实现转炉出钢过程的精准化与无人化操作。其核心系统包括炉体倾动装置、钢包定位机构、液位检测传感器及PLC控制系统。出钢时，系统根据预设角度（通常120°-150°）自动控制炉体倾动速度，结合激光测距仪或红外摄像头实时监测钢包内钢水液位，当液位接近安全上限时，自动触发减速并精准停位，避免钢水溢出或残钢过多。同时，氩气搅拌系统与出钢口挡渣装置协同工作，通过调节氩气流量形成钢包内环流，促进夹杂物上浮，并利用挡渣塞或气动挡渣机阻挡炉渣进入钢包，将下渣量控制在≤5kg/t钢以内。该技术使出钢时间缩短至3-5分钟，钢水收得率提升2%-3%，且减少了人工操作的安全风险，成为现代转炉高效、洁净生产的重要支撑。

### 3.4.2 多料种精准均匀投料技术

多料种精准均匀投料技术通过自动化设备与智能算法的协同，实现合金、脱氧剂及造渣材料等多类原料的精确投放与均匀混合。系统采用振动给料机、旋转盘式喂料器或气力输送装置，结合高精度电子秤与激光粒度分析仪，对每种原料的流量、粒度及成分进行实时监测与动态调整。例如，在脱氧合金化阶段，系统根据钢水氧含量、温度及目标成分，自动计算硅铁、铝锰铁等合金的加入量与加入顺序，并通过多通道喂料器实现同步投放，确保合金快速熔化并均匀分布于钢水中，减少成分偏析。此外，智能模型还融入历史数据与专家经验，优化投料策略以应对原料波动，使钢水成分命中率提升至98%以上，同时降低合金消耗2%-5%，显著提升产品质量与经济效益。

## 4 自动化控制技术在转炉炼钢中的未来发展趋势

### 4.1 智能化发展

未来转炉炼钢的智能化发展将深度融合人工智能、数字孪生与边缘计算技术，构建全流程自主决策系统。例如，宝武集团已在其智能炼钢项目中应用AI算法动态优化吹氧强度与合金配比，使终点碳温双命中率提升至98%，吨钢能耗降低5%。数字孪生技术通过虚拟仿真实现转炉运行状态的实时映射，结合机器学习模型预测炉衬侵蚀、氧枪寿命等关键参数，提前触发维护预警，减少非计划停机时间。此外，智能视觉系统可实时监测炉口火焰形态与烟气成分，结合深度学习算法快速识别异常工况，如喷溅、返干等，实现闭环控制。智能化还将推动操作模式变革，从“经验驱动”转向“数据驱动”，例如通过强化学习训练智能体自主调整供氧曲线，使冶炼周期缩短至28分钟以内，人工干预率低于10%。

### 4.2 绿色化发展

绿色化发展将聚焦低碳冶金技术与资源循环利用的深度整合。氢基直接还原铁（DRI）与电炉短流程工艺的融合将成为主流，例如河钢集团张宣科技采用“氢基竖炉+电炉”工艺，吨钢碳排放较传统长流程降低70%，且已实现电炉配加DRI冶炼“绿钢”的规模化生产。转炉环节将广泛应用富氧底吹技术，通过提高氧气利用率降低铁水消耗，结合烟气余热回收系统，使吨钢能耗降

至530kgce以下。此外，废钢-铁水双联冶炼技术将进一步普及，利用废钢预热与电弧炉能量互补，实现“一炉两用”，减少铁前工序碳排放。在污染控制方面，转炉一次烟气超低排放技术将普及，颗粒物、二氧化硫排放浓度分别降至 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $15\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，同时开发钢渣梯级利用技术，将转炉渣用于道路材料、水泥掺合料等领域，实现固废零排放。

### 4.3 与工业互联网深度融合

工业互联网平台将成为转炉炼钢的核心基础设施，通过设备联网、数据中台与行业云服务，实现全产业链协同优化。例如，中冶赛迪开发的“工业互联网+转炉炼钢”平台，已连接全国超200座转炉，实时采集温度、压力、成分等2000余个参数，结合大数据分析构建区域性能耗基准模型，指导企业优化生产计划。平台还集成供应链管理系统，根据铁水成分、废钢价格与能耗数据，动态调整原料配比，使吨钢原料成本降低8%。此外，工业互联网将推动远程运维服务普及，通过AR眼镜与专家系统实现跨地域设备诊断，故障响应时间缩短至30分钟以内。在安全领域，基于5G的实时定位与行为识别技术可监测人员操作规范，结合AI风险预警模型，将安全事故率降低60%以上<sup>[3]</sup>。

### 结束语

在新时期冶金行业转型升级的关键阶段，转炉炼钢自动化控制技术已成为推动产业高质量发展的核心引擎。从智能检测与动态供氧的精准调控，到原料配比与出钢控制的无人化操作，技术迭代正持续突破传统生产边界。未来，随着人工智能、工业互联网与绿色低碳技术的深度融合，转炉炼钢将迈向“智慧、低碳、高效”的新阶段，实现能耗降低15%、碳排放强度下降20%的可持续发展目标。

### 参考文献

- [1] 贺旭杨,李超.转炉炼钢过程中渣-钢反应机理及成分调控技术研究[J].新疆钢铁,2024(4):17-19.
- [2] 孙岩,王瑞华,王金河.炼钢转炉中的底吹控制技术分析[J].集成电路应用,2024,41(1):236-237.
- [3] 蔡伟,吴巍,杨利彬,等.转炉炼钢自动控制技术发展及展望[J].中国冶金,2024,34(4):10-23.