

冶金仪器仪表量值溯源体系的构建与完善

郭伟 魏铁龙 姜新军

河南金数智能科技股份有限公司 河南 安阳 455004

摘要:量值溯源作为冶金工业测量数据准确性与可靠性的核心保障机制,直接决定产品质量管控精度、生产流程安全稳定性及行业标准化发展水平。本文结合 T/BAS 015-2024《选冶生产检测监测计量保障技术指南》核心要求与国内大型冶金企业实践案例,系统阐述冶金仪器仪表量值溯源体系的构建原则、三级框架结构及关键技术支撑体系,深入分析当前体系运行中存在的标准规范缺失、极端环境技术瓶颈、管理机制薄弱等问题,提出涵盖标准化建设、核心技术突破、数字化转型、人才培养的多维完善路径。研究成果可为冶金企业提升计量保障能力、降低生产风险、实现高质量发展提供理论依据与实践参考。

关键词:冶金仪器仪表;量值溯源;体系构建

1 引言

冶金工业作为国民经济的基础性重工业领域,其生产流程涵盖炼铁、炼钢、有色金属冶炼等关键环节,全程面临高温(1500℃以上熔融态金属处理)、高压(高炉炉内压力达0.2-0.3MPa)、强腐蚀(酸碱电解液环境)等极端工况。在此背景下,温度、压力、成分、流量等关键工艺参数的测量精度直接影响冶炼效率(如高炉煤气利用率提升1%可降低焦比15kg/t)、产品质量(如不锈钢成分偏差0.1%即导致性能不达标)及生产安全(如氧含量超标可能引发爆炸事故)。仪器仪表作为参数采集的核心载体,其量值准确性依赖于科学完善的量值溯源体系。

量值溯源依据 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》定义,是指“通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果或测量标准的值能够与规定的参考标准(通常是国家计量基准或国际计量基准)联系起来的特性”。在国际计量体系中,量值溯源是实现测量结果全球互认的基础,我国《计量法》亦明确要求“属于强制检定范围的计量器具,未按照规定申请检定或者检定不合格的,不得使用”。

当前,我国冶金行业正处于从“规模扩张”向“质量效益”转型的关键阶段,《计量促进仪器仪表产业高质量发展的指导意见》(2023年)明确提出“到2025年,建成覆盖重点领域的产业量值传递溯源体系,解决复杂工况下量值准确测量难题”。然而,调研数据显示,国内30%以上的中小型冶金企业存在溯源链条断裂问题,25%的检测数据因缺乏有效溯源支撑而无法作为质量判定依据,由此引发的产品召回、贸易纠纷年均造成经济损失超50亿元。例如,某中小型不锈钢企业因成

分分析仪未及时溯源,导致批次产品铬含量偏低0.3%,不符合 GB/T 3280-2023《不锈钢冷轧钢板和钢带》要求,最终产品召回损失达280万元。因此,系统构建并持续完善冶金仪器仪表量值溯源体系,已成为推动行业高质量发展的迫切需求。

2 冶金仪器仪表量值溯源体系的构建基础

2.1 核心构建原则

2.1.1 基准统一原则

所有测量结果必须可追溯至国家计量基准或国际标准,确保不同企业、不同设备、不同批次间的数据可比性。例如,在金属钼中氧含量检测中,需采用重铬酸钾(GBW06105)基准试剂配制标准溶液,通过氧化还原滴定法校准检测仪器,使测量结果符合 GB/T 3461-2016《钼及钼合金化学分析方法 氧含量的测定 脉冲加热惰气熔融-红外吸收法》要求,不确定度控制在 $\pm 0.005\%$ 以内。对于跨企业数据比对场景,如钢铁企业间的钢材力学性能检测,需通过国家钢铁材料测试中心的标准样品(如 GBW01406 低合金钢标准样品)进行量值统一,避免因基准差异导致的数据偏差。某钢铁集团在跨厂区质量比对中,通过统一溯源基准,将数据偏差率从4.2%降至0.8%,显著提升了产品质量一致性。

2.1.2 全生命周期原则

覆盖仪器仪表从选型、验收、使用、校准、维护至报废的全生命周期,建立“采购-核查-维护-溯源”闭环管理机制。在选型阶段,需依据 GB/T 26816-2011《工业自动化仪表 选型设计规范》明确溯源要求,优先选择具备国家计量器具型式批准证书(CPA)的设备,如某铜冶炼企业采购的在线离子色谱仪,因具备 CPA 证书,后续溯源流程简化30%;验收阶段需通过标准物质

验证仪器计量性能,如对在线红外成分分析仪,需测试其对 GBW01401a 碳钢标准样品(碳含量 0.10%、硫含量 0.015%)的分析误差,确保碳分析误差 $\leq 0.005\%$ 、硫分析误差 $\leq 0.001\%$ 方可验收;报废阶段需销毁或封存仪器校准记录,避免无效数据流入生产系统。某大型钢铁企业通过实施全生命周期管理,将仪器故障率从 8% 降至 3%,年校准成本降低 15%,减少因仪器故障导致的停产损失超千万元。

2.1.3 适配性原则

结合冶金工艺特性设计差异化溯源路径,针对特殊仪器制定专项校准方案。对于高温环境使用的仪器(如高炉热风炉温度传感器,工作温度 1200-1400℃),需采用高温黑体炉(如 FLUKE 9175)进行现场校准,校准周期缩短至 2 个月,相较于常规 6 个月周期,有效避免了高温导致的传感器漂移问题;对于强腐蚀环境下的在线 pH 计(如铜电解槽 pH 监测仪),需选用耐酸材质的标准缓冲溶液(如 pH = 4.00、6.86 的邻苯二甲酸氢钾、混合磷酸盐标准溶液),并增加校准频次至每月 1 次,某电解铜企业通过该方案,将 pH 测量偏差从 $\pm 0.2\text{pH}$ 降至 $\pm 0.05\text{pH}$,提升了电解效率;对于无法拆卸的大型设备(如连铸机辊缝测量仪),采用激光跟踪仪(如 Leica AT960)进行非接触式比对校准,单次校准时间从传统拆卸校准的 8 小时缩短至 2 小时,减少停机损失。

2.1.4 风险防控原则

提前识别设备老化、环境干扰、人员操作等风险点,制定应急预案。通过建立内部标准物质库,实现仪器日常性能核查,如某有色金属企业储备了铜、铅、锌等 20 种金属标准样品,每日对原子吸收分光光度计进行核查,当发现吸光度偏差超过 5% 时,立即启动校准流程,避免不合格数据产出;针对电网波动风险,为关键校准设备(如标准信号发生器、压力校准仪)配备 UPS 电源,确保校准过程中电压稳定在 $220\text{V}\pm 5\%$ 范围内,某钢铁企业曾因电网波动导致校准数据异常,后续配备 UPS 后,此类问题发生率降至 0;建立风险分级机制,将影响产品质量的关键仪器(如炼钢转炉氧枪流量仪)列为一级风险设备,实施双人巡检、每周核查制度,某转炉车间通过该制度,及时发现 1 次氧枪流量仪漂移问题,避免了钢水过氧化事故。

2.2 体系框架设计

参考 T/BAS 015-2024 标准框架,结合冶金行业特点,量值溯源体系分为三个层级,各层级间通过校准链条紧密衔接,确保量值传递的准确性与连续性。

2.2.1 基准层

以国家计量院(NIM)发布的计量基准为核心,涵盖冶金行业常用的 12 类计量参数,是整个溯源体系的权威源头。具体包括:

温度基准:如 ITS-90 国际温标下的高温固定点(铜凝固点 1084.62℃、银凝固点 961.78℃、金凝固点 1064.18℃),可满足冶金高温测量仪器的溯源需求;

化学量基准:如钢铁、有色金属成分分析用基准物质(GBW 系列),如 GBW01401a 碳钢基准物质、GBW01426 合金添加剂基准物质,其不确定度通常小于 $\pm 0.001\%$;

力学量基准:如压力基准(活塞式压力计,准确度等级 0.005 级)、质量基准(E1 等级标准砝码)、流量基准(钟罩式气体流量标准装置)。

2.2.2 标准层

作为连接基准层与应用层的关键纽带,包括行业专用标准物质、三级计量校准实验室标准及校准规范,为企业仪器溯源提供可操作的技术依据。

标准物质:涵盖冶金生产各环节的标准样品,国内现有冶金类国家一级标准物质 230 余种,二级标准物质 580 余种,如铁矿石成分标准样品(GBW07218)、生铁标准样品(GBW01402)、铝合金标准样品(GBW02025)等,解决了基体匹配性溯源问题。某铁矿选矿厂使用 GBW07218 铁矿石标准样品校准 X 射线荧光光谱仪,使铁含量分析误差从 $\pm 0.3\%$ 降至 $\pm 0.1\%$;

校准实验室:企业需选择具备 CNAS(中国合格评定国家认可委员会)认可资质的校准机构,如矿冶科技集团有限公司计量检测中心、北京市计量检测科学研究院、上海材料研究所等,其校准能力需覆盖冶金专用仪器(如高频红外碳硫分析仪、氧氮氢分析仪)。某镍冶炼企业与矿冶科技集团合作,实现了在线镍含量分析仪的定期溯源,确保产品质量符合国际买家要求;

校准规范:包括国家计量技术规范(JJG 系列)、行业标准(YB/T 系列),如 JJG 694-2010《原子吸收分光光度计检定规程》、JJG 823-2014《高温熔体测温仪检定规程》、YB/T 4500-2017《冶金分析仪器校准规范》,明确了校准方法、周期及判定标准。

2.2.3 应用层

直接面向冶金生产现场,涵盖三类核心设备,需建立完整的设备档案与溯源记录,确保量值可追溯至标准层或基准层。

生产过程仪器:如高炉煤气分析仪(监测 CO、CO₂、O₂ 含量)、转炉氧含量仪、连铸结晶器液位计、轧机压力传感器等,此类仪器需实时在线监测,溯源周期通常

为1-3个月。某高炉车间对煤气分析仪每月校准1次，避免因成分测量偏差导致的热风炉燃烧效率下降；

实验室检测设备：如原子吸收分光光度计、高频红外碳硫分析仪、万能材料试验机、硬度计等，用于产品出厂质量检验，溯源周期为3-6个月。某钢铁企业实验室的万能材料试验机每3个月校准1次，确保钢材屈服强度、抗拉强度测量数据准确；

数据处理系统：包括计量数据采集软件、实验室信息管理系统（LIMS），需定期验证数据传输准确性（如每月1次数据比对），确保溯源信息完整可查。某不锈钢企业通过LIMS系统记录仪器校准数据，实现了从检测到报告的全流程溯源，满足欧盟CE认证要求。

2.3 关键技术支撑

2.3.1 标准物质研制技术

针对冶金行业基体复杂、成分多样的特点，开发基体匹配的标准样品，解决“基体效应”导致的溯源偏差，是确保量值准确的核心技术之一。采用“高纯原料制备-均匀性检验-稳定性监测-多家实验室联合定值”的制备流程，确保标准样品的量值准确性与可靠性。

在钼金属氧含量标准样品研制中，通过真空电子束熔炼技术控制氧含量在0.005%-0.1%范围内，采用脉冲加热惰气熔融-红外吸收法进行定值，经均匀性检验（随机抽取20个样品，相对标准偏差<2%）与稳定性监测（12个月内量值变化<0.001%），确保标准样品质量。某难熔金属企业使用该标准样品校准氧分析仪，使钼制品氧含量检测误差从 $\pm 0.008\%$ 降至 $\pm 0.003\%$ ；

针对高合金钢多元素同时分析需求，某研究院开发的“高合金钢多元素标准样品”（涵盖碳、硅、锰、磷、硫、铬、镍、钼8种元素），采用电弧炉熔炼结合真空精炼工艺制备，通过电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）、红外吸收法等多种方法联合定值，加标回收率稳定在90%-110%，不确定度<0.005%，已在国内50余家钢铁企业应用，解决了多元素同时溯源难题。

2.3.2 复杂环境校准技术

冶金极端工况（高温、振动、腐蚀、电磁干扰）给仪器校准带来巨大挑战，传统实验室校准方法无法满足现场需求，需开发专项校准技术与设备。

高温在线校准技术：采用光纤传感技术研制高温校准探头，探头材质选用耐高温石英玻璃，可在800-1600℃环境下长期工作，通过与高温黑体炉（温度准确度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）的量值比对，实现温度实时校准，不确定度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。宝武集团宝山钢铁股份有限公司在高炉温度监测中应用该技术，将温度测量偏差从 $\pm 5^\circ\text{C}$ 降至 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，提升了高炉热平衡控制精度；

结束语

冶金仪器仪表量值溯源体系的构建与完善，是冶金工业从“规模驱动”转向“质量驱动”的核心技术保障，更是实现测量数据全球互认、提升行业核心竞争力的关键路径。本文立足冶金极端工况特性，提出的“基准统一、全生命周期、适配性、风险防控”四大构建原则，为体系搭建提供了逻辑框架；而基准层-标准层-应用层的三级架构设计，结合标准物质研制、复杂环境校准、区块链数据溯源等关键技术，形成了“理论-框架-技术”的完整支撑体系。

参考文献

- [1]国家市场监督管理总局. 计量促进仪器仪表产业高质量发展的指导意见 [Z]. 2023.
- [2]北京标准化协会. T/BAS 015-2024 选冶生产检测监测计量保障技术指南 [S]. 2024.
- [3]郭少毅, 姚素红. 金属钼中氧元素标准样品量值溯源探究 [J]. 冶金计量, 2024, 38 (2):15-20.
- [4]王姝, 沈上圪. 选冶计量器具全生命周期溯源管理 [J]. 矿冶工程, 2024, 44 (3):142-146.
- [5]GB/T 43866-2024, 企业能源计量器具配备率检查方法 [S]. 2024.