

# 铜冶炼转炉吹炼终点判断方法研究进展

沈 昆 张兆闫 徐洪傲 余 彬 李江平  
(楚雄滇中有色金属有限责任公司, 云南 楚雄 675000)

**[摘 要]** 铜转炉吹炼是铜冶炼流程中将铜铕吹炼成粗铜的过程,吹炼过程分为造铜期和造渣期,各阶段的判断基准和方法不同,粗铜的质量与终点判断的精确度相关,特别是当前原料成分越来越复杂,吹炼终点的判断和控制难度大幅增加。本文结合当前国内外铜冶炼转炉吹炼终点判断方法研究现状,阐述了人工经验法、仪器测定法、物料平衡法、神经网络法4类吹炼终点判断方法的研究进展,展望了铜冶炼吹炼终点判断方法发展方向。随着检测仪器的开发、吹炼送风和物料计量精度的提高,以及转炉吹炼自动程度提升以及人工智能的发展,铜转炉吹炼终点控制向着自动精确判断和智能控制方向发展。

**[关键词]** 吹炼终点;判断方法;人工经验法;物料平衡法;神经网络法;自动控制;智能控制

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0034-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.005

## 0 前言

金属铜作为国民经济与国防建设中的重要金属,被广泛应用于电器工业、国防工业、通讯光缆、机械制造、交通运输等领域<sup>[1]</sup>。当前,全球范围内80%以上的铜采用火法炼铜工艺生产<sup>[2]</sup>,而P-S转炉(简称“转炉”)吹炼作为火法炼铜过程中的重要环节,主要包括造渣期和造铜期两大阶段。由于原料中杂质元素和成分越来越复杂,含量越来越高,熔炼产出的铜铕成分也越来越复杂,导致造渣期和造铜期控制条件复杂多变,增大了准确判断造渣期和造铜期的吹炼终点的难度。

为精确判断转炉吹炼造渣期和造铜期的吹炼终点,确保粗铜产品质量,国内外研究学者和生产技术人员做了大量的研究,形成了传统方法(人工经验

法)、仪器测定法、物料平衡法、神经网络法等多种判断造渣期和造铜期终点的方法。本文全面总结了人工经验法、仪器测定法、物料平衡法、神经网络法4类吹炼终点判断方法的应用研究进展,并展望了火法炼铜吹炼终点智能判断方法的发展方向,为火法炼铜企业吹炼终点智能判断提供参考。

## 1 传统方法(人工经验法)

传统方法即人工经验法是国内外大多数铜冶炼企业转炉吹炼采用的终点判断方法,转炉操作人员通过长期经验总结,观察转炉吹炼过程中造渣期和造铜期炉口火焰、喷溅物、炉后钎样粘物、炉内熔体等物体特征,判断转炉内反应情况,进而判断转炉是否达到吹炼终点<sup>[3]</sup>。

接近造渣期终点时,随着炉内温度升高,炉口火焰颜色从黄色转为乳白色;喷溅物呈絮状,漂浮无力、发亮,凝固时呈空心粒状;此时,熔体中的FeS逐渐被氧化为FeO,与加入的石英溶剂反应造渣,生成铁橄榄石( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ),使铕中铜含量逐渐升高,因此炉后钎样粘物的颜色会呈现灰白色-青灰色-油黑色的变化,并且粘物纹理由粗糙变为平滑且带有光泽;炉内熔体出现明显分层,渣和铜之间的界面十分清晰<sup>[4]</sup>。

接近造铜期终点时,由于铜铕中 $\text{Cu}_2\text{S}$ 逐渐氧化生成 $\text{Cu}_2\text{O}$ 和 $\text{SO}_2$ , $\text{Cu}_2\text{O}$ 又与未反应的 $\text{Cu}_2\text{S}$ 反应生成金属Cu和 $\text{SO}_2$ ,直到生成的粗铜中Cu含量大于98.5%时造铜期结束。因此,炉口火焰颜色会发生

**[收稿日期]** 2024-03-29

**[作者简介]** 沈昆(1988—),男,云南楚雄人,本科,工程师,研究方向:铜冶炼自动化技术管理。

**[通信作者]** 张兆闫(1996—),男,云南保山人,硕士,研究方向:铜冶炼技术及过程管理。

**[引用格式]** 沈昆,张兆闫,徐洪傲,等.铜冶炼转炉吹炼终点判断方法研究进展[J].绿色矿冶,2024,40(5):34-38.

SHEN Kun, ZHANG Zhaoyan, XU Hongao, et al. Recent advances in the judgment method of copper smelting blowing end-point[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 34-38.

灰白色-棕红色-橘红色的变化;喷溅物会从点滴状变为爆裂状,再转为球状,并产生“眨眼”现象;炉后钎样粘结物会发生金黄色-黑褐色-橘红色-玫瑰红色的变化,粘结物表面由粗糙变为光滑,并带有小泡;炉内熔体取样冷却后,会呈现亮丽的玫瑰红色<sup>[5]</sup>。

由于传统方法基本上是转炉操作人员根据个人经验进行判断,具有很大的局限性,容易导致吹炼过程发生喷炉、过吹、欠吹等操作事故,进而给下游阳极板的生产带来不利影响。个体经验差异导致判断标准不一,已跟不上社会的发展需求,如何将人工经验法与智能化结合起来,提高终点判断的时效性,是未来铜冶炼行业转炉吹炼终点判断的必然趋势。对于如何将冶炼过程的现象特征与智能分析方法结合起来,在钢铁行业已经有很深入的研究<sup>[6-8]</sup>。通过对转炉炼钢过程中炉口火焰图像特征、火焰光谱信息等进行智能分析,建立吹炼终点的预测模型,既能满足炼钢的生产要求,又能提高转炉炼钢终点的判断精度。未来,随着智能化和自动化程度的不断提高,可以预见人工经验法终将会被淘汰,因此,可借鉴人工经验法与智能分析方法在钢铁企业的研究应用成果,将铜冶炼转炉吹炼终点的人工判断法与智能化方法结合起来,通过先进科技手段分析吹炼过程中的现象,掌握其中的原理,从而进一步提高吹炼终点的判断精度与效率。

## 2 仪器测定法

仪器测定法即利用烟气取样器、烟气预处理装置、烟气分析仪等现代分析检测仪器,实时检测转炉吹炼过程中的高温烟气成分,进而判断转炉吹炼终点。基于转炉吹炼过程中造渣期和造铜期烟气中 $\text{SO}_2$ 浓度变化的规律,许多科研工作者做了大量的研究工作。刘高鹏等<sup>[9]</sup>采用 $\text{SO}_2$ 分析系统,对转炉排出的 $\text{SO}_2$ 质量分数进行实时监测分析,判断吹炼终点,并且采用一种双泵联用的方法消除负压堵转,从而减少终点判断分析系统的滞后时间,提高终点判断的精准度,但是该过程操作复杂并且检测结果滞后,不能满足冶炼过程的要求,没有被冶炼厂采纳。

马云清<sup>[10]</sup>的研究发现,当到达造渣终点时, $\text{PbO}$ 、 $\text{PbS}$ 光谱强度变化曲线会发生交点(图1),此时高温烟气中的 $\text{PbS}$ 含量会降低, $\text{PbO}$ 含量则逐渐升高;而在造铜期阶段,烟气中的 $\text{SO}_2$ 浓度会随着造

铜反应的进行逐渐降低直至接近零(图2)。这种方法的原理是基于 $\text{PbO}$ 、 $\text{PbS}$ 在转炉吹炼各阶段的挥发特性以及光谱的敏感性。

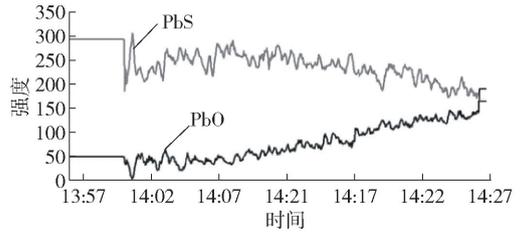


图1 造渣期 $\text{PbO}$ 、 $\text{PbS}$ 变化曲线

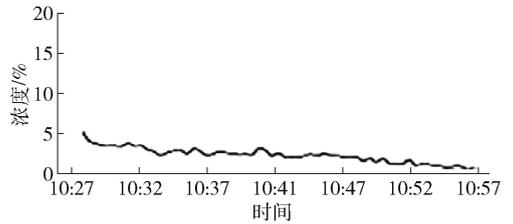


图2 造铜期 $\text{SO}_2$ 浓度变化曲线

范进军<sup>[11]</sup>、纪利华<sup>[12]</sup>等利用烟气中 $\text{PbO}$ 和 $\text{PbS}$ 的发射强度差异,通过发射光谱检测技术在线连续检测 $\text{PbO}$ 和 $\text{PbS}$ 光谱强度的相对变化,开发出铜终点在线检测系统(图3),实现了对造渣期终点的判断;同时,采用 $\text{SO}_2$ 浓度在线分析仪实时检测烟气中的 $\text{SO}_2$ 浓度变化情况(图4),根据检测到的 $\text{SO}_2$ 浓度变化来确定造铜期终点,工业现场运行实践显示该系统预报的全程吹炼终点与实际经验操作终点平均误差为 $\pm 8$  min,实现了铜转炉吹炼过程智能自动控制。此外,还有学者通过监测吹炼过程中锅炉入口烟气温度的变化情况来判断吹炼终点。接近造铜终点时,烟气温度会明显下降;当温度降低至 $60^\circ\text{C}$ 左右时,达到较高质量粗铜——火山铜的生产要求<sup>[13]</sup>。

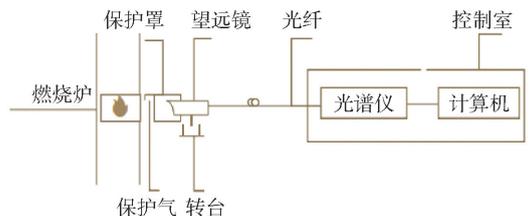


图3  $\text{PbO}$ 、 $\text{PbS}$ 在线检测系统<sup>[11]</sup>

相比较于人工经验法,仪器测定法具有简洁有效、自动化程度高、判断精度高等优点,但存在仪器价格昂贵、易损坏,受冰铜带入的铅含量影响大,炉内信息采集不准确,判断存在一定误差等缺点。

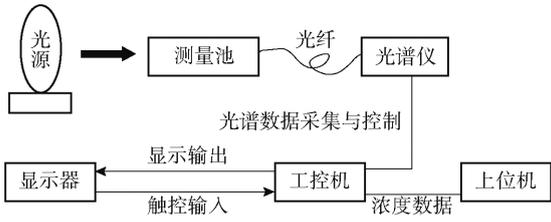


图4 SO<sub>2</sub>浓度在线分析仪<sup>[12]</sup>

### 3 物料平衡法

物料平衡法是基于冶炼过程物料平衡计算和热平衡计算,将计算机数学建模与仿真手段结合起来,通过构建模型来判断转炉吹炼终点的方法。随着计算机技术的快速发展,该方法逐渐成为研究热点之一。贺慧敏等<sup>[14]</sup>基于物料守恒定理,研究了造渣过程中各组分质量和能量分项的变化规律,指出冰铜品位对造渣期影响最大,富氧率的影响最小,并建立了转炉铜钨吹炼造渣期冷量的动态计算模型,对优化冷料添加进而实现节能降耗具有指导意义。蒋涛等<sup>[15]</sup>研究了铜液温度及其纯度与氧探头电动势之间的关系,通过 Nernst 方程得出氧含量的变化趋势,从而判断铜转炉吹炼的终点,用非平衡态数据进行平衡态热力学计算虽然不够准确,但是可以直观地看出铜氧体系中氧含量变化的趋势,为冰铜吹炼终点判断提供理论参考。黄慧娟等<sup>[16]</sup>提出了一种转炉造渣期吹炼终点控制 DMC 模型(图5),根据转炉吹炼总风量,以铜钨品位、冷料量等参数作为输入,以造渣期和造铜期所需风量为输出,再由平均送风量计算吹炼时间从而判断吹炼终点,与实际吹炼终点比较,判断准确率在 73% 以上,系统具有较高的准确度。李林山等<sup>[17]</sup>依据质量平衡、热平衡和元素平衡搭建转炉吹炼过程数学模型,通过控制冷料添加量和添加时机来判断吹炼终点,该模型可将判

断误差控制在 5% 以内,极大提高了铜钨吹炼终点仿真模型的判断精度。

另外,还有学者在物料、能量守恒的基础上,通过建立热力学、动力学模型来预报转炉吹炼终点。Goto<sup>[18]</sup>在 1974 年就曾提出了一个用于多相系统平衡计算的热力学模型以实现终点预测,但该模型却存在预报终点值比实际值偏大的问题,导致与实际生产差距较大。Harjunkoski 等<sup>[19]</sup>建立了转炉吹炼过程的热力学模型来预测吹炼终点,但由于转炉生产操作指标具有间歇性和随机性的特点,该模型实际应用中测量难度大。王雅琳等<sup>[20]</sup>建立了一个反映转炉吹炼过程的非线性动力学模型,并对现场生产数据进行仿真实验,实验结果表明所建立的动力学模型能很好地反映造渣期吹炼过程的终点状态。基于物料平衡方程构建起来的转炉吹炼终点预测模型,为铜转炉吹炼终点的智能判断提供了新的判断方法,但由于转炉吹炼过程复杂多变,信息获取具有滞后性和随机性,实际生产与理论研究相差较大,再加上模型参数计算困难,工作量大,该方法目前很少在转炉吹炼终点的智能判断中得到应用。

### 4 神经网络法

随着人工智能的飞速发展,基于人工神经网络、遗传算法等算法的智能技术在铜冶炼转炉吹炼终点智能判断中的应用也受到国内外众多学者的广泛关注<sup>[21-22]</sup>。人工神经网络、遗传算法是通过数学模型与人脑思维的方式对生产数据进行分析处理,进而实现铜转炉吹炼终点的智能判断。徐翔等<sup>[23]</sup>基于广义回归神经网络(GRNN),采用机器学习对转炉吹炼过程的火焰图像进行分析,构建了铜转炉吹炼终点预报模型(图6)。该模型不仅大幅减少了数学计算和系统误差,还极大提

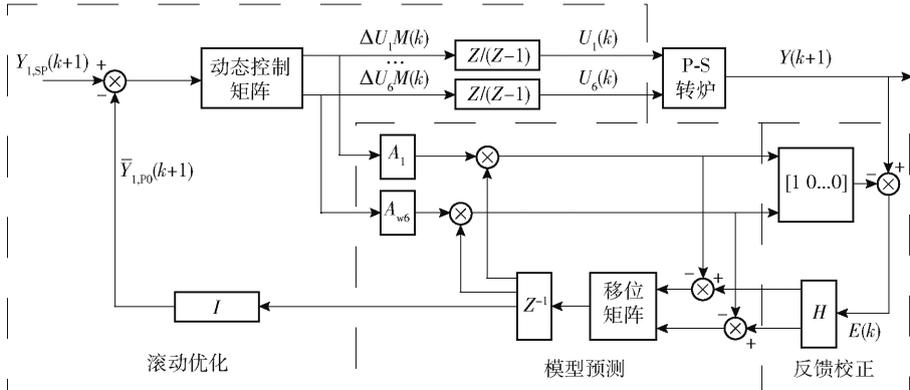


图5 PS 转炉造渣期吹炼终点控制 DMC 模型<sup>[16]</sup>

高了终点预测的准确性,其预测精度可达97.33%,为转炉终点判断提供一种新途径。胡金宝等<sup>[24]</sup>以温度补偿、负压压力、送风流量、富氧量、送风压力作为动态补偿,利用转炉吹炼终点烟气中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 浓度的对应关系来判断吹炼终点,并采用Elman递归神经网络模型中的BP神经网络模型来实现过程自调整、自学习(图7),造铜期终点判断准确率达到了98%以上。高帅等<sup>[25]</sup>基于深度卷积神经网络(DCNN),开展了时间终点、铜熔池火焰数字化特征、 $\text{SO}_2$ 浓度和烟气温度耦合的多任务模型仿真,实际生产验证结果表明该模型造渣期平均预测误差为2.31%,造铜期平均预测误差为1.97%,终点预测命中率显著提高,达到97.33%。孙鑫红等<sup>[26]</sup>分析了影响冰铜吹炼终点,提出采用主元分析与Elman神经网络相结合的方法对铜转炉吹炼终点进行预报,并采用遗传算法搜索神经网络的连接权值、网络结构或学习规则,实验结果表明其建立的模型有较高的预测精度,在铜转炉吹炼的终点预报方面具有良好的应用前景。基于人工神经网络算法构建的铜转炉吹炼终点预测模型,大幅提高了终点判断的准确率,但转炉吹炼属于非稳态复杂过程,影响因素多且交互耦合、吹炼条件复杂多变,所建立的模型通常复杂程度高、训练学习时间长和收敛难度大,具有很大的挑战性。

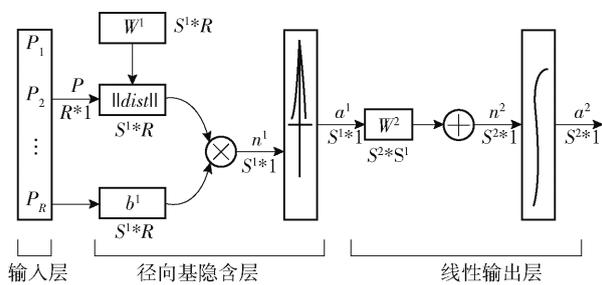


图6 广义回归神经网络结构图 (GRNN) <sup>[23]</sup>

## 5 结论和展望

通过对传统方法、仪器测定法、物料平衡法、神经网络法4种铜冶炼转炉吹炼终点判断方法的分析,可以得到以下结论。

1) 传统的人工经验法目前仍然是一些铜冶炼企业转炉吹炼采用的判断方法,受人员经验等诸多因素的限制,该方法与智能化时代不相匹配。

2) 仪器测定法具有简洁有效、自动化程度高、判断精度高的优点,但存在仪器价格昂贵、易损坏,

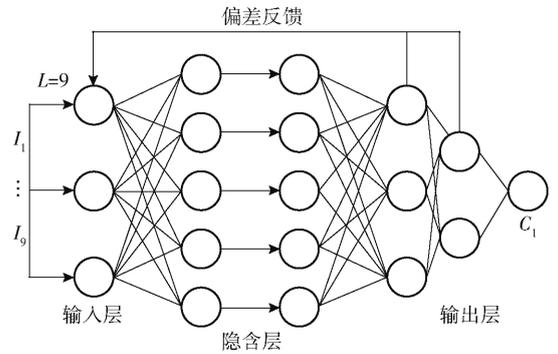


图7 ELman中BP神经网络结构图<sup>[24]</sup>

信息采集不准确等因素的影响,终点判断可能存在一定误差并且滞后。

3) 物料平衡法为铜冶炼转炉吹炼终点智能判断提供了新的判断方法,但由于转炉吹炼过程复杂多变、信息获取具有滞后性和随机性,导致实际生产与理论研究相差较大,再加上模型参数计算困难、工作量大,因此该方法目前在转炉吹炼终点智能判断中应用较少。

4) 神经网络法大幅提高了终点判断的准确率,但转炉吹炼过程属于非稳态复杂过程,受影响因素多且交互耦合、吹炼条件复杂多变,所建立的模型和算法复杂程度高,机器训练和学习时间比较长,遇到变化的条件需要人工干预和修订,具有较高的挑战性。

诸多铜转炉吹炼终点判断方法在国内外已经进行了大量研究,并取得了良好的效果。未来铜转炉吹炼终点判断发展方向应该是上述几种方法或其他新技术与大数据、算法进行智能融合,化解过程的复杂性,为火法炼铜企业智能化建设发展注入新动力。

## [参考文献]

- [1] 宋彦坡. 数据挖掘技术及其在铜转炉吹炼过程优化中的应用[D]. 长沙:中南大学,2005.
- [2] 董越,李晓霞. 国内铜火法冶炼技术现状及展望[J]. 现代工业经济和信息化,2023,13(5):283-286,289.
- [3] 杨文栋,谢文仕,冯秋艳. 浅析转炉吹炼终点的判断方法[J]. 有色矿冶,2006(6):30-33.
- [4] 胡新海. 表面现象观察法在转炉操作中的应用[J]. 中国有色冶金,2004(6):29-31,3.
- [5] 金泽志,李林山. 转炉铜钨智能数控吹炼技术简介[J]. 世界有色金属,2020(8):18-22.
- [6] 刘帅. 基于火焰图像与光谱特征的转炉炼钢终点温度预测研究[D]. 南京:南京理工大学,2021.
- [7] 张彩军,韩阳,何世宇,等. 炉口火焰光谱驱动的炼钢终点控制[J]. 仪器仪表学报,2018,39(1):24-33.

- [8] ZHANG Yanchao, ZHANG Caijun, ZENG Kai, et al. Research on terminal control model of intelligent mining of flame spectral information of converter mouth in late smelting stage[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2021, 48(6).
- [9] 刘高鹏, 徐子康. 减少转炉终点判断分析系统滞后时间的方法[J]. *有色冶金设计与研究*, 2019, 40(5): 31-33.
- [10] 马云清. 高强度智能闪电速炼铜技术及实践[J]. *铜业工程*, 2017(4): 64-66.
- [11] 范进军, 何建平, 刘奇, 等. 铜终点在线监测系统对转炉吹炼终点判断的应用[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2018(8): 8-11.
- [12] 纪利华. 铜转炉冶炼操作优化及智能控制应用[J]. *铜业工程*, 2018(3): 91-94.
- [13] 朱鹏春, 何恩, 于海波, 等. 铜冶炼转炉工艺集成技术研究与应用[J]. *世界有色金属*, 2021(22): 10-13.
- [14] 贺慧敏, 廖胜明, 刘骁浚, 等. PS转炉吹炼渣期冷量及其影响因素的研究[J]. *冶金能源*, 2014, 33(4): 29-34, 64.
- [15] 蒋涛, 吴秋文, 段晨锋, 等. 根据铜液氧活度判断冰铜吹炼终点[J]. *中国有色冶金*, 2013, 42(6): 52-56.
- [16] 黄惠娟, 李鸣, 刘国平. 先进控制在铜钼吹炼渣期终点判断的应用[J]. *计算机与现代化*, 2008(1): 52-54.
- [17] 李林山, 赵宇娟, 金泽志. 转炉铜钼吹炼终点判断仿真研究[J]. *中国有色冶金*, 2021, 50(6): 22-28.
- [18] GOTO S. Equilibrium calculations between matte, slag and gaseous phases in copper smelting[J]. *Copper Metallurgy-Practice and Theory*, 1974: 23-34.
- [19] HARJUNKOSKI I, BORCHERS H W, FAHL M. Simultaneous scheduling and optimization of a copper plant[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2006, 21(6): 1197-1202.
- [20] 王雅琳, 桂卫华, 阳春华, 等. 基于有限信息的铜吹炼动态过程智能集成建模[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(8): 860-866.
- [21] 彭叶斌. 人工智能在冶金自动化中的应用[J]. *流体测量与控制*, 2023, 4(4): 78-81.
- [22] 高荣, 陈习堂, 徐洪傲, 等. 铜冶炼企业智能化发展概述[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023(6): 138-143.
- [23] 徐翔, 刘大方, 徐建新. 基于GRNN算法的铜转炉吹炼终点预报模型[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(3): 9-17.
- [24] 胡金宝, 余向阳. 铜冶炼转炉在线造铜期终点智能判断[J]. *中国冶金*, 2021, 31(4): 110-117.
- [25] 高帅, 李彪, 李泽西, 等. 基于深度学习的铜转炉终点多任务动态预测模型及应用[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(4): 8-15.
- [26] 孙鑫红, 谢永芳, 桂卫华, 等. 铜转炉吹炼终点预报模型研究[J]. *计算机应用研究*, 2007(11): 60-62.

## Recent Advances in the Judgment Method of Copper Smelting Blowing End-point

SHEN Kun, ZHANG Zhaoyan, XU Hongao, YU Bin, LI Jiangping  
(Chuxiong Dianzhong Nonferrous Metals Co., Ltd., Chuxiong 675000, China)

**Abstract:** Copper matte converter blowing is the process of converting copper matte into crude copper in copper smelting process. The blowing process is divided into copper making period and slag making period. The judgment criteria and methods of each stage are different. The quality of crude copper is related to the accuracy of end-point judgment. Especially with the increasing complexity of raw material composition, the difficulty of judging and controlling the endpoint of blowing is greatly increased. Based on the current research status of end-point judgment methods for copper smelting converter blowing at home and abroad, this paper expounded the research progress of four kinds of blowing end-point judgment methods, such as artificial experience method, instrument measurement method, material balance method and neural network method, and looked forward to the development direction of end-point judgment methods for copper smelting blowing. With the development of detection instruments, the improvement of blowing air supply and material measurement accuracy, coupled with the improvement of converter blowing automation and the development of artificial intelligence, the end point control of copper matte converter blowing is developing towards automatic and accurate judgment and intelligent control.

**Key words:** blowing end-point determination; manual empirical method; instrumental measurement method; material balance method; neural network method; automatic control; intelligent control