

双流体喷雾冷却在铜冶炼阳极炉烟气降温中的应用

汤晓勇¹, 许名熠^{2*}

(1. 北京中大万联科技有限公司, 北京 100085; 2. 湖南安全技术职业学院 防灾与救援学院, 湖南 长沙 410151)

[摘要] 铜冶炼阳极炉产生的烟气温度和烟气量波动较大, 导致热容量变化剧烈, 需要降温才能进入后续的收尘系统。基于此特点, 本文介绍一种双流体压缩空气喷雾冷却技术, 含尘的高温烟气从冷却塔顶部进入, 与充分雾化的液滴顺流接触, 液滴在塔内高温烟气行进过程中被迅速汽化, 显热换为水蒸发潜热, 烟气急冷后从底部经排气口流出。系统配置了自控泵站, 为喷枪提供带有一定压力的水和压缩空气, 根据冷却塔烟气进出口温度、喷水流量、压力等信号, 实时计算与控制, 保证烟气出口温度稳定在设置的目标范围内。经白银有色集团铜冶炼技术提升改造工程阳极炉生产实际验证, 总体布置合理, 工艺流程顺畅, 温度调节范围大, 冷却塔底部无漏水、各种技术指标达到设计要求。

[关键词] 铜冶炼; 喷雾冷却; 高温烟气; 降温; 阳极炉

[中图分类号] TP229 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0048-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.009

0 引言

随着科技的发展, 世界主要发达国家工业已进入智能化 4.0 时代, 作为传统行业的铜冶炼技术也随之不断发展、升级。铜冶炼技术从古至今虽经历了漫长的过程, 但至今仍以火法冶炼为主。近年来, 随着我国各地炼铜厂规模不断扩大, 随之产生的烟气对空气的污染也日益加剧, 给生态环境带来严重困扰, 因此对冶炼烟气的治理和利用具有重要而深远的意义^[1]。旧传统的铜冶炼工艺对烟气的冷却通过水池盘管或自然冷却处理, 此类方法投资大, 冷却温度不确定, 对后续收尘影响较大。

铜的火法精炼阳极炉生产分为加料、氧化、还原、浇铸几个工艺过程, 排出炉口的烟气温度高达 1 100 °C, 且各个周期温度不同、波动较大, 需经冷却

收尘处理后才能达标排放。

1 阳极炉烟气收尘工艺流程

白银铜冶炼技术提升改造工程共有 2 台 450 t 阳极炉, 采用稀氧燃烧, 烟气经过二次燃烧室后进入烟气处理系统。由于阳极炉烟气在氧化期含 SO₂, 其他期不含 SO₂, 因此在氧化期时的烟气送脱硫系统, 非氧化期的烟气则送环境集烟烟囱。

每台阳极炉设置一套冷却收尘系统, 两台阳极炉烟气分别单独送脱硫系统和烟囱。由阳极炉产生的烟气含尘量约 1.5 g/Nm³, 温度 750~850 °C, 经过喷雾冷却器后烟气温度降至 300 °C 左右, 烟气中所带烟尘也有部分沉降下来, 从喷雾冷却器出来的烟气进入板式烟气冷却器, 经板式烟气冷却器再次冷却降温后, 烟气温度由 300 °C 降到 150 °C 以下进入布袋收尘器进行净化, 使烟气含尘浓度降至 20 mg/Nm³ 以下, 然后烟气进入脱硫系统或从烟囱进行排放。工艺流程图如图 1 所示。

2 双流体雾化冷却

采用喷水直接对高温烟气进行冷却, 主要是利用水由液态转为气态时潜热吸收烟气的显热, 而要快速使水滴汽化, 须增大水滴的表面积, 因此对水滴进行充分雾化, 使水滴直径尽可能小。水滴直径与

[收稿日期] 2023-01-15

[第一作者] 汤晓勇(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事烟气治理装备研发工作, 现任北京中大万联科技有限公司技术总监。

[通信作者] 许名熠(1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智能控制及故障诊断关键技术, 特种设备及应急装备安全监控系统, 邮箱: mitch_hsu@hotmail.com。

[引用格式] 汤晓勇, 许名熠. 双流体喷雾冷却在铜冶炼阳极炉烟气降温中的应用[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 48-52.

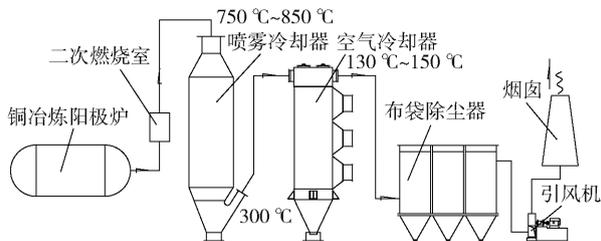


图1 阳极炉烟气收尘工艺流程图

蒸发时间的关系如图2所示,雾滴直径越大,蒸发时间越长。

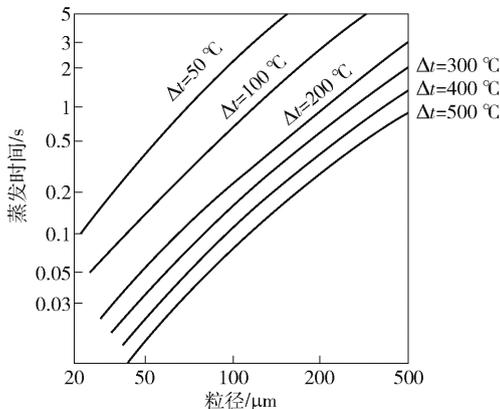


图2 雾滴直径与蒸发时间的关系

液体雾化有高压雾化、压缩空气雾化等方式,高压雾化一般通过减少水流通道,孔径实现对液体的破碎,往往喷嘴通道较小,在水质净化不能得到充分保证的情况下,容易堵塞,导致喷雾功能失效。压缩空气雾化能量的来源为带压的空气,通过强大的空气动力干扰、振荡破碎水流形成雾化,在保证同样雾化效果情况下可以采用大的通道。为保证烟气在冷却塔内冷却降温过程中迅速全部汽化,降低湿壁风险,采用烟气冷却及调质行业可靠、有成熟应用案例的FLOMAX系列双流体压缩空气雾化喷嘴。FLOMAX喷嘴采用多级跨孔喷嘴设计,在与高速空气流混合之前,通过剪切液体从而实现雾化效果,在操作压力较低的情况下,比其他喷嘴能产生更小的液滴,实现严格的液滴尺寸控制。FLOMAX喷嘴使用大流量畅通通道,降低了堵塞风险,可适用较低成本的水源,单只即可产生非常大的喷射流量,流量的调节比高达10:1,在水量因不同工艺要求而产生变化时空气压力仍可保持恒定。

3 阳极炉高温烟气喷雾冷却系统

白银有色铜冶炼技术提升改造工程精炼车间配

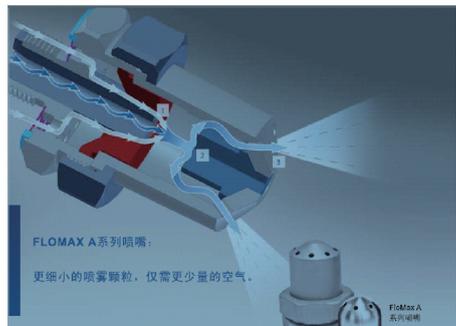


图3 Flomax 喷嘴

置了两台回转式阳极炉,加料、氧化、还原、浇铸循环周期作业,各环节烟气温度和烟气量不同,波动变化较大。因此,对后续烟气冷却收尘系统提出了较高的稳定性要求。

3.1 烟气条件及要求

该项目的烟气条件及要求如下所述。

入口烟气量:最大值为 $13\ 230\ \text{Nm}^3/\text{h}$,最小值为 $7\ 400\ \text{Nm}^3/\text{h}$;

入口温度: $800\ ^\circ\text{C}$ (最大值为 $850\ ^\circ\text{C}$,最小值为 $750\ ^\circ\text{C}$);

出口温度: $\leq 300\ ^\circ\text{C}$;

冷却塔直径: $\Phi 3\ 100\ \text{mm}$,有效高度: $10\ \text{m}$;

入口压力: $-200\ \text{Pa}$ (表压);

烟气成分: $\text{CO}_2\ 5.2\% \sim 19.1\%$, $\text{H}_2\text{O}\ 4.8\% \sim 21.1\%$, $\text{O}_2\ 12.7\% \sim 18.9\%$, $\text{N}_2\ 47\% \sim 74\%$, $\text{SO}_2\ 0 \sim 0.8\%$;

入口烟气含尘: $0.5 \sim 10\ \text{g}/\text{Nm}^3$;

烟尘成份:铜冶炼烟尘($\text{Cu}\ 2.3\% \sim 10.4\%$, $\text{Pb}\ 15.2\% \sim 24\%$, $\text{Zn}\ 25.5\% \sim 29.2\%$, $\text{Sn}\ 12.8\% \sim 20.6\%$);

烟尘密度: $0.5 \sim 2.0\ \text{t}/\text{m}^3$ (堆);

安装地点:室内地面布置;

工作制度: $24\ \text{h}/\text{d}$ 。

3.2 喷雾冷却系统组成

3.2.1 P&ID图

P&ID图也称管道和仪表流程图、系统图,是工程设计中从工艺流程到工程施工设计的重要工序,是设备、机泵、仪表、电气、管路设计的依据。

本项目喷雾冷却系统P&ID图见图4,工艺介质(即阳极炉高温烟气)以 $750 \sim 850\ ^\circ\text{C}$ 的温度从喷雾冷却器顶部入口进入冷却器,与雾化液滴顺流接触,在筒体内降温后,由倾斜排气口排出进入下一级冷

却设备空气冷却器。入口设置一支温度热电偶(0~1 000℃),出口设置三支热电偶(0~600℃)。

为得到充分雾化的雾滴,采用大流量的双流体雾化喷枪(最大液滴直径 $\leq 160\ \mu\text{m}$),喷枪采用压缩空气和水两相流雾化技术,因此需要分两路给喷枪提供压缩空气和水。一路压缩空气通过储气罐、过滤器、调压阀及一些控制阀门送至自控泵站,再经管道送至塔顶环管送至均匀布置的喷枪。一路冷却介质用水通过供水控制阀组送至水箱,水箱设置了高限位、低报警、低限位开关信号,水从水箱出水口进入自控泵站,经离心泵增压输送至喷枪,与压缩空气混合、破碎、雾化从喷嘴喷出,进入冷却器对烟气进行降温。

3.2.2 冷却塔本体

冷却器本体根据设计要求及布置条件,采用立式筒体,来自阳极炉的高温烟气从塔顶管道进入冷却器上部锥体部位,通过锥体部位截面的扩大,高温

烟气流速降低后进入冷却器直筒体段,再向下流动进过天圆地方部件送至灰斗,在灰斗处拐弯,以与水平呈 60° 的倾角排出,进入下一级冷却或其他工序。

锥体部位均匀布置 3 支斯普瑞 Flomax 喷枪,喷嘴垂直水平枪杆朝下,喷出的细小雾滴与高温烟气顺流接触,在与烟气一起由于引风机的抽力而行进过程中充分混合、传热、蒸发、汽化,将烟气中的显热变成水蒸汽潜热,降低烟气的温度。为使 3 支喷枪工作状态一致、均匀,在直筒体顶部圆周设置了环管,以使供给喷枪的水和压缩空气均匀。

筒体直径 $\Phi 3\ 100\ \text{mm}$,直筒体高度 7.2 m,总有效高度 10 m,由于烟气入口处温度 $750\sim 850\ ^\circ\text{C}$,甚至可能更高达 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以上,锥体部位及直筒体靠上半部分采用耐热钢板,内侧采用高铝质捣打料敷设,以免筒体失效。冷却器主体采用 120 mm 厚保温棉保温、隔热。

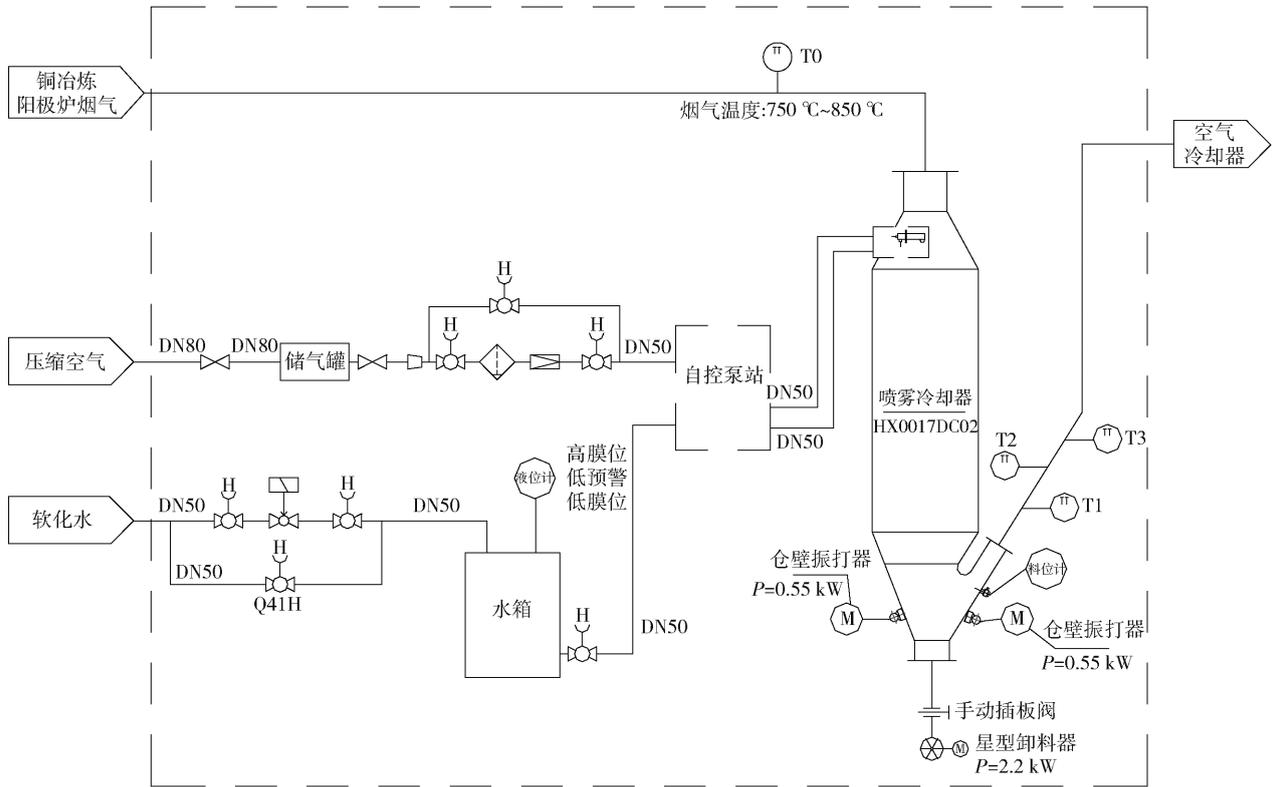


图 4 喷雾冷却系统 P&ID 图

3.2.3 自控泵站

自控泵站是整个阳极炉喷雾冷却系统的驱动和控制中心,在提供了最大入口温度和入口烟气流速等条件下,控制出口温度到一个期望值(本项目控制到 $300\ ^\circ\text{C}$),主要由水路、压缩空气管路、智能控制

系统、支撑箱体、外壳等组成。

水路由箱体后部进入,经过入口阀门后,分成两路管路,在两路管路上均设置过滤精度为 150 目的 Y 型管路过滤器,用于过滤进水,防止堵塞喷嘴,两路管路互为备份回路,过滤器前后均安装有阀门,可

以在线不停机检修。经过两路过滤器后,水路汇合到同一管道,再分两路分别流入两台多级立式离心泵入口,水从两台离心泵出口流出后最后汇合到一条出口管路向外供水,管路出口前配置了电磁流量计用于实时精确计量水流量。两台立式多级离心泵出口均配置有对夹式止回阀,确保泵单独运行时互不干扰。

压缩空气管路由气动球阀根据系统开闭需要进行控制,同时配备了手动旁路,手动旁路目的:一是当气动球阀故障时,不停机能检修;二是打开一个微小开度,使后续管路中不管系统是否停机一直保有一定压缩空气通过,最后能吹扫喷嘴,防止堵塞并起到一定冷却作用。

自控泵站搭载了一套智能控制系统,控制系统采用西门子 S7 系列 PLC 作为控制核心,根据冷却塔进出口的烟气温度信号,管路的流量、压力信号,自动调节水泵频率,流量,从而保证出口的烟气温度在设定的范围内。烟气出口温度是冷却系统的基本参数,出口温度是整个系统自动控制的基本依据。因此,温度检测部分由出口温度检测仪表组成,在喷雾冷却后的出口烟气管道安装三只热电偶。出口温度为控制器提供控制信号,从而实现对系统的自动控制。

自控泵站的技术参数如表 1 所示。

表 1 自控泵站技术参数表

项目	数值
水量/(t·h ⁻¹)	0~5
水压/MPa	0~0.2
压缩空气消耗量/(m ³ ·min ⁻¹)	0~8
压缩空气压力/MPa	0.4~0.6
水路进出口规格	DN32
压缩空气进出口	DN50

3.2.4 供气管路

压缩空气是本系统的主要雾化能源,在运行过程中必须确保压缩空气的有效供应。本系统在工厂供气至自控泵站压缩空气进口之间配置了储气罐、过滤器、减压阀,在主供气管路上同时配备了手动旁路,以便于主气路上元器件损坏的在线检修。

根据雾化需要,0.414 MPa 状态下压缩空气消耗量 7.425 Nm³/min,且实际工作时要求不间断供

气,在压缩空气管路上配置了储气罐,起稳压和短时间的储气作用。储气罐容积为 2 m³,工作压力为 0.8 MPa。冶炼厂的供气压力一般会到 0.6~0.7 MPa,且会有一定波动,为保证雾化效果,在供气管路上设置了减压稳压阀。

3.2.5 供水管路

水作为喷雾冷却器高温烟气的冷却介质,在阳极炉生产过程中是不能断供的,因此在供水管路启闭的电动球阀旁也配置了手动旁路球阀,以防止故障时的断水。在进入自控泵站供水入口前端设置了水箱用以储水,根据喷雾用水需求配置水箱容量 5 m³、直径 Φ1 900 mm、有效高度 1 750 mm,在断水情况下,最大烟气状态所需流量供水 1.2 h。

3.2.6 人机交互

为了方便操作人员实时了解喷雾系统工作状态,系统配置了人机交互界面(HMI),人机交互采用西门子触摸屏,安装在自动泵站上控制柜上,触摸屏主界面如图 5 所示。操作人员可通过此界面实时查看并监测烟气出、入口温度、水流量、水压、气压、水箱的水位等各种状态信号,并可以在紧急状态下通过界面设置安全模式流量,进入安全模式后,系统将以设定流量进行喷雾,不再自动调节。

界面下一级菜单还可以查看故障列表、实时温度曲线、I/O 状态,并可以进行各种报警设置,运行设置。



图 5 人机界面图

4 应用

根据提供的工艺流程、烟气条件、现场环境及相关要求,进行了详细的设计计算、外购件选型、施工图设计及现场施工组织、安装、调试,最终实现了完整交付,经生产实际运行验证,总体布置合理,工艺流程顺畅,温度调节范围大,目标温度控制稳定,冷

却塔底部无漏水、各种技术指标达到设计要求并超越了最初的技术协议要求,自动化水平达到国内先进水平。喷雾冷却器工业现场如图 6 所示。



图 6 喷雾冷却器工业现场

5 结语

文中介绍了阳极炉高温烟气收尘工艺流程、高温烟气的冷却方式及喷雾冷却系统组成,详细介绍了喷嘴选型、喷雾冷却系统 P&ID 图、冷却器本体及

相关配置、自控泵站、供水、供气管线,人机交互界面。喷雾冷却技术在白银铜冶炼技术提升改造工程中的生产运行一切正常,实践证明使用效果良好,达到客户和设计要求。随着有色冶炼行业的快速发展,对烟气冷却的要求也在提高,喷雾冷却器操作方便,调节范围广,适应性强,性能可靠,投资、占地面积小,自动化程度高,将会被越来越多的冶炼厂所应用。

[参考文献]

- [1] 蒋继穆. 顶吹浸没熔炼技术在中国的进展[J]. 有色冶金, 2001(5): 1-4.
- [2] 贾华, 陈佳. 烟气喷雾冷却对温度控制的实现及仿真[J]. 自动化仪表, 2013, 34(11): 59-61.
- [3] 朱茂, 道云宝, 刘炳华. 喷雾降温技术在阳极炉高温烟气降温中的应用[J]. 新技术新工艺, 2012(5): 69-72.
- [4] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 中国石化出版社, 2016.
- [5] 张殿印, 王纯. 除尘工程设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [6] 李文胜, 周敏群, 王旭. 烟气冷却系统在增湿塔中的应用[J]. 水泥, 2011(6): 51-52.

Application of Two Fluid Spray Cooling in Flue Gas Cooling of Copper Smelting Anode Furnace

TANG Xiao-yong, XU Ming-yi*

Abstract: The temperature and volume of flue gas produced by copper smelting anode furnace fluctuate greatly, resulting in drastic changes in heat capacity, which requires cooling before entering the subsequent dust collection system. Based on this feature, this paper introduces a dual fluid compressed air spray cooling technology. The dusty high-temperature flue gas enters from the top of the cooling tower and contacts with the fully atomized droplets downstream. The droplets are vaporized rapidly during the travel of the high-temperature flue gas in the tower, and the sensible heat is replaced by the latent heat of water evaporation. After the flue gas is quenched, it flows out from the bottom through the exhaust port. The system is equipped with an automatic pump station to provide water and compressed air with a certain pressure for the spray gun. According to the flue gas inlet and outlet temperature of the cooling tower, water spray flow, pressure and other signals, real-time calculation and control are carried out to ensure that the flue gas outlet temperature is stable within the set target range. The actual production verification of anode furnace in the copper smelting technology upgrading and transformation project of Baiyin Nonferrous Metals Group shows that the overall layout is reasonable, the process flow is smooth, the temperature regulation range is large, there is no water leakage at the bottom of the cooling tower, and various technical indicators meet the design requirements.

Key words: Copper smelting; Spray cooling; High temperature flue gas; Cooling; Anode furnace

