

引用格式: 汤晓勇, 豆龙. 闪速炉事故烟道喷雾冷却箱系统设计与分析[J]. 有色设备, 2025, 39(4): 94-99.

TANG Xiaoyong, DOU Long. Design and analysis of flash furnace emergency flue spray cooling box system[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 94-99.

# 闪速炉事故烟道喷雾冷却箱系统设计与分析

汤晓勇, 豆龙

(长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012)

**[摘要]** 铜精矿闪速熔炼过程中会产生高温烟气, 正常运行时高温烟气经余热锅炉回收余热后进入沉尘室及电收尘器进行净化, 净化后的烟气由高温排风机送入制酸工序, 锅炉或后续工艺设备故障时, 闪速炉高温烟气需由事故烟道急冷后送入后续收尘脱硫系统。基于此工艺流程及特点, 本文研制了一种闪速炉事故烟道用喷雾冷却箱, 高温烟气从箱体底部进入, 垂直向上流动, 雾化后的液滴通过喷嘴垂直向下迎着烟气来流方向喷出, 两者逆流全方位接触、混合、换热, 微小液滴在烟气高温作用下中迅速蒸发、汽化, 烟气的显热转化为水蒸汽潜热, 使烟气温度急冷到要求温度后经顶部排气口流出。经某有色集团铜冶炼技术提升改造工程闪速炉生产实际验证, 总体布置合理, 工艺流程顺畅, 冷却箱内无液态水, 各种技术指标达到设计要求。

**[关键词]** 铜冶炼; 闪速炉; 事故烟道; 高温烟气; 喷雾冷却箱

**[中图分类号]** TF351; TF811

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2025)04-0094-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.011

## 0 引言

铜冶炼技术主要包括火法冶炼和湿法冶炼, 以火法冶炼工艺为主。由于新能源汽车、光伏等新兴产业对铜需求的增加, 我国铜产量近年来呈稳定增长态势, 铜冶炼生产规模也不断扩大, 相应地, 冶炼高温烟气环保处置要求越来越高, 需对高温废气进行降温净化处理和合理利用<sup>[1-2]</sup>。传统的铜冶炼工艺对高温烟气的冷却方法有水池盘管、水套冷却、表面淋水冷却、间接风冷或自然冷却等, 此类方法投资大、冷却速度慢且温度不易控制, 难以适应闪速炉循环周期性作业的烟量、烟气温度波动较大的工况。

喷雾冷却高温烟气降温是一种直接冷却的方式, 液体在压力作用下变成液雾或其他小雾滴, 通过喷枪喷嘴将水雾化成极细的雾滴, 喷入高温烟气中, 由于雾化后的液体表面积大幅增加, 在与高温烟气接触过程中进行热和质的交换, 烟气中的热量因液滴蒸发而被吸收, 使温度降低, 同时喷出的水完全转变为气态<sup>[3]</sup>。本文以白银有色 200 kt/a 铜冶炼技术提升改造工程为例, 以闪速炉事故烟道高温烟气为冷却对象, 采用喷雾

直接冷却降温方式, 对喷雾冷却箱系统进行设计与分析, 以期为类似的工程提供参考与借鉴。

## 1 闪速炉熔炼工艺流程

闪速炉是目前铜冶炼行业造钼熔炼的一种广泛应用的主要工艺设备, 由反应塔、沉淀池、上升烟道和连接部等部分组成。白银有色 200 kt/a 铜冶炼技术提升改造工程采用闪速炉熔炼收尘工艺, 将硫化精矿悬浮在氧化气氛中, 通过精矿中部分硫和铁的氧化以实现闪速熔炼, 其方式与粉煤的燃烧十分相似。将精矿和熔剂用工业氧或富氧空气或预热空气利用闪速喷嘴喷入专门设计的闪速炉中, 用硫化铁的闪速燃烧获得熔炼温度, 精矿在闪速燃烧过程中完成焙烧与熔炼反应。

闪速炉产出的烟气 1 350 °C 左右, 含尘约 186.63 g/Nm<sup>3</sup> 的烟气经余热锅炉回收余热后降温至 360 °C 左右, 同时所携带的烟尘由于重力作用在余热锅炉内大量沉降下来, 含尘量降至 125.8 g/Nm<sup>3</sup>, 随后进入沉尘室及电收尘器进一步净化, 使其含尘浓度净化至环保要求的 0.5 g/Nm<sup>3</sup> 以下, 经三级净

**[收稿日期]** 2025-04-03

**[第一作者]** 汤晓勇(1985—), 男, 湖南永州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为烟气治理及采矿装备研究开发。

化后的烟气再由高温排风机送到制酸工序,图 1 展示了闪速炉熔炼收尘工艺流程图。

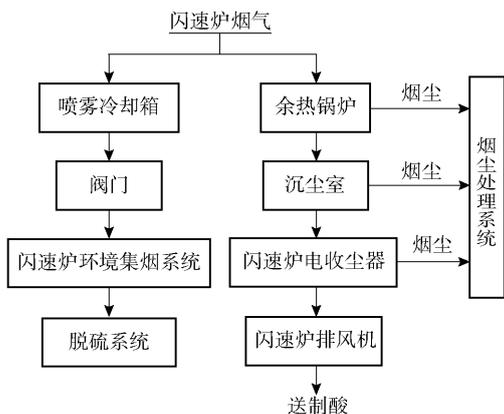


图 1 闪速炉熔炼收尘工艺流程

Fig. 1 Process flowchart of flash furnace melting and dust collection

闪速炉上升烟道顶部开有事故烟道口,为锅炉故障状态下烟气排空烟道。为降低高温烟气温度,在事故烟道设置喷雾冷却箱对高温烟气进行急冷至 300 °C 左右后汇入闪速炉环境集烟系统,然后进入脱硫系统。

## 2 高温烟气冷却方式

高温烟气具有成分复杂、烟气量波动大的特点,其显热是一种余热能源,按照节能与环保的要求不允许直接排放。因此,考虑高温烟气冷却方案时,尽可能地回收利用,尤其是 800 °C 以上的烟气,通常利用余热锅炉或烟道来回收生产中高温烟气以发电并网使用。1 000 °C 以下高温烟气的冷却通常采用直接冷却或间接冷却 2 种方式,如图 2 所示。

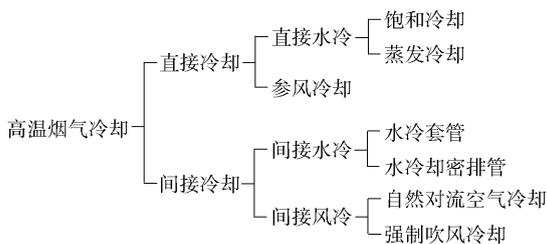


图 2 高温烟气冷却方式

Fig. 2 High temperature flue gas cooling method

通过对各种冷却方式的分析比较,针对闪速炉熔炼高温烟气特点,在事故烟道采用喷雾直接冷却降温,效果明显,速度快,对波动较大的闪速炉烟气

温度容易控制,投资、占地空间小,在生产过程中进行改造对生产的影响小。

## 3 工艺计算

### 3.1 烟气成分

该喷雾冷却箱入口烟气成分(体积占比)如下: CO<sub>2</sub>: 0 ~ 12%、H<sub>2</sub>O: 0 ~ 9%、O<sub>2</sub>: 0 ~ 3%、N<sub>2</sub>: 45% ~ 55%、SO<sub>2</sub>: 20% ~ 30%,入口烟气量为 32 000 Nm<sup>3</sup>/h,入口烟气温度为 1 000 °C,出口烟气温度要求 ≤ 300 °C。

### 3.2 烟气成分比热容计算

本文研究的烟气换热过程可看成定压过程。温度不太低、压力不太高时(常温下压力不超过 7.0 MPa),烟气成分均远离液态,性质接近理想气体,工程计算时可作为理想气体处理。

$t_1 \sim t_2$ 之间的平均比定压热容计算式见式(1)。

$$c_p |_{t_1}^{t_2} = \frac{c_p |_{0^\circ\text{C}}^{t_2} t_2 - c_p |_{0^\circ\text{C}}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

根据式(1)计算 300 ~ 1 000 °C 之间的平均比定压热容<sup>[3]</sup>,见表 1。

表 1 300 ~ 1 000 °C 之间的平均比定压热容

Table 1 Average specific heat capacity at constant pressure between 300 °C and 1 000 °C

kJ/(kg·K)					
气体	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
平均比定压热容	1.071	1.163	1.196	2.240	0.824

### 3.3 烟气热容量计算

热量等于比热容、质量及温差的乘积(式(2)),各烟气成分在相同温差条件下比热容与质量的乘积可表征某种烟气成分所含热力学能比重的大小。各烟气成分比热容与摩尔质量的乘积(按 300 ~ 1 000 °C 之间的平均比定压热容)见表 2。

表 2 各烟气成分比热容与摩尔质量的乘积

Table 2 Product of specific heat capacity and molar mass of each smoke component

气体	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
比热容 × 摩尔质量	34.286	32.564	52.642	40.373	52.795

可见,此闪速炉烟气中 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 比重大一些,所含热量高一些。根据烟气成分条件: O<sub>2</sub> 3%、N<sub>2</sub>

46%、CO<sub>2</sub>12%、H<sub>2</sub>O 9%、SO<sub>2</sub> 30%，各烟气成分的体积(烟气流:32 000 Nm<sup>3</sup>/h)见表 3。

表 3 各烟气成分的体积

Table 3 Volume of each smoke component Nm<sup>3</sup>

成分	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
体积	1 984.5	7 289.7	2 526.9	1 323	105.8

可得各烟气成分的物质质量见表 4。

计算可得各烟气成分的质量见表 5。

烟气从 1 000 °C 降到 300 °C 所具备的热容量数值见表 6。

表 6 烟气从 1 000 °C 降到 300 °C 所具备的热容量

Table 6 Thermal capacity of flue gas from 1 000 °C to 300 °C

成分	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	合计
热容量	1 028 571.4	14 979 267.8	6 317 069.7	3 633 527.1	15 838 377.4	41 796 813.4

$$Q = Cm\Delta T \quad (2)$$

式中:  $Q$  为热容量, kJ;  $C$  为比热容, kJ/(kg·K);  $m$  为质量, kg;  $\Delta T$  为温差, K。

### 3.4 冷却介质(水)用量计算

冷却箱内绝对压力约为 0.1 MPa, 查饱和水和干饱和蒸汽表(节录)<sup>[4]</sup>得到对应的饱和温度  $T_s = 100$  °C, 0.1 MPa 的饱和水及干饱和蒸汽参数:  $h' = 419.06$  kJ/kg,  $h'' = 2 675.71$  kJ/kg。

冷却介质用水从 20 °C (室温) 加热到目标温度 300 °C 所需吸收的热量等于烟气降到 300 °C 所放出的热量。

冷却介质水(0.1 MPa, 20 °C) 初态为未饱和水, 终态(0.1 MPa, 300 °C) 为过热蒸汽。

查未饱和水和过热蒸汽表(节录)<sup>[4]</sup>得 0.1 MPa 下, 20 °C 和 300 °C 时  $h_1 = 83.96$  kJ/kg,  $h_2 = 3 073.8$  kJ/kg。

0.1 MPa 下单位质量水从 20 °C 加热到 300 °C 所需总热量:  $q = h_2 - h_1 = 3 073.8 - 83.96 = 2 989.84$  kJ/kg。

烟气温度为 1 000 °C 时, 所消耗水量为  $m = 41 796 813.4 / 2 989.84 = 13 979.6$  kg。

因此, 每小时所需冷却水用量为: 13 979.6 kg。

## 4 喷雾冷却箱设计

### 4.1 总体设计思路

1) 根据产生高温烟气的炉窑形式、工艺介质的

表 4 各烟气成分的摩尔数

Table 4 Molar numbers of various flue gas components

成分	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
物质的量	42 857.1	657 142.9	171 428.6	128 571.4	428 571.4

表 5 各烟气成分的质量

Table 5 Quality of various smoke components kg

成分	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
质量	1 371.4	18 406.6	7 544.6	2 316.9	27 454.3

冷却要求、所建装置的水源、电力情况及后续工艺的需要, 进行冷却方式(吸风直接冷却、间接冷却、喷雾直接冷却、间接水冷)的技术、经济比较, 以确定使用喷雾冷却箱的可行性、可靠性及经济性<sup>[5-7]</sup>;

2) 根据现场布置及环境条件, 确定喷雾冷却箱的布置形式;

3) 根据介质最终冷却温度、烟气流、烟气温度、烟气成分等烟气条件计算需要降温的烟气热容量, 再通过热平衡计算所需冷却介质(水)的用量;

4) 根据喷雾冷却箱的布置形式、所需冷却介质用量、雾滴蒸发速度及在冷却箱内停留的时间, 确定喷雾形式、液滴与高温烟气接触方式(顺流或逆流)、喷枪布置<sup>[8]</sup>;

5) 考虑操作条件、布置场地进行喷雾冷却箱结构设计、给喷枪供水的泵站及管路、阀门、仪表布置设计。

### 4.2 烟气条件及设计要求

本文设计的喷雾冷却箱入口烟气条件及设计参数如下。

- 1) 入口烟气流: 32 000 Nm<sup>3</sup>/h;
- 2) 入口烟气温度: 1 000 °C;
- 3) 出口烟气温度: ≤300 °C;
- 4) 规格尺寸要求: 1 300 mm × 1 300 mm × 5 500 mm (长 × 宽 × 高) 尺寸范围内;
- 5) 入口压力: -100 Pa (表压);

- 6) 烟气成分(体积):  $\text{CO}_2$ : ~12%;  $\text{H}_2\text{O}$ : ~9%;  
 $\text{O}_2$ : ~3%;  $\text{N}_2$ : 45% ~55%;  $\text{SO}_2$ : 20% ~30%;  
 7) 安装地点: 室内;  
 8) 冷却箱内无液态水存在, 全部汽化, 无湿壁现象。

### 4.3 结构设计

喷雾冷却箱根据设计要求及布置条件, 采用立式筒体, 1 300 mm × 1 300 mm 截面, 由上筒体、中筒体、下筒体、烟气进口、烟气出口、喷雾装置、操作平台、供水口、排水口、人孔门、内衬等组成, 喷雾冷却箱结构如图 3 所示。

来自闪速炉上升烟道顶部的高温烟气, 经过矩形弯管从下筒体侧面烟气进口进入冷却箱, 向上拐弯后垂直上升至中筒体、上筒体, 从上筒体侧面烟气出口排出, 而后进入闪速炉环境集烟管道, 最后送入脱硫系统脱硫后排放。

中筒体顶部横截面上均匀布置 8 支不锈钢喷枪, 安装有实心锥形螺旋喷嘴, 垂直朝下喷雾, 喷出的微小雾滴与垂直向上的高温烟气逆流接触、混合、传热、蒸发、汽化, 将烟气中的显热转变为水蒸汽潜热, 使烟气降温至要求温度后排出。围绕着中筒体外部四周设置了大液体通过能力环管, 可均匀供给喷枪的同样的水流量, 以使 8 支喷枪工作状态一致、均匀, 从而均匀覆盖冷却箱全截面烟气通道。

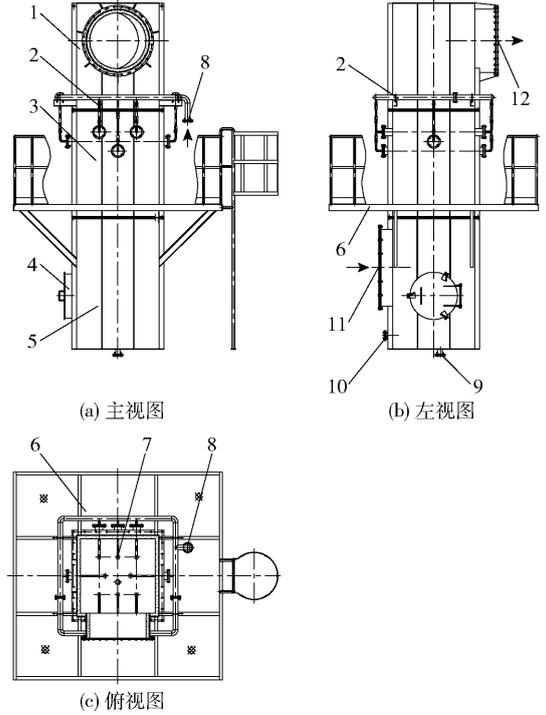
筒体截面为矩形, 规格 1 300 mm × 1 300 mm, 高度 5.5 m, 在喷枪部位设置了操作平台, 方便日常观察喷枪、喷嘴工作状态及维护, 扶手和竖杆采用外径为  $\Phi 42$  mm 的钢管, 横杆采用外径为  $\Phi 32$  mm 的钢管, 栏杆高设置为 1.2 m, 平台采用格栅板, 确保日常维护的安全。

### 4.4 内衬设计

闪速炉排出的烟气温度非常高, 喷雾冷却箱需要进行耐温隔热, 因此需要进行内衬设计。

冷却箱隔热采用捣打料。捣打料是用捣打方法施工的一种不定型耐火材料, 由具有一定级配的耐火骨料、粉料、结合剂、外加剂加水或其他液体经过混炼而成, 具有化学稳定性好、耐冲刷、抗磨损、抗剥落等特性。按材质分类有高铝质、黏土质、镁质、白云石质、锆质及碳化硅-碳质耐火捣打料。本设计采用高铝质捣打料, 为使捣打料与内壁结合更紧固, 在结合面焊接 6 mm 的 V 形钩钉, 间距 50 mm 设置 1 个。整个冷却箱内衬 50 mm 厚, 耐温 1 200 ~ 1 500 °C,

为保护捣打料不被水雾浸湿, 并且不被高温烟气冲刷而损坏, 在捣打料内侧还设置 316L 不锈钢内壳, 将捣打料封住在内外壳之间, 隔绝高温烟气向外传递, 如图 3 所示。



1—上筒体; 2—喷雾装置; 3—中筒体; 4—人孔门; 5—下筒体;  
 6—操作平台; 7—喷嘴; 8—进水口; 9—底部排水口; 10—侧面排水口; 11—烟气进口; 12—烟气出口

图 3 喷雾冷却箱结构

Fig. 3 Structure of spray cooling box

### 4.5 喷嘴选型

为保证微小雾滴在冷却箱内换热过程中全部汽化, 降低冷却箱内湿壁风险, 采用可靠且有成熟应用案例的大流量单流体实心锥形螺旋喷嘴。液体进入喷嘴, 穿过喷孔, 然后通过螺旋的间隙流出喷嘴, 当液体从螺旋表面偏转出去时, 形成实心锥形喷雾形状, 开放式通道在给定管道尺寸的情况下, 可实现最大液流量, 工作压力高达 2.5 MPa。

由冷却介质用量计算可知, 烟气温度从 1 000 °C 降到 300 °C 所需消耗水总量为 13 979.6 kg/h (233 L/min)。综合考虑喷雾系统的可靠性、筒体结构、布置形式, 在冷却箱中筒体顶部横截面内布置 8 支喷嘴, 垂直向下喷雾。如图 4 所示, 根据喷嘴厂家 Spray 样本, 喷嘴选型为: 3/8HHSJ-SS9040, 喷射角度: 90°, 3 bar 压力下流量: 32 L/min, 材质: 316L

不锈钢,完全可满足所需流量范围。

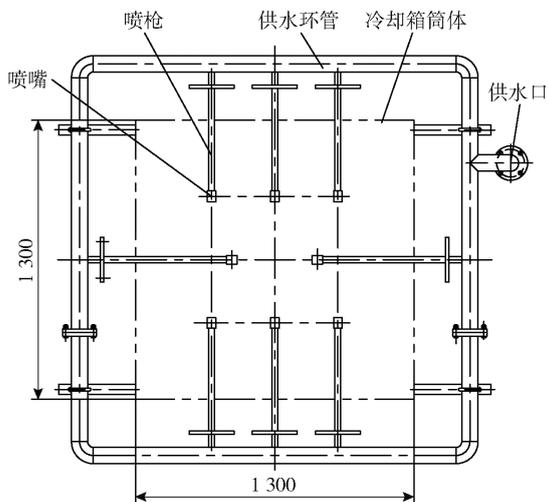


图4 喷嘴布置

Fig.4 Nozzle layout

#### 4.6 效果分析

根据闪速炉冶炼工艺流程、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、安装、调试,研制了一种闪速炉事故烟道用喷雾冷却箱,安装在白银有色200 kt/a铜冶炼技术提升改造工程闪速炉事故烟道上。经生产实际运行验证,总体布置合理,工艺流程顺畅,冷却箱内无液态水、无湿壁现象,各种技术指标达到设计要求。

#### 5 结语

1)采用喷雾直接冷却降温,降温速度快、效果明显、设备简单、水和动力消耗不大、投资较少、温度调节范围广、控制稳定、适应性广,用于冷却闪速炉

事故烟道高温烟气,具有重要的工程现实意义,是一种理想的高温烟气冷却方法。

2)设置了喷雾冷却箱入口烟气条件及设计参数,经工艺计算,烟气从1000℃降到300℃所具备的热容量41796813.4 kJ,每小时所需冷却水用量为:13979.6 kg,从而设计出了喷雾冷却箱结构、内衬、喷嘴,并应用于白银有色200 kt/a铜冶炼技术提升改造工程闪速炉事故烟道,生产运行中的各种技术指标达到了设计要求。

3)随着有色冶炼行业的快速发展及环保要求的提高,对烟气冷却的要求也在提高,喷雾冷却箱性能可靠,投资、占地面积小,作为冶炼炉窑的事故应急烟道,在冶炼场所具有广阔的应用前景,将会被越来越多的冶炼厂所应用。

#### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] 袁精华. 闪速炉设计及操作中的节能技术和措施[J]. 有色冶金节能,2000,16(3):9-11,40.
- [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.
- [7] 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(3):48-52.
- [8] 汤晓勇,杨永波,谭文兵. 列管式空冷器在阳极炉烟气降温中的应用[J]. 现代冶金,2019,47(6):77-80.

## Design and analysis of flash furnace emergency flue spray cooling box system

TANG Xiaoyong, DOU Long

(Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China)

**Abstract:** High-temperature flue gas will be generated in the flash smelting process of copper concentrate. During normal operation, the high-temperature flue gas is recovered by the waste heat boiler and enters the dust chamber and electric dust collector for purification. The purified flue gas is sent to the acid making process by the high-temperature exhaust fan. In the event of a boiler or subsequent process equipment failure, the high-temperature flue gas from the flash furnace needs to be rapidly cooled by the

accident flue and sent to the subsequent dust collection and desulfurization system. Based on the process flow and characteristics, the paper developed a spray cooling box for flash furnace emergency flue. High temperature flue gas enters from the bottom of the box and flows vertically upward. The atomized droplets are sprayed vertically downward through the nozzle and downward in the direction of flue gas flow. The two countercurrent contact, mix, and exchange heat in all directions. The tiny droplets quickly evaporate and vaporize under the effect of high temperature of flue gas. The sensible heat of flue gas is converted into latent heat of water vapor, which makes the flue gas temperature rapidly cool to the required temperature and then flow out through the top exhaust port. Through the practical verification of the flash furnace production in the copper smelting technology improvement and renovation project of a certain non-ferrous group, the overall layout is reasonable, the process flow is smooth, there is no liquid water in the cooling box, and various technical indicators meet the design requirements.

**Keywords:** copper smelting; flash furnace; accident flue; high temperature flue gas; spray cooling box



(上接第 74 页)

## Study on corrosion resistance of copper/aluminum dissimilar metal diffusion welding joints

TIAN Jipeng<sup>1,2</sup>, DING Yunlong<sup>1,2</sup>, SHAO Wenjie<sup>1,2</sup>, CUI Shiyi<sup>1,2</sup>, ZHUANG Zhiguo<sup>3</sup>, HAN Bing<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Workpiece Surface, Anshan 114051, China;

3. Chongyi Zhangyuan Tungsten Co., Ltd, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** In the study, the vacuum diffusion welding process was used to successfully weld T2 copper and 1060Al. The scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer were utilized to analyze the microstructure and phase composition of the diffusion layer. Corrosion immersion tests and research on the electrochemical corrosion performance were carried out in a 3.5wt% NaCl solution to study and compare the corrosion resistance of each diffusion layer and the base materials. The results show that a diffusion layer composed of the AlCu layer, Al<sub>2</sub>Cu layer, and Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> layer was formed at the interface of the T2 copper/1060Al vacuum diffusion joint. The corrosion resistance varied in different regions of the diffusion layer. The corrosion degree in the diffusion layer region on the copper side was relatively mild. In the diffusion layer region on the aluminum side, the pitting holes developed into pitting pits, and with the passage of time, irregular deep gullies were formed, which eventually developed into exfoliation corrosion. In terms of the corrosion resistance, the base materials and each diffusion layer were ranked as follows: T2Cu > Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> > AlCu > Al<sub>2</sub>Cu > 1060Al.

**Keywords:** copper/aluminum diffusion welding; diffusion layer; corrosion resistance; microstructure; dissimilar metals; welding; corrosion potential

