

# 用于硅铁电炉烟气除尘的先进技术

杨丽芳<sup>1,2</sup> 张志凌<sup>3</sup> 何家宁<sup>1</sup> 王皓<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 昆明冶金高等专科学校环境与化工学院, 昆明 650093;  
3. 昆明有色冶金研究设计院, 昆明 650051)

**摘要** 介绍了国内外硅铁电炉烟气除尘现状、发展趋势及微硅粉尘的应用途径, 认为挪威埃肯集团公司的除尘技术不仅解决了烟气污染问题, 而且还能回收应用途径广泛的微硅粉; 本文还详细介绍了该技术的特点和主要技术参数, 为该项技术的推广应用提供参考。

**关键词** 硅铁电炉 微硅粉 挪威埃肯集团公司 袋式除尘器

中图分类号 X701.2 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)01-0099-05

## Advanced technology used to collect smoke dust from emission of silicon-iron electric-furnace

Yang Lifang<sup>1,2</sup> Zhang Zhiling<sup>3</sup> He Jianing<sup>1</sup> Wang Hao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093;  
2. Faculty of Environment and Chemical Engineering, Kunming Metallurgy College, 650093;  
3. Kunming Design & Research Institute of Non-ferrous Metallurgy, Kunming 650051)

**Abstract** This paper introduces the actualities of collecting smoke dust from emission of silicon-iron electric-furnace, its developmental direction and application -approach in the world. It is indicated that the dust catcher of Elkem ASA Corporate Headquarters of Norway not only solves the problem of smoke pollution, but also can recover fine silicon-powder. The paper also introduces characteristics of technology of Elkem ASA Corporate Headquarters and its primary parameters in order to offer reference for its application and dissemination.

**Key words** silicon-iron electric-furnace; fine silicon-powder; Elkem ASA Corporate Headquarters; bag hose filter

在冶炼行业内, 硅铁电炉烟气由于其含尘浓度大( $2.2 \sim 5.5 \text{ g/Nm}^3$ )、烟气温度高( $400 \sim 550^\circ\text{C}$ ), 含有密度小、粒度细的微硅粉尘(含  $\text{SiO}_2$ ), 给除尘和粉尘回收利用带来很大困难<sup>[1]</sup>。以云南某冶炼厂硅铁电炉烟气为例, 烟气含尘浓度为  $5 \text{ g/Nm}^3$ , 微硅粉尘真比重为  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , 堆比重为  $0.15 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ , 比表面积为  $28 \sim 35 \text{ m}^2/\text{g}$ , 比电阻  $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

烟气成分为:  $\text{CO}$  0.05%,  $\text{CO}_2$  3.90%,  $\text{H}_2\text{O}$  1.80%,  $\text{O}_2$  17.20%,  $\text{N}_2$  77.05%,  $\Sigma$  100。

烟尘成分为:  $\text{SiO}_2$  94%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.22%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.29%,  $\text{CaO}$  0.305%,  $\text{MnO}$  0.013%,  $\text{MgO}$  0.03%,  $\text{K}_2\text{O}$  0.07%,  $\text{Na}_2\text{O}$  0.07%,  $\text{P}_2\text{O}_3$  0.002%,  $\text{C}$  3.10%,  $\text{SiC}$  1.9%,  $\Sigma$  100。

烟尘粒径分布为:  $< 0.1 \mu\text{m}$  60%,  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$  30%,  $> 0.4 \mu\text{m}$  10%。

由于粒径在  $0.4 \mu\text{m}$  以下的占 90% 以上, 该粉

尘在空气中停留时间长, 不易沉降, 比电阻大, 气体的粘度随温度的增高而增大, 在金属或纺织品表面上的粘结性强, 附着力大, 亲水性好, 易于结团, 所以这种粉尘具有较强的扩散能力, 除尘设备不易捕集, 一旦被捕集, 阻力增大, 清灰困难。因此, 除尘工艺设计和设备选型时要充分考虑这些特性<sup>[1]</sup>。

## 1 国内外硅铁电炉烟气净化技术现状及发展趋势

硅铁电炉烟气的治理方式主要有湿式除尘、高压静电除尘和袋式除尘。湿式除尘只有采用高能耗洗涤器或文丘里除尘器才能达到净化要求, 虽然设

收稿日期: 2006-05-22; 修订日期: 2006-09-06

作者简介: 杨丽芳(1967~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事环境工程的教学、科研和工程应用工作。

E-mail: yang-lf@hotmail.com

备简单、投资省,但存在动力消耗大(约为袋式除尘器的3~6倍),水处理系统复杂,收集的粉尘难以回收利用<sup>[2,3]</sup>;高压静电除尘技术需要粉尘的比电阻范围为 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ,而硅铁粉尘的比电阻超过此范围,需进行增湿调质处理,由于增湿过程要求控制系统精度高,有一定技术难度,且投资大<sup>[2,3]</sup>;硅铁电炉烟气除尘系统采用袋式除尘在目前国内外硅铁行业已形成共识<sup>[3]</sup>,国内硅铁生产企业烟气达标排放且运行管理较好的都选用袋式除尘器,袋式除尘器的特点是除尘效率高、运行可靠、管理简单。

挪威王国埃肯集团公司(Elkem ASA Corporate Headquarters)(以下简称埃肯公司)的正压过滤、抽吸清灰方式的袋式除尘器在硅铁、金属硅电炉烟气的净化及微硅粉回收方面处于世界先进水平,该除尘器具有除尘效率高、投资省、运行费用低、使用寿命长、操作环境好和清灰效果好等优点,目前已在世界范围内推广使用。我国腾达西北(集团)硅材料有限公司(青海)、贵州遵义铁合金(集团)有限公司、内蒙鄂尔多斯电力铁合金有限公司已引进埃肯公司的除尘技术。

## 2 埃肯公司的硅铁电炉烟气治理技术及微硅粉应用

### 2.1 埃肯公司的硅铁电炉烟气治理技术

埃肯集团公司20多年来一直致力于解决硅铁或金属硅熔炼电炉的烟气净化及回收粉尘的综合利用问题,为了解决除尘设备的难题,采用正压过滤、抽吸清灰式袋式除尘器,使除尘系统有较高的除尘效率;采用优越的预处理设备,使收下的微硅粉尘质量得到提高,有应用价值;完善微硅粉处理(加密)系统,便于微硅粉尘的贮存、运输和利用。埃肯集团公司至今已经向全球提供70多套除尘系统,在我国也有办事处和设备加工厂家。

埃肯公司应用的工艺流程为:硅铁电炉烟气→冷却器→预处理器→主风机→袋式除尘器→排空,冷却器不需振打清灰、无灰排出;预处理器为一个双筒旋风除尘器,大筒体起到增浓作用,经增浓后的烟气进入小筒体除掉粗颗粒,预处理器收下的尘量占总烟尘量的3%~5%;主风机将烟气鼓入袋式除尘器进行正压操作,不仅除尘效率很高,而且操作环境好;收下的微硅粉尘经机械输送或气力输送至加密仓内,在仓内均化和微硅粉加密,微硅粉加密后由罐

装汽车外运出售,实现烟尘的资源化。

### 2.2 微硅粉应用

硅铁(金属硅)熔炼烟尘被认为是一种严重污染环境的烟尘,近20年来,回收的副产物微硅粉经研究与利用已经证实它是一种很有价值的商品,具有广泛的应用前景。

(1)微硅粉添加到混凝土中,能使混凝土密实度提高,气孔率减少;使水泥中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 减少或不存在,提高了混凝土抵御外界介质的渗透、侵蚀等能力;提高了抵抗氯离子掺入引起电化学破坏的能力,增强了钢筋混凝土的耐久性。所以不仅可以提高混凝土的抗压强度、抗拉强度,还能使混凝土的水化热降低,使其抗渗透性能好、耐腐蚀、防油等。微硅粉混凝土被广泛应用于建造高层大厦和耐久性建筑物;用于抗冲刷磨损、抗渗漏工程,如电站大坝导流洞、蓄水池和隧道等;用于抗硫酸盐、氯酸盐的工程,如作为海洋港口工程的耐久材料以及钻井平台等。

(2)作为生产橡胶的填料,橡胶中加入微硅粉可提高其延展性、抗撕裂及抗老化度;具有良好的介电性,吸水能力低,适用于轮胎制造等<sup>[1]</sup>。

(3)能代替有毒有害的石棉纤维。

(4)工程塑料中加入微硅粉,使其抗冲击能力及抗老化能力大大提高。

(5)具有改良土壤的功能,可制成缓效农肥硅酸钾,不易挥发流失,保护土壤,促进作物根部发育,抑制病虫害,防止肥料结块<sup>[1]</sup>。

## 3 埃肯公司的技术特点

### 3.1 流程布置特点

每台电炉烟气独立使用1台烟气冷却器、预处理器及风机,使各台电炉的生产情况及操作互不影响,几台电炉可合用1台袋式除尘器,使投资及占地面积减少。其典型流程组合如图1所示。

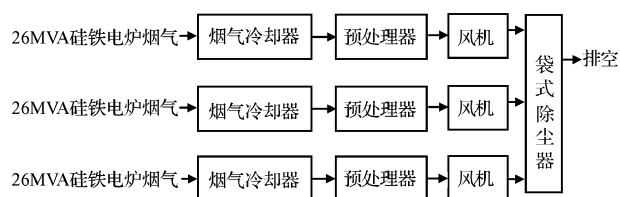


图1 埃肯公司硅铁电炉烟气治理的典型流程组合示例

Fig. 1 Typical flow combination of Elkem ASA Corporate for treatment of smoke dust from emission of silicon-iron electric-furnace

### 3.2 表面冷却器特点

硅铁、金属硅熔炼电炉出来的烟气温度通常在  $400 \sim 550^{\circ}\text{C}$ , 非正常时可能达到  $700 \sim 800^{\circ}\text{C}$ , 硅铁电炉烟气温度为  $300^{\circ}\text{C}$  以下时, 用袋式除尘器是最经济的<sup>[1]</sup>, 因此, 后续袋式除尘器进口温度必须控制在  $300^{\circ}\text{C}$  以下, 采用 U 形管表面冷却器是收集、控制微硅粉的关键步骤。

埃肯公司使用的表面冷却器的结构如图 2 所示。

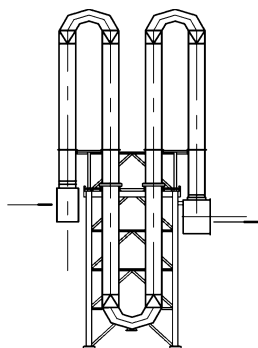


图 2 表面冷却器结构简图

Fig. 2 Sketch of surface cooler's frame

烟气冷却器采用大气自然风冷, 冷却器由多排“U”形钢管组合而成, 管束采用顺列(棋盘格排列), 以便于布置支架的梁柱, 便于安装和检修, 与普通的表面冷却器相比, 设计采用的烟气冷却器具有如下优点:

(1) 管内烟气的设计流速高 ( $22 \text{ m/s}$ ), 管道直径可以减小, 烟气中的微硅粉不会在管道的转弯处堆集, 因此“U”形管束不需设灰斗, 简化了冷却器的结构。

(2) 管内烟气流速提高至  $22 \text{ m/s}$  后, 系统的对流传热系数  $\alpha$  比普通的表面冷却器提高了  $50\% \sim 60\%$ , 根据对流传热速率方程式  $Q = \alpha A \Delta t$ , 传热面积  $A$  比普通的表面冷却器减少了  $50\% \sim 60\%$ , 节省了管道长度和弯头数量, 因此, 烟气流速增加带来的阻力损失得到弥补, 其系统阻力和普通的表面冷却器相当。

(3) 表面冷却器耗材省, 除了“U”形钢管使用高质量钢材外, 支架则可以使用槽钢、角钢等其他型材。

### 3.3 双级旋风预处理器的特点

为了提高正压布袋除尘器对微硅粉的收集效率, 最大限度地实现微硅粉的回收利用, 预处理器必

须将微硅粉中的大颗粒粉尘杂质和带火星炭粒除掉, 由于这些杂质的粒径较小, 需要将其浓缩后才能除掉。埃肯公司使用的双级旋风预处理器是利用离心原理, 使一些粗的颗粒从烟气中分离出来, 既保证了微硅粉质量, 又保证风机不被粗颗粒磨损。

双级旋风式预处理器是由一个蜗壳形惯性分离器和一个“C”形除尘器组合而成, 其工作原理为含尘烟气以较高的流速由切线方向进入第 1 级蜗壳形惯性分离器, 尘粒在旋转气流的离心力作用下, 粉尘逐渐向壳体外缘分离, 在壳体外缘形成一个尘粒浓缩层, 烟气带着被浓缩的尘粒由分出口切向进入“C”形除尘器, 浓缩尘粒杂质在离心力作用下沿筒壁向下落到灰斗, 净化烟气在中心作螺旋上升运动, 烟流至排烟管后返回第 1 级惯性分离器, 与一级除尘器的净化烟气混合后排出。

双级旋风式除尘器如图 3 所示。

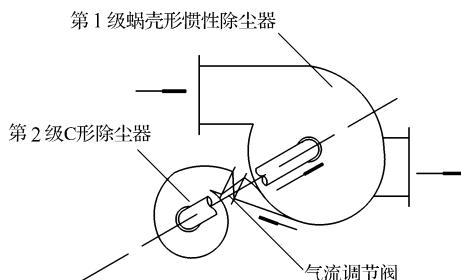


图 3 双级旋风式除尘器简图

Fig. 3 Sketch of double cyclone dust catcher

双级旋风式除尘器在硅铁电炉烟气预处理中具有如下优点:

(1) 利用第 1 级蜗壳形惯性除尘器将烟气中的粉尘杂质浓缩, 第 2 级将其去除, 为后续布袋除尘器回收微硅粉服务。

(2) 由于系统中设置气流调节阀, 可以通过调节进入 C 形除尘器的气流量来控制系统的除尘效率, 埃肯公司的工程实践证明, 将双级旋风除尘器的除尘效率控制在  $3\% \sim 5\%$  时, 布袋除尘器收集的微硅粉纯度最高。因此, 双级旋风除尘器具有调节除尘效率的优点。

### 3.4 袋式除尘器的特点

埃肯公司采用的正压内滤式袋式除尘器的结构如图 4 所示。

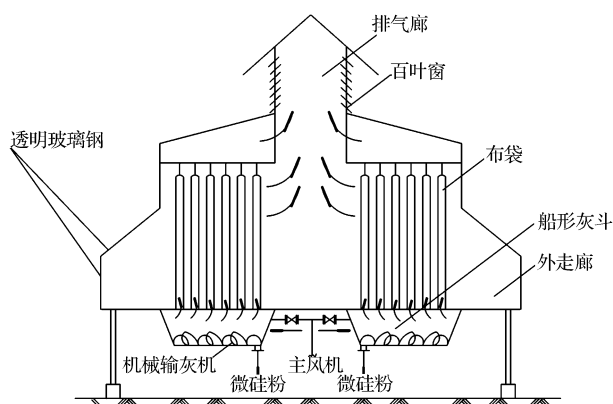


图4 正压内滤式袋式除尘器简图

Fig. 4 Sketch of positive pressure bag hose filter

埃肯公司采用正压内滤式袋式除尘器,采用双列分室组合的形式,中间进风,主风机把烟气鼓入袋式除尘器灰斗进入袋式除尘器,经过滤后的气体由袋式除尘器顶部排气廊排出,滤袋粘满灰尘需清灰时,关闭主风机,反吹风机从灰斗抽出气体使滤袋吸瘪达到清灰目的。与常规的袋式除尘器相比,埃肯公司使用的袋式除尘器具有如下特点:

(1)正压操作的袋式除尘器投资省、运行费用低。

袋式除尘器可采用正压或负压工作,中国腾达西北(集团)硅材料有限公司25 MVA电炉原来采用负压袋式除尘器,后来改为正压袋式除尘器,改造前后的除尘系统比较见表1。

表1 腾达西北(集团)硅材料有限公司25 MVA电炉袋式除尘器正压与负压工作除尘系统比较

Table 1 Comparison of 25 MVA electric cooker's bag hose filters working in positive pressure and negative pressure in Tengda Northwest Silicon Material Corporation

| 项目       | 系统风量<br>( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | 主风机配<br>电机功率<br>(kW) | 袋式除尘器<br>过滤面积<br>( $\text{m}^2$ ) | 袋式除尘器<br>单位过滤面积<br>耗钢量( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) |
|----------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| 正压袋式除尘器  | 320 000                           | 800                  | 6700                              | 30                                               |
| 负压袋式除尘器  | 360 000                           | 1000                 | 7500                              | 42                                               |
| 正压/负压(%) | 88.9                              | 80                   | 89                                | 71                                               |

从表1可以看出,正压操作袋式除尘器比负压袋式除尘器具有明显的优势,可不考虑袋式除尘器的漏风,风机风量可减少,电机功率可降低;袋式除尘器结构不要求密封,耗钢量少,造价低;系统布置灵活,可多台电炉共用1台袋式除尘器;由于除尘风

机安装在除尘器之前,袋式除尘器的滤袋起到了消声器的作用,使环境噪声比负压系统明显降低;除尘系统不需设置烟囱,烟气由排气廊通过百叶窗直接排放,使除尘系统投资降低。

(2)由于微硅粉在高温下流动性好,粒度细而软,对风机的磨损小,系统阻力低,风机能耗大大降低。

(3)滤袋材质采用戈尔覆膜滤料,除尘效率高,使用寿命可达4年以上。

(4)除尘器围护结构采用彩色瓦楞形钢板,在袋室外廊两侧用透明玻璃钢采光,便于除尘器内检修换袋工作。袋室外廊底部和顶部吊挂布袋层都做成格栅,不仅减轻了结构重量,而且有利于自然通风。

(5)除尘器清灰时,反吹风机从灰斗抽出气体使滤袋吸瘪达到清灰目的,反吹风机抽出的气体作为主风机进气的一部分,使抽吸气体在系统内部循环,保证排放烟气的含尘浓度不受清灰的影响。

(6)除尘器的灰斗为船形结构,底部设置机械输灰机(刮板输送机),利于微硅粉的清运。

#### 4 主要设备参数

(1) 烟气表面冷却器

传热系数  $35 \text{ kJ}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ , 进口管内流速  $22 \text{ m/s}$ 。

(2) 预处理器

惯性分离器筒体断面流速  $3.3 \text{ m/s}$ 。

(3) 风机

系统阻力  $4000 \text{ Pa}$ 。

(4) 袋式除尘器

过滤速度  $0.7 \text{ m}/\text{min}$ , 滤袋材质为戈尔覆膜, 单条滤袋的尺寸为  $\phi 0.3 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 。

#### 5 主要技术指标

以国内某冶炼厂硅铁电炉烟气除尘为例,达到的技术指标如下:

(1) 除尘效率:  $\eta > 99.4\%$

(2) 净化后烟气含尘量:  $< 20 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

双级旋风除尘器收下的粗烟尘成分及含量为  $\text{SiO}_2$  36.34%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  19.25%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  19.64%,  $\text{CaO}$  10.41%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.59%, C 0.20%, 其他 13.57%, 合计 100%

袋式除尘器收下的微硅粉成分及含量为  $\text{SiO}_2$

93.32% ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1.83% ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.87% ,  $\text{CaO}$  1.26% ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.07% ,  $\text{C}$  0.01% , 其他 1.63% , 合计 100% 。

## 6 结 论

(1)通过调查分析,认为利用表面冷却器、双级旋风预处理器和正压袋式除尘器处理硅铁电炉烟气,不仅净化后烟气的含尘浓度  $< 20 \text{ mg/Nm}^3$ ,而且通过回收微硅粉尘可以产生经济效益,该技术成熟可靠,目前全世界范围内约有 70 多套处理系统,国内使用该项技术的冶炼公司主要有腾达西北(集团)硅材料有限公司(青海)、贵州遵义铁合金(集团)有限公司、内蒙鄂尔多斯电力铁合金有限公司,该项技术在中国有广泛的应用前景。

(2)利用管内烟气流速为  $22 \text{ m/s}$  的 U 形管表面冷却器,由于微硅粉不会在管内集沉,因而不需设灰斗;由于系统的对流传热系数比普通的表面冷却器大 50% ~ 60% ,冷却管的表面积比普通的要小 50% ~ 60% ,所需的管径、长度和弯头数量大大减少,投资大幅度降低,而系统的阻力并未因管内烟气流速的增加而增加。

(3)利用双级旋风预处理器,不仅可以将烟气中的大颗粒粉尘和带火炭粒捕集下来,而且通过调

节两级除尘器之间的进口阀门调整预处理器的除尘效率,为后续袋式除尘器回收微硅粉创造有利条件。

(4)采用结构先进的正压袋式除尘器,不仅运行稳定可靠,而且投资省、运行费用低,由于滤袋具有吸音功能,且清灰时抽吸的气体在内部循环,故除尘器的噪声污染较小,操作环境好;由于袋式除尘器两侧走廊采用透明的玻璃钢材料,不仅采光效果好,而且有助于观察内部的运行情况;滤袋材质采用戈尔覆膜滤料,除尘效率高,使用寿命长达 4 年以上。

(5)回收的微硅粉尘具有广泛的应用前景,在实现粉尘的资源化方面具有重要意义,采用气体压缩加密或机械加密的形式将微硅粉加密,不仅减少微硅粉贮仓所需的体积,而且节约了运输成本。

## 参 考 文 献

- [1] 张云田,金雅玲.工业硅电炉的烟尘特性及其净化.轻金属,1994,(2):38~42
- [2] 吴向培.硅铁生产中烟气治理技术发展近况与最佳选择.青海环境,1996,(4):196~199
- [3] 张海燕.硅铁矿热炉烟尘的治理与回收利用.河南冶金,2002,5(52):20~22