

利用袋式除尘器烟气脱硫的试验研究

郭立新¹ 刘天元¹ 葛伟年² 赵国君³

(¹长春理工大学 ²吉林省环境监测中心站 ³长春市环境监测中心站)

摘要: 采用袋式除尘器进行烟气脱硫试验。阐述了利用袋式除尘器进行烟气脱硫的反应机理和脱硫过程, 并通过对锅炉烟气脱硫效率的试验数据的分析, 讨论了影响脱硫效率的因素。

关键字: 袋式除尘器 SO₂ 脱硫效率 烟气脱硫

我国 SO₂ 污染主要是由燃煤造成的。随着经济的发展, 能源的需求量将会增加, 而以煤炭为主的能源结构在相当长时间内不会改变, 由燃煤排放的 SO₂ 量将会增加。因此, 控制 SO₂ 的排放量已迫在眉睫^[1]。

目前烟气脱硫技术 (FGD) 主要分为湿法、干法、半干法。其中湿法脱硫效率高, 技术成熟, 但一次性投资高, 系统复杂, 适用于大型电厂; 干法烟气脱硫投资少, 但脱硫效率低, 稳定性不高, 设备寿命短, 维护困难; 半干法脱硫效率、投资和运行费用都易于接受, 且工艺稳定, 是一种值得深入研究、不断改进并大力推广的脱硫技术。喷雾

干燥法是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一种半干法脱硫工艺, 是目前市场份额仅次于湿钙法的烟气脱硫技术, 具有设备和操作简单, 可以使用碳钢作为结构材料, 不产生由微量金属元素污染的废水等优点。自从 20 世纪初国外进行喷雾干燥袋式除尘器脱硫装置中期试验获得成功之后, 利用袋式除尘器进行烟气脱硫进一步引起了人们的重视。

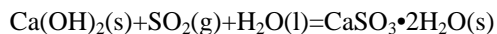
研究表明, 袋式除尘器在去除固体颗粒物的同时, 还可以除去烟气中的一部分 SO₂, 起到辅助脱硫的作用, 袋式除尘器中去除的 SO₂ 可占到 SO₂ 总去除率的 10% 左右。相关研究工作国内外正在进行小型试验。准确测

定袋式除尘器的脱硫效率及分析影响脱硫效率的因素可为利用袋式除尘器进行烟气脱硫的工业推广应用提供重要参考数据。

1 脱硫反应机理及试验装置

1.1 脱硫反应机理

半干法烟气脱硫的机理涉及传热、传质及化学反应过程，主要包括：（1）反应物 SO_2 从主流气体向颗粒表面的外部气相传质；（2）颗粒表面对 SO_2 的吸收溶解，形成 HSO_3^- 和 SO_3^{2-} 离子；（3） $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 颗粒在液相中溶解；（4）钙与硫的液相反应，亚硫酸盐的析出；（5）液滴中水分的蒸发^[2]。对于石灰喷雾干燥， SO_2 吸收的总反应为：



袋式除尘器被广泛用于捕集干化固体，其原因在于收集在滤袋表面的固体颗粒中未反应的碱类物质能够与烟气中的 SO_2 继续反

应^[3]。袋式除尘器的脱硫过程是： SO_2 被雾化的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆液或 Na_2CO_3 溶液吸收。同时，温度较高的烟气使液滴被干燥，形成了固体颗粒，其主要成分除了由煤燃烧产生的飞灰外，还含有硫酸钙、亚硫酸钙及过剩的氧化钙。其典型组成为：飞灰 64%~79%， $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 14%~24%， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.1%~4%， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1.2%~5%。

1.2 试验方法与条件

测定袋式除尘器的脱硫效率采用西安热工研究所研制的 R-DXL-1 型 SO_2 分析仪。烟气采样采用带过滤装置及电加热的采样管，以克服飞灰和烟气冷凝水对测试的影响。为了提高测试精度，必须做到进出口同步测试。

表 1（采样时间为 15 min）为对某厂逆气流清灰袋式除尘器脱硫效率试验的结果。试验期间，锅炉燃煤平均低位发热量为 13333 kJ/kg，平均含硫量为 0.79%，烟气平均含湿量 18.31%，袋式除尘器进口处烟气温度 433 K，出口处烟气温度 418 K，飞灰组成为：CaO 40.0%、 SiO_2 22.5%、 Fe_2O_3 10.5%、 Al_2O_3 12.5%、MgO 4.0%、 SO_3 3.0%。

表 1 袋式除尘器脱硫效率试验结果

序号	锅炉负荷 (t/h)	平均耗煤量 (t/h)	运行袋室数 (个)	过滤速度 (m/min)	压力损失 (Pa)	进气口 SO_2 (g/m^3)	排气口 SO_2 (g/m^3)	漏风率 (%)	脱硫效率 (%)
1	90	20.83	10	0.43	730	0.9712	0.8832	0.53	8.58
2	110	25.45	10	0.43	850	1.9866	1.7822	1.20	9.21
3	120	27.78	10	0.45	1040	2.0202	1.7650	3.16	9.87
4	130	30.09	10	0.46	1080	2.9534	2.5427	3.49	10.90
5	120	27.78	8	0.55	1100	1.6488	1.4967	0.97	8.34

2 试验结果分析

2.1 飞灰成分对脱硫效率的影响

由于飞灰中 CaO 含量高达 40%，当烟气以约 0.5 m/min 的过滤速度通过滤袋上粉尘层时，可以脱除烟气中的一部分 SO₂，脱硫效率为 8%~10%。对于 CaO 含量少的飞灰，袋式除尘器脱硫效率较低，而且很难测定。但是若和旋转喷雾干燥脱硫装置相连接，由于飞灰中碱性氧化物增多，脱硫效率还会有所提高。

2.2 粉尘层厚度对脱硫效率的影响

脱硫效率与滤袋上积存的粉尘层厚度有关。粉尘颗粒由于截留、惯性碰撞、静电、扩散作用，在滤袋表面形成粉尘初层，具有良好的阻力特性。比较 1 号与 2 号试验，过滤速度基本一样，但 2 号试验锅炉负荷增加，耗煤量相应增多，滤袋上积存的粉尘层也较厚，除尘器的过滤阻力由 730 Pa 增加到 850 Pa。测定结果脱硫效率 1 号试验为 8.58%，而 2 号试验上升至 9.21%。因此，在过滤速度相同的情况下，增加滤料上积存的粉尘层厚度，可以提高袋式除尘器的脱硫效率。

2.3 过滤速度对脱硫效率的影响

从表 1 试验数据中可以看出，脱硫效率与袋式除尘器的过滤速度有关。比较 3 号与 5 号试验，同样在 120 t/h 负荷下，3 号试验 10 个袋室运行，过滤速度为 0.45 m/min，脱

硫效率为 9.87%；5 号试验关闭了 2 个袋室，仅 8 个袋室运行，过滤速度为 0.55 m/min，脱硫效率为 8.34%。因此，为了保证一定的脱硫效率，应保持袋式除尘器在较低的过滤速度下运行。

3 结论

本研究利用袋式除尘器进行烟气脱硫试验，试验结果表明，袋式除尘器在去除粉尘的同时，收集在滤袋表面的固体颗粒中未反应的碱类物质能够与烟气中的 SO₂ 继续反应，可以脱除烟气中的一部分 SO₂，脱硫效率一般为 8%~10%，其脱硫效率与过滤速度、过滤阻力、过滤材料种类、飞灰组成和烟气湿度等因素有关，应进一步试验以确定其运行性能，使其最佳化。

参考文献

- 1 郭立新, 刘天元. 对在我国实施清洁生产必要性的几点认识. 长春理工大学学报, 2004, 17(1): 8~110
- 2 郝吉明. 大气污染控制工程. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002. 329~334
- 3 蒲恩奇. 大气污染治理工程. 北京: 高等教育出版社, 1999. 222~223

电弧炉袋式除尘器自动控制系统

孟德霞¹, 王庚²

(¹唐山钢铁公司四轧厂 ²唐山创元方大电气有限责任公司)

摘要:文中简要介绍了唐钢电炉袋式除尘器的结构,分析了变频调速的原理及可行性。提出了为节约电能,提高除尘效果,混风降温、喷雾降温的自组织微分先行PID控制思想及策略。

关键词: 电弧炉;袋式除尘器;负压;变频调速;自组织;微分先行PID

1 引言

随着社会的发展,循环到炼钢业的废钢量在逐年递增,电弧炉炼钢做为冶金业获得高品质用钢的重要手段必将得到大的发展。人们对环保要求越来越高,加强电弧炉的除尘环保研究,提高除尘效率,改善除尘效果,有其现实意义。

炼钢电弧炉的排烟方式主要有炉外、炉内和炉内外结合三种。烟尘净化设备国内外都采用袋式除尘器。国内对除尘器大多采用仪表检测显示负压、差压、电压、电流等参数,实施系统控制的不多见。

唐钢电炉炼钢厂电弧炉采用布袋式、伞形罩式炉外排烟除尘器,具体结构如图1所示

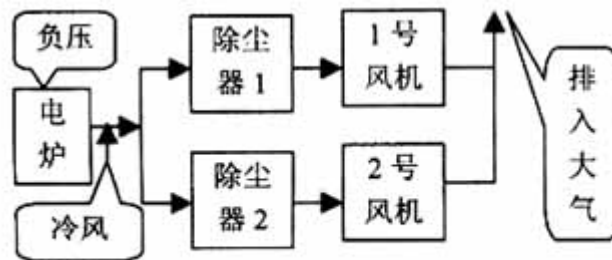


图1 除尘器构成示意图

目前1、2号除尘风机由130KW鼠笼式三相异步电动机驱动,开壹备壹。烟气大、温度高时,炉前有逸烟现象,说明负压不够,一个风机功率此时不足;冷风混入量不足致使进入布袋的烟气温度过高,将布袋烧坏的现象时有发生。而开两个风机功率过剩,浪费电能,排入大气的粉尘含量也会增高。不利于节能和环保!

2 实施自动控制系统的任务与目的

- (1)解决炉前逸烟问题;
- (2)解决布袋烧坏的问题;
- (3)解决开两个风机功率过剩的问题;
- (4)以最低的能源消耗达到最佳的除尘效果;
- (5)全面实现除尘系统的自动运行。

3 风机实施变频调速的可行性

3.1 风机变频调速的节能分析

从流体力学知道,风量与转速的一次方成正比,风压与转速的二次方成正比,轴功率与转速的三次方成正比。由此可见,通过调节风机转速来调节风量,其所需功率成三次方关系变化。例如风量只需80%时,电机的转速降到80%,这时的电机轴功率降到 $(80\%)^3=51\%$,和全速运行相比节电49%。

如果设一号风机全速运行时的引风量为A,功率为B;那么一、二号两台风机全速运行时的引风量则为2A,功率为2B。当调节两台风机使其引风量各为0.5A,而总引风量仍为A时,电能消耗为 $0.5^3B*2=0.25B$,也就是说,这时两台风机同时运行的总引风量与一台全速运行时的引风量相等,而电能消耗只有一台电能消耗的25%,节电75%!

通过以上分析可知,两台除尘器并列运行,并将引风机实施变频调速控制,系统有

两倍 (2A) 的风量调节冗余度, 足以保证有足够的负压使烟尘不外逸, 当烟气温度高时可以混入冷风, 过高时喷入少量的水雾, 防止布袋烧坏, 并以最低的电能消耗实现最佳的除尘效果。

3. 2 风机变频调速的应用分析:

(1) 变频调速的原理

电动机的同步转速与电源频率成正比, 而异步电动机的转速又总是略低于同步转速, 因而提高频率可使转速升高, 降低频率可使转速降低, 连续地改变频率可以实现无级调速。

(2) 变频调速的方法

变频调速可分为恒转矩、恒功率、保持过载能力不变 3 种调速方法, 而风机为恒转矩负载, 故采用恒转矩调速。恒转矩意味着变频前后电机的电磁转矩不变, 既

$$M = C_m \varphi_m I_2 \cos \varphi_2 = const$$

故 $I_2 \cos \varphi_2$ 和 φ_m 都应保持不变。由电势平衡方程式:

$$U_{1N} \approx E_{1N} = 4.44 f K_w W_1 \varphi_m \text{ 可得}$$

$$\varphi_m \propto U_{1N} / f$$

要保持 φ_m 不变, 当频率由 f 变为 f' , 电源电压不再是 U_{1N} 。而应是 U_1 , U_1 随 f' 变化的关系是

$$U_{1N}/f = U_1/f'$$

式中 f 、 U_{1N} 是额定频率和额定电压。为保持调频时电动机的最大转矩不降低, 不减少过载能力, 可按公式 $U_1 = U_{1N} f' / f$ 将 U_1 提高

一点, 既将 f' 提高一点。

根据理论分析, 变频调速的调速范围大, 稳定性好, 变频时机械特性硬度不变。另外应注意, 频率 f' 高于额定频率 f 时, 适用于恒功率调速, 频率 f' 低于额定频率 f 时, 适用于恒转矩调速, 当应用于风机调速时, 一般使频率 f' 低于额定频率 f , 属恒转矩调速。

通过以上的分析可知, 对除尘器风机实施调速, 理论上和技术上可行, 并有显著的节电效果。

4 主要控制思想及策略

为了实现控制目标, 对两台除尘风机实施并列变频调速运行, 控制冷风混入量, 降低进入除尘器的烟尘温度。当温度过高, 混入冷风不能达到要求时, 适当喷入水雾用以降低烟尘温度, 充分保障布袋不被烧坏。我们在电弧炉控制系统中采用变频微分先行 PID 控制技术。并在其中加入自组织环节以弥补简单 PID 控制的控制规则和参数调定能力的不足。它能自动在运行中调定参数, 改善系统品质和性能, 系统的稳定性和控制效果将大大提高。

4. 1 自组织微分先行 PID 调节器

既保证除尘效果又节约电能, 就应通过变频器调节风机的转速跟随生产过程的变化 (为了便于测量和防止烟气外逸, 调节风机转速控制负压 P), 为此我们设计了自组织微分先行 PID 调节器, 如图 2:

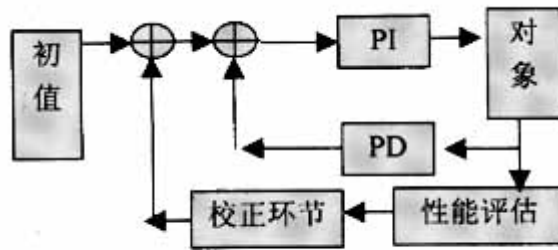


图2 自组织微分先行PID调节器结构

自组织系统由性能评估环节和校正环节组成。通过对温度传感器信号、流量信号、光纤灰尘传感器信号、负压变送器信号等进行综合判定后，给出校正指令。

4. 2 调速性能的评估和校正

随着生产过程的进行，烟尘量、烟尘温度不断变化。烟尘进口负压P随之变化(高温时气体膨胀系数加大)。如果系统不能适应这

种变化，保持负压给定值不变，则烟尘会外逸，达不到预期的效果。温度T和负压P成非线性关系，根据极限理论，在某温度点T附近有温度变化量与负压变化量的关系为 $\Delta t = k \Delta P$ ，k为常数。在保持风机转数不变的情况下，使温度改变 $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ ，再测得负压变化量 Δp ，可得常数k的值。

温度点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	...	T _n
对应k值	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	...	K _n

根据上表可以确定出K_n值，则负压给定值的变化量为

$$\Delta P = (t_n - t_{n-1}) / K_n$$

4. 3 除尘效果的评估与喷水量的控制

控制除尘器不仅要节能，还应尽可能地降低由排风机排入大气的烟气中的粉尘含量，使除尘效果最佳。进入布袋的烟气温度亦不能太高，以防止布袋烧坏。当烟尘温度过高时，适量喷入水雾，使水颗粒和烟尘颗粒碰撞、增湿凝聚、降温增体，对提高除尘效果十分有利。经研究发现，加大喷水量Q1能提高除尘效果且能降温，而大的喷水量不仅浪费水资源，还会增大系统阻力，从而降

低布袋的透气性，影响除尘效果。喷水量的适度非常重要。

温度T和喷水量Q1成非线性函数关系。根据极限理论，在某温度点T附近有温度变化量与喷水量Q1变化量的关系为

$$\Delta Q1 = Q1_k \Delta T, \quad Q1_k \text{ 为常数, 可在现场调出。}$$

在某温度点T，保持风机转数不变的情况下，使温度改变 $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ 调节Q1使排入大气的烟气粉尘含量H最低，再测得Q1变化量 $\Delta Q1$ ，可得常数Q1 K的值。

Q1_k对于不同的温度点则有下表对应关系存在：

温度点	T1	T2	T3	T4	...	Tn
对应 Q _k 值	Q _{k1}	Q _{k2}	Q _{k3}	Q _{k4}	...	Q _{kn}

由上表可以得出喷水量的控制给定值的变化量为:

$$\Delta Q1 = Q1_{kn} (t_n - t_{n-1}) + M(H_N - H_{N-1})$$

在这里 H 为光纤烟尘传感器测得的烟尘含量, M 为系数, 由现场调试获得。

5 结论

除尘风机应用变频调速改善了风机的启动性能, 延长了电机的使用寿命, 减少了系统机械故障, 平均可节约电能 70% 以上。

除尘系统的全面自动控制稳定了除尘布

袋内外的压差, 降低了烟尘颗粒穿透布袋的能力, 提高了除尘效果。降低了烟尘温度, 烧布袋现象不再发生。

总之系统的经济效益和社会效益可观, 值得推广应用。

参考文献:

[1] 冶金工业部能源办公室编 [R]. 《钢铁企业节电经验》

[2] 吴勤勤主编. 控制仪表及装置 [M]. 化学工业出版社

袋式除尘设备常见问题解答

1. 怎样才是一台高质量、运行良好的除尘器?

过滤后的烟气必须根据除尘器的设计要求达到国家排放浓度标准; 除尘器运行阻力一般保持在 150Pa 以下; 滤料工作寿命达到 2 年以上; 清灰系统的电磁脉冲阀工作寿命达到 5 年 10 万次喷吹。

2. 高质量的除尘器需具备哪些关键部分?

耐压能力强; 喷吹气量大; 隔膜材料耐用; 产品质量统一性高, 能够把有效的清灰压力喷吹到长袋袋底(特别是 6 米以上长滤袋)的电磁脉冲阀。

用透气性能好、耐腐蚀、耐磨损、适合现场工艺要求(例如: 温度、化学侵蚀等)的

滤料, 以高质量缝制技术加工而成的滤袋。

能够满足喷吹效果的大容量、高压力气包、且配置了压力表和全自动排污阀的气包。

操作简易, 使现场负责人能够快速根据工艺需要修改喷吹参数的清灰控制系统(例如单片机和 PLC 等)。控制系统需要配备在线阻力压差、入口温度、喷吹时间, 以及排放浓度等参数和报警线的显示与记录系统。

3. 导致袋式除尘器失败的主要原因有几种?

最普遍的原因, 就是清灰系统失效: 即喷吹进滤袋的压缩气清灰力量不能有效地把粘附在滤料上的灰尘打掉, 使除尘器的阻力升高, 滤料糊袋。而令清灰系统失效的最主

要原因，就是电磁脉冲阀的质量问题。

其他原因包括滤料选用不恰当或加工质量差：产生水解、酸解、温度过高、覆膜剥落、滤袋破裂等现象；入口烟气浓度、露点、花板的开孔间距、布管途径没有控制好；壳体和灰斗的设计和制造工艺不佳，产生漏气等现象。

缺乏设备运作阶段的维护管理。

4. 如何选择高质量的电磁脉冲阀？

选择全进口的高质量品牌：电磁脉冲阀乃是除尘设备的核心，其总价格是脉冲喷吹除尘器的总体价格的5%左右；是气箱脉冲除尘器的1%造价，选用最高质量的进口脉冲阀，比选用国产阀的设备总造价只是增加1~2%。所以在脉冲阀上节省设备成本而承担整个除尘系统失效的风险是最不值得的。

选择具有长远历史的阀门制造厂：阀门制造厂家必须具有10年以上的生产历史和运行成功的案例，这样才能保证脉冲电磁阀产品拥有完善的质量保证体系，真正达到喷吹10万次5年免检。

选择5年免费保修期：脉冲阀的实验动作次数不足以说明阀门质量高低，膜片必须经过年限的自然老化因素考验。所以阀门供应商必须提供隔膜和电磁线圈的免费质保年限，一般为5年。

选择具有实际喷吹气量的脉冲阀而不仅仅是连接口径尺寸：脉冲阀的接口尺寸，往往不能判断其清灰功能。有些脉冲阀的设计采用小直径膜片，但只是把接口增大。比如：应用2"的阀门膜片安装在2 1/2"接口的阀门壳体中。这样会使阀门的喷吹气量不足导致清灰系统不佳。

选择高中低压力范围都能够适用的脉冲阀：脉冲阀的耐压范围至少需要达到1~8kg/cm²。这样如果在应用过程中滤料的阻力

随着时间而增高时，可以通过调整气包压力来保持除尘器良好的运行阻力，保证滤料不会糊袋。

选择脉冲阀的生产质量统一性：阀门的制造，必须是采用配备机器人和CNC中心的全自动生产线，杜绝由于人为加工所引起的生产质量不统一。在一个清灰系统上，往往会由于一只阀门的漏气而导致整个系统的瘫痪。

选择低阻力脉冲阀：脉冲阀的内部结构需要保证喷吹气量大，膜片行程长，壳体内结构根据流体力学设计使阀门阻力小。由于阀体的设计不当，有些3"接口的阀门喷吹气量仅能达到1"2接口的阀门喷吹气量。选用低阻力、高喷吹量的脉冲阀则每个阀门可以清灰更大面积的滤料，大大节省喷吹系统的总体造价。由于阀门数量的减少，除尘器的运作和维护费用也相应降低。

5. 如果电磁脉冲阀选择不当，将会引起什么后果？

劣质的脉冲阀膜片使除尘器整体失效：因为一个阀门膜片破裂，会导致整个气包压力大幅降低并且气量不足，使气包上的其他阀门不能正常喷吹。除尘器的清灰不良，会产生局部糊袋现象，除尘器气布比提高，运行阻力增加，加速缩短滤料的工作寿命。

劣质的脉冲阀膜片增加设备检修和维护难度：当小部分阀门膜片破裂时，现场工作人员难以判断故障原因，在上百个阀中找出膜片发生破裂的阀门，需要花费大量时间对阀门逐个进行检查。

劣质的脉冲阀膜片严重影响生产运作：当阀门发生故障时，经常需要停止整个过滤箱体或者依靠旁通排气方法才能进行检修工作，有时甚至还要停止整个除尘系统甚至整条生产线进行事故检修，严重影响企业的正

常生产，污染现场工业环境。除尘系统的经常性失效，也可能导致企业受到当地环保执法部门的处分、罚款甚至停顿或关闭。

清灰系统不良增加运行费用：由于清灰效果差，除尘系统的压差阻力过高，风机运行超负荷，能源损耗增大；由于清灰力度不够，导致糊袋现象，滤袋使用寿命缩短，使整台除尘器的除尘效率降低；由于需要经常

更换膜片，工厂必须把膜片当成易耗品大量库存备件，并且经常性地花费大量的人力物力更换膜片，不利于企业控制生产成本和提高生产效益。

清灰系统不良可能会引起安全事故：如果烟气中含有易燃易爆气体，再加上滤料的阻力增大，可能会导致重大危险事故的发生。

中国袋滤技术通讯编辑部

地址：沈阳 东北大学 265 信箱（滤料检测中心）

邮编：110004 电话：(024) 83688327, 23915302 Email: merryshenyang@yahoo.com.cn