

脉冲袋除尘器在水泥窑尾上的应用分析

吴军平

摘要：本分主要通过对比分析，总结出脉冲袋除尘器的性能优势，在此基础上，重点就滤料的选择与成本分析，过滤风速的控制以及应用经验和结构优化等方面进行了一一介绍和总结比较。

关键词：脉冲袋除尘，滤料，过滤风速，滤袋价格，使用寿命，覆膜玻纤，P84，Nomex，经济效益，成本，能耗，检漏，系统优化

多年以来，静电除尘和反吹风袋除尘被广泛用于水泥窑尾的粉尘收集。静电除尘由于其在高温气体和含尘浓度较高时的可靠性而被广泛应用，然而其性能易受生产的影响。当烟气工况（比如温度或湿度）发生变化，或者粉尘的性质发生改变时，除尘效率都会受到明显的影响，因此生料磨开启或关闭期间，易导致粉尘高排放。反吹风袋除尘器属于弱清灰，其设计风速受到一定的限制，因此初期投资比较高；同时反吹风除尘器必须离线清灰，这会引入系统压差的波动，运行参数（窑内压力变化，CO和NO_x的生成）难以依靠引风机的调节来稳定。

脉冲袋除尘器的排放不受生产变化而波动，同时可以在线清灰。在上世纪90年代初，即使脉冲袋除尘器在其它领域的应用已经被认可，水泥生产厂还是很难接受用脉冲袋除尘器来处理窑尾烟气。困难在于Nomex滤袋和普通玻纤滤袋80年代中期刚开始在窑尾上应用时，这两者的使用寿命都很短。Nomex滤袋被水解，且受到了酸腐蚀，普通玻纤滤袋很快被堵了。这都导致了人们对脉冲袋除尘器的可靠性产生怀疑，压差高影响了窑的产能，滤袋寿命短停窑频繁，维护费用高。不难看出当时采用脉冲袋除尘器来处理水泥窑尾烟气没有被认可，究其原因还是在于滤料性能的限制，由此也使得脉冲袋除尘器一直没有得到积极有效的推广。因此滤料的发展将直接影响着处理水泥窑尾烟气是否可以采用脉冲袋除尘器。

复合的解决办法，使用ePTFE覆膜玻纤织物脉冲袋除尘技术。以美国戈尔公司为主导的覆膜玻纤滤袋在窑尾上的应用很快就被认可，使用覆膜玻纤织物，持续耐高温达到260°C，可以抗氧化，抗水解。而且ePTFE覆膜有效的消除了滤袋被堵的问题（ePTFE薄膜微孔表面过滤技术）。

早在1995年在美国Paulding的Lafarge工厂的两个湿法窑，使用Gore[®]覆膜Superflex滤袋，滤袋的使用超乎当时的预期，使用了7年。在北美陆续有15台除尘器使用了Gore[®]覆膜玻纤织物滤袋，包括4个Lafarge在北美的工厂。

1996年，国内首次在窑尾使用袋式除尘，当时使用的是玻纤大布袋。几年后陆续有些窑尾使用低压长袋脉冲袋式除尘，以进口覆膜玻纤滤料为主，由于使用效果绝大部分比较令人满意，因此逐渐被推广。近年来其应用技术也越来越成熟，出现了一批整体工艺线采用覆膜玻纤脉冲袋式除尘器的大型水泥企业。

1. 脉冲袋除尘器的优势

脉冲袋除尘器由多个独立的袋室组成，含尘气体经过滤袋过滤后，粉尘被阻留在滤袋外侧，净化后的气体由滤袋内部进入净气后室排入大气。随着滤袋外侧所附积的粉尘不断增加，电磁脉冲阀打开释放一定量的高压压缩空气向袋内喷射实现清

灰。脉冲清灰逐行进行，可以在线或离线操作；其清灰属于强清灰，因此在选择过滤风速时比反吹风袋除尘器更有优势。而覆膜滤料应用技术的日益成熟，使得其粉尘排放和系统阻力都可以控制在极低的范围以内。

脉冲袋除尘器用于水泥窑尾的优势主要有：

- 初期投资低：
 - 脉冲袋除尘器约为反吹风袋除尘器的 85%；
 - 相对于排放 30mg/Nm³ 的静电除尘器，脉冲袋除尘器的投资约 90%；
- 粉尘排放可以控制在 5—10mg/Nm³ 以下；
- 不受气体性能的波动的影响；
- 可以在线清灰，对窑内压力稳定起到了至关重要的作用。

2. 滤料的选择

烟气中的含水量，酸性气体的含量，以及气体的温度，多方面制约着水泥窑尾滤料的选择。当然滤料的价格差异和性能，在不同地域会有所不同。各滤料的市场及应用情况见表 1。

2.1 在北美洲

在北美洲有超过 90% 的窑尾脉冲袋除尘器使用 ePTFE 覆膜玻纤织物滤料，此滤料应用于水泥窑尾的主要优势有以下几方面：

- 使用温度可以达到 260°C，瞬间耐温 288°C；
- 使用 ePTFE 多微孔薄膜的表面过滤技术，可以有效防止滤袋被堵，薄膜表面光滑，易于在线清灰；
- 抗氧化，抗酸，抗水解；

然而此滤料也有其缺点，耐磨性能稍逊，常常要求袋笼竖筋较多来保证对滤袋有较好的支撑。

这种滤料的期望寿命在 3-6 年。失效主要为袋笼质量问题，毛刺多等导致其磨损，或喷吹管偏斜，除尘器结构与滤袋碰擦。也有少数失效源于脉冲过于频繁。ePTFE 覆膜玻纤织物滤袋的脉冲次数约为 10 万次。当然这与各滤料厂商对玻纤纤维的后处理性能密切相关。对于美国戈尔公司的 ePTFE 覆膜玻纤织物滤料，人们往往只认识到其薄膜以及覆膜技术的优异，而忽视其对玻纤纤维的后处理技术也是处于绝对领先的地步，这样才有效的保证了其数十年在海内外的成功应用。

表 1：滤料的选择

滤料	滤袋		适用温度	预期排放	预期滤袋寿命	备注
	北美 US\$/m ²	中国 RMB/m ²	°C	mg/Nm ³	年	
ePTFE 覆膜玻纤织物	45-50	280	260	5-10	3-6	耐磨性能稍逊
P-84 毡料	42-47	370	235	10-15	3-4	易受 NO ₂ 的侵蚀，高温下易水解
Nomex 毡料	—	200	200	20-30	2	易水解

2.2 在欧洲

在欧洲玻纤织物滤料比美国价格要高出许多，因此接近有一半的窑尾使用毡料，而最常用的毡料为 P-84，其瞬间耐温为 260°C。

毡料的抗弯折性能相对较好（可以使用 10~12 根竖筋的袋笼），反面被污染影响也不会太大。但是作为很容易受到化学腐蚀的 P-84 毡料，烟气的成分需要特别关注，NO₂ 的含量对其很敏感。在湿度 20% 的时候使用温度不可以超过 200°C。对于预分解窑/生料磨除尘，在磨机停机的时候，烟气温度不可以超过 220°C，哪怕是磨机停机的时间仅仅为 10%。

其它滤料（如：亚克力，PPS，Nomex 等）在欧洲也有应用，但是极少。

2.3 在国内

目前以使用覆膜玻纤滤料为主。从美国进口的覆膜玻纤滤料，与从欧洲进口的 P-84 滤料相比较，覆膜玻纤滤料其表面过滤的优势比较明显，另外 P-84 滤料的价格相对高出不少，P-84 相对耐磨些，但易受 NO₂ 的侵蚀，这些都会是用户选择滤料必然会考虑的因素。

3. 过滤风速的选择

经过滤袋的压降主要由以下因素决定：

$$\text{滤袋压差} = \text{滤料阻力系数压差} + \text{粉饼压差}$$
$$= (K_1 \times V) + (K_2 \times C \times V^2 \times T / 2)$$

V = 过滤风速；

C = 粉尘浓度；

T = 两次清灰之间的时间间隔；

K₁ = 阻力系数（与滤料的透气性，脉冲清灰的效果和频率有关）在滤料的整个使用周期中，普通滤料一般上升比较快，而覆膜滤料能基本保持在较低定值，或者说上升很慢。

K₂ = 与粉饼的空隙率及粉尘的粗细相关。

对于新的滤袋，阻力系数较低，允许建立较厚的粉饼（因此可以设定更长的清灰周期）。对于使用了一定年限的滤袋，阻力系数将有所升高，为了达到固定的压降，只能允许较薄的粉饼存在，因此脉冲频率将会增加，为了防止过于频繁的脉冲对滤袋造成损伤，有时将花板上下的压差设定升高。

需要附注说明的是，滤料的阻力系数，是指过滤压差与过滤风速的比值，对于普通非覆膜滤料来说，初始阻力系数较低，但是随着粉尘逐步渗入滤料内部，其阻力系数急速上升。而对于覆膜滤料，由于粉尘无法进入滤料内部，薄膜表面极光滑易于清灰，因此其阻力系数在滤料的整个使用周期中可以始终维持在比低的定值。

由上面的计算公式可以看出，过滤风速对于花板上下的压差（风机能耗）起决定性因素，同时也决定了滤袋的寿命（低过滤风速将允许更长的清灰周期）。

对于使用覆膜滤料的脉冲袋除尘器来处理水泥窑尾烟气时，推荐过滤风速的选择如表 2：

表 2: 过滤风速的选择

应用	过滤风速	滤袋的期望寿命	花板上下压差 (滤袋寿命结束时)
	m/min	年	mm 水柱
3 风机系统, 预热窑/生料磨 粉尘浓度 $C=70\text{g/m}^3$	0.9	6	150
	1.0	5	160
	1.1	4	175
	1.2	4	150
2 风机系统, 预热窑/生料磨 粉尘浓度 $C=350\text{g/m}^3$	0.85	4	175

4. 使用周期成本分析:

系统运行的好坏, 直接关乎窑的烧成质量。而对于系统来说, 其运行成本当然也是其经济效益的主要方面, 下面以 5000T/D 生产线窑尾烟气除尘器为案例作一个简单的分析。分别将使用国产普通滤料, P-84 滤料, 戈尔覆膜玻纤滤料的运行状况以及经济效益作一简单的比较, 如表 3。

表 3: 不同滤料的经济效益分析

项 目		使用条件		
处理风量	Am^3/hr	900'000		
滤袋规格	mm	$\phi 160 \times 6000$		
入口含尘浓度	g/m^3	~80		
分隔室数	室	24		
滤袋总数量	条	4608		
过滤风速	m/min	1.1		
过滤面积	m^2	13'890		
滤料材质		国产普通滤料	P-84 滤料	戈尔覆膜玻纤
允许入口温度	$^{\circ}\text{C}$	< 200	< 235	< 260
出口含尘浓度	mg/m^3	< 50	< 50	< 20
脉冲清灰压力	Kg/cm^2	6.0	6.0	2.0~4.0
过滤压降	Pa	2300	2200	1500
使用寿命	年	1	3	4
滤袋总价	万元	208	514	389
滤袋年运行费用	万元/年	208	171	97
风机年能耗差异*	万元/年	+90	+79	+0

$$* \text{风机年能耗差异} = \frac{\text{压降差异}(\text{Pa}) \times \text{风量}(\text{Am}^3/\text{hr}) \times \text{年运行时间 } 7200\text{hr} \times \text{电价 } 0.5/\text{kwh}}{1000 \times 3600 \times \text{系统效率 } 0.8}$$

当然以上并没有将一些其它相关费用差异全部列举, 其中压缩空气的消耗也是差异比较明显, 粉尘的排放影响环保而额外发生的费用, 粉尘排放对于产量减少

的影响，当前我国水泥工业的粉尘散失量超过水泥总产量的 0.5%。另一方面，由于滤袋更换周期短，滤袋破损停窑频繁，直接造成的经济损失更是难以估计。因此选择合适的滤料对于系统运行的稳定，以及运行成本的控制都非常重要。

5. 使用经验总结及系统结构优化

5.1 防腐保护

对于除尘室，大量的粉尘粘附于箱体壁板上，对于烟气中的大量水气而带来的腐蚀，起到很好的保护作用。但是在净气室，如果箱体壁板的表面凝结水气，就会发生腐蚀现象。对于预热窑/生料磨除尘器来说，推荐在静气室箱体壁板表面使用特殊耐高温防锈漆。

5.2 滤袋检漏与脉冲喷吹

一个较大的水泥窑尾脉冲喷吹布袋可能超过 5000 只，早期检查出破损的滤袋非常重要，可以防止粉尘进入滤袋的反面，造成滤袋堵塞，阻力上升。基于此，在出口管道安装一种高灵敏度的粉尘在线检测器将很有帮助。每一次脉冲后，检测器将检测到总体排放的一次小小的波动，如果波动异常，表明为可能存在泄漏的区域。当检测器与脉冲喷吹 PLC 控制器关联，将很容易发现哪一行滤袋泄漏。首先，可以将这一行的脉冲喷吹关闭，防止继续损坏滤袋，然后将这个室关闭，冷却后将破损的滤袋更换。

5.3 喷吹系统的优化

对于脉冲袋式除尘器的喷吹系统，除了气包、脉冲阀、喷吹管等先天设计没有缺陷以外。喷吹压力、喷吹间隔以及脉冲阀的开启时间都直接影响系统运行的好坏，而且也关系滤袋使用寿命等。对于覆膜玻纤滤袋，由于薄膜表面光滑易清灰，只需要很低的喷吹压力完全可以达到较好的清灰效果，这样一方面延长了滤袋的使用寿命，同时也大大节约了压缩空气的消耗。而对于针刺毡非覆膜滤袋，由于清灰比较不易，因此需要较高的喷吹压力才能实现系统的正常运行，负面的影响就是滤袋寿命缩短，并且压缩空气消耗较多。

5.4 气流量监测

大部分脉冲袋除尘器清灰程序依据进出口压差来调节，然而对于一座现代化的预热窑/生料磨除尘器，气流量变化常常与生料磨/煤磨是否开机有关。当气流量减少，调节压差应适当的减少。在这些过程中，为避免在滤袋上生成很厚的粉饼，有必要实行每小时一到两次脉冲清灰，这样会避免当除尘系统恢复高气流量时压差过高。入口气流监测有助于在不同的状态下调节清灰周期。

6. 结束语

通过脉冲袋除尘器的过去 10 多年的应用经验证明，在水泥窑尾上的应用，如果选择了合适的滤料，其应用是相当可靠的。同时正确认识除尘器，以及其作为关键生产设备的选择是非常重要的。因此，对于老的小型窑采用脉冲袋除尘器改造时，使用覆膜玻纤滤料，过滤风速选择 1.2m/min 是合适的。而对于新建的大型预热窑/生料磨建议选择过滤风速 1~1.1m/min，在这种状况下，额外的投资是有必要的，这有利于减少其在正常的使用周期的运行费用。同时对于将来增加产能留有一定的空间。

参考文献:

1. 袋式除尘器在水泥工业窑尾的应用与发展, 肖容绪, 中国环境保护产业协会袋式除尘委员会;
2. Pulse-jet fabric filters, Bernard Cloutier, Solios Environment Inc.。