

- [12] Hooftman, R. N., *Mutat. Res.*, **91**, 347, (1981).
- [13] Hooftman, R. N. and G. J. Vink, *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **5**, 261, (1981).
- [14] Kligerman, A. D., *Mutagenicity New Horizons in Genetic Toxicology*, 435, in: J. H. Heddle (Ed.), Academic Press, New York, (1982).
- [15] Krishnaja, A. P. and M. S. Rege, *Mutat. Res.*, **102**, 71, (1982).
- [16] Manna, G. K., *Nucleus*, **27**, 203 (1984).
- [17] Hooftman, R. N. and W. K. de Raat, *Mutat. Res.*, **104**, 147, (1982).
- [18] Zhang, C. J. et al., *Mutation, Cancer and Malformation*, 814, in: A. H. Y. Chu and W. M. Gene-roso (Eds.), Plenum, New York, (1984).
- [19] Manna, G. K. et al., *Nucleus*, **28**, 176, (1985).
- [20] Das, R. K. and N. K. Nanda, *Mutat. Res.*, **175**, 67, (1986).
- [21] Siboulet, R. et al., *Mutat. Res.*, **125**, 275, (1984).
- [22] Grinfeld, S. et al., *Environ. Mutagen.*, **8**(1), 41, (1986).
- [23] Jaylet, A. et al., *Mutagenesis*, **1**, 211, (1986).
- [24] Jaylet, A. et al., *Mutat. Res.*, **164**, 245, (1986).
- [25] Ma, T. H., et al., *Mutat. Res.*, **138**, 157, (1984).
- [26] Degrassi, F. et al., *Mutat. Res.*, **85**, 245, (1981).

(收稿日期: 1988年3月17日)

改进电除尘器性能的新技术 ——第三届电除尘国际会议论文综述

俞 寿 成

(诸暨净化设备厂)

1987年10月在意大利阿伯诺(Abano)召开了第三届电除尘国际会议。共交流论文107篇。主要议题有:电除尘技术的基础研究和物理现象;不同供电方式对电除尘器性能的改进,尤其是脉冲供电和间隙供电在实验室和工业应用中取得的巨大成功;电除尘器作为一种有效的环保设备装置,在大气污染控制中的广泛应用;近年来在气流分布、选型、设计等方面的最新发展以及在克服反电晕现象,改进电除尘性能方面各种尝试的最新结果等等。基本上反映了当前国际上电除尘技术研究和发展的概况。

随着排放标准的不断提高或者由于燃料特性的改变,六七十年代甚至于八十年代初期投运的电除尘器要求改造的情况越来越普遍,用增加电场或扩大电除尘器容积的做法是以前较常采用的改造方案。但它常常受到场地和改造工期的限制,而采用 SO_3 、 NH_3 或其他调质剂对烟气进行调质,不仅需要增加额外的装置而且很多用户往往因为现场需

要增加化学设备而不愿采用。经过多年的试验研究和工业性运行发展起来的脉冲供电已经公认是一种日趋成熟的新技术。脉冲供电的研究成果因此也成了本次会议的热门议题。一个典型的例子是丹麦ENSTED电厂2,3号机组使用脉冲供电的经验介绍,该电厂2号机组容量为 $2 \times 75\text{MW}$,配置2台有二个电场四个供电分区的电除尘器,总集尘面积为 9156m^2 ,比集尘面积为 $39\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。3号机组容量为 630MW ,配置2台双室五电场二十个供电分区的电除尘器,总集尘面积为 65800m^2 ,比集尘面积为 $82.5\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。分别用微秒脉冲(代号为MP)和毫秒脉冲(代号为SP)两种形式的脉冲电源进行了工业性运行试验。在2号机组上用MP脉冲电源供电时,对具有 $10^{11}\Omega\text{-cm}$ 数量级高比电阻的粉尘其出口排放量较常规电源(代号为CC)供电时降低了三分之二,而SP脉冲电源在3号机组电除尘器上的运行证明,对燃用低硫(0.5%)煤且灰中钠、铁含量

表 1 脉冲供电改进电除尘性能的情况

比电阻 ρ ($\Omega\text{-cm}$)	排放量 (mg/Nm^3)			表观驱极速度 ω_k			ω_k 增加系数	
	CC	SP	MP	CC	SP	MP	SP	MP
10^{12}	290	200	145	25	30	37	1.2	~ 1.5
10^{13}	800	560	275	12.5	16	26	~ 1.3	~ 2.1

很低(分别为 0.1% 和 1.5%)时产生的高比电阻粉尘不仅其排放量低于 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$, 而且比常规供电平均节省了约 80% 的电能。从实际运行中测定, 电耗的降低在气流方向上不同的电场是不同的, 第一电场约可节电 60% 至 70%, 而在末级电场则可节电约 80% 至 90%。具有不同比电阻的粉尘, 用 SP 和 MP 两种脉冲电源供电时, 在 2 号机组上获得的除尘性能改进的情况列于表 1。

其中, ω_k 由 MATTS 公式得出:

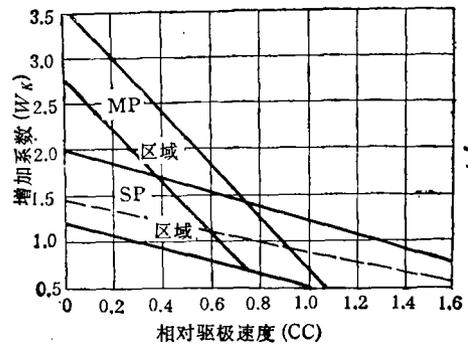
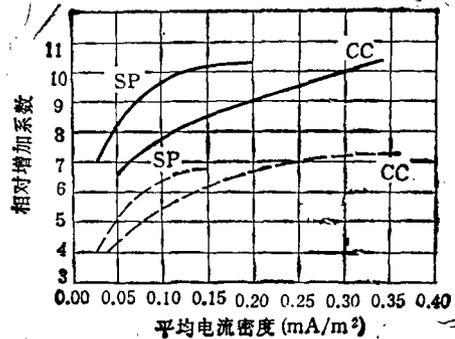
$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{\omega_k}{100} \cdot \frac{A}{Q}\right)^k}$$

式中: η ——集尘效率; A ——总集尘面积 (m^2); Q ——处理烟气量 (m^3/s); K ——常数, 0.5—1.0; ω_k ——表观驱极速度, cm/s

而 ω_k 增加系数定义为 $\omega_{k\text{脉冲}}/\omega_{k\text{CC}}$ 。

从表 1 可以看出, 比电阻越高, 用脉冲供电时, ω_k 增加系数越大, 也就意味着用脉冲供电改善除尘性能效果越明显。

有人曾对分布在世界 20 多个国家的几百台电除尘器进行过试验, 这些电除尘器有新设计的, 也有老设备改造的, 其应用范围涉及到许多工业部门。试验结果表明, 电除尘器在燃煤锅炉、水泥厂、烧结厂以及氧化铝生产上使用脉冲供电, 不仅可以节电 50% 至 90%, 而且还可以大大提高电除尘器的效率, 使出口排放量减少 85% 以上; 而对于其他诸如碱回收炉、石灰浆烘干窑和废物焚烧炉等工艺过程中的应用其优越性仅表现为节电, 而除尘效率的提高不那么明显。图 1 显示了使用脉冲供电时 ω_k 增加的趋势。这是从几百台应用于不同工艺过程中电除尘器上

图 1 使用脉冲供电时 ω_k 的增加趋势图 2 相对 ω_k 与平均电流密度的关系

——螺旋线 ——其他类型放电线

获得的结果。其中 SP 区域内虚线以上部分的结果是从使用螺旋线的电除尘器上获得的, 而虚线以下部分则包括了使用其他类型放电极进行试验所得的结果。从中可以得出以下结论: (1) 使用脉冲供电, 均能使 ω_k 相对地提高; (2) 在比电阻适中、粉尘容易收集的情况下, SP 与 MP 具有基本相同的 ω_k 增加系数, 而比电阻偏高时 MP 比 SP 具有更大的 ω_k 增加系数; (3) 使用螺旋线的电除尘器, 由于其产生的电晕电流在极板上分布比较均匀等原因, 采用脉冲供电时能获得比

其他极线更大的 ω_k 增加系数。

图 2 显示了不同供电方式,相对 ω_k 同平均电流密度之间的互相关系。从中可知在获得相同 ω_k 情况下,SP 供电比常规供电所需的平均电流密度要小许多,这意味着在得到相同除尘效率时 SP 供电能节约许多电能。图 2 还显示了螺旋线在电气性能方面的优越性,几乎在任何供电方式下,它都能获得比其他放电极更高的相对驱极速度。

在广泛调查的基础上,对新建电除尘器的投资估算比较如下:对一台 100MW 机组,其锅炉产生的飞灰具有高的比电阻,在获得相同除尘效率的条件下,假定采用常规供电(即 CC)时成本为 1。则如采用 SP 供电,成本为 CC 供电时的 82.5%,即可节省投资 17.5%;如采用 MP 供电,成本为 CC 供电的 74%,比 CC 供电节省投资 26%。另一台 100MW 机组,飞灰比电阻中等偏高,仍假定 CC 供电时成本为 1,则 SP 供电时成本为 CC 供电的 81.6%,节省投资 18.4%;采用 MP 供电时成本为 CC 供电的 84.2%,节省投资 15.8%。

对老设备改造,脉冲供电更具有明显的优越性。有一台 210MW 机组,飞灰比电阻很高,现有 4 个电场电除尘器出口排放量为 $350\text{mg}/\text{Nm}^3$,用户要求对电除尘器进行改造,使其出口排放量降低到 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。有三个改造方案,其相对成本列于表 2。显然第三个方案最佳,不仅成本最低,而且它不必更换电除尘器的内件和增加电场,改造时机组无需停运,MP 供电换下的原有 T/R 装置还可回收利用。毫无疑问上述分析的综合效益,特别是经济效益是因国家和具体情况而异的。但是有一点可以肯定,脉冲供电在国外已是一项应用广泛的较为成熟的实用新技术。国内在这方面的研究也已取得了一定成果,但离实际应用尚有较大差距。

宽间距是另一项日趋成熟的新技术,近年来已有广泛的应用,尤其是在日本和欧洲。

表 2 电除尘器改造方案及其成本

项目	改造方法	相对成本
方案 1	CC 供电,需新增加 3 个电场	5
方案 2	SP 供电,新增加 1 个电场	2
方案 3	不增加电场,将原有的其中 2 个电场改用 SP 供电,另外 2 个电场改用 MP 供电	1

习惯上人们把同极间距为 300mm 左右的电除尘器称为常规间距电除尘器,而大于这个间距的(常常又指 400mm 以上)称为宽间距电除尘器。很多研究者从不同角度进行试验,几乎得出同样的结论:在一定范围内,在相同体积的电除尘器中,采用大于 300mm 同极间距可以获得同 300mm 间距相同或稍高的除尘效率。这就意味着我们通常所说的粉尘粒子的驱极速度在一定范围内与极间距成正比。许多来自运行现场的试验报告也证实了这一点。人们为了解释这一现象,从理论上进行了多方面的探索。一个比较有说服力的解释是:随着电极间距的增大,放电极产生的电晕电流在极板上的分布趋于相对均匀。也即意味着极板附近的电场强度分布趋于相对均匀,减少或避免了在极板上产生无电晕电流的“死区”(在空气条件下,在常规间距电除尘器中,使用管型芒刺线时,其“管子”所对的阳极板上电晕电流几乎是零),充分发挥了整个极板表面的集尘作用,这相当于增加了集尘面积。从现象上看,也即提高了有

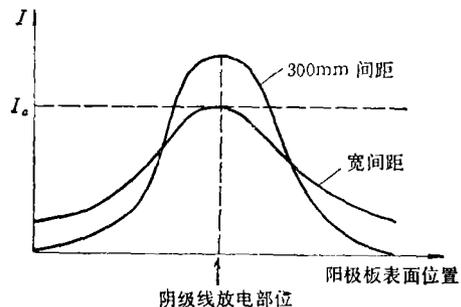


图 3 不同间距时极板上电晕电流分布情况

表 3 不同极间距电流密度分布的 σ_r 值

同板间距	板线名称	
	管型芒刺线	螺旋线
300mm	0.662	0.612
400mm	0.497	0.570

效驱极速度。图 3 表示了同极间距为 300mm 和宽间距时,极板上电晕电流的分布情况。假定 E_a 为合适的最高电场强度,根据欧姆定律电场强度 $E = I \cdot R$, 则 $I_a = E_a/R$ 就是合适的最高电流密度。在间距为 300mm 时,大于 I_a 部分的电流是无用的。间距增大到某个数值时,大于 I_a 的部分没有了,而原来电流密度过小的地方相对地有了提高,使原来“无用”部分的电流转化为有用。这是宽间距能提高有效驱极速度的主要原因。另一方面,从公式 $E = I \cdot R$ 可以看出,过高的电流密度如果又碰上高比电阻粉尘,将产生局部过大的电场强度,此时会产生反电晕现象。而宽间距时在某种情况下可以避免产生局部过于集中的电流密度,从而在一定程度上避免了反电晕现象,这是它能提高有效驱极速度的又一重要原因。表 3 所列的实验结果,证实了上述理论。表中 σ_r 值为极板上电流密度分布的相对均方根差,定义如下:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{(n-1)\bar{I}^2}}$$

式中 n 为测点数; I_i 为第 i 个测点上的电流密度 (mA/m^2); \bar{I} 为测试平面上平均电流密度 (mA/m^2), $\bar{I} = \sum_{i=1}^n I_i/n$ 。

从表 3 可知,不管是管型芒刺线还是螺旋线,400mm 间距比 300mm 间距 σ_r 值都相对减小。相比之下电流密度分布本来不够均匀的芒刺型电极(管型芒刺线)比电流密度分布相对比较均匀的非芒刺型电极(螺旋线),随着间距的增加电流密度分布的均匀性有更加明显的改善。另外一种理论上的解释是,

尘粒的捕集主要是受极板表面附近的电场强度的支配,间距增大后提高了操作电压,也即增大了电场强度,同时由于空间电荷的影响进一步强化了电场强度。西德 LURGI 公司的研究表明,烟气温度的 155°C 时,在相同的工况条件下,极板间距从 300mm 增大到 400mm,操作电压从 44.4kV 增大到 65kV,除尘效率从 97.3% 提高到 98.1%,即有效驱极速度增高了 1.45 倍。作者认为,随着间距的增大,一方面极板上电流密度分布趋于均匀;另一方面提高了操作电压,也即增强了极板表面附近的电场强度。宽间距能提高有效驱极速度,这两方面的因素都起了作用。

但是驱极速度正比于极间距这一趋势只在一定范围内成立。间距过大不仅收不到应有的效果,反而会带来许多麻烦。采用较大间距的电除尘器由于减少了内件,所以降低了钢耗和成本。但是在一定程度上这样降低了的造价又被变压整流装置和其他绝缘措施所增加的费用等所抵消。研究表明,宽间距的优越性因烟气的具体条件不同而有很大差异,一般而言收集比电阻较高的粉尘,宽间距的优点更加突出。例如在水泥厂的除尘系统里,由于进入末级电场的粉尘相对地粒度细且粘度大,比电阻高于前面几个电场,所以有的厂家在设计电除尘器时,前级电场采用 400mm 间距,而在末级电场则采用 500mm 或者 600mm 间距。又例如烧结机机头除尘,由于进口含尘量低 ($0.5-3\text{g}/\text{Nm}^3$),除尘效率要求高,粉尘情况较为复杂且粘度大,除尘困难,因此日本新日铁株式会社采用 600mm 间距的 ESCS 型电除尘器,取得了较好的效果。另外处理烟气体积越大,采用宽间距也就越加有利。

目前较为普遍的看法是同极间距在 400mm 到 600mm 之间选取为宜,而大于 1200mm 会带来许多由于高压引起的问题,除尘效率也不理想并且显得很经济,因此是不可取的。世界上不少厂家都把 400mm 间距

作为标准设计,例如瑞典 FLAKT 公司、西德 LURGI 公司和瑞士 ELEX 公司等。国内许多厂家也都开始采用 400mm 左右间距,这说明它的优越性得到了普遍的承认。另外,宽间距还有一个突出的优点就是方便维修,它使维修人员有可能直接进入电极通道内,由于极板板线及振打系统的易损零部件数量减少,因而也使维修工作量相应地减少。

在本次会议上,用 SO₂ 和 NH₃ 调质、在锅炉燃烧时注入石灰石、用外部分解硫酸铵随后喷入烟气流等方法来降低飞灰比电阻的技术也有不少研究成果发表。这些技术有些当前已有应用,有些在某些场合将会得到应用。此外在本届会议上还介绍了电除尘器的

一些较为特殊的应用情况。例如用电除尘器收集焦油、除去酸雾、用于燃木锅炉的烟灰除尘等等。人们还试图用化学的方法使 SO_x、NO_x 吸附在固体尘粒上或者转化为固体尘粒,然后用电除尘器加以收集以达到脱硫或脱氮的目的。总之开发新技术,提高运行性能,降低消耗(包括钢耗和能耗),不断开拓新的应用领域,是电除尘技术研究和发展的主要目标。

参 考 文 献

[1] 俞寿成,劳动保护科学技术,(3),29(1985).
(收稿日期:1988年4月1日)

(上接第 39 页)

籽实 BaP 水平为 0.422—5.146PPb,漂洗后即下降到 0.121—0.650PPb。尽管这个水平仍包括大气污染与土壤污染的贡献,但却说明西郊、北郊和南郊区小麦籽实的 BaP 高达几个 PPb 的水平,“主要来自大气污染的贡献”^[1]。这与 Grimmer, G. 等得出的“植物中 BaP 的积累主要是大气污染造成的”结论相一致。

从市郊各区域与清洁对照区大气污染程度和土壤污染程度的差异及小麦植株中 BaP 含量的差异可以看出大气污染对小麦 BaP 含量做出的主要贡献:大气污染越严重,漂洗后降低的幅度就越大。可见,大气污染程度对小麦 BaP 含量起主导作用。西郊、北郊和南郊区小麦 BaP 含量高,主要原因就在于此。

根据 BaP 的基本理化性质和植物体内 BaP 的“多源性”,以及植物根系从土壤中吸收 BaP 的生理特征可知,除了生物合成因素外,植物株体,特别是籽实部分,长时间直接暴露在大气污染环境中,大气污染对植物地上部分 BaP 的贡献要比水-土壤的贡献大得多。

三、结 论

1. 运城市郊各区域大气中 BaP 的含量和土壤、小麦植株中 BaP 的含量分布都是西郊>北郊>南郊>东郊。这表明小麦植株中 BaP 的积累主要是大气污染造成的。从我们测得的小麦植株中 BaP 含量茎叶>根系>籽实也可以看出,大气污染对小麦植株中 BaP 的贡献要比土壤的贡献大得多。

2. 小麦根系可以吸收土壤中 BaP,并将其吸收的一部分转移、积累在地上部分。但是,一方面由于 BaP 的疏水性,难以为根系所吸收,另一方面由于根系所吸收的 BaP 在转移时绝大部分在代谢过程中被同化或降解,因而在籽实中积累很少。

3. 大气污染对于食物链 BaP 的贡献是十分重要的,必须及早对大气中 BaP 的污染源进行有效的控制。

参 考 文 献

[1] 高拯民等,环境科学学报,1(1),12(1981).
[2] 曹守仁等,环境与健康,2(2),6(1985).

(收稿日期:1988年3月1日)