

静电技术应用专题系列

第五讲 静电除尘的物理机制

杨丽佳

(北京理工大学应用物理系)

本文对静电除尘过程中涉及到的一些物理现象和机制进行了描述和讨论。着重介绍了电晕放电、电场分布和尘粒荷电等方面的一些基本概念和理论及其在工程中的应用。

一、研究的意义和目的

静电除尘是最重要的静电应用之一。静电除尘器就是利用高电压下的气体电离和电场作用力,使粉尘从废气中分离出来的除尘设备。随着现代工业的迅速发展,大气污染被作为重大的社会问题提了出来。在发电、冶金、煤气、水泥以及伴有其它粉尘和烟雾发生的各工矿企业中,为了防止空气污染和回收有用物质,普遍地采用了静电除尘设备。

静电除尘的原理是,在强电场作用下,局部区域产生电离,使气体中浮游着的粉尘或烟雾粒子带电,然后在极间电场作用下,进行静电分离并收尘。如图1所示,将两端绝缘的细金属丝悬挂在接地的金属圆筒的轴心上,并在它的上面加负高压。当负电压达到某一电压值(电

化的气体从圆筒的上边出去。从功能上说,外边的圆筒电极叫做集尘电极,里边的金属线叫做放电电极。

由于静电除尘器受到很多极复杂因素的影响,所以尽管人们对除尘的机制进行了许多研究,但至今还有很多问题不清楚,其设计方法在很大程度上需要根据多方面的经验。因此,对研究设计人员和管理操作人员来说,充分了解静电除尘器中发生的各种物理现象和机制,以便正确判断和处理实际中遇到的问题,是十分必要和有意义的。

二、电晕放电

静电除尘器是利用在强电场作用下的气体放电工作的,这种放电是在不均匀电场作用下的气体的局部放电,即电晕放电。弄清楚电晕放电的实质,对于了解静电除尘器是很重要的。

当逐步提高放电极和集尘极之间的电压时,在放电极表面附近的空间,电场强度首先达到电离的临界值 E_c 。在这个小范围的空间里,空气最先电离,即中性气体分子分离为正离子和电子。继续升高电压时(如图2所示),电子和中性气体分子不断地进行碰撞而形成电子雪崩。此时在电离区内,电离激烈进行,产生出大量正离子与电子,并分别向两个对应的电极运动。与此同时伴随着发出淡蓝色的辉光和轻微的噼噼气体爆裂声,这就是电晕放电。可是,在稍微离开放电电极一段距离处,由于电场强度急剧地下降,碰撞电离停止,结果使电离区域局限在放电电极表面附近的狭窄空间内。通过碰撞电离所产生的电子群,因其迁移率比正离子

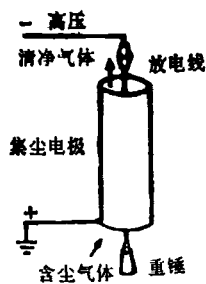


图1 圆筒型静电除尘器

晕起始电压 V_c) 以上时,在金属丝的表面附近的区域中会产生电晕放电,并有负离子电荷从金属丝向圆筒方向流动。当从下边向圆筒内通进含有粉尘或烟雾的气体时,粉尘及烟雾等粒子与负离子作用而直接带电,在电场的作用下,它们被吸附在圆筒的内壁上并堆积起来,被净

的迁移率要大 10^3 倍左右, 所以非常迅速地离开电离区域。当它们与其它颗粒或气体分子相撞时就附着在其上, 并变成低迁移率的负离子而飞向集尘电极。正离子群在被放电电极吸收的同时, 由于碰撞而使电极表面产生二次电子

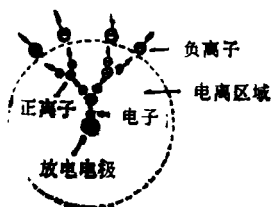


图2 碰撞电离

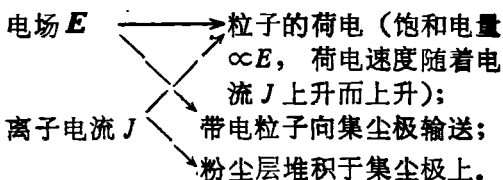
发射, 以继续维持放电。放电电极和集尘电极之间的空间形成一定的负电荷分布。朝着集尘电极运动的负离子与中性气体分子碰撞时, 把动能给予中性气体分子, 此时, 伴随着电晕放电, 自放电电极向集尘电极的方向上有电风产生。

工业用的电除尘器通常是采用负电晕放电, 这是由于在相同的条件下它可以获得比正电晕放电要大一些的电流, 同时, 其闪络电压也比正电晕放电要高。不过, 用于净化空气的电除尘器, 还是采用产生较少有害臭氧气体的正电晕放电。此外, 正电晕放电还具有在放电线上分布均匀, 且非常容易延伸的特点, 而负电晕放电在放电线上是呈点状分布, 并难于延伸。

三、电场分布和离子电流

影响静电除尘器除尘效果的因素很多, 其中电场的分布和离子电流起着关键作用。

电场与离子电流的相互关系和作用如下:



在静电除尘器的荷电空间中, 通常存在着单极性离子与带电粒子的空间电荷, 其电场在稳定状态下将由下面的泊松方程来描述, 即

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\nabla^2 \varphi = \frac{\rho_i + \rho_p}{\epsilon_0}; \quad (1)$$

而离子电流则满足连续性方程和欧姆定律, 即

$$\nabla \cdot \mathbf{i} = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{i} = \rho_i \mu_i \mathbf{E} + \rho_p \mu_p \mathbf{E}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{i} 为电流密度矢量 (A/m^2), ρ_i 为离子空间电荷密度 (C/m^3), ρ_p 为粒子空间电荷密度 (C/m^3); μ_i 为离子迁移率 ($\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), μ_p 为粒子迁移率 ($\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), ϵ_0 为真空介电常数。

在给定的边界条件下, 求解上面三个方程, 即可求出荷电空间中的电场及电流分布。

对于圆筒型静电除尘器, 由拉普拉斯方程 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, 可求得当低于电晕起始电压 V_c 时, 电场 E 随着距放电线轴心距离 r 的增大而减少, 如图 3 中的曲线 1 所示; 当电压升高到

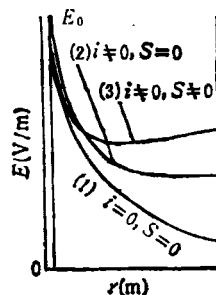


图3 集尘空间的电场分布
(S 为 1m^3 气体中浮游粉尘的表面积总和)

V_c 时, 产生电晕放电, 由于离子空间电荷的作用(此时场方程为 $\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_i$), 使距放电线的距离 r 较大处的电场强度增大, 因而使电场分布均匀化。这种作用在离子电流越大或离子迁移率越小时, 就越显著。在集尘极附近, 电场分布几乎与 r 无关, 趋于平坦地分布, 如图 3 中曲线 2 所示。

下面考虑在集尘空间含有粉尘的情况。粉尘因离子作用而带电, 并使空间电荷密度增加[此时的场方程由 (1) 式决定], 其效果相当于离子迁移率 μ_i 减小, 因此在同一电压下, 引起电晕电流减小, 这种现象叫做粉尘的电晕阻止效应。图 3 中的曲线 3 给出此时的电场分布情况^[4]。当气体中含尘量越高或粒子越微细时, 这一效应也就越显著。

一般地说,在除尘装置集尘室的入口一侧,含尘浓度高,而在靠近出口一侧,含尘浓度减少。因此,在入口一侧,容易产生火花放电,而靠近出口一侧,产生火花放电的电压有增高的倾向。因此,若将集尘室分为数段,则各段可分别以各自最合适的电压和电流来运行。

四、粒子的荷电

静电除尘器中粉尘粒子的荷电有两种机理:一是由于电场的作用,粉尘粒子与运动离子发生碰撞而荷电;二是由于离子的热运动而向粒子表面进行的扩散荷电。

在由电场产生的碰撞荷电的情况下,沿电力线运动的离子与粉尘粒子碰撞,把它的电荷交给粒子。在带电 t (s)后,粒子的荷电量可由下式给出^[2]: $q = q_0 t / (t + \tau)$, (4)

其中 $q_0 = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} a^2 E$ = 饱和电量, (5)

$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{\mu_i \rho_i} = \frac{4\epsilon_0 E}{i} \text{ = 荷电时间常数, (6)}$$

这里 a 为粒子半径, ϵ_r 为粒子的相对介电常数。当 $t = \tau$ 时, q 为饱和电量的一半,当 $t = 10\tau$ 时, q 为饱和电量的91%。离子碰撞带电的饱和电量 q_0 与该点的电场强度和粒子的表面积成正比,而与离子的密度和迁移率无关。但是,带电速度由离子的密度和迁移率来确定,其值越大,带电速度就越快。

下面考虑,由于离子的扩散而荷电的情况。气体中的离子和气体分子一起,进行着热运动,并遵循气体分子运动论的法则。由于扩散,离子向粒子表面上移动并附着于其上,经过时间 t (s)后的荷电量可由下式给出^[2,3]:

$$q' = \frac{4\pi\epsilon_0 a k T}{e} \ln \left(1 + \frac{t}{\tau'} \right), \quad (7)$$

$$\tau' = \frac{4\epsilon_0 k T}{ac N_0 e^2} \text{ = 荷电时间常数, (8)}$$

其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, e 为电子电量, c 为离子的热运动均方根速率 $\left[c = \left(\frac{3kT}{m} \right)^{1/2} \right]$, m 为离子质量, N_0 为离子密度。

一般地说,在直径大约为 $2\mu\text{m}$ 以上的粒子中,碰撞荷电占支配地位,而在直径约为 $0.2\mu\text{m}$ 以下的粒子中,扩散荷电占支配地位。对于实际使用的工业用电除尘器来说,粉尘粒径多比 $2\mu\text{m}$ 大,因此,作为荷电机理,只考虑碰撞荷电就够了。实际上要得到理想的荷电量是极为困难的,原因在于当粉尘层的电阻率 $\rho > 10^{11}\Omega \cdot \text{cm}$ 时,将发生反电晕现象,这将使粒子所获得的饱和荷电量与用(5)式计算的结果相比要大大下降。

五、反电晕现象

在静电除尘器中,当集尘极上堆积的粉尘层的表观电阻率 ρ_d 显著变高时,在集尘极一侧将会发生反电晕的异常现象,这将使除尘性能大幅度降低。这是因为当 ρ_d 较高时,流过粉尘层的电流会在层内产生大的电位降,并在粉尘层中的气隙部分引起绝缘击穿,这种绝缘击穿进一步在粉尘层内的气体空间中诱发气体放电,导致反电晕的产生。

一般来说,当 ρ_d 大约超过 $5 \times 10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$ 左右时,开始产生反电晕,其现象及形态因 ρ_d 值的不同而有极大的不同。当 ρ_d 比较低(在 $5 \times 10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$ 附近)时,粉尘层内气体的绝缘击穿会直接在电极间诱发火花放电,此时如果不降低外加电压,除尘器就无法稳定地运行,除尘效率大大降低。当 ρ_d 为 $10^{11} - 10^{12}\Omega \cdot \text{cm}$ 时,将会产生稳定的反电晕,这时,自粉尘表面产生的大量正离子与集尘电极附近起集尘作用的负电荷中和,集尘性能更加下降。当 ρ_d 进一步提高到 $10^{12} - 10^{13}\Omega \cdot \text{cm}$ 时,在极小的电流下,粉尘层就开始绝缘击穿。实际上,当超过电晕起始电压 V_c 时,即产生反电晕。这时,即使再提高电压,其大部分也被分担到粉尘层上,在层内的许多点上接连不断地出现绝缘击穿,形成稳定的辉光形反电晕,集尘性能显著地降低。

反电晕产生的条件可以看成是粉尘层内气体的绝缘击穿条件,即 $i_d \times \rho_d \geq E_{d_0}$ ($\rho_d > 10^{14}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上的情况除外),这里 i_d 为粉尘层内的电流密度, E_{d_0} 为粉尘层内气体的绝缘击

穿场强。此处的 ρ_d 值一般并不是恒定值,当粉尘层内的电场强度 E_d 增加并逐渐接近 E_{d_0} 时,其 ρ_d 将降低。此外,在电晕区域中, E_{d_0} 也较平行平板电极中测得的值要高得多。因此这里的 ρ_d 和 E_{d_0} 都必须取电晕区域中粉尘绝缘击穿前一瞬间的值。

六、粉尘的再飞散现象

被捕集到集尘电极上的粉尘,由于某种原因,会再飞散到气体当中,与气流一同被搬运,由烟囱排出,这将使集尘效率降低。粉尘的再飞散现象可以分为:

(1) 振打集尘极时造成粉尘的飞散;

(2) 随着气体流速上升产生的流体力学的再飞散;

(3) 由于粉尘电阻率 ρ_d 非常低 ($\rho_d \leq 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$), 粉尘相对介电常数大,粉尘粒径较大,或者发生反电晕等原因而产生的再飞散。

各种再飞散现象,当产生它的作用力越大,而与之抗衡的粉尘附着力(粒子与粒子之间以及粒子与集尘极间的范德瓦尔斯力和电的附着

力)越小时,表现得越显著。

粒子越大,就越容易引起再飞散现象。当温度下降而相对湿度上升时,由于粒子接触点的缝隙间产生水分子的凝聚,范德瓦尔斯力就增加。

电性附着力是在当粉尘电阻率达到 $\rho_d \geq 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 时开始出现的,随着 ρ_d 及电流密度的增加而增大。在高电阻区域,集尘效率将由支配反电晕的 ρ_d 来支配。但对 $\rho_d \leq 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的粉尘,则粉尘的机械性附着力在很大程度上支配着集尘率。

在粉尘粒径越大时,再飞散现象越容易发生,如果粉尘中含有相当多粗大的粒子,则可以在电除尘装置的入口处装设多管式旋流除尘器等其它机械除尘装置把它除去。此外,选择合适的振打力和振打频率也可减轻再飞散现象。

- [1] Lowe, Lucas, *British J. of Appl. Phys. Suppl.*, No. 2 (1953), 40.
- [2] H. J. White, *AIEE Trans.*, 76 (1951), 1186.
- [3] Murphy et al., *AIEE Trans.*, 78-44 (1959), 318..

中国科学院表面物理实验室完成分子束外延设备配套工作

中国科学院表面物理实验室于 1987 年 4 月引进了英国 VG 公司的“特殊超高真空设备”。由中国科学院物理研究所和中国科学院表面物理实验室组成的配套研制组,在此设备的基础上,设计、加工了被禁运的快门,分子束炉和生长设备的计算机控制系统等三项配套装置,建立了分子束外延设备。该系统于 1987 年 7 月正式投入运行,并在 1988 年 6 月开始了计算机控制系统的联机运行。二年来,在该设备上共进行了材料生长实验 500 余次。实践证明,分子束炉、快门和计算机控制系统都达到了设计要求。该设备生长出来的材料质量稳定,性能良好。1987 年 10 月以后生长的调制掺杂 GaAs/GaAs 二维电子气迁移率 (77 K) 最高达到 $13.2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。用 2 DEG (二维电子气) 做 HEMT (高迁移率场效应晶体管) 也获得较好结果。在计算机调试过程中,生长了不同类型的超晶格和多量

子阱结构,用于透射式和反射式非线性光学性质和子带间红外吸收效应的研究,均获得了一定结果。该设备经国内分子束外延方面专家的评议,认为这样的引进形式是成功的,主要表现为:

1. 在国外设计经验的基础上实现了快门的国产化,并在驱动线路和检验快门状态两方面有所发展,故障率低;
2. 在借鉴国外经验上合理地设计、加工了分子束炉,高温和使用寿命均达到要求;
3. 自行设计了功能较为完备的计算机控制系统,该系统操作方便,抗干扰能力强,运行可靠;
4. 这一引进也为国产分子束外延设备的研制提供了有益的借鉴。

(中国科学院物理研究所 沈电洪)