

白烟治理的最佳工艺和设备

沃斯坦热力技术（北京）有限公司

一、 白烟是怎样产生的

电厂煤炭的燃烧，钢铁企业的烧结机都会产生大量的烟气，这些烟气须经过脱硫净化处理才能排放。常用的脱硫净化方式是湿法脱硫，用石灰浆液将烟气中的硫去除。经过净化处理的烟气通常是接近饱和态的湿烟气，其相对湿度较高，将近 100%，成分主要有 N_2 ， CO_2 以及 O_2 ，另外，还含有大量的水蒸气 H_2O 。

众所周知，纯粹的 N_2 ， CO_2 ， O_2 都是无色气体，它们排放到空中是不会产生白烟的。那为什么实际烟气排放时会经常产生白烟呢？

这是因为，当烟气排放到环境后和周围的冷空气混合时，烟气受到冷空气的冷却，温度降低，在一定的大气温度和湿度条件下，烟气中的水蒸气就会冷凝形成小液滴。如果烟气中存在大量的液滴，就会反射或者折射阳光，这样，肉眼看上去就会看到白色或灰色的烟。这就是白烟产生的机理。

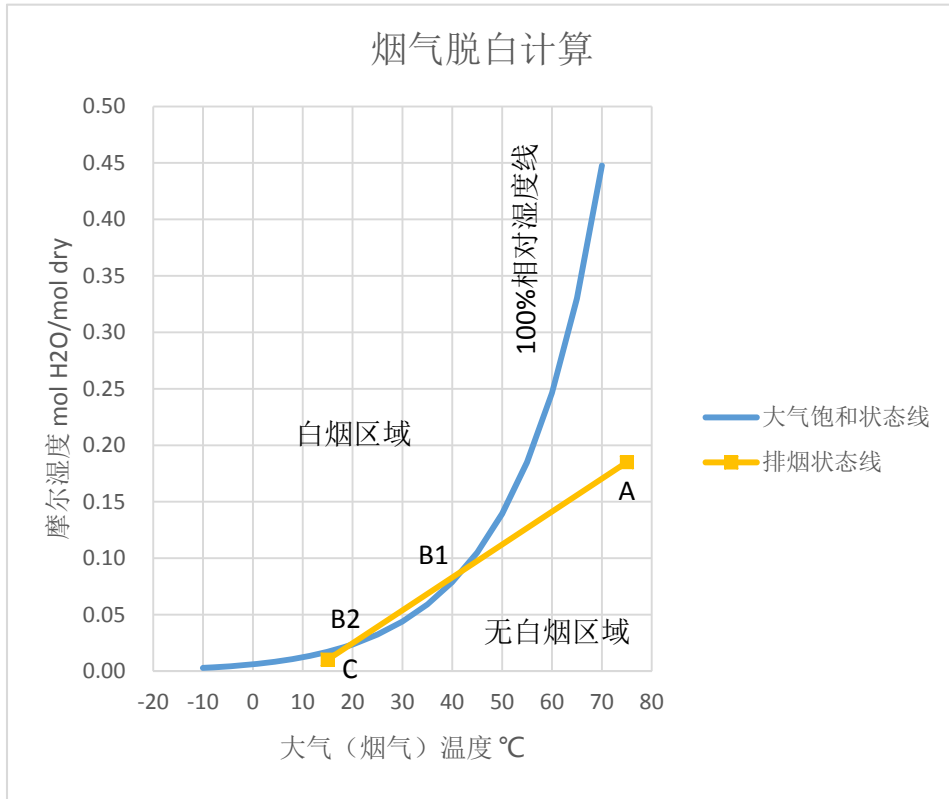


烟气离开烟囱后，受到冷空气的冷却，从排烟温度开始逐渐降温，在此过程中，烟气持续和大气相互混合，最终变成和空气温度相同的温度。在整个混合过程中，烟气中的水蒸气也会混合到大气中。如果混合气体达到了饱和状态，水蒸气就不能再继续融入，随着温度继续降低，

水蒸气就会凝结成水滴，当水滴量较大时，就会产生白烟。

我们以常见的排烟参数来具体看一下：

脱硫处理后的烟气通常在 $50^{\circ}\text{C}\sim 55^{\circ}\text{C}$ ，其含湿量大约为 0.185 ，烟气被加热到 75°C 进入烟囱排放。排烟状态点为图中的 A 点。环境气象条件：大气温度 15°C ，相对湿度 80% ，即图中的 C 点。



烟气排入大气后将沿着 AC 直线逐渐降温变化，在这个过程中，烟气状态线 AC 线和空气饱和状态线有 2 个交点，分别是 B1 和 B2。在 B1 点，烟气状态越过了空气饱和状态线，将产生白烟。在 B2 点，烟气状态又回到了空气饱和状态线之下，白烟就消失了。这种情形表现为在烟囱出口处（A 点）没有白烟，稍有距离后（B1）出现白烟，再过一段距离（B2）白烟又消失了。

二、 如何减轻或消除白烟

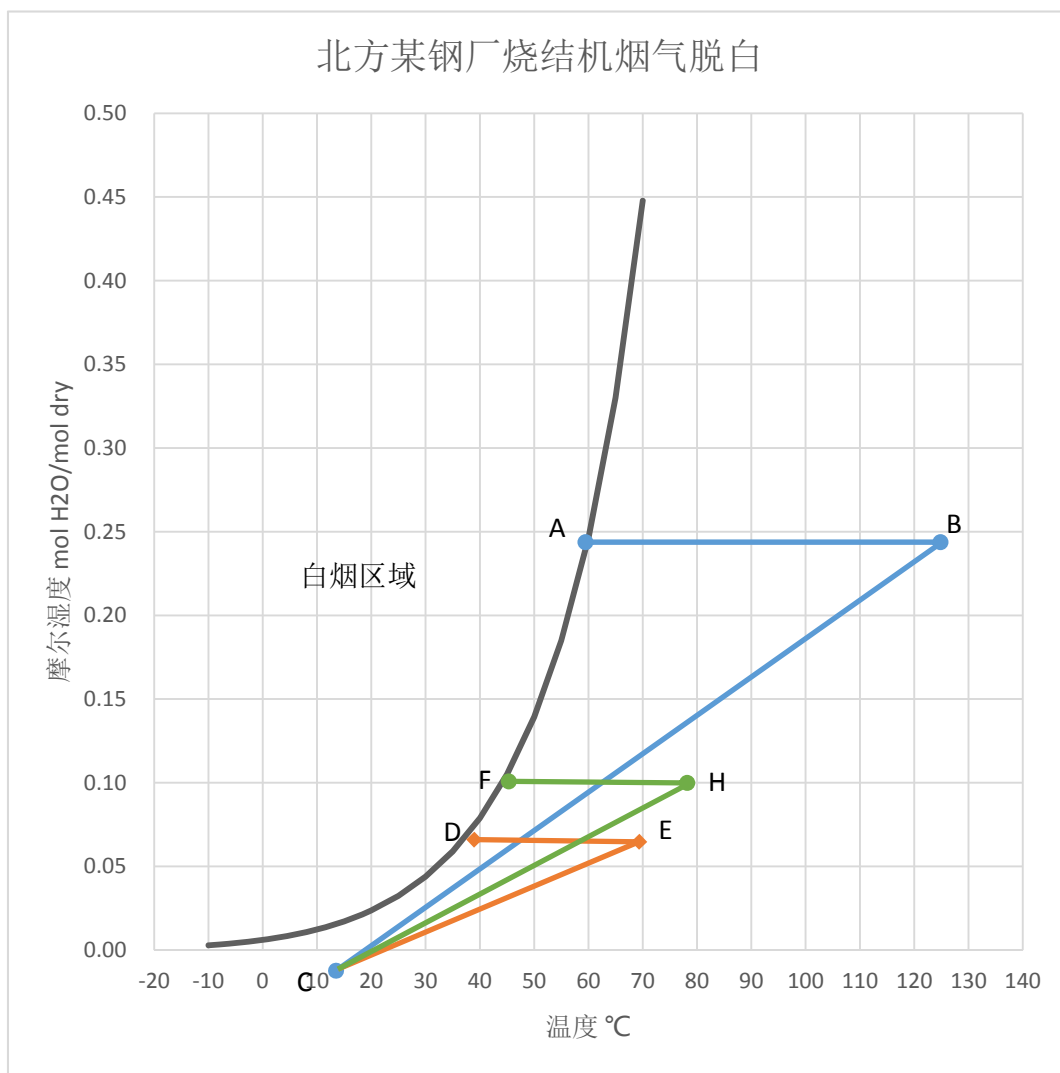
白烟的产生，根本原因是烟气和冷空气混合，在冷却过程中烟气含有的水蒸气冷凝形成了大量液滴。从这一点出发，就可以找到减轻白烟甚至完全消除白烟的方法。

对烟气做除湿处理，降低烟气中的 H₂O 含量，或者，提升烟气温度，减小烟气的相对湿度，使烟气远离饱和态，这样，烟气排放后冷却过程中就只会产生少量的液滴，甚至，完全不产生液滴。当液滴较少时，烟气的白烟现象就可以显著减轻。如果没有液滴产生，就完全不产生白烟。

因此，对烟气进行除湿和加热处理，是白烟治理的关键。

我们以北方某钢厂的烧结机烟气排放白烟治理工程为例，仔细分析一下。

该项目烟气脱硫处理之后是 60℃的饱和湿烟气，对应于 A 点。选定的脱白设计点为 15℃，80%相对湿度，即图中的 C 点。



第一种处理方式是直接对烟气加热，将烟气加热到 125℃排放，就是 B 点。烟气沿着 A-B-C 演变，整个演变过程始终位于空气饱和线之下，可以确保不会产生白烟。

另一种处理方式是先将烟气冷凝然后再加热，先冷凝到 40℃再加热到 70℃排放，冷凝时烟气沿着饱和线从 A 到达 D（对应于 40℃），再加热到 E 点（对应于 70℃），然后排放进入大气，最终到达环境点 C。烟气沿着 A-D-E-C 变化，始终位于空气饱和线之下，也不会产生白烟。并且 EC 线和 BC 线相比，距离饱和线有更多的距离，意味着有更大的安全余量。

也可以选用不同的冷凝温度和再加热温度组合，例如：先冷凝到 45℃（图中 F 点），再加热到 78℃（图中 H 点），烟气沿着 A-F-H-C 线演变，同样可以保证无白烟，只是和 EC 线相比安全余量略小些。

三、 最佳工艺路线—烟气冷凝再热处理

如果脱硫系统出口烟气温度比较低，例如在 40℃左右，甚至低于 40℃，那么可以选择直接加热法，将烟气加热到 72℃排放，在环境温度 5℃时就基本上可以实现烟气脱白。

但是，目前在各个行业各个企业，大量的常规湿法脱硫装置出口处，烟气温度通常在 50℃~60℃的范围内，由于温度较高，烟气的含湿量也就较大，如果采用直接加热法治理白烟，就必须将烟气加热到很高的温度排放，根据计算，可能需要加热到 125℃甚至更高，这是非常不合理的能源浪费，不可取。

合理解决方案应当是首先对烟气进行降温冷凝除湿，再适当小幅加热，然后排放。并且，在烟气冷凝脱水过程中，凝结水的冲刷还可以产生除尘等协同效应，进一步降低烟气含尘量，改善烟气排放质量。冷凝收集的酸性凝结水，也可以经过中和处理之后，作为脱硫系统的补水，得到重复利用。从这一点上来说，烟气冷凝再热处理，是治理白烟的最佳工艺路线。

我们还可以通过选择不同的冷凝温度和再热温度的组合搭配，调整冷凝部分和再热部分的投资占比，从而找到一个总投资最优的方案。

四、 最佳设备—氟塑料烟气冷凝器

在电力、钢铁冶金、石油化工等工业应用场合下，由于烟气中含有 SO₂ 等酸性气体，烟气冷凝过程中在换热元件的表面会产生低温酸性腐蚀，冷凝换热元件始终工作在强腐蚀环境下。如果采用金属材质的冷凝换热元件，将会受到强烈腐蚀，无法保证安全稳定、高效地工作。因

此，不能使用金属材质的烟气冷凝器。

另外，烟气中还含有灰尘，灰尘和冷凝析出水混合，可能会堵塞烟气通道，或者，在换热元件表面结垢，这些都会使得换热效率急剧恶化，对整个冷凝换热产生非常大的影响。

氟塑料是一种耐强腐蚀的材料，自身表面光洁，不易附着灰尘，不易结垢，容易清洗，可以完美解决腐蚀和堵塞的难题，因此，氟塑料成为了烟气冷凝换热元件的最佳选择，采用氟塑料换热元件制造的各种类型的烟气换热器已经在电力、冶金、石化等领域得到了广泛应用。

沃斯坦公司在常规 PTFE 氟塑料材料的基础上，深入研究分析，经过大量的试验和测试，研制出特殊配方的改性添加剂，生产出了改性 PTFE 氟塑料换热元件，在进一步提高换热性能的基础上，增强了材料的强度、韧性、抗疲劳能力，改善了氟塑料的焊接成型性能，提高了换热元件的使用寿命，使其综合性能有了更大的提高。超过二十年应用于全球不同烟气工况的项目业绩证明了其成熟、可靠以及耐用！