

我国燃煤电厂SO₃和可凝结颗粒物控制存在问题与建议

我国煤电超低排放改造已实现2017年电力行业烟尘、SO₂和NO_x排放量仅占排放峰值的7%、9%和11%。燃煤电厂排放的颗粒物有两种类型：一类是目前我国排放标准中已监控的可过滤颗粒物，另一类是我国尚无标准控制的可凝结颗粒物。应通过控制烟气中的SO₃实现对可凝结颗粒物的控制,尽快针对燃煤电厂的湿烟气特点,制定SO₃监测的方法标准和SO₃排放标准。充分发挥现有烟气治理设施中的低低温电除尘器、湿式电除尘器、湿法脱硫对SO₃的协同脱除作用,可以将SO₃控制在5mg/m³以下。采用烟气加热方式消除白色烟羽会增加污染物排放。

截至2018年第三季度末,我国实现超低排放的煤电机组达7.5亿kW,占全部煤电机组的75%以上,已建成全球最大的清洁煤电供应体系。煤电超低排放的环境效益日益显现:2017年全国火电发电量45442亿kW·h,是2006年的1.9倍,而火电SO₂排放量120万t,仅为2006年的9%,火电NO_x排放量114万t,仅为2011年的11%,火电烟尘排放量26万t,仅为2006年的7%。中国燃煤电厂在烟尘、SO₂和NO_x三大污染物控制方面取得的成就赢得了广泛赞誉,为改善我国大气环境质量做出了巨大贡献。但打赢蓝天保卫战还未取得根本性胜利,仍是目前的首要任务。火电行业在经济合理的前提下,应进一步减少大气污染物排放。燃煤电厂超低排放后是否需要进一步治理,如何治理,不仅是一个重要的科学问题,更是一个重大的现实问题。

1 地方政府燃煤电厂深度治理政策

2015年12月11日,原环境保护部、国家发改委会和国家能源局联合印发了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》,标志着燃煤电厂超低排放的正式实施。燃煤电厂没有实施超低排放改造前,SO₂排放标准相对宽松,石灰石-石膏湿法脱硫设施能够做到达标排放,但普遍存在石膏雨现象,在人口密集区还会引起居民纠纷。由于国外湿法脱硫均未出现过石膏雨,属于国内特有现象,主要是由于工程设计与运行管理不当造成的。为解决这一问题,上海市在2016年1月29日出台的《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB31/963—2016)中,增加了“燃煤发电锅炉应采取烟温控制及其他有效措施消除石膏雨、有色烟羽等现象”条款,以期在超低排放改造过程中一并解决这一问题。

2018年9月30日,浙江省发布了《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB33/2147—2018),出台了与上海市类似的规定,强调位于环境空气敏感区的燃煤电厂应采取烟温控制或其他有效措施消除石膏雨、有色烟羽等现象。

2018年6月,天津市发布《火电厂大气污染物排放标准》(DB12/810—2018),要求对烟气进行冷凝,控制排烟温度,目的是回收烟气中的水分,减少可凝结颗粒物的排放。

2018年,河北省大气污染防治工作领导小组办公室(以下简称“大气办”)印发的《河北省钢铁、焦化、燃煤电厂深度减排攻坚方案》、唐山市大气办印发的《唐山市钢铁、焦化超低排放和燃煤电厂深度减排实施方案》、邯郸市大气办印发的《邯郸市钢铁、焦化、燃煤电厂深度减排攻坚方案》、衡水市大气办印发的《关于衡水、恒兴公司开展有色烟羽“脱白”工作的通知》等均要求对烟气进行先冷凝后加热的处理方式,回收烟气中部分水分、减少可凝结颗粒物排放和消除石膏雨、有色烟羽等。其中,唐山市还将燃煤电厂颗粒物、SO₂和NO_x的排放要求分别严格限制在5mg/m³、25mg/m³和30mg/m³;衡水市明确规定了排放烟气中的SO₃不高于5mg/m³。

2018年,江苏省徐州市市政府办公室下发了《关于加快推进全市燃煤发电企业烟气综合治理的通知》,要求燃煤发电企业尽快进行烟气排放系统改造,基本消除石膏雨和有色烟羽,其工艺也是先冷凝后加热。镇江市人民政府下发了《关于加快推进全市燃煤发电企业实施烟气综合治理的通知》,也是采用先冷凝后加热技术。

由此可见,上海市出台地方标准的目的是在超低排放改造过程中一并解决脱硫系统原先存在的石膏雨、有色烟羽问题;天津市的地方标准是要求对烟气进行冷凝处理,进一步减少可凝结颗粒物的排放,并不要求消除有色烟羽;其他

省份、城市则是在电厂超低排放后，要求电厂对烟气采用先冷凝后加热的方式，消灭石膏雨、有色烟羽。事实上，满足超低排放的燃煤电厂不可能出现石膏雨，否则其颗粒物无法达到超低排放。

采用先冷凝后加热的方式对烟气进行治理，其目的都有减少可凝结颗粒物的需求，但可凝结颗粒物的测试方法、排放标准、监控要求等在所有文件中均未涉及，只有衡水市的文件中要求排放烟气中SO₃浓度不高于5mg/m³。厘清SO₃和可凝结颗粒物的定义及二者之间的关系，明确排放与监控要求，这才是政策精准发力的关键点。

2 SO₃和可凝结颗粒物定义及关系

我国对燃煤电厂颗粒物排放水平的测试，其依据均源自《固定污染源排气中颗粒物的测定与气态污染物采样方法》(GB/T16157—1996)，针对的是可过滤颗粒物。下面从国内外的测试标准中梳理SO₃和可凝结颗粒物的定义，厘清二者之间的关系。

2.1 烟气中SO₃的测试方法及测试对象

湿法脱硫后，烟气中的水分基本处于饱和状态，SO₃极易与水结合形成硫酸，因此烟气中的SO₃全部以H₂SO₄形式存在。当烟气温度低于硫酸蒸汽的露点(Dew point)温度时，硫酸蒸汽冷凝形成硫酸液滴。0.5~3.0 μm小粒径的硫酸液滴会形成硫酸气溶胶，导致硫酸雾的出现；而粒径超过10 μm的较大的硫酸液滴则会吸附在飞灰颗粒上。所以，SO₃的测试结果均与测试方法密切相关，表1列出了国内外SO₃的测试方法标准及测试对象。

表1 SO₃测试方法标准与测试对象
Table 1 SO₃ definition and test method standard

序号	标准名称	测试对象	采样原理	主要技术要点与质控措施
1	美国 EPA 方法 8 固定污染源排放烟气中硫酸雾和 SO ₂ 的测定	硫酸雾和气态三氧化硫	异丙醇吸收	采用不加热的过滤器；采样探头加热至防止凝结的最低温度；吸收液为 30% 异丙醇溶液
2	美国 EPA 方法 8A 克拉夫回收炉排放烟气中硫酸蒸汽或雾和 SO ₂ 的测定	硫酸雾滴和硫酸雾	控制冷凝	260℃ 的加热过滤器；采样探头加热至 177℃ 以上防止硫酸雾(滴)的凝结；控制冷凝管实现硫酸雾(滴)与 SO ₂ 的分离
3	《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》(GB/T 21508—2008) 附录 C 烟气中 SO ₃ 浓度的测定	资料性附录，未明确	控制冷凝	采样管和石英过滤器加热温度保持在 260℃；采用玻璃蛇形收集管捕集和分离 SO ₃
4	《石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置性能验收试验规范》(DL/T 998—2016) 附录 A 烟气中 SO ₃ 的测定	资料性附录，未明确	控制冷凝	采样烟气温度在 150℃ 以上；通过二级玻璃蛇形收集管捕集和分离 SO ₃ ；加热的石英丝毛过滤网过滤烟尘
5	《固定污染源废气 硫酸雾的测定 离子色谱法》(HJ 544—2016)	硫酸小液滴、三氧化硫及颗粒物中可溶性硫酸盐	滤筒捕集 + 水吸收	加热采样枪的温度不低于烟气温度；等速采样；通过滤筒过滤颗粒物

从表1可以看出，国内外对烟气中SO₃的测试方法并不统一，采用不同的测试标准，其测试对象也有所不同。这就造成不同的测试方法获得的测试结果存在一定差异，有时可能还相差很大。

2.2 可凝结颗粒物的定义及测试方法

我国尚无可凝结颗粒物的定义及测试方法，美国EPA Method202对可凝结颗粒物的定义为：在烟道环境内为蒸汽态，离开烟道后在空气中冷却、稀释后经冷凝或反应立刻形成固态颗粒物或液体颗粒物的一类物质，所有可凝结颗粒物都是PM2.5。

从EPA的定义可以看出，可凝结颗粒物是混合物。图1为EPA Method 202A采样流程，采用“控制冷凝+惯性撞击”的方式对可凝结颗粒物进行捕集。

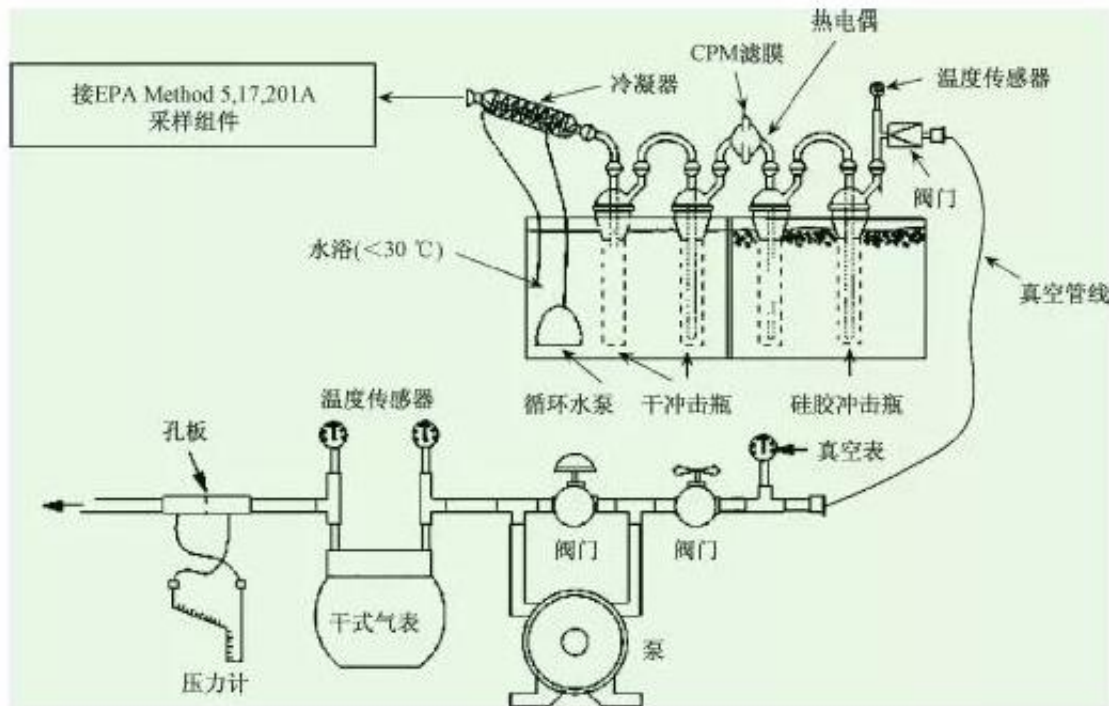


图1 EPA Method 202A 采样流程

与SO₃

测试中控制冷凝的方法不同

，可凝结颗粒物采样系统中的水浴控制温度低于30℃，

而SO₃

控制冷凝采样方法中的水浴控制温度需维持在75~85℃。另外，可凝结颗粒物前端可根据不同的采样目的，配置EPA Method 5、Method 17或Method 201测定可过滤颗粒物。

2.3 SO₃和可凝结颗粒物之间的关系

烟气中SO₃

、可凝结颗粒物的测试方法与测试条件的不同，测试对象就会有所不同，测试结果也会存在一定差异。二者都可以采用控制冷凝、惯性

性撞击的方式进行收集，测试对

象必然存在交叉。此外，从定义上看，烟气中的SO₃

确实具有可凝结颗粒物属性，即在烟道内是蒸汽态，排入大气环境后因冷凝或与其他阳离子发生反应生成硫酸盐而成为液态或固态颗粒物

。尽管不同测试方法的测试对象有所不同

，但测试结果均表明烟气中的SO₃

是可凝结颗粒物中最主要的组成部分，可凝结颗粒物中

的SO₄²⁻占离子总量的比例高达81.67%，占阴离子总量的比例高达86.76%

。目前，烟气中SO₃的测试已有在线监测仪器，但可凝结颗粒物的测试尚无在线监测技术。

3 SO₃和可凝结颗粒物控制存在问题

3.1 控制对象及控制程度模糊

由于我国对燃煤电厂湿烟气排放成分缺少足够的研究，特别是环保部门尚未对烟气中的可凝结颗粒物给出定义与测试方法，造成烟气中的成分测试非常混乱，结果千差万别。例如，烟气中的“可溶性盐”“可溶盐”“溶解盐”“水溶性离子”“溶解固形物”“溶解性总固体”“超细粒子”“超细颗粒物”等各种概念见诸媒体及相关论文中，甚至得出“湿法脱硫是致霾主因”的谬论。一些地方政府迫于雾霾治理的压力，仓促出台超低排放后烟气深度治理的相关政策，但对控制对象、控制程度非常模糊。

排放烟气中的水汽以气态为主, 占99.95%以上, 气态水中不含盐, 只有液态水溶液中才含有“溶解盐”, 即溶解固形物。由于液态水占比小于0.05%, 超低排放条件下烟气中排放的溶解固形物介于0.15~2mg/m³, 一般不超过1mg/m³。

“可溶性盐”“溶解盐”等各种没有明确定义的项目测试中, 测试的都是水溶液中的溶解固形物成分或各种离子浓度之和。水对各种盐的溶解度不仅与温度有关, 而且与水溶液的pH值密切相关, 如烟气中未反应的石灰石颗粒, 在pH值为7的水溶液中基本不溶解, 但在pH值为3的酸性水溶液中会快速溶解。

由于测试方法、测试条件各不相同, 会导致结果相差很大, 如有些测试是直接对烟气进行冷凝, 烟气中以H₂SO₄形式存在的SO₃、SO₂、NO₂、CO₂等都会溶入水中, 造成pH值大幅下降, 从而溶解烟气中的可过滤颗粒物, 造成“盐”浓度明显偏高。

根据美国EPA Method202, 燃煤电厂烟气排放的颗粒物有可过滤颗粒物和可凝结颗粒物两类。上述各种“盐”的分析与测试, 本质上都属于这两类颗粒物。可过滤颗粒物就是目前我国标准中的颗粒物, 对于超低排放燃煤电厂, 执行的是全世界最低的排放限值10mg/m³。对于可凝结颗粒物, 世界各国均没有排放标准, 主要是通过控制烟气中SO₃来实现对可凝结颗粒物的控制, 美国已有22个州颁布了燃煤电厂SO₃地方排放标准。

3.2 排放要求与监测方法缺失

在我国所有地方政府出台的烟气深度治理政策文件中, 尽管表述各不相同, 但基本上均提及要控制可凝结颗粒物。非常遗憾的是, 除衡水市明确要求烟气中SO₃不高于5mg/m³外, 其他地区所有文件中均未明确污染物的排放控制要求, 更无监测方法的相关要求。如前文所述, 我国目前在国家层面暂无针对燃煤电厂SO₃排放的监测方法标准, 各单位开展的监测基本上均属于研究性监测, 监测方法、监测对象尚未统一。考虑到大气中的环境行为, 建议监测烟气中以H₂SO₄形式存在的SO₃, 无需监测被飞灰吸附生成的硫酸盐。

3.3 现有设施对SO₃协同治理不够充分

燃煤电厂对SO₃的治理源于2000年的美国Gavin电厂, 该厂在加装SCR烟气脱硝后, 出现了“蓝烟”现象。因为SCR脱硝增加了烟气中的SO₃浓度, 湿烟气中的SO₃以亚微米粒径的硫酸气溶胶形式存在, 粒径越小, 对于短波长的散射越强, 使得烟羽呈现蓝色。此后, 为了控制蓝色烟羽, 湿式电除尘器在美国电厂得到应用。

对SO₃具有明显协同减排效果的烟气治理设施包括低低温电除尘器、湿式电除尘器、电袋复合除尘器和湿法烟气脱硫, 只有以硫酸小液滴形式存在的SO₃, 才易被这些设施协同脱除。因此, 低低温电除尘器必须运行在酸露点温度以下, 其协同脱除效果才会明显, 脱除效率可以达到80%以上。事实上, 现在有不少电厂的低低温电除尘器运行在酸露点温度以上, 对SO₃的脱除效率普遍偏低。湿式电除尘器、湿法脱硫对SO₃的脱除效果与硫酸小液滴的大小及烟气流速密切相关, 脱除效率与工艺及参数密切相关, 如不同工艺的石灰石-石膏湿法脱硫对SO₃的协同脱除效率可从16.3%变化到86.9%。

上海市6个电厂6台机组SO₃全流程的测试结果表明, 只要充分发挥好现有烟气治理设施协同脱除SO₃效果, 排放烟气中的SO₃可以做到小于5mg/m³, 平均值仅为2.29g/m³, 无需再对烟气进行冷凝

。烟气冷凝与湿式电除尘器结合对SO₃的脱除效率可高达90%，烟气冷凝与高效除雾器结合对SO₃的脱除效率可高达75.8%。是否需要采用烟气冷凝方式进一步脱除以SO₃为主的可凝结颗粒物，主要取决于烟气中SO₃浓度的排放标准。

3.4 烟气加热无法消除蓝色烟羽

对于满足超低排放的燃煤电厂，有色烟羽只能是白色烟羽或蓝色烟羽。白色烟羽是由烟气中的水汽冷凝形成的。烟气加热可消除白色烟羽，但由于能耗增大会导致污染物排放量的增加。可见，从减少大气中PM_{2.5}等污染物的角度出发，不对烟气进行加热以消除白色烟羽。

蓝色烟羽是由烟气中的硫酸雾滴形成的。烟气加热不能消除蓝色烟羽，因为烟气中的SO₃在200℃以下全部以硫酸气溶胶，即硫酸雾滴的形式存在，只有当烟气温度大于500℃时，烟气中的SO₃才全部以气态SO₃形式存在，而燃煤电厂加热排烟温度一般都在80℃以下。

4 结论与建议

燃煤电厂超低排放大幅减少了电力行业颗粒物、SO₂和NO_x的排放，为我国大气环境质量改善做出了巨大贡献。燃煤电厂湿烟气排放的颗粒物有两种类型，一类是目前我国排放标准中已监控的可过滤颗粒物，另一类是我国尚无标准控制的可凝结颗粒物。一些报道及研究中关于烟气中排放“盐”偏高的结果，是由于监测方法不当，烟气中可过滤颗粒物、SO₂、NO₂、CO₂等溶解在凝结水中并相互反应造成的。

燃煤电厂可凝结颗粒物中的最主要成分是SO₃，全部以硫酸气溶胶的形式存在，部分会被飞灰吸附反应生成硫酸盐。国内外不同监测方法针对的SO₃对象有所不同。现有烟气治理设施中的低低温电除尘器、湿式电除尘器、湿法脱硫等对SO₃具有明显的协同脱除作用，但不同电厂的脱除效率相差较大。燃煤电厂超低排放后的烟羽只能是白色烟羽或蓝色烟羽。烟气加热可以消除白色烟羽，但不能减少SO₃或可凝结颗粒物的排放，更不能消除蓝色烟羽。相反，由于能耗增大会增加污染物的排放。

从技术角度，建议国家尽快针对我国燃煤电厂的湿烟气特点，抓紧研究湿烟气中SO₃和可凝结颗粒物的赋存形式、监测方法与控制技术，并进行工程示范；系统研究超低排放条件下，现有烟气治理设施对烟气中SO₃和可凝结颗粒物的协同脱除效果与影响因素，弄清不同治理设施对SO₃和可凝结颗粒物的脱除机理；深入研究湿烟气条件下，有色烟羽的成分、成因、物理特性、扩散规律及其环境影响。

从管理角度，建议国家尽快明确烟气中SO₃和可凝结颗粒物的定义，出台固定污染源烟气中SO₃和可凝结颗粒物的监测方法标准；修订《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)，增加SO₃的排放标准限值；地方政府必须依法出台相关的政策与标准，对烟气进行治理时必须明确具体的污染物及其治理要求、监控方法；任何非法或背离环境保护目的的所谓烟气综合治理政策都应尽快停止执行，坚信减少大气污染物排放才是治理雾霾的重要手段。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/142687.html>