治霾当务之急是控制可凝结颗粒物的排放浓度

来源:《电力科技与环保》  作者:江得厚 苏跃进

摘要：燃煤锅炉净烟气中可凝结颗粒物的排放尚未进行有效监测和治理,而可凝结颗粒物是环境空气中PM2.5和气溶胶物质的重要前体物,可凝结颗粒物排放浓度在总颗粒物浓度中的占比较高,在固定源排气常规污染物达到超低排放的情况下,进一步深度治理的边际效应显著降低,治霾当务之急是控制净烟气中可凝结颗粒物的排放浓度。控制可凝结颗粒物排放浓度需要制定合理的控制标准,对湿烟气的控制标准须更严格。可凝结颗粒物治理宜在合理的标准指引下,采取有针对性的措施,避免盲目治理。

**0 引言**

近几年来，固定源排气中的常规污染物排放浓度控制成效显著，尤以燃煤电厂超低排放为代表。排放至大气的净烟气中会有大量体积极小的气态有机或无机物在空气中稀释、降温数秒后凝结成液态或固态，并通过凝聚、碰撞与合并生成可凝结颗粒物CPM( Condensable Particulate Matter) 。燃煤锅炉净烟气中CPM的排放尚未进行有效监控，已经采取的污染物治理措施基本上不是直接针对CPM。CPM是环境空气中PM2.5和气溶胶物质的重要前体物，PM2.5在大气环境中稳定存在时间长，输送距离远，影响范围广，不易通过干沉降去除。未对CPM 进行有效治理的情况下，CPM排放浓度在总颗粒物浓度TPM( Total Particulate Matter ) 中的占比较高，在固定源排气常规污染物达到超低排放标准的情况下，进一步深度治理常规污染物的边际效应显著降低，而治理CPM的边际效应比较高，治霾当务之急是有针对性地控制净烟气中CPM的排放浓度。控制CPM排放浓度需要制定合理的控制标准，并且要区分干湿烟气情况。控制CPM排放浓度应制定合理的排放标准，采取合理的治理措施，避免盲目治理。

**1 燃煤锅炉净烟气中可凝结颗粒物的排放浓度比较高**

胡月琪等分别对燃煤电厂、供热锅炉、工业锅炉等的净烟气中颗粒物排放浓度进行了测试，如表1 所示，烟气中CPM、水溶性离子的排放浓度均比较高。

从某燃煤电厂A的颗粒物排放情况看，可过滤颗粒物FPM( Filterable Particulate Matter) 排放浓度仅有1. 04mg /m3，远低于5mg /m3 的超低排放标准，但是CPM排放浓度却达到12.94 mg /m3，是FPM排放浓度的12. 4 倍。CPM 的粒径通常远小于FPM 的粒径，CPM的粒数浓度远远高于FPM 的粒径。

《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采用方法》( GB /T 16157－1996) 标准( 以下简称国标法) 仅对FPM进行测量，该燃煤电厂的颗粒物排放浓度已经非常好。但是，从排放浓度看，该燃煤电厂的排放浓度显然非常高。供热厂、工业企业所用脱硫工艺的脱硫副产物溶解度远高于石灰石法，其排放的CPM浓度、离子总量均明显高于燃煤电厂。供热厂1、工业企业B采用湿法脱硫除尘一体净化工艺，其FPM的浓度远高于燃煤电厂。供热厂2采用了袋式除尘器+ 湿法脱硫，其FPM排放浓度明显低于湿法脱硫除尘一体净化工艺，但是其CPM排放浓度并不低。特别需要注意的是，某工业企业B采用钠法+ 氨法脱硫除尘一体净化工艺，其FPM、CPM、水溶性离子浓度均非常高，分别达到46.58、35.81、51. 24 mg/m3，对于环境的危害特别大。

胡月琪等测试的燃煤锅炉净烟气的CPM排放浓度结果具有很强的代表性。燃煤锅炉净烟气排放了如此高浓度的CPM，对于雾霾污染源的确定、污染物的治理具有很强的指导意义，应引起足够的重视。

朱法华对燃煤电厂净烟气中SO3排放浓度的检测结果和胡月琪等的检测结果具有一致性。超低排放机组烟气中SO3浓度测试结果的平均值为8.86mg/m3，其中加装湿式电除尘器的20台机组平均值6.6mg/m3。实现超低排放之前，烟气中SO3的排放浓度平均不超过30mg/m3。

对于污染物治理，应当考虑环保投入的边际效应。在FPM 浓度仍较高的情况下，采用超低排放改造等措施，降低颗粒物排放浓度很有必要，且环保投入的边际效应较高，能够起到立竿见影的效果。在FPM 治理达到非常好的情况下，再进一步深度治理的边际效应很小，减排量也很小，投入却不小; 在CPM尚未获得有效治理的情况下，采取适当的治理措施，降低CPM排放浓度能够带来较高的环保边际效应。

**2 达到超低排放标准的基础上，再提高排放标准的环保边际效应非常低**

在烟气污染物治理方面，超低排放标准的实施对于控制污染物排放总量、排放浓度起到了非常重要的作用，在较短的时间内，对于大气质量改善起到了重要作用。超低排放技术在燃煤电厂成功应用的基础上，在更大范围内也逐步得到推广应用。在超低排放标准实施的基础上，若进一步降低常规污染物的浓度，边际效应显著下降。以脱硝为例，若原烟气NOx浓度从500mg/m3 降低至100mg/m3，布置两层催化剂即可实现( 为方便表述，不以催化剂面积，而以催化剂层数表示催化剂的使用量) ，每层催化剂的边际效应为200mg/m3，脱硝还原剂氨的反应比较完全。若降低至50mg/m3，则须增加至三层催化剂，第三层催化剂的边际效应仅50mg/m3。同时，由于催化剂层数的增多，SO2氧化生成SO3的浓度会提高; NOx排放浓度越低，低浓度的NOx和氨气反应越困难，氨逃逸的问题会越突出。NOx和氨气均是CPM 的重要来源，在目前的脱硝工艺没有明显改进的情况下，深度脱硝会加剧CPM 的排放。提高脱硝效率，催化剂层数需要增加，SCR脱硝装置之后布置的空气预热器、低温省煤器出现堵塞的机会升高，烟气阻力增大，带来能耗的增加。能耗的增加是一种变相的污染物排放浓度升高。若进行更深度的脱硝，当出口NOx达不到排放标准的时候，运行人员通常会选择提高喷氨量的做法。在脱硝效率超过一定的平衡点后，可能会出现减排的氮氧化合物浓度不如增加的氨逃逸、SO3生成浓度多，会出现减排控制悖论。

再以喷淋塔湿法脱硫为例，若从2000mg/m3 的原烟气SO2浓度降低至100mg/m3，建设三层喷淋层即可实现，每层喷淋层的边际效应为633mg/m3。提高脱硫效率的方法比较多，包括烟气整流、使用托盘、使用旋汇耦合、串塔布置、使用高效喷嘴等。为方便表述，仅以增加喷淋层的层数代表提高脱硫效率的途径。若降低至35 mg /m3，通常须增加至四层喷淋层，第四层喷淋层边际效应仅为65mg/m3。天津市出台了更严格的污染物排放标准( 征求意见稿) ，要求新建机组达到10mg/m3 的标准。若再增设一层喷淋层的话，第五层喷淋层的边际效应仅为25mg/m3。由于喷淋层数的增多，脱硫产生的次生颗粒物硫酸钙、碳酸钙的粒数浓度可能会增加。

若进一步降低脱硫装置出口处的雾滴浓度，还需要增加除雾器层数，或者采用湿式电除尘等工艺手段。喷淋层增加和除雾能力提高，烟气阻力会增大，增大引风机电耗; 循环浆液泵的投入数量增加也会明显增加电耗，脱硫能耗增加明显。

超低排放技术不是直接针对CPM去治理的，其对CPM浓度降低的作用起到辅助作用，但对于特定污染物，某些技术是负边际效应。如，提高SCR法脱硝排放标准，会带来氨气、SO3排放浓度的升高。在某些情况下，若控制常规污染物浓度方法不当，对于CPM浓度的控制贡献不大，甚至是负边际效应。如，对高温烟气采用废氨水脱硫，可以控制SO2浓度达到很低的水平，但会造成氨气气溶胶等CPM的上升，若再去治理气溶胶，一方面治理困难，另一方面，治理成本反而会更高。

在超低排放标准的基础上，再进一步提高常规污染物的排放浓度，带来的边际效应显著递减，不但投资显著增大，技术难度显著提高，运行维护费用、能耗也会显著增高，能够带来的减排量已经微乎其微，环境收益和投入之间的比值非常低。武安君等认为，污染物减排不能等同于雾霾治理，雾霾治理要抓住主要矛盾。因此，在当前阶段，若非必要，常规污染物排放浓度达到超低排放标准，再降低排放浓度的意义不是很大。为尽快治理雾霾，除了做好常规污染物排放浓度仍较高的产业的治理外，有限的财力物力应当尽快投放到环保边际效应比较高的CPM治理方面。

**3 可凝结颗粒物治理应当标准先行**

国内针对CPM的危害、治理等已经有了一定研究。为控制致霾污染物，随着认识的深入，部分地方出台了治理雾霾的地方环保标准或规定，但是均没有直接针对CPM，所给出的治理方向比较发散。部分钢铁、电力企业进行了治理的实践和研究，取得了一定的成效。

如表2 所示，列出了近期国内几个地方出台的实施或征求意见的地方标准、规定的情况。其中，上海规定了硫酸雾( SO3) 的排放浓度; 杭州规定了SO3、氨气的排放浓度，并要求对石膏雨、有色烟羽治理; 天津对新建机组规定了更严格的常规污染物排放标准，可以称之为“超超低排放”，关于烟气温度湿度和再加热的规定，实质是对有色烟羽的治理;河北省邯郸和唐山市、山西省临汾市等提出了烟气脱白要求。

归纳起来，这些规定都和CPM排放浓度的控制有相关性，含糊的脱白、白烟治理规定，显然难以作为可有效操作执行的标准; SO3、NH3排放浓度规定可操作执行，但是所控制污染物包括了CPM的重要组成部分，不能全面反映CPM的控制效果; 测试SO3不包括硫酸根量、测试NH3不包括铵根量的情况下，测试的浓度值会明显偏低; 控制烟气温度和湿度，与CPM实际排放控制之间的关系不明确，且控制温度湿度情况下，再进行烟气加热，烟气“脱白”治理成本非常高昂。

从这些地方的规定可以看出，烟气中CPM的环境危害已经引起了政府部门的高度重视，并且已经付诸行动。从另外一个侧面说明，对于烟气中CPM的治理，认识上仍然存在差异; 在治理途径上，仍缺乏更深入的认识。如果治理途径不能直接有效降低致霾污染物排放浓度，可能会造成治理费用的浪费，治理成本的提高，治理周期的延长。因此，迫切需要从国家层面上尽快制定并实施CPM排放浓度标准、监测标准。从简化排放标准角度看，可以考虑只控制总的颗粒物排放浓度，不区分CPM与FPM。

**4 可凝结颗粒物排放标准应当区别对待干湿烟气**

1996年颁布执行的国标法测定颗粒物浓度，测量对象基本上是湿法脱硫经GGH加热后的烟气，或者是干法、半干法脱硫的净烟气，烟气中基本不含液态水。在干烟气条件下，CPM和FPM、水溶性离子之间基本不发生相互转换的情形。2012 年后，为满足更严格的环保排放标准的要求，多数燃煤电厂原有的GGH大量被拆除、新建机组通常不采用MGGH，以湿烟囱方式排放饱和湿烟气，烟气中所含液态水浓度显著高。湿烟囱条件和干烟气条件下，烟气中颗粒物的形态分布有着明显的差异。

湿烟气条件下，烟气中的颗粒物成分之间可以发生相互转化。表现在以下几个方面:

( 1) 烟气中含有一定浓度的雾滴，雾滴为液态水稀释了的脱硫浆液。脱硫塔除雾器之后测试的雾滴浓度指标，是指剔除了含固物后的脱硫浆液量，而脱硫浆液中包含了较高浓度的水溶性离子。胡月琪等的研究可以验证，石灰石脱硫工艺净烟气雾滴中的水溶性离子浓度相对较低，而钠法、氨法脱硫工艺由于脱硫副产物溶解度非常高，净烟气雾滴中的水溶性离子浓度比较高。

( 2) 烟气中FPM 向水溶性离子转变。由于烟气中大量凝结液滴的存在，在湿烟囱、烟羽范围内，烟气中的SO2和凝结液滴反应生成亚硫酸，并进一步被氧化生成硫酸液滴，增加液滴中的硫酸根、亚硫酸根的浓度，而SO3、HCl、HF、NH3等物质进入液态水中，烟囱内的液滴具有很强的酸性，pH值大约在2 左右，在强酸性条件下，烟气中的FPM中，脱硫次生颗粒物中溶解度低的硫酸钙会溶解于强酸液中、碳酸钙会和强酸间发生反应生成水溶性离子，没有脱除的粉煤灰颗粒物中的金属氧化物和强酸反应生成水溶性离子。

( 3) 湿烟囱条件下，SO2能够生成硫酸液滴，一定程度上具有SO3CPM的特征，同时，由于SO2在湿烟囱内不足以全部转化生成硫酸液滴，一部分

SO2仍以气态形式排放。因此，SO2兼有常规气态污染物和CPM的特征。CEMS装置通常安装在水平烟道或烟囱下部，湿烟囱条件下，CEMS不能准确反映烟囱出口处的SO2浓度。如何对待SO2排放浓度的检测结果，如何判定SO2在烟囱出口处，以及烟羽范围内的SO2排放形式，是否需要折算、以及如何折算成CPM，是个值得探讨的问题。

若用MGGH对烟气进行加热，则烟囱内烟气重新进入不饱和状态，没有液态水的存在，烟气中的SO2无从转化为硫酸液滴，FPM 也无从转化为水溶性离子。另外，由于GGH 的加热作用，烟气中的雾滴在换热元件表面发生液态水的蒸发，液滴中的水溶性离子部分在换热元件表面凝结，减少了水溶性离子的排放浓度，部分水溶性离子转化为FPM 排放。因此，GGH 的作用不仅是提高烟气的抬升扩散能力、避免烟囱内壁腐蚀，更重要的是烟气变为不饱和烟气，一定程度减少CPM 的排放浓度。而水溶性离子浓度、CPM浓度高低，对于颗粒物粒数浓度会有影响。使用MGGH 基本消除了白色烟羽，但是，消除白色烟羽不应当是使用MGGH 的主要目的。相对于湿法脱硫而言，如果采用干法脱硫、半干法脱硫，基本上不存在湿烟气产生的问题。

基于以上分析，干烟气和湿烟气的CPM排放浓度会不同。对于湿烟囱内、以及烟羽范围内，CPM的转化生成情况的研究还很少，从定性看，影响会比较明显。当制定CPM 排放浓度标准时，宜在测试研究的基础上，对干湿烟气情形适当区别对待。对于湿烟气条件，CPM排放浓度应当要求更严格。

**5 采取合理措施治理可凝结颗粒物排放浓度，避免进入治理误区**

减少CPM排放浓度，需要综合考虑CPM的生成、烟气常规污染物治理和CPM治理的协同、经济合理的CPM脱除等措施，并且要避免进入治理误区。周勇等对湿法脱硫致霾进行了分析，对控制可溶盐排放问题进行了呼吁，并提出了一定的治理措施。

控制CPM的生成可以包括减少炉膛内燃烧阶段的污染物生成，脱硝环节减少氨逃逸、减少SO2氧化生成SO3的比例等。

CPM的协同治理是一个努力方向。在空气预热器与干式电除尘间设置烟气冷却器，将烟气温度从120～130℃降低到90℃左右，由于在该温度范围大部分SO3发生凝结，沉积在灰颗粒表面，能有效脱除SO3。提高除雾器、湿式电除尘等的除雾效果，通过深度除雾，能够有效降低雾滴浓度，并一定程度脱除硫酸雾。对于氨法、钠法、镁法脱硫，尤其要注重控制雾滴浓度，降低烟气中水溶性离子的浓度。通过深度脱硫，降低净烟气中的SO2浓度，可以降低SO2在湿烟气中生成硫酸液滴的量。

针对CPM的脱除措施，目前比较有效的措施是冷凝法。冷凝法可以实现有效降低烟气中的CPM，并回收烟气中的部分水份。对于缺水区域，部分回收烟气中的水分意义明显。同时，冷凝法还能实现有色烟羽治理。冷凝法存在的主要问题是如何获得经济、可行的冷源。

应当指出的是，采用冷凝法的目的不应该主要是为了实现“脱白”，而“脱白”的目的应当主要围绕降低污染物的排放浓度。“脱白的方法有多种，例如，使用MGGH可以实现“脱白”，但对于降低CPM排放浓度作用比较有限，也不能降低烟气中的含水量，投资不小，能耗不低。即使在城市建成区域、环境敏感区域等对白色烟羽有特殊要求的区域内，也应当尽可能采用以脱除污染物为目标的“脱白”手段。

检验CPM的排放是否达标，其标准应当是CPM的排放浓度。通过控制烟气的温度、湿度等，不是治理目标，只能是一个过渡期内的、间接的控制CPM浓度的一种监测控制手段。如果通过烟气的深度治理，净烟气能够满足CPM的排放浓度要求，就没有必要进行“脱白”治理。反过来，如果采取了“脱白”措施，但是CPM排放浓度不能达到一定标准，就不能认定为达标排放。合理的“脱白”方法是有效治理烟气中CPM排放浓度的一种手段，而不应当作为治理污染物的追求目标，本末不可倒置。

**6 结语**

( 1) 燃煤锅炉净烟气中CPM的排放浓度比较高，治理CPM 排放的环保边际效应高。

( 2) 达到超低排放标准的基础上，再提高常规污染物排放标准的环保边际效应非常低。

( 3) CPM治理应当标准先行，目前国内已有的地方规定非常发散，不利于CPM的有效治理。

( 4) CPM排放标准应当区别对待干湿烟气，对于湿烟气排放应当采取更严格的排放标准。

( 5) 采取合理措施治理CPM排放浓度，避免进入治理误区。