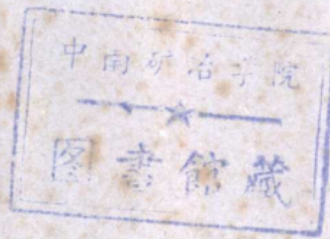


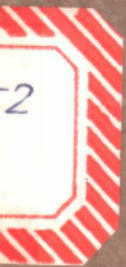
492386

废气净化工程



湘潭大学科技情报室

一九八三年十月



492386



0099375

前 言

“废气净化工程”是我校化工环境工程专业开设的主要专业课之一，本课程所涉及的内容较为广泛：主要包括气体污染物在大气中的扩散规律，废气中颗粒物及气体污染物的采样、分析，废气净化的各种理论、设备、工艺过程及参数，废气净化过程工艺及设备的设计、评价等。

编辑本译文集的目的旨在：

1. 为教学和科研积累有关废气净化工程的资料；
2. 将国外有关这方面的资料介绍给从事该专业工作的科研教学工作者作参考。

鉴于我们在废气净化工程方面缺乏专业知识、本译文集中的错误在所难免，敬请读者惠赐批评指正。

本译文集在编辑过程中，得到我校化工系废气净化工程教研组杨万发等老师的支持和具体指导，在此表示感谢。

湘潭大学科技情报室

1983年10月



1981/12/28/02

目 录

- 一、除尘设备的设计.....(1—8)
- 二、受限锅流洗涤器净化热气.....(9—21)
- 三、在硫化床烧煤中可增强石灰石硫酸盐的水化作用.....(22—28)
- 四、烧煤产生的硫污染、煤的矿物成分对硫酸盐化煤粉和硫酸钙热稳定性的影响.....(29—38)
- 五、在石灰/石灰石烟气脱硫系统中氢氧化物对亚硫酸盐的氧化及结垢的影响.....(39—43)
- 六、温度对石灰石颗粒与二氧化硫反应的影响.....(44—52)
- 七、在氧、 H_2S 共存下的湿式脱硫法.....(53—64)
- 八、柠檬酸盐烟气脱硫技术的工业应用.....(65—73)
- 九、柠檬酸钠溶液洗涤回收 SO_2(74—81)
- 十、排烟脱硫与排热回收系统.....(82—88)
- 十一、碱性硫酸铜—石膏法排烟脱硫设备的操作.....(89—98)
- 十二、电子束照射干法脱硫脱氢氧化物流程.....(99—107)
- 十三、脱除氢氧化物的新型催化反应器.....(108—114)
- 十四、活性炭脱除有机蒸气的吸附容量及预测方法.....(115—122)
- 十五、使用两段文丘里洗涤降低能量消耗.....(123—126)

除尘设备的设计

山田 弘

1. 前言

随着矿产工业的飞速发展，将有可能产生对环境的破坏和污染。为了预防和消除这种破坏和污染，研究出了许多公害防止设备，并在实际中得到了应用。

现在，对工业设备增强的时代过去了，而对环境保护的关心却与日俱增。因此，不仅要明确环境保护的标准，而且人们的目的是要使排放出来的烟达到人眼看不见的程度（即不可视烟）。

另一方面，生产所用能源的燃料，迅速由石油向煤炭转移。煤与重油燃料不同，燃料中的灰份要高得多。因此，燃烧废气中的粉尘量也会显著增加。但是烟囱里排放出来的烟气含尘浓度必须保持在现有水平（不可视烟），这样就对除尘设备的效能提出了更高要求。

为了要满足这些高要求，就必须发展高性能的除尘技术。

本文作为这类高效除尘设备的设计参考，对有关除尘设备的设计程序，除尘设备的特性以及最近高效除尘器的应用实例作一介绍。

2. 除尘设备的设计程序

各种不同的除尘设备，在除尘效率、设备费用、运转费用等方面都有各自的利弊，因此，在进行除尘设备设计时，必须全面分析它的使用目的，捕集物的处理（是否对物料进行回收）等各方面，以最经济的方式选择具有适当的除尘效率的除尘设备。

〔图1〕表示了选定除尘设备的程序。从图中可以清楚地看出，选择除尘设备的最重要的因素是掌握发尘源的状态。如果对这一点不明确或是不全面，事后就会引起性能不足和性能不稳定之类的问题，就必然造成进行设备的改造，增加了二次投资等恶果。

在锅炉排气的除尘过程中，如果对排气量的变化调查得不充分，不是用最大排气量来选择除尘设备，事后就会因处理能力不足而增加调整措施；如果忽视排气中腐蚀性成分（ SO_2 ， HCl 等）的分析，设备的使用寿命就会因腐蚀而明显缩短，这样一类的例子很多。这些问题的存在主要是制作者调查不够或技术能力不强而产生的。为了防止这些问题的产生，既使是在除尘设备的安装方面，也要充分理解对发尘源调查的重要性，要与制作者协作，为了事后不发生意外而进行全面的实地调查。

特别希望不要只是调查发尘源的平均状态，还要综合调查它最大增产时条件变化的幅度。

在除尘设备的设计中，要充分认识到除尘设备功能的复杂性。最好是能求得有经验

的制作者的协作，设计出最适宜的除尘装置。

3. 影响除尘设备性能的因素和除尘设备的选定。

在选择除尘器规格的时候，要充分掌握各种除尘设备的性能特点。

图2(略)表示了几种有代表性的除尘设备的性能，图3(略)表示了它们各自总经费的比较。旋风分离器经费低，但它的除尘效率低，最低只能捕集 $5\mu\text{m}$ 的粒子，而微细的粒子往往难于捕集。在特殊情况下，它可以用作高含尘浓度处理的初级除尘器。

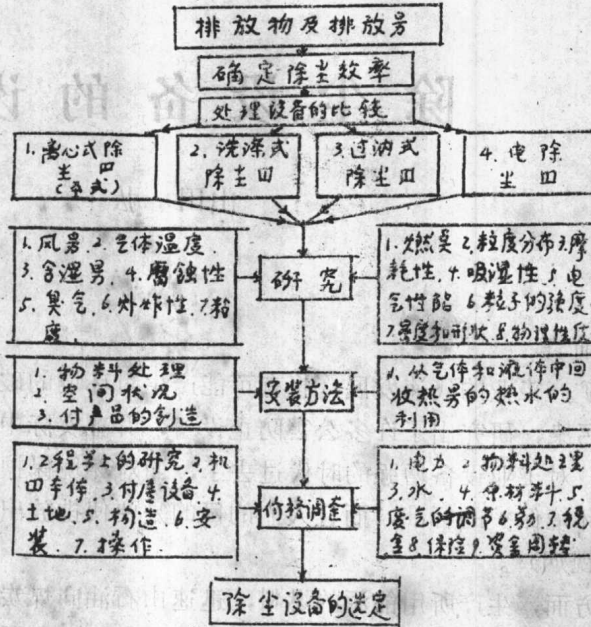


图1. 选择除尘设备的筹划和程序

对于细微的烟或尘雾，一般采用电除尘器，过滤式除尘器，文丘里洗涤器这样一些具有较高效率的除尘设备。

在这些高效除尘设备中，文丘里洗涤器制作费用比较便宜，性能也比较好。但是，由于要使用大量的水，就存在一废水处理的问题。湿式除尘设备都要进行泥浆处理，并且由于气体温度下降而使烟气的扩散不良，这些是湿式的共同缺点。

一般在燃烧排气中高温气体较多，要求采用干式除尘方式。因此，在这种情况下，只有选择布袋过滤器和电除尘器两种。

电除尘器一般适用于大容量的排气处理。因为微粒子的电阻值对除尘效率有很大影响，所以要充分掌握这种特性，在使用时要进行调湿、调温等予处理，否则就得不到稳定的高效率。这是电除尘器的一个缺点。

电除尘器的设备费用比较高，但维修比较容易，运转费用较低。所以这样的大型设备有很好的效果。作为微粒子捕集的一种方法，今后还要进一步完善。

布袋过滤器适用于中、小容量的废气处理。只要考虑了滤布的选择和操作的条件，即使捕集微粒子也有很高的效率。这是布袋过滤器的一个特点。

但是，布袋过滤器存在着耐热性问题，通常是在 150°C 以下。在过滤器前端必须设置冷却装置。另外，过滤除尘压力损失很大，有 $150\sim 250\text{mmH}_2\text{O}$ 之多。运转费用就增大了。

但是，最近出现了除尘效率不受粉尘的电气性能影响而又能稳定地去除微粒子的除尘器。美国正在将这种除尘器用于煤炭火力发电的超大容量的设备中去。日本也正在进

行这方面的研究。

4. 最近的除尘技术的应用及动向

在前面,我们记述了捕集微细粒子的各种除尘设备的优缺点。这些除尘设备单独使用当然都有各自的局限性。为了稳定地保持更高的除尘效率,我们研究出了综合各种除尘设备特征的复合式除尘器。

4.1 烧煤锅炉用移动电板式电除尘器

表 1 煤灰成份的比较(单地%)

煤 的 成 份		国产煤	中国煤	澳大利亚煤(A)	澳大利亚煤(B)
灰 的 成 分	SiO ₂	53.34	47.78	7.5	5.62
	Al ₂ O ₃	25.24	24.10	13	28.50
	Fe ₂ O ₃	4.61	9.55	4.3	3.77
	CaO	4.28	4.49	0.33	2.83
	MgO	1.38	1.23	0.44	0.00
	Na ₂ O	2.59	1.53	1.18	0.81
	K ₂ O	1.70	1.22	1.7	0.69
	SO ₃	0.28	0.27	0.07	0.31
	TiO ₂	1.18	1.09	0.60	1.09
	Ig loss	6.75	9.04	4.2	5.33
	T.C	4.17	8.46	3.8	4.23
挥发分	1.16	1.36	2.7	2.04	

表 2 煤的物性比较

名 称		日本煤	中国煤	澳大利亚煤(A)	澳大利亚煤(B)	
煤的 工业 分析 值	发热度	kcal/kg	6.360	6.740	5.440	6.830
	湿度	%	10.2	9.5	—	4.7
	固有水分	%	2.2	1.8	1.9	—
	灰分	%	21.5	15.8	30.6	9.6
	挥发分	%	34.2	31.0	25.9	29.4
	固定炭	%	42.1	51.4	41.6	56.3
	含硫量	%	1.06	0.86	0.56	0.05

从烧煤锅炉里排出的煤尘的性状如〔表1〕所示。因大部分煤种含有高电阻的物质 SiO_2 、 Al_2O_3 ，所以，这些煤尘的电阻率 ρ 就有比较高的值。

特别是今后的大部分煤种都是进口煤，从〔表2〕中也可以看出，进口煤大多数是含硫量在5%以下的低硫煤，它们的电阻率都非常高。图4（略）表示了这些煤种的含硫量、温度、以及煤尘的电阻率相互之间的关系。含硫量在1%以下，特别是在0.5%以下的低硫煤，在低温区，电阻率有 $10^{11} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ，这就不可避免地会产生反向电离现象。

一方面，随着粉尘粒径的减小，粉尘向除尘极的移动速度就会减小，微粒子一旦到达除尘极板就会产生很强的机械吸附力和静电吸附力，粉尘难于脱落，使除尘极上积灰明显增厚，除尘效率难免要下降。

粒径的大小，粉尘的表面电阻率的高低，对这种吸附力有很大的影响。〔图5〕是这种关系的测定实例。对电阻值高的煤尘， $10\mu\text{m}$ 以下的微细粒子吸附力很大，所以在采用电磁振打方式中，如图6（略）所示，一旦高电阻粉尘吸附在电极板上，用通常的振打力（ $100 \sim 400 \text{ g}$ ），几乎不能使粉尘脱离，也就无法消除反向电离现象（异常放电）。

就是把振打力增加到接近于机械强度的极限值，也得不到稳定放电。但是，实际证明，用电刷装置，基本上可以恢复正常的稳定带电状态。

日立移动电极型EP（电除尘器）如图7（略）所示，把除尘极板分成若干块，装上链条，用滚筒在上下方向以超低速回转。在除尘极板的中间装上放电极，粉尘捕集在集尘极板的两面。而在下部的非电场区域则用旋转的刷子连续进行清刷，刷掉集尘极板上的粉尘。（日立专利申请）。

因此，由于集尘极板经常保持清静，既使对高电阻微细粒子也不会发生反向电离现象。这就有可能得到稳定的高压荷电了。

因为烧煤锅炉里排放出来的煤尘粒径有 $20 \sim 30\mu\text{m}$ ，所以在粒径大，粉尘容易脱落的入口端，就采用通常的固定电极和振打方式。而在出口端，因捕集的是微细粒子，就采用了上述的移动电极的形式。选定这种组合机种按〔图8〕所示的程序。采用固定电极和移动电极组合的电除尘器，就可确保稳定的高效率除尘。这种除尘设备达到了经济性的要求。

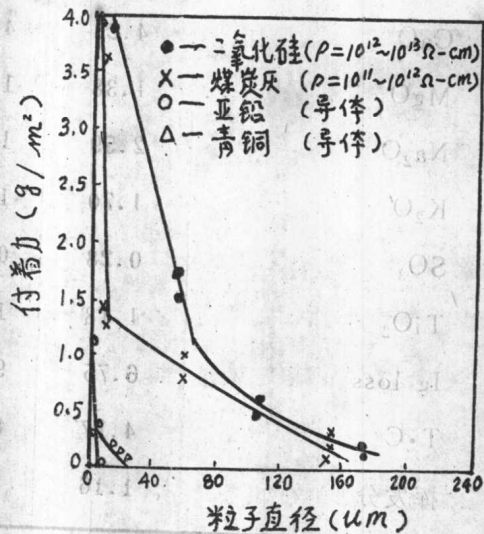


图5 粉尘的粒径和附着力的关系

表 3 某公司烧煤锅炉用电除尘器说明

固定电极 + 移动电极	
〔设计说明〕	
处理风量 (m ³ /h)	323,800
气体温度 (°C)	150
入口粉尘浓度 (g/m ³ N)	20
出口粉尘浓度 (g/m ³ N)	0.05
除尘效率 (%)	99.75
粉尘的电阻率 (Ω-cm)	2 × 10 ¹¹ ~ 1 × 10 ¹³
〔机器说明〕	
电除尘器形式	SO-HP ₂₂ 角波形式
集电极形式	SO-HM ₂₁ 平板履带式
集电极形式	框架式(4mm角线) 同左

〔表 3〕是某公司装在烧进口煤的锅炉上的组合型电除尘器的主要规格, 图 9 (略) 是设备的外形。

4.2 静电布袋过滤器的应用

布袋过滤器几乎不受粉尘物性的影响, 对微细粒子也有很高的捕集效率。它能适应今后外国煤种类的扩大, 也能满足更严格的排放标准, 因此, 这种除尘设备在国内也引起了人们的关注。但是, 这种设备运转维修的困难比较多, 这是人们希望解决的问题。为此, 我们研究出了静电布袋过滤器, 它将粉尘先经过电晕放电, 使粉尘荷电, 然后再由布袋过滤器进行捕集。

在过滤器前段装有粒子荷电装置的静电布袋过滤器, 已经应用到环境工程中去了, 现在正在把它制成焊接烟雾的除尘器, 作为工业设备向外出售。

布袋过滤器, 是靠过滤器表面沉积的粉尘层进行过滤捕集的, 所以通风阻力就会上升, 运转费用就会增大, 这是它的一个缺点。为了防止这种通风阻力的上升, 就在原有

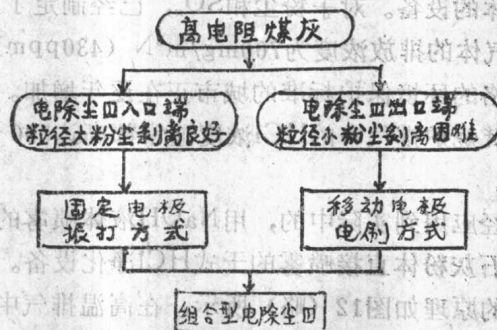


图 9 烧煤锅炉用电除尘器的类型选定

的布袋过滤器的前面设置了荷电装置，利用电晕放电，予先使粉尘荷电，然后再进行捕集，其结构如图10（略）所示，把荷电粒子捕集在过滤器上，利用积聚在粉尘层上的电荷和荷电粒子的静电斥力，达到提高捕集效率，降低通风阻力的目的。

〔图11〕是表示布袋过滤器的荷电效果的一个实例，与无荷电($E = 0\text{kv/cm}$)的情况相比较，在相同负荷下，荷电时($E = 4\text{kv/cm}$)通风阻力减少 $\frac{1}{2}$ 。而出口粉尘浓度是随着通风阻力上升而大幅度下降的。

对于 $1\mu\text{m}$ 以下的亚微粒子，捕集效率在无荷电($E = 0\text{KV/cm}$)情况下是60%左右，而在荷电($E = 4\text{KV/cm}$)的情况下则一跃而至93%以下。

今后，在烧煤火力发电中用布袋过滤器进行除尘时，要求大风量处理的设备，可望应用这种新技术。

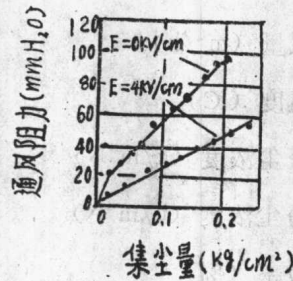


图11 通风阻力与荷电的关系

4.3 城市垃圾焚烧炉用的带有干式脱除HCl气体设备的电除尘器。

作为除尘除气同时处理的设备，我们以利用粉体吸附与电除尘组合的复合方式为例谈谈关于城市垃圾焚烧排气中的HCl气体处理和除尘的设备。

近几年里，随着塑料制品的普及，在城市的垃圾中，氯乙烯树脂一类含氯塑料的比例年年增加，因而在焚烧垃圾时产生的氯化氢气体对大气就会造成污染。人们希望有消除有害气体的设备。对于粉尘和 SO_x ，已经制定了严格的标准。对HCl也制定了标准，规定HCl气体的排放浓度为 $700\text{mg/m}^3\text{N}$ (430ppm) 以下。另外，为了城市居民的生活而施行严格的环境保护标准的城市正在逐年增加。

由于焚烧炉排气中的HCl浓度通常都高达 $300\sim 1000\text{ppm}$ ，所以，必须装有HCl的净化设备。

在已经应用到实际中的，用NaOH液体喷雾的喷淋法的基础上，设计了经济性更高的，用硝石灰粉体直接喷雾的干式HCl净化设备。笔者对此作一些介绍。

设备的原理如图12（略）所示，在高温排气中（气体温度为 $300\sim 350^\circ\text{C}$ ）的HCl气体，在吸收塔内与喷成雾状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉体气一固两相接触，进行吸收反应，反应后的生成物以及未反应的吸收剂以干燥的粉末形式与排气中的粉尘一起进入后段的电除尘器进行捕集。这种设备的特征是：

- (1) 吸收剂使用的是廉价 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉体，所以运转费便宜；
- (2) 能够简单地控制与HCl浓度相应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 喷雾量，可进一步降低运转费用；
- (3) 因为是完全干式的，就不会产生在喷管上、管道的弯头处因冷凝水而使粉尘粘附在壁上这样一些操作上的麻烦，使维修容易。
- (4) 完全干式温降小，就有可能在高温区使用电除尘器，也就有可能进行稳定的除尘和有效地减少设备的腐蚀。

图13（略）是某城市使用的外形。〔表4〕是其运转结果的一例。

如〔图14〕所示，HCl的净化率随着硝石灰投入的当量比不同而变化，最高可达80%

以上,说明即使以后标准再严格一些,也能保证有很好的效果。同时,设备还可以保证有高效率的除尘性能。

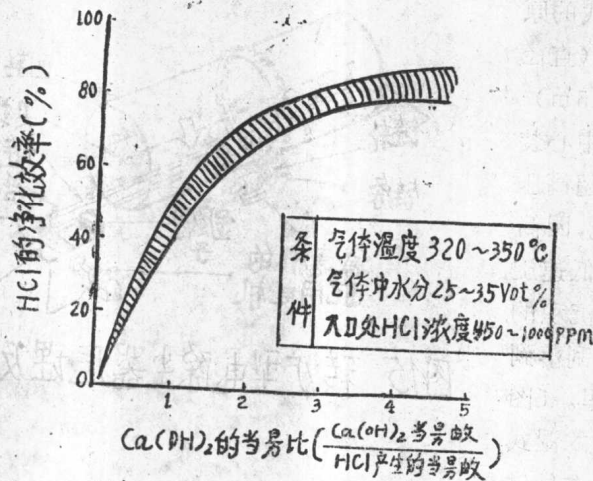


图14. HCl的净化效率与当量比的关系

表 4 某城市清扫中心收藏物的HCl净化装置使用说明

项		目	
垃圾燃烧量		吨/日	60
吸收塔入口	气流量	m ³ N/h	18,500/17,200
	气流温度	C	350
	气流湿度	Vol%	25
HCl净化	吸收塔入口HCl	ppm	1,000
	EP出口HCl浓度	ppm	400
	HCl净化率	%	60.0/73.0
	Ca(OH) ₂ 当量比	—	2.0
集尘	吸收塔入口含尘量	g/m ³ N(dy)	5.0
	EP出口含尘量	g/m ³ N(dry)	0.2
	集尘率	%	96.0/98.6

4.4 电极烧成炉用节能型干式电除尘器

下面介绍一下能代替复合除尘设备的节能型干式电除尘器
对从电极烧成炉等产生的高粘度的焦油烟雾的处理,一般使用通常的湿式电除尘器

等设备，本文介绍的是关于新形转炉型干式电除尘器。

由于洗涤式和湿式电除尘器都必须设有水处理设备，那么设备费用和运转费用都要增加，因而不经济。为此，我们考虑用干式电除尘器来处理这些高粘度烟雾的方式。

[图15]是这种方式的原理。采用迴转圆筒型（直径1.5~2m，长度5~15m）的集尘极，在集尘极中心装上柱状的放电极，用超高压（150~200KV）载电，圆筒电极以每分钟数米的低速旋转，把集尘极内表面沉积的焦油烟雾下部的刮板刮落到两头，收集到缸筒里。[图16]是本方式与常用的湿式电除尘器，Prenit型布袋过滤器三者之间，作为焦油烟雾的除尘设备的成本比较，它证明了本方式的经济性。

本方式除了能除去焦油烟雾外，也有可能作为工业设备的一个部分对含有泥状粉尘的烟雾和石油烟雾等进行处理。

5. 结束语

上面我们叙述了关于因燃料变化而对燃烧废气进行相应的处理，以及为了达到因环保工作的加强而提出的减小排气量，并且要排出的是不可视烟的要求，所进行的微细粒子的消除方法；关于各种除尘方式的比较以及目前在各种产业设备中应用的高效除尘的实例。介绍了复合型和节能型两种具有代表性的除尘设备。今后，敬请各位读者给予多方面的批评和指导，以便我们进一步提高除尘的技术。

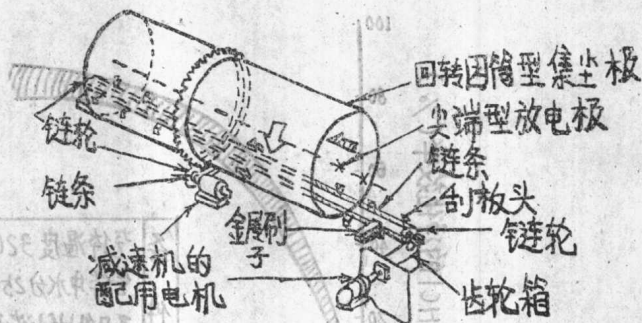


图15 转炉型电除尘器原理及构造图

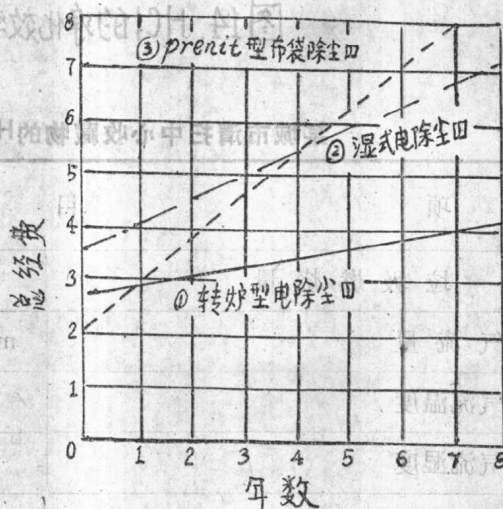


图16. 焦油烟雾除尘用各种除尘器总经费的比较

文献略

译自《公害对策と技术開発》1982第二期

除尘设备与干法除尘设备除尘设备复合翻译 文昌建 除尘设备与干法除尘设备除尘设备复合翻译 文昌建 除尘设备与干法除尘设备除尘设备复合翻译 文昌建

受限涡流洗涤器净化热气

V.H. Shui, D.B. Strickler, S.W. Clark, and K.O. Tong

热气净化法是靠气流有限离心作用推动圆柱形涡流室内的反应液以有效地捕捉气态和小颗粒污染物。

为了满足美国能源的需要，煤的使用越发显得重要和引人注目。由于其他能源例如石油和天然气成本高，供应又不一定可靠。此外美国丰富的煤储藏将足以满足自身能量需要，这将大大地改善整个经济状况，避免危机，不断改善生活标准。

加压综合循环流化床在直接和有效地用煤发电方面具有良好的发展趋势。图一绘出的是加压综合循环流化床的实例。该法将煤在加压流化床内燃烧，用热的加压燃烧气(温度接近900°C，压力6—16大气压)使气体透平做功发电。

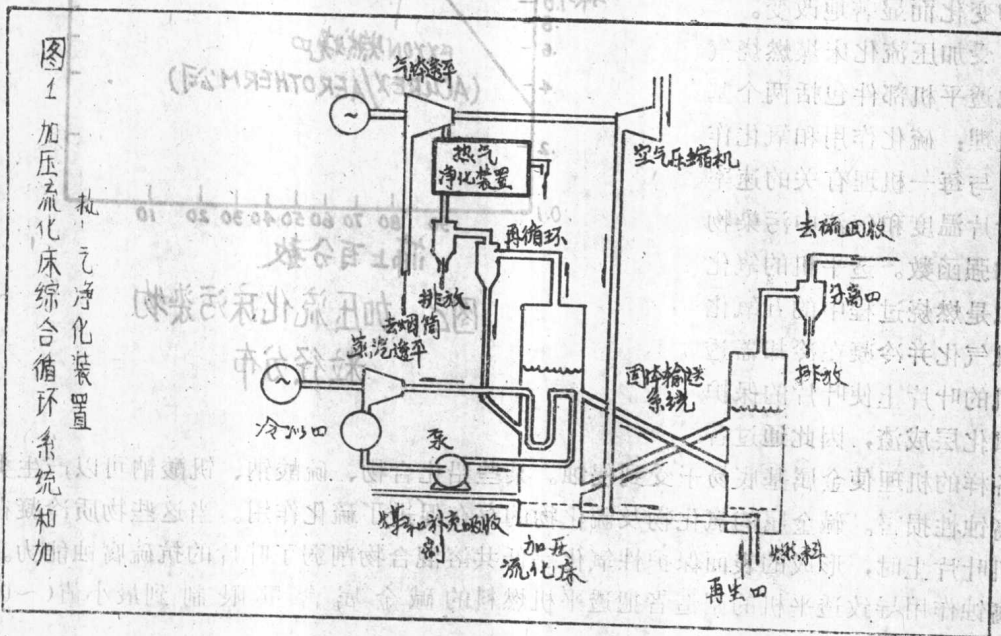


图1 加压流化床综合循环系统知加

然而这种燃烧气含有尘粒以及可能损害和污染机器部件的化学物质，必须加以清除以确保透平机的使用寿命。况且为了确保加压综合循环流化床系统的经济可靠性，气体的净化必须在高温高压条件下进行，使能量损失尽可能降低。人们承认加压综合循环流化床法的“难点”是高温高压气体的净化。

污染物的损害作用

污染物对透平机的损害作用最重要的是部件的腐蚀和磨损使透平机的寿命降低，沉降物沉积于通道内降低透平机的能量输出。磨损作用是因微粒碰撞透平部件所致，并受到粒径大小，颗粒的物理性质、叶片的性质、碰撞速度和碰撞角的强烈影响。所取得的数据表明磨损量正比于微粒质量负荷时，则磨损量随粒径的增加而迅速增加。磨损量受碰撞速度影响也是强烈的：金属表面的磨损正比于碰撞速度的2.5次方，而陶瓷则为4.5次方，这表明允许的颗粒质量负载和粒径分布可能因透平机的设计、气体的进入速度以及其他参数的变化而显著地改变。

受加压流化床煤燃烧气腐蚀透平机部件包括两个基本机理：硫化作用和氧化作用。与每一机理有关的速率是叶片温度和气流中污染物量的强函数。透平机的氧化磨损是燃烧过程中的五氧化二钒气化并冷凝在冷却器透平机的叶片上使叶片的保护性氧化层成渣，因此通过各种各样的机理使金属基底易于受到侵蚀。某些铅化合物、硫酸钠、钒酸钠可以产生类似的腐蚀性损害。碱金属的氯化物及硫化物的存在促进了硫化作用。当这些物质冷凝在透平机叶片上时，形成的表面保护性氧化层低共溶混合物削弱了叶片的抗硫腐蚀能力。这些腐蚀作用导致透平机的制造者把透平机燃料的碱金属含量限制到最小值（~0.01 ppm）。

透平机通道内沉积物的产生降低了透平机的能量输出，因此必须作周期性的清理。此外气体中碱性盐的存在大大地影响微粒负载、粒径分布以及颗粒沉降速率。因为这些化合物具有比较低的熔点（例如碱金属氧化物熔点大约在 550℃），它们可能冷凝在透平机的叶片上并加强颗粒的沉积作用。

碱性颗粒的熔合必须使颗粒粘着，因为增加温度加速了碱性颗粒熔合的反应速度。

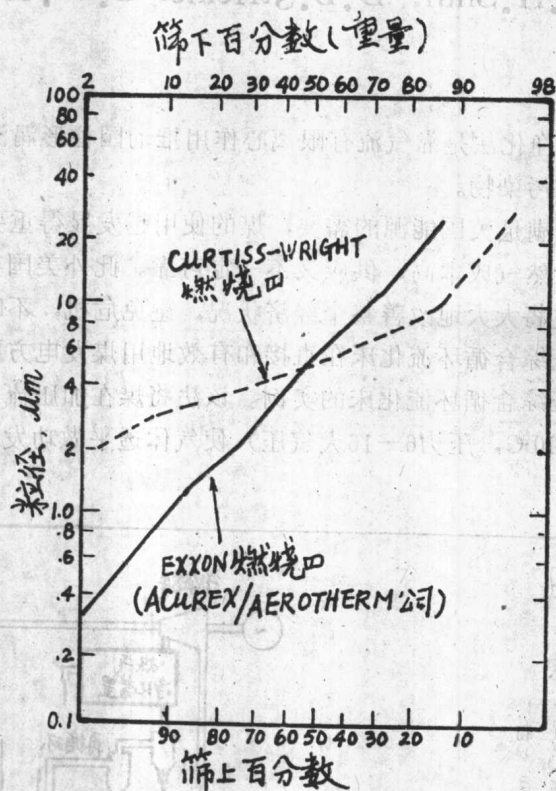


图2. 加压流化床污染物粒径分布

表 1

加压流化床取样颗粒中各种金属的浓度

元 素	旋 风 (ppm)	热过滤 (ppm)
K	8,200	8,850
Na	1,310	2,500
V	185	135
Al	16,400	9,400
Si	94,000	82,600
Fe	30,000	13,000
Ca	20,000	19,000
Mg	11,400	17,800
Ti	2,430	1,950
Cu	248	165
Ni	120	100
Mn	59	49
An	<13	<80
Tl	6	1,950

表 2

随粒径变化而变化飞灰中的微量金属

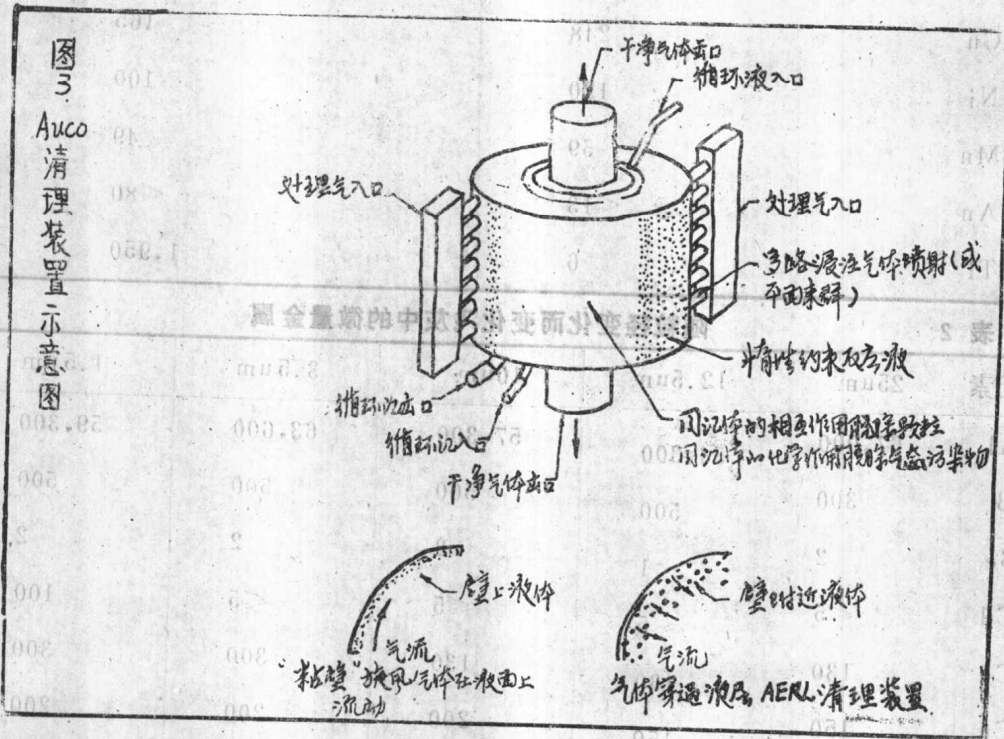
元素	25um	12.5um	10um	3.5um	1.5um
Al	67,000	54,300	57,300	63,600	59,300
B	300	500	500	500	500
Be	2	1	2	2	2
Cd	≤5	≤5	≤5	≤5	100
Cr	130	130	130	300	300
Cu	150	150	200	200	200
Fe	40,000	59,000	43,500	35,500	32,300
Mn	200	240	290	390	500
Ni	300	200	200	300	300
Pb	300	200	300	300	500
V	200	200	200	200	200

因而也增加了颗粒的沉积作用。一项研究发现，温度超过 470°C ，与其说是飞灰的腐蚀，倒不如说是飞灰的粘着，所以沉积作用可能是加压综合循环流化床运行面临的主要问题。气体透平以燃煤膨胀气运行的其他实验指出：如果透平机的入口温度低于 550°C ，沉积作用就不成为问题了。

正在开发的净化装置

种类繁多的热气净化概念/装置正处于许多团体研究的不同发展阶段。较通用的装置包括旋风、表面过滤器、颗粒床过滤器以及静电除尘器。为此目的正在研究的更为新式的热气净化装置包括熔盐洗涤器、电流化床、熔融玻璃洗涤器、声波凝聚器以及干式洗涤器。所有这些传统的和新式的装置都侧重微粒的收集，而不是脱除气态污染物。此外，这些装置无一个能达到延长透平机使用寿命所需要的极低污染物浓度标准。

Avco 热气净化法适用于颗粒物质和碱性/微量金属化合物两种类型污染物的脱除。颗粒物质是透平机叶轮的磨损与沉积的隐患。通常需要用几组数据：包括颗粒总负



荷、粒径分布以及化学组成表示从加压综合循环流化床系统带出的颗粒物质的特性。Weetinghouse, Argonne 国立有限公司的 Exxon 和 Curtiss-Wright 燃烧器显示出总负载的有效数据是在 $2\sim 10$ 加仑/标立方呎 ($4.6\sim 23$ 克/米³) 范围内。然而实际上从经济和效率考虑，为了捕集并将净化的物料大部分返回到流化床，通常必须把旋风装置放在加压综合流化床系统内。于是有理由假定：这里所研究的热气净化装置将面临着平均约为 1 加仑/标立方呎 (2.3 克/米³) 或更低的进气颗粒负载。

—有关加压综合循环流化床系统排出气体的颗粒粒径分布数据仍较缺乏。

Acurex/Aerotherm公司最近已取得了Exxon Miniplant 两级旋风排放物的粒径分布。Curtiss-Wright 有限公司最近取得了加压综合循环流化床中试装置再循环旋风排放物的粒径分布。这两套数据如图2所示，它们代表有关热气净化装置的典型粒径分布。因为考虑到透平机叶片的使用寿命，要求气体中的微粒负载大约维持在0.001加仑/标呎³ (2.3毫克)以下，并要求净化装置微粒脱除效率大于99%。

其他意义重大的主要污染物包括钾、钠、钙、钒、铅、硫、氯以及其他微量金属化合物。这些污染物是透平机叶片腐蚀和沉积的潜在因素，必须减少到足够低的含量，以达到透平机使用寿命和性能要求。

如前所述，我们有相当的数据认为：高温高压气体净化装置的碱性/微量金属浓度的极限应为 $\sim 0.01\text{ppm}$ 。

然而为了确定净化装置所要求的性能/效率，我们需要气体进入净化装置时碱性/微量金属的浓度、组分等方面的资料。遗憾的是这些资料颇为贫乏，且对使用不同原料(煤、石灰石等)的不同体系而言，实际价值会有很大的变动。例如煤中含有碱性化合物的数量在大的范围内变化，其变化范围受煤的来源所决定。美国典型的煤内钠的重量为 $500 \pm 400\text{ppm}$ ；而钾的重量为 $1600 \pm 600\text{ppm}$ ；石灰石在这些污染物的浓度方面也显示类似的变化。Acurex/Aerotherm最近从Exxon Miniplant 加压综合循环流化床(测量的工艺条件： 730°C 和9个大气压)收集了排放物的样品。用火花质谱仪分析了热旋风和热滤器($T = 730^\circ\text{C}$)收集的颗粒物质，并将分析结果汇总在表1内。表2给出燃煤热电厂飞灰中按粒径大小分类金属浓度变化的例子。我们发现：由Acurex/Aerotherm公司测定的Exxon Miniplant 加压综合循环流化床排出物的颗粒物质，其微量金属的含量与一般的飞灰类似。

人们可用许多方法研究气相微量元素的含量及其冷凝作用。第一，可以把低温(大约 230°C 让微量元素成分冷凝)时收集的颗粒微量元素的含量同加压综合循环流化床系统温度时收集的颗粒含量作比较看看是否有明显不同的结果。其次，在加压综合循环流化床系统温度时颗粒脱除后，可将取样气体冷却并收集冷凝产物。Acurex/Aerotherm已完成了这一研究，但由于某些实验的困难，有关气相微量元素含量及冷凝作用的结论仍颇有争论。为了恰当地说明加压综合循环流化床系统排放物特征和确定高温高压净化装置的性能/效率的限度，仍需要这方面的可靠数据。

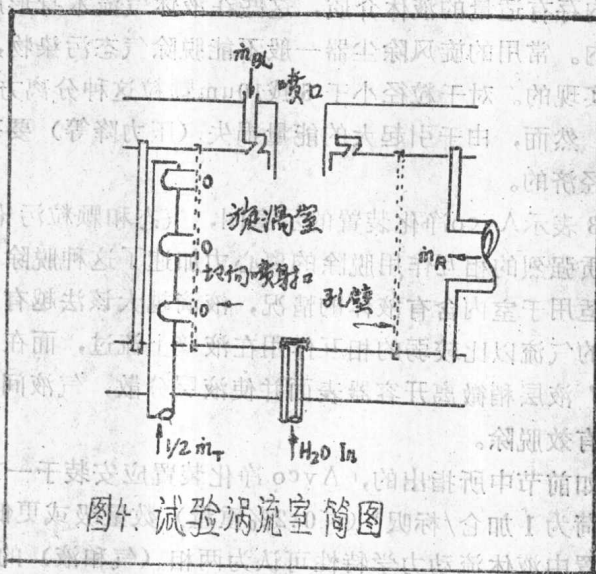


图4. 试验涡流室简图

新式净化法

Avco 热气净化法是靠液气间直接有力的作用取得污染物脱除的一种新方法。园柱形容器内存有适量的液体介质，这些在液体气流本身形成的有限涡流离心力作用下分散在容器内。常用的旋风除尘器一般不能脱除气态污染物，而颗粒的脱除是靠离心力的惯性分离实现的。对于粒径小于 5 或 10 μm 颗粒这种分离方法不起作用，除非产生极大的离心力。然而，由于引起大的能量损失（压力降等）要获得这样大的离心力是不切合实际又不经济的。

图 3 表示 Avco 净化装置的示意图，气态和颗粒污染物均靠器内涡流室中的适当的液体介质强烈的相互作用脱除的离心力加速了这种脱除，但不是仅有的主要分离方法。离心力适用于室内含有液体的情况，液滴越大该法越有效。图 3 较低部分表示“粘壁”旋风中的气流以比较弱的相互作用在液壁上流过，而在 Avco 净化装置中，导致气流“提升”液层稍微离开容器表面并使液层分散，气液间强有力的相互作用，从而获得污染物的有效脱除。

正如前节中所指出的，Avco 净化装置应安装于一或二个旋风的后面，且气流中的颗粒负荷为 1 加仑/标呎³ ($<0.2\%$ 重量) 数量级或更低点。此极小固液比意味着：推荐的装置中液体流体力学特性可认为两相（气和液）的有限涡流以及同颗粒的相互作用可分别予以处理。

60 年代后期和 70 年代初期，把限制在旋涡中的液体和固体颗粒的研究应用到核火箭推动上。这些研究结果为 Avco 热气体净化装置提供了某些理论和实践依据。

关于液体的限制试验

限制液体的某些试验在直径为 10cm 的园柱涡流室内用水完成的。图 4 表示这些试验中所使用的涡流室的示意图。气体通过六个切向入口和多孔园柱侧壁引入涡流室。由于侧壁的蒸发冷却流经侧壁的径向流动对其特殊应用是重要的。具有大角动量的气体于送气口端壁喷入边界层以便尽可能减少水头损失。每个试验初期通过一装在送气口对面端壁处的入口把水引进室内。

实验结果表明，增加切向喷射物质流量则室内的含水量也增加。长和直径皆为 10cm 的园柱体含水量将高达 180 克。当增加切向流速时，至少在功能上存在两种对抗作用。

第一室内较强的涡流倾向分散液体成较小的液滴，该液滴易于随排放的气体夹带出去；第二，较强的涡流产生较大的离心力，该力倾向维持室内的液体并阻止夹带。显然第二种作用对所研究的几何条件而言比第一种要强一些。加少量的表面活性剂，则水的表面张力降低，发现水的夹带量也减少。但是含水的降低与表面张力的降低并不呈线性关系。还对排放气中的液体损失作了研究，其结果表明：若排放气体中的相对湿度为 100% 则室内水的损失量为常数，且与室内持液量无关。

为了研究气液两相间相互的传递作用，把 SO_2 作为微量物质加入输入气流中。把