文章编号：1008－8857(2015)03－0154－05 DOI：10.13259/j.cnki.eri.2015.03.006

处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气污染的高效廉价新技术

曾庆衿

（广州大学 物理与电子工程学院，广州 510006）

摘 要：介绍了一种处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气污染的新方法.该技术利用气体射流的紊流剪切和冲击作用，克服分子团聚的引力，将 $PM_{2.5}$ 粒子拆分为分子，并利用紊流、分子热运动和分子红外谐振的共同作用，打破分子化学键，将化合物分解为单质，从而达到处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气污染的效果.实验结果显示，该技术处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气污染迅速且成本低廉，处理 1 t 废气和 $PM_{2.5}$ 粒子成本不到人民币 10 元.

关键词：射流；紊流；$PM_{2.5}$ 粒子；废气；红外谐振

中图分类号：X 513 **文献标志码**：A

A novel efficient technique for $PM_{2.5}$ particles and waste gas disposal with low cost

ZENG Qingjin

(School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A new technique of processing $PM_{2.5}$ particles and waste gas was introduced. Turbulent jet was employed to overcome the agglomeration of $PM_{2.5}$ particles and split them into molecules with the shear and impact force. The combined action of turbulence, Brownian motion, and infrared resonance of the molecules further breaks the chemical bonds, and decomposes these compounds into simple substances. In this way, the goal of eliminating the $PM_{2.5}$ particles and waste gas pollution is achieved. The field tests verified our theory and confirmed that the new technique is the fastest and cheapest way of $PM_{2.5}$ particles and waste gas disposal. The total cost of $PM_{2.5}$ particles and waste gas disposal is less than RMB 10 yuan $\cdot t^{-1}$.

Keywords: jet; turbulence; $PM_{2.5}$ particle; waste gas; infrared resonance

含碳矿物能源的燃烧是 $PM_{2.5}$ 粒子的主要来源.燃烧时伴有高温和局部缺氧.高温时含碳矿物能源发生热分解，析出多种碳氢化合物 C_nH_m；局部缺氧会使碳氢化合物脱氢，析出原子级的碳粒.例如：煤、油在高温时热分解析出 C_nH_m，当 $n=1$、$m=4$ 时，即甲烷(CH_4)；在高温缺氧状况下，CH_4 分解脱氢，即

$$CH_4 \rightarrow C + 2H_2$$

原子级碳粒表面能很大，碳粒间相互作用发生团聚，组成更大颗粒的碳黑.高温时低熔点的无机氧化物或氯化物发生熔化、液化和汽化.例如，碱金属氧化物 Na_2O、K_2O 在 700 ℃ 便会熔化；$MgCl_2$、$CaCl_2$、KCl、NaCl 在 700～800 ℃ 熔化，1 400 ℃ 汽化[1].它们的蒸气与水蒸气或油雾接触时，由于分子的相互作用而凝结在漂浮运动的碳粒上，形成含碳的水滴、油滴、玻璃滴.它们因热

收稿日期：2014－05－05

第一作者：曾庆衿(1936—)，男，教授. 研究方向：能源与环保技术.E-mail：zeng2011jin@163.com

冲击膨胀或冷缩,产生大量球形碳黑(俗称漂珠)和絮状的碳黑,它们都是 $PM_{2.5}$ 粒子.

$PM_{2.5}$ 粒子是由众多分子结合而成的.其相互作用能有两种:一是形成分子的化合键能;一是将分子团聚成 $PM_{2.5}$ 粒子的分子相互作用能.后者取决于分子间的相互作用力,即范德华力.处理 $PM_{2.5}$ 粒子,就是要破解这两种力或相互作用能.破解技术愈简便、廉价、高效,则愈适合当前经济发展的需要.文献[1]中较为完整和系统地表述了处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气的技术,提出首先利用声、电、磁等多种技术使 $PM_{2.5}$ 粒子团聚成大颗粒,然后利用现有的传统技术进行收集处理.这不失为解决 $PM_{2.5}$ 颗粒污染的一种方案,但程序繁琐,进展缓慢,成本高且可行性不强,且该方案未解决废气污染和温室气体处理问题.本文提出一种更廉价、简便、高效的处理这种污染的新技术.

1　处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气的理论

$PM_{2.5}$ 粒子实质上是多种分子(如 C、CO_2、K_2O、Na_2O、C_nH_m、KCl、$MgCl_2$ 等)借助分子相互作用能而结合在一起的宏观物体.只有解除使这些分子凝结在一起的相互作用能,才能使 $PM_{2.5}$ 粒子分解处理.为此,分两步解除这两种相互作用能:第一步解除将废气分子凝结在一起的分子相互作用能,使 $PM_{2.5}$ 粒子破解为分子;第二步破解分子的化学键能,使化合物分解为原子或离子.为了破解分子相互作用能,首先估算分子相互作用能的大小.

组成自然界物质的分子,可分为两类:一类是有极分子,如 H_2O、K_2O、NaO、KCl、$MgCl_2$ 等;另一类是无极分子,如 C、CO_2、H_2、O_2、C_nH_m 等.

1.1　有极分子相互作用能[2]

设有两个有极分子,其偶极矩分别为

$$p_1 = el_1,\ p_2 = el_2 \tag{1}$$

式中:e 为电子电量;l_1、l_2 分别为两个有极分子的偶极矩,通常远小于 r,r 为两偶极矩间的距离,不失一般性取 $l_1 = l_2 = 5\times10^{-11}$ m,$r = 10^{-9}$ m.

两个有极分子的相互作用能

$$U_0 = \frac{2p_1p_2}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \tag{2}$$

式中,ε_0 为真空介电常数.

将 $r = 10^{-9}$ m 代入式(1),则 $U_0 = 1.15\times10^{-21}$ J,比化学键能(数量级为 10^{-19} J)小 2 个数量级.

1.2　无极分子相互作用能

无极分子的相互作用必须考虑量子效应,只能用量子力学求解色散力.采用半经典半量子理论求得两无极分子相互作用能[2]

$$U_d = \frac{he^4}{4\pi\varepsilon_0^2 m^2\omega_0^3 r^6} \tag{3}$$

式中:h 为普朗克常数;ω_0 为分子振动固有频率;m 为分子诱导偶极子的振动等效质量.

以 CH_4 为例,其 $m = 4.95\times10^{-27}$ kg.将 $\omega_0 = 6.28\times10^{14}s^{-1}$、$r = 10^{-9}$ m 代入式(3),则 $U_d = 7.3\times10^{-26}$ J.可见,无极分子的相互作用能比有极分子相互作用能小 5 个数量级,比单键化学键能更小.

1.3　有极分子和无极分子的相互作用能

有极分子和无极分子彼此靠近时,有极分子的极化场会诱导无极分子产生诱导电矩.有极分子电矩和诱导电矩产生相互作用,其相互作用能 U_h 比有极分子相互作用能 U_0 小,但比无极分子相互作用能 U_d 大,即 $U_d < U_h < U_0$

根据上述分析,要破解 $PM_{2.5}$ 的团聚问题,只需使 $PM_{2.5}$ 彼此碰撞动能充分大于有极分子的相互作用能 U_0 便可.因此,设计紊流雷诺数 $Re > 4\,000$ 便可获得足够大的剪切应力破解分子团聚而使 $PM_{2.5}$ 颗粒分子化.

破解分子化学键能使废气分子原子化.运用发明专利[3]"用射流和红外谐振分解废气的装置及方法"的技术,利用射流产生紊流,并利用废气自身温度在射流接收装置内激发热辐射红外波谱匹配废气分子化学键固有振动谱,使废气分子处于共振激发状态.在这种状态下,分子热运动产生的分子间相互碰撞动能足以破解分子的化学键能,从而实现化合物分子原子化.

1.4　废气分子键强度、振动固有频率和固有波长

表 1 给出了几种废气分子键强度、固有频率 ω_0、固有波长 λ_0[4].由表可知,化学键的键强度比分子间相互作用强度大 2 个数量级,所以,依靠射流的紊流破坏化学键是不可能的,因此还需利用分子热运动的碰撞和化学键固有频率的谐振激发实现此目的.

表 1 废气分子化学键、固有频率 ω_0 和固有波长 λ_0

Tab. 1 Chemical bonds, inherent frequencies and wavelengths of the components in the flue gas

分子式	化学键	克分子键强度 D_{298}/(kJ·mol^{-1})	25 ℃单键强度 d_{298}/(10^{-19}J)	固有频率 ω_0/(10^4s^{-1})	固有波长 λ_0/μm
H_2O	H—O	428.0	7.1	6.30、6.90	2.96、2.70
CO_2	C＝O	1 076.5	17.9	4.39	4.30
SO_2	S＝O	1 043.4	17.3	1、2.1、2.5	19、8.7、7.5
NO	N＝O	630.6	10.5	2.38、4.20	7.80、4.50
CH_4	C—H	337.0	5.6	6.28	3

2 处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气的新技术

2.1 采用射流紊流技术将 $PM_{2.5}$ 粒子分解为废气分子

图 1 为喷射器和接收器的组合示意图，其中：a 为接收器前段；b 为接收器混合段；c 为接收器扩压段；d_1 为喷射器出口直径；d_2 为接收器前段入口直径；d_3 为接收器扩压段入口直径；Q_1 为喷射器出口流量；Q_2 为接收器引射流量；l_c 为射流自由流束长度.

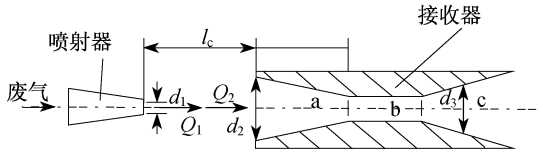

图 1 喷射器和接收器组合图

Fig. 1 Diagram of combining ejector and receiver

流量为 Q_1 的废气从喷射器以射流形式喷出，进入接收器；在接收器入口处，因射流的负压效应而吸入引射流量 Q_2 的废气. 这两股气流在接收器混合段 b 相互作用形成紊流，当紊流雷诺数 $Re>4\ 000$ 时，便有足够的动能. 紊流造成的剪切力和足够的碰撞截面可使 $PM_{2.5}$ 颗粒拆离，实现分子化，之后再把分子破键分解为原子态.

紊流剥离 $PM_{2.5}$ 粒子的剪切应力与紊流强弱正相关。紊流是由射流引发的，此处用射流速度 V 近似代表紊流速度. 假定紊流速度为 V，紊流粒子间相对运动速度为 $2V$，相互碰撞的动能必须大于分子团聚的相互作用能 U_0，则从喷射器出口射流而出的废气射流速度 V 应满足

$$\frac{1}{2}M(2V)^2 > 10^{-20}\text{J} \tag{4}$$

式中，M 为 $PM_{2.5}$ 颗粒平均质量.

假设 $PM_{2.5}$ 颗粒是由 100 个碳原子团聚而成，则可求出 $M=1.98\times10^{-24}$ kg. 从式(4)求得 $V>50\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$，因此取 $V=80\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 可满足条件.

为了确保 $PM_{2.5}$ 颗粒完全分解，应将射流紊流组合单元进行适当的串并联，分 n 级循环处理，并使每级混合段的紊流雷诺数 $Re>4\ 000$，级数 n 由实验确定.

2.2 采用射流和红外谐振分解废气分子[4]

燃烧源的废气分子(CO_2、CO、SO_2、NO、N_2O_3等)在一定的温度下做热运动，紊流的作用使分子无规运动加剧，强化了分子间碰撞的破键作用. 它们在接收器混合段 b 中，还受到管壁热辐射的激发.

分子振动的动能

$$E_k = \frac{1}{2}M_0\omega_0^2X_0^2 \tag{5}$$

式中：X_0 为键振动振幅；M_0 为废气分子键振动的折合质量.

例如，CO_2 分子的键振动的折合质量为 $M_0=1.44\times10^{-26}$ kg，$\omega_0=4.39\times10^{14}\ \text{s}^{-1}$，$X_0=10^{-10}$ m，则可求得 $E_k=1.39\times10^{-17}$ J，显然 $E_k>d_{298}$(1.79×10^{-18} J)，说明键谐振已临近破解状态，分子碰撞将击破碳氢键.

从另一个角度分析，当射流紊流将 $PM_{2.5}$ 颗粒拆散为分子之后，分子的运动适用分子运动理论，按照能量均分定理，每个分子热运动速度 v 满足

$$\frac{1}{2}M'v^2 = \frac{3}{2}kT \tag{6}$$

式中：M' 为分子质量；k 为玻尔兹曼常数；T 为绝对温度.

例如：CO_2 的 $M'=1.44\times10^{-26}$ kg，$T=473$ K，则 $v=1\ 315\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

在一个大气压下，分子间每秒碰撞次数为 10^8 次，显然每秒钟都有相当高的概率使紊流和热运动相向迭加发生对心碰撞. 根据麦克斯韦速度分布率，分子速度为最可几速度两倍以上的分子数占分子总数 5%以上，那么便有 5%以上的分子相互碰撞动能达到

$$E_k = \frac{1}{2}M_0[2(2v + V)]^2 \quad (7)$$

当 $V = 100\ m \cdot s^{-1}$, $v = 1\ 315\ m \cdot s^{-1}$, 则 $E_k = 2.15 \times 10^{-19}$ J.

由此估算得到的碰撞动能 E_k 和单个碳氧键键能在同一数量级. 考虑到表 1 所给出的是碳氧键在 25 ℃时的键强度, 200 ℃时键强度将减弱; 此外, 碳氧键处于共振激发态, 高速振动使分子处于离散状态, 因此在同等数量级的动能冲击下碳氧键将被破解.

以上分析的 5%以上的分子一旦在碰撞中分解, 键的振动能转化为"碎片"的动能, 将以更大的动能冲击下一个分子, 以连锁反应的速度(碰撞频率大于 10^8 次 $\cdot s^{-1}$)发展下去. 所以这种处理废气的方法迅速、廉价, 而且可自动化进行.

废气分子破键后, 产生的离子或原子仍然在作不规则热运动, 彼此相互碰撞可能复合为原来的分子, 所以必须采取措施防止已分解的分子发生逆向复合.

2.3　防止已分解分子逆向复合的措施

整个实验装置简称为 MBBS(molecule breaking bond structure). 该装置分为 MBBS-Ⅰ、MBBS-Ⅱ, 前者为气体分子破键分解装置, 后者为分解产物的收集装置. 废气分子破键分解后成为离子, 当离子高速飞到已接地的器壁——碳素钢板(Q235)外壳时, 离子失去电荷变成原子. 原子进入钢板后, 由于碳素钢为 α-Fe 体心立方晶体结构, 原子可通过其间隙, 同时在钢板外壳的内外两侧又存在压力差和温度差, 根据能斯特-爱因斯坦扩散理论, 原子会向钢板外侧扩散, 直到离开钢板, 进入已设计好的封闭容器 MBBS-Ⅱ内. 由于两相同原子存在自旋相反电子对量子耦合效应, 会最终结合成稳定的两原子气体分子(H_2、O_2、N_2 等).

废气分解过程的反应式为

$$2H_2O \xrightarrow{MBBS-Ⅰ} 4H^+ + 2O^{2-} \xrightarrow{MBBS-Ⅰ} 4H + 2O \xrightarrow{MBBS-Ⅱ} 2H_2 + O_2;$$

$$CO_2 \xrightarrow{MBBS-Ⅰ} C^{4+} + 2O^{2-} \xrightarrow{MBBS-Ⅰ} C + 2O \xrightarrow{MBBS-Ⅱ} C + O_2;$$

$$2NO_2 \xrightarrow{MBBS-Ⅰ} 2N^{4+} + 4O^{2-} \xrightarrow{MBBS-Ⅰ} 2N + 4O \xrightarrow{MBBS-Ⅱ} N_2 + 2O_2.$$

α-Fe 是体心立方晶体结构, 晶体常数 $a = 0.286\ 63$ nm, 立方晶体顶点分布 Fe 原子或 Fe 离子, 气体原子(C、H、N、O、S)的大小由原子物理公式计算, 也有相近的测试数据可查, 结果均表明原子(C、H、N、O、S)可穿过 α-Fe 的间隙, 但气体分子(H_2、O_2、N_2 等)比体心立方晶体的间隙大, 不能穿过 α-Fe, 因此可类比化学中分子筛的概念认为 α-Fe 是"原子筛".

已分解的废气, 在没有催化剂作用下, 或者在温度低于 550 ℃时, 只可能复合为同原子的双原子气体而不可能复合成不同原子的化合物分子. 因此, 整个实验装置温度应控制在 550 ℃以下, 而且要远离催化剂, 便可防止逆向复合.

3　处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气的测试结果

图 2 为测试装置示意图, 图中: q_1、q_2 分别为输入、输出端瞬时流量; Q_3、Q_4 分别为 20 min 内输入、输出端累积流量. 测试过程中, 发动机产生的废气经由孔板流量计 1 进入 MBBS, 该装置输出端输出的废气由孔板流量计 2 计量. 测试分为两组: 一组选定发动机 G(单缸汽油发动机)于 2010 年 1 月 21 日在开平进行测试; 另一组选定发动机 D(四缸汽油发动机)于 2010 年 12 月 9 日在肇庆进行测试. 表 2 为两组测试数据结果, 其中: T_1、T_2 分别为输入、输出端废气温度; ρ_1、ρ_2 分别为输入、输出端废气密度; M_1、M_2 分别为 20 min内输入、输出废气质量; 分解率的定义为 $(M_1 - M_2)/M_1$.

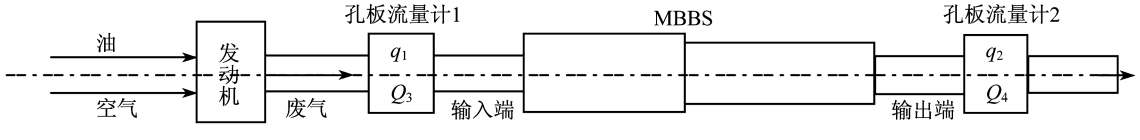

图 2　测试装置示意图

Fig. 2　Diagram of the testing device

表 2 测试数据

Tab. 2 The test data

发动机	功率/kW	输入量					输出量					分解率/%
		q_1/($m^3 \cdot h^{-1}$)	Q_3/m^3	T_1/℃	ρ_1/($kg \cdot m^{-3}$)	M_1/kg	q_2/($m^3 \cdot h^{-1}$)	Q_4/m^3	T_2/℃	ρ_2/($kg \cdot m^{-3}$)	M_2/kg	
G	12	116	40.8	300	2.79	113.8	43.7	15.4	50	2.00	30.8	73
D	48	126	42.0	220	2.68	112.6	31.0	10.3	40	2.00	20.6	82

从表 2 可以看出，针对发动机 G 测试时，20 min内输入废气 113.8 kg，输出废气仅30.8 kg，即 20 min 内分解了发动机 G 排出的废气达 83 kg，分解率达 73%. 针对发动机 D 测试时，分解率高达 82% . 测试结果显示，本文设计的射流、紊流、红外谐振装置可分解黑烟、废气和 $PM_{2.5}$ 颗粒，而且已分解的发动机废气可变成单质可燃的混合气体，经收集后返回发动机，不仅可节能，而且可增加生产能力. 进一步改进设计可以分解更多的废气.

测试中，已分解的废气变成了离子（H^+、O^{2-}、N^{2+}、C^{4+} 等）. 它们经过钢板外壳，变成了原子（H、O、N、S、C 等），可穿过体心立方晶体的间隙逃逸. 以发动机 D 的测试结果为例，20 min内便处理了废气 92 kg，而不必另外消耗能量，成本仅为 MBBS 装置的折旧成本. 本装置分解 1 t 废气成本小于人民币 10 元. 测试结果表明，MBBS 装置处理废气不仅廉价、高效，而且处理量大.

4 结束语

利用气体射流、紊流、分子红外谐振共同作用的方法，设计出一套分解废气的装置. 实验测试结果表明，该装置 20 min 内处理发动机排出的废气的分解率最高达 82%，且廉价、高效，处理大. 这为进一步处理 $PM_{2.5}$ 粒子和废气污染，实现节能减排提供了一种可行性方案. .

参考文献：

[1] 杨林军. 燃烧源细颗粒物污染控制技术[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

[2] 优肯斯坦 M B. 分子的结构及物理性质[M]. 张乾二，译. 北京：科学出版社，1960.

[3] 曾庆衿. 用射流和红外谐振分解废气的装置及方法：中国，ZL200810025891.0[P]. 2012 - 05 - 23.

[4] 姚允斌. 物理化学手册[M]. 上海：上海科学技术出版社，1985.

（上接第 153 页）

[4] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2012.

[5] 陕西省统计局，国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴(2012)[M]. 北京：中国统计出版社，2012.

[6] 贵州省统计局，国家统计局贵州调查总队. 贵州统计年鉴(2012)[M]. 北京：中国统计出版社，2012.

[7] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. [2013 - 06 - 09]. http://www.ipcc-nggip. iges. or. jp/public/2006gl/chinese/index. html.

[8] 朱聆，张真. 上海市碳排放强度的影响因素解析[J]. 环境科学研究，2011，**24**(1)：20 - 26.

[9] 董军，张旭. 中国工业部门能耗碳排放分解与低碳策略研究[J]. 资源科学，2010，**32**(10)：1856 - 1862.

[10] 岳超，胡雪洋，贺灿飞，等. 1995—2007 年我国省区碳排放及碳强度的分析：碳排放与社会发展Ⅲ[J]. 北京大学学报：自然科学版，2010，**46**(4)：510 - 516.

[11] 世界自然基金会，国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 中国经济刺激计划对气候和能源的影响[R]. 北京：世界自然基金会，2010.