



多孔介质燃烧理论 与技术

程乐鸣 岑可法 周昊 骆仲泱 编著

DUOKONG JIEZHI RANSHAO
LILUN YU JISHU



化学工业出版社



多孔介质燃烧理论 与技术

程乐鸣 岑可法 周昊 骆仲泱 编著

**DUOKONG JIEZHI BANSHAO
LILUN YU JISHU**



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是在浙江大学热能工程研究所能源清洁利用国家重点实验室自1999年以来对多孔介质燃烧的理论、实验研究和应用研发的基础上,总结国内外多孔介质燃烧理论与科研成果而完成的学术专著。

书中系统介绍了多孔介质燃烧及应用的理论、发展动态及应用领域,主要包括以下内容:气体燃料燃烧技术;多孔介质燃烧基本概念与方式;多孔介质材料;多孔介质燃烧测量;多孔介质预混燃烧稳定性;单向多孔介质预混燃烧;多孔介质燃烧模型;多孔介质燃烧二维火焰面特性数值模拟;多孔介质燃烧技术应用等。

本书可供从事能源清洁利用的研究人员、技术人员参考,主要面向从事燃烧理论及燃烧流体力学的科研人员,从事动力、煤矿瓦斯、化工、冶金、环保等领域的工程技术人员及高等院校相关专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

多孔介质燃烧理论与技术/程乐鸣,岑可法,周昊,骆仲泱编著.
北京:化学工业出版社,2012.5
ISBN 978-7-122-13766-1

I. 多… II. ①程…②岑…③周…④骆… III. 多孔介质-燃烧理论 IV. O643.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第043386号

责任编辑:袁海燕 陈丽
责任校对:徐贞珍

文字编辑:郑直
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印刷:北京永鑫印刷有限责任公司
装订:三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张13 字数318千字 2013年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

前 言

多孔介质燃烧技术是一种新型的燃烧技术，燃烧效率高，燃料适应性广，火焰稳定性强，负荷比宽，可燃烧低热值燃料气体如煤矿瓦斯，污染排放低，燃烧装置体积小。国内外近年来对多孔介质燃烧技术的学术及技术研究颇热，然而相关学术专著特别是全面详细阐述多孔介质燃烧技术的理论专著尚未见到。为让科研工程人员更好地认识多孔介质燃烧技术这一新型燃烧技术，了解及掌握该方面的发展动态，促进相关学科和技术的工业化发展，撰写此书。

11年前，岑可法院士在浙江大学倡导开展多孔介质燃烧理论和技术研究，自此浙江大学进行了长期的研究。本书是根据浙江大学自2000年以来依托国家、省和部委项目开展多孔介质燃烧理论和技术研究基础上，总结国内外多孔介质燃烧理论与技术科研成果而完成的学术专著。书稿材料主要来源于作者和同事、研究生们这11年研究的成果。

本书系统地介绍了多孔介质燃烧及应用的理论，发展动态及应用领域，主要包括以下内容：气体燃料燃烧技术；多孔介质燃烧基本概念与方式；多孔介质材料；多孔介质燃烧测量；多孔介质预混燃烧稳定性；单向流动多孔介质预混燃烧；多孔介质燃烧模型；多孔介质燃烧二维火焰面特性数值模拟；往复流动多孔介质燃烧；往复流动多孔介质燃烧系统数值模拟；多孔介质燃烧技术应用。

本书作者一位是中国工程院院士，三位是浙江大学教授，所在单位为能源清洁利用国家重点实验室，长期从事清洁能源理论和技术研究，该书的内容是作者多年来紧密合作、共同研究的集体结晶，其中多孔介质燃烧模型、多孔介质制氢技术内容主要由周昊教授负责撰写。书中引用了浙江大学热能工程研究所同事和研究生们的大量研究资料，并在撰写过程中得到他们很多的帮助。在此，要感谢施正伦研究员、方梦祥教授、倪明江教授、高翔教授、王勤辉教授、周劲松教授、王树荣教授、余春江副教授、王恩宇博士、王关晴博士、郑成航博士、凌忠钱博士、李昊硕士、李姮硕士、褚金华硕士、李涛硕士、张俊春博士研究生、朱茜茜硕士、景森、龚玲玲、黄贵芝和王诗依，特别要感谢王关晴博士在书稿准备过程中付出的巨大时间和精力。没有他们的帮助，本书是不可能完成的。

我们感谢国家自然科学基金、国家863计划、教育部博士点基金、浙江省自然科学基金等项目的支持，这些项目的部分研究结果已反映在本书中。

我们还要感谢大连理工大学、中国科技大学等单位，本书引用了这些单位的有关研究成果。

本书可供从事能源清洁利用的研究人员、技术人员参考，主要面向从事燃烧理论及燃烧流体力学的科研人员，从事动力、煤矿瓦斯、化工、冶金、环保等领域的工程技术人员及高等院校相关专业的师生。

由于多孔介质燃烧理论和技术仍在迅速发展，同时限于作者理论知识水平，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

2012年1月于浙江大学求是园

主要符号说明

符号	意义	计量单位	符号	意义	计量单位
a	无量纲常数;热扩散系数	m^2/s	M	无量纲对流换热系数	
A	空气量,常数		M_2	无量纲热量损失系数	
A_f	化学反应频率因子		N	能级粒子数	
B	经验关联系数		N_a	a 能级粒子数密度	
c	气体浓度	g/m^3	N_g	基态粒子数密度	
c_p	定压比热容	$J/(kg \cdot K)$	N_r	无量纲辐射热导率	
C	常数		Nu	努赛尔数	
C_f	摩阻系数		Nu_v	体积努赛尔数	
C_1	多孔介质穿透性	m/s	O	氧化剂量	kg
C_2	多孔介质阻力系数		P	压力;Favre 联合 PDF 组分	Pa
d	直径	m	Pe	贝克莱数	
d_h	水力直径	m	Pr	普朗特数	
d_m	平均直径	m	q	辐射通量;热流密度	$J/(m^2 \cdot s)$
d_n	公称直径	m	Q	热量;燃烧负荷;流量	$kJ; kW; L/min, m^3/h$
d_p	颗粒直径	m	Q_3	燃气不完全燃烧热损失	
d_T	猝熄距离	m	Q_d	燃气总发热量	kJ
d_n	多孔介质猝熄直径	m	Q_F	燃气流量	$L/min, m^3/h$
D	燃烧器直径或扰动横向尺寸	m	R	通用气体常数	$J/(kg \cdot K)$
D_m	扩散系数	m^2/s	Re	雷诺数	
D_{11}^2	热弥散效应	$m^2/(s \cdot ^\circ C)$	R_s	无量纲频率因子	
E	活化能	kJ/mol	S	横截面积	m^2
Ea	无量纲活化能		SA	比表面积	m^2/m^3
F	燃料量	kg	S_i	压力损失源项	$kg/m^2 \cdot s^2$
FR	燃烧强度	kW/m^2	S_L	火焰传播速度	m/s
g	重力加速度	m/s^2	S_T	多孔介质骨架总表面积	m^3
G_a	能级 a 筒并度		t	时间;正方体单元边梁宽度	$s; m$
G_k	平均速度梯度产生的湍流 动能速率	$kg/(m \cdot s^2)$		或厚度	
h	对流换热系数;高度;火焰 倾斜值;焓	$W/(m^2 \cdot K);$ $m; m; kJ/kg$	t_{hp}	换向半周期	s
h_v	体积对流换热系数	$W/(m^3 \cdot K)$	t_p	换向周期	s
h_0	燃料低位发热量	kJ/kg	T	温度	$^\circ C, K$
h_i	组分 i 的单位摩尔焓值	J/mol	T_0	环境温度	$^\circ C$
H_0	无量纲热值		T_{ad}	绝热温度	$^\circ C, K$
I	激光功率;光强度	$W; cd$	T_{ex}	出口温度	$^\circ C$
I_b	黑体辐射强度	W/m^2	T_g	气体温度	$^\circ C, K$
k	湍流动能;辐射衰减系数	$J; 1/m$	T_s	固体温度	$^\circ C, K$
K	水力传导系数	m/s	T_w	燃烧器内壁面温度	$^\circ C, K$
K_p	渗透率	m^2	ΔT_{ad}	升高的绝热温度	$^\circ C, K$
l	特征长度	m	ΔT_c	升高的燃烧温度	$^\circ C, K$
L	厚/长度;着火极限	$m; \%$	Δx	倾斜幅度增加速度	m/s
Le	刘易斯数		Δx_{max}	火焰面最大倾斜幅值	
m	质量	kg	u	流速	m/s
			u_g	气流速度	m/s
			u_m	实际平均流速	m/s

符号	意义	计量单位	符号	意义	计量单位
u_s	表观流速	m/s	ϵ_v	体积孔隙率	
u_t	热波波速	m/s	$\epsilon_{v,e}$	有效孔隙率	
u_w	燃烧波波速	m/s	$\epsilon_{v,T}$	总孔隙率	
\bar{u}_i	Favre 平均速度	m/s	ϵ_s	面孔隙率; 多孔介质表面 辐射发射率	
\bar{u}'_i	流体脉动速度	m/s	ϵ_l	线孔隙率	
U	无量纲速度		ϵ_{ext}	燃烧器出口的辐射发射率	
v	y 向速度	m/s	η	换热效率	
V	体积, 容积	m ³	η_r	燃烧效率	%
V_s	多孔介质固体所占体积	m ³	ϕ	当量比	
V_v	多孔介质中孔隙容积	m ³	ϕ_{lm}	维持稳定燃烧最低当量比	
$V_{v,T}$	多孔介质区域孔隙总容积	m ³	θ	无量纲温度	
V_T	总体积	m ³	θ_r	相对超焓量	
V_{T}	多孔介质总容积	m ³	λ	热导率; 波长	W/ (m · K); m
$V_{s,e}$	有效孔隙容积	m ³	λ_e	有效热导率	W/ (m · K)
$V_{s,d}$	多孔介质死端孔隙容积	m ³	λ_r	辐射有效热导率	W/ (m · K)
W	宽度; 相对分子质量; 燃料 反应速率	m; —; kg/s	λ_{e-g}	气相有效热导率	W/ (m · K)
x_e	多孔介质燃烧换热区长度	m	λ_{e-s}	多孔介质有效热导率	W/ (m · K)
X	无量纲坐标		μ	动力黏度	Pa · s
ΔX	倾斜幅度	m	ω_i	组分 i 的摩尔转化率	
y	坐标轴		ν	运动黏度	m ² /s
Y	组分/质量分数		ξ	壁面散热损失系数	W/ (m ² · K)
z	高度	m	ρ	密度	kg/m ³
α	倾斜角度; 二次风比; 过量 (°); —; — 空气系数		σ	斯蒂芬-波尔兹曼常数	W/ (m ² · K ⁴)
β	无量纲时间; 温度系数		σ_a	多孔介质吸收系数	1/m
β	壁面热损失系数	W/ (m ³ · K)	σ_s	多孔介质散射系数	1/m
γ_c	气固导热比		ν	比流量	m ³ / (m ² · s)
β_v	多孔介质单位体积有效热量 损失系数		σ_k	湍流动能的普朗特常数	
β_{hp}	无量纲半周期		σ_z	湍流耗散率普朗特常数	
Γ	气固热容比		τ_e	光学厚度	μm
δ_{ij}	Kronecker 符号		φ	流动势	
ϵ	孔(多孔介质)/空(堆积 床) 隙率; 辐射发射率; 湍流动能耗散率		χ	气体非线性极化率	
			ω	频率/摩尔转化率	Hz

上、下标

符号	意义
g	气体
hp	换向半周期
i	组分; 方向
in	入口
j	方向
max	最大值
min	最小值
out	出口

上、下标

符号	意义
s	固体
rad	辐射
th	理论
0	初始时刻
1	燃烧器; 前半周期
2	蓄热器; 后半周期

目 录

主要符号说明	4.1.4 激光测量	58
第1章 气体燃料燃烧技术	4.2 燃烧产物测量	62
1.1 能源现状与环境危机	4.2.1 红外光谱技术	62
1.2 气体燃料	4.2.2 气相色谱技术	64
1.3 气体燃烧技术	4.2.3 质谱分析技术	67
1.3.1 脉动燃烧	参考文献	68
1.3.2 催化燃烧	第5章 多孔介质预混燃烧稳定性	70
1.3.3 高温空气燃烧	5.1 多孔介质燃烧火焰传播	70
1.3.4 多孔介质燃烧	5.1.1 热波	70
参考文献	5.1.2 稳定传播的燃烧波	70
第2章 多孔介质燃烧基本概念与方式	5.1.3 主要影响因素	74
2.1 多孔介质燃烧基本概念	5.1.4 燃烧波理论分析	77
2.2 多孔介质燃烧机理	5.2 多孔介质燃烧自稳定性	77
2.3 多孔介质燃烧特点	5.3 多孔介质燃烧猝熄	80
2.4 多孔介质燃烧方式	5.3.1 猝熄效应	80
2.4.1 多孔介质燃烧分类	5.3.2 基本猝熄理论	80
2.4.2 单向流动燃烧	5.3.3 多孔介质燃烧猝熄	81
2.4.3 往复流动燃烧	5.4 多孔介质燃烧失稳	82
参考文献	5.4.1 热点	83
第3章 多孔介质材料	5.4.2 倾斜	84
3.1 多孔介质材料	参考文献	91
3.1.1 多孔介质概念	第6章 单向流动多孔介质预混燃烧	93
3.1.2 多孔介质结构	6.1 单向多孔介质燃烧器流动阻力特性	93
3.2 多孔介质材料	6.1.1 多孔介质燃烧器阻力随多孔介质层厚度的变化	93
3.2.1 金属材料	6.1.2 多孔介质燃烧器阻力随多孔介质孔径的变化	94
3.2.2 非金属材料	6.1.3 多孔介质燃烧器阻力随当量比的变化	95
3.3 多孔介质特性参数	6.1.4 多孔介质材质对燃烧器阻力的影响	95
3.3.1 基本结构参数	6.2 启动特性	95
3.3.2 传热特性参数	6.2.1 渐变多孔介质燃烧器冷态启动	95
参考文献	6.2.2 渐变多孔介质燃烧器预热启动	98
第4章 多孔介质燃烧测量	6.3 温度分布特性	99
4.1 温度测量	6.3.1 当量比的影响	99
4.1.1 热电偶测量		
4.1.2 裸露/包覆结对热电偶多孔介质燃烧器内气、固温度测量法		
4.1.3 红外测量		

6.3.2	燃烧强度的影响	99	9.2.3	燃烧生成产物动态变化	143
6.3.3	孔径变化的影响	101	9.3	影响温度分布特性的因素	144
6.3.4	多孔介质结构组合的影响	102	9.3.1	换向半周期的影响	144
6.3.5	多孔介质材料的影响	103	9.3.2	当量比的影响	146
6.4	传热特性	104	9.3.3	流速的影响	147
6.5	污染物排放特性	105	9.3.4	二次风比的影响	148
6.5.1	当量比和孔径的影响	105	9.4	影响燃烧产物生成特性因素	149
6.5.2	燃烧强度的影响	106	9.4.1	换向半周期的影响	149
6.5.3	多孔介质结构组合的影响	106	9.4.2	当量比的影响	151
6.6	火焰传播速度	107	9.4.3	流速的影响	152
6.6.1	当量比与孔径的影响	107	9.4.4	二次风比的影响	152
6.6.2	结构分布组合的影响	108	9.5	燃烧效率	153
6.7	燃烧极限	108	9.5.1	换向半周期的影响	153
参考文献		111	9.5.2	当量比的影响	154
第7章	多孔介质燃烧模型	113	9.5.3	二次风比的影响	154
7.1	流体力学模型	113	9.6	系统稳定燃烧极限	155
7.1.1	动力学模型	114	9.6.1	燃烧极限状态时温度分布	155
7.1.2	湍流模型和燃烧模型	115	9.6.2	换向半周期的影响	156
7.1.3	辐射模型和边界条件	115	9.6.3	热负荷的影响	156
7.1.4	物理模型和模拟工况	116	9.6.4	系统最低燃烧极限	157
7.2	化学反应机理与反应动力学计算	116	参考文献		157
7.2.1	复杂化学反应机理	116	第10章	往复流动多孔介质燃烧系统数值	
7.2.2	化学反应动力学计算	118	模拟		159
7.3	模拟结果和实验验证	118	10.1	物理模型	159
7.3.1	温度分布	118	10.2	物理模型数学化	159
7.3.2	产物生成	121	10.2.1	基本假设	159
参考文献		123	10.2.2	模型方程	160
第8章	多孔介质燃烧二维火焰面特性数值		10.2.3	化学反应源项处理	161
模拟		125	10.2.4	辐射源项处理	161
8.1	数学模型	125	10.2.5	点火模型	162
8.2	火焰面传播	128	10.3	初始条件、边界条件与求解	162
8.3	入口气流速度的影响	129	10.3.1	初始条件	162
8.4	当量比的影响	131	10.3.2	边界条件	162
8.5	散热损失的影响	132	10.3.3	模型方程的无量纲化	163
8.6	孔密度的影响	133	10.3.4	模型方程求解	165
参考文献		134	10.4	点火位置的影响	167
第9章	往复流动多孔介质燃烧	137	10.5	温度分布特性	169
9.1	多孔介质流动阻力	137	10.5.1	气、固两相温度	169
9.2	动态燃烧特性	140	10.5.2	换向半周期的影响	169
9.2.1	系统稳定性运行判断	140	10.5.3	燃气热值的影响	171
9.2.2	周期内温度分布动态变化	141	10.5.4	雷诺数的影响	171

10.6	超焓燃烧特性	172	11.3	往复多孔介质燃气金属熔炼炉	185
10.7	数值模拟结果验证	174	11.4	50000m ³ /h 低热值气体燃烧系统	186
	参考文献	174	11.5	油气多孔介质燃烧应用	192
第 11 章	多孔介质燃烧应用	176	11.6	多孔介质制氢技术	194
11.1	多孔介质燃烧应用	176		参考文献	195
11.2	多孔介质热交换燃气炉	181	附录：作者单位在本领域部分相关文献		198

第 1 章 气体燃料燃烧技术

1.1 能源现状与环境危机

能源是人类社会赖以生存的物质基础，是社会经济发展的重要资源。工业革命以来，全球经济持续高速发展，能源消费不断提高，煤、石油和天然气等传统化石燃料的消费更是日益剧增，并深刻影响着人们生产和生活的各个层面，成为社会经济发展的命脉和各国政府的关注焦点。

2006 年世界主要能源消费国一次能源消费及结构如表 1.1 所示^[1]。当年全球能源消费总量为 108.785 亿吨油当量，在能源消费结构中，石油平均占 35.8%（比 2005 年 36.4% 下降 0.6%），天然气平均占 23.7%（比 2005 年 23.5% 上升 0.2%），煤炭平均占 28.4%（比 2005 年 27.8% 上升 0.6%），核电平均占 5.8%，水电平均占 6.3%。世界主要能源消费国的能源消费结构中，石油一般仍占 38% 左右，天然气一般占 23% 左右。

在我国能源消费结构中，煤和石油等一次能源消费比例偏高，占据了消费总量的 90% 左右，特别是煤炭，占据了消费总量的 70%，接近世界平均水平的 3 倍，天然气、水电、核电等一次性清洁能源所占比例相当小，远远低于世界平均水平，体现我国能源消费结构并不均衡，说明天然气等清洁能源在我国有很大发展空间。

表 1.1 2006 年世界主要能源消费国一次能源消费及结构^[1]

国家	指标	消费量/Mt	消费结构/%				
			石油	天然气	煤	核电	水电
美国		2326.4	40.4	24.4	24.4	8.1	2.8
加拿大		322.3	30.7	27	10.7	6.9	24.6
法国		262.6	35.3	15.5	5	38.9	5.3
德国		328.6	37.6	23.9	25.1	11.5	1.9
意大利		182.2	47	38.1	9.5	—	5.3
英国		226.6	36.3	36.1	19.2	7.5	0.8
俄罗斯		704.9	18.2	55.2	16	5	5.6
日本		520.3	45.2	14.6	22.9	13.2	4.1
韩国		225.8	46.6	13.6	24.3	14.9	0.5
印度		423.2	28.4	8.5	56.2	2.1	6
中国		1720.7	21.1	3.0	69.7	0.7	5.5
世界合计		10878.5	35.8	23.7	28.4	5.8	6.3

我国能源消费结构长期以传统燃煤技术为主，造成能源利用效率低下，经济效益差，产品缺乏竞争力，对我国生态环境造成了严重的影响。首先，煤炭资源的过度开采严重浪费了我国已经十分紧缺的土地资源，煤炭开采加工过程同样会严重破坏和污染地下水资源，使河流受到煤矿污染，危害人们身体健康和生活。其次，煤炭开采过程中会产生废气，由于热值较低无法利用，常常直接排入大气，严重污染大气环境，进一步加剧了大气的“温室效应”。

传统煤炭等化石燃料的利用方式都是采用直接燃烧的方式,在燃烧过程中产生大量烟尘和 NO_x 、 SO_x 等污染物,后者在大气中又形成酸雨,对森林、湖泊、农业生产、建筑以及材料造成严重危害,我国已经成为继北美和欧洲后的第三大酸雨污染区^[2]。据降水监测站的监测结果统计,全国已有 60% 的地方降雨 pH 值低于 5.6,南方 29 个城市,特别是西南地区遭受酸雨危害严重,受害最大的是赣州、长沙、南充、宜宾、怀化、重庆、梧州、南昌、泸州、杭州、衡阳和桂林等地,酸雨出现频率在 70% 以上^[3],呈现出酸雨酸性强度越来越大,频率越来越高的变化趋势。这不但严重危及人体健康,还造成大范围的森林退化和水域生态系统破坏,以及建筑、金属构架和露天艺术品的严重腐蚀和损坏。

我国作为能源消耗大国,在保持经济持续快速增长,缓解生态环境压力问题的同时,要实现能源、经济、生态和社会之间可持续发展,必须调整和优化现有的能源消费结构,一方面要开发新能源,利用可再生能源,代替常规能源;另一方面要改进和发展新型燃烧技术,实现常规能源的高效清洁利用,走资源节约型、清洁生产型、生态保护型、循环经济型的经济发展之路,这也是我国能源可持续发展战略的必经之路。

1.2 气体燃料

气体燃料是能产生热能或动力的气态可燃物质,一般含有低分子量的碳氢化合物、氢和一氧化碳等可燃气体,并常含有氮和二氧化碳等不可燃气体。

天然的气体燃料有沼气、天然气等。经过加工而成的气体燃料有由固体燃料经干馏或气化而成的焦炉气、水煤气、发生炉煤气等;石油加工而得的石油气;以及在炼铁过程中所产生的高炉气等。煤炭开采过程中产生的煤层瓦斯气采用适当技术也可作气体燃料。

气体燃料具有下列优点:①用管道进行远距离输送;②不含灰分;③着火温度较低,燃烧容易控制;④燃烧炉内气体可根据需要调节为氧化气氛或还原气氛等;⑤可经过预热以提高燃烧温度;⑥可利用低级固体燃料制得。缺点是所用的贮气柜和管道要比相等热量的液体燃料所用的大得多。

(1) 天然气 天然气是工业生产和日常生活中最为常用的气体燃料,是地下岩层中以碳氢化合物为主要成分的气体混合物的总称,主要由甲烷、乙烷、丙烷和丁烷等烃类组成,其中甲烷占 80%~90%。

天然气是一种清洁气体燃料,燃烧热值高达 $35600\text{kJ}/\text{m}^3$ (各地成分不同,热值会有所差别)。燃烧后生成 CO_2 和 H_2O ,几乎没有烟尘、二氧化硫(天然气中的硫分在预处理中已经脱除)等污染物产生,产生的温室气体少于煤炭、石油,对大气环境造成的污染远远小于石油和煤炭^[4]。在石油和煤炭消费领域里,有 70% 以上都可以用天然气取代^[5]。因此,世界各国正在不断加大天然气的勘探、开发、利用比例。截至 2007 年,全球天然气可采储量约为 137 亿吨石油当量,与石油基本相当。过去 20 年内,天然气探明储量平均每年增长 4.9%,产量平均每年增长 3.15%。有关专家预测,未来 10 年内,全世界天然气消费年均增长率将保持 3.9%,发展速度超过石油、煤炭和其他任何一种能源。

我国天然气资源相对丰富,现探明地质资源储量达 $54.54 \times 10^{12}\text{m}^3$,陆上 $38.75 \times 10^{12}\text{m}^3$,近海大陆架 $15.79 \times 10^{12}\text{m}^3$ ^[6]。天然气开发消费处于高速增长时期。2008 年,我国天然气消费量为 $778 \times 10^8\text{m}^3$,比 2007 年增加 $96 \times 10^8\text{m}^3$,增长了 13%,成为国内增长速度最快的一次能源。在未来 15 年,我国天然气需求将呈爆炸式增长^[7],年平均增速将达 11%~13%。预计到

2010年,我国天然气需求将达 $1100 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2015年中国天然气需求将达 $1200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。到2020年,天然气在我国能源需求总量中所占比重将从1998年的2.1%增加至10%。

为适应在未来能源消费结构中对天然气的需求,我国在建设实施“西气东输”项目的同时,还先后开展了广东引进LNG试点、中俄管道天然气合作、东海天然气勘探开发、南海天然气勘探开发、中亚石油天然气管道输送、伊朗天然气管道输送等项目。天然气取代传统的煤气成为家庭民用燃气,甚至通过建立天然气电厂来代替传统的燃煤发电,缓解了我国广大地区,特别是华东、华北、东南沿海地区的能源紧缺状况和大气环境压力。

在天然气开发利用高速增长时期,开展天然气等气体燃料的高效低污染燃烧技术,对于实现气体燃料的高效清洁利用,拓展天然气一次消费能源的应用领域,必将具有重要的现实意义。

(2) 低热值气体 低热值气体燃料没有明确的定义。一般地,根据气体燃料热值的高低,将其分为三类^[8]:发热量大于 15.07 MJ/m^3 ,为高热值燃料;发热量在 $6.28 \sim 15.07 \text{ MJ/m}^3$ 为中热值燃料;发热量低于 6.28 MJ/m^3 为低热值燃料。如基于燃气当量比,通常以甲烷为基准,当量比在 $0.4 \sim 0.6$ 之间为较低热值燃气,当量比在 0.4 以下为低热值燃气。

在钢铁冶金、石油化工、煤炭等工业和自然界日常生活中,存在大量可以回收利用的低热值气体。这些低热值气体所在领域不同,种类不同,组成成分相差很大,甚至完全不同,燃气热值差别巨大;即使同种低热值气体燃料,由于产生环境或工艺不同,气体成分存在差别,燃气热值也会随之变化。对具体的低热值气体需要具体分析。

工业中常见的低热值气体燃料主要有高炉煤气、低浓度煤矿瓦斯气、化工过程低热值尾气、石油化工行业的尾气等^[9]。高炉煤气是钢铁行业中产生的主要伴生气,主要成分是 CO 、 CO_2 、 N_2 、 CH_4 等,由于钢铁企业炼焦比不同,各高炉煤气中的气体可燃成分比例并不相同,甚至差别很大。煤矿瓦斯气是煤炭矿井开采过程中从煤层及其围岩涌入矿井巷道和工作面的天然气体,主要成分是 CH_4 。低浓度瓦斯气是甲烷体积浓度小于30%,经煤矿瓦斯抽放系统抽出或排放的瓦斯。通风排放的瓦斯气体中甲烷体积浓度小于0.5%。化工过程低热值尾气是指在化工、制药等行业产品生产、加工过程中产生的可燃气体。石油化工行业的尾气成分复杂,由于生产方法、工艺不同,产生的可燃气体可能完全不同,总体来讲,该类低热值气体主要是由易挥发的有机物组成。在自然界的日常生活中,同样存在大量的物质热解气化气等低热值气体,如酿造和养殖行业产生的沼气,生物质热解过程中产生的 CO 、 CH_4 、 C_2H_2 等可燃气体,垃圾填埋场里产生的以甲烷为主的可燃气体。

总体而言,不同行业中产生的低热值气体燃料,其热值通常可以限定在一定范围之内。例如冶金行业中的高炉煤气热值在 4 MJ/m^3 以下,煤层瓦斯气的热值在 0.65 MJ/m^3 以下^[9],生物质热解气化气的热值通常是在 5 MJ/m^3 以下。化工中的低热值尾气热值更低,甚至在 0.1 MJ/m^3 以下,而且含有苯等有毒物质。

我国目前存在着大量的低热值气体燃料尚未有效利用的情况。国家发改委在节能中长期专项规划^[10]中明确提到在钢铁工业、石油化工工业、煤炭工业等行业需要充分回收和利用低热值气体。根据中国工程项目报告^[11]:我国每年空排的焦炉煤气近 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,约折合标准煤 $1100 \times 10^4 \text{ t}$;每年有总量20%以上的冶炼尾气被直接排空,约折合标准煤 $880 \times 10^4 \text{ t}$;每年产生的沼气约折合标准煤 $730 \times 10^4 \text{ t}$;假设我国秸秆可利用量 $3.5 \times 10^8 \text{ t}$ 的10%用来生

产秸秆气,则每年生产的秸秆气约折合标准煤 $900 \times 10^4 \text{t}$;将 $1.1 \times 10^8 \text{t}$ 生活垃圾的填埋气体全部收集利用,就相当于 $(10 \sim 70) \times 10^8 \text{m}^3$ 的天然气。我国 67% 的煤矿矿井对抽放出来的低浓度瓦斯气体直接排空。煤矿瓦斯、垃圾填埋气、污水处理厂的沼气等全国每年排放 $430 \times 10^8 \text{m}^3$,如果能加以利用,相当于增加了 8 个“西气东输”。

长期以来,这些气体燃料由于可燃成分含量少,热值低,在传统的自由火焰燃烧条件下,难以点燃与控制,燃烧非常困难,容易出现回火和吹熄等现象,常常被当作废气直接排入大气中,这不仅造成能源浪费,而且由于化工工业中的低热值气体通常含有如苯、CO 等有害气体,会造成环境污染,并进一步导致了温室效应的加剧。在致温室效应的气体中,CH₄ 占 17%,大多来自于直接排空的低热值可燃气体,CH₄ 温室效应是 CO₂ 24.5 倍,是导致地球温室环境的元凶之一。在煤炭开采、运输中产生的煤层气超过 $180 \times 10^8 \text{m}^3$,排空量超过 $160 \times 10^8 \text{m}^3$,相当于 1.33 个西气东输一线管道年供气能力,约折合 $2000 \times 10^4 \text{t}$ 标准煤。如果把这部分排空的煤层气有效利用,相当于每年可减少 $1.92 \times 10^8 \text{t}$ 二氧化碳的温室作用,也相当于 66 座 600MW 火力发电厂一年排出的二氧化碳。

研究开发新型、高效、低污染排放的低热值气体燃料燃烧技术,解决低热值气体燃料的稳定燃烧,避免直接排放造成的环境污染,实现低热值气体燃料高效清洁利用,对缓解能源紧张,改善能源消耗方式,提高能源利用率,减轻温室效应,保持社会经济可持续发展都具有重要的意义。

1.3 气体燃烧技术

气体燃烧主要包括扩散燃烧和预混燃烧两种。扩散燃烧是燃气与氧化剂未预先混合,燃气燃烧所需氧化剂通过扩散作用获得的燃烧过程;预混燃烧是指气体燃料和氧化剂在燃烧前预先混合的燃烧过程。

扩散燃烧分为自然引风式扩散燃烧和鼓风式扩散燃烧,预混燃烧分为部分预混燃烧和完全预混燃烧。

为实现气体燃料高效清洁利用,在气体燃料燃烧领域出现了各种燃烧技术,包括脉动燃烧、催化燃烧、高温空气燃烧、多孔介质燃烧等燃烧技术。

1.3.1 脉动燃烧

早在 1777 年,希格金斯(Higgins)博士在一个竖直玻璃管和一个气体燃烧器组成的实验装置中研究发现,当燃烧器和火焰从下面伸入玻璃管时,玻璃管内便激发出很大的声音,在玻璃管上方套上一个滑动的套筒,改变管子的长度,这时声音的频率就会发生变化,就像唱歌一样,称之为“会唱歌的火焰”。19 世纪中叶,李康特教授在一次音乐晚会中发现,每当音乐一响,烛光火焰便准确地随着音乐节拍的变化振动跳舞,而且火焰的变化能完美地反映出乐器发出的颤音,发现了对声音“敏感的火焰”。在发现了“会唱歌的火焰”和对声音“敏感的火焰”以后,人们开始了对脉动燃烧现象的探索和研究,出现了新型的脉动燃烧技术。

(1) 脉动燃烧原理 脉动燃烧是指在一种声振条件下发生的周期性燃烧过程,不同于常规的稳定燃烧过程,是指在一定的声学条件下,在燃烧区内表征燃烧过程的状态参数,如温度、压力、气流速度及热释放率等稳态变量都随时间周期性波动的一种特殊的不稳定燃烧

过程。

上述“会唱歌的火焰”和对声音“敏感的火焰”的描述，从燃烧机理上正好反映出脉动燃烧过程中的两个基本激励过程：即燃烧可以在某种条件下激发燃烧器中的声学脉动；反过来，声学脉动也可以改变燃烧的特性。脉动燃烧正是在特定条件下，这两个激励过程的相互反馈所形成的一种特殊的燃烧过程。正是这种特殊的相互反馈，很大程度上强化了燃烧器及尾管中颗粒与颗粒之间、颗粒与气流之间的传热、传质（混合）及动量传递过程，使脉动燃烧技术具有常规稳定燃烧不可比拟的优势。

(2) 脉动燃烧特点

① 燃烧强度和燃烧效率高。脉动燃烧过程中气流的脉动强化了燃烧器中气流与气流或颗粒之间的混合，加快了化学反应速度，燃烧充分，使脉动燃烧器具有很高的燃烧强度。燃用气体燃料的各种脉动燃烧器，当过量空气系数略大于1.0时，便可达到近似100%的燃烧效率。如以重油为燃料时，在过量空气系数为1.05的条件下，其燃烧效率就可以达到99%以上。在Rijke管型脉动燃烧器中燃烧无烟煤块，在过量空气系数只有1.05和1.10条件下，其燃烧效率分别可以达到95%和97.5%。

② 传热效率高。脉动燃烧室中的声共振引起了较大的流体振动，附加在这些振动上的是湍流速度振动，湍流的作用增强了传热。同时由于气流的脉动削弱了管壁边界层的阻力作用，使热量传递增强。目前脉动燃烧器热效率可达95%~96%。

③ 排烟污染小。脉动燃烧烟气排放中的C、H₂、CO及碳氢化合物的含量都较低。脉动燃烧温度较低，与常规锅炉(58~138)×10⁻⁶的NO_x排放量相比，脉动燃烧器NO_x排放量可减小到(34~36)×10⁻⁶，燃烧污染物排放低。

④ 具有自吸功能。脉动燃烧大都具有自吸功能，也就是不需要鼓风机，能自行吸入燃料及供燃烧用的空气。脉动燃烧器的工作原理决定，在其工作过程中，在燃烧器内会形成一段暂时的部分真空状态，从而它可以自行吸入所需的空气及燃料，而不需要外加鼓风机或减少鼓风机压头为其提供燃烧所需的空气。

⑤ 结构紧凑、节省固定投资。脉动燃烧技术优良的传热、传质特性使得脉动燃烧器燃烧室的体积和换热面积都可相应地减小。

当然在脉动燃烧应用中，仍会存在一定的问题。一方面是噪声问题，在燃烧器中会有一些的声能从尾管出口辐射出来，空气和燃料各自的入口也会向外辐射声能，对周围环境造成噪声污染，有时甚至高达110~130dB，近年来最新的设计已成功地吧噪声水平降到45dB。另一方面是振动问题，脉动燃烧器内的压力脉动会引发装置系统组件的振动，对系统构件的强度、工作可靠性可能会造成一定的影响。有关振动对系统组件的影响仍需研究。

(3) 脉动燃烧种类 根据脉动产生方式的不同，脉动燃烧器可分为强迫脉动式和自激脉动式两种。

强迫脉动式是通过一定的机械部件，向燃烧室周期供气或供燃料，从而产生脉动燃烧。由于其阀门使用频繁，寿命较短，可靠性比较差。

自激脉动式是利用热声转换技术将部分热能自发地转换成声能，产生自激、持续稳定的脉动。由于其没有机械运动部件，寿命相对较长，但噪声大。

根据脉动燃烧的产生的声学结构的不同，主要可以分为以下几类，见图1.1。

Schmidt型是一端开口一端闭口的直管结构，又称1/4波长型。它是基于声学上的1/4波长谐振管的原理，依靠自激振荡产生并维持气体脉动。

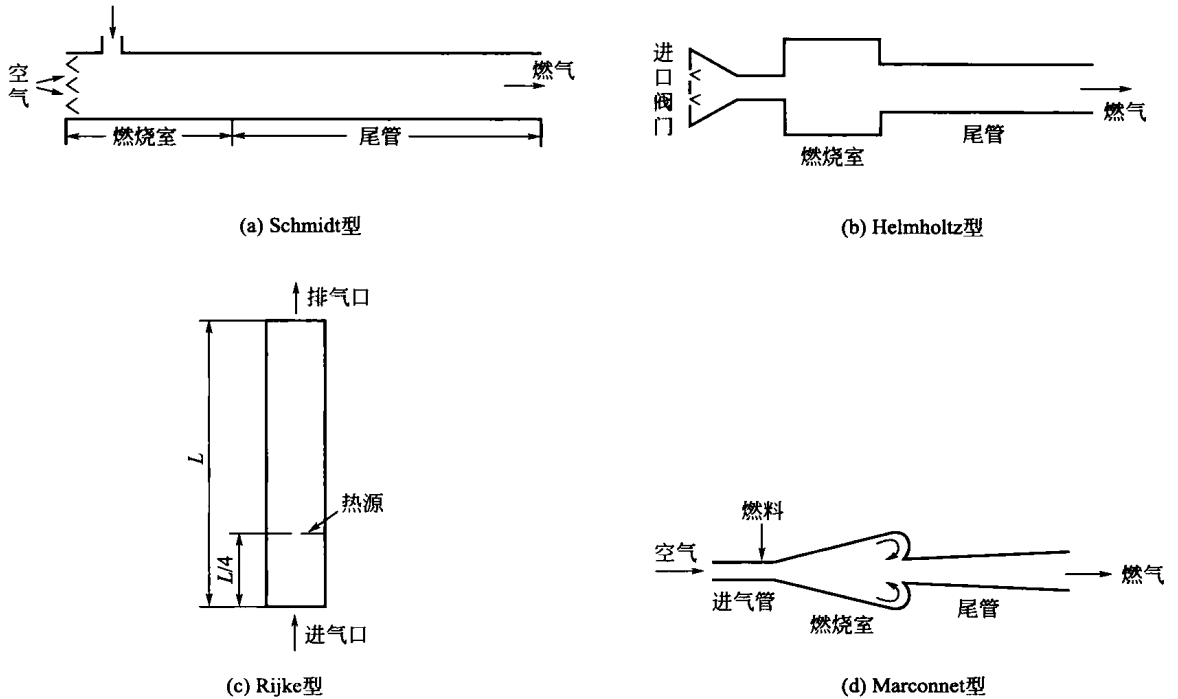


图 1.1 各种类型脉动燃烧器

Helmholtz 型是与 Schmidt 型工作原理一样的脉动燃烧器，它与前者的主要区别在于它有一个大的共振腔。当采用进气阀门时，这两种燃烧器都可以把尾管做得很长，换热非常充分。

Rijke 型是一个两端开口的直立长管。当热源在进口端 $L/4$ 处时，或冷源在出口端 $L/4$ 处时，便可产生声-热耦合脉动。它的特点在于不仅可以燃用气、液燃料，而且还可以很方便地燃用固体燃料。

Marconnet 型为进气口是一个“气动阀”的脉动燃烧器。当燃气从燃烧室向外流动时，阻力较大，而当气体向燃烧室内流动时，阻力较小。这种“阀门”起到了一定的自吸作用。

(4) 脉动燃烧应用 脉动燃烧技术具有燃烧强度和燃烧效率高、热效率高、污染物排放低等优点，广泛应用于化工、能源、民用等领域。

① 冲力和动力领域。脉动燃烧能提供很强的压力，应用在喷气推进系统和燃气涡轮领域。其除被应用于 V-1 火箭发动机以外，还曾被试验用于推动小型直升机桨片；利用脉动燃烧器具有的增压燃烧特点，还将其应用于燃气涡轮中。

② 加热和采暖领域。利用脉动燃烧技术极好的传热特性及自动吸气排烟功能，可将其应用于空间和液体的加热方面及民用采暖领域。如美国 MacDonaldis 公司的 Fulton 型燃气脉动燃烧循环加热锅炉，发热范围为 $318000 \sim 2120000 \text{kJ/h}$ ，在冷凝状态下效率可达到 98%。

③ 干燥领域。脉动燃烧用于干燥工业，利用脉动燃烧所产生的高温、高频、高速尾气流，能在较短时间用较少的燃气在较低的温度下干燥各种物料。该方法不仅能降低维护费用，还能克服传统干燥法在干燥热敏性或生物物料时导致的产品质量退化、降低或失去营养价值及微生物失活等缺点，是一个很有前途的发展方向。

④ 焚化、煨烧领域。脉动燃烧器引起的附加湍流能应用于焚化和煨烧领域中，能够减少燃烧一定量废弃物所需的过量空气量，减少或消除瞬态操作时“喷焰”的危害，提高废弃物的燃烧速率和整个焚化炉的燃烧能力；减少焚化炉的燃料需要量。脉动燃烧技术可应用于焚化和煨烧各种废弃物。

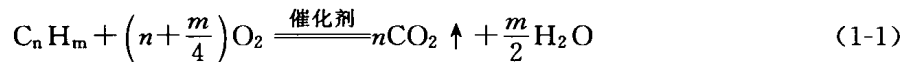
此外，脉动燃烧技术还可用于打井、吹灰、气化、造雾、化学反应器等其他工业领域，是一种非常有发展前景的燃烧技术。

脉动燃烧技术在应用过程中也存在不足，如脉动燃烧器噪声污染、体积较大等问题。

1.3.2 催化燃烧

催化燃烧技术是近几十年发展起来的一种有广泛应用前景的新型燃烧方式。20世纪40年代末，美国催化燃烧公司将研制出的世界上第一台催化燃烧装置用于处理工业中的有机废气后，催化燃烧技术在德国、日本、前苏联等国家得到迅速发展和应用。我国从20世纪70年代开始发展催化燃烧技术，并在绝缘材料、印刷工业等方面进行了研究，使催化燃烧技术得到迅速发展。

(1) 催化燃烧原理 催化燃烧是指煤、石油、天然气等燃料在固体催化剂的作用下能够在较低温度下进行的完全氧化燃烧过程，通常是以多相催化中的气-固相催化应用最为广泛。它是一种典型的气-固相催化反应，能够借助催化剂降低反应活化能，并在固体催化剂表面进行氧化反应，使燃料在较低的起燃温度（200~300℃）下进行无焰燃烧，产生CO₂和H₂O，放出大量的热量。整个氧化燃烧反应过程温度较低，抑制了空气中的N₂形成高温NO_x，同时催化剂的选择性催化作用，限制了燃料中氮化合物的氧化过程，使其多数形成分子氮（N₂）。这样就从燃烧机理上限制了NO_x污染物的产生。其统一的化学反应式表示如下：



催化燃烧实质是空气中的氧气被催化剂中的活性组分所活化，当活性氧与反应物分子接触时发生了能量的传递，反应物分子随之被活化，从而加快了氧化反应的反应速率，即活性氧参与深度氧化作用的过程。具体过程一般需要以下步骤：

- ① 反应物分子由气相扩散到催化剂表面；
- ② 反应物分子从催化剂外表面通过微孔向催化剂内表面扩散；
- ③ 克服气-固界面膜的阻力被催化剂表面的活性部位吸收（至少吸收一种反应物）；
- ④ 被活化的吸附物与另一种活化的吸附物或物理吸附物或直接来自气相之间的反应物进行化学反应；
- ⑤ 反应产物从催化剂表面上脱附；
- ⑥ 脱附物通过细孔向催化剂外表面扩散，由外表面向气相扩散；
- ⑦ 脱附物由外表面向气相扩散。

上述①、②、⑥和⑦四个步骤为传质过程，也是传热过程。③、④、⑤三个步骤为表面反应过程。总反应速度决定于最慢步骤的速度，称为速度控制步骤。对给定的反应方式和催化剂，速度控制步骤随反应温度、流速、气体组成及催化剂的几何物态变化而不同。研究表明，多数工业气相反应总速度都受催化剂内扩散或催化剂与流体之间的传热速度所控制。但是在低温开始反应时，催化剂无疑起关键作用。催化研究者则关注③、④、⑤三个步骤的表面反应，催化剂的作用是降低反应活化能。一些动力学研究结果表明，多数有机物完全氧化

的活化能在 $80\sim 200\text{kJ/mol}$ ，而在催化剂作用下可降到 $20\sim 80\text{kJ/mol}$ 。

(2) 催化燃烧特点 与传统火焰燃烧相比，催化燃烧技术有着很大的优势，主要表现在以下几个方面。

① 起燃温度低，节约能源。传统燃烧为火焰燃烧，在燃烧过程中不可避免地以可见光形式释放能量，这部分能量无法利用而损失；催化燃烧在催化剂的作用下，起燃温度较低，是一种无焰燃烧，可使燃烧所放出来的热量得到充分利用，并且能够使燃烧器接近加热物体，缩短加热时间，提高热效率。传统燃烧条件下，燃料不能充分燃烧，剩余烃类和烟尘直接排放到大气中，造成能源的巨大浪费。催化燃烧能够使燃料基本上完全燃烧，提高燃料利用率。在某些情况下，催化燃烧达到起燃温度后便无需外界供热。

② 污染物排放低。传统燃烧温度高，空气中的氧气与氮气相互作用产生大量的 NO_x ；在催化燃烧过程中，燃烧温度降低，且催化剂的选择性催化作用限制了燃料中氮化合物的氧化过程，使其多数形成分子氮 (N_2)，降低了 NO_x 的排放。催化燃烧过程中，在催化剂的作用下，燃料氧化反应的活化能大大降低，燃料燃烧充分，CO 排放显著降低。

③ 适用范围广。催化燃烧几乎可以处理所有的烃类有机废气及恶臭气体。对于有机化工、涂料、绝缘材料等行业排放的低浓度、多成分、无回收价值的废气，采用吸附-催化燃烧法的处理效果更好。

④ 处理效率高，无二次污染。用催化燃烧法处理有机废气的净化率一般都在 95% 以上，最终产物为无害的 CO_2 和 H_2O （杂原子有机化合物还有其他燃烧产物），且在燃烧过程中，燃烧缓和，噪声小，不会造成二次污染。催化燃烧不仅可以使燃料得到充分利用，还是一个环境友好的燃烧过程。

(3) 催化剂要求与种类 在燃烧反应过程中，燃烧反应速率不仅决定于反应物的性质以及所处的外界条件（如温度、压力、容器结构等），还受到加入反应混合物中的其他物质的影响，这些物质能够加快化学反应速率，但它们本身的化学组成和数量并没有发生改变，这些物质称为催化剂。如果是减小反应速率，称为阻化剂。

① 催化剂的基本要求。催化剂性能对燃烧过程具有重大影响，选择良好的催化剂是催化燃烧的关键所在。催化燃烧对催化剂的基本要求是：既能抑制烧结、保持活性物质具有较大的比表面积以及良好的热稳定性，又具有一定的活性，可起到催化剂活性组分的作用。这两个要求在某种程度上相互矛盾的，因为研究表明，氧化物的活性和热稳定性成反比。另外，还需要有高的力学性能以及有高的耐腐蚀性，工业催化剂还应考虑成本合理和原料供应稳定等条件。

在高温催化燃烧过程中，特别是在燃气轮机燃烧室和大型锅炉在高温下（ $1000\sim 1500^\circ\text{C}$ ）进行催化燃烧，对催化剂的要求更高。高温催化剂应该满足以下基本要求：具有较高的催化活性，即对燃料和空气混合物要有尽量低的起燃温度；高温条件下，催化剂活性仍高，保证燃烧充分；燃烧产物通过催化床时，沿程阻力损失尽量小，保持高的燃烧效率；热稳定性良好，能够保证在 1100°C 以上温度下长期使用；具有良好的抗热震性、耐压性、耐磨性等力学性能。

② 催化剂分类。目前，国内外用于催化燃烧的催化剂主要有两大类：一类是贵金属催化剂；另一类是非贵金属催化剂，主要为过渡金属氧化物催化剂和复合氧化物催化剂。

a. 贵金属催化剂。Pt、Pd、Rh 等贵金属对烃类及其衍生物的氧化具有很高的催化活性和抗中毒能力，使用寿命长，适应范围广，易于回收，因而是最常用的废气燃烧催化