

燃烧论文集

燃烧论文集编辑组 编

学术 期刊 出版 社

内 容 简 介

本文集包括燃烧理论与技术论文 77 篇，内容有燃烧学的基础理论研究、煤粉与水煤浆燃烧、流化床燃烧、燃烧过程的数值计算、发动机燃烧及燃烧测量技术等，文集涉及面较广，理论联系实际，适合燃烧科研人员、工程技术人员和高等院校师生参考。

燃 烧 论 文 集

燃烧论文集编辑组编

学术期刊出版社出版

(北京海淀区学院南路 86 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京顺义冠中印刷厂印刷

•

787×1092 毫米 16 开本 24.25 印张 633 千字

1989 年 1 月第一版 1989 年 1 月第一次印刷

印数：1—1100 册 定价：12.00 元

ISBN 7-80045-131-3/TK·3

序

近四十年來，一方面由于空气喷气发动机和火箭技术的发展，另一方面由于能源危机和大气污染的日益严重，燃烧理论和燃烧技术的研究工作获得了蓬勃的开展，取得了很大的进展。特别是工业燃烧设备和发动机的节约用能和降低污染的研究工作，开展得更为广泛。近年來，我国在燃烧学的各个方面也进行了大量的科研工作，取得了不少成绩，对我国国民经济和国防建设的发展起到了很大的促进作用。

《中国工程热物理学会 1987 年燃烧学学术会议论文集》汇集了 1987 年 10 月 5 日至 10 月 8 日在四川峨嵋召开的学术会议上宣读的论文 77 篇，其中包括燃烧的基础理论，煤粉和水煤浆燃烧，流化床燃烧，发动机燃烧，排气污染，燃烧过程数值计算以及燃烧测量技术等各方面的内容。这些论文都是经过评审挑选出来的，在一定程度上反映了我国目前燃烧学方面的研究水平。本论文集的出版有利于在学术上的交流和切磋，也激励我们在新的起点上更上一层楼，取得更丰硕的成果。

史绍熙

1988 年 6 月 4 日

目 录

燃烧学的基础研究

- 可燃气体爆炸泄压过程中声动不稳定燃烧压力峰减弱方法的研究……王宝兴 李振彦(1)
- 关于控制氧化氮生成诸影响因素某些试验结果的分析研究……田正渠(6)
- 低浓度甲烷气体催化燃烧试验研究……王华芳 刘高恩 李 黎(11)
- 三股矩形喷口受限射流的实验测定……陈维汉 王国贵 霍又章(17)
- 矩形受限空间内扁平射流冷态流场的实验研究……黎 军 卫景彬 王宏宇(22)
- 矩形通道内扁平射流的数值模拟 王宏宇 赵 烈 黎 军 卫景彬(27)
- 矩形受限空间均相射流火焰的研究——扁平射流气相火焰研究
……卫景彬 黎 军 王宏宇(31)
- 旋流模型燃烧室实验研究……朱慧龄 唐 明 严传俊(36)
- 柴油及其乳化油的燃烧特性……江淑琴 叶经纬(40)
- 掺水燃油燃烧特性研究……马元骥 辛 军 朱崇基(45)
- 燃烧过程中防止重油裂解与节能的研究……张润霞(50)
- 电场对碳氢燃料火焰结构的影响研究……陈丹之 韩绍辛 李兴华(55)
- 在静止 O_2-N_2 环境中激光点燃的碳粒燃烧特性实验研究 ……顾毓沁 洪 涛(60)
- 卤代烷灭火剂阻燃试验研究……熊湘伟(65)

水煤浆与煤粉燃烧

- 水煤浆的管内流动特性研究……夏德宏 王世均 赵立合(70)
- 射流栅方法用于强化水煤浆(煤粉)燃烧的研究
……谢名湖 吕德寿 张铁均 曹欣玉 冯国华 岑可法(74)
- 多环形逆向分布射流稳定和强化煤粉及水煤浆燃烧
……赵惠富 张培元 王一贞 那希志 王 宏 陈先华(79)
- 利用反吹射流稳陷和控制水煤浆燃烧的理论及试验研究
……王月明 曹欣玉 顾 战 黄镇宇 姚 强 岑可法(83)
- 预燃室旋流燃烧器对水煤浆雾炬着火的强化
……陈建荣 谢名湖 吕德寿 张铁均(87)
- 在燃气轮机试验燃烧室内提高水煤浆燃烧强度的途径和燃烧效率的测定
……曹 健 高丽君 龚 盈 马人熊 张长梅(92)
- 关于煤粉火焰稳定性和煤粉预燃室及火焰稳定船的作用
……徐旭常 王云山 金茂庐 赵 平(97)
- 煤粉气流着火界限的试验研究……金茂庐 朱大宏 徐旭常(102)
- 煤粉预燃室内气体湍流交换系数的实验和数据整理……牛建磊 徐旭常 曾瑞良(107)

稳燃腔煤粉燃烧器的气流结构及燃烧特性研究·····	袁建伟	肖丽	韩才元	(111)
无烟煤粉燃烧动力学参数的实验研究·····	李成之	郭伯伟	张海洲	(116)
预燃室运行寿命的试验研究·····			刘志东	(121)
低NO _x 贴墙风煤粉燃烧系统炉内冷态空气动力特性的试验研究 ·····	何秀光	曾汉才	李文珏	李宏飞(127)
石灰石、白云石脱硫的电镜分析·····	曹璋	朱美珠	方一麟	(132)

流化床燃烧

沸腾炉悬浮段中倾斜二次风流场的理论与LDV实验研究·····	孙绍增	秦裕琨		(137)
宽筛分物料流化床中固体颗粒的粒度分布模型·····	王宏宇	陆惠林	秦裕琨	(142)
宽筛分煤粒在沸腾炉内的燃烬特性与微倾斜布风板 ·····	谢建扬	张学宏	曹源泉	吴松(148)
流化床辐射换热机理研究·····	陆继东	钱壬章	程尚模	(153)
沸腾-层燃复合燃烧灰渣床·····	曹源泉	吴松	谢建扬	张学宏(158)
倾斜浅床流化床中颗粒的扩散和混合·····			马力行	张鹤声(163)
流化床中宽筛分物料的临界流化速度·····	陆惠林	阮根健	庞丽君	秦裕琨(168)
增压循环床内的气固两相流动·····	徐益谦	林嵩明	沈湘林	江培军
水煤浆流化床燃烧试验研究 ·····	岑可法	黄国权	倪明江	项黔
一种适合煤燃烧的新型流化床的初步研究·····	杨家林	吕荣	池勇	卜成
快速循环流化床宽筛分粒子夹带的试验研究 ·····	简庆杭			(177)
快速循环流化床中回料装置的试验研究 ·····	刘树钢	李成之		(182)
快速循环流化床宽筛分粒子夹带的试验研究 ·····	杨和平	刘焕彩	刘德昌	林志杰
快速循环流化床中回料装置的试验研究 ·····	伍蔚恒			(187)
快速循环流化床中回料装置的试验研究 ·····	杨和平	刘焕彩	刘德昌	林志杰
快速循环流化床中回料装置的试验研究 ·····	伍蔚恒			(192)
循环流化床上部空间燃料燃烧份额和传热 ·····	潘忠刚	任爱峰	王达三	姜鸿安
循环流化床锅炉飞灰循环量的测定·····	宋渝吉	杨金生		(197)
内循环旋流床基础试验研究·····	吴邦贤	汤伟声		(202)
流化床内的横向粒子扩散系数和热扩散系数·····	康齐福	任有中	方梦祥	施正伦
燃气流化床自由空间的颗粒运动·····	赵翔			(207)
燃气流化床自由空间的颗粒运动·····	任有中	B.M.	吉布斯	(212)
燃气流化床自由空间的颗粒运动·····	张磊	张鹤声		(217)

燃烧过程数值计算

两相湍流射流扩散燃烧的数值计算·····	朱祚金	范维澄		(222)
四方程湍流模型在燃烧过程数值计算中的应用·····	郑楚光	袁建伟	钱壬章	(227)
湍流的雷诺应力模型·····	范维澄	李康	符松	(232)
摄动法在燃烧中的应用·····			李天祥	(236)
仿沙丘火焰稳定器流场的数值计算·····	宁槐	林星山		(241)
一种新的壁面函数·····	范维澄	李康		(246)
单室火灾可用逃生时间的理论与计算·····	沈浩	范维澄		(251)
楼房走廊中烟气传播的计算机模拟·····	万跃鹏	范维澄		(257)

对 k-ε 湍流模型的修正及其应用效果·····	龚 盈 王应时(261)
柴油机复合燃烧系统中燃油着壁率的数值计算·····	龚允怡(266)
高速气流中跨流喷射时火焰稳定器截面的燃油浓度分布计算 ·····	王 俭 顾善建 杨茂林(270)
计算内燃机气缸内涡流运动的一个简化解析方法·····	解茂昭(275)
燃用水煤浆的前置燃烧室内传热过程的数值模拟及试验研究 ·····	沈珞婵 徐 幸 吴小华 曹欣玉(280)
燃烧室传热 Monte-Carlo 解法用于工程计算时的模拟精度探讨 ····	胡迺一 孙昭星(284)

发 动 机 燃 烧

在定容燃烧装置中进行柴油机喷雾特性的研究·····	史绍熙 赵奎翰 张惠明 顾小军(289)
内燃机示功图误差诊断和校正方法的研究·····	史绍熙 苏万华(294)
燃气轮机燃用煤矿瓦斯的问题·····	吴文东 沙英普 孙秀婵 杨金生 张亚南(299)
环形燃烧室出口温度分布系数的研究·····	张宝诚(305)
模拟外函进口温度下稳定器表面集油率随其径向位置的变化 ·····	顾善建 杨茂林 吴继平 肖维慧(310)
直射式喷嘴水平跨流喷油与沙丘驻涡稳定器匹配的实验研究 ·····	顾善建 杨茂林 肖维慧 张迎年(315)

喷 嘴

新型高效节能喷嘴(TE-1型油枪)的试验研究 ·····	黄世乐 张松寿(320)
切向槽式离心机械雾化油喷嘴计算方法与结构参数研究·····	张恩仲(325)

燃 烧 测 量 技 术

仿沙丘火焰稳定器温度场的激光全息干涉测量·····	徐 行 林星山 宁 棍(330)
应用三维LDA对大速差同向射流煤粉燃烧室稳燃机理的研究 ·····	吴承康 卫景彬 杨家寿 赵 烈(334)
相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)测量火焰温度的实验研究 ·····	孙树兰 李春金 赵建荣(339)
马尔文粒度分析仪的精度提高及改善·····	张宏建 王乃宁(344)
HF-1A红外火焰辐射仪的研究·····	魏福清 叶梦眉 刘 彦 龙迎天(349)
两种测量燃烧效率和气油比的燃气分析技术的对比研究·····	吴寿生(353)
燃烧中热值气体燃料的燃烧效率测量的实验研究·····	王华芳 刘高恩(358)
数据采集系统在减阻实验中的应用及初步减阻试验研究 ·····	蒋 智 唐智明 高 歌 宁 棍(363)
柴油机燃烧温度测定装置标定用黑体辐射源的研制·····	刘长胜 黄松本 程晓舫(368)
单颗粒粉末燃料燃烧时的表面温度测量·····	朱德忠 罗晓迎(372)
藉助热重分析对循环流化床燃尽状况的测量与研究·····	任爱峰 王达三 姜鸿安(376)

可燃气体爆炸泄压过程中声动不稳定燃烧压力峰减弱方法的研究

王宝兴 李振彦

(公安部天津消防研究所)

一、前言

爆炸泄压用于建筑物防爆已有多年历史。但是近年来一些爆炸案例表明,尽管按照规范^[1、2]设置了泄压面积,某些情况爆炸损失仍十分严重,造成了建筑物主结构的破坏。文献^[3-6]指出,在爆炸泄压后期出现声动不稳定燃烧压力峰(P_3),是造成建筑物恶性破坏的主要因素,并详尽地研究了各种参数对 P_3 的影响,对 P_3 的产生机理也作了初步合理的解释。

既然建筑物内声动不稳定燃烧压力振荡(或 P_3)是造成建筑物破坏的主要因素,如果消除了 P_3 ,则爆炸泄压的效果将更令人满意。因此,研究消除或减弱 P_3 的措施就成为当今世界上防爆研究者的一个重要课题^[7]。

Wanwingerden^[4]1983年在5.2米³试验容器的内壁上衬以50毫米厚的玻璃棉,成功地消除了 P_3 ,但是没看到在大的试验装置内试验成功的报导。

二、消除声动不稳定燃烧压力峰 P_3 的基本原理

文献^[6]阐述了 P_3 的产生机理,概括地可由图1说明。可燃混气在有平行壁面的建筑物(或容器)内经火花点燃后开始泄压。点燃产生的声振在两个平行的刚性壁面之间将产生驻波,于是可燃气质点以驻波方式作纵向振动。可燃质团在纵向振动的密状态下,燃烧加速,促进局部压力增高;在疏状态下,燃烧减慢,吸热,使局部压力降得更低,引起振荡燃烧,振荡燃烧又引起压力振荡。然后压力振荡又进一步加剧了可燃混气团的纵向迁移振动,也即产生了一个正反馈,回路发散,燃烧转变为不稳定燃烧,振荡的压力振幅急剧增加,使残余的可燃气燃完为止,产生了 P_3 。

如果消除了点火后产生的可燃混气质点的声振驻波,整个放大回路就中断。于是既产生不了不稳定燃烧,也消除了压力振荡,从而消除了 P_3 。这就是消除声动不稳定燃烧压力峰 P_3 的基本原理。

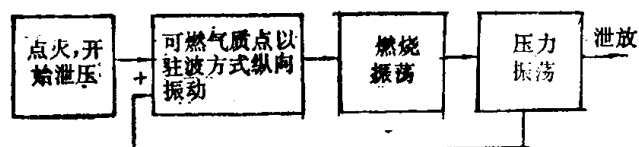


图1 P_3 产生的机理框图

三、“爆炸减压板”——消除(或减弱) P_3 的有效方法

本研究通过对声动不稳定燃烧的试验研究与机理探讨,研制出一种“爆炸减压板”并将其

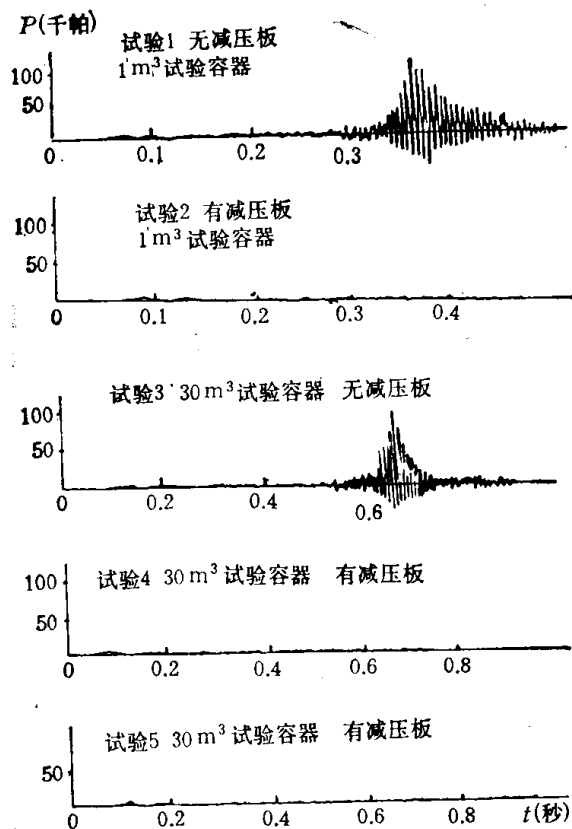


图2 “爆炸减压板”减压效果对比试验

以特定方式附于建筑物内壁上，可有效地消除甲烷气、天然气、丙烷气以及液化石油气爆炸泄压间产生的强烈声动不稳定燃烧压力振荡和 P_3 。

“爆炸减压板”是一种难燃的材料板(氧指数大于35)，作为装饰板附于墙上。墙的内壁衬上它，将改变原来声振的边界条件，使声振的前进波遇到“爆炸减压板”后，不能产生周相反转，于是前进波与反射波不能相互干涉产生驻波，从而消除了产生 P_3 的“动力”，于是消除了(或减弱了) P_3 。

图2给出“爆炸减压板”消除 P_3 的效应的对比试验。表1给出对比试验的有关数据。对比试验表明，装置了“爆炸减压板”， P_3 从最大值98.0(千帕)被减低到4(千帕)，火焰变暗，啸叫声消失。

表1

“爆炸减压板减压性能”的对比试验

试验编号	试验容器容积 (米 ³)	泄压口封盖的材料	$A/V^{2/3}$	P_3 (千帕)	体积浓度 (%)	“爆炸减压板”设置状况	备注
1	1	0.05毫米塑料薄膜	0.404	91.0	5.1	无	声音啸叫，火焰明亮
2	1	同上	0.404	2.0	5.1	左、右、后、底四个内表面衬“爆炸减压板”	声音低闷
3	30	同上	0.326	98.0	4.2	无	声音啸叫，振荡时火焰明亮
4	30	同上	0.326	4.0	4.3	左、右、后、顶四面衬“爆炸减压板”	声音闷。 $P_2 = 6$ 千帕是最大的压力
5	30	3毫米厚的平板玻璃	0.472	4.0	4.1	同上	从充液化石油气开始，用两台300毫米排气扇搅拌，直到点火前停转。爆炸后有一块半玻璃完好

注：1. 试验用的可燃气体为液化石油气。

2. A代表泄压口面积，V代表试验容器的容积。 $A/V^{2/3}$ 为比例泄放比。

四、“爆炸减压板”的减压功能试验

为了全面考核“爆炸减压板”的减低声动不稳定燃烧压力峰 P_3 的功能，做了以下全面考核试验。

1. 各种可燃气体浓度下的“爆炸减压板”的减压效果 在1米³试验容器内，以内右壁面，左壁面，后壁面以及底面衬减压板的方式，在不同液化石油气浓度下进行了试验。表2给出了试验数据。显然，在包括最危险浓度在内的各种浓度下，减压板几乎完全消除了 P_3 。

表 2

不同浓度下的减压性能对比试验

试验编号	体积浓度 (%)	P_3 (千帕)	泄压口封盖物	减压板敷设情况	备 注
1	5.9	≤ 2	3毫米厚平板玻璃	左、右、后及底四面敷设“爆炸减压板”	声音低闷
2	5.4	≤ 2	同 上	同 上	同 上
3	4.85	≤ 2	同 上	同 上	声音低闷, $P_1 = 14$ (千帕)
4	4.3	≤ 2	同 上	同 上	声音低闷, $P_1 = 19$ (千帕)

($A/V^{2/3} = 0.264$, 液化石油气)

2. 不同比例泄压面积的减压效果 在1米³试验容器内用接近危险浓度的液化石油气, 分别在四种不同的比例泄压面积下进行了试验。结果列于表3。典型的压力-时间曲线与图2试验2相似。

表 3

不同比例泄压面积减压性能对比试验

试验编号	体积浓度 (%)	$A/V^{2/3}$	泄压口封盖物	P_3 (千帕)	减压板敷设情况	备 注
1	5.4	0.264	3毫米平板玻璃	≤ 3	左、右、后及底四面敷设“爆炸减压板”	声音低闷
2	5.4	0.404	同 上	≤ 3	同 上	同 上
3	5.4	0.545	同 上	≤ 3	同 上	同 上
4	5.4	0.821	同 上	≤ 3	同 上	同 上

表3的试验结果表明, 各种泄压面积下, 爆炸减压板的减压效果均很好, 都将 P_3 减低到2~3(千帕)。

3. 爆炸减压板对不同的可燃气体的减压效果 文献[8]指出: 可燃气体与空气混气的爆炸指数 K_{max} 表征其爆炸烈度, 甲烷的 K_{max} 约为5400(千帕·米·秒⁻¹), 丙烷气的 K_{max} 约为7350(千帕·米·秒⁻¹), 液化石油气依生产厂家的不同, 成分有所差异, 约为9000~10000(千帕·米·秒⁻¹)。文献[5]指出, 液化石油气-空气混气产生的 P_3 最大。

本研究做了甲烷气, 液化石油气两种可燃气体的爆炸减压板的减压效应试验。试验结果表明, 爆炸减压板对甲烷气的爆炸泄压过程的减压效果更好。凡是 K_{max} 值小于液化石油气的 K_{max} 值的可燃气体, 爆炸减压板的减压效果均好。

4. 不同容积的情况下爆炸减压板的减压效果 除了在1米³试验容器内作了一系列爆炸减压板的减压效果试验外, 在30米³试验装置内也作了多次试验。例如表1中的试验4、试验5均为在30米³试验装置内进行的(试验的P-t曲线见图2的试验4、试验5)。这些试验均获得了很佳的减压效果、将 P_3 最大值98.0(千帕)(无减压板)减低到4(千帕), 基本上消除了 P_3 。

5. 使用不同的泄压口封盖物时的爆炸减压板的减压效果 共试验了两种泄压口封盖物质——塑料薄膜和3毫米平板玻璃。表1中的试验2和试验4分别为1米³试验容器和30米³试验容器使用塑料薄膜封盖泄压口情况, 表1中的试验5, 表2、表3中的全部试验均为3毫米平板玻璃封盖泄压口情况。试验结果表明, 两种情况下爆炸减压板的减压效果均很好。

6. 建筑物内有陈设物情况下爆炸减压板的减压效果 一般情况下, 建筑物内是有设备和陈设的。为了考核这种实际情况下, 爆炸减压板的减压效果, 做了一次模拟试验。在

30米 试验装置内放置一个旧扳羊架、一个油桶、木板。以阻碍气油向外流动的方式置放。用4.6%的液化石油气-空气混气，几何中心点火。容器内的左、右、顶、后四壁面上敷设减压板，进行了一次爆炸试验($A/V^{2/3} = 0.326$ ，3毫米平板玻璃封盖泄压口)。结果，爆炸最高压力小于7(千帕)。

7. 室内通风(有初始紊流度)时爆炸减压板的减压效果 室内通风，则会增加初始紊流度，增加爆炸的烈度。为考核爆炸减压板在这种情况下的减压效果，在30米³试验装置底面上装两台30厘米排气扇。扇叶朝上，分别对着顶部两个可燃气口吹，从开始充气一直吹到充气结束。排气扇停转半分钟之内点火。试验数据列于表1(试验5)，P-t曲线见图2的试验5。P₃已减小到4(千帕)。也即有初始紊流度的情况下，爆炸减压板仍有很佳的减压效果。

值得指出的是，爆炸后仍有一块半玻璃未碎。这说明在这一块玻璃未破碎之前，爆炸压力已减小到足够低的程度，不足以使它破坏。由此推论，墙体更是安全的。

8. 减压板装设面积对减压效果的影响 上述试验均采用左、右、顶(或底)、后四个内表面敷设爆炸减压板的方式。这是试验确定的最有效的方式。如果左、右两平行面中有一个平面不装爆炸减压板，减压效果差一些，但P₃仍可减低到11(千帕)之内。

五、结 束 语

综上所述，概括如下：

1. 减弱或消除P₃的方法的研究是当今世界上爆炸泄压研究的方向之一。
2. 经各种工况下的考核试验证实，本研究研制的“爆炸减压板”和将它附于建筑物内壁减弱建筑物内发生的甲烷气、天然气、丙烷气和液化石油气的爆炸压力的方法是有效的，能够将P₃由最大值98(千帕)减低到8(千帕)之内。
3. 爆炸减压板最适于应用在以下情况：
 - ①具有甲烷气、天然气和液化石油气爆炸危险的建筑物，爆炸会引起较多人员伤亡的情况。
 - ②建筑物本身强度低，一旦爆炸会引起砖石满天飞的情况。
 - ③室内有可燃物管道、容器，强烈的爆炸会引起可燃物进一步泄漏，造成二次爆炸的情况。
4. 本研究的成功，对于液化石油气一类的可燃气体来说，克服了爆炸泄压“不能提供足够的泄压面积来防止建筑物中最佳混合物的爆炸带来的严重损失”的缺点，使爆炸泄压防护技术升到一个新的水平，也即，当泄压面积符合“建筑设计防火规范”的规定时，内建筑物装置了爆炸减压板，将保证任何可燃气体浓度下发生的爆炸都不会造成建筑物主结构的损坏。

参 考 文 献

- [1] NFPA68, "The Guide for Explosion Venting", National Fire Protection Association.1984.
- [2] TJB—74(试行)“建筑设计防火规范”，公安部。
- [3] C. J. M. Vanwingerden, J. P. Zeeuwen. "on the Role of Acoustically Driven Flame Instabilities in Vented Gas Explosions and Their Elimination", Combustion and Flame, 51, (1983), PP.109—111.
- [4] 王宝兴等：“1立方米爆炸泄压试验和它的实用价值”，力学与实践，9，5，(1987)。
- [5] 王宝兴等：“建筑物爆炸泄压泄放比的研究”，中国消防协会建筑防火专业委员会第二次学术报告会宣读论文。

1986.9。

[6] 王宝兴, “声动不稳定燃烧压力峰 P_3 的产生机理和实验验证”, 中国工程热物理学会, 燃烧学学术会议宣读论文, 1986.9。

[7] C. Yao, «Fuel—Air explosions», University of Waterloo Press, 1982, PP.987~989。

[8] ISO 6184/2, “Explosion Protection Systems—Part2; Determination of Explosion Indices of Combustible Gases in Air”, International Organization for Standardization, 1985.11.15。

ON THE ELIMINATION MEASUREMENTS OF PRESSURE PEAK DRIVEN BY ACOUSTICALLY INSTABLE COMBUSTION IN VENTED GAS EXPLOSIONS

Wang Baoxing Li Zhenyan

(Tianjin Fire Research Institute)

Abstract

This paper demonstrate the pressure reducing effect of “Explosion pressure-reducing board” and its contrast tests. It has been proved by tests that “Explosion pressure-reducing board” is very important explosion protection measurement for building.

关于控制氧化氮生成诸影响因素 某些试验结果的分析研究

田正渠

(长江动力公司锅炉设计研究所)

一、概 述

净化燃烧是当今社会中和能源短缺问题一样的一个日益突出的重大课题，在热能工程领域，降低毒性的 NO_x 排放量，越来越为人们所关切。研究指出：往炉膛燃烧区中喷入一定量的湿份——水蒸汽，是有效抑制 NO_x 生成的简便方法。

试考虑在锅炉炉膛内运行条件下，于各种复杂的多方面的影响因素作用下，炉内生成的 NO_x 量为一随机变量，它是喷湿量的函数，利用随机变量取值必遵一定概率的概念，可以理解 NO_x 生成物的数量率必对应于其发生的概率值。

试验得到：随着喷入炉内的湿量增加， NO_x 生成量减少。但是影响喷湿量效果的因素，如炉中的温度水平、炉膛空气过剩量情况、炉膛的运行方式(负压或正压运行)、燃用燃料的含氮量等，都对最终生成的 NO_x 量有不同程度的影响。怎样据已得的试验结果，定量地求出其间的变化规律，是本文研究的基本内容。知道了这些规律后，便可以有效地应用它实现公众要求的净化燃烧了。

二、温度的影响

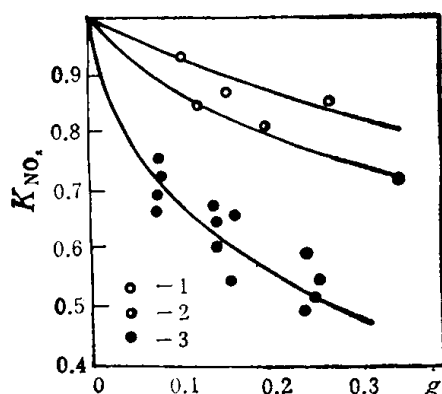


图 1 当喷湿份入炉时，在不同火焰温度下所生成的 NO_x 相对浓度 K_{NO_x} 随湿燃比 g 的变化

1— $T_{\text{max}} = 1507(^{\circ}\text{C})$; $C_{\text{NO}_x}^{\text{g}=\text{0}} = 178(\text{mg}/\text{m}^3)$;

2— $T_{\text{max}} = 1627(^{\circ}\text{C})$; $C_{\text{NO}_x}^{\text{g}=\text{0}} = 293(\text{mg}/\text{m}^3)$;

3— $T_{\text{max}} = 1797(^{\circ}\text{C})$; $C_{\text{NO}_x}^{\text{g}=\text{0}} = 1240(\text{mg}/\text{m}^3)$

试验求得^[1]：炉膛中所生成的相对的 NO_x

浓度 $\left(K_{\text{NO}_x} = \frac{C_{\text{NO}_x} \text{mg}/\text{m}^3}{C_{\text{NO}_x}^{\text{g}=\text{0}} \text{mg}/\text{m}^3} \right)$ 随着湿燃比

$\left(g = \frac{\text{湿份重量, kg}}{\text{燃料重量, kg}} \right)$ 的变化情况示图 1，其

数据见表 1。

按前述，在考虑所生成 NO_x 相对浓度 K_{NO_x} 数量率为生成氧化氮累计概率值时，它与湿燃比 g 之间的关系，若遵从威布尔分布时，则在威布尔概率纸上必形成一条直线。因此，取表 1 中的试验所得数据在威布尔概率纸上描点作图，分别对应于不同的温度水平，可以得到图 2 中示出的 1、2、3 共三条直线。由此亦

表 1 不同温度水平下所生成NO_x相对浓度K_{NO_x}依随湿燃比g变化的试验值与理论值

1. T ₁ ^{max} = 1507°C				2. T ₂ ^{max} = 1627°C				3. T ₃ ^{max} = 1797°C			
g	lng	试验值	计算值	g	lng	试验值	计算值	g	lng	试验值	计算值
0.1	-2.3	0.935	0.923	0.12	-2.12	0.85	0.854	0.01	-4.61	—	0.898
0.155	-1.86	0.87	0.89	0.199	-1.61	0.805	0.795	0.08	-2.53	0.725	0.714
0.26	-1.35	0.85	0.835	0.349	-1.05	0.71	0.706	0.14	-1.97	0.64	0.63
0.01		—	0.988	0.01		—	0.975	0.255	-1.37	0.52	0.527
0.05		—	0.950	0.05		—	0.92	0.05		—	0.771
0.08		—	0.935	0.08		—	0.889	0.1		—	0.683
0.2		—	0.866	0.25		—	0.762	0.2		—	0.571
0.3		—	0.816	0.4		—	0.680	0.3		—	0.496
0.4		—	0.773	0.5		—	0.635	0.4		—	0.439
0.5		—	0.733	0.6		—	0.594	0.5		—	0.394
0.6		—	0.696	0.7		—	0.558	0.6		—	0.357
0.7		—	0.662					0.7		—	0.326

注：表中试验值系试验点所示的平均值

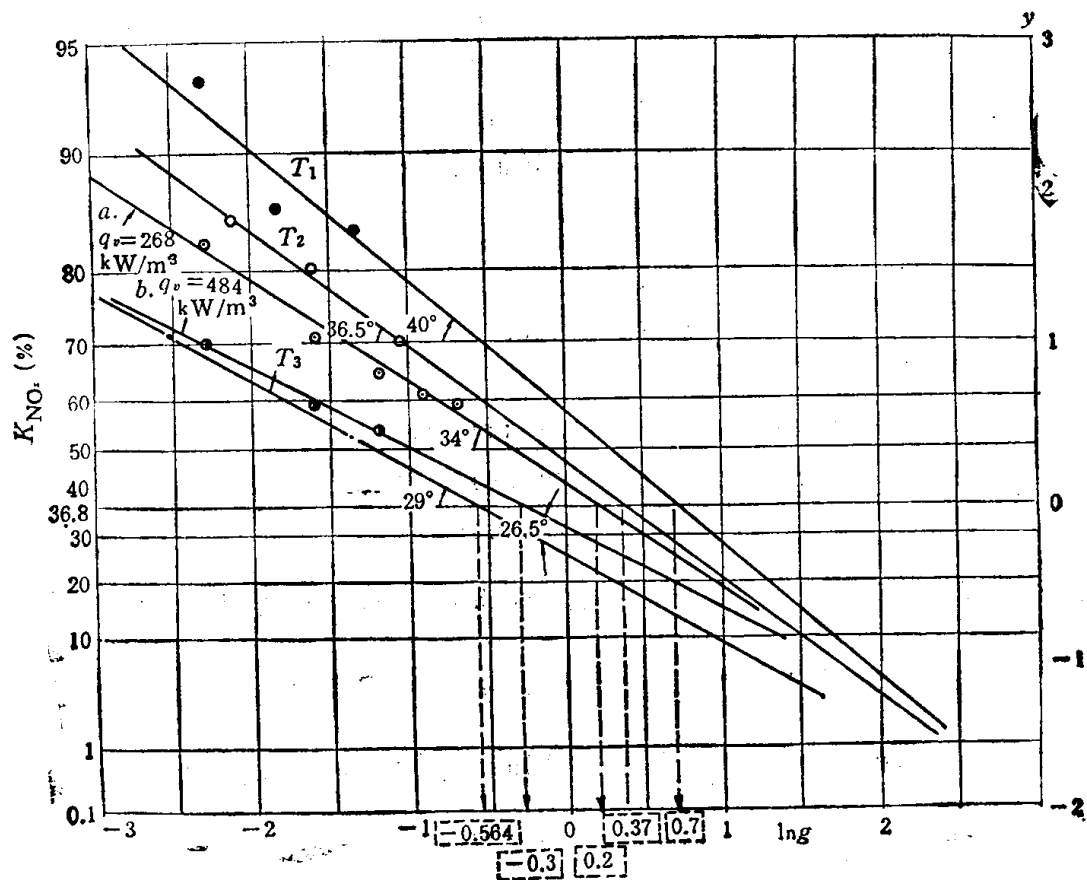


图 2 威布尔概率坐标纸上描点作图的 K_{NO_x}-lng 分布线图

即表明原考虑 K_{NO_x}-lng 间的关系，确实是服从威布尔分布的。

按威布尔分布函数用简便的图解法求其参数的法则，可以对上述三种温度水平求出理论表达式：

$$\left. \begin{aligned}
 T_1: K_{NO_x}^{T_1} &= \exp\left[-\left(\frac{g}{2.01}\right)^{0.839}\right] \\
 T_2: K_{NO_x}^{T_2} &= \exp\left[-\left(\frac{g}{1.45}\right)^{0.74}\right] \\
 T_3: K_{NO_x}^{T_3} &= \exp\left[-\left(\frac{g}{0.569}\right)^{0.554}\right]
 \end{aligned} \right\} (1)$$

按这三个表达式对不同温度水平在不同 g 值下计算出的 K_{NO_x} 值列入表 1 内(见表 1 中计算值栏)。

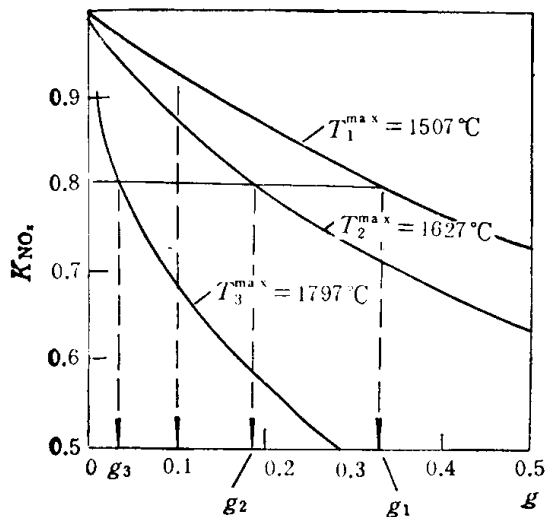


图 3 不同温度下的 K_{NO_x} - g 曲线(理论值)

从表中所列试验值与计算值两者对比, 看出它们是相吻合的。由表中不难算得其间的相对误差最大值在 2% 以下, 而由文献 [1] 试验数据本身的测定误差在 $\pm 5\%$ 水平上。由此可见: 计算值是能够反映实验所得数据情况的。

按(1)式再求出不同 g 值下的 K_{NO_x} 值, 亦列于表 1 中, 据(1)式画出的计算曲线如图 3 所示。

由图 3 可见: 在同一湿燃比 g 值之下, 如 $g = 0.1$, 喷湿量对 NO_x 生成在较高温度水平之下的影响作用大; 而在生成同一相对浓度 K_{NO_x} 之下, 也可看出这种影响作用的趋势, 即在较高温度水平下喷入的湿份量, 远远小于较低温度下的喷湿量, 图 3 中为 $g_3 \ll g_2 \ll g_1$ 。

再根据数理统计学的原理与方法, 表征 $T_1^{max} = 1507(^{\circ}C)$ 温度水平下全过程的威布尔变量 g 的数学期望值为:

$$\bar{g} = g_0 \Gamma(1 + 1/m)$$

对前述三种情况可求得

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{g}_1 &= 2.01 \Gamma(1 + 1/0.839) = 2.205 \\
 \bar{g}_2 &= 1.45 \Gamma(1 + 1/0.74) = 1.745 \\
 \bar{g}_3 &= 0.569 \Gamma(1 + 1/0.554) = 0.958
 \end{aligned} \right\}$$

再求出对应于 \bar{g} 值之下的 K_{NO_x} 值, 即将 $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3$ 值代入(1)式。分别求得

$$K_{NO_x}^{T_1} = 0.339, K_{NO_x}^{T_2} = 0.317, K_{NO_x}^{T_3} = 0.263$$

由 $K_{NO_x} = C_{NO_x} / C_{NO_x}^{(g=0)}$, 今已知 $C_{NO_x}^{(g=0)1} = 178(\text{mg}/\text{m}^3)$,

$$C_{NO_x}^{(g=0)2} = 293(\text{mg}/\text{m}^3), C_{NO_x}^{(g=0)3} = 1240(\text{mg}/\text{m}^3),$$

故分别可以求得表征三种温度水平下的 NO_x 生成浓度

$$C_{NO_x}^{T_1} = 0.339 \times 178 = 60.3 (\text{mg}/\text{m}^3) (T_1^{max} = 1507^{\circ}C)$$

$$C_{NO_x}^{T_2} = 0.317 \times 293 = 92.8 (\text{mg}/\text{m}^3) (T_2^{max} = 1627^{\circ}C)$$

$$C_{NO_x}^{T^*} = 0.263 \times 1240 = 326.1 \text{ (mg/m}^3\text{)} \text{ (} T^* = 1797^\circ\text{C)}$$

这表明了随着炉内温度水平的提高所生成的NO_x浓度是迅速增高的，这个结论为世界各国研究者所公认，上述结果可绘成图4曲线形状。

由图看出：在相对较低温度下 $T^{\max} \leq 1627$ ($^\circ\text{C}$)，平均的 C_{NO_x} 浓度随温度升高的幅度为 $\Delta C_{NO_x} / \Delta T = (92.8 - 60.3) / (1627 - 1507) = 0.27 \text{ (mg/m}^3\text{)}$ ，

但在 $T^{\max} \leq 1797$ ($^\circ\text{C}$) 时，这一幅度为 $(326.1 - 92.8) / (1797 - 1627) = 1.37 \text{ (mg/m}^3\text{)}$ 。这即是在相对较高温水平之下， C_{NO_x} 浓度随着温度水平提高的幅度比低温水平下约增大了五倍以上 ($5.07 \times 0.27 \text{ mg/m}^3 = 1.37 \text{ mg/m}^3$)。从上述定量分析计算得出，温度水平影响氧化氮生成十分显著，并且尤其是当温度达到一定水平 ($\sim 1800^\circ\text{C}$) 以后， C_{NO_x} 成倍地增长，而这在相对较低温度水平下却绝非这样。

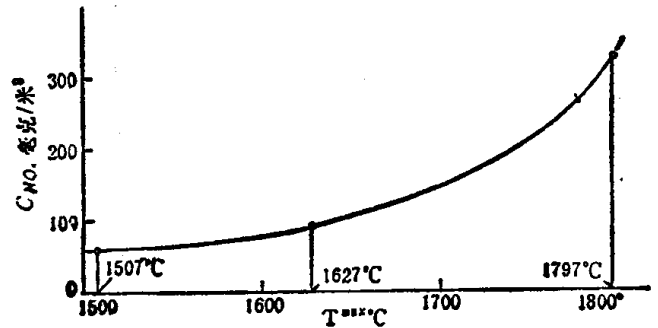


图4 氧化氮浓度 C_{NO_x} 随炉膛中最高温度水平 T^{\max} 变化情况

以上通过实例运用数理统计概率分析方法，表明了可以获得影响氧化氮生成的因素的理论表达式。进而说明原考虑NO_x为随机变量取值概念是正确的。

关于炉内空气过剩量的影响，炉膛正压运行方式或负压运行方式的影响，燃料中不同含氮量的影响等，均可以通过试验所得数据，定量求出其相应的理论表达式，随之导出一些有实用价值的结果。本文限于篇幅将这三者对于NO_x生成的影响及其有关规律等全予略去。

三、结 论

通过本文运用数理统计学方法处理有关氧化氮在锅炉炉膛中生成的诸影响因素研究分析表明，这种方法的应用是能获得与试验数据吻合一致的结果的；炉膛中生成NO_x的相对浓度与喷湿量 g 之间的定量连系遵从威布尔分布，具有 $K_{NO_x} = \exp[-(g/g_0)^m]$ 形式。用它来描述不同影响因素下的定量关系，看来与文献[1]中给出的数学表达式 $K_{NO_x} = 1 - ag^b$ (a 和 b 为与温度有关的系数) 有相似的形式；通过运用数理统计分析方法，能进一步找出与影响氧化氮浓度的因素之间的直接关系，如 $C_{NO_x} = f(T)$ ， $C_{NO_x} = f(N_T)$ 等，这是运用其它非直接方法难于觅获的。

参 考 文 献

- [1] Лукошявичюс В. П. и Др. : "О Факторах, Влияющих на Эффективность Подавления Образования Окислов Азота Вводом Влага в Зону Горения", Теплоэнергетика, 7, (1986), pp.9~12.
- [2] 田正渠: "论燃料质点磨细之质量评定及其应用", 四川省自贡市动力工程学会年会宣读论文资料, (1986,11).

EXPERIMENTAL RESULT ANALYSIS ON VARIOUS FACTORS CONTROLLING THE FORMING OF NO_x

Tian zhengqu

(Institute of Boiler Design and Research Chang Jiang Energy Corporation)

Abstract

This paper, based on the principles and methods of mathematical statistics, discusses the experimental results on various factors affecting the forming of NO_x. It is shown that the Weibull distribution of mathematical statistics can well describe the relationship between numbers of formed NO_x's and wet sprayed into boiler in various conditions to restrain the forming of NO_x's. The calculated results agree with experimental data satisfactorily.

低浓度甲烷气体催化燃烧试验研究

王华芳 刘高恩 李 黎

(北京航空学院热动力研究所)

一、前 言

在煤矿开采过程中释放大量的瓦斯气(以甲烷为主的空气混合气),为了安全和身体健康,需要不断地向矿井内鼓风,使甲烷容积浓度少于1%然后排出矿井,这部分排出气体甲烷浓度低于甲烷—空气混合火焰传播的浓度下限5%,因而不能进行常规的火焰燃烧。本文研究采用催化方式进行燃烧以获得这部分能量。烷烃在碳氢化合物中是比较难催化的而甲烷又是烷烃中最难氧化的一种成份。本文研究了催化剂种类及其催化特性,催化反应起始温度、催化转化率与进口速度、温度、燃料浓度及催化剂的长度等关系,这对论证在燃气轮机上能否利用这部分能量提供了参考数据。

二、试验设备

图1为实验装置简图,空气由气源经过涡轮流量计1,再由电加热器将进口空气加温,功率为10千瓦,试段直径为112mm,包括前测量段4,催化燃烧段5和后测量段6,燃料气由气瓶供给由减压器和浮子流量计控制流量,由燃料喷嘴3喷入,燃料喷嘴采用侧向喷射,二侧交错各开直径为1mm的8个孔的直射式喷嘴。前测量段测取空气进口温度 T_1 、总压 P_1 和静压 p_1 ,并有取样感头分析进气的甲烷容积浓度,后测量段测取燃烧室出口温度 T_2 、总压 P_2 及燃气分析催化燃烧后的燃气中甲烷的容积浓度。温度感头前后各取三点在径向按等环面分布,热电

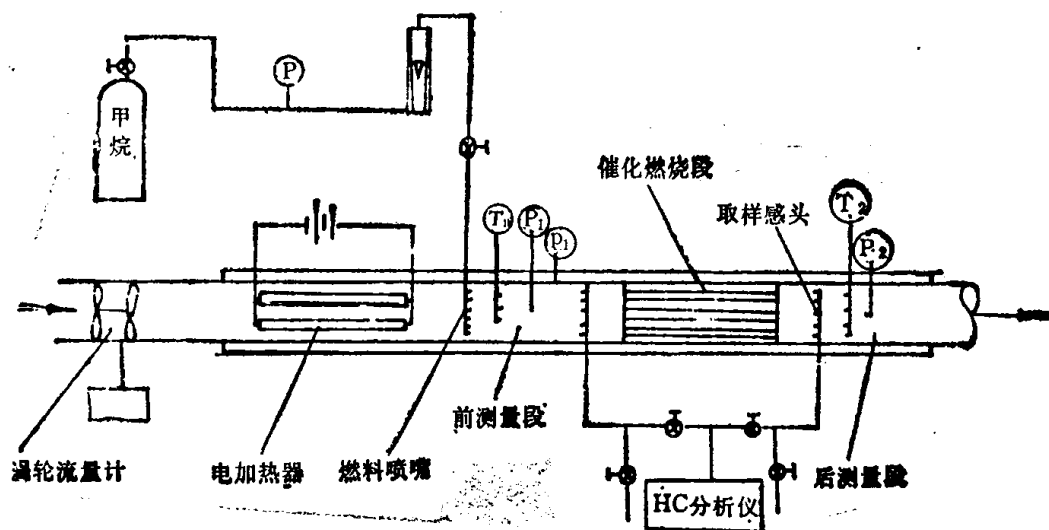


图1 试验设备