

中国工程热物理学会

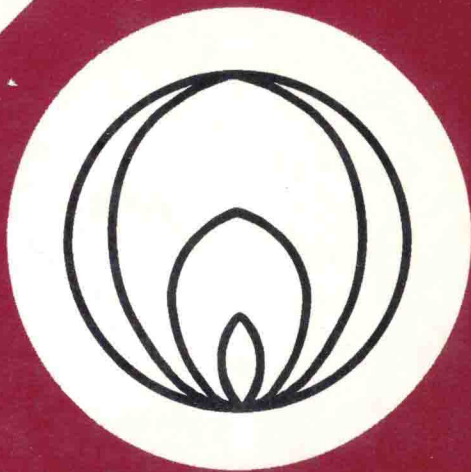
燃烧学学术会议

论文集

二〇〇四

大连

中国工程热物理学会编



燃烧学学术会议论文目录

一. 燃料及可燃物的燃烧特性

- 044003 着火油罐燃烧特性的理论分析.....杨君涛 魏 东 张学魁 赵大年(1)
- 044010 $H_2-O_2(N_2)$ 混气着火过程非线性特性研究.....李卓毅 张会强(7)
- 044018 木质装饰板材贫氧条件下燃烧和热解特性研究.....
.....李爱民 孙兰军 王 雷 李润东(13)
- 044022 基于简单碰撞理论煤粉燃烧动力学模型的研究—PART I: 理论建模与热重实验
.....傅培舫 方庆艳 肖二霞 周怀春(21)
- 044023 基于简单碰撞理论煤粉燃烧动力学模型的研究—PART II: 颗粒表面的浓度
分布模型.....傅培舫 方庆艳 肖二霞 周怀春(32)
- 044024 基于简单碰撞理论煤粉燃烧动力学模型的研究—PART III: 有效比表面积...
.....傅培舫 方庆艳 肖二霞 周怀春(39)
- 044035 天然气催化膜燃烧实验研究.....许 考 刘中良 马重芳(44)
- 044063 激波与火焰作用的实验与理论研究.....叶经方 贾正望 董 刚 范宝春(48)
- 044072 实验装置结构及方案设计对烟气组分 CO_2 和 CO 释放的影响.....
.....张 慧 祁海鹰 吕子安 徐旭常(55)
- 044090 乙烷对冲扩散火焰中 PAH 的生成.....钟北京 候凌云(61)
- 044091 二甲醚和乙醇燃烧特性的比较.....张 波 傅维镛(67)
- 044096 渐变型多孔介质中燃气燃烧特性试验研究.....
.....王恩宇 程乐鸣 褚金华 施正展 骆仲泐 岑可法(72)
- 044111 二甲醚 HCCI 燃烧高温反应动力学分析.....
.....罗马吉 黄 震 彭小圣 乔信起(79)
- 044113 生物质焦的孔隙结构.....张 军 林晓芬 印佳敏 范志林 徐益谦(86)
- 044128 燃气轮机燃用重油处理系统设计研究.....张文普(91)
- 044133 多相气体对流反应扩散方程的解析解.....徐曾和 李明春 田彦文(96)

二. 煤的燃烧技术

- 044014 基于分子运动对流换热和热辐射下煤粉颗粒群粒子的加热分析.....
.....刘国军 孙丹萍 周怀春(102)
- 044017 煤燃烧可吸入颗粒物的形成分析.....吕建燚 李定凯(107)
- 044033 燃煤超细颗粒团聚机理的研究.....魏 凤 张军营 郑楚光 陈 俊(114)
- 044037 煤粉燃烧 NO_x 释放特性的数值模拟与试验研究.....
.....金 晶 张忠孝 樊俊杰 钟海卿 陈占军 李瑞阳(121)
- 044048 煤中环境敏感性痕量元素的燃烧迁移行为研究.....
.....宋党育 秦 勇 张军营 王文峰 郑楚光(128)
- 044054 煤燃烧中硒与含氧气体的反应机理研究.....王 臣 徐明厚 刘 晶(134)

044055	孔隙结构变化对煤粒破碎的影响研究	李 庚 徐明厚 于敦喜 黄建辉	(140)
044056	煤燃烧过程中一次破碎的影响因素分析	黄建辉 徐明厚 于敦喜 李 庚	(147)
044057	煤焦破碎成灰模型研究	于敦喜 徐明厚 黄建辉 李 庚 刘小伟 俞 云	(156)
044065	300 MW 煤粉锅炉砷排放特征的实验研究	郭 欣 郑楚光	(162)

三. 燃烧过程数值计算

044002	着火油罐燃烧过程预测的整体模型	魏 东 薛 岗 田 亮 杨君涛	(168)
044008	矩形射流流动和燃烧过程中的流向涡特性研究	蒋 平 郭印诚 张会强 王希麟 林文漪	(174)
044009	火灾中碳黑生成及其对温度预报的影响	曹连雨 郭印诚	(183)
044012	入口扰动对圆湍射流流动的拟序结构预报的影响	容 易 张会强 王希麟	(189)
044015	旋流和无旋突扩流动的 LES-RANS 模拟	胡珏元 周力行 张 健	(194)
044020	湍流扩散燃烧的数值研究—PDF 方法和火焰面模型的性能比较	王海峰 陈义良 刘明候	(200)
044021	堆积床内甲烷/空气预混燃烧的理论分析	张根烜 陈义良 刘明候 林博颖 赵平辉	(208)
044026	燃烧反应放热的辐射传递过程对能量平衡影响的模拟研究	艾育华 周怀春	(216)
044038	HCCI 发动机燃烧边界条件的数值分析	黄豪中 苏万华	(222)
044044	对具有平均标量梯度的被动标量场的直接模拟	刘亚明 柳朝晖 贺 铸 郑楚光	(227)
044050	喷动床内颗粒浓度数值模拟和实验研究	李水清 姚 强 赵香龙 郑义忠	(233)
044053	考虑辐射传热的自适应化学理论数值计算	乔 瑜 徐明厚 Pisi Lu Viriato Semi o William H. Green	(240)
044058	甲烷再燃烧对突扩燃烧器中煤粉燃烧和 NO 生成影响的数值研究	张 宇 魏小林 周力行 盛宏至	(247)
044060	基于小脑神经网络的垃圾热值预测模型研究	沈 凯 陆继东 李正华 刘 刚	(254)
044064	多孔介质预混燃烧中辐射属性影响的敏感性分析	杜礼明 解茂昭	(261)
044071	空气加湿对甲烷-空气射流扩散火焰中 NO _x 生成的影响	张哲巛 王 岳 聂超群 肖云汉	(271)
044073	一种旋流燃烧器燃烧性能的数值研究	周 涌 由长福 李金平 祁海鹰 岳光溪	(279)
044077	考虑温度脉动对焦炭异相反应影响的 AUSM 模型	张 宇 魏小林 周力行 盛宏至	(285)

044083	凹腔驻涡模型燃烧室内涡的演化发展·····	甘志文 樊未军 杨茂林(291)
044088	小火焰模型在湍流扩散火焰中的研究·····	候凌云 钟北京(297)
044089	甲烷在逆流换热微燃烧器内催化燃烧的数值模拟·····	钟北京 伍 亨(303)
044093	甲烷在微元管中催化燃烧的数值模拟·····	曾 文 解茂昭(309)
044099	贴体坐标系下模型加力室的大涡模拟·····	颜应文 赵坚行(316)
044100	环形燃烧室两相燃烧流场的数值模拟·····	郭尚群 赵坚行(322)
044101	HCCI 发动机多维 CFD 与详细化学动力学耦合模型研究中的几个关键问题 ·····	贾 明 解茂昭(328)
044102	气相温度脉动对煤粉颗粒挥发分释放的影响·····	尚 庆 张 健 周力行(335)
044103	炉排炉垃圾焚烧过程数值模拟·····	张凤坡 淮秀兰 姜任秋 董兆一(342)
044104	二甲醚均质充量压缩燃烧的数值模拟与试验研究····· ·····	钟 赟 乔信起 黄 震 罗马吉(347)
044114	高温空气燃烧技术燃气射流速度对 NO _x 生成的影响····· ·····	朱 彤 吴家正 冯 良 张鹤声(354)
044120	甲烷-空气旋流扩散燃烧的 LES-RANS 模拟·····	胡珅元 周力行 张 健(360)
044124	铬在氢气/空气火焰中燃烧的热力学参数计算和热力学平衡分析····· ·····	吕雪峰 于溯源(366)
044125	燃烧室流场的并行计算与大涡模拟·····	刘 勇 蔡文祥 颜应文 赵坚行(370)
044126	先进燃烧室火焰筒及其涡流器流场计算·····	蔡文祥 赵坚行(377)

四. 燃烧污染控制

044019	分解炉中煤焦还原 NO 的实验研究····· ·····	王世杰 陆继东 郑 瑛 胡芝娟 黄 来 张振顶 李正华(383)
044025	锅炉 NO _x 排放特性及燃烧三维温度场试验研究····· ·····	王浙芬 罗自学 周怀春(389)
044027	煤燃烧过程中铜对多环芳烃生成的影响····· ·····	倪明江 尤孝方 严建华 李晓东 曹志勇 岑可法(394)
044028	热重-红外联用分析塑料垃圾热动力学特性对多环芳烃生成的影响····· ·····	尹雪峰 李晓东 尤孝方 古月玲 严建华 倪明江 岑可法(402)
044029	煤燃烧过程中痕量元素 As, Se, Sb 形态转化的热力学研究····· ·····	孟 韵 张军营 钟 秦 魏 凤 赵永椿(408)
044030	PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放的一维炉煤燃烧实验研究····· ·····	张军营 魏 凤 王春梅 张 娟 赵永椿 郑楚光(420)
044031	煤中噻吩有机硫热解机理的量子化学研究····· ·····	黄 充 张军营 陈 俊 郑楚光(426)
044040	垃圾和煤混烧二噁英排放抑制试验研究····· ·····	陆胜勇 严建华 李晓东 岑可法(430)

044041 垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的低温热处理试验研究·····	严建华 陈 彤 李晓东 黄 蕾 岑可法(436)
044042 气液两相流滑动弧放电降解苯酚废水·····	杜长明 严建华 李晓东 薄 拯 孙晓丹(441)
044045 四气门汽油机分层 EGR 的试验研究·····	姚春德 刘增勇 卢艳彬 李云强 吉 庆 段 峰(447)
044046 磁流化床烟气脱硫反应模型·····	张 琦 马宇洁 归柯庭(455)
044049 可压缩性颗粒层过滤实验研究·····	黄 斌 徐海卫 姚 强(462)
044059 卤素对于燃烧中 CO 氧化和 NO 生成的影响·····	张静伟 魏小林 盛宏至 张 宇(467)
044067 活性炭纤维吸附 NO 和 SO ₂ 的实验研究·····	许绿丝 岑泽文 曾汉才 朱全利(475)
044075 燃烧温度对工业锅炉型煤硫排放的影响·····	邓加耀 王希麟 孙小岩 安钟峰 张会强(480)
044078 等离子体一吸附 SO ₂ 转化机理研究·····	叶 丹 张 欣 高 伟 顾 璠(486)
044086 模拟危险废物颗粒回转窑内运动特性试验研究·····	刘 刚 池 涌 蒋旭光 朱 江 田文斌 严建华(490)
044097 等离子体辅助同时催化去除柴油机 NO _x 和碳烟的试验研究·····	裴梅香 林 赫 上官文峰 黄 震(499)
044098 旋风除尘器高温净化垃圾焚烧烟气的实验研究·····	梅红生 陈德珍 林 瑜 茅清希(505)
044105 富氧预混燃烧的低污染特性研究·····	刘 巍 李宇红 祁海鹰(512)
044106 干低 NO _x 燃烧室的结构演化和发展规律·····	祁海鹰 李宇红(520)
044107 进气中 CO ₂ 浓度对预混合燃烧和排放影响的试验和模拟研究·····	方俊华 黄 震 乔信起(531)
044112 生物质焦脱硫性能实验研究·····	张 军 林晓芬 印佳敏 范志林 徐益谦(538)
044115 一次风旋流数对燃烧室内湍流燃烧与 NO _x 生成的影响·····	普 勇 张 健 周力行(543)
044118 高压沿面放电烟气脱硫技术热态实验研究·····	任启森 安钟峰 王希麟(548)
044119 预处理对垃圾焚烧飞灰玻璃化的影响·····	陈德珍 贾其亮 袁 园 张鹤声(554)
044129 氮氧化物在湿法脱硫过程中作用的实验研究·····	王 琿 宋 蕾 杨小勇(561)
044130 柴油机排放颗粒物氧化过程的动力学分析·····	徐 松 宋 蕾 何百磊(567)
044132 城市垃圾与煤混烧的灰渣中重金属的特性分析·····	娇维红 那永洁 郑明辉 吕清刚(573)

五. 液雾及气体燃料燃烧

044001 船用锅炉增压燃烧与传热计算方法研究·····	明平剑 姜任秋 李彦军 孙宝芝(580)
-------------------------------	----------------------

044005 旋转燃烧室中喷嘴对 HAP 三组元燃料振荡燃烧的抑制作用研究·····	·····党建军 罗 凯 张宇文(585)
044016 障碍物扰动对预混气点火的影响·····	·····尤 寒 余立新 孙文超 盛宏至(590)
044032 喷雾促进超细颗粒物团聚的模型研究·····	·····陈 俊 张军营 魏 凤 黄 充 郑楚光(595)
044034 柴油燃料 HCCI 燃烧特性的试验研究·····	·····石 磊 邓康耀 崔 毅(601)
044039 Bump 环强化混合过程的数值模拟·····	·····张晓宇 苏万华 裴毅强 赵昌普 林铁坚 赵 华(607)
044051 离心式及其气动辅助雾化喷嘴试验研究·····	·····苏中高 甘晓华 王宏明 夏春有(613)
044061 基于灰度判别和图像处理的粒子图像速度粒度实时同场测量新技术·····	·····吴志军 张 伟(623)
044066 废气再循环及添加剂控制高辛烷值燃料均质压燃(HCCI)的研究·····	·····吕兴才 陈 伟 占丽斌 黄 震(629)
044070 柴油、乙醇和水三组元乳化液流变特性的研究·····	·····盛宏至 吴东垠 魏小林 张宏策(636)
044079 全尺寸燃烧室空气加湿燃烧特性的实验研究·····	·····房爱兵 王 岳 徐 纲 肖云汉(641)
044084 柴油机燃用掺水燃料的节油机理的定量分析·····	·····候凌云 傅维镛 王利坡 马凡华(648)
044087 氢气对柴油机燃烧乳化油特性影响的计算研究·····	·····卢小丰 候凌云 傅维镛(655)
044092 一种新型喷嘴的提出及其流量特性的研究·····	·····龚景松 傅维镛(659)
044095 旋转气流对射流分裂与雾化的影响·····	·····严春吉 殷佩海 解茂昭(665)
044116 燃气轮机合成气燃烧室改造技术—燃烧室设计·····	·····崔玉峰 徐 纲 聂超群 黄伟光(671)
044117 燃气轮机合成气燃烧室改造技术—试验研究·····	·····徐 纲 俞 镔 雷 宇 宋权斌 房爱兵 聂超群 黄伟光(678)
044131 油雾振荡燃烧的计算和诊断·····	·····朱 民 A. P. Dowling K. N. C. Bray(686)
044135 燃气轮机合成气燃烧室动态特性的实验研究·····	·····雷 宇 徐 纲 房爱兵 聂超群 黄伟光(691)
044136 加力用气冷气动雾化喷油杆冷却性能数值模拟·····	·····李瑞明 岳 明 樊未军 杨茂林(697)
044137 再循环废气在缸内运动规律的可视化研究·····	·····姚春德 吉 庆 刘增勇 李云强 卢艳彬(702)

六. 其它燃烧问题及燃烧测试技术

044006 旋风分离器固体颗粒浓度三维电容成像分析·····	·····王海刚 刘 石 姜 凡 杨五强(708)
044007 水蒸汽抑制火焰物理化学作用的模拟研究·····	·····丛北华 廖光煊(713)

044011	大型室内体育场馆火灾烟气充填及排烟措施研究	秦挺鑫 郭印诚 林文漪(720)
044013	W 型火焰锅炉炉内燃烧过程检测实验研究	方庆艳 姚 斌 江瑞宝 周怀春(727)
044043	循环流化床氢氧化铝焙烧系统运行及优化	唐美琼 陆继东 金 刚 李卫杰(732)
044047	四通道燃烧器冷态流场的 PIV 实验测量	黄 来 陆继东 王世杰 胡芝娟 沈序辉 郑金昭(738)
044052	联合时频分析方法研究火焰结构的意义和途径	徐 强 靳 从(743)
044062	基于首次着火循环的低温冷起动特性研究	刘志敏 李理光 邓宝清 张永平 肖宗成 宫长明(747)
044068	基于区域模拟的火灾发展模型	杨立中 郭再富 龚 剑 陈 恒 陈晓军(754)
044069	火灾中烟气向远距离处迁移及其危害性的实验研究	杨立中 冯文兴 方廷勇 杨满江 范维澄(759)
044074	利用主动轮廓算法(ACM)提取火焰前锋	王 岳 唐延东 张哲巅 聂超群 肖云汉(764)
044076	铁基添加剂增强细水雾灭火性能的实验研究	廖光煊 丛北华 况凯骞(771)
044080	含添加剂细水雾与 B 类火相互作用的模拟实验研究	陆 强 廖光煊 黄 鑫(778)
044081	4 MW _{th} CFB 燃烧试验台的试验研究	王智微 李志伟 党黎军 时正海 高洪培 孙献斌 王鹏利(784)
044082	利用 PIV 技术对二维驻涡燃烧室冷态流场的初步研究	严 明 樊未军 朱 菁 杨茂林(790)
044094	影响烟气连续监测系统稀释比例的分析	郑海明 蔡小舒(796)
044108	微型燃气轮机环型燃烧室的初步设计研究	张文普(802)
044109	石灰在带旋风除尘器的烟道内高温净化 HCl 气体的研究	林 瑜 陈德珍 梅红生 魏 芃 张鹤声(808)
044110	CaCO ₃ 用作净化 HCl 气体吸收剂的研究	魏 芃 林 瑜 张旌明 陈德珍 张鹤声(815)
044121	弱浮力环境下导线可燃性研究	孔文俊 劳世奇 张培元 张孝谦(821)
044122	地下组合受限空间火灾分区现象模拟实验研究	杜 扬 周琳莉 杨小凤 钱海兵 周建忠(827)
044123	地下狭长受限空间火灾数值模拟与实验研究	杜 扬 杨小凤 周琳莉(833)
044127	双色法测量火焰温度场的研究	姜 凡 刘 石 李志宏 穆怀萍 王海刚 卢 钢 阎 勇(840)
044134	微尺度扩散火焰特性的数值解析	黄显峰 张春林 赵黛青(847)
044138	微热光电系统原型的设计制造和测试	潘剑锋 杨文明 李德桃 黄 俊(854)

着火油罐燃烧特性的理论分析*

杨君涛¹ 魏东² 张学魁² 赵大林³

1——天津大学热能研究所, 天津, 300072

(电话: 0316-2068561, E-mail: wei_dong@eyou.com)

2——武警学院消防指挥系, 河北廊坊, 065000; 3——公安部天津消防研究所, 天津, 300381;

摘要: 本文利用自行建立的油罐火灾燃烧特性整体模型, 计算得到了燃烧速度、火焰高度, 火焰跳动频率和平均温度等油罐燃烧特性的变化规律, 并深入探讨了油品燃烧速度在油罐直径、风速、环境温度和油位等因素影响下的变化趋势。为了验证理论计算的准确性, 将计算结果与汽油和柴油储罐的燃烧实验数据进行了对比, 获得了较满意的结果。

关键词: 池火、着火油罐、燃烧特性、燃烧速度

1 引言

石油储罐的火灾, 是目前损失大、非常难以扑救的一类火灾。如 2001 年的沈阳大龙洋油库大火, 烧掉汽油罐 8 个, 经济损失近亿元。因此, 研究油罐区火灾发生、发展的内在规律, 揭示油罐火焰传播、热量传递等方面的科学规律, 对于保障国家和人民生命财产安全是十分必要而又非常迫切的。油罐火灾的燃烧特性是在预测火灾发展趋势和评估火灾对周围环境影响的基础和前提, 国内外的学者对其进行了多方面的研究。美国的 Anthony Hamins^[1]在总结前人的实验数据和研究成果上详细的研究了油池燃烧火焰的结构, 包括火焰形状、火焰跳动频率和火焰高度等。西班牙的 Eulalia Planas-Cuchi^[2]在 1989 年也通过对 4m² 面积的乙烷油池和 12m² 面积煤油油池燃烧实验的研究, 拟合了一个火焰温度随时间和火焰高度的关系式。另外日本的 TAKAAKI YAMAGUCHI^[3]和 Hiroshi Koseki^[4]对大规模油罐(直径 80m)的燃烧特性进行了实验研究, 获得了一些基础数据。然而, 由于油罐火灾实验的特殊性, 加之资金、安全、环保等因素的限制, 直接进行大型实验是非常困难的。因此构建数学模型, 利用计算机来计算油罐燃烧中各种特性参数的变化逐渐成为研究油罐火灾的重要手段。

笔者根据油罐火灾的燃烧特点, 从基本的传热规律和燃烧机理出发, 以油品表面热反馈的能量平衡为前提, 并利用化工热力学方法计算了火焰的平均温度, 通过迭代方法, 并结合相关的实验数据和结果, 构建了油罐火灾的整体燃烧模型, 可适用于多种碳氢类燃料, 模型详细情况见文献^[5]。本文在此模型的基础上, 对不同直径的油罐火灾进行了理论计算, 同时为了验证模型的准确性, 还将计算结果与不同直径的汽油罐和柴油罐火灾实验数据进行了对比分析, 得到了油罐火灾中燃烧特性的变化规律, 为消防工程的设计和灭火战术的制定提供了参考与依据。

2 燃烧特性参数随油罐规模的变化趋势

根据油罐火灾燃烧的整体模型, 自行编制了 FORTRAN 计算程序, 并在 VISUAL FORTRAN 6.0 的平台上进行修改和调试, 最终得到计算油罐火灾燃烧特性变化规律的

*国家“十五”攻关项目“城市火灾与重大化学灾害事故应急救援技术研究”(No.2001BA803B02)

程序组 TANKCOM，以下将利用该程序组对不同直径的油罐火灾进行了模拟，并对结果进行了分析和比较，以寻求油罐火灾燃烧特性随油罐规模变化的共性和规律。

2.1 平均燃烧速度

图 2-1 表明油罐直径从 1m 到 30m 范围内平均直线燃烧速度的变化趋势。由图可以看出，随着直径的增加，平均燃烧速度逐渐增大，但增加趋势逐渐平缓。当直径达到 10m 左右后，基本不再增加，该规律与国外理论和实验结果完全一致，即存在最大极限燃烧速度（汽油的极限燃烧速度为 7mm/min，柴油为 3 mm/min）。从计算结果来看，汽油的燃烧速度普遍大于柴油的燃烧速度一倍左右，两种油品随直径的变化趋势基本相同。图中在直径 25m 的时候出现不连贯现象，经分析是由于此时的无量纲火焰高度小于 1，从而造成空气的卷吸特性发生变化造成的。

2.2 无量纲火焰高度

图 2-2 表明了油罐直径从 1m 到 30m 范围内无量纲火焰高度的变化趋势。随着直径的增加，无量纲火焰高度（ H_f 与 D 的比值）在降低，最后趋近于一个常数，对于汽油大约为 1.5 左右，柴油约为 0.9。图中还可看出，汽油的无量纲火焰高度大于柴油的无量纲火焰高度，约高出柴油 40%左右。另外，在小直径条件下（小于 2.5m），无量纲火焰高度存在最大值，柴油表现更加明显。

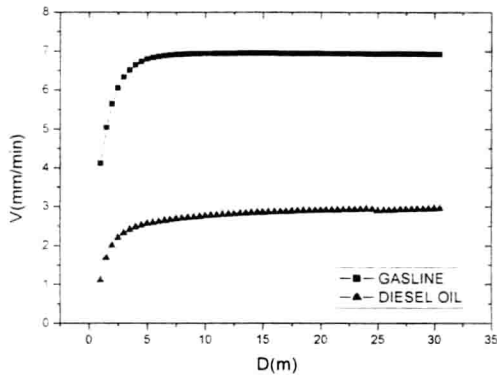


图 2-1 平均直线燃烧速度与罐径的关系

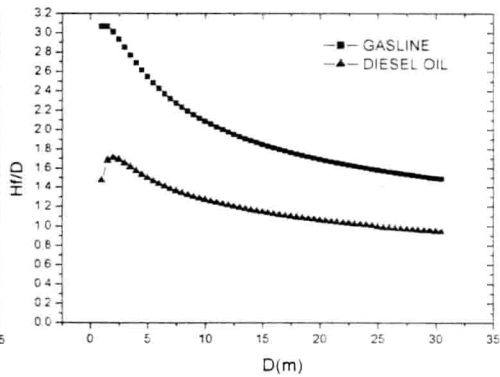


图 2-2 无量纲火焰高度与罐径的关系

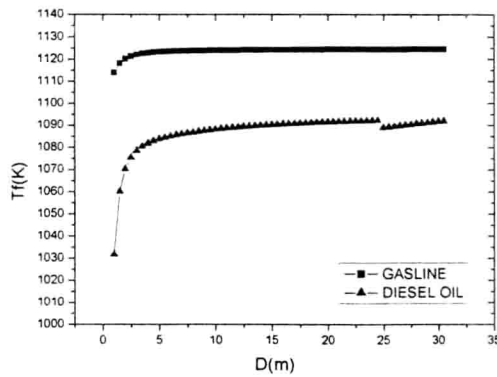


图 2-3 平均火焰温度与罐径的关系

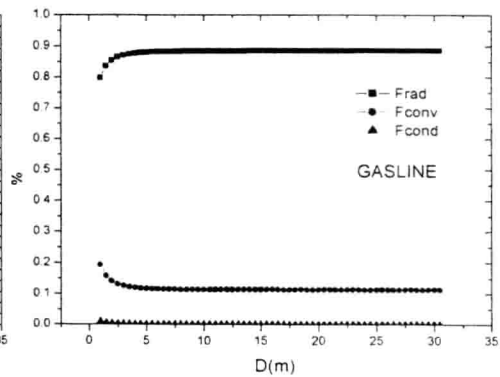


图 2-4 三种传热方式在反馈热量中所占的比例

2.3 火焰的平均温度

图 2-3 表明了火焰平均温度的变化趋势。由于火焰温度的计算采用化工热力学方

法，且考虑为均匀混合的气体混合物，故结果反映的是稳定燃烧状态下的时间和空间上的平均值。从图中可以看出，随着直径的增加，火焰的平均温度也在逐渐升高，这是由于油罐直径增加，卷吸的空气量增加，油品表面的蒸发速度加快，导致燃烧速度增加，即单位时间燃烧释放的热量增加，使得燃烧温度升高。同时，由于火焰温度提高，火焰向油表面的辐射热量增加，进一步加快了油品的燃烧速度，由此形成了一个正反馈循环，当循环达到稳定时，即为计算的火焰温度，该正反馈机理在程序中是通过迭代来实现的。从增加的总体趋势来看，火焰平均温度的增加幅度并不大，油罐直径从 1m 增加到 30m 时，温度只增加了 10℃ 左右。

2.4 三种传热方式在反馈热中所占的比例

在油罐火灾的燃烧过程中，所释放的热量分为三部分：向高空飘散的烟羽流、向环境释放的辐射热量和传递给燃料表面的反馈热量。对油品的燃烧速度有直接影响的就是第二部分——反馈热量。火焰的热量传递给油品表面的方式无外乎有二种：导热、对流和辐射。了解三种传热方式在反馈热量中的比例大小，对于控制燃烧速度、选择灭火方式和途径是十分必要的。图 2-4 表明了汽油罐燃烧时导热、对流和辐射在反馈热量所占的比例，分别为 1%、10%和 90%左右。可见，辐射热量传递占绝对统治地位，是换热的主要方式，对于柴油来说，辐射所占比例更大（95%）左右。另外，随着油罐直径的增加，辐射所占比例也在增加，因此，有些文献将大直径油罐的反馈热量完全用辐射来计算是可行的。应用该计算结果，对于实战来将，在灭油罐火的时候，应注重阻隔火焰对液面的辐射作用，在火焰底部和油层表面之间喷射泡沫或其他物质，使辐射热量不能有效传递给油面，抑制油品蒸发，火焰便会自行熄灭。

2.5 火焰的跳动频率

图 2-5 显示的是火焰跳动频率的变化趋势。从图可以看出，随着油罐直径的不断增大，火焰的跳动频率逐渐降低。这主要是由于油罐直径增大，火焰的直径同时增大。根据燃烧理论，卷吸的空气量是从油罐四周穿过火焰进入火焰中心的，火焰规模的扩大将导致空气的行程增大，使得进入火焰内的空气不足，从而导致火焰燃烧需要一定时间来积聚空气量，这样，跳动频率就降低了。在实验过程中，发现大直径油罐燃烧有时出现火球，就是由于供氧不足造成的。

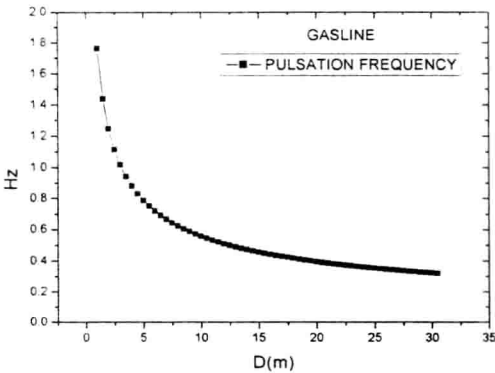


图 2-5 汽油火焰跳动频率的变化规律

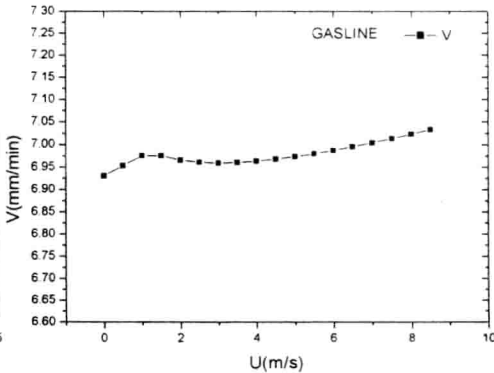


图 3-1 平均直线燃烧速度随风速的变化趋势

3 其他因素对油品燃烧速度的影响

燃烧速度是描述油罐火灾猛烈程度的一个特性参数，它表征单位时间内燃烧掉油品

的数量。燃烧速度不仅能表示油罐燃烧的快慢，同时也是对其他特性参数如火焰高度、火焰温度以及对周围的辐射热分布起决定作用的参数。影响燃烧速度的因素很多，比如风速、环境温度、直径和油位等，本文通过模型计算得到了燃烧速度在各种影响因素下的变化趋势，其随直径的变化在上一节中已经提到，下面详述一下其在其它因素下的变化规律。

3.1 风速的影响

图 3-1 为汽油火焰倾角随风速的变化关系。由图可以看出，火焰的平均燃烧速度随着风速的增加而有轻微的增加，当风速从 0m/s 升高到 8m/s 时，直线燃烧速度增加了 1.3%。在风速为 1.5m/s 左右有一个突起，主要是由于前面的计算，在风速小于 1.5m/s 时假设火焰倾角为零造成的。由于风速的增加，会有更多的空气穿过火焰内部到达火焰中心，使得火焰燃烧更加剧烈，从而增加了燃烧速度。但本模型没有考虑风速到达一个临界值会把火焰吹熄的情况。

3.2 环境温度的影响

图 3-2 表示的是为汽油火焰的平均直线燃烧速度随环境温度的变化关系。由图可以看出，随着环境温度的升高，燃烧速度呈显著上升的趋势。当环境温度由 0℃ 上升到 30℃ 时，汽油的直线燃烧速度增加了 23%。

3.3 燃烧油位的影响

图 3-3 表示的是为汽油火焰的平均直线燃烧速度随距罐口距离的变化关系。由图可以看出，随着油位的逐渐下降，油面距罐口的距离越来越大，其平均直线燃烧速度明显下降。当距罐口距离从 0 增加到 2m 时，直线燃烧速度下降了 8.2%。这里指的燃烧速度并不是即时燃烧速度，而是表征在油罐装油量不同时，发生火灾时的平均燃烧速度。

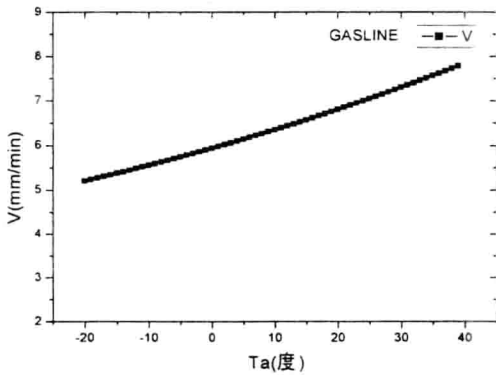


图 3-2 直线燃烧速度随环境温度的变化

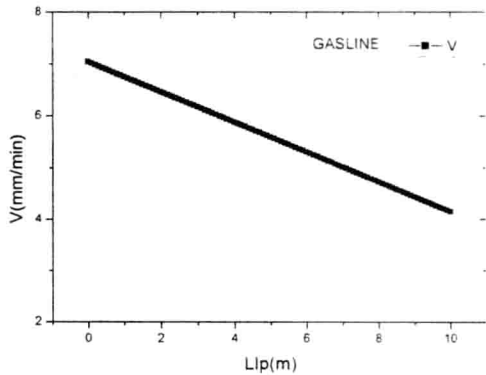


图 3-3 直线燃烧速度随距罐口距离的变化

4 理论与实验的对比

为了验证理论模型计算的正确性，我们对直径为 1m、1.5m 和 2.7m 的汽油和柴油储罐进行了实体燃烧实验，实验具体情况见文献^[6]。在实验基础上，本文获得了大量的着火油罐燃烧特性的实验数据，并将其与计算结果进行了对比分析。

4.1 无量纲火焰高度

图 4-1 表示的是汽油燃烧时，无量纲火焰高度理论计算与实验结果的对比。由图可以看出，理论计算普遍大于实验观测值。这是因为两者的定义有差别。实验观测值是在实验录象的基础上整理出来的，是人们肉眼可以看见的火焰高度；而理论计算的值火焰

高度是如此定义的：火焰平均高度为间断性参数为 0.5 时所对应的位置距罐上沿的距离。所谓间断性参数是指在罐上方某一高度处，至少有火焰的任意一部分到该位置的时间百分数。在连续火焰区，其间断性参数等于 1，在无穷远处其值为零。因此计算的数值高于肉眼观测值，但变化趋势基本一致。之所以这样定义是为了与后面计算辐射热分布相适应，因为火焰尖端的一部分不可见火焰同样具有非常大的辐射力，在计算对人的辐射强度时理应计算上。

4.2 火焰跳动频率

火焰的跳动是有规律的，有固定的跳动周期。借助于数码摄像机，利用 Ulead Videostudio 6 软件进行图片处理，得到实验中直径 1.0m、1.5m 和 2.7m 油罐火焰的跳动频率分别为 1.6Hz、1.083Hz 和 0.916Hz。图 4-2 表征了理论计算的火焰跳动频率与实验结果的对比。由图可以看出，两者是非常接近的。

4.3 燃烧速度

图 4-3 表征了理论计算的直线燃烧速度与实验结果的对比。由图可以看出，两者是非常接近的。由于燃烧速度直接影响着火焰温度、高度等其他参数，因此该结果表明利用本模型计算得到的着火罐燃烧时的各特性参数是十分准确的，对油罐火灾的实战具有重要的指导意义。

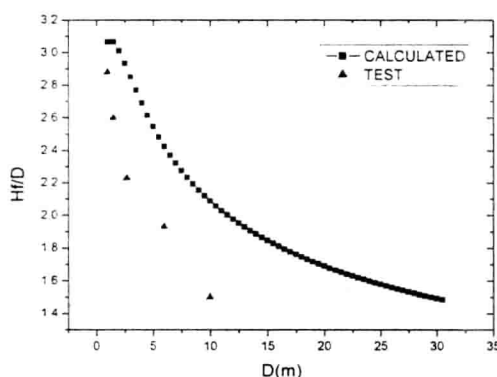


图 4-1 火焰高度与实验值的对比

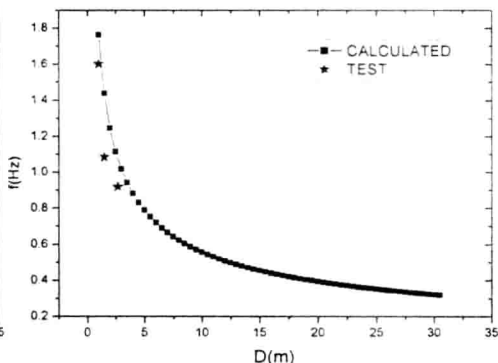


图 4-2 火焰跳动频率与实验值的对比

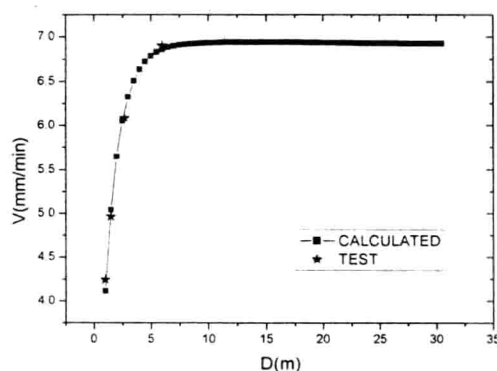


图 4-3. 直线燃烧速度与实验值的比较

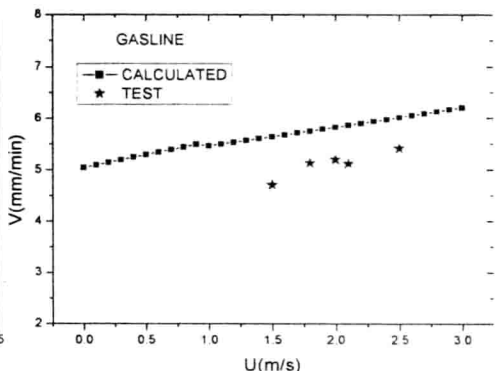


图 4-4 风速的影响规律与实验值的比较

4.4 燃烧速度与风速的关系

图 4-4 表征了理论计算的直线燃烧速度随风速的变化趋势。由图可以看出，理论计

算稍高于实验值,但两者的上升趋势是一直的。这可能有多方面的原因,比如测量精度、计算误差等。但由于所描述的结果为稳定燃烧时的结果,风速也是一段时间的平均风速,存在差异是必然的,今后应根据即时测量结果来比较。

总体来讲,通过以上理论计算与实验结果的对比,证明利用模型计算的结果与实验是非常接近的,而且可以预测大直径下油罐火灾的各项特性参数,这无疑对于火灾现场发展趋势的预测与灭火战术的制定起到积极的指导作用。

5 结论

本文对着火油罐的多个燃烧特性参数进行了理论计算,得到了以下结论:

1. 随着油罐直径的增加,油品的平均燃烧速度逐渐增大,到一定程度时趋近于一个极限值,火焰的高度逐渐增加,但火焰的无量纲高度 H_f/D 逐渐下降并也趋近于一定值,火焰的跳动频率逐渐降低,而火焰的平均温度则稍有增加。
2. 油罐燃烧时在火焰对油品表面的反馈热量中,辐射热量占绝对统治地位,是换热的主要方式,而且随着罐径的增加,辐射所占的比例也在增加。
3. 随着风速的加大,油品的平均燃烧速度呈缓慢增加的趋势;而随着环境温度的升高,其燃烧速度的增加较明显。此外,燃烧初始时刻的油位越低,燃烧速度则越低。
4. 将理论的计算结果与实验数据相对比,证明用此模型得出的油罐火灾的各项燃烧特性参数准确度较高。

参考文献

1. Anthony Hamins, Takashi Kashiwagi, Robert R. Buch, Characteristics of pool fire burning [C]. Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899.
2. Eulalia Planas-Cuchi, Joaquim Casal, "Flame temperature distribution in a pool-fire", Journal of Hazardous Materials, Vol 62,1998,pp231-241.
3. Takaaki Yamaguchi, Kenji Wakasa, "Oil Pool Fire Experiment", Fire Safety Science-Proceedings of the First International Symposium,JAPAN,1981,pp911-918
4. Hiroshi Koseki, Yusaku Lwata, Tomakomai Large Scale Crude Oil Fire Experiments [J], Fire Technology, Vol.36 NO.1 2000
5. 魏东, 薛岗等, 着火油罐燃烧过程预测的整体模型, 2004 年中国工程热物理学会燃烧学分会
6. 赵大林, 魏东等, 汽油储罐火灾燃烧特性的实验研究, 工程热物理学报, Vol.25 No.2, Mar. 2004, 341-344

H₂-O₂(N₂)混气着火过程非线性特性研究

李卓毅 张会强

清华大学工程力学系, 北京, 100084

Tel:62772112 Email: zhanghq@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 本文采用基元反应模拟了 H₂-O₂(N₂)混合气体的着火过程, 得到了不同散热和不同燃料-氧化剂初始浓度比条件下着火临界曲线。结果表明: 在相同 H₂/O₂ 比值下, 不同散热条件下的着火临界曲线非常相似, 可近似看成同一曲线在第二区的“延伸线”上滑移。不同的 H₂/O₂ 初始浓度比会使临界曲线的形状改变。散热对着火极限的影响和着火延迟时间有密切关系, 在临界曲线第二区延迟时间最小, 导致散热对该区的影响最弱, 从而使着火临界曲线非常相似。

关键词: 基元反应 着火临界曲线 非线性

1 引言

火焰的链式基元反应可以描述火焰燃烧的复杂过程。相对于总包反应而言, 采用基元反应数值模拟火焰燃烧, 可以得到更为符合实际的解。对于一个密闭容器中存在任意时刻均匀混合的 H₂-O₂ (或含 N₂) 混合气体, 实验表明, 气体着火的界限曲线(初始 P—T 关系)是一个类似于反 S 型的曲线。然而按照简单的热自燃理论处理, 初始 P—T 关系是单调递减的下突曲线。文献[1]采用基元反应数值模拟 H₂-O₂ 混合气体的着火临界曲线, 得到与实验类似的曲线。但是其模型采用绝热条件, 这是一个不足之处。本文采用基元反应模拟与外界有热交换的密闭容器中气体的热自燃着火界限。并对 H₂-O₂ 的三个着火极限区域进行分析, 验证基元反应在燃烧过程中具有重要的影响力。

2 计算模型

本文模拟一个与外界有热交换的密闭容器^[2], 容器视为良好搅拌器。基元反应数据采用 GRI[3]数据, 如表 1 所示。

表 1 基元反应及其参数

编号 R	反应	$k=A*(T^b)*Exp(-E/R/T)$		
		A	b	E
1	H+O2<=>O+OH	2.650E+16	-.6707	17041.00
2	O+H2<=>H+OH	3.870E+04	2.700	6260.00
3	OH+H2<=>H+H2O	2.160E+08	1.510	3430.00
4	2O+M<=>O2+M H2/ 2.40/ H2O/15.40/	1.200E+17	-1.000	0
5	O+H+M<=>OH+M H2/2.00/ H2O/6.00/	5.000E+17	-1.000	0
6	O+HO2<=>OH+O2	2.000E+13	0	0

7	$2\text{H}+\text{H}_2\rightleftharpoons 2\text{H}_2$	9.000E+16	-600	0
8	$\text{O}+\text{H}_2\text{O}_2\rightleftharpoons \text{OH}+\text{HO}_2$	9.630E+06	2.000	4000.00
9	$\text{H}+\text{O}_2\rightleftharpoons \text{HO}_2$	2.800E+18	-860	0
10	$\text{H}+2\text{O}_2\rightleftharpoons \text{HO}_2+\text{O}_2$	2.080E+19	-1.240	0
11	$\text{H}+\text{O}_2+\text{H}_2\text{O}\rightleftharpoons \text{HO}_2+\text{H}_2\text{O}$	11.26E+18	-760	0
12	$\text{H}+\text{O}_2+\text{N}_2\rightleftharpoons \text{HO}_2+\text{N}_2$	2.600E+19	-1.240	0
13	$2\text{H}+\text{M}\rightleftharpoons \text{H}_2+\text{M}$ $\text{H}_2/.00/\text{H}_2\text{O}/.00/$	1.000E+18	-1.000	0
14	$2\text{H}+\text{H}_2\text{O}\rightleftharpoons \text{H}_2+\text{H}_2\text{O}$	6.000E+19	-1.250	0
15	$\text{H}+\text{OH}+\text{M}\rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}+\text{M}$ $\text{H}_2/.73/\text{H}_2\text{O}/3.65/$	2.200E+22	-2.000	0
16	$\text{H}+\text{HO}_2\rightleftharpoons \text{O}+\text{H}_2\text{O}$	3.970E+12	0	671.00
17	$\text{H}+\text{HO}_2\rightleftharpoons \text{O}_2+\text{H}_2$	4.480E+13	0	1068.00
18	$\text{H}+\text{HO}_2\rightleftharpoons 2\text{OH}$	0.840E+14	0	635.00
19	$\text{H}+\text{H}_2\text{O}_2\rightleftharpoons \text{HO}_2+\text{H}_2$	1.210E+07	2.000	5200.00
20	$2\text{OH}(+\text{M})\rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2(+\text{M})$ $\text{H}_2/2.00/\text{H}_2\text{O}/6.00/$	7.400E+13	-370	0
21	$\text{H}+\text{H}_2\text{O}_2\rightleftharpoons \text{OH}+\text{H}_2\text{O}$	1.000E+13	0.0	3600.00
22	$2\text{OH}\rightleftharpoons \text{O}+\text{H}_2\text{O}$	3.570E+04	2.400	-2110.00
23	$\text{OH}+\text{HO}_2\rightleftharpoons \text{HO}_2+\text{H}_2\text{O}$	1.450E+13	0.0	-500.00
24	$\text{OH}+\text{H}_2\text{O}_2\rightleftharpoons \text{HO}_2+\text{H}_2\text{O}$	2.000E+12	0.0	427
25	$2\text{HO}_2\rightleftharpoons \text{O}_2+\text{H}_2\text{O}_2$	1.300E+11	0.0	-1630.00

密闭容器着火过程的能量方程为：

$$\rho_{\infty} C_V \cdot dT/dt = \sum Q_s \omega_s - (\alpha F/V) \cdot (T - T_{\infty}) \quad (1)$$

其中， ρ_{∞} 为气体密度， C_V 为混合气体平均定容比热容， T ， T_{∞} 分别是气体和环境温度， Q_s 为 s 组分的热焓， ω_s 为 s 组分的反应速率， α ， F ， V ，分别是系统和外界的换热系数，外表面和体积。可以看出， $\alpha F/V$ 对系统的影响是一个综合效果，记

$$L = \alpha F/V。$$

$$\text{反应速率方程} \quad dw_s/dt = \sum_i k_i \prod_s C_s \quad (2)$$

k_i 为某反应速率系数常数，符合阿努尼乌斯公式： $k=A \cdot T^b \cdot \exp(-E/R/T)$ ，其中 A ， b 为常数， E 为活化能， R 为普适气体常数， T 为系统温度。 C_s 为含 s 组分的 i 反应中，反应物的浓度。

3 结果及分析

3.1 着火临界曲线图

氢气/氧气或氢气/氧气/氮气等不同混气在不同初始混合比和散热条件下的临界着火曲线如图 1 和图 2 所示。

图 1 左为摩尔比等于 1:3, L 取不同值时的 H_2-O_2 混合气体的着火极限曲线。图 1 右为摩尔比等于 2:1, 但存在 N_2 , 并且 L 也变化的 $H_2-O_2(N_2)$ 混合气体的着火临界极限曲线。图 2 为相同 L 下, H_2-O_2 摩尔比不同, 或系统含 N_2 时, 混合气体着火临界曲线。从图中看出, 虽然有相同的 L , 但是由于 H_2-O_2 的摩尔比值不同, 结果着火临界曲线的形状并不相似, H_2-O_2 的摩尔比值变大, 第二区的在 T 上变化的范围要缩短, 并且第二区的直线在斜率上也略有不同。 N_2 对一区和三区的临界着火温度都有影响, 但对二区和曲线形状影响较小, 其效果和 L 相似。

从图 1 中可以发现, 着火临界曲线第二区, 在对数坐标下近似为直线。随着 L 的增大, 在第一区, 同一个压力下, 可燃的温度增加最多; 第三区则较为平缓; 而第二区重合范围内, L 的影响要小得多。

直观上观察, 可以认为, 在有相同的 H_2-O_2 比条件下, L 取不同值的曲线, 有一定的相似性, L 增大时, 它们可以沿曲线的第二区“延伸线”方向往上滑移得到的, 而不是沿温度轴向右平移得到。在 H_2-O_2 为 1:3, L 从 0.3 变化到 100 时, 第二区温度范围仅从 145K 变化为 140K。而 H_2-O_2 比为 2:1, 不同 L 或者含 N_2 时, 第二区温度范围为 121K。这表明第二区具有相当的相似性。

曲线相似仅和 H_2-O_2 的摩尔比值有关, 和 N_2 含量关系不大。但是由于 N_2 的存在, 使得第一区和第三区的着火临界温度提高, 但是第二区(和一、三区连接处除外)基本没有影响。

从两图 1、2 还可以看出, 即使 L 在不相同, 或者气体含有 N_2 , 但只要 H_2-O_2 摩尔比相同, 混合气体着火临界曲线的第二区在温度轴上的范围接近, 且曲线在一定的 L 范围内, 有重合的情况, 这表明此时散热的影响很小, 这要求考察着火延迟时间。

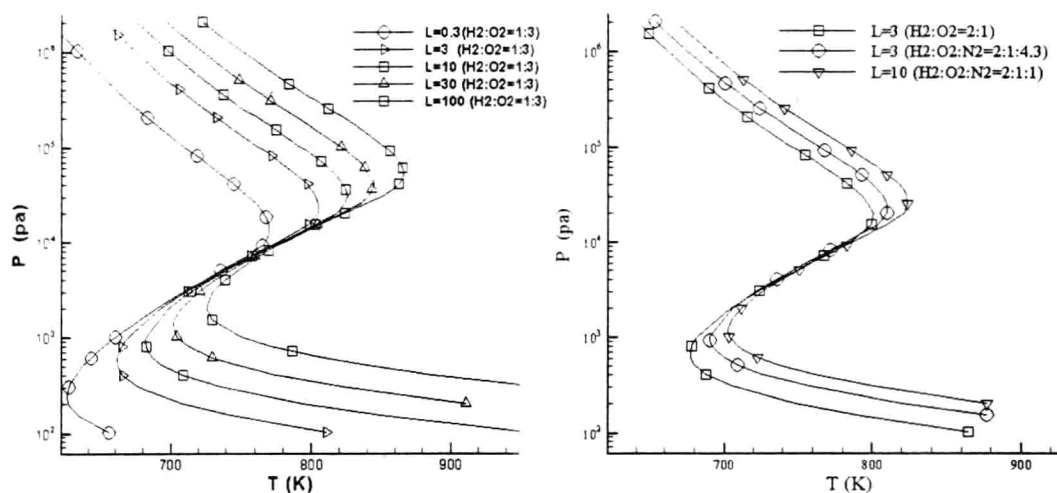


图 1. 同 H_2-O_2 比, 不同 L 或 N_2 时着火临界曲线

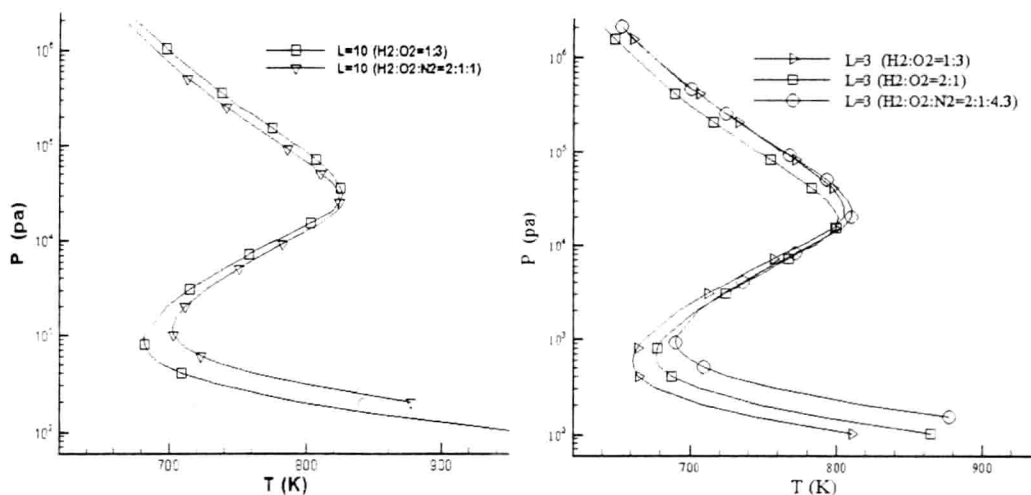


图 2. 相同 L, 不同 H₂-O₂ 比, 或 N₂ 时着火临界曲线

3.2 临界线上的着火延迟时间

文献[3]在理论上给出系统的散热特征时间, 即 Newton 冷却时间为:

$$t_N = \left(\frac{\alpha F}{\rho_x \bar{C}_v I} \right)^{-1} = \frac{\bar{M} \cdot \bar{C}_v}{RL} \frac{P}{T} \quad (3)$$

$\bar{C}_v$ 是温度的函数。将 t_N 随温度变化的曲线显示在图 4 上, 可以看出散热特征时间随温度单调递增, 文[3]参考弗朗克-卡门涅茨基的非稳态分析方法, 认为着火临界曲线上 $t_i / t_N = \text{const}$, 也就是说, 简单理论分析得到的感应时间随压力增加而增加。

图 3 给出了 H₂-O₂ 摩尔比为 1:3, L=3 时, 在着火临界曲线上系统的着火延迟时间。它的非单调和非线性更加明显。在第二区系统的着火延迟时间最短, 只有大约 0.1—1 秒。其次是第一区, 也比较快。在第三区, 随着压力的增加, 着火延迟时间越来越长, 可以达到几百甚至几千秒。

从图 3 中可以看出在第一、二区并没有理论分析的关系, 从第一区到第二区, 感应时间减小, 第二区到第三区的转折过程中, 感应时间迅速增加。然而在第三区, 感应时间和散热特征时间差一段近似的

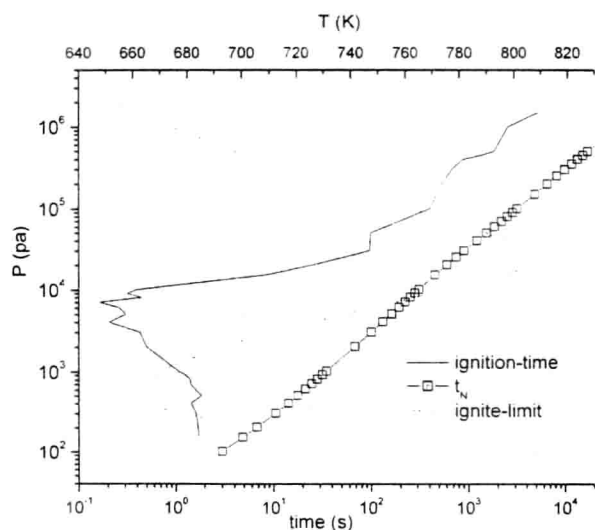


图 3. H₂:O₂=1:3, 延迟时间和压力关系图