

清华大学优秀博士学位论文丛书



高碳碳氢燃料的火焰传播特性和熄灭特性的研究

李博 著 Li Bo

Studies of Flame Propagation and
Extinction Characteristics of
Heavy Hydrocarbon Fuels

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

高碳碳氢燃料的火焰传播特性和熄灭特性的研究

李博 著 Li Bo

Studies of Flame Propagation and
Extinction Characteristics of
Heavy Hydrocarbon Fuels



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书探讨了单火焰条件下单一组分碳氢燃料和航空煤油、柴油的层流火焰传播速度、熄灭极限和传播规律,利用已有的化学机理进行数值模拟并对这一机理进行了改进。

本书适合能源、动力机械和工程热物理等专业人员阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高碳碳氢燃料的火焰传播特性和熄灭特性的研究/李博著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-47435-7

I. ①高… II. ①李… III. ①碳—氢燃料—火焰传播—研究 ②碳—氢燃料—灭火—研究 IV. ①TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 130959 号

责任编辑:黎 强

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:9.75 字 数:162 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版 印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

产品编号:073930-01

一流博士生教育

体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

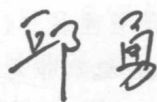
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

掌握航空燃料和柴油燃料的燃烧特性是先进发动机设计的重要基础。这些燃料的组分非常复杂,相较于汽油燃料,主要组分的碳数更高,平均含碳数在 12 以上,主要由高碳直链烷烃、支链烷烃、环烷烃和芳香烃组成。将相关重要组分作为替代燃料单独开展研究是认识这些复杂燃料的基础,随着研究的深入开展,人们对燃烧特性和化学机理的研究也逐渐从小分子燃料向大分子燃料延展。目前人们对小分子的碳氢燃料的燃烧特性和反应机理有比较深入的认识,但对含碳数高的碳氢燃料的认识却比较缺乏。基于此,李博同学的博士学位论文通过实验和数值模拟对这些 C12(平均碳数大于 12)以上高碳碳氢燃料的火焰传播特性和熄灭特性开展了较为深入的研究。

起初搭建了对冲火焰实验系统,在实验系统中实现了高沸点的高碳碳氢燃料的稳定汽化。采用激光粒子速度仪(PIV)准确测定了正十六烷、异十六烷、正十四烷和十氢萘等四种单一组分高碳碳氢燃料和 JP-5、HRJ 两种典型实际航空煤油以及 F-76、HRF 两种典型柴油燃料的层流火焰传播速度以及预混火焰和非预混火焰的熄灭极限,考察了碳数、结构和组分对火焰传播与熄灭极限的影响规律。论文所获得的实验数据新颖详实、准确可靠。

与此同时,李博同学利用 CHEMKIN 软件开展了相应的数值模拟研究,考察实验中不能测得的重要中间组分的生成和消耗规律,通过敏感性分析和路径分析对影响燃烧特性的化学反应和分子传输性质进行了详细的分析,揭示了实验获得的火焰传播和熄灭极限随碳数、结构和组分而变化的机理,比较了现有的三种机理的预测精度,解释了误差的产生原因,并根据实验数据和理论分析对现有的化学机理进行了改进,提高了模拟准确性。

李博同学的研究成果丰富,得出了多条重要的结论,研究成果有助于人们深入认识高碳燃料的基本燃烧特性,同时也为使用相关燃料或者燃料组分的发动机设计提供了基础数据。

李博论文的一些成果已发表于国际燃烧界重要杂志和国际燃烧会议,受到同行专家的首肯,并荣获清华大学优秀博士论文二等奖。我们很高兴清华大学出版社将李博同学的博士论文收录出版,相信这一工作有助于同行进一步了解相关研究进展,扩大交流,共同增进人们对复杂燃料基础燃烧特性的认识。

岳光溪 张 海

清华大学能源与动力工程系

2017年5月于北京

摘 要

航空燃料和柴油燃料广泛用于军民交通领域,由于其化学复杂性,需要通过燃料及其替代组分的基础研究才能准确获得和模拟这些实际燃料的燃烧特性。

在研究过程中搭建了对冲火焰实验系统,以单火焰形式在常压和初始温度为 443K 条件下采用 PIV 激光测量方法测定了正十六烷、异十六烷、正十四烷和十氢萘等四种单一组分高碳碳氢燃料与 JP-5、HRJ 两种航空煤油以及 F-76、HRF 两种柴油燃料的层流火焰传播速度 S_u^0 以及预混火焰和非预混火焰的熄灭极限 K_{ext} ,考察了碳数、结构和组分对火焰传播与熄灭极限的影响规律。同时利用前人提出的化学机理开展了相应的数值模拟研究,并在此基础上对现有的化学机理进行了改进。论文的主要结论如下:

(1) 高碳直链烷烃的 S_u^0 受碳数影响不明显,比相同碳数的支链烷烃的数值高,前者燃烧生成较多化学反应活性较大的小分子直链烃,而后者燃烧生成较多的相对稳定的小分子中间产物,裂解产生的 C_0 - C_4 小分子的化学反应机理是影响高碳碳氢燃料的火焰传播特性的主要因素。

(2) 高碳碳氢燃料预混火焰的 K_{ext} 主要受裂解产生的 C_0 - C_4 小分子的化学反应机理影响,反应物的分子传输性质在近极限处作用增强,但是仍然次于化学动力学。

(3) 高碳碳氢燃料非预混火焰的 K_{ext} 受分子传输性质的影响明显,在结构相同条件下, K_{ext} 随燃料碳数增加而降低;支链烷烃的 K_{ext} 比相同碳数的直链烷烃的小。

(4) 所测得的实际燃料预混火焰的 S_u^0 和 K_{ext} 均低于正十六烷。石油衍生燃料的 S_u^0 和 K_{ext} 低于生物替代燃料。实际燃料的成分差异是形成这种

基础燃烧特性差异的主要原因。

(5) 修正 C_0 - C_4 小分子化学机理可以提高高碳燃料预混火焰传播和熄灭特性的预测精度;而修正燃料分子的传输参数可以丰富传输数据库并提高高碳燃料非预混火焰的熄灭特性。

关键词: 对冲火焰;层流火焰;高碳碳氢燃料;火焰传播;熄灭极限

Abstract

Jet and diesel fuels are used extensively in both the civilian and military sectors worldwide. Due to the chemical complexity of these fuels, the combustion characteristics of practical fuels cannot be modeled from first principle and understood. The first step towards that goal is to perform fundamental combustion studies for both the practical fuels and the attendant surrogate compounds.

In this paper, flame propagation and extinction characteristics of four kinds of heavy hydrocarbons (*n*-hexadecane, *n*-tetradecane, *iso*-cetane, decalin), two kinds of jet fuels (JP-5, HRJ), and two kinds of diesel fuels (F-76, HRF) were studied in the counterflow configuration under atmospheric pressure and at evaluated temperature of 443K. Digital particle image velocimetry (PIV) was used to measure the axial flow velocities along the stagnation streamline. The effect of carbon number and chemical structure were also considered. The simulation results were also shown for comparison issues. This study also make improvement of kinetic mechanisms. The main conclusions are as follows:

(1) The laminar flame speeds of heavy hydrocarbons are dominate by C_0 - C_4 mechanisms. Heavy *n*-alkanes exhibit similar laminar flame speeds. Compared to *n*-hexadecane, the lower reactivity of *iso*-cetane is attributed to the production of resonantly stabilized intermediates that result from fuel decomposition and which inhibit the overall reactivity. Additionally, the differences of laminar flame speeds of *iso*-octane/air and *iso*-cetane/air mixtures are caused by the distinctions of the fuel molecular structures.

(2) At near limit state of premixed flames, the heavy hydrocarbon fuels are affect by C_0 - C_4 small hydrocarbon mechanisms, the effect of fuel diffusivity are enhanced. As the chemical kinetics dominate the extinction of premixed flame, the extinction strain rates of *n*-teterdecane and *n*-hexadecane

premixed flames are similar to each other.

(3) Non-premixed *n*-teterdecane flames were found to exhibit notably greater resistance to extinction compared to non-premixed *n*-hexadecane flames due to the dominate effect of fuel diffusivity. The extinction strain rates of non-premixed *iso*-cetane flames are lower than those of non-premixed *n*-hexadecane flames as more stabilized intermediate fragments were generated during the oxidation of *iso*-cetane. The correction of the mass diffusivity of the heavy fuel has great effect on the prediction of the extinction limits of the non-premixed flames.

(4) The laminar flame speeds and extinction strain rates of JP-5, HRJ, F-76 and HRF flames are lower than those of *n*-hexadecane flames. The laminar flame speeds and extinction strain rates of petroleum-derived fuels are lower than those of bio-derived fuels. The discrepancies of combustion characteristics of practical fuels are caused by the differences of chemical compositions.

(5) The improvement of the C_0 - C_4 mechanism effectively improved the prediction accuracy in laminar flame speeds and extinction limits for heavy hydrocarbon premixed flames, while the improvement of fuel diffusivity effectively improve the prediction accuracy in extinction limits for heavy hydrocarbon non-premixed flames.

Key Words: Counterflow; Laminar flames; Heavy hydrocarbons; Flame propagation; Extinction limits

主要符号对照表

A_i	组分 i 的之前因子
c_j	组分 j 的生成或消耗速率
C_p	气体比热容
C_{pk}	组分 k 的比热容
D	对冲喷嘴的喷嘴直径
D_{km}	组分 k 和组分 m 的分子扩散系数
h_k	组分 k 的比焓
K	局部拉伸率
K_{ext}	熄灭极限
$K_{\text{ext,p}}$	预混火焰的熄灭极限
$K_{\text{ext,np}}$	非预混火焰的熄灭极限
$\bar{M}$	平均相对分子质量
M_k	组分 k 的相对分子质量
L	对冲喷嘴的喷嘴间距
p	压力
P_{vp}	液体燃料的蒸汽分压
q'''	辐射热损失
R	通用气体常数
S_u^0	层流火焰传播速度
$S_{u,\text{ref}}$	参考火焰速度
T	火焰温度
T_u	喷嘴出口处未燃气体混合物温度
u	气体速度
v_k	组分 k 的常扩散系数
V_c	矫正速度
V_k	组分 k 的扩散速度

w_k	组分 k 的热扩散速度
x	火焰轴向位置
X_k	组分 k 的摩尔分数
Y_k	组分 k 的质量分数
r	气体密度
f	化学当量比
λ	气体的热传导系数
Δ	相对误差
Θ_k	组分 k 的热扩散比