

· 成果简介 ·

国家自然科学基金重点项目推动 我国“新一代内燃机燃烧理论与技术”的源头创新

苏万华¹ 刘涛² 纪军²

(1 天津大学内燃机国家重点实验室, 天津 300072; 2 国家自然科学基金委员会工程与材料学部, 北京 100085)

[关键词] 内燃机高效清洁燃烧, 柴油机混合率与化学反应率协同控制, 技术创新为导向的基础研究

1 重点项目的立项依据和意义

在可以预见的未来, 内燃机仍是汽车、机车、轮船、农用机械(农用车)、工程机械及军用车辆等移动装置的动力源, 是我国石油的主要消费渠道, 而石油仍将是内燃机的主要燃料, 且我国内燃机的石油消费量约占石油总消费量的 66%, 内燃机同时又是大气环境, 特别是城市大气环境的主要污染源, 内燃机的节能减排是节约石油资源和保护环境的主战场之一。

国外汽车和内燃机发达国家(美、英、日和欧盟)都在努力研发汽车燃油动力技术。2001年后主要是大力支持“均质压燃、低温燃烧”新一代内燃机燃烧理论和技术的研究。我国内燃机工业过去没有认真参与国际燃油发动机技术领域的激烈竞赛, 产品开发主要依赖国外, 致使我国成为国外过时技术的转接地, 自 1998 年 20 多年来产品水平始终落后发达国家 10 年左右, 能量利用率则始终低大约 20%。近几年我国工业界已开始重视发动机产品的设计能力, 而发动机开发能力的瓶颈在于燃烧技术, 突破这一瓶颈必须加强技术创新导向的基础研究。为此, 国家自然科学基金委员会通过重点项目, 在内燃机燃烧领域, 分别于 1999 年对“车用内燃机新概念燃烧过程研究”(基金资助号 59936130, 资助金额 110 万元, 受资助单位: 天津大学, 研究期限: 2000—2003)和 2007 年对“先进内燃机燃烧与控制理论中的若干关键问题的研究”(基金资助号 50636040, 资助金额 280 万元, 受资助单位: 天津大学、西安交通大学, 研究期限: 2007—2010)连续

进行了资助。

第一个课题的提出正值 20 世纪 90 年代末, 全世界内燃机界面临环境污染带来的巨大挑战, 对工业界而言就是如何满足日趋严格的排放法规。不能满足相应的排放法规, 则意味着退出市场, 是内燃机工业界生死攸关的大事。当时, 国际内燃机技术领域在热烈地探讨“什么样的技术才可以满足欧 III 或更严格的排放法规?”, 有人提出“均质压燃燃烧(HCCI)”可能是一个有潜力的技术方向。与此同时, 我们在前期国家自然科学基金课题“柴油机现象学数学模型的研究”和攀登计划课题“柴油机燃烧近壁混合气浓度分布和湍流混合过程”的研究中发现, “提高柴油机混合率不仅可以降低碳烟的排放, 而且可以降低氮氧化物(NO)排放, 后者是对当时国外认为“NO 是由高混合率形成的强预混燃烧形成的理论”的悖论, 在 1993 年伦敦 CIMAC 国际内燃机大会上曾有过激烈的争论。但是我们提出的高混合率燃烧室(BUMP 燃烧室)已经显示了同时减低碳烟和氮氧化物的效果, 在此基础上我们提出以实现高混合率为目标的”新概念燃烧过程的建议, 并得到基金的支持。

第二个重点课题, 是在“973”项目“新一代内燃机燃烧理论的研究”取得了重要进展, 同时也遇到一些技术基础瓶颈下提出的, 我们形成了“柴油机混合率与化学反应率协同控制”的思想, 但是我们必须深入理解柴油喷雾雾化的机理, 必须定量深入理解各个参数如何影响喷雾中浓度分布的规律, 才能主动地控制混合率和化学反应率。

本文于 2011 年 5 月 12 日收到。

2 重点项目的研究内容

重点项目的研究内容本着“以技术创新为导向的基础研究”的原则,以内燃机燃烧新技术的需求为出发点,以我国前期内燃机燃烧基础研究为基础,加强国内外学术交流,旨在推动内燃机燃烧理论和技术的原始创新。研究的主要内容包括:

2.1 燃烧过程中物理和化学过程演变及其控制的研究

“内燃机燃烧过程混合率与化学反应率协同控制实现高效、清洁燃烧的理论”是该课题组对不同燃烧状态下(发动机负荷、转速)物理和化学过程的深入研究的基础上提出的,该理论跳出传统燃烧理论体系的范畴,提出了实现内燃机高效、清洁燃烧的物理和化学过程的期望。该重点项目的研究内容就在于理解这些物理和化学过程的变化规律和影响因素,提出相应的控制方法。

2.2 内燃机“极限”条件下的燃烧过程研究

为了突破传统内燃机燃烧过程在热效率和有害排放产物方面的极限,必须关注极限条件下的物理和化学现象。例如燃料着火极限、可控自燃极限和稳定燃烧极限等。为了提高内燃机在低负荷下的热效率(这一点对于堵车严重的城市车辆节能减排非常重要),就必须把相应工况下的着火极限扩展到远远超出传统燃烧学中的“着火极限”;为了利用废气再循环提高内燃机的清洁排放水平,必须提高燃油和空气混合气在低氧浓度下稳定燃烧的极限;为了取得更高的热效率,必须提高燃烧速率,遏制传统内燃机燃烧过程中由于火核形成和火焰传播的不稳定性引起的循环变动;为了消除破坏性爆震就必须控制自燃的发生和发展,实现可控自燃燃烧。

2.3 燃烧边界条件与燃料化学的协同控制

随着石油供应的日益紧张,内燃机适应多种燃料,实现燃料的多元化是必然的趋势,也是燃烧学基础研究应当解决的问题。本项目的目标之一是研究内燃机工况变化所引起的燃烧条件的变化与控制,使之适应燃料的理化特性和燃烧特性。燃烧边界条件是指反应物质的组分、浓度、温度和压力的状态和环境,其控制很大程度上取决于燃料的供给的方式、燃烧室内气流运动,组分的输运,以及废气再循环伴生的稀释作用,比热作用、热作用和化学作用等。

3 项目的主要特点

(1) 该课题的设置紧扣内燃机燃烧的清洁和高

效。内燃机燃烧属于“工程领域的基础研究科学”,它应当具备两个基本的特征。第一,它是“纯基础燃烧科学”和工程技术科学之间的桥梁,它利用纯基础燃烧科学在化学动力学、热力学、流体力学等学科的最新成果,包括提供的模型,数据,原理等去解决工程技术科学提出的瓶颈问题。研究工作的基本目标是为解决工程需要提出新技术原理;第二,内燃机燃烧学本身是为内燃机燃烧技术进步服务的,因而具有明确的支持工程技术进步的目标,是工程技术原始创新动力的源泉。

(2) 坚持“以技术创新为导向的基础研究”,同时十分重视国际学术交流。本课题的立项正值国际内燃机燃烧技术新一轮竞赛,它以均质压燃概念的提出(20世纪90年代末)为标志。因此本课题的研究从一开始就与国际内燃机燃烧研究站在同一个平台上。该课题的设置指导思想是摒弃跟踪研究和重复研究,坚持“以技术创新为导向的基础研究”。同时十分重视国际学术交流,我国内燃机燃烧研究从来没有像近10年这样活跃,课题组成员每年都访问包括美国圣地亚国家实验室、威斯康辛内燃机中心、GM、Ford、瑞典Lund大学等世界知名内燃机燃烧研究机构,进行讲学交流,同时也吸引知名国外学者来华交流。自2002年起每2年举办一次的“内燃机高效、清洁燃烧国际学术研讨会”,已经成为国际学者认可的定期举办的国际学术会议。

(3) 通过“产、学、研”结合实现工程领域的基础研究与工程化技术研究的结合。主要承担本研究的天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室作为一个科研团队,着力把内燃机基础性研究和工程化技术创新结合起来,在此过程中得到了包括潍柴动力和玉柴机器等知名大公司的合作和支持。该课题执行的过程证明,这种通过“产、学、研”结合实现的基础性研究与工程化技术研究的结合,是我国工业原始创新动力的源泉。这是因为:第一,它可以及时、准确地把工程技术瓶颈问题提炼和分解为基础性研究的目标和命题;例如,发动机“工况”的变化,引起燃烧过程中物理和化学过程的巨大变化,而早期HCCI燃烧理论不能适应这种变化。这就提示我们必须研究新问题,提出新观点和新解决方案,从而丰富了内燃机燃烧学研究;第二,引导基础性研究聚焦在工程技术科学的需求上,从而更好地为工程创新服务。例如,该研究从“内燃机均质压燃燃烧”理论为出发点,对不同工况下燃烧过程边界条件变化,以及物理

化学过程的变化,不断深化研究工作,先后提出MULINBUMP复合燃烧、均质压燃低温燃烧,以及高密度-低温燃烧等新概念,并在企业的合作下开发成功“无后处理器国IV重型柴油机”,突破了国外必须依赖尾气后处理器的技术路线(SCR氮氧化物选择催化还原后处理器或DPF微粒过滤再生后处理器)。后处理器造价很高,可占发动机成本的40%—70%(英国Ricardo数据),而该研究提出的内燃机高效、清洁燃烧技术通过自身燃烧净化达到国IV排放法规要求,可降低发动机成本30%以上,具有重要的经济和社会效益。

4 研究的创新性进展

经过连续两个重点课题,跨越近10年的支持,该课题在内燃机燃烧学自身和新技术原理创新两个层面上,取得显著的进展。

4.1 提出高混合率技术是柴油机第一决定性技术,创新发明了高混合率燃烧室技术

相当长时间以来,人们认为柴油机混合率过高会增加 NO_x 排放,太低则增加碳烟(或颗粒物)排放,存在所谓“trade-off”关系。认为 NO_x 主要是在预混燃烧阶段形成,并决定于预混燃烧强度,因而自20世纪80年代欧洲开始实施柴油机排放法规开始,始终在混合率的折中上辗转周折。该研究在前期自然科学基金支持下,建立了可以描述燃烧全程混合率的现象学模型,揭示扩散燃烧阶段的高混合率不但有助于降低碳烟,而且有助于降低 NO_x 排放,拓展了柴油机燃烧研究的思路。接着在1999年启动的重点课题中,通过气体射流速度场和浓度场模拟研究,以及柴油喷雾的PLIF激光诊断方法研究,证明影响柴油机混合率的主要因素之一是燃油喷雾在燃烧室近壁形成薄而浓的壁面射流,其混合率只有空间射流的一半,因而形成近壁混合气的堆积,形成高温缺氧的浓混合气区,这正是柴油机碳烟和 NO_x 排放高的根本原因。该研究正值我国开始推行排放法规,并较快地从国I提升为国II和国III的时期。该研究提出“高混合率是柴油机第一决定性技术”,通过激光诊断和数值模拟方法,探索消除壁面射流提高混合率的方法。最终发现特定的燃烧室形状,可以使壁面射流从壁面剥离,形成二次空间射流,标量耗散率可提高40余倍,在此研究的基础上,提出了BUMP高混合率燃烧室技术,在潍柴、玉柴和天津雷沃等企业应用,在发动机从国I到国IV的升级中,发挥了重要作用。

4.2 在国际上,最早提出并采用多脉冲燃油喷射高混合率技术

通过早喷燃料,使燃料在着火之前得以更充分的混合,以实现均质压燃燃烧是本世纪初国外学者提出的混合技术。但只能喷少量的油,着火前才能完成均匀混合,否则会出现燃油喷雾撞击缸套,稀释润滑油等问题,不能成为工程技术。该研究根据对喷射过程的数值模拟和实验观察,创新提出一种“多脉冲燃油喷射技术”,并在此基础上,提出了MULINBUMP复合燃烧过程,即使不采用废气再循环(这可显著降低散热损失,简化发动机结构),也能在轻型车运行工况实现清洁燃烧。特别是在开发无后处理器国IV重型柴油机过程中,在中等负荷运行条件下,多脉冲喷射呈现的高混合率,与传统单次燃油喷射相比,显示出突出的优势,可以实现“接近零的排放”。

4.3 提出高强度柴油机“高密度-低温燃烧”概念和技术

目前国际内燃机界在强化柴油机高效、清洁技术的研究中遇到了共同的瓶颈问题,该研究将其归结为:高循环供油量与高进气量的矛盾;高进气量与高废气再循环率的矛盾;均匀混合与高温高压下短滞燃期的矛盾;高热效率与最大燃烧压力的矛盾等4大矛盾。研究从高效清洁燃烧机理的研究中,提出了3个相互联系的解决方案,即第一增加进气压力,第二降低压缩温度,第三促进混合过程。前两个解决方案都已经实现了技术的工程化,是无后处理器国IV柴油机开发成功的重要技术。第三项技术仍在研究中,为未来我国实施更严格排放法规提供了技术储备。

4.4 提出并形成了“柴油机混合率与化学反应协同控制理论和技术”

内燃机的燃烧过程是一个脉动、瞬变的燃烧过程,从混合气的准备到燃烧结束只有几个到十几个毫秒的时间,在这极其短暂的时间里,燃烧室内发生着极其复杂的物理和化学过程,伴随着浓度、温度、压力、组分和物性等变化,该研究的重要进展在于将其归纳为混合过程和化学反应过程的变化,一方面,探索、研究混合率促进技术;另一方面探索、研究化学反应率抑制技术,使两者时间常数可比、可控,从而实现燃烧路径的控制,使之向高效清洁的方向发展。在此基础上与企业合作攻克了相应的工程化技术,为我国内燃机工业自主创新做出了贡献。

项目全面完成了预期的目标,在基础性研究方面突破了传统内燃机燃烧理论,开发并建成了包括激光

诱导荧光法光学燃烧诊断装置和技术,建成了光学发动机和高温、高压、高密度燃烧实验装置,开展了包括正庚烷等基础燃料化学动力学骨干机理的研究,内燃机燃烧过程数学模型研究的水平也显著提高,内燃机燃烧学基础性研究的水平和能力得到提升。

研究面向国家环境保护的重大需求,始终以工程需求为导向,为工程创新提供了理论和方法,成为新技术创新的推动力。研究期间获国家技术发明奖1项,天津市技术发明奖一等奖1项,教育部技术发明奖二等奖1项,发表SCI/EI论文61篇,获授权专利9项,软件著作权11项,培养博士后5人,博士生20余人。

5 几点思考与启示

该项目的进展和成果,给重点项目的组织工作

的启示:

(1) 工程领域的基础性研究重点项目应当聚焦相应工程领域的重大需求,开展以技术创新为导向的基础研究,发挥技术创新的动力和源泉的作用。

(2) 鼓励工程领域的基础性研究重点项目与企业“先进技术创新研究”相结合,明确的工程目标和需求有利于课题组把握研究的方向,自觉地成为国家科技创新体系的有生力量。

(3) 工程领域的基础性研究应当成为基础研究和先进技术研究的桥梁,一方面,通过基础性研究取得的最新数据,原理和模型为先进技术研究服务;另一方面,使研究结果在先进技术研究中得到验证、修正和完善,并且不断发展。

ENHANCEMENT OF ORIGINAL TECHNICAL INNOVATIONS BY IMPLEMENTATION OF KEY PROJECTS OF NSFC

Su Wanhua¹ Liu Tao² Ji Jun²

(1 *Tianjin University, Tianjin 300072*; 2 *Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*)

Key words high efficiency and clean combustion in IC engines, coordinate control of mixing and chemical rates in engine combustion, fundamental research targeting in original innovations

(上接第256页)

果帮助申请者对时间进行把握,在规定的时间内合理分配好时间。研究基础与工作条件则督促申请者不断提升自己,完善科研平台的设施和人力,加强拟研究领域的开拓。相关的承担和完成科学基金项目说明从学术的角度要求申请者具备高度的责任心和

以一贯之的科学态度。此外,行云流水的文字让人如沐春风,层次分明的逻辑引人入胜,是申请者追求的目标,体现出申请书对文字表达能力的考验。

总之,对申请书各个环节的思考有助于申请者实现科研思维质的飞跃。

NSFC PROPOSAL WRITING IS AN EXCELLENT WAY TO SKILLED SCIENTIFIC THINKING FOR YOUNG SCIENTISTS

Shi Xiaotao^{1,2}

(1 *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002*; 2 *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*)