



Research
Engines and Fuels—Review

燃料 / 发动机系统的发展——实现可持续运输的途径

Gautam Kalghatgi^{a,b,c,†}

^a Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

^b University of Oxford, Oxford OX1 2JD, UK

^c Saudi Aramco, Dhahran 31311, Saudi Arabia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 June 2018

Revised 24 January 2019

Accepted 25 January 2019

Available online 28 March 2019

关键词

运输能源

内燃机

汽油

柴油

摘要

全球对运输能源的需求巨大且不断增长,主要由在内燃机(ICE)中燃烧的石油衍生液体燃料来满足。此外,未来对航空燃油和柴油需求的增长速度预计将快于对汽油的需求,可能会使低辛烷值汽油更容易获得。许多重大措施力争发展电池电动汽车(BEV)和燃料电池作为内燃机汽车的替代品,并寻求如生物燃料和天然气等燃料作为传统液体燃料的替代燃料。然而,这些替代方案中的研究基础都非常薄弱,并且还要克服重大障碍从而快速自由地发展。因此,在未来几十年内,运输(特别是商业运输)将继续主要由燃用石油基液体燃料的内燃机提供动力。因此,只有通过改进内燃机才能确保交通运输的可承受性、能源安全,控制对温室气体(GHG)排放和空气质量的影响。实际上,内燃机在使用目前市场上燃料的同时,通过改进燃烧系统、控制系统和后处理系统,以及在部分电气化混动辅助下将进一步得到改进。然而,通过改进燃料/发动机系统,内燃机依旧还有很多发展空间,可以使我们更多地利用制造燃料过程中的收益并使用易于获得的部件。如汽油压燃(GCI),可在压缩点火发动机中使用低辛烷值汽油,使汽油受压缩着火。与现代柴油发动机相比,GCI可以实现接近柴油机的效率,且在成本更低的情况下较易控制氮氧化物(NO_x)和颗粒物的排放。按需辛烷值(OOD)还有助于优化燃料的抗爆性能,从而提高系统的整体效率。

© 2019 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

现代社会严重依赖货物和人员的运输。2015年,世界上有大约 1.1×10^9 辆轻型车(LDV)和 3.8×10^8 辆卡车[1],预计这些数字还将增长,特别是非经济合作与发展组织[non-OECD(OECD, Organization for Economic Co-operation and Development)]国家如印度和中国,到2040年将达到 $1.7 \times 10^9 \sim 1.9 \times 10^9$ 辆[1–4]。运输耗能占所有能源使用量的20%左右,二氧化碳(CO₂)排放量占全球的23%左右[5]。然而,如果包括甲烷等气体

在内,运输GHG排放量仅占全球的14%左右,与畜牧业中生产肉类和乳制品所产生的比例相当[6]。目前,运输的动力源几乎完全(>99.9%)是内燃机,而往复式发动机为陆地和海上运输提供动力,航空发动机为空运提供动力。火花点火(SI)发动机为全球约80%的乘用车提供动力[4],而柴油发动机在商业领域(公路和海上使用)占据主导地位。尽管与商用车相比LDV的数量要多得多,其约使用全球运输能源的44%[7]。

目前,运输能源约95%由石油衍生的液体燃料提供,并且大约60%的原油用于炼制运输燃料[2–4,7]。世界各

E-mail address: kalghatgi@gmail.com

[†] The author retired recently from Saudi Aramco and is a visiting Professor at Imperial College London and University of Oxford.

地对运输燃料的需求巨大，每天约需要 4.9×10^9 L汽油和柴油以及 1.3×10^9 L喷气燃料[8]，且需求量年增长率约为1%[2,7]。由于人口增长和经济繁荣带来的能源需求增加，运输领域正在发生变化，需要确保能源安全，控制温室气体排放，改善当地空气质量并迎合消费者的喜好和要求。每个驱动因素对变化的重要性在不同国家和不同时期都会有所不同。电池电动汽车（BEV）和燃料电池可取代内燃机，天然气和生物燃料等燃料可替代原油制成的传统液体燃料。然而，这些替代现有体系的方案都是从一个非常薄弱的基础开始的，要想实现无限制快速增长还面临着许多关键的阻碍[8]，甚至预计到2040年不会超过全球运输能源的10%左右[2,3,7]。重要的是要在生命周期的基础上评估这些替代方案，以确保环境和其他收益是真实的，并且不仅仅是简单地将所产生的GHG从发动机排气管转移到其他地方。

因此，在未来的数十年里，运输动力都将主要由使用石油基燃料的内燃机提供[2,3,7,8]。此外，在这个时间范围内，石油短缺不会限制运输的增长。在过去几十年中，已知的石油探明储量增长速度快于消费速度，以现在的石油消耗率，目前探明的储量应至少可以在未来持续使用50年[8,9]。因此，必须提高内燃机的效率，改善内燃机的环境影响和可负担性，内燃机将在可预见的未来继续为运输提供动力。

总的来说，LDV燃料消耗减少的空间要远远大于商用车，因此预计未来商用车对运输能源的需求将比乘用车增长得快得多[2,3]。必须加工更多的石油来生产商用车所需的越来越多的柴油和航空燃料，并且按比例增加低辛烷值汽油（统称为石脑油）的生产。石脑油通常可进一步加工成汽油，且它也可以用来生产石化产品。由于对汽油的需求预计不会像对柴油和航空燃料需求一样以相同的速度增长，因此石脑油很可能在未来得到广泛使用。炼油厂将需要进行大量的投资来满足这种不断变化的燃料需求结构，还需要在运输燃料中找到石脑油的经济用途，以保持它的商业可行性[10,11]。

通过改进燃烧系统、控制系统和后处理系统，内燃机效率的提高依然存在着很大潜力。在未来，随着部分电气化混合动力技术的加入，火花点火（SI）发动机[2]的燃料消耗可以进一步降低，且混动技术可能会得到广泛应用[2]。混动形式允许SI发动机能更高效地运行并回收制动中损失的能量。重型车辆运行在频繁启动和停止的驾驶模式下的机会较少，这在乘用车当中更常见，并且这些车辆主要由运行已经非常高效的柴油发动机提供

动力，因此，电力混动技术在这些车辆中收益不大。然而，如果未来发动机没有被迫使用当前的市场燃料，那么发动机和燃料可开发的更大空间，在可接受的成本内提高效率和排放的收益。这些方法还可以提供使用诸如低辛烷值汽油的燃料的途径，这些燃料可能会因为较多的盈余而可以以较低的价格卖给消费者。

本文讨论了上述问题，但很大程度上是借鉴了本文作者之前的综述[8,12-14]。本文首先简要讨论了当前的燃料和发动机以及对目前燃料供需情况的预测；随后讨论了内燃机和燃料/发动机系统的未来发展。

2. 内燃机燃料和燃烧系统

有关发动机燃料和燃烧过程的详细信息已在几本著作[15-18]中讨论过，因此本节仅作简短的总结。

2.1. 内燃机燃料

由于其高能量密度及易于运输和储存，运输已经发展成几乎完全由液体燃料提供动力。例如，在常温常压下，1 L汽油的能量是1 L天然气的700多倍，是1 L氢气的3100多倍。为了能让车辆携带足够且范围合理的燃料质量，必须使用大量的能源来液化或压缩气体燃料。在20世纪，液体燃料已经成为运输的主要燃料，形成了一个价值数亿美元的广泛的全球网络，替换或复制这一全球网络将是困难且昂贵的。

运输燃料主要通过精炼原油（石油）制成。第一步是原油的蒸馏。当油被加热到高于环境温度时，溶解在原油中的气体被释放，这些气体构成液化石油气（LPG）。LPG可占原油的2%，主要由丙烷和一些丁烷组成。在初始蒸馏时馏出的、沸点在约20 °C至约200 °C之间的汽油沸程内的原油馏分称为直馏汽油（SRG）。柴油燃料由较重的组分组成，沸点范围为约160 °C至约380 °C。沸点高于380 °C的重组分占原油重量的40%~60%，具体比重取决于油的来源。在炼油厂中，这些重组分首先“裂化”成较小的分子，可以通过如减少硫或改变它们的辛烷/十六烷值的方法进一步加工成有用的产品。炼油厂不同部分的汽油沸程范围内的馏品在通用术语下统称“石脑油”。石脑油通常被进一步加工来增加其辛烷值，其也可用于石化行业。其他非石油类组分，如生物燃料和高辛烷值组分[如甲基叔丁基醚（MTBE）和乙醇]，可以与炼油厂馏分以及一些燃料添加剂混合，以达到燃料所需的规格[15,16]。

爆震是一种异常燃烧现象，限制了SI发动机的效率。因此，汽油需要具有高的抗爆性，由研究法辛烷值（RON）和马达法辛烷值（MON）确定[15,19,20]。大多数商用汽油的RON> 90。对于柴油燃料，自燃性由十六烷值（CN）评定。柴油燃料通常需要高的CN，因为它们需要易于自燃着火，实际柴油燃料的CN> 40。燃料的RON越高，其CN越低，反之亦然[15,19]。航空燃料的CN低于传统柴油燃料的CN，并且航空燃料由更多柴油沸程内的挥发性组分混合而成。海上运输燃料由分馏池中最重的组分混合而成，含硫量高。由于目前采取了措施降低船用燃料的硫含量，未来船用发动机可能会被迫使用传统的柴油燃料，这种转变将进一步促进未来对柴油燃料的需求。

本文将汽油类燃料定义为CN <30或RON> 60的燃料，即汽油自燃着火范围内的燃料，如参考文献[19]中所述。

2.2. 发动机燃烧系统

主要有用于陆地和海上运输这两种实际应用的内燃机燃烧系统。在SI发动机中，电火花点燃预混合后被压缩的燃料和空气的混合物，形成火焰传播并释放能量。在现代SI发动机中，燃空比必须保持在化学计量数水平，以使三效催化剂能够有效地减少一氧化碳（CO）、未燃烧的碳氢化合物（HC）和氮氧化物（NO_x）排放量，使其达到可接受的低水平。在排放质量方面，SI发动机的碳烟排放可以忽略不计，然而，纳米颗粒（即直径小于100 nm的颗粒）的数量越来越受到关注。未来可能更加需要汽油颗粒过滤器来解决SI发动机的颗粒排放。对于任何给定的燃料，“末端气体”在扩展的火焰前锋之前可以达到的最高温度和压力受到爆震的限制，爆震是由末端气体中的自燃引起的[15,19,20]。爆震取决于末端气体达到自燃所需的时间和燃料的抗爆性。通过使用节气门来减少进气量，从而减少了SI发动机中的负荷，由于固定的空燃比，燃料能量值不能独立于进气量而减小。相反，压缩点火（CI）发动机不使用节气门，因为可以通过控制喷射的燃料量来控制负荷。SI发动机在压缩冲程期间压缩燃料和空气的混合物，相比之下，CI发动机在压缩冲程期间主要压缩空气[17,18]。因此，SI发动机的泵气损失高于CI发动机。由于这些原因，SI发动机在典型的驾驶循环中仅将20%~25%的燃料能量转换成动力，与CI发动机相比效率较低。然而，由于使用有效的后处理系统，它们在HC、NO_x、CO和颗粒质量

排放方面对环境的污染影响很小。用于商业运输的发动机比用于乘用车的发动机更大更重，因此它们必须以较低的速度运行。爆震通常发生在大型发动机低速运行工况，比小型发动机高速运行工况出现的概率大，因为大型发动机低速时有更多的时间可能发生自燃。因此，SI发动机通常不用于商业运输。

在CI发动机中，燃料被喷射到压缩冲程顶部附近的高压高温环境中，当燃料与氧气混合时自燃释放热量。目前，所有实际应用的CI发动机都使用柴油燃料且都是柴油发动机。碳烟（颗粒）和NO_x排放是柴油发动机的重要问题，需要用复杂的后处理系统和高压燃油喷射系统的技术来控制。因此，现代柴油发动机比相同尺寸大小的SI发动机昂贵得多，而效率更高。

最近，人们对均质充量压缩着火（HCCI）燃烧产生了很大兴趣。在HCCI发动机中，燃料和空气与在SI发动机中一样完全预混合，但是类似在SI发动机中的爆震一样通过自燃释放热量。HCCI发动机的热效率非常高，但由于在较浓的当量比下压力升高率过高，因此它们仅限于在低负荷（即稀混合气强度）下运行。在较低负荷下摩擦损失成比例地增加，并且HCCI发动机在其可以运行的负荷下的制动效率将更低。较大的混合气或温度分层可以提高HCCI发动机的上限负荷，但由于混合气不均匀，这种发动机不应该被称为HCCI发动机。HCCI发动机被限制在低负荷下运行，碳烟和NO_x水平非常低。在柴油和SI发动机中，分别通过主要燃料喷射时刻和火花点火时刻来控制循环内的放热相位。这种循环内控制在HCCI燃烧中不可能完成，这使其在实际发动机中难以实现。如果通过最终燃料脉冲的晚喷获得一定程度的不均匀性/分层，则可以恢复控制循环内的燃烧，获得类似HCCI的燃烧，其燃料和空气“充分预混合”以实现低的碳烟和NO_x排放。汽油压缩点火（GCI）和反应活性控制压缩点火（RCCI）正是两种这样的方法，将在下文讨论。

GCI等新技术的发展需要所有利益相关方（包括汽车和石油行业以及政府）之间的合作，并受到交通能源供需等战略问题的影响。

3. 未来发展

目前改善内燃机的努力集中于使用现有的市场燃料。这显然是必不可少的，因为在市场上同时更换燃料和发动机非常困难。

目前正在进行重大改进以将SI发动机的效率提高到几乎达到柴油发动机的水平[21–25]。例如，美国市场上最佳乘用车的燃油消耗量已经比类似尺寸、性能的车型的平均值低约16%[21]。正在开发的技术方法包括稀薄燃烧、小型化和涡轮增压，以及使用市售汽油的CI[24,25]。许多支持技术也正在开发[21–23]，以确保这些高效率发动机满足严格的废气排放要求。部分预混压缩点火（PCI）的汽油直喷压缩点火（GDCI）发动机已经证明了使用美国市场汽油达到类似柴油机效率[24]。与2015年使用SI发动机的车队平均值相比，预计独立的燃烧系统开发将降低LDV中约30%的燃料消耗[21–23]。通过轻量化和混动等其他技术，这一改善可达到约50%。随着燃料消耗的减少，内燃机的GHG排放将按比例减少，同时减少可再生电力运行的BEV在温室气体排放方面的一些优势。

同样将继续开发后处理系统以减少排放污染物，如颗粒物、NO_x、CO和HC [26–28]。例如，现代柴油微粒过滤器（DPF）和汽油微粒过滤器几乎完全消除了内燃机废气中的微粒[27,28]。现代汽车中的预热催化剂几乎可以将废气中的HC排放降至零，当然远低于许多城市地区的环境空气水平[26]。通过现代化的排气催化剂和燃烧温度与模式的智能管理，即使柴油机中的NO_x排放水平也可以降至2020年欧洲限值1/10的水平[28]。

3.1. 短期内对燃料的影响

发动机燃烧系统的发展也对燃料有影响。例如，SI发动机的设计趋势是在一个给定的未燃烧气体温度下增加气缸中的压力，以便提高功率密度和效率。这使得在末端的混合气更有可能发生自燃，导致爆震。高抗爆燃料将有助于避免爆震并能提高SI发动机的效率。为了实现高效率的SI发动机，增加汽油的抗爆性能的需求将会增加。例如，有建议[29]到2040年美国所有汽油的RON应该大于98，而目前美国常规最常用汽油的RON约为92。这种变化是否会带来温室气体减排方面的好处需要在生命周期的基础上进行评估，对于不同的炼油厂配置，答案可能会有所不同。RON的增加将需要炼油厂进行更大的改造和投资，并将使石脑油等低辛烷值汽油组分的可用性进一步增加[10,11]，因为将它们混合到汽油中的概率将减少。高辛烷值组分如乙醇、MTBE、二异丁烯和甲醇的重要性也将增加。

在这样的现代发动机中应该如何定义燃料的抗爆性是一个重要的问题[14,19,20]，因为这个定义对燃料的

制造有重大影响，这样定义是为了满足汽油抗爆标准。目前，RON和MON定义了汽油的抗爆性。根据美国材料与试验协会（ASTM）制定的测试程序，在一台单缸多燃料研究（CFR）发动机中比较汽油与异辛烷和正庚烷的混合物[称为主要参考燃料（PRF）]来检测汽油的RON和MON。对于实际燃料，RON高于MON，它们之间的差值称为灵敏度S。与RON测试相比，MON测试在更高的进气温度下运行，并且在MON测试中，在给定未燃烧混合物温度下的压力要低于RON测试中在给定未燃烧混合物温度下的压力。实际汽油中含有芳烃、烯烃和含氧化合物，与用于定义RON和MON值的PRF相比，实际汽油在化学动力学方面对压力升高的反应大有不同。与PRF相比，实际燃料在MON测试条件下更容易发生自燃和爆震。然而，SI发动机已经不采用MON测试条件，因为设计者通过增加发动机中空气的质量（压力）而不是过多地增加未燃烧气体温度来提高效率和功率密度[19,30]。实际上，对于一个给定的RON值，较低MON值的燃料（即对特定RON值且具有较高灵敏度的燃料）在现代发动机中具有更好的抗爆性能[14,19,20]。然而，在包括美国和欧洲在内的许多地区，MON被认为有利于抗爆，也就是说，高MON值被认为是可取的。随着发动机设计者力求进一步提高发动机的效率，规格和发动机要求之间的不对称将会扩大并且必须要得到解决。一种方法是利用基于甲苯/正庚烷混合物（甲苯参考燃料，TRF）的辛烷值度量尺度替换基于PRF的辛烷值度量尺度。燃料的辛烷值将利用RON测试进行测试，并指定一个甲苯值（TN），TRF中甲苯的体积百分比与爆震时的测试燃料相匹配[31]。至少，仅仅使用RON测试指定汽油抗爆性的国家（如日本）不应引入最低MON规格。

由于SI发动机继续寻求更高的效率，除了爆震之外，传统的与燃料有关的问题如火花点火、火焰发展、沉积物形成与控制[12]以及污染物形成将继续变得越来越重要。燃料制造商一直面临着降低汽油和柴油中硫含量的压力，以保证有效的后处理系统。燃料添加剂[12,32]通常用于控制燃料系统中的沉积物。

如果发动机不限于使用现有的市场燃料，那么价格合理且高效的新型的燃料/发动机系统有着更大的开发潜力，这些新型的燃料/发动机系统可以满足对GHG和当地空气质量日益严格的要求。当然，这种转变需要汽车和石油行业与其他利益相关者之间的合作，并且有可能在中长时期内实现。下面讨论其中的一些可能性。

3.2. 汽油压缩点火

这一部分大量借鉴了最近一篇关于GCI的综述[33]，该综述还列有更全面的相关文件清单。

柴油发动机由于其较高的热效率而产生较低的GHG，然而，它们日益引起了人们对微粒和NO_x排放的关注。在大多数工况条件下，柴油燃料在喷入后在它有机会与汽缸中的氧气充分混合之前就很快地被点燃并在准稳态喷射扩散火焰[34]中燃烧。如果燃烧中的局部混合物的当量比 ϕ 不大于2 [34]，则可以最大限度地减少碳烟的形成。如果燃烧温度保持在2200 K左右，通常通过在实际发动机中使用废气再循环（EGR）[34,35]，可以最大限度地减少NO_x的形成。

大部分生成的碳烟在柴油发动机内被氧化。如果增加EGR水平以控制NO_x生成，则汽缸中的氧含量和温度都会降低。随后碳烟氧化减少，若碳烟已经形成，则发动机排出的颗粒物（PM）或碳烟增加，导致柴油发动机中众所周知的PM / NO_x折中关系。如果在燃烧开始之前燃料和氧气充分混合，可以减少或避免碳烟形成。然后可以使用EGR控制NO_x排放而不增加发动机碳烟的排放。然而，这种燃烧系统增加了发动机HC和CO的排放，必须通过适当的后处理来控制。

在燃烧开始之前必须充分完成燃料的喷射，以避免碳烟的形成。参考文献[36]定义了避免碳烟形成的部分预混燃烧（PPC）或PCI两种燃烧模式，它们在燃烧开始之前充分完成燃料的喷射，以确保发动机排出的碳烟值（FSN）低于0.05。与PPC相关的时间常数是点火停留， $IDW = SOC - EOI$ ，其中SOC和EOI分别是燃烧开始时和燃料喷射结束时的曲轴转角。在PPC中IDW必须为正数。

当使用柴油燃料时，在给定的工况条件下可以通过减小喷射脉冲宽度和增加喷射压力加速混合的方式来促进PPC燃烧。如果使用柴油燃料，即使是现代喷射系统，PPC也只能在低负荷下运行，并且NO_x和颗粒排放必须由传统柴油发动机中复杂的后处理系统控制。在柴油发动机中，整体混合气浓度低于化学计量比，发动机排气总是含有氧气，在富氧环境中减少NO_x非常困难。可以通过复杂的后处理技术来解决使用柴油燃料带来的问题，这使得现代柴油发动机变得昂贵。减少污染物排放的策略也会增加燃料的消耗。例如，当低负荷下排气温度低时，DPF积聚碳烟，必须使用额外的燃料燃烧积累的碳烟再生DPF。

Kalghatgi等[37,38]已经证明，在一台单缸重型发动

机中，如果使用具有更强抗自燃性（相对柴油而言）的类汽油燃料，则可以获得极低的碳烟和NO_x排放。这就是GCI，GCI是实现类HCCI燃烧的更实用的方法。重要的区别是与HCCI发动机不同，在GCI中，燃料和空气没有完全预混合。通过最后一次燃料喷射的时间（当使用多次喷射时），可以像在柴油发动机中那样在循环中控制燃烧相位。这就保证汽缸内存在足够的不均匀性以确保即使在发生自燃的工况条件下也开始自燃，因此HCCI燃烧是（如低负荷工况下）不可能的。因此，在GCI中，虽然燃料和空气“足够”预混合以确保低碳烟或没有碳烟形成，但它们没有完全预混合。其他几个研究小组也证明，如果通过使用具有更强抗自燃性的类汽油燃料来获得更多的混合时间，则CI发动机中颗粒和NO_x排放的控制变得更容易[24,39–56]。

3.2.1. GCI 发动机的优点

GCI发动机中的喷射系统应该比现代柴油发动机廉价，因为GCI发动机不需要高喷射压力。事实上，在这种发动机中，较低的喷射压力可以提高低负荷工况下燃烧的稳定性，可能是因为增加了混合的不均匀性[33,48,51]。在GCI发动机中，后处理的重点从碳烟和NO_x的同时控制转变为HC和CO的氧化。一台GCI发动机如柴油发动机一样，整体运行在稀薄工况下，排气中也将含有氧气，因此，CO和HC的氧化应该比减少NO_x更容易实现。可能需要DPF来应对GCI发动机高负荷下的较高碳烟排放。然而，GCI发动机在低负荷下不会形成碳烟，并且DPF不会累积碳烟；如果有的话，DPF也不需要经常再生。尽管可能在高负荷下形成碳烟，但因为排气温度也许足够高，DPF主要是自再生的，而不需要额外的燃料。因此，GCI发动机中的后处理系统可以比现代柴油发动机更简单、廉价。

已经证明GCI发动机具有非常高的效率。在重型发动机中测得的燃油热效率高达56%[39]。与在SI模式下的汽油发动机相比，轻型发动机在一个运行周期内的燃油消耗可降低25%或更多[24,45,46]。与传统的柴油机相比，轻型发动机可以进一步提高效率。例如，在使用柴油燃料的轻型柴油发动机中，噪声是低负荷工况下的主要问题，因为燃烧是通过浓混合物中的自燃引发的。即使在燃烧之前完成燃料喷射也是如此，因为柴油燃料的滞燃期（ID， $ID = SOC - SOI$ ，SOI是喷射开始时的曲轴转角）较短[48,51,52]。在现代柴油发动机中，采用预喷来提高温度，以促进主喷燃料更多地扩散燃烧来降低

噪声,然而,这样做会导致效率降低和碳烟量增加,从而增加DPF的负担。通过使用具有高滞燃期(ID)的燃料可以避免这种负面结果,因为自燃发生在比柴油燃料更稀薄的混合物中,在低负荷时压力升高率非常低[33,48,51],同时发动机噪声很低,并且不需要引燃喷射。对于给定的转速,在更高的负荷下,GCI与柴油发动机相比可以控制碳烟和NO_x的生成,并且在给定工况循环下,可以减小发动机的尺寸来满足要求。由于较低的喷射压力会减少附加损失,且DPF的再生频率较低,所以可能带来效率方面的其他好处。如果使用的燃料比传统柴油或汽油的加工量少,那么在整体能源消耗和制造燃料过程中产生的温室气体减排方面将会有额外的改善。

3.2.2. GCI 发动机的燃料要求

使用的燃料不需要具有高RON,低辛烷值组分如石脑油可以用于制造该燃料而不需要在炼油厂中做太多额外的处理,并且石脑油未来将十分丰富。高RON使得在极低负荷下难以确保和控制燃烧,然而如果RON太低,燃烧将更类似于柴油燃料的燃烧,并且在较高负荷下同时控制NO_x和碳烟将变得困难。基于在参考文献中压缩比为16的小型单缸发动机中进行的实验,建议燃料最佳的RON在75~85之间[51]。基于重型CI发动机的实验,对于GCI发动机而言,最佳RON被认为是在“70的范围”内[39]。

如果ID或RON足够高,即使燃料含有柴油沸程范围内相对不挥发的成分,低碳烟和低NO_x的运行工况依旧可以实现[36,52]。挥发性范围非常宽广的燃料,如柴油和汽油的混合物,可能会使燃料更加分层,实际上扩大了GCI发动机的运行工况范围[53]。由于对挥发性的要求较低,可以使炼油厂的运营更加灵活,只要解决安全因素,如闪点要求,就可以将较重的柴油组分与汽油组分混合来制造GCI发动机燃料。但是,如果柴油沸程中组分的体积浓度小于50%,则对这种混合物的闪点和可燃性几乎没有任何影响[57,58]。用于GCI发动机的汽油/柴油混合物可能需要25%或更少来自柴油沸程范围内的组分,并且应该与目前的市场汽油一样安全[57,58]。与传统汽油相比,低辛烷值汽油由于其在制造过程中较低的能耗和较高的氢/碳比(H/C)而具有较低的碳足迹,因为低辛烷值汽油中有更多的石蜡。在这个良好的基础,与使用汽油RON高得多的同等SI发动机相比,使用燃料RON为70的GCI发动机可以使GHG

降低约30%[49,50],这种发动机对温室气体的影响比同等柴油发动机低约5%,其改善效果来自于燃料制造的工程中。

3.2.3. 挑战和需要的开发工作

在过去十年中对这一主题进行了大量研究,此概念已得到充分阐明,并确定了挑战。开发工作对于在实际车辆中实施GCI技术至关重要。冷启动和怠速工况、合适的瞬态工况、合适的排放控制(特别是HC和CO)、低负荷工况稳定性以及高负荷和中等负荷下的压力升高率/噪声控制都需要进行研究。需要开发硬件来优化燃烧室、EGR系统、喷射器、涡轮增压器/机械增压器、后处理系统和喷射策略,以满足排放、效率、噪声和稳定性所需的要求。理想情况下,这些优化应该适用于已知RON和挥发性特征的特定燃料,但是如果有适当的控制,可以使发动机承受燃料特性的微小变化。目前开发的是使用市场汽油的GCI发动机[24,25,46],然而如上所述,使用RON约为70的低辛烷值汽油将带来更多的优势。正如参考文献[10,11]中介绍的,这种燃料在挥发性和组成成分方面需要更加充分地规定说明,以使其能够进行实际的生产制造。燃油应具有足够的润滑性以保护喷射系统和足够的去污能力以保持喷射系统清洁,这就需要使用适当的燃料添加剂。增加润滑性的一种方法是向燃料混合物中添加少量生物柴油,如脂肪酸甲酯(FAME)。

开发工作不需要任何全新的技术;相反,它需要适应现有技术。这样的调整实际上将通过诸如更简单的后处理系统和更低的喷射压力来简化现有的柴油机技术。开发GCI技术与在使用柴油燃料时为满足柴油发动机中的NO_x和微粒排放标准而已经实现的开发技术中遇到的挑战相比是简单有利的。

GCI可以被视为降低CI(当前柴油)发动机成本而不影响效率的方法,也可以被视为通过在CI模式而非SI模式下运行来提高携带使用汽油燃料的发动机效率的方法。如果使用低辛烷值汽油,与今天汽油和柴油的制造相比,GCI燃料的制造将消耗更少的能源并且具有更低的GHG。

3.2.4. GCI 发动机的展望

由于GCI发动机使用的汽油的辛烷值比目前的市场汽油低得多(约70 RON),因此它具有类似柴油机效率的前景,它可能需要更廉价的发动机和后处理系统。这

种低辛烷值的汽油燃料可以在不需要进一步对低辛烷值汽油组分进行加工的情况下制造，这些低辛烷值汽油组分很容易获得，因为未来对柴油和航空燃料等重质燃料需求的增长速度将快于传统高辛烷值汽油。因此，GCI发动机在发动机和燃料两方面都具有优势。此外，GCI为减轻未来将会出现的汽油和中间馏分之间需求的不平衡提供了一个机会。

发动机制造商仍然在使用柴油燃料的柴油发动机技术中投资巨大。因此，在短期内——2025年前，CI发动机将继续使用柴油（CN> 40）。然而如果继续使用柴油燃料，要使发动机满足日益严格的NO_x和碳烟排放标准，这些发动机的成本可能会增加。低辛烷值汽油组分可能比低硫柴油燃料廉价得多，并可能推动GCI发动机的发展。此外，目前对柴油的魔鬼化，加上禁止柴油发动机的计划，也许为使人们接受使用一种可归类为“汽油”的燃料提供了更好的政策环境。

许多利益相关者（如政策制定者、石油和汽车行业）之间的合作将需要部署如GCI一样的新的燃料/发动机系统。这种合作关系最有可能存在于利益相关者的关系更容易协调的国家（如中国），或在现有柴油技术方面的保障相对薄弱的国家，以及由于中间馏分油和汽油之间的预期需求不平衡开始占据主导地位而使低辛烷值汽油比低硫价格低得多的国家。

GCI发动机必须首先使用现有的市场燃料。尽管目前正在开发可以使用市场汽油的系统，但GCI的潜在燃料可能是汽油/柴油混合物（即汽柴油）[59]，尽管它的辛烷值低于市场汽油[24,46]。

GCI发动机非常适合作为并联式混合动力系统的一部分，可以在合适的狭窄工况范围内工作。在串联混合动力系统中，它也可以运行在特定的工况条件下，为电池充电。通过使用基于缸压的控制系统控制燃烧相位，使GCI发动机对燃料的自燃特性不敏感，因此GCI发动机的部署更容易，且其燃料更易于从传统燃料转向低辛烷值汽油。在GCI中继续使用市场汽油或汽油/柴油的混合物是不太理想的，因为在炼油厂中“升级”后，汽油和柴油都将在车辆中“降级”。生产低辛烷值汽油需要较少的能源，并有助于进一步减少对总体GHG的影响。有可能在2030年之后，CI发动机可以长期使用低辛烷值汽油（RON在70~85范围内），且对这些低辛烷值汽油的挥发性要求很宽松。过渡到长期情景将取决于许多因素，包括原始设备制造商（OEM）采用的发展战略。新型发动机理念如Achates对置活塞发动机也许会比较

适合运行GCI模式[60]。德尔福GDICI [24,46]和马自达SkyActiv [25]遵循GCI模式的原则，但它们使用的是市场汽油。

3.3. 反应性控制压缩点火

GCI发动机中对燃料的自燃性或ID的要求随发动机中压力和温度的变化而变化。例如在低负荷时，在自然着火很困难的情况下，低ID将是有益的；而在高负荷时，碳烟排放是一个问题，理想的燃料ID较高。RCCI是满足不同工况条件下不同ID要求的一种方法[61–65]。在RCCI理念中，当气道喷入高ID的燃料，如市场汽油、乙醇[61,62]或天然气[63]，然后在上止点附近直接喷射低ID的商用柴油燃料等来触发起点。根据发动机运行工况，改变使用的两种燃料的比例，例如，当自燃很困难时，在低负荷的情况下，使用相对较多的柴油燃料。但是，使用的柴油燃料量约为正常运行循环内所用燃料总量的10%。RCCI在重型发动机中的广泛应用应有助于缓和柴油燃料需求的增长。当使用一种燃料（市场汽油）时，RCCI也可以实施到船机上，但可通过使用不同量的柴油点火改进剂来降低其ID，并通过喷入这种反应性燃料而不是柴油燃料来触发起点[64]。RCCI燃烧可以具有非常高的指示效率、近零水平的NO_x和碳烟排放，以及在大范围的发动机负荷下可接受的压力升高率和噪声[65]。RCCI需要两个燃油喷射系统，这将增加成本和复杂性。重型发动机已经非常昂贵，增加的成本按百分比计算会更小。在集中供油的情况下，也可以减少使用混合燃料的可能性。因此RCCI可能更适合商业舰队作业。

3.4. 按需辛烷值

在SI发动机中，通常只需要在发动机运行工况区域内的一小部分中使用高辛烷值[66–71]。按需辛烷值（OOD）可充分利用燃料的辛烷值。发动机带有高辛烷值和低辛烷值的燃油，并有两个燃油喷射系统。这些燃油组分可以从泵中的纯汽油分离出来[66,67]，或者可单独采购并存储在车辆上[68]。这种方法允许发动机的重新设计（如设计更高的压缩比）以提高效率分离出来[66,67]。或者在相同的压缩比下，发动机可以仅在需要的一段时间里使用高辛烷值燃料，而在大多数工况状态下使用低辛烷值燃料。由于低辛烷值燃料具有较低的碳足迹，即使发动机压缩比没有提高，也能从整体上减少GHG [70,71]。

3.5. 减少整体 GHG 的长期方案——电燃料

电燃料可以是烃类（液态或其他态）由CO₂和氢气制成或氢气本身。如果使用可再生能源或核能制造电燃料，其GHG非常低。氢可由水的电解制成，并可用于燃料电池。然而，电燃料的生产非常耗能，且电燃料的全周期效率非常低。在一项研究中，采用电燃料路线的乘用车的全周期效率为13%，而BEV路线为73%[72]。因此，如果有足够的可再生电力，为BEV供电比使用它来制造电燃料高效得多。只有在碳价格非常高的情况下，电燃料才具有商业意义。此外，在任何实际时间尺度上，电燃料只能提供全球车辆能源需求的一小部分[72,73]。例如，欧盟（EU）如果使用电燃料为其公路运输提供动力，将需要比目前总发电量多1.5倍的电能源，而所有这些多出的电能源都必须是可再生的。如果可再生电力用于此目的，那么重点应该放在航空电燃料上，因为航空运输无法通过电池实际供电[8]。

由于可再生能源的间歇性，随着发电中太阳能和风能份额的增加，在不需要利用电能时将会生产越来越多的电能。通过利用这种多余的电力制造航空电燃料，可以在一定程度上减少航空领域的GHG。

4. 结论

虽然可能存在区域差异，但以下结论与全球运输相关，在未来其增长将由印度和中国等非OECD国家主导。

- 对运输能源的需求非常大且不断增长。未来几十年，运输将继续主要由使用石油基燃料的内燃机提供动力，因为内燃机替代品的的基础非常薄弱，并面临着快速无限制增长的重大障碍。过早地对现有系统进行强行的改变将会带来严重的环境、经济和社会不可持续性后果。
- 为了保持或者提高运输领域的可持续性，必须提高内燃机的效率，改善它对环境的影响。
- 预计全球对柴油和航空燃料（中间馏分油）需求量的增长速度将超过汽油。随着更多的石油被加工以满足对中间馏分需求量的增加，低辛烷值汽油组分（即石脑油）的实用性可能增加。未来的发动机应使用石脑油等燃料成分，这些燃料成分可能比柴油更容易获得并且更廉价，这样做能保持燃料制造的可持续性，同时也为消费者带来了效益。
- 通过改进燃烧系统、控制系统和后处理系统，以

轻质材料实现轻量化，以混动的形式实现部分电气化，利用现有的市场燃料同样可以显著改善效率。例如，与目前美国SI发动机的平均效率相比，这些改进措施可以使效率提高50%，通过使用更好的催化剂以及对温度和燃烧模式进行智能管理，柴油发动机的颗粒物和NO_x等污染物排放可降低到可忽略的水平。这些改进也可能需要对燃料进行改变。例如，在许多含硫量高的市场燃料中，必须降低其含硫量，以便保证更有效的后处理。可能需要提高燃料抗爆性以提高SI发动机的效率，但是必须要在生命周期的基础上对任何可能的收益进行评估。在许多领域里都认为，设备规格更高的MON更有利于提高燃料的抗爆性能。这些规格需要进行改变，以符合现代高效发动机的要求。

- 如果发动机不受限于使用当前的市场燃料，将会有更大的改进余地；开发新型的燃料/发动机系统可以额外地利用生产燃料过程中的效益并且可以使用更易获得的燃料组分。
- 燃烧低辛烷值汽油的GCI发动机是一个有利的未来燃料/发动机系统。GCI发动机可以更轻松地减少NO_x和颗粒物的排放，同时实现类似于柴油机的效率。未来它可能会使用多余的燃料成分，使得GCI发动机更廉价。RCCI和OOD可以使用现有的市场燃料，但在未来同样也可以使用低辛烷值汽油。
- 完全从运输领域消除GHG将需要对可再生能源发电进行大规模（或许不可持续）投资，同时使用这种电力来制造氢气等电燃料。然而此路线非常耗能。如果有足够的可再生电力，它最适合用于驱动电动汽车，但这将产生与电池制造相关的自身环境问题，并且将对充电基础设施的建设提出巨大挑战。尽管如此，随着可再生能源在电力领域中的份额的增加，且由于风能和太阳能的间歇性，将会获得更多额外的电能。这种额外的电能可以用于制造电燃料，以减少航空运输对GHG的影响，在可预见的未来，航空运输将继续依赖内燃机提供动力。

Compliance with ethics guidelines

Gautam Kalghatgi and Saudi Aramco declare that they

have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

缩写词

ASTM	美国材料与试验协会
BEV	电池电动汽车
CFR	多燃料研究
CI	压缩点火
CO	一氧化碳
DCN	导出十六烷值
DPF	柴油微粒过滤器
EGR	废气再循环
EOI	喷油结束
EU	欧盟
FSN	滤烟值
GCI	汽油压燃
GHG	温室气体
GPF	汽油颗粒过滤器
HC	未燃烧的碳氢化合物
HCCI	均质充量压缩着火
ICE	内燃机
ID	点火延迟
IDW	点火停留
LPG	液化石油气
MON	马达法辛烷值
NO _x	氮氧化物
OOD	按需辛烷值
PPC	部分预混燃烧
RCCI	反应活性控制压缩点火
RON	研究法辛烷值
S	灵敏度
SI	火花点火
SOC	燃烧开始
SOI	喷油开始
SRG	直馏汽油

References

- [1] The number of cars worldwide is set to double by 2040 [Internet]. San Francisco: World Economic Forum; c2019 [updated 2016 Apr 22; cited 2018 Jun 12]. Available from: <https://www.weforum.org/agenda/2016/04/the-number-of-cars-worldwide-is-set-to-double-by-2040>.
- [2] Exxon Mobil Corporation. 2017 outlook for energy: a view to 2040. Report. Irving: Exxon Mobil Corporation; 2017.
- [3] World Energy Council. Global transport scenarios 2050. Report. London: World Energy Council; 2011.
- [4] Organization of the Petroleum Exporting Countries. 2013 world oil outlook. Report. Vienna: OPEC Secretariat; 2013.
- [5] Sims R, Schaeffer R, Creutzig F, Cruz-Núñez X, D'Agosto M, Dimitriu D. Transport. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kdner S, Seyboth K, editors. Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press; 2014.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Key facts and findings [Internet]. Rome: FOA; c2019 [cited 2019 Mar 3]. Available from: <http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode/>.
- [7] US Energy Information Administration (EIA). International energy outlook 2016. Report. Washington, DC: EIA; 2016.
- [8] Kalghatgi G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Appl Energy* 2018;225:965–74.
- [9] BP p.l.c. Statistical review of world energy [Internet]. London: BP p.l.c.; c1996–2019 [cited 2018 Jun 12]. Available from: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>.
- [10] Kalghatgi G, Gosling C, Weir MJ. The outlook for transport fuels: part 1. *Petrol Technol Quart* 2016;Q1:23–31.
- [11] Kalghatgi G, Gosling C, Weir MJ. The outlook for transport fuels: part 2. *Petrol Technol Quart* 2016;Q2:17–23.
- [12] Kalghatgi G. The outlook for fuels for internal combustion engines. *Int J Engine Res* 2014;15(4):383–98.
- [13] Kalghatgi G. Petroleum-based fuels for transport. *J Auto Safe Energy* 2015;6(1):1–16.
- [14] Kalghatgi G. Developments in engine combustion systems and implications for combustion science and future transport fuels. *Proc Combust Inst* 2015;35:101–15.
- [15] Kalghatgi G. Fuel/engine interactions. Warrendale: SAE International; 2013.
- [16] Richards P. Automotive fuels reference book. 3rd ed. Warrendale: SAE International; 2014.
- [17] Stone R. Introduction to internal combustion engines. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan; 2012.
- [18] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw Hill Book Co.; 1988.
- [19] Kalghatgi G. Auto-ignition quality of practical fuels and implications for fuel requirements of future SI and HCCI engines. SAE Technical Paper 2005-2005-01-0239.
- [20] Kalghatgi G. Knock onset, knock intensity, superknock and preignition in SI engines. *Int J Engine Res* 2018;19(1):7–20.
- [21] Miles P. Potential of advanced combustion for fuel economy reduction in the light-duty fleet. In: Proceedings of the SAE High-Efficiency IC Engine Symposium; 2018 April 8–9; Detroit, MI, USA; 2018.
- [22] US Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability (DRIVE). Advanced combustion and emission control roadmap. Report. US DRIVE; 2018.
- [23] US Nuclear Regulatory Commission (NRC). Cost, effectiveness, and deployment of fuel economy technologies for light-duty vehicles [Internet]. Washington, DC: NRC; c2019 [cited 2018 Jun 17]. Available from: <https://www.nap.edu/read/21744/chapter/2#3>.
- [24] Sellnau M, Hoyer K, Moore W, Foster M, Sinnamon J, Klemm W. Advancement of GDCl engine technology for US 2025 CAFE and tier 3 emissions. SAE Technical Paper 2018-2018-01-0901.
- [25] MAZDA. Skyaktiv technology [Internet]. Hiroshima: MAZDA; c2018 [cited 2018 Apr 8]. Available from: <http://www.mazda.com/en/innovation/technology/skyactiv/skyactiv-g/>.
- [26] Johnson T, Joshi A. Review of vehicle engine efficiency and emissions. *SAE Int J Engines* 2018;11(6):1307–30.
- [27] Association for Emission Control by catalysts (AECC). Gasoline particulate filter (GPF)—how can the GPF cut emissions of ultrafine particles from gasoline engines? Report. Brussels: AECC; 2017.
- [28] Kufferath A, Krüger M, Naber D, Mailänder E, Maier R. The path to a negligible NO₂ emission contribution from the diesel powertrain. Detroit: Crain Communications, Inc.; [cited 2018 May 22]. Available from: <http://www.autonews.com/assets/pdf/bosch-nox-report.pdf>.
- [29] Chow E, Heywood J, Speth R. Benefits of a higher octane standard gasoline for the US light-duty vehicle fleet. SAE Technical Paper 2014-2014-01-1961.
- [30] Mittal V, Heywood JB. The shift in relevance of fuel RON and MON to knock onset in modern SI engines over the last 70 years. *SAE Int J Engines* 2010;2(2):1–10.
- [31] Kalghatgi G, Head R, Chang J, Viollet Y, Babiker H, Amer A. An alternative method based on toluene/n-heptane surrogate fuels for rating the anti-knock quality of practical gasolines. *SAE Int J Fuel Lubr* 2014;7(3):663–72.
- [32] Fuel additives: uses and benefits [Internet]. Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers (ATC); [cited 2018 Jun 20]. Available from: <https://www.atc-europe.org/public/Doc113%202013-10-01.pdf>.
- [33] Kalghatgi G, Johansson B. Gasoline compression ignition (GCI) approach to efficient, clean, affordable future engines. *Proc Inst Mech Eng* 2018;232(1):118–38.
- [34] Dec JE. Advanced compression ignition engines—understanding the incylinder processes. *Proc Combust Inst* 2009;32(2):272–42.

- [35] Kamimoto T, Bae M. High combustion temperature for the reduction of particulate in diesel engines. SAE Technical Paper 1988:880423.
- [36] Kalghatgi G, Hildingsson L, Harrison AJL, Johansson B. Surrogate fuels for premixed combustion in compression ignition engines. *Int J Engine Res* 2011;12(5):452–65.
- [37] Kalghatgi G, Risberg P, Ångström HE. Advantages of a fuel with high resistance to auto-ignition in late-injection, low-temperature, compression ignition combustion. SAE Technical Paper 2006:2006-01-3385.
- [38] Kalghatgi G, Risberg, P, Ångström HE. Partially pre-mixed auto-ignition of gasoline to attain low smoke and low NO_x at high load in a compression ignition engine and comparison with a diesel fuel. SAE Technical Paper 2007:2007-01-0006.
- [39] Manente V, Johansson B, Canella W. Gasoline partially premixed combustion, the future of internal combustion engines? *Int J Engine Res* 2011;12 (3):194–208.
- [40] Hanson R, Splitter D, Reitz R. Operating a heavy-duty direct-injection compression-ignition engine with gasoline for low emissions. SAE Technical Paper 2009:2009-01-1442.
- [41] Cracknell RJ, Rickeard DJ, Ariztegui J, Rose KD, Meuther M, Lamping M, et al. Advanced combustion for low emissions and high efficiency: part 2—impact of fuel properties on HCCI combustion. SAE Technical Paper 2008:2008-01-2404.
- [42] Wang B, Wang Z, Shuai S, Xu H. Combustion and emission characteristics of multiple premixed compression ignition (MPCI) mode fuelled with different low octane gasolines. *Appl Energy* 2015;160:769–76.
- [43] Weall AJ, Collings N. Investigation into partially premixed combustion in a light duty multi cylinder diesel engine fuelled with a mixture of gasoline and diesel. SAE Technical Paper 2007:2007-01-4058.
- [44] Zhang F, Zeraati Rezaei S, Xu H, Shuai S. Experimental investigation of different blends of diesel and gasoline (dieseline) in a CI engine. *SAE Int J Engines* 2014;7(4):1920–30.
- [45] Chang J, Viollet Y, Amer A, Kalghatgi G. Fuel economy potential of partially premixed compression ignition (PPCI) combustion with naphtha fuel. SAE Technical Paper 2013:2013-01-2701.
- [46] Sellnau M, Foster M, Hoyer K, Moore W, Sinnamon J, Husted H. Development of a gasoline direct-injection compression ignition (GDICI) engine. *SAE Int J Engines* 2014;7(2):835–51.
- [47] Chang J, Kalghatgi G, Amer A, Adomeit P, Rohs H, Heuser B. Vehicle demonstration of naphtha fuel achieving both high efficiency and drivability with EURO6 engine-out NO_x emission. *SAE Int J Engines* 2013;6(1):101–19.
- [48] Kalghatgi G, Gurubaran K, Davenport A, Harrison AJ, Taylor AKMF, Hardalupas Y. Some advantages and challenges of running a EuroIV, V6 diesel engine on a gasoline fuel. *Fuel* 2013;108:197–207.
- [49] Lu Z, Han J, Wang M, Cai H, Sun P, Dieffenthaler D, et al. Well-to-wheels analysis of the greenhouse gas emissions and energy use of vehicles with gasoline compression ignition engines on low octane gasoline-like fuel. *SAE Int J Fuel Lubr* 2016;9(3):527–45.
- [50] Hao H, Liu F, Liu Z, Zhao F. Compression ignition of low-octane gasoline: life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions. *Appl Energy* 2016;181:391–8.
- [51] Hildingsson L, Kalghatgi G, Tait N, Johansson B, Harrison A. Fuel octane effects in the partially premixed combustion regime in compression ignition engines. SAE Technical Paper 2009:2009-01-2648.
- [52] Kalghatgi G, Hildingsson L, Johansson B, Harrison AJ. Low-NO_x, low-smoke operation of a diesel engine using “premixed enough” compression ignition—effects of fuel autoignition quality, volatility and aromatic content. In: *Proceedings of the THIESEL 2010, Thermo and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines*; 2010 Sep 14–17; Valencia, Spain; 2010.
- [53] Won HW, Pitsch H, Tait N, Kalghatgi G. Some effects of gasoline and diesel mixtures on partially premixed combustion and comparison with practical fuels, gasoline and diesel, in a diesel engine. *Proc Inst Mech Eng* 2012;226 (9):1259–70.
- [54] Kolodziej C, Ciatti SA, Kodavasal J, Som S, Shidore N, Delhom J. Achieving stable engine operation of gasoline compression ignition using 87 AKI gasoline down to idle. SAE Technical Paper 2015:2015-01-0832.
- [55] Viollet Y, Chang J, Kalghatgi G. Compression ratio and derived cetane number effects on gasoline compression ignition engine running with naphtha fuels. *SAE Int J Fuel Lubr* 2014;7(2):412–26.
- [56] Zhang Y, Kumar P, Traver M, Cleary M. An experimental and computational investigation of gasoline compression ignition using conventional and higher reactivity gasolines in a multi-cylinder heavy-duty diesel engine. SAE Technical Paper 2018:2018-01-0226.
- [57] Al-Abdullah MH, Kalghatgi G, Babiker H. Flash points and volatility characteristics of gasoline/diesel blends. *Fuel* 2015;153:67–9.
- [58] Algunaibet I, Voice AK, Kalghatgi G, Babiker H. Flammability and volatility attributes of binary mixtures of some practical multi-component fuels. *Fuel* 2016;172:273–83.
- [59] Xu H. Present and future of premixed compression ignition engines. *Auto Safe Energy* 2012;3(3):185–99.
- [60] Redon F, Ciatti S. OPGCI: an evolution that revolutionizes the internal combustion engine [Internet]. San Diego: Achates Power, Inc.; c2018 [cited 2018 Jun 20]. Available from: <http://achatespower.com/opgci-an-evolutionthat-revolutionizes-the-internal-combustion-engine/>.
- [61] Splitter D, Hanson R, Kokjohn S, Reitz R. Reactivity controlled compression ignition (RCCI) heavy-duty engine operation at mid-and high-loads with conventional and alternative fuels. SAE Technical Paper 2011:2011-01-0363.
- [62] Kaddatz J, Andrie M, Reitz R, Kokjohn S. Light-duty reactivity controlled compression ignition combustion using a cetane improver. SAE Technical Paper 2012:2012-01-1110.
- [63] Nieman DE, Dempsey AB, Reitz R. Heavy-duty RCCI operation using natural gas and diesel. In: *Proceedings of the SAE World Congress Experience 2012*; 2012 Apr 24–26; Detroit, MI, USA; 2012.
- [64] Splitter D, Reitz R, Hanson R. High efficiency, low emissions RCCI combustion by use of a fuel additive. *SAE Int J Fuel Lubr* 2010;3(2):742–56.
- [65] Kokjohn SL, Hanson RM, Splitter DA, Reitz RD. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion. *Int J Engine Res* 2011;12(3):209–26.
- [66] Partridge RD, Weissman W, Ueda T, Iwashita Y, Johnson P, Kellogg G. Onboard gasoline separation for improved vehicle efficiency. *SAE Int J Fuel Lubr* 2014;7 (2):366–78.
- [67] Kuzuoka K, Kurotani T, Chishima H, Kudo H. Study of high compression ratio engine combined with an ethanol gasoline fuel separation system. *SAE Int J Engines* 2014;7(4):1773–80.
- [68] Chang J, Viollet Y, Alzubail A, Abdul-Manan A, Arfaj A. Octane-on-demand as an enabler for highly efficient spark ignition engines and improvement of greenhouse gas emissions. SAE Technical Paper 2015:2015-01-1264.
- [69] Morganti KJ, Alzubail A, Al-Abdullah M, Viollet Y, Head R, Chang J, et al. Improving the efficiency of conventional spark-ignition engines using octane-on-demand combustion. Part I: engine studies. SAE Technical Paper 2016:2016-01-0679.
- [70] Morganti KJ, Alzubail A, Al-Abdullah M, Viollet Y, Head R, Chang J, et al. Improving the efficiency of conventional spark-ignition engines using octane-on-demand combustion. Part II: vehicle studies and life cycle analysis. SAE Technical Paper 2016:2016-01-0683.
- [71] Morganti K, Al-Abdullah M, Alzubail A, Kalghatgi G, Viollet Y, Head R, et al. Synergistic engine-fuel technologies for light-duty vehicles: fuel economy and greenhouse gas emissions. *Appl Energy* 2017;208:1538–61.
- [72] E-fuels too inefficient and expensive for cars and trucks, but may be part of aviation's climate solution—study [Internet]. Brussels: Transport&Environment; [cited 2018 Apr 8]. Available from: <https://www.transportenvironment.org/press/e-fuels-too-inefficient-and-expensive-cars-and-trucks-may-be-partaviations-climate-solution-%E2%80%9393>.
- [73] Malins C. What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future? Report. Brussels: Transport & Environment; 2017 Nov.