



# Vehicle Carbon Neutral Path Analysis

Xin Chen

College of Automotive and Transportation, Xihua University, Chengdu, China  
Email: 1748277436@qq.com

**How to cite this paper:** Chen, X. (2025)  
Vehicle Carbon Neutral Path Analysis. *Open Access Library Journal*, 12: e13809.  
<https://doi.org/10.4236/oalib.1113809>

**Received:** June 20, 2025

**Accepted:** June 29, 2025

**Published:** July 2, 2025

Copyright © 2025 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

With the formulation of the “double carbon” target, the transportation industry has become an important part of the low carbon field, and the “decarbonization” target of the automobile industry has become imperative. This paper focuses on the automobile carbon neutrality, discusses the areas of automobile carbon footprint, and analyzes the path of automobile carbon neutrality. With the technical support and policy encouragement of the government, automobile enterprises in various countries promote the automobile to achieve the carbon peak and carbon neutral target at present. This article explains the three paths of automobile lightweighting and green internal combustion engine materials for new energy vehicles to explain the technological updates and industry development of automobile energy conservation and emission reduction and low-carbon development, providing a path reference for the goal of carbon neutrality. From those three paths, the development of the automobile industry needs higher and more perfect requirements for low-carbon technologies and low-carbon solutions in future. However, each carbon neutral path has its own barriers and needs to develop a more complete and closed-loop management application system for the path. The paper analyzes that each path brings new opportunities and challenges to the development of automobile industry to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality. Meanwhile, it has injected new impetus into the development of the automobile industry.

## Subject Areas

Transportation Engineering

## Keywords

Low Carbon Path, Lightweight, New Energy Vehicles, Green Internal Combustion Engine Fuel

## 1. 引言

随着全球经济的快速发展，气候变化问题不断突出，各个国家和各个企

业也开始发展各行业的绿色、低碳经济。随着气候不断变暖，全球气候发生灾难性变化，“双碳目标”节能环保、绿色可持续发展已成为人们所关注的热点问题。

在 2015 年 12 月通过了《巴黎协定》，该协定明确了将 21 世纪末全球平均气温控制在 2°C 之内，并力争将 1.5°C 温控目标确立为我国长期努力方向[1]。中国力争在 2060 年前完成碳中和[2]。2020 年 11 月，国务院颁布《新能源汽车产业发展计划(2021~2035 年)》，为推进我国汽车工业强国打下坚实基础[3]。

众所周知，交通运输行业一直以来都是温室气体的排放大户，对国家制定的“30•60 计划”必须做出汽车行业绿色变革和产业结构调整。汽车工业作为目前国民经济的主要产业其产业链涉及的区域不仅是生产原料，同时也是消费产品，社会各行各业都离不开汽车产品[4]。汽车行业的整体碳排放是实现汽车碳总量达峰、总量中和的关键一步。据中汽数据统计，我国 2021 年燃油汽车保有量达到了 2.32 亿辆。并且随着汽车保有量的上涨，CO<sub>2</sub> 排放达 7.02 亿吨，较 2017 年的 6.25 亿吨有明显的增加。由于汽车产业涉及的领域众多，实际的碳排放的数值还远远高于所统计出的数据。我国 CO<sub>2</sub> 在交通运输行业的碳排放量占我国 CO<sub>2</sub> 总排放量的 11%~12%，由此可见，汽车行业将面临巨大挑战[5]。汽车行业面临巨大挑战，必须调整高碳制造发展模式，推动绿色低碳技术升级。

本文旨在系统比较汽车碳中和的三条路径的轻量化、新能源动力系统和绿色燃料内燃机的减排潜力，评估其可行性，识别关键障碍，并提出综合策略。本文将从减排潜力、技术成熟度、经济成本、资源与环境影响、政策依赖度和产业化时间表等维度进行分析，并通过比较表格直观展示各路径的特点。最后，文章将探讨绿色燃料内燃机作为未来最有前景的低碳技术路径的依据。

本文通过系统性文献综述方法，筛选和分析了汽车行业碳中和路径的相关研究。文献搜索范围包括 Web of Science、Scopus、中国知网等数据库，时间跨度为 2010 年至 2025 年。

## 2. 轻量化路径优势

在如今低碳经济背景下汽车原材料选取逐渐趋向轻量化、高性能、低碳高效方向发展。数据显示，若车身质量减轻 10%，燃油消耗率可提高 6%~8%；动力电池续航能力就会增加 10%~11% [6]。因此，汽车轻量化是促进汽车“节能减排”的有效途径之一，也在一定程度上取决于汽车材料的未来发展。在汽车低碳背景下的轻量化过程中不仅仅要保证汽车在运行过程中的使用寿命、安全性而且还要保证汽车本身的可靠性。针对汽车的轻量化路径有轻量化材料、轻量化制造工艺、轻量化结构等。在汽车轻量化设计当中通过材料的合理分布、工艺实现材料性能优化、提高汽车整体结构性能和设计效率来实现汽车的轻量化，推动我国汽车行业持续健康的发展。

### 2.1. 材料轻量化

汽车轻量化是指在确保汽车强度和运行平稳性的基础上，降低汽车整体

重量[7]。马晓坤等[8]探讨了碳纤维技术在汽车上的高效成型技术和碳纤维复合材料在汽车上的应用。随着低成本碳纤维复合材料的利用机制不断完善,碳纤维复合材料是汽车节能减排提高燃油经济性的重要手段。

徐树杰等[9]借助 GREET 软件,构建原生材料与轻量化材料能耗、排放差异模型通过调整轻量化材料比例来比较传统材料与轻量化材料能耗、排放情况。由图 1 可知随着轻量化材料应用比例的升高,总能耗逐渐下降。经对比,使用轻量化材料比使用原生材料能耗减少 33%。由图 2 可知,随着轻量化应用比例的升高,三种温室气体的排放量逐渐降低。其中,CO<sub>2</sub>排放量减少 42%,N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>的排放量也有减少。此外,轻量化材料的应用范围正在不断扩大,未来有望进一步降低汽车的碳排放。

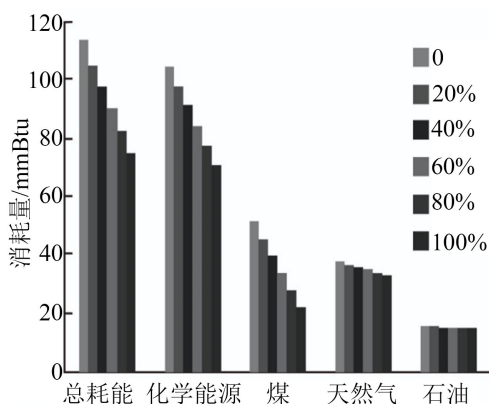


图 1. 轻量化材料应用比例对能源消耗的影响[9]

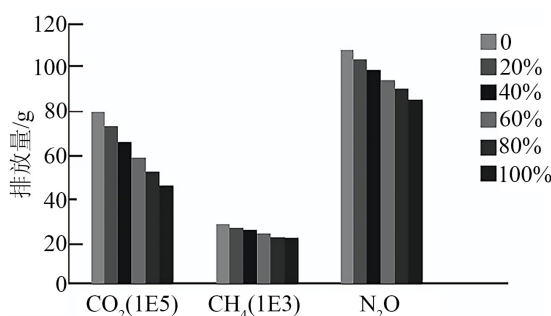


图 2. 轻量化材料应用比例对温室气体排放的影响[9]

Palencia 等[10]在传统的内燃机中引入零排放车辆(Zero-Emission Vehicle, ZEV)和轻质材料,并建立了一款动态核算模型。利用该模型研究了 2010-2050 年期间哥伦比亚乘用车存量增长了 6.6 倍。能源消耗和二氧化碳排放分别增加 5.5 倍和 4.9 倍。与 2050 年的基线值相比,轻量化和纯电动汽车能耗和二氧化碳排放量分别减少了 48%和 61%。

Jason 等[11]对汽车生命周期温室气体排放进行了敏感性和蒙特卡罗分析,以轻量化对生命周期温室气体排放影响为变量。建立混合动力汽车和纯电动汽车的动力系统模型。研究表明,与更高效的混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)轻量化(6 t/CO<sub>2</sub>eq.)相比,轻量化内燃机汽车(Internal Com-

bustion Engine Vehicle, ICEV)在基本情况下的温室气体减排(10 t/CO<sub>2</sub>eq.)效果更好。与汽油车相比,电动汽车的轻量化可导致更高或更低的温室气体减排,这在很大程度上取决于电力来源。

Palencia 等[12]探讨了汽车动力系统、车辆尺寸和轻量化材料对轻型载客车能源使用、CO<sub>2</sub>排放和成本的影响。与 2050 年的基线值相比,纯电动汽车的推广具有能耗和 CO<sub>2</sub>减排潜力,分别为 70.6%和 92.2%;相比之下,到 2050 年,小型轻型燃料电池混合动力汽车的潜在能耗和 CO<sub>2</sub>排放量分别减少了 55.4%和 82.9%。轻量化显著降低了电池电动汽车和燃料电池混合动力电动汽车的资本成本。

因此随着轻量化材料逐渐兴起和应用尤其是现在的复合材料的强度性能得到增加,以此实现降低汽车零部件重量的目标但轻量化工作还需进一步深入,增加结构优化技术研究深度、扩大应用范围,从而激发汽车材料轻量化最大潜力,材料轻量化更有潜力做到汽车高效低排。

## 2.2. 结构轻量化

汽车结构轻量化是指汽车的结构布局结构外形和结构尺寸等相关结构参数作为设计变量,把汽车结构的质量、刚度、强度和耐撞性等性能作为约束条件或目标函数,并结合计算机辅助技术建立数学模型再通过优化算法求解数学模型的一种方法[13]。徐建全等[14]对纯电动汽车和传统汽车做轻量化优化研究,经优化后,纯电动汽车与传统汽油车钢材用量减少分别为 6.44%和 6.41%,纯电动汽车能耗减少 3.20%,温室效应(global warming potential, GWP)减少 2.84%;传统汽油车能耗减少 3.21%,GWP 减少 2.88%。陈文斐[15]以计算机辅助工程结构优化技术为基础,对解决汽车燃油经济性、排放问题提升经济效益发挥积极的推动作用。

王品健[16]通过结构优化设计对纯电动汽车电池包的结构件进行形貌优化和尺寸优化。优化后发现,在保持良好的静态性能前提下,电池包的整体质量减少 6.3%并且动态性能得到改善。廖先才[17]对电动汽车碳纤维复合材料地板进行优化设计。确定了碳纤维复合材料地板的铺层设计方案使地板结果获得了 36.6%的减重,显著降低 CO<sub>2</sub>排放量,实现经济和环境的双赢。

## 2.3. 工艺轻量化

汽车工艺轻量化指采用铸造成形工艺,有效提高材料利用率[18]。吉泽升等[19]探究了挤压铸造的工艺特点,列举了挤压铸造在丰田汽车轻量化各方面应用实例。张鹏等[20]介绍了内高压成型工艺、热压成型工艺、辊压成型工艺不仅能减轻零部件质量,而且能提高资源利用从而减少零件使用数量,避免材料浪费以达到节能减排的目的。赵雨[21]分别介绍了激光焊接技术制造工艺、热成型技术制造工艺,在制造汽车零部件时,可以用激光焊接技术和热成型技术来提高汽车材料的使用效率,进而有效减少汽车尾气的排放和对环境的污染程度。

就以上三种轻量化路径而言,材料轻量化才是最有可能靠近碳中和目标路径之一。虽然另外两条路径能减少车身自重但受到研究成本、碳排放、燃料经济性、铸造技术等诸多方面的限制。在汽车轻量化材料方面,具有多元化的发展趋势,在未来汽车轻量化材料的解决方案中,可通过技术改进来降低材料成本、提高利用率、开发兼具环保性和可回收性为一体的新材料[22]。为在材料轻量化目标下实现节能减排和绿色发展道路做出积极贡献。

### 3. 新能源汽车路径

根据数据显示,我国交通行业的碳排放占总排放的 28%,推广新能源汽车是实现“碳中和”目标的重要方式[23]。经预测,预计 2030 年我国机动车保有量可达 3.5 亿到 5.5 亿辆[24]。中国日益增长的交通出行需求对“碳中和”提出了新一轮的挑战。对此,中国正积极推动新能源汽车,以此来减少二氧化碳排放。但是,新能源汽车是否有利于实现二氧化碳减排?[25]

#### 3.1. 新能源混合动力汽车(HEV)

混合动力汽车是指将电动机与发动机作为汽车动力驱动。既能发挥发动机的优点,又能发挥电动机无污染零排放的好处。混合动力汽车可明显提高发动机热效率和改善尾气排放等问题。混合动力系统总成已从电机离散结构向一体化结构发展[26]。

##### 混合动力汽车路径优势

梁焱等[27]选取同类型传统汽油车和两款插电式混合动力为研究对象。插电式混动汽车的 HC、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放较传统燃油车分别降低 19%、18.4%、21.3%、28.6%和 25%,PM、NOX 和 SOX 分别增加 4.7%、22.3%和 58%。而另一款插电式混动汽车生命周期 CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、HC 和 N<sub>2</sub>O 排放较传统燃油车分别降低 25%、24.6%、27.4%、32.5%和 33.3%,PM、NOX 和 SOX 分别增加 2.3%、12.6%和 36%。可见,插电式混合动力汽车有利于降低汽车 HC、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的排放。

丁振森等[28]对比燃料电池汽车和插电式混合动力汽车的节能减排差异评价,同级别的插电式混合动力汽车比同级别燃料电池汽车更节能环保。除了维修阶段,插电式混合动力汽车的臭氧前躯体潜值明显高于燃料电池汽车。在全球变暖潜值上,燃料电池汽车明显高于插电式混合动力汽车刘大鹏等[29]选取某款同级别纯电动汽车与混合动力汽车作为研究对象。对 HEV 和 BEV 的各个阶段能耗与排放对比发现,混合动力汽车比纯电动汽车更节能环保。特别是 BEV 原料生产阶段的 CO 排放高出 HEV 60%。

García 等[30]评估了串联混合动力汽车使用四种不同低碳燃料(Low Carbon Fuels, LCF)的潜力,并将结果与传统柴油燃烧的结果进行了比较。以评估轻型车辆试验循环(World Light Vehicle Test Cycle, WLTC)的燃油消耗和发动机排放 NO<sub>x</sub> 性能,结果表明,在所有测试燃料中串联式混合动力车辆在 100%有效载荷的情况下,油耗降低了 5%。但由于混合动力车在蓄电池充电期间以更高的发动机转速和负载运行,其发动机外 NO<sub>x</sub> 排放水平

显示出 16% 的性能较差，特别是在燃油效率方面，有助于减少二氧化碳排放。

高建平等[31]探究了插电式混合动力汽车(Plug In Hybrid Electric Vehicle, PHEV)的电源功率分配策略，在能量分配策略相同的前提下，使用复合电源后，燃油经济性提高 3.4%，纯电动行驶里程数增加 1.3%。潘广纯等[32]为提高混动车燃油经济性，建立模型控制策略。分析得出在 100 km 的油耗为 5.64 L，MPC 策略与基于规则控制策略相比，燃油经济性提高 8.03%。有效的提高了汽车的燃油经济性。

### 3.2. 新能源纯电动汽车(BEV)

纯电动汽车是指完全由电池提供动力源，行驶过程中实现零排放。纯电动汽车使用单一的电能源供能，然而，目前纯电动汽车仍然面临着续航较短、安全性较差，制造和使用成本较高，充电设施仍然是其发展的主要障碍[33]。

#### 纯电动汽车路径优势

刘斌等人[34]在汽车产业创新论坛介绍了，由于我国使用煤发电占到了全国发电的 74%，每发一度电会产生 0.61 kg 的 CO<sub>2</sub> 平均每百公里耗 12.4 度电，每万公里产生 0.76 吨 CO<sub>2</sub>。而一辆 6.31 L/100km 的汽车 1L 汽油消耗产生 0.3 kg 的 CO<sub>2</sub>，每万公里消耗 1.5 吨 CO<sub>2</sub> 并且上游炼油环节产生 0.2 吨 CO<sub>2</sub> 显而易见电动汽车比传统燃油车每一万公里可以减少 0.94 吨 CO<sub>2</sub> 排放。探究了对同类型同规格同大小的车辆进行了全生命周期对比评价。如图 3 所示，比较丰田卡罗拉汽油版、HEV 版、PHEV 版和比亚迪秦 EV 版。卡罗拉汽油版产生 176 g/km 的 CO<sub>2</sub> 排放，秦 EV 产生 118 g/km，减碳效果明显。4 辆车跑 15 年 15 万公里考虑燃料周期和车辆周期等因素。卡罗拉汽油版分别比较了卡罗拉 HEV 版、PHEV 版、秦 EV 版。从图中数据可以看出减碳效果分别是 23%、25%、33%。也就是说当前和未来，新能源车都是最重要的低碳技术路线。由此可以看出纯电动汽车应是我国低碳行业大力发展的方向。但纯电动汽车技术难度较大如攻克更高能量密度、高续航能力、高寿命、高安全性动力电池、高充电效率充电设施建设的进度等问题。

何义团等[35]对 C 级车以 CO<sub>2</sub> 排放全生命周期为基础来计算对比内燃机汽车和纯电动汽车运输时 CO<sub>2</sub> 的排放量，通过计算，内燃机 C 级车 CO<sub>2</sub> 排放总量约为 150 g/km，而 C 级纯电动汽车 CO<sub>2</sub> 排放量为 111.932 g/km。Tanti 等[36]研究了马其他群岛纯电动汽车 CO<sub>2</sub> 排放量将混合动力和内燃机车辆的排放量进行比较。研究发现 BEV 的二氧化碳排放量大大低于混合动力和传统燃料驱动的车辆。

Yu 等[37]对汽油车和锂 - 铁磷酸亚铁电池和镍钴锰锂电池驱动的动力系统进行了全生命周期评估。发现电动汽车的 CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 CO 排放量明显低于汽油车。此外，优化电力结构可以分别将 GWP、CO 和 CO<sub>2</sub> 降低 15%、37% 和 14%。此外，电池能量密度增加 100 Wh/kg 可以减少 14%~20% 的空气污染物排放。

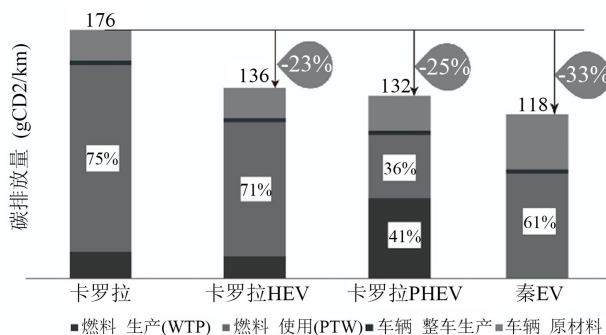


图 3. 同类型车型全生命周期碳排放对比[34]

### 3.3. 新能源燃料电池汽车(FCEV)

燃料电池是将燃料的化学能直接转换成电能的装置。例如，氢燃料电池是通过电池内部的电化学反应将氢气和氧气的化学能直接转变成电能的装置，过程是氧化还原反应转化为电能，从而驱动电机带动汽车驱动，将反应剩余的电能存储于蓄电池中[38]。

#### 燃料电池汽车路径优势

Hwang 等[39]对燃料电池汽车与传统汽油车相比，以光伏电解氢为燃料的燃料电池汽车可以减少约 99.2%的能源消耗和 46.6%的温室气体排放。然而，使用电网电解氢燃料的燃料电池汽车的生命周期能耗和温室气体排放分别比传统燃料电池汽车高 35%和 52.8%。基于电网的纯电动汽车相比，以天然气重整氢为燃料的燃料电池汽车的全生命周期能耗和温室气体排放分别约为 79.0%和 66.4%。

Parikhit [40]提到可再生氢燃料电池汽车的生命周期碳足迹(105~149 g/CO<sub>2</sub> 当量/车辆公里)与加州电网电力充电的纯电动汽车(132 g/CO<sub>2</sub> 当量/车辆公里)相当，约为紧凑型内燃机汽车的一半。

可见燃料电池汽车的碳减排潜力巨大并且燃料电池优点突出运行噪音低、能量转化率高、构造简单便于维修保养、无污染零排放。但是氢的制备、储存、运输、密封还有添加都是目前还未攻关的核心技术，完成碳中和之路还有很远的要走。综上可以预测未来，中国将大力推进燃料电池汽车核心技术的研究和发展，努力攻克燃料电池汽车技术难题。

## 4. 绿色燃料内燃机路径

### 4.1. 氢内燃机

氢气在常温常压下是一种极易燃烧的气体，具有质量热值高、燃烧速度快、扩散性好、燃浓度范围广等优点，氢内燃机具有零碳排放、高效率、高可靠性和低成本的显著优势，成为氢能应用最广泛的原因[41]。并且氢燃料可通过电解绿氢制取，实现 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的近零排放。

#### 氢内燃机路径优势

孙柏刚等[42]研究了缸内直喷氢燃料内燃机混合气高效燃烧效率，发现采

用高压直喷的策略可将热效率提升至 42%，采用废气再循环技术使氢内燃机的污染物  $\text{NO}_x$  降低至  $0.5 \text{ g/kWh}$ 。Markus 等[43]搭建了氢内燃机样机的台架测试整车实验仿真模型。如图 4、图 5 所示，在串并联混动发动机直接驱动模式进行测试，串并联混合动力系统将缸内直喷(Direct Injection, DI)和进气道燃料喷射(Port Fuel Injection, PFI)氢内燃机在 RTS95 循环下的运行工况点控制在原始  $\text{NO}_x$  排放小于  $10 \times 10^{-6}$  的区域，系统仿真结果表明，在没有导致氢耗明显增加的前提下，可以实现近零排放的目标。相比原机，在 DI 氢内燃机将欧洲驾驶循环周期和全球统一轻型车辆测试循环的氢耗分别降低 14.4%和 14.8%。基于 PFI 和 DI 氢内燃机串并联混合动力系统分别实现了 613 km 和 619 km 的新欧洲驾驶循环周期续驶里程。由此可见，串并联混合动力系统很好的兼顾了近零排放和续驶里程。预计提高氢内燃机的热效率是一个重要的方向。

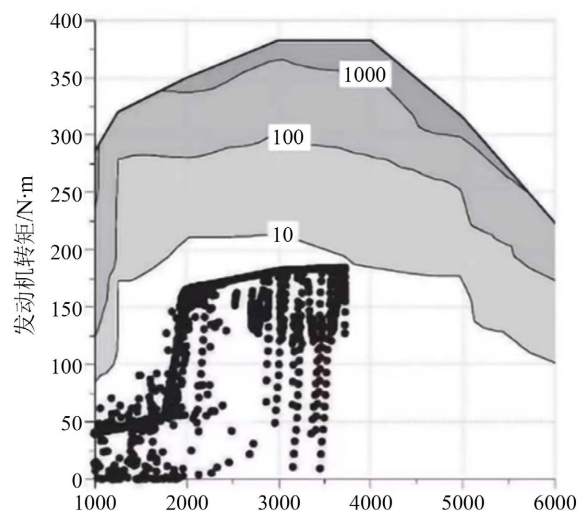


图 4. 混合动力总成的 DI 发动机在原始  $\text{NO}_x$  排放万有特性图中的运行工况点(图中黑点) [43]

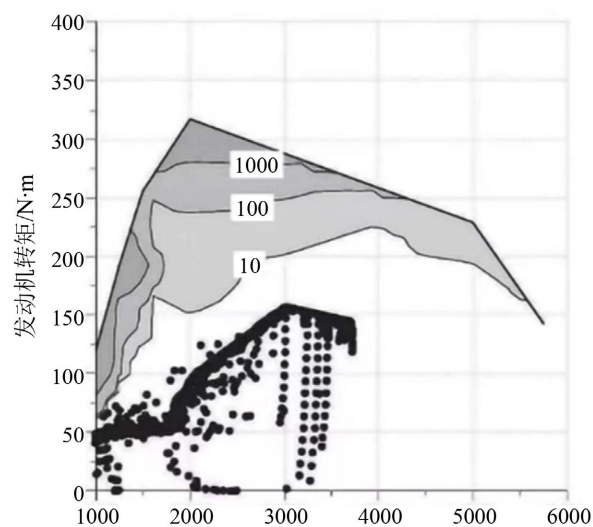


图 5. 混合动力总成的 PFI 发动机在原始  $\text{NO}_x$  排放万有特性图中的运行工况点(图中黑点) [43]

刘福水等人[44]探讨了 PFI 和废气再循环系统氢内燃机燃烧和排放特性。在中高负荷时较大的 EGR 率可以降低  $\text{NO}_x$  排放，反而高负荷 EGR 率会造成经济性和动力性下降。

Arat [45]对混合动力汽车内燃机使用  $\text{H}_2$  的富集变得更加环保，性能不断提高。 $\text{H}_2$  的富集使内燃机扭矩提高了 3.56%，功率提高了 2.37%。混合动力模式的累计油耗和排放污染分别下降了 12.6%和 14%~33%。孙柏刚等[46]分别使用汽油轿车和柴油公交车相比氢内燃机轿车和氢内燃机公交车分别可节约 35%以上和 20%左右的燃料费用。

## 4.2. 氨内燃机

氨燃烧只产生清洁无污染的水和氮气，且含氢量高。氨具备：较好的燃烧特性、高辛烷值、能与一般燃料混烧。相对于氢，氨易液化、易贮运、能量密度大。可通过增大压缩比使发动机提高热效率[47]。氨燃料有望对化石能源的高效、清洁替代。氨燃料发动机对减少环境污染、降低温室效应等方面都具有重要意义。

### 氨内燃机路径优势

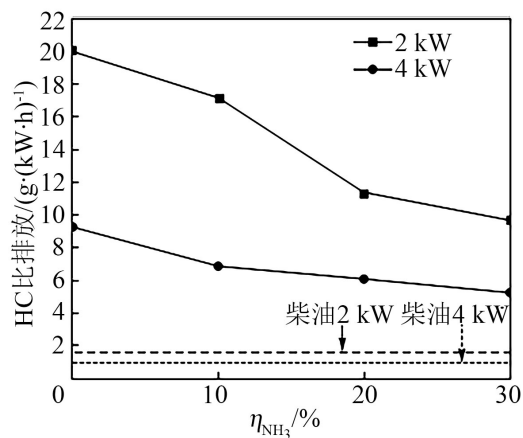


图 6. 不同掺氨比下尾气中 HC 的比排放[48]

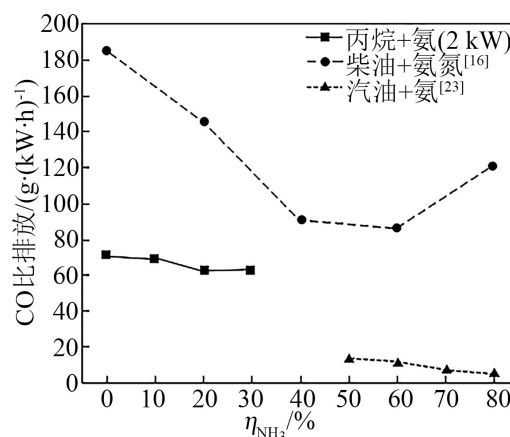


图 7. 不同掺氨比下尾气中 CO 的比排放[48]

楚育纯等[48]采用以丙烷助燃剂与氨混合燃烧,通过改变氨与丙烷的热值比来实验测试燃料的经济性指和排放特性。分别探讨了氨-丙烷双燃料在发动机中的燃烧排放情况。图6所知,使用丙烷时HC排放较高,在相同掺氨时HC排放随着功率的增大而减小。图7所知,使用不同燃料时柴油掺氨燃烧的CO排放高于丙烷掺氨和汽油掺氨。图8可以看出,掺氨比30%时可减少47%~55%的CO<sub>2</sub>排放。

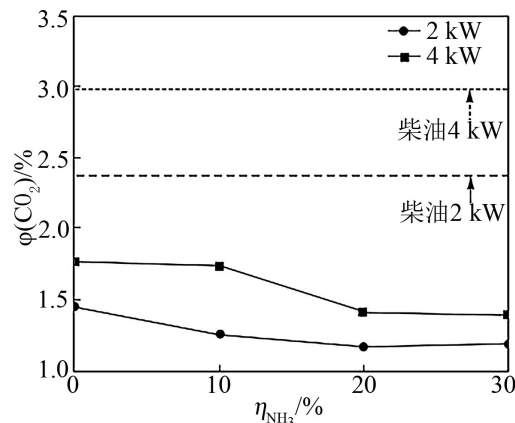
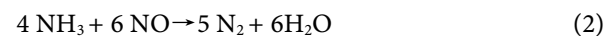
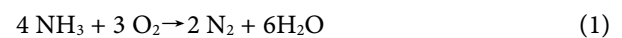


图8. 不同掺氨比下尾气中CO<sub>2</sub>的比排放[48]

高正平等[49]研究当掺混比小于60%时减碳效果较好,提出氨燃烧利用EGR技术可以降低NO<sub>x</sub>排放。

张瀚镭[50]以氨燃料反应为基础初步探讨了氨燃料燃烧优势,氨的氧化或燃烧反应中,与零碳燃料相关的2个主要反应(如式(1)、式(2)):



从成本使用、大规模生产、从能量及储能密度、在安全性方面等都体现了被推广应用,将有利于对传统能源的依赖,从而进一步减少温室气体的排放。Xin等[51]研究不同氨水体积分数对氢内燃机的影响。随着氨水体积分数的增加,增加了发动机的功率,降低了指示热效率。指示平均有效压力和热效率增加添加氨体积分数对NO<sub>x</sub>排放量影响不大,随着点火时间的推迟,NO<sub>x</sub>排放量逐渐增加。Liab[52]对柴油机中导点火式氨燃料发动机的低压和高压喷射双燃料模式的燃烧和排放特性进行数值比较。结果表明,低压喷射模式和高压喷射模式的比较表明,低压喷射模式有可能获得更高的指示热效率,而高压喷射模式可以显著降低发动机输出NH<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>和温室气体排放。

绿色燃料内燃机在这三种路径中优势明显就氢内燃机为例其有多种方式制取。氢燃料内燃机可使用电解生产的绿氢作为燃料,可实现CO<sub>2</sub>及NO<sub>x</sub>的近零排放。是个非常有未来前景的低碳系统。氢内燃机从长远和发展的观点来看很有可能是未来内燃机技术的最新趋势。

## 5. 总结

本文从轻量化、新能源动力系统和绿色燃料内燃机三个方面对汽车碳中

和路径进行了系统分析。在分析过程中每条路径都能对碳中和碳达峰起到一定的促进优化作用。

(1) 从轻量化角度分析汽车材质重量降低和材料低碳角度既能促进汽车节能减排也能改善汽车燃料经济性，无论是新能源汽车还是传统燃油车都很大程度促使了汽车制造和使用的低碳节能目的的达成。在轻量化路径方面对汽车提供了一定的碳中和参考。

(2) 从新能源角度分析了汽车从排放端减轻低碳化和零碳化。分别阐述了混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车对比传统燃油车的燃料经济性、全生命周期排放和能耗都有一定的优势。由于中国 74%为火力发电，就混合动力汽车和纯电动汽车而言，低碳本质问题没有得到根本的解决，并且充电桩的修建和普及也是现在面临的主要问题。

(3) 从内燃机角度分析了绿色燃料内燃机，它也是接下来国家节能减排的技术突破点和未来重心，其发展趋势和低碳效果几乎是目前看起来最有实现可能的低碳、零碳之路，但还有很多技术难题仍然限制绿色内燃机的发展趋势。

综上分析绿色燃料汽车，无论是从我国成熟的发动机技术层面还是现在成熟的管道输送和相关的配套设施的广泛使用和低成本，都能看到未来汽车动力对绿色燃料的依赖。虽然新能源汽车也能给人们带来低碳出行，但在新能源整个生命周期来看，它和传统燃油车相比并无多大优势。在碳中和目标下还有很多技术难题需要解决和攻关，绿色燃料内燃机从长远和发展的观点来看很有可能是未来取代传统汽油、柴油等内燃机的替代产品，也是内燃机技术的最新趋势。

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

## References

- [1] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17-24.
- [2] 习近平: 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 2020-09-23. [https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c\\_1126527652.htm](https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm)
- [3] 代迪尔, 张宇辉. 双碳目标背景下中国汽车行业碳减排的经验与启示[J]. 海峡科技与产业, 2021, 34(10): 63-66.
- [4] 常维, 刘斌, 祝月艳. 双碳目标下汽车产业发展趋势[J]. 汽车纵横, 2021(8): 31-35.
- [5] 卓星. 中国工程院院士黄震: 可再生合成燃料有望使内燃机燃料取之不尽, 独立于化石能源, 实现碳中和和零碳排放[J]. 商用汽车, 2021(6): 84-85.
- [6] 钱余海, 吴庆芳, 雷浩. 汽车轻量化材料及工艺的研究进展[J]. 大众科技, 2022, 24(2): 49-52.
- [7] 杨谋. 汽车轻量化材料及制造工艺分析[J]. 南方农机, 2019, 50(20): 242.
- [8] 马晓坤, 王瑞, 侯建峰, 等. 基于汽车轻量化的碳纤维复合材料应用分析[J]. 化工新型材料, 2020, 48(11): 223-226.
- [9] 徐树杰, 董长青. 基于 GREET 汽车全生命周期能耗排放研究[J]. 汽车工艺与材

- 料, 2014(2): 10-13.
- [10] González Palencia, J.C., Furubayashi, T. and Nakata, T. (2012) Energy Use and CO<sub>2</sub> Emissions Reduction Potential in Passenger Car Fleet Using Zero Emission Vehicles and Lightweight Materials. *Energy*, **48**, 548-565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.041>
- [11] Luk, J.M., Kim, H.C., De Kleine, R.D., Wallington, T.J. and MacLean, H.L. (2018) Greenhouse Gas Emission Benefits of Vehicle Lightweighting: Monte Carlo Probabilistic Analysis of the Multi Material Lightweight Vehicle Glider. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **62**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.006>
- [12] González Palencia, J.C., Sakamaki, T., Araki, M. and Shiga, S. (2015) Impact of Powertrain Electrification, Vehicle Size Reduction and Lightweight Materials Substitution on Energy Use, CO<sub>2</sub> Emissions and Cost of a Passenger Light-Duty Vehicle Fleet. *Energy*, **93**, 1489-1504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.017>
- [13] 宋冬冬, 芮执元, 刘军, 等. 机床床身结构优化的轻量化技术[J]. 机械制造, 2012, 50(5): 65-69.
- [14] 徐建全, 杨沿平. 纯电动汽车与传统汽车轻量化全生命周期多目标优化研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(8): 885-891, 914.
- [15] 陈文斐. 基于结构优化的汽车轻量化方法探索[J]. 汽车实用技术, 2019(24): 135-138.
- [16] 王品健. 纯电动汽车动力电池包箱体结构轻量化设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [17] 廖先才. 电动汽车碳纤维复合材料地板结构轻量化设计[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [18] 杨天云. 汽车座椅轻量化结构设计及成形工艺优化[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [19] 吉泽升, 张永冰, 姜博, 等. 铝合金挤压铸造的研究进展及其在汽车轻量化上的应用[J]. 铸造工程, 2020, 44(2): 39-45.
- [20] 张鹏, 刘颖. 新能源汽车结构优化轻量化关键工艺分析[J]. 汽车实用技术, 2020(7): 203-205.
- [21] 赵雨. 汽车轻量化材料及制造工艺分析[J]. 内燃机与配件, 2021(16): 44-45.
- [22] 郭玉琴, 朱新峰, 杨艳, 等. 汽车轻量化材料及制造工艺研究现状[J]. 锻压技术, 2015, 40(3): 1-6.
- [23] 张长令. 推动新能源汽车大规模应用与发展, 助力中国实现碳中和[J]. 可持续发展经济导刊, 2021(Z2): 28-30.
- [24] Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., Li, W. and Hang, W. (2015) Scenario Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from China's Passenger Vehicles. *Energy*, **91**, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.054>
- [25] 何文韬, 郝晓莉, 陈凤. 基于生命周期的新能源汽车碳足迹评价[J]. 东北财经大学学报, 2022(2): 29-41.
- [26] 杨文康. “碳中和”背景下乡镇新能源汽车推广的方法和思路[J]. 农机使用与维修, 2021(12): 69-70.
- [27] 梁炉, 符钢战. 不同动力系统的插电式混合动力汽车全生命周期能耗和排放的对比分析[J]. 上海汽车, 2016(3): 45-50.
- [28] 丁振森, 陈轶嵩, 刘佳慧. 燃料电池汽车与插电式混合动力汽车生命周期对比评价研究[C]//《环境工程》编委会, 工业建筑杂志社有限公司. 《环境工程》2018年全国学术年会论文集(上册). 西安: 长安大学汽车学院, 2018: 274-278.

- [29] 刘大鹏, 陈轶嵩. 纯电动汽车与混合动力汽车全生命周期节能减排对比研究[J]. 汽车实用技术, 2018(15): 1-4.
- [30] García, A., Monsalve-Serrano, J., Villalta, D. and Guzmán-Mendoza, M. (2022) Impact of Low Carbon Fuels (LCF) on the Fuel Efficiency and Nox Emissions of a Light-Duty Series Hybrid Commercial Delivery Vehicle. *Fuel*, **321**, Article ID: 124035. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124035>
- [31] 高建平, 赵金宝, 葛坚, 等. 插电式混合动力汽车车载复合电源功率分配策略研究[J]. 图学学报, 2015, 36(4): 603-608.
- [32] 潘广纯, 赵红, 闫松, 等. 功率分流式混合动力汽车模型预测控制策略[J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(6): 30-35, 54.
- [33] 邱先文. 纯电动汽车技术状况及发展趋势研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2019, 48(6): 74-79.
- [34] 刘斌. 面向碳达峰、碳中和目标的汽车产业实施路线图[J]. 汽车与配件, 2021(22): 36-39.
- [35] 何义团, 张鹏博, 邵毅明, 等. 燃油与纯电动汽车流通过程中 CO<sub>2</sub> 排放分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(7): 126-130.
- [36] von Brockdorff, P. and Tanti, G. (2017) Carbon Emissions of Plug-In Electric Vehicles in Malta: A Policy Review. *Case Studies on Transport Policy*, **5**, 509-517. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.05.002>
- [37] Yu, A., Wei, Y., Chen, W., Peng, N. and Peng, L. (2018) Life Cycle Environmental Impacts and Carbon Emissions: A Case Study of Electric and Gasoline Vehicles in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **65**, 409-420. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.009>
- [38] 梁新成, 刘鹏, 张志冬, 等. 基于燃料电池汽车氢气制备研究[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(2): 31-37.
- [39] Hwang, J., Kuo, J., Wu, W., Chang, W., Lin, C. and Wang, S. (2013) Lifecycle Performance Assessment of Fuel Cell/Battery Electric Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 3433-3446. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.148>
- [40] Sinha, P. and Brophy, B. (2021) Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen for Fuel Cell Passenger Vehicles in California. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **45**, Article ID: 101188. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101188>
- [41] 秦朝举, 段俊法. 内燃机燃用氢气的研究进展[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(1): 34-36.
- [42] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 265-278.
- [43] Markus, W., 丁锋, Erik, S., 等. 基于氢燃料内燃机的串并联混动系统研究[C]//中国汽车工程学会(China Society of Automotive Engineers). 2020 中国汽车工程学会年会论文集(3). 北京: 机械工业出版社, 2020: 199-206.
- [44] 段俊法, 刘福水, 孙柏刚. 热 EGR 氢内燃机的动力性和排放[J]. 内燃机工程, 2016, 37(1): 21-25, 30.
- [45] Arat, H.T. (2019) Alternative Fuelled Hybrid Electric Vehicle (AF-HEV) with Hydrogen Enriched Internal Combustion Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 19005-19016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.219>
- [46] 孙柏刚, 田华宇, 张冬生, 等. 氢内燃机汽车与传统内燃机汽车的经济性比较研究[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(1): 21-27.
- [47] 安恩科, 杨霞, 宋尧. 氨作为富氢载体和燃料的应用[J]. 能源技术, 2008, 29(4): 209-211, 239.

- 
- [48] 楚育纯, 周梅, 王兆林, 等. 掺氨燃料在四冲程内燃机中的排放特性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(1): 50-57.
- [49] 高正平, 涂安琪, 李天新, 等. 面向零碳电力的氨燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 173-184.
- [50] 张瀚镕. 氨作为燃料的发展潜力[J]. 化工管理, 2016(9): 143.
- [51] Xin, G., Ji, C., Wang, S., Meng, H., Chang, K. and Yang, J. (2022) Effect of Different Volume Fractions of Ammonia on the Combustion and Emission Characteristics of the Hydrogen-Fueled Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 16297-16308. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.103>
- [52] Li, T., Zhou, X., Wang, N., Wang, X., Chen, R., Li, S., *et al.* (2022) A Comparison between Low- and High-Pressure Injection Dual-Fuel Modes of Diesel-Pilot-Ignition Ammonia Combustion Engines. *Journal of the Energy Institute*, **102**, 362-373. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.04.009>