



苏万华,山东天津人,内燃机动力工程专家,中国工程院院士。现任天津大学内燃机国家重点实验室教授,中国内燃机学会副理事长,《内燃机学报》主编,Int. J Engine Research 和 Int. J. Automotive Technology 编委。

## 卷首语 Foreword

科技导报 2013,31 (2)

# 提高内燃机效率的潜力及焓分析方法

内燃机在未来几十年仍将是移动式动力装置的主要原动机。2011年,我国内燃机年产量已达13.5亿千瓦,内燃机的石油消费量约占我国石油总消费量的66%,我国石油进口依赖度已达54%。内燃机也是大气环境的污染源,发展高效清洁内燃机技术是经济和社会发展的最大需求。

2007年欧盟颁布了强制性汽车CO<sub>2</sub>排放法规(Regulation (EC) NO.715/2007),要求2012年轿车的CO<sub>2</sub>平均排放低于130g/km,2015年低于95g/km。要求2014—2017年轻型商用车的CO<sub>2</sub>排放比2007年降低14%,2020年进一步减少28%,达到147g/km。美国能源部也要求大幅度提高内燃机效率,2020年重型内燃机热效率由当前的40%提高到55%。我国内燃机油耗现状与上述国际先进内燃机油耗法规标准还存在很大差距。

**我国应积极参与内燃机热效率极限的讨论和研究。**按卡诺理论循环的假定,卡诺循环的工作介质向低温热源排出热量,工作介质重新回到循环的始点,形成闭口循环。而内燃机是开口系统,包含化学反应、气体交换和散热过程,但并不要求把热量排到“环境”状态的低温热源。因此内燃机效率并无类似卡诺循环的限制,理论上其效率可达100%。但实际效率受限于燃烧、摩擦、焓/功转化效率,以及材料和成本等工程因素。

2010年美国汽车研究委员会(USCAR)学术会议提出了“关于车用内燃机效率的总结报告”,其结论是:活塞式内燃机最大有效热效率不考虑摩擦损失可以达到60%(当前是40%或略高);现在的内燃机由于非约束(非平衡)的燃烧过程造成焓损失约为20%~25%;内燃机经过根本性改造,最大热效率可望超过60%,但小于85%。我国应当积极参与内燃机热效率的讨论,参与新一轮的技术竞赛。

焓是研究内燃机热效率影响因素的最有效方法。节能减排新技术的提出、发展和应用是不断突破技术和经济两方面约束的过程。焓分析方法近十几年得到快速发展,在过程“无效性”分析方面显示了独特的功能,它不仅适用于自然科学,也被应用于经济等社会科学。第一定律可以成功地研究能量的转化,但是作为过程的分析,很难深入地识别“无效性”损失及其形成的机理。以一个天然气锅炉朗肯循环“无效性”分析为例,从第一定律的能量守恒的观点,所有“无效性”都归结为散热损失和废气损失。但是,当采用焓平衡分析时,则清楚地发现最重要的“无效性”发生在锅炉,锅炉的焓损失达60%,其中包括30%的燃烧过程损失和30%的传热损失。

**焓分析在内燃机燃烧过程研究中运用现状。**内燃机通过燃烧将燃料的化学能转化为活塞功,包含着一系列物理和化学过程。而过程终止时输出功、热、产物的总焓并不等于初始的焓,其差别等于熵增。至今有关内燃机燃烧不可逆损失的研究很少,仅有的少量研究也是采用平衡热力学方法。平衡热力学方法简单,但不能充分反映内燃机燃烧过程焓损失随时间的分布及变化关系。

实际上,内燃机的燃烧是一个热力学和化学非平衡的过程,只有使用非平衡态热力学才能揭示焓的分布和变化关系,对过程因温度场、压力场和浓度场的不均匀,组分间的黏性耗散,化学反应等不可逆因素造成的熵增进行详细的描述。但是由于研究手段的限制,目前只局限于稳定火焰和非受限火焰的研究,我们的目标是把非平衡态分析技术发展到包括内燃机在内的燃烧动力装置中。

内燃机的燃烧不仅是热力学非平衡过程,同时也是化学非平衡过程。化学过程的非平衡问题,即有限化学反应速率问题。内燃机燃烧化学反应发生在无约束条件下,化学反应速率不能得到连续有效的支持,甚至在化学反应没有完成的情况下终止,是焓损失的重要原因。

燃料的化学动力学模型是内燃机燃烧化学非平衡研究的重要工具,以美国劳伦斯国家重点实验室为代表的研究团队已经完成了包含所有到C<sub>16</sub>的烷烃链分支反应以及直到C<sub>20</sub>的2-methyl-alkanes反应机理研究,范围可以涵盖汽油/柴油在蒸馏过程中所有组分。完整的机理有7200个物质,31400个反应,并通过了实验验证,为研究内燃机燃料在燃烧化学非平衡过程中,持续支持化学反应速率条件,研究化学键破坏和重整过程,在不同化学反应约束条件下化学焓的演变过程提供了有利的支持。

**积极开展提高内燃机效率的燃烧过程约束条件的研究。**内燃机燃烧受物理因素(如混合物浓度、黏性、压力、流速等)和化学因素(如活化能、温度、组分、速率常数等)的制约,因此有必要对内燃机非受控燃烧过程进行约束,减少燃烧过程因非约束化学反应造成的焓损失。

新型内燃机燃烧方式的研究发现,通过对燃烧条件进行约束,可以有效改善内燃机效率和排放。其中包括均匀化燃烧,初始能量配置等。最近Stanford大学的Chris F. Edwards和K-Y Teh设计了一种转化活塞功的内燃机结构,其压缩比大于100:1。实验证明此内燃机结构可以达到60%的指示热效率,预计最终热效率可达70%。

**积极开展内燃机燃烧过程中焓/功转化效率的研究。**减少内燃机燃烧过程的焓损失和其他不可逆损失并不代表内燃机热效率可以得到提升,减小焓损失仅仅为内燃机热效率提升提供了可能。内燃机效率的提升还与其焓/功转化效率有关。

在较低负荷时,采用稀燃烧方式,内燃机效率会随着EGR率上升而上升。但这个过程存在一个临界的当量比,超过临界当量比时,单调线性增加规律出现反转,内燃机效率随着EGR率的上升而下降。这个现象与燃烧焓损失和焓/功转化效率的折中关系有关,在不同条件下,主导因素会发生改变,并最终体现在内燃机效率的变化上。

焓分析是一个方兴未艾的内燃机燃烧过程的研究方法,它已经显示出巨大的潜力,同时也存在诸多瓶颈问题有待解决。为了适应大幅度提高内燃机热效率、降低CO<sub>2</sub>排放,解决分析技术相关科学问题,是内燃机燃烧学发展的需要。发展焓分析方法将使我们站在一个新的高度,剖析内燃机燃烧过程“无效性”产生的机理,推动内燃机燃烧过程的变革。

(天津大学,天津 300072)