

文章编号:1000-582X(2009)12-1451-05

甲醇发动机缸内燃烧过程的多维数值模拟

张庆峰,何祖威,王 迎

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400030)

摘 要:针对甲醇作为发动机燃料的优缺点,通过 CFD 程序 KIVE-3V 对仿真甲醇发动机的缸内燃烧过程进行了多维数值模拟。通过模拟,得到了缸内压力、温度等大量实时数据信息,为甲醇发动机的研究提供依据。计算表明,甲醇发动机与汽油机相比,最高燃烧压力和压力升高率均有所提高,但升压分布均匀,整体处于汽油机水平,不会影响发动机正常运转;由于甲醇较快的燃烧速率,较短的燃烧期,致使最高燃烧温度低于汽油机,从而更有利于 NO 生成量的降低;同时 CO 的生成量也低于汽油机。

关键词:甲醇;发动机;燃烧过程;数值模拟

中图分类号:TK464

文献标志码:A

Multi-dimensional numerical simulation of the combustion process on methanol-fueled engine

ZHANG Qing-feng, HE Zu-wei, WANG Ying

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The paper concludes the characters of methanol as a fuel in engines. Based on the kiva-3v program, it conducts the multi-dimensional numerical simulation of the operation process in cylinder of a methanol-fueled engine to obtain the detail information and performance graphic charts, as well as the real time data of pressure, temperature and so on. It is helpful for the research on methanol-fueled engines. The results indicate that the methanol is a green alternative fuel and the methanol-fueled engines have steady operations and lower emissions by comparing the numerical results with the data of gasoline engine.

Key words: methanol; engines; combustion process; numerical simulation

目前甲醇作为最有前途的内燃机替代燃料已被普遍接受,作为发动机燃料的研究开始于上世纪 70 年代,早期的研究多局限于甲醇与汽油混合燃烧,详见文献[1-4]。近年来,开始对全甲醇发动机进行细致的试验研究^[5-12],但对于缸内过程尤其是燃烧情况的细节参数研究较少,甲醇发动机的数值模拟目

前鲜有报道。精确度较高的多维数值模拟是降低试验成本、提高效益的先进研究手段之一。笔者用此方法对甲醇发动机的缸内燃烧过程进行仿真,深入研究了缸内细节参数的变化情况。

美国 Los Alamos 国家实验室针对内燃机燃烧室内的流动、燃烧计算开发的 KIVA 系列程序,适用

收稿日期:2009-07-11

基金项目:重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC2006AB4005)

作者简介:张庆峰(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事内燃机燃烧数值模拟研究。

何祖威(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)zwhe@cqu.edu.cn。

于各类液态和气态燃料,广泛应用于内燃机的数值模拟中^[13-14],甚至能适应燃气轮机等燃烧装置内的流动和燃烧模拟。

1 甲醇主要特性

甲醇和汽油的主要物理和化学特性见表 1^[15]。

针对目前研究情况,甲醇作为内燃机燃料主要有以下特点:

1) 甲醇分子中含 50% 氧,因此甲醇完全燃烧所需要的空气量比汽油少得多。

2) 甲醇低热值低于汽油,需要更多的燃料,可以保持发动机正常功率。

3) 甲醇高的汽化潜热和低的蒸汽压力性质导致混合气形成和发动机冷启动困难,使进气温度降低,提高了充气效率,同时改善燃烧后的内部冷却条件,降低排气温度,增强动力性。

4) 甲醇有较高的辛烷值,因此具有较高的抗爆震性能,可以通过增大发动机的压缩比来提高整体发动机的性能。

5) 甲醇着火界限宽,能够在较稀的混合气状态下燃烧,对发动机排气净化和降低油耗非常有利。

6) 甲醇有较高的燃烧速率,使得燃烧过程更快,从而提高了热效率。

表 1 甲醇、汽油的主要物理和化学特性对比

燃料	甲醇	汽油
化学分子式	CH ₃ OH	—
相对分子质量	32	95~120
氧含量/%	50.0	0
C/H 原子质量比	3.0	5.6~7.4
液态密度(20 °C)/(kg·m ⁻³)	792	730
沸点/°C	64.7	27~225
蒸汽压(38 °C)/kPa	31.86	48.26~103.32
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	1109	310
辛烷值	112	70~90
理论空燃比	6.5	14.8
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	19.93	43.03
自燃温度/°C	500	228~471

2 计算说明

以 KIVA-3V 程序作为计算工具,使其能够在 PC 机上运行,研究甲醇发动机缸内燃烧过程。KIVA-3V 源程序以 FORTRAN 语言编制,使用 Cray Fortran 编译器在 Cray Time Sharing System

系统下运行。选用 Fortran Powerstation 6.5 作为编译系统,将原有实型变量与函数均转换为双精度型;同时,替换、取消、补充了部分库函数资源;加入物质浓度的计算以及输出选项;自编程调整了图形输出接口,采用专业的流场可视化软件 FIELDVIEW、TECPLOT 进行计算数据的后处理,获得相应的曲线和图像。

3 计算方法

3.1 计算网格

仿真对象为单缸四冲程发动机,由 JL368Q3 型发动机改造而成,主要结构参数见表 2。使用平底气缸盖,仿真采取 360° 模型生成计算网格。

表 2 仿真发动机基本结构参数

参数项	数值项
缸径/mm	68.5
冲程/mm	72
挤气间隙/mm	0.15
连杆长/mm	163
压缩比	9.4

3.2 初始及边界条件

仿真计算在上止点前 150 °CA 开始,结束于上止点后 148 °CA。计算采用 RNG k-ε 湍流模型,利用概率分布函数定义液滴和喷雾方程,边界条件为湍流壁面定律速度条件和固定温度壁面条件。

选取 1 500 rpm 下的工况。为了更好地分析模拟结果,计算时对比相应功率水平的汽油机选择计算参数。考虑到甲醇化学计量空燃比的单位质量混合气热值与汽油大致相同^[16],根据等热值原则减少了对比机型的循环喷油量。通过计算,设定甲醇量为汽油量的 2.16 倍,相应增大喷油器的喷油直径。

4 计算结果与分析

4.1 燃烧过程缸内压力

4.1.1 缸内压力变化

甲醇发动机缸内压力的变化见图 1。可以看出,甲醇发动机缸内最高燃烧压力和压力升高率较汽油机均有提高。最高燃烧压力最大值发生在曲轴转角 1.6~6.7 °CA 的位置,离上止点较近,燃烧定容度好。最高压力升高率处于汽油机水平,因而能实现低噪声、低振动的运转,并且具有较高的机械效率。

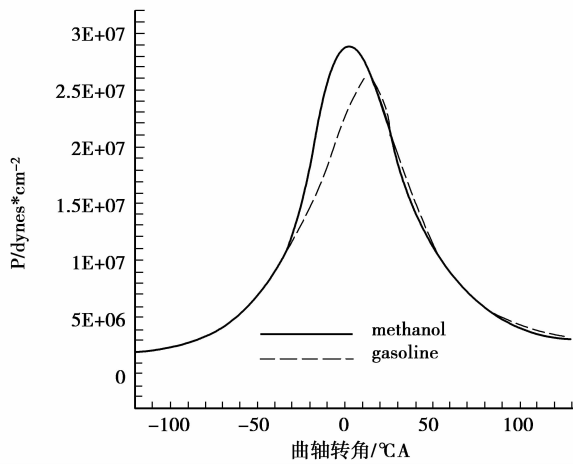


图 1 缸内压力随曲轴转角的变化

4.1.2 缸内压力场分布图

仿真计算得到了甲醇和汽油发动机各自燃烧时不同曲轴转角的压力场等值线分布。限于篇幅,仅列出二者在-5.0 °CA 横剖面和 0.0 °CA 轴截面的压力场分布图,见图 2 所示。可以看出,同一转角下甲醇发动机的缸内压力大于汽油机,且压力分布均匀。

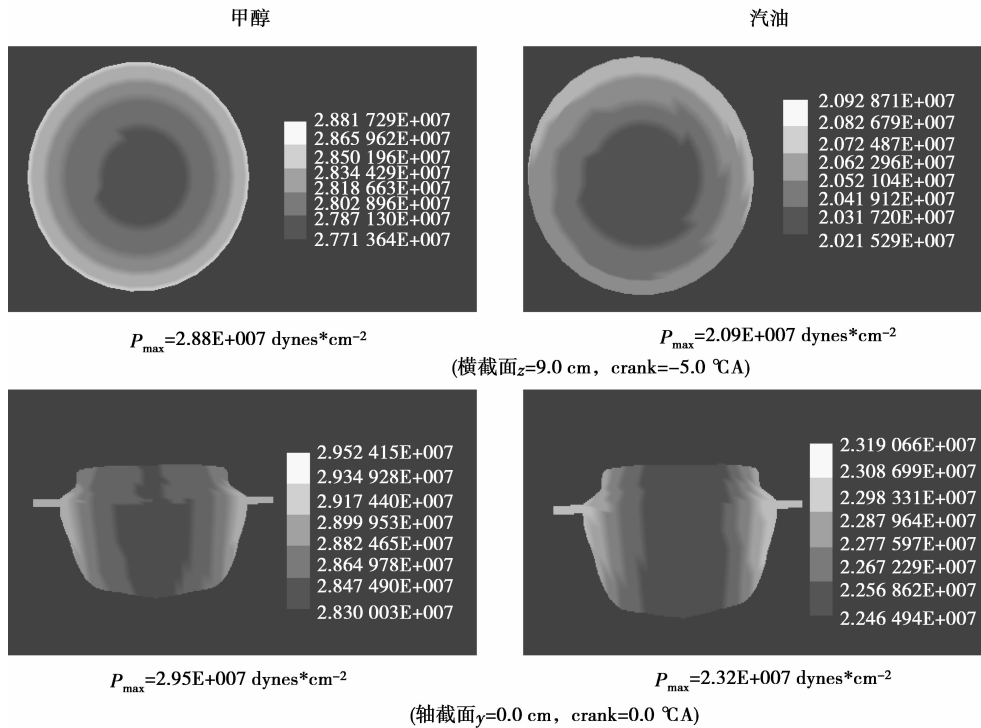


图 2 不同燃料燃烧时缸内压力场的分布

4.2 燃烧过程缸内温度

4.2.1 缸内温度变化

由图 3 可知,甲醇发动机的缸内最高温度比汽油机低 70 K 左右。甲醇的燃烧速率要比汽油快,致使甲醇发动机缸内较早地达到最高温度,但甲醇从燃烧开始到结束,整个燃烧过程的持续时间比汽油要短,同时甲醇汽化潜热较大,导致缸内温度下降较多,有利于降低 NO 的生成量。

4.2.2 缸内温度场分布图

仿真计算得到了甲醇和汽油发动机各自燃烧时不同曲轴转角的温度场等值线分布。同一曲轴转角下甲醇发动机的缸内最高温度小于汽油机,温度分

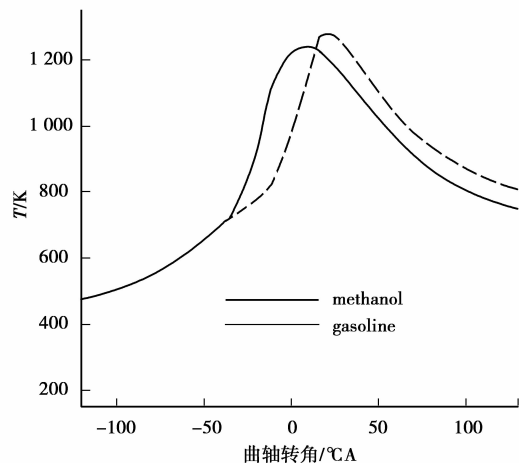


图 3 缸内温度随曲轴转角的变化

布均匀, 详见图 4。

4.3 缸内燃烧过程 CO 生成情况

CO 的生成量见图 5。燃烧前期甲醇发动机缸内 CO 的生成量较汽油机高些, 这是由于温度较低、甲醇火焰传播速度快的缘故; 在曲轴转角 10°CA 之内, 甲醇发动机缸内 CO 的生成量远低于汽油机, 被氧化为 CO_2 的时刻较早, 源于甲醇自携带氧比空气中的氧更有助于充分燃烧。直到排气门开启, CO

的生成量保持很低水平。

4.4 缸内燃烧过程 NO 生成情况

在相同的点火提前角下, 甲醇发动机的 NO 生成量仅为汽油机的 $1/3$ 左右, 见图 6。其主要原因是甲醇燃烧过程中缸内温度较低所致。实际使用过程中, 一般要适当推迟甲醇的点火提前角时刻, 更有助于降低 NO 的排放。

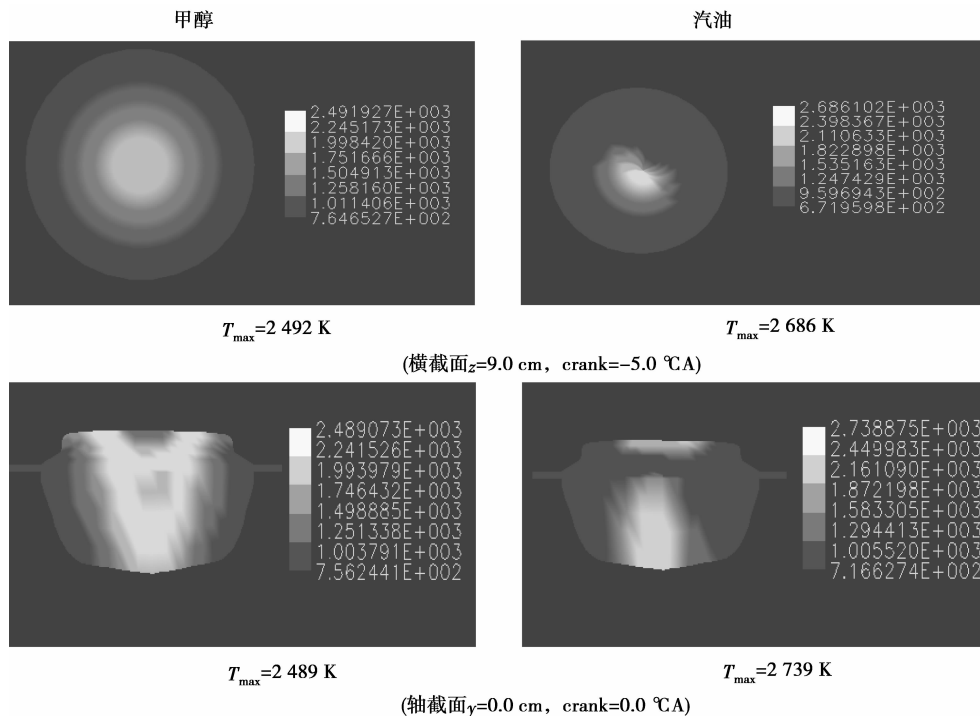


图 4 不同燃料燃烧时缸内温度场的分布

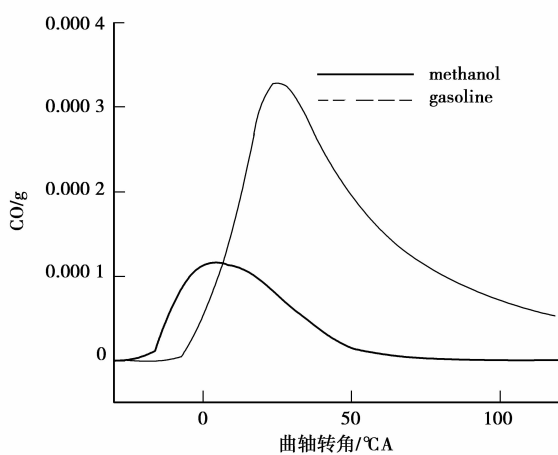


图 5 缸内 CO 生成量对比

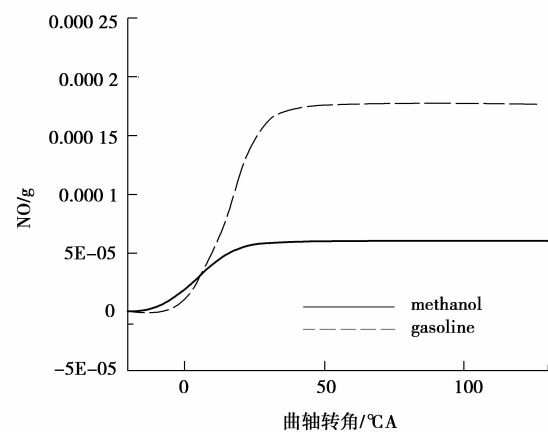


图 6 缸内 NO 生成量对比

5 结 论

通过对甲醇发动机燃烧过程的多维数值模拟, 得到了大量的缸内性能参数及流场分析, 限于篇幅

文中仅列出其中的极小部分。仿真结果表明:

1) 甲醇发动机相对于汽油机具有较高的爆发压力和压力升高率, 但能实现低噪声、低振动的运转, 并且具有较高的机械效率。

2)受到汽化潜热等因素的影响,甲醇发动机缸内温度低于汽油机,有助于 NO 的减少。

3)在相同当量循环喷油量下,甲醇发动机的 CO 生成量要低于汽油机。

4)在相同当量循环喷油量下,甲醇发动机的 NO 生成量仅为汽油机的 1/3 左右。实际使用过程中,采取一定措施,NO 的生成量会降到更低。

参考文献:

- [1] HARRINGTON J A, PILOT R M. Combustion and emission characteristic of methanol[C]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 750420, 1975.
- [2] BRINKMAN N D. Effect of compression ratio on exhaust emissions and performance of a methanol fueled single-cylinder engine [C]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 770791, 1977.
- [3] HILDEN D L, PARKS F B. A single-cylinder engine study of methanol fuel-emphasis on organic emissions [C]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 760378, 1976.
- [4] PATEL K S, HENEIN N A. Burning velocities in methanol-indolene air mixtures in a CFR engine[C]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 850111, 1985.
- [5] GEIVANIDIA, PISTIKOPOULOS, SAMARAS. Effect on exhaust emissions by the use of MMT fuel additive and other lead replacement gasoline [J]. The Science of the Total Environment, 2003,305:129-141.
- [6] 李宇峰,刘忠长.点燃式甲醇发动机的性能和排放[J].内燃机工程,1991,12:52-57.
LI YU-FENG, LIU ZHONG-CHANG. Investigation on performance and exhaust emissions of a spark-ignition methanol engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1991,12:52-57.
- [7] 姜立永,刘忠长.点燃式甲醇燃料发动机的燃料特性[J].内燃机学报,1994,12:244-248.
JIANG LI-YONG, LIU ZHONG-CHANG. Combustion characteristics of a spark ignition methanol engine[J]. Transactions of CSICE, 1994,12:244-248.
- [8] 张红光,潘奎润,王焱,等.车用 492M 甲醇发动机的试验研究[J].北京工业大学学报,2005,31:500-504.
ZHANG HONG-GUANG, PAN KUI-RUN, WANG YAN, et al. Experimental study on 492M methanol automotive engine[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005,31:500-504.
- [9] 汪洋,王雪雁,蒋宁涛,等.甲醇发动机的性能研究[J].燃烧科学与技术,2006,12:390-393.
WANG YANG, WANG XUE-YAN, JIANG NING-TAO, et al. Study on the performance of methanol engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006,12:390-393.
- [10] 汪洋,王静,史春涛,等.甲醇发动机排放特性研究[J].内燃机学报,2007(1):73-76.
WANG YANG, WANG JING, SHI CHEN-TAO, et al. Study on the emission characteristic of a methanol fuel gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 2007 (1):73-76.
- [11] 陈韬,何邦全,谢辉,等. HCCI 甲醇发动机的燃烧与排放特性[J].燃烧科学与技术,2007,13:177-182.
CHEN TAO, HE BANG-QUAN, XIE HUI, et al. Combustion and emission characteristics of HCCI engine fueled with methanol fuel [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007,13:177-182.
- [12] 葛蕴珊,尤可为,王军方,等.甲醇燃料汽车的排放特性研究[J].北京理工大学学报,2008,28:314-318
GE YUN-SHAN, YOU KE-WEI, WANG JUN-FANG, et al. A study on exhaust emission from methanol vehicle [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2008,28:314-318.
- [13] KONG S C, REITZ R D. Application of detailed chemistry and CFD for predicting direct injection HCCI engine combustion and emissions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002,29:663-669.
- [14] RUTLAND C J, PIEPER C M, HESSEL R P. Intake and cylinder flow modeling with a dual-valve port[C]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 930069, 1993.
- [15] 谢克强,李忠.甲醇及其衍生物[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [16] 蒋德明,黄佐华,高剑,等.内燃机替代燃料燃烧学[M].西安:西安交通大学出版社,2007.

(编辑 陈移峰)