

# 柴油甲醇双燃料 燃烧技术进展

报告人: 姚春德  
天津大学  
2019.04.22

## 主要内容

- 一 柴油甲醇组合燃烧技术及在车用应用
- 二 船舶等柴油动力应用甲醇燃料进展
- 三 预期社会和经济效益
- 四 结束语

## 甲醇是内燃机的安全燃料

性质	甲醇	柴油	LNG
分子式	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>10</sub> ~C <sub>22</sub>	CH <sub>4</sub>
分子组成	O	0	0
	C	37.5	76
	H	12.5	24
密度 (kg/L)	0.793	0.830-0.860	0.430
闪点 (°C)	11	>55	-190
沸点 (°C)	64.7	180~360	-162.5
热值 (MJ/kg)	20.083	42.50	47.7
自燃温度°C	450	250	650
空燃比	6.45	14.5	17.2
汽化潜热 (kJ/kg)	1110	250	--
蒸发温度 (°C)	65	180-360	-162
爆炸限	26%-5.5%	0.6%-0.5%	15%-5%

## 甲醇燃料对人员是安全的

指标	甲醇	汽油	指标	甲醇	汽油		
吸入低浓度	毒性	3	10	皮肤接触时	毒性	9	8
	可能性	10	10		可能性	3	3
吸入高浓度	毒性	10	10	口服时	毒性	10	10
	可能性	3	4		可能性	8 (2)	3

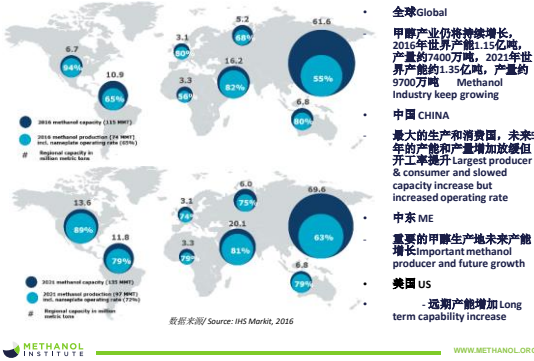
①括号中的数字表示添加剂存在时的可能性。

美国能源部1991年曾指出, 甲醇对人体的总危害要比汽油要小得多。如果把危害程度分为10个等级, 1为没有危害, 2和3为低水平危害, 4~6为中水平危害, 7~8为高水平危害, 9~10为极端危害, 则甲醇和汽油的毒性危害性比较见表1-9。可以看出, 低浓度时, 甲醇的毒性要小于汽油的毒性, 高浓度时二者相当, 但是处于高浓度甲醇蒸汽的概率低于汽油, 因为甲醇的蒸汽压低于汽油。

**蒸汽压比较 (雷德法37.8°C/MPa) 甲醇0.037, 汽油0.05-0.09**

**甲醇饱和蒸汽压 (kPa) 12.9/20°C, 68.8/55°C, 1atm**  
**柴油饱和蒸汽压 (kPa) 37.1/20°C, 54.8/38°C, 1atm**

## 中国是全球最大甲醇生产国 2016 vs 2021



## 推广甲醇燃料得到国家政策的支持

**工业和信息化部文件**  
 关于开展甲醇汽车试点工作的通知

工信部自2012年开始，在山西、陕西、上海两省一市启动了甲醇汽车试点。2015年，又增加了贵州、甘肃两省。将重卡柴油车应用甲醇的方式指定为柴油甲醇组合燃烧方式。

2013年2月6日颁发国务院办公厅《关于加强内燃机工业节能减排的意见》重点工程第五条提出用甲醇替代柴油解决重型柴油机替代燃料问题。

工信部等八部委于2019年3月19日发布《关于在部分地区推广应用甲醇汽车的指导意见》。正式将甲醇列为我国内燃机的应用燃料，并提出鼓励商用车利用甲醇汽车。

## 中国甲醇生产与甲醇汽车试点

- 我国自2012年开始，由工信部组织甲醇汽车试点，车辆包括乘用车、商用车。在陕西、山西、甘肃、贵州和上海市。历经5年时间，取得全面的成功。
- 目前在贵州省贵阳市，陕西省西安市已经开始全面推广使用甲醇出租车。



## 柴油机节能减排是中国面临的重要任务



柴油机是工程机械、农业机械、交通运输等主导动力。2016年以来我国的道路运输量占总运输量的75%以上、水路的17%是柴油动力完成。2018年统计，柴油消耗近1.6亿吨左右。2018年柴油动力排放NOx超过机动车68%，PM排放超过95%。

### 柴油甲醇组合燃烧技术及其工作特点

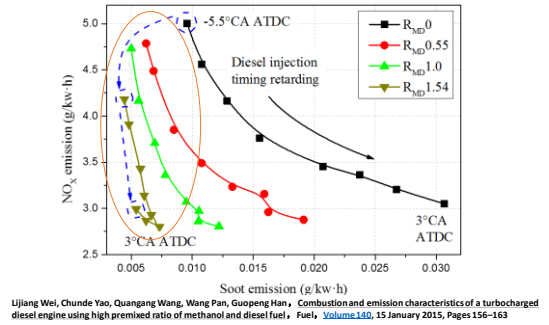
燃料性质	甲醇/乙醇	柴油	汽油
自燃温度 °C	450	~205	415°C~530°C
十六烷值	< 5	>45	< 5

**甲醇压燃有三难：**  
 自燃温度高  
 挥发性不良  
 与柴油不互溶

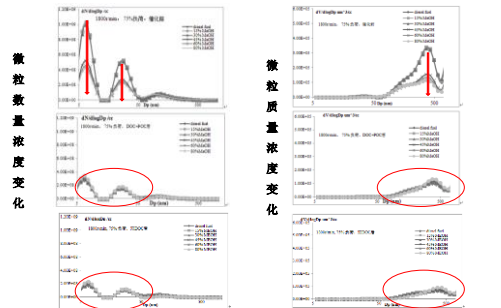
**低碳二元燃料燃烧**  
 -----高活性燃料喷  
 进低活性燃料的均质热氛围中，在气缸内两者一起实现快速燃烧

**柴油甲醇组合燃烧技术 (DMCC)**

### 甲醇掺烧打破了NOx与PM的trade-off关系



### 甲醇掺烧大幅度降低微粒排放



### 无尿素辅助满足国V排放法规要求

DMCC+EGR+DOC+POC					
	Emission	HC	CO	NOx	PM
ESC	Euro V	0.46	1.5	2.0	0.02
	DMCC	0.023	0.020	1.557	0.010
ETC	Euro V	0.55	4.0	2.0	0.03
	DMCC	0.03	0.01	1.76	0.013
ELR	Emission	Euro V		DMCC	
	Smoke capacity	0.5		0.1520	

ESC: HC 5.0%, CO 1.3%, NOx 77.9%, PM 50%  
 ETC: HC 5.4%, CO 0.25%, NOx 88%, PM 43.3%  
 Smoke: 30%

**DOC with ceramic carrier**      **POC with metal carrier**

**DOC+POC**

Hongyan Wei, Chunde Yao, Wang Pan, Guopeng Han, Zhancheng Dou, Taoyang Wu, Meijuan Liu, Jian Gao, Chao Chen, Junjie Shi, To meet demand of Euro V emission legislation urea free for HD diesel engine with DMCC, Fuel, Volume 207, 1 November 2017, Pages 33-46

## DMCC重卡参加工信部甲醇车试点并通过验收



DMCC技术参加了工信部于2012年开展的甲醇车试点工作。采用该技术的车辆在陕西榆林地区进行了长达2年多的运行，在榆林地区5辆车行驶超过10万公里，替代率46%，替换比1.2，经济效益22%，节省柴油100吨。于2017年7月通过工信部组织的专家验收。

DMCC重型车已经在国内12省2市得到应用，近200辆DMCC重卡正在全国各地运行，经历着严寒和酷暑的考验。根据统计的平均结果，平均甲醇替代率超过30%，体积替换比低于1.5。经济效益和排放得到了双重的改善。

## 甲醇作为船用燃料的试验

2017年由农业部主导开展船舶应用甲醇替代柴油工作，委托天津大学和潍柴联合开展台架实验。将于2018年上半年在南通进行系泊试验和渔船运行试验。项目得到国际最大甲醇公司梅赛尼斯 (Methanex) 集团的支持。

目前潍柴台架已搭建完毕，初步性能和排放试验已经完成，甲醇替代柴油显示出明显的经济和环境效益。



## 船用柴油机甲醇化改造

型式	直列、四冲程、直喷、废气涡轮增压中冷
气缸数	6
气缸直径 (mm)	170
活塞行程 (mm)	200
压缩比	14.5
持续转速 (r/min)	1500
持续功率 (kW)	450
平均有效压力 (MPa)	1.454
燃油消耗率 (g/kW·h)	196

## 中功率船机技术参数



### 发动机的技术参数

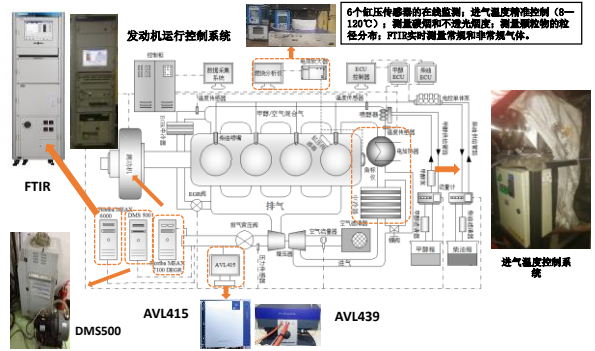
参数名称/单位	参数值
发动机型号	YC6MK350DM-C20
发动机控制形式 (柴油)	电控高压共轨
柴油喷油系统	博世共轨
排量/L	10.34
压缩比	16.8
缸径×行程/mm	123×145
额定功率/转速	257kW/1800r/min
最大扭矩/转速	1800N.m/ (1300~1500) r/min
试验爆压限值	≤150bar
排放	船机一阶段

### 高速船机甲醇化改造

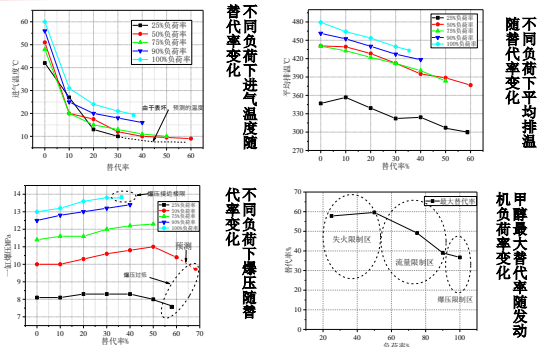
2只ECU由CAN总线通讯协同工作

在增压中冷、电控高压共轨发动机上加装甲醇喷射和控制系统，由主控计算机对其进行标定和运算，使之按照柴油甲醇组合燃烧方式运行。

### 排放测试台架及其相关测试设备



### 台架试验结果

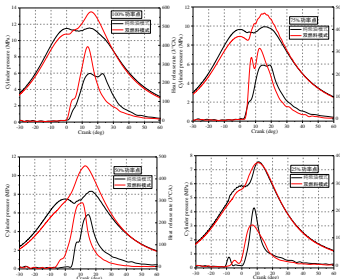


### 6MK发动机排放测试结果

运行模式	GB 15097-2016 1.2 ≤SV ≤5		纯柴油模式	双燃料模式 一次标定	双燃料模式二次标定 自动运行
	I阶段	II阶段			
CO排放量 (g/kW-h)	5.0	5.0	0.690	0.022	0.028
THC排放量 (g/kW-h)			0.096	0.000	0.009
NOx排放量 (g/kW-h)			5.933	5.818	5.842
THC+NOx排放量 (g/kW-h)	7.2	5.8	6.029	5.818	5.851
PM排放量 (g/kW-h)	0.20	0.14	0.0643	0.067	0.068
甲醇加权替代率			#	41.232%	40.382%
加权替代比			#	1.825	1.952

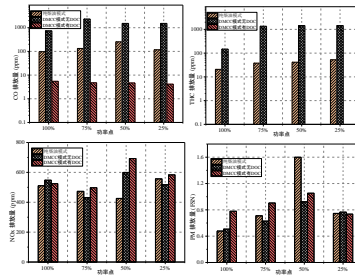
注：（1）《船舶发动机排气污染物排放限制及测量方法（中国第一、二阶段）》2018年7月1号实施；（2）双燃料时颗粒物排放仅为I阶段限值的34%，II阶段的48%。

### 双燃料发动机燃烧结果分析



输出功率与纯柴油模式完全相同；  
不改变原机标定情况下，双燃料模式下燃烧相位要早于纯柴油模式；  
双燃料模式下的最大缸压以及峰值放热率高于纯柴油模式；  
最大缸压以及最大压力升高率均远低于发动机的设计

### 排放试验排放结果分析



双燃料模式有DOC时，CO和THC接近零排放；  
双燃料模式有DOC时，NOx排放当量排放低于纯柴油模式；  
双燃料模式PM排放50%功率点约为原机的一半，25%功率点与原机持平，仅100%功率点和75%功率点略高于原机。

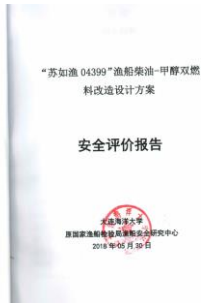
### 实船试验方案介绍

系泊试验	
甲醇替代率实验	烟度排放对比实验
试验转速：600r/min	试验转速：500和700r/min
<b>实验过程</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 发动机充分热机；</li> <li>◆ 船舶合架，将发动机转速设置为600r/min；</li> <li>◆ 待发动机完全稳定后，将测试容器燃油量进行标记，然后发动机连续运转5小时；</li> <li>◆ 待5小时连续运转后，将燃油添加到实验前标定的刻度附近，采用称重式测量法，测量5小时连续运转期间发动机消耗的柴油量。</li> </ul>	<b>实验过程</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 发动机充分热机；</li> <li>◆ 船舶合架，将发动机转速设置为500r/min，转速稳定后开始试验；</li> <li>◆ 用便携式烟度计测量发动机烟度排放，待烟度计示数稳定后开始记录烟度排放结果，连续测量记录3分钟，然后取平均；</li> <li>◆ 将发动机转速设置为700r/min，转速稳定后开始试验；</li> <li>◆ 用便携式烟度计测量发动机烟度排放，待烟度计示数稳定后开始记录烟度排放结果，连续测量记录3分钟，然后取平均；</li> </ul>

### 实船试验结果分析

替代率实验									
模式	试验时间 (h)	柴油消耗量 (kg)	甲醇消耗量 (kg)	替代率 (%)	替代比	柴油价格 (元/吨)	甲醇价格 (元/吨)	燃料成本 (元/天)	经济性
纯柴油	5	145	0	#	#	7715	2611	5369.64	#
双燃料	5	105	44	27.6	1.1	7715	2611	4439.8	17.3%
烟度排放对比实验									
模式	转速 (r/min)	K值 (m <sup>-1</sup> )	Ns值 (%)	双燃料模式K值减少率 (%)	双燃料模式Ns值减少率 (%)				
纯柴油	500	5.07	88.66						
双燃料	500	1.37	44.47	73.07	49.84				
纯柴油	700	2.41	63.76						
双燃料	700	1.11	38.01	54.04	40.39				

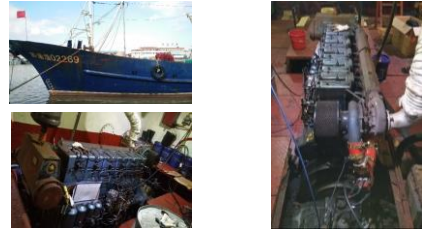
## 完成了初步安评报告



### 安评结论与建议：

1. “苏如渔04399”号渔船甲醇柴油双燃料动力改造方案基本符合主管机关的有关规定要求；
2. 该设计方案中所存在的风险可以通过修改设计方案和在施工过程中进行风险控制来避免的；
3. 渔船DMCC技术改造可以提高我国渔船的技术和装备水平，优化渔船船舶废气排放指标，有助于实现渔业船舶“节能减排”战略目标，具有良好的社会、经济效益。

## 甲醇燃料的实船应用系泊试验



发动机：潍柴 6160, 184kW/1000r/min 发动机动力性保持不变  
烟度减少平均超过60%，500r/min降73.07%，700r/min降54.07%  
燃油经济性提高了17.3%，甲醇对柴油替代达27.6%，替代等量柴油的甲醇为1.1

## 通过了交通部的项目结题验收



2018年12月21日由国家交通运输部海事局，对天津大学承担的原农业部渔船检验局的项目《船用柴油机应用甲醇研究》，组织专家进行结题验收评审。与会专家听取了项目组完成情况的汇报。



专家组同意通过项目验收评审。

## 预期社会和经济效益

柴油甲醇双燃料船舶与纯柴油船舶对比		
	柴油甲醇双燃料船舶	柴油船舶
经济性	甲醇2元/L，每小时节约15%~20%	柴油6元/L
安装成本	10~15万元	
动力性	比原机更好	
甲醇替代率	最高60%，平均40%	#
使用便利性	需要分别加柴油及甲醇	有柴油加注网络
安全性	甲醇对部分金属材料有腐蚀性	安全
燃料加注	燃料级别甲醇全国都有生产	
环境影响	NOx和PM排放低，排温低	NOx和PM排放高，排温高

## 甲醇已用作大型船舶内燃机的燃料

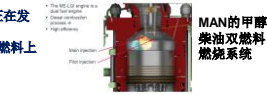
- 国际上已有7艘柴油甲醇双燃料船运输船，正在发展到11艘。
- 国际海事组织CCS在今年9月14日通过低闪点燃料上船的决议。
- 我国CCS发布醇类燃料上船的公告。



世界上首艘甲醇双燃料船舶



甲醇双燃料船舶2017年停靠乍浦港



CCS 中国船级社

船舶甲醇燃料使用规范 2017

2017年 08月14日

为贯彻落实《船舶甲醇燃料使用规范》(以下简称《规范》)的要求，指导船舶甲醇燃料的使用，特制定本指南。本指南适用于甲醇双燃料船舶的甲醇燃料系统的设计、建造、检验、试验、操作、维护、修理、改造、报废等各个环节。本指南是《规范》的补充和细化，是船舶甲醇燃料使用的重要技术文件。本指南由中国船级社(CCS)编制，并经CCS技术委员会审议通过。本指南自发布之日起实施。本指南由中国船级社(CCS)负责解释。本指南的发布和实施，将有利于提高船舶甲醇燃料使用的安全性和可靠性，促进船舶甲醇燃料的推广应用。



中国船级社  
船舶甲醇燃料使用规范

发布日期：2017年8月14日

001

## Scania的柴油甲醇双燃料车



### 发动机的技术参数

斯堪尼亚的13L发动机，能够以甲醇为燃料，在1900转的时候即可输出331kW（即450马力）的最大功率，1000-1300转时可以输出最大2350N·m的扭矩，符合欧六排放标准。



7升的共轨发动机，能够以甲醇为燃料，最大功率为206kW（280马力），最大扭矩为1200N·m，满足欧六排放标准。



## 甲醇与柴油掺烧的优越性

1. 甲醇不含硫，燃烧清洁，尾气无腐蚀；
2. 甲醇汽化潜热高，可以大幅度回收发动机余热；
3. 甲醇燃烧时需要空气少，NO<sub>x</sub>排放低；
4. 甲醇与掺烧对原发动机基本不改动
5. 甲醇与柴油双燃料更安全。

## 结束语

- 甲醇柴油组合燃烧技术突破甲醇不能用于压燃式的技术障碍，加装甲醇系统简单易行，燃料切换方便，运行柴油甲醇的双燃料时动力性与原机相同。
- 掺烧甲醇可以满足排放法规I、II阶段的要求。同时可大幅度减少能量流失，提高燃料热效率；
- 甲醇柴油双燃料发动机标定、专业部件全部国产化，为大规模推广应用提供了坚实的基础。
- 使用甲醇燃料的动力已经成为动力多元化的组成部分，甲醇也构成了燃料多元化。

谢谢各位专家！