

重型燃气机燃烧系统参数对燃烧特性影响的研究

陈欢，张宏飞，徐敏
(东风商用车有限公司，武汉 430056)

摘要：本论文以重型天然气发动机为研究对象，利用计算流体力学、传热学等理论方法，以数值仿真为研究手段，设计了两种压缩比（11.5 和 13.5）及每种压缩比下两条燃烧室型线燃烧室方案，运用 **converge** 软件进行三维燃烧系统仿真分析，并研究了挤流角度以及燃烧室深度对燃烧过程的影响。结果表明：在低压压缩比下，挤流角度越小，燃烧速度越快；在高压压缩比下，挤流角度越大，燃烧速度越快。在低压压缩比和高转速下，燃烧室深度越大，燃烧过程越快。

关键词：天然气发动机；缸内直喷；流场结构；扩散燃烧

面对日益严峻的能源短缺与环境污染问题，天然气作为一种清洁燃料，受到了广泛的重视。天然气发动机以其良好的排放指标和较高的经济效益获得了诸多认可，但是天然气存在着着火温度高、火焰传播速度慢等缺点，使得发动机的燃烧持续期较长，导致排气温度高、热效率低及燃烧循环变动大等问题。因此，了解发动机缸内流动和燃烧的各项性能参数对于优化缸内燃烧过程具有重要的指导意义。

迄今为止，学者们对天然气发动机进行了大量的研究。Jin Kusaka^[1]使用多维模型与包含 57 种化学成份和 290 个基本反应的化学动力学模型相耦合的方法对双燃料天然气发动机的燃烧与排放特性进行了研究，在计算中研究了预混合气浓度对燃烧的影响。结果表明，由于预混合气的消耗速率和缸内气体温度增加，增加天然气浓度可以改善燃烧，降低 THC、CO 排放。天津大学的郑清平^[2]利用 AVL-FIRE 软件对分隔室压燃式天然气发动机的燃烧室结构参数对着火时刻、缸内平均温度和压力以及 NO 排放的影响进行了分析。吉林大学的窦慧莉^[3]采用 STAR-CD 对电控喷射稀燃天然气发动机的混合气形成和燃烧过程进行了数值模拟。

本文以数值仿真为研究手段，在阐明火花点火天然气发动机缸内流动及燃烧特征的基础上，分析了转速、压缩比、燃烧室深度对燃烧性能的影响。

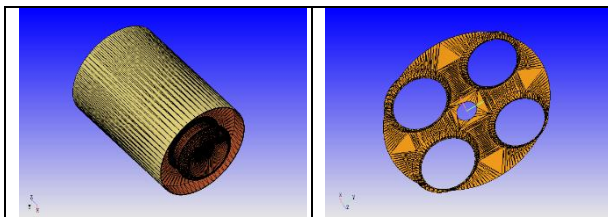
1 数值模型的建立

本研究基于一台 DGI13 天然气发动机，该发动机的基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机结构参数

项目	参数
冲程数	4
气缸数	6
气缸排列形式	直列
连杆长度/mm	265
缸径×冲程/mm×mm	131×160

基于 **Converge** 自带网格生成软件建立发动机计算网格，整个计算模型包括缸盖、缸体、缸垫、火花塞、缸套、气门垫圈、气门导管、气门、进气道、排气道等，如图 1 所示。**Converge** 软件可以在火花塞附近以及边界区域细化网格，从而在保证计算精度的前提下尽可能减小计算工作量，如图 2 所示。



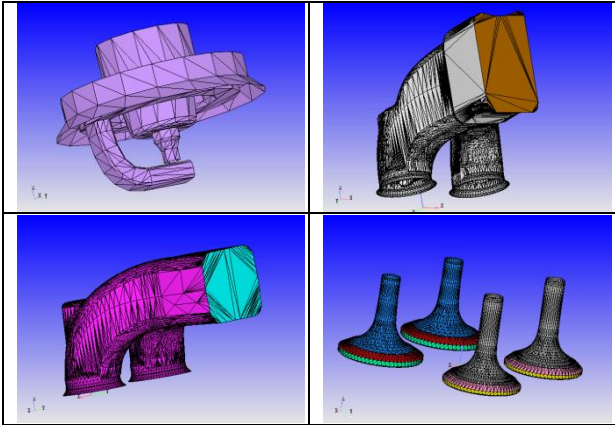


图 1 DGI13 各部件网格模型

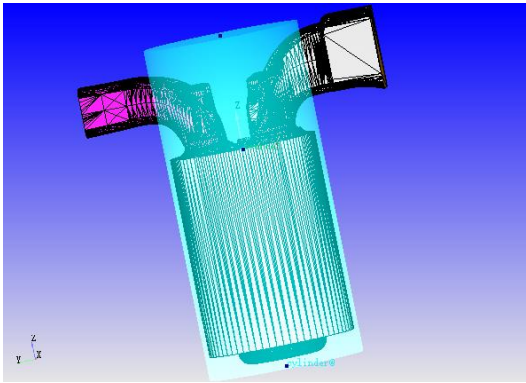
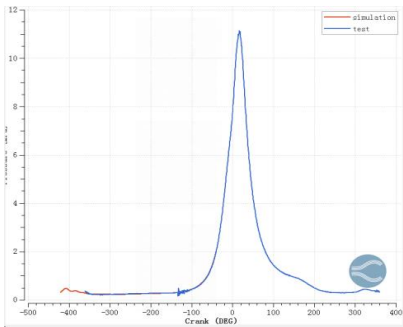
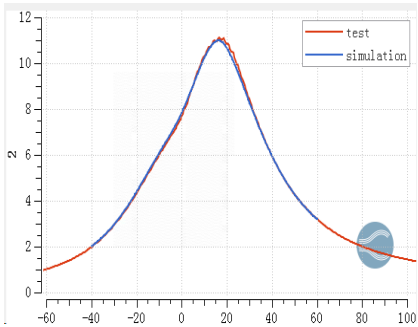


图 2 DGI13 加密网格模型

计算从进气门开启前开始，模型标定分两段进行，纯压缩段和点火燃烧段。纯压缩段从进气门开启到点火前，点火燃烧段从点火开始前到燃烧结束，模型标定结果如图 3 所示。试验和模拟的缸压曲线吻合较好，误差在 5%以内，表明该模型可以比较合理地反映缸内流动燃烧的物理化学过程。



(a) 压缩段



(b) 点火燃烧段

图 3 模型标定结果

2 燃烧室计算方案

燃烧室计算方案如表 2-1~表 2-4 所示。对应的燃烧室型线如图 4 所示。

表 2-1 压缩比 11.5-不同转速

模型	ANG	ANG	ANG	ANG
	1394_H =31.5	1727_H =31.5	1394_H =31.5	1727_H =31.5
气道类型	切向气道（低涡流比）			
转速(r/min)	1000	1000	1800	1800
压缩比	11.5	11.5	11.5	11.5
空燃比	19.18:1	19.18:1	21.23:1	21.23:1
EGR 率	11%	11%	19%	19%
点火正时	-16° CA	-16° CA	-32° CA	-32° CA

表 2-2 压缩比 13.5-不同转速

模型	ANG	ANG	ANG	ANG
	1450_H =31.5	1660_H =31.5	1450_H =31.5	1660_H =31.5
气道类型	切向气道（低涡流比）			
转速 (r/min)	1000	1000	1800	1800
压缩比	13.5	13.5	13.5	13.5
空燃比	19.18:1	19.18:1	21.16:1	21.16:1
EGR 率	11%	11%	19%	19%
点火正时	-10.25° CA	-10.25° CA	-29.5° CA	-29.5° CA

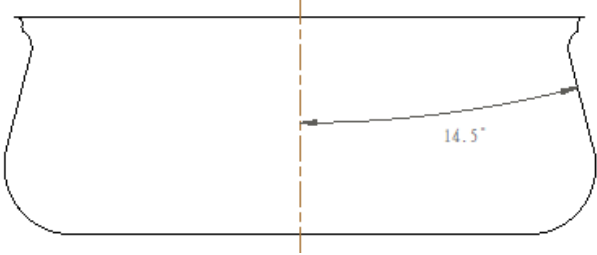
表 4-3 不同压缩比-1800rpm

模型	ANG	ANG	ANG	ANG
	1404_H =34.5	1726_H =34.5	1404_H =34.5	1726_H =34.5

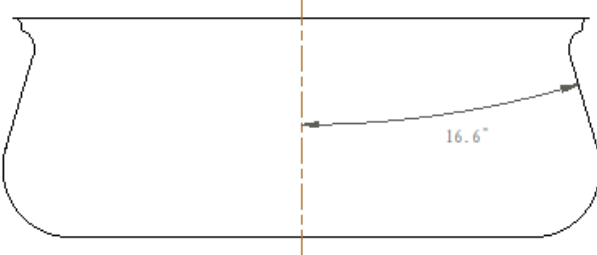
气道类型	切向气道（低涡流比）			
转速 (r/min)	1800	1800	1800	1800
压缩比	11.5	11.5	13.5	13.5
空燃比	21.23:1	21.23:1	21.16:1	21.16:1
EGR 率	19%	19%	19%	19%
点火正时	-32° CA	-32° CA	-29.5° CA	-29.5° CA

表 5 压缩比 11.5-1800rpm
天然气发动机基本结构参数和工况

模型	ANG 1404_H =34.5	ANG 1726_H =34.5	ANG 1404_H =34.5	ANG 1726_H =34.5
气道类型	切向气道（低涡流比）			
转速 (r/min)	1800	1800	1800	1800
压缩比	11.5	11.5	11.5	11.5
空燃比	21.23:1	21.23:1	21.23:1	21.23:1
EGR 率	19%	19%	19%	19%
点火正时	-32° CA	-32° CA	-32° CA	-32° CA



(c) 135-1450



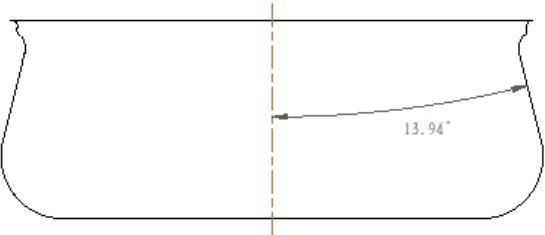
(d) 135-166

图 4 燃烧室方案

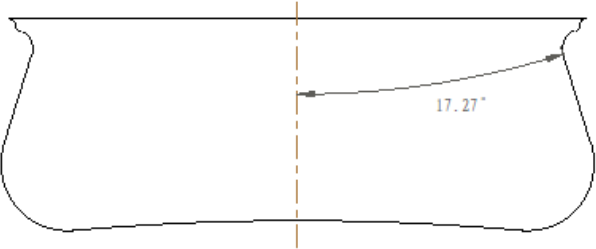
3 计算结果与分析

3.1 挤流角度对缸压和放热率的影响

表 6 显示了压缩比为 11.5 时，在高、低转速下的四种模型的结构参数和计算工况。图 4~图 6 为缸内燃烧二维结果对比，从图 5 缸压曲线可以看出，1000rpm 13.94° 倾角爆压峰值最大，倾角 13.94 在 1000rpm 和 1800rpm 都大于 17.27 度倾角。



(a) 11.5-1394



(b) 11.5-1727

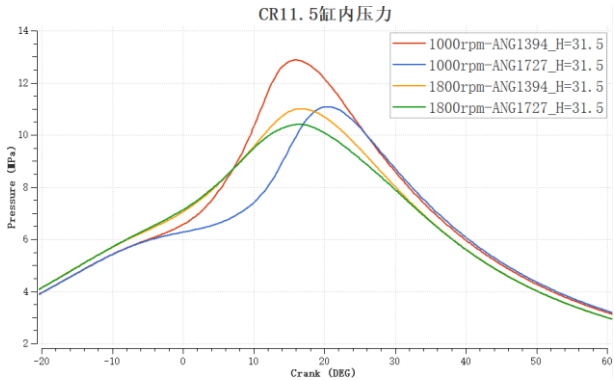


图 5 压缩比 11.5-不同转速
天然气发动机缸压曲线

图 6 为不同转速压缩比 11.5 在不同倾角下的瞬时放热速率曲线，可以看出，1000rpm 时，13.94 度倾角的峰值略高于 17.27 度，13.94 度倾角的相位比 17.27 度倾角的相位靠前 4°。在 1800rpm，13.94 度倾角的峰值相位与 17.27° 倾角接近，峰值高于

17.27° 倾角。图 7 为不同转速压缩比 11.5 在不同倾角下的放热量对比，在 1000rpm 和 1800rpm 下 13.94 度倾角达到相同放热量的时间更短，燃烧速度更快。

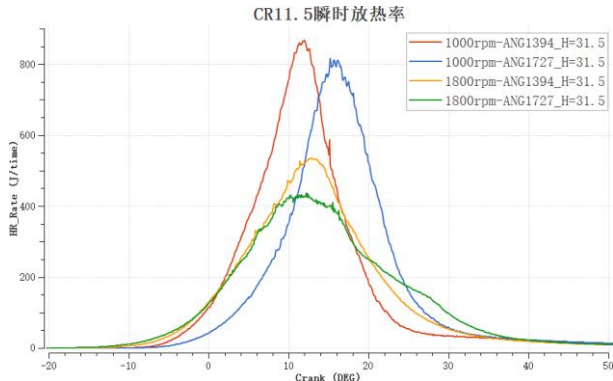


图 6 压缩比 11.5-不同转速
天然气发动机瞬时放热率曲线

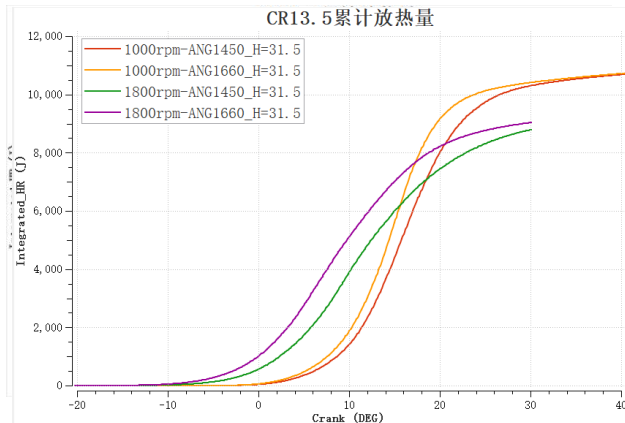


图 7 压缩比 11.5-不同转速
天然气发动机累计放热量曲线

表 6 压缩比 11.5-不同转速天然气发动机对比

模型	压缩比	点火正时	最高压力
1000rpm-ANG 1394_H=31.5	11.5	-16 ° CA	12.86MPa
1000rpm-ANG 1727_H=31.5	11.5	-16 ° CA	11.08MPa
1800rpm-ANG 1394_H=31.5	11.5	-32 ° CA	11.00MPa
1800rpm-ANG 1727_H=31.5	11.5	-32 ° CA	10.40MPa

图 8~图 10 为 13.5 压缩比下缸内燃烧二维结果对比。由图中缸压、放热率和放热量的对比可以看出，与 11.5 压缩比的情况不同，在 1000rpm 和 1800rpm 下，16.6 与 14.5° 挤流倾角相比，爆压更

大，燃烧相位更加靠前，燃烧持续期更短。故在 13.5 大压缩比下，大的挤流倾角体现出了更优的性能。

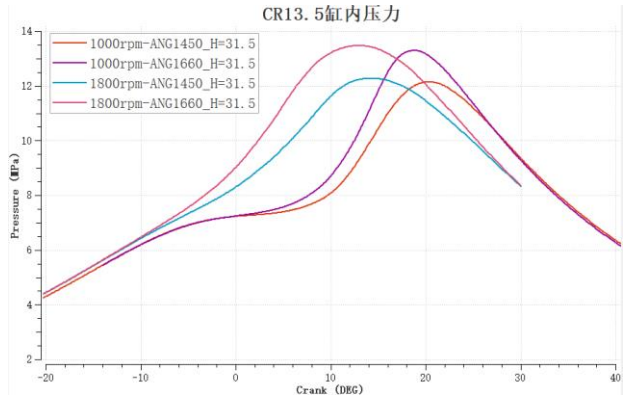


图 8 压缩比 13.5 缸内压力

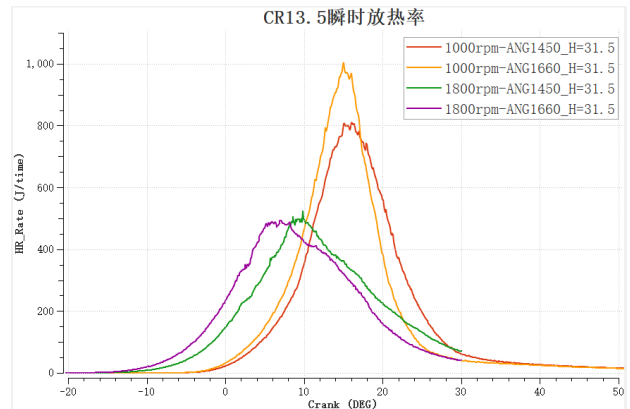


图 9 压缩比 13.5 瞬时放热率

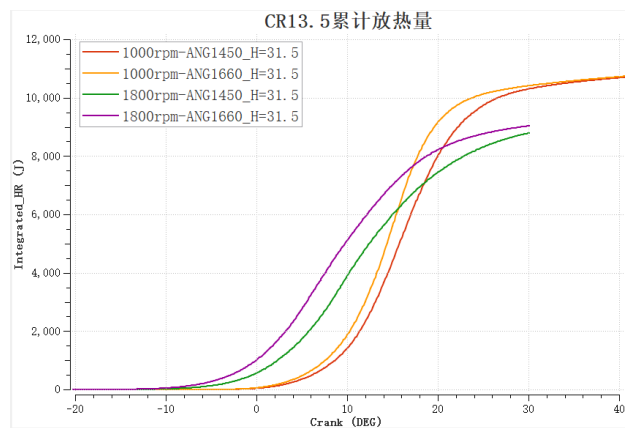


图 10 压缩比 13.5 累积放热

3.2 挤流角度对缸内燃烧温度的影响

由图 11 可知，压缩比 11.5，转速 1000rpm 时 ANG1394 燃烧相位较前，缸内最高温度较高；压缩比 11.5，转速 1800rpm 时在急燃期内

ANG1394 的放热率更大，燃烧速度更快，缸内温度也更高。

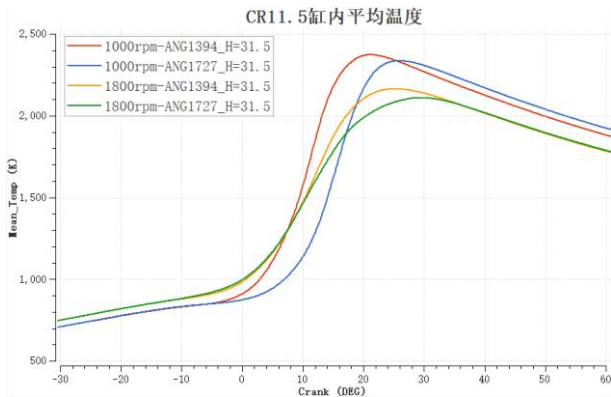


图 11 CR11.5 缸内平均温度

由图 12 可知，压缩比 13.5，转速 1000rpm 时 ANG1660 缸内最高温度较高；压缩比 13.5，转速 1800rpm 时在 ANG1660 燃烧相位较前，缸内温度更高。

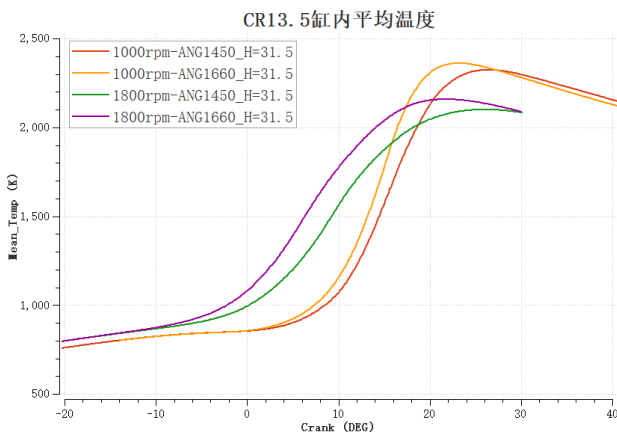


图 12 压缩比 13.5-不同转速
天然气发动机缸内平均温度曲线

3.3 挤流角度对缸内湍动能的影响

由图 13 可知，压缩比 11.5，转速 1000rpm 时点火时刻 ANG1394 缸内湍动能较高；压缩比 11.5，转速 1800rpm 时在点火时刻 ANG1727 缸内湍动能较高。湍流强度越大，火焰传播速度越快，燃烧越快。

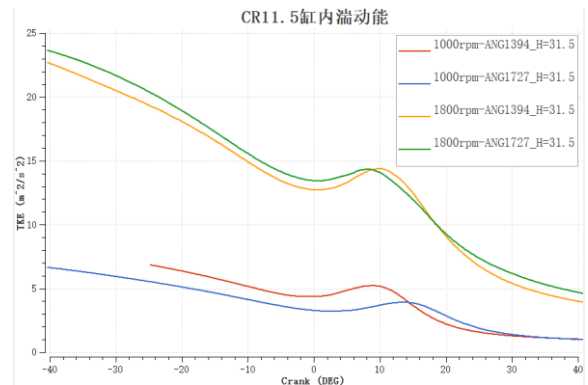


图 13 压缩比 11.5 缸内湍动能

图 14 为压缩比 13.5 缸内湍动能。由图可知，压缩比 13.5，转速 1000rpm 时点火时刻 ANG1660 缸内湍动能较高。转速 1800rpm 时点火时刻 ANG1660 缸内湍动能较高，且持续到上止点后 8° CA。

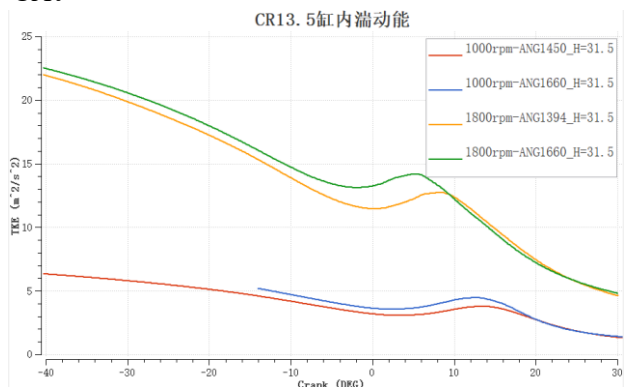
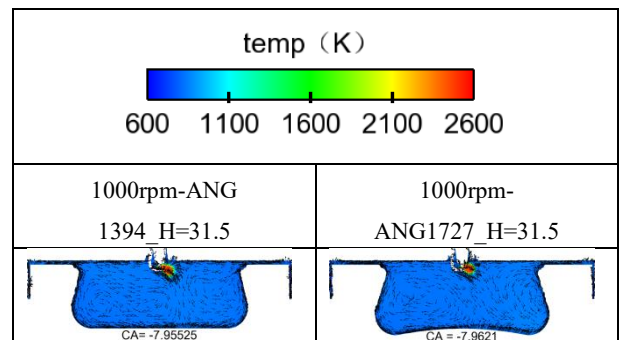


图 14 压缩比 13.5 缸内湍动能

图 15 为压缩比 11.5，1000rpm 下两个不同挤流角度温度场的对比，由图可知 13.94° 挤流倾角的火焰核心形成速度更快，火焰面的扩展速度更快，在上止点后 20° 曲轴转角，火焰基本已发展到整个燃烧室，而 17.27° 倾角的火焰可明显看出，在燃烧室的左下部分还未发展完全。



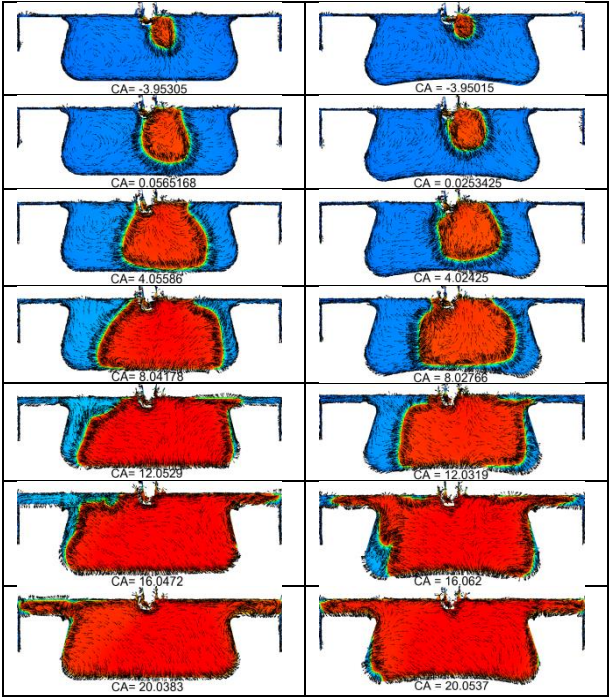


图 15 压缩比 11.5-1000rpm 天然气发动机温度对比

图 16 为火焰面发展情况的对比，可更直观的看出 13.94° 挤流倾角的火焰面发展更快。由图 8 和图 9 可知，在压缩比 11.5、转速 1000rpm 时，ANG1394 的温度场和火焰面发展更快，因此其燃烧性能优于 ANG1727。

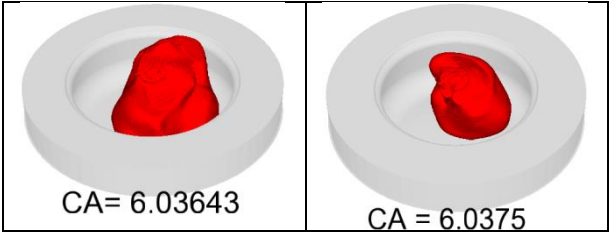
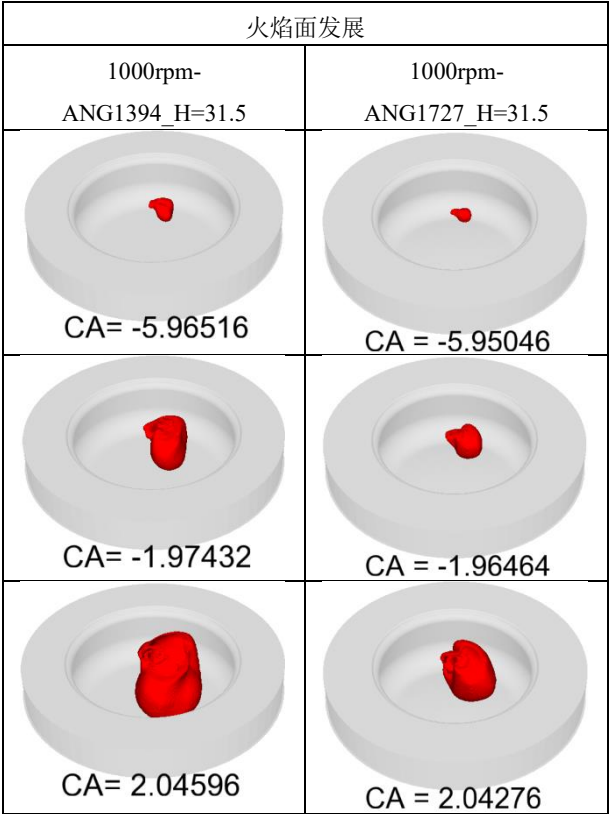


图 16 压缩比 11.5-1000rpm 天然气发动机火焰面发展对比

由图 17 可知，压缩比 11.5，转速 1800rpm 时，ANG1394 的速度场分布更加均匀，故其燃烧性能优于 ANG1727。结合温度场、速度场等分析可知，在 11.5 小压缩比下，小的挤流倾角性能更优。

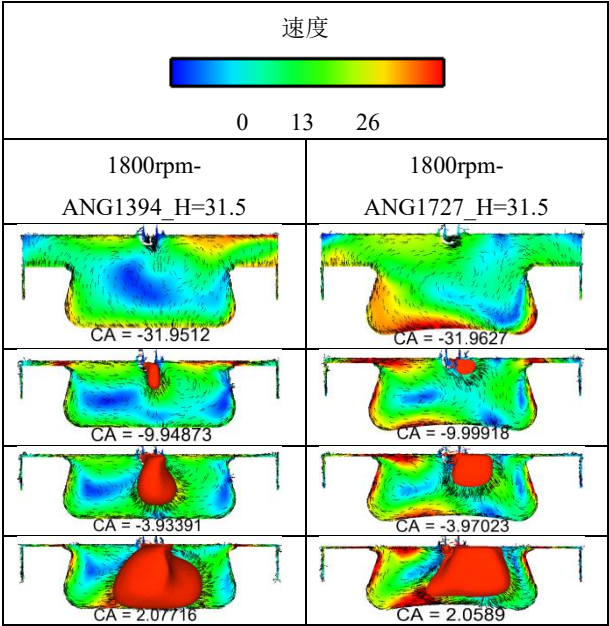
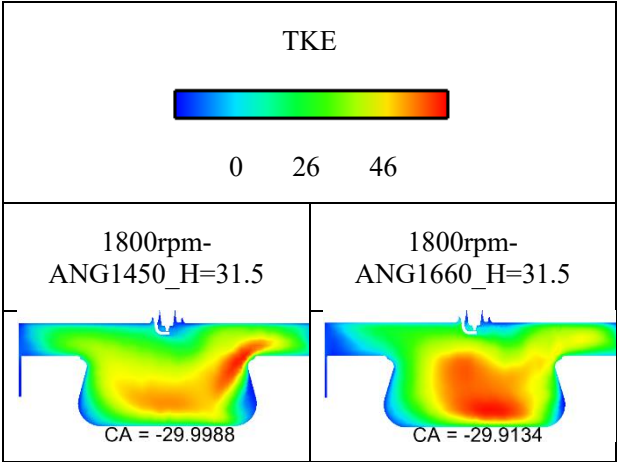


图 17 压缩比 11.5-1800rpm

天然气发动机纵切面速度对比

由图 18 可知，压缩比 13.5，转速 1800rpm 时，ANG1660 的湍动能更大，故其燃烧性能优于 ANG1450。



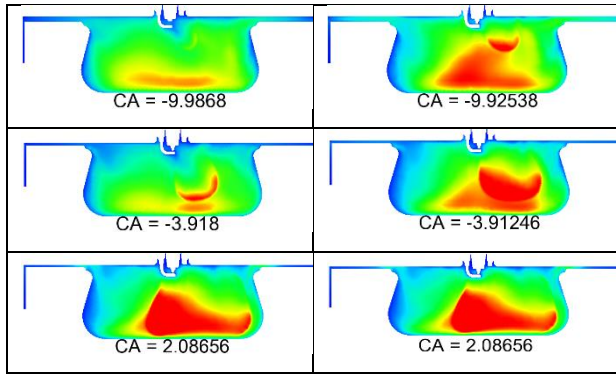


图 18 压缩比 13.5-1800rpm

天然气发动机湍动能

图 19 压缩比 13.5-1800rpm 天然气发动机火焰面发展对比。由 18 可知，压缩比 13.5，转速 1800rpm 时，ANG1660 燃烧性能优于 ANG1450。

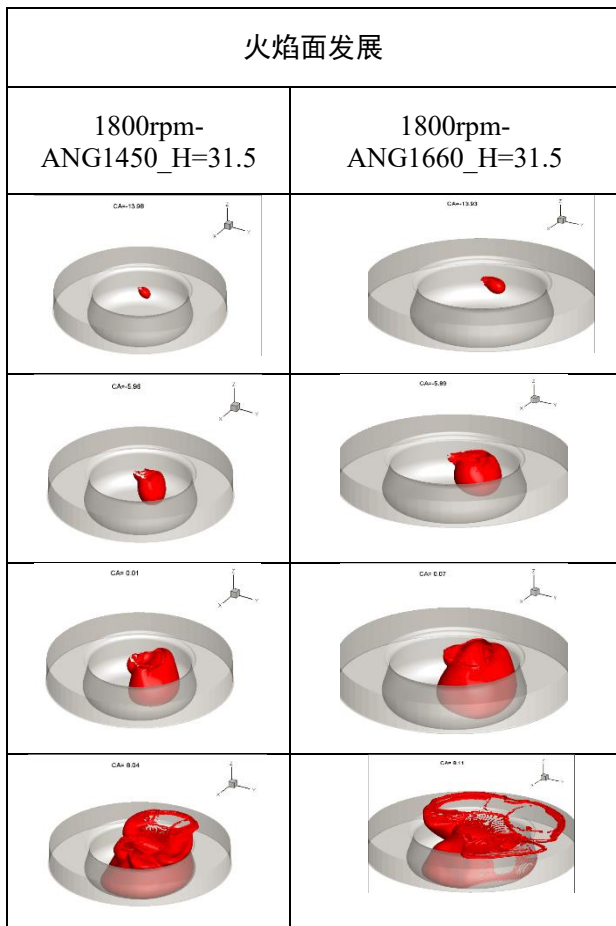


图 19 压缩比 13.5-1800rpm 天然气发动机火焰面发展对比

(1) 完成 1000rpm 下共计 4 套燃烧室方案的三维缸内燃烧计算及分析。获得了缸内压力、温度、湍动能曲线，瞬时放热率、累计放热量曲线。

(2) 对比分析了不同转速下，挤流角度对燃烧性能的影响。运用 ENSIGHT 软件对比分析各个燃烧室的速度场、温度场、湍动能分布及火焰发展。

(3) 对比分析了不同压缩比下，挤流角度对燃烧性能的影响。运用 ENSIGHT 软件对比分析各个燃烧室的速度场、温度场、湍动能分布及火焰发展。

(4) 对比分析了燃烧室深度对燃烧性能的影响。运用 ENSIGHT 软件对比分析各个燃烧室的速度场、温度场、湍动能分布及火焰发展。

基于以上这些工作，对该型发动机进排气系统已有了多方面的认识，通过计算分析得出以下结论：

(1) 在低压缩比 (CR11.5)，高转速 (1800rpm) 和低转速 (1000rpm) 下，挤流角度越小，燃烧速度越快。

(2) 在高压缩比 (CR13.5)，高转速 (1800rpm) 和低转速 (1000rpm) 下，挤流角度越大，燃烧速度越快。

(3) 在高转速 (1800rpm)，低压缩比 (CR11.5) 下，燃烧室深度越大，燃烧过程越快。

参 考 文 献

- [1] Jin Kusaka, Takashi Okamoto, Yasuhiro Daisho, Ryouji Kihara, Takeshi Saito. Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas[J]. JSAE Review, 2000, 21(4).
- [2] 郑清平. 压燃式天然气发动机燃烧过程模拟计算和试验研究[D]. 天津大学, 2006.
- [3] 樊慧莉. 电控喷射稀燃天然气发动机的关键技术研究[D]. 吉林大学, 2006.

4 结 论

本论文以重型天然气发动机为研究对象，利用计算流体力学、传热学等理论方法，运用 converge 软件进行了以下几个方面的工作：