

涡流燃烧室碰撞喷雾模拟分析

安西方

(大连理工大学能源与动力学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 应用 FIRE 软件, 对一种吊钟型涡流室式柴油机的压缩、喷雾过程进行模拟, 考察气流运动、喷雾方向对混合气形成、分布、扩散过程的影响。对于喷雾过程, 主要通过缸内的燃空当量比分析了燃油的分布情况; 由油滴在涡流室内的粒径云图观察喷雾的形态。模拟结果表明: 涡流室内强烈的气流运动对燃油的雾化作用很大, 由于气流的阻尼作用, 油滴不断破碎、雾化、蒸发, 最终形成可燃混合气; 改变喷雾方向, 可以实现燃油的碰撞喷雾, 油滴的破碎, 使混合气在涡流室内均匀分布, 有利于燃油的充分燃烧。

关键词: 涡流燃烧室; 碰撞喷雾; 数值模拟

中图分类号: TK421.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)03-0008-06

Numerical Simulation of the Spray Impingement in a Swirl Chamber

An Xifang

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024)

Abstract: Using AVL FIRE software, the compression and expansion stroke of a diesel engine with bell type swirl chamber is simulated. The influence of the gas flow and injection direction on the mixing and diffusion process is studied. As for injection process, the distribution of fuel in the swirl chamber is analyzed by controlling fuel air equivalence ratio in the chamber. The shape of spray is described with spray cloud in the swirl chamber. The result shows that the strong air movement in swirl chamber has big influence on the atomization of fuel. Because of the damping effect of air flow, oil droplets are broken, atomized, evaporated, then combustion finally become available. The spray impinging in chamber wall will take place when changing injection direction, that improves the broken of oil droplets, and the mixture will be distributed in swirl chamber more evenly, which is preferable for the following combustion.

Keywords: swirl chamber; spray impingement; numerical simulation

0 引言

发动机的排放污染问题正日益受到世界各国的重视, 如何降低发动机排放物对环境的危害已成为国内外内燃机工作者的重点。涡流室式柴油机由于燃烧系统特有的低排放、低噪声、高速适应性好等优点, 在满足排放要求方面, 具有一定的优越性^{[1][2]}。因此说深入研究涡流室式柴油机的燃烧系统, 有着深刻的意义^{[3][4]}。涡流室式柴油机在我国

国民经济中占有重要地位, 作为汽车、拖拉机、农用水泵、收割机、小型工程机械、小型船舶的动力, 广泛应用于交通、农业、工业等各个部门。近年来, 国内外内燃机工作者为开发和研制新型涡流燃烧室做了不少工作, 取得了一些新的研究成果。如: 日本尼桑公司通过增加涡流室内的过量空气, 即抑制了 NO_x 的形成, 又不增加指示燃油消耗率, 同时采用副喷孔以降低怠速噪声。早在二十世纪七十年代初, 我国江苏理工大学动力系李德桃教授领

收稿日期: 2010-11-01; 修回日期: 2011-01-09

作者简介: 安西方(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为内燃机燃烧过程数值模拟, E-mail: axhandsome@163.com。

导的科研小组,在常柴Ⅱ号的基础上,开发出一种用在 495Q 型柴油机上的新涡流燃烧室,其性能达到当时的国际水平。二十世纪八十年代,李德桃教授提出并成功开发的“低油耗、低污染、低爆压涡流燃烧室”,采用双楔型主燃室,圆弧型通道,优化的涡流燃烧室设计,使其性能和排放得到全面改善。杜家益应用自行开发的大型 Engine CFD 软件包,对 S195 柴油机标定工况的燃油喷雾过程进行了二维数值模拟计算,研究了流场及燃油与空气混合过程随曲轴转角的变化规律,以及燃油喷雾对流场的影响^[2-9]。

本文应用 AVL FIRE 软件对一台涡流室式柴油机的喷雾燃烧过程进行了数值模拟。主要模拟从进气门关闭开始至排气门开启时结束,分析了其间缸内的气体流动特点、涡流的形态、燃油喷射及雾化的过程;改变喷雾的方向,考察该因素对涡流室内混合气的形成及其分布的影响;通过观察涡流室及主燃室内的燃空当量比分布,探讨了涡流室柴油机燃烧系统的喷雾特点,以及可燃混合气在缸内的分布情况。

1 计算模型和初始条件的建立

1.1 计算对象

本文参考某台涡流室式柴油机的标准工况进行模拟分析,其结构参数如表 1 所示。

表 1 某涡流室式柴油机参数

冲程数	4
缸径×冲程/mm	78×65
连杆长度/mm	130
转速/(r/min)	3 000
压缩比	20
喷油开始时刻/°C A BTDC	26
喷油结束时刻/°C A BTDC	13
循环供油量/kg	1.37×10^{-5}

1.2 模型的建立和加载边界条件

利用 UG 绘制出三维实体模型(图 1),然后将此模型输入仿真软件 FIRE 中,并对模型进行加载、计算和分析。

涡流室容积 V_k 与压缩容积 V_c 之比为 46.4%、通道截面积 f_k 与活塞面积 F_p 之比为 1.15%、连接通道倾角 α 为 41.5°。

气体初始边界条件如下:假设气缸内气体均匀,各处温度和压力均相等,缸内气体初始温度取 325 K,缸内初压为 1.1×10^5 Pa。温度边界采用恒

温边界,不考虑活塞运动和缸内燃烧对温度的影响,分别取气缸盖、活塞顶部和涡流室壁的平均温度作为边界温度。缸盖底部温度、涡流室壁温度、活塞顶部凹坑温度分别为 475 K、450 K、450 K。

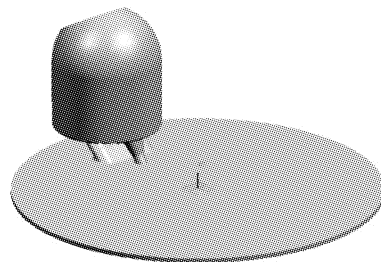


图 1 涡流燃烧室实体模型

1.3 喷雾及燃烧模块

采用 ENABLE 模型计算湍流扩散过程。在喷雾方程中引入气相湍流脉动速度 u_i 来计算液滴的湍流扩散。 u_i 的分量由标准方差为 $\sigma = \sqrt{2K/3}$ 的高斯分布确定。该模型喷雾子循环的时间步长为湍流时间尺度和液滴通过网格单元时间尺度中的最小值。

在 FIRE 中,采用了 TAB 模型来描述喷油的雾化过程。该模型将液滴的振动和变形与弹簧质量系统相类比,液滴表面张力类比为弹簧刚度,液滴阻力类比为外力,液滴粘性力类比为阻尼力。

喷注着壁模型对雾化和混合的影响较大,本文采用 Bai-Gosman 模型。为了确定各种形态所在参数范围的判据,Bai 和 Gosman 进一步假定:①各种形态之间的转换均对应于一个确定的参数值而非像事实那样有一定范围;②粘附和摊布两种形态可合并为一种:“附壁”;③以韦伯数为基本参数,忽略一些次要参数的影响。

FIRE 中采用的柴油机点火模型是 Shell 自燃模型。对于湍流扩散燃烧模型,本文选取 FIRE 中的 3 区拟序火焰模型(ECFM-3Z)燃烧模型。

2 模拟结果分析

2.1 气流运动分析

本文分析了从进气门关闭到喷油开始,缸内气流的运动情况,着重介绍了涡流室内的气体流动特性,图 2 为 593~693 °C A 的气流速度矢量分布图。

涡流燃烧室利用压缩涡流来改善混合气形成和燃烧过程,涡流燃烧室内气流运动属涡流性质,其涡流特性既随曲轴转角改变,也随沿涡流室半径方向而变。随着活塞向上止点靠近,在涡流室内开始明显出现刚体涡流或近似刚体涡流,这种刚体涡流几乎分布在整个涡流室内。

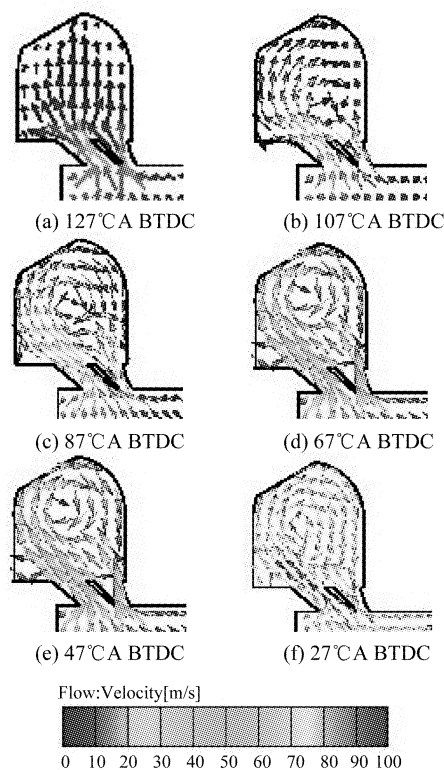


图 2 涡流室气流运动速度图

图 2 为上止点前 127 °C A 到上止点前 27 °C A 范围内, 涡流室式燃烧室中的气流运动状态。如图 2a 所示, 在压缩冲程初期, 气缸内气体随活塞一起向上运动, 且速度较小; 涡流室内尚未形成旋涡, 最大气流速度 15 m/s 出现在连接通道和启动喷孔中, 并且这一现象在其它各图中均存在。在图 2b ~ d 中, 随着气体逐渐被压缩, 大量气体进入涡流室内, 并在涡流室内形成一个大涡, 该旋涡为顺时针, 且速度随时间不断增大。到压缩冲程末期, 涡流室壁面附近气流速度可达 60 m/s 以上(图 2e、f)。壁面附近气流运动较大对燃烧是有利的, 因为可以避免燃油堆积在壁面附近, 从而有效促进燃料与空气混合。在涡流室内, 除了上述大涡外, 还有多个小涡存在, 在燃烧室左下角存在一个逆时针的副涡, 形成原因可能是连接通道处的气流速度很大, 气体进入涡流室内后, 沿涡流室切向方向继续运动, 从而带动涡流室左下角的气流运动, 从而形成了该副涡。启动喷孔处的气流速度也很高, 该处气流在进入涡流室内后, 与涡流室的主涡会合, 形成了多个小涡, 这种小涡存在时间较短, 并促使主涡中心向喷油嘴附近移动, 因此, 在喷油前 1 °C A, 喷嘴附近的空气流动很强烈, 可以很快将油滴吹向涡流室壁面, 并与空气混合、蒸发, 形成可燃混合气。在气缸右上角部位, 气流的方向发生改变, 形

成了一段垂直于气缸轴线的滚流, 该滚流随着活塞上行, 逐渐消失。

图 2 中的 90 ~ 100 区域代表气流运动速度较大, 0 ~ 10 区域代表气流运动速度较小。从图中可以看到, 活塞上面的空气随着活塞上行运动被挤到涡流室中, 喷油前燃烧室中的最大气流速度始终出现在连接通道处, 速度将近 100 m/s。由于连接通道与启动喷孔的形状, 可以肯定, 气流在进入涡流室前后, 能量会发生损失, 局部区域会出现边界层分离, 形成低压区。这对燃油的雾化是不利的, 因此, 要尽量使燃油沿涡流室周向雾化, 并在上止点前在涡流室内形成均匀混合的可燃混合气。

2.2 喷雾形态

本文模拟研究了不同喷雾方向对涡流室内混合气的形成和分布的影响。在计算初期, 设置初始条件时, 建立了两种算例 Case1 和 Case2。Case1 中的喷射方向为与竖直方向成 30°, Case2 喷射方向为与竖直方向成 60°, 见图 3。改变喷雾方向, 是为了使燃油在涡流室壁进行碰撞, 促进油粒破碎, 从而更好地与空气混合。

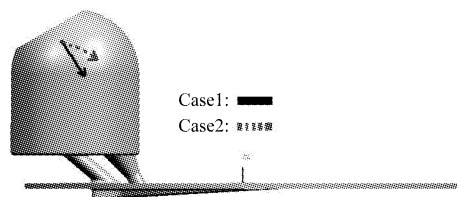


图 3 两种喷雾方向示意图

FIRE 的后处理模块可以观察到燃油在燃烧室内的喷雾形态, 通过模拟燃油的粒径, 来描述喷雾在燃烧室内的分布。

由图 4 可见, 燃油从喷油嘴顺气流喷向涡流室, 由于该机采用轴针式喷油嘴, 喷油锥角较小, 油滴的初始直径以及初始速度较大, 因此, 在喷油嘴附近, 刚进入涡流室的油滴, 其运动轨迹几乎不受涡流的影响。随后, 在涡流室中强烈的、有规律的涡流运动的作用下, 进入涡流室的油滴和涡流室内的气体进行质量、动量和能量的交换后, 其运动轨迹发生改变, 逐渐转移到空气运动的轨迹上, 空气运动使油滴分散到更大的空间中去。

2.3 喷雾方向对燃空当量比分布的影响

2.3.1 喷油持续期涡流室内浓度分布

图 5 是 697 ~ 713 °C A 的燃空当量比示意图。图例中的 4.5-5 区域表示浓混合气, 0 ~ 0.5 区域表示稀薄混合气。由图中 Case1 的一系列当量比分布可见, 燃油在初始喷入涡流室内时, 由于喷油量很

小, 所以当量比很小。随着燃油持续喷入涡流室内, 由于气流的阻尼作用, 与涡流室内的强涡流发生作用, 油束边缘的燃油开始破碎、雾化、蒸发、混合, 故油束前端是当量比较高的区域, 因此在设计喷油时, 通过近距碰撞或其它方法促进大油滴破碎成小油滴是十分有利的。随着活塞运动, 涡流室中的混合气逐步向整个涡流室中扩散, 到喷油后期 713 °C A 时, 涡流室壁附近已经形成可燃混合气, 只是在涡流室中心, 还存在着较浓的混合气, 这主要是因为之前的涡流室的涡流形态所造成的。涡流室壁附近气流速度较大, 燃油与空气混合较好, 而涡心的速度较小, 燃油不易扩散、蒸发。但由于此时活塞仍在上行, 仍有气体不断地从主燃室内通过连接通道, 进入涡流室内, 对燃油的进一步混合极为有利。

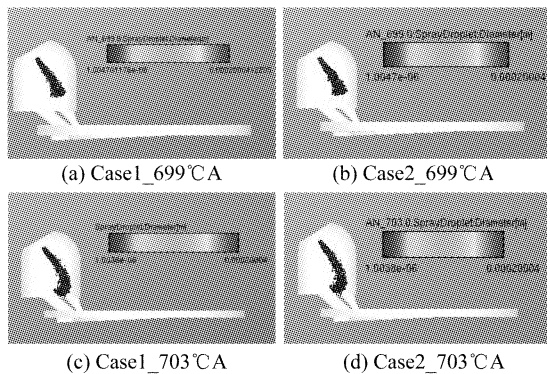


图 4 喷雾形态示意图

Case2 为喷雾碰壁的情况, 通过比较图 5 中 Case1 和 Case2 的燃空当量比分布, 可以看出喷雾碰壁对当量比分布的影响。在喷油前期, Case1、Case2 两者相差较小, 此时油束前端尚未到达室壁。在 701 °C A 时, 从 Case2 可以看出, 此时燃油开始与壁面作用, 一部分燃油发生反弹, 另一部分顺着吊钟型涡流室壁向下运动。反弹部分的燃油与涡流室内的主涡混合, 不断破碎、蒸发, 其余的燃油在壁面气流的作用下, 向启动喷孔及连接通道部位运动, 且壁面附近的当量比很高, 这是由燃油附壁造成的。喷油末期, 壁面的燃油已经蒸发, 而浓混合气则主要集中在启动喷孔附近, 在整个涡流室中可燃混合气所占的空间很大。与 Case1 相比, 由于喷雾的碰壁, 促进了可燃混合气的形成; 同时, 启动喷孔及连接通道处的浓混合气在上止点后可以随气流迅速进入主燃室, 加快了主燃室的扩散燃烧。因此说, 喷雾碰壁对可燃混合气的形成是非常有利的。

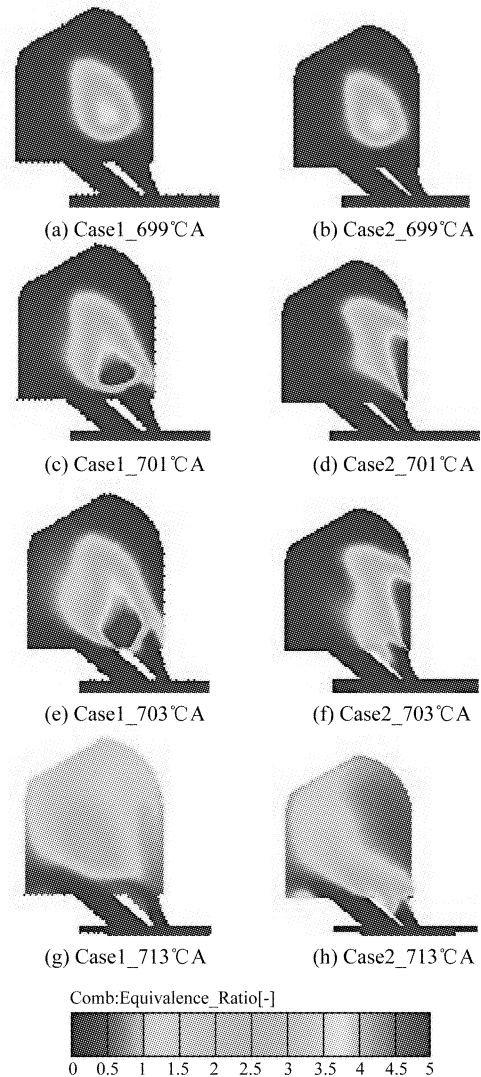


图 5 燃烧室纵截面燃空当量比分布

2.3.2 上止点后缸内浓度分布

图 6 显示了上止点后 15 °C A 范围内, 涡流室及主燃室的混合气浓度变化情况。由 Case1 中的四幅图可以看出, 可燃混合气在上止点时分布在涡流室中心及连接通道处, 此处的燃空当量比为 1 ~ 1.2, 在涡流室的左侧及左下角的区域, 燃油浓度较小, 燃空当量比为 0.6 ~ 0.8。由于此时缸内温度和压力已经很高, 燃烧在局部地区已开始进行, 释放的热量进一步加速了混合气的扩散。由混合气的浓度分布, 可以判断, 着火应该出现在涡流室或连接通道内。图 6c 中, 此时为上止点后 5 °C A, 可以看到, 可燃混合气已完全均匀地分布于涡流室内, 燃空当量比为 1.2 左右, 且燃烧已向主燃室扩散。图 6e、g 中, 燃烧重心已向主燃室内转移, 涡流室内的燃油浓度逐渐下降, 局部燃空当量比为 0.6。

通过对 Case1 与 Case2 的浓度分布的比较发现, 两者区别不是很明显, 可以看出, 改变喷雾方向,

对燃烧期内混合气的浓度分布影响并不大。仅就混合气分布的均匀程度来说,改变喷雾方向,使涡流室内的混合气分布更均匀,燃烧更柔和。而且,改变了喷雾方向后,在主燃烧室的燃油扩散方面,表现更好。同时,在活塞上止点时余隙容积处的混合气浓度也有所增加,降低了燃烧室出现积炭的可能。

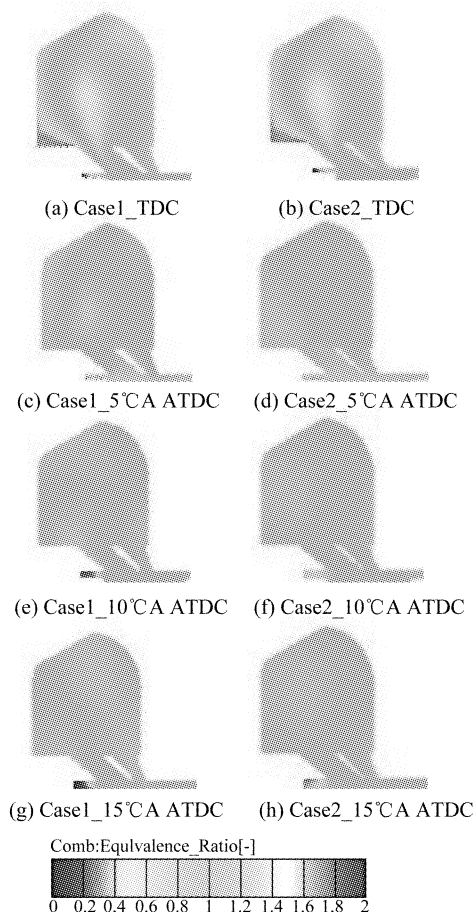


图 6 燃烧室纵截面燃空当量比分布

2.3.3 主燃室内浓度分布

图 7 为上止点后 15°CA 范围内,主燃烧室内的混合气浓度变化情况。由图 7 中 Case1 的图可以看出,由于喷油方向与启动喷孔方向一致,故主燃室内的燃油浓度比 Case2 中的高,燃烧室中心燃空当量比为 1.2 左右。由于双楔形的活塞顶,导致气流在主燃烧室内的分布也呈现类似的形状,类似于肺形,其中连接通道及后续的燃烧通道处燃油浓度较高。而主燃室的上下两部的混合气则较稀,燃空当量比为 0.7 左右。整体比较 Case1 与 Case2 的主燃烧室的混合气浓度可以看出,改变喷雾方向后,涡流室内的混合气得到改善,而主燃室内的混合气发展则呈现出先缓后急的趋势。由于 Case1 中的喷油方向正对启动喷孔,因而上止点时,主燃室内的混合气较浓。Case2 中,由前面的分析可知,启动

喷孔和连接通道处的混合气较浓,因而在上止点后会随涡流室的气流迅速进入主燃烧室,形成与 Case1 相当的可燃混合气。

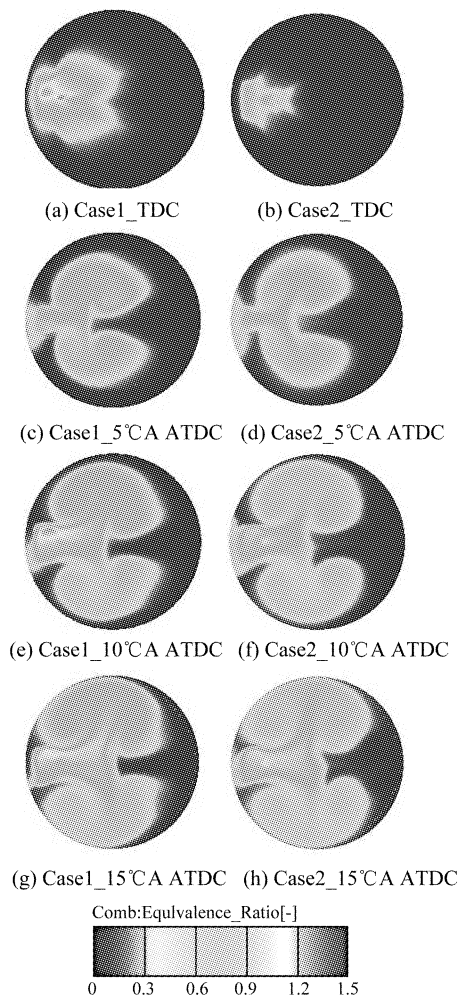


图 7 活塞顶横截面燃空当量比分布

综上所述,可以看出喷射方向为 60°CA 时可以产生喷雾碰壁,而且这种碰壁对于混合气的形成、燃油扩散以及主燃室内的浓度分布都是有利的。综合比较喷射方向为 60°CA 时比 30°CA 时的结果要好。

3 结 论

(1) 涡流室内的气流运动属于涡流运动,沿涡流室壁面的气流速度较大,可以使附壁的燃油较快蒸发,并与空气混合,形成燃空当量比为 1.1 ~ 1.3 的可燃混合气。

(2) 喷雾在进入涡流室内,初始速度较大,之后逐渐转到空气运动轨迹上,在空气涡流的带动下,燃油破碎、蒸发,继而均匀地分布于整个涡流室内。

(3) 改变喷雾方向,能够引起燃油碰壁。燃油碰壁后,一部分反弹入涡流室内,与空气涡流混

合; 另一部分顺涡流室壁向下继续运动, 之后随空气涡流一起运动。通过比较碰壁前后的燃空当量比分布, 可以看出, 碰壁后的可燃混合气形成较好, 分布均匀, 有利于后续的燃烧。因此, 可以尝试在涡流室内安装凸台, 这样可以更好地引导喷雾碰壁, 促进燃烧。

参考文献

- [1] 李德桃. 涡流室式柴油机的燃烧过程和燃烧系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 张伟夫, 田东波. 柴油机涡流燃烧室结构的发展现状[J]. 世界汽车, 1998(7): 16-18.
- [3] 田东波, 杨文明, 李德桃. 柴油机涡流室新的结构设计[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(4): 355-360.
- [4] 胡军军, 阎小俊, 周龙保. 一种新型涡流室式柴油机燃烧

系统的研究[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(1): 37-44.

- [5] 王夺, 纪威. 涡流室柴油机燃烧过程模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 49-52.
- [6] 夏兴兰, 李德桃. 涡流室式柴油机油滴破碎和喷雾碰壁的三维数值模拟[J]. 内燃机学报, 1999, 17(4): 317-322.
- [7] 杜家益. 涡流室柴油机燃油与空气混合过程的多维数值模拟[J]. 江苏理工大学学报, 1996, 17(5): 20-23.
- [8] Luca Montorsi, Alf Magnusson and Sven Anderson. A numerical and experimental study of diesel fuel sprays impinging on a temperature controlled wall[C]. SAE Paper 2006-01-3333.
- [9] Tsdao Okazaki, Masahiko Sugimoto, Satoshi Fujii, etc. Development of small IDI diesel engine using numerical approaches[C]. SAE Paper 2004-32-0054.

(上接第 7 页)

高压共轨燃油系统将喷射压力的产生和喷射过程彼此完全分开, 油压的建立由高压油泵和油轨来实现, 喷射过程由 ECU 和喷油器中的执行机构来实现。这一措施使高压油管压力大小与发动机的转速无关, 同时通过高速电磁阀实现精准的供油过程控制, 从而大幅提升了喷油系统的理想度。

案例 2: 使用 ARIZ 通用程序解决复杂技术问题。

问题描述: 在强化度极高的赛车发动机上, 连杆部件中的连杆螺栓由于受到较强的交变应力, 要求连杆螺栓要有极高的疲劳强度, 从而对材料的要求很高, 掌握这一材料技术的厂家垄断了这一市场。为打破这一垄断格局, 意大利的 SCAM, Srl 公司请 TRIZ 专家 Gaetano Cascini 来解决问题。Gaetano Cascini 通过运用 ARIZ 分析, 定位了现有连杆结构中存在的主要矛盾, 使用了全新的连杆结构化解了这一矛盾, 从而解决了问题。新的高性能连杆结构如图 6 所示, 该结构的连杆从根本上消除了交变应力对连杆螺栓的影响, 从而摆脱了对高性能合金材料的依赖。

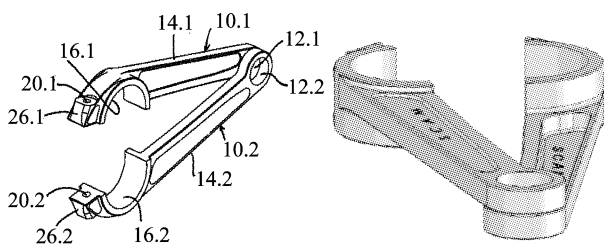


图 6 新的高性能连杆

4 结束语

尽管 TRIZ 理论的面世已有 60 余年的历史, 但 TRIZ 在全球的广泛应用还是近十几年的事, TRIZ 在我国的应用属于刚起步的阶段, 目前在我国的柴油机研发机构中应用此方法的还不多。经过近年的快速发展, 我国的综合实力逐步增强, 也已具备了一定的创新能力。柴油机以其较高的技术含量体现着国家制造业的综合能力, 柴油机的技术创新更是有战略意义的举措, 而创新方法的得当往往使技术创新能够事半功倍, 尤其对原始创新来说有较大的应用价值。

参考文献

- [1] 张武城. 技术创新方法概论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] Gaetano Cascini. TRIZ Theory of Inventive Problem Solving Improve your problem solving skills[M].