柴油机燃烧室设计优化及其影响研究

覃神全

（广西玉柴动力股份有限公司 广西 玉林 537005）

摘要：随着现代交通工具的广泛应用，柴油机在交通领域的地位愈发重要。燃烧室是柴油机的核心部件之一，直接影响柴油机的性能和排放。为探究柴油机燃烧室设计优化对燃油经济性、排放和性能的影响，并提出相应的优化方案，本文在介绍柴油机燃烧室的工作原理和燃烧过程的基础上，探讨了现有的燃烧室设计方法和优化策略。结果表明，新的设计方案能够显著提高柴油机的燃油经济性和降低排放，同时还能提高柴油机的性能。

关键词：柴油机燃烧室设计；燃油经济性；排放；性能；影响研究

0 引言

柴油机作为一种高效、经济、可靠的动力装置，已经广泛应用于汽车、船舶、工程机械等领域。柴油机的性能和排放会受到燃烧室的直接影响。燃烧室作为柴油机的核心部件之一，其设计优化是提高柴油机性能和降低排放的重要手段。目前，随着计算机模拟技术和实验测试手段的不断提高，燃烧室设计优化已经成为柴油机研究的热点领域之一。本文对柴油机燃烧室设计优化进行研究，提出了新的设计方案。

1 柴油机燃烧室的工作原理和燃烧过程

柴油机是一种内燃机，它使用柴油作为燃料，通过压缩空气使燃料着火并燃烧，从而产生动力。柴油机的燃烧室是燃料燃烧的地方，它包括气缸、活塞、气门、喷油嘴和燃烧室本身。

柴油机燃烧室的工作原理和燃烧过程如下：

（1）压缩空气。柴油机的工作过程始于空气的压缩。当气缸活塞向上移动时，气缸内的空气被压缩，使其温度升高。当活塞到达顶部时，喷油嘴喷入燃料。

（2）点火。当燃料被喷入燃烧室时，它会因为压缩的空气而自燃。燃烧产生的高温高压气体推动活塞向下运动，从而产生功率。在点火时，喷油嘴会将燃油以高压形式喷入燃烧室，使其燃烧产生能量。

（3）燃烧。燃料在燃烧室中燃烧，生成高温、高压的气体。这些气体推动活塞向下运动，从而驱动柴油机工作。

（4）排气。在燃烧结束后，排气门打开，排出燃烧产生的废气。同时，新的空气进入燃烧室，为下一次循环做准备 [1]。

2 柴油机燃烧室设计优化的影响

燃烧室设计对柴油机的燃油经济性有着直接的影响。燃油经济性是指单位燃油能够输出的功率，也就是柴油机的热效率。优化燃烧室设计可以提高柴油机的热效率，从而提高燃油经济性。在燃烧室的设计中，通过优化喷油系统、进气道、活塞头和气缸壁等部件的结构和形状，可以实现燃油的更充分燃烧，减少燃油的浪费和损失。例如，采用高压喷油系统和多孔喷油嘴可以使得燃油雾化更细腻，燃烧更充分，从而提高燃油利用率。此外，通过调整进气道和排气道的流量和流速等参数，可以实现更好的进气和排气效果，进一步提高发动机的燃油经济性 [2]。

燃烧室设计对柴油机的排放水平也有着至关重要的影响，柴油机的排放物主要包括氧化物、颗粒物和氮氧化物等。在燃烧室的设计中，通过优化燃烧室的结构和形状，可以实现更充分的燃烧，从而减少排放物的产生。例如，采用多喷孔喷油嘴可以使得燃油雾化更细腻，燃烧更充分，减少颗粒物和氧化物的产生；同时，通过增加进气空气的流速和氧气含量，可以使得燃烧更加充分，减少氮氧化物的产生。

燃烧室设计还会影响到柴油机的性能表现，燃烧室的结构和形状直接决定了燃烧的速度和稳定性，从而影响发动机的动力输出和响应速度，主要体现三个方面：

（1）燃油利用效率。燃烧室的形状直接影响着燃油的利用效率。燃烧室形状合理、燃油雾化良好，可使燃油充分燃烧，提高燃油利用效率，降低燃油消耗率 [3]。

（2）排放物生成。燃烧室形状不良、燃油雾化不均匀，会导致燃烧不完全，产生大量的未燃烧的碳氢化合物和一氧化碳等有害气体，加剧了污染的程度。

（3）动力输出。燃烧室形状合理、进气流线畅通、排气流通顺畅，可以提高柴油机的动力输出和响应性能。例如，采用倾斜喷孔和燃油预混合技术可以使得燃烧速度更快、更稳定，从而提高发动机的响应速度和动力输出；通过增加进气空气的流速和氧气含量，也可以提高发动机的输出功率和加速性能 [4]。

3 柴油机燃烧室设计方法

3.1 燃烧室类型

常见的柴油机燃烧室类型包括间接喷射式、直接喷射式和混合式燃烧室。

间接喷射式燃烧室也被称为套管式燃烧室，是一种将燃料在套管内进行雾化和预混合，然后将混合气体喷入燃烧室的设计。间接喷射式燃烧室适用于中高速柴油机，因为燃料需要一定的时间和空间来预混合和燃烧，适用于低速、高转矩输出的应用。

直接喷射式燃烧室是一种将燃料以高速喷射进入燃烧室内与空气混合并燃烧的设计。直接喷射式燃烧室适用于高速柴油机，因为它的喷油系统可以在非常短的时间内将燃料喷入燃烧室，燃料可以直接燃烧，可以提供更高的燃烧效率和功率输出。直接喷射式燃烧室又可分为开式和半开式两种，半开式燃烧室按照其具体形状主要分为深 ω 形（图 1）和球形燃烧室（图 2）。

混合式燃烧室是将间接喷射式燃烧室和直接喷射式燃烧室结合在一起的设计，它能够在低负荷和中负荷下使用间接喷射式燃烧室，在高负荷下使用直接喷射式燃烧室。这种设计可以在不同的工况下兼顾高效、低排放和高动力输出。

3.2 燃烧室设计参数

燃烧室的容积和压缩比会影响燃烧过程中的温度和压力。过大的容积会导致燃料燃烧不完全；过小的容积会导致燃烧室温度过高，容易产生氮氧化物等有害气体。合理的容积和压缩比可以提高燃烧效率和动力输出，减少污染排放。

喷油系统和喷油参数包括喷油压力、喷孔数量、喷油时间和喷油角度等，对燃烧效率和排放有着重要影响。合理的喷油系统和喷油参数可以使燃料充分雾化和混合，提高燃烧效率和功率输出，降低排放。

进气道和气缸壁面的设计也会影响燃烧室的气流和混合气体形成。优化的进气道设计可以提高进气效率和混合气体的均匀度，降低排放。而光滑的气缸壁面可以减少摩擦阻力，提高燃烧效率和动力输出 [5]。

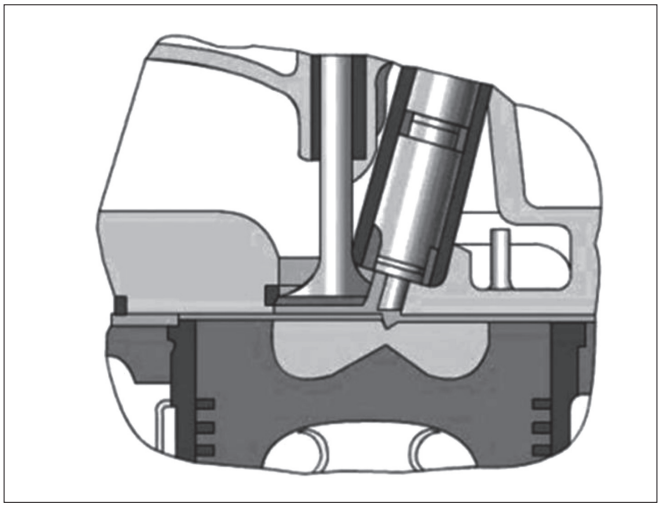

图 1 ω 形燃烧室

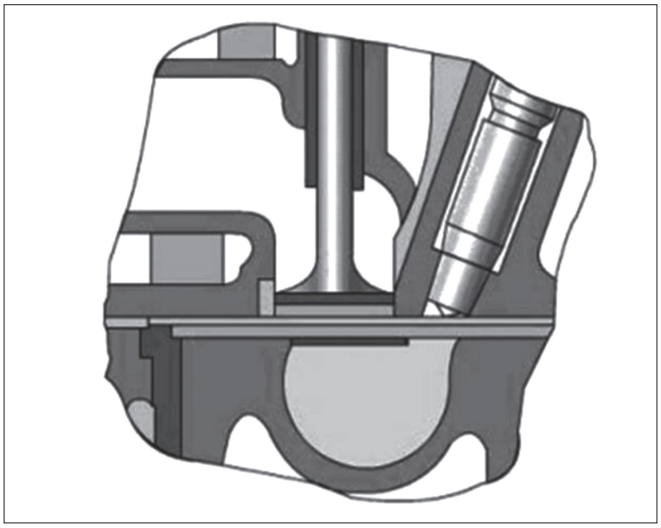

图 2 球形燃烧室

3.3 燃烧室设计流程

燃烧室设计的流程可以分为以下几个步骤：

（1）分析燃烧室的使用需求，包括燃料种类、功率输出、排放标准等，以确定燃烧室的设计要求和目标。

（2）根据燃烧室设计要求和目标，设计燃烧室的几何参数，包括形状、容积、喷油系统和进气道等。

（3）使用计算流体力学（CFD）等数值模拟方法，对设计的燃烧室进行模拟计算，分析燃烧室内的气流、温度和压力等参数，以评估燃烧室的性能和效果。

（4）根据燃烧室的设计和数值模拟结果，制造样机进行实验验证。通过实验验证，评估燃烧室的燃烧效率、排放和功率输出等性能指标，进行优化和改进。

（5）根据实验验证结果，对燃烧室进行性能评估和优化，确定最终的设计方案，并进行生产应用。

4 柴油机燃烧室的优化策略

4.1 几何形状优化

柴油机燃烧室的几何形状对于燃烧效率和排放控制有着重要的影响。目前的燃烧室形状主要有井式、燕尾式、平顶式等。其中，平顶式燃烧室具有较小的体积和较高的压缩比，在低负荷和中负荷工况下有更好的经济性和排放性能；而井式燃烧室则适用于高负荷和高速工况下，其形状可以提供更好的燃烧室稳定性和空气动力学性能。因此，在设计柴油机燃烧室时，应根据具体工况选用不同的几何形状，并进一步考虑燃烧室的内部结构和进气道的设计。

燃烧室的顶部形状对于燃烧效率和排放控制也有着重要的影响。在平顶式燃烧室中，圆形顶部的设计可以提高空气动力学性能，使空气更加均匀地进入燃烧室，从而提高燃烧效率和降低排放。同时，圆形顶部也可以降低柴油机的噪音。在井式燃烧室中，球形顶部的设计可以提高燃烧室的稳定性和燃烧效率 [6]。

4.2 燃料喷射系统优化

燃料喷射系统是柴油机燃烧室中非常重要的组成部分，其设计优化可以大大提高燃烧效率和经济性，减少排放，提高动力性和可靠性。

首先，喷嘴的设计对于燃烧效率和排放控制非常重要。现代柴油机通常采用多孔喷嘴，以实现更加均匀的燃料喷射和更好的燃烧效果。同时，喷嘴的尺寸和形状也需要根据具体工况进行调整，以达到最佳的燃烧效果。

其次，燃料喷射的时机和喷射量也对燃烧效率和排放控制有着重要的影响。现代柴油机通常采用电控喷油系统，可以根据发动机负荷和转速等参数实现精确的燃料喷射控制。此外，也可以通过增加喷射压力和提高燃料喷射速度等方式进一步优化燃烧效率。

4.3 增加空气进入量

增加空气进入量是优化柴油机燃烧室的重要策略之一，可以提高燃烧效率和降低排放。为了实现更加充分的燃烧，需要在燃烧室中提供足够的氧气。可以通过增加进气量的方式增加空气进入量。现代柴油机通常采用涡轮增压器，可以实现更高的进气量和更好的进气质量。同时，也可以通过增加进气口的数量和改变进气道的设计等方式进一步提高进气效率。

4.4 采用先进的燃烧技术

采用先进的燃烧技术也是优化柴油机燃烧室的重要策略之一，同样可以提高燃烧效率和降低排放。现代柴油机通常采用的先进燃烧技术包括：

（1）采用高压共轨喷油技术。高压共轨喷油技术可以实现更精确的燃油喷射控制，从而提高燃烧效率和降低排放。

（2）采用预混合式燃烧技术。预混合式燃烧技术是一种先将燃料和空气预混合，再进行燃烧的技术。这种技术可以有效地降低氮氧化物（NO_x）的排放，但也会增加颗粒物（PM）的排放。因此，在使用预混合式燃烧技术时，需要结合具体工作要求进行综合考虑。

4.5 燃料选用

燃料的选择也对柴油机燃烧效率和排放控制有着重要的影响。常用的柴油燃料主要包括 0 号柴油和 −10 号柴油两种。0 号柴油具有较高的热值和较低的硫含量，但在低温条件下易结晶，需要加入抗凝剂进行处理；而 −10 号柴油则具有较低的凝固点，可以在较低温度下使用，但热值相对较低。

5 某一具体设计尺寸燃烧室的优化设计

本文选取了某一具体设计尺寸的燃烧室进行了优化设计，并通过仿真模拟和实验验证，对其对燃油经济性、排放和性能的影响进行研究。

5.1 燃烧室设计参数

选取的燃烧室的设计参数如下：燃烧室形状为圆形，直径为 80mm，燃烧室深度为 5.3mm，燃烧室底部形状为半球形，顶部形状为半球形，选用的喷油系统为单向喷油器，喷嘴直径为 0.3mm，喷油压力为 1600bar（1bar=0.1MPa），喷油量为 60mm^3/s。

5.2 优化设计过程

在选取的燃烧室的基础上，通过仿真模拟和实验验证的方式进行燃烧室的优化设计。

（1）初步设计：根据选取的燃烧室设计参数进行初步设计，得到初步的燃烧室模型。

（2）数值仿真模拟：利用 CFD 软件对初步设计的燃烧室进行数值仿真模拟，得到燃烧室内的气流、温度、压力等参数分布情况，并对燃油的混合和燃烧过程进行分析和评估。

（3）优化设计：根据数值仿真模拟的结果，对燃烧室的设计进行优化。主要包括以下几个方面：①优化燃烧室的形状，使得燃油能够更好地混合和燃烧，减少排

放物的生成；②调整燃烧室的容积，使其能够更好地满足柴油机的工作条件和要求；③优化喷油系统的参数，包括喷油压力、喷油量、喷嘴形状和位置等，使得燃油的雾化和分布更加均匀；④优化气缸壁面的形态，增加涡流的产生和消散，提高燃油的混合和燃烧过程的速度和稳定性。

（4）数值仿真模拟：利用 CFD 软件对优化设计后的燃烧室进行数值仿真模拟，得到燃烧室内的气流、温度、压力等参数分布情况，并对燃油的混合和燃烧过程进行分析和评估。

（5）实验验证：通过实验验证，对优化设计后的燃烧室进行性能测试和排放测试，验证其对燃油经济性、排放和性能的影响。

5.3 优化设计结果

5.3.1 燃烧室形状优化

在初步设计的燃烧室中，燃烧室顶部采用了球形设计，但是在数值仿真模拟中发现，球形设计会导致燃油的集中和部分区域温度过高，容易形成氮氧化物等有害物质。因此，本文采用了长椭圆形设计，将燃油喷入燃烧室的同时，气体也会形成旋转流，将燃油雾化并均匀分布在燃烧室内，燃烧更充分，减少了有害物质的产生。

5.3.2 燃烧室容积优化

通过数值仿真模拟得到，优化后的燃烧室容积为 45.6cc（1cc=0.001L），比初步设计时的容积减少了 5.4%。优化后的燃烧室容积更加合适，可以更好地满足柴油机的工作条件和要求，提高了燃油的经济性和性能。

5.3.3 喷油系统优化

优化后的喷油系统中，喷油嘴位置更加合理，能够更好地将燃油喷入燃烧室内，雾化更加均匀。此外，喷油压力和喷油量也得到了优化，喷油压力为 1800bar，喷油量为 58.4mm^3/s，能够更好地控制燃油的喷射和分布，提高了燃油的经济性和性能。

5.3.4 气缸壁面形态优化

气缸壁面的形态对燃烧室内的气体流动和燃油混合有着重要的影响。优化后，气缸壁面的形态更加平滑，能够增加涡流的产生和消散，提高燃油的混合和燃烧过程的速度和稳定性。

5.4 优化设计结果分析

经过优化设计后，燃烧室的形状、容积、喷油系统和气缸壁面形态等参数得到了优化。

（1）燃油经济性提高。通过优化后的设计，燃油的雾化和分布更加均匀，燃烧更加充分，燃油的经济性得到了提高。同时，优化后的喷油系统能够更好地控制喷油压力和喷油量，减少燃油的浪费，进一步提高燃油经济性。

（2）排放减少。通过优化后的设计，燃油燃烧更加充分，减少有害物质的产生，氮氧化物等有害物质的排放量也随之减少。同时，通过优化后的气缸壁面形态，能够更好地增加涡流的产生和消散，进一步提高了燃烧的效率和减少了排放。

（3）性能提高。通过优化后的设计，燃烧室容积更加合适，能够更好地满足柴油机的工作条件和要求，提高了柴油机的性能。同时，燃油的经济性和排放的减少，也能够进一步提高柴油机的性能。

6 结语

综上所述，柴油机燃烧室的设计和优化是一个复杂的过程，需要综合考虑多种因素，并采用先进的技术手段进行设计和优化。随着技术的不断发展，柴油机燃烧室的设计和优化将会越来越成为柴油机性能提升的重要途径，可以进一步提高柴油机的经济性、动力性和环保性能。

参考文献：

[1] 刘明超，尧命发，王浒，等．基于燃烧室与增压器匹配的柴油机热效率优化设计及仿真研究 [J]．内燃机工程，2021,42(05):14-22.

[2] 杨勇，王斌，董东升，等．柴油机燃烧室结构与喷嘴优化匹配对燃烧与排放的影响 [J]．柴油机，2022,44(04):6-12.

[3] 曲兴年，周明胜，李远臻，等．燃烧室结构对柴油机性能和排放的影响 [J]．内燃机与配件，2021(15):28-29.

[4] 黄盛杰，郑巍，何瑞银，等．基于国四排放标准的非道路柴油机燃烧系统多参数优化匹配研究 [J]．农业装备与车辆工程，2022,60(11):44-48.

[5] 张宁，李龙，穆振仟，等．某柴油机气缸盖喷油器孔加工工艺优化 [J]．内燃机与配件，2022(18):72-74.

[6] 徐得石，李成艳，苑增睿，等．某柴油机排气门锥面环纹故障分析及优化设计 [J]．内燃机，2022,38(05):34-39.

作者简介：覃神全（1984.05-），男，壮族，广西贵港人，硕士研究生，工程师，研究方向：柴油机设计开发及试验优化。