



Effect of Piston Bowl Geometry on Performances of a High Speed Diesel Engine

Bin Wang¹, Hua Tian^{2,*}, Demin Jia¹, Xiaoyan Wang¹, Wuqiang Long²

¹Weichai Power Co., Ltd., Weifang, China

²School of Energy and Power, Dalian University of Technology, Dalian, China

Email address:

watson_tian@hotmail.com (Hua Tian)

*Corresponding author

To cite this article:

Bin Wang, Hua Tian, Demin Jia, Xiaoyan Wang, Wuqiang Long. Effect of Piston Bowl Geometry on Performances of a High Speed Diesel Engine. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 2, 2022, pp. 29-35. doi: 10.11648/j.sd.20221002.12

Received: February 27, 2022; Accepted: March 26, 2022; Published: March 29, 2022

Abstract: As one of the primary performances of the diesel engine, the special power can be promoted by increasing the speed or the indicated mean effective pressure. However, the diesel engine will not have enough time for fuel-air mixing and combustion under higher speed, so the excellent matching of injection-bowl is the main way to improve mixing and accelerate combustion. In order to achieve the rapid combustion of a high-speed diesel engine, the effects of piston bowl geometry, diameter-depth ratio, and nozzle arrangement on combustion and performance are calculated by using CFD numerical simulation. The results show that the mixing quality can be improved, the combustion duration can be shortened, and higher combustion efficiency and higher power can be obtained by using a double-layer diverging combustion chamber with a shallow basin structure in the upper and lower layers. With the increase of the diameter-depth ratio of the two-layer diverging combustion chamber, the maximum explosion pressure, the peak heat release rate and the turbulent kinetic energy increase, and the power rise is continuously improved. A new double-layer diverging combustion system matched with a double-layer stagger nozzle based on double-layer diverging combustion chamber the is proposed, the mixing in the cylinder is uniform, the combustion is accelerated and close to complete combustion, and the special power is 61.39kW/L.

Keywords: Diesel Engine, High Power Density, Piston Bowl Geometry, Double-layer Nozzle, Special Power

燃烧室结构对高速柴油机性能影响

王斌¹, 田华^{2,*}, 贾得民¹, 王晓艳¹, 隆武强²

¹潍柴动力股份有限公司, 潍坊, 中国

²大连理工大学能源与动力学院, 大连, 中国

邮箱

watson_tian@hotmail.com (田华)

摘要: 升功率是发动机重要性能指标之一, 柴油机通过提高转速或平均指示压力能够提升功率密度。但柴油机转速的提高会缩短燃料混合、燃烧及做功的时间, 而探索良好的油室匹配是促进油气混合和加速燃烧进程的主要途径。为实现高速柴油机的快速燃烧以达到更高的功率密度, 通过CFD数值模拟, 计算燃烧室结构、径深比和喷孔布置对燃烧和性能的影响。结果表明, 上下层近似浅盆结构的双层分流燃烧室能促进油气混合, 缩短燃烧持续期, 获得较高燃烧效率和升功率; 随着双层分流燃烧室径深比增加, 最高爆压、放热率峰值和湍动能增加, 升功率不断提升; 双层分流燃烧室匹配双层喷孔交错布置, 混合均匀、燃烧加快并接近完全燃烧, 升功率提升到61.39kW/L。

关键词：柴油机，高强度，燃烧室结构，双层喷孔布置，升功率

1. 引言

在日益严峻的能源环境局势下，节能减排成为了内燃机领域的研究重点[1]，因此小型化高强度是柴油机未来的重要发展方向。在商用发动机领域，部分研究已开发出超过100kW/L的小排量柴油机[2-4]。随着高压共轨技术和涡轮增压技术等关键技术的不断突破，柴油机转速、平均指示压力以及功率密度不断提升，但也会带来一系列的挑战。随着转速的提高，柴油机需要在更短的燃烧持续期内实现完全燃烧，对高强度柴油机提出快速混合与快速燃烧的要求[5]。

燃烧室结构对油气混合和燃烧具有重要影响，其与喷油系统的合理匹配可以进一步改善柴油机的性能[6]。研究燃烧室结构和喷孔布置对缸内气流运动、油气混合和燃烧过程的影响规律，对于实现高强度柴油机快速混合和快速燃烧的目标具有十分重要的意义。

高转速、高增压和高喷油压力是高强度柴油机主要特征，而超高的喷油压力在改善燃油雾化效果及促进油气混合的同时也会带来燃油撞壁和燃油堆积等问题[7]。对于径深比较小的 ω 型燃烧室或缩口燃烧室能够提供较强的挤流和一定的湍流促进油气混合，但仍存在燃油落点问题及燃烧室顶层空间的利用不理想。多数高强度柴油机燃烧室结构的研究关注点在于喉口直径和径深比等因素[8-9]，仍未脱离缩口燃烧室或 ω 型燃烧室结构。相较于缩口燃烧室和 ω 型燃烧室，由大连理工大学提出的双层分流燃烧室[10]，燃油撞壁早并分层流动，燃油在落点处的堆积被明显抑制，喷雾扩散速度快、分布范围大，顶隙空间利用得好，因此双层分流燃烧室结构在充分发挥高强度柴油机过量空气系数大的优势、扩大燃油喷雾分布范围、提高缸内空气利用率以及改善柴油机性能等方面具有很大的潜力。

喷孔的布置对油束和空气的混合有直接影响，不同的喷孔布置对缸内混合气燃空当量比的分布情况产生不同影响。与单层喷孔相比，双层交错布置喷孔油嘴可以使油束在燃烧室轴向及径向空间均匀分布，减少局部富氧和富油区，从而进一步改善柴油机的燃烧。如魏胜利等[11]采用了双 ω 型燃烧室和双层喷孔的燃烧系统进行模拟研究，结果表明双层喷孔改善了喷雾的分布空间，提高缸内混合气质量，特别是上层5孔和下层3孔组合能够改善燃烧性能，燃烧效率进一步提高。黄康等[12]在一台高压共轨柴油机上进行双层交错喷孔喷油系统试验研究，试验发现与单层喷孔相比，双层喷孔布置的燃烧持续期缩短，发动机动力性和经济性有所提高，且缩小下层喷油夹角能进一步提高缸内平均压力。高转速下的柴油机对油气快速混合同样提出更高的要求，而双层喷孔布置具有促进燃油快速混合和均匀分布的特性，对高强度柴油机有重要的研究意义。

本文基于一台高强度柴油机，以升功率和燃烧效率为主要评价指标，通过计算流体动力学数值模拟，探索

了燃烧室结构、径深比和喷孔布置对燃烧和性能的影响，以期实现高强度柴油机快速燃烧并进一步提升其动力性。

2. 模型参数与验证

2.1. 发动机主要参数

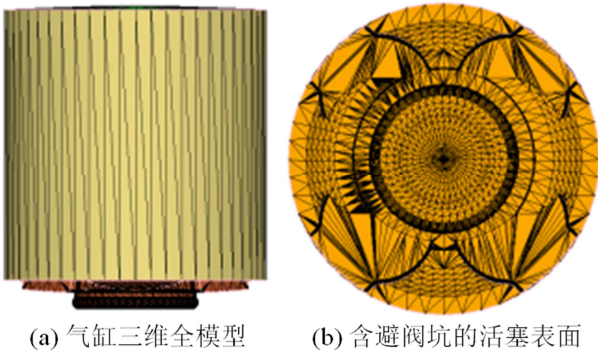


图1 发动机三维几何模型。

本文的研究工作基于某型小缸径重型柴油机展开，发动机主要参数如表1所示。如图1所示，计算几何模型采用了包含避阀坑的气缸全模型。通过三维CFD软件CONVERGE v2.3对缸内喷雾及燃烧过程进行数值模拟研究。表2为计算所采用的各类物理化学模型。

表1 发动机主要参数。

参数	单位	数值
缸径×冲程	mm	98X102
曲杆长度	mm	174
压缩比	—	11
功率/转速	kW/rpm	59/3000
孔数×孔径	mm	12X0.214
共轨压力	MPa	250
喷油正时	°CA	-10
喷油持续期	°CA	28
喷油量	mg	190

表2 CFD子模型的选取。

模型类别	模型名称
气体状态方程	Redlich-Kwong [13]
湍流模型	RNG κ - ϵ [14]
喷雾破碎模型	KH-RT [15]
液滴蒸发模型	Frossling [16]
液滴碰撞模型	NTC collision [17]
喷雾-壁面相互作用	O'Rourke Wall film [18]
燃烧模型	SAGE [19]

2.2. 模型验证

在一台小缸径高强度柴油机上对缸内过程涉及的流动、喷雾、相变、混合、化学反应等过程进行模拟验证，该柴油机在2700rpm的高转速、增压比为4的高增压以及

180MPa的高共轨压力下运行。图2为模拟与试验的缸压对比，计算得出的缸压在每一时刻与试验值的相对误差都在0.1%以下，计算结果与试验数据吻合良好，验证了本文所用计算模型的可信性。

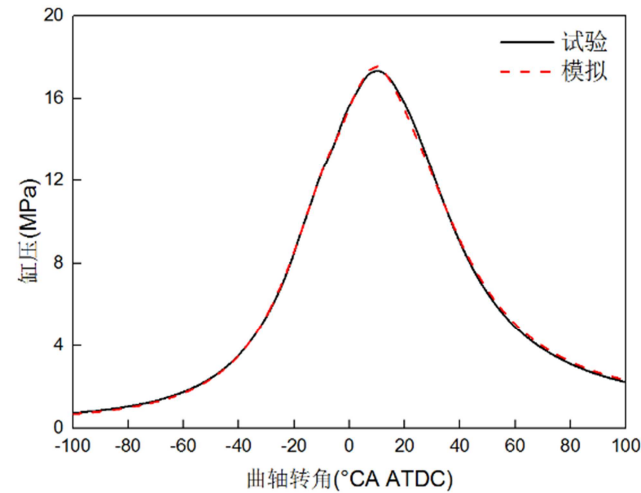


图2 模拟与试验的缸压对比。

3. 方案设计

表3为计算方案及主要参数。在燃烧室结构方面，本文参考隆武强等提出的双层分流燃烧室结构[10]，设计了双层分流燃烧室A型和B型，与原机及直口 ω 型结构进行对比；并在双层分流B型结构基础上对比不同径深比的影响，匹配不同喷油角以保证碰撞台起分流作用，不同燃烧室结构如图3所示。最后在双层分流B3燃烧室里采用双层喷孔布置，为了充分发挥双层分流燃烧室下层型线的导流作用以及探究上下层油束干涉程度，下层喷油夹角取较小值[12]，如图4所示。

表3 计算方案及参数。

方案	参数				
燃烧室结构	原型、直口 ω 型、双层分流A型和B型，统一148°喷油角				
径深比	D/H	B0: 1.4	B1: 1.6	B2: 1.8	B3: 2.0
喷孔布置	喷油角	140°	144°	148°	152°
	单层喷孔、双层对齐喷孔、双层交错喷孔，上/下层喷油角为160°/100°				

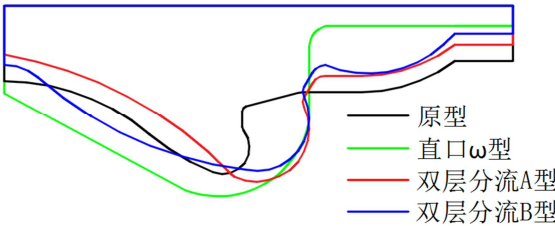
为便于分析发动机燃烧特性，将燃烧室中燃料的燃烧持续期分为三个阶段：滞燃期（CA0-CA10）、前半程主燃烧期（CA10-CA50）和后半程主燃烧期（CA50-CA90），其含义分别为：从喷油开始至累计放热量占总放热量10%、累计放热量占总放热量从10%增加至50%以及累计放热量占总放热量从50%增加至90%所经历的曲轴转角。

升功率是强化柴油机的重要性能指标之一，油气混合均匀是发动机能快速燃烧的前提，为了分析强化柴油机性能影响的因素，从计算结果中提取升功率并量化混合气均匀程度进行对比。这些参数定义为：

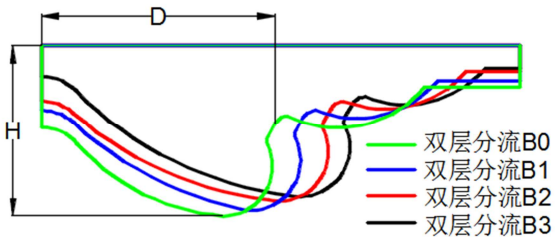
$$P_L = \frac{\eta_m P_i}{V_s} \tag{1}$$

$$\phi_{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{cell} m_{cell} (\phi_{cell} - \phi_{mean})^2}{m_{total}}} \tag{2}$$

公式（1）中： P_L 为升功率，kW/L； P_i 为指示功率，kW； V_s 为气缸工作容积，L；公式（2）中： ϕ_{STD} 为当量比标准差； ϕ_{cell} 为每个网格单元的当量比； ϕ_{mean} 为气缸内平均当量比； m_{total} 为缸内总质量。式（1）中考虑到发动机存在机械损失， η_m 为机械效率。[20]



(a)



(b)

图3 不同燃烧室结构（a）和双层分流燃烧室不同径深比（b）示意图。

4. 结果与分析

4.1. 燃烧室结构的影响

图5和图6展示了不同燃烧室结构对缸压、放热率和燃烧持续期的影响。不同燃烧室结构方案的最大燃烧压力和放热率峰值的大小关系为 $P_{max}(\omega型) > P_{max}(B型) > P_{max}(原型) > P_{max}(A型)$ ，体现了快速燃烧期前半段剧烈程度，但差异不大，此时CA10-50无明显差异，说明在超高转速下，高强度柴油机采用高增压，缸内背景密度提高，燃油贯穿距变短以及从开始喷油到开始触壁时间较长，燃烧室结构尚未完全起到导流作用[21]。特别在40°CA后放热率大小关系为 $HRR(原型) < HRR(A型) < HRR(B型) < HRR(\omega型)$ ，此时若在循环喷油量相近的累计放热下，放热率越大，说明后燃越严重。但如图7所示，原型燃烧室结构燃烧效率过低，燃烧情况整体恶化，导致燃烧持续期偏短。 ω 型方案的CA50-90最大，狭小的顶隙空间抑制了燃油向气缸外围扩散，顶隙空气利用较差，后燃较为严重。

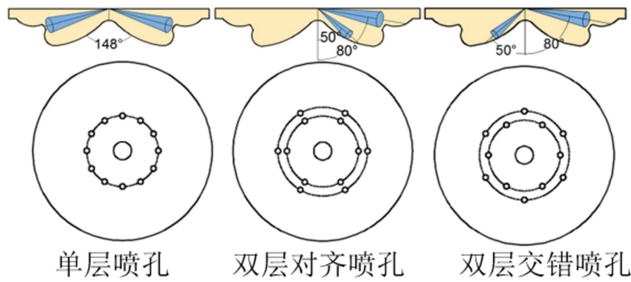


图4 B3型燃烧室喷孔布置方案示意图。

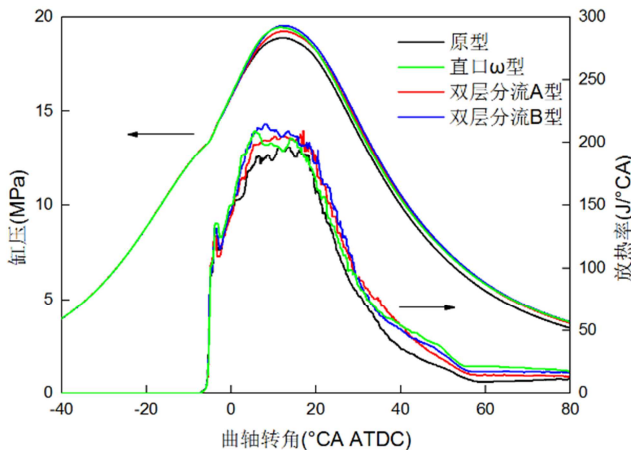


图5 燃烧室结构对缸压和放热率的影响。

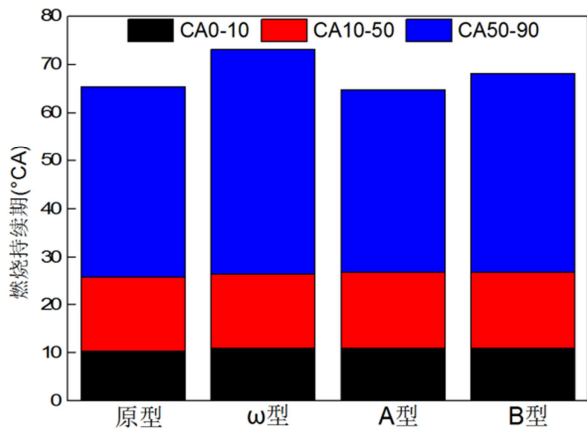


图6 燃烧室结构对燃烧持续期的影响。

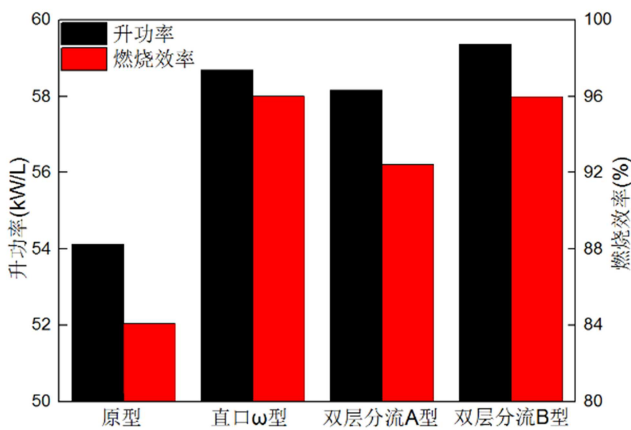


图7 燃烧室结构对燃烧持续期的影响。

图7为不同燃烧室结构对升功率和燃烧效率的影响。原型燃烧室的升功率和燃烧效率都很低，原因是发动机为了提升动力性而进一步提高了进气增压比和转速，原型机燃烧室结构难以适应超高充量和超高转速的条件。相比于原型燃烧室，双层分流及 ω 型燃烧室的升功率和燃烧效率都有较大提高。而双层分流B型燃烧室采用近似“浅盆”上下层型线，燃烧及性能优于A型；且双层分流B型燃烧室能与 ω 型燃烧室保持同一燃烧效率情况下，其升功率有所提升，燃烧持续期相对更短。

图8为不同燃烧室结构对当量比分布及涡团分布的影响。原型方案的当量比过多集中于顶隙空间，活塞型线对燃油的导流作用不显著，不易形成卷吸涡团。 ω 型方案的燃油不易进入狭窄的顶隙空间，后燃会较长，但避阀坑的存在同样起到一定双层分流作用，所以CA10-50期间燃烧压力稍高。双层分流燃烧室通过碰撞台将燃油分为上下两股，在逆挤流作用下，上下两层存在较明显涡团，利于卷吸更多空气。相较于A型，B型燃烧室上下层都采用近似“浅盆”型线，上层燃油不易沿上层燃烧空间底面扩散，下层较低凸起有利于燃油快速扩散，在燃油进入量较多时有利于燃烧室中心区域的利用，进一步促进油气混合并加快燃烧[22]。

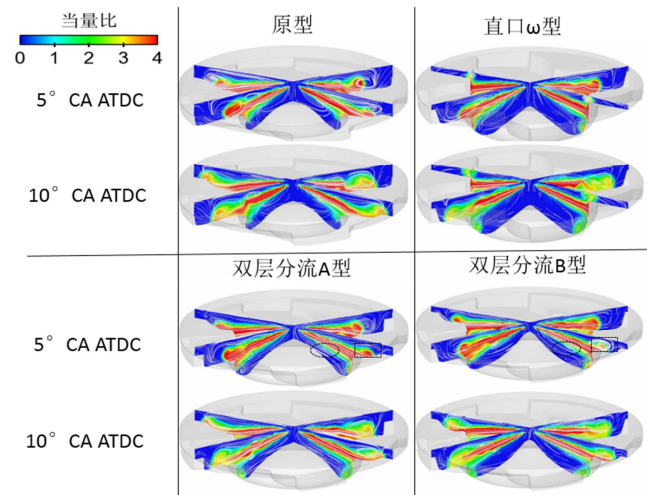


图8 燃烧室结构对当量比分布及流线的影响。

图9展示了缸内湍动能和当量比标准差的变化趋势。上止点后双层分流燃烧室的湍动能都低于原型和 ω 型，原因是原型和 ω 型的空间划分占比较大的分别是顶隙和活塞凹坑，并与燃油直喷共同带来较强烈气流运动。而双层分流燃烧室特征在于燃烧室被划分为上下两部分，油束经碰撞台分流，虽然减缓气流扰动，但改善了燃油直喷入较大空间引起的小空间燃烧恶化。从当量比标准差来看，原型方案的当量比标准差一直保持较高水平，说明原型燃烧室的混合气均匀度较低。而双层分流燃烧室在0~20°CA ATDC的当量比标准差高于 ω 型燃烧室，但20°CA ATDC之后，当量比标准差要低于 ω 型燃烧室，说明双层分流燃烧室改善了 ω 型燃烧室顶隙空间利用不理想的弊端；且整体上看双层分流B型燃烧室的当量比标准差在整个燃烧持续期内能保持在较好水平，证明双层分流

燃烧室方案的油气混合均匀程度较好, 有促进缸内快速燃烧的作用。

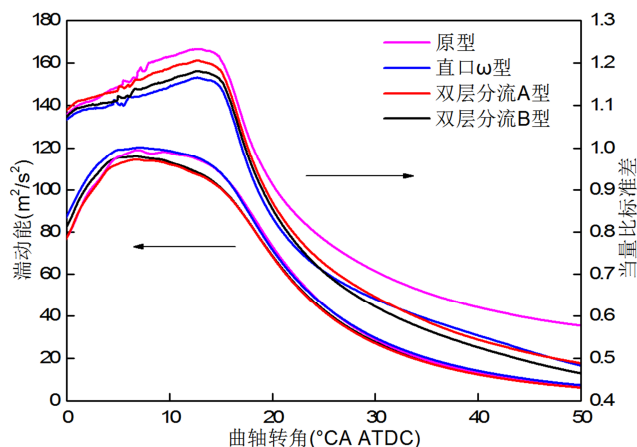


图9 燃烧室结构对端动能和当量比标准差的影响。

4.2. 双层分流燃烧室径深比的影响

图10和图11为双层分流燃烧室径深比对缸压、放热率和燃烧持续期的影响。随着径深比的增加, 最大燃烧压力和放热率峰值不断增加。对于双层分流燃烧室结构, 径深比越大, 分流碰撞台越靠近缸套, 上下层容积分配较均等, 狭窄的顶隙区域较少, 分流后进入上层空间的燃油能充分卷吸空气。CA10-50和CA50-90都随径深比的增加而缩短, 且CA50-90缩减幅度较大。

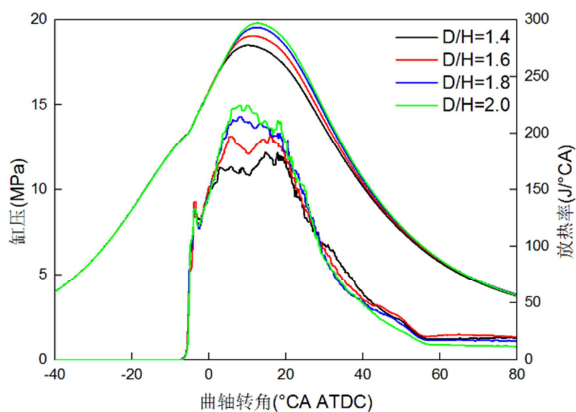


图10 径深比对缸压和放热率的影响。

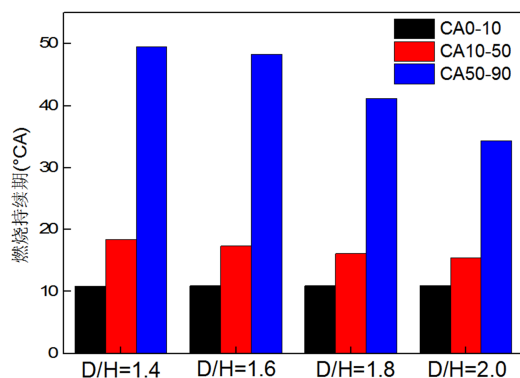


图11 径深比对燃烧持续期的影响。

图12为径深比对升功率和燃烧效率的影响。随着径深比的增加, 升功率不断增加, 而径深比从1.4到1.6, 燃烧效率增加, 但径深比从1.6到2.0, 燃烧效率小幅度下降。原因是在避阀坑到缸盖的距离一定情况下, 随着径深比的增加, 余隙高度不断减小, 避阀坑的深度增加, 在一定程度上改变双层分流燃烧室结构, 使油室匹配变差[23]; 而且径深比越大, 进入下层的燃油扩散至燃烧室中心的距离越远, 在燃烧后期难以利用燃烧室中心空气。图13展示缸内端动能和当量比标准差的变化趋势, 随径深比的增大, 上止点后的缸内端动能越高, 强烈的气流扰动促进了油气混合, 所以当量比标准差随着径深比的增加而减小。虽然避阀坑对油室配合及缸内燃烧造成一定的负面影响, 燃烧效率稍有降低, 但径深比较大的双层分流燃烧室结构在促进燃油分布和油气混合方面的仍存在优势, 升功率进一步提升。

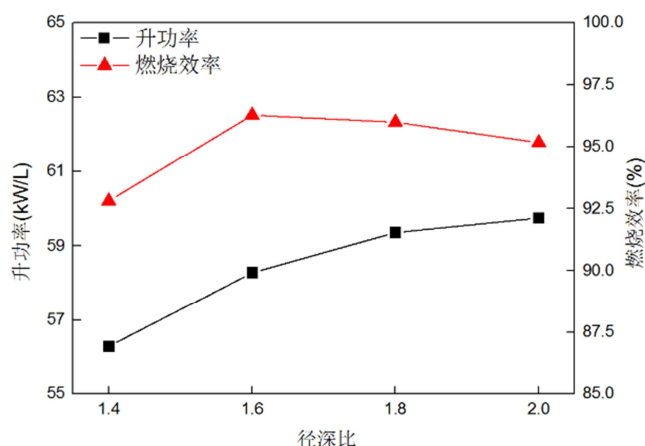


图12 径深比对升功率和燃烧效率的影响。

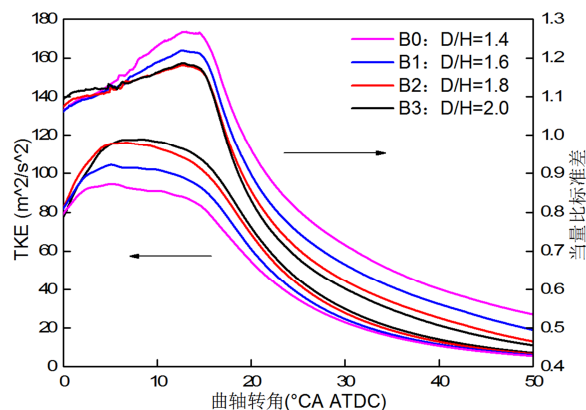


图13 径深比对端动能和当量比标准差的影响。

4.3. 双层分流燃烧室喷孔布置的影响

图14为喷孔布置方案对缸压和放热率的影响。与单层喷孔方案相比, 双层对齐喷孔方案的最大燃烧压力和放热率峰值降低幅度较大, 燃烧后期放热缓慢。而双层交错喷孔最大燃烧压力比单层喷孔方案的稍低, 原因是在偏上层空间的喷孔数比单层喷孔少了一半, 造成上层空间周向油束密度下降, 最大燃烧压力有所下降, 但在其燃烧中后期有较好的油气混合, 利于快速燃烧, 缸压仍高于其他两个方案。

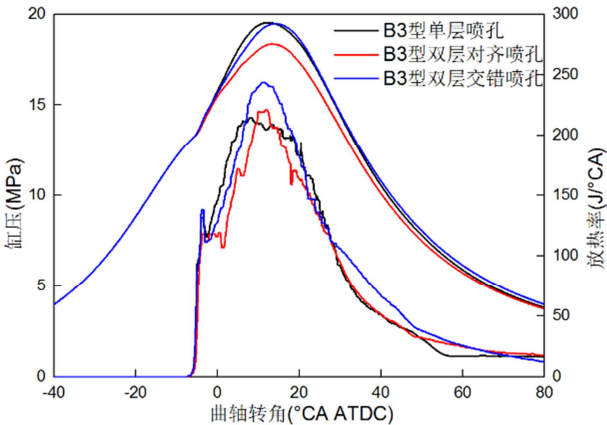


图14 喷孔布置对缸压和放热率的影响。

图15为喷孔布置对燃烧持续期的影响。三个方案的滞燃期变化不大，双层喷孔对齐布置的整体燃烧持续期都偏长，双层交错喷孔和单层喷孔的CA10-50差异不明显，但双层交错喷孔后半程燃烧期有所缩短，说明双层喷孔交错布置对于单层喷孔的优势表现在燃烧中后期良好的油气分布，能够完成快速燃烧，而且仍然能够在燃烧前期与单层多孔布置保持较近水平。

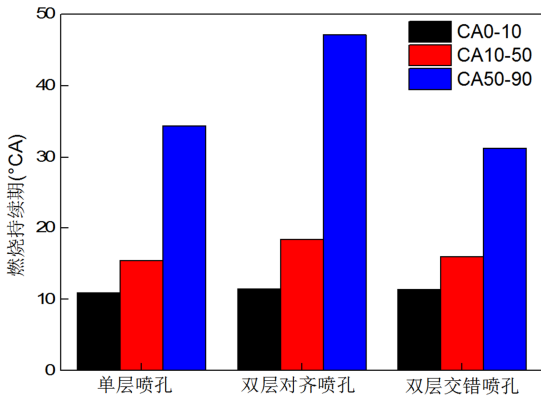


图15 喷孔布置对燃烧持续期的影响。

图16为喷孔布置方案对升功率和燃烧效率的影响。相比于单层喷孔布置，双层喷孔对齐布置的升功率和燃烧效率降低，而双层喷孔交错布置则相反，且其燃烧效果更加优秀，燃烧效率达到99.3%，接近完全燃烧，升功率达到61.39kW/L。

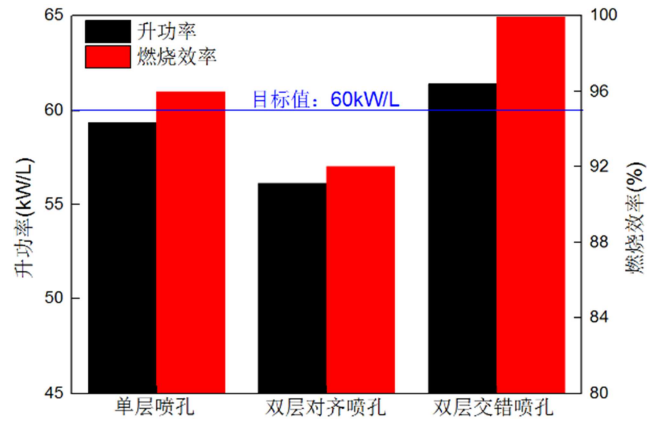


图16 喷孔布置对升功率和燃烧效率的影响。

图17为喷孔布置对当量比分布的影响。在燃烧前期15°CA ATDC，双层喷孔对齐布置的上下层油束在最大夹角差下仍存在较严重的干涉，上下层油束交汇合并，造成区域燃油富集，不利于油气混合以及引起燃烧恶化。对于双层喷孔交错布置，一方面下层油束接近燃烧室中心，能卷吸中心区域的空气；另一方面，下层油束在凹坑型线的导流作用下向上层空间运动，一定程度上填补了上层油束的间隙空间。在燃烧后期，在缸内逆挤流作用下，各喷孔布置方案的当量比分布特点有了明显的差异，单层喷孔方案的混合气聚集在气缸外围，难以利用中心空气。双层喷孔对齐布置的混合气分布均匀程度较差，大部分聚集于偏燃烧室中心位置。而双层喷孔交错布置无论在周向还是径向的混合气分布均匀，有助于中后期的快速燃烧以及缸内空气高效利用。

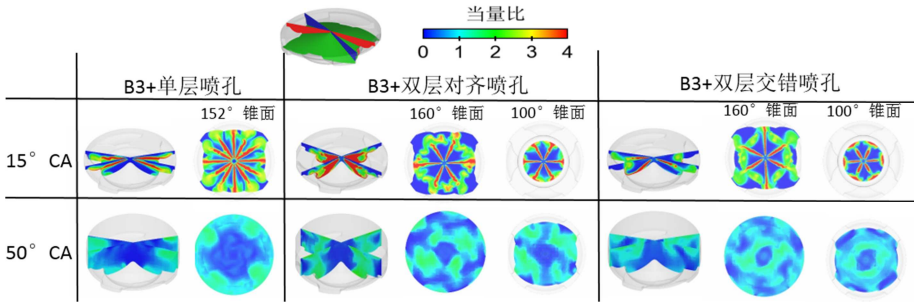


图17 喷孔布置对当量比分布的影响。

5. 结论

通过对高速柴油机缸内燃烧过程的模拟仿真分析，研究了燃烧室结构、双层分流燃烧室径深比和双层喷孔布置对高速柴油机混合、燃烧及性能的影响，得出以下结论：双层分流燃烧室对高速柴油机的燃烧及性能有较

大的改善，特别是上下层近似“浅盆”型的双层分流B型，以其燃油快速分流的特点，既加强上层空气卷吸又保证下层燃油的扩散，油气快速混合，燃烧效率和升功率较高。而且随着双层分流B型燃烧室径深比的增加，油室匹配越好，最大燃烧压力、放热率峰值增加，燃烧持续期不断缩短，缸内湍动能增大，混合气越均匀，能完成快速燃烧并提高升功率。

在双层分流燃烧室采用双层喷孔交错布置,从而提出了新的双层分流燃烧系统,能充分利用双层分流燃烧室上下层空间,极大地促进缸内径向和周向的油气混合,缩短了燃烧持续期,实现快速燃烧且接近完全燃烧,升功率增加至61.39kW/L。

参考文献

- [1] 郭建军, 刘一泽, 郭斌扬, 等。高充量密度重型柴油机燃烧室形状优化数值模拟研究[J]。内燃机工程, 2021, 42 (02): 72-81。
- [2] Thirouard M, Pacaud P. Increasing Power Density in HSDI Engines as an Approach for Engine Downsizing. SAE International Journal of Engines, 2006, 3 (2), 56-71.
- [3] Lamping, M., Körfer, T., and Wix, K. HSDI diesel engines-FEV's high power density concepts [J]. ATZ Autotechnology, 2009, 9 (1): 40-45.
- [4] Di B G, Carlo B, Giacomo B, et al. Functional Requirements to Exceed the 100 kW/l Milestone for High Power Density Automotive Diesel Engines [J]. Sae International Journal of Engines, 2017, 10 (5): 2017-24-0072.
- [5] 张卫正, 原彦鹏, 郭良平, 等。高强度柴油机设计问题的仿真[J]。兵工学报, 2006 (05): 775-778。
- [6] 司鹏鹏, 陈贵升, 王鑫, 等。燃烧室和喷油器结构对重型柴油机性能与排放的影响[J]。农业机械学报, 2013, 44 (11): 12-18。
- [7] 付焱, 隆武强, 冯立岩, 等。双层分流燃烧室内空间利用和喷雾分布的研究[J]。内燃机学报, 2020, 38 (03): 193-199。
- [8] 李树宇, 续彦芳, 刘若凡, 等。燃烧室几何形状对某高强度柴油机燃烧特性的研究[J]。内燃机, 2016 (03): 5-8。
- [9] 袁野, 李国岫, 虞育松。高速直喷柴油机燃烧室形状与喷孔结构匹配规律的三维仿真研究[J]。热科学与技术, 2012, 11 (02): 156-162。
- [10] 大连理工大学。直喷式柴油机双层分流燃烧系统: CN201210152367.6 [P]。2012-09-12。
- [11] 魏胜利, 王飞虎, 陈欢, 等。喷孔分布对柴油机双 ω 燃烧系统性能影响的研究[J]。兵工学报, 2015, 36 (01): 33-39。
- [12] 黄康, 欧阳光耀, 安士杰, 等。双层交错布置多孔喷嘴燃烧排放性能试验研究[J]。内燃机工程, 2015, 36 (04): 81-84。
- [13] Hekayati J, Roosta A, Javanmardi J. Volumetric properties of supercritical carbon dioxide from volume-translated and modified Peng-Robinson equations of state [J]. Korean J Chem Eng, 2016, 33 (11): 3231-3244.
- [14] Han Z, Reitz R D. Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG κ - ϵ models [J]. Combustion Science & Technology, 1995, 106 (4/6): 267-295.
- [15] Taylor hybrid model [J]. Atomization and Sprays, 1999, 9 (6): 623-650.
- [16] Miller R S, Harstad K, Bellan J. Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1998, 24 (6): 1025-1055.
- [17] Akhlaghi H, Roohi E, Stefanov S. On the Consequences of Successively Repeated Collisions in No-Time-Counter Collision Scheme in DSMC [J]. Computers & Fluids, 2017, 161: 23-32.
- [18] Schmehl R, Roskamp H, Willmann M, et al. CFD analysis of spray propagation and evaporation including wall film formation and spray/film interactions [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1999, 20 (5): 520-529.
- [19] Senecal P K, Richards K J, Pomraning E, et al. A new parallel cut-cell cartesian CFD code for rapid grid generation applied to in cylinder diesel engine simulations [J]. SAE Paper, 2007, 2007-01-0159.
- [20] Hao C, Lu Z, Feng Y, et al. Optimization of Fuel/Air Mixing and Combustion Process in a Heavy-duty Diesel Engine Using Fuel Split Device [J]. Applied Thermal Engineering, 2020: 116458.
- [21] 李向荣, 赵陆明, 李志杰, 等。高强度柴油机燃烧放热特性影响规律仿真研究[J]。系统仿真学报, 2011, 23 (11): 2487-2493。
- [22] 付焱, 冯立岩, 田华, 等。高喷油压力下双层分流燃烧室性能的研究[J]。哈尔滨工程大学学报, 2020, 41 (03): 318-324。
- [23] 王坤, 李海鹰, 李玉峰, 等。避阀坑深度对高强度柴油机燃烧过程的影响[C]//中国内燃机学会。中国内燃机学会, 2016。