

活塞冷却油腔内流动的数值模拟

Numerical Simulation of Flow in the Cooling Gallery of the Piston

孙平 胡玉平 闫理贵 李国祥
山东大学能源与动力工程学院

摘要：本文利用 CFD 软件 STAR-CD 对发动机活塞冷却油腔内的流动进行了三维数值模拟，分析了不同喷油压力下，活塞运行到上止点、下止点，以及中间位置时，冷却油腔内流体的流动特性，模拟结果为活塞冷却油腔的优化设计提供了依据。

关键词：活塞，冷却油腔，CFD, STAR-CD

Abstract: The 3-D numerical simulation of flow in the cooling gallery of piston was carried out with CFD software STAR-CD. The character of flow in Cooling Gallery based on TDC, BDC and middle is analyzed under different injection pressure and the simulation provides more dependable theoretical evidence for the optimization design of the Cooling Gallery of piston.

Key word: piston, cooling gallery, CFD, STAR-CD

1 前言

随着柴油机强化程度的不断提高，活塞作为燃烧室的关键零件，其温度和温度梯度也大幅度增加，使活塞产生了较大的热变形和热应力^[1]。因此活塞冷却成为柴油机设计性能的一项关键措施。目前应用于活塞冷却的方式主要有：无喷油冷却、有喷油冷却、内冷油腔冷却、高位空心环冷却等，而在高强化发动机上，因为空心环冷却方式冷却效果明显优于其他方式，所以主要采用高位空心环冷却方式^[2]。

对于活塞冷却的模拟计算，以前的研究主要偏重于有限元方法^[3]，而很少采用 CFD 方法进行相关研究。本文应用 STAR-CD 对采用高位空心环冷却方式的活塞冷却油腔进行了数值模拟，并针对不同喷油压力下，活塞分别处于上止点、下止点和中间位置时的油腔流动状态分别进行了模拟计算。通过对结果的对比分析，为活塞冷却油腔的优化设计提供了依据。

2 计算模型的建立

2.1 几何模型及网格的划分

首先应用 Pro/E 建立了活塞冷却油腔、气缸套和底部喷油孔的三维几何模型，如图 1 所示，将面网格导入到 STAR-CD 的网格生成器 pro-am 中，在保证计算网格质量的前提下，为了提高计算速度，应尽量减少网格的数量。本模型计算网格采用 Trimmed cell 方式。在整个空腔内，由于空气占绝大部分体积，虽然机油以较高速度喷入，但从整个流场的状态来看，流动方式依然为层流，且气缸形状为规则的圆柱形，所以网格基本尺寸设定较大。在冷却过程中，从油到壁面的热边界层对于换热有重要的影响，因此要着重考察机油在油腔壁面的分布和流动状态，所以模型的壁面统一添加了 subsurface。同时，对于机油从喷空向上喷出到撞至壁面所途径的区域，以及模型上方形状复

杂的区域，为了提高计算精度，对这些区域的网格进行了局部加密，这样整体来看，既保证了网格精度，又减少了网格数量。按照这种思路，分别生成了活塞位于上止点、下止点，以及距离下止点 60mm 时的网格模型（如图 2 所示）网格总数分别为 79971, 37451, 59819, 节点总数分别为 116256, 42458, 54324。

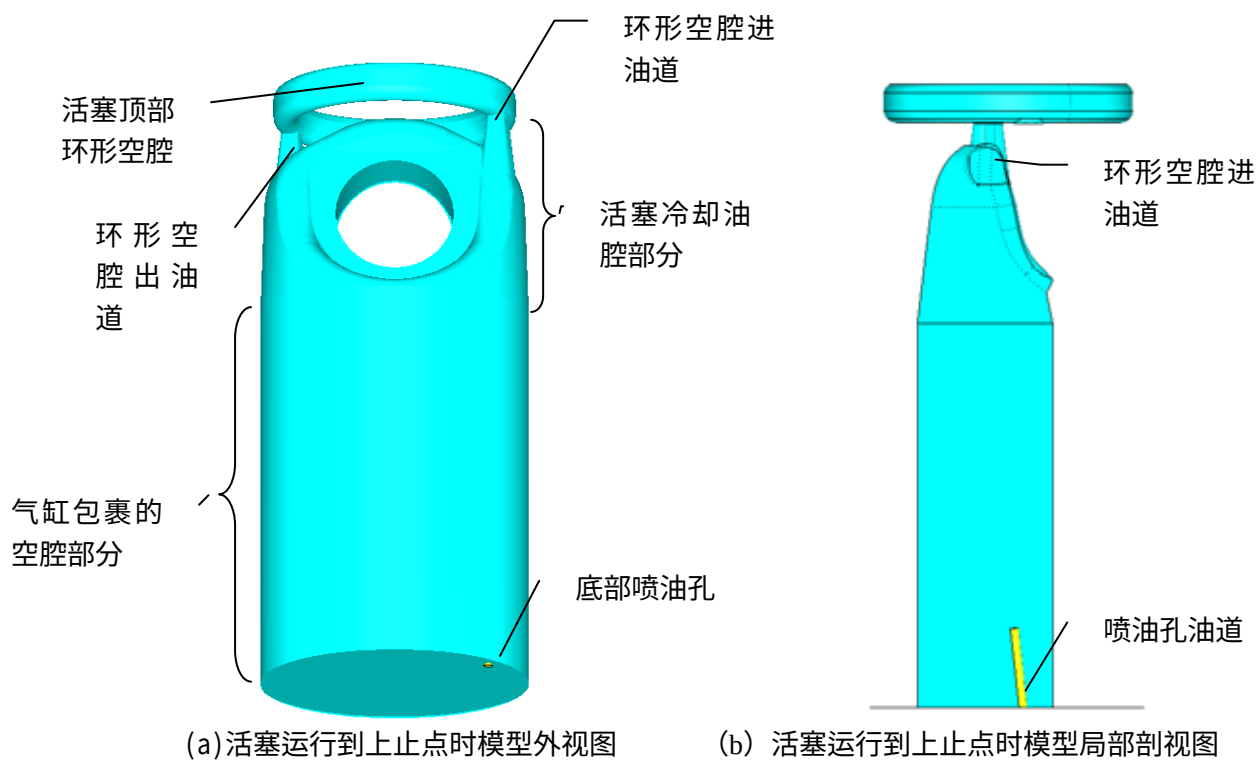


图 1 冷却油腔三维几何模型

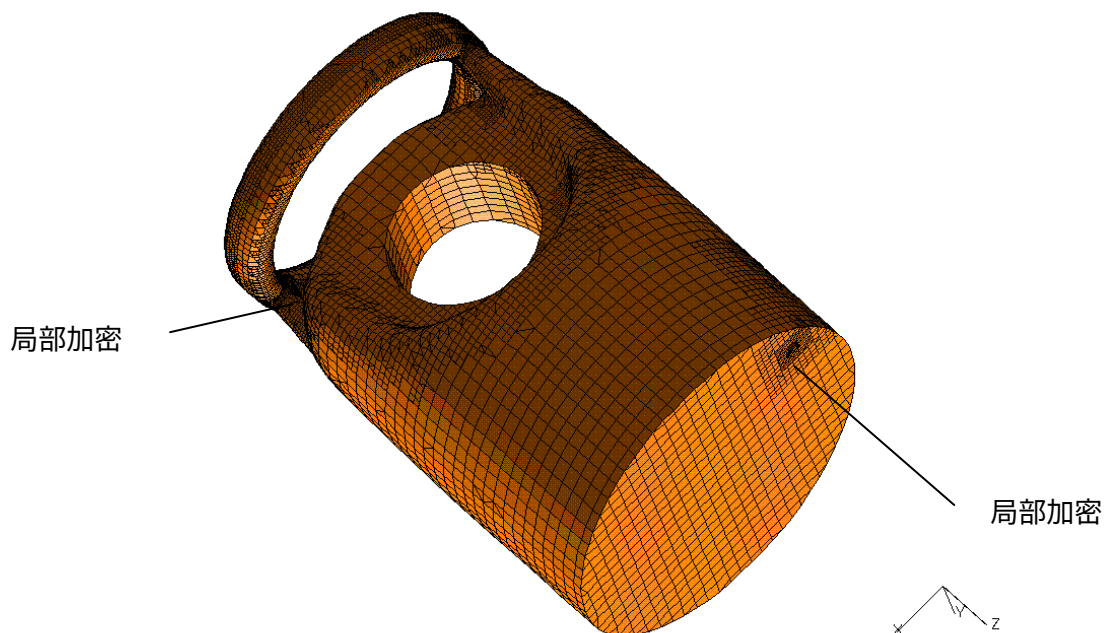


图 2 计算网格模型

2.2 求解器和边界条件的设定

机油是从一个面积为 7.35016 mm^2 喷孔中向上克服重力阻碍，喷入充满空气的空腔，沿着空腔顶部的环形空腔以及侧壁面，最终回流到空腔底部。在机油和空气的交界面上没有固定的边界，空气在机油的搅动下，也具有了速度，最终的流场由油和空气的流动共同组成。针对此类物理模型，需要激活 STAR-CD 的‘自由表面’和‘瞬态计算’模块进行求解。激活‘自由表面’模块中的张力选项，将机油属性编辑为密度 870 kg/m^3 ，动力粘度 0.001 kg/ms ，设定 Z 轴方向为重力加速度方向，为了便于收敛，将喷孔设定为速度入口，速度由不同喷射压力下的体积流量除以喷口面积，底面设定为自然出口，由于仅考察流动状态不考虑换热，所以其他壁面默认为绝热边界。由于模型中的喷油管道不是规则的平行于 Z 轴方向，所以在入口平面建立局部坐标系，使机油速度方向能垂直于入口平面。边界条件设定如表 1、表 2 所示：

表 1 喷油压力 600kpa 时边界条件

边界名称	边界类型	边界条件
喷油孔入口	速度入口	建立局部坐标系， $w = 16.08 \text{ m/s}$
地面出口	自然出口	默认
其余壁面	绝热面	默认

表 1 喷油压力 400kpa 时边界条件

边界名称	边界类型	边界条件
喷油孔入口	速度入口	建立局部坐标系， $w = 12.46 \text{ m/s}$
地面出口	自然出口	默认
其余壁面	绝热面	默认

3 结果分析

3.1 流动结果分析

本文对机油在活塞分别处于上止点，下止点和距离下止点 60mm 时的流动状态进行了三维数值模拟。在冷却过程中，换热发生在机油与活塞以及气缸的交界面，因此要着重考察机油在油腔壁面的分布和流动状态。机油在壁面上的速度矢量分布如图 3，图 4 所示，由结果可以看出，机油流速最大的地方分布在喷油孔附近的壁面处。由于活塞顶部是热负荷最高最集中的区域，而高位空心环冷却油腔的设计也是为了解决这部分区域的冷却问题，所以应当重点考察此区域流速分布。

图 3 与图 4 通过对比可知，在 400kpa 与 600kpa 两种不同压力下，壁面上的速度矢量分布基本相同，但是在数值范围上，600kpa 时壁面各点的速度矢量要比低压时高 1-2m/s 不等。而影响顶部环形空腔的关键因素是活塞的位置，以及喷油孔与环形空腔进油道的对应关系。活塞在下止点时，喷油孔离环形空腔距离最近，进入空腔的机油可以获得更好的速度冲量。此外从图可以看出，此时的喷油孔与进油道对应关系良好，油束直接喷入顶部环形空腔，顶部速度分层状态良好，有利于机油流动，带走壁面更多的热量，而随着活塞上移，油束逐渐偏离进油道。当活塞到达上止点时，顶部环形空腔内已基本不存在流动。

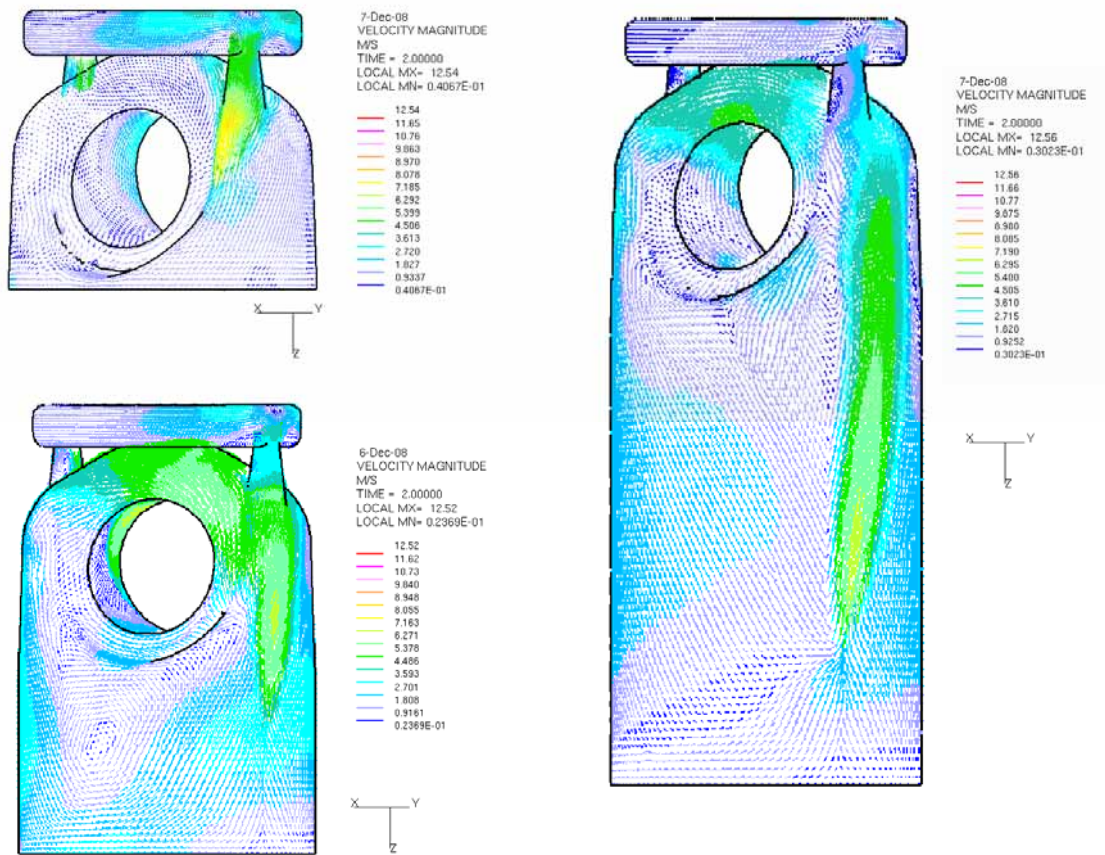


图 3 400kpa 时壁面速度矢量分布图

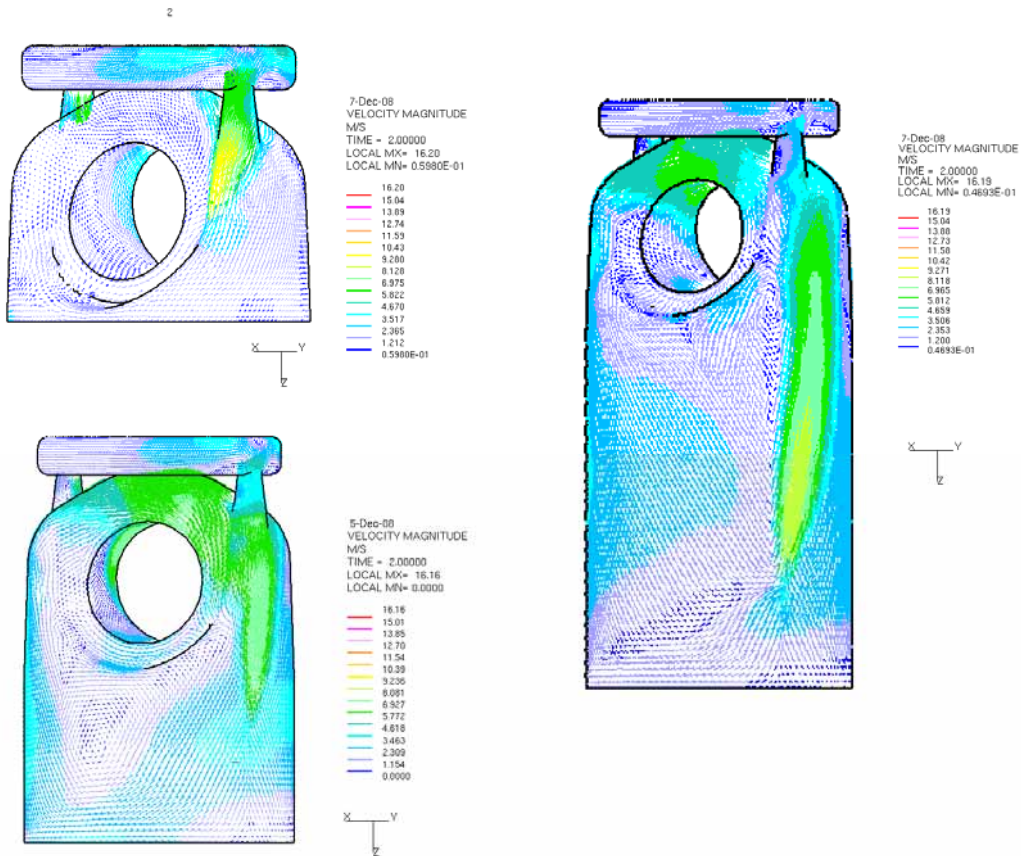


图 4 600kpa 时壁面速度矢量分布图

3.2 进油道、出油道处机油质量分数结果分析

图 5 所示为喷油压力 400kpa，活塞在各个位置时环形空腔下方进、出油道的质量分数截面图。当活塞在下止点时，进油道的机油平均质量分数在 40%左右，出油道的机油平均质量分数在 35%左右，由此可以推知整个环形空腔内机油质量分数应该维持在 35%-40%之间，机油充量状态良好，基本达到了结构设计的目的，可以对活塞顶部进行有效地换热冷却。而当活塞位于其他位置时，机油质量分数大幅降低，从中间位置往上，最高不超过 2%，说明活塞冷却油腔设计存在一定缺陷，机油在这些位置无法喷入顶部环形空腔，不能够最大限度发挥环形空腔的冷却作用。

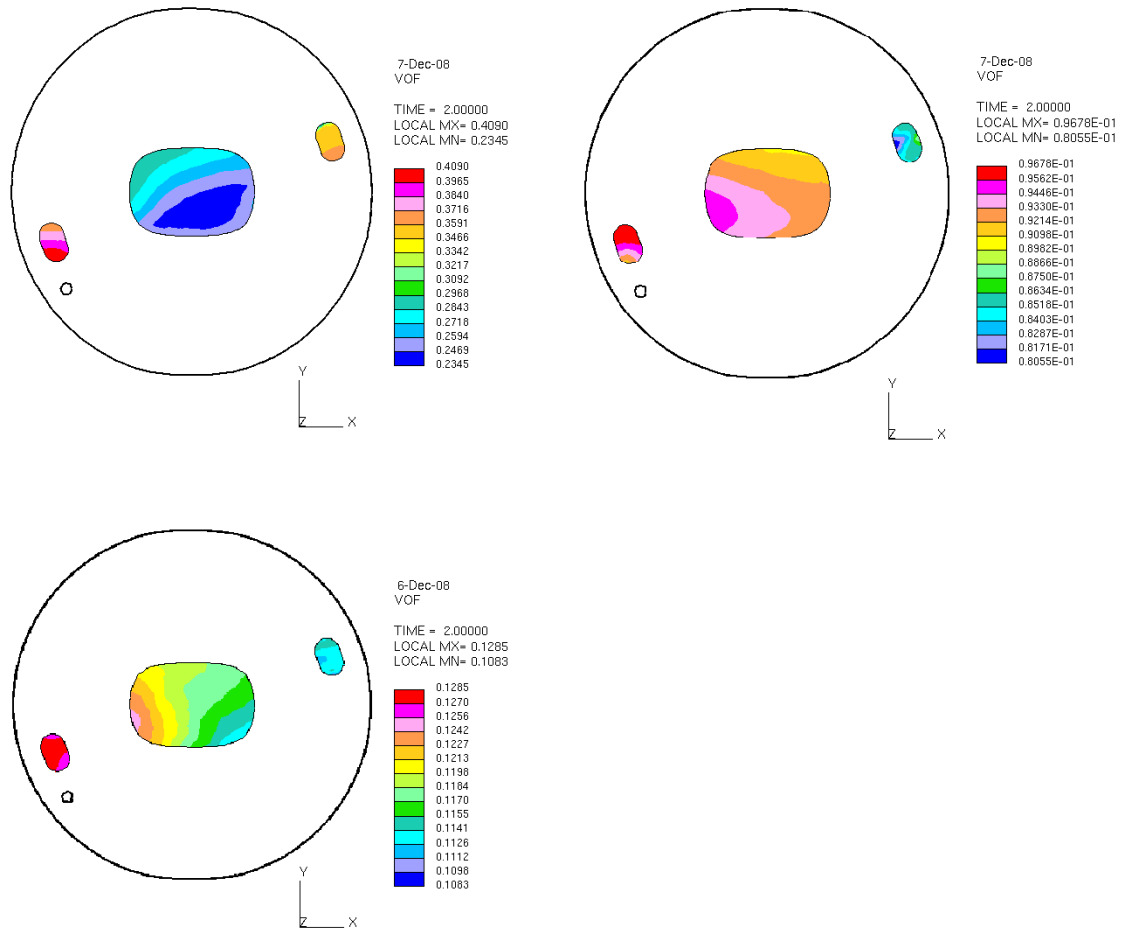


图 5 400kpa 时环形空腔下方进、出油道质量分数截面图

3.3 喷油孔截面质量分数结果分析

图 6 所示为喷油压力 400kpa，活塞在各个位置时喷油孔质量分数截面图。当活塞在下止点时，喷油孔与进油道位置对应关系良好，而且此时两者距离最近，油束以较高冲量喷入环形空腔，此截面上两者之间的区域机油质量分数较高，在 36%-40%左右。而随着活塞上移，喷油孔与进油道距离增大，对应关系也出现恶化，油束逐渐偏离进油道，在 400kpa 的压力下，只有非常少量的机油能够进入环形空腔。

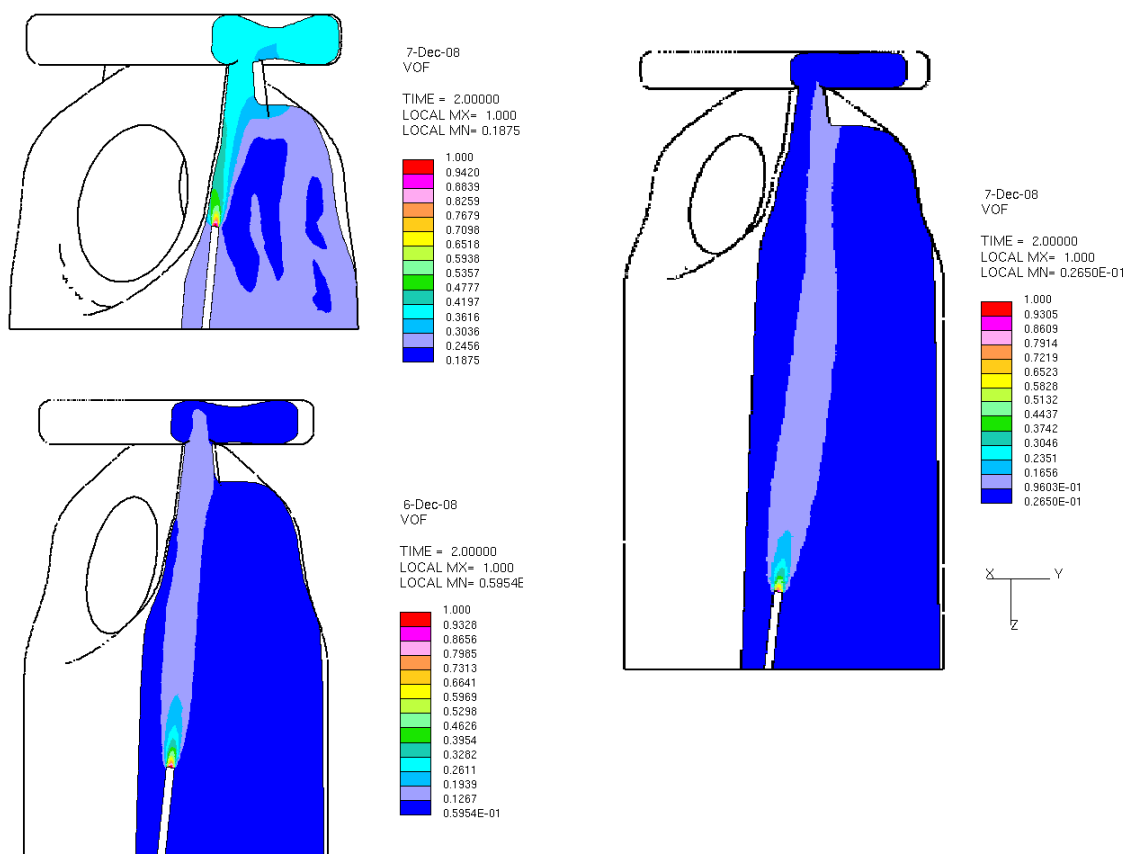


图 5 400kpa 时喷油孔质量分数截面图

4 结束语

通过对活塞冷却油腔的 CFD 计算, 分析了整个流场的速度矢量分布、进出油道质量分数以及喷油截面质量分数, 掌握了机油在空腔内的流动状态。明确了喷油孔与进油道之间的位置对应关系对机油分布的影响, 以及不同压力下腔内流动的特点, 为进一步改善高位空心环冷却油腔的设计, 提高冷却能力提供了依据。

5 参考文献

- [1] 张力, 申正均, 张勇。增压柴油机内冷油腔活塞结构分析及评价。车用发动机, 2004, 6
- [2] 谭建松, 俞小莉。高强度发动机活塞冷却方式仿真。兵工学报, 2006, 1
- [3] 原彦鹏, 王月, 张卫正, 刘畅, 赵维茂。冷却油腔位置改变对活塞温度场的影响。北京理工大学学报, 2008, 7