

柴油机迷宫式油气分离器分离效率数值模拟

陶丽芳, 王 成, 刘 荣, 徐亚飞, 杨文乐

(奇瑞汽车股份有限公司发动机工程研究院, 安徽芜湖 241009)

摘 要: 应用商用 CFD 软件 AVL-FIRE 对某三缸柴油机迷宫式油气分离器进行 CFD 分析, 模拟迷宫内的流速与压力分布; 采用离散模型模拟油滴粒子喷射, 假定油滴粒子与壁面碰撞后即被捕捉, 进而得出不同直径的油滴分离效率; 对比了几种迷宫结构方案的进出口压降以及油气分离效率。结果显示: 计算结果虽偏高, 但趋势与试验值较吻合, 证明了采用 CFD 技术对油气分离器进行模拟的可行性。

关键词: 迷宫式油气分离器; CFD; 油气分离效率

中图分类号: TK412 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)05-0019-04

CFD Analysis for the Separation Efficiency of a Labyrinth Oil Mist Separator

Tao Lifang, Wang Cheng, Liu Rong, Xu Yafei, Yang Wenle

(Engine Engineering Research Institute, Chery Automobile Co., Ltd., Anhui Wuhu 241009)

Abstract: CFD analysis is performed for a labyrinth oil mist separator in a three-cylinder diesel engine with CFD software package AVL-FIRE. The velocity and pressure distribution of the labyrinth is calculated. The discrete model is used to simulate the injection of the oil mist particles. Oil mist particles are assumed to be trapped once they impact the wall, then the separation efficiency of different size of oil mist is obtained. The pressure drop and oil mist separation efficiency of several different labyrinth oil mist separator are compared. The results show that though the simulation results are higher, the trend is consistent with that of test results, which proves the feasibility of using CFD analysis on the simulation of oil mist separator.

Keywords: labyrinth oil mist separator; CFD; oil separation efficiency

1 前 言

在排放法规要求越来越严格的今天, 高性能的油气分离器对降低排放、减少机油消耗至关重要。迷宫式油气分离器因其布置空间小, 结构简单, 在小型紧凑的发动机上应用日益广泛。

传统的迷宫式油气分离器开发方法是将不同结构的迷宫样件进行油气分离试验, 试验成本高, 开发周期长。而应用 CFD (Computational Fluid Dynamic)

仿真技术, 结合商业流体软件, 在计算机虚拟环境中模拟油气分离器的流动、压损与分离效率, 可以更直观地对油气分离器内的气体流动进行评价, 并能快速进行方案优化。

国外从 2000 年左右开始对汽车油气分离器分离效率数值模拟方法进行探索和研究, 计算方法主要为在空气连续流动结果基础上进行离散油滴粒子轨迹捕捉, 日本 nissan 汽车公司针对油滴粒子反弹规律也做过专门研究^{[1]~[3]}。国内目前在车用油气

分离器的数值模拟计算方法与应用方面都鲜有报道。

本文介绍了一种模拟油气分离器分离效率的方法,以某柴油机迷宫式油气分离器为例,对比了不同结构的迷宫流动、压损与分离效率的差别,并形象、直观地显示了不同直径油滴在迷宫内的分布情况,能快速有效地进行方案评价与结构优化。

2 计算模型

活塞漏气中包括气体和液体成分,数值计算中需要求解气相与液相的守恒方程。文中选取湍流模型来模拟油气分离器中气体的连续相流动^[2];而液体的运动则选取离散液滴模型(Discrete Droplet Model),用拉格朗日方法计算液滴在计算流域内的轨迹与捕捉运动。由于油雾粒子占总活塞漏气量的体积分数与质量分数均较低,计算中忽略离散相对连续相的影响,即,先模拟气体流动再模拟液滴轨迹^[4]。本次模拟计算需要求解连续相流动控制方程与离散相运动轨迹方程。

连续相控制方程的通用格式如式(1)所示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S \quad (1)$$

式中, ϕ 为通用变量,可以代表三个速度分量 u 、 v 、 w 、温度 T 、湍动能 k 或湍流耗散率 ε 等求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

离散相运动轨迹方程如式(2)所示:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i \quad (2)$$

右边第一项为颗粒的单位质量曳力;第二项为重力;第三项 F_i 为其他作用力。文中只考虑曳力与重力,忽略了其他力的影响。

3 模拟方法

3.1 计算流程

油气分离器计算流程^[1]一般如图1所示。首先求解连续相的气体流动,在此结果基础上,引入离散相油滴粒子模型,一定质量的油滴粒子按照一定的直径分布规律,以某种分布形式被喷射入油气分离器计算流域,一部分粒子随着流动惯性,直接流出油气分离器;另一部分粒子与壁面发生碰撞后产生两种运动形式。一类粒子碰壁后即是在壁面上发生扩散,并慢慢在壁面上形成油膜,通过发动机回油孔流回到油底壳;另一类粒子碰壁后发生反弹并伴有动量衰减,然后再次碰壁反弹和动量衰减,直至最后在壁面扩散或者流出油气分离器。扩散粒子的总和与喷入粒子之比即为油气分离效率。为了简化计算,文中假定粒子碰壁后即扩散,没有考虑反弹。

有动量衰减,然后再次碰壁反弹和动量衰减,直至最后在壁面扩散或者流出油气分离器。扩散粒子的总和与喷入粒子之比即为油气分离效率。为了简化计算,文中假定粒子碰壁后即扩散,没有考虑反弹。

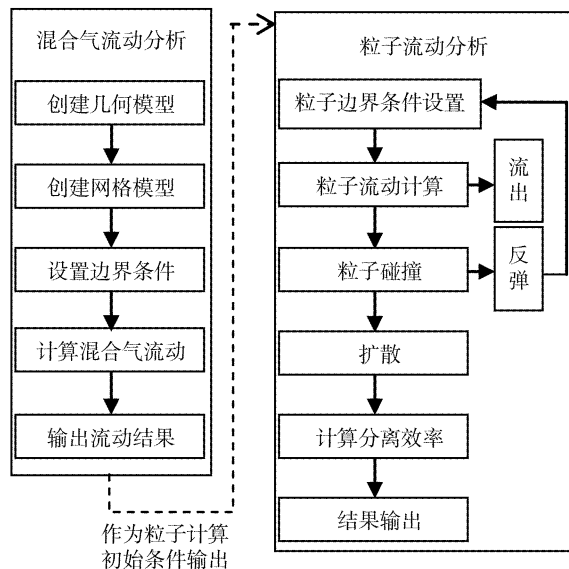


图1 油气分离器 CFD 计算流程

3.2 网格模型

图2为某柴油机迷宫式油气分离器 CAD 模型,该迷宫进口处设置了倾斜挡板,整个流域内设置了一块穿孔挡板与四块一般挡板。图3为该迷宫的流体网格模型,85%的网格为六面体,网格数 520 000。

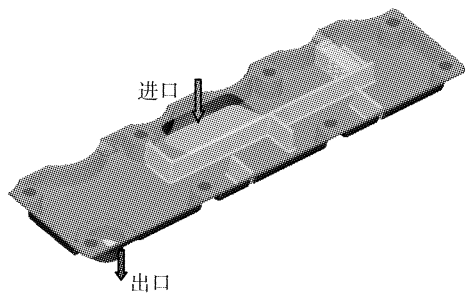


图2 某油气分离器 CAD 模型

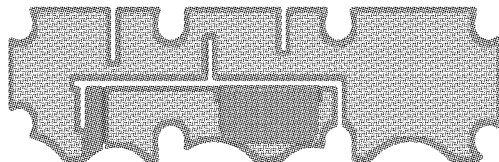


图3 某油气分离器 CFD 网格模型

3.3 边界条件

计算流体为不可压空气,进口为实测的活塞漏气量: 34.9 L/min, 出口为实测压力: 95 765 Pa。分离前油滴总质量测量值为 2 g/h, 计算中考虑重力作用。油滴粒子尺寸分布由于没有实测数据,假定为典型的乘用车粒子分布规律,如图4所示。

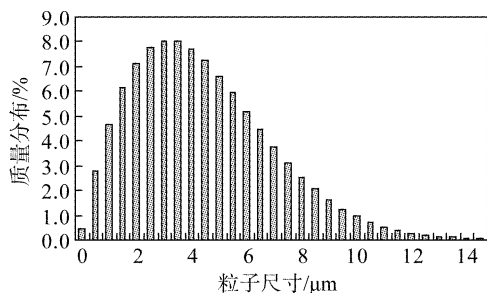


图4 典型乘用车油滴粒子尺寸分布

4 模拟结果对比与评价

油气分离器要求油气分离效率高, 进出口压损小。通过气体连续相计算, 得到整体的流速、压力分布以及进出口压损; 通过粒子离散相计算, 得到粒子在油气分离器内的捕捉分布, 并计算油气分离效率。根据初始计算结果, 对油气分离器进行优化设计。

4.1 油气分离器气体连续相结果分析

图5为油气分离器整体与切片的流速分布, 图6为总压分布。在挡板的阻隔作用下, 气体主要沿着壁面与挡板之间的缝隙流动, 挡板之间形成了漩涡区域。压损最大区域发生在穿孔板处, 其他挡板处也有一定的压损, 但相对较小。进出口总压损为154 Pa。

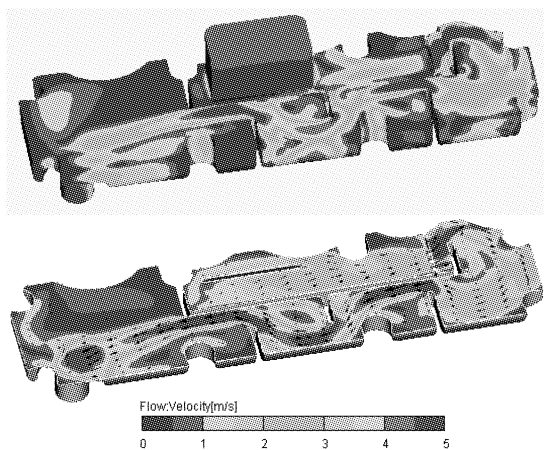


图5 迷宫内空气流速分布

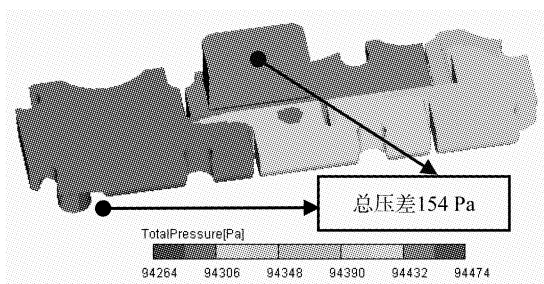


图6 迷宫内空气总压分布

4.2 离散相粒子轨迹计算结果

以气体流动结果为初始条件, 在入口处将图4中的不同尺寸的粒子均匀喷入油气分离器计算流域内, 粒子总质量35 g/h, 总粒子数10 000。计算步长0.01 s, 计算时间10 s。1.46 s时计算收敛, 此时粒子捕捉数为7 500, 因此对于该油气分离器, 油气分离效率为75%。

图7为计算收敛后粒子在流域内的分布。进口挡板处以及穿孔板处的粒子捕捉率相对较高, 大直径粒子绝大部分均在穿孔板之前被捕捉, 其他挡板上以及壁面内凹弯角处也有部分7 μm以下的粒子分布, 靠近出口的大片区域粒子捕捉率较低, 有优化潜力。

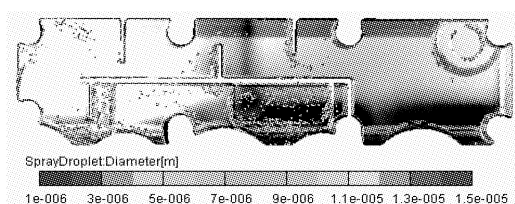


图7 油气分离器内碰壁粒子分布

4.3 油气分离器方案优化

根据油气分离器计算结果, 为了提高靠近出口区域的粒子捕捉率, 在此处新增加一细长挡板, 简称改进方案一(如图9中矩形框内所示)。图8为改进方案一的总压分布, 进出口压损由原方案的154 Pa增加到167 Pa, 新增挡板区域有明显压损。

图9为改进方案一内碰壁粒子分布, 新增挡板处以及挡板附近壁面上均有粒子被捕捉, 整体油气分离效率由原方案的75%增加到75.52%。由于原油气分离器主分离区域集中在进口挡板以及穿孔板处, 在出口附近新增挡板虽增加了出口附近区域的分离效率, 但所起的分离作用相对于整体来说不明显。

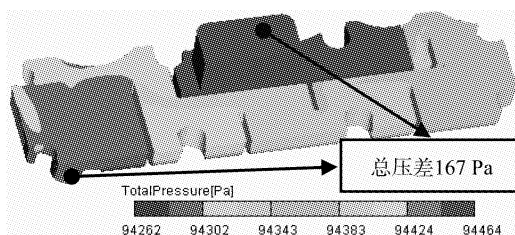


图8 改进方案一总压分布

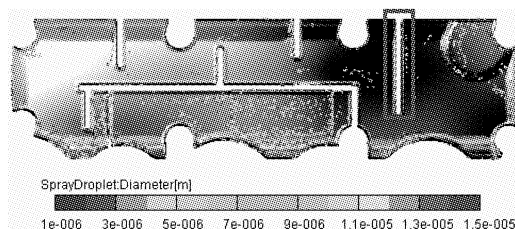


图9 改进方案一碰壁油滴分布

以改进方案一为基础,在穿孔挡板与进口挡板之间的区域再增加一普通细挡板,简称改进方案二(如图 11 中矩形框内所示)。改进方案二总压损增加为 236 Pa(图 10),分离效率提高为 80.99%,说明:在分离集中区域增加挡板对提高整体分离效率作用更加显著。

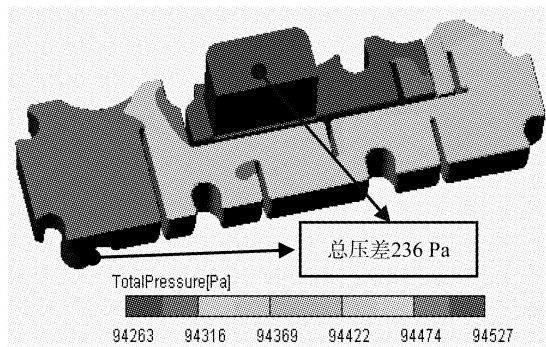


图 10 改进方案二总压分布

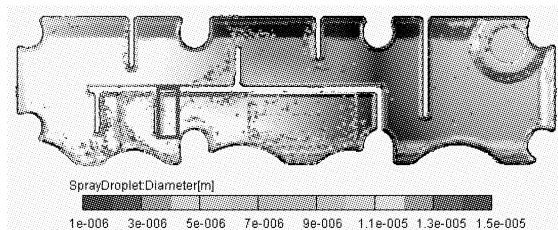


图 11 改进方案二碰壁粒子分布

4.4 计算结果与试验验证

油气分离器压损值一般没有硬性的设计指标,只要满足曲轴箱压力为 $-3 \sim 0.5$ kPa,油气分离器压损值越小越好,一般不超过 1 kPa。

不同厂家对于不同发动机,对油气分离效率的要求都会有所不同。在满足其最低设计指标的前提下,分离效率越高越好。

表 1 与表 2 分别列出了三种迷宫方案压差与分离效率计算值与试验值。计算值普遍高于试验值,但趋势保持一致。可见,油气分离器的模拟计算对于设计初期定性评价不同设计方案有一定的可信度。并能较快实现方案优化。

表 1 各方案压差计算值与试验对比 单位: Pa

	CFD 计算	试验
原方案	154	146
改进方案一	167	151
改进方案二	236	201

表 2 各方案分离效率计算值与试验对比 单位: %

	CFD 计算	试验
原方案	75	47
改进方案一	75.52	47
改进方案二	80.99	50

5 结 论

本文应用 CFD 计算手段,采用离散粒子模拟油滴喷射的方法,实现了对某迷宫式油气分离器的流动、压力以及分离效率的模拟计算。由于没有考虑油滴粒子的反弹运动,计算得到的分离效率偏高,但趋势保持一致。可以在设计阶段应用于方案优化。通过对比不同设计方案的压损与分离效率,择优选取最佳方案,同时 CFD 计算结果,特别是碰壁粒子的分布规律可以帮助设计人员大致评估油气分离集中区域。在此区域进行合适的方案修改,对于提高整体分离效率作用更明显。

参考文献

- [1] Kazunari Satoh, Takeshi Kawai, Manabu Ishikawa, et al. Development of method for predicting efficiency of oil mist separators[C]. SAE Paper 2001-01-1234, 2000.
- [2] Sydney Tekam, Marc Demoulin, Virginie Daru. Prediction of the efficiency of an automotive oil separator: comparison of numerical simulations with experiments[C]. SAE Paper 2004-01-3019, 2004.
- [3] Naser Hineiti, Laila Guessous. Numerical investigation of transient flow effects on the separation parameters of a reverse flow type cyclone particle separator[C]. SAE Paper 2008-01-0419, 2008.