

基于 CFD 的某汽油机曲轴箱通风系统的改进

CFD-Based Improvement of Crankcase

Ventilation in Gasoline Engine

叶伊苏 王伟民 徐莉 黄平

(东风汽车公司技术中心 430056)

摘要: 本文对曲轴箱通风系统的功能、设计目标以及布置形式作了简要介绍, 并针对某款汽油机在开发过程中曲轴箱通风系统机油消耗过大(超过目标机型)的现象, 利用 STAR-CCM+软件的拉格朗日多相流模型对气门室罩盖迷宫中的气液两相流场进行了数值模拟, 分析了不同直径油滴的分离效率及其运动轨迹。在此基础上确定了优化方案, 对迷宫进行了改进设计。试验结果表明, 采用改进方案后, 曲轴箱通风系统中的机油消耗量与目标机型相当。

关键词: 曲轴箱通风 机油消耗量 STAR-CCM+ 拉格朗日多相流 分离效率

Abstract: The function, design target and popular layout of positive crankcase ventilation are briefly described in this paper. During the development of a gasoline, the oil consumption is more than benchmark engine. The two-phase flow, separation efficiency and oil droplet trace at different oil particle size of labyrinth separators in the cylinder head cover were simulated by using STARCCM+ Lagrangian multiphase models. Based on this simulation, the labyrinth was optimized. The experimental results show that the oil consumption is about equal to the benchmark engine after the optimization scheme was adopted.

Key words: PCV Oil consumption STARCCM+ Lagrangian multiphase Separation efficiency

引言

在发动机工作时, 会有部分可燃混合气和燃烧产物经活塞环由气缸窜入曲轴箱内, 当发动机在低温下运行时, 还可能有液态燃油漏入曲轴箱, 这些物质如不及时清除, 会加速机油变质, 并使机件受到腐蚀。又因为窜入曲轴箱内的气体中含有 HC 及其它污染物, 所以不允许把这些气体直接排放到大气中^[1]。国家环保总局公布的轻型车污染物排放限值及测量方法中(国III、IV阶段)规定汽车在以 50km/h 的速度等速行驶时, 不允许有任何曲轴箱污染物排入大气。现代汽车发动机采用的强制式曲轴箱通风系统就是防止曲轴箱污染物排放到大气中的净化装置, 其作用是将这些离开气缸的“旁通气体”通过进气系统导入到气缸中再次燃烧。但同时这些气体会将滞留在活塞和气缸表面的油膜和油滴带入气流中。一方面由于机油不能完全燃烧, 会对排放指标产生负面影响; 另一方面, 若不及时对气体中的机油进行回收, 会使得机油消耗量很大, 这将会大大影响产品的竞争力。因此, 为了满足日益严格的排放法规, 必须将机油从曲轴箱通风系统中分离出来^[2]。总的来说, 曲轴箱通风系统应起到合理控制曲轴箱内压力与油气分离的作用。

1 强制式曲轴箱通风系统开发

1.1 功能

一般而言，强制式曲轴箱通风系统的功能如下：

- (1) 将“旁通气体”导入气缸燃烧，以防机油变质而使机件受到磨损；
- (2) 采用 PCV 阀来控制曲轴箱内维持一定的真空度，以防曲轴箱污染物因压力升高从油封、衬垫处泄露而污染大气；
- (3) 采用油气分离装置（如迷宫、旋风式分离器）对“旁通气体”中的机油进行回收，延长机油使用期限，同时可改善排放指标。

1.2 设计目标

根据以上通风系统功能，经查阅相关资料^[3]，设计目标如下：

- (1) 在标准《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（GB18352.3—2005）》要求的工况下，曲轴箱内压力应为负压（低真空度状态），一般推荐为 $-5\sim 0\text{kPa}$ ；
- (2) 发动机正常运行过程中，伴随混合气从通风管道进入气缸燃烧的机油量应小于 5g/h ；
- (3) 在恶劣工况下，及空滤器堵塞、活塞漏气量增大情况下从通风管道中进入气缸燃烧的机油量应小于 10g/h ；
- (4) 发动机发生倾斜或遭遇低温时，通风系统应能正常工作。

当采用专用油气分离器时，第（2）和（3）条取值应为 1g/h 和 4g/h ，具体需根据活塞漏气情况调整；第3条试验中空滤器堵塞以压力损失 4kPa 模拟活塞漏气量增大情况，以向曲轴箱通入1倍活塞漏气值的气体模拟。

1.3 布置形式

图1是现今日本比较流行的布置方式。在该系统结构中，通风管道包括PCV阀管道和通气管道，PCV阀管道将气门室（和曲轴箱相连）与进气歧管相连，通气管将气门室与空滤器后管相连。PCV阀管道为怠速和中低负荷主要通道，此时，新鲜空气经罩盖中迷宫进入曲轴箱与“旁通气体”混合，然后经PCV阀进入进气歧管；通气管为高负荷主要通气管道（活塞漏气量增加，PCV阀管道流量有限）。此方式的优点是实现容易、成本低，但仅采用迷宫来分离油气，效率不高。

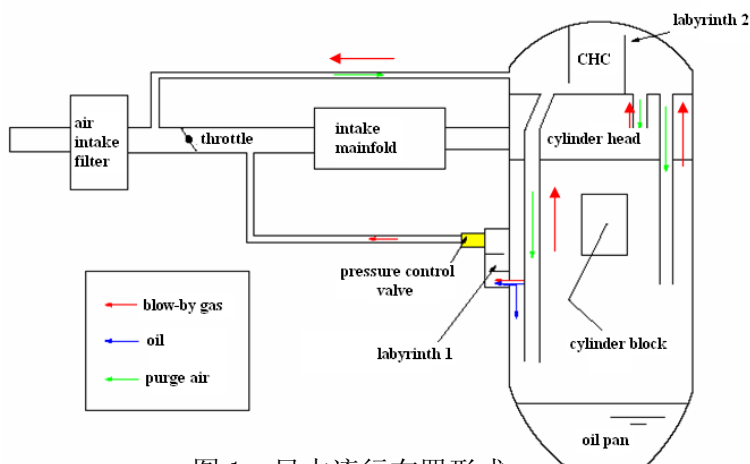
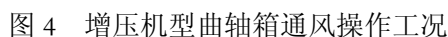


图1 日本流行布置形式



2 原机曲轴箱通风系统

本文所描述的汽油机曲轴箱通风系统形式如图 1 所示,在进行开发试验时,发现其机油消耗偏大。为此,在上下两路通风管路中安装机油收集装置,进行机油携带量试验,并与目标机型进行对比。结果显示,该汽油机曲轴箱通风管路中所携带的机油要超过目标机型。

3 油气分离迷宫 CFD 分析

气液两相流的数值模拟包括气相场和气液间的相互干扰计算。相互干扰即气液两相间的质量、动量、能量交换过程。常见算法可以分为欧拉-欧拉型算法和欧拉-拉格朗日型算法两种类型。一般而言,在对油气分离进行 CFD 分析时,对气相流场采用欧拉观点进行计算,而对液滴的运动则采用拉格朗日观点进行跟踪计算^[4]。另外,由于离散相的体积含量很小,可以忽略离散相对连续相的影响,认为离散相的随流性很好,因此,在用 STARCCM+计算时,首先计算连续相的流场。

3.1 连续相模型设定

试验测定该发动机活塞漏气量 (blow-by gas) 最大为 20L/min,由于流量小,迷宫内速度较低,故可将其视为不可压缩气体。设定“旁通气体”的密度为 1kg/m^3 ,动力粘度为 $2.11 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ($P=101325\text{Pa}$, $T=353\text{K}$)。

边界条件设定如下:

- (1) 入口边界:速度入口边界 (velocity-inlet);根据最大活塞漏气量及入口截面积计算得出进出口速度。
- (2) 出口边界:压力出口 (pressure-outlet),设定出口压力为 0Pa。
- (3) 壁面边界:无滑移固定壁面,壁面速度为 0。

3.2 离散相模型设定

本文假定油滴颗粒为球体、对于给定直径的油滴,假定其在运动中保持直径不变,不考虑蒸发、摩擦、聚合及热效应的影响。一般采用颗粒轨道模型模拟颗粒运动,在得到气体连续相的流场后,运用拉格朗日方法就可以得到离散相的颗粒运动轨迹及分离效率。

由于油滴的质量流量及粒径分布都很难确定,另外模型中进行了很多假设,所以很难定量分析得出经分离后“旁通气体”所携带的机油量,但针对油气分离效率的定性分析可以作为不同方案之间比较的判据。因此,可设定油滴的质量流量为 10^{-6}kg/s 。在 $T=353\text{K}(80^\circ\text{C})$ 时,油滴的密度为 840kg/m^3 。

离散相边界条件为:

- (1) 油气分离迷宫入口为油滴的入射面。假定被连续相携带的离散相不存在惯性滞后,所以颗粒的入射速度与气流入口速度相等^[5]。在 STAR-CCM+中将入口设为逃逸边界。
- (2) 油气分离迷宫出口也设为逃逸边界。

(3) 壁面采用逃逸边界 (Escape)，即油滴一旦碰撞到壁面后，即被吸附到壁面上，油滴轨迹终止。油气混合气中油滴直径大致分布在 $0.2\ \mu\text{m}$ – $50\ \mu\text{m}$ 之间^[4]，所以本文针对 10 种不同直径的油滴进行了油气分离效率和运动轨迹的计算，分别为 $0.2\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 。

3.3 油气分离迷宫结构更改

出于整机布置的考虑，在改进方案中，与 PCV 阀连接的迷宫（如图 1 所示）不再放在缸体上，将两路迷宫全部集成在罩盖内，并对其结构进行了更改。

3.4 结果分析及对比

分离效率定义：分离效率 = $(1 - \text{出口油滴质量流量} / \text{入口油滴质量流量}) \times 100\%$ 。

图 5 是油气分离效率对比曲线图，从中可以看出，改进方案中两路迷宫的油气分离效率比原方案要高出很多，当油滴直径在 $5\ \mu\text{m}$ 以上时，分离效率随油滴直径的增加而增加。采用改进后的气门室罩盖进行机油携带量试验（全速全负荷工况），结果如表 1 所示。

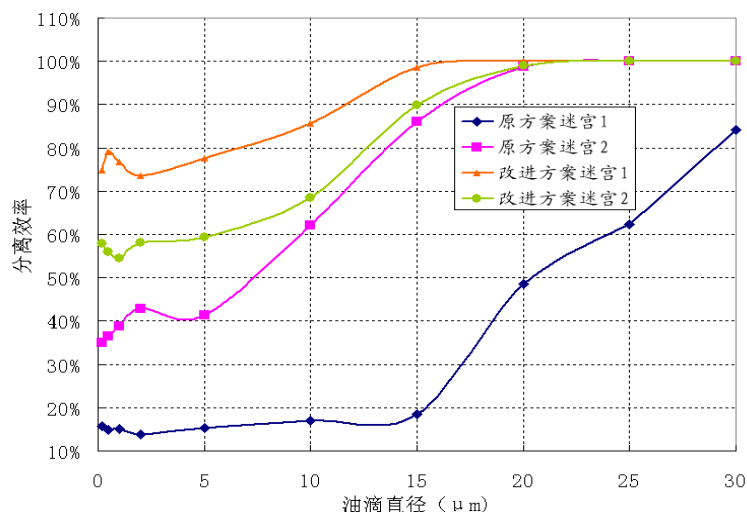


图 5 油气分离效率随油滴直径的变化曲线

从图 5 及表 1 可以看出，迷宫 1 结构改变后，分离效率大大提高，试验结果中机油携带量也少了很多，明显好于迷宫 2 的改进效果。这些都间接说明了图 5 中 CFD 分析结果的正确性。

表 1 计算结果与试验结果的间接对比

	分离效率 (计算结果)	机油携带量 (试验结果)
迷宫 1	大大改善	比原方案低 30g/h
迷宫 2	小幅改善	比原方案低 5g/h

图 6~9 分别是直径为 $1\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 的油滴运动轨迹示意图，可以明显看出，随着直径的增加，随气流一起流出的油滴在减少，当油滴直径为 $20\ \mu\text{m}$ 时，除原方案迷宫 1 外，其余迷宫结构均没有油滴随气流流出。

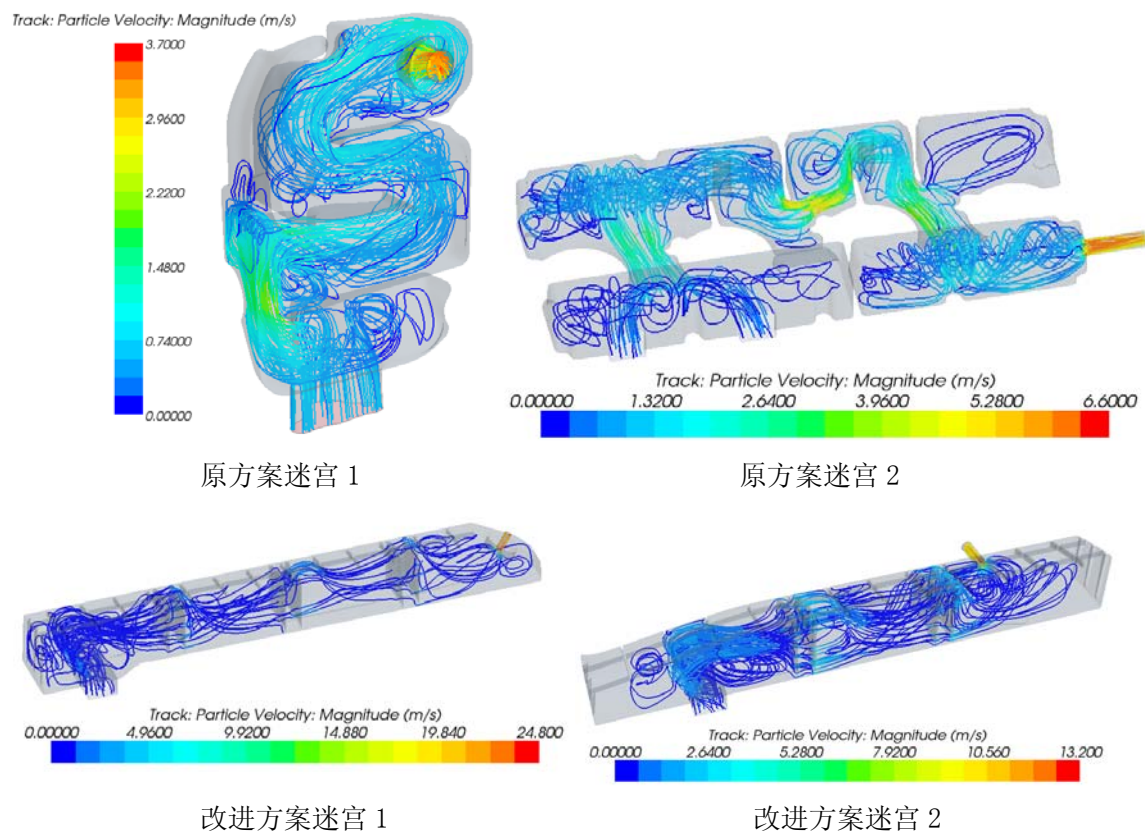


图 6 $1\ \mu\text{m}$ 直径油滴的运动轨迹

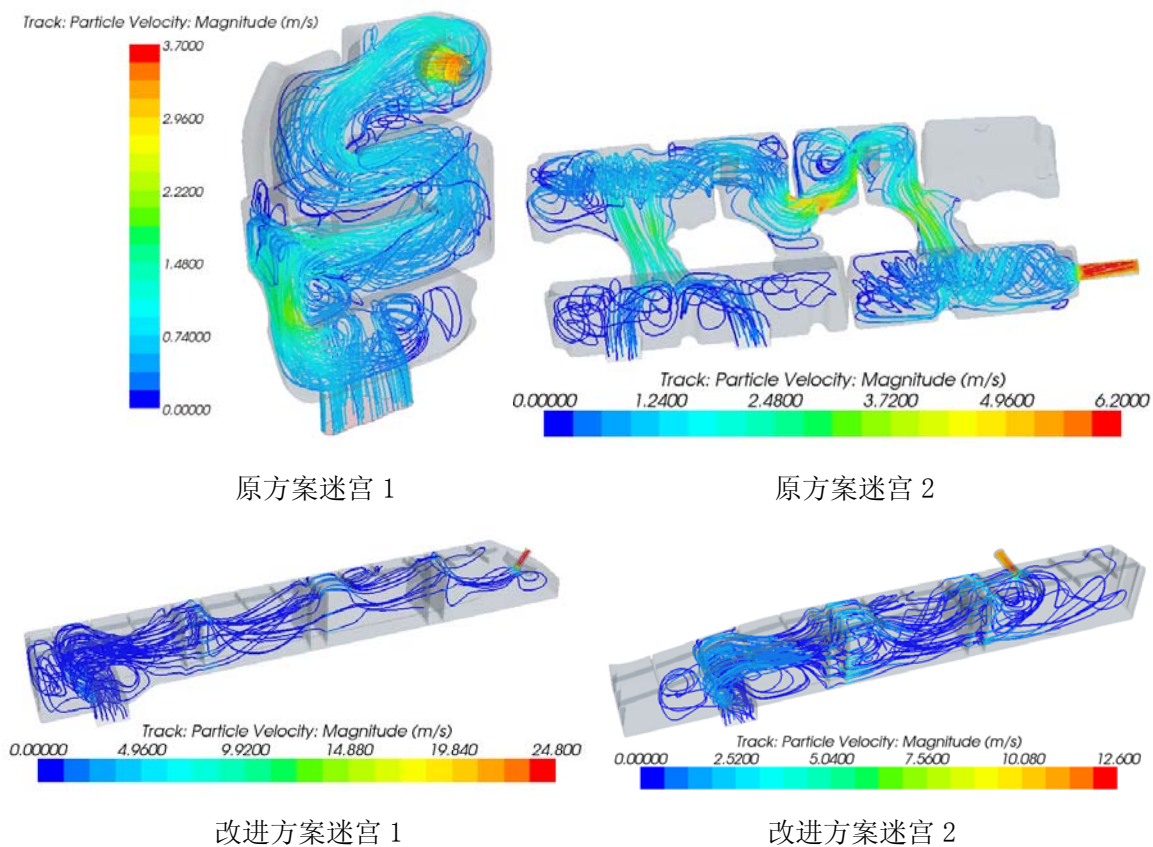


图 7 $5\ \mu\text{m}$ 直径油滴的运动轨迹

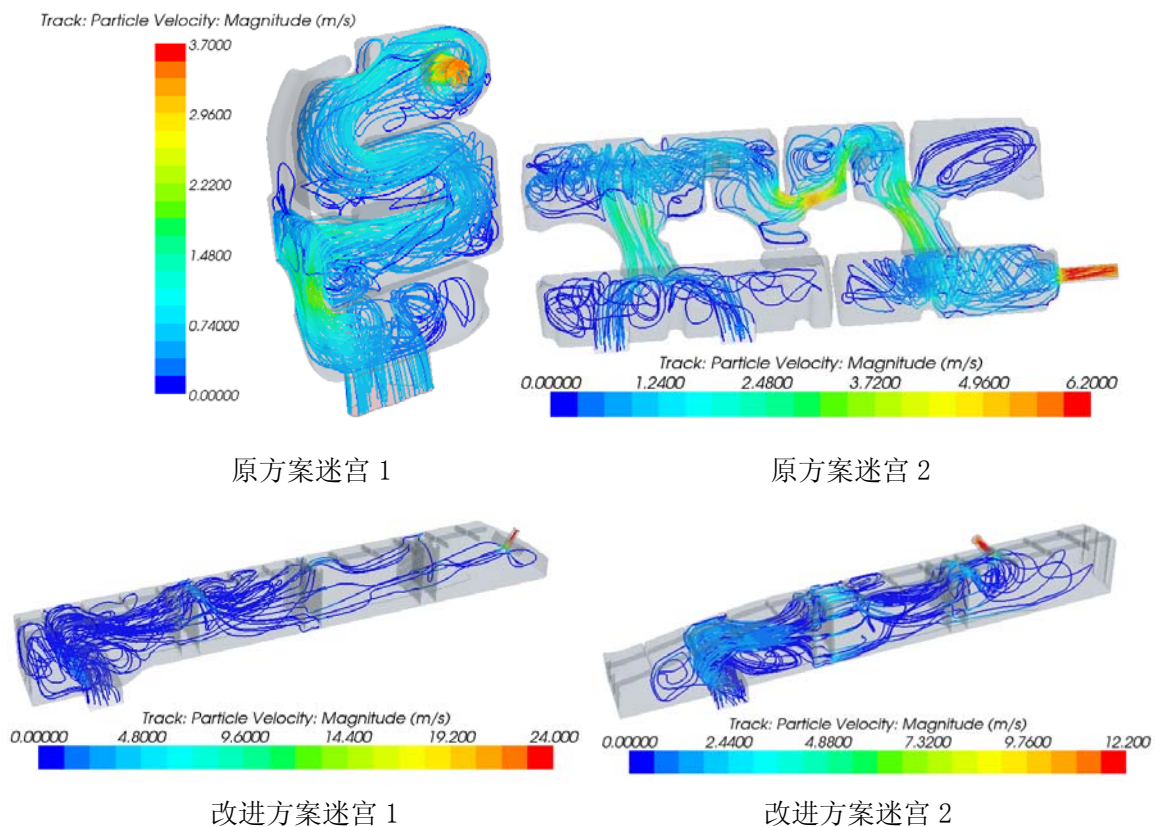


图 8 $10\ \mu\text{m}$ 直径油滴的运动轨迹

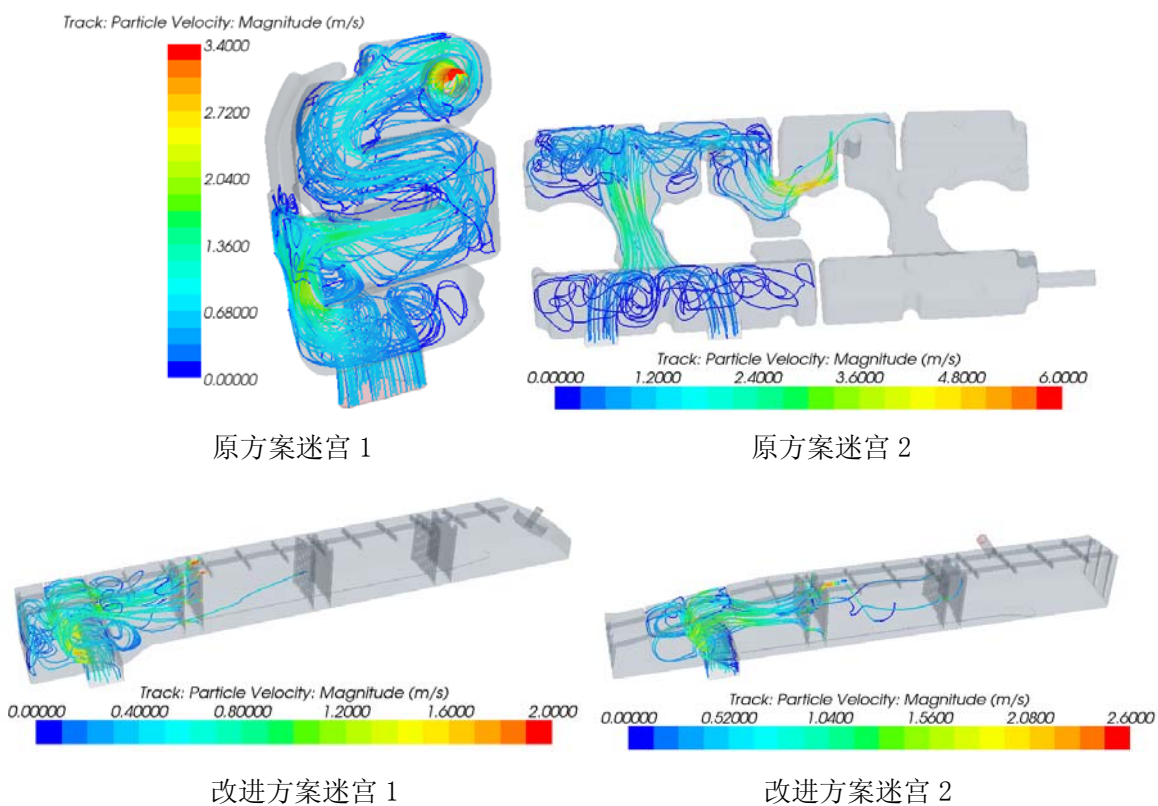


图 9 $20\ \mu\text{m}$ 直径油滴的运动轨迹

4 结论

本文在不考虑油滴的蒸发、摩擦、聚合及热效应等因素的影响下,应用 STAR-CCM+软件对油气分离迷宫内油滴的分离效率及其运动轨迹进行了数值模拟,总结如下:

- (1) 分离效率随油滴直径的增加而增加,这符合颗粒尺度越小,随气流流动能力就越强,也就越难分离的规律。
- (2) 改进方案的油气分离效率较原方案有了很大提高。试验结果表明:油气分离效率越高,机油携带量越少,间接地说明了 CFD 分析结果的正确性。
- (3) 采用 CFD 分析手段来用于油气分离器的优化设计,可以缩短开发周期、降低开发成本,与传统的试验开发形成了良好的互补。

5 参考文献

- [1] 吉林大学汽车工程系,《汽车构造(上册)第五版》,北京:人民交通出版社,2008。
- [2] Frank K, Frank G H, Kolja O. Lubrication and ventilation system of modern engines-measurement, calculation and analysis[C]//SAE2002-01-1315。
- [3] 王锐,闵龙,成卫国. 汽油机曲轴箱通风系统设计. 2008 中国汽车工程学会论文集. SAE-C2008127。
- [4] 周华,夏南. 油气分离器内气液两相流的数值模拟. 计算力学学报,2006,23(6): 766-7710。
- [5] 刘宇恒,郝志勇,贾维新. 基于 CFD 技术的迷宫式油气分离器优化设计. 小型内燃机与摩托车,2008,37(3): 50-53。