

改进的VOF方法对气液两相流振荡 流动和传热计算的影响

朱海荣^{1,2}, 张卫正¹, 原彦鹏¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;
2. 河北科技大学 机械工程学院, 石家庄 050018)

摘 要: 在VOF(volume of fluid)模型的基础上,引入level set函数,形成CLSVOF(coupled level set volume of fluid)模型对气液两相流的振荡流动和传热过程进行数值模拟,与只采用VOF模型模拟的结果进行对比分析,并与实验结果相比较.结果表明:无论是针对矩形空腔中两相流的振荡流动和传热,还是活塞冷却油腔中机油的振荡冷却过程,采用CLSVOF模型都可以更为准确地模拟气液两相流的振荡流动规律,传热系数计算值也与实验结果保持了更高的一致性.对于活塞冷却油腔中机油的振荡冷却计算,随着转速即雷诺数的增大,传热系数计算值的误差开始增大.在极限转速3000 r/min时,CLSVOF模型的误差为3.8%,VOF模型的误差为7.5%,CLSVOF模型的误差增幅稳定在0.6%左右. CLSVOF模型的误差较小且误差增幅稳定,说明其计算准确性更高.

关 键 词: 两相流; 振荡流动; 界面追踪; CLSVOF模型; 传热

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Effects of modified VOF method on gas-liquid two-phase flow oscillating flow and heat transfer calculation

ZHU Hai-rong^{1,2}, ZHANG Wei-zheng¹, YUAN Yan-peng¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering,

Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: On the basis of VOF (volume of fluid) model, the level set function was introduced, and the CLSVOF (coupled level set volume of fluid) model was formed to numerically simulate the process of gas-liquid two-phase oscillating flow and heat transfer. The simulation results of CLSVOF model were compared with that of VOF model, and also compared with the experimental results. The results show that either for the oscillating flow and heat transfer process of two-phase flow in rectangular cavity, or for the oscillating cooling process of engine-oil in piston oil cooling gallery, CLSVOF model can more accurately simulate the oscillating flow rules of gas-liquid two-phase flow, and the calculation values of heat transfer coefficient consist with experimental results much better. For the oscillating cooling calculation of engine-oil in piston oil cooling gallery, with the increase of speed, i. e. Reynolds number, the error of calculation values of heat transfer coefficient increase accordingly. At the ultimate speed of 3000 r/min, the error of CLSVOF model is 3.8%, and the error of

收稿日期: 2014-12-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(613570303)

作者简介: 朱海荣(1979—),女,河北廊坊人,讲师,博士生,主要从事流体传热传质方面的研究.

VOF model is 7.5%; the error increase amplification of CLSVOF model is about 0.6%. The error increase amplification of CLSVOF model is relatively small and stable, so its higher calculation accuracy can be illustrated.

Key words: two-phase flow; oscillating flow; interface tracking; coupled level set volume of fluid model; heat transfer

气液两相流(以下简称两相流)的振荡流动和传热过程是指气液两相以一定比例共存于空腔中,随着空腔的往复运动,液体在惯性力作用下产生振荡流动,与空腔壁面之间存在着较大的相对速度,容易形成紊流.同时,由于液体与空腔壁面之间存在温度差,因此可以极大地强化传热.对于该问题的研究从20世纪60年代开始^[1-2],到目前为止,研究成果主要集中于空腔形状^[3-5]、振荡频率^[6-7]、填充率^[8-9]等宏观参数对振荡流动规律和传热效果的影响,对于两相流振荡流动的流动机制及其对传热效果的影响研究较少,关于适用模型的研讨验证工作开展得也有限.

两相流在流动过程中存在着分开两种物质(组分)的相界面,这是两相流与单相流最主要的区别^[10].相界面是流场中密度、黏度等参量产生阶跃的地方,它的位置和形状会发生变化,有时还可能发生破碎、聚合等现象;此外,两相间质量、动量、能量的传递也要通过相界面.对相界面进行准确地追踪是两相流数值计算的基础,也是求解其控制方程的前提.

目前大多采用VOF模型来追踪两相流振荡流动相界面,该模型对于常规流动相界面具有很好的追踪效果,但对于复杂的流动相界面,VOF模型在相函数构造上的先天缺陷使其很难如实反映流动中的参数变化.Level set方法是一种计算不可压两相流的方法,其基本思想是使用连续相函数对相态分别进行表征.Level set方法已被成功用于解决一些两相流问题,如火焰的运动^[11-12]、水中空气泡的运动^[13-16]、柱体的绕流^[17]等.有学者提出将VOF模型和level set方法结合起来,形成一种CLSVOF模型^[18-21].本文将分别采用CLSVOF模型和VOF模型,对矩形空腔中的两相流振荡流动和传热过程以及活塞冷却油腔中机油振荡冷却进行数值模拟,并与实验结果相比较,以判定模型对两相流振荡流动和传热过程的适用性,并研究其对振荡流动流场以及传热效果的影响.

1 数学模型

1.1 多相流模型

1.1.1 VOF模型

VOF模型是一种应用于固定Euler网格上的界面追踪技术.它在整个计算域内对互不相溶流体求解同一动量方程组,并通过追踪每种流体的体积分数来模拟多相流.VOF模型用单元相体积分数来表征模型中的每一相,在每个控制单元内,所有相的体积分数之和为1.

相函数 定义如下:

$$(\quad) = \begin{cases} 1 & \text{液相} \\ 0 \sim 1 & \text{混合相} \\ 0 & \text{气相} \end{cases} \quad (1)$$

的对流输运方程可以表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) = 0 \quad (2)$$

其中 $\mathbf{v}$ 为单元流体速度.

1.1.2 Level set方法

Level set方法称为等值面函数法,也是使用相函数对相态分别进行表征.Level set方法把运动的物质相界面看作某个相函数 ϕ 的零等值面, ϕ 满足一定的方程,只要求出 ϕ 在某个时刻的函数值,就可以知道所对应的零等值面的位置,即运动相界面的位置.该方法不需要显式地追踪运动相界面,避免了对拓扑结构变化的处理,计算稳定.

相函数 ϕ 的定义为

$$\phi(x, t) = \begin{cases} > 0 & \text{相界面以外} \\ = 0 & \text{相界面} \\ < 0 & \text{相界面以内} \end{cases} \quad (3)$$

其中 ϕ 为0时代表相界面.相函数 ϕ 的对流输运方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \phi = 0 \quad (4)$$

CLSVOF模型是指将VOF模型和level set方法耦合起来使用.CLSVOF模型有两种形式,本文所采用的模型是以VOF模型为基础,引入level set函数来对其进行修正.由于本文所研究

的两相流振荡流动和传热过程,初始时刻其相界面曲线函数可直接积分但不可直接求导,因此采用VOF-相界面法进行相函数的初始化比较适宜^[22].

1.2 物性参数方程

每个控制单元由气液两相共享,出现在输运方程中的流体属性是由存在于每个控制单元中的分相的体积分数(或相函数)和属性决定的.控制单元中的密度 ρ 由下式计算得到(ρ_{oil} 和 ρ_{air} 分别为液相和气相的密度):

$$\rho = F\rho_{oil} + (1 - F)\rho_{air} \quad (5)$$

控制单元中流体的其他属性,如动力黏度 μ 等均按式(5)的形式计算.

1.3 动量方程

求解控制单元内的单一的动量方程时,其速度场是由各相共享的,计算式如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\nabla + (\nabla)^T] + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

式中 p 为控制单元中的压力, σ 为表面张力, $\mathbf{g}$ 为重力加速度.

1.4 能量方程

求解整个区域内的能量方程如下式所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \nabla(\rho c_p T \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (7)$$

式中 κ 为有效热导率, c_p 为比定压热容, T 为温度.

2 矩形空腔两相流振荡流动和传热的数值模型

2.1 物理模型和网格模型

以封闭中空的矩形空腔(以下简称空腔)建立物理模型.空腔长 a 为40 mm,宽 b 为15 mm,高 h 为30 mm.初始时刻,向空腔中注入50%体积的水.空腔沿其高度方向(竖直方向)进行往复运动,封闭在空腔内的水也随之产生振荡,并将热量从上壁面(热端)传递到下壁面(冷端).

考虑到边界层效应,对壁面附近的附面层网格进行加密,距离壁面越远,网格划分得越稀.空腔网格模型如图1所示,采用结构化六面体网格单元,网格数目为27 600.采用CFD软件Fluent进行数值仿真,选用SST(shear stress transport) $k-\omega$ 湍流模型,压力速度耦合选用PISO(pressure implicit with splitting of operators)算法,并采用

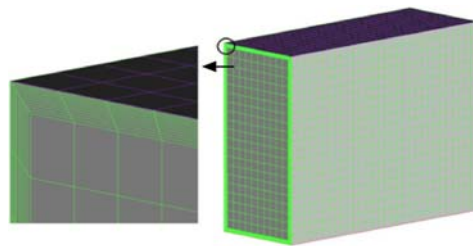


图1 空腔网格模型

Fig. 1 Mesh model of cavity

Fluent 动网格技术实现空腔的往复运动.初始条件下,空腔的行程为20 mm,加速度为 $15 \text{ m}^2/\text{s}$,上壁面温度为363 K,下壁面温度为343 K,侧壁绝热.

2.2 计算结果及分析

2.2.1 空腔中两相流振荡流动的瞬态分布

图2为仿真得出的空腔中两相流振荡流动瞬态分布,图中红色部分为液相,蓝色部分为气相.两种模型的仿真结果与可视化实验结果比较一致,基本上能够反映出流体的实际运动趋势.

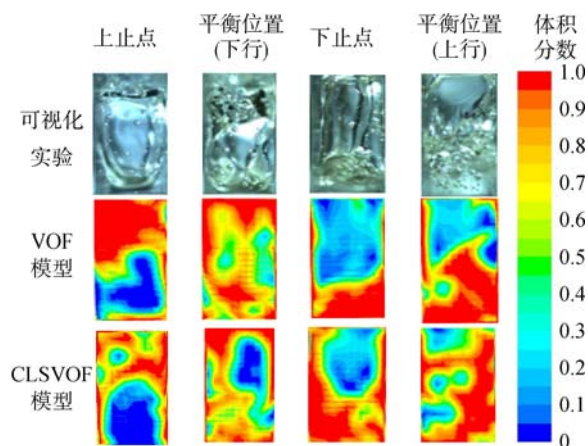


图2 空腔中两相流振荡流动瞬态分布

Fig. 2 Oscillating flow transient distribution of two-phase flow in cavity

进一步观察发现,在黏性力、表面张力的作用下,流体呈现出一种“贴壁”运动趋势,即流体较多地附着在空腔壁面上运动,而在空腔中心出现较大的空洞,同时,流体在振荡流动中破碎成各种不同尺度的液滴,液滴相互之间继续碰撞,形成更小的液滴,直至耗散消亡.采用VOF模型进行仿真时,流体的运动趋势比较稳定,气液两相的相界面比较清晰,液团内部气泡较少;而采用CLSVOF模型时,流体内部会破碎出小液团,小液团经过不断的运动变化破碎成更小的液团直至溃灭,越来越多的气泡也出现在流体内部,湍流运动也因此

变得更为剧烈.两相流的振荡流动包含了剪切、碰撞、破碎等物理现象,气液两相的相界面的情况比较复杂,相函数 F 在相界面构造上的缺陷必然使得 VOF 模型的仿真结果存在较大的偏差;CLSVOF 模型在 VOF 模型的基础上引入了连续相函数 ϕ ,可以体现相界面位移随时间的变化规律,即可通过 ϕ 的分布来描述流场中相界面的具体位置以及形状,比 VOF 模型更为准确.

2.2.2 空腔中两相流的振荡流动和传热特性

对文献[23]的圆柱形空腔振荡流动和传热模型进行了修正,整理出了适合空腔的关联式.拟合关联式如下:

$$Nu = 1.05 Re_b^{0.5532} P^{0.33} D^{*0.4882} (1 - R_{of})^{0.2384} A^{*0.2918} \quad (8)$$

式中努塞尔数 $Nu = \frac{2}{(a+b)} \frac{abu}{\nu}$;雷诺数 $Re_b = \frac{2abu}{(a+b)\nu}$;无量纲径长比 $D^* = \frac{2}{(a+b)}$; R_{of} 为空腔中的液体填充率; A^* 为无量纲的冲程与空腔高 h 之比,即 $A^* = \frac{h}{h}$; α 为传热系数; u 为来流速度; ν 为液体的运动黏度; P 为普朗特数.

分别采用两种模型对空腔中液体填充率为 20%~80%、冲程为 20~70 mm 时的振荡流动和传热过程进行数值模拟,并与拟合关联式(8)进行比较,结果如图 3 所示.对比发现,VOF 模型的数值模拟结果在雷诺数较小的情况比较接近拟合关联式(8)结果,有个别数据点落在拟合曲线上,随着雷诺数的增大,偏差增大;CLSVOF 模型的各个数据点更靠近拟合曲线,且有多个数据点都

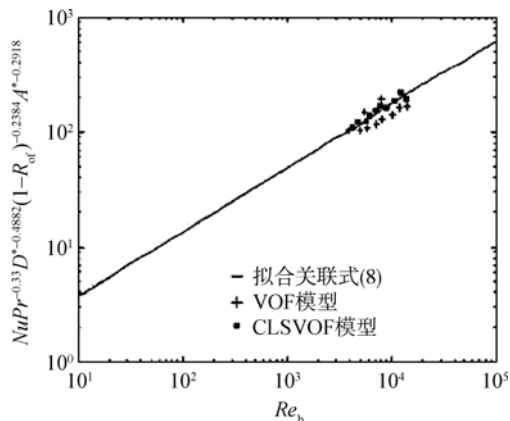


图3 数值模拟结果与拟合关联式(8)结果的比较

Fig. 3 Comparison of numerical simulation results and fitted correlation Eq. (8) results

与拟合关联式(8)结果吻合.随着雷诺数的增大,也出现数据点偏离拟合曲线的现象.由此可见,采用 CLSVOF 模型能更好地模拟空腔两相流的振荡流动和传热现象.

3 活塞冷却油腔中机油振荡冷却的数值模型

两相流振荡流动和传热在工程中最实际最广泛的应用是活塞冷却油腔(以下简称油腔)中机油的振荡冷却.如图 4 所示,在活塞头部设置环形油腔,机油由冷却喷嘴持续喷入油腔进口,随着活塞的高速往复运动在油腔内反复振荡流动,最终由油腔出口流出.两相流在油腔内产生强烈的振荡流动,从而对活塞头部进行有效地冷却.以某型活塞为例研究不同模型对机油振荡冷却效果的影响.

图4 油腔结构示意图

Fig. 4 Schematic of gallery structure

3.1 物理模型和网格模型

建立油腔计算模型,柴油机主要技术参数见表 1.由于油腔为环形结构,按对称性只建立一半模型即可.冷却喷嘴与活塞运动方向平行,对准油腔进口进行喷油,机油从喷嘴喷出直至进入油腔之前的流动区域简化为半圆柱体.采用 ANSYS ICEM 软件结构化六面体网格对模型进行划分,考虑到附面层效应对壁面附近网格进行加密,油腔计算模型及局部网格剖面如图 5 所示.进行网格无关性分析,最终确定网格数目为 65 580.

表1 柴油机主要技术参数

Table 1 Major technical parameters of diesel engine

参数	数值
缸径/mm	132
冲程/mm	145
压缩比	15
单缸功率/kW	100

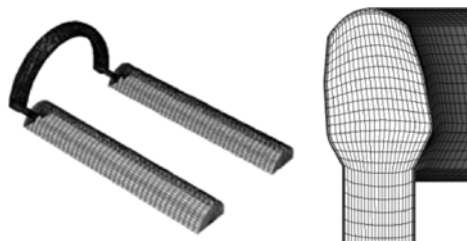


图5 油腔计算模型和局部网格剖面

Fig. 5 Calculation model and local mesh section of gallery

整个计算区域采用速度入口边界条件,又因为油腔与曲轴箱是连通的,曲轴箱内部气体压力变化较小,因此计算区域出口采用压力出口边界条件.压力速度耦合选用 PISO 算法,利用 Fluent 动网格技术实现活塞的运动规律.上壁面、内壁面、外壁面和下壁面的初始温度分别为 533, 513, 493 K 和 473 K.初始时刻,油腔计算区域内全部为空气,温度为 373 K,固定喷嘴开始向油腔中喷射机油.采用动态时间步长进行计算,计算过程中监测油腔中的机油填充率,当机油填充率只与曲轴转角有关,且各循环之间变动较小时,认为机油在油腔中达到了周期性的稳定状态,取此循环之后的结果进行分析.

3.2 计算结果及分析

3.2.1 不同曲轴转角时机油的分布规律

选取了上止点、下止点等关键位置的流动状态与文献[24]可视化实验中机油的振荡流动过程进行对比,结果如图6所示.

图6中红色为机油,蓝色为空气.活塞运动到上止点(曲轴转角为 0°)位置时,机油主要集中在油腔顶部;当活塞下行时,机油也开始向下运动,

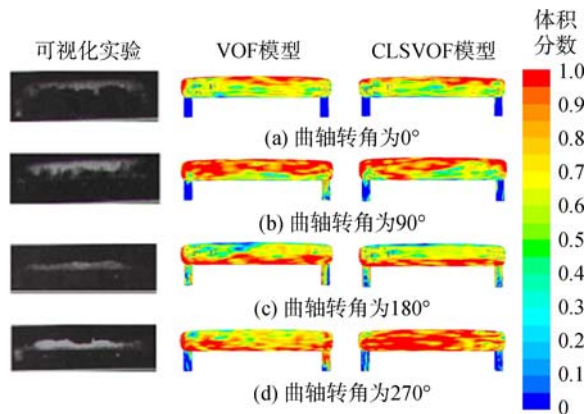


图6 机油振荡流动过程仿真与实验对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experiment for oscillating flow process of engine-oil

在惯性作用下仍有大量机油附着在油腔的上部;当活塞运动到曲轴转角为 90° 位置时,机油逐渐离开油腔上部,高速撞击油腔下壁面,机油开始从油腔下部出口流出油腔;活塞运动到下止点(曲轴转角为 180°)位置时,机油汇聚在油腔下壁面.随后活塞开始加速上行,机油在惯性作用仍保持在油腔下部,此时有机油同时从油腔的进、出口流出;当活塞运动到曲轴转角为 270° 位置时,机油开始向上运动,将不会再流出油腔;随着活塞上行,机油又开始冲击上壁面,直至一个循环结束. VOF 模型和 CLSVOF 模型的仿真结果都能大致反映出机油在油腔中的运动规律,但也存在一定差别.在活塞运动的几个关键位置,CLSVOF 模型的模拟结果与 VOF 模型的模拟结果相比,与可视化实验观测结果吻合更好,更能反映出机油在油腔中的运动规律.

这主要是由于 VOF 模型在追踪复杂相界面结构变化时,计算过程比较简单,流动中的参数振荡等变化会因相函数在相界面处的不连续性被忽略,使得法向方向、曲率及与曲率相关的物理量难以得到.采用 CLSVOF 模型来模拟机油的振荡流动过程,由于额外求解了连续相函数,成功克服了 VOF 模型难于准确计算法向方向、曲率等物理量的缺陷,实现了对相界面的精确追踪,可有效削弱虚假流动现象.

3.2.2 壁面平均传热系数随曲轴转角的变化规律

如图7所示,当转速为 3000 r/min,机油体积流量为 2 L/min 时,油腔壁面平均传热系数在一个振荡周期内呈现出高低起伏的变化规律.取其中一个循环进行分析,壁面平均传热系数从上止点到下止点的过程变化较为剧烈,从下止点到上

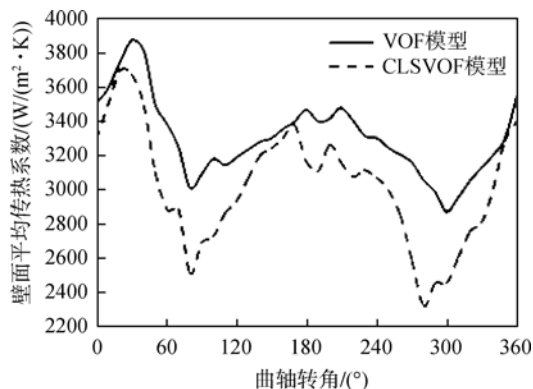


图7 壁面平均传热系数随曲轴转角的变化

Fig. 7 Variations of wall average heat transfer coefficient with crank angle

止点的过程变化较为平缓.这主要跟机油填充率的变化有关.活塞下行时,机油填充率较大,平均温度较低,油腔顶部和大部分侧壁被机油覆盖,而底部则几乎没有机油,因此壁面平均传热系数较大.而当活塞上行时,机油大多集中在油腔底部,部分机油会从油腔出口流出,油腔内的机油填充率减小,壁面平均传热系数也会相应减小.此外经过与上壁面的传热后,机油温度已经升高,使得机油与各壁面之间的温差变小,传热效果有所下降.

分析壁面平均传热系数变化曲线可以发现,VOF模型计算的壁面平均传热系数最大值为 $3875 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,最小值为 $2878 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,平均值为 $3306 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,幅值变化率为 $12.9\% \sim 17.2\%$;CLSVOF模型计算的壁面平均传热系数最大值为 $3695 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,最小值为 $2325 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,平均值为 $3026 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,幅值变化率为 $22.1\% \sim 23.2\%$.可见,采用CLSVOF模型计算出的壁面平均传热系数幅值变化较大,能更好地体现壁面平均传热系数的周期性变化规律.

3.2.3 壁面平均传热系数随转速的变化规律

相比于转速、冲程、填充率等影响油腔传热效果的参数,转速的影响最为显著^[23].分别以两种模型研究油腔传热效果随转速的变化规律.

图8为低转速下壁面平均传热系数随转速的变化^[23].转速为 $200 \text{ r}/\text{min}$ 时,壁面平均传热系数为 $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右;转速升高到 $1000 \text{ r}/\text{min}$ 时,壁面平均传热系数迅速增大到 $2300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右.可见,随着转速的升高,壁面平均传热系数不断增大,转速对于油腔传热效果有着显著的影响.两种模型的数值计算结果比较相近,而CLSVOF模型的计算结果与实验结果更为接近.

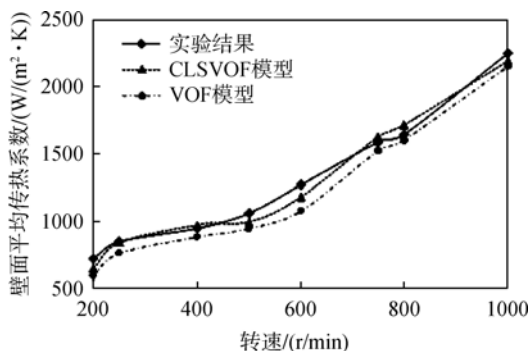


图8 低转速下壁面平均传热系数随转速的变化

Fig.8 Variations of wall average heat transfer coefficients with speed in low speed

图9为高转速下壁面平均传热系数随转速的变化^[24].两种模型的计算结果比较接近,但均比实验结果偏小.当转速为 $1000 \text{ r}/\text{min}$ 时,CLSVOF模型的误差为 2.6% ,VOF模型的误差为 4.1% ;转速为 $2000 \text{ r}/\text{min}$ 时,CLSVOF模型的误差为 3.2% ,VOF模型的误差为 5.6% ;而当转速达到 $3000 \text{ r}/\text{min}$ 时,CLSVOF模型的误差为 3.8% ,VOF模型的误差为 7.5% .CLSVOF模型的误差增幅稳定在 0.6% 左右,而VOF模型的误差增幅逐渐增大,最大值达到 1.9% .可见,两种模型的计算结果均在合理误差范围内,CLSVOF模型的误差增幅稳定且更小,用来研究两相流的振荡冷却准确度更高.

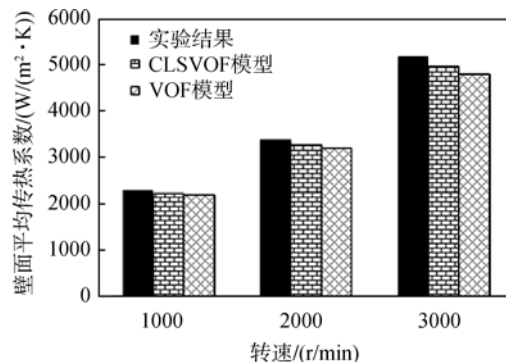


图9 高转速下壁面平均传热系数随转速的变化

Fig.9 Variations of wall average heat transfer coefficients with speed in high speed

综合比较空腔中两相流的振荡流动和传热过程以及油腔中机油的振荡冷却过程,可以发现:在两相流的振荡流动过程中,流体在惯性力作用下进行高速往复运动,流体由于碰壁振荡而破碎成液滴,液滴在非均匀剪切流的作用下进行输运、碰撞,产生破碎、聚合的现象;同时,流体随着转速的升高即雷诺数的增大,相界面的复杂变化更为剧烈,相界面上产生的不平滑过渡极易使计算产生误差.VOF模型相函数构造的缺陷使得其界面追踪的准确度进一步下降.CLSVOF模型由于引入了level set函数,使得它能够精确地计算曲率、法向方向等参数,对相界面追踪的准确性也更高.可见,当两相流相界面不是平滑曲线,即相界面上存在不平滑过渡,且运动过程中又存在着流体破碎现象,CLSVOF模型的计算精确度要高于VOF模型.

4 结 论

1) 采用CLSVOF模型模拟出的空腔内两相

流的振荡流动结构与可视化实验的结果基本一致,预测其振荡流动和传热效果,结果更为准确。

2) CLSVOF 模型能够有效模拟出机油在油腔中的瞬态分布状况和动态变化规律。所得壁面平均传热系数幅值变化较大,更能体现其在一个振荡周期内的变化特点。

3) 油腔壁面平均传热系数误差随着转速的升高而逐渐增大。当转速达到 3000r/min 时,CLSVOF 模型的误差为 3.8%,VOF 模型的误差则达到 7.5%。CLSVOF 模型的误差增幅稳定在 0.6%左右,远低于 VOF 模型的误差增幅。说明 CLSVOF 模型模拟油腔中机油振荡冷却效果准确度更高。

参考文献:

- [1] 姚仲鹏,王新国.车辆冷却传热[M].北京:北京理工大学出版社,2001.
- [2] Heron S D. History of sodium-cooled piston development [R]. Ethyl Corporation, Report ERM, 1958.
- [3] Bush J E, London A L. Design data for cocktail shaker cooled pistons and valves[R]. SAE Paper 650727, 1965.
- [4] French C C J. Piston cooling[R]. SAE Paper 720024, 1972.
- [5] Sander W, Weigand B. Shaker-based heat and mass transfer in liquid metal cooled engine valves[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(11): 2552-2564.
- [6] Sander W, Weigand B, Beerens C. Direct numerical simulation of two phase flows in liquid cooled engine valves[R]. San Francisco: 2005 ASME Summer Heat Transfer Conference, 2005.
- [7] Yi Y, Reddy M, Jarret M. CFD modeling of the multiphase flow and heat transfer for piston gallery cooling system [R]. SAE Paper 2007-01-4128, 2007.
- [8] Kajiwar H, Fujioka Y, Negishi H. Prediction of temperatures on pistons with cooling gallery in diesel engines using CFD tool[R]. SAE Paper 2003-01-0986, 2003.
- [9] Yoshikawa T, Rolf D R. Development of an oil gallery cooling model for internal combustion engines considering the cocktail shaker effect [J]. Numerical Heat Transfer: Part A Applications, 2009, 56(7): 563-578.
- [10] 车得福,李会雄.多相流及其应用[M].西安:西安交通大学出版社,2007.
- [11] Kim J, Chung S H, Ahn K Y, et al. Simulation of a diffusion flame in turbulent mixing layer by the flame hole dynamics model with level-set method[J]. Combustion Theory and Modeling, 2006, 10(4): 219-240.
- [12] 杨成仁,侯凌云,傅维标.预混湍流燃烧的 level-set 小火焰库方法研究[J].航空动力学报,2003,18(3): 358-362.
YANG Chenren, HOU Lingyun, FU Weibiao. Level-set flamelet modeling for premixed turbulent combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 358-362. (in Chinese)
- [13] Croce R, Griebel M, Schweitzer A M. Numerical simulation of bubble and droplet deformation by a level set approach with surface tension in three dimensions[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 62(9): 963-993.
- [14] 赵知辛,王焕然,李彦鹏,等.用 Level Set 方法对水下两个气泡运动的数值模拟[J].西安交通大学学报,2009,43(7): 11-15.
ZHAO Zhixin, WANG Huanran, LI Yanpeng, et al. Numerical simulation on motion of two underwater bubbles using level set method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 11-15. (in Chinese)
- [15] HUANG Juntao, ZHANG Huisheng. A level set method for simulation of rising bubble[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(4): 379-385.
- [16] YANG Chao, MAO Zaisha. An improved level set approach to the simulation of drop and bubble motion[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2002, 10(3): 263-272.
- [17] Balabel A. Numerical prediction of droplet dynamics in turbulent flow, using the level set method[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2011, 25(5): 239-253.
- [18] Bourlioux A. A coupled level-set volume-of-fluid algorithm for tracking material interfaces[R]. Lake Tahoe: Sixth International Symposium on Computational Fluid Dynamics, 1995.
- [19] Sussman M, Puckett E G. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D axisymmetric incompressible two-phase flows[J]. The International Journal of Computational Physics, 2000, 162(2): 301-337.
- [20] Son G, Hur N. A coupled level set and volume-of-fluid method for the buoyancy-driven motion of fluid particles [J]. Numerical Heat Transfer: Part B Fundamentals, 2002, 42(6): 523-542.
- [21] Son G. Efficient implementation of a coupled level set and volume-of-fluid method for three-dimensional incompressible two-phase flows[J]. Numerical Heat Transfer: Part B Fundamentals, 2003, 43(6): 549-565.
- [22] 王春海.基于 CLSVOF 方法的单液滴碰壁铺展过程的模拟研究[D].北京:北京交通大学,2011.
WANG Chunhai. Simulation analysis on spreading process of single droplet impingement based on CLSVOF method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [23] 曹元福.高强化活塞振荡冷却强化传热研究[D].北京:北京理工大学,2012.
CAO Yuanfu. Investigations of oscillating cooling enhanced heat transfer in high power diesel engine piston [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [24] Yu N, Noda T, Yamada T. Development of techniques for improving piston cooling performance (first report): measurement of heat absorption characteristics by engine oil in cooling channel [R]. [S. l.]: Annual of Japan Society of Automotive Engineering, 2005.