文章编号：1008-1542(2024)01-0035-09

两相流振荡流动特性的可视化实验研究

朱海荣[1]，肖　旭[1]，张凯伦[1]，李　林[1]，王　钊[2]

(1. 河北科技大学机械工程学院，河北石家庄　050018；
2. 河北拓普电气有限公司，河北石家庄　050000)

摘　要：为了解决活塞内冷油腔中气液两相流的振荡传热问题，设计并搭建了由柴油机改装的往复振荡实验装置，利用高速摄像技术对内冷油腔实验件中气液两相流的振荡流动过程进行了可视化观测实验，分析在不同转速和液体填充率下实验件中气液两相流在起振阶段和充分振荡阶段的振荡流动形态。结果表明：在起振阶段，气液两相的分界面明显，没有强烈的湍流混合运动，在充分振荡阶段，液体的运动规律及流动形态呈周期性变化；转速主要影响气液两相流的湍流强度，填充率主要影响气液两相流的流动形态。研究结果揭示了内冷油腔中气液两相流的振荡流动规律，可为高强化活塞的结构优化设计提供参考。

关键词：内燃机工程；内冷油腔；气液两相流；振荡流动；可视化

中图分类号：TK423　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.7535/hbkd.2024yx01004

Visualization experiment study on oscillatory flow characteristics of two-phase flow

ZHU Hairong[1], XIAO Xu[1], ZHANG Kailun[1], LI Lin[1], WANG Zhao[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. Hebei Tuopu Machinery Electric Company Limited, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract: In order to solve the oscillatory heat transfer problem of gas-liquid two-phase flow of cooling oil gallery of piston, a reciprocating oscillatory experimental device reformed by diesel engine was designed and established. The oscillatory flow process of gas-liquid two-phase flow in a test piece was visualized by high-speed camera technology, and the oscillatory flow patterns of gas-liquid two-phase flow in the test piece at initial and full oscillation stage under different rotation speed and liquid filling rate were analyzed respectively. The results show that at initial oscillation stage, the interface between gas and liquid is obvious, and there is no intense turbulent mixing motion. At full oscillation stage, the movement law and flow pattern of liquid change periodically. Rotational speed mainly affects the turbulence intensity of gas-liquid two-phase flow, while the liquid filling rate mainly affects the flow pattern of gas-liquid two-phase flow. The research results reveal the oscillatory flow rules of gas-liquid two-phase flow in cooling oil gallery, and also provide a reference for the structural optimization design of the highly-intensified piston in the future.

收稿日期：2023-08-08；修回日期：2023-11-01；责任编辑：冯　民

基金项目：教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220237)；河北省自然科学基金(E202208009)；河北省省级科技计划软科学研究专项资助项目(22557664D)

第一作者简介：朱海荣(1979—)，女，河北廊坊人，副教授，博士，主要从事流体传热传质方面的研究。

通信作者：王钊，工程师。E-mail：66680821@qq.com

朱海荣，肖旭，张凯伦，等. 两相流振荡流动特性的可视化实验研究[J]. 河北科技大学学报，2024，45(1)：35-43.

ZHU Hairong, XIAO Xu, ZHANG Kailun, et al. Visualization experiment study on oscillatory flow characteristics of two-phase flow[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(1): 35-43.

Keywords: internal combustion engine engineering; cooling oil gallery; gas-liquid two-phase flow; oscillatory flow; visualization

柴油机作为主要的动力输出设备,经过长期改进,其功率相比于以前有了较大提升,强化程度不断提高[1],与此同时,其零部件所承受的机械负荷及热负荷也随之增大,这就要求柴油机的机械结构及其零部件具有更高的强度[2-4]。有研究表明,采用振荡冷却的方法可以使活塞的顶面温度下降近40 ℃[5],因此研究活塞的振荡冷却机理,降低活塞工作时所承受的过高热负荷,既对增强柴油机的可靠性具有重大意义[6-8],又对振荡冷却的实际应用有一定的指导作用[9-10]。

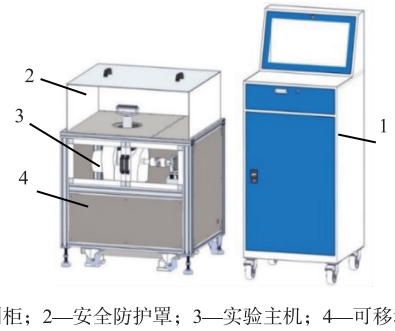
活塞可视化观测实验主要出现在2010年前后,由于高速摄影技术的不断发展,高速相机被用于活塞振荡实验中拍摄工质在油腔中的振荡流动过程。如2011年北京理工大学开发的发动机活塞振荡冷却试验装置[11],2014年中国北方发动机研究所开发的活塞振荡油腔试验模拟装置[12]等。WANG等[10]搭建了相关的活塞振荡可视化试验台,使用高速相机拍摄了规则长方形油腔内的纯水工质在不同曲轴转角下的图像,以电机转速和方形容腔的填充率作为变量,探究了不同工况下的多相流流动形态。LV等[13]采用高速摄像机捕捉了在不同曲柄角度下简化活塞振荡实验件内水和空气的流动模式,探讨了气液两相流往复运动过程中的换热机理。DENG等[14]设计并搭建了活塞内冷油腔振荡传热试验台,拍摄了内冷油腔内工质的运动情况,并开展了传热实验研究转速和喷油速率对振荡换热的影响。胡定云等[15]研究了在不同的曲轴转角下,机油在内冷油腔内的流态和传热特性,得到了内冷油腔壁面机油分布、传热系数等随曲轴转角的变化规律。黄钰期等[16]设计并搭建一个活塞振荡两相流可视化模拟试验台,利用3D打印技术还原某型号柴油机的活塞内冷油腔,针对甘油水溶液以及大豆油两种不同的冷却介质,在可视化拍摄流场图像的同时,收集出油数据并计算通过率。郭凯[17]基于船用柴油发动机设计和建造了具有真实活塞形状冷却油腔的活塞振荡试验台,搭建了活塞振荡台的可视化测量系统,开展了不同工作状态下的真实活塞振荡腔内的润滑油振荡形态可视化试验。许函聪等[18]以船用柴油发动机进行数值研究,发现数值计算能够模拟活塞冷却油腔内甩流、断流、撞壁回流、振荡和沉降等一系列流动特征。以上研究或不断改进可视化实验装置,完善高速摄影的拍摄方法,或通过数值计算模拟活塞油腔内流动特性,但关于冷却油腔内气液两相流的振荡流动形态分析却很少,而这与内冷油腔内气液两相流的振荡传热机理密切相关。

本研究设计并建立了由柴油机改装的振荡流动与传热实验装置,采用高速摄影技术对实验件模型内的气液两相流的振荡流动形态进行可视化观测实验,得到在不同实验条件(不同柴油机转速、不同机油填充率)下气液两相流在起振和充分振荡阶段的湍流结构以及振荡流动规律。

1 实验设计

1.1 实验装置

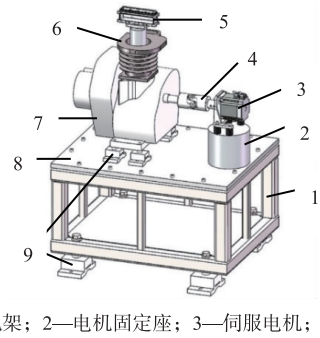
根据实验要求,本文设计并建立了由柴油机改装的振荡流动与传热实验装置,整体结构如图1所示,主要包括实验主机、可移动机罩、安全防护罩和控制柜。主体部分结构如图2所示,主要包括主体机架、电机固



1—控制柜;2—安全防护罩;3—实验主机;4—可移动机罩。

图1 振荡流动与传热实验装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the oscillating flow and heat transfer experimental device



1—主体机架;2—电机固定座;3—伺服电机;4—万向联轴器;5—实验件;6—气缸;7—实验主机;8—钢板;9—减震橡胶脚垫。

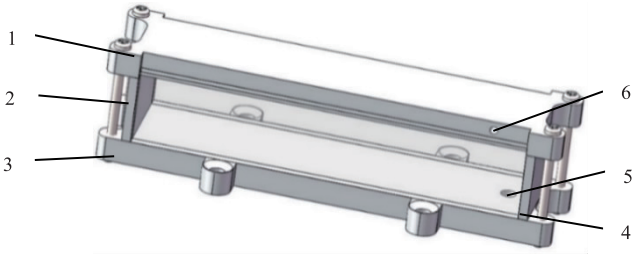
图2 主体部分结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the main body

定座、伺服电机、万向联轴器、实验件、实验主机、减震橡胶脚垫等。选择的伺服电机型号为MHMF082L1U2M，与伺服电机配套的驱动器型号为 MCDLT35SF。实验装置工作原理是：由控制系统控制伺服电机，通电后，伺服电机带动柴油机组转动，带动固定于活塞上的实验件上下往复直线运动，同时高速摄像机捕捉气液两相的瞬时流动形态，完成对实验件的可视化观测。

1.2　实验件

活塞为金属不透明结构，其内部的内冷油腔一般为环形，且空间狭隘，结构复杂。为了得到清晰的气液两相流振荡流动形态图像，把活塞油腔实验件设计为长方体结构。选择铝合金材料作为实验件的上、下及两侧壁面，透明石英玻璃作为实验件的前、后壁面，实验件模型如图 3 所示，由铝合金板和透明石英玻璃围成的立方体实验件尺寸为 128 mm×28 mm×22 mm，有效观测面积为 128 mm×22 mm。由于活塞的不透明、内冷油腔环境的复杂以及机油自身特性的影响，很难对其进行可视化观测实验，故选择液体介质去离子水替代机油对其进行可视化观测实验。图 4 为活塞上止点(TDC)和下止点(BDC)位置示意图。



1—上壁面；2—左壁面；3—下壁面；4—右壁面；5—液体出口；6—液体入口。

图 3　实验件模型结构示意图

Fig. 3　Experimental model structure diagram

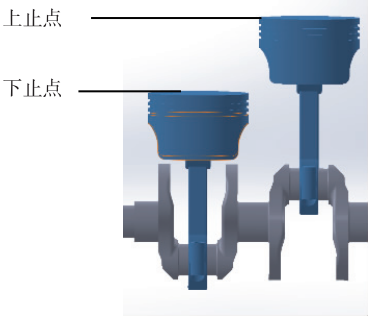


图 4　活塞行程示意图

Fig. 4　Diagram of piston stroke

1.3　可视化观测系统

实验中采用德国 PCO 公司的 pco. 1200S 高分辨率高速摄像机对实验件空腔内的液体流动形态进行拍摄，帧率为 500～32 023 f/s，最大分辨率为 1 280×1 024。高速摄像机如图 5 所示，其操作由电脑软件控制，拍摄时置于实验台正前方约 1 m 位置，调整焦距至图像清晰，并在两侧放置摄像灯以提高图像清晰度，如图 6 所示。

图 5　高速摄像机

Fig. 5　High speed camera

图 6　摄像灯

Fig. 6　Camera light

1.4　实验方法

1)在实验开始前，把实验装置周围与实验无关的物体清空；准备好注射器，用于注入液体介质；检查液体介质是否为去离子水，液体中是否有杂质，是否过保质期；检查装置是否正常；检查实验件是否固定。

2)取下安全防护罩，在实验件空腔内注入实验方案中设定的液体量，再次把安全防护罩放置到位。

3)安装可视化观测系统即高速摄像机及各光源，打开实验室电源给控制高速摄像机和显示图像的电脑、高速摄像机以及各光源通电并将其打开，调整高速摄像机高度，设置各参数，使高速摄像机中的图像清晰可

见，并且要避免实验件形成的阴影对拍摄造成影响。

4）给实验装置控制柜通电，打开控制柜内的电脑，打开运动控制软件和相机控制软件，单击总电源控制区域的“启动”按钮，给实验装置通电，调整伺服电机运行模式为变速运行模式，设定伺服电机运行速度、运行圈数、加减速时间，单击启动电机，高速摄像机同时自动开始录制，当电机达到运行圈数时，电机停止，同时停止图像的拍摄。

5）检查拍摄效果，导出图像。

6）关闭实验装置电源，关闭高速摄像机和控制柜内电脑，切断控制柜电源及各灯源，切断实验室电源。

7）排出实验件液体，至此实验结束。以上为本实验的详细操作步骤，每次实验开始前实验件空腔模型都位于活塞行程的最低点位置，然后重复操作以上所需的步骤。

2 两相流振荡流态分析

有学者认为液体填充率范围在 30%～60%时，内燃机活塞内冷油腔壁面传热系数最佳[19-20]，也有学者实验研究了 20%～80%的液体填充率下气液两相流的振荡流动特性[13,21]。本文以 20%～80%的液体填充率讨论气液两相流振荡流动形态及其对传热效果的影响。

2.1 两相流起振阶段的流动形态

本文选液体填充率为 30%、转速为 300 r/min 时的两相流振荡流动过程进行分析，如图 7 所示。实验件从下止点(BDC)静止开始起振，向上运行到上止点(TDC)，反向再次运行到下止点为一个循环，其中上止点 1 为实验件第 1 次到达活塞行程最高点位置，下止点 2 为实验件第 2 次到达活塞行程最低点位置，90°-5 为第 5 个循环中实验件从下止点上行 90°时的位置，270°-9 为第 9 个循环中实验件从上止点下行 90°时的位置，本文关于此的命名方式相同。

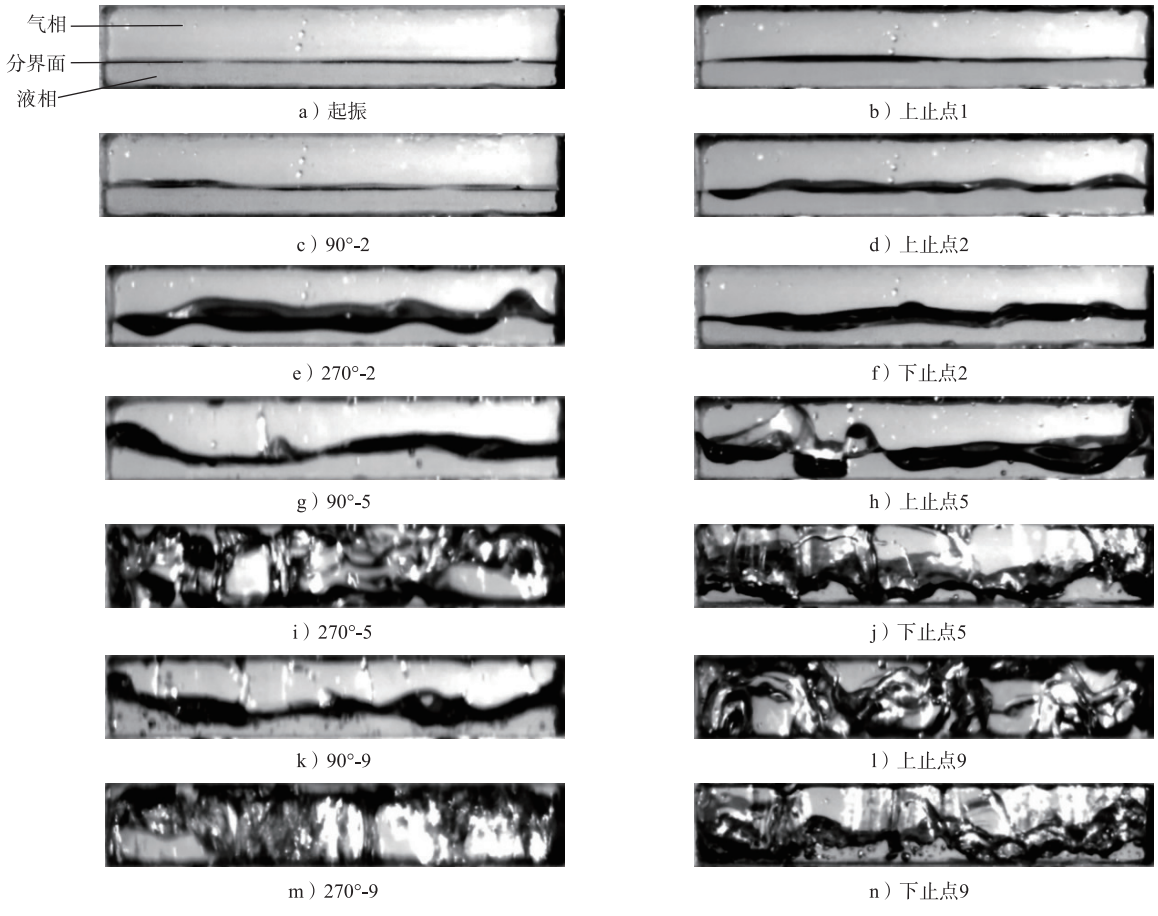


图 7 气液两相流起振阶段流动形态

Fig. 7 Flow pattern of gas-liquid two-phase flow at ininitial oscillation stage

在起振阶段，气液两相流的液相和气相的分界面较为明显，没有比较强烈的混合，液体的湍流运动不明显，此时上壁面的热量是通过气相向下传递，热量不易传递。随着转速的增加，液体速度也逐渐增加，有“爬壁”趋势，与中间液柱形成“ω”形液相，到上止点 9 位置时，转为贴着上壁进行“贴壁”运动，但由于液体流速的不足，“贴壁”运动至上壁面某处便向下坠去。此阶段实验件内液相逐渐增多，热量传递加快，且液体下落后壁面附着水珠，有利于上壁面降温。

2.2　两相流充分振荡阶段的流动形态

柴油机达到预定转速并运行平稳后，振荡流场趋于稳定，此时实验件内液体往复运动有规律且周期恒定。以 30%液体填充率、转速 300 r/min 的一个稳定循环为例对气液两相流充分振荡阶段的流动形态进行分析，其流动形态如图 8 所示，其中图 8 a)和图 8 p)为 90°位置，图 8 f)为上止点位置，图 8 n)为下止点位置。

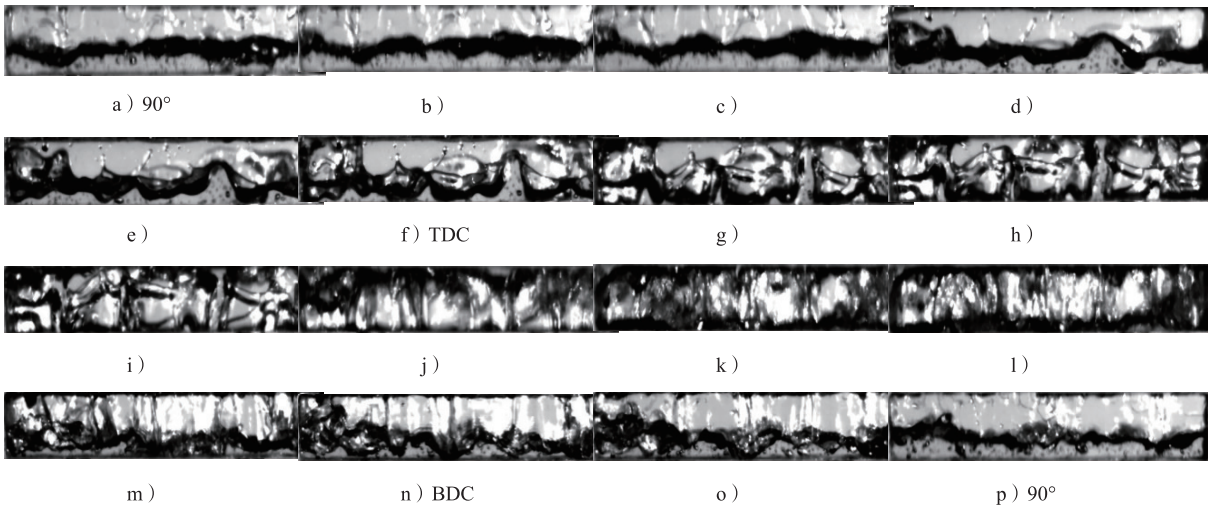


图 8　气液两相流充分振荡阶段流动形态

Fig. 8　Flow pattern of gas-liquid two-phase flow at fulloscillation stage

图 8 a)—f)为实验件从 90°到上止点过程。由图 8 a)可知，此时液面轮廓相对比较平缓，但其液面却处于一个强烈的波动状态，并且部分上次循环液体滞留在上壁面上，这些液体在下坠的过程中，在气相中形成断断续续的水幕，这层水幕便于上壁面的热量向下传递；由图 8 b)—e)可知，两侧液团逐渐到达上壁面，由“爬壁”运动演化为“贴壁”运动；图 8 f)—n)为上止点位置转而向下运动过程，其中 f)—i)显示，两侧液团在上壁面的阻挡下沿上壁面做横向运动，并且由于有气体进入，与下液面形成小的空腔；j)—k)显示，在实验件转向向下运动时由于液体惯性力的存在撞击到上壁面，液体破碎、飞溅，形成无数液滴和气泡混杂在一起，此时液体的湍流强度达到最大，并且先行下坠液体与部分正在上升液体碰撞混合，进一步增加了液体的无序性；l)—n)显示，碰撞后的液体一起向下壁面坠去，此时液体的速度经过上壁面的反弹后已经超出实验件的速度，在到达下止点位置前这些液体夹杂着气体已经到达下壁面并进行了撞击，而且有少量液体被反弹向上运动，形成较大的气泡，此时气相中也再一次形成新的水幕。由图 8 o)—p)可知，实验件到达下止点位置后开始转向向上运动，反弹向上的液体失去了惯性力后开始下落与下方的液体再次混合，大气泡也在混合后变成小气泡，最终液面再次趋于平缓且接近于图 8 a)，再次开始爬壁过程。

通过重复以上过程可知，气液两相流振荡流动在充分振荡阶段时，其运动规律及其流动形态呈周期性变化，液体获得较大速度和惯性力后，会在实验件侧壁进行“爬壁”运动，并与上壁面撞击后转变为贴上壁面的横向运动，然后下坠形成水幕，受黏度影响壁面还滞留部分液体。随着往复运动过程对侧壁面的不断冲刷，可以提高整体的传热系数，水幕可以额外吸热冷却，另外液体附着也可提高整体散热。

通过实验还发现，液体在对上壁面进行冲击时，首先发生在上壁面两端，其次才是中间部位，但经过几个循环后，会转变为先冲击中间部位，再是上壁面两端，并且由于液体速度大小和方向的不同，不是所有液体都会到达上壁面使底部呈现空腔的状态，总会有少部分液体留在下壁面，其内部在剧烈翻滚，在上方的液体对上壁面进行冲击向下回落时这些少部分液体才会向上运动，并最终与回落的液体相撞后一同再次落下。在液体流动的过程中，液体内部会由于液体挤压、碰撞产生各种尺度的气泡，使湍动能不断加剧。

3 两相流振荡流动形态的影响因素

3.1 转速对两相流振荡流动形态的影响

受实验条件所限且实验台最高转速已可满足对实验规律的探究，以液体填充率为30%，转速分别为200，300，400，500，600和700 r/min的气液两相流振动流动过程为例进行研究，在达到设定转速并运行平稳后，分别选取其中一个循环，探究气液两相流振荡流动形态。90°和270°为此循环内曲轴转角转过的角度。

图9为在不同转速下实验件内气液两相流的流动形态。通过对比以上各图可知，无论转速高低，实验件在90°附近时，内部都会短暂的有趋于平缓的液面，此时实验件内有较为明显的气相与液相的分界面，转速越低越明显。虽然在这段极短的时间内液面趋于平缓，但液体内部有较为强烈的湍流脉动特征，有无数的细小气泡，其液面也处于不断的波动状态，但在不同的转速下湍流脉动特征并不相同。

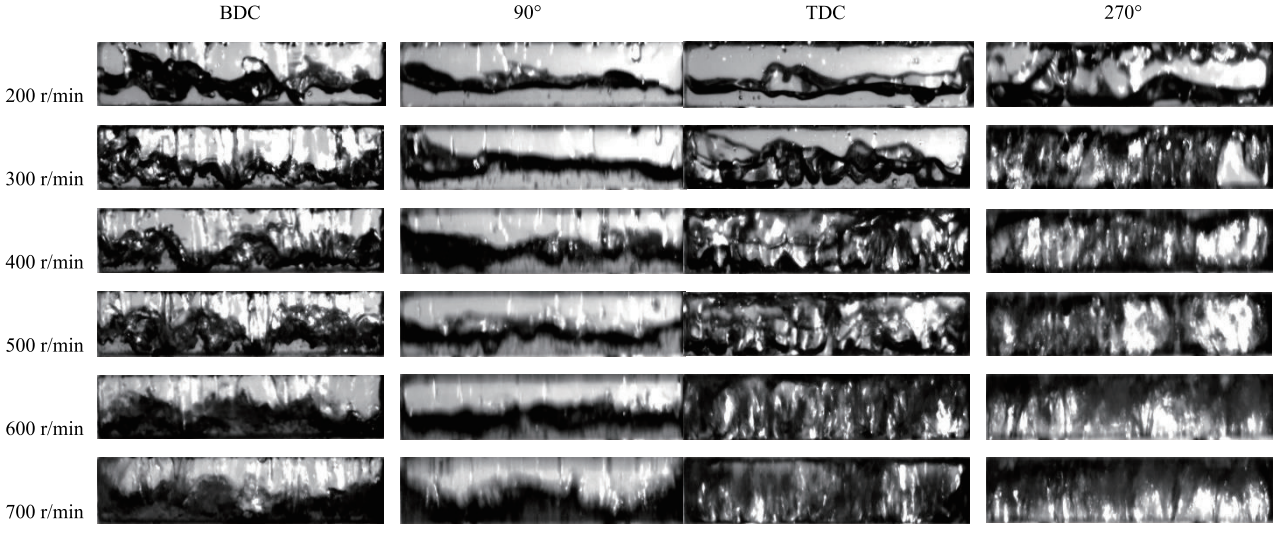


图9 气液两相流在不同转速下的流动形态

Fig. 9 Flow patterns of gas-liquid two-phase flow at different rotation speeds

在转速为200 r/min时，转动产生的惯性力并不足以使液体轻易上升，液体在下方时间较多，当达到上止点时，液体尚未达到上壁面，此时实验件向下运动与液体碰撞，碰撞力度相对较小，没有较多液滴破碎和液膜形成，不利于传热；在转速为300 r/min时，与200 r/min液体形态类似，但是液体惯性力有所增强，如图所示，当转速达到400和500 r/min时，气相与液相的分界面开始模糊，说明在此分界面上已经有更加细小的液滴形成，液体内部湍流强度得到了增强，在与上壁面撞击后破碎的液滴也更多。当转速达到700 r/min时，在90°附近位置，此时的液面已经不再平缓，两端的液体即将接触到上壁面，气相变得更加模糊，说明此时气相中已经形成了更多细小的液滴或雾滴。在实验件向下止点位置运动时，液体与上壁面撞击后在下降的过程中，与下方正在上升的液体再次猛烈撞击，然后继续向下运动，受撞击液体开始破碎，飞溅再落下。同时使上壁面覆盖着一层液膜，气相中也有水幕形成，这将持续提升传热效果，又由于此时转速较高，实验件速度较快，上壁面覆盖的液滴和液膜还没来得及完全落下就被下一循环形成的液滴和液膜所替代，与低转速下液体的流动形态相比，这极大地促进了上壁面的热量向液相中的传递。这说明，转速提高使气液两相流振荡流场波动剧烈，稳定性较差，液体中充满了较为细密的小尺度气泡，气泡的运动、聚合、破碎伴随着动量的不断交换增加了流场的湍流脉动，更加剧了流场的不稳定性，因此转速是影响流场湍动能大小即流场稳定与否的根本因素。

3.2 填充率对两相流振荡流动形态的影响

通过文献[19-22]的模拟结果可知，在固定转速下，液体填充率是影响传热效果的因素之一。由上节可知，在相同的液体填充率下，充分振荡时低转速与高转速下的液体流动形态差异较大，但总体上液体的流动形态随曲轴转角周期性变化，尤其在较高转速时，不同转速间的液体流动形态差异很小。以下将以转速分别为200和600 r/min，实验件内液体填充率分别为20%，30%，40%，50%，60%，70%和80%为例，在达到设定转速并运行平稳后，分别选取其中一个循环，探究气液两相流振荡流动时液体填充率对传热效果的影响。

图 10 为转速在 200 r/min 时活塞内冷油腔实验件内气液两相流的流动形态。当液体填充率为 20%和 30%时，液体的惯性力较小，重力为主要影响因素，此时较少有液滴破碎，尽管上壁面有液膜和少量液滴但不能被后续冲击及时替换；当填充率为 40%和 50%时，在上止点位置，液体可以到达上壁面，在撞击后形成空腔并产生大量气泡，液体的湍流强度增强，但整个过程中，液体主要位于实验件下方，降温效果并不好；当填充率达到 60%时，液体的晃动程度进一步增大；当液体填充率继续增加达到 70%和 80%时，液体在实验件内的位移已经很小，由于液体行程变小，气体含量较少以及水表面张力的原因，气体完全被液体包围，不易与液体混合，并不利于传热，反而使降温效果更差，因此可知，液体填充并非越多越好。

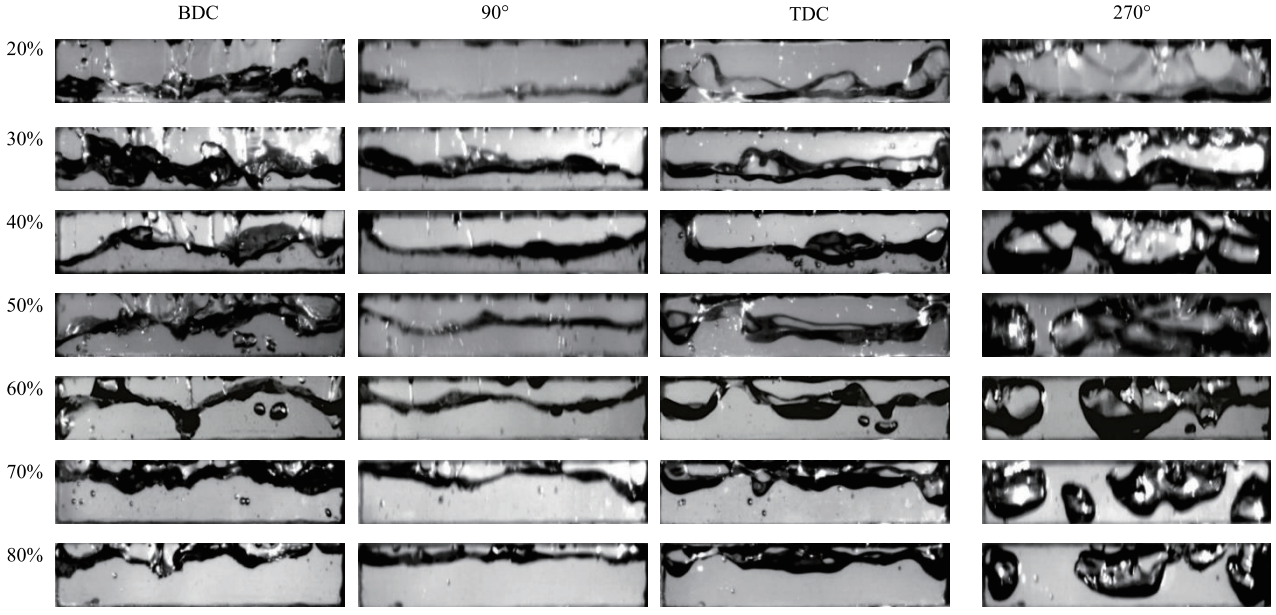


图 10　气液两相流在不同液体填充率时的流动形态(转速为 200 r/min)

Fig. 10　Flow patterns of gas-liquid two-phase at different liquid filling rate (rotation speed of 200 r/min)

图 11 为转速在 600 r/min 时活塞内冷油腔实验件内气液两相流的流动形态。当转速增加到 600 r/min 时，液体的流动形态已经发生了较大的变化，此时重力对液体流态的影响已经很小，即使填充率仅为 20%或 30%，液体也能对上壁面进行强烈地撞击，并且在撞击后破碎生成大量细小的雾滴，但由于液体较少，上壁面覆盖的液膜和液滴在高频率振荡下尚未与后续液体撞击便与上壁面分离，液体在上壁面停滞的时间较短，且

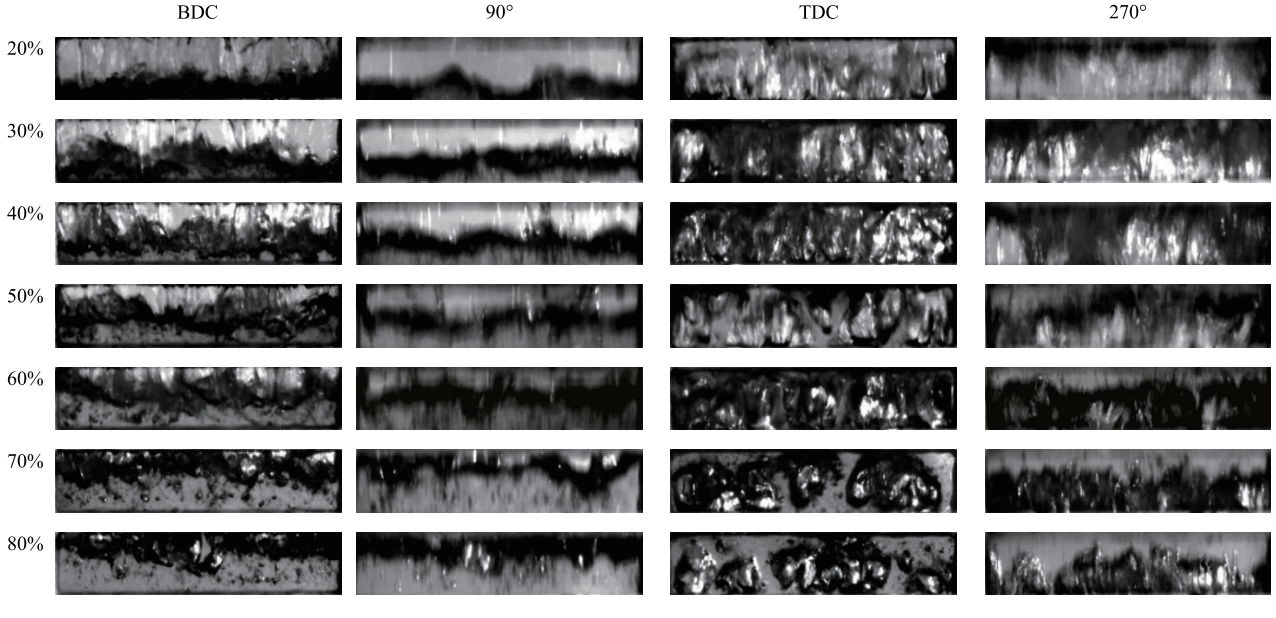


图 11　气液两相流在不同液体填充率时的流动形态(转速为 600 r/min)

Fig. 11　Flow patterns of gas-liquid two-phase at different liquid filling rate (rotation speed of 600 r/min)

不能及时替换，上壁面依然和气体接触较多，所以在低填充率下，其传热效果并不好。当液体填充率继续增加至 40%，50%和 60%时，液体在实验件内运动更加剧烈，生成了较多的气泡，当液体在上止点位置换向向下运动时，上壁面得到了更加猛烈的冲击，液体均匀地分布在实验件内，与气体混合得更加充分，同时上壁面覆盖的液膜和黏附的液滴也更多，这增加了液体的传热特性。当液体填充率为 70%和 80%时，液体的流动形态再次发生变化，其在上止点位置时与其他填充率下相比有了更加完整的较大气泡，当大量液体上行时，由于较短的行程使得液体与上壁面的撞击力度变小，液体得不到更加充分的破碎，气体不能与液体充分混合而被挤压，最终被液体包围，气体中的热量也不能被液体及时吸收，同时由于撞击力度的不足，也使得上壁面停滞的高温液膜得不到替换而使得冷却效果被削弱。当液体与上壁面接触时，不论是两侧冲击、中间荡起的冲击、还是横向“绕壁”运动，都会使壁面换热系数大幅增加，造成壁面温度大幅下降；而当液体主要集中在空腔底部区域不与上壁面接触时，上壁面附近都是空气相，此时壁面换热系数较小，因此壁面温度较高。由此可见，在本文转速范围内，空腔壁面换热效果主要取决于空腔内的液体填充率。在不同的填充率下，液体冲击壁面时壁面换热系数最大，壁面换热效果最好；而转速的变化只能影响流场的稳定性，即在同一填充率下，增大转速可以增大流场的湍动性能，从而也能影响壁面换热效果。

4 结 语

1)气液两相流在初始振荡阶段没有强烈的混合，液体的湍流运动不明显；充分振荡阶段，其流动形态呈周期性变化，此外，在对上壁面进行冲击时，首先发生在上壁面两端，然后是中间部位，但在几个循环后会转变为先冲击中间，然后是两端部位。

2)转速的高低与气液两相流的流动形态有密切关系，随着转速的持续增加，两相流的振荡流动形态差异会逐渐变小，最终极其相似，转速对气液两相流的流动形态影响也越来越小。

3)在低转速下，液体与上壁面的撞击力度较小，没有较多的液滴破碎，液体在实验件下方的时间较多；在高转速下，液体与气体的混合更加充分，湍流强度更强，上壁面覆盖的液膜和液滴也更多。但无论转速高低，当液体填充率达到 70%或 80%时，液体与气体都不能进行充分地混合，液体内部将生成较大的气泡，不利于对上壁面热量的吸收。

4)转速主要对气液两相流的湍流强度和液体内气泡产生影响，转速越高，湍流强度越强，气泡越小越密；填充率主要对气液两相流的流动形态产生影响，随着填充率的增加，液体与气体的混合程度也随之增加，但填充率过大时，液体与气体的混合程度反而会减小。

本文通过可视化实验研究获得了气液两相流的振荡流动特性，但未对其传热效果进行定量研究，后续将研究如何同步开展活塞测温实验，针对不同影响因素对活塞的降温效果进行定量研究。

参考文献/References：

[1] 陈晓萌，彭培英，朱海荣，等. 振荡冷却活塞温度场及热机耦合分析[J]. 河北科技大学学报，2023，44(3)：237-245.
CHEN Xiaomeng，PENG Peiying，ZHU Hairong，et al. Analysis of temperature field and thermo-mechanical coupling of oscillating cooling piston[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2023，44(3)：237-245.

[2] 刘阳，雷基林，邓晰文，等. 基于热障涂层的柴油机活塞热分析研究[J]. 内燃机工程，2021，42(3)：67-73.
LIU Yang，LEI Jilin，DENG Xiwen，et al. Research on thermal analysis of piston in diesel engine based on thermal barrier coating[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering，2021，42(3)：67-73.

[3] 穆艳丽，雷基林，陈康. 内冷油腔振荡冷却仿真方法研究[J]. 农业装备与车辆工程，2020，58(2)：46-52.
MU Yanli，LEI Jilin，CHEN Kang. Simulation method for oscillation cooling of internal cooling oil cavity[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering，2020，58(2)：46-52.

[4] 马伟，刘泉. 柴油机冷却与润滑系统温度影响分析[J]. 内燃机与配件，2022(18)：38-40.
MA Wei，LIU Quan. The temperature influence analysis of diesel cooling and lubrication system[J]. Internal Combustion Engine & Parts，2022(18)：38-40.

[5] 文均，王东方，雷基林，等. 活塞内冷油腔的振荡传热特性及位置的研究[J]. 中国机械工程，2019，30(6)：672-679.
WEN Jun，WANG Dongfang，LEI Jilin，et al. Study on oscillation heat transfer characteristics and position of cooling gallery[J]. China Mechanical Engineering，2019，30(6)：672-679.

[6] KIRMSE C J W，OYEWUNMI O A，TALEB A I，et al. A two-phase single-reciprocating-piston heat conversion engine：Non-linear dynamic modelling[J]. Applied Energy，2017，186(Part 3)：359-375.

[7] 郭圣刚，王建平，赵忠诚，等. 金属掺杂对高强化柴油机活塞销类金刚石薄膜涂层摩擦学性能的影响[J]. 兵工学报，2021，42(4)：715-722.
GUO Shenggang，WANG Jianping，ZHAO Zhongcheng，et al. The effect of metal doping on the friction performance of DLC coating forpiston pins of highly-strengthened diesel engine[J]. Acta Armamentarii，2021，42(4)：715-722.

[8] LUFF D C，LAW T，SHAYLER P J，et al. The effect of piston cooling jets on diesel engine piston temperatures，emissions and fuel consumption[J]. SAE Technical Papers，2012，5(3)：1300-1311.

[9] 吕继组，高林松，常胜南，等. 壁面改性强化活塞油腔换热的模拟试验[J]. 内燃机学报，2022，40(5)：457-462.
LV Jizu，GAO Linsong，CHANG Shengnan，et al. Experimental study on heat transfer enhancement of piston gallery wall with micro-nano structure modification[J]. Transactions of Csice，2022，40(5)：457-462.

[10] WANG Peng，HAN Kaihong，YOON S，et al. The gas-liquid two-phase flow inreciprocating enclosure with piston cooling gallery application[J]. International Journal of Thermal Sciences，2018，129：73-82.

[11] 原彦鹏，曹元福，张卫正，等. 一种发动机活塞振荡冷却试验装置[P]. 中国专利：CN102032991A，2011-04-27.

[12] 陈晓飞，庞明，刘长振，等. 一种活塞振荡油腔试验模拟装置[P]. 中国专利：CN103994881A，2014-08-20.

[13] LV Jizu，WANG Peng，BAI Minli，et al. Experimental visualization of gas-liquid two-phase flow during reciprocating motion[J]. Applied Thermal Engineering，2015，79：63-73.

[14] DENG Xiwen，LEI Jilin，WEN Jun，et al. Numerical investigation on the oscillating flow and uneven heat transfer processes of the cooling oil inside a piston gallery[J]. Applied Thermal Engineering，2017，126：139-150.

[15] 胡定云，熊毕伟，袁晓帅，等. 活塞振荡油腔的数值模拟计算[J]. 小型内燃机与车辆技术，2017，46(1)：42-45.
HU Dingyun，XIONG Biwei，YUAN Xiaoshuai，et al. Numerical simulation of oscillating gallery in piston[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle，2017，46(1)：42-45.

[16] 黄钰期，陈卓烈，胡军强，等. 活塞内冷油腔两相流振荡可视化模拟[J]. 浙江大学学报(工学版)，2020，54(3)：435-441.
HUANG Yuqi，CHEN Zhuolie，HU Junqiang，et al. Visual simulation of two-phase flow oscillating flow in piston cooling gallery[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science)，2020，54(3)：435-441.

[17] 郭凯. 船用柴油机活塞振荡流动可视化研究[D]. 武汉：华中科技大学，2020.
GUO Kai. Visualization Research on Oscillating Flow in Marine Diesel Engine Piston Internal Cooling Gallery[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2020.

[18] 许函聪，王红，郭昊鹏. 船用柴油机振荡冷却流动与传热特性数值分析[J]. 节能技术，2023，41(3)：252-259.
XU Hancong，WANG Hong，GUO Haopeng. Numerical analysis of oscillatory cooling flow and heat transfer characteristics in a marine diesel engine[J]. Energy Conservation Technology，2023，41(3)：252-259.

[19] 刘庆刚，耿泽伟，朱海荣. 水滴形活塞冷却油腔振荡传热数值模拟与优化[J]. 机械设计与制造，2020(2)：47-50.
LIU Qinggang，GENG Zewei，ZHU Hairong. Numerical simulation and optimization for the oscillation heat transfer characteristics of a drop shaped piston cooling gallery[J]. Machinery Design & Manufacture，2020(2)：47-50.

[20] 曹元福，张卫正，杨振宇，等. 封闭空腔中多相流振荡传热特性的数值模拟[J]. 化工学报，2013，64(3)：891-896.
CAO Yuanfu，ZHANG Weizheng，YANG Zhenyu，et al. Numerical simulation of oscillating heat transfer characteristics in cavity partly filled with cooling liquid[J]. CIESC Jorunal，2013，64(3)：891-896.

[21] 邓立君. 内燃机活塞内冷油腔内两相流的流动与换热机理研究[D]. 济南：山东大学，2017.
DENG Lijun. Study on Flow and Heat Transfer Mechanism of Two-phase Flow in Cold Oil Cooling Gallery of Internal Combustion Engine[D]. Jinan：Shandong University，2017.

[22] 朱楠林，董非，宗明景，等. 内燃机活塞内冷油腔振荡冷却特性的模拟研究[J]. 工程热物理学报，2017，38(2)：375-380.
ZHU Nanlin，DONG Fei，ZONG Mingjing，et al. Simulation study on oscillating cooling characteristics in piston oil cooling gallery of internal combustion engines[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2017，38(2)：375-380.