

# 发动机冷却水套穴蚀机理分析与试验

杜慧勇, 周文瑾, 李 民, 刘建新, 李鹏涛, 徐 斌

(河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003)

**摘 要:** 为研究柴油机冷却水套内空化现象的产生机理, 该文使用计算流体力学 (CFD) 方法研究施加壁面振动的不同入口流速、不同流场温度时冷却水套内部流体的流动特性及空化特性, 同时设计并搭建可施加壁面振动的可视化空化试验台, 对计算结果进行了验证。研究表明: 空化现象主要发生在圆弧壁最小间隙位置, 并在下游区域发展壮大; 冷却水入口流速的增加会使得空化现象略有加强, 但并不明显; 当冷却水温为 50℃ 时, 空化现象较强, 当水温逐渐升高时, 空化现象反而减弱; 当圆弧壁面有振动时, 空穴现象明显加强, 并且其产生的空化效果明显强于冷却水温及入口流速等因素的变化所产生的空化波动。此研究的结果将有助于控制发动机冷却水套中空化现象的发生, 并降低冷却水套穴蚀的发生风险。

**关键词:** 发动机; 计算流体力学; 试验; 冷却水套; 空化; 穴蚀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.010

中图分类号: TK421+.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-08-0076-06

杜慧勇, 周文瑾, 李 民, 刘建新, 李鹏涛, 徐 斌. 发动机冷却水套穴蚀机理分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 76-81. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.010 http://www.tcsae.org

Du Huiyong, Zhou Wenjin, Li Min, Liu Jianxin, Li Pengtao, Xu Bin. Analysis and experiment on cavitation mechanism in cooling water jacket of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 76-81. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.010 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

穴蚀是柴油机冷却水套失效的重要原因之一<sup>[1-4]</sup>。柴油机的冷却水套一旦发生穴蚀损坏, 其穴蚀处壁面变薄甚至穿透, 造成燃烧室气密性下降, 机油温度和油耗升高, 润滑性能下降, 柴油机动力性经济性严重下降, 甚至产生拉缸等严重事件, 严重影响柴油机的工作寿命, 后期的检修及更换新冷却水套更会耗费大量成本<sup>[5-8]</sup>。因此, 深入研究冷却水套穴蚀机理, 分析冷却水套穴蚀的影响因素, 找出冷却水套穴蚀的预防措施, 具有重要的理论和实际意义<sup>[9-12]</sup>。

国内外对冷却水套穴蚀和冷却水空化的机理进行了许多研究。日本学者米沢徹等<sup>[13-14]</sup>研究了柴油机冷却水套振动空蚀的机理, 认为活塞敲击冷却水套致其振动引起了冷却水的压力波动, 从而导致空蚀的产生。Shuji 等<sup>[15]</sup>通过空蚀速率与液体冲击侵蚀速率的对比试验, 发现 2 种形式的侵蚀之间的相关性非常高。陈剑<sup>[16]</sup>综合分析了冷却水套空蚀的机械作用机制与电化学机制, 认为机械作用在空蚀过程中占主要地位。薛伟等<sup>[17]</sup>通过扫描电镜对空蚀样件的破坏过程进行了观察和研究, 认为空泡溃灭时的微射流造成了金属表面的空蚀针孔, 而空蚀破坏则是气泡溃灭产生的微射流和冲击波对金属表面的累计

损失过程。Chen 等<sup>[18-19]</sup>通过气泡崩溃过程模拟并解释了凹坑形成的机理是高温高压及微射流冲击作用。

杜慧勇等<sup>[20]</sup>已通过计算流体力学的方法 (CFD) 研究施加壁面振动的冷却水套在不同入口流速时的内部流体空化特性。本文在此基础上通过对柴油机冷却水套在外界敲击力作用下实际工作过程的研究建立冷却水套试验模型, 设计并搭建可视化空化试验台, 研究施加壁面振动的冷却水套在不同入口流速、流场温度时的内部流体空化特性, 并分析壁面振动、入口流速、流场温度对冷却水套内部流动的影响, 找到冷却水套穴蚀的主要原因, 为减少冷却水套穴蚀提供理论依据。

## 1 冷却水套空化特性模拟

### 1.1 冷却水套及其穴蚀

缸径 100 mm, 壁面狭隙厚度 10 mm, 高度为 120 mm 的某潍柴 4100 发动机冷却水套的简化图如图 1 所示。根据前人进行的冷却水套穴蚀试验结果<sup>[21]</sup>和实际使用中柴油机冷却水套穴蚀位置的实际统计观测, 冷却水套穴蚀通常会出现在与活塞销垂直平面上的活塞敲击侧面附近, 呈蜂窝状带状沿柱面分布, 主推侧面及次推侧面较为严重<sup>[22-25]</sup> (如图 2 所示), 图 2<sup>[26]</sup>柴油机冷却水套活塞敲击两侧面的穴蚀图。即图 2 为图 1 中冷却水入口及出口所在面的实际穴蚀图, 对比图 1、图 2 可明显发现图中穴蚀部分穴蚀孔的排列位置与冷却水流向有关<sup>[27-28]</sup>。

### 1.2 冷却水套近振动壁面三维模型构建

#### 1.2.1 模型构建

本文主要研究施加壁面振动条件下, 入口流速、流

收稿日期: 2016-08-11 修订日期: 2017-03-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0700700)

作者简介: 杜慧勇, 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, 主要从事内燃机 CFD 方面研究。洛阳 河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003。

Email: dhy@mail.haust.edu.cn

场温度不同时冷却水套内部流体流动特性及空化特性。而壁面振动产生空化的原因是壁面振动产生的冷却水扰动使近壁面处的压力场出现突变<sup>[29]</sup>，所以建立模型的关键要保证振动壁面的振动速度变化与实际相一致，且试验所用等比例简化模型与冷却水套内部流体实际运动具有相似性。取某潍柴 4100 型发动机近振动壁面狭隙处的部分冷却水套作研究对象，为简化模型，突出振动壁面对空化的影响，去掉不必要的结构，本文只保留主推侧面部分冷却水套，对近振动壁面冷却水套进行三维建模，设置圆弧振动壁面半径 50 mm，壁面狭隙间距 10 mm，如图 3 所示<sup>[20]</sup>，用正六面体结构网格进行划分，最终获得整个计算域的网格数量为 15 288。

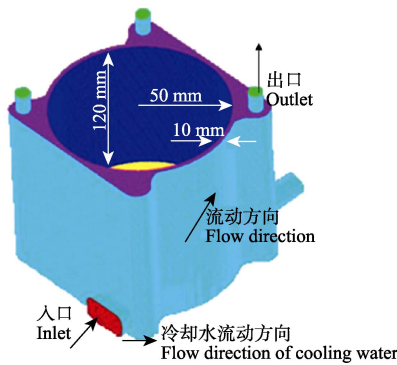


图 1 柴油机冷却水套模型

Fig.1 Model of cooling water jacket in diesel engine

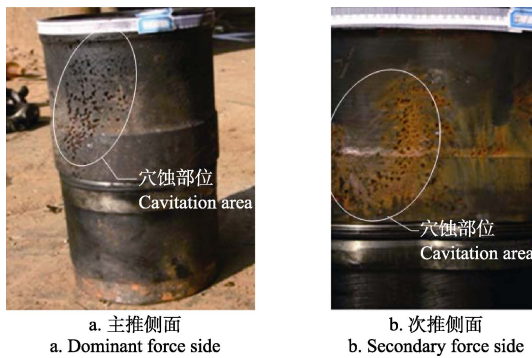
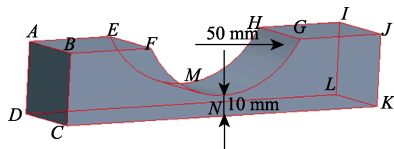


图 2 柴油机冷却水套穴蚀

Fig.2 Cooling water jacket cavitation of diesel engine



注：EFGH 壁面为圆弧振动壁面，ABCD 壁面为冷却水流入面，IJKL 壁面为冷却水流出面，其余壁面简化为长方体壁面以简化计算模型。

Note: The wall EFGH represents vibrated wall, the wall ABCD represents inlet wall of cooling water, the wall IJKL represents outlet wall of cooling water, the rest walls are simplified to rectangular walls in order to simplify the calculation mode.

图 3 带有振动壁面冷却水套三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of cooling jacket with vibration wall

### 1. 2. 2 动网格设置

在活塞往复运动过程中，活塞侧面及裙部会对冷却水套内壁面形成侧推力。当活塞运动至做功冲程，越过上止点（top dead center）并在其附近时，活塞侧推力变向，此时活塞侧推力的变化最为剧烈，形成活塞对冷却

水套的在主推侧壁面的敲击力，在该力作用下冷却水套振动，且壁面振幅呈衰减形式<sup>[30-31]</sup>。本试验所用振动壁面构件为压紧后曲率半径为 50 mm 的金属薄片。使用北京东方振动和噪声技术研究所（Coinv）振动信号采集分析仪（INV1861A 应变调理器与 INV3060S 网络分布式采集仪）对试验中的模拟振动壁面构件的单次敲击振动形变数据进行采集分析，得到的试验所用振动壁面构件的振动形变趋势曲线（如图 4），计算出振动壁面构件的实际振动速度变化，再根据实际敲击振动过程中冷却水套振动频率<sup>[32]</sup>，以及冷却水套的刚度等实际参数，对冷却水套实际振动频率为 20 kHz 时的振动特性进行研究，计算冷却水套壁面振动位移随时间的变化，根据试验与计算结果：其波峰值最大是 0.081 mm，波谷值最小是 -0.031 mm。设置曲轴转动 1°所用时间（7e-5 s）作为度量振动衰减位移函数曲线的横坐标的单位，模拟曲线如图 5 所示，与杜慧勇等的计算结果一致<sup>[20]</sup>，活塞敲击时振动出现在上止点后 4°附近，在 6°曲轴转角时衰减振动结束，并根据此设置动网格。

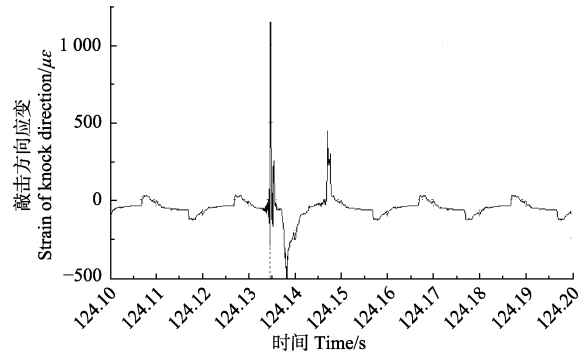


图 4 振动壁面构件的振动形变趋势曲线

Fig.4 Deformation trend curve of vibration wall components

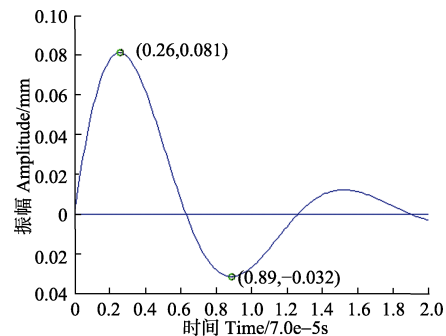


图 5 振动衰减曲线

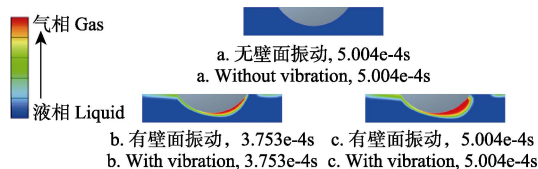
Fig.5 Attenuation curve of vibration

## 2 冷却水套空化特性模拟结果分析

将冷却水套出现穴蚀的振动壁面处的振动特性及其附近冷却水的流场特性进行耦合分析，模拟计算分析近壁面振动影响（壁面振动时衰减振动频率为 20 kHz，振幅为 81 μm）下流场的空化特性，并对比分析了壁面振动影响下的不同入口流速，不同流场温度时的冷却水套内流体空化特性<sup>[14]</sup>。模拟空化云图中靠近红色区域为气相，靠近蓝色区域为液相。

## 2.1 壁面振动条件下的空化情况对比

图6为冷却水入口流速 $2\text{ m/s}$ ，流场温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时，施加振动条件和不施加壁面振动条件下某些时刻的近振动壁面处流体流场区域的模拟空化云图。由图6可看到，振动壁面受到振动激励后，空化区域逐渐出现，在此时刻前流场不受振动扰动，流体内部压力较稳定，不会突降至饱和蒸汽压，因此不会有空化区域出现。受到振动激励后，流场压力场受壁面振动扰动而降至液体饱和蒸汽压，空化区域形成并随时间增大。



注：冷却水入口流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，流场温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$

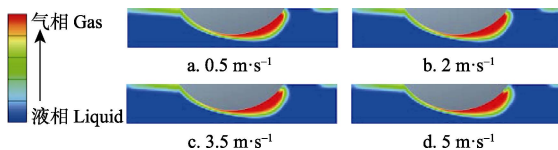
Note: Inlet velocity of cooling water is  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , flow temperature is  $70\text{ }^\circ\text{C}$ .

图6 有无振动条件下的模拟空化云图

Fig.6 Cavitation cloud picture with and without vibration

## 2.2 入口流速对冷却水流场空化的影响

图7为施加振动条件下，流场温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$ ，入口流速从 $0$ 到 $5\text{ m/s}$ 变化的不同入口流速条件下某个时刻( $5.004\text{e-}4\text{ s}$ )的模拟空化云图。由图7可知：虽然空化区域面积随着流速增加而增大<sup>[20]</sup>，但增大幅度并不明显，可忽略不计。



注：施加壁面振动条件下，流场温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$ ，冷却水入口流速分别为 $0.5$ 、 $2$ 、 $3.5$ 、 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $5.004\text{e-}4\text{ s}$ 时的模拟空化云图

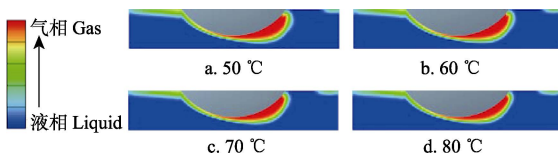
Note: Cavitation cloud at the time of  $5.004\text{e-}4\text{ s}$  with vibration, flow temperature of  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , inlet velocity of cooling water of  $0.5$ ,  $2$ ,  $3.5$ ,  $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

图7 不同入口流速条件下的模拟空化云图

Fig.7 Cavitation cloud picture under conditions of different inlet flow velocity

## 2.3 温度对冷却水流场空化的影响

图8给出流场入口流速为 $2\text{ m/s}$ 条件下，流场温度分别为 $50$ 、 $60$ 、 $70$ 和 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的某个时刻( $5.004\text{e-}4\text{ s}$ )的模拟空化云图。由图8可知：在同一条件下，低温度下如 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的空化区域面积更大<sup>[20]</sup>，即冷却水在温度较低时(在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 左右)，流场更容易出现空化区域。



注：施加壁面振动条件下，冷却水入口流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，流场温度分别为 $50$ 、 $60$ 、 $70$ 、 $80\text{ }^\circ\text{C}$ ， $5.004\text{e-}4\text{ s}$ 时的模拟空化云图

Note: Cavitation cloud at the time of  $5.004\text{e-}4\text{ s}$  with vibration, inlet velocity of cooling water is  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , flow temperature of  $50$ ,  $60$ ,  $70$ ,  $80\text{ }^\circ\text{C}$ .

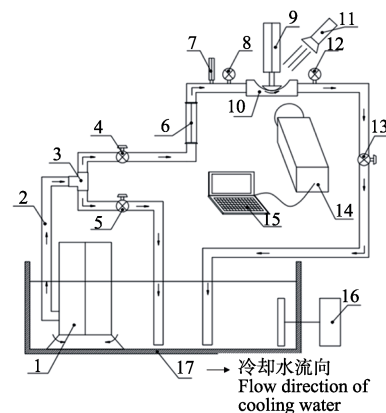
图8 不同流场温度条件下的模拟空化云图

Fig.8 Cavitation cloud picture under conditions of different fluid temperature

## 3 试验

### 3.1 可视化试验台设计布置

试验所用的穴蚀可视化试验台设计布置如图9，整套试验系统各个部件之间由直径为 $\text{DN}40$ 的橡胶管连接，试验采用压紧块固定的金属薄片(弯曲的半径为 $50\text{ mm}$ ，与可视壁面距离为 $10\text{ mm}$ )来模拟振动壁面，使用可视化视窗组件，来建立模拟近振动壁面处冷却水套振动空化致冷却水套穴蚀的系统，可近似观察到柴油机工作中冷却水套受活塞主敲击振动时振动壁面处空化穴蚀的情况。其中激振器对壁面施加敲击力，模拟活塞敲击冷却水套，空化试验视窗组件主要模拟冷却水套受活塞主敲击振动时振动壁面处冷却水套空化穴蚀的情况并进行观察，GX-8型高速摄像机可对试验中的空化现象进行实时记录，恒温系统使冷却水保持试验所需的恒定温度。



1. 潜水泵 2. 橡胶管 3. 分流三通 4. 控制球阀一 5. 控制球阀二 6. 转子流量计 7. 温度计 8. 入口压力表 9. 激振器 10. 空化试验视窗组件 11. 光源系统 12. 出口压力表 13. 控制球阀三 14. 高速摄影仪 15. 电脑 16. 恒温装置 17. 冷却水箱

1. Submersible pump 2. Rubber tube 3. Diverging duct 4. Control valve 1 5. Control valve 2 6. Flowmeter 7. Thermometer 8. Inlet pressure gauge 9. Exciter 10. Windows components of cavitation experiment 11. Lighting system 12. Outlet pressure gauge 13. Control valve 3 14. High speed digital camera 15. Computer 16. Thermostat device 17. Cooling water tank

图9 试验装置示意图

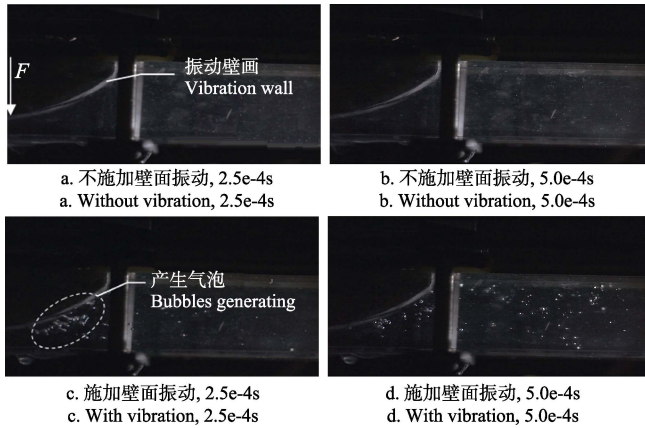
Fig.9 Schematic of experimental device

### 3.2 壁面振动对空化的影响

由图7可知入口流速对冷却水套内部空化区域的产生影响不大，所以为方便试验中取入口流速约为 $0.45\text{ m/s}$ 。如图10给出冷却水 $70\text{ }^\circ\text{C}$ ，循环流量 $2000\text{ L/h}$ (入口流速约为 $0.45\text{ m/s}$ )时施加振动条件和不施加壁面振动条件下的近振动壁面处流体流场区域的空化试验图。试验从开始产生气泡开始计时，图中F箭头指代方向为振动壁面受力方向，闪白点处为气泡群。

如图10可以观察到，不施加壁面振动条件时在流场流动很稳定，施加敲击振动激励后，观察到视窗组件内压紧块壁面处出现部分气泡，并聚集在狭隙下游圆弧壁面处。由试验结果可以看出其与模拟结果(如图6)一致，都是在狭隙下游侧壁面处穴蚀更为严重。这是因为没有施加振动条件时，近振动壁面处几乎不会出现空化区域，因为没有扰动，稳定的流场区域其压力场将处于相对稳

定的状态，近壁面流体区域压力不会突降到液体饱和蒸汽压之下，因此不会出现大量的空化气泡形成空化区域。施加振动时由于扰动的影响，近壁面处的压力场将出现突变，大量空化气泡群将沿着振动壁面出现形成空化区域，同时随着时间推移，空化气泡群将在狭隙下游圆弧壁面处聚集，形成空化区域，沿流体流动方向向出口发展，并在此区域空泡大量溃灭，对后圆弧壁面进行高温高压微射流和压力波的冲击，最终造成冷却水套在此区域的穴蚀。因此冷却水套壁面振动是冷却水套穴蚀的主要因素，减小冷却水套振动振幅时可以有效减少穴蚀产生。



注： $F$ 为振动壁面所受力，箭头方向为 $F$ 作用力方向。冷却水入口流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，流场温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的空化试验图。冷却水入口流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，流场温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的空化试验图。  
Note:  $F$  is the force of vibration wall, the arrow points the direction of  $F$ . Cavitation images with inlet velocity of cooling water of  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , flow temperature of  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cavitation images with inlet velocity of cooling water of  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , flow temperature of  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

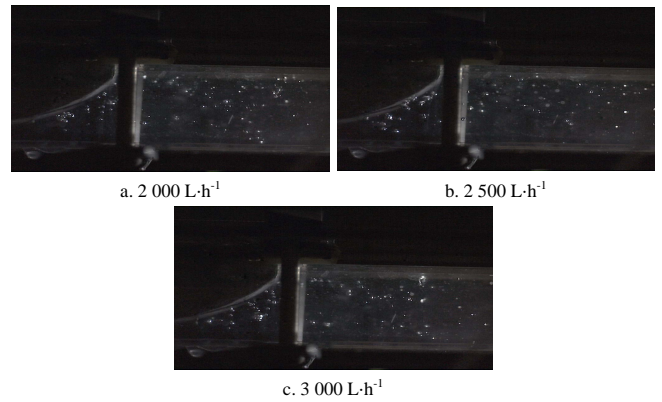
图 10 有无振动条件下不同时刻的空化试验图对比  
Fig.10 Comparison of cavitation images with or without vibration at different time

### 3.3 入口流速对空化的影响

如图 11 给出其他条件相同，循环流量分别为 2 000、2 500、3 000 L/h（即 0.45、0.57、0.68 m/s）时，施加振动条件的近振动壁面处空化区域在同一时刻的空化试验图，图中随着冷却水流速增加，振动壁面处空化区域面积增大幅度并不明显，此结果与模拟结果（如图 7）一致。这是由于流速增大时流场内压力场趋于减小，同时由于振动壁面的谐振扰动，使得流场内压力更容易降低至饱和蒸汽压，从而出现更大面积的空化区域。所以冷却水入口流速对冷却水套穴蚀影响较小，在试验范围内可忽略。

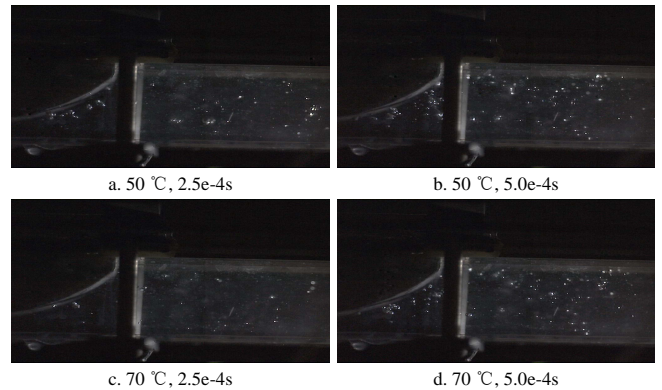
### 3.4 冷却水温度对空化的影响

图 12 给出循环流量 2 000 L/h 时，50、70  $^{\circ}\text{C}$  冷却水施加振动后的近振动壁面处流体流场区域的空化试验图。从试验现象来看，50  $^{\circ}\text{C}$  低温时近壁面处的空化现象比 70  $^{\circ}\text{C}$  时明显，与模拟结果（如图 8 所示）一致。这是由于温度会影响气体在冷却水中溶解度的变化，在温度较高时冷却水的气化压强越高，气泡相对不易产生，所以冷却水套穴蚀情况有所减轻。所以在低温时冷却水套比较容易出现穴蚀。



注：流场温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷却水入口流速分别为 2 000、2 500、3 000  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。  
Note: Flow temperature of  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , inlet velocity of cooling water of 2 000, 2 500, 3 000  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ .

图 11 不同入口流速同一时刻的空化试验图对比  
Fig.11 Cavitation images under conditions of different inlet flow velocity at same time



注：施加壁面振动条件下，冷却水入口流速 2 000  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ ，流场温度分别为 50、70  $^{\circ}\text{C}$  时的模拟空化试验图  
Note: Cavitation cloud with vibration, inlet velocity of cooling water of 2 000  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ , flow temperature of 50, 70  $^{\circ}\text{C}$ .

图 12 不同流体温度不同时刻的空化试验图对比  
Fig.12 Comparison of cavitation images under conditions of different fluid temperature at different time

## 4 结 论

- 1) 冷却水套壁面振动是冷却水套穴蚀的关键因素，壁面振动对冷却水流场的扰动影响，导致大量空化气泡出现并形成空化区域，所以减小冷却水套振动振幅是减少穴蚀产生的有效方法。
- 2) 冷却水入口流速的增加会使得空化现象略有加强，但并不明显（试验中随着冷却水入口流速增加空化区域几乎没有变化）；当冷却水温为 50  $^{\circ}\text{C}$  时，空化现象最强，当水温逐渐升高时，空化现象反而减弱，其冷却水套壁面振动产生的空化效果明显强于冷却水温及入口流速等因素变化所产生的空化波动。
- 3) 空化现象主要发生在圆弧壁最小间隙位置，并在下游区域发展长大，所以冷却水套狭隙下游圆弧壁面处穴蚀较为严重。

### [参 考 文 献]

[1] 王泽民，陶晓明，王明泉，等. 柴油机缸套穴蚀成因分析

- 和提高抗穴蚀能力的措施[J]. 内燃机, 2004(2): 43—45, 47.
- Wang Zemin, Tao Xiaoming, Wang Mingquan, et al. Analysis of cavitation reasons of cylinder-bushing and measures for improving anti-cavitation ability[J]. Internal Combustion Engines, 2004(2): 43—45, 47. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡斌, 罗昕. 柴油机湿式汽缸套穴蚀的原因分析及预防措施[J]. 农机化研究, 2006(7): 208—210.
- Hu Bin, Luo Xin. Analysis of reason on the wet-type cylinder liner corrosive pitting of the diesel engine and its preventive measurements[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(7): 208—210. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘彦辉. 柴油机缸套穴蚀问题探讨[J]. 腐蚀与防护, 2011(6): 490—493.
- Liu Yanhui. Discussion of diesel engine cylinder cavitation[J]. Corrosion and Protection, 2011(6): 490—493. (in Chinese with English abstract)
- [4] 管金发, 邓松圣, 张攀锋, 等. 空化特性研究进展[J]. 科学技术与工程, 2011(27): 6674—6680.
- Guan Jinfa, Deng Songsheng, Zhang Panfeng, et al. Research progress of cavitation characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2011(27): 6674—6680. (in Chinese with English abstract)
- [5] Petracchi G. Investigations of cavitation corrosion[J]. Metallurgia Italiana, 1949, 41: 1—6.
- [6] Bazanini G, Bressan J D. Preliminary experience with a new compact disk apparatus for cavitation erosion studies[J]. Wear. 2007, 263(1/6): 251—257.
- [7] Kornfeld. M, Suvarov. L. On the destructive action of cavitation [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15: 495—506.
- [8] 杜川, 徐万里, 汪家道, 等. 空蚀初生期破坏程度的表征方法[J]. 润滑与密封, 2011(3): 16—19.
- Du Chuan, Xu Wanli, Wang Jiadao, et al. A characterization method for cavitation erosion incubation period[J]. Lubrication Engineering, 2011(3): 16—19. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘凯, 杜润, 柯坚, 等. 气蚀的 CFD 评价方法[J]. 液气气动与密封, 2011(5): 32—35.
- Liu Kai, Du Ruen, Ke Jian, et al. Evaluation method of cavitation erosion with CFD[J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2011(5): 32—35. (in Chinese with English abstract)
- [10] 董洪全, 冯慧华, 董彪, 等. 移动载荷作用下的汽缸套动态特性建模与穴蚀倾向分析[J]. 内燃机学报, 2013(5): 467—472.
- Dong Hongquan, Feng Huihua, Dong Biao, et al. Dynamic modeling and cavitation tendency analysis of cylinder liner considering the effects of moving loads[J]. Transactions of Csic, 2013(5): 467—472. (in Chinese with English abstract)
- [11] 黄新明. 如何提高船用柴油机汽缸套的抗穴蚀能力[J]. 内燃机, 2006(1): 51—52.
- Huang Xinming. How to raise the ability of resisting cave corrosion on marine diesel cylinder sleeve[J]. Internal Combustion Engines, 2006(1): 51—52. (in Chinese with English abstract)
- [12] 宁海强. 高频振动对柴油机湿式汽缸套穴蚀的影响[J]. 航海工程, 2008, 37(3): 59—61.
- Ning Haiqiang. Study of the impact of high-frequency vibration on the cavitation of engine wet cylinder liner[J]. Ship and Ocean Engineering, 2008, 37(3): 59—61. (in Chinese with English abstract)
- [13] 米沢徹. 柴油机汽缸套穴蚀分析[J]. 国外内燃机车, 1992(267): 7—14.
- [14] 米沢徹, 前田广, 王伯福, 等. 抑制柴油机汽缸套的振动防止汽缸套穴蚀[J]. 国外内燃机车, 1988(333): 44—49.
- [15] Shuji Hattori, Makoto Takinami. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate [J]. Wear, 2010(269): 310—316.
- [16] 陈剑. 柴油机缸套穴蚀产生的机理[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2000, 29(1): 63—69.
- Chen Jian. Mechanism and causes of the emergence of the corroded-holes on the external surface of the cylinder of the diesel engine[J]. Journal of Shanghai Normal University; Natural Sciences, 2000, 29(1): 63—69. (in Chinese with English abstract)
- [17] 薛伟, 陈昭运. 空蚀破坏的微观过程研究[J]. 机械工程材料, 2005, 29(2): 59—62.
- Xue Wei, Chen Zhaoyun. The micro course of the cavitation erosion[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2005, 29(2): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [18] Chen Haosheng, Li Yongjian, Chen Darong. et al. Experimental and numerical investigations on development of cavitation erosion pits on solid surface[J]. Tribology Letters, 2007(26): 153—159.
- [19] Chen Haosheng, Li Yongjian, Chen Darong . et al. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water[J]. Wear, 2008(265): 692—698.
- [20] 杜慧勇, 李鹏涛, 李民, 等. 壁面振动致汽缸套空蚀现象模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2016(12): 1065—1069.
- Du Huiyong, Li Pengtao, Li Min, et al. Simulating cavitation erosion of cylinder liner caused by wall vibration[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016(12): 1065—1069. (in Chinese with English abstract)
- [21] 彭存达, 李健. 船用柴油机汽缸套穴蚀成因与防治[J]. 船舶, 2006(5): 33—34.
- Peng Cunda, Li Jian. Formation cause and prevention of corrosion in pit form in cylinder jacket of marine diesel engine[J]. Ship and Boat, 2006(5): 33—34. (in Chinese with English abstract)
- [22] Matsumoto Y. Influence of homogeneous condensation inside a small gas bubble on its pressure response[J]. Journal of fluids engineering, 1985, 107(2): 281—286.
- [23] REA Arndt. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, 13: 273—328.
- [24] Philipp A, Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 361: 75—116.
- [25] Brujan E A, Ikeda T, Matsumoto Y. On the pressure of

- cavitation bubbles[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 32(5): 1188—1191.
- [26] 银增辉, 李民, 杜慧勇, 等. 基于线阵相机的柱面外表面全景自动采集系统: CN102589465A [P]. 2012-07-18.
- [27] Iwai Y, Li S. Cavitation erosion in waters having different surface tensions[J]. *Wear*, 2003, 254(1-2): 1—9.
- [28] 隋江华, 贾明莆, 孙丰雷. 柴油机气缸套穴蚀的成因以及预防措施[J]. *船舶工程*, 2009(增刊 1): 45—47, 62. Sui Jianghua, Jia Mingpu, Sun Fenglei. Diesel engine cylinder liner cavitation causes and preventive measures[J]. *Ship Engineering*, 2009(Supp.1): 45—47, 62. (in Chinese with English abstract)
- [29] Dular M, Stoffel B, Irok B. Development of a cavitation erosion model[J]. *Wear*, 2006, 261(5/6): 642—655.
- [30] Li Xiaolei, Liu Jianmin, Qiao Xinyong. et al. The influencing factors research of piston slap vibration from diesel[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013(5): 197—200.
- [31] Zhou Y K, He J G, Hammitt F G. Cavitation erosion of cast iron diesel engine liners[J]. *Wear*, 1982, 76: 329—335.
- [32] 李晓磊, 刘建敏, 乔新勇, 等. 柴油机活塞敲击及其振动响应机理研究[J]. *车用发动机*, 2014(1): 32—37. Li Xiaolei, Liu Jianmin, Qiao Xinyong. et al. Piston slap and its vibration response mechanism of diesel engine[J]. *Vehicle Engine*, 2014(1): 32—37. (in Chinese with English abstract)

## Analysis and experiment on cavitation mechanism in cooling water jacket of diesel engine

Du Huiyong, Zhou Wenjin, Li Min, Liu Jianxin, Li Pengtao, Xu Bin

(College of Vehicle and Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Light weight and high power become the trend of the development of diesel engine. At the same time, the liner cavitation erosion of engine cylinder becomes one of the important restrictions of engine reliability and life. A lot of research has been made and the results show that cooling water jacket cavitation erosion theories widely accepted are: A high frequency vibration of cooling water jacket leads to the cavitation and the cavitation bubbles breaking produces a shock wave and micro-jet, which have the mechanical action to cooling water jacket and lead to the occurrence of cavitation erosion. Therefore, the study of the flow characteristics of the cooling water jacket near the vibrating wall is an effective way to understand the spatial and temporal distribution of cavitation. In this paper, the computational fluid dynamics (CFD) simulation method was used to investigate the forming mechanism of cavitation in engine cooling jacket. By analyzing the cooling water jacket of the diesel engine, taking the part of cooling water jacket in the minimum space of the flow channel near the vibration wall as the research object, a three-dimensional model of diesel cooling water jacket was built. Then according to the calculation and analysis of the vibration wall components' single knock experiment, the moving mesh was set. Then the characteristics of flow and cavitation under various inlet velocity and fluid temperature with and without wall vibration were simulated. The cavitation characteristics were compared and analyzed under the conditions of different inlet velocity and different flow field temperature with the influence of cylinder wall vibration, and the numerical theory of cooling water jacket cavitation erosion was improved, which also guided the cooling water jacket cavitation erosion experiment of the vibration. According to the simulation results, a wall vibration cavitation erosion visualization bench was designed and built, the related experimental verification was proceeded in the visual experiment platform, and the credibility of the simulation calculation was confirmed. The simulation results were validated by the experiments on this optical rig. The outcome of the study indicated that cavitation occurred in the minimum space of the flow channel, and grew up in the downstream. Higher velocity of inlet flow (from 2 000 to 3 000 liters per hour) caused stronger cavitation near the vibration wall of the cooling water flow field, but it was not significant, so the significant change was not observed in the cavitation images under the condition of different inlet flow velocity. On the contrary, higher temperature of inlet flow (above 50 °C) caused weaker cavitation, and the strongest cavitation occurred at the temperature of 50 °C. An obvious cavitation phenomenon appeared when the wall which fluid flowed by was vibrated in a very high frequency, and this change of cavitation was much stronger than those caused by various inlet flow velocity and fluid temperature. So the author thought that cooling water jacket vibration was the more important factor than cooling water flow velocity and temperature that caused cavitation. This study will be helpful in controlling the occurrence of cavitation in cooling water jacket and lowering the cavitation erosion risk of cooling water jacket.

**Keywords:** engines; computational fluid dynamics; experiments; cooling water jacket; cavitation; cavitation erosion