



太原理工大学  
TAIYUAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 缸套水侧穴蚀失效的瞬 态流固耦合仿真研究

汇报人：刘东

导师：李国兴副教授



(1) 随着排放法规的加严，柴油机从国V升级至国VI，燃烧爆发压力随之升高 ( $\geq 25\text{MPa}$ )。为了承受大负荷高爆压而选用的钢活塞，导致了活塞侧击力的增大与敲缸区域的集中，很大程度上增加了缸套穴蚀的风险。

(2) 现有关于穴蚀预防与改善的研究大多将精力集中于缸套表面抗穴蚀能力的提高，而没有从穴蚀产生的根源处（压力波的产生）来着手寻求解决方案。



主推力侧



次推力侧



## 研究意义

01

随着大功率柴油机国V升级到国VI，关于缸套穴蚀的研究迫在眉睫。

02

从根源处（空化气泡的产生）寻求解决方案是解决穴蚀问题的关键所在。

03

对大功率内燃机提高运行可靠性、延长使用寿命和降低维护成本具有重要的科学与工程意义。



## 国内研究现状

隋江华（2009年）从穴蚀机理入手，分析了引起气缸套穴蚀的原因，并提出一些基本的缓解方案。

夏冬生（2011年）结合空化理论和空泡溃灭理论，分析了缸套穴蚀与壁面振动的相关性。

时素果（2013年）利用高速全场显示技术，分析了热力学效应对空化流动结构的影响。

[1] 隋江华, 贾明莆, 孙丰雷等. 柴油机气缸套穴蚀的成因以及预防措施[J]. 船舶工程, 2009, 31(z1):45-47,62.

[2] 夏冬生, 张会臣, 于彦等. 柴油机气缸套冷却水空化流的三维数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22):167-173.

[3] 时素果, 王国玉, 陈广豪, 张敏弟. 热力学效应对非正常空化流动结构影响的实验研究[J]. 船舶力学, 2013, (04):327-335.



## 国内研究现状

董洪全（2013年）进行气缸套动态特性建模与分析分析，认为穴蚀空化是由冷却液中的压力波动引起的。

杜慧勇（2017年）结合计算流体力学和可视化试验，研究冷却水套不同流速和流场温度的空化特性。

冯建东（2017年）从表面材料的方向，研究硬段含量对TDI-BDO-PPG水性聚氨酯涂层穴蚀性能的影响。

[4]董洪全, 冯慧华, 董彪. 移动载荷作用下的气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.

[5]杜慧勇, 周文瑾, 李民等. 发动机冷却水套穴蚀机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 第33卷(8):76-81.

[6]冯建东, 齐育红, 杨帆等. 硬段含量对TDI-BDO-PPG水性聚氨酯涂层穴蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 第46卷(10):9-14.



Singhal（2002年）等人发展的完全空化模型考虑了空化流中的**相变、空泡动力学和湍流压力脉动**的影响。

Matevz Dular（2004年）通过不同结构的试验对比，认为**穴蚀结构**与穴蚀之间存在明显的**相关性**。

Chen等（2008年）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。

Ohta等（2015-2016年）通过声-固耦合建模研究了缸套**振动特征与冷却液空化**之间的相互影响关系。

国外研究动态

- [7] A. K. Singhal, H. Y. Li, M. M. Athavale, and Y. Jiang. "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model". ASME FEDSM'01. New Orleans, Louisiana 2001.
- [8] Matevz Dular, Bachert B, Stoffel B, et al. Relationship between cavitation structures and cavitation damage[J]. Wear, 2004, 257(11): 1176-1184.
- [9] 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.
- [10] Kazuhide Ohta, Xiaoyu Wang. Study on Piston Slap Induced Liner Cavitation[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2015, 283: 137-153
- [11] Ohta K, Wang X, Saeki A. Piston slap induced pressure fluctuation in the water coolant passage of an internal combustion engine[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 363: 329-344.



# 文献总结

振动特性与穴蚀的相关性

抗穴蚀材料的研究

结构参数的影响

影响穴蚀的因素  
(流速、温度等)

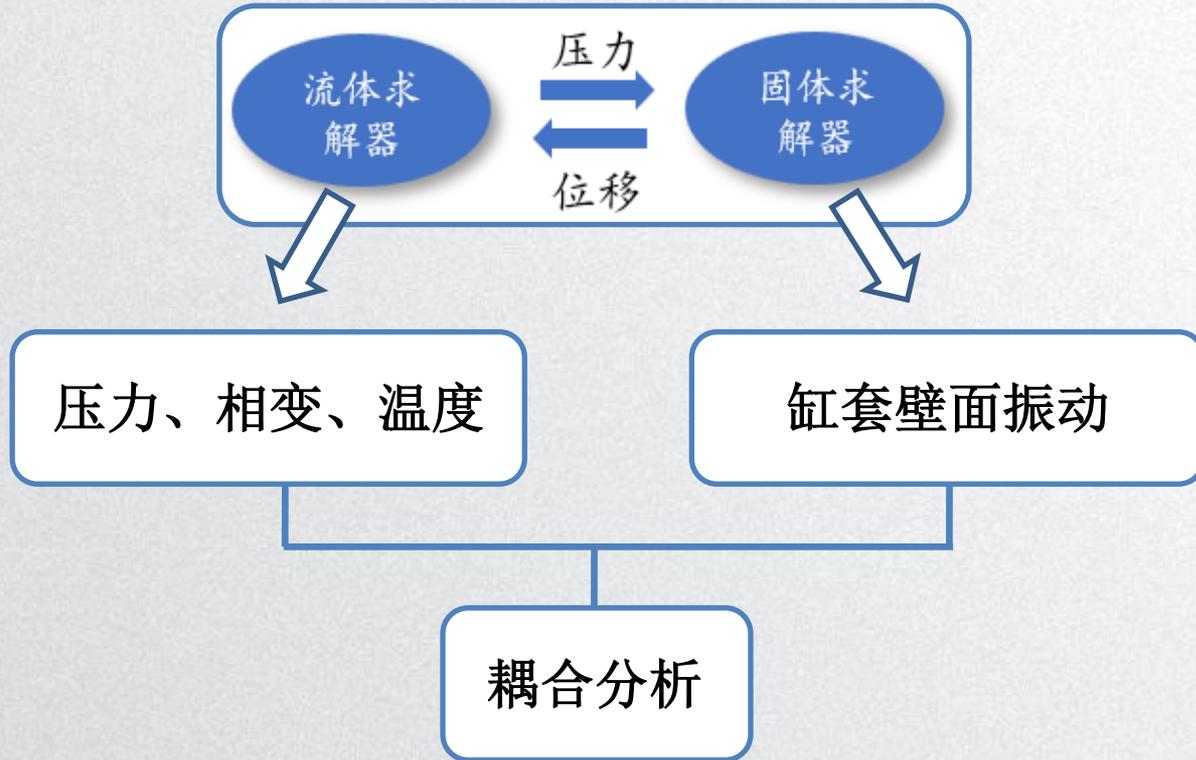
穴蚀产生的原因

文献  
总结



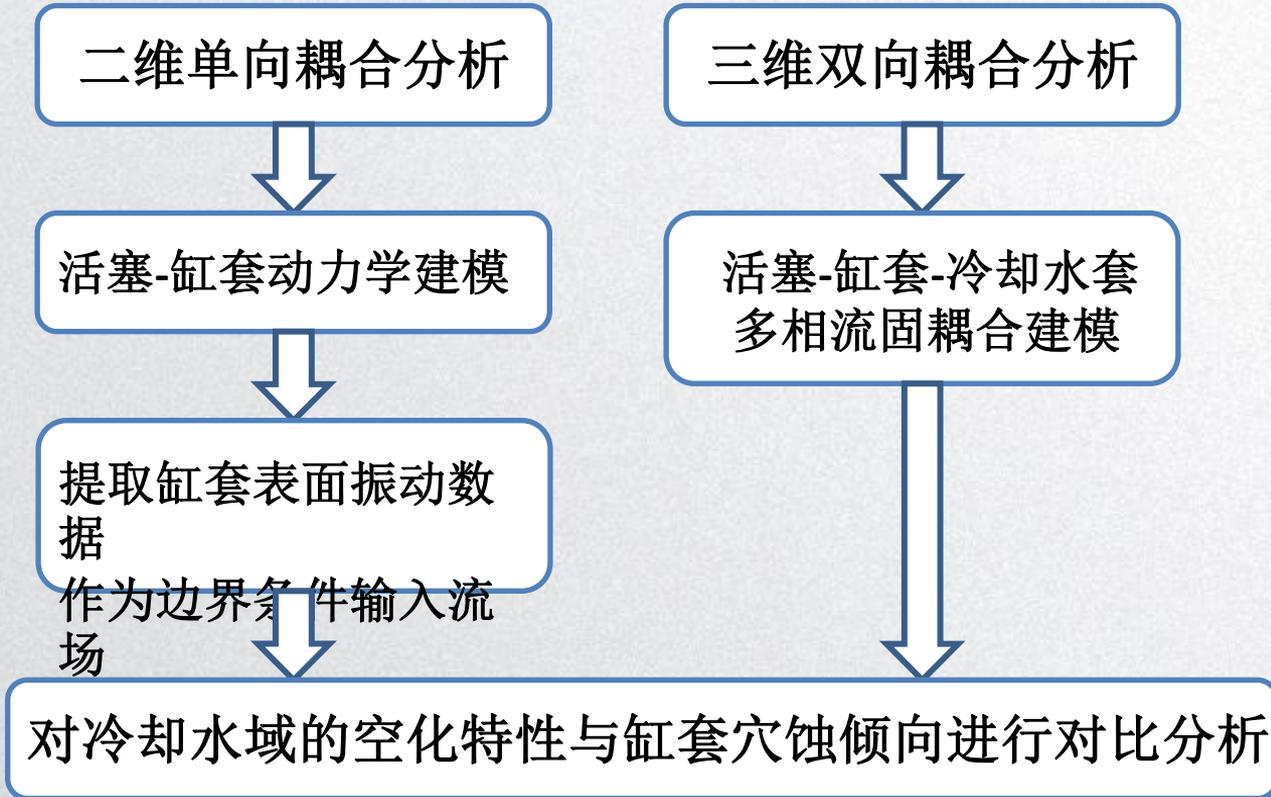


# 瞬态流固耦合仿真研究



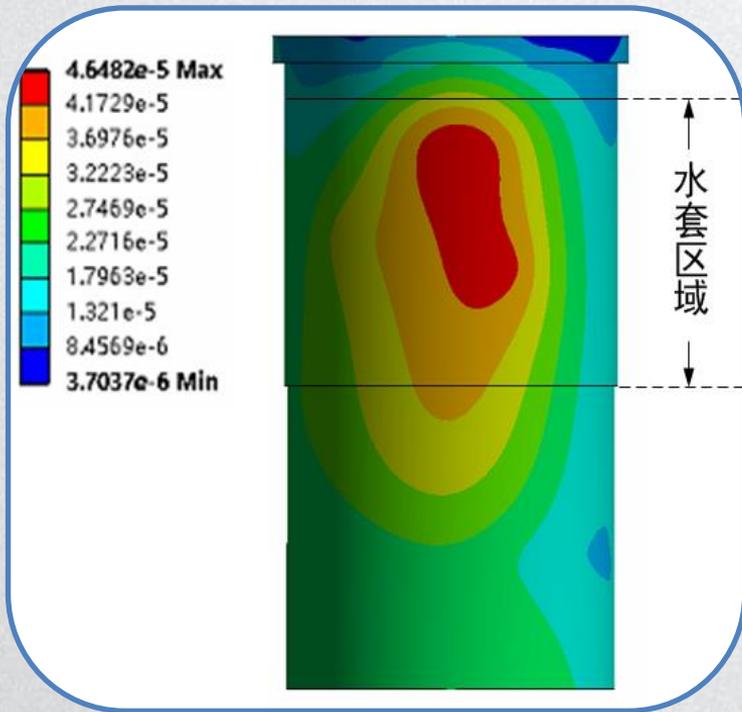


# 研究技术路线

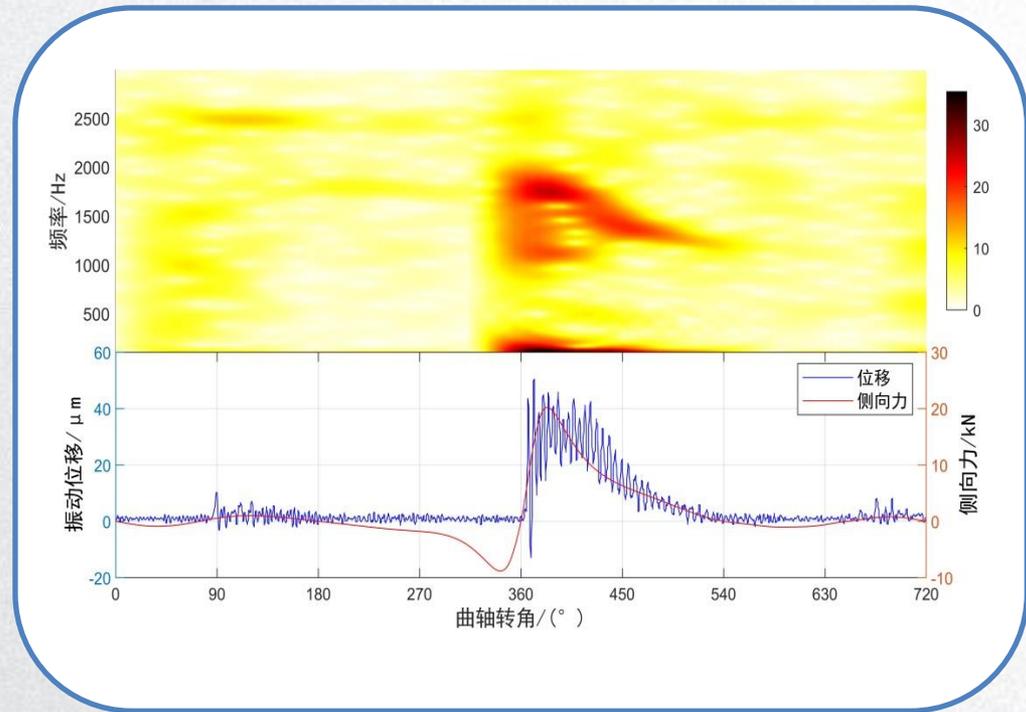




## 二维单向耦合分析



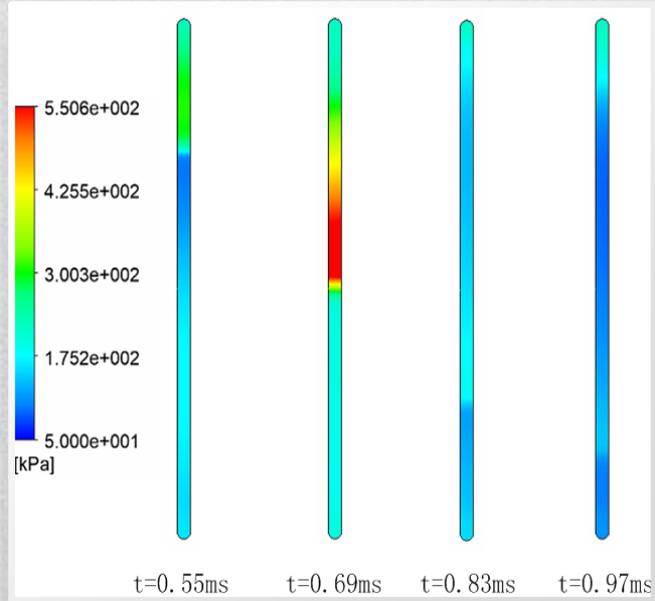
缸套总变形



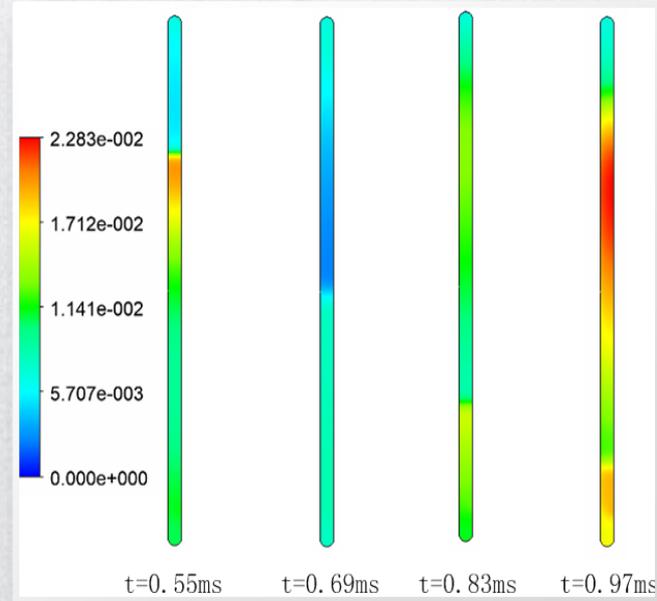
振动响应时频图



## 二维单向耦合分析



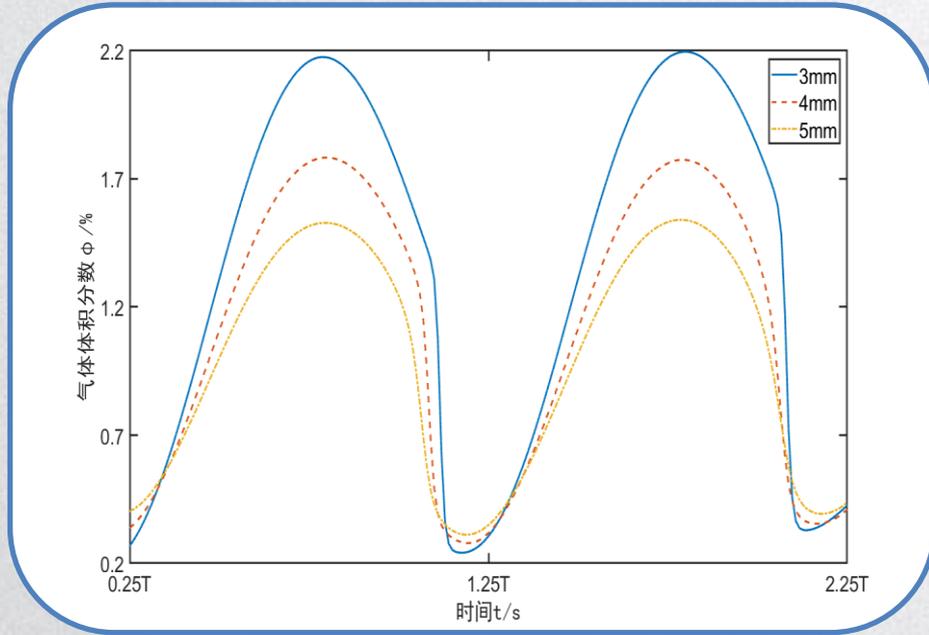
绝对压力变化云图



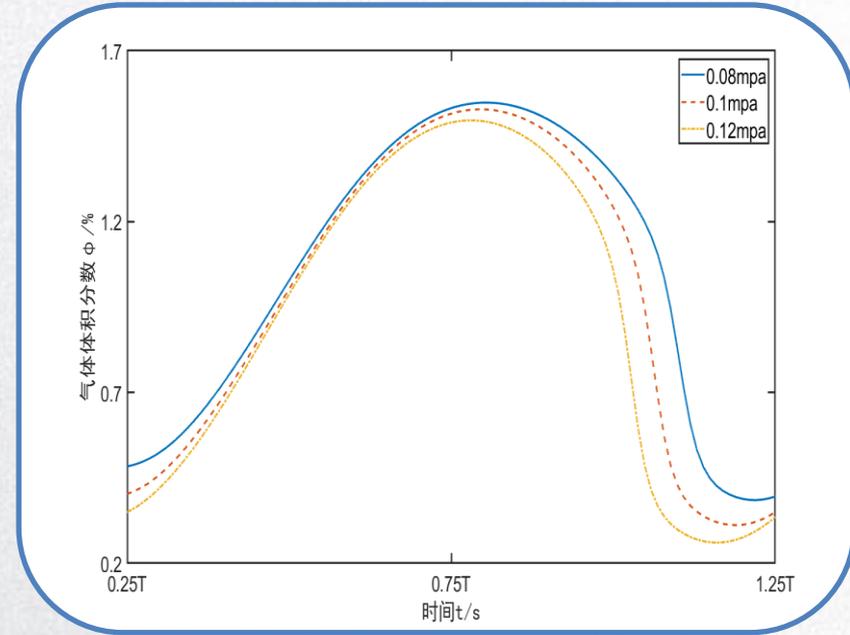
气体体积分数变化云图



## 二维单向耦合分析



不同壁厚气体体积分数变化曲线



不同出口压力气体体积分数变化曲线



### 单向耦合分析总结

高频模态振动决定了冷却水场的空化特性

空化状况呈区域性差异，模态振幅高的位置气体体积分数较高，穴蚀倾向明显。

壁面振动作用下的冷却水场存在反射波叠加效应

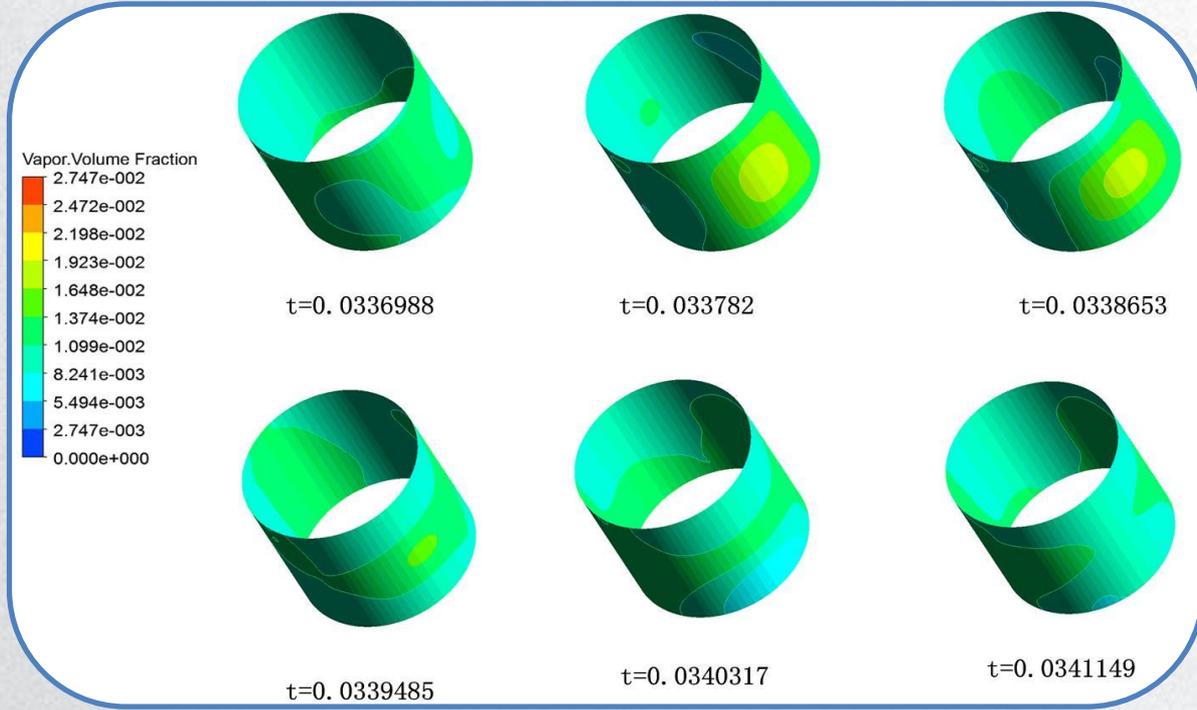
壁面振动产生的压力波与水套外壁传递的反射波相互叠加，水套内部压力梯度增大，气体体积分数增加。

冷却水套厚度对空化作用影响明显

适当增加水套厚度可以有效降低缸套穴蚀风险



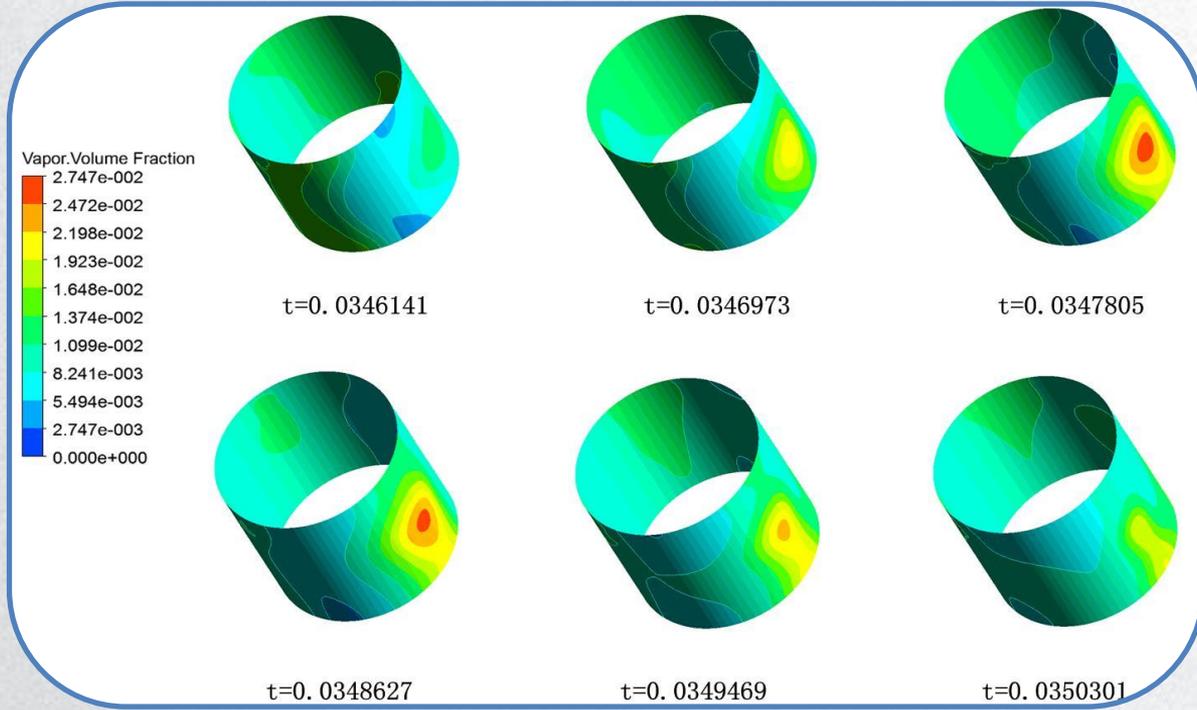
# 三维双向耦合分析



惯性力侧击作用下的气体体积分数变化



# 三维双向耦合分析



燃烧驱动的活塞侧击下的气体体积分数变化



## 三维双向耦合分析

### 总结

01

活塞侧击产生的水套内的气体体积变化主要发生在主推力侧，而次侧推力侧变化比较平缓，这也与实际发动机穴蚀发生的区域对应。

02

仿真表明约0.42毫秒【事件发生频率25kHz】壁面压力完成一次周期波动。

03

相比于换向惯性力驱动的侧击，【燃烧驱动的活塞侧击】造成的壁面压力与气体体积变化更为显著。



太原理工大学  
TAIYUAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

谢谢!