

# 基于FLUENT超声振动流场的数值模拟

舒力, 王艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月20日; 录用日期: 2023年5月1日; 发布日期: 2023年5月8日

## 摘要

超声振动辅助加工技术具有高效、高精度、高可靠性、环保等优点, 对提高加工质量和效率具有重要意义。为研究在超声振动辅助下工件的两种装夹方案的流场特性, 首先, 本文在ICEM CFD建立了二维模型并进行了网格划分。然后, 将其导入计算流体动力学软件FLUENT进行模型相关参数设置, 从而进行数值模拟分析, 对工件不同装夹方案流场的气含率进行了详细分析及讨论。最后, 对比两种不同安装方式的流场内气含率的分布及大小, 从而选择更优的工件装夹方案, 为超声振动辅助加工技术发展提供参考。

## 关键词

超声振动, FLUENT, 流场特性, 数值模拟

# Numerical Simulation of Ultrasonic Vibration Flow Field Based on FLUENT

Li Shu, Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 1<sup>st</sup>, 2023; published: May 8<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Ultrasonic vibration assisted machining technology has the advantages of high efficiency, high precision, high reliability and environmental protection, which is of great significance to improve machining quality and efficiency. In order to study the flow field characteristics of two kinds of workpiece clamping schemes assisted by ultrasonic vibration, firstly, a two-dimensional model was established and meshed in ICEM CFD. Then, it was imported into the computational fluid dynamics software FLUENT to set the relevant parameters of the model, to carry out numerical simulation analysis, and carry out detailed analysis and discussion on the vapor volume fraction of the flow field in different clamping schemes of the workpiece. Finally, the vapor volume fraction distribution range and contents of two different installation modes in the flow field were compared, to select a better workpiece clamping scheme, which provides a reference for the development of ultrasonic vibration assisted machining technology.

## Keywords

Ultrasonic Vibration, FLUENT, Flow Field Characteristics, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

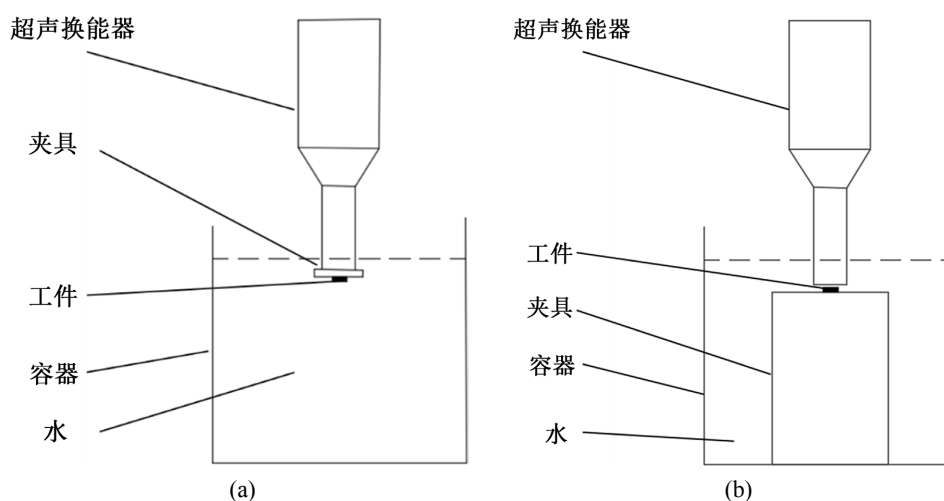
## 1. 引言

超声振动辅助加工是一种通过超声波产生的振动辅助机械加工的技术, 它可以改善加工表面质量、提高加工精度和加工效率, 并且在某些应用领域中已经得到了广泛应用。吕婷等[1]利用 FLUENT 软件模拟了超声抛光中存在的空化现象, 对流场的相关参数进行了数值模拟, 并对加工质量进行了预测。孙冰[2]对超声空化进行了数值模拟, 分析流场的流体速度, 气含率等, 进而对超声空化发生的机理和影响因素进行了分析。Zhai 等人[3]提出了超声振动辅助磁流变抛光工艺对蓝宝石晶片进行加工, 得到了晶圆的表面质量和抛光效率受复合磨料的外壳厚度影响。刘仁鑫等人[4]复合了超声与化学机械抛光工艺, 对硅片边缘进行抛光。通过研究超声振动的不同形式, 发现了椭圆超声振动能得到最优的抛光效果。Zhou 等人[5]研究了蓝宝石超声化学抛光的多物理场, 对其进行了 CFD 仿真与试验分析, 验证了超声空化作用对材料去除的影响。试验证明, 在超声加工区域内的切削液在超声正负压相的作用下能产生有益的空化效应[6] [7]。

结合上述分析, 对超声振动过程中的流场进行数值模拟, 有助于选取合适的工件安装方式以及对材料去除机理进行更深层次的研究。本文基于计算流体力学软件 FLUENT, 研究工件在不同安装方案时, 对超声振动流场进行数值模拟从而对空化现象进行研究。

## 2. 超声抛光流场几何模型建立

本文以超声振动下的流场作为分析对象, 分为工件与超声振头固定装夹和工件单独装夹两种方案来进行研究, 其试验原理图如图 1 所示。



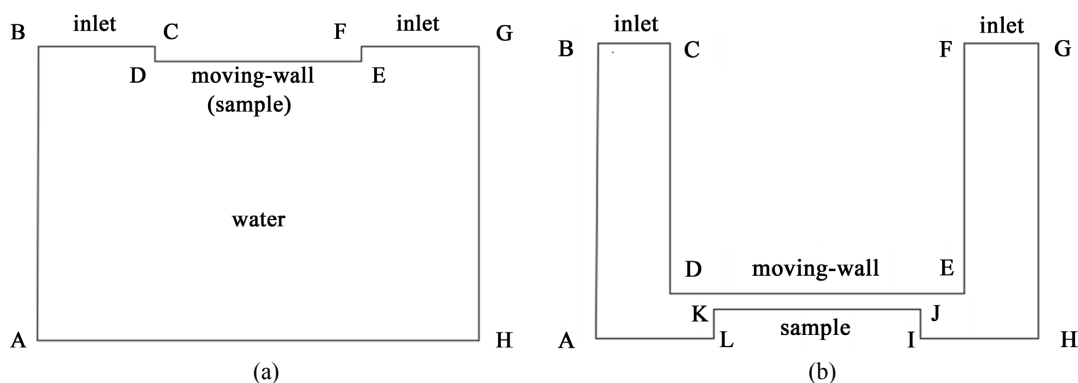
**Figure 1.** Clamping method of workpiece. (a) Workpiece and ultrasonic probe fixed clamping; (b) The workpiece is clamped separately

**图 1.** 工件的装夹方式。(a) 工件与超声振头固定装夹; (b) 工件单独装夹

### 3. 仿真结果与分析

#### 3.1. 模型的建立与网格的划分

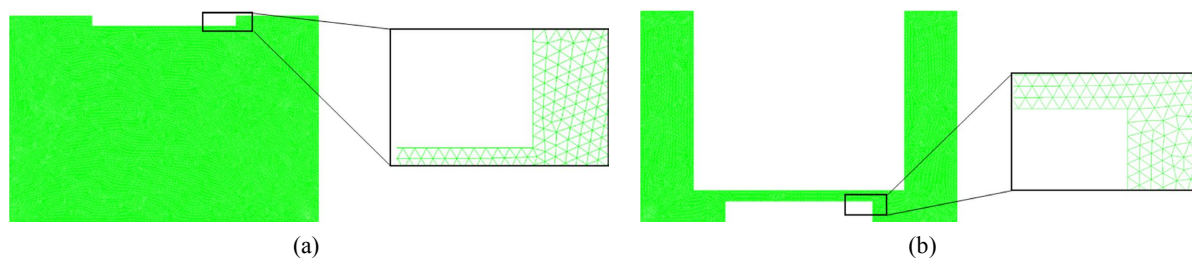
根据图 1 工件的安装方式, 为了简化计算、节约计算时间, 对模型进行二维简化如图 2 所示。只需要在 ICEM CFD 中确定好节点的位置, 然后将各个节点一次连接, 就可以得到流场的二维模型。



**Figure 2.** Simplified model of flow field. (a) Simplified model of flow field in Scheme a; (b) Simplified model of flow field in Scheme b

**图 2.** 流场简化模型。(a) 方案 a 中流场简化模型; (b) 方案 b 中流场简化模型

绘制好的模型直接在 ICEM CFD 中进行网格划分, 为了得到更为精确的计算结果, 考虑到模型的动网格类型, 对流体区域采用非结构化网格划分, 网格全局尺寸设置为 0.1, 经网格划分后, 方案 a 有 134,996 个单元, 方案 b 有 53,678 个单元, 其网格划分的二维模型如图 3 所示。



**Figure 3.** Meshing results of simplified model of flow field. (a) Meshing results of Scheme a; (b) Meshing results of Scheme b

**图 3.** 流场简化模型的网格划分结果。(a) 方案 a 网格划分结果; (b) 方案 b 网格划分结果

#### 3.2. 仿真前处理

##### 3.2.1. 边界条件的设置

图 2 流场简化模型图 2(a)中 AB、AH、GH 为壁面, BC、FG 为容器内部与外界交界面, DE 代表在超声振头上的工件。模型的详细参数以及边界类型和边界名称如下表 1 所示。

**Table 1.** Setting of model boundary conditions in Scheme a

**表 1.** 方案 a 模型边界条件设置

	长度/mm	边界名称	边界类型
AB	20	wall	wall
BC	8	inlet	pressure-inlet

## Continued

CD	1	deform	wall
DE	14	moving-wall	wall
EF	1	deform	wall
FG	8	inlet	pressure-inlet
GH	20	wall	wall
AH	30	wall	wall

图 2 流场简化模型图 2(b)中, AB、AL、IH 和 HG 代表壁面, JK 代表工件, BC 和 FG 代表容器内部与外界的分界面。模型的详细参数以及边界类型和边界名称如下表 2 所示。

**Table 2.** Setting of model boundary conditions in Scheme b

**表 2.** 方案 b 模型边界条件设置

	长度/mm	边界名称	边界类型
AB	20	wall	wall
BC	5	inlet	pressure-inlet
CD	17	deform	wall
DE	20	moving-wall	wall
EF	17	deform	wall
FG	5	inlet	pressure-inlet
GH	20	wall	wall
HI	8	wall	wall
IJ	2	wall	wall
JK	14	sample	wall
KL	2	wall	wall
AL	8	wall	wall

### 3.2.2. 流场计算参数设置

求解器设置为 transient, 加入两相流混合模型, 选择  $k-\varepsilon$  模型, 设置液态水为主相, 水蒸气为次相, 考虑两两相互作用模型选择 cavitation。模拟环境为标准大气压, 室温环境。设置动网格, 其中动边界的位移方程为:

$$y = a \sin(2\pi f \times t) \quad (1)$$

其中,  $a = 30 \mu\text{m}$ 、 $f = 20 \text{ kHz}$ 、 $t$  为运行时间。

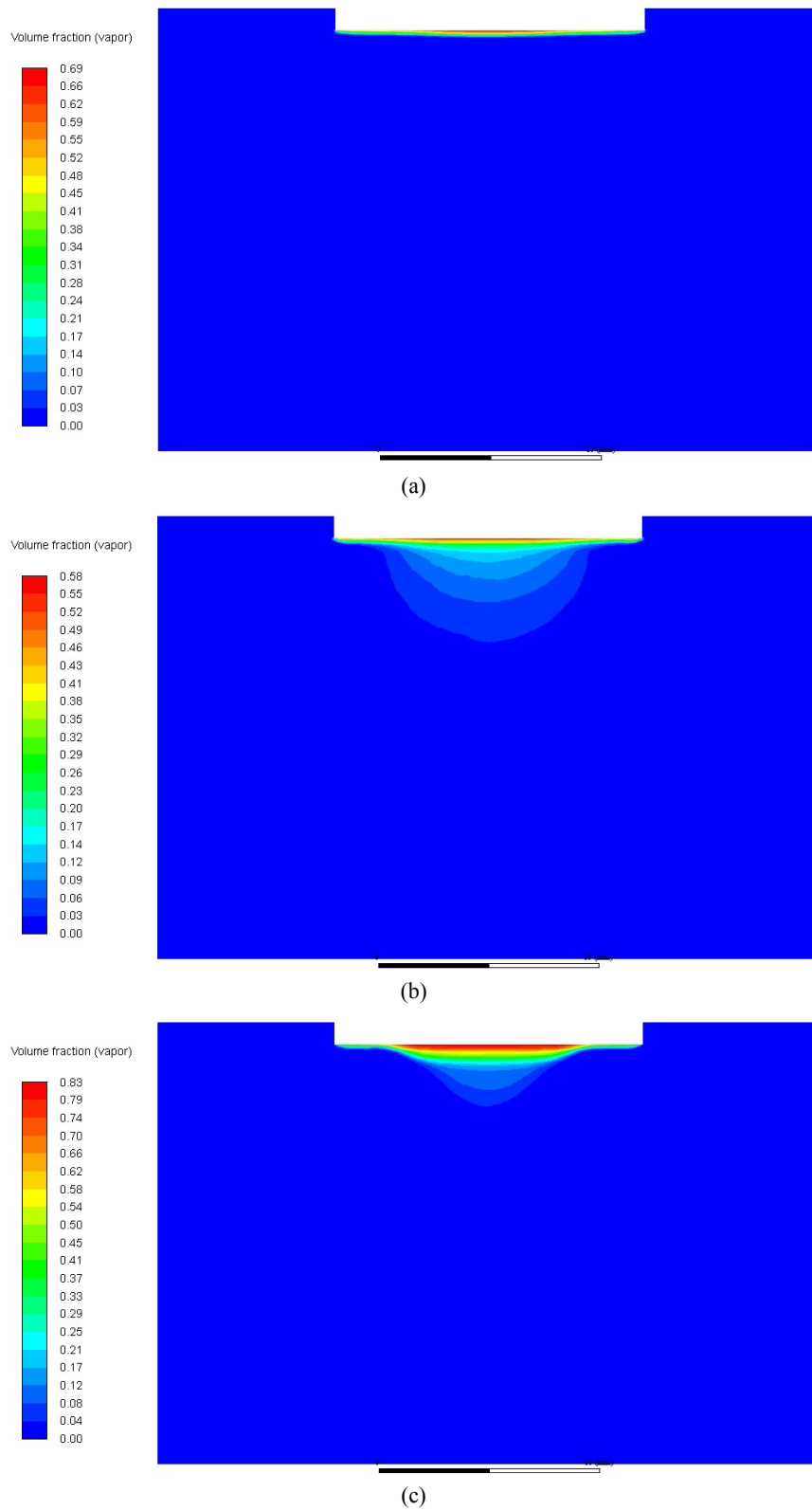
对上述方程求导则可得到速度方程:

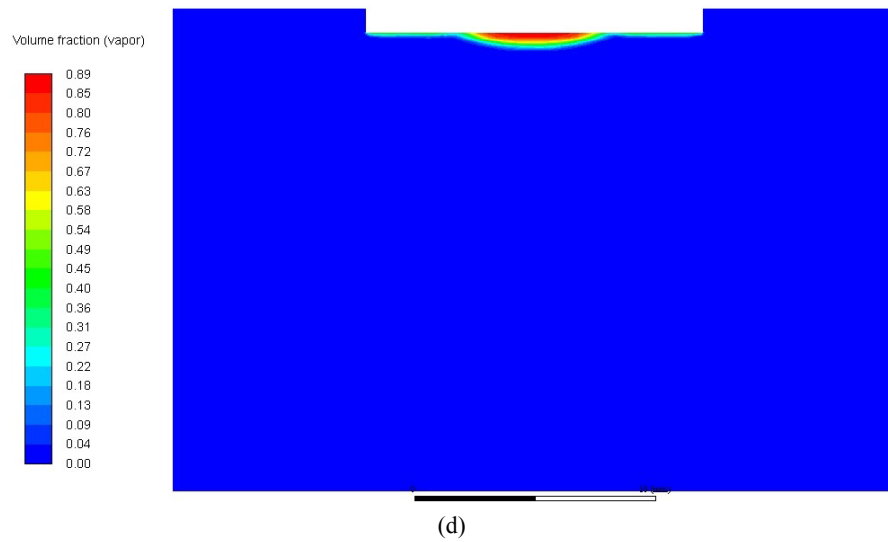
$$v = 2\pi f \times a \cos(2\pi f \times t) \quad (2)$$

### 3.3. 气含率仿真结果分析

本小节主要研究了流场内气含率的大小, 因此仿真结果主要参考了不同时刻的气含率的大小, 以及

其在流场内的分布情况。方案 a 的气含率分别在  $t = 10 \text{ ms}$ 、 $t = 20 \text{ ms}$ 、 $t = 30 \text{ ms}$  以及  $t = 40 \text{ ms}$  时刻的分布情况如下图 4 所示。



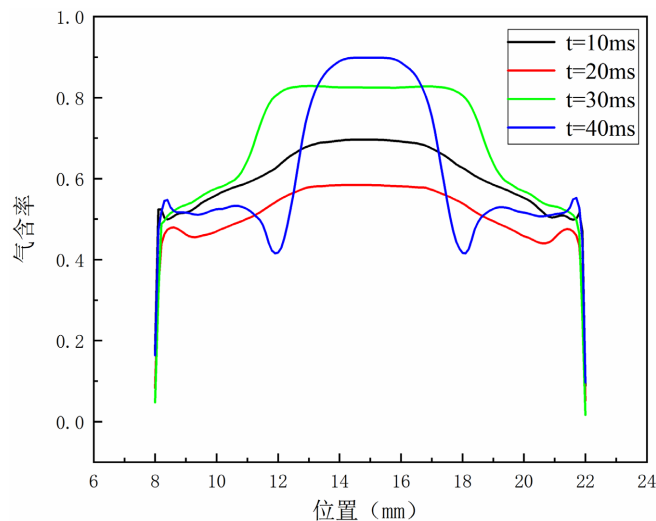


**Figure 4.** Distribution of vapor volume fraction in flow field at different times in Scheme a. (a) Vapor volume fraction at  $t = 10$  ms; (b) Vapor volume fraction at  $t = 20$  ms; (c) Vapor volume fraction at  $t = 30$  ms; (d) Vapor volume fraction at  $t = 40$  ms

**图 4.** 方案 a 中不同时刻气含率流场内分布情况。(a)  $t = 10$  ms 时气含率分布; (b)  $t = 20$  ms 时气含率分布; (c)  $t = 30$  ms 时气含率分布; (d)  $t = 40$  ms 时气含率分布

由上述仿真结果可知, 在方案 a 中, 在动边界附近, 气含率大小在  $t = 10\sim 40$  ms 时刻总体成增大的趋势, 且在  $t = 10\sim 30$  ms 这个时间段内气含率的分布范围总体呈向下扩散的趋势, 在  $t = 40$  ms 时气含率的大小到达了最大值, 同时气含率的分布范围也是较为集中; 并且在非振动区域内, 气含率大小是为 0 的, 因为在非振动区域内无法产生超声空化现象, 因此也没有空化气泡的产生, 所以气含率的大小为 0, 这是符合正常工况的。总体而言, 气含率的分布主要集中在工件振动区间, 且由该区域向下呈扩散趋势。

由图 5 可知, 气含率在动边界的中点处达到极大值, 且气含率的分布沿动边界的中点两端对称, 动边界上气含率大小有着明显的波动。在  $t = 40$  ms 时气含率极大值相较于其他时刻达到了最大值 0.8987。



**Figure 5.** Vapor volume fraction at different times on moving-wall in Scheme a

**图 5.** 方案 a 不同时刻动边界气含率大小

由图 6 可知, 绝对压力在动边界处自上而下衰减, 最大值达到了 202,538 pa, 且绝对压力的分布规律在左右两端近似对称, 在动边界处绝对压力最小, 最小值为 3540 pa, 达到了空化阈值, 此时在动边界附近产生空化效应, 因此气含率主要集中分布在动边界附近。

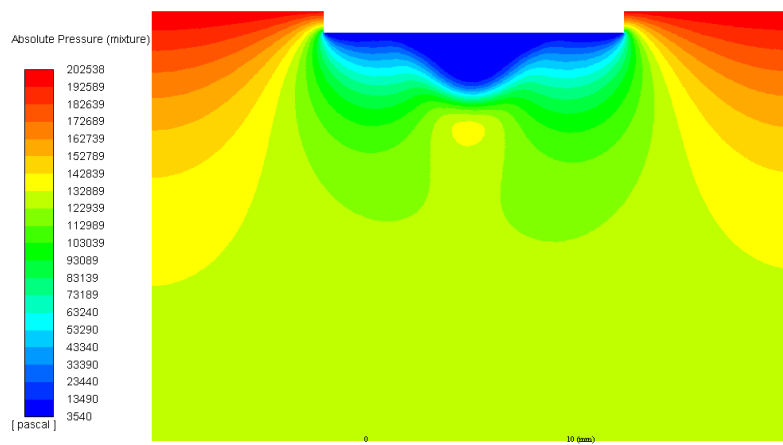


Figure 6. The absolute pressure distribution at  $t = 30$  ms  
图 6.  $t = 30$  ms 时绝对压力分布

由图 7 可知, 气含率和流场压力的峰值交替出现, 这主要是由于在绝对压力较低时, 流场内的空化气泡产生、膨胀因此气含率随之增加; 而当绝对压力过高时, 流场内原本存在的空化气泡会因此溃灭, 所以气含率随之降低。

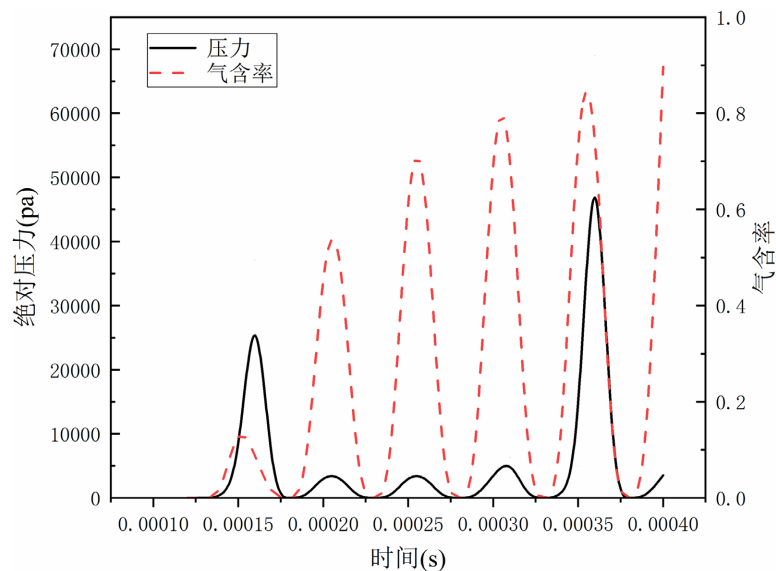
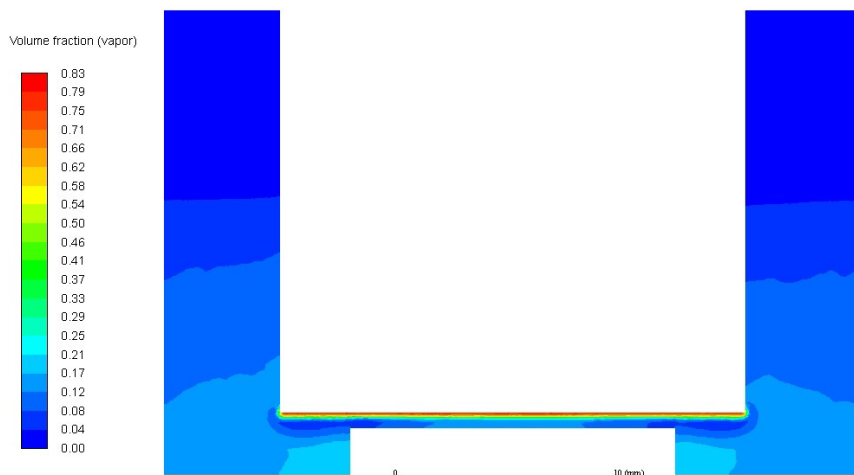


Figure 7. Vapor volume fraction and pressure at the middle point of moving-wall in Scheme a  
图 7. 方案 a 动边界中点处气含率和压力大小

方案 b 的气含率分别在  $t = 10$  ms、 $t = 20$  ms、 $t = 30$  ms 以及  $t = 40$  ms 时刻的分布情况如下图 8 所示。

由下述仿真结果分析可知, 在动边界附近, 气含率大小在  $t = 10\sim 40$  ms 时刻呈上升趋势, 在  $t = 40$  ms 时气含率的大小达到了最大值; 在非振动区域, 气含率在流场区域下端也出现了较少的分布, 这主要是由于动边界与工件的间隔较小, 而产生的气含率较大, 因此会有部分空化气泡往两端向下运动, 从而在

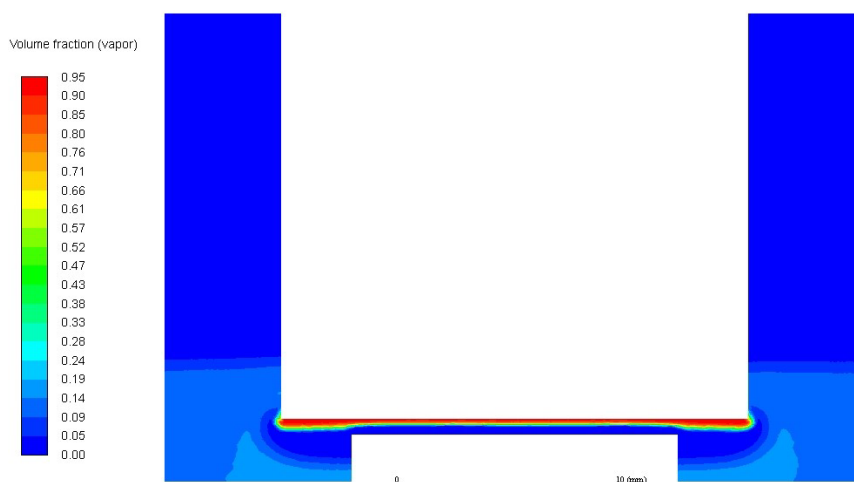
该区域内也会有较小的气含率分布。总体而言, 在上述时刻分析气含率数值总体较大, 且气含率的分布情况总体向左右两端扩散。



(a)

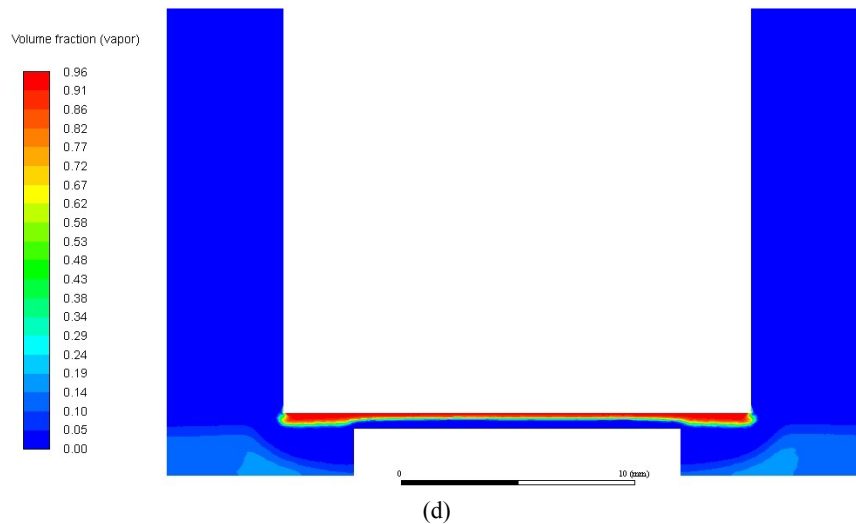


(b)



(c)

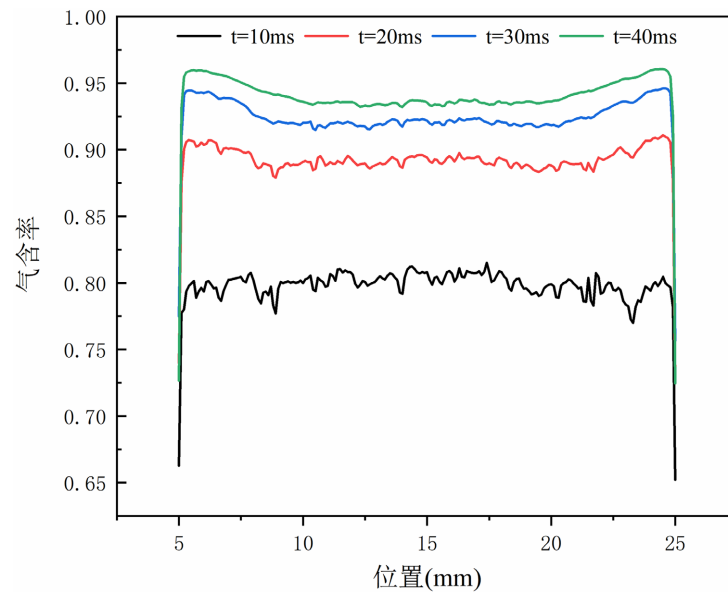




**Figure 8.** Distribution of vapor volume fraction in flow field at different times in Scheme b. (a) Vapor volume fraction at  $t = 10$  ms; (b) Vapor volume fraction at  $t = 20$  ms; (c) Vapor volume fraction at  $t = 30$  ms; (d) Vapor volume fraction at  $t = 40$  ms

**图 8.** 方案 b 中不同时刻气含率流场内分布情况。(a)  $t = 10$  ms 时气含率分布; (b)  $t = 20$  ms 时气含率分布; (c)  $t = 30$  ms 时气含率分布; (d)  $t = 40$  ms 时气含率分布

由下**图 9**可知, 方案 b 的气含率在动边界两端点处达到极大值, 总体上在同一时刻在动边界上的气含率数值的波动较小; 在不同时刻, 随着时间的增加, 气含率的大小也随之增大。在  $t = 40$  ms 时气含率达到最大值为 0.9598。



**Figure 9.** Vapor volume fraction at different times on moving-wall in Scheme b

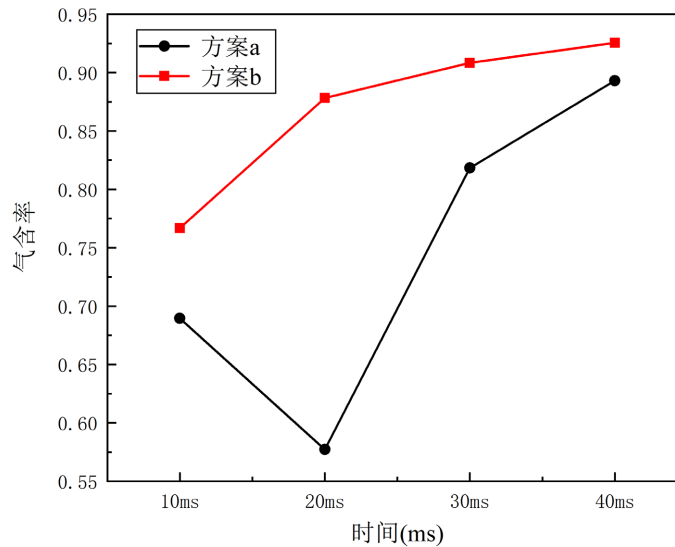
**图 9.** 方案 b 不同时刻动边界气含率大小

分别取方案 a 动边界 DE 的中点以及方案 b 动边界 DE 的中点为监测点, 分别得到在不同时刻该点的气含率具体数值, 如下**表 3** 所示。

根据下**表 3** 中监测点下方案 a 和方案 b 在不同时刻气含率大小, 得到气含率的变化趋势对比如下**图 10** 所示。

**Table 3.** Vapor volume fraction at different times at monitoring points  
**表 3.** 监测点下不同时刻气含率的大小

	方案 a 气含率大小	方案 b 气含率大小	增长比率
$t = 10$ ms	0.6896	0.7669	11.21%
$t = 20$ ms	0.5773	0.8782	52.12%
$t = 30$ ms	0.8184	0.9083	10.98%
$t = 40$ ms	0.8932	0.9256	3.63%



**Figure 10.** Vapor volume fraction trends of Scheme a and Scheme b at different times  
**图 10.** 方案 a 和方案 b 在不同时刻气含率变化趋势

由上表 3 和图 10 可知, 在同一时刻方案 b 的气含率始终高于方案 a 的气含率。在  $t = 20$  ms 时, 二种工件安装方案的气含率相差达到了最大幅度, 与方案 a 相比, 方案 b 气含率提高了 52.12%, 而在其余时刻, 方案 b 的气含率始终也高于方案 a 的气含率, 在  $t = 40$  ms 时, 二种工件安装方案气含率相差达到最小, 此时气含率相差 3.63%。考虑到气含率主要反映的是空化气泡的密度, 而空化气泡的溃灭会产生微射流对工件表面的凸峰进行去除作用, 因而气含率的大小能一定程度的反映出对工件表面的加工作用, 因此基于上述分析, 与工件振动相比, 固定工件流场的振动区间内能产生更大的气含率, 从而更有助于对工件的加工。

#### 4. 结论

本文以超声振动工件的两种安装方式为研究对象, 基于 ICEM CFD 建立二维模型并进行网格划分, 在计算流体动力学软件 FLUENT 中对其进行了数值模拟, 结果表明, 流场的主要空化区域发生在振动边界处; 在不同时刻, 固定工件流场的振动区域内的气含率都明显高于工件振动流场的气含率。结合由空化气泡溃灭所产生的能量对工件表面凸峰的冲击去除作用可知, 方案 b 固定工件安装能达到更好的材料加工效果。

#### 参考文献

- [1] 吕婷, 李艺, 陶柏霖. 模具异型腔内超声空化特性的仿真研究[J]. 工具技术, 2014, 48(10): 33-36.  
<https://doi.org/10.16567/j.cnki.1000-7008.2014.10.010>

- 
- [2] 孙冰. 基于 FLUENT 软件的超声空化数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [3] Zhai, Q., Zhai, W., Gao, B., *et al.* (2021) Effect of Core-Diameters and Shell-Thicknesses of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  Composite Abrasives on the Performance of Ultrasound-Assisted Magnetorheological Polishing for Sapphire. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **625**, Article ID: 126871. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126871>
- [4] 刘仁鑫, 杨卫平, 吴勇波. 硅片边缘超声振动辅助化学机械抛光实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 221-226.
- [5] Zhou, M., Zhong, M. and Xu, W. (2021) Effects of Ultrasonic Amplitude on Sapphire Ultrasonic Vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing by Experimental and CFD Method. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **29**, 7086-7103. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1992691>
- [6] Ye, L., Zhu, X. and Wei, X. (2020) Damage Characteristics and Surface Description of Near-Wall Materials Subjected to Ultrasonic Cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **67**, Article ID: 105175. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2020.105175>
- [7] Chen, F., Du, J. and Huang, S. (2021) Fabrication of Repairable Anti-Corrosive Superhydrophobic Surfaces with Micro-Nano Structures by Ultrasonic Cavitation. *Applied Surface Science*, **541**, Article ID: 148605. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148605>