

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905675

# 长度标准器超声清洗参数设计研究\*

史舟森<sup>1</sup>, 禹静<sup>1</sup>, 刘立人<sup>2</sup>, 林希萌<sup>1</sup>, 李东升<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 昆山市超声仪器有限公司 昆山 215345)

**摘要:**针对长度标准器在超声清洗过程中产生的损伤现象,开展了影响超声空蚀作用因素的研究。根据 Rayleigh-Plesset 方程解得气泡半径演化曲线,得出不同气核初始半径、频率和温度下,空化泡首次缩塌时的泡内最高温度与正应力响应,进而分析长度标准器损伤原因。再提出了一种新的失质法,研究超声频率、温度和超声辐射时间对长度标准器的去污效果与腐蚀阶段的影响,实验结果表明,长度标准器的清洗过程分为空化清洗期、空蚀孕育期和空蚀加速期3个阶段,并且在去除油污的过程中,空蚀作用的影响十分微小。当溶液温度 60℃,超声频率 28 kHz,辐射时间 1 min 的情况下,会有较好的清洗效果。

**关键词:**长度标准器;声空化;空化泡;空蚀;超声清洗

中图分类号: O426.4 TB921 TH711 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55 140.2040

## Design and study on length standard ultrasound cleaning parameters

Shi Zhoumiao<sup>1</sup>, Yu Jing<sup>1</sup>, Liu Liren<sup>2</sup>, Lin Ximeng<sup>1</sup>, Li Dongsheng<sup>1</sup>

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Kunshan Ultrasonic Instruments Co., Ltd., Kunshan 215345, China)

**Abstract:** Aiming at the damage phenomena of length standard in ultrasonic cleaning process, the factors influencing the ultrasonic cavitation erosion effect are studied. According to Rayleigh-Plesset equation, the evolution curve of bubble radius is solved, and the maximum temperature and normal stress response in the bubble for the first collapse of the cavitation bubble under different initial radius, frequency and temperature of the gas nucleus are obtained, and then the damage reason of the length standard is analyzed. A new method of deterioration is proposed to study the effects of ultrasonic frequency, temperature and ultrasonic radiation time on the decontamination effects and corrosion stages of the length standard. The experiment results show that the cleaning process of the length standard is divided into three stages: cavitation cleaning stage, cavitation erosion incubation stage and cavitation erosion acceleration stage. In the process of removing oil pollution, the effect of cavitation erosion is very small. When the solution temperature is 60℃, the ultrasonic frequency is 28 kHz and the radiation time is 1 minute, the cleaning effect will be better.

**Keywords:** length standard; acoustic cavitation; cavitation bubble; cavitation erosion; ultrasound cleaning

## 0 引言

长度标准器是定义、维持和复现长度单位的高精度量具,其长度为计量器具的长度标准。通过对计量仪器、量具和量规等示值误差的检定等方式,使机械加工中各种制品的尺寸能够溯源到长度基准。

量块作为世界范围内计量技术与工程测量领域中应用最广泛的长度计量标准器,其保存与清洗在工艺流程

上有着严格的指标要求。钢制量块的主要材质为特制硬质合金,不适当的保存与清洗会导致测量表面氧化锈蚀或者附着油污,进而直接影响到量块的精度。因此定期对量块进行清洗以保证量块洁净是必要的。就目前状况而言,业内量块清洗往往采用人工清洗,这种效率低下的清洗方法,例如一套 83 块的量块需花费 1 d 的时间清洗,这大大减慢了整个检定流程的作业速度,并且传统清洗中往往使用航空汽油等一类具有强烈气味的挥发性清洗剂,常在恒温室内长时间接触该类清洗剂,会对检定

人员的身心健康带来不小的危害,且废液的处理方法为静置挥发,具有安全隐患还会对环境带来一定危害。因而,急需一种绿色环保的自动化清洗方法来替代传统清洗方法<sup>[1]</sup>。

工业上金属清洗的常用方式主要包括超声波清洗、喷淋清洗、电解清洗、摇动清洗等。针对长度标准器,其中喷淋清洗往往采用高温溶剂冲刷,使得溶剂的清洗利用率低下,清洗成本高,且长度标准器经高温溶剂喷淋后需静置至室温,以避免热膨胀误差,这导致难以缩短检定流程的时间;电解清洗从机理上易侵蚀长度标准器;摇动清洗的清洗效率低,且清洗过程中可能对长度标准器带来碰撞与损伤;而超声波清洗具有清洗效率高,清洗效果好,无毒无污染等优点,其伴随发生的乳化作用更是利于长度标准器表面的油污溶解。超声波清洗能在保证清洗洁净的情况下,将原本需要为期一天的清洗时间缩短到十几分钟内,且溶剂可反复利用数次,清洗成本低。综上所述,超声波清洗技术十分适用于长度标准器的清洗。

如今超声技术已广泛应用于检测、成像等诸多领域<sup>[2-5]</sup>。其中超声清洗是利用超声空化原理<sup>[6]</sup>,通过一定声压下的超声辐射,使液体中的微小气核在正负压区交替压缩膨胀,最终导致空化泡破裂。而空化泡破裂时产生的微射流、高温和冲击波等物理效应,能够剥离量块表面的防锈油污达到清洗目的<sup>[7]</sup>。超声乳化能进一步使原本不溶于水的油污颗粒均匀分布在水中,形成分散物系,避免附着在液面的油污造成二次污染。相较于传统的量块清洗方法,超声清洗无需使用航空汽油等一系列强刺激气味的清洗剂,并且能在保证高效的清洗能力下,缩短清洗时间。

然而,过强的空化场会导致空蚀现象的产生,这不是超声清洗的目的。为了避免空蚀作用对量块的损伤,适度利用空化现象,本文从 Rayleigh-Plesset 方程出发,探究了空蚀对量块壁面损伤的产生机理,并提出了解决方法。再通过改变超声频率与溶液温度,寻找出最佳的超声频率、溶液温度以及辐射时间。

## 1 长度标准器的超声清洗

### 1.1 空化类型

根据空化泡的生长周期,可将声空化过程分为瞬态声空化与稳态声空化两种类型。前者空化泡通常只在一到几个周期内溃灭,而后的空化泡将发生持续复杂的小振幅运动,且不会发生溃灭。

声空化的类型主要由不同半径的空化泡固有频率与外部声场频率之间的大小决定,其中空化泡作简谐运动时的固有频率为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi R_e} \left[ \frac{3\gamma}{\rho} \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_e} \right) - \frac{2\sigma}{\rho R_e} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $R_e$  为空化核共振半径; $f_r$  为空化泡固有频率; $\sigma$  为液体表面张力; $P_0$  为液体静压; $\rho$  为液体密度。

当空化泡初始半径  $R_0 < R_e$  时,空化核将发展成瞬态空化。而超声清洗往往利用的是瞬态空化泡溃灭时产生的微射流与高温等效应<sup>[8]</sup>。因此,选取合适的超声频率将有效改变空化效应的强度。由式(1)可知,超声频率  $f_r$  与空化核共振半径  $R_e$  的关系如图 1 所示。

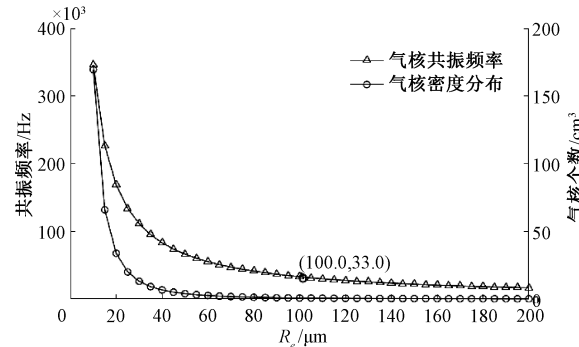


图 1 超声频率  $f_r$  与气核密度和气核共振半径  $R_e$  的关系

Fig.1 Relationship between ultrasonic frequency  $f_r$  and gas nucleus density vs. gas nucleus resonance radius  $R_e$

由图 1 可知,随着气核半径的增大,发生瞬态空化所需要的超声频率越低,也就是说,低频超声能触发液体中更多的空化泡发生瞬态空化,但由于气核密度随气核半径呈指数减小,一味减小超声频率并不能无限增大空化强度,因此可由式(1)计算得到多数空化核发生瞬时空化的合适超声频率。本文以下讨论均发生在瞬时空化下。

### 1.2 蚀坑产生原因

在方案可行性实验验证过程中,出现了量块在一些清洗情况下产生“灼烧”的现象。微观观察后发现,量块表面“灼烧”处分布有如图 2 所示的圆环蚀坑。下面具体分析这些蚀坑产生的原因。

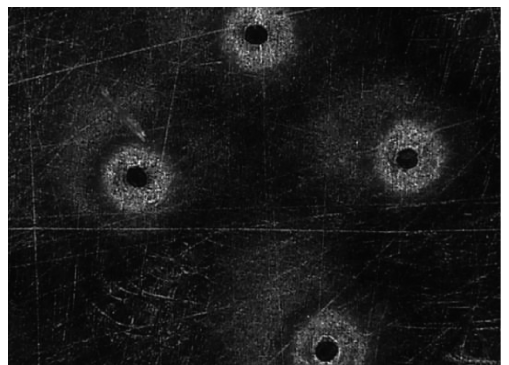


图 2 圆环蚀坑

Fig.2 Circle ring corroded pits

当空化泡压缩溃灭时会产生局部高温与高速的微射流以及其他伴随效应,这些微观极端环境可能导致量块微观表面的形貌性质发生改变,下面具体从气泡溃灭温度与微射流对硬壁面的正应力响应两个方面讨论空化作用对量块表面形貌的影响,进而分析蚀坑产生原因<sup>[9]</sup>。

以下均以单气泡的情况展开讨论。

当考虑液体黏性,不考虑可压缩性时,气泡半径随时间演化过程可由 Rayleigh-Plesset 方程得出。

$$R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[ \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + P_v - p_0 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R} - P_d(t) \right] \quad (2)$$

式中: $R$  为气泡瞬时半径; $R_0$  为气泡初始半径; $\gamma$  为绝热指数; $p_v$  为饱和蒸汽气压; $\eta$  为液体动力粘度; $P_d(t)$  为驱动声压随时间的变化。

利用五阶 Runge-Kutta 可解该二阶常微分方程。其边界条件为:

$$\begin{cases} R(0) = R_0 \\ R'(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

当方程各参数已定时,初始半径为  $R_0$  的空化核随时间的演化过程如图 3 所示。

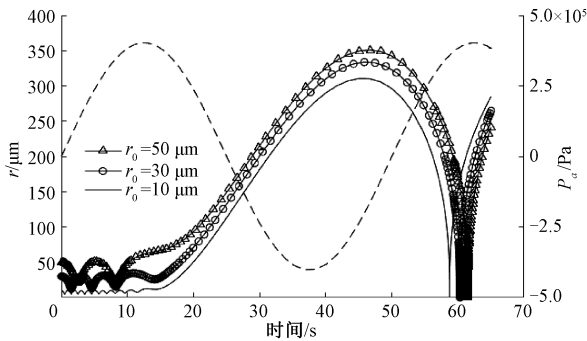


图3 气泡半径  $r$  演化曲线与驱动声压  $P_a$  的关系

Fig.3 Relationship between bubble radius  $r$  evolution curve and driving sound pressure  $P_a$

根据气泡演化曲线,可得到空化泡压缩至最小半径  $R_{\min}$  时的泡内温度  $T_g$  为:

$$T_g = T_0 \left( \frac{R_0^3 - a^3}{R_{\min}^3 - a^3} \right)^{\gamma-1} \quad (4)$$

式中: $T_0$  为液体温度; $a$  为范德瓦耳斯排斥核半径; $R_{\min}$  为空化泡压缩相内最小半径。

计算可得,空化泡瞬时空化溃灭时产生的局部高温达到 3 000 K,这种热效应会使量块微观壁面的温度骤然上升,进而导致钢制量块与溶于液体中的氧气发生氧化作用,产生氧化膜<sup>[10]</sup>。

另一方面,空化作用主要发生在固液界面上,研究表

明,气泡溃灭时产生的高速微射流是产生蚀坑现象的主要物理原因。当固体为硬壁面,且不考虑气泡间相互影响时,壁面附近的单空化泡溃灭时的正应力响应可近似表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$s \approx 2\rho_1 \left[ \frac{R^2 \ddot{R} + 2R \dot{R}^2}{\sqrt{(l/2)^2 + d^2}} - \frac{R^4 \dot{R}^2}{2((l/2)^2 + d^2)^2} \right] \quad (5)$$

式中: $l$  表示空化泡中心与壁面的垂直距离; $d$  为垂心与壁面任意一点的距离。

研究表明,空化泡垂直于壁面垂心的正应力响应最大,并且随着距离  $d$  的增大逐步减小,当空化泡中心与壁面的垂直距离增大后,气泡溃灭时产生的正应力响应也会随之减小。而正应力响应随时间的变化符合瞬时空化时空化泡的生长过程,产生应力骤变的原因,正是空化泡在正压时膨胀至  $R_{\max}$  后急剧压缩造成的。最大应力响应随空化泡初始半径  $R_0$  呈先增大后减小的趋势,因此每个不同半径的空化泡产生空化强度均不相同,且空化强度先增大后减小。

由式(5)计算可得,空化泡溃灭时产生的正应力响应峰值随着泡心的壁面垂足向外,应力大小逐渐减小。这一点正好解释了蚀坑呈环状的原因<sup>[10]</sup>。

在微观环境中的高温高压作用下,量块表面油污被剥离后,持续溃灭的空化泡将不断导致量块微观壁上发生高温氧化与氧化膜被高速微射流击碎两种现象,蚀坑产生的原因是物理与化学共同作用的结果。为避免这一现象的产生,可通过掺气减蚀的方法,在超声清洗前先通入氮气,根据亨利定律,溶液中的氧浓度会大幅减小,一方面减少了氧化的可能性,另一方面随着氮气浓度的提高,固液面之间会发生气体隔离现象,空化泡离壁面的平均溃灭距离  $d$  也会随之上升。根据上文分析可知,随着距离  $d$  的上升,空化泡溃灭时在壁面的正应力响应也会大幅减小,从宏观上反应出来的就是空化效应的减弱。

然而空化效应的减弱又会导致清洗能力的变弱,因此下文将重点讨论温度、频率与辐射时间与空化效应的关系,并寻找出最佳的清洗参数。

### 1.3 影响空化强度的因素

声场中的空化强度很大程度上由溶液中可发生空化作用的气核数量  $N_A$  决定<sup>[13]</sup>,根据上文分析可知,不同初始半径  $R_0$  的空化核所能产生的空化效应  $e(R)$  也各不相同。每秒钟表现的空化强度可表示为<sup>[14-15]</sup>:

$$E = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} N(R) \cdot e(R) dR \quad (6)$$

式中: $N(R)$  为半径为  $R$  的气核个数; $e(R)$  为半径为  $R$  的单个气核在单位时间内产生的平均空化效应。其中气核个数可由经验公式  $N(R) = kR^\gamma$  得出,而在一定声压频率下所能发生的空化核半径上下限可通过 Walton 等<sup>[16]</sup> 的公式得到,即:

$$\begin{cases} R_{\max} = \frac{2}{3\omega}(P_A - P_0) \left(\frac{2}{\rho P_A}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{2}{3P_0}(P_A - P_0)\right]^{\frac{1}{2}} \\ R_{\min}^3 + \frac{2\sigma R_{\min}^2}{P_0} - \frac{32\sigma^3}{27P_0(P_0 - P_A)^2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_A$  为超声驱动声压;  $\omega$  为超声角频率。

从式(7)中分析可知,声场参数的超声频率  $f$  与驱动声压  $P_A$  共同决定了可发生空化作用的空化核半径上限,而半径下限则由超声驱动声压  $P_A$  决定。液体温度  $T$  的变化会导致表面张力  $\sigma$ 、液体密度  $\rho$  与静压压强  $P_0$  的改变,其中表面张力  $\sigma$  的改变占主导地位。

因此可通过改变超声频率  $f$  与驱动声压  $P_A$  以及溶液温度  $T$  可有效改变空化场中可发生瞬时空化的气核半径界限,进而改变单位时间内发生空化现象的气核数量,最终影响声场空化强度。但由于单位时间内的平均空化效应十分复杂,作用效果也包含许多因素,难以定量计算。因而在实际分析声场空化强度时,往往采用别的量值来间接度量空化强度。

描述声场空化强度主要可通过空蚀失质法、声致发光法、声化学法与空化噪声法等宏观测量方法。其中空蚀失质法最为简单直观<sup>[14]</sup>。

## 2 实验与讨论

### 2.1 超声辐射时间的影响

超声辐射时间是决定了有利的空化作用是否转变为有害的空蚀作用的重要因素。因此寻找出合适的超声辐射时间区域,确定二者转化的时间节点是必要的。

传统空蚀失质法利用铝箔超声清洗前后的质量变化  $\Delta m$  与原先质量  $m_0$  的比值来反应空蚀作用的强弱。而在超声清洗实验中,由于量块表面存在油污,在清洗经过一段时间后,可能会出现空蚀的质量损失会与剥离的油污除质量一同体现在质量损失上这一情况,从而导致失质法的失效<sup>[17-18]</sup>,为解决这一问题,本文提出了一种新的实验方法。

将自来水作为试验溶液,通过记录不同时间超声辐射的质量变化,来反应超声清洗对固体表面的各个历经过程,具体方法如下:

1) 选取 7 块规格为 2 mm×9mm×30 mm 的轴承钢精板作为试验对象。通过传统清洗方法得到洁净的精板,并分别记录下初始质量  $m_1$ 。

2) 在洁净的轴承钢精板上涂抹防锈油,用来模拟实际检定过程中所需清洗的油污,并分别记录下上油后质量  $m_2$ 。

3) 在超声频率 20 kHz,超声声强 70 w/in<sup>2</sup>,溶液温度

20℃ 的环境下,分别将七块轴承钢精板置于超声波清洗槽的网篮内,清洗时间依次为 1、3、5、7、10、15、20 min,清洗完成后静置风干,并记录下超声清洗后的质量  $m_3$ 。

4) 再通过传统清洗方式清洗 7 块轴承钢精板,静置风干后记录下量块质量  $m_4$ 。

不同超声辐射时间下的质量变化实验数据如表 1 所示,为了验证空化与空蚀作用是否会同时存在,假设  $\Delta m_{ce}$  为空蚀损失的质量,  $\Delta m_{op}$  为油被污剥离的质量,若存在油污未被剥离完前就出现空蚀这一现象,即可得下式:

$$\begin{cases} \frac{\Delta m_{31}}{\Delta m_{21}} = \frac{\Delta m_{ce} + \Delta m_{op}}{\Delta m_{21}} \\ \frac{\Delta m_{14}}{\Delta m_{21}} = \frac{\Delta m_{ce}}{\Delta m_{21}} \end{cases} \Rightarrow \frac{\Delta m_{op}}{\Delta m_{21}} = \frac{\Delta m_{31} - \Delta m_{14}}{\Delta m_{21}} \quad (8)$$

分别可得到轴承钢精板自身失重量与时间以及轴承钢精板超声清洗后去除率与时间的关系,结果如图 4 和 5 所示。

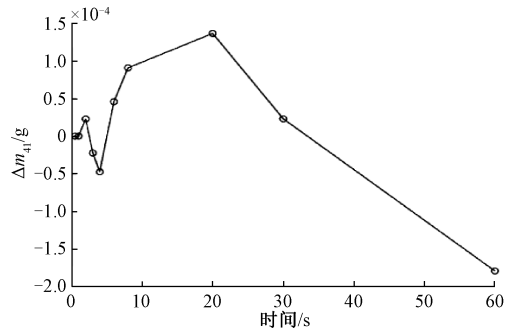


图 4 轴承钢精板自身失重量与时间的关系  
Fig.4 Relationship between self weight loss of bearing refined steel plate and time

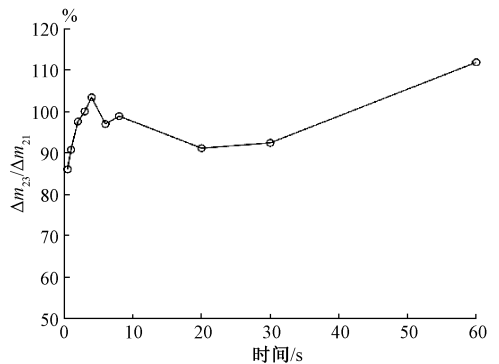


图 5 轴承钢精板超声清洗后去除率与时间的关系  
Fig.5 Relationship between removal rate of bearing refined steel plate and time after ultrasonic cleaning

由图 5 可知,轴承钢精板最开始经历空化清洗期,直至第 3 min 去除率第一次达到 100%,记为  $t_1$ ,进入空蚀



孕育期,去除率一直稳定在100%附近。直到60 min后去除率明显开始明显大于100%,空蚀正式开始进入加速期。由图4可以进一步发现,起初轴承钢精板的质量变化率一直稳定在一个水平,直到第8 min,质量开始逐步上升后下降,记为 $t_2$ 。其中上升的原因可能是在空蚀

孕育期中一部分空化泡的破裂产生的高温导致壁面局部氧化,而对壁面受到冲击还处于弹性阶段并未产生塑性变形,因而整体质量呈先上升趋势,随后随着空化过程进入加速期后,壁面不断承受空化泡破裂产生的微射流进而产生坑蚀导致质量缺失。

表1 不同超声辐射时间下的质量变化

Table 1 Mass change under different ultrasonic radiation time

(g)

时间/min	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$\Delta m_{21}$	$\Delta m_{23}$	$\Delta m_{41}$
0.5	4.356 7	4.361 0	4.357 3	4.356 7	0.004 3	0.003 7	0
1	4.351 4	4.357 9	4.352 0	4.351 4	0.006 5	0.005 9	0
2	4.392 2	4.400 4	4.392 4	4.392 3	0.008 2	0.008 0	0.000 1
3	4.453 7	4.461 5	4.453 7	4.453 6	0.007 8	0.007 8	-0.000 1
4	4.207 3	4.213 2	4.207 1	4.207 1	0.005 9	0.006 1	-0.000 2
6	4.367 2	4.373 8	4.367 4	4.367 4	0.006 6	0.006 4	0.000 2
8	4.415 1	4.420 7	4.415 5	4.415 5	0.005 6	0.005 2	0.000 4
20	4.399 9	4.407 8	4.400 6	4.400 5	0.007 9	0.007 2	0.000 6
30	4.354 5	4.361 1	4.355 0	4.354 8	0.006 6	0.006 1	0.000 1
60	4.466 6	4.474 2	4.465 7	4.466 0	0.007 6	0.008 5	-0.000 8

经上述分析可以得到,在 $t_1 = 3$  min时,超声清洗去除率第一次达到100%,而直到 $t_2 = 8$  min时,轴承钢精板的质量才开始发生明显的变化,这说明在本实验去除油污过程中,空蚀作用的影响是微乎其微的。

## 2.2 溶液温度与超声频率的影响

前述部分已经证明,溶液温度与超声频率会影响空

化作用的强度。为了在保证无空蚀现象出现的情况下,寻找到较优的超声清洗参数,本文利用三水平三因子正交实验从温度20、40、60℃,频率28、45、100 kHz,时间0.5、1、3 min中,挑选出较好的清洗方案。具体实验方法与上述实验一致。

具体三水平三因子正交实验如表2所示,经过方差

表2 三水平三因子正交实验表

Table 2 Three level and three factor orthogonal experiment table

试验号	因素				去污率/%	有无空蚀 (1无0有)	合计/%
	A(温度)	B(频率)	C(时间)	空列			
1	1(20℃)	1(28 kHz)	1(30 s)	1	88.89	1	88.89
2	1	2(45 kHz)	2(1 min)	2	90.28	0	0
3	1	3(100 kHz)	3(3 min)	3	78.13	1	78.13
4	2(40℃)	1	2	3	90.43	1	90.43
5	2	2	3	1	100	0	0
6	2	3	1	2	75.71	1	75.71
7	3(60℃)	1	3	2	94.16	1	94.16
8	3	2	1	3	84.67	0	0
9	3	3	2	1	93.15	1	93.15
$k_{j1}$	1.670 2	2.734 8	1.646 0	1.820 4			
$k_{j2}$	1.661 4	0	1.835 8	1.698 7			$K=5.204 7$
$k_{j3}$	1.873 1	2.469 9	1.722 9	1.685 6			$P=3.010 0$
$Q$	3.019 4	4.526 5	3.016 0	3.013 6			$Q=4.545 8$
$S_j^2$	0.009 4	1.516 5	0.006 0	0.003 6			$S_t^2=1.535 5$

分析得,  $B$  因子(频率)的  $F$  值远大于  $A$  因子(温度)与  $C$  因子(时间), 因此  $B$  因子对于去油的作用最为显著, 为主要因素, 其次是  $A$  因子与  $C$  因子, 分别为次要因素。不同超声辐射时间下的质量变化如表 2 所示, 可以看出:

$$K_{21} > K_{23} > K_{22}, K_{13} > K_{11} > K_{11}, K_{32} > K_{33} > K_{31}。$$

因此, 较优的搭配水平为  $A_3B_1C_2$ , 即在本次实验中选取温度  $60^\circ\text{C}$ , 频率  $28\text{ kHz}$ , 时间  $1\text{ min}$  会获取较高的清洗效果。不过值得指出的是, 清洗效果与去油速率是成正比关系的, 而去油速率又是与油膜总质量和清洗时间正相关, 因此本实验仅提供一种研究方法, 具体最优参数应视实例中的情况而定。

### 3 结 论

本文根据 Rayleigh-Plesset 方程解得不同气核初始半径的气泡半径演化曲线, 计算出空化泡首次缩塌时的泡内最高温度与正应力响应。本文讨论了影响空化强度的几种因素, 并分析了超声清洗中长度标准器产生损伤的原因。在超声频率  $20\text{ kHz}$ , 超声声强  $70\text{ w/in}^2$ , 溶液温度  $20^\circ\text{C}$  的环境下, 轴承钢精板经历了空化清洗期、空蚀孕育期和空蚀加速期。当  $t_1 = 3\text{ min}$  时, 超声清洗去除率第一次达到  $100\%$ , 空化清洗期结束。而直到  $t_2 = 8\text{ min}$  时, 轴承钢精板的质量才开始发生明显的变化, 证明了在轴承钢精板清洗油污过程中, 空蚀作用的影响十分微小。最后直至  $60\text{ min}$ , 轴承钢精板的质量明显减少, 空蚀开始进入加速期。

本文利用正交法设计了温度、频率、时间的三水平三因子实验, 并经过方差分析得到, 在本次实验中当溶液温度  $60^\circ\text{C}$ , 超声频率  $28\text{ kHz}$ , 辐射时间  $1\text{ min}$  的情况下, 会有较好的清洗效果。

### 参考文献

- [ 1 ] 谭新国. 超声波在量块清洗中的应用[J]. 工业计量, 2002, 12(3): 54.  
TAN X G. Application of ultrasonic wave in cleaning measuring block [J]. Industrial Metrology, 2002, 12(3): 54.
- [ 2 ] 陈尧, 冒秋琴, 陈果, 等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 128-134.  
CHEN Y, MAO Q Q, CHEN G, et al. Research on high-speed total focusing ultrasonic imaging method based on Omega-K algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 128-134.
- [ 3 ] 张闯, 刘成立, 刘素贞, 等. 基于电磁加载铝板应力超声检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 169-177.

- ZHANG CH, LIU CH L, LIU S ZH, et al. Ultrasonic detection of aluminum stress based on electromagnetic loading [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 169-177.
- [ 4 ] 陶钧, 白庆杰, 肖占山, 等. 超声测井仪器数据压缩算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(6): 32-39.  
TAO J, BAI Q J, XIAO ZH SH, et al. Research on data compression algorithm of ultrasonic logging tool [J]. Electronic measurement technology, 2018, 41(6): 32-39.
- [ 5 ] 门平, 董世运, 康学良, 等. 材料早期损伤非线性超声诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1101-1118.  
MEN P, DONG SH Y, KANG X L, et al. Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1101-1118.
- [ 6 ] 陈思忠. 超声波清洗技术与进展[J]. 洗净技术 2004, 2(2): 7-12.  
CHEN S ZH. Ultrasonic cleaning technology and its progress [J]. Cleaning Technology, 2004, 2(2): 7-12.
- [ 7 ] 陈伟中. 声空化物理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
CHEN W ZH. Acoustic Cavitation Physics [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [ 8 ] 陈大融. 空化与空蚀研究[J]. 中国基础科学, 2010, 12(6): 3-7.  
CHEN D R. Research on cavitation and cavitation erosion [J]. Basic Science of China, 2010, 12(6): 3-7.
- [ 9 ] 李根生, 沈晓明, 施立德, 等. 空化和空蚀机理及其影响因素[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(1): 99-104, 121.  
LI G SH, SHEN X M, SHI L D, et al. Cavitation and cavitation erosion mechanism and its influencing factors [J]. Journal of petroleum university (natural science edition), 1997, 21(1): 99-104, 121.
- [ 10 ] 陈昭运. 空蚀破坏的微观氧化过程[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(9): 1056-1059.  
CHEN ZH Y. Microscopic oxidation process of cavitation erosion [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(9): 1056-1059.
- [ 11 ] 庞博慧, 张陆陈, 卢吉, 等. 环境气压对水体中气核分布的影响[J]. 水电能源学, 2018, 36(9): 30-33.  
PANG B H, ZHANG L CH, LU J, et al. Influence of ambient pressure on the distribution of gas nuclei in water bodies [J]. Journal of Hydro-energy Science, 2018,

- 36(9):30-33.
- [12] 吴书安. 超声珩磨时空化泡溃灭对固壁面的冲击作用研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.  
WU SH AN. Impact of bubble collapse on solid wall in ultrasonic honing [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2017.
- [13] CHEN H SH, LI J, CHEN D R, et al. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water[J]. *Wear*, 2008, 265(5-6):692-698.
- [14] 林翠, 赵晓斌, 张翼飞. 金属材料的空化腐蚀行为及影响因素研究进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(1):11-19.  
LIN C, ZHAO X B, ZHANG Y F. Research progress on cavitation corrosion behavior and influencing factors of metal materials [J]. *Chinese Journal of Corrosion and Protection*, 2016, 36(1):11-19.
- [15] 刘芑宏. 超声化学反应器内空化强度表征与影响因素[D]. 天津: 天津大学, 2016.  
LIU P H. Characterization of cavitation intensity and influencing factors in ultrasound chemical reactor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [16] WALTON A J, REYNOLDS G T. Sonoluminescence[J]. *Advances in Physics*, 1984, 33(6):595-660.
- [17] 刘刘, 陈艳, 孔彦荣, 等. 超声波+四价铈去污技术研究[J]. *辐射护*, 2017, 37(1):39-44.

LIU Y, CHEN Y, KONG Y R, et al. Study on ultrasonic + tetravalent cerium deconvolution technology [J]. *Radiation Protection*, 2017, 37(1):39-44.

- [18] 傅蒙茹. 空蚀过程中不同损伤形式及“彩虹环”形成机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

FU M R. Study on different damage forms and formation mechanism of rainbow rings during cavitation erosion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

## 作者简介



**史舟淼**, 2018年于中国计量大学获学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为表面形貌测量、超声空化。

E-mail: 625960121@qq.com

**Shi Zhoumiao** received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2018, and now is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His main research interests include surface topography measurement and ultrasound cavitation.



**禹静** (通信作者), 2015年于天津大学获得博士学位, 主要研究方向为超精密测量技术、超声清洗技术。

E-mail: yujing88@cjlu.edu.cn

**Yu Jing** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2015. Her main research interests include ultra-precision measurement technology and ultrasonic cleaning technology.