

某型外啮合齿轮泵的气蚀数值模拟研究

杨成万,吴根林,杨志敏

(湖南南方通用航空发动机有限公司,湖南 株洲 412002)

摘要:为研究某型外啮合齿轮泵的空化气蚀规律,采用流体仿真软件进行数值模拟分析,研究气蚀对吸油能力的影响,分析齿轮泵在工作过程中的压力变化规律以及气泡产生发展的过程。同时针对齿轮泵侧板油孔的结构特征,构建有油孔和无油孔两种模型,评估油孔对齿轮泵气蚀风险的影响,并与齿轮泵实际使用情况进行对比。研究结果表明:气蚀可以提高齿轮泵的吸油稳定性,但会降低泵的自吸能力;油孔对气泡存在引射效果,将加剧侧板的气蚀风险。

关键词:齿轮泵;空化效应;油孔;数值计算

中图分类号:TH325 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0105-04

Numerical Simulation Reserch of Cavitation in External Gear Pump

YANG Chengwan, WU Genlin, YANG Zhimin

(Hunan Southern General Aviation Engine Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

Abstract:In order to study the cavitation corrosion law of an external gear pump, the fluid simulation software for numerical simulation is used to study the influence of cavitation on oil absorption capacity and analyse the pressure change law of gear pump and the bubble generation and development in the working process. Meanwhile, according to the structural characteristics of oil holes in the side plate of gear pump, two models with and without oil holes are constructed to evaluate the impact of oil holes on the cavitation risk of gear pump, and comparison with the actual situation of gear pump is conducted. The results show that cavitation can improve the oil absorption stability of gear pump, but will reduce the oil absorption capacity of pump, and that the oil hole has a drainage effect on bubbles, which will increase the cavitation risk of the side plate.

Keywords:gear pump; cavitation effect; oil hole; numerical calculation

0 引言

在齿轮泵齿轮旋转过程中,啮合区的低压区会析出气泡。随着气泡的生长及运动,最终将在高压区坍塌,坍塌过程会产生很高的能量密度变化,导致油液中出现较高的温度和压力,引起油液变质后失效。金属表面附近的大量气泡高频内爆,会产生循环应力冲击金属表面,最终表现为金属表面的剥蚀脱落,使得元件表面受损而失效,这样的损伤过程也称作气蚀。

产生气蚀现象的区域通常具备两方面条件,一是该区域存在大量气泡,二是该区域存在较高压力。在油液内部的气泡溃灭能量往往使得油液局部温度升高,而在近壁面的气泡溃灭则会产生高速射流冲击壁面,引起壁面的损伤。因此高压区近壁面存在气泡的位置更易发生气蚀现象,在数值仿真中可将近壁面的气体体积分数作为判断气蚀风险的依据之一。

国外对空化效应的研究起步较早,早在19世纪中期RAYLEIGH就已经开始进行研究空化效应的实验^[1]。DESHPANDE等在20世纪末提出了基于正压流体状态方

程的空化模型,但该模型只是简单将密度表达为压力的单值函数,忽略了涡旋在空化现象中的作用,无法准确预测空化的对流和输运现象^[2]。KADIVAR和SINGHAL等在2002年提出了基于输运方程的全空化模型^[3-4],该模型同时考虑了表面张力和不可凝气体对空化作用的影响。SINGHAL等还通过对具有强涡旋作用下的轴向泵、离心水泵和诱导轮进行模拟^[5],空化实验结果表明该模型具有很好的有效性。近些年来国内对空化效应开展了大量研究,陈奎生等使用全空化模型对外啮合齿轮泵进行了模拟,研究表明齿轮泵的困油区域局部压力过高,空化现象比较明显^[6]。王健等对离心式空化发生器的空化产生机制、压力脉动及其空蚀区域进行了预测,研究表明腐蚀区域主要发生在叶齿尾端和中端^[7]。气蚀现象将导致泵中存在金属屑、大磨粒,影响泵的正常使用,工程上对泵气蚀风险的评估也尤为重要。

某型外啮合齿轮泵为某发动机的辅助滑油泵。该泵从侧板上打孔引油来满足齿轮轴的润滑需求,如图1所示,油孔位置位于困油区和排油腔交接处。本文对该外啮合齿轮泵进行气蚀仿真模拟研究,为其气蚀风险的评估和改进提供依据。

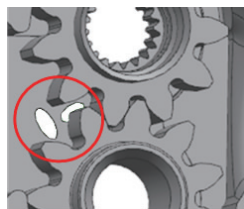


图1 润滑齿轮的油孔

1 计算域及仿真方法

1.1 物理模型及工作原理

针对某型外啮合齿轮泵,利用UG软件建立齿轮泵三维模型,抽取原始模型内型面构建计算域。齿轮泵的主要部件包括吸油流道、排油流道、主动齿轮、从动齿轮和油孔。主动齿轮及从动齿轮均为11齿齿轮,如图2所示。在齿轮泵底部侧板上有两个油孔,其中一个距啮合区较近,位于困油区域。表1为外啮合齿轮泵中齿轮的设计参数。

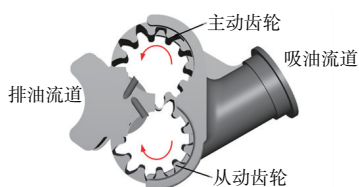


图2 某型齿轮泵结构图

表1 齿轮设计参数

参数	数值
齿数	11
模数/mm	4.2
齿厚/mm	30
分度圆直径/mm	46
齿顶圆直径/mm	50.4
齿根圆直径/mm	34.6
压力角/(°)	20

1.2 仿真方法

计算过程采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,该模型已有十多年的历史,已经被广泛证明可以提供良好的工程效果。空化模型采用SINGHAL提出的全空化模型,建立了空化流场内关于蒸汽质量分数 f 的运输方程,基本表达式如下:

$$\frac{\partial f}{\partial x} - \nabla \cdot (\rho u f) = R \quad (1)$$

式中: f 表示空化流场蒸汽质量分数; ρ 为流体混合密度; u 为流场油液沿 x 方向的运动速度; R 为油液-气体之间质量传递的源项。全空化模型是基于Rayleigh-Plesset方程推导得到,简称R-P方程。考虑表面张力和黏性力的R-P方程表达式为

$$r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = \left(\frac{p_v - p}{\rho_l} \right) - \frac{4v}{r} - \frac{2\sigma}{\rho_l r} \quad (2)$$

式中: r 为气泡半径; v 为流体运动黏度; p 为静压; σ 为流体表面张力; ρ_l 为远场流体密度; p_v 为油液的饱和蒸汽压;

$\frac{dr}{dt}$ 表示气泡半径随时间的变化率。考虑油液中液体、蒸汽和不可凝空气,可以得到流体混合密度 ρ :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1-f_v-f_g}{\rho_l} \quad (3)$$

式中: f_v 为流体内蒸汽的质量分数; f_g 为流体内空气的质量分数; ρ_v 为蒸汽的密度; ρ_g 为空气的密度。将式(2)和式(3)代入式(1)可得蒸发源项和凝结源项的表达式:

$$R = \begin{cases} 0.02 \frac{\sqrt{e}}{\sigma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{p_v - p}{\rho_l} (1 - f_g - f_v), & p \leq p_v \\ -0.01 \frac{\sqrt{e}}{\sigma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{p_v - p}{\rho_l} f_v, & p > p_v \end{cases} \quad (4)$$

式中 e 为自然常数。由此可见全空化模型不仅考虑了液体中的蒸发项,还考虑了空气中的凝结项,仿真精度较高。

1.3 边界条件

滑油型号为4050合成航空润滑油,外啮合齿轮泵的工作温度为65℃,在该温度下滑油的运动黏度为11.24 mm²/s,油液中含气量设置为6%,空气密度为1.2 kg/m³、滑油密度为880 kg/m³。工作转速为6 000 r/min,排油口压力为170 kPa,吸油口和两个油孔压力为101 kPa。采用非定常计算,旋转一周需0.01 s,旋转一周共计550步。

1.4 计算网格

齿轮泵网格如图3所示。在工作状态下对网格进行网格无关性分析,如图4所示。当网格量大于24万之后,外啮合齿轮泵的供油流量稳定,误差在1%以内,取总网格量28万的网格用作后续研究。

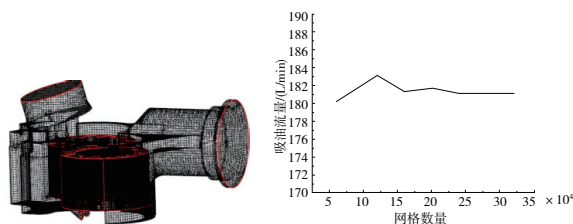


图3 齿轮泵网格

图4 网格无关性验证

2 结果及分析

2.1 空化对吸油能力影响分析

为了研究空化对吸油能力的影响,分别计算了考虑空化模型和不考虑空化模型的情况。图5为两种状态下吸油流量在一个旋转周期内的变化情况。不考虑空化时,吸油瞬时流量随着齿轮啮合点的变化发生实时变化,在一个齿轮旋转周期内,存在22个波峰和22个波谷。考虑空化时,吸油瞬时流量更加平稳,曲线趋于波浪形,波峰和波谷变为11个,整体流量略有下降。对比结果表明存在空化现象时,泵的吸油稳定性提高,但自吸能力略微下降。

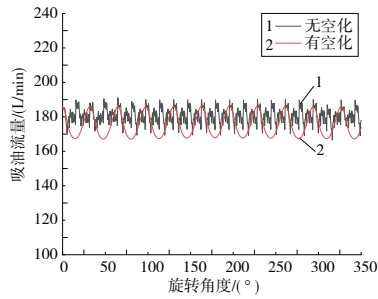


图5 空化对吸油流量的影响

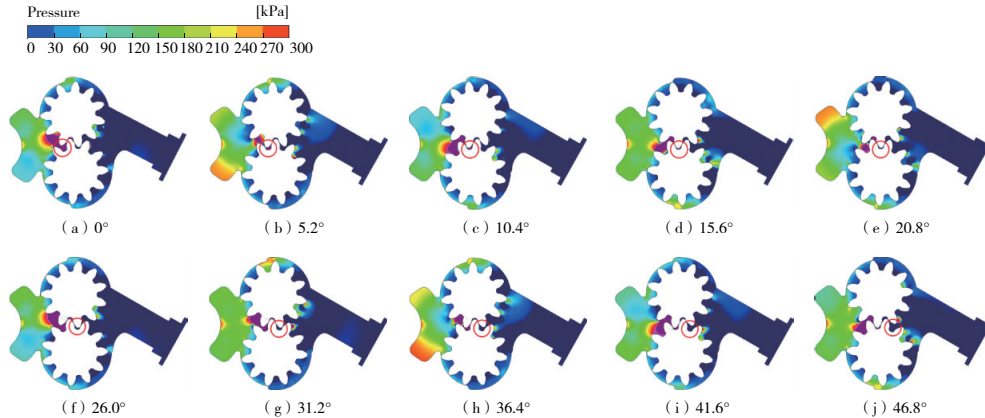


图6 不同角度下中间截面压力分布图

困油区中压力变化梯度较大,压力云图不能将这种变化表现出来。为了便于监测润滑油泵中压力变化过程,在啮合区域设置了2个压力监测点,位置如图7所示。

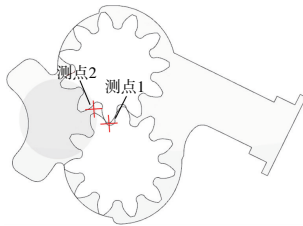


图7 齿轮泵压力监测位置

测点1以及测点2为固定位置点,不随齿轮旋转而改变坐标,因此这两处一直处于啮合区,随着齿轮的转动,啮合腔不断经历困油压缩和困油膨胀过程,这两处监测点压力也呈周期性变化,如图8所示。测点1为处于啮合容积较小的位置,最高瞬时压力可达1.4 MPa,测点2所处的啮合腔体积较大,无法完全闭合,最大瞬时压力达1.1 MPa。

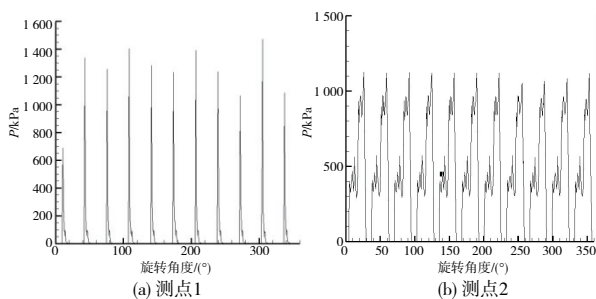


图8 监测点压力波动

2.2 空化过程分析

图6为不同角度下辅助润滑油泵中间截面压力变化图。取10个连续计算结果,每个计算结果之间间隔 5.2° 。对图中画圈的啮合腔进行分析,从 $0^\circ \sim 20.8^\circ$,该啮合腔一直处于收缩状态,压力渐增;而从 $20.8^\circ \sim 46.8^\circ$,啮合腔一直处于扩张状态,压力减小。随着齿轮的转动,吸油腔的压力变化不大,进口压力保持在0.1 MPa左右,排油腔压力有较明显的区别,其中近困油区处压力较高,且整个困油区域有较大范围的变化。

图9为不同时间中间截面气体体积分数图,对图中标示的区域4进行分析。在初始 0° 时刻,区域4体积较小,此时压力较大,啮合腔内充满油液;在 5.2° 时该区域体积增大,压力降低,气泡开始产生,形成气液两相;在 $10.4^\circ \sim 20.8^\circ$ 时,气泡发展至充满整个啮合腔;在 26.0° 时,由于齿轮不再啮合,气泡中间开始凹陷;从 $31.2^\circ \sim 46.8^\circ$ 时,气泡逐渐脱落,并破碎成小气泡。结合压力变化图可以看到,随着齿轮旋转,在啮合腔体积由小变大时压力减小,气体从油液中析出形成气泡,随着啮合腔体积的增大,气泡逐渐发展直至充满整个啮合腔,当啮合腔不再封闭时,气泡开始凹陷破裂,并粘附在齿轮上继续转动,当气泡与齿轮面之间的粘附力不足以克服惯性力,气泡从齿轮面上逐渐脱落,并分裂成更小的气泡。气泡运动至高压区时,由于高压区压力可达1 MPa以上,气泡极易溃灭,产生气蚀风险。

图10为高速相机实拍的齿轮泵中气泡发展过程。气泡由啮合区初生,随着啮合腔容积增大,气泡逐渐充满整个啮合腔,随着齿轮啮合结束,气泡凹陷并吸附在齿轮表面,大气泡逐渐破裂成小气泡并完全从齿轮表面脱落,这与数值模拟的气体体积分数变化过程基本一致。

2.3 油孔影响分析

油孔的主要作用是给主动齿轮轴和从动齿轮轴进行润滑冷却。为研究油孔的影响,分别对存在油孔和不存在油孔两种模型进行了数值模拟。图11为两种模型侧板气体分布对比图,两个油孔入口处均有气泡存在,其中近啮合区的气体体积分数更大,表明油液通过油孔时,将带动气泡运动至小孔入口附近,加剧了小孔附近的气蚀风险。

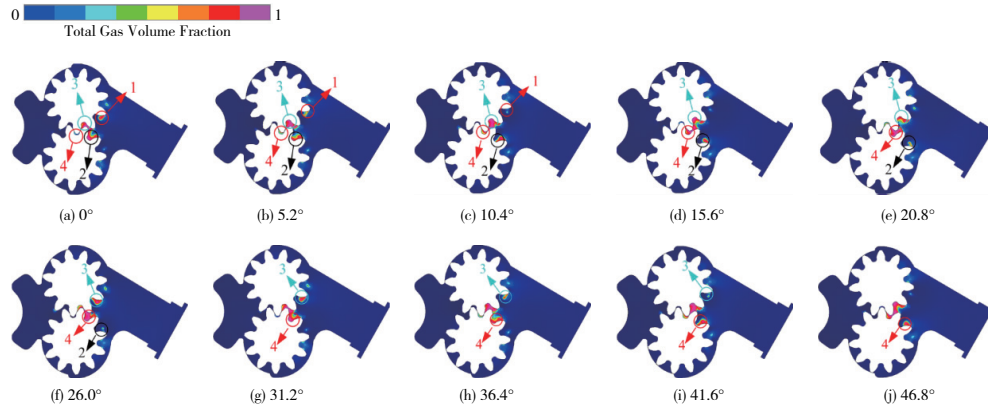


图9 不同角度下中间截面气体体积分数图

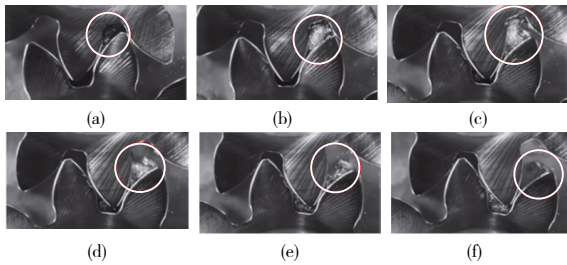


图10 高速相机实拍齿轮泵气泡变化过程

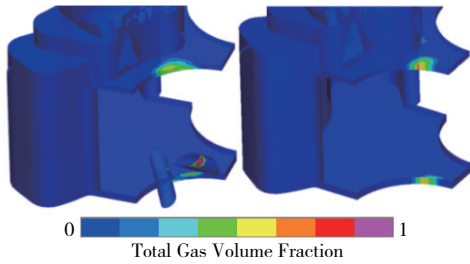


图11 两种模型侧板气体分布对比图

在仿真软件中,可以通过显示与气泡溃灭时相关的功率耗散来展示空化对泵的损伤效果。这种损伤效果通过损伤功率表现,损伤功率单位为 W,损伤功率越大表明对泵的损坏越严重,根据经验当损伤功率超过 5×10^8 W 时空化将对泵体造成破坏,将该区域被认为是气蚀风险区域。数值模拟仿真得到的侧板附近气蚀风险区域与实际使用一段时间后的齿轮泵气蚀位置对比如图 12 所示。气蚀风险主要在油孔和卸荷槽台阶处,与仿真结果基本一致。

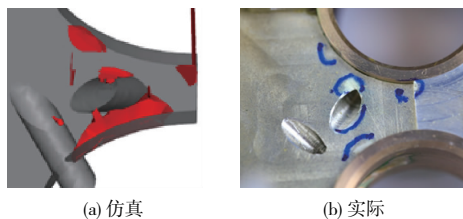


图12 气蚀风险区域对比图

3 结语

通过对某型齿轮泵的仿真研究,结合齿轮泵实际使用中的气蚀情况,可以得到以下结论:

- 1) 气蚀可以提高齿轮泵的吸油稳定性,但降低了吸油能力;
- 2) 随着齿轮泵转动,啮合区压力先减小再增大,随着压力的减小,气泡从啮合区初生,经历生长、发展、凹陷、破裂、脱落、碎裂等过程,形成大量小气泡,小气泡最终运动到高压区域,在高压区域溃灭引起气蚀风险;
- 3) 油孔对气泡存在引流效果,使得油孔入口处存在明显的气蚀风险,这与实际使用情况相符。

参考文献:

[1] RAYLEIGH L. VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1917, 34:94-98.

[2] DESHPANDE M, FENG J Z, MERKLE C L. Cavity flow predictions based on the Euler equations [J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116(1):36-44.

[3] KADIVAR E, KADIVAR E, JAVADI K, et al. The investigation of natural super-cavitation flow behind three-dimensional cavitators: full cavitation model [J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 45:165-178.

[4] LI H Y, SINGHAL A K, ATHAVALE M M, et al. Application of the full cavitation model to pumps and inducers [J]. The International Journal of Rotating Machinery, 2002, 8(1):45-56.

[5] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H Y, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3):617-624.

[6] 李玲辉,陈奎生,湛从昌. 考虑空化的外啮合齿轮泵流量特性仿真分析 [J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2021, 44(4):262-269.

[7] 王健,刘厚林, MATEV (z) D. 离心式水力空化发生器空化空蚀机制试验研究 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(14):49-55.

收稿日期:2022-05-09