

# 高速磁力泵隔离套的磁涡流损失

孔繁余<sup>1</sup>, 张 勇<sup>1</sup>, 邵 飞<sup>1</sup>, 王志强<sup>2</sup>, 薛 玲<sup>1</sup>

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 上海凯泉泵业(集团)有限公司, 上海 201804)

**摘 要:** 为了快速准确地研究不同金属材料的隔离套对高速磁力泵磁涡流损失的影响。该文利用 ANSYS 软件分别对采用不同金属材料 TC4 和 1Cr18Ni9Ti 的磁力泵隔离套进行有限元分析, 得到涡流损失数值分析结果, 并与涡流损失试验值进行对比。对比表明: 在除隔离套材料不同外其余完全相同的条件下, 1Cr18Ni9Ti 材料隔离套产生的涡流损失是 TC4 材料的 2.26 倍, 模拟值与试验值基本吻合。磁涡流损失的模拟方法是可行的。验证了 TC4 钛合金是高速磁力泵隔离套的理想材料。

**关键词:** 泵, 有限元, 涡流, 高速磁力泵, 隔离套, 数值模拟

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.012

中图分类号: TH317

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0061-05

孔繁余, 张 勇, 邵 飞, 等. 高速磁力泵隔离套的磁涡流损失[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 61—65.

Kong Fanyu, Zhang Yong, Shao Fei, et al. Eddy current loss of containment shell of high-speed magnetic driving pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 61—65. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

磁力泵采用磁力传动, 实现力矩的无接触传递而设计的无轴封、无泄漏、无污染的工业用泵<sup>[1]</sup>。为满足军工、航天等重要领域对泵体积、扬程及无泄漏的要求, 开发的高速磁力泵有体积小、扬程较高和效率高等优点。随着变频技术的普及及节能环保的需要, 高速磁力泵的应用前景会越来越广。

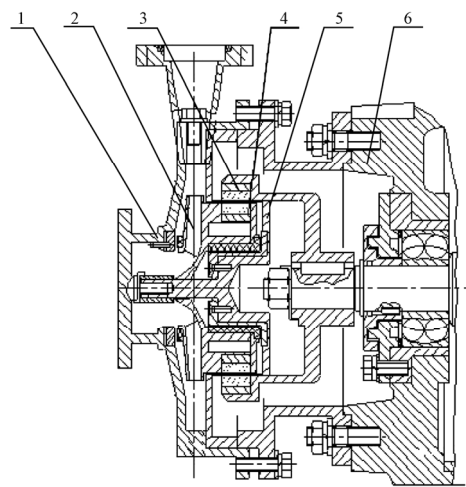
高速磁力泵的核心部件隔离套, 在内、外磁转子高速旋转运动时, 由于磁场方向和大小按一定规律随时间而变化, 从而使隔离套壁壳中的磁通量也随时间而变化, 作为导体将产生环绕磁通量变化方向的涡流, 即环形电流<sup>[2]</sup>, 产生涡流损失和传递效率的降低, 直接影响高速磁力泵性能。文献[3]提出用经验公式估算磁力泵的涡流损失及转速提高, 涡流损失增加。随着计算机辅助工程 CAE (computer aided engineering) 技术的不断应用, 已经能够快速准确地对磁性联轴器的磁场进行数值模拟<sup>[4]</sup>。为了快速准确地比较高速磁力泵不同金属材料隔离套的涡流损失功率, 本文对 TC4 钛合金和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的隔离套分别进行有限元分析, 得到涡流损失值, 并利用试验对分析结果的正确性进行验证。为 TC4 钛合金在磁力泵领域的应用提供依据。

## 1 泵结构与基本理论

### 1.1 高速磁力泵的结构

高速磁力泵主要由泵体、叶轮、外磁转子、内磁转子、隔离套、高速电机等部件组成。结构如图 1 所示,

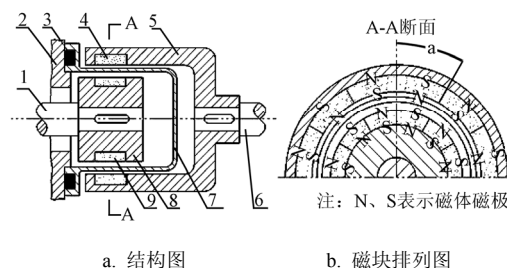
叶轮与内磁转子体为一体, 采用动轴式结构, 轴固定在隔离套上, 减少轴向尺寸; 普通电源通过变频器后调节高速电机达到规定转速。磁性联轴器结构如图 2 所示。



1. 泵体 2. 叶轮 3. 外磁转子 4. 内磁转子 5. 隔离套 6. 高速电机

图 1 高速磁力泵结构

Fig.1 Structure of high-speed magnetic driving pump



1. 泵轴 2. 泵盖 3. 静密封 4. 外磁块 5. 外磁钢体 6. 驱动轴 7. 隔离套 8. 内磁钢体 9. 内磁块

图 2 磁性联轴器结构示意图

Fig.2 Magnetic coupling structure

收稿日期: 2010-11-03 修订日期: 2011-12-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAF34B10)。

作者简介: 孔繁余, 教授, 博士研究生导师, 主要从事流体机械研究。镇江江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: kongm@ujs.edu.cn

1.2 基本假设

隔离套涡流损失数值计算是一个非线性的三维问题。为简化模型，减少计算量。假设磁转子的气隙尺寸远小于其轴向尺寸，这样就可以忽略端部效应,且结构对称，可以把三维问题转化为二维问题进行处理<sup>[5-6]</sup>；隔离套的涡流损失发生在相对交变磁力线的切割下，建立模型使隔离套转动，内、外磁转子不动，隔离套与内、外磁转子的相对运动状态不变；只计算原交变磁场在隔离套内所产生的涡流，忽略由涡流产生的附加交变磁场在隔离套内产生的涡流；内外磁体沿径向均匀磁化；同时假设内转子轭铁内侧和外转子轭铁外侧不发生漏磁。从工程角度看，内转子轭铁内侧和外转子轭铁外侧为磁场的边界线<sup>[7]</sup>。

1.3 基本方程

电磁场理论用 Maxwell 方程组来描述和求解,在无自由电荷的磁性联轴器系统中，Maxwell 方程组<sup>[8]</sup>可写成

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\nabla$  为矢量微分算子； $H$  为磁场强度，A/m； $J$  为传导电流密度，A/m<sup>2</sup>； $B$  为磁感应强度，T。

为简化模型，在模型中引入磁矢势  $\vec{A}$ ，它的旋度是磁感应强度  $\vec{B}$ ，即

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2)$$

则上述的 Maxwell 方程组可化为

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \vec{J} \quad \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \quad (3)$$

如果选择  $A$  使其满足  $\nabla \cdot A = 0$ ，则上式可化为

表 1 磁性联轴器的参数  
Table 1 Parameters of magnetic coupling

永磁体材料	隔离套材料	磁极数 目 $m$	转子轴向长度 $L/\text{mm}$	内磁转子半径 $r_2/\text{mm}$	气隙 $l_g/\text{mm}$	内磁体厚度 $t_{im}/\text{mm}$	外磁体厚度 $t_{om}/\text{mm}$	内转子轭铁厚度 $t_{il}/\text{mm}$	外转子轭铁厚度 $t_{ol}/\text{mm}$	隔离套厚度 $t/\text{mm}$	电机转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	TC4	24	16	36	2.5	3.5	3.5	4	4	0.6	7800

2.2 定义属性及网格划分

选用 PLANE53 作为分析单元，设置自由度为磁矢势 AZ，转速为常数 OMEGAZ，并把该单元指定给隔离套。分别定义永磁体、轭铁、气隙及隔离套材料属性，见表 2。为每个永磁体建立局部坐标系，把已选的单元，已定义的材料属性以及坐标系分配给模型的各个区域；采用 ANSYS 自带的智能网格划分器划分网格，细化隔离套区域的网格，图 3 为模型网格放大图。

表 2 磁性联轴器的材料属性  
Table 2 Material properties of the magnetic coupling

部件	材料	矫顽力 $A/\text{m}$	相对磁导率	电阻率 $/\mu\Omega\cdot\text{m}$
永磁体	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	700000	1.03	/
轭铁	DT4	/	184000	/
隔离套 1	TC4	/	1	170
隔离套 2	1Cr18Ni9Ti	/	1	75
气隙	/	/	1	/

$$\nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \quad (4)$$

$$\vec{J} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 j_0 \quad (5)$$

式中， $\varepsilon_0$  为自由空间的介电常数，F/m； $\mu_0$  为自由空间的磁导率，H/m； $\frac{\partial E}{\partial t}$  为电场对时间的变化率； $j_0$  为自由空间的电流密度，A/m<sup>2</sup>。

对于二维静磁场问题  $\frac{\partial E}{\partial t} = 0$ ，又只考虑到  $\vec{B}$  的  $XY$

平面内的分量，所以磁矢势只有  $AZ$  分量。这样，可用单一的  $AZ$  描述以上的方程。再加上边界条件边界  $\vec{A} = 0$ ，为第一类边界条件<sup>[9-10]</sup>，就可以求出结果。

2 数值模拟

GCB70-80A 高速磁力泵<sup>[11]</sup>设计参数为流量 85 L/min，扬程 70 m，功率 3 kW，转速 7 800 r/min。磁性联轴器的设计参数见表 2。对不同材料的隔离套、不同磁转角及不同转速的模型，编制 APDL（ANSYS Parametric Design Language）语言命令流进行数值模拟。APDL 即 ANSYS 参数化设计语言，它是一种解释性语言<sup>[12-13]</sup>，可用来自动完成一些通用性强的任务，也可以用于根据参数来建立模型，使模拟更加快速。

2.1 创建有限元模型

用表 1 给出的设计参数作为设计变量，用 PCIRC、AGEN、AOVLAP 等命令建立模型。图 3 为 ANSYS 创建的模型图。用高斯定理求解法<sup>[14]</sup>得到磁转角  $\theta = 4^\circ$  时为磁力泵正常工作状态。

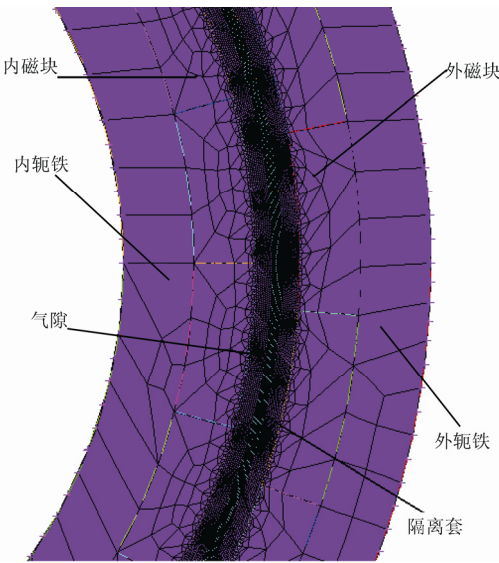


图 3 磁性联轴器模型网格图  
Fig.3 Grids of model of magnetic driving coupling

### 2.3 加载约束及后处理

在磁性联轴器内外边界上加通量平行边界, 即边界处各节点  $AZ=0^{[10]}$ 。考虑到隔离套速度效应, 选用系数矩阵求解器 Sparse Solver 求解。

### 2.4 模拟结果分析

图 4 为隔离套在磁转角  $\theta=4^\circ$  下磁感应电流密度矢量图, 说明磁感应电流密度在隔离套圆周方向上呈正弦曲线分布, 周期数为 12, 最大磁感应电流密度为  $1.17 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 。图 5 为 2 种材料隔离套的涡流损失与转角的关系曲线。可

知, 涡流损失随着磁转角的增大而减少。由图 6 可知, 涡流损失与转速是二次抛物线关系, 随着电机转速的增加, 涡流损失增加越来越快。所以磁力泵在高速化下解决涡流损失问题, 隔离套材料的选用尤为重要。用 POWERH 命令得到两种材料的涡流损失模拟值, 乘以转子轴向长度得到三维涡流损失值。可以得到在  $\theta=4^\circ$  下, TC4 隔离套的涡流损失 258.4W, 1Cr18Ni9Ti 隔离套的涡流损失 584.5W, 分别占泵额定功率的 8.6%和 19.5%。TC4 隔离套的涡流损失是 1Cr18Ni9Ti 隔离套 44.2%。

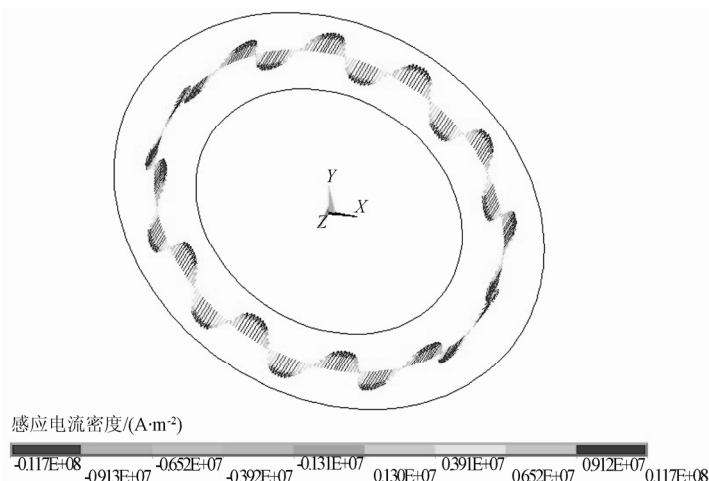


图 4 感应电流密度矢量图(磁转角  $\theta=4^\circ$ )

Fig.4 Induced current density vectors diagram (Magnetic dip  $\theta=4^\circ$ )

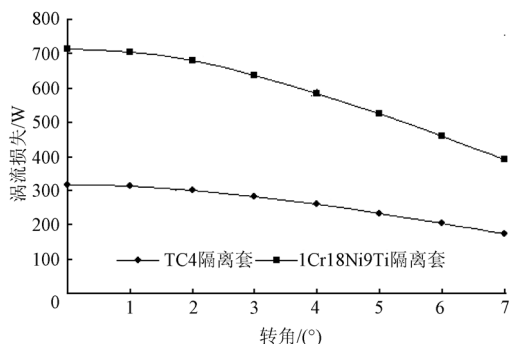


图 5 不同隔离套的涡流损失模拟值 (转速  $n=7\ 800 \text{ r/min}$ )

Fig.5 Eddy current loss of different containment shells by numerical simulation (Rotating speed  $n=7\ 800 \text{ r/min}$ )

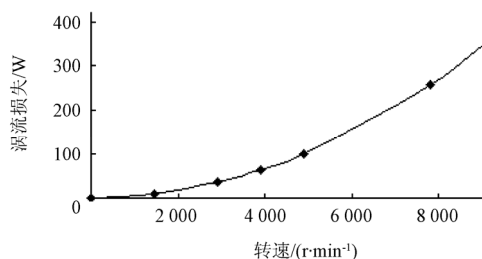


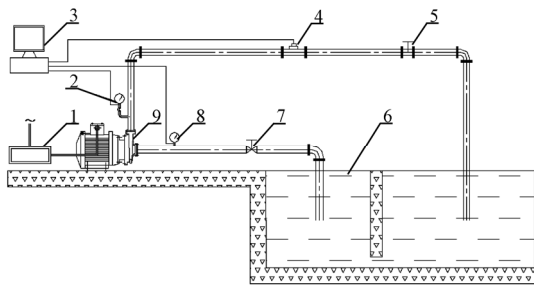
图 6 涡流损失与转速的关系(磁转角  $\theta=4^\circ$ )

Fig.6 Relationship between eddy current loss and rotating speed (Magnetic dip  $\theta=4^\circ$ )

### 3 试验研究

高速磁力泵的性能测试按照 GB/T3216-2005《回转动力泵水力性能验收试验 1 级和 2 级》标准进行, 试验台如图 7 所示。试验步骤如下: 第一步, 将安装有 TC4 隔离套的 GCB70-80A 磁力泵在额定转速下做一性性能试验, 采用电测法测试泵的轴功率。测得一组扬程、轴功率、效率随流量变化的相关性能数据; 第二步, 把 TC4 隔离套拆下, 换上 1Cr18Ni9Ti 隔离套, 在保证 1Cr18Ni9Ti 隔离套的尺寸精度与 TC4 隔离套相同的提前下, 电机、叶轮、泵体以及试验条件不变, 测得另外一组相关性能数据。把两组数据对比, 得到同样工况下轴功率的差值, 这个差值就认为是两种材料隔离套的涡流损失功率差值。再加上涡流损失与材料的电阻率成反比关系, 就可以分别求出两种材料在不同流量下的涡流损失值。图 8 为 2 种材料隔离套的涡流损失与流量的关系曲线。

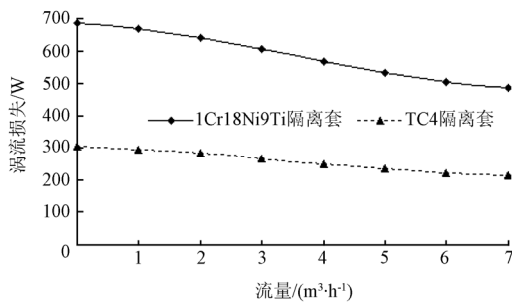
由图 8 可知, 涡流功率是随流量的增加而减小的。在关死点, 由于电机输出转矩最小, 磁转角处于最小值状态, 流量为零, 而涡流损失处于最大值; 随着阀门的开启, 输入功率增加, 转角增大, 流量也增加, 涡流损失逐步减小。各流量条件下, 1Cr18Ni9Ti 隔离套的涡流损失始终远大于 TC4 隔离套。图 8 所知在额定流量  $Q=5.1 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$  下, TC4 隔离套的涡流损失 236.7 W, 1Cr18Ni9Ti 隔离套的涡流损失 534.6 W, 1Cr18Ni9Ti 隔离套的涡流损失大约是 TC4 隔离套的 2.26 倍。



1. 变频器 2. 出口压力表 3. 计算机处理系统 4. 流量计 5. 出口调节阀 6. 集水池 7. 进口调节阀 8. 进口压力表 9. 试验泵(即为文中提到 GCB70-80A 磁力泵)

图 7 高速磁力泵试验装置示意图

Fig.7 Experimental equipment of high-speed magnetic driving pump



注: 磁转角  $\theta=4^\circ$

图 8 不同流量下实测涡流损失值 (转速  $n=7\ 800\ \text{r/min}$ )

Fig.8 Eddy current loss at series of flow rates (rotating speed  $n=7\ 800\ \text{r/min}$ )

#### 4 模拟值与试验值的比较

模拟值与试验值比较, 误差分别为 9.17%, 9.33%, 用模拟方法可指导工程实践。数值模拟结果与试验结果相对误差主要由以下几个方面的原因:

1) 数值模拟的模型与试验所用的实物之间有误差, 3D 化简为 2D 使结果偏大。实物所牵涉到边界问题非常复杂, 材料的属性方面也存在误差。

2) 网格划分的疏密对计算结果也会产生一定的影响。

3) 软件的有限元计算本身也存在允许范围内的误差。采用不同的计算公式其误差也有所不同。

4) 试验结果所得数据及处理也存有允许范围的误差。

经过综合分析, 尽量使模拟接近于实际效果。这样才可以尽量减少误差, 达到设计的预期效果。

#### 5 结论

1) 用 ANSYS 对隔离套涡流损失模拟计算方法所得结果误差在 10% 以内, 计算方法可行。

2) TC4 隔离套涡流损失约是 1Cr18Ni9Ti 隔离套的涡流损失的 44.2%, 且 TC4 钛合金的金属性能优异, 是高速磁力泵隔离套的理想材料。

#### [参 考 文 献]

[1] Keith Thompson. What the future holds for magnetic drive pumps[J]. World pumps, 2007, 11: 28—29.  
[2] 赵克中, 徐成海. 驱动器涡流损失的研究[J]. 化工机械, 2003, 30(6): 326—328.

Zhao Kezhong, Xu Chenhai. Research on the eddy current loss of magnetic drivers[J]. 2003, 30(6): 326—328. (in Chinese with English abstract)  
[3] 冯忠明, 陈存东. 磁力泵涡流损失的计算分析与应用[J]. 通用机械, 2005(4): 81—87.  
Feng Zhongming, Chen Cundong. Application and computational analysis on Eddy current losses of magnetic pump[J]. 2005(4): 81—87. (in Chinese with English abstract)  
[4] 孔繁余, 陈刚, 曹卫东, 等. 磁力泵磁性联轴器的磁场数值计算[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 213—218.  
Kong Fanyu, Chen Gang, Cao Weidong, et al. Numerical calculation of magnetic field in magnetic couplings of magnetic pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 213—218. (in Chinese with English abstract)  
[5] 孔繁余, 王志强, 张洪利, 等. 磁力泵磁性联轴器的磁场分析及性能计算[J]. 磁性材料及器件, 2009, 40(3): 24—27.  
Kong Fanyu, Wang Zhiqiang, Zhang Hongli, et al. Field Analysis and Performance Calculation on the Magnetic Coupling of Magnetic Driving Pump[J]. J Magn Mater Devices, 2009, 40(3): 24—27. (in Chinese with English abstract)  
[6] Nicolas Weibel, Greene, Tweed, et al. Magnetic-coupled Pumps: The Containment Shell[R]. SAMPE 2010-Seattle, WA May 17—20, 2010.  
[7] 夏平畴. 永磁机构[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2000.  
[8] Fanyu Kong, Zhiqiang Wang, Cuilan Gao, et al. Design of high-speed magnetic pump based on the numerical simulation[C]// Proceeding of the ASME 2009 Fluid Engineering Division Summer Meeting, August 2-6, 2009.  
[9] 王勇. 磁力机械分析与设计方法[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2007.  
[10] 孔繁余, 王志强, 张旭峰, 等. 磁性联轴器的转矩数值分析及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2009, (11): 7—9.  
Kong Fanyu, Wang Zhiqiang, Zhang Xufeng, et al. Numerical analysis for torque and optimum design of the magnetic coupling[J]. Machinery Design and Manufacture, 2009, (11): 7—9. (in Chinese with English abstract)  
[11] 孔繁余, 张洪利, 高翠兰, 等. 基于流场数值模拟的高速磁力泵汽蚀性能研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 89—93.  
Kong Fanyu, Zhang Hongli, Gao Cuilan, et al. Cavitation Performance Research in High-speed Magnetic Drive Pump Based on Numerical Simulation of Flow Field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 24. (in Chinese with English abstract)  
[12] 丛小青, 钱玉琴, 张孝春, 等. 磁力泵磁力驱动系统仿真[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 114—117.  
Cong Xiaoqing, Qian Yuqin, Zhang Xiaochun, et al. Simulation for magnetic driver system of magnetic pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 114—117. (in Chinese with English abstract)  
[13] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
[14] 赵克中. 磁力驱动技术与设备[M]. 北京: 化工工业出版社, 2004.

## Eddy current loss of containment shell of high-speed magnetic driving pump

Kong Fanyu<sup>1</sup>, Zhang Yong<sup>1</sup>, Shao Fei<sup>1</sup>, Wang Zhiqiang<sup>2</sup>, Xue Ling<sup>1</sup>

(1. *Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;* 2. *Shanghai Kaiquan Pump (Group) Co. Ltd., Shanghai 201804, China*)

**Abstract:** In order to quickly and accurately study the effects of containment shell material on the eddy current loss of high-speed magnetic drive pump, containment shells using materials TC4 and 1Cr18Ni9Ti were simulated using ANSYS software. The numerical results of eddy current loss were compared with those of experiment. The comparison results showed that, the eddy current loss generated by 1Cr18Ni9Ti was 2.26 times more than that of TC4 when other parameters were the same. The numerical results were in agreement with that of experiment, thus the credibility of numerical simulation eddy current loss was proved. Besides, it was also proved that TC4 was an ideal material for containment shells of magnetic driving pump.

**Key words:** pumps, finite element methods, eddy current, magnetic driving pump, containment shell, numerical simulation

孔繁余, 等. 高速磁力泵隔离套的磁涡流损失 (图4)

Kong Fanyu, et al. Eddy current loss of containment shell of high-speed magnetic driving pump (Figure 4)

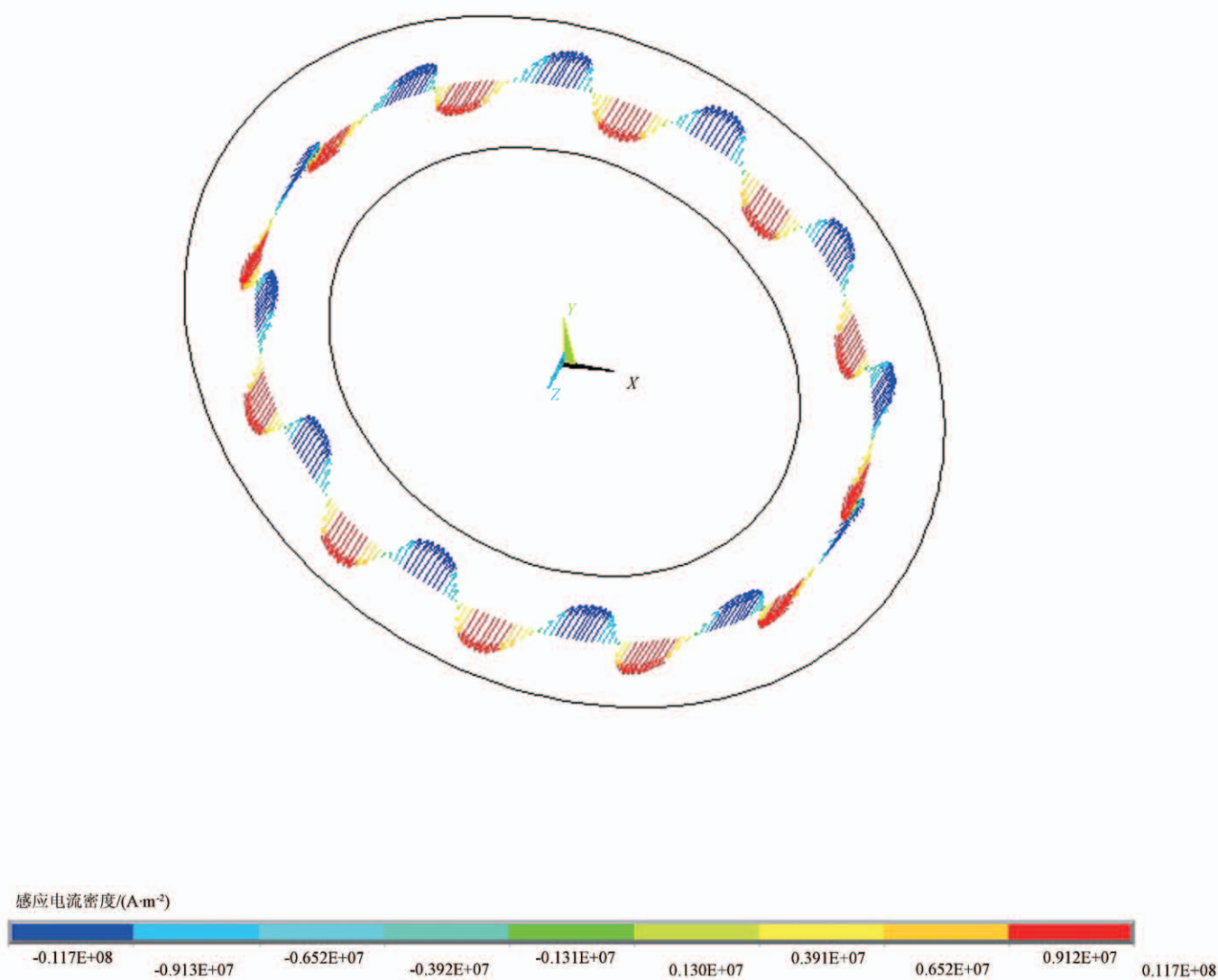


图4 感应电流密度矢量图(磁转角 $\theta=4^\circ$ )

Fig.4 Induced current density vectors diagram (Magnetic dip  $\theta=4^\circ$ )