

磁流体对气体和液体耐压能力的对比研究

Comparative study of the failure pressure between sealing liquids and gas with magnetic fluid

王虎军^{1,2} 李德才¹ 甄少波² 何新智¹ 王四棋¹
WANG Hu-jun^{1,2} LI De-cai¹ ZHEN Shao-bo² HE Xin-zhi¹ WANG Si-qi¹

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 中国劳动关系学院, 北京 100048)

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. China Institute of Industrial Relations, Beijing 100048, China)

摘要:对比研究磁流体用于密封气体和密封液体的耐压性能。从理论上推导磁流体密封耐压公式,分析磁流体与被密封介质速度差对密封性能的影响,设计出可用于密封水的磁流体密封结构,并搭建直立式磁流体密封试验台。结果表明:磁流体用于静密封水时的耐压值接近用于静密封气体时的耐压值,且耐压值均随密封间隙的增大而降低。磁流体密封气体时的耐压能力一般不受转轴转速影响。磁流体用于密封水时,转轴转速高于临界值情况下耐压值明显下降。

关键词:磁流体;静密封;动密封;耐压

Abstract: Magnetic fluid has been widely used in sealing gas, but sealing liquids with magnetic fluid is still in the research stage. In this paper, the effect of velocity difference on failure pressure was theoretically deduced. The magnetic fluid seal structure was designed and an experiment its rig was set up, and then the seal performances of sealing gas and liquids with magnetic fluid were studied. The results showed that the failure pressures of sealing liquids and gas statically under the same sealing gap were almost the same, and the failure pressure was generally not affected by the speed of the rotating shaft when sealing gas with Magnetic fluid. The failure pressure decreases significantly when the rotating shaft overspeeded the critical value, under the condition of Magnetic fluid as sealing liquids.

Keywords: magnetic fluid; static seal; dynamic seal; failure pressure

磁流体密封无污染,可靠性高,寿命长,泄漏率几乎为

零,在密封气体中应用广泛^[1-2]。然而,当磁流体动密封液体时,密封性能较差^[3-5]。磁流体对气体和液体密封性能的差异值得进一步研究。

王虎军等^[6]在 1 r/min 转速下进行磁流体密封液体试验取得成功,但其接近于静密封;文献[7]论述了轴速对磁流体液体动密封耐压能力的影响;文献[8]论述了转轴转速、密封温度和磁场强度等因素对磁流体密封液体寿命的影响;王媛等^[9]论述了液—液界面处相对速度对界面稳定性的影响;文献[10]论述了在极靴上设置防护来尽可能减少被密封液体流对磁流体稳定性的影响,取得了较好的效果。以上文献均单独研究磁流体密封液体时的密封性能的影响因素,并未将磁流体密封气体和密封液体进行对比研究。为此,笔者以水为被密封液体,设计并搭建了磁流体密封试验台,从理论上对比研究磁流体密封气体和密封液体的耐压性能。

1 理论研究

1.1 磁流体密封宏观耐压公式

耐压能力是磁流体密封最重要的指标,耐压能力越大磁流体密封的可靠性越高。一般在最大耐压限度内,磁流体密封都可以达到“零”泄露。磁流体的伯努利方程结合边界条件可得磁流体密封的最大耐压^[11]为:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH + \frac{\mu_0}{2} (M_{n2}^2 - M_{n1}^2), \quad (1)$$

式中:

μ_0 ——真空磁导率, H/m;

M_{n1} 、 M_{n2} ——分别为边界 1 和边界 2 处的磁化强度, A/m;

H ——磁场强度, A/m;

p ——磁流体在某处的压强, MPa。

假设整个磁流体密封膜均处于饱和磁化状态,则可推得

基金项目:教育部长江学者创新团队发展计划(编号:IRT13046);国家自然科学基金资助项目(编号:51375039);中央高校基本科研业务费专项基金项目(编号:12zy021)

作者简介:王虎军,男,中国劳动关系学院讲师,北京交通大学在读博士研究生。

通信作者:李德才(1966—),男,北京交通大学教授,博士,博士生导师。E-mail: dcli@bjtu.edu.cn

收稿日期:2016-10-13

磁流体密封的单级耐压公式为：

$$\Delta p = \mu_0 M_s (H_{\max} - H_{\min}), \quad (2)$$

式中：

M_s ——磁流体的饱和磁化强度，A/m；

$H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ ——分别是间隙内最大、最小的磁场强度，A/m。

假定每级磁流体耐压能力都近似相等，则 N 级磁流体总的密封耐压能力为：

$$\Delta p_{\max} = N \mu_0 M_s (H_{\max} - H_{\min}). \quad (3)$$

因密封间隙较小，通常在实际的数值计算时将间隙中的磁流体视为空气处理，式(3)可变为：

$$\Delta p_{\max} = N M_s (B_{\max} - B_{\min}), \quad (4)$$

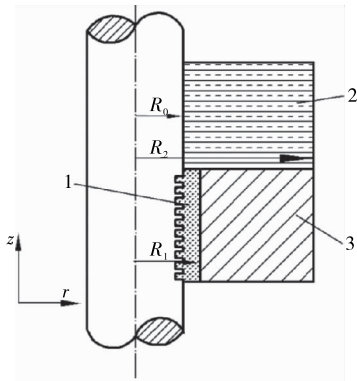
式中：

$B_{\max}$ 、 $B_{\min}$ ——分别是密封间隙内的最大磁感应强度和最小磁感应强度，T。

从式(4)可以看出，磁流体密封的耐压能力与磁流体的饱和磁化强度、间隙里的磁场强度、密封级数等变量均正相关。式(4)被广泛地应用于磁流体密封气体中。

1.2 磁流体与被密封介质速度差对密封能力的影响

图 1 为磁流体密封结构的示意图。图中，转轴半径为 R_0 ，转轴角速度为 ω ，极靴内径和密封腔内径分别为 R_1 和 R_2 。



1. 磁性液体 2. 密封介质 3. 极靴

图 1 磁流体密封结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the structure

由于密封间隙很小，密封区域内的流体可被看作沿切向的一维层流^[9]。磁流体不可压缩，且重力的影响可忽略不计。磁流体场轴对称，高速旋转时磁流体径向和轴向速度为零。由以上特点可得，在距转轴中心半径为 r 的界面上某一点处：

$$\rho = \text{const}, v_z = v_r = 0, \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0.$$

假设密封结构内两种流体的线速度均沿半径方向线性分布^[12]，并且其边界条件为：

$$v_1|_{r=R_0} = v_2|_{r=R_0} = \omega R_0, \quad (5)$$

$$v_1|_{r=R_1} = v_2|_{r=R_2} = 0. \quad (6)$$

则密封结构内磁流体和被密封介质的速度分别为：

$$v_1(r) = \frac{\omega R_0}{R_0 - R_1} r - \frac{\omega R_0 R_1}{R_0 - R_1}, \quad (7)$$

$$v_2(r) = \frac{\omega R_0}{R_0 - R_2} r - \frac{\omega R_0 R_2}{R_0 - R_2}. \quad (8)$$

在磁流体与被密封介质的界面处，当 $r \leq R_1$ 时速度差 Δv 为：

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \omega R_0 \left[\left(\frac{1}{R_0 - R_2} - \frac{1}{R_0 - R_1} \right) r - \left(\frac{R_2}{R_0 - R_2} - \frac{R_1}{R_0 - R_1} \right) \right]. \quad (9)$$

将 Δv 对 r 求导，得到：

$$\frac{\partial \Delta v}{\partial r} = \omega R_0 \frac{R_2 - R_1}{(R_0 - R_2)(R_0 - R_1)} > 0. \quad (10)$$

由上式可知， Δv 与 r 正相关，即当 $r = R_1$ 时速度差 Δv 最大。

$$\Delta v(r)_{\max} = \frac{\omega R_0 (R_1 - R_2)}{R_0 - R_2}. \quad (11)$$

由于密封间隙高度 $h \ll R_0$ ，故

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{R_0 + h}{R_0} \approx 1. \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)，得到

$$\Delta v(r)_{\max} \approx \omega R_0. \quad (13)$$

当磁流体与被密封介质的界面稳定时，速度差满足下式^[13]：

$$(\Delta v)^2 = (v_2 - v_1)^2 \leq \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 \rho_2} \{ 2 [g(\rho_2 - \rho_1)\sigma]^{0.5} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} H^2 \}, \quad (14)$$

式中：

ρ_1, ρ_2 ——磁流体和被密封介质的密度，kg/m³；

μ_1, μ_2 ——两种流体的相对磁导率，H/m；

σ ——两流体界面张力，10⁻³ N/m；

g ——重力常数，m/s²；

H ——外磁场，A/m。

将式(13)代入式(14)可得：

$$\omega^2 \leq \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 \rho_2 R_0^2} \left\{ 2 [g(\rho_2 - \rho_1)\sigma]^{0.5} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} H^2 \right\}. \quad (15)$$

式(15)为转轴转速的界面稳定性的理论范围。由式(15)可知，当转速在上式范围内时，磁流体与被密封介质的界面保持稳定；超出该范围时，界面处于不稳定状态。且转速越大，界面越不稳定，耐压能力越低。

将磁流体和水的相关参数^[7]代入式(14)可计算出磁流体与水的界面存在不稳定性时临界速度差的理论计算值为 $\Delta v = 1.23$ m/s；当密封介质为氮气时，界面存在不稳定性时临界速度差的理论计算值为 $\Delta v = 27.64$ m/s。由以上理论计算结果可知，磁流体密封气体时的界面稳定性临界速度差明显大于密封水时的界面稳定性临界速度差，数值超过 20 倍。磁流体密封水时更容易受到速度差的影响，导致密封失效。

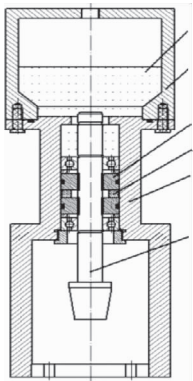
2 试验研究

2.1 试验台搭建

用于密封水的磁流体密封结构由导磁轴、永久磁铁、极

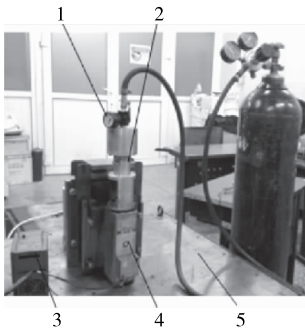
靴、密封腔和外壳等组成,见图 2。环形永久磁铁材料为钕铁硼^[14];转轴和环形极靴材料为 2Cr13;外壳及密封腔为非导磁材料铝合金。

磁流体密封试验台由磁流体密封结构、电机、变频调速器、氮气瓶等搭建而成,见图 3。电机可由变频调速器无级变速。为了保证转轴与极靴间的间隙要求,转轴与电机输出端为刚性连接,外套内表面与电机外套无间隙配合。



1. 被密封液体 2. 密封腔 3. 极靴 4. 永磁体 5. 外壳 6. 转轴
图 2 磁流体密封结构示意图

Figure 2 Schematic of magnetic fluid seal structure



1. 气压计 2. 密封部件 3. 变频调速器 4. 电机 5. 支架
图 3 磁流体密封试验台

Figure 3 The experimental system of magnetic fluid seal

2.2 试验方法

试验分为静密封和动密封两部分。静密封试验分别测试 0.05, 0.10, 0.20 mm 3 种间隙下磁流体静密封水及气体的耐压性能。静密封气体时,高压氮气向密封腔缓慢加压直到氦质谱检漏仪测到泄漏,记录一次耐压值。连续重复 3 次以上试验,求得的平均数即为磁流体密封气体的试验耐压值。静密封水时,先将水注入密封腔到容积的一半。注水完成后与氮气瓶相连。后续试验过程和静密封气体试验相同。

动密封试验中,密封件的间隙分别为 0.05, 0.10 mm。电机带动转轴旋转达到一定转速运转 10 min 后,氮气瓶开始向密封腔加压,其他步骤与静密封相同。

2.3 结果与分析

在静密封试验中,磁流体密封气体及水两种介质的耐压值均随间隙的变大而降低,且相同的密封间隙下磁流体静密封水的耐压实验值和静密封气体的耐压试验值基本相等,两条曲线接近重合,见图 4。

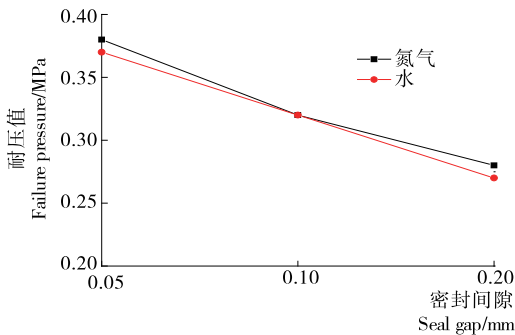


图 4 磁流体静密封水和气体耐压能力试验值的比较
Figure 4 Comparison of the failure pressure of static sealing water and gas with magnetic fluid

由式(3)可知,磁流体密封的耐压能力与密封间隙内的磁场强度正相关,而间隙内的磁场强度又与密封间隙负相关,因此,磁流体密封的耐压能力与密封间隙负相关。与试验结果一致。另一方面,由于在磁流体静密封水时,水与磁流体均保持静止状态,没有产生速度差,故磁流体与水之间界面保持稳定。试验中,磁流体静密封气体和水的耐压曲线也接近重合。

在动密封中,磁流体密封气体时,各个转速下的耐压值基本保持不变,而密封水时,当转速达到 2 250 r/min 后,耐压值明显下降,见图 5。

设计的磁流体密封结构的转轴直径为 12 mm,由式(15)及相关参数可得,当密封介质为氮气时,界面稳定性临界转轴转速的理论计算值为 $\omega = 44\ 013\ \text{r/min}$ 。理论上,对于本设计中的密封结构,当磁流体密封气体时,如果转轴转速大于 44 013 r/min,磁流体与气体的界面处于不稳定状态。由于转轴很难达到这一转速,因此,在一般情况下,磁流体密封气体的耐压能力和转轴转速无关。当磁流体密封水时,由理论计算得到的磁流体与水的界面稳定性临界转轴转速值为 $\omega = 1\ 959\ \text{r/min}$,即理论上如果转轴转速大于 1 959 r/min,磁流体与水的界面处于不稳定状态。试验中,转轴转速为 750, 1 500 r/min 时,磁流体密封水的耐压值与静密封接近,而转速为 2 250, 3 000 r/min 时,磁流体密封水的耐压值逐渐下降,明显低于静密封耐压值,与理论分析一致。

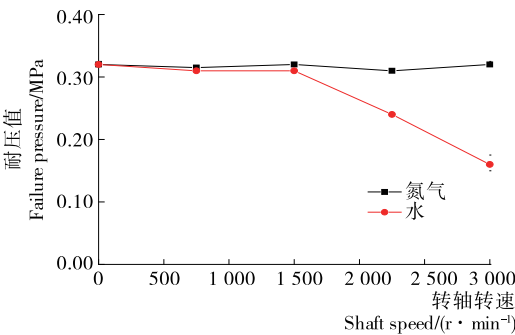


图 5 磁流体动密封水和气体密封耐压试验值的比较
Figure 5 Comparison of the failure pressure of dynamic sealing water and gas with magnetic fluid

(下转第 101 页)

2.3 验证实验

根据上述正交试验确定的小苏打复合液护绿最优烫漂条件,进行 3 次重复验证性实验,得到的样品总叶绿素含量平均值为 166.21 mg/100 g FW,高于正交表中各组处理总叶绿素含量,证实了此优化结果的可靠性。在此最优处理条件下,测得的样品叶绿素 a/脱镁叶绿素 a 比值为 5.91,护绿效果较好。

3 结论

从引起小松菜总叶绿素降解的两种主要影响因素(自身酶分解,酸等不当环境脱镁)入手,采用复合液烫漂护绿,研究了小苏打浓度、氯化钠浓度、烫漂温度、烫漂时间对小松菜总叶绿素保留量的影响,通过单因素与正交试验,获得了莎莉小松菜速冻加工中复合液烫漂处理及最佳护绿条件为:0.10%小苏打与 0.10%氯化钠复合液,在 90 ℃条件下漂烫 1.2 min 后,并结合 0.20% 氯化钙溶液 25 ℃下浸泡 30 min,再 PE 包装,速冻后于-18 ℃下模拟冻藏贮运 15 d,产品鲜绿色保持良好,护绿效果安全有效,可为该品种出口速冻小松菜加工与贮运中安全护绿保鲜提供技术参考。

参考文献

[1] 陈国海,许映君,蔡娜丹,等. 出口小松菜生产技术规程[J]. 中国园艺文摘, 2013(7): 167-168.

[2] 陈纪算,张慙,容小红,等. 采后原料贮藏方式对速冻小松菜褐变的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(10): 1 075-1 078.

[3] 孟秋峰,王毓洪,任锡亮,等. 南方多雨地区小松菜周年栽培适宜品种及关键技术[J]. 中国蔬菜, 2011(3): 47-48.

[4] 王伟东. 出口小松菜的无公害生产技术[J]. 上海蔬菜, 2005

(1): 23.

[5] VAN BOEKEL M A J S. Kinetic modeling in food science: a case study on chlorophyll degradation in olives[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(1): 3-9.

[6] 郭新发,胡传银,吴红星,等. 出口冷冻小松菜的护绿工艺[J]. 冷饮与速冻食品工业, 2001, 7(3): 8-10.

[7] 陈纪算,张慙,许映君,等. 种植因素控制小松菜速冻加工产品褐变试验[J]. 长江蔬菜, 2013(10): 69-72.

[8] 中华人民共和国卫生部.GB 2760—2011 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S].北京: 中国标准出版社, 2011: 162-163.

[9] 朱东兴,刘天鹤,仲伟,等. 不同处理方法对小松菜冻藏期保鲜品质的影响[J]. 北方园艺, 2016(10): 131-134.

[10] 吕心泉,甘洪,朱国建,等. 米邦塔仙人掌风味软罐头的生产工艺[J]. 食品与机械, 2003(1): 41-42.

[11] 谢元,蒋中香. 方便芹菜食品的加工技术[J]. 食品与机械, 1997(3): 22.

[12] 韩雅珊. 食品化学实验指导[M].北京: 中国农业出版社, 1996: 195-196.

[13] 王建,王骥. 浮游植物叶绿素与脱镁叶绿素的测定方法[J]. 武汉植物学研究, 1984, 2(2): 321-328.

[14] 戴桂芝. 果蔬食品脱绿失脆的原因及其控制方法[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(5): 87-89.

[15] 柯乐芹. 香椿护色工艺研究[J]. 食品科技, 2007(7): 107-109.

[16] 王丽琼. 果蔬贮藏与加工[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 174.

[17] 焦凌梅,袁唯. 绿色蔬菜加工中护绿技术的研究及进展[J]. 保鲜与加工, 2004, 4(1): 11-14.

[18] 王向阳,蔡政军,许朝霞. 青菜脱水工艺护色的研究[J]. 科技通报, 2000, 16(z1): 107-110.

(上接第 70 页)

3 结论

磁流体静密封水的耐压值和其静密封气体的耐压值均随密封间隙的增加而减小。同一间隙磁流体静密封水的耐压能力,与其静密封气体的耐压能力基本相同。动密封时,磁流体密封气体时的临界转速很高,因此磁流体用于密封气体时的耐压能力一般不受转轴转速影响。磁流体用于密封水时,转轴转速高于临界值情况下耐压值明显下降。

参考文献

[1] MIZUTANI Y, SAWANO H, YOSHIOKAH, et al. Magnetic fluid seal for linear motion system with gravity compensator[J]. Procedia Cirp, 2015, 33: 581-586.

[2] 牛晓坤,钟伟. 磁性液体的应用[J]. 化学工程师, 2004(12): 45-47.

[3] RADIONOV A V. Application of magnetic fluid seals for improving reliability of air coolers[J]. Chemical & Petroleum Engineering, 2015, 51(7/8): 481-486.

[4] ANTHONY W, MELVYN K, DAVID B L. Studies of the double surfactant layer stabilization of water-based magnetic fluids[J]. Journal of Colloid Interface Science, 1991, 144(1): 236-242.

[5] RONALD E Z, JAMES R M. Dynamics and stability of ferroflu-

ids; surface interactions[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 39(1): 1-24.

[6] WILLIAMS R A , MALSKY H. Some experience using a ferrofluid seal against a liquid[J]. IEEE Transactions on magnetic, 1980, 16(2): 379-381.

[7] 王虎军,李德才,何新智. 转轴转速对磁流体液体动密封耐压能力影响的实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 28(2): 179-181.

[8] KURFESS J MULLER H K. Sealing liquids with magnetic liquids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1990, 85: 246-252.

[9] 王媛,樊玉光. 相对速度对磁流体液体动密封中界面稳定性的影响[J]. 流体机械, 2007, 35(1): 18-20.

[10] MITAMURA Y, YANO T, NAKAMURA W, et al. A magnetic fluid seal for rotary blood pumps; behaviors of magnetic fluids in a magnetic fluid seal[J]. Bio-medical Materials and Engineering, 2013, 23(1/2): 63-74.

[11] 李德才. 磁性液体的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 190-197.

[12] 黄卫星,陈文梅. 工程流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 113-115.

[13] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. New York: Dover Publications INC, 2002: 307-323.

[14] 李德才. 磁性液体密封理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 373-375.