

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2011.03.014

超声速流下多供气孔圆盘静压止推气体轴承性能分析*

王学敏 李姗姗 庄明 白红宇 付豹

(中国科学院等离子体物理研究所 安徽合肥 230031)

摘要: 应用 Fluent 软件对多供气节流小孔圆盘静压止推气体轴承进行三维流场的模拟计算, 分析供气小孔数、气膜间隙和供气压力对圆盘静压止推气体轴承性能的影响, 并与 Reynolds 方程解的结果进行比较, 分析气膜内发生超音速流和不发生超音速时气膜内的压力分布和马赫数情况。结果表明, 应用 Fluent 数值模拟可以很方便地处理节流小孔进入到气膜内区域的复杂流场流动; 增加供气孔数、减小气膜间隙和降低供气压力能够避免多供气孔静压止推气体轴承气膜内发生超音速。

关键词: Fluent; 多供气孔静压止推轴承; Reynolds 方程解

中图分类号: TH133.36; TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2011)3-055-5

Performance Analysis of Multi-orifice Circular Aerostatic Thrust Bearing under Supersonic Flow

Wang Xuemin Li Shanshan Zhuang Ming Bai Hongyu Fu Bao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: The numerical simulation of the three-dimensional flow field of circular thrust aerostatic bearing with multi-orifice was simulated by Fluent software. The effect of the supply holes number, film clearance and supply air pressure on the performance of circular aerostatic thrust bearing was analyzed, and the results were compared with Reynolds equation solution. The pressure distribution and Mach number at the film clearance were analyzed in the condition of supersonic flow or not occurring supersonic flow. The results show that the complex gas flows at the area of orifice hole into the film entrance region can be handled easily by the Fluent numerical simulation application. Increasing for the number of supply holes, reducing the film gap and cutting down supply gas pressure is a way to avoid supersonic flow occurring in the circular thrust aerostatic bearing.

Keywords: Fluent; multi-orifice aerostatic thrust bearing; Reynolds equation solution

气体润滑轴承具有摩擦功耗小、运动精度高、振动小和无污染等优点, 可以应用于某些如高温、高压及有辐射的特殊场合。然而气体轴承性能受到多方面因素的影响, 如气膜厚度、小孔直径、供气孔数和供气压力等改变都会影响其性能, 传统的气体轴承研究方法是通过求解经典 Reynolds 方程来获得轴承的性能, 但对于多供气孔圆盘静压止推气体轴承而言, 传统的 Reynolds 方程解法做了如下假设: (1) 假设流动为层流、绝热, 忽略惯性力影响; (2) 假设气体从节流孔流出后立即均布在节流孔所在圆周上, 并均匀沿径向两侧流出, 无环向流动。但在实际没有均

压槽情况下, 气流从节流孔进入到气膜后首先有一个扩散效应, 然后才逐渐变为径向流, 一般情况下气流经节流小孔流入再从边界流出过程中, 气膜内流速为亚音速, 但当压力升高、气膜间隙变大或节流小孔数变少后, 在节流孔附近马赫数有可能大于 1, 并且伴随激波产生。一旦发生超音速, 解 Reynolds 方程方法即认为节流孔后压力就等于临界压力, 其他参数不变, 改变节流小孔直径或气膜间隙得到的承载能力都一样, 很显然这是不对的, 这也是传统的解 Reynolds 方程方法处理气膜内超音速区域存在的缺陷。

国外有许多学者利用 CFD 软件对静压止推轴承进行过多种研究, Renn 和 Hsiao^[1] 利用 CFD 数值软件对带气室的小孔节流型空气止推轴承进行了研究, 并且与试验进行了比较, 结果证明 CFD 模拟结果与试验数据很吻合; Li 和 Ding^[2] 应用 CFD 数值模拟方法来研究节流小孔型气体轴承间隙内的空气流动, 从而得到气体轴承性能, 他们认为通过 CFD 模拟来预测

* 基金项目: 国家“九五”大科学工程 EAST 项目(计投资(1998)1303号); 中国科学院重要方向性项目。

收稿日期: 2010-10-12

作者简介: 王学敏(1983—), 男, 博士研究生, 从事氦透平膨胀机的设计研究。E-mail: wangxuemin2011@ipp.ac.cn.

空气轴承的承载能力与试验结果吻合很好; Khatait 等^[3]在研究小孔节流空气止推轴承性能过程中, 利用 CFD 软件建立三维模型验证了其理论方法的正确性; Mohamed^[4]利用 CFD 软件中的稳态、三维、可压缩全 N-S 湍流模型, 模拟了气膜内的压力降低现象, 结果表明气膜内的压力分布与另外一个学者试验数据相吻合。Miyatake 等^[5]利用 CFD 软件先求微小节流小孔止推轴承的小孔节流系数, 再结合有限元法获得静压止推轴承的动静态特性。国内有利用 Fluent 软件对单供气孔静压止推轴承发生超声速流时详细分析的算例^[6], 相比单供气孔, 多供气孔静压止推轴承气膜内流场更复杂。

本文作者在前人的基础上, 利用基于体积法的 Fluent 软件对超声速流下多供气孔圆盘静压止推轴承的静态性能进行研究, 通过改变供气孔数 n 、气膜间隙 h_0 和供气压力 p_s , 研究其对气膜内流动特性的影响, 分析了各种情况下可能发生超音速的变化趋势, 并将计算结果与解 Reynolds 方程解进行了比较。

1 模型简化及边界条件

1.1 物理模型

以圆盘式多供气孔环面节流型静压止推轴承为研究对象, 模型结构如图 1 所示, 具体参数见表 1。为了减少计算量, 采用对称边界条件只计算 1/2 区域。图 2 示出了计算网格模型, 采用三维计算模型。网格好坏直接影响到计算结果的精度, 因此节流小孔和气膜单独划分网格, 均采用六面体结构网格, 并且保证气膜高度方向上有 10 层网格数。

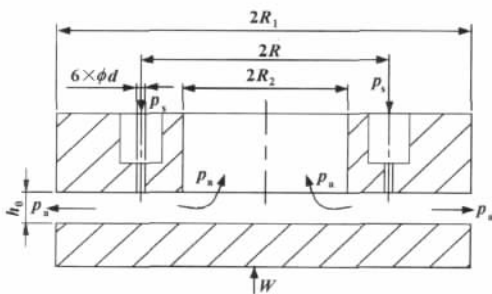


图 1 多供气孔环面节流型静压止推轴承结构图

Fig 1 Schematic view of circular thrust aerostatic bearing with multi-orifice

表 1 计算模型参数

Table 1 Parameters of the calculation model

圆盘外半径 R_1 /mm	10
圆盘内半径 R_2 /mm	6
供气孔分布圆半径 R /mm	8
环境压力 p_a /MPa	0.1

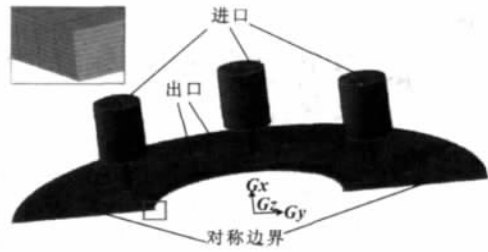


图 2 计算模型

Fig 2 Calculation model

1.2 边界条件及求解器

工作介质假设为理想气体, 采用层流模型, 求解器采用易于收敛的稳态分离求解器, 进出口边界条件分别设为压力进口和压力出口, 用 SIMPLE 算法求解方程组, 动力黏度 μ 采用 Sutherland 定律定义如下:

$$\frac{\mu}{\mu^*} = \left(\frac{T}{T^*} \right)^{3/2} \frac{T^* + S}{T + S}$$

式中: $\mu^* = 1.716 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $S = 110.55 \text{ K}$, $T^* = 273.11 \text{ K}$ 。

2 基于 Reynolds 方程的算法

很多文献中都有详细的 Reynolds 方程推导过程^[7-8], 圆柱坐标系下完整的可压缩稳态量纲一 Reynolds 方程式如下:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{PH^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{PH^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \Lambda \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (PH) \quad (1)$$

式中: P , H 分别为量纲一的压力和气膜厚度; θ , Y 分别为环向和轴向的坐标系; Λ 为轴承数, $\Lambda = \frac{6\mu UR}{p_a C_r^2}$, μ 为动力黏度, $U = R \cdot \omega = \pi RN/30$, N 为转速 (r/min)。

Reynolds 方程是求解静压止推气体轴承性能的基础, 气流进入气膜以后均匀沿径向两侧流出, 无环向流动, 压力只随半径改变, 经推导可得承载能力 W 的表达式^[8]:

$$W = \pi R^2 p_a F(p_d) \quad (2)$$

式中: $F(p_d) = - \exp\left(-\frac{2}{G_2}\right) \sqrt{\frac{G_2}{2}} \int_{x_1}^{x_2} \exp(t^2) dt +$

$$\exp\left(\frac{2}{G_1}\right) \sqrt{\frac{G_1}{2}} \int_{x_2}^{x_1} \exp(-t^2) dt, x_1 = \frac{\sigma}{\beta} \sqrt{\frac{2}{G_2}}, x_2 = \sqrt{\frac{2}{G_2}}$$

$$G_1 = \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^2 \right] \ln \frac{R_1}{R}; G_2 = \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^2 \right] \ln \frac{R}{R_2}$$

$$\sigma = \frac{p_a}{p_s}, \beta = \frac{p_d}{p_s}$$

流进气膜内总质量流量为:

$$\dot{Q}_{in} = n\phi A_i p_s \sqrt{\frac{2p_a}{p_s}} \psi \quad (3)$$

其中:

$$\psi = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{(k+1)}{k(k-1)}}} & \text{当 } \beta_i \leq \beta_k = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\frac{k}{k-1} [\beta_i^{2/k} - \beta_i^{(k+1)/k}]} & \text{当 } \beta_i > \beta_k = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases}$$

式中: n 为供气孔数; ϕ 为流量系数, 一般取值 0.8~0.85; A_i 为节流面积, 其中环面节流孔 $A_i = \pi dh_0$, 小孔节流孔 $A_i = \frac{1}{4} \pi d^2$; β_i 为孔后压比; β_k 为临界压比; k 为绝热指数; d 为节流孔直径。

3 计算结果对比

模型的总体参数 (见表 1) 不变, 分别改变供气孔数 n , 气膜间隙 h_0 和供气压力 p_s 来研究对静压止推气体轴承性能的影响, 并计算结果与 Reynolds 方程解进行比较。

3.1 不同供气孔数 n 影响

其他参数不变, 当小孔直径 $d=0.4$ mm, 气膜间隙 $h_0=0.01$ mm, 供气压力 $p_s=1$ MPa, 供气孔数 $n=6, 10, 12, 24$ 时计算得到的承载能力和气体消耗量结果如图 3 所示。

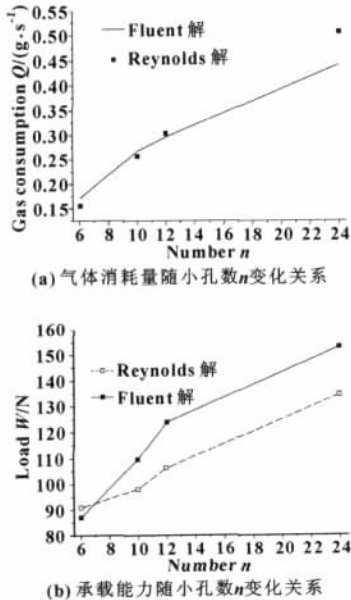


图3 小孔数 n 对气体消耗量和承载能力的影响
Fig 3 Effect of supply holds number n on gas consumption (a) and carrying capacity (b)

3.2 气膜间隙 h_0 影响

其他参数不变, 当小孔直径 $d=0.4$ mm, 供气压力 $p_s=1$ MPa, 小孔数目 $n=6$, 气膜间隙 $h_0=10, 25, 45, 100$ μm 时, 计算得到的气体消耗量和承载能力结果如图 4 所示。

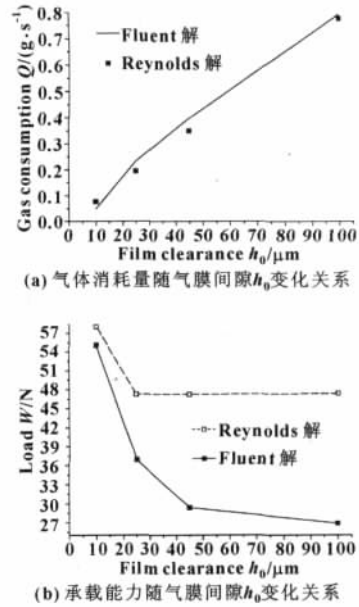


图4 气膜间隙 h_0 对气体消耗量和承载能力的影响
Fig 4 The effect of film clearance h_0 on gas consumption (a) and carrying capacity (b)

3.3 供气压力 p_s 的影响

其他参数不变, 当小孔直径 $d=0.4$ mm, 供气孔数 $n=6$, 气膜间隙 $h_0=10$ μm , 供气压力 $p_s=0.5, 0.7, 1.0, 1.5$ MPa, 承载能力 W 和气体消耗量 Q 计算结果如图 5 所示。

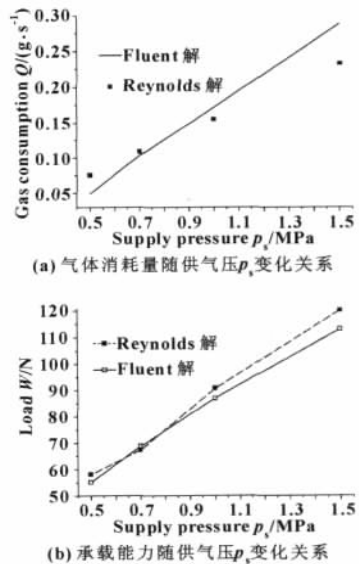


图5 供气压力 p_s 对气体消耗量和承载能力的影响
Fig 5 The effect of the supply pressure p_s on gas consumption (a) and carrying capacity (b)

4 结果分析

通过观察 Reynolds 方程解节流孔后压比是否大

于临界压比 β_k 可以判断节流小孔是否发生堵塞, 气膜内是否存在超音速流。图 3 中, 当节流孔数 $n = 6$, 10 时有发生堵塞, $n = 12, 24$ 时未发生堵塞; 图 4 中, 气膜间隙 $h_0 = 10 \mu\text{m}$ 时未发生堵塞, 当气膜间隙 $h_0 > 10 \mu\text{m}$ 时均发生节流小孔堵塞; 图 5 中, 当供气压力 $p_s \leq 0.7 \text{ MPa}$ 时不发生堵塞, 而当 $p_s > 0.7 \text{ MPa}$ 时会发生堵塞。

从图中还可以看出, 当节流小孔发生堵塞时, Reynolds 方程解得到的气体消耗量 Q 比 Fluent 模拟结果小, 不发生堵塞时 Reynolds 方程解的值偏大。由式 (2) 可知, 承载能力 W 与孔后压力 p_d 成正比, 如果节流小孔发生堵塞, 孔后压比等于临界压比 β_k , 当供气压力 p_s 不变时, 孔后压力始终等于 p_d 不变, 即使改变轴承其他参数, 如气膜间隙 h_0 , 此时计算得到的承载能力 W 无变化, 如图 4 (b) 所示, 很显然这是不正确的, 得出此错误结论是因为解 Reynolds 方程方法无法处理从节流小孔进入到气膜流动区域内的流动问题, 如果发生超音速流, 此区域内的流动将会变得很复杂, 对轴承性能影响很大, 而 Fluent 软件可以处理类似复杂的流动问题, 还能捕捉到激波现象, 与图 4 (b) 中的 Fluent 解相比, 如果发生堵塞, Reynolds 解误差在 50% 以上, 不发生堵塞时, 两者的误差在 10% 左右。

图 6 示出了 $d = 0.4 \text{ mm}$, $p_s = 1 \text{ MPa}$, $n = 6$ 时径向位移方向上的压力分布, 气体从进口阶梯孔流入,

进入气膜中, 再从两侧的边界流出。从图中可以看出, 进口阶梯孔内压力始终等于进口压力, 压力骤降发生在节流小孔 $E-F$ 段和从节流小孔进入到气膜 $A-E$, $B-F$ 段, 整个 $A-B$ 段可看作是两个电阻引起压力降低, 此段即传统解 Reynolds 方程无法单独处理的区域。从图中还可以发现, 当 $h_0 = 10 \mu\text{m}$ 时, 气体经节流小孔流入气膜后, 气膜内的压力呈抛物线平滑地降至环境压力, 而 $h_0 = 25, 45, 100 \mu\text{m}$ 时, 在 $A-E$ 和 $B-F$ 段, 都存在压力分布突然降低后再升高的现象, 并且随着气膜间隙 h_0 变大, 节流小孔后压力降低就越厉害, 当气膜间隙 $h_0 = 100 \mu\text{m}$ 时, 在 $A-E$, $B-F$ 段甚至出现负压, 文献 [4] 对此阶段的复杂流动进行了详细的分析和解释。

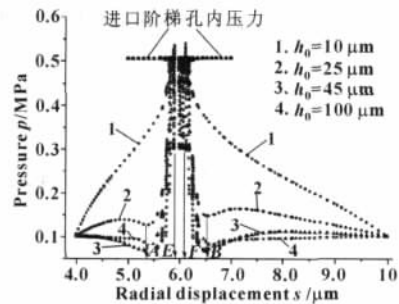


图 6 径向位移上压力分布

Fig 6 Pressure distributions in radial displacement

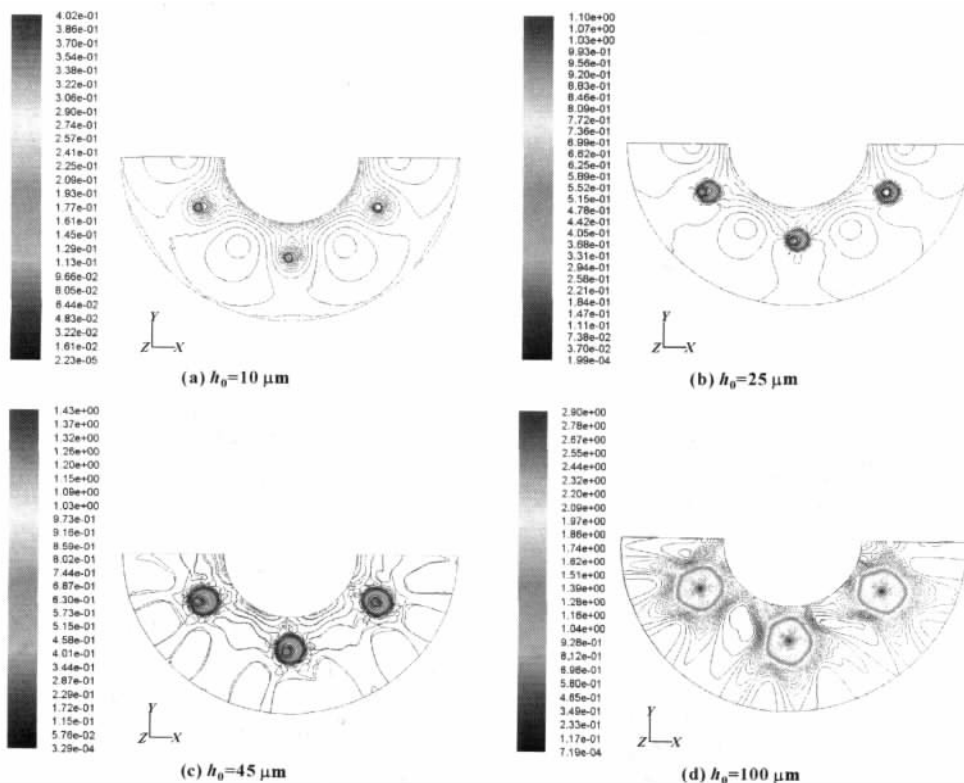


图 7 不同气膜厚度 h_0 时径向位移方向马赫数分布

Fig 7 Mach distribution in radial displacement for different film clearance h_0

图7示出了不同气膜间隙 h_0 时气膜内的马赫数 Ma 分布,当 $h_0 = 10 \mu\text{m}$ 时,最大马赫数小于1,当 $h_0 \geq 25 \mu\text{m}$ 时,最大马赫数均大于1,且随着气膜间隙增大而变大,且最大马赫数并未发生在节流小孔进入到气膜的入口处,而是由于滞后原因,离入口位置有一小段距离,且随着气膜间隙增大而逐渐靠近气膜入口。图7说明 $h_0 = 10 \mu\text{m}$ 时气膜内始终为亚音速流动,当 $h_0 \geq 25 \mu\text{m}$ 时,气膜内出现超音速流动,且最大流速出现在面积最小的喉部,此结论与 Reynolds 方程解一致。

5 结论

(1) 气膜内如果没有发生超音速流动, Fluent 解的结果与 Reynolds 解接近(误差为10%左右),证明 Fluent 得到的解的结果是可靠的。选用 Fluent 作为辅助优化设计工具,可以减少对实验的依赖性,还能够显著缩短设计周期,降低设计费用,提高设计可靠性。

(2) 气膜内如果发生超音速流动,由于传统 Reynolds 方程解过程无法处理节流小孔进入到气膜内区域的流动问题,得出的结论与实际情况误差很大(50%以上)。而 Fluent 可以方便处理此区域内的复杂流动,另外还可以准确给出如速度场和温度场分布的时变特性。

(3) 分析表明,在其他参数不变情况下,减小气膜间隙 h_0 ,增多供气孔数 n 和降低供气压力 p_s 可以避免气膜内出现超音速流。

参考文献

- 【1】 Renn J C, Hsiao C H. Experimental CFD study on the mass flow-rate characteristics of gas through orifice-type restrictor in aerostatic bearings [J]. Tribology International, 2004, 37: 309 - 315.
 - 【2】 Li Y, Ding H. Influences of the geometrical parameters of aerostatic thrust bearing with pocketed orifice-type restrictor on its performance [J]. Tribology International, 2007, 40: 1120 - 1126.
 - 【3】 Khatait J P, Lin W, Lin W J. Design and development of orifice-type aerostatic thrust bearing [J]. SIMTech Technical Reports, 2005, 6(1): Jan-Jun
 - 【4】 Mohamed E E. CFD investigation of pressure depressions in aerostatic circular thrust bearings [J]. Tribology International, 2009, 42: 1108 - 1117.
 - 【5】 Miyatake M, Yoshimoto S. Numerical investigation of static and dynamic characteristics of aerostatic thrust bearings with small feed holes [J]. Tribology International, 2010, 43: 1353 - 1359.
 - 【6】 于贺春, 马文琦, 王祖温. 基于 FLUENT 的环面节流静压气体圆盘止推轴承二维流场仿真分析 [J]. 机床与液压, 2008, 36(10): 109 - 112.
YU Hechun, MA Wenqi, WANG Zuwen. Characteristic Analysis of Flow of Inherently Compensated Circular Thrust Aerostatic Bearing Based on Fluent Software [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(10): 109 - 112.
 - 【7】 十合晋一. 气体轴承设计、制作与应用 [M]. 韩涣臣, 译. 北京: 宇航出版社, 1988.
 - 【8】 刘瞰, 刘育华, 陈世杰. 静压气体润滑 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
-
- (上接第80页) Fabricating Method and Its Forecast of Sulfide Self-lubricating Coating [J]. Hot Working Technology, 2005 (11): 70 - 72.
- 【4】 王志平, 霍树斌. 超音速火焰喷涂 (HVOF) 技术发展及工艺特点 [J]. 焊接, 2000, 32(6): 6 - 10.
Wang Zhiping, Huo Shubin. Development and Characteristics of High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Spray [J]. Welding, 2000, 32(6): 6 - 10.
 - 【5】 盛选禹, 雒建斌, 温诗铸. MoS_2 超细粉制备耐磨涂层及其性能分析 [J]. 润滑与密封, 2000, 25(6): 33 - 35.
Sheng Xuanyu, Luo Jianbin, Wen Shizhu. Anti-wear Coating Made by Ultra-fine MoS_2 Powder and Its Performance [J]. Lubrication Engineering, 2000, 25(6): 33 - 35.
 - 【6】 姚冠新, 吴德宣. 等离子弧喷涂钼基钎合金涂层的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 64 - 67.
Yao Guanxin, Wu Dexuan. Experimental Study on Plasma-Spraying Molybdenum Base Pseudo-Alloy Coating [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 64 - 67.
 - 【7】 王海斗, 王昆林, 庄大明, 等. 等离子喷涂硫化亚铁润滑层的摩擦学性能 [J]. 材料热处理学报, 2002, 23(3): 38 - 41.
Wang Haidou, Wang Kunlin, Zhuang Daming, et al. Study on Tribological Properties of FeS Coated by Plasma Spray [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2002, 23(3): 38 - 41.
 - 【8】 Singer I L, Fayulle S. Wear behavior of triode-sputtered MoS_2 coating in dry sliding contact with steel and ceramics [J]. Wear, 1996, 195(3): 7 - 12.
 - 【9】 王海斗, 徐滨士, 刘家浚, 等. 硫化物喷涂层的微观组织与减摩性能 [J]. 金属热处理, 2005, 30(11): 6 - 8.
Wang Haidou, Xu Binshi, Liu Jiajun, et al. Microstructures and Anti-friction Property of Sprayed Sulfide Coating [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(11): 6 - 8.