

DOI: 10.3901/JME.2014.10.177

# 液压电机泵中孔板离心泵的增压效应\*

冀宏 张继铭 王金林 任威 孙东宁 王文璐

(兰州理工大学能源与动力工程学院 兰州 730050)

**摘要:** 液压电机泵利用油流在壳体内的流动带走工作过程中产生的热量, 由此会增加主泵吸油阻力, 影响主泵充分吸油。研制出的液压电机泵通过在主泵前设置孔板离心泵以解决此矛盾, 通过对液压电机泵与同规格电机液压泵组的试验结果进行对比分析, 同时结合不同转速下液压电机泵内吸油流场的仿真计算结果, 获得转速对主泵吸油流场的影响规律。研究发现, 孔板离心泵可以明显促进主泵充分吸油, 孔板离心泵出口(主泵吸油腔进口)总压最大值随其转速升高呈近似线性增加的趋势, 与电动机液压泵组相比电机泵容积效率高 1.25%左右。当孔板离心泵转速低于 1 395 r/min 后, 会对主泵吸油产生不利影响, 当输出压力升高至 22 MPa 时, 液压电机泵容积效率相对降低 2.7%。总结给出增压效应的确切含义。

**关键词:** 液压电机泵; 孔板离心泵; 增压效应; 流场仿真; 试验

**中图分类号:** TH137

## Charging Effect of Port-plate Centrifugal Pump in Electric Motor-pump

Ji Hong ZHANG Jiming WANG Jinlin REN Wei SUN Dongning WANG Wenlu

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

**Abstract:** The suction flow resistance rises in the electric motor-pump due to the flow of cooling oil through the suction channel to take away the heat, which affects the sufficiency of oil suction. To solve this problem, a port-plate centrifugal pump is placed in front of the main pump. The experiment of the electric motor-pump and the electric-hydraulic power unit with equal power is done and the flow field simulation of suction channel for different rotational speed is calculated, the influence rule of rotational speed on main pump suction flow field is obtained. The research results show that the suction performance of the main pump is evidently improved by the port-plate centrifugal pump and the maximum value of the total pressure on the outlet port of the port-plate centrifugal pump (the inlet port of the main pump) almost increases linearly with the increase of rotational speed. The volumetric efficiency of the electric motor-pump is nearly 1.25% higher than that of the electric-hydraulic power unit. When the rotational speed is below 1 395 r/min, the port-plate centrifugal pump causes an adverse impact on the suction performance of the main pump. The volumetric efficiency relatively decreases by 2.7% with the delivery pressure rising to 22 MPa. The exact meaning of charging effect is summarized.

**Key words:** electric motor-pump; port-plate centrifugal pump; charging effect; flow field simulation; experiment

## 0 前言

液压电机泵是将电动机与液压泵融合为一体的新一代液压动力单元, 具有结构紧凑、静音、效率高、无外泄漏等优点, 液压电机泵已成为液压动力单元一个重要的发展方向<sup>[1-4]</sup>。目前液压电机泵的研究、生产主要集中在发达国家和地区, 国内在此方面的研究与开发还比较少, 设计准则与试验研究方面的文献还不多见。文献[5]针对研制出的液压电

机叶片泵建立了性能试验系统, 得到了液压电机叶片泵样机的转子转速、噪声、功率和效率等随输出压力变化的特性; 文献[6]获得了孔板离心泵主要结构参数对其升压效果和效率的影响规律, 并总结出孔板离心泵的设计原则; 文献[7]对柱塞液压电机泵内部流场进行数值仿真与计算, 为流道结构优化设计提供了参考。

液压电机泵利用油液在壳体内的流动带走工作过程中产生的热量(油冷), 由此会增加主泵的吸油阻力, 导致吸油不足甚至吸空, 这是电机泵中存在的一个共性问题。为此, 提出在主泵进油口前设置孔板离心泵以解决此矛盾<sup>[8]</sup>。孔板离心泵与液压

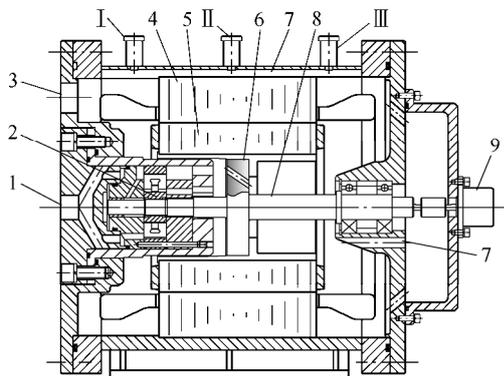
\* 国家自然科学基金(51075194)和甘肃省科技支撑计划(1011GKCA041)资助项目。20130524 收到初稿, 20131026 收到修改稿

电机泵主轴集成在一起,具有结构简单、加工制造方便的优点。孔板离心泵设置在主泵进油腔前端,构成主泵的前置辅助泵,利用旋转离心力作用,提升主泵进油口的压力,进而改善主泵的吸油性能。通过对研制出的第二代液压电机泵与同规格电机液压泵组的对比试验,结合不同转速下电机泵内吸油流场的仿真计算,揭示出孔板离心泵对主泵吸油性能的影响规律,并总结定义为增压效应。本研究对高效液压电机泵研制和液压泵自吸性能改善具有普适的指导意义。

## 1 液压电机泵结构与试验系统

### 1.1 液压电机泵结构

图 1 给出了液压电机泵(以下简称为电机泵)的结构图。电机泵主要是由三相异步电动机、孔板离心泵与主泵(高压叶片泵)组成。其中电机转子 5、孔板离心泵 6 和主轴 8 集成为一体。压力传感器 I、II、III 监测吸油流道内部的压力,转速传感器 9 通过弹性联轴器与主轴连接测量电机转子转速。孔板离心泵实物如图 1b 所示。



(a) 液压电动机叶片泵样机结构



(b) 孔板离心泵实物

图 1 液压电机泵结构图

1. 油口 2. 主泵 3. 进油口 4. 电机定子 5. 电机转子  
6. 孔板离心泵 7. 吸油流道 8. 主轴 9. 转速传感器  
I. 压力传感器 I II. 压力传感器 II III. 压力传感器 III

电机泵通电工作时,电机转子 5 把电磁转矩传递到主泵 2 的转子,液压油从进油口 3 进入,流经

吸油流道 7,通过孔板离心泵 6 把液压油输送至主泵的吸油腔,再由主泵高压区的出油口 1 排出。油流在壳体内环绕电机定子、转子流动带走工作过程中产生的热量,起到冷却作用。

### 1.2 液压电机泵试验系统

图 2 为电机泵与同规格电机液压泵组的对比例照,电机液压泵组由标准电动机与独立的液压泵组成。电机液压泵组中的液压泵与电机泵中的主泵型号相同;电机液压泵组采用与电机泵电机功率相同的 11 kW 标准 Y2 系列电动机。电机泵与电机液压泵组的对比试验在相同初始油温(33 °C±2 °C)、供电电压及负载条件下进行,通过溢流阀来调节输出压力,并测量转速、输出压力、流量及温度等参数。



图 2 电机泵与同规格电机液压泵组对比例照

## 2 试验结果分析

电机泵与电机液压泵组的容积效率

$$\eta_{pv} = \frac{q_p}{q_t} = \frac{q_p}{nD} \quad (1)$$

式中  $\eta_{pv}$ ——容积效率;

$q_p$ ——实际输出流量;

$q_t$ ——理论输出流量;

$n$ ——转速;

$D$ ——理论排量。

图 3 给出了容积效率与转速随输出压力的变化曲线。随着输出压力的升高,电机泵与电机液压泵组的容积效率都逐渐降低,两者的转速也随之下降,电机泵转速下降较快,其主要原因是电机泵样机内电机转子鼠笼导体材料使用了电阻率较大的黄铜,而标准电动机转子鼠笼为铸铝材料。空载运行时两者容积效率基本相同,输出压力从 0 MPa 上升至 15 MPa 过程中,电机泵容积效率比电机液压泵组高 1.25% 左右;当输出压力升高至 15 MPa 时,电机泵转速为 1 395 r/min,电机泵容积效率开始低于电机

液压泵组, 输出压力升高至 22 MPa 时, 容积效率相对降低 2.7%。孔板离心泵将机械能转化为流体的动能, 增加流体能量, 促进主泵充分吸油。当电机泵转速较高时, 孔板离心泵能使主泵吸油充足; 当输出压力升高至 15 MPa, 对应转速下降至 1 395 r/min 以后, 孔板离心泵供油能力减弱, 不能为主泵充分供油, 导致电机泵容积效率的相对降低。同时, 图 3a 也表明电机液压泵组中的液压泵存在着吸油不充足的现象, 尤其是在中等转速(1 500 r/min)条件下液压泵仍有吸油不充足的共性现象。

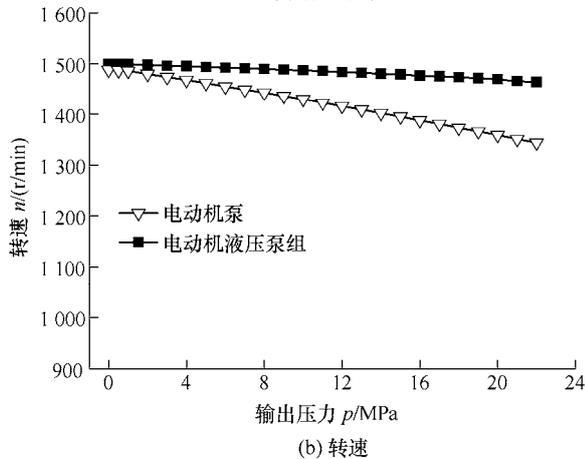
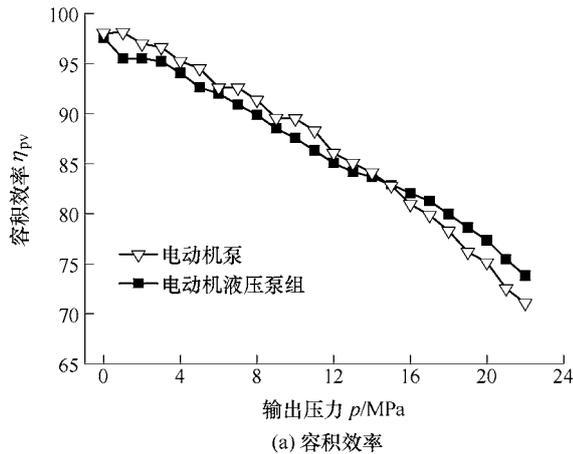


图 3 容积效率与转速随输出压力的变化曲线

### 3 流场仿真及结果分析

为进一步揭示电机泵中孔板离心泵对主泵吸油流场的影响规律, 应用 Fluent 流场仿真技术对电机泵在不同转速下的主泵吸油流场进行仿真计算。

#### 3.1 计算模型

图 4 给出了电机泵内主泵吸油流场的三维几何模型。建模时将电机定子绕组形状等效为与实际绕组体积相同的中空圆环体, 计算区域为从供油口至孔板离心泵出口(主泵吸油腔进口)的流体区域。

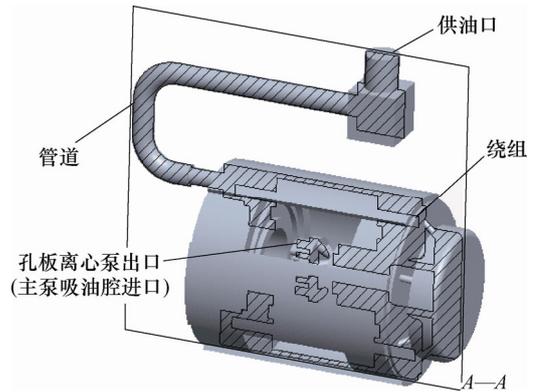


图 4 电机泵内主泵吸油流场三维几何模型

根据试验结果确定孔板离心泵转速与油液黏度, 如表 1 所示。

表 1 计算模型

模型	转速 $n/(r/min)$	动力黏度 $\mu/(Pa\cdot s)$
1	1 475	0.047 6
2	1 450	0.047 5
3	1 425	0.046 8
4	1 400	0.046 2
5	1 375	0.044 3
6	1 350	0.042 8

电机泵试验使用 L-HM46 液压油, 在试验过程中电机泵进油口油液温度由 33.3 °C 上升至 36.8 °C, 根据油液黏温特性<sup>[9]</sup>, 可得油液在不同温度下的动力黏度。模型采用四面体网格进行划分, 尺寸最小处保证至少有 5 层网格, 网格总数为 856 万, 网格质量为 0.74。

控制方程采用定常雷诺时均 Navier-stokes 方程, 湍流模型采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 此模型处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动时有更高的精度与准确性<sup>[10]</sup>。采用 SIMPLE 算法计算流场中的压力与速度耦合, 离散格式采用中心差分格式。

模型的进口边界条件设置为压力进口, 进口相对压力为 0 MPa; 出口边界条件设置为速度出口, 出口速度初值根据主泵在不同转速下的输出流量计算得出。孔板离心泵的流道壁面及电机转子壁面设置为旋转壁面, 其余壁面设置为无滑移壁面。油液密度为 860 kg/m<sup>3</sup>, 收敛精度为 10<sup>-6</sup>。

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 电机泵内流场与速度分布

图 5 给出了电机泵转速为 1 475 r/min 时中心截面处的流场与速度分布云图。由图 5 可知, 油液从供油口通过管道流入电机泵, 经壳体与定子之间的吸油流道进入转子的中间腔内, 通过孔板离心泵把油液输送至孔板离心泵出口。在油液流动过程中, 流经电机泵内部定子、转子与孔板离心泵后进入主泵吸油腔。由图 5 可见, 孔板离心泵外侧油流流速

达到 6.6 m/s, 这是孔板离心泵对油液做功的结果。油液在电机泵壳体内的绕流流动可带走电机工作过程中产生的热量, 起到良好散热的作用。

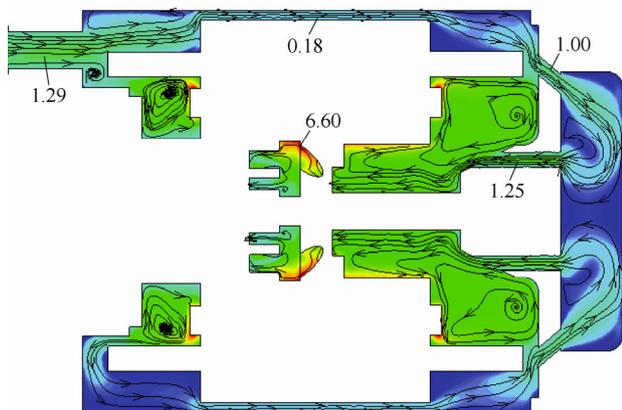


图 5 电机泵内流线与速度分布云图(m/s)

### 3.2.2 电机泵内总压分布

电机泵工作时, 孔板离心泵对油液做功, 增加了油液的能量, 流场总压分布表示电机泵内流体各处的能量(压力势能与动能之和)。图 6 给出了电机泵转速分别为 1 475 r/min、1 350 r/min 时的电机泵内总压分布云图。由图 6 可见, 油液沿流动方向(图 5)从进油口至孔板离心泵进油腔, 总压逐渐减小, 这是由于吸油流道内部的阻力所致, 吸油流道内的

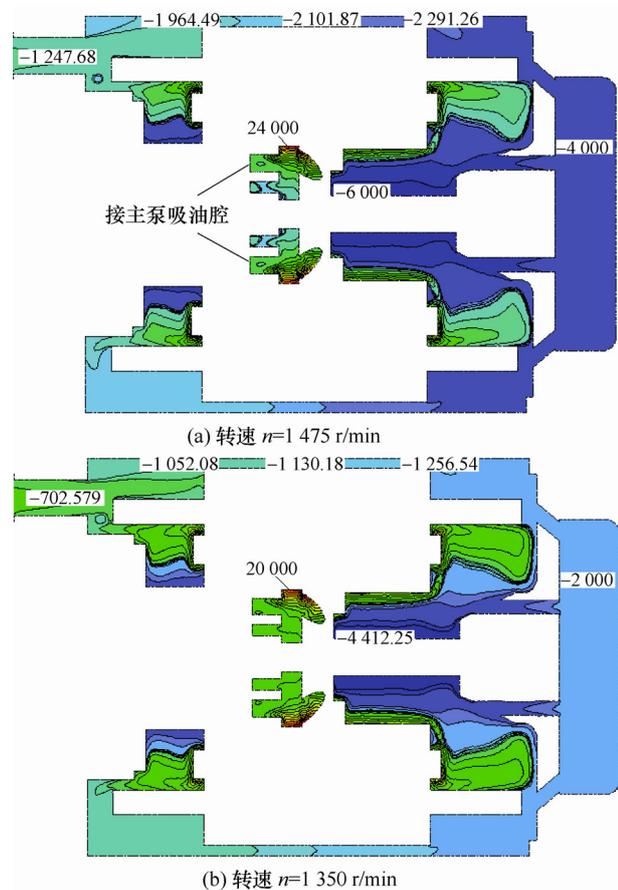


图 6 电机泵内总压分布云图(Pa·s)

负压值随转速的降低而减小。孔板离心泵对流体做功, 使得流体从孔板离心泵进油腔流至孔板离心泵出口的动能增加, 造成离心管外侧总压大幅增加。当  $n=1\ 475\ \text{r/min}$  时, 通过孔板离心泵做功, 流体总压上升了 30 000 Pa(孔板离心泵中离心管出口、进口总压差值); 当  $n=1\ 350\ \text{r/min}$  时, 总压上升了 24 412.25 Pa, 总压相对降低 17%, 表明随着转速的下降, 孔板离心泵对油液做功减少, 导致孔板离心泵出口(即主泵吸油腔进口)总压的下降。

### 3.2.3 孔板离心泵出口总压分布

图 7 给出了不同转速下孔板离心泵出口的总压分布云图。电机泵通电工作时电机转子按顺时针方向旋转, 对比图 7a、7b 可知孔板离心泵出口右侧压力高, 左侧压力低, 总压分布不均匀。转速从 1 475 r/min 下降至 1 350 r/min 的过程中, 孔板离心泵出口总压最大值也随之下降。

图 8 给出了孔板离心泵出口总压最大值随转速的变化曲线。用出口总压最大值作为评价孔板离心泵提升主泵吸油性能的指标。出口总压最大值随着转速的升高而升高, 呈现近似线性变化的规律。电机泵中孔板离心泵的增压效果随着转速的升高而增强, 能使主泵充足吸油。

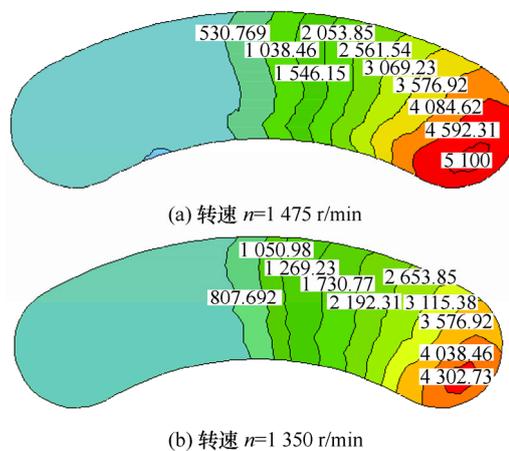


图 7 孔板离心泵出口总压分布云图(Pa)

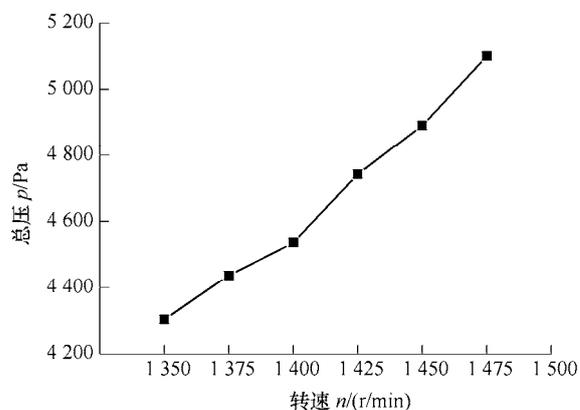


图 8 出口总压最大值随转速的变化曲线

## 4 吸油流道压力测量

图9给出的是位于电机泵吸油流道内一个位置上的压力(图1a中压力传感器2)的流场仿真结果与实测值的对比曲线。由图9可知,吸油流道内的绝对压力随着转速上升而减小,流场仿真结果与实测数据在变化趋势上吻合良好,在数值上存在一定的误差,两者相对误差在1.2%~2.0%。误差产生的原因主要来源于流场仿真模型的假设、数值计算误差和试验的测量误差。

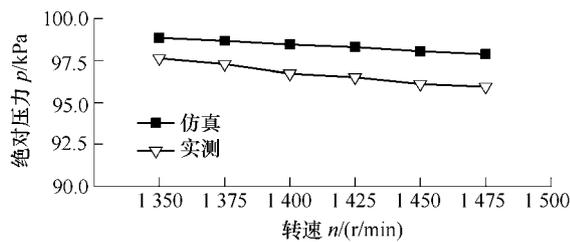


图9 吸油流道内压力

## 5 结论

通过对液压电机泵和电机液压泵组的对比试验,结合不同转速下对电机泵内主泵吸油流场的仿真分析,获得如下主要结论。

(1) 孔板离心泵可有效解决电机泵油冷与主泵充分吸油的矛盾。转速较高时,电机泵容积效率比同规格电机液压泵组高1.25%左右,孔板离心泵可为主泵充足供油;当转速低于1395 r/min后,电机泵容积效率会低于电机液压泵组,输出压力22 MPa时,容积效率相对降低2.7%。

(2) 主泵吸油腔进口设置孔板离心泵,增大了离心泵出口(主泵吸油腔进口)流场总压分布的总压最大值,总压最大值随转速增大而增大,转速大于一定值(临界转速)时,可为主泵充足供油,提高主泵的容积效率,当转速低于临界转速后,主泵效率将有所降低,此即增压效应。

(3) 与电机泵的试验对比表明,电机液压泵组中的液压泵在中等转速(1500 r/min)运行时仍存在明显的吸油不足的现象。通过减小吸油流道阻力或采取增压措施,可提高液压泵的容积效率约1%~2%,进而能改善因主泵吸油不足引起的流量脉动及气穴现象。

### 参 考 文 献

[1] WEHNER D, HELDUSER S. Integrated electric-hydraulic drives for power and motion

control[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, China, Hangzhou, 2005: 81-84.

- [2] 冀宏, 张立升, 王峥嵘, 等. 电动液压动力单元的一体化演变[J]. 机床与液压, 2011, 39(19): 117-120.  
JI Hong, ZHANG Lisheng, WANG Zhengrong, et al. Development of integration of electro-hydraulic power unit[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(19): 117-120.
- [3] 江木正夫, 萧欣志. 日本液压技术动向[J]. 液压气动与密封, 2004(1): 11-14.  
MASAO E, XIAO Xinzhi. The trend of Japan's hydraulic technology[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2004(1): 11-14.
- [4] 付永领, 李祝锋, 安高成, 等. 电液泵发展现状与关键技术综述[J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 143-149, 160.  
FU Yongling, LI Zhufeng, AN Gaocheng, et al. State of the art and core techniques of edropump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(1): 143-149, 160.
- [5] 冀宏, 李志锋, 王峥嵘, 等. 液压电机叶片泵样机的性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 48-51, 56.  
JI Hong, LI Zhifeng, WANG Zhengrong, et al. Performance test of the prototype of electric motor pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 48-51, 56.
- [6] 冀宏, 丁大力, 王峥嵘, 等. 液压电机叶片泵内置孔板离心泵的流场解析与优化[J]. 机械工程学报, 2009, 46(6): 199-205.  
JI Hong, DING Dali, WANG Zhengrong, et al. Flow analysis and optimization of port-plate centrifugal pump in electric motor pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 199-205.
- [7] 高殿荣, 刘金慧, 温茂森. 轴向柱塞液压电机泵内部流场的分析[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(6): 483-492, 500.  
GAO Dianrong, LIU Jinhui, WEN Maosen. Analysis of internal flow field of a new axial piston hydraulic motor pump[J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(6): 483-492, 500.
- [8] 冀宏, 王金林, 孙天健, 等. 电动机内含离心泵和叶片泵的液压动力单元: 中国, 201110360308.3[P]. 2012-08-08.  
JI Hong, WANG Jinlin, SUN Tianjian, et al. The hydraulic power unit with motor including the vane pump and the centrifugal charging pump: China, 201110360308.3[P]. 2012-08-08.
- [9] 雷天觉. 新编液压工程手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.  
LEI Tianjue. The new hydraulic engineering manual[M].

Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999.

Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[10] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

作者简介: 冀宏(通信作者), 男, 1972 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代液压元件基础理论及应用。

WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis-The Principle and application of CFD[M].

E-mail: jihong@lut.cn



### 第 3 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

## 利用化学和机械协同作用的 CVD 金刚石抛光机理与技术

作者: 苑泽伟

毕业学校: 大连理工大学

指导教师: 金洙吉

金刚石是集多种优越的物理、化学、光学和热学性能于一身的材料极品。它不但是自然界已知材料中硬度最大、摩擦因数最小、导热性能最好的材料, 而且具有优良的电绝缘性、较宽的透光波段、优秀的半导体特性和化学惰性, 被视为 21 世纪最有发展前途的工程材料, 具有广泛的应用前景和巨大的市场潜力。化学气相沉积(CVD)金刚石的出现打破了天然金刚石数量稀少、尺寸过小及价格昂贵等限制, 使金刚石的应用不再局限于传统的刀具和模具领域, 逐渐向光学、热学、电子半导体及声学等高科技领域发展。然而由于其生长机制的限制, CVD 金刚石晶粒粗大, 表面粗糙度和精度较差, 无法满足上述领域对金刚石超光滑、高精度和低损伤的表面质量要求。平坦化技术已经成为 CVD 金刚石应用于高新技术领域的关键技术之一。

金刚石的高硬度和良好化学稳定性给目前常用的加工技术带来了挑战。机械抛光加工效率极低, 容易引入裂纹和划痕等损伤; 化学作用较强的激光抛光、电火花加工和化学刻蚀等方法会遇到加工表面质量较差、残留有变质层等问题。借助化学和机械的协同作用去除金刚石材料将为 CVD 金刚石的高效、超精密和低损伤抛光提供新思路。为此, 探索化学和机械协同作用下金刚石的微观去除机理, 研究化学机械协同作用抛光的相关技术是实现 CVD 金刚石平坦化的关键。

本文从化学热力学和化学动力学理论入手, 研究化学和机械协同作用去除金刚石材料的相关理论, 分别采用摩擦化学抛光技术和化学机械抛光技术为粗、精加工技术实现 CVD 金刚石高效、超精密、低损伤的抛光。主要的研究工作如下。

(1) 通过化学反应热力学和化学动力学分析, 论证过渡金属催化金刚石向石墨转化的可行性, 揭示金刚石向石墨转化的金属催化机制, 提出摩擦化学抛光盘材料应具备未配对电子、垂直对准原则、高温硬度和高温抗氧化性等基本条件; 研究化学和机械协同作用下金刚石氧化的化学动力学理论, 建立化学机械抛光金刚石的化学动力学模型。揭示金刚石的表面结构、机械摩擦引入的晶格畸变和氧化剂的氧化性是金刚石氧化的驱动力。

(2) 根据摩擦化学抛光盘的材料要求, 采用机械合金化结合真空热压烧结技术制备 FeNiCr 合金基抛光盘。表征 FeNiCr 合金基抛光盘材料的硬度、抗氧化性能及抛光性能。结果表明, FeNiCr 合金基抛光盘材料的硬度和高温抗氧化性能均优于 304 不锈钢和高速钢。抛光时材料去除率达到  $3.7 \mu\text{m}/\text{min}$ , 远高于 TiAl 合金基、304 不锈钢和高速钢三种抛光盘的抛光效率。根据理论分析和试验研究, 摩擦化学抛光机理是, 金刚石在摩擦热和金属催化作用下先转化为石墨, 然后以机械、扩散或氧化的形式去除。

(3) 研制高效稳定的抛光液是化学机械抛光 CVD 金刚石的前提。根据理论分析和试验研究, 在  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ 、 $\text{KMnO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 $\text{CrO}_3$ 、 $\text{KIO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  等八种氧化剂中,  $\text{K}_2\text{FeO}_4$  抛光效果最好。另外, 最佳磨料为粒径  $2 \mu\text{m}$  的碳化硼磨料, 最佳抛光盘为玻璃盘。在此基础上, 分析高铁酸钾抛光液的氧化性、物理和化学稳定性, 通过试验确定最佳的氧化剂浓度、磷酸浓度和催化剂分别为  $15 \text{ g}/100\text{mL}$  水、 $4\sim 7.5 \text{ mL}/100\text{mL}$  水和粒径  $30 \text{ nm}$  的催化剂 T 粉末。采用 X 射线衍射、拉曼光谱及 XPS 光电子能谱分析研究抛光后 CVD 金刚石的表面成分, 揭示化学机械抛光 CVD 金刚石的材料去除机理。结果表明, 抛光后金刚石表面存在 C-C、C-OH、C-O-C、C=O 和 O=C-OH 等多种形式官能团。化学机械抛光 CVD 金刚石的材料去除机理如下: 高铁酸钾在酸性条件下将水氧化为自由基氧, 自由基氧吸附在 CVD 金刚石和固体催化剂表面, 逐步氧化金刚石表面碳原子。磨粒的机械划擦作用使金刚石产生一层厚度约为  $2 \text{ nm}$  畸变层, 保证化学反应的持续进行。

(4) 搭建局部加热式化学机械抛光试验台和小尺寸晶片摩擦力在线测量装置, 研究化学机械抛光温度、压力、抛光盘转速、氧化剂浓度对材料去除率及摩擦力的影响规律。根据理论分析和试验研究, 合理的摩擦化学抛光工艺如下: 抛光压力为  $6.5 \text{ MPa}$ , 抛光盘转速为  $11\ 000 \text{ r}/\text{min}$ ; 合理的化学机械抛光工艺如下: 抛光压力为  $266.7 \text{ kPa}$ , 抛光盘转速为  $70 \text{ r}/\text{min}$ , 抛光头转速为  $23 \text{ r}/\text{min}$ , 抛光温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。化学机械抛光 CVD 金刚石的摩擦因数在  $0.060\sim 0.065$  范围内变化, 为混合摩擦状态。采用优化的抛光工艺抛光后, CVD 金刚石表面粗糙度可达到  $R_a=0.187 \text{ nm}$ , 表面没有划痕和损伤。