无菌精密灌装的氧化锆陶瓷无阀泵设计及特性分析

周欢伟¹,边少平²

(1.广州铁路职业技术学院,广州 510430; 2.内蒙古建筑职业技术学院,呼和浩特,010070)

摘要:目的 针对传统柱塞泵结构复杂、灌装稳定性较差,已经无法满足高温、耐腐蚀的高端无菌精密 灌装需求,提出利用氧化锆陶瓷的高强度、高硬度、抗刮耐磨性、耐腐蚀性等特性,研究出高精密、高 洁净度的陶瓷无阀泵。方法 通过改变传统的柱塞模式,全新设计一种无阀结构,使陶瓷柱塞能在陶瓷 缸筒内同时实现周向旋转和轴向运动,获得液体压力差。建立压力和流量的关系模型,提出无阀旋转泵 流量控制和精度微调等的实现方法。分析研磨杆制造缸筒的加工工艺,保障高装配精度的工艺方法。结 果 当灌装范围为6mL/r时,最高达灌装精度达0.42%,获得了高性能的氧化锆陶瓷无阀泵。结论 研制 的无阀泵灌装具有范围大、灌装精度高等特点,适用于耐高温、耐腐蚀的高端无菌精密灌装行业。 关键词:精密灌装;陶瓷;无阀;旋转泵;无菌

中图分类号:TB486 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2019)09-0161-06 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.026

Design and Characteristic of Valve-less Zirconia Ceramic Pump for Aseptic Precision Filling

ZHOU Huan-wei¹, BIAN Shao-ping²

(1.Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 510430, China;2.Inner Mongolia Technical College of Construction Hohhot, Hohhot 010070, China)

ABSTRACT: The work aims to develop valve-less ceramic pump with high precision and cleanliness by utilizing characteristics of zirconia ceramics such as high strength, high hardness, scratch and abrasion resistance and corrosion resistance, because the traditional plunger pump has complex structure and poor filling stability, what can no longer meet the high-end aseptic precision filling requirements of high temperature and corrosion resistance. By changing the traditional plunger mode, a new valve-less structure was designed to make the ceramic plunger rotate circumferentially and move axially in the ceramic cylinder at the same time, and the liquid pressure difference was obtained. The relationship model between pressure and flow was established. The realization methods of flow control and precision fine-tuning were put forward for the valve-less rotary pump. The processing technology of cylinder barrel manufactured by grinding rod and the processing method of ensuring high assembly accuracy were analyzed. When the filling range was 6 mL/r, the highest filling accuracy could reach 0.42%. Valve-less zirconia ceramic pump of high performance was obtained. The developed valve-less zirconia ceramic pump has a large filling range and high filling accuracy. It is suitable for the high-end aseptic precision filling industry with high temperature and corrosion resistance.

KEY WORDS: precision filling, ceramics, valve-less, rotary pumps, aseptic

收稿日期: 2018-12-10

基金项目: 广州市科技创新委员会-科学研究专项(201707010406); 广州市属高校产学研结合基地(14CXY10); 广州市 教育局-课程与教学研究项目(2017242202); 广东省自然科学基金(2016A030310101)

作者简介:周欢伟(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为包装机械设计、微纳米加工技术。

阀体的结构形式与灌装精度密切相关^[1-2],传统 柱塞泵主要由柱塞、缸体、弹簧、单向阀等关键零部 件组成,当柱塞在缸体内作直线往返运动时,利用柱 塞与缸体高精密的配合,形成局部真空,实现液体的 吸入与排出。然而,这种柱塞泵结构复杂,柱塞的个 数与流量的稳定性密切相关,偶数柱塞比奇数柱塞的 稳定性强,且柱塞数量越多,柱塞泵表现得越稳定, 不适合高精度的灌装^[3]。

为了获得稳定的微量精密灌装结构模型,1996年,石奇光等人^[4]设计了一款无阀微型泵,用于检测 DPIV等样品,取得了较好的效果。2012年,李疆^[5]提出了气动旋转式灌装机构,在继承直线式灌装机构 优点的同时,利用控制恒压状态下的角座阀,获得不 同的灌装量,且实现了在线实时检测及补偿,使产品 具有较高的灌装精度。2014年,庆波等人^[6]通过合理 设计瓶子与拔杆的位置,确保瓶子的进瓶、灌装、退 瓶的整个运动轨迹,设计了合理的双列旋转式的灌装 结构,使产能提高了 0.8~1 倍。2013年,Jurgen S 等人^[7]设计了小型化齿轮泵,且求解了达到精密灌装 的径向最小间隙。2014年,Kollek^[8]分析了小型齿轮 的力矩、切向力与流量的关系模型。2014年,MATEO-ORTIZ D^[9]等人设计了微注灌装设备,通过多通道的方 法,实现了液体或粉剂类物料的有效精量灌装。

无阀旋转泵是使偏心旋转柱塞在缸体内作旋转 和直线运动,在柱塞的表面上开设一平台,形成一定 容积的空间,利用柱塞与吸入口与排出口不断相通, 实现液体吸入与排出。由于柱塞表面的容量较小,在 旋转时吸入液体量也较小,流量较小且平稳,缸体内 无死角,容易清洗,适合小容量高洁净度的精密灌装 行业。为了控制灌装精度,2013 年,李明等人^[10]利 用 PLC 控制技术,实现了液体的精准全自动定量灌 装。2015年,STABILE A和 CHO Y等人^[11-12]提出 了基于永磁低速同步伺服电机的灌装精度控制策略, 获得了较好的效果。2017年,韩顺杰等人^[13]利用 CMAC-PID 控制器,采用卡尔曼滤波方法,借助人工 蜂群算法^[14],通过抑制噪声和干扰信号,获得了响应 快、超调量小、抗干扰能力强的超灌装精度的精油灌 装设备。

宋玉泉院士^[15]指出,结构陶瓷是指具有力学性能 和部分热学、化学功能,用于制造机械工程零部件的 工程陶瓷,而结构陶瓷分为3种,即氧化物陶瓷、非 氧化物陶瓷和玻璃陶瓷,其中氧化物陶瓷中有氧化锆 陶瓷、氧化铝陶瓷、氧化铍陶瓷等种类,而氧化锆陶 瓷是这几种陶瓷中韧性最高、抗弯强度最高、硬度较 高、耐磨性较高、耐化学腐蚀较好、抗氧化较强的材 料,且生产工艺简单,力学性能较优。文中设计一款 新颖的无阀旋转泵,利用氧化锆陶瓷上述优点,选用 其为无阀旋转泵的主要核心材料。通过流量控制、加 工和装配工艺分析,确保设计和制造的无阀泵具有较 长的工作寿命,实现高精度的定量灌装,适应于高腐 蚀、高温、高洁净度等特殊液体的灌装。

1 结构设计

无阀旋转泵是在缸筒不动的情况下(见图 1), 电机通过角支轴承旋转使陶瓷柱塞在缸筒内作旋转 运动;同时,陶瓷柱塞的中心轴与电机的中心轴有一 定的夹角β,使陶瓷柱塞在缸筒内作来回直线运动, 产生压力差,实现泵里液体吸入和排出,达到灌装的 目的。电机固定支架通过螺栓与泵头固定支架的弧形 槽连接,见图 2,可以使陶瓷泵柱塞部分以弧形槽的 弧线作一定角度的旋转运动。



图 1 氧化锆陶瓷无阀旋转泵结构 Fig.1 Structure of valve-less zirconia ceramic pump

在陶瓷柱塞的圆柱表面上铣削陶瓷柱塞平面 B, 铣削深度为 H,构成泵体的液体存储空间。入料口内 径和出料口内径都为 D₂,陶瓷柱塞在缸筒内旋转, 当入口与陶瓷柱塞平面 B 相通时,出口与陶瓷柱塞表 面的非平面 B 处接触,使出口封闭,同时,在角支轴 承的作用下,陶瓷柱塞沿缸筒的中心轴向 X 正方向运 动,缸筒内产生负压,使液体通过入口沿平面 B 从外 部吸入泵体,实现进料;当出口与陶瓷柱塞平面 B 相 通时,入口与陶瓷柱塞表面的非平面 B 处接触,使入 口封闭,同时,在角支轴承的作用下,陶瓷柱塞沿缸 筒的中心轴向 X 负方向运动,缸筒内产生正压,使液 体通过出口沿平面 B 向外部排出到灌装容器中,实现 灌装。

2 压力及流量分析

根据伯努利方程:

$$Zg + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = C$$

其中: *Z* 为端口面距基准面的高度 (mm); *p* 为 静压力 (Pa); *v* 为流体速度 (m/s); *ρ* 为流体密度 (kg/m³); *g* 为重力加速度 (m/s²)。

当液体流动时,液体所受阻力与速度v成正比,对于层流流动,压力坡降J为:

 $J = \frac{32\,\mu v L \tan\,\beta}{\rho g D_2^2}$

由于速度较快,此时的压力坡降 J 与静压力 p 相等。

 $v = \rho g D_2^2 \rho / (32 \mu L \tan \beta)$

其中: L 为角支轴承的滚动体到陶瓷柱塞中心线的距离(mm); μ 为物料的动力粘度系数(Pa·s)。

陶瓷柱塞每转一圈使体积 *V* 的料液从入口吸入, 当角支轴承的滚动体到陶瓷柱塞中心线的距离为 *L* 时,可得陶瓷柱塞在缸筒的最大活动位移为 *L*tan β, 电机每转 1 周料液从入口吸入的体积为:

$$V = \frac{L\pi D_1^2 \tan \beta}{4}$$

流量为:
$$Q_1 = \frac{L\pi D_1^2 n \tan \beta}{4 \times 60}$$

其中: Q₁为无阀旋转泵的入口流量(mL/s); D₁ 为陶瓷柱塞的直径(mm)。n为电机转速(r/min); V 为电机每转1周料液从入口吸入的体积(mL/r)。

根据液压原理可知:

$$Q_2 = \frac{\pi D_2^4 \rho g P}{128 \mu L \tan \beta}$$
(2)

其中:
$$Q_2$$
为无阀旋转泵的出口流量(mL/s); D_2

为出口管道内径 (mm)。

3 流量及精度控制

3.1 流量控制

电机连接套安装在电机主轴上,角支轴承通过电机连接套与驱动部分联接,陶瓷柱塞紧配合在角支轴承上,使陶瓷柱塞的中心轴与电机中心轴形成夹角 β 。 当电机旋转时,带动电机连接套旋转,电机旋转套带动角支轴承旋转,利用角支轴承的球头能旋转 360°的原理,且产生偏心运动,带动陶瓷柱塞既能旋转运动,又能沿缸筒中心轴直线运动,使液体能从入口进料,从出口灌装。电机旋转1周,陶瓷柱塞旋转1周, 且沿缸筒中心轴往复运动1次,无阀旋转泵完成1个 周期的灌装。夹角 β 的大小决定了陶瓷柱塞沿缸筒中 心轴运动的行程,电机的转速决定了陶瓷柱塞工作1 个周期的频率,故电机转速与夹角 β 直接影响无阀旋转泵的流量。

根据式(1)可得,氧化锆陶瓷无阀旋转泵的流 量与电机转速 n,夹角 β 密切相关。当夹角 β 增大时, 陶瓷柱塞的中心轴与电机中心轴变平坦,使得陶瓷柱 塞在缸筒的最大活动位移变小,从而使得灌装液体体 积变小;反之亦然。

对于无阀旋转泵,人口流量与出口流量相等,即 $Q_1 = Q_2$,联合式(1)和(2)可得:

$$V = \frac{L\pi D_1^2 \tan \beta}{4} = \frac{60\pi D_2^4 \rho g p}{128 \mu n L \tan \beta}$$

灌装范围相同时,出口的灌装压力与电机转速、 角支轴承的滚动体到陶瓷柱塞中心线的距离 *L* 成 正比。

3.2 精准控制

(1)

为了获得精准的料液,松开电机固定支架与泵头固定支架间的螺栓,沿着弧形槽的弧线改变夹角 β 的大小,使陶瓷柱塞在缸筒里的运动行程发生微小的改变,进而微量改变入料和出料的体积,达到精准微调的目标。当夹角从 β_1 变化到 β_2 时,电机每转1周产生的容积差为:

$$\Delta V = \frac{L\pi d_1^2 (\tan \beta_1 - \tan \beta_2)}{4}$$

当减小夹角 β 时, ΔV 值为正值,表示灌装料液的体积将增加 ΔV ;当增大夹角 β 时, ΔV 值为负值, 表示灌装料液的体积将减少 ΔV 。由于弧形槽的长度 有限,故夹角 β 的改变也只能控制在一定的范围内, 一般将夹角 β 控制在 130°~140°内变化。以 0.14 mL/r 的无阀旋转泵为例,当夹角 β 从 135°变化到 134°时, 电机每转 1 周增加容积 0.0049 mL,每度调整精度量达 3.55%,改变了传统柱塞泵无法微调灌装料液容量的现状,从而达到了精量调整灌装料液容量的目标。

4 制造工艺分析

4.1 加工工艺分析

由于氧化锆陶瓷的高强度、高硬度和抗刮耐磨等 性质,加工孔时,通常采用研磨的方式进行,氧化锆 陶瓷的陶瓷柱塞与缸筒以基轴制加工。在磨削之前, 通过眼睛识辨筛选颜色不对、含有杂质的物料,利用 研磨杆等专用加工刀具,采用粗加工和精加工两步, 使得工件和研磨杆达到最佳贴合状态,同时安装一整 套冷却装置,使磨削热和粉屑及时排出。

4.2 装配工艺分析

氧化锆陶瓷长期在弯曲作用力下,容易产生塑性 变形,为了保证高精密的灌装精度,需要保证一定的 装配工艺:控制陶瓷柱塞与缸筒的同轴度和直线度在 微米级,且将它们水平紧固在灌装机部件上;由于陶 瓷柱塞与缸筒为精密共同体,尺寸精度和表面粗糙度 要求较高,氧化锆陶瓷难以加工,做到互换性高的陶 瓷柱塞和缸筒较难,故采用基轴制的选配法装配,保 证它们的配合精度控制在亚微米级;在装配时,要确 保旋转泵的各密封部件无走动,且无泄漏。

5 实验分析

检验项目

标准要求

实测数据

5.1 实验平台建设

在三维数字模型的基础上,制造及装配出的样机 见图 2。用水作为灌装液体进行实验,在 25 ℃时, 其密度为 1000 kg/m³,动力粘度系数为 0.899 kPa·s, 为获得 0.14 mL/r 的料液,通过计算获得角支轴承的滚 动体到陶瓷柱塞中心线的距离 L 为 22 mm,陶瓷柱塞 直径 D_1 为 21.5 mm,入口内径和出口内径 D_2 为 7 mm。



图 2 氧化锆陶瓷无阀旋转泵 Fig. 2 Valve-less zirconia ceramic rotary pump

5.2 无菌处理

氧化锆陶瓷本身具有耐高温、耐酸碱腐蚀及高化 学稳定性等优良特性,在使用前,需要对无阀陶瓷泵 主体进行灭菌,具体步骤如下:利用不超过 80 ℃的 热水,开启旋转泵,使陶瓷柱塞和缸筒产生相应的拉 动和旋转,去除陶瓷柱塞和缸筒的表面毛刺;分别将 瓷柱塞和缸筒拆卸下来,在非金属容器内,用不超过 80 ℃热水清洗零件;为防止受热变形折叠时产生变 形,将瓷柱塞和缸筒等主要零件垂直吊挂,放入温度 120 ℃且压力 0.1 MPa 的专用灭菌箱高压湿热灭菌, 灭菌时间为 30 min,确保灭菌效果良好;灭菌后将各 部件温度自然降到室温,避免由于急冷导致陶瓷柱塞 和缸筒的损坏;按照要求组装无阀陶瓷泵,并获得良 好的运动效果;根据物料要求,对原料进行无菌精密 灌装。

5.3 数据分析

0.14

0.14

以表 1 的参数设计一款特定的无阀旋转泵,用 60 ℃的水为介质进行实验,分析不同灌装范围的无 阀旋转泵灌装精度。

0~715

710

| 衣「二乙國加特家的多数 Tab. 1 Parameters of valve-less rotary pump | | | | | | |
|--|--------|----------------------------|-----------------------------|--|--|--|
| 额定电压 | 最大功率/W | 灌装范围/(mL·r ⁻¹) | 灌装速度/(r·min ⁻¹) | | | |

80

80

通过上述设备,以水进行实验测试,将6台灌装 范围为0.14 mL/r设备通过10次测试,获得的数据见 表2,对比见图3。

AC220 V/50/60 Hz

AC220 V/50 Hz

通过同样的方法,对不同灌装范围的设备用 60 ℃的水料液进行测量,灌装范围包括 0.3, 0.7, 2.9,6 mL/r,获得的误差见表 3。

通过实验可知:灌装量的精度都在设计精度范

围内,均控制在 0.8%以下,并且灌装范围越大的设备,获得的灌装精度越高,当灌装范围为 6 mL/L 时,灌装精度达 0.42%;观察发现,出口处的液体 流动平稳,对于相同灌装范围的设备,灌装量的鲁 棒性较高;另由于柱塞和缸筒氧化锆陶瓷,故该 设备适用耐高温、耐腐蚀的高端无菌精密灌装 行业。

表 2 灌装范围 0.14 mL/r 的无阀陶瓷泵实验数据 Tab.2 Experimental data of valve-less ceramic pump with 0.14 ml/r filling range

| 皮旦 | 实测灌装量/(mL·r ⁻¹) | | | | | | | | | |
|-----|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 厅 5 | 频次 1 | 频次 2 | 频次 3 | 频次 4 | 频次 5 | 频次6 | 频次 7 | 频次 8 | 频次 9 | 频次 10 |
| 第1台 | 0.141 | 0.142 | 0.142 | 0.143 | 0.141 | 0.143 | 0.142 | 0.142 | 0.141 | 0.142 |
| 第2台 | 0.142 | 0.142 | 0.141 | 0.141 | 0.142 | 0.143 | 0.142 | 0.142 | 0.142 | 0.142 |
| 第3台 | 0.143 | 0.142 | 0.143 | 0.144 | 0.143 | 0.142 | 0.143 | 0.143 | 0.144 | 0.142 |
| 第4台 | 0.144 | 0.143 | 0.142 | 0.143 | 0.142 | 0.143 | 0.143 | 0.142 | 0.143 | 0.143 |
| 第5台 | 0.142 | 0.143 | 0.142 | 0.142 | 0.143 | 0.144 | 0.143 | 0.142 | 0.144 | 0.143 |
| 第6台 | 0.143 | 0.143 | 0.144 | 0.143 | 0.143 | 0.143 | 0.142 | 0.143 | 0.142 | 0.143 |



图 3 测试 10 次后的结果对比 Fig.3 Results of 10 tests

| 衣 3 | 个问准表氾固的准备 | 又有皮 |
|---------------|-----------------------|------------------|
| Tab.3 Filling | accuracy of different | filling range |
| 年午日 | | SH4 (11 - 11) (1 |

| 灌装范围/ (mL·r ⁻¹) | 最大误差/ (mL·r ⁻¹) | 灌装精度/ % |
|--------------------------------|--------------------------------|------------|
| 0.14 | 0.001 | 0.71 |
| 0.3 | 0.002 | 0.67 |
| 0.7 | 0.0045 | 0.647 |
| 2.9 | 0.018 | 0.627 |
| 6 | 0.027 | 0.42 |

6 结语

从无阀旋转泵的需求出发,探索了无阀旋转泵的 工作原理,提出了流量控制和精度微调的实现方法, 建立了入口与出口的压力和流量方程,获得了陶瓷柱 塞、缸筒等关键零件的尺寸数据,通过分析加工工艺 和装配工艺,获得了成熟的无阀陶瓷泵实体模型。在 经过高压湿热灭菌等处理后,利用60 ℃的水为料液, 进行精密定量灌装实验,实验结果表明,不同灌装范 围的灌装精度均控制在 0.8%以下,并且灌装范围越 大,获得的灌装精度越高,当灌装范围为6 mL/r 时, 灌装精度达 0.42%。该研究为高温、耐腐蚀的高端无 菌精密灌装行业提供了一款有效的设备。

参考文献:

- 黄川,李东波,刘延友,等. 基于 FLUENT 的易拉罐 灌装阀阀道流场分析与结构优化[J]. 机械设计与制 作工程, 2014, 43(8): 27—31.
 HUANG Chuan, LI Dong-bo, LIU Yan-you, et al. The Flow Distribution Analysis and Structure Optimization of Cans Filling Road Based on Fluent[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8): 27—31.
- [2] BARI S, VEALE D. Improvement of BIB Packaging Product Filling Valve CIP Performance and Efficiency[J]. Food and Bio products Processing. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C, 2012, 90(4): 849–857.
- [3] 王海燕,魏秀业. 轴向柱塞泵流量脉动特性的仿真研究[J]. 机床与液压, 2014(5): 144—148.
 WANG Hai-yan, WEI Xiu-ye. Simulation Study on the Flow Pulsation Characteristics of Axial Piston Pump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014(5): 144—148.
- [4] 石奇光,马庆,徐开义,等.弯掠动叶对旋转失速流场 的影响[J]. 华东工业大学学报,1996,18(2):85—91.
 SHI Qi-guang, MA Qing, XU Kai-yi, et al. Experimental Study on Predicting Ash Erosion Performance Based on the Physical and Chemical Properties of Fly

Ash[J]. J East China University of Technology, 1996, 18(2): 85-91.

 [5] 李疆. 气动旋转式自动定量灌装机的研制[J]. 食品 与机械, 2012, 28(1): 144—145.
 LI Jiang. Development on Pneumatic Rotating Filling

Machines of Fixed Amount[J]. Food & Machinery, 144—145.

- [6] 庆波,李东波,何非. 双列旋转式灌装机设计[J]. 包装工程,2014,35(19):69—72.
 QING Bo, LI Dong-bo, HE Fei. Design of Double-row Rotary Filling Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19): 69—72.
- [7] JURGEN S, HELMUTHEL B, HELMUT J. Development of a Novel Miniature High-pressure Fuel Pump with a Low Specific Speed[J]. Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(7): 997—1006.
- [8] KOLLEK W, OSIN P, STOSIAKA M, et al. Problems Relating to High Pressures Gear Micro-pumps[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014(14): 88—95.
- [9] MATEO-ORTIZ D, MUZZIO F J, MENDEZ R. Particle Size Segregation Promoted by Powder Flow in Confined Space[J]. The Die Filling Process Case, 2014(2): 215–222.
- [10] 李明,李丽娟,杨松,等. 全自动液体定量灌装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2013, 34(5): 78—81.
 LI Ming, LI Li-juan, YANG Song. Design of Automat-

ic Quantitative Liquid Filling Machine Control System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(5): 78-81.

- [11] STABILE A, ESTIMA J O, BOCCALETTI C, et al. Converter Power Loss Analysis in a Fault-Tolerant Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1984—1996.
- [12] CHO Y, LEE K B, SONG J H, et al. Torque-Ripple Minimization and Fast Dynamic Scheme for Torque Predictive Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2182–2190.
- [13] 韩顺杰,齐冀樊. 精油微装量系统的卡尔曼滤波 CMAC-PID 控制[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 7—12.
 HAN Shun-jie, QI Ji-fan. CMAC-PID Control with Kalman Filter in Essential Oil Micro-filling System[J].
 Packaging Engineering, 2017, 38(5): 7—12.
- [14] KISHOR A, SINGH P K, PRAKASH J. NSABC: Non-dominated Sorting Based Multi-objective Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application in Data Clustering[J]. Neurocomputing, 2016, 216: 514—533.
- [15] 宋玉泉, 徐进, 胡萍, 等. 结构陶瓷的超塑性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(3): 225—242.
 SONG Yu-quan, XU Jin, HU Ping, et al. Super Plasticity of Structural Ceramics[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(3): 225—242.