

# 成型工艺对多孔 PI 材料 摩擦学及力学性能的影响

Effect of molding process on tribology  
and mechanical properties of  
porous PI materials

叶锦宗<sup>1</sup>, 李锦棒<sup>1</sup>, 周宁宁<sup>2</sup>, 曹均<sup>1</sup>, 卿涛<sup>2</sup>, 蒋世宇<sup>1</sup>, 于爱兵<sup>1</sup>

(1 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2 北京控制工程研究所 精密转动和传动机构长寿命

技术北京市重点实验室, 北京 100094)

YE Jin-zong<sup>1</sup>, LI Jin-bang<sup>1</sup>, ZHOU Ning-ning<sup>2</sup>, CAO Jun<sup>1</sup>,

QING Tao<sup>2</sup>, JIANG Shi-yu<sup>1</sup>, YU Ai-bing<sup>1</sup>

(1 Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo

University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2 Beijing Key

Laboratory of Long-life Technology of Precise Rotation and

Transmission Mechanisms, Beijing Institute of

Control Engineering, Beijing 100094, China)

**摘要:** 为探索冷压定容烧结成型工艺对多孔聚酰亚胺(PI)材料摩擦性能和力学性能的影响,采用正交实验设计方法,研究了密度、烧结温度、保温时间对多孔 PI 材料含油性能、摩擦因数、拉伸强度和冲击强度的影响。通过综合考虑甩油后摩擦因数和冲击强度,优化了多孔 PI 材料的成型工艺。实验结果表明:随着密度的减小,材料表面孔洞增大,内部孔洞支架变稀疏,含油率明显增大,但含油保持率较低,摩擦因数相对较高,拉伸强度和冲击强度显著下降;当烧结温度为 350 ℃时,冲击强度较高;保温 60 min 即可保证不同密度多孔 PI 材料的强度;优化制备工艺后,材料含油率为 12.0%,离心甩油 2 h 后摩擦因数为 0.092,冲击强度为 105.9 kJ/m<sup>2</sup>,拉伸强度为 74.2 MPa。

**关键词:** 多孔 PI;成型工艺;含油摩擦;冲击强度

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.001205

**中图分类号:** TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)09-0144-08

**Abstract:** In order to explore the influence of cold-pressing and constant-volume sintering molding process on the friction and mechanical properties of porous polyimide (PI) materials, the effects of density, sintering temperature and holding time on the oil content, friction coefficient, tensile strength and impact strength of porous PI materials were studied by orthogonal experimental design method. By comprehensively considering the friction coefficient and impact strength after centrifuging oil, the molding process of the porous PI material was optimized. The experimental results show that as the density decreases, the surface holes of the material increase, the internal hole brackets become rarefied, and the oil content significantly increases, but the oil retention becomes lower, the friction coefficient becomes relatively high, the tensile strength and impact strength are significantly reduced. When the sintering temperature is 350 ℃, the impact strength is high; the strength of porous PI materials with different densities can be guaranteed by holding for 60 minutes. After optimizing the preparation process, the oil content of the material is 12.0%, and the friction coefficient is 0.092 after centrifuging oil for two hours. The impact strength is 105.9 kJ/m<sup>2</sup> and the tensile strength is 74.2 MPa.

**Key words:** porous PI; molding process; oil-containing friction; impact strength

聚酰亚胺是一种主链上含有酰亚胺环的有机高分子材料<sup>[1]</sup>, 因具有耐高低温、耐辐照及良好的力学性能等优点, 在航空、航天等领域有着广泛的应用前景<sup>[2-4]</sup>。同时聚酰亚胺是一种无须添加造孔剂也可以制备多孔材料的聚合物<sup>[5]</sup>, 多孔 PI 材料的内部分布着均匀的孔洞结构, 这种孔洞结构能够存储润滑油, 当受到压力的作用或者随着温度升高时, 可以连续稳定地向摩擦副表面提供润滑油; 在停止工作时, 又会把润滑油吸入孔洞结构中, 防止润滑油的流失<sup>[6-7]</sup>。因此在贫油工作状态下, 多孔材料能发挥良好的润滑作用, 可以长时间不加油, 并减少润滑油污染。

近年来, 多孔 PI 含油材料得到了广大研究者的青睐。Zhang 等<sup>[8]</sup>通过化学改性方法选择性地改善多孔 PI 材料的硅油保持率, 发现改性后样品的润湿性从亲水性变为疏水性, 硅油保持率从 52% (质量分数, 下同) 提高到 87%, 改性后多孔样品表现出较高的保油性和较慢的油释放。Wang 等<sup>[9]</sup>研究了不同孔隙率的多孔 PI 材料在贫油润滑条件下的润滑性能, 发现多孔 PI 含油材料主要是通过热膨胀来释放润滑油, 有效地减小摩擦磨损。邱优香等<sup>[10]</sup>分析了不同黏度润滑油下多孔 PI 含油材料的摩擦学性能, 结果表明摩擦热导致润滑油黏度降低, 含油材料在高转速摩擦过程中摩擦系数均随着时间的延长而逐渐减小。此外, 为了进一步提高 PI 材料的性能, 诸多学者做了聚酰亚胺填充改性研究, 并取得了一定成果。浦玉萍等<sup>[11]</sup>研究了添加 5% 的 MoS<sub>2</sub>, Pb, PTFE 对聚酰亚胺基复合材料微孔特性的影响, 实验发现添加 5% 的 PTFE 后, 复合材料的平均孔径显著增大。周宁宁等<sup>[12]</sup>发现碳纳米管能够增大孔隙率和孔隙表面吸附力, 提高材料含油率和含油保持率。Zhao 等<sup>[13]</sup>研究了聚酰亚胺复合材料在高温滑动和腐蚀条件下的磨损行为, 发现磨损率随着温度升高而增大。通过添加碳纤维、芳纶、石墨可以降低聚酰亚胺基体的摩擦因数, 提高耐磨性<sup>[14-16]</sup>。Zhu 等<sup>[17]</sup>发现改性后的多壁碳纳米管与聚酰亚胺基体之间的强界面相互作用, 极大地改善了材料的力学性能。

上述诸多研究对多孔 PI 材料的含油性能和摩擦学性能进行了深入研究, 但有关多孔 PI 材料力学性能的研究较少, 且在试样制备时很少考虑到制备工艺对材料综合性能的影响。本工作通过正交实验研究了成型工艺对多孔 PI 材料含油性能、摩擦系数、拉伸强度和冲击强度的影响, 并综合考虑冲击强度和甩油后摩擦因数, 对成型工艺进行了优化。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 试样制备

实验选用的 PI 模塑粉由上海市合成树脂研究所有限公司生产, 牌号为 YS-20, 玻璃化温度 260 ℃。冷压定容烧结法制备多孔 PI 材料的影响因素主要为密度、烧结温度和保温时间, 故采用四因素三水平正交表设计实验, 如表 1 所示。

表 1 正交实验设计表

Table 1 Orthogonal experiment design table

No	Density/ (g · cm <sup>-3</sup> )	Sintering temperature/℃	Holding time/min	Null value
1	1.1	320	60	1
2	1.1	335	90	2
3	1.1	350	120	3
4	0.9	320	90	3
5	0.9	335	120	1
6	0.9	350	60	2
7	0.7	320	120	2
8	0.7	335	60	3
9	0.7	350	90	1

根据表 1 中的理论密度和模具容积计算得出所需加入的 PI 粉末质量, 经过冷压定容烧结制得试样, 具体操作步骤如图 1 所示。图 2 所示为正交实验设计制备的试样实物图, 其中盘状试样尺寸为  $\phi 30$  mm × 10 mm, 条状试样尺寸为 80 mm × 10 mm × 4 mm, 测得试样的实际密度与其理论密度的误差在 5% 以内。

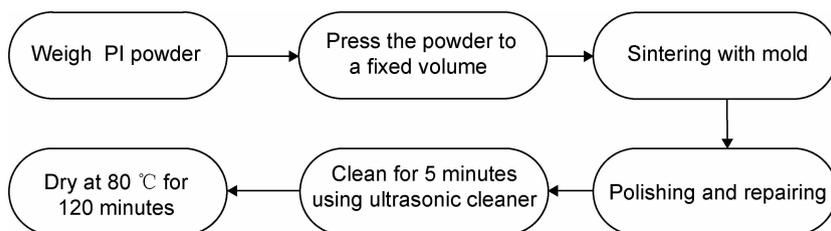


图 1 试样制备流程图

Fig. 1 Schematic diagram of sample preparation

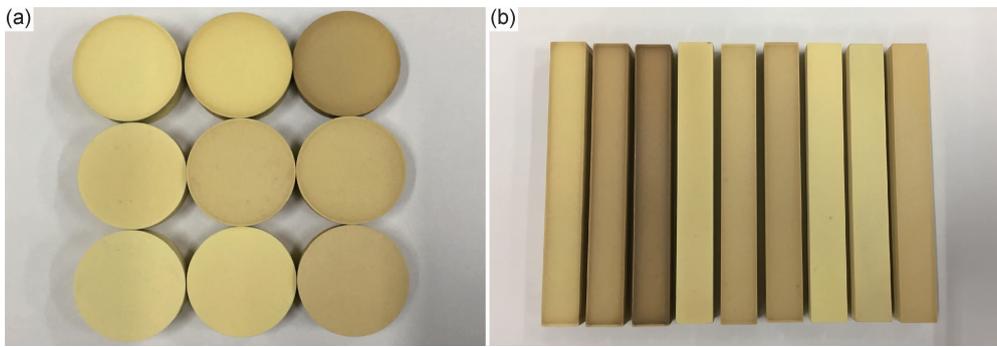


图2 试样实物图 (a)盘状试样;(b)棒状试样

Fig. 2 Pictures of the sample (a)disc-shaped samples;(b)rod-shaped samples

## 1.2 性能测试方法

在测试试样含油性能前,先干燥称重,再将试样浸没在装有聚 $\alpha$ -烯烃全合成基础油(PAO4)的烧杯中,放入真空加热炉中抽真空并加热到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 $20\text{ h}$ 后取出试样,擦净表面润滑油称重,得到试样浸油前后质量差,计算得出试样的含油率;采用TG16G台式高速离心机,转速为 $3000\text{ r/min}$ ,对含油后的盘状试样进行离心甩油,得到含油保持率,含油率和含油保持率计算公式如下:

$$\eta = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{m_t - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $m_0$ 为含油前试样质量; $m_1$ 为含油后试样质量; $m_t$ 为甩油 $t$ 分钟后试样质量。

采用SFT-2M型球-盘摩擦磨损试验机测试所制试样的摩擦学性能,对磨球为 $5\text{ mm}$ 的GCr15钢球,施

加载荷 $5\text{ N}$ ,摩擦半径为 $5\text{ mm}$ ,转速设置为 $400\text{ r/min}$ ,测试时间 $60\text{ min}$ 。用以上方法测试试样的干摩擦因数、含油后摩擦因数以及甩油后摩擦因数。

采用扫描电镜SU5000对试样微孔进行表征。拉伸实验在INSTRON-5567万能材料试验机上完成,拉伸速率为 $2\text{ mm/min}$ 。冲击强度测试采用JZL系列液晶数显冲击试验机。

## 2 结果与分析

### 2.1 多孔PI材料的含油性能

图3(a),(b)和(c)分别为正交实验中1号、4号和7号试样表面的SEM照片,可以清楚地观察到试样表面微孔分布较为均匀,随着试样密度的减小,表面孔的尺寸越来越大。这些微孔能够存储润滑油,从而降低材料摩擦因数。

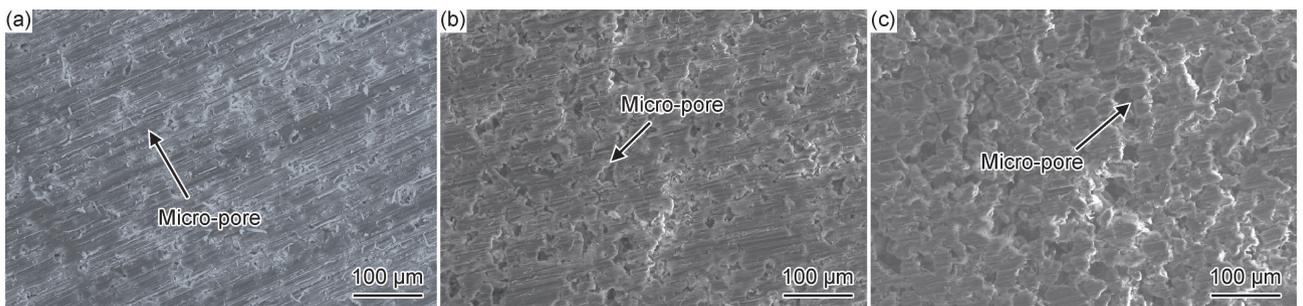


图3 试样表面SEM照片 (a)1号;(b)4号;(c)7号

Fig. 3 SEM micrographs of sample surfaces (a)No. 1;(b)No. 4;(c)No. 7

图4(a)为试样真空浸油后的含油率测试结果,其中1号、2号、3号试样含油率明显较低,4号、5号、6号试样含油率在 $30\%$ 左右,而7号、8号、9号试样含油率高达 $60\%$ 左右。结合正交设计中的成型工艺,发现其含油率变化主要受密度大小影响,当密度逐渐减小时,试样孔洞尺寸明显增大,使得含油率随之增大。

烧结温度与保温时间对试样的含油率影响较小。

含油后的试样经过离心甩油,每隔 $10\text{ min}$ 计算一次含油保持率,得到含油保持率变化图,如图4(b)所示。密度最高的1号、2号、3号试样含油保持率较高,在甩油 $60\text{ min}$ 后含油率基本稳定;4号、5号、6号试样含油率在甩油 $90\text{ min}$ 后也基本达到稳定状态;密度

最小的 7 号、8 号、9 号试样含油保持率较低,并且在经过甩油 120 min 后,含油保持率仍然呈小幅度下降趋势。其次在相同密度、不同烧结温度的情况下:保温时

间为 60 min 的 1 号、6 号、8 号试样含油保持率较低,保温时间为 120 min 的 3 号、5 号、7 号试样含油保持率较高。

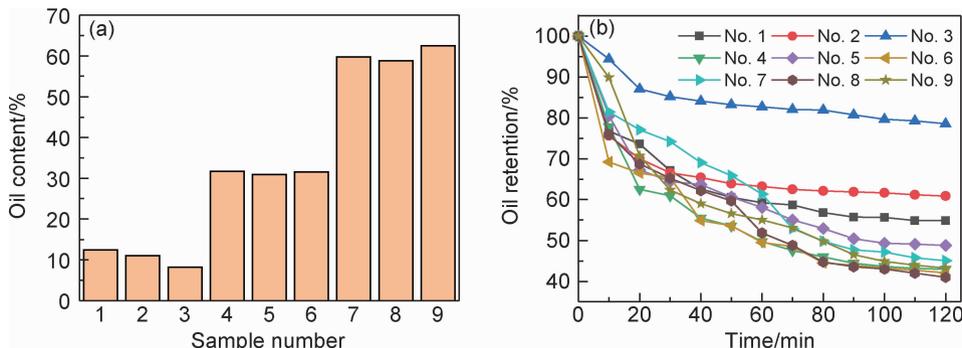


图 4 含油性能测试结果 (a)含油率;(b)含油保持率  
Fig. 4 Oil performance test results (a)oil content;(b)oil retention

通过观察图 5 棒状试样断口 SEM 照片,发现保温时间为 60 min 的 1 号试样内部孔洞普遍较大,保温时间为 120 min 的 3 号试样内部孔洞较小,保温时间为 90 min 的 2 号试样内部现象介于 1 号和 3 号试样之间,说明随着保温时间的增长,试样内部孔洞存在着逐渐减小的趋势。在试样做离心甩油实验时,孔内润滑油主要受到离心力和毛细力,当离心力大于毛细力

时,润滑油将被甩出,导致试样含油保持率降低<sup>[18]</sup>。实验过程中离心力保持不变,而毛细力的大小与孔径成反比,所以内部孔洞较小的试样含油后毛细力相对较大,能够更好地克服离心力,从而提高试样的含油保持率。当然多孔含油材料也不是孔洞越小越好,孔洞过小时,一方面多孔材料的含油率会降低,另一方面会导致出油困难,两者都会影响多孔含油材料的润滑性能。

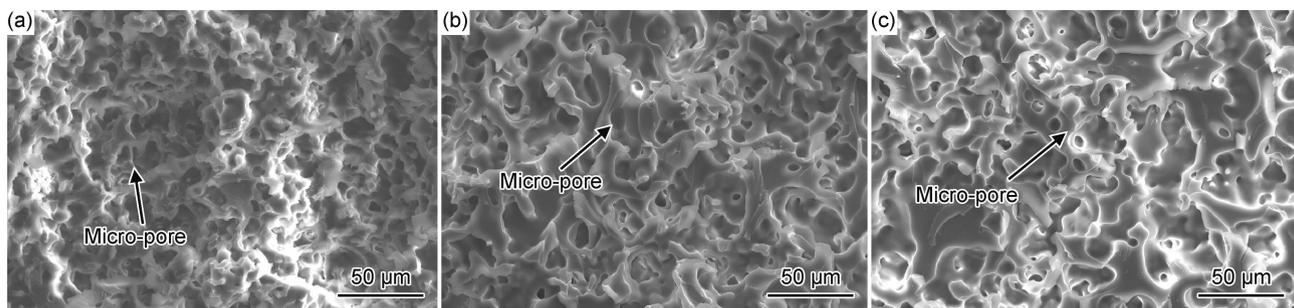


图 5 棒状试样断口 SEM 照片  
(a)1 号;(b)2 号;(c)3 号  
Fig. 5 SEM micrographs of cross-section structure of rod like samples  
(a)No. 1;(b)No. 2;(c)No. 3

综合分析得出,密度小的 PI 试样表面孔洞明显较大,含油率较高,但含油保持率较低,较长的保温时间有利于减小孔洞尺寸,提高试样的含油保持率。

### 2.2 多孔 PI 材料的摩擦性能

图 6(a), (b)和(c)为 1 号、4 号和 7 号试样的摩擦因数变化曲线,含油前三组试样摩擦因数均较大,波动较为明显,试样含油后摩擦因数大幅度降低并且始终处于稳定状态,说明在摩擦实验过程中,含油后的孔洞能够持续向摩擦表面提供润滑油,起到良好的润滑效果。甩油后试样的摩擦因数有所上升,但仍然远低于

其干摩擦因数。各试样干摩擦因数、含油后以及甩油后摩擦因数在 60 min 内的平均值如图 6(d)所示,在干摩擦情况下,试样的平均摩擦因数较大,均在 0.25 以上,密度最小的 7 号、8 号和 9 号试样的干摩擦因数高于 0.4。试样含油后的摩擦因数均明显下降,平均摩擦因数均在 0.12 以下,其中 4 号试样最低,平均含油后摩擦因数为 0.079。离心甩油 2 h,试样的摩擦因数轻微上升,平均摩擦因数均在 0.15 以下。

多孔含油材料在摩擦实验过程中,孔洞内的润滑油由于受到离心力、压力以及摩擦热引起的膨胀<sup>[19]</sup>,

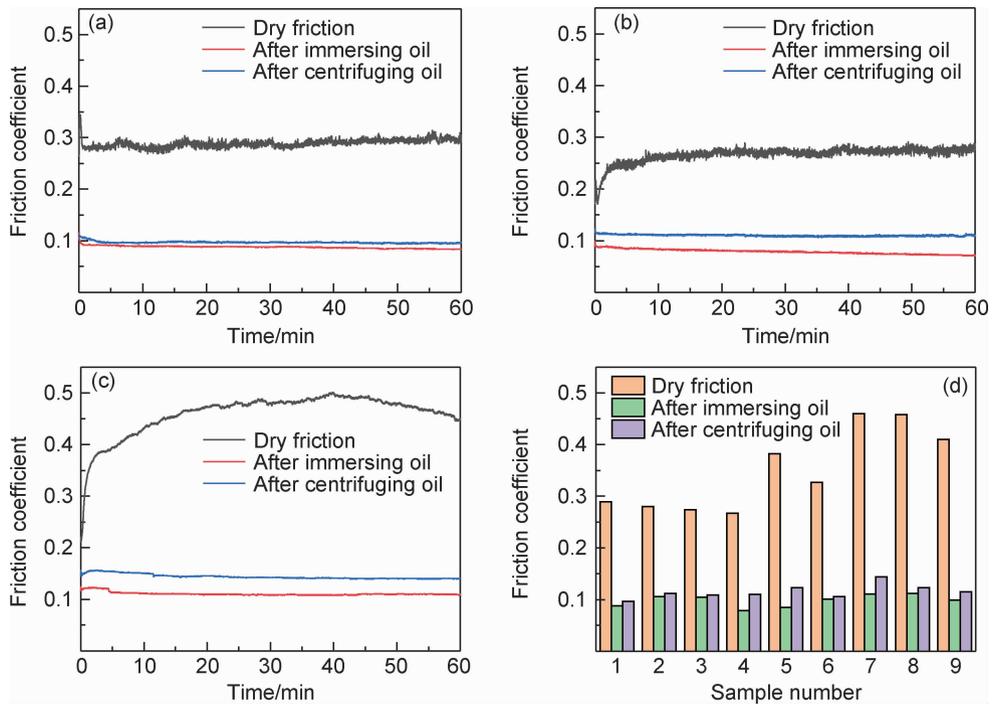


图6 试样摩擦因数

(a)1号;(b)4号;(c)7号;(d)摩擦因数平均值

Fig. 6 Friction coefficient of the samples

(a)No. 1;(b)No. 4;(c)No. 7;(d)average friction coefficient

能够向摩擦表面提供润滑油,从而大幅度降低试样的摩擦因数。离心甩油后,试样孔洞内润滑油含量减少,降低了润滑效果,使得试样甩油后摩擦因数有所上升。通过对比1号、4号和7号试样的摩擦因数变化曲线,发现密度较大的1号和4号试样干摩擦因数和含油后摩擦系数较低,甩油后摩擦因数上升幅度较小;而密度较低的7号试样干摩擦因数和含油后摩擦因数相对较大,其主要原因为密度减小使得材料的孔洞和表面粗糙度增大,导致了摩擦力的增大<sup>[20]</sup>,同时孔洞较大也直接导致了其含油保持率较低,甩油后的摩擦因数上升相对较大。

从9组实验可以看出,相同密度下保温时间为60 min试样(1号、6号和8号)甩油后的摩擦因数相对较低,保温时间为120 min试样(3号、5号和7号)的摩擦因数较高,该结果说明较长的保温时间并不利于降低试样的摩擦因数,虽然较长的保温时间可以减小孔洞,提高含油保持率,但孔洞的减小也会引起毛细力增大,导致材料内部孔洞中的润滑油向摩擦表面供给较为困难,从而未能起到良好的润滑效果。多孔含油材料的含油率越高并不代表其摩擦因数就会越低,密度较低的7号、8号和9号试样,由于内部孔洞较大,含油率高达60%,但含油后摩擦因数较大,甩油后的摩擦因数也明显较大。该结果说明增大孔洞虽然能提

升材料的含油率,但不利于降低其摩擦因数,一定微量润滑油即可满足多孔材料的润滑需求。因此在设计多孔含油摩擦材料时,应通过调节密度合理地控制材料孔洞大小。

### 2.3 多孔PI材料的力学性能

对棒状试样的拉伸强度和冲击强度进行均值分析,结果如图7所示。多孔PI材料拉伸强度和冲击强度均随着密度的减小而明显降低,当试样密度由 $1.1 \text{ g/cm}^3$ 降低到 $0.7 \text{ g/cm}^3$ 时,拉伸强度均值由 $68.87 \text{ MPa}$ 降到了 $12.20 \text{ MPa}$ 。烧结温度对拉伸强度的影响不大,冲击强度随着烧结温度的升高而增大,60 min以上的保温时间对拉伸强度和冲击强度的影响较小。

图8为棒状试样在冲击实验后的断口形貌。可以看出,密度最大的1号试样的孔洞支架较为密集,断裂点的数量较多,密度最小的7号试样中孔洞支架较为稀疏,断裂点较少且面积较小,4号试样的现象介于两者之间。经过分析试样断口SEM照片,可以得出密度大的试样,孔洞支架密集,断裂点数量明显较多,这也是其冲击强度较高的主要原因。

密度不同的1号、4号和7号试样,烧结温度相同,保温时间不同,但3个试样的孔洞支架均交错相连,断裂处清晰可见,并且上述分析得知60 min以上

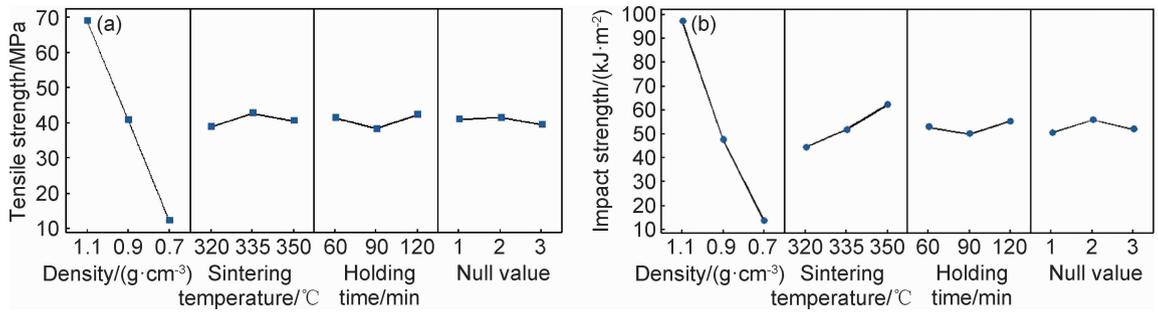


图 7 强度均值分析结果 (a)拉伸强度;(b)冲击强度

Fig. 7 Mean analysis result of strength (a)tensile strength;(b)impact strength

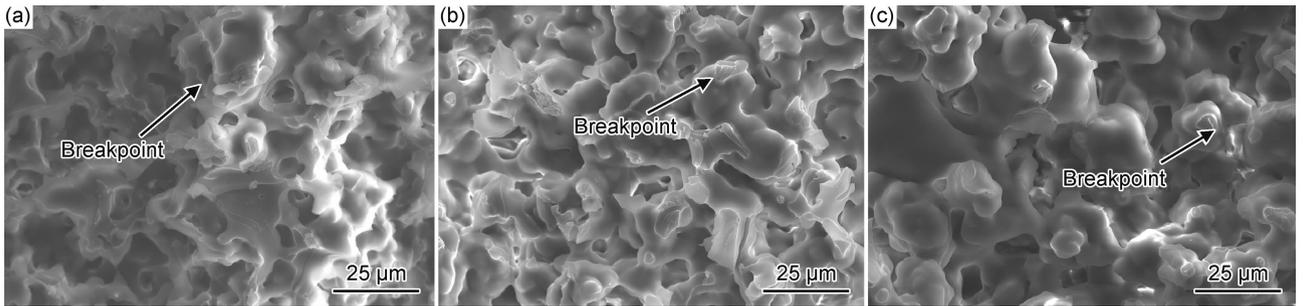


图 8 棒状试样断口 SEM 照片 (a)1 号;(b)4 号;(c)7 号

Fig. 8 SEM micrographs of cross-section structure of rod like samples (a)No. 1;(b)No. 4;(c)No. 7

的保温时间在实验范围内对试样的拉伸和冲击强度影响不大,说明不同密度的多孔 PI 材料均可在 60 min 内烧结成型,并保证材料强度。

### 2.4 工艺参数优化

综合考虑多孔 PI 试样的摩擦学性能和力学性能,对工艺参数进行了优化。按照甩油后摩擦因数和冲击强度各占 50% 的权重,计算得到综合评分 S,其计算公式如下:

$$S = \frac{1}{2} \times \left( \frac{\mu_{\max} - \mu}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} + \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\mu$  为试样甩油后摩擦因数; $\mu_{\max}, \mu_{\min}$  为实验试样中甩油后摩擦因数的最大、最小值; $a$  为试样冲击强度; $a_{\max}, a_{\min}$  为实验试样中冲击强度的最大、最小值。

表 2 为综合评分表,计算综合评分的  $\bar{K}_i, R$  值,发现密度越大、烧结温度越高、保温时间越短综合评分越高。表 3 为综合评分方差分析结果,由  $F$  值可知对综合评分影响最为显著的是密度,其次是烧结温度。分析优化后得到成型工艺参数:密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup>,烧结温度为 350 °C,保温时间为 60 min。

表 2 综合评分表

Table 2 Comprehensive score sheet

No	Density/(g · cm <sup>-3</sup> )	Sintering temperature/°C	Holding time/min	Null value	$\mu$	$a/(kJ \cdot m^{-2})$	S
1	1.1	320	60	1	0.097	86.746	88.915
2	1.1	335	90	2	0.112	96.595	77.998
3	1.1	350	120	3	0.109	108.386	87.234
4	0.9	320	90	3	0.110	35.569	48.869
5	0.9	335	120	1	0.123	46.883	40.832
6	0.9	350	60	2	0.110	60.289	61.531
7	0.7	320	120	2	0.144	10.776	0
8	0.7	335	60	3	0.123	11.829	22.878
9	0.7	350	90	1	0.115	18.008	34.555
$\bar{K}_1$	84.716	45.928	57.775	54.767			
$\bar{K}_2$	50.411	47.236	53.807	46.510			
$\bar{K}_3$	19.144	61.107	42.689	52.994			
R	65.571	15.179	15.086	8.258			

Note:  $\bar{K}_i$  is the average value of the comprehensive score of each factor at the  $i$  level, and R is the worst.

表3 综合评分方差分析表

Table 3 Analysis of variance of comprehensive scores

Source	df	SS	MS	F	P
Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	2	6454.0	3227.02	56.93	0.017
Sintering temperature/°C	2	424.5	212.25	3.74	0.211
Holding time/min	2	367.0	183.48	3.24	0.236
Error	2	113.4	56.69		
Total	8	7358.9			

Note: df is the degree of freedom; SS is the sum of squares deviation from mean; MS is the mean square; F is the level of significant difference; P is the test level.

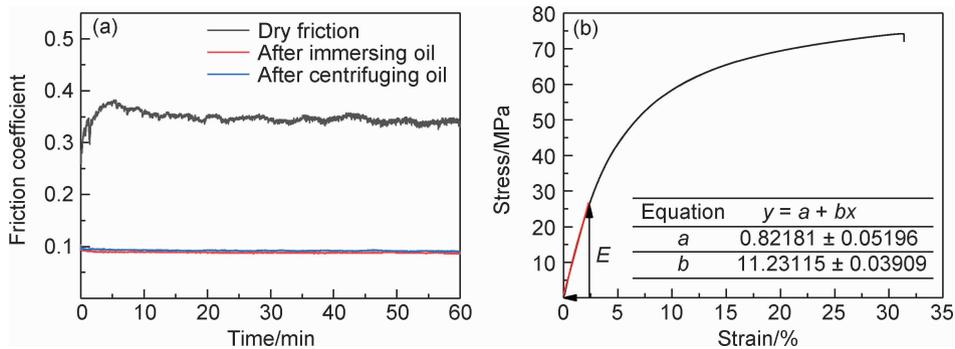


图9 优化后试样的摩擦因数和应力应变曲线

(a)摩擦因数;(b)应力-应变曲线

Fig. 9 Friction coefficient and stress-strain curve of the optimized sample

(a)friction coefficient;(b)stress-strain curve

### 3 结论

(1)多孔PI材料的密度越小,含油率越高,但摩擦因数并不随含油率的上升而减小,且拉伸强度、弹性模量和冲击强度明显降低,因此在设计多孔含油摩擦材料时,应根据实际工况综合考虑材料的含油率和力学性能。

(2)烧结温度对多孔PI材料摩擦因数和拉伸强度的影响较小,但材料的冲击强度随烧结温度的升高而增大。

(3)相同密度下保温时间为60 min试样甩油后的摩擦因数相对较低,保温时间为120 min试样的摩擦因数较高,这说明较长的保温时间不利于降低摩擦因数,实验结果表明保温60 min即可保证材料的力学性能,并能获得较低的摩擦因数。

#### 参考文献

[1] 段春俭, 邵明超, 李宋, 等. 极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料的研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2018, 48(12): 1561-1567.  
DUAN C J, SHAO M C, LI S, et al. The research progress in polyimide self-lubricating composites under extreme conditions

采用优化后工艺参数制备试样,测得其含油率为12.0%,甩油2 h后含油保持率为68.4%,摩擦因数随时间变化曲线如图9(a)所示,甩油后摩擦因数为0.092,低于优化前各试样的甩油后摩擦因数。冲击强度为105.9 kJ/m<sup>2</sup>,接近正交实验中的最高值。拉伸应力-应变曲线如图9(b)所示,拉伸强度为74.2 MPa,线性拟合得到弹性模量为1.12 GPa,均高于优化前试样的强度。经赫兹公式验算得出摩擦实验中的平均接触应力为25.7 MPa,试样处于弹性形变阶段,说明摩擦实验中的载荷设置处于合理的工作范围内。

[J]. Scientia Sinica: Chimica, 2018, 48(12): 1561-1567.

[2] KWON J, KIM J, PARK D, et al. A novel synthesis method for an open-cell microsphere polyimide for heat insulation[J]. Polymer, 2015, 56: 68-72.

[3] 倪洪江, 邢宇, 戴霄翔, 等. 黏度可控化制备BPDA-PDA型聚酰亚胺及表征[J]. 材料工程, 2019, 47(11): 100-106.  
NI H J, XING Y, DAI X X, et al. Viscosity-controllable preparation and characterization of BPDA-PDA polyimide[J]. Journal of Materials and Engineering, 2019, 47(11): 100-106.

[4] YUAN R, WU Y P, JU P F, et al. Effect of polyaspartic acid-functionalized graphene oxide on the mechanical performance of polyimide-based composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(37): 47939.

[5] 吴刚, 赵春华, 秦红玲, 等. 多孔材料的摩擦学性能研究及展望[J]. 材料导报, 2011, 25(9): 75-78.  
WU G, ZHAO C H, QIN H L, et al. Progress and prospect in tribology of porous materials[J]. Materials Reports, 2011, 25(9): 75-78.

[6] 赵华俊, 王晓雷, 黄巍. 多孔聚酰亚胺保持架对轴承贫油润滑性能研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(3): 31-34.  
ZHAO H J, WANG X L, HUANG W. Study of effect of porous polyimide retainer on bearing at starved lubrication[J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(3): 31-34.

[7] 闫普选, 朱鹏, 黄丽坚, 等. 聚酰亚胺多孔含油材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(3): 272-276.

- YAN P X, ZHU P, HUANG L J, et al. Study on tribological properties of porous polyimide containing lubricants[J]. Tribology, 2008, 28(3): 272-276.
- [8] ZHANG D, WANG T M, WANG Q H, et al. Selectively enhanced oil retention of porous polyimide bearing materials by direct chemical modification[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(29): 45106.
- [9] WANG J Q, ZHAO H J, HUANG W, et al. Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication[J]. Wear, 2017, 380/381: 52-58.
- [10] 邱优香, 王齐华, 王超, 等. 多孔聚酰亚胺含油材料的储油性能及摩擦学行为研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(6): 538-543.
- QIU Y X, WANG Q H, WANG C, et al. Oil-containing and tribological properties of porous polyimide containing lubricant oil[J]. Tribology, 2012, 32(6): 538-543.
- [11] 浦玉萍, 吕广庶, 李晓军, 等. 添加剂对聚酰亚胺基复合材料微孔特性的影响[J]. 材料工程, 2003(6): 7-10.
- PU Y P, LU G S, LI X J, et al. Influence of additives on microporous properties of polyimide matrix composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(6): 7-10.
- [12] 周宁宁, 卿涛, 张韶华, 等. 碳纳米管填充多孔聚合物材料含油性研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(2): 120-123.
- ZHOU N N, QING T, ZHANG S H, et al. Research on oil-containing performance of porous polymer materials filled with carbon nanotubes[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(2): 120-123.
- [13] ZHAO G, HUSSAINOVA I, ANTONOV M, et al. Effect of temperature on sliding and erosive wear of fiber reinforced polyimide hybrids[J]. Tribology International, 2015, 82: 525-533.
- [14] 董风霞, 侯国梁, 刘亮, 等. 稀土改性对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料在不同温度下摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 148-154.
- DONG F X, HOU G L, LIU L, et al. Effect of surface treatment on carbon fibre by rare earth on the tribological properties of carbon fiber reinforced polyimide composite at elevated temperatures[J]. Tribology, 2017, 37(2): 148-154.
- [15] WANG Q H, ZHANG X R, PEI X Q. Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3761-3768.
- [16] LV M, ZHENG F, WANG Q H, et al. Friction and wear behaviors of carbon and aramid fibers reinforced polyimide composites in simulated space environment[J]. Tribology International, 2015, 92: 246-254.
- [17] ZHU B K, XIE S H, XU Z K, et al. Preparation and properties of the polyimide/multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(3/4): 548-554.
- [18] JIA Z N, YAN Y H, WANG W Z. Preparation and tribological properties of PI oil-bearing material with controllable pore size[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2017, 69(2): 88-94.
- [19] 张迪, 王超, 卿涛, 等. 空间用多孔聚合物轴承保持架材料研究进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 17-26.
- ZHANG D, WANG C, QING T, et al. Research progress of porous polymer bearing retainer materials used in aerospace[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 17-26.
- [20] LU Y, LIU Z M. Coupled effects of fractal roughness and self-lubricating composite porosity on lubrication and wear[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(4): 581-591.

基金项目:宁波市科技创新 2025 重大专项(2018B10004);国家自然科学基金面上项目(51875294);精密转动和传动机构长寿命技术北京市重点实验室开放基金(BZ0388201803)

收稿日期:2019-12-24;修订日期:2020-06-09

通讯作者:李锦棒(1988—),男,讲师,博士,研究方向为压电驱动及聚合物摩擦学,联系地址:浙江省宁波市江北区风华路 818 号宁波大学绣山工程大楼 315 室(315211),E-mail:lijinbang@nbu.edu.cn

(本文责编:高磊)