引用格式：叶志坚，许峥嵘，李锦棒，等．三明治型密度分层多孔聚酰亚胺材料的制备与性能研究[J]．材料工程，2026，54(4)：313-321.
YE Zhijian，XU Zhengrong，LI Jinbang，et al. Preparation and properties of sandwich type density layered porous polyimide materials[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：313-321.

三明治型密度分层多孔聚酰亚胺材料的制备与性能研究

叶志坚[1]，许峥嵘[1]，李锦棒[1*]，李　凯[1]，福　姣[2]，常江娟[2]，施晨淳[1]，周宁宁[2]
（1 宁波大学 机械工程与力学学院 宁波市微纳运动及智能控制重点实验室，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）

摘要：多孔聚酰亚胺材料（PPI）具备相互贯通的孔隙结构，能够有效储存润滑油。然而，这些孔隙的存在会降低PPI的强度和耐磨性，导致其含油率与耐磨性相互制约，难以兼顾。因此，采用分层冷压定容烧结的方法，制备了三明治型密度分层多孔聚酰亚胺材料。该材料外层与内层可具有不同孔隙率，外层采用大孔隙率增加含油量，内层采用小孔隙率提高材料强度和抗磨性，以克服含油率与耐磨性难以兼顾的问题。基于不同密度均一PPI性能的研究，设计了密度分层PPI的孔隙结构，制备出两种分层PPI，并研究了其力学性能、含油性能和摩擦磨损性能。结果表明：与均一PPI相比，密度分层PPI由于内外层不同孔隙率的协同作用，具有较高的含油率（>15%）和优异的含油保持率（94.06%），并保持了优异的力学性能和摩擦学性能。1.0-1.1-1.0分层材料的拉伸强度和压缩强度分别为41.7 MPa和374 MPa，其摩擦因数（0.078）接近1.1 g/cm^{3}密度均一PPI的摩擦因数（0.07），但分层材料的含油率（15.5%）远高于均一材料的含油率（11.1%）。这种三明治型密度分层PPI可以兼顾含油率和耐磨性，为多孔材料的设计提供了一种新思路。

关键词：密度分层材料；多孔聚酰亚胺；含油材料；摩擦磨损；轴承保持架
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000837　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000837
中图分类号：TH117　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0313-09

Preparation and properties of sandwich type density layered porous polyimide materials

YE Zhijian[1]，XU Zhengrong[1]，LI Jinbang[1*]，LI Kai[1]，FU Jiao[2]，CHANG Jiangjuan[2]，SHI Chenchun[1]，ZHOU Ningning[2]
（1 Ningbo Key Laboratory of Micro Nano Motion and Intelligent Control，School 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）

Abstract：Porous polyimide materials (PPI) have interconnected pore structures that can effectively store lubricating oil. However，the presence of these pores will reduce the strength and wear resistance of PPI，resulting in a mutual constraint between its oil content and wear resistance，making it difficult to balance. Therefore，a sandwich type density layered porous polyimide material is prepared using the method of layered cold pressing and constant volume sintering. The outer and inner layers of the material can have different porosities. The outer layer uses a high porosity to increase oil content，while the inner layer uses a low porosity to improve material strength and wear resistance，in order to overcome the problem of difficult balance between oil content and wear resistance. Based on the study of uniform PPI performance with different densities，the pore structure of density layered PPI is designed，and two types of layered PPI are prepared. Their mechanical properties，oil content properties，and friction and wear properties are studied. The results show that compared with uniform PPI，density stratified PPI has a higher oil content (>15%)

and excellent oil retention rate (94.06%) due to the synergistic effect of different porosity in the inner and outer layers, and maintains excellent mechanical and tribological properties. The tensile strength and compressive strength of the 1.0-1.1-1.0 layered material are 41.7 MPa and 374 MPa, respectively. Its friction coefficient (0.078) is close to that of a uniform PPI density of 1.1 g/cm^3 (0.07), but the oil content of the layered material (15.5%) is much higher than that of the uniform material (11.1%). This sandwich type density layered PPI can balance oil content and wear resistance, providing a new approach for the design of porous materials.

Key words: density-layered materials; porous polyimide; oil-impregnated material; friction and wear; bearing retainer

航天器控制力矩陀螺(CMG)中的轴承保持架对其性能和寿命具有重要的影响[1-2]。为了实现CMG的长寿命免维护运行[3],常采用多孔含油材料作为轴承保持架,以微油润滑的方式润滑高速轴系[4-6]。多孔聚酰亚胺(PPI)材料由于其出色的储油性能和独特的固液联合润滑方式,在CMG中得到了广泛应用[7]。

聚酰亚胺(PI)具有出色的力学性能和摩擦学性能,通过冷压定容等烧结方法可将其制备成多孔材料。材料内部均匀分布的孔隙结构能够作为润滑油的理想载体,提供微量润滑油,降低摩擦和磨损。当受到压力或温度升高时,PPI材料能持续稳定地向摩擦表面提供润滑油;而在停止工作时,它能将润滑油重新吸入孔隙中,防止润滑油流失[8-9]。因此,含油PPI材料能够实现空间高速活动部件的长寿命润滑。

目前,PPI材料的成型方法主要包括冷压烧结法、模板-滤取法和等静压成型法。冷压烧结法操作简便,制备的多孔材料性能主要受工艺参数和原料特性影响[10-11]。模板-滤取法通过向聚酰亚胺中加入易溶或易分解的造孔剂来控制孔径,但造孔剂的残留会造成污染[12]。大多数PPI材料具有单一尺寸的孔隙结构,研究者通过冷、热等静压成型成功制备了双尺寸孔隙的PPI[13-16]。当轴承低速运行时,优先抛出储存在大孔径中的润滑油;在高速运行时,小孔隙润滑油被抛出参与润滑界面。然而,制备过程中温度对孔隙率的影响并不显著。尽管现有的制备方法能够调控孔隙率和孔径,但在优化这些参数时,仍难以平衡含油性能、力学性能和耐磨性[17-20]。胡旭东等[21]通过添加介孔碳、石墨烯和稀土等改性剂来提升PPI的含油性能及摩擦学性能,旨在解决含油率与耐磨性难以兼顾的问题。然而,改性剂虽然改善了摩擦磨损性能,但也破坏了PPI的孔结构,并降低了其强度。

同一密度的聚酰亚胺难以兼顾耐磨性和含油率,高密度的聚酰亚胺材料孔隙率小,强度高,耐磨性好,但含油率低;低密度的聚酰亚胺材料孔隙率高,含油率高,但强度低,耐磨性差。受孔隙率与耐磨性相互制约的限制,PPI的含油量和摩擦磨损特性难以同时提高,针对此问题,本工作提出了一种三明治型密度分层多孔聚酰亚胺保持架材料,并研究了制备方法和性能。所提出的材料中间层与外层的孔隙率可单独调控,外层可设置大孔隙率、中间层可设置小孔隙率,兼顾高孔隙率和高耐磨性的优点,为多孔材料的设计提供新的思路。

1 实验材料与方法

所选用的PI材料购自上海合成树脂研究所有限公司,型号为YS-20,是一种热塑性PI,其玻璃化温度为260 ℃。测试含油性能前,先对试样进行称重和干燥处理,然后浸没在PAO4润滑油中,在温度80 ℃、气压20 Pa的真空条件下浸油20 h。取出后擦拭表面油液,直到表面无明显油液聚集,称重并计算含油率η。测试油保持率时,将含油样品置于TG16G台式高速离心机中,转速为3000 r/min,离心半径为10 cm,相对离心力(RCF)约为9.8 N,离心时间为2 h,定期取样称重,记录数据并计算含油保持率γ。计算含油率和含油保持率如式(1),(2)所示。

$$\eta=\frac{m_1-m_0}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

$$\gamma=\frac{m_t-m_0}{m_1-m_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中:m_t是甩油后样品的质量;m_1是样品含油后的质量;m_0是样品在含油之前的质量。

样品的孔隙率和孔径采用AutoPore Ⅳ 9500全自动压汞仪测量。拉伸强度测试采用Instron 5966小型电子万能试验机,拉伸速率为1 mm/min。拉伸断面经过喷金处理后,使用SEM观察断面形貌。压缩性能测试使用CMT5105金属试验机在室温下进行,加载速度设定为1 mm/min。

使用往复摩擦试验机TRB3测试材料的摩擦性能,载荷为10 N,对磨球为6 mm的GCr15钢球,往复

行程 12 mm，速度 12 mm/s，采样频率为 1000 Hz，干摩擦样品测试时间设置为 1400 次循环，含油样品为 2800 次循环，实验重复 3 次，取平均值。摩擦实验后通过 KH-8700 三维数字显微镜观察样品和对磨球磨损表面。

2　结果与分析

2.1　三明治型密度分层 PPI 的设计

2.1.1　密度分层结构设计

在点接触或线接触中，接触应力由接触中心向外递减。在摩擦过程中，中心区域承受的磨损较为严重，而外层的接触应力和磨损相对较小。针对这一工况，设计了三明治型密度分层多孔含油聚酰亚胺(DLPPI)摩擦材料。首先，需要明确外层和中间层的密度设计。外层的设计功能是储油，以模拟实际工况下应力较小的接触；中间层则旨在提供抗磨性能，以应对接触应力较大的情况。

设计分层材料前，首先需对不同密度的多孔 PI 材料的含油性能和摩擦性能进行系统研究。均一密度 PPI 的含油性能测试结果如图 1(a)所示，PPI 样品在真空含油处理后的含油性能如下：密度为 1.0、1.1、1.2 g/cm^3 的情况下，PPI 含油率分别为 16.92%、11.06%、4.98%。当密度增至 1.24 g/cm^3，含油率降低至 0.77%，PPI 接近无孔化结构。随着密度的增加，试样的含油率显著下降，因为 PPI 内部的孔隙率降低，材料表面更加致密，润滑油难以渗透进多孔材料内部。不同密度 PPI 的油保持性能如图 1(b)所示。4 组密度不同的 PPI 样品均表现出优异的油保持性能，高速离心后的 4 组样品含油保持率均在 90% 以上，但是由于密度不同，4 组 PPI 样品的油保持率存在差异，密度为 1.0 g/cm^3 时含油保持率下降更快，经过 120 min 的高速离心后，含油保持率约为 92.32%。随着密度增大至 1.2 g/cm^3 后，由于其含油率较低，储存在孔隙中的润滑油较少，离心时难以溢出。结果表明，密度的减小显著降低了含油保持率，而较大密度的孔隙结构可提供更大的毛细力来防止 PAO4 的泄漏。

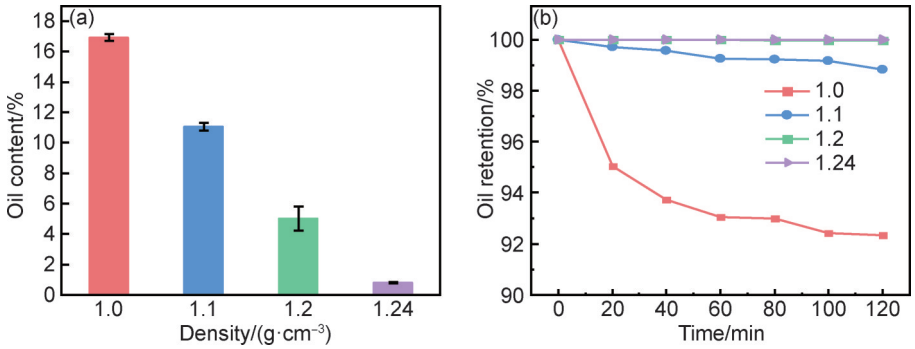


图 1　不同密度的 PPI 含油性能测试结果

(a)含油率；(b)含油保持率

Fig.1　Test results of oil retention properties of PPI with different densities

(a)oil content；(b)oil retention rate

不同密度 PPI 的干摩擦因数和含油摩擦因数如图 2 所示。在干摩擦条件下，4 组试样的平均摩擦因数较高，且随着密度增加，PPI 的平均摩擦因数逐渐减小。PPI 含油后的摩擦因数显著下降，4 个样品的平均含油摩擦因数分别为 0.083、0.070、0.065 和 0.071。1.0 g/cm^3 密度多孔聚酰亚胺虽然具有较高的孔隙率和含油率，使其能够储存更多的油，但较高的孔隙率会使材料强度下降，更多的表面孔隙也会造成粗糙度增大，导致摩擦因数上升。随着密度继续增大，材料硬度提高，含油率降低，聚酰亚胺的平均摩擦因数逐渐减小。当密度升至 1.24 g/cm^3 时，由于较低的孔隙率和含油率，润滑效果显著下降，导致摩擦因数快速上升。结果表明：在较短的往复周期内，含油摩擦曲线的变化趋势与干摩擦曲线一致。密度较大的 PI 试样初始摩擦因数较低，而含油率较高的 1.0、1.1 g/cm^3 组在往复周期延长后表现出更好的稳定性，其摩擦因数呈缓慢下降趋势。

采用光学显微镜观察 PPI 的磨痕，如图 3 所示。在干摩擦条件下，PPI 的磨损较为严重，密度为 1.0 g/cm^3 和 1.1 g/cm^3 的样品表面出现黑色碎屑堆积，磨痕宽度较大。随着密度增加，磨损后暴露的孔隙数量明显减少。在含油摩擦下，PPI 样品的磨痕宽度明显减小，1.24 g/cm^3 样品磨痕宽度最小，因其强度高，且所含的微量润滑油短时间具有润滑作用。

基于上述研究结果，中间层的密度选定为 1.1 g/cm^3，以实现良好的含油性能和稳定且优异的耐磨性，两端

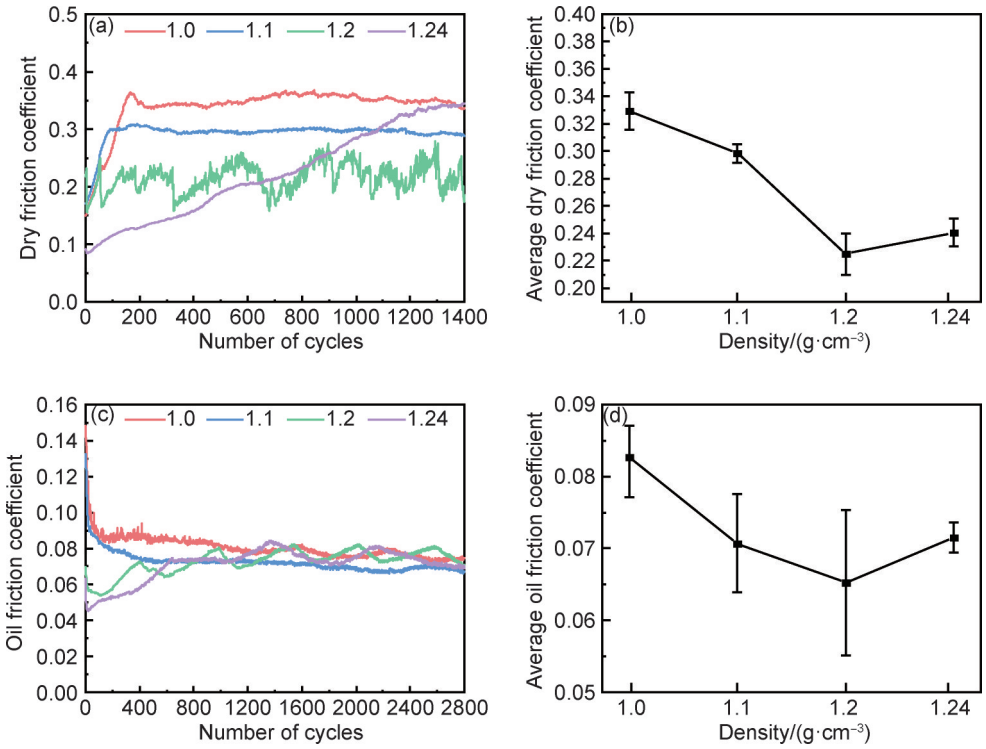


图2 不同密度PPI摩擦因数

(a)干摩擦因数;(b)平均干摩擦因数;(c)含油摩擦因数;(b)平均含油摩擦因数

Fig.2 Friction coefficient of PPI with different densities

(a)dry friction coefficient;(b)average dry friction coefficient;(c)oil friction coefficient;(d)average oil friction coefficient

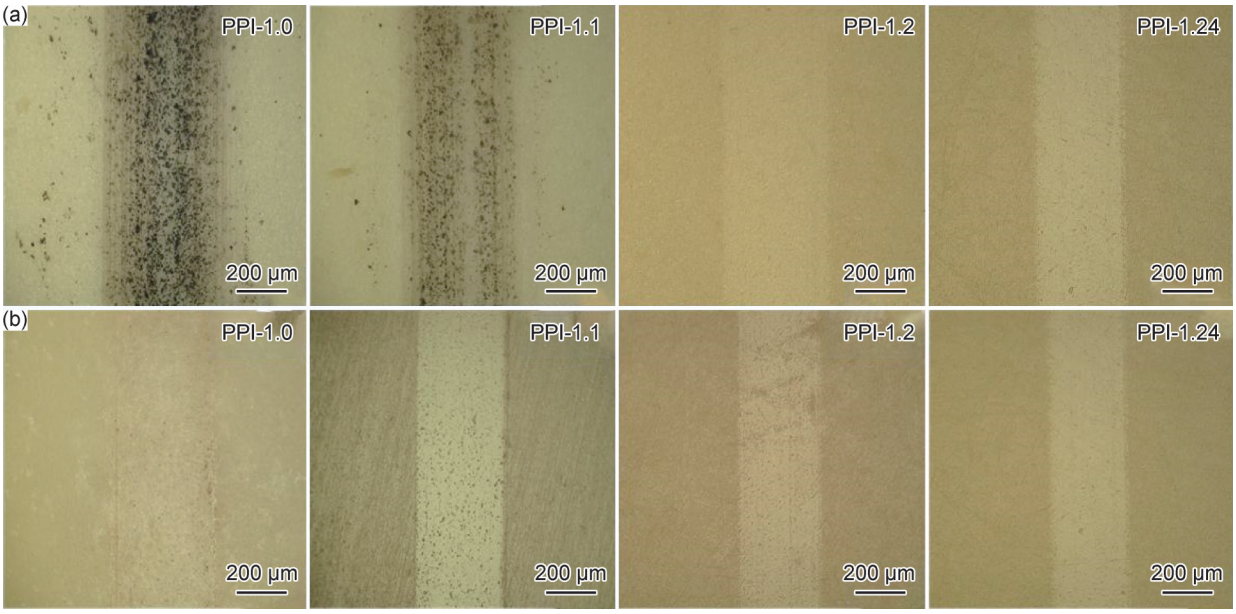


图3 不同密度PPI光镜下磨痕表面 (a)未含油试样;(b)含油试样

Fig.3 Wear track surfaces of PPI with different densities under optical microscopy (a)non-oiled sample;(b)oil impregnated sample

外层的密度则设定为1.0 g/cm³,以提高材料的含油率,所制备的试样命名为1.0-1.1-1.0。同时,适当延长PPI的保温时间可以提升材料强度但会降低含油率。设计了另一种三明治型多孔材料,三层的密度均为1.1 g/cm³,为了提高中间层的强度,其烧结时间设置为外层的2倍,命名为1.1-M2,所有材料中间层的厚度为4 cm,占整体体积的25%。

2.1.2 三明治型密度分层PPI的制备

三明治型密度分层PPI制备方法如下:(1)根据各层设计的密度称量所需的PI粉末;(2)将中间层的PI

粉末倒入模具，使用液压机压制固定体积，保压15 min，然后用螺栓固定上下端盖；(3)将模具放入烧结炉，设定温度为330 ℃，保温1 h；(4)取出芯柱后，在两侧填充相同质量的PI粉末，进行二次烧结；(5)脱模，得到坯料；(6)切割、打磨、超声波清洗和干燥试样，进行测试。制备示意图如图4所示。

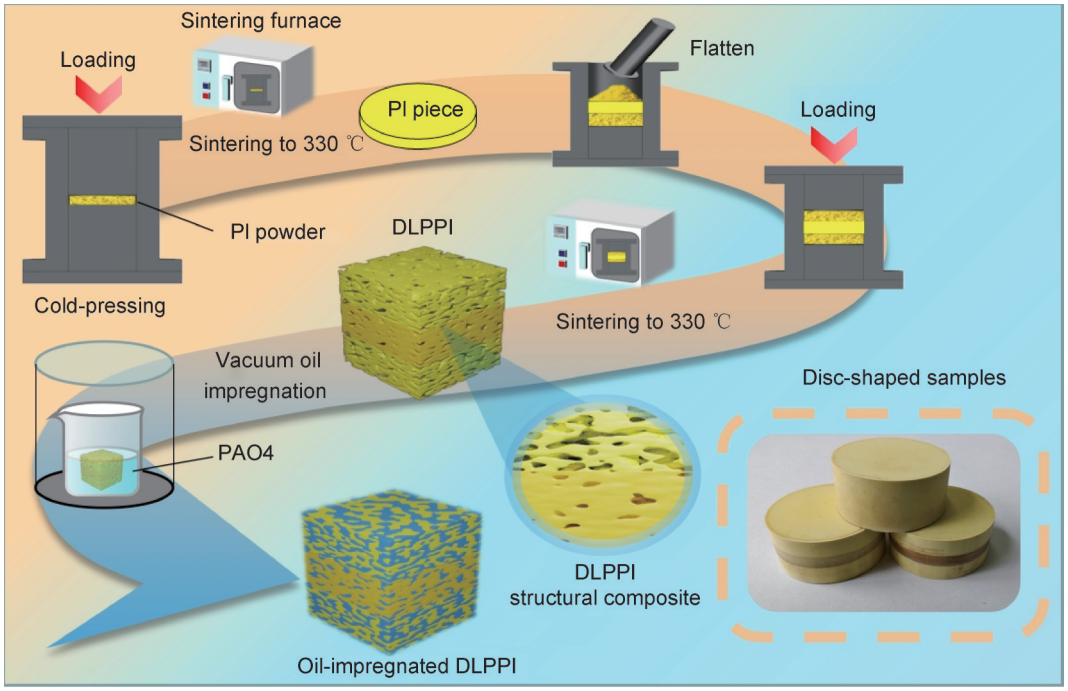


图4　三明治式密度分层多孔聚酰亚胺制备工艺示意图

Fig.4　Schematic diagram of sandwich type density layered porous polyimide preparation process

样品尺寸包括用于摩擦实验的圆盘试样(Φ35 mm×16 mm)，切割打磨后的拉伸试样(28.5 mm×3 mm×16 mm)，以及压缩圆柱试样(Φ13 mm×13.5 mm)。

2.2　三明治型密度分层PPI的力学性能

层间结合性能是评价分层材料制备工艺的关键，因此，测试了所制备分层材料的拉伸性能、压缩性能。分层材料间的结合强度受结合表面的粗糙度影响较大，本节改变中间层结合面的粗糙度，研究分层材料的拉伸和压缩性能，优化材料的制备。

研磨经过一次烧结的PPI两侧，得到4组(1～4号)不同表面粗糙度(R_a)的中间层PPI材料，以进行第二次烧结。1～4号试样的R_a分别为7.5、6.5、5、4.5 μm左右。分层材料的拉伸强度如图5所示。分析可知，中间层R_a为4.5 μm的DLPPI断裂速度最快，拉伸强度最低，仅为19.4 MPa；当R_a为6.5 μm时拉伸强度升至最大值41.7 MPa，提高了2.14倍。随着R_a值的降低，分层材料的拉伸强度先增大后减小。对于光滑的结合面，二次烧结时，各层材料之间无法很好地熔合，导致拉伸强度不高；而对于粗糙表面，粗糙面较深的沟壑难以填充，也导致结合较差。图6为拉伸试样断口的SEM图像，从图6可以清晰地看到R_a为7.5 μm左右的试样有明显打磨后留下的痕迹，结合较差(图6(a))；中间层R_a为6.5 μm左右的试样，拉伸断裂后表面存在各层相互黏结的材料，说明结合较好(图6(b))；R_a为4.5 μm左右的试样看不到由于黏结引起的材料破坏，结合性能也较差(图6(d))。

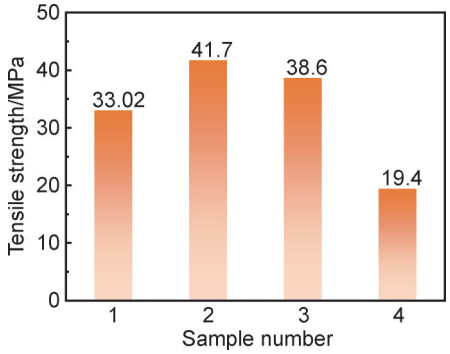


图5　不同粗糙度分层界面的拉伸强度

Fig.5　Tensile strength of layered interfaces with different roughness

均一密度PPI和密度分层PPI的压缩性能如图7所示。随着密度增加，相比1.0 g/cm³，密度为1.1 g/cm³的PPI压缩强度显著提高，而内层密度1.1 g/cm³外层密度1.0 g/cm³分层材料1.0-1.1-1.0的压缩强度和弹性模量分别为374.2 MPa和1047.8 MPa，介于两者之间。1.1-M2材料的压缩强度提升非常明显，达到

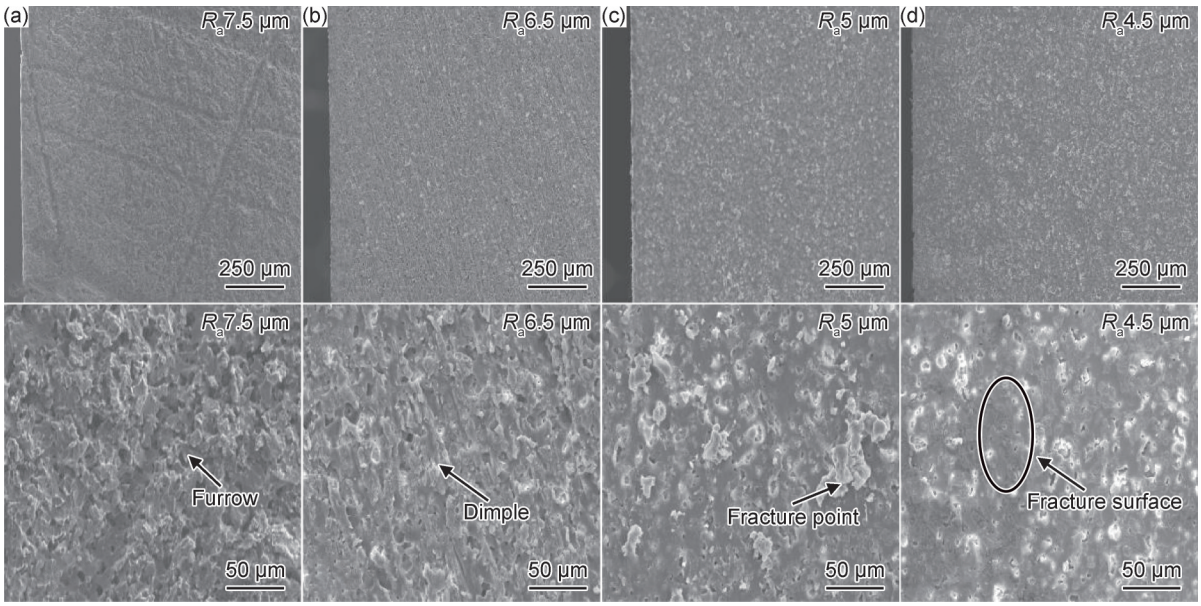


图6 拉伸试样断口的SEM图像 (a)1号;(b)2号;(c)3号;(d)4号

Fig.6 SEM images of tensile sample fractures (a)No.1;(b)No.2;(c)No.3;(d)No.4

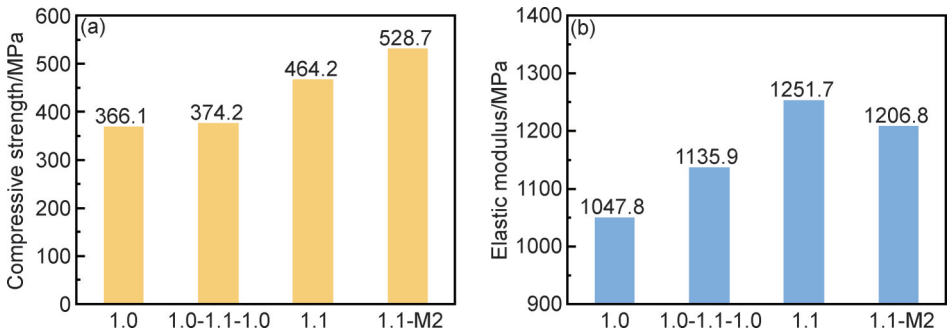


图7 均一密度PPI和密度分层PPI的力学性能

(a)压缩强度;(b)弹性模量

Fig.7 Mechanical properties of uniform density PPI and density layered PPI

(a)compressive strength;(b)elastic modulus

528.7 MPa,相较于1.0-1.1-1.0提高41.3%,且弹性模量与1.1 g/cm^{3}相差不大。

2.3 三明治型密度分层PPI的含油性能

图8给出了两种DLPPI样品的含油率和含油保持率。1.0-1.1-1.0的含油率为15.5%,相比1.1 g/cm^3,含油率提高了39.63%。1.1-M2的含油率为10.6%,相较于1.1 g/cm^{3}含油率仅下降4.5%。1.0-1.1-1.0材料的含油率较1.1-M2材料提高46.23%,离心120 min后的含油保持率为94.06%,介于两种均一密度之间。相同条件下,1.1-M2的含油保持率下降至97.62%,表

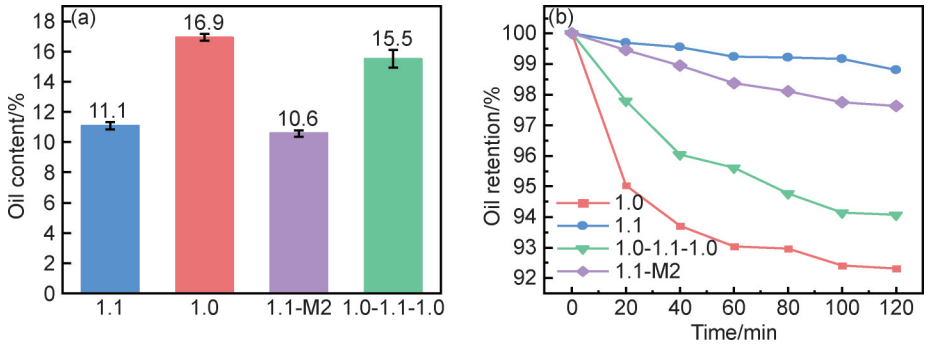


图8 DLPPI含油性能测试结果 (a)含油率;(b)含油保持率

Fig.8 Oil retention performance test results for DLPPI (a)oil content;(b)oil retention rate

明 1.0-1.1-1.0 通过增加中间层密度可以提高分层材料整体的保油性能，1.1-M2 的含油保持率下降的原因可能是结合层导致毛细作用减小，使保油性能略微变差。

采用压汞仪测试 DLPPI 的孔径分布和孔隙率，进出汞的曲线和孔径分布曲线如图 9 所示。测试结果表明，密度分别为 1.0 g/cm³和 1.1 g/cm³的 PPI 材料具有单一的最可几孔径，分别约为 1.46 μm 和 2.92 μm，其对应的孔隙率分别为 25.9% 和 18.18%。此外，对 1.1-M2 中间层（标记为 1.1(2)）进行了压汞测试，以研究保温时间延长对 PPI 孔径分布和孔隙率的影响。结果表明，与密度为 1.1 g/cm³的 PPI 材料相比，1.1(2)的孔径分布范围有所减小，其最大孔径由 2.49 μm 减小至 2.04 μm，孔隙率降低至 15.31%。这一结果表明，延长保温时间能够减小表面孔径尺寸，从而成为提高材料压缩强度的关键因素。此外，1.0-1.1-1.0 结构的进汞曲线呈阶梯式上升，并显示出两种不同的最可几孔径（1.31 μm 和 2.91 μm），对应孔隙率为 21.6%。这一现象验证了材料内部存在密度分层的多孔结构。

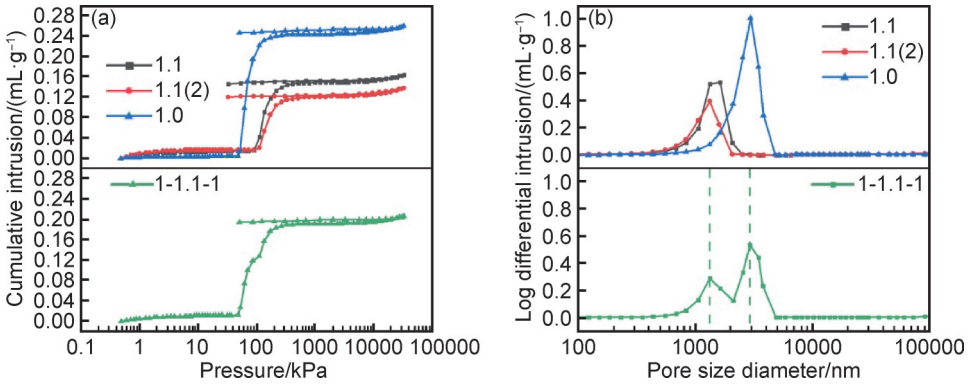


图 9　DLPPI 压汞实验测试结果

（a）进汞和出汞曲线；（b）孔径和压汞量

Fig.9　Mercury injection test results of DLPPI

(a)mercury inlet and outlet curves; (b)pore size and mercury intrusion rate

2.4　三明治型密度分层 PPI 的摩擦性能

2.4.1　摩擦性能分析

采用往复摩擦试验机测试三明治型分层多孔材料的摩擦性能，结果如图 10 所示。1.0-1.1-1.0 和 1.1-M2 的平均摩擦因数分别为 0.078 和 0.069。1.0-1.1-1.0 的摩擦因数在较短的往复周期内下降显著，且整体摩擦曲线低于 1.0 g/cm³的 PPI。图 10(c)展示了试样在含油摩擦下不同位置的摩擦因数，三明治型多孔材料在 −2～2 mm 的区间中摩擦因数出现明显内凹现象，这表面层次化的结构设计有效利用了内外材料的协同合作，降低了中心耐磨层的摩擦因数。

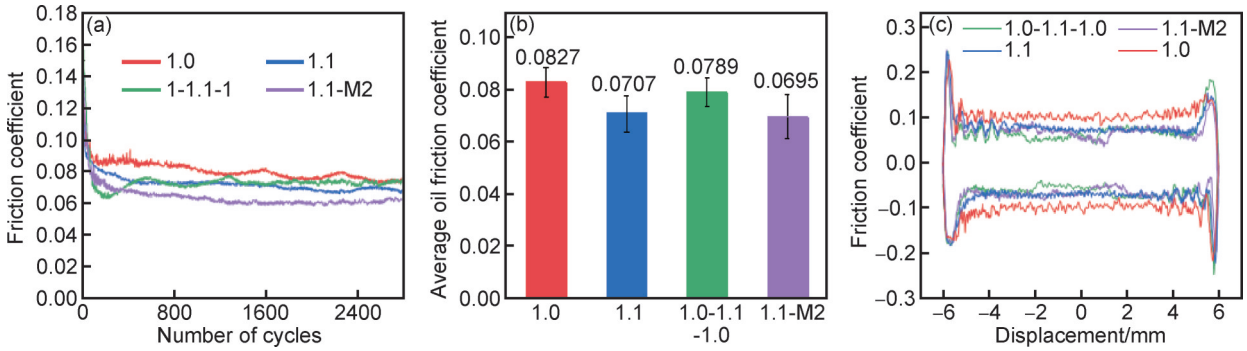


图 10　DLPPI 摩擦因数

（a）含油摩擦因数；（b）平均含油摩擦因数；（c）含油摩擦下不同位置的摩擦因数

Fig.10　Friction coefficient of DLPPI

(a)oil-lubricated friction coefficient; (b)average oil-lubricated friction coefficient; (c)friction coefficients at different positions under oil lubrication

使用光学显微镜观察摩擦后的 DLPPI 样品，如图 11 所示。由图 11 可知，1.0-1.1-1.0 和 1.1-M2 的分层界面处都有明显的磨痕增大现象。这是因为低密度的 PPI 硬度较小，因此在磨损过程中更容易变形，导

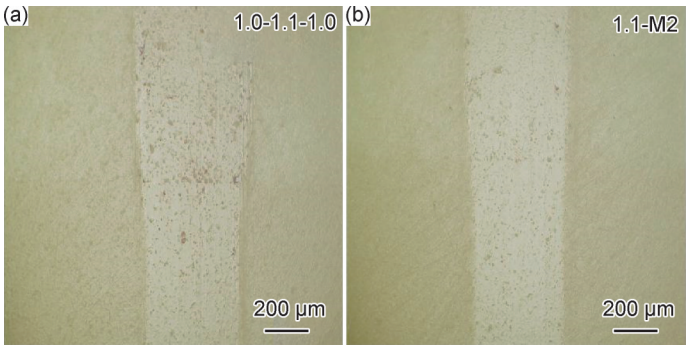


图 11 光镜下的磨痕表面 (a)1.0-1.1-1.0;(b)1.1-M2

Fig.11 Wear scar surfaces under optical microscopy (a)1.0-1.1-1.0;(b)1.1-M2

致磨痕的宽度在分层处突然增大。表 1 为密度分层聚酰亚胺磨痕宽度的变化,1.1-M2 中间层的磨痕宽度从 444.5 μm 降至 409.7 μm,下降了 7.8%;1.0-1.1-1.0 中间层磨痕宽度由 444.5 μm 降至 417.2 μm;外层的磨痕宽度则从 592.2 μm 降至 530.7 μm。此外还可看出,所制备的分层材料层间结合性能良好,经过摩擦后也未出现任何缺陷。

表 1 PPI 样品含油摩擦后磨痕宽度

Table 1 Wear scar widths of PPI samples after oil-lubricated friction

Sample	Wear scar width/μm		
	Uniform PPI	Outer layer of layered PPI	Center layer of layered PPI
1	592.2		
1.1	444.5		
1.1-M2			409.7
1.0-1.1-1.0		530.7	417.2

2.4.2 润滑机理分析

所制备的三明治型分层多孔材料能够平衡孔隙率与耐磨性,可根据接触摩擦的实际工况灵活设计中间耐磨性和两侧贮油层的尺寸和位置,其摩擦润滑机理如图 12 所示。

高密度的中心耐磨层具有低粗糙度和高硬度的优点,使其在高压力下保持稳定性,从而显著增强了其耐磨性能。同时,在摩擦实验中,摩擦界面的热量和压力促使两侧层中的润滑油迁移至中间层。这一过程可以通过毛细作用、扩散或摩擦产生的液体流动等机制实现。当润滑油迁移至中间层时,它在该层表面形成了一层润滑膜。这层润滑膜有效降低了摩擦因数和磨损。此外,因两侧层具有较高的含油率,它们能够在摩擦过程中不断补充润滑油,维持持续的润滑效果。

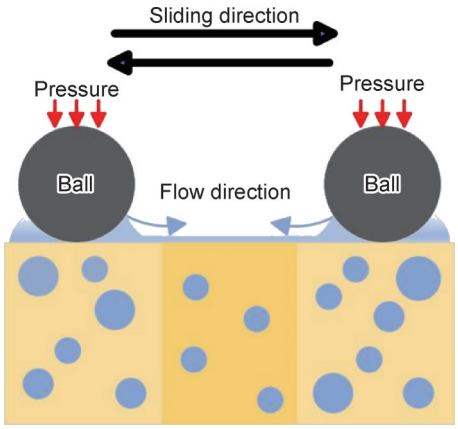


图 12 DLPPI 材料的摩擦润滑机理示意图

Fig.12 Schematic diagram of friction lubrication mechanism for DLPPI materials

3 结论

(1)所提出的材料呈现出双尺寸孔隙结构,能够有效平衡孔隙率与耐磨性。其中低密度层更适合储存润滑油,而高密度层则显著增强了材料的力学性能,两者相互补充提高材料的摩擦学性能。

(2)所制备的 1.0-1.1-1.0 和 1.1-M2 材料在性能上各具优势,适用于不同工况需求。1.0-1.1-1.0 材料的含油率较 1.1-M2 材料提高 46.23%,油保持率达 94.06%,其拉伸强度为 41.7 MPa,压缩强度为 374 MPa。材料外层通过储存更多润滑油维持持续润滑,内层则凭借高硬度和低粗糙度提升耐磨性,适合润滑需求较高的场景。而 1.1-M2 材料在压缩强度(528.7 MPa,相较于 1.0-1.1-1.0 提高 41.3%)和摩擦因数(0.069)上表现更优。这种性能提升主要归因于中间层孔径减小所带来的硬度增强,更适合高耐磨需求的严苛工况。

(3)均一材料的测试结果表明,在常用的孔隙率范围内,含油 PPI 的孔隙率和耐磨性是相互制约的关系,这一结果是三明治型分层多孔聚酰亚胺材料设计的重要依据。

参考文献

[1] 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.

[2] 钟爱文，姚萍屏，肖叶龙，等. 空间摩擦学及其材料的研究进展[J]. 航空材料学报，2017，37(2)：88-99.
ZHONG A W，YAO P P，XIAO Y L，et al. Research status and developing trend of space tribology and tribological materials[J]. Journal of Aeronautical Materials，2017，37(2)：88-99.

[3] 胡海，孟祥胜，柯红军，等. 长时耐 300 ℃易成型聚酰亚胺树脂及其复合材料[J]. 材料工程，2023，51(9)：183-191.
HU H，MENG X S，KE H J，et al. Processable polyimide resins and their composites for long-term application at 300 ℃[J]. Journal of Materials Engineering，2023，51(9)：183-191.

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

[5] WANG J，ZHAO H，HUANG W，et al. Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication[J]. Wear，2017，380：52-58.

[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] 何刘，李新跃，李科，等. 多孔聚酰亚胺保持架含油材料的研究进展[J]. 山东化工，2024，53(1)：88-90.
HE L，LI X Y，LI K，et al. Research progress of oil-bearing materials for porous polyimide cages[J]. Shandong Chemical Industry，2024，53(1)：88-90.

[8] RUAN H，ZHANG Y，LI S，et al. Effect of temperature on the friction and wear performance of porous oil-containing polyimide[J]. Tribology International，2021，157：106891.

[9] 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.

[10] 浦玉萍，吕广庶. 模压聚酰亚胺多孔体材料性能的研究[J]. 北京理工大学学报，2003，23(3)：389-393.
PU Y P，LU G S. A study on the property of molding-pressing of polyimide porous materials[J]. Journal of Beijing Institute of Technology，2003，23(3)：389-393.

[11] 邵阳. 空间轴承聚酰亚胺保持架材料的成型工艺及性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2022.
SHAO Y. Study on forming process and properties of polyimide cage material for space bearings [D]. Dalian：Dalian University of Technology，2022.

[12] 李佶莲，傅仁利，王静秋，等. 模板-滤取法制备UHMWPE多孔材料及其孔道结构[J]. 塑料，2013，42(1)：52-54.
LI J L，FU R L，WANG J Q，et al. The porous UHMWPE prepared by templates-leaching method and its structure[J]. Plastics，2013，42(1)：52-54.

[13] 徐明坤，郭丽和，周宁宁，等. 等静压成型对多孔聚酰亚胺保持架成孔性能的影响研究[J]. 机械工程学报，2022，58(16)：178-188.
XU M K，GUO L H，ZHOU N N，et al. Influence of isostatic press on the pore properties of porous oil-containing polyimide retainer [J]. Journal of Mechanical Engineering，2022，58 (16)：178-188.

[14] YANG X Y，CHEN L H，LI Y，et al. Hierarchically porous materials：synthesis strategies and structure design[J]. Chemical Society Reviews，2017，46(2)：481-558.

[15] RUAN H，ZHANG Y，SONG F，et al. Efficacy of hierarchical pore structure in enhancing the tribological and recyclable smart lubrication performance of porous polyimide[J]. Friction，2023，11(6)：1014-1026.

[16] XU M，GUO L，RUAN H，et al. Design and pore properties tuning of two-scale porous polyimide fabricated by isostatic pressing for improving oil storage and tribological properties[J]. Advanced Engineering Materials，2023，25(8)：2201421.

[17] WANG C，ZHANG D，WANG Q，et al. Effect of porosity on the friction properties of porous polyimide impregnated with poly-α-olefin in different lubrication regimes [J]. Tribology Letters，2020，68(4)：102.

[18] 倪洪江，李军，邢宇，等. 基体厚向梯度化聚酰亚胺复合材料制备与表征[J]. 航空材料学报，2022，42(3)：55-62.
NI H J，LI J，XING Y，et al. Preparation and characterization of matrix-graded polyimide composite along thickness direction[J]. Journal of Aeronautical Materials，2022，42(3)：55-62.

[19] XU X，SHU X，PEI Q，et al. Effects of porosity on the tribological and mechanical properties of oil-impregnated polyimide [J]. Tribology International，2022，170：107502.

[20] CHEN W，WANG W，ZHU P，et al. Effects of pore size on the lubrication properties of porous polyimide retainer material [J]. Friction，2023，11(8)：1419-1429.

[21] 胡旭东，李锦棒，叶锦宗，等. 几种改性剂对多孔聚酰亚胺含油性能和摩擦性能的影响[J]. 复合材料学报，2022，39(6)：2619-2630.
HU X D，LI J B，YE J Z，et al. Effects of several modifiers on oil-bearing and tribological properties of porous polyimides[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2022，39(6)：2619-2630.

基金项目：国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U23A20618)；宁波市镇海区“十四五”技术攻关重大专项(2022001)；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(BZ0388202203)
收稿日期：2024-12-17；**录用日期**：2025-01-20

通讯作者：李锦棒(1988—)，男，副教授，博士，研究方向为摩擦学及精密驱动，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楼404(315211)，E-mail：lijinbang@nbu.edu.cn

(本文责编：解　宏)