

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.001

不同固含量聚酰亚胺/金刚石凝胶磨具的制备及性能

董明利, 王园园, 蔡钟灏, 李亦凡, 王耀月, 刘庆阳, 彭进

(河南工业大学材料科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: 与传统固结磨具相比,凝胶磨具因能够有效改善磨料及气孔的分散均匀性,成为现今精密磨削工具研究的热点。其中有机凝胶磨具因兼具自锐性和弹性在硬脆材料的磨削中脱颖而出,但现今多数的有机凝胶磨具存在耐热性差、化学稳定性低等问题,限制了其应用。为解决上述问题,以均苯四甲酸二酐(PMDA)和4,4'-二氨基二苯醚(ODA)为原料,制备了水溶性聚酰胺酸盐,通过溶胶-凝胶法和冷冻干燥法制备了一系列不同聚酰亚胺(PI)固含量的PI凝胶磨具。系统研究了固含量对磨具气孔率、热学性能、力学性能、磨削质量及微观形貌的影响。结果表明,随着固含量的增加,PI凝胶磨具的内部孔径逐渐减小,孔壁厚度逐渐增大,压缩强度逐渐增大。所有PI凝胶磨具均表现出优异的热稳定性,初始分解温度高于530℃;当固含量低于19%时,PI凝胶磨具的气孔率大于50%。磨削测试结果表明,固含量低时,磨具骨架强度低,易堵塞磨具;固含量高时,磨具孔壁厚度大,磨料易团聚。分析表明,固含量19%的PI凝胶磨具表现最优,其磨削碳化硅的表面粗糙度低至69 nm,且具有优异的力学、热学、气孔率和自锐性等综合性能。

关键词: 聚酰亚胺;溶胶-凝胶;磨具;碳化硅;热稳定性;磨削性能

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0001-09

Preparation and properties of diamond gel abrasives with polyimide of different solid contents

DONG Mingli, WANG Yuanyuan, CAI Zhonghao, LI Yifan, WANG Yaoyue, LIU Qingyang, PENG Jin

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract : Compared with traditional bonded abrasives, gel abrasives have become a hot topic in the research of precision abrasives nowadays due to their effective improvement of the uniformity of abrasive and pore dispersion. Among them, organic gel abrasives stand out in the grinding of hard and brittle materials due to their combination of self-sharpening and elasticity. However, most of the current organic gel abrasives have problems such as poor heat resistance and low chemical stability, which limit their application. To solve the above problems, water-soluble polyamide salts were prepared using pyromellitic dianhydride (PMDA) and 4,4'-diaminodiphenyl ether (ODA) as raw materials. A series of polyimide (PI) gel abrasives with different solid contents were prepared by sol-gel method and freeze-drying method. The effects of solid content on the porosity, thermal properties, mechanical properties, grinding quality and microstructure of abrasives were systematically studied. The results show that with the increase of solid content, the internal pore size of the PI gel abrasive gradually decreases and the thickness of the pore wall gradually increases, the compressive strength of PI gel abrasives gradually increases. All PI gel abrasives exhibit the excellent thermal stability with an initial decomposition temperature above 530 °C. When the solid content is lower than 19%, the porosity of PI gel abrasives is greater than 50%. Grinding test results show that when the solid content is low, the strength of the grinding tool skeleton is low and it is easy to block. When the solid content is high, the thickness of the abrasive hole wall is large, and the abrasive is easy to agglomerate. Analysis shows that the PI gel abrasive with a solid content of 19% performs the best. Its surface roughness for grinding silicon carbide is as low as 69 nm and it has excellent comprehensive properties such as mechanics, thermology, porosity and self-sharpening.

Keywords : polyimide ; sol-gel ; abrasive ; silicon carbide ; thermal stability ; grinding performance

基金项目: 2025 年国家科技重大专项(2025ZD0717401), 河南省重点研发专项(241111233100), 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2022BS052), 河南省科技攻关项目(242102231018)

通信作者: 彭进, 教授, 硕士生导师, 研究方向为树脂结合剂磨具

收稿日期: 2025-10-25

引用格式: 董明利, 王园园, 蔡钟灏, 等. 不同固含量聚酰亚胺/金刚石凝胶磨具的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 1-9.

DONG Mingli, WANG Yuanyuan, CAI Zhonghao, et al. Preparation and properties of diamond gel abrasives with polyimide of different solid contents[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 1-9.

近年来,随着人工智能、新能源汽车、轨道交通等行业的快速发展,市场对大算力、高能效和高稳定性的半导体芯片的需求量越来越高^[1-2]。碳化硅(SiC)作为第三代半导体,凭借其高击穿电场、高导热性和优异的稳定性而被广泛应用于新能源汽车、智能电网等要求高频和高压器件之中^[3-5]。而表面无损伤、粗糙度低的SiC衬底晶圆是制造SiC基电子器件的基础^[6]。目前,SiC晶圆的主要加工流程包括切片、减薄、研磨、抛光和清洗。其中,通过超精密晶圆减薄工艺可以有效减小芯片封装体积、导通电阻、改善芯片的热扩散效率,提高其电气性能和力学性能^[7]。然而SiC晶圆具有极高的硬度和化学惰性,是一种典型的难加工材料,金刚石磨具凭借其高材料去除率和优异的形状保持性成为SiC晶圆减薄难以替代的关键工具。

目前,金刚石磨具根据其结合剂类型分为树脂结合剂磨具、金属结合剂磨具和陶瓷结合剂磨具。与另外两种磨具相比,树脂结合剂磨具具有加工表面质量高、亚表面损伤低等优势,但同时也存在超细磨料分布不均匀、易堵塞、加工效率低等不足^[8]。为了提升树脂结合剂磨具的综合性能,冯凯萍等^[9]将金刚石和填料分散在聚乙烯醇-酚醛树脂复合凝胶之中反复冷冻,烧结之后得到细粒度金刚石磨具。用该金刚石凝胶磨具进行SiC陶瓷磨削实验,获得了表面粗糙度低于3.5 nm的磨削效果,优于传统热压金刚石磨具。Wu等^[10]通过混料-凝胶化-冷藏-干燥流程制备了预糊化多糖结合剂磨具,能够在蓝宝石抛光过程中,利用其含有的软质SiO₂磨粒与工件发生固相反应,实现低损伤的表面加工。Yu等^[11]将环氧树脂与含金刚石磨料的软凝胶体结合,制备出一种蜂窝结构的研磨盘,用该研磨盘对SiC晶片进行磨削,得到较好的表面质量和表面精度。

上述学者采用溶胶-凝胶法制备树脂结合剂磨具,尽管解决了超细金刚石微粉的分散问题,但其采用的凝胶树脂耐热温度、力学性能均不如聚酰亚胺(PI)树脂^[12-15]。PI作为综合性能最佳的有机高分子材料之一,以其为基础制备的PI凝胶同样具备十分优异的性能^[16]。与普通有机凝胶相比,PI凝胶具备更优异的耐高温性能、化学稳定性和力学性能^[17-18]。同时,PI凝胶的可设计性和可加工性强,很容易与一些功能材料复合从而获得所需要的性能^[19-21]。

本文对PI的前驱体——聚酰胺酸(PAA)进行水

溶性改性,通过溶胶-凝胶和冷冻干燥的方法制备出一种耐热性高、孔隙率可控、孔径可调的新型PI凝胶磨具,探究了不同固含量对其力学性能、热稳定性、磨削性能以及孔隙结构的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

N,N-二甲基乙酰胺(DMAc):分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

4,4'-二氨基二苯醚(ODA):D806772,纯度98%,上海麦克林生化科技有限公司;

均苯四甲酸二酐(PMDA):P816102,纯度96%,上海麦克林生化科技有限公司;

三乙胺(TEA):分析纯,成都科隆化学有限公司;

金刚石:HHW-C,20 μm,河南黄河旋风股份有限公司;

去离子水:实验室自制。

1.2 主要仪器及设备

差示扫描量热(DSC)仪:DSC200F3,德国耐驰仪器制造公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IRPrestige-21,日本岛津制作所;

电子万能试验机:WDW-50W,济南永科试验仪器有限公司;

数字式黏度计:NDJ-5S,上海仪昕科学仪器有限公司;

邵氏硬度计:LX-C,乐清市爱德堡仪器有限公司;

冷冻干燥机:PILOT-4LD,博医康仪器有限公司;

热重(TG)分析仪:TG-DTA8122,日本理学株式会社;

扫描电子显微镜(SEM):PHENOM PROX,荷兰BV公司;

白光轮廓仪:Nexview NX2,美国zygo公司;

超景深三维显微镜测试仪:VHX-5000,基恩士(中国)有限公司;

磨床:MA6025,上海机床厂。

1.3 水溶性聚酰胺酸盐(PAAs)的制备

首先,将ODA(20.024 g,0.1mol)溶于DMAc溶液中,待其完全溶解后,在冰水浴条件下分批加入PMDA(22.03 g,0.101 mol),持续搅拌4 h,获得固含

量为15%的PAA溶液。随后,向该溶液中滴加与ODA等物质的量的TEA (13.9 mL, 0.1 mol), 其反应机理如图1所示, 加入与ODA等物质的量的TEA之后, PAA上的羧基约有一半转化为PAA羧酸盐, 这么做是因为过量的TEA会导致PAAs溶于水, 使其不能沉淀析出, 而TEA不足会导致沉淀的PAAs在热水中的溶解变得极为缓慢^[22]。继续搅拌4 h, 得到PAAs溶液, 将所得PAAs溶液倒入过量去离子水中进行沉淀, 经五次洗涤后, 收集所析出的白色絮状产物。该产物于60 °C下干燥12 h, 经粉碎后, 获得黄色PAAs粉末。

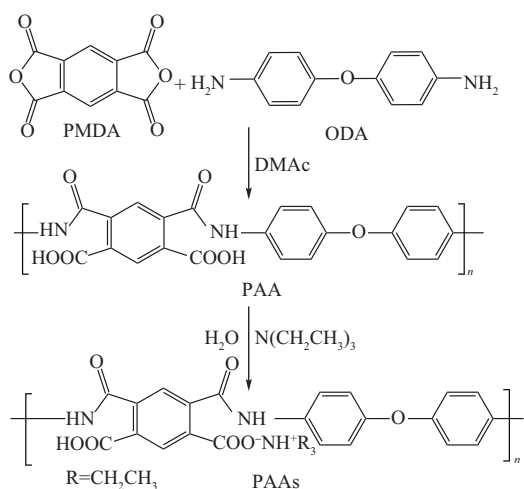


图1 PAAs的合成机理图

Fig. 1 Synthesis mechanism diagram of PAAs

1.4 PI凝胶磨具的制备

将PAAs粉末按固含量分别为17%, 18%, 19%, 20%和21%与去离子水混合, 随后加入与PAAs粉末体积相同的金刚石微粉, 开始搅拌。将混合体系升温至60 °C后, 缓慢滴加TEA (22 mL)使PAAs溶解, 继续搅拌1 h使金刚石微粉在PAAs的水溶液中分散均匀。随后, 将均匀的浆料浇注到模具中。将模具置于-70 °C条件下冷冻24 h, 然后将样品转移至冷冻干燥机中, 冷冻干燥72 h。最后, 对样品进行阶梯式热亚胺化处理, 在100, 200 °C和250 °C下各保温1 h, 最终制得PI凝胶磨具。

1.5 测试与表征

(1) DSC测试。采用DSC仪测试, N₂气氛, 测温范围为25~300 °C, 气体流速为30 mL/min, 升温速率为10 °C/min。

(2) FTIR测试。采用FTIR仪测试, 采用KBr压片法制样, 并以纯KBr片作为背景校正, 扫描波数为400~4 000 cm⁻¹, 扫描128次。

(3) 压缩强度测试。采用电子万能试验机按GB/T 1041-2008测试, 速度2 mm/min, 样品尺寸为(20.0±1) mm×(20.0±1) mm×(10.0±1) mm。

(4) 硬度测试。采用邵氏硬度计按GB/T 2411-2008测试, 试样尺寸为(60.0±1) mm×(30.0±1) mm×(10.0±1) mm。

(5) 黏度测试。采用数字式黏度计按GB/T 2794-2022测试, 4号转子, 转速为12 r/min。

(6) TG表征。采用TG分析仪测试, 样品用量为10~15 mg, 温度范围为25~800 °C, 升温速率为10 °C/min, 在空气氛围下进行。

(7) SEM观察。采用SEM观察样品微观形貌, 测试前样品在液氮中浸泡10 min进行脆断, 喷金60 s, 测试时加速电压10 kV, 放大倍数分别为500, 1 000, 2 000, 5 000。

(8) 超景深观察。采用超景深三维显微镜测试仪观察PI凝胶磨具表面, 放大倍数为250倍。

(9) 表面粗糙度。采用白光轮廓仪观察, 观察距离8.3 mm。

(10) 磨削测试。采用磨床进行磨削测试, 转速为3 000 r/min, 进给速度为0.2 mm/min。

(11) 气孔率 P 计算。样品尺寸为(20.0±1) mm×(20.0±1) mm×(10.0±1) mm。基于阿基米德原理, 采用式(1)计算。

$$P = \frac{M_3 - M_2}{M_3 - M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_1 为干试样在空气中的质量; M_2 为饱和试样在水中的质量; M_3 为饱和试样在空气中的质量。

2 结果与讨论

2.1 DSC与FTIR分析

图2为PAAs的DSC曲线。由图2可见, PAAs

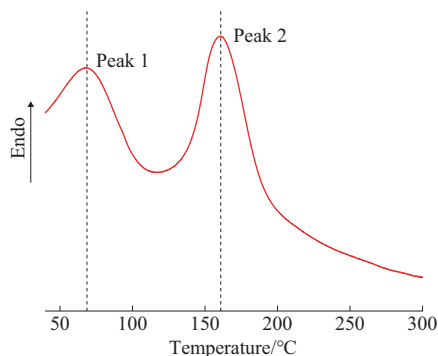


图2 PAAs的DSC曲线

Fig. 2 DSC curve of PAAs

在热亚胺化的过程中出现两个明显的吸热峰。第一个吸热峰位于40~120℃,峰值温度为68.63℃,在该温度区间的吸热行为主要为样品内部残留的水和溶剂的挥发。第二个吸热峰由150℃开始并一直延续到300℃,在该温度区间有两个主要的吸热行为:一是样品内部的残余溶剂的深度脱除,二是体系中TEA的脱除及羧基与氨基或酰胺基团间的酰胺化反应即内环化。因此,100℃保温1h,200℃保温1h,250℃保温1h的升温程序足以满足PI凝胶磨具的亚胺化要求。

图3为PI凝胶和PAAs的FTIR谱图。由图3可知,PAAs的谱图上出现了1610,1404 cm^{-1} 等羧酸盐的特征峰,1610 cm^{-1} 处为 COO^- 的反对称伸缩振动峰,1404 cm^{-1} 处为 COO^- 的对称伸缩振动峰,1660 cm^{-1} 处为 C=O 伸缩振动峰(酰胺I带),1550 cm^{-1} 处为 N-H 的弯曲振动峰(酰胺II带),这说明成功制备了水溶性的PAAs。在PI凝胶的谱图上出现了1780,1720,1380,725 cm^{-1} 等典型PI特征峰。1780 cm^{-1} 处为 C=O 的不对称伸缩振动峰,1720 cm^{-1} 处为 C=O 的对称伸缩振动峰,1380 cm^{-1} 处为 C-N-C 的伸缩振动峰,725 cm^{-1} 处为 C=O 的弯曲振动峰。PAAs的红外特征峰全部消失,表明样品已完全酰亚胺化。

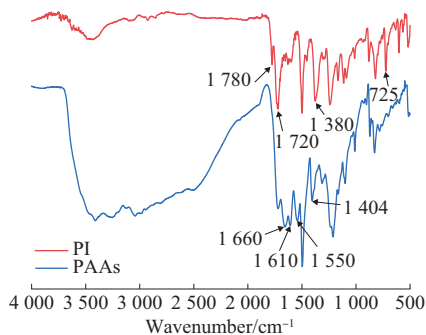


图3 PAAs和PI凝胶的FTIR谱图

Fig. 3 FTIR spectra of PAAs and PI gel

2.2 PI凝胶磨具固含量研究范围的确定

PI凝胶磨具固含量为前驱体溶液(未添加金刚石)中PAAs的质量分数,其对PI凝胶磨具的硬度、孔径、孔隙率及力学性能的影响显著。图4a为不同固含量PI凝胶磨具的压缩强度。如图4a所示,固含量10%的PI凝胶磨具的压缩强度仅为2.17 MPa,即使固含量增加到16%,PI凝胶磨具的压缩强度仍未超过7 MPa,无法满足PI凝胶磨具的使用要求。随着固含量的进一步增加,PI凝胶磨具的压缩

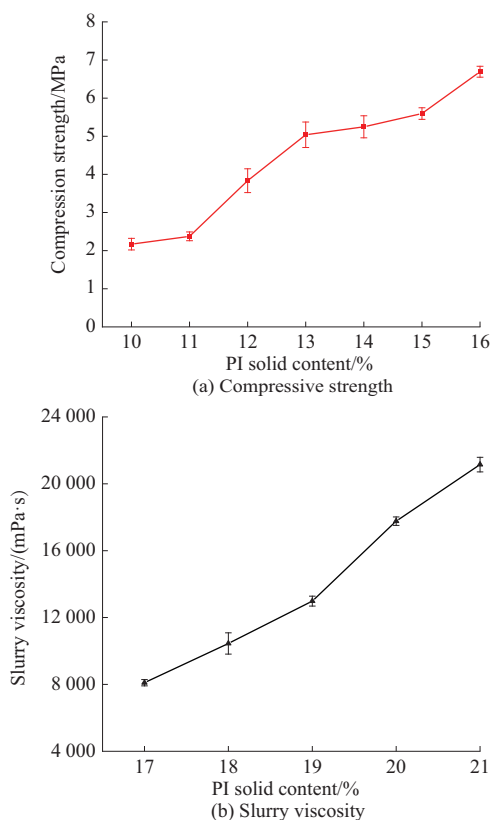


图4 不同固含量PI凝胶磨具的压缩强度与浆料黏度

Fig. 4 Compressive strength and slurry viscosity of PI gel abrasives with different solid contents

强度和硬度继续增大,然而,高固含量也导致浆料黏度急剧升高,如图4b所示,当固含量增加到21%时,PI凝胶磨具的浆料黏度为21150 mPa·s,浆料流动性差。同时,过高的固含量会缩短凝胶时间,导致提前凝胶而影响浇注过程^[22]。因此,为了平衡PI凝胶磨具的强度与可加工性,选定固含量17%~21%作为研究范围。

2.3 PI凝胶的SEM表征

图5为固含量17%~21%的PI凝胶的SEM和孔径分布图。如图5所示,随着固含量的增加,PI凝胶内部的孔壁厚度逐渐增大,且固含量大于20%时,出现了较为粗壮的“枝干状”孔壁。这是由于在单位体积内,PI相的增加,增大了PI分子链之间相互缠结的机会,形成较厚的孔壁。同时,随着固含量的增加,PI凝胶内部孔径在逐渐减小。固含量为17%时,孔径分布的峰值为50 μm ;当固含量增加到21%时,孔径分布的峰值已经降到了38 μm ,且小尺寸孔隙逐渐增多,大尺寸孔隙几乎消失。这是因为体系内PI相的增加,使得分子链之间的交联点更为密集,导致凝胶网络结构更为致密,表现为平均孔径减小。

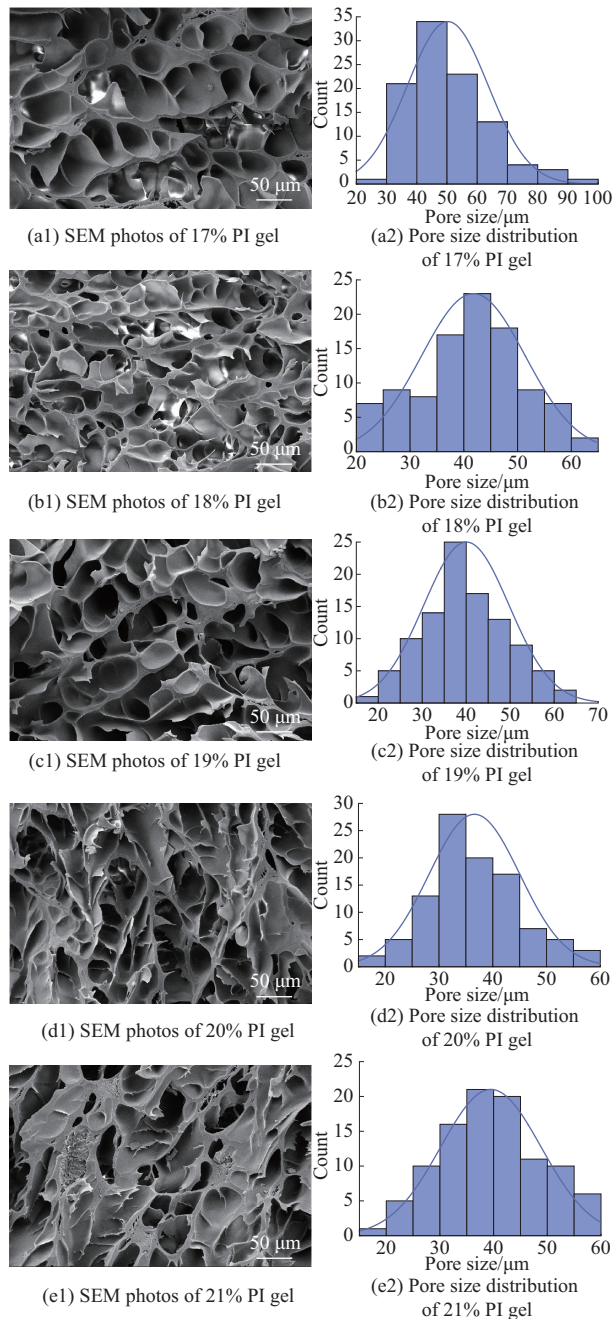


图5 固含量17%~21%的PI凝胶的SEM照片和孔径分布图

Fig. 5 SEM photos and pore size distribution diagram of PI gel with solid content of 17%–21%

2.4 PI凝胶磨具的SEM表征

图6为固含量17%~21%的PI凝胶磨具的SEM照片。如图6所示,PI凝胶磨具内部结构变化与PI凝胶的内部结构变化基本一致。固含量较低时,孔壁较薄,断裂边缘比较尖锐,随着固含量的增加,PI凝胶内部的孔壁厚度逐渐增大,断裂边缘逐渐钝化。所制备的PI凝胶磨具中的金刚石基本都均匀地分布在PI凝胶孔壁处,这是由于金刚石被PI凝胶包裹,在

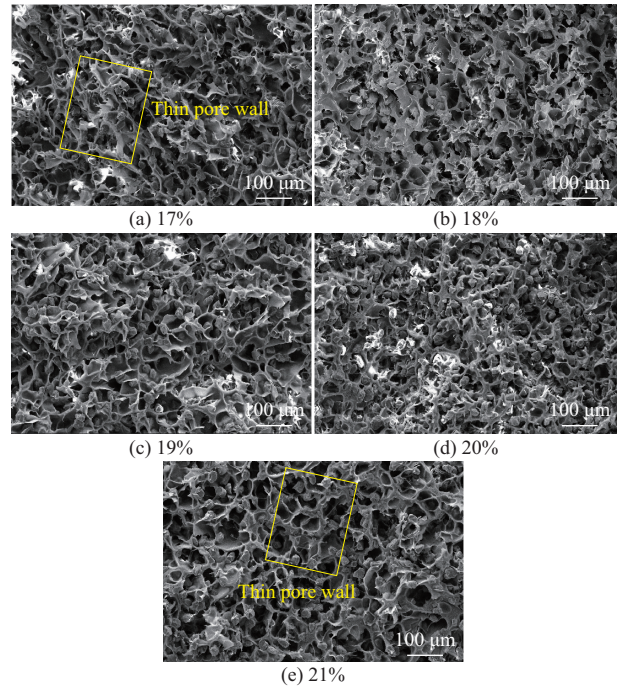


图6 固含量17%~21%的PI凝胶磨具的SEM照片

Fig. 6 SEM photos of PI gel abrasives with solid content of 17%–21% 冷冻过程中冰晶的生长会挤压PI凝胶,金刚石随之移动形成孔壁。当固含量大于19%时,PI凝胶磨具内部同样出现明显的“枝干状”孔壁。由图6e可以看出,“枝干状”孔壁的周围分布的金刚石数量明显少于薄孔壁附近的金刚石,出现金刚石的微团聚现象,这可能导致PI凝胶磨具内部组织均匀性下降。

2.5 气孔率

气孔作为磨具三要素之一,为磨具提供了至关重要的容屑空间和冷却通道,是磨具保持锋利切削与高效磨削的关键。因此,气孔率的调控至关重要。图7为不同固含量的PI凝胶磨具的气孔率图。由图7可见,固含量17%的PI凝胶磨具的气孔率最高,其气孔率为63.67%。随着固含量的增大,PI凝

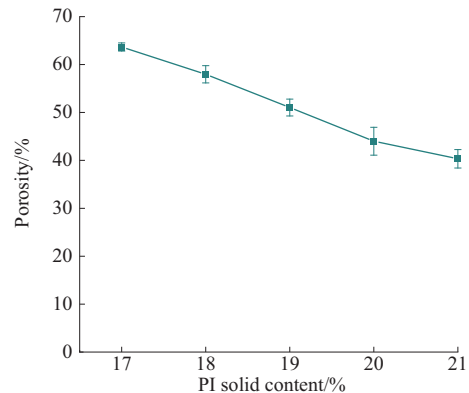


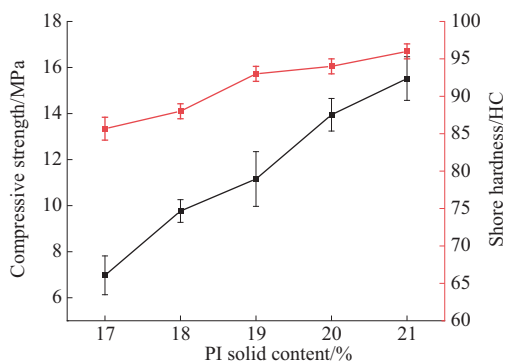
图7 固含量17%~21%的PI凝胶磨具的气孔率

Fig. 7 Porosity of PI gel abrasive with solid content of 17%–21%

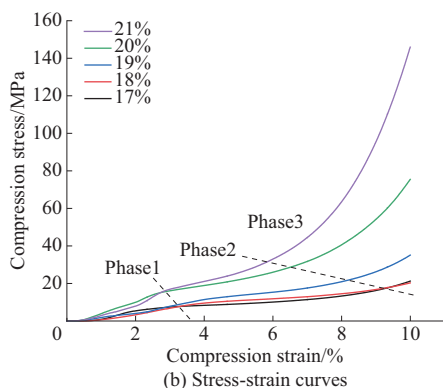
胶磨具的气孔率逐渐下降;当固含量为19%时,PI凝胶磨具的气孔率为51.03%;当固含量增加到21%时,PI凝胶磨具的气孔率降至40.33%。这是因为随着固含量的升高,单位体积内分子链的数量增多,这些链相互缠结形成更密集的骨架网络,进而使孔壁增厚,压缩孔隙尺寸,导致气孔率降低。

2.6 力学性能

磨具的力学性能是磨具的核心属性,其直接影响磨具的寿命、切削效率及加工质量等性能。对不同固含量的PI凝胶磨具进行压缩和硬度测试,结果如图8a所示。由图8a可见,随着固含量的增加,PI凝胶磨具的压缩强度和硬度逐渐增大。固含量为17%时,PI凝胶磨具的压缩强度和硬度分别为6.97 MPa和85 HC;固含量增加到21%后,压缩强度和硬度增加到15.52 MPa和96 HC,分别提升了122.7%和12.94%。这是因为随着固含量的增加,PI凝胶磨具内部的网络骨架变得粗壮,网络密度增加同时气孔率下降,有效增强了PI凝胶磨具抵抗外力引发的变形的能力。图8b为不同固含量的PI凝胶磨具的压缩应力-应变曲线。由图8b可见,PI凝胶磨具在压缩过程中分为3个阶段,第一阶段的应力



(a) Curves of compressive strength and hardness



(b) Stress-strain curves

图8 固含量17%~21%的PI凝胶磨具的力学性能

Fig. 8 Mechanical properties of PI gel abrasives with solid content of 17%~21%

和应变呈线性关系,随着应变的增加,应力线性增大,这个阶段主要是PI凝胶磨具的多孔结构骨架的破坏。第二阶段的应力随着应变的增加变化不大,该阶段曲线几乎与横坐标轴持平,这个阶段主要是PI凝胶磨具内部孔洞被压缩的过程,所需压力不大。第三阶段的应力随着应变的增加大幅直线增大,这是由于PI凝胶磨具的孔洞均被压缩消失,被破坏的骨架结构直接相互挤压,导致所需应力大幅增加。

2.7 TG测试

对不同固含量的PI凝胶磨具进行热性能测试,其均表现出优异的热稳性,如图9所示。由图9可见,不同固含量的PI凝胶磨具样品在25~100℃内有一个轻微的失重台阶,这是样品内吸附水的去除。之后,曲线在500℃内失重较为平缓,均表现出优异的热稳定性。固含量17%~19%的PI凝胶磨具的初始分解温度为536℃,固含量20%~21%的PI凝胶磨具的初始分解温度为538℃,二者仅2℃之差,这是由于PI凝胶磨具的初始分解温度取决于PI凝胶磨具内部化学结构的C—N键的断裂,而固含量对PI凝胶磨具的热稳定性影响不大。

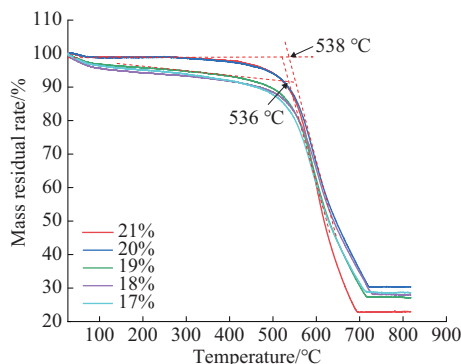


图9 固含量17%~21%的PI凝胶磨具的TG曲线

Fig. 9 TG curves of PI gel abrasives with solid content of 17%~21%

2.8 磨削性能

选用固含量为17%,19%,21%三个具有代表性的PI凝胶磨具对SiC进行磨削测试,其加工表面质量如图10所示。由图10可见,SiC初始表面粗糙度Ra为753 nm,经固含量17%的PI凝胶磨具加工后其表面粗糙度降至94 nm,经固含量19%的PI凝胶磨具加工后其表面粗糙度降至69 nm,经固含量21%的PI凝胶磨具加工后其表面粗糙度降至78 nm,SiC表面粗糙度呈现先降低后升高的趋势。

图11为固含量17%,19%,21%的PI凝胶磨具的内部结构图。从图11a1可以看出,固含量17%的

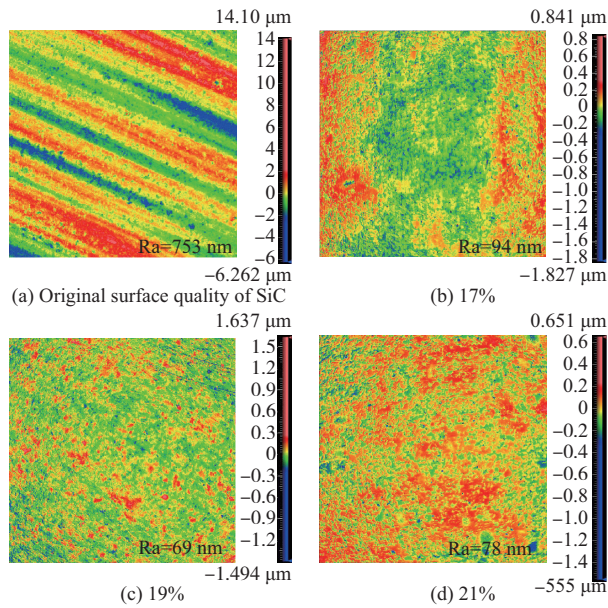


图10 固含量17%,19%,21%的PI凝胶磨具磨削SiC的表面粗糙度
Fig. 10 Surface roughness of SiC grinding with PI gel abrasives with solid content of 17%, 19% and 21%

PI凝胶磨具内部孔壁较薄,断口尖锐且杂乱。从图11a3中可以看出,固含量17%的PI凝胶磨具对金刚石的包覆仅为薄薄一层甚至未完全包覆。这使得其对金刚石的把持力不足导致磨料在磨削过程中过早脱落,磨屑占据孔隙,堵塞磨具,导致磨削质量下降。从图11b1和图11c1能够看出,固含量19%

与21%的PI凝胶磨具断口相对平整,薄孔壁数量减少,孔壁厚度增加。但在图11c2中可以发现,固含量21%的PI凝胶磨具内部的金刚石有轻微团聚的现象,这是由于在冷冻过程中,PI相的增多导致体系中水相的降低,也就是气孔率降低,在冷冻过程中水相和干燥过程中PI相的双重挤压下,金刚石磨料分布空间减少,所以出现微团聚现象。这会导致在磨削过程中金刚石的不规则脱落与磨具的部分堵塞,导致磨削质量的降低。

图12为磨削测试后磨具的数码照片与表面超景深图像。由图12可见,固含量17%的PI凝胶磨具表面几乎完全变黑被磨屑覆盖,且气孔完全坍塌。这是因为固含量17%的PI凝胶磨具的网络骨架强度较低且对金刚石把持力不足,导致其在磨削过程中金刚石提前脱落,无法对SiC形成有效磨削,导致磨屑堆积,随着磨削的进行,磨具所受到的法向力增大从而导致表面气孔坍塌。固含量19%的PI凝胶磨具表面几乎不存在磨屑且气孔并无坍塌。这是因为固含量19%的PI凝胶磨具强度适中且内部组织较为均匀,在磨削过程中,金刚石磨钝后能够与PI骨架同时脱落漏出新的金刚石磨粒,自锐性较好。因此在磨削测试后,获得较好的表面质量且仍保留大量气孔。固含量21%的PI凝胶磨具表面存在部分磨屑和少量气孔。这是因为固含量21%

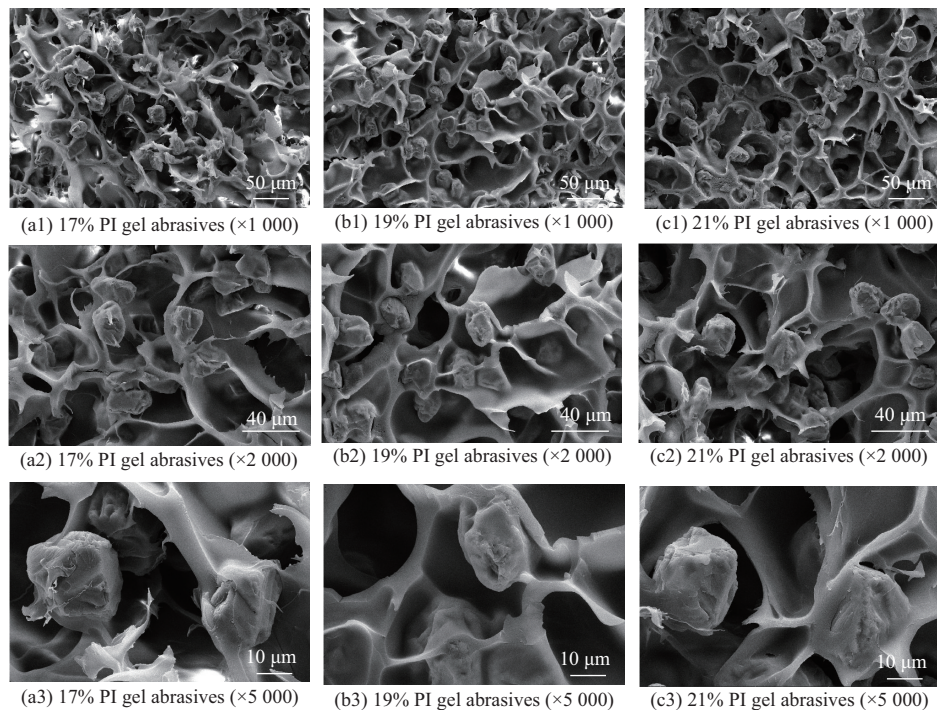


图11 固含量17%,19%,21%的PI凝胶磨具的内部结构图

Fig. 11 Internal structure diagram of PI gel abrasives with solid content of 17%, 19% and 21%

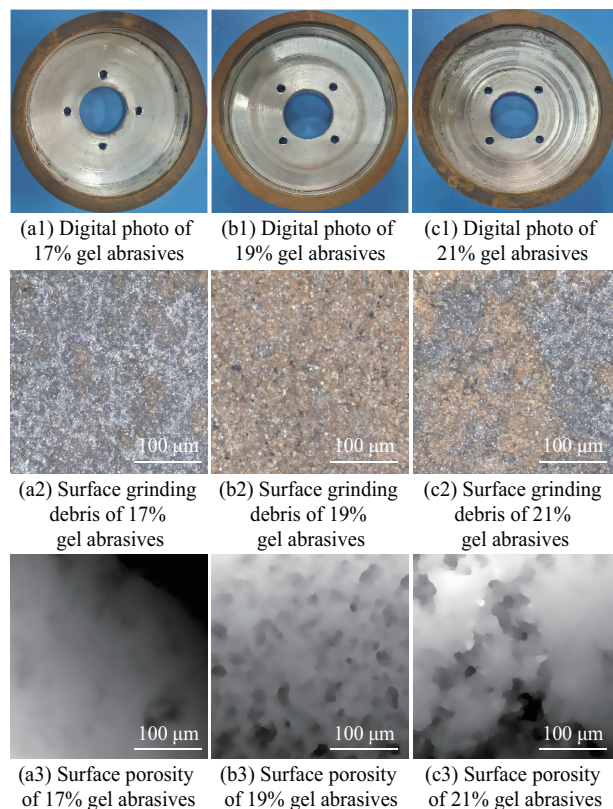


图12 固含量17%,19%,21%的PI凝胶磨具的数码照片与表面超景深图像

Fig. 12 Digital photos and surface super depth of field images of PI gel abrasives with solid content of 17%, 19% and 21%

的PI凝胶磨具孔壁厚度较大,孔隙率偏低,导致金刚石磨料微团聚,在磨削过程中,金刚石分布较少的部分往往先被磨屑占据导致磨削表面不均匀。

3 结论

(1)通过TEA改性PAA成功制备出水溶性PAAs,并通过冷冻干燥法及100 °C/1 h,200 °C/1 h,250 °C/1 h的升温工艺成功制备出新型的PI凝胶磨具。

(2)固含量对PI凝胶磨具的性能影响显著。随着固含量的增加,PI凝胶磨具的孔隙率降低,孔壁厚度增加,孔隙直径减小,压缩强度与硬度逐渐增大。

(3)固含量对PI凝胶磨具的耐热性能影响不明显。不同固含量的PI凝胶磨具均具有优异的热稳定性。

(4)适当的固含量对PI凝胶磨具的磨削性能至关重要。固含量低,孔壁较薄,对金刚石磨料的把持力不足,导致金刚石磨料提早脱落,造成磨具堵塞。固含量高,磨具孔壁厚度增大,孔隙率降低,导致金刚石磨料部分团聚,使得磨具内部结构不均匀,导致磨削质量下降。

参考文献

- [1] 卢守相,郭塞,张建秋,等.高性能难加工材料可磨削性研究进展[J].表面技术,2022,51(3):12-42.
LU Shouxiang, GUO Sai, ZHANG Jianqiu, et al. Grindability of high performance difficult-to-machine materials[J]. Surface Technology, 2022, 51(3):12-42.
- [2] ZENG Y B, ZHANG J, ZHOU H, et al. A new processing technique for fabrication of ultra-thin wafer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1 287-1 298.
- [3] 周仁宸,王哲,杨远航,等.超精密晶圆减薄砂轮及减薄磨削装备研究进展[J].表面技术,2024,53(3):1-21,220.
ZHOU Renchen, WANG Zhe, YANG Yuanhang, et al. Research progress on grinding wheels and equipment for ultra precision wafer thinning[J]. Surface Technology, 2024, 53(3):1-21, 220.
- [4] HO J K, HUANG C Y, TSAI M Y, et al. Investigation of polishing pads impregnated with Fe and Al_2O_3 particles for single-crystal silicon carbide wafers[J]. Applied Sciences, 2016, 6(3). DOI: 10.3390/app6030089.
- [5] TSAI M Y, LI K Y, JI S Y. Novel abrasive-impregnated pads and diamond plates for the grinding and lapping of single-crystal silicon carbide wafers[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4). DOI: 10.3390/app11041783.
- [6] ZHANG X D, YANG C L, ZHANG Y M, et al. Sub-surface damage of ultra-thin monocrystalline silicon wafer induced by dry polishing[J]. Electronic Materials Letters, 2020, 16(4):355-362.
- [7] WU K, ZHOU L B, ONUKI T, et al. Study on the finishing capability and abrasives-sapphire interaction in dry chemo-mechanical-grinding (CMG) process[J]. Precision Engineering, 2018, 52: 451-457.
- [8] 铁生年,李星.超细粉体表面改性研究进展[J].青海大学学报(自然科学版),2010,28(2):16-21.
TIE Shengnian, LI Xing. Research progress of surface modification of ultra-fine powder[J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2010, 28(2):16-21.
- [9] 冯凯萍,吕冰海,朱国旗,等. PVA/PF复合凝胶磨具精密磨削碳化硅陶瓷工艺实验研究[J].表面技术,2022,51(2):347-357.
FENG Kaiping, LYU Binghai, ZHU Guoqi, et al. Study on precision grinding of SiC ceramic by PVA/PF composite Sol-gel grinding abrasive tool[J]. Surface Technology, 2022, 51(2):347-357.
- [10] WU Z, ZHU Y F, CHEN J P, et al. Machining of single-crystal sapphire with polysaccharide-bonded abrasive tool[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(3):360-369.
- [11] YU Y Q, HU Z W, WANG W S, et al. The double-side lapping of SiC wafers with semifixed abrasives and resin-combined plates[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(4):997-1 006.

- [12] LI C D, ZHANG G H, LIN L L, et al. Silica aerogels: From materials research to industrial applications[J]. *International Materials Reviews*, 2023, 68(7):862–900.
- [13] SONU S S, RAI N, CHAUHAN I. Multifunctional aerogels: A comprehensive review on types, synthesis and applications of aerogels[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2023, 105(2):324–336.
- [14] LI Q Y, RAZZAQUE S, JIN S B, et al. Morphology design of microporous organic polymers and their potential applications: An overview[J]. *Science China Chemistry*, 2017, 60(8):1 056–1 066.
- [15] 王柏霖, 王子青, 余文涛, 等. 聚酰亚胺气凝胶的制备及其隔热性能研究[J]. *功能材料*, 2025(7):7 029–7 034.
WANG BoLin, WANG Ziqing, YU Wentao, et al. Preparation and thermal insulation properties of polyimide aerogels[J]. *Journal of Functional Materials*, 2025(7):7 029–7 034.
- [16] MEADOR M A B, ALEMÁN C R, HANSON K, et al. Polyimide aerogels with amide cross-links: A low cost alternative for mechanically strong polymer aerogels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(2):1 240–1 249.
- [17] 肖泳霜, 林家辉, 李同兵, 等. 聚酰亚胺基阻燃相变材料研究进展[J]. *现代塑料加工应用*, 2024, 36(5):18–21.
XIAO Yongshuang, LIN Jiahui, LI Tongbing, et al. Research progress of polyimide-based flame retardant phase change materials [J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2024, 36(5): 18–21.
- [18] 王子扬, 杨雪, 刘玮, 等. 纳米纤维素/聚酰亚胺气凝胶制备与性能研究[J]. *功能材料*, 2022, 53(8):8 116–8 121.
WANG Ziyang, YANG Xue, LIU Wei, et al. Preparation and properties of nano-cellulose/polyimide aerogels[J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, 53(8):8 116–8 121.
- [19] GU W H, WANG G H, ZHOU M, et al. Polyimide-based foams: Fabrication and multifunctional applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(43):48 246–48 258.
- [20] LI M M, CHEN X, LI X T, et al. Wearable and robust polyimide hydrogel fiber textiles for strain sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36):43 323–43 332.
- [21] 朱明月, 王梁, 姜雨, 等. 聚酰亚胺气凝胶及其复合材料的研究进展[J]. *化学研究*, 2022, 33(5):396–406.
ZHU Mingyue, WANG Liang, JIANG Yu, et al. Research progress on polyimide aerogels and their composites[J]. *Chemical Research*, 2022, 33(5):396–406.
- [22] 陈招. 水凝胶法制备聚酰亚胺多孔材料及性能调控[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
CHEN Zhao. Preparation and performance regulation of polyimide porous materials by hydrogel method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.