

氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的制备与性能

苏立伟¹, 陈传东², 王 哲¹, 苏天宇¹, 潘高飞^{1*}

(1. 内蒙古科技大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014030)

摘 要:通过预聚体法制备了聚氨酯硬质泡沫,并与不同粒径的氧化铈复合,制备了氧化铈/聚氨酯硬质泡沫复合材料,并探究了氧化铈粒径对氧化铈基聚氨酯硬质泡沫复合材料性能的影响。当聚氨酯硬质泡沫中氧化铈的质量分数为16%时,随着氧化铈粒径的降低,复合材料的热稳定性和硬度呈现增大的趋势。纳米氧化铈改性的聚氨酯硬泡具有较好的耐磨性,孔隙率为48.7%。为了验证复合材料的应用性能,将其应用于液晶玻璃的抛光实践中,配合1 μm 氧化铈抛光液进行上机测试,结果表明含5 μm 氧化铈的聚氨酯硬泡复合材料抛光效率最高,但容易出现划伤,含1 μm 氧化铈的聚氨酯硬泡复合材料抛光效率适中且良率为80%左右。这些数据保证了氧化铈基聚氨酯硬泡复合材料在抛光中的应用。

关键词:聚氨酯;硬质泡沫;纳米氧化铈;预聚体法;复合材料

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2026)02-0068-10

随着高世代液晶显示器、芯片、集成电路的迅速发展,抛光作为这些器件表面平坦化的必要环节,引起了人们的广泛重视。对于化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP)用材料细分占比,抛光液和抛光垫是最核心的材料,价值量占比分别为49%和33%^[1]。虽然抛光消耗的成本占比约为7%,但却是液晶显示器、晶圆、半导体生产过程中重复次数最多的步骤,抛光垫的寿命也极低,通常为45小时至75小时,属于易耗品。抛光垫也被称为抛光片或抛光皮,是抛光粉和抛光液的载

体,尤为重要^[2,3]。常见的抛光垫是由聚氨酯硬泡和磨料形成的复合材料,具有强度高、耐磨性能好、硬度可调、弹性好等优点、同时具有特有的液体存储功能的微孔结构特点^[4,5]。在高世代液晶显示器、蓝宝石、芯片、集成电路等的抛光中得到了广泛应用,能够加快机械磨削和化学腐蚀作用,提高抛光效率和质量^[6-9],与其他抛光垫材料相比,具有一定的优越性。但是目前用于抛光的聚氨酯抛光垫依然存在磨削寿命低和热稳定性差的问题,长时间的抛光摩擦会使聚氨酯硬泡材料发生软化塌边,造

收稿日期:2023-07-12

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0028);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT23004);内蒙古自治区科技计划项目(2022YFHH0117)

作者简介:苏立伟(2000-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事功能聚氨酯材料相关研究,E-mail:suliwei2000@163.com

*通信作者:潘高飞,副教授,E-mail:2019962@imust.edu.cn

DOI:10.3724/S1004-0277.202602008

成抛光效率的降低^[10,11]。因此,通过改变材料的结构提升聚氨酯硬泡复合材料在抛光领域的应用性能具有重要意义。从材料合成的角度出发,可以提升其性能的方法主要包括:提升聚氨酯硬泡的性能;改变填料的形貌和尺寸;设计复合材料的界面。目前可用于抛光垫复合材料填料包括氧化铁、氧化铈、氧化铝、碳化硅等,相对于其他磨料,氧化铈具有以下优点:(1)其主要晶型为面心立方晶体,颗粒成多边形,棱角明显,有效比表面积大;(2)莫氏硬度约为7,接近玻璃的硬度,抛光过程中对材料表面的划痕较小,抛光后的玻璃具有良好的光泽;(3)CeO₂在碱性抛光条件下呈两性,能同时吸附阴、阳离子,获得较好的抛光效果。因此,探究氧化铈改性聚氨酯硬泡的性能对于提升抛光垫的品质具有重要意义。

本研究在已有的工作基础上,优选了甲苯二异氰酸酯、聚醚多元醇 N220、1,4-丁二醇、4,4'-亚甲基二(2-氯苯胺)以及必要的助剂,通过预聚体法制备了氧化铈/聚氨酯硬质泡沫复合材料,并通过对氧化铈粒径的控制,制备了一系列氧化铈/聚氨酯硬质泡沫复合材料,并探究了氧化铈粒径对氧化铈基聚氨酯硬质泡沫复合材料性能的影响规律。利用热重分析仪、场发射扫描电子显微镜、万能试验机等对聚氨酯硬泡复合材料的热性能、泡孔结构以及力学性能进行了研究。结果表明,当聚氨酯硬质泡沫中氧化铈的质量分数为16%时,随着氧化铈粒径的依次降低,即5 μm、1 μm、400 nm,复合材料的热稳定性和硬度呈现增大的趋势,复合材料的拉伸强度在添加微米级的氧化铈时基本不变,加入纳米氧化铈后具有明显的增大。纳米氧化铈改性的聚氨酯硬泡的磨耗量为1.8 cm³(1.61 km)⁻¹,孔隙率为48.7%,这些数据保证了氧化铈基聚氨酯硬泡在抛光垫中的应用。为了验证所合成的氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的应用性能,分别制备了800 mm×2 mm尺寸的样品,应用于液晶玻璃的抛光,配合1 μm氧化铈抛光液进行上机测试,结果表明,含5 μm氧化铈的聚氨酯硬泡复合材料抛光效率最高,但容易出现划伤,含1 μm氧化铈的聚氨酯硬泡

复合材料抛光效率适中且良率为80%左右。这些数据保证了氧化铈基聚氨酯硬泡在抛光垫中的应用。

1 材料和方法

1.1 实验原料

氧化铈(5 μm, 1 μm, 400 nm),包头中科雨航抛光材料有限公司;聚醚多元醇,N220,羟值105 mg KOH/g~119 mg KOH/g,酸值低于0.15,广东佳塑化学试剂有限公司;二异氰酸酯(TDI),98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;1,4-丁二醇(BDO),98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;二月桂酸二丁基锡(DBTDL),98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;硅醚泡孔稳定剂,广东佳塑化学试剂有限公司;4,4'-亚甲基二(2-氯苯胺)(MOCA),98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 实验设备

鼓风干燥箱,101-ZBS,邦西仪器科技(上海)有限公司;哑铃型制样机,MZ-2062,江苏明珠试验机械有限公司;磁力恒温搅拌器,MS-H380-Pro,北京大龙兴创实验仪器有限公司;动态热分析仪,DMA8000,美国PERKINELMER公司;电子分析天平,BSA124S-CW,赛多利斯科学仪器有限公司。电子万能试验机,ZQ-990LA,东莞智取精密仪器有限公司;高分辨率X射线显微镜(XRM),ZEISS versa610;阿克隆耐磨试验机,RW-7813A,东莞锐雯仪器有限公司;液晶屏玻璃单面抛光机,作台尺寸800 mm,日本SpeedFam Company Limited。

1.3 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料制备

按照表1配比向聚醚多元醇N220中加入甲苯二异氰酸酯(TDI)、1,4-丁二醇(BDO)、二月桂酸二丁基锡、有机硅泡孔稳定剂,搅拌5 min左右,使其充分混合均匀,真空脱泡15分钟,将混合物置于油浴中,恒温80℃,反应40 min,得到预聚体。然后向预聚体中加入磨料氧化铈、扩链剂4,4'-亚甲基二(2-氯苯胺)(MOCA)、和发泡剂水的混合物,搅拌均匀后,迅速倒入到模具中,80℃熟化12 h后,切片,进行性能测试。

表 1 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料配方表
Table 1 Formulation of cerium oxide/polyurethane rigid foam composites

Samples	CeO ₂ particle size	Content/(% (Mass fraction))
RPUF	—	—
CeO1/RPUF	5 μm	16
CeO2/RPUF	1 μm	16
CeO3/RPUF	400 nm	16

2 结果与分析

聚氨酯硬质泡沫是由硬段与软段形成的嵌段

共聚物,通过调控硬段和软段的含量可以得到性能优异的聚氨酯硬泡基体。本工作优选甲苯二异氰酸酯作为硬段,聚醚多元醇 N220 作为软段,二月桂酸二丁基锡作为催化剂制备预聚体,完成预聚体的制备后,加入磨料氧化铈、1,4-丁二醇、固化剂甲基二(2-氯苯胺) (MOCA) 和发泡剂水的混合物得到氧化铈基聚氨酯硬泡复合材料(图 1)。其中,纯聚氨酯硬泡命名为 RPUF,其他样品依次为 CeO1/RPUF, CeO2/RPUF, CeO3/RPUF(表 1),为了验证合成材料的结构和性能,本文进行了一系列的测试和分析。

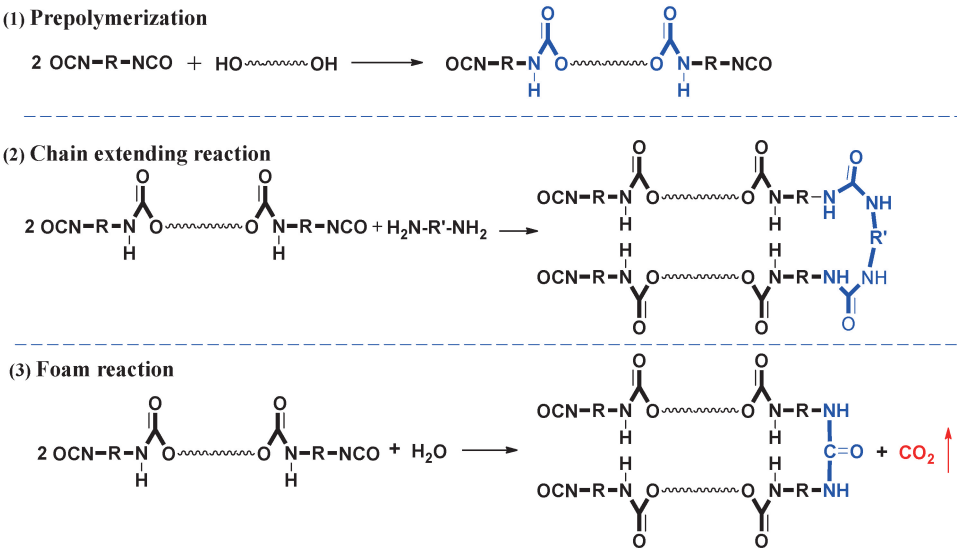


图 1 聚氨酯硬泡的合成原理
Fig. 1 Synthesis mechanism of polyurethane rigid foam

2.1 傅里叶红外光谱

从 FTIR 图(图 2a)中可以看出,1727 cm⁻¹ 和 1652 cm⁻¹ 处的特征吸收峰分别对应于氨基甲酸酯键和缩二脲键中的羰基,1601 cm⁻¹ 和 1088 cm⁻¹ 处的特征吸收峰分别对应于聚氨酯基体中的亚胺键和酯键^[12,13],且所有样品在 2270 cm⁻¹ 处均无明显的一NCO 吸收峰,证明 RPUF 反应良好,掺杂不同粒径的氧化铈颗粒不会影响聚氨酯基体的反应。此外,CeO1/RPUF、CeO2/RPUF 和 CeO3/RPUF 样品在 1011 cm⁻¹ 和 767 cm⁻¹ 处具有明显的 CeO₂ 特征峰^[14]。

2.2 热重分析

氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的热分解产物主要包括两部分:一是聚氨酯基体受热碳化产生的残碳,二是氧化铈颗粒(表 2)。如图 2b,从 TGA 图中可以看出,未添加氧化铈的聚氨酯样品在氮气气氛、700 ℃ 的热失重测试中残余率为 1.8%,而添加同等含量、不同粒径氧化铈的复合材料中,残余率分别为 16.8%、19.6%和 20.7%。随着氧化铈粒径的减小,热重残余率逐渐提升,这主要由于在相同的制备工艺下,粒径更小的氧化铈颗粒与聚氨酯基体相容性更好,在发泡过程中可以随着聚氨酯泡沫

的膨胀均匀分散,有效避免了沉积现象。因此,1 μm 和 400 nm 的氧化铈颗粒具有更好的掺杂效果,有利于提升复合材料的抛光性能。如图 2c,DTG 图抛光垫主要有两个热失重峰,第一阶段在 200 $^{\circ}\text{C}$ ~ 380 $^{\circ}\text{C}$,主要是聚氨酯硬段部分的热分解,生成异氰酸酯、醇类等物质;第二阶段在 385 $^{\circ}\text{C}$ ~ 470 $^{\circ}\text{C}$,主要是剩余聚氨酯链软段部分的碳化^[15,16]。添加氧化铈后,加速了材料的热失重过程,其中,CeO1/RPUF 样品添加 5 μm 的氧化铈颗粒后,由于掺杂不均匀,使得聚氨酯基体的软硬段热分解过程略微有所提前,热失重峰值变化不大。在添加 1 μm 氧化铈颗粒的 CeO2/RPUF 样品中,由于氧化铈粒径较小,掺杂更为均匀,但聚氨酯基体的软段

部分难以包覆氧化铈颗粒,使其主要集中于硬段区域内,极大促进了聚氨酯硬段部分的热分解过程,因此材料第一阶段的热失重峰的峰值和积分面积提升较大,而对软段部分的热分解影响稍弱。在添加 400 nm 氧化铈颗粒的 CeO3/RPUF 样品中,纳米尺寸的氧化铈可均匀分布在聚氨酯的两相结构中,同时,纳米氧化铈的催化能力进一步加速了材料基体的热分解,使得第一阶段热分解提前,第二阶段热分解加剧^[17~19]。综上所述,氧化铈颗粒的加入能加速复合材料的热分解过程,且颗粒粒径越小,对聚氨酯基体的热分解影响越大,但在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下所有样品均未出现热分解过程,说明添加不同粒径的氧化铈颗粒不会影响材料使用过程中的结构稳定性。

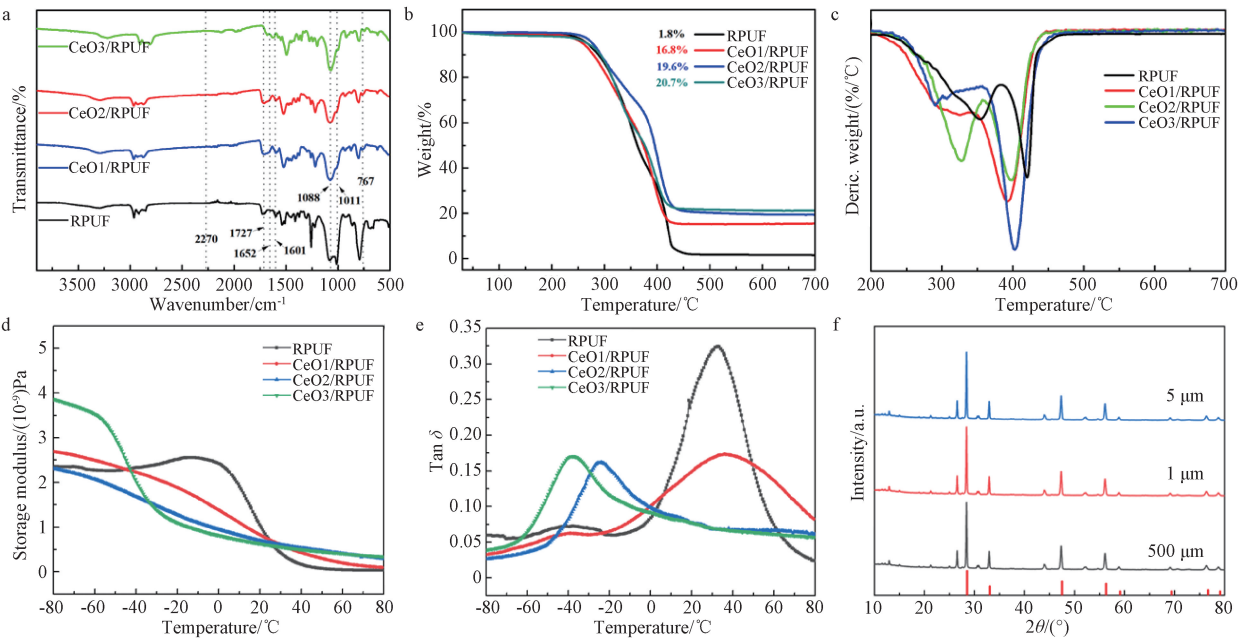


图 2 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料在 4000 cm^{-1} ~ 500 cm^{-1} 范围内的 FTIR 图 (a); 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的 TGA 图 (b); 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的 DTG 图 (c); 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的储能模量图 (d); 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的 $\text{Tan } \delta$ 图 (e); 不同粒径氧化铈颗粒的 XRD 图 (f)

Fig. 2 FT-IR spectra of CeO_2/RPUF composites in the range of 4000 cm^{-1} ~ 500 cm^{-1} (a); TGA curves of CeO_2/RPUF composites (b); DTG curves of CeO_2/RPUF composites (c); Storage modulus curves of CeO_2/RPUF composites (d); $\text{Tan } \delta$ curves of CeO_2/RPUF composites (e); XRD patterns of different particle sizes of CeO_2 (f)

2.3 动态热机械分析 (DMA)

从图 2e 中可以看出,RPUF 样品的玻璃化转变

温度为 32.8 $^{\circ}\text{C}$,而样品 CeO1/RPUF、CeO2/RPUF 和 CeO3/RPUF 的玻璃化转变温度分别为 37.05 $^{\circ}\text{C}$ 、

-25.6 ℃和-37.5 ℃。可以看到随着添加氧化铈粒径的减小,复合材料的玻璃化转变温度逐渐降低,CeO1/RPUF 样品中由于氧化铈颗粒较大,难以均匀分布,因此,其玻璃化转变温度相较于 RPUF 差别不大,纳米尺寸的氧化铈颗粒更利于均匀分散在聚氨酯的软段结构中,大幅降低了材料的玻璃化转变温

度,使得 CeO2/RPUF 和 CeO3/RPUF 样品在常温下获得更好的柔韧性^[20]。由于聚氨酯软段结构的玻璃化转变,如图 2d,RPUF 的储能模量从-12 ℃左右开始急速下降,材料转变为弹性,添加氧化铈颗粒后,弹性转变提前,这使抛光垫具备更好的韧性和弹性,有助于延长其使用寿命^[21]。

表 2 不同粒径氧化铈掺杂时 CeO₂/RPUF 复合材料的热重分析数据

Table 2 Thermogravimetric analysis data of CeO₂/RPUF composites with different sizes of CeO₂

Different size of CeO ₂ /%	<i>T</i> _{1max} /℃	<i>T</i> _{2max} /℃	<i>W</i> ₁ /%	<i>W</i> ₂ /%	<i>W</i> ₃ /%
(Mass fraction)			(Mass fraction)	(Mass fraction)	(Mass fraction)
0	350	420	40.8	85.8	98.2
5 μm	323	393	27.2	65.0	83.2
1 μm	328	398	28.0	64.5	80.4
400 nm	291	403	9.3	57.8	79.3

Notes: *T*_{1max} and *T*_{2max} are the maximum decomposition temperature in the first and second stage; *W*₁ and *W*₂ are the mass loss fraction in the first and second stage; *W*₃ is the total mass loss fraction.

2.4 氧化铈粉末衍射(XRD)分析

本文对不同粒径的氧化铈进行了 XRD 分析,通过对比 CeO₂ 的标准图谱(#PDF 34-0394),2θ 在 28.26°、32.96°、47.3°、56.12°处的衍射峰分别对应于氧化铈的(111)、(200)、(220)、(311)晶面。如图 2f,从三种不同粒径的 XRD 图中可以看出,随着氧化铈颗粒粒径的减小,相关衍射峰没有表现出明显的区别^[22~24]。

2.5 扫描电子显微镜(SEM)分析

聚氨酯硬泡孔均匀程度、闭孔率以及氧化铈粉体在聚氨酯硬泡中的分散情况对于复合材料使用中的抛光性能具有重要意义。其中,泡孔的均匀性可以保证在抛光过程中抛光液在抛光垫表面的均匀分散,而闭孔率则有利于抛光液在抛光过程中的存储。氧化铈粉体的良好分散可以避免团聚造成抛光表面的划伤。本工作通过扫描电子显微镜对样品的切面进行了表征。如图 3a 至图 3d,比例尺为 500 μm 的图片可以观察泡孔情况,50 μm 的图

片可以观察到粉体在聚氨酯基体中的分散情况,如图 3e 至图 3h。由 CeO1/RPUF 和 CeO2/RPUF 抛光面的 SEM 图可以看出,添加 400 nm 和 1 μm 氧化铈颗粒的聚氨酯硬泡比添加 5 μm 氧化铈颗粒的抛光垫的泡孔结构更加规整,这主要是由于 5 μm 的氧化铈颗粒粒径较大且晶型不够规整,在发泡初期极易破坏成核中心,且 5 μm 的氧化铈颗粒在聚氨酯基体中分散较差,使得材料发泡过程中泡沫的表面张力不均匀,易发生并泡现象^[25]。致密的泡孔结构有利于提升材料的硬度,且在抛光过程中与抛光液接触更为均匀,可提升材料的抛光效率^[26,27]。

2.6 高分辨率 X 射线显微镜

泡孔结构和孔隙率对于聚氨酯硬泡在抛光中的应用非常重要,为了进一步探究合成的氧化铈基聚氨酯硬泡复合材料的泡孔结构,通过高分辨 X 射线显微镜对合成材料的内部泡孔结构和孔隙率进行了分析,如图 4 所示。结果与扫描电子显微镜结果基本吻合,尽管都存在少数大孔的情况,但整体

呈现的趋势是随着填充颗粒粒径的减小,泡孔结构明显呈现减小和稳定的趋势,且孔隙率也由 66.3%

降低到 48.7%,表明纳米粒子可以明显增加泡孔的成核性,有助于泡孔的稳定。

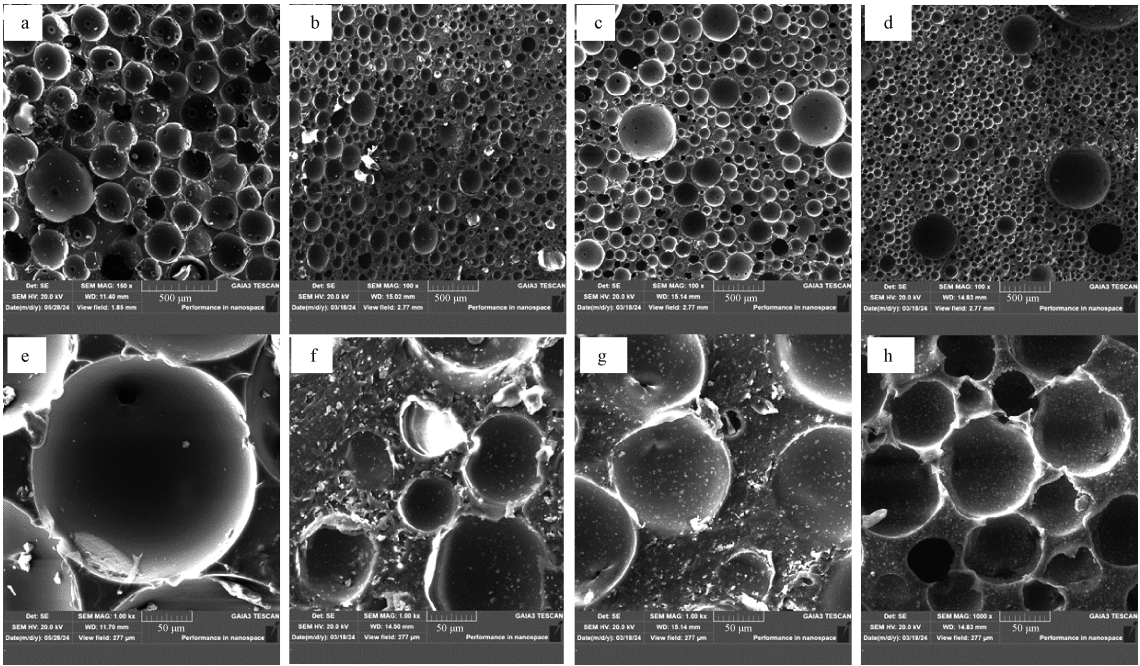


图 3 样品 RPUF 的 SEM 图(a, e); 样品 CeO1/RPUF 的 SEM 图(b, f); 样品 CeO2/RPUF 的 SEM 图(c, g); 样品 CeO3/RPUF 的 SEM 图(d, h)

Fig. 3 SEM images of RPUF samples(a, e); SEM images of CeO1/RPUF samples(b, f); SEM images of CeO2/RPUF samples(c, g); SEM images of CeO3/RPUF samples(d, h)

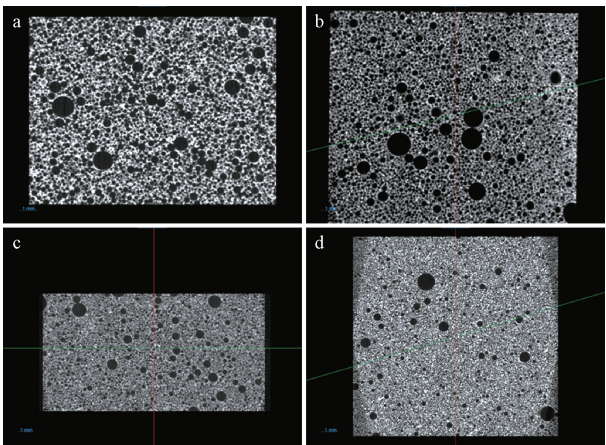


图 4 样品 RPUF (a)、CeO1/RPUF (b)、CeO2/RPUF (c)、CeO3/RPUF (d) 的高分辨率 X 射线显微镜图

Fig. 4 High-resolution X-ray microscopy images of samples RPUF (a), CeO1/RPUF (b), CeO2/RPUF (c), CeO3/RPUF (d)

2.7 力学性能分析

从几种样品的拉伸曲线(图 5)可以看出,在不添加氧化铈的样品 RPUF 中,得益于聚氨酯泡沫中软段部分的柔性和硬段部分的刚性,材料的形变可达 100.7%,随着不同粒径氧化铈颗粒的加入,材料刚性都有所增加,抗拉强度大幅提升。在 CeO1/RPUF 样品中,5 μm 的氧化铈颗粒由于分散不均,团聚现象严重,易造成应力集中,使得材料的抗拉强度相较于 CeO2/RPUF 和 CeO3/RPUF 下降明显^[28~32]。而在添加 1 μm 和 400 nm 氧化铈颗粒中,由于填料在基体中分散均匀,极大增加了材料的刚性,并且 400 nm 氧化铈颗粒的纳米补强作用更为明显,因此上述样品中, CeO3/RPUF 样品具备 6.96 MPa 的最大抗拉强度和 48.1% 的形变能力,提升了材料在抛光过程中的稳定性。

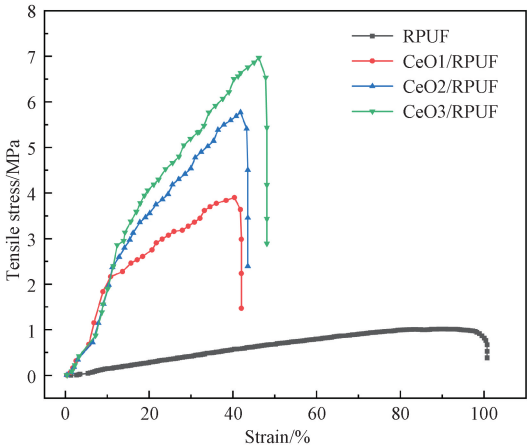


图 5 氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的应力-应变图
Fig. 5 Stress-strain image of CeO₂/RPUF composites

耐磨性是抛光垫的重要指标,本文通过阿克隆耐磨实验机对抛光垫的耐磨性进行了研究。从表 3 可以看出,随着氧化铈的加入,聚氨酯硬泡的耐磨性明显变差,这主要是因为抛光粉氧化铈的加入,

增加了聚氨酯硬泡表面的粗糙度,测试中与砂轮的摩擦损耗比较大。随着氧化铈颗粒粒径的减小,磨损量呈现先增大后减小的趋势,表明纳米填料的加入有助于改善聚氨酯硬泡的耐磨性。

2.8 抛光性能测试

为了进一步验证所合成的氧化铈/聚氨酯硬泡复合材料的应用性能,分别制备了氧化铈粒径为 5 μm 和 1 μm、尺寸为 800 mm×2 mm 的样品,应用于日本创技生产的液晶屏玻璃单面抛光机,作台尺寸 800 mm,配合 1 μm 氧化铈抛光液进行上机测试,主要关注切削率和良率两个指标,切削率通过游标卡尺进行测试,达到 10 μm 即为合格,良率通过抽样检测法获得。结果表明,含 5 μm 氧化铈的聚氨酯硬泡复合材料抛光效率最高,但容易出现划伤,含 1 μm 氧化铈的聚氨酯硬泡复合材料抛光效率适中且良率为 80% 左右。考虑到氧化铈磨料的市场价格,添加 1 μm 氧化铈的样品 CeO₂/RPUF 更适用于市场需求。

表 3 CeO₂/RPUF 复合材料的力学性能和抛光性能数据
Table 3 Mechanical and polishing properties analysis data of CeO₂/RPUF composites

Samples	Density/ (kg · m ⁻³)	Shore/ A	Tensile strength/ MPa	Abrasion/cm ³ (1. 61 km) ⁻¹	Porosity/ %
RPUF	0. 37	78	1. 01	0. 57	66. 3
CeO1/RPUF	0. 42	80	3. 89	1. 72	55. 0
CeO2/RPUF	0. 46	82	5. 77	1. 86	51. 2
CeO3/RPUF	0. 46	82	6. 96	1. 80	48. 7

3 结论

1. 添加同等含量、不同粒径的氧化铈颗粒均不会影响聚氨酯基体的反应进程,其中,添加 400 nm 氧化铈颗粒初始热分解温度为 200 ℃,保证了复合材料在抛光过程中的结构稳定性。
2. 更小粒径的氧化铈颗粒晶型更加规整,可均匀分散于聚氨酯基体中,极大地增加了材料的抗拉强度,且对发泡过程影响较小,使得抛光垫的泡孔

结构更为致密,有效提升了硬度和抛光效率。

3.1 μm 氧化铈掺杂的同款复合材料抛光效率表现良好,同时结合市场情况考量,添加 1 μm 氧化铈的 CeO₂/RPUF 样品,更契合市场应用的核心需求,具有良好的市场前景。

致谢

感谢内蒙古自治区科技重大专项、内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目、内蒙古自治区科技计划项目的支持。

参考文献:

- [1] 王也, 张保国, 吴鹏飞, 等. 用于光学玻璃 CMP 的高效稀土抛光液研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(5): 79-84.
- Wang Y, Zhang B G, Wu P F, et al. Research on high-efficiency rare earth polishing slurry for CMP of optical glass[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(5): 79-84.
- [2] 熊强, 蔡伟明, 路家斌, 等. 抛光垫表面微细结构对抛光性能的影响试验[J]. 中国表面工程, 2023, 36(2): 200-211.
- Xiong Q, Cai W M, Lu J B, et al. Experiment on the effect of polishing pad surface microstructure on polishing performance[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(2): 200-211.
- [3] 吴成, 李军, 侯天逸, 等. 抛光垫及抛光液对固结磨料抛光氧化镓晶体的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(6): 720-727.
- Wu C, Li J, Hou T Y, et al. Effect of pad and slurry on fixed abrasive polishing of gallium oxide crystal[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(6): 720-727.
- [4] 何雄刚. CaCO_3 /高岭土复合填料增强聚氨酯硬泡研究[J]. 热固性树脂, 2020, 35(5): 36-40.
- He X G. Research on the CaCO_3 /Kaolin composite filler reinforced PU rigid foam [J]. Thermosetting Resin, 2020, 35(5): 36-40.
- [5] 黄昊, 张红, 王宇飞, 等. 空心玻璃微珠/石膏涂层对 RPUF 燃烧性能的影响[J]. 四川建材, 2022, 48(12): 225-227.
- Huang H, Zhang H, Wang Y F, et al. Effect of hollow glass microspheres/gypsum coating on the combustion properties of RPUF [J]. Sichuan Building Materials, 2022, 48(12): 225-227.
- [6] Belkhir N, Bouzid D, Herold V. Morphological behavior and wear of polyurethane pads used in glass polishing process[J]. Precision Engineering, 2012, 36(4): 641-649.
- [7] Liao D F, Xie R Q, Hou J, et al. A polishing process for nonlinear optical crystal flats based on an annular polyurethane pad[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(22): 8552-8557.
- [8] Fujita T. Evaluation of correlation between chemical modification state of pad and polishing rate in oxide chemical mechanical planarization[J]. Thin Solid Films, 2020, 709: 138233.
- [9] Satake U, Matsui S, Enomoto T. Polishing pad for reducing edge roll-off while maintaining good global flatness of silicon wafer[J]. Precision Engineering, 2020, 66: 577-592.
- [10] 曹威, 邓朝晖, 李重阳, 等. 化学机械抛光垫的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 27-41.
- Cao W, Deng Z H, Li Z Y, et al. Polishing pad in chemical mechanical polishing[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 27-41.
- [11] 罗求发, 陆静, 林莹超, 等. 单层磨料凝胶抛光垫的加工性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 101-110.
- Luo Q F, Lu J, Lin Y C, et al. Study on the processing property of monolayer abrasive sol-gel polishing pad [J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 101-110.
- [12] Mozaffari Z, Nikje M M A, Peymani A. Synthesis and characterization of antibacterial polyurethane rigid foam nanocomposites by incorporation of tea tree oil as a natural biocide [J]. Materials Today Communications, 2022, 32: 104171.
- [13] 李鋆, 鲍俊杰. 硬段含量对非离子型水性聚氨酯氢键化作用的影响[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2021, 19(2): 54-60.
- Li J, Bao J J. Influence of hard segment content on hydrogen bonding interaction in nonionic waterborne polyurethane[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2021, 19(2): 54-60.
- [14] 田春慧, 王庆法, 张香文, 等. 高温溶液法制备 CeO_2 纳米晶体及其紫外吸收性能研究[J]. 稀土, 2014, 35(3): 1-5.
- Tian C H, Wang Q F, Zhang X W, et al. Syntheses of ceria nanocrystal by high temperature solution-phase method and investigation on its UV absorption property [J]. Chinese Rare Earths, 2014, 35(3): 1-5.
- [15] Glowacz-czerwinka D, Zakrzewska P, Oleksy M, et al. The influence of biowaste-based fillers on the mechani-

- cal and fire properties of rigid polyurethane foams[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 36: e00610.
- [16] Gu X H, Wang X Y, Guo X Y, et al. Study and characterization of regenerated hard foam prepared by polyol hydrolysis of waste polyurethane[J]. *Polymers*, 2023, 15(6): 1445.
- [17] Akkoyun S, Akkoyun M. Improvement of thermal conductivity of rigid polyurethane foams with aluminum nitride filler[J]. *Cellular Polymers*, 2021, 40(2): 87-98.
- [18] Kuźnia M, Magiera A, Zygmunt-Kowalska B, et al. Fly ash as an eco-friendly filler for rigid polyurethane foams modification[J]. *Materials*, 2021, 14(21): 6604.
- [19] Liu S H, Xie H, Cao Q M, et al. Preparation of a novel IPDI/PUF@ CeO₂ bi-functional microcapsules and its improvement for the self-healing and anti-corrosion performance in epoxy coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 169: 106897.
- [20] Cai G Y, Xiao S, Deng C M, et al. CeO₂ grafted carbon nanotube *via* polydopamine wrapping to enhance corrosion barrier of polyurethane coating[J]. *Corrosion Science*, 2021, 178: 109014.
- [21] Xu L, Chen H Y, Lü B H, et al. Study on rheological properties and polishing performance of viscoelastic material for dilatancy pad [J]. *Precision Engineering*, 2022, 77: 328-339.
- [22] Chen A L, Wang W Y, Ma X Y, et al. Ceria coated hexagonal mesoporous silica core-shell composite particle abrasives for improved chemical-mechanical planarization performance [J]. *Journal of Porous Materials*, 2019, 26(4): 1005-1015.
- [23] He Q. Experimental study on polishing performance of CeO₂ and nano-SiO₂ mixed abrasive[J]. *Applied Nanoscience*, 2018, 8(1/2): 163-171.
- [24] 吕超, 殷宏鑫, 刘艳龙, 等. 微波热解法制备氧化铈过程的可视化研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(7): 1238-1245.
- Lü C, Yin H X, Liu Y L, et al. Visualization study on preparation of CeO₂ by pyrolysis method *via* microwave heating[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(7): 1238-1245.
- [25] MSerilla B, Lamy-mendes A, Villafane F, et al. Polyurethane foam scaffold for silica aerogels: Effect of cell size on the mechanical properties and thermal insulation [J]. *Materials Today Chemistry*, 2022, 26: 101257.
- [26] Huy L N Q, Lin C Y, Chen C A. Development of modeling to investigate polyurethane pad hardness in chemical mechanical planarization/polishing (CMP) process [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(SJ): SJ1002.
- [27] Prasad A, Fotou G, Li S T. The effect of polymer hardness, pore size, and porosity on the performance of thermoplastic polyurethane-based chemical mechanical polishing pads[J]. *Journal of Materials Research*, 2013, 28(17): 2380-2393.
- [28] Zhang Y, Fan Y, Kamran U, et al. Improved thermal conductivity and mechanical property of mercapto group-activated boron nitride/elastomer composites for thermal management[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 156: 106869.
- [29] Su L, Liu M, Jing Y, et al. Recyclable flame retardant, luminescent, and transparent thermoplastic polyurethanes: Applications in light conversion films for flexible solar cells [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 517: 164436.
- [30] Su L W, Su T Y, Zhao Z, et al. High-strength, flame-retardant, UV-resistant polyurethane elastomers realized by synergizing nitrogen-phosphorus-containing ligands and cerium oxide nanoparticles[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142(37): e57443.
- [31] Xie A, Mao S W, Chen T J, et al. Microstructure and properties of cerium oxide/polyurethane elastomer composites[J]. *Rare Metals*, 2021, 40: 3685-3693.
- [32] Wang S G, Gao R, Zhou K Q. The influence of cerium dioxide functionalized reduced graphene oxide on reducing fire hazards of thermoplastic polyurethane nanocomposites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 536: 127-134.

Synthesis and Characterization of Cerium Oxide/Polyurethane Rigid Foam Composites

SU Li-wei¹, CHEN Chuan-dong², WANG Zhe¹, SU Tian-yu¹, PAN Gao-fei^{1*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China)

Abstract: Polyurethane rigid foam was prepared by prepolymerization method, and composited with CeO₂ of different particle sizes to prepare cerium oxide/polyurethane rigid foam composites, and the influence of CeO₂ particle size on the properties of CeO₂-based polyurethane rigid foam composites was investigated. When the mass fraction of cerium oxide in polyurethane rigid foam was 16%, the thermal stability and hardness of the composites showed an increasing trend with the decrease of cerium oxide particle size. The cerium oxide nanomodified polyurethane showed enhanced wear resistance and a porosity of 48.7%. To evaluate the application performance of the composite materials, they were applied in the polishing process of liquid crystal glass a machine test was conducted using a 1 μm cerium oxide polishing slurry. The results showed that the polyurethane rigid foam composite containing 5 μm cerium oxide achieved the highest polishing efficiency, but was prone to causing surface scratches. In contrast, the composite with 1 μm cerium oxide exhibited moderate polishing efficiency and yielded an approximate pass rate of 80%.

Key words: polyurethane; rigid foams; nano-cerium oxide; prepolymerization; composites