

文章编号: 1001-4888(2021)03-0334-06

压头形状对高分子材料压痕和刮擦行为影响的实验研究^{*}

黄科臻, 赵思伟, 张建伟, 张小芳, 彭俐荃, 王秋菊

(郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450001)

摘要: 针对聚丙烯 PP 和聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA, 本文开展了系统的压痕与刮擦实验, 研究了压头形状对高分子材料压痕与刮擦过程中变形和失效的影响, 探讨了高分子材料压痕和刮擦响应的应力集中敏感性。压痕实验结果表明: 不同压头形状下, PP 压入硬度均随载荷增加而小幅减小; 而不同压头下 PMMA 的压入硬度变化不大。两种材料维氏压头压入硬度均小于圆锥形压头压入硬度。刮擦实验结果表明: 不同压头形状下 PP 与 PMMA 的刮擦变形和失效形式不同, 且压头形状对两种材料刮擦时的切向力和刮擦深度有一定的影响。

关键词: 高分子材料; 压头形状; 压痕; 刮擦

中图分类号: TB324; O344.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-089

0 引言

由于具备质量轻、比性能好和成本低等优点, 高分子材料在包装、汽车、建筑及生活用品等领域有着广泛应用, 如聚丙烯(PP)可用于汽车内饰和手机外壳等; 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)可用于飞机座舱玻璃、汽车尾灯等^[1-3]。但高分子材料对压痕和刮擦较为敏感, 压痕和刮擦会对材料服役过程中的美观性、结构完整性和耐久性产生不利影响。

目前国内外学者针对高分子材料刮擦行为开展了大量相关研究。Jiang 等^[4]对不同力学性能的高分子材料分别进行刮擦实验, 探讨了韧弱、韧强、脆弱和脆强四类高分子材料的刮擦损伤机制, 发现剪切流动与银纹流动之间的共存和竞争是 PMMA 刮擦损伤的主要机制^[5]。Zhang 等^[6]通过刮擦实验和有限元分析发现, 在研究范围内增大屈服强度同时适当降低弹性模量有利于提高 PP 的耐刮擦性能。魏耀富等^[7]研究了基底材料和残余预张应力对低密度聚乙烯薄膜耐刮擦性能的影响。

然而, 考虑不同压头形状影响的高分子材料耐刮擦性能的相关研究比较缺乏。实际应用中 PP 和 PMMA 产品经常承受不同形状硬质物体的压入和刮擦作用。开展不同压头形状下 PP 和 PMMA 材料压入和刮擦实验研究, 对于进一步了解其压痕和刮擦性能有着重要的研究价值和工程意义。本文利用维氏压头和圆锥形压头对 PP 和 PMMA 进行压入和刮擦实验, 从而研究应力集中程度对其刮擦行为的影响。

1 实验部分

1.1 试样准备

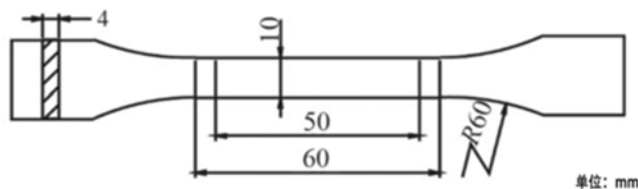
实验材料为商用 PP 板材(中国石油化工股份有限公司, P380)和 PMMA 板材(日本住友化学株式

^{*} 收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(11702253)和河南省 2018 年科研发展计划项目(182102210192)资助

通信作者: 张建伟(1989—), 男, 博士, 讲师。主要从事高分子材料刮擦行为的研究。Email: zhangjianwei@zzu.edu.cn

会社, S001)。将 PP 和 PMMA 板材加工为图 1 所示哑铃状, 试样中间等直段宽度 10mm, 厚度 4mm。为消除加工过程中的热机械历史, 使用电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司, 型号为 WGL-45B)对试样进行热处理。PP 和 PMMA 均在 90℃ 下退火 2h, 冷却至室温后取出。

图1 试样尺寸^[3]Fig. 1 Specimen shape^[3]

1.2 实验工况

压痕实验由微米力学测试系统(NANOVEA 公司, 型号为 PB1000)压痕模块完成。对于 PP 材料, 使用维氏压头时, 以 5N/min 的速度加载到 5N, 10N, 20N; 使用圆锥形压头时, 以 5N/min 的速度加载到 10N, 20N, 30N。对于 PMMA 材料, 使用维氏压头时, 以 5N/min 的速度加载到 1N, 4N, 10N; 使用圆锥形压头时, 以 5N/min 的速度加载到 2N, 4N, 10N。圆锥形压头的圆锥角为 120°, 尖端圆弧半径为 200μm; 维氏压头是四棱锥压头, 其尖端相对面夹角为 136°。每组实验保载 15s 后以 5N/min 卸载至 0N。实验均在室温下进行。为保证实验的可靠性, 每组实验进行六次重复性实验, 实验完成后使用超景深三维显微镜(日本基恩士公司, 型号为 VHX-2000E)对试样进行观察。

刮擦实验由微米力学测试系统(NANOVEA 公司, 型号为 PB1000)划痕模块完成, 分别使用圆锥形压头与维氏压头对 PP 与 PMMA 进行刮擦实验。采用线性加载的方式, 以 10mm/min 的刮擦速度, 从 0.5N 加载到 30N, 时间为 1min, 每组进行三次重复性实验。实验均在室温下进行。实验后使用超景深三维显微镜(日本基恩士公司, 型号为 VHX-2000E)对试样进行观察。

2 结果与讨论

2.1 PP 和 PMMA 压痕行为研究

2.1.1 PP 压痕行为研究

压入硬度可表示为 $H = F/S$, 其中 F 为最大压入载荷, S 为投影接触面积^[8]。如图 2 所示, 无论是使用维氏压头还是圆锥形压头, PP 的压入硬度值均随载荷的增加而减小。且在相同载荷下, 维氏压头作用下 PP 的压入硬度比圆锥形压头小。可以发现压头形状和载荷大小都会影响材料的硬度值, 这与刘进等^[9]采用维氏压头和努氏压头得到的立方氮化硼复合片压痕结果一致。压入硬度值随载荷增加而减小, 这是因为聚丙烯具有皮芯结构, 皮层结晶度大于芯部^[3], 造成皮层硬度大于芯部。随着压入深度的增加, 硬度较小的芯层影响越来越大, 造成两种压头下 PP 的压入硬度逐渐减小。

2.1.2 PMMA 压痕行为研究

对于 PMMA, 如图 3 所示, 使用维氏压头, 载荷从 1N 到 4N 再到 10N 时, 硬度值先增加后减小, 这是因为维氏压头载荷过大时出现了图 4(a)所示的裂纹。1N 时, 未观察到 PMMA 材料出现裂纹, 4N 时出现压痕导致的

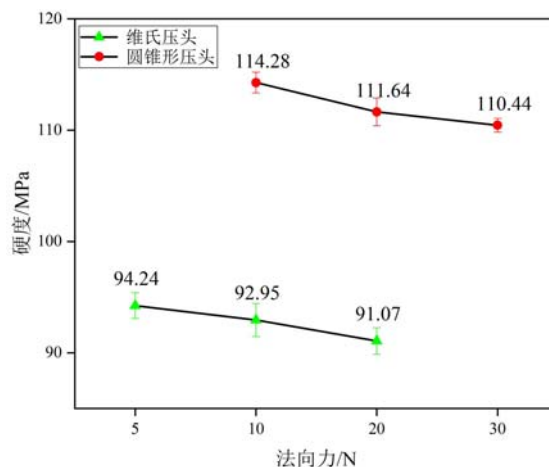


图2 维氏压头与圆锥形压头下 PP 材料压入硬度的对比

Fig. 2 Comparison of indentation hardness of PP using Vickers and conical indenters

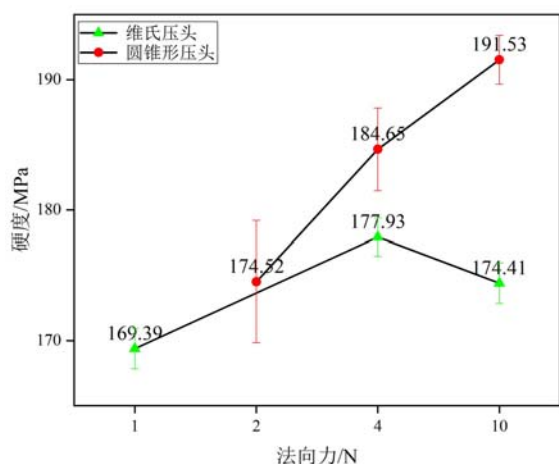


图3 维氏压头与圆锥形压头下 PMMA 材料压入硬度的对比

Fig. 3 Comparison of indentation hardness of PMMA using Vickers and conical indenters

起也比维氏压头更为明显。

裂纹。随着载荷的增加,裂纹长度变长。加载过程中裂纹的产生会影响测试材料的局部柔度,使得压头压入更深,从而降低材料的硬度^[10]。使用圆锥形压头时,硬度值随载荷增大而增加,压入载荷范围内未出现裂纹,如图 4(b)。需要指出的是不同载荷下 PMMA 的压入硬度变化不大(维氏压头 4.72%,圆锥形压头 8.75%)。在相同载荷下,维氏压头对应的硬度比圆锥形压头对应的硬度更小,这与 PP 结果一致。

2.2 PP 和 PMMA 刮擦行为研究

2.2.1 PP 刮擦行为研究

两种压头形状下 PP 刮擦形貌如图 5 所示。可以看出维氏压头下刮擦导致的应力发白区域主要集中在划痕中心线上,而圆锥形压头产生的应力发白区域更广,且划痕周围的隆起也比维氏压头更为明显。

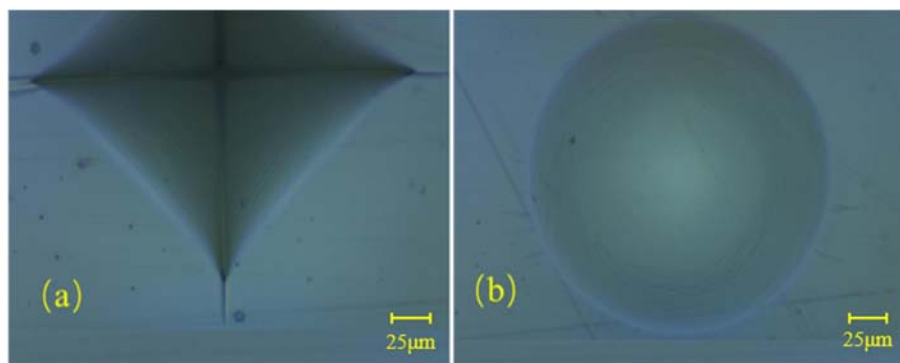


图4 两种压头下 PMMA 压入形貌:(a)维氏压头;(b)圆锥形压头

Fig. 4 Indentation results of PMMA: (a) Vickers indenter; (b) conical indenter



图5 两种压头下 PP 刮擦形貌:(a)维氏压头;(b)圆锥形压头

Fig. 5 Scratch results of PP: (a) Vickers indenter; (b) conical indenter

可将切向力和刮擦深度视为高分子材料耐刮擦性能的评判指标^[6]。由图 6(a)可见,切向力随着法向力的增加而增加,且相同法向力下圆锥形压头对应的切向力大于维氏压头。这是由于圆锥形压头产生的隆起造成的材料阻力大于维氏压头,该现象与钟月曦的结果相似^[11]。图 6(b)为 PP 刮擦深度与法向力的关系,随着法向力的增加,刮擦深度逐渐增加,且圆锥形压头刮擦深度略小于维氏压头,区别不明显。综合切向力、刮擦深度和刮擦引起的应力发白等因素,相同条件下圆锥形压头引起的 PP 材料刮擦变形和失效比维氏压头更为明显。

2.2.2 PMMA 刮擦行为研究

两种压头形状下 PMMA 刮擦形貌如图 7 所示。可以看出维氏压头下刮擦导致的应力发白区域集

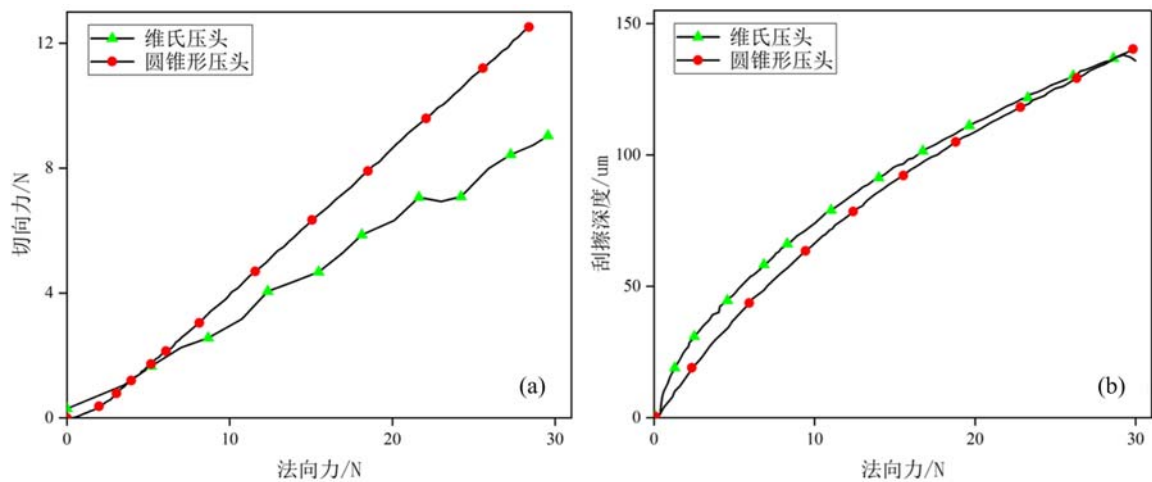


图6 两种压头下 PP 刮擦响应:(a)切向力;(b)刮擦深度

Fig. 6 Scratch results of PP: (a)tangential force; (b)scratch depth

中在刮擦产生的划痕内,且比圆锥形压头显著;而圆锥形压头则产生周期性的刮擦破坏,根据文献[5],这主要是由于剪切变形和银纹变形的竞争导致的。



图7 两种压头下 PMMA 刮擦形态:(a)维氏压头;(b)圆锥形压头

Fig. 7 Scratch results of PMMA: (a)Vickers indenter; (b)conical indenter

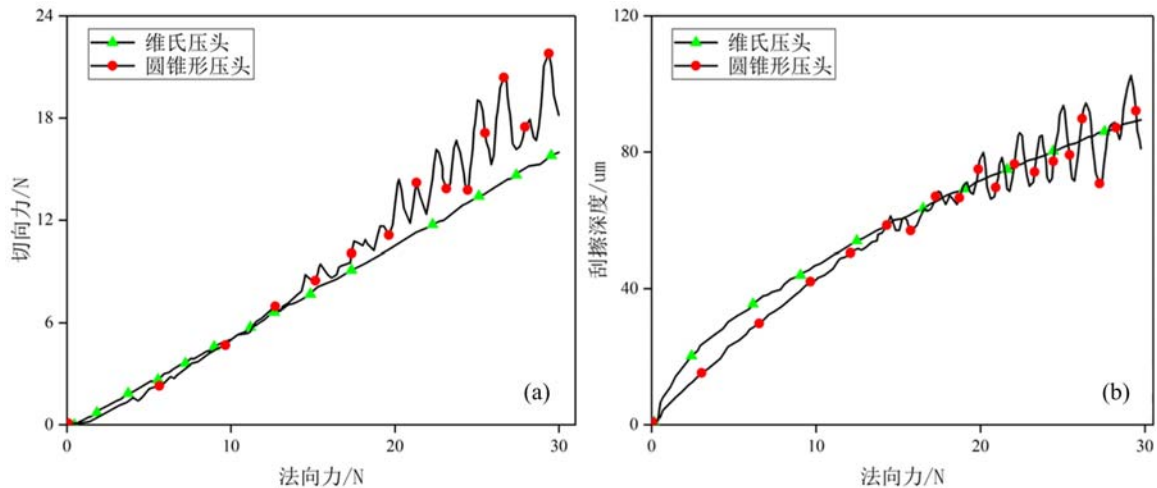


图8 两种压头下 PMMA 刮擦响应:(a)切向力;(b)刮擦深度

Fig. 8 Scratch results of PMMA: (a)tangential force; (b) scratch depth

由图8(a)可见,当法向力较小时(小于15N),维氏压头引起的切向力与圆锥形压头得到的结果接近;法向力较大时,圆锥形压头引起的切向力大于维氏压头,同时发现圆锥形压头曲线后半段有剧烈波动。这是由于较大法向载荷下,圆锥形压头刮擦时 PMMA 表面产生周期性破坏所致。图8(b)显示当法向力小于15N时,维氏压头刮擦深度大于圆锥形压头;法向力较大时,PMMA 表面产生周期性破坏,造成刮擦深度产生剧烈波动,两者差别不明显。综合分析,可以看出 PMMA 材料维氏压头和圆锥形压头刮擦过程中均产生了明显的刮擦失效行为,维氏压头使 PMMA 产生了明显的应力发白,圆锥形压头

则使 PMMA 表面出现周期性的刮擦破坏。

对于 PP 和 PMMA,使用圆锥形压头得到的压入硬度均大于使用维氏压头的结果。刮擦实验中可以发现随着法向力的增大,使用圆锥形压头时得到的切向力更大,且刮擦深度略小于维氏压头的结果。这说明圆锥形压头划入材料的难度更大且阻力更大。压痕实验的结果可为解释刮擦实验结果提供支撑。

3 结 论

(1) 压痕实验中,不同压头形状下(维氏压头和圆锥形压头)PP 的压入硬度值均随着法向载荷的增加而减小,而 PMMA 不同载荷下的压入硬度变化不大。PP 和 PMMA 维氏压头压入硬度均小于圆锥形压头压入硬度。

(2) 刮擦实验中,对于 PP 材料,在相同法向力下,维氏压头的切向力小于圆锥形压头,刮擦深度区别不明显,且刮擦可视化程度小于圆锥形压头,维氏压头耐刮擦性能优于圆锥形压头。对于 PMMA 材料,在维氏压头及圆锥形压头下均发生了刮擦失效。维氏压头使 PMMA 产生了应力发白,而圆锥形压头使 PMMA 表面出现周期性刮擦破坏。

参考文献:

- [1] 徐杨,李顿,沈佳斌,等. 高分子材料刮擦行为研究进展[J]. 高分子学报, 2018, 10(10): 1262—1277 (XU Yang, LI Dun, SHEN Jiabin, et al. Research progress in scratch behaviors of polymeric materials[J]. Acta Polymerica Sinica, 2018, 10(10):1262—1277 (in Chinese))
- [2] Cheng Qian, Jiang Chengkai, Zhang Jianwei, et al. Effect of thermal aging on the scratch behavior of poly (methyl methacrylate)[J]. Tribology International, 2016, 101:110—114.
- [3] 程洁,梁昇,陈彬,等. 温度循环老化对聚丙烯表面耐刮擦性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(9): 112—116 (CHENG Jie, LIANG Sheng, CHEN Bin, et al. Effect of temperature cyclic aging on scratch resistance of polypropylene surface[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):112—116 (in Chinese))
- [4] Jiang Han, Browning R, Sue H J. Understanding of scratch-induced damage mechanisms[J]. Polymer, 2009, 50 (16):4056—4065.
- [5] Jiang Han, Zhang Jianwei, Yang Zhuoran, et al. Modeling of competition between shear yielding and crazing in amorphous polymers' scratch[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 124:215—228.
- [6] Zhang Jianwei, Jiang Han, Jiang Chengkai, et al. Experimental and numerical investigations of evaluation criteria and material parameters' coupling effect on polypropylene scratch[J]. Polymer Engineering and Science, 2018, 58 (1):118—122.
- [7] 魏耀富,程前,蒋晗. 基底材料和残余预张应力对低密度聚乙烯(LDPE)薄膜抗刮擦性能影响的实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1):24—30 (WEI Yaofu, CHENG Qian, JIANG Han. Experimental study of the effect of substrate material and residual pretension stress on scratch resistance of low density polyethylene (LDPE) film [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):24—30 (in Chinese))
- [8] 葛琦. 有限元方法模拟压痕实验研究残余应力对金属玻璃硬度的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2008 (GE Qi. Effect of residual stress on the hardness of metallic glasses using finite element simulation of indentation experiment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese))
- [9] 刘进,姜伟,寇自立. 硬度计压头形状和负荷的大小对显微硬度的影响[J]. 超硬材料工程, 2008, 20(1):30—33 (LIU Jin, JIANG Wei, KOU Zili. Influence of sclerometer indenter shape and load on hardness value[J]. Superhard Material Engineering, 2008, 20(1):30—33 (in Chinese))
- [10] Quinn G D, Green P, Xu Kang. Cracking and the indentation size effect for Knoop hardness of glasses[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86(3):441—448.
- [11] 钟月曦. 划痕测试影响因素分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2018 (ZHONG Yuexi. Analysis and experimental study on influencing factors of scratch behavior[D]. Changchun: Jilin University, 2018 (in Chinese))

Experimental investigation on the effect of indenter shape on indentation and scratching behaviour of polymer materials

HUANG Kezhen, ZHAO Siwei, ZHANG Jianwei,
ZHANG Xiaofang, PENG Liquan, WANG Qiuju

(School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The indentation and scratch experiments are carried out systematically for polypropylene (PP) and polymethylmethacrylate (PMMA), to explore the influence of the indenter shape on the indentation and scratch behaviours of polymer materials, and analyze the stress concentration sensitivity of the indentation and scratch response of polymer materials. The results of indentation tests show that under different indenter shapes, the hardness of PP decreases slightly with the increase of the load. The hardness of PMMA changes a little. The indentation hardness values of PP and PMMA using Vickers indenter are larger than those using conical indenter. The results of scratch tests indicate that the scratch deformation and damage behaviours of PP and PMMA are different due to different indenter shapes. The indenter shapes also influence the tangential force and the scratch depth.

Keywords: polymer material; indenter shape; indentation; scratch