再生聚丙烯塑料保险杠蒙皮低速碰撞性能研究

赵子晗[1,2] 周宇耀[3] 赵一权[1,2] 张铜柱[1] 秦玉洁[4]

(1.中国汽车技术研究中心有限公司,天津 300300; 2.中汽零部件技术(天津)有限公司,天津 300300; 3.上汽大众汽车有限公司,上海 201805; 4.延锋彼欧汽车外饰系统有限公司,上海 201805)

摘要: 为研究再生塑料在汽车领域的适用性及优劣势,使用再生和原生聚丙烯塑料(RPP、VPP)制备成保险杠蒙皮,并使用摆锤冲击系统对2种材料保险杠的低速碰撞性能进行对比分析。结果表明,不同冲击强度下,2种材料保险杠试验后均未发生断裂,但RPP保险杠擦伤宽度大于VPP材料,外观性能表现不佳;RPP材料同负载下碰撞产生的冲击力小于VPP材料,冲击时间更长,表明RPP保险杠的冲击加速度更小,在行人保护方面更具优势。为探究低速碰撞性能差异原因,对2种材料的力学性能进行分析,结果显示,VPP材料的屈服伸长率高于RPP材料,冲击强度和冲击吸能略低于VPP材料,使RPP材料保险杠蒙皮产生相同形变时的作用力较小,即拥有更小的冲击加速度。由于助剂作用及再生塑料本身熔融流动性较好,RPP保险杠性能接近VPP。

关键词: 低速碰撞 再生塑料 力学性能 行人保护

中图分类号: TQ317 **文献标志码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250272

Research on the Low-Speed Collision Performance of Automotive Recycled Plastic Bumper Covers

Zhao Zihan[1,2], Zhou Yuyao[3], Zhao Yiquan[1,2], Zhang Tongzhu[1], Qin Yujie[4]

(1. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300; 2. CATARC Component Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300; 3. SAIC Volkswagen Automotive Co., Ltd., Shanghai 201805; 4. Yanfeng Plastic Omnium Automotive Exterior Systems Co., Ltd., Shanghai 201805)

Abstract: To study the applicability and advantages and disadvantages of recycled plastics in the automotive field, bumpers skins are made from recycled and virgin polypropylene plastics (RPP and VPP), and the low-speed collision performance of the 2 materials' bumpers is compared and analyzed using a pendulum impact system. The results show that no fracture occurred after the test of the 2 material bumpers under different impact strengths, but the width of the RPP bumper abrasion is larger than that of the VPP, and the visual performance is not excellent. The impact force generated by the collision under the same load was less than that of the VPP, but the impact time is reversed, indicating that the impact acceleration of the RPP bumper is more modest, which is more advantageous in pedestrian protection. In addition, the mechanical properties of materials are analyzed in order to investigate the reasons for the variation in test. The yield elongation of the VPP material is lower than that of the RPP (35%) and the impact strength and energy absorption are slightly great. This allows the RPP bumper skin to generate the same deformation with less force (less impact acceleration). The performance of RPP bumpers is close VPP due to the advantage of additives of RPP and the greater melt fluidity.

Key words: Low-speed collision, Recycled plastics, Mechanical properties, Pedestrian protection

作者简介: 赵子晗(1996—),男,工程师,硕士学位,研究方向为汽车及零部件检测、汽车绿色环保、双碳相关政策及技术。

基金项目:"科创甬江2035"关键技术突破计划项目"汽车行业碳足迹评价和标识认证研究及应用"(2024Z252)。

参考文献引用格式:

赵子晗, 周宇耀, 赵一权, 等. 再生聚丙烯塑料保险杠蒙皮低速碰撞性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(2): 64-72.

ZHAO Z H, ZHOU Y Y, ZHAO Y Q, et al. Research on the Low-Speed Collision Performance of Automotive Recycled Plastic Bumper Covers[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 64-72.

1 前言

随着对生态环保要求的日益提高,材料的回收再利用成为汽车行业减少碳排放的重要方式之一[1-2],报废汽车材料的回收再利用逐渐被各大主机厂所关注[3-6]。

报废汽车的材料可进行破碎、分类回收再利用[7-8],据统计,一辆小型家用轿车的材料构成约为钢铁62%、铸铁9.67%、粉末冶金1.23%、有色金属8.5%、非金属材料18.6%[9],非金属材料中以塑料为主,在汽车用塑料制品中,聚丙烯(Polypropylene,PP)含量高达37%[10]。然而,消费后聚丙烯塑料的理化性能会发生改变,Pieter Gijsma等研究表明,PP材料在使用过程中的老化失效与产品内抗氧化剂的含量有关,受阻胺稳定剂能有效减缓PP氧化,但在生命周期接近结束时PP材料的性能会大幅降低[11]。其次,工业生产中一般通过分选的方式将不同材质的塑料进行分类,这一过程中往往存在很多杂质[12],例如,塑料保险杠表面的油漆难以完全去除、电镀件表面镀层清除困难、复合材料无法完全分离等,使再生塑料制品的性能存在争议[13-14]。赵一权等对再生聚丙烯塑料的性能进行研究,发现再生含量低于某一比例时,再生PP的强度可保持较高水平[15-16]。Laura Prior等对消费后聚丙烯塑料的热学性能进行分析,再生聚丙烯熔化所需的能量较少,但在较高温度下会结晶,原因为降解过程中产生羰基形式的化学杂质富集和聚合物链断裂导致的分子质量降低[17]。再生塑料制品能否满足汽车各方面的需求成为制约其发展的主要因素[18]。保险杠蒙皮是整车系统中最常见的塑料零部件,相关检验测试标准较为全面[19-20],如:GB 17354—2024《乘用车前后端保护装置》对前、后保险杠的性能作出要求,在发生接触或轻度碰撞时,不应导致车辆的严重损伤;GB 11566—2009《乘用车外部突出物》对汽车保险杠外观尺寸作出了规定。再生塑料保险杠蒙皮与原生塑料保险杠蒙皮相比存在性能差异,因此需研究再生塑料保险杠蒙皮能否满足车用要求[21-25]。

依据现有研究[15-16],本文选择再生含量为35%的再生聚丙烯塑料(Recycled Polypropylene,RPP)、原生聚丙烯塑料(Virgin Polypropylene,VPP)保险杠蒙皮为研究对象,对GB 17354—2024中低速碰撞试验方法进行简化,使用可移动升降平台承载保险杠蒙皮及工装,通过改变负载质量,研究不同冲击强度下RPP与VPP保险杠蒙皮低速碰撞性能的差异,使用摄影测量、变形量分析、拉伸、弯曲、冲击、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,SEM)断面扫描等理化测试方式对2种材料低速碰撞性能的差异进行表征分析,并研究导致性能差异的原因。其次,整车低速碰撞试验对于保险杠蒙皮的考察仅限于其变形量及损坏情况,通过在移动升降平台上增加配重,可使保险杠蒙皮达到整车级试验工况。

2 试验部分

2.1 主要原料

本试验所用原材料为原生PP/三元乙丙橡胶(Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer,EPDM)-TD10、再生PP/EPDM-TD10(再生含量35%),试验样件为VPP保险杠、RPP保险杠(再生含量35%)。

2.2 主要设备及仪器

本研究使用的设备仪器如表1所示。

表1 设备及仪器清单

序号	设备名称	型号	制造商
1	电子万能材料试验机	Z010	德国兹韦克罗睿测试技术(太仓)有限公司
2	摆锤冲击系统	CEAST 9050	德国英斯特朗公司
3	扫描电子显微镜(SEM)	EVO 15	德国蔡司集团
4	摄影测量系统	CANON EOS-1DX	GOM Metrology
5	保险杠冲击试验台	BGCJ-001	机械工业部汽车工业天津规划设计研究院

2.3 样品制备

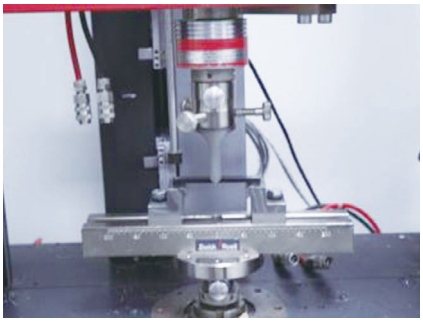
本文采用报废聚丙烯塑料制品,完成前处理后,先经过拆解、破碎、预洗、风选、热洗、浮选、漂洗、脱水、烘干、色选、最终检验、称重等工艺后打包入库,后经过混料、挤出、切粒、水冷、过筛、金属分离、除味、最终检验、称重等过程后加工成为PCR塑料粒子。

本文以RPP或VPP为主体,加入其他助剂(抗

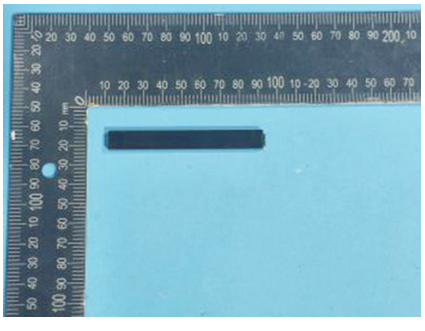
氧化剂1010，质量分数为0.5%；抗氧化剂168，质量分数为0.2%；硬脂酸钙，质量分数为0.2%）后混合均匀，通过注塑制成样件，制备的RPP和VPP保险杠蒙皮除再生塑料比例不同外，其他成分均一致。

2.4 性能测试与结构表征

弯曲强度和弯曲模量按照GB/T 9341—2008《塑料 弯曲性能的测定》进行测试，试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，试验速率为2 mm/min，试验设备及样件尺寸如图1所示。



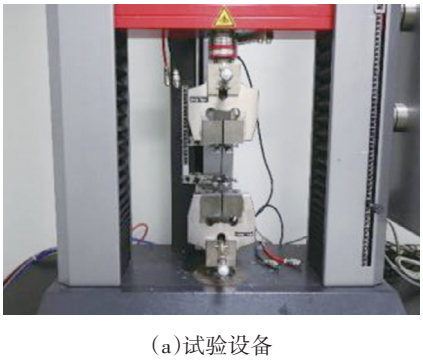
（a）试验设备



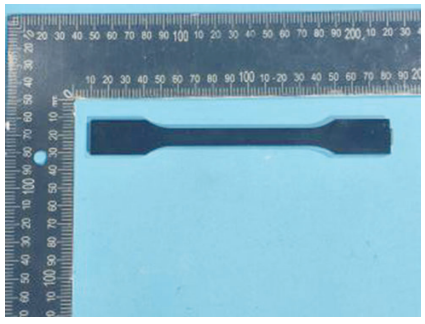
（b）样件尺寸

图1 弯曲强度和弯曲模量试验

屈服强度和屈服伸长率按照GB/T 1040.1—2025《塑料 拉伸性能的测定 第1部分：总则》、GB/T 1040.2—2022《塑料 拉伸性能的测定 第2部分：模塑和挤塑塑料的试验条件》进行测试，选用1A型试样；试验速率为50 mm/min，标距为75 mm，试验设备及样件尺寸如图2所示。



（a）试验设备



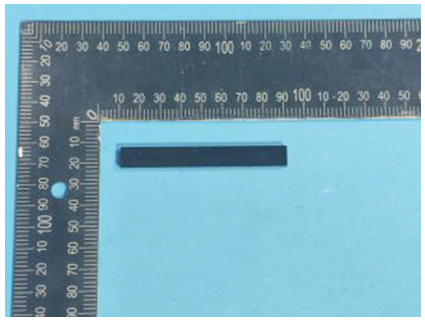
（b）样件尺寸

图2 屈服强度和屈服伸长率试验照片

简支梁冲击按照GB/T 1043.1—2008《塑料 简支梁冲击性能的测定 第1部分：非仪器化冲击试验》进行测试，试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，摆锤标称能量为4 J，试验设备及样件尺寸如图3所示。



（a）试验设备



（b）样件尺寸

图3 简支梁冲击试验照片

保险杠断面喷金处理后进行SEM分析，电子束的加速电压为20 kV。

形变分析使用摄影测量系统，通过计算测量点的位移得到保险杠变形数据，包含X、Y、Z轴方向变化量。

使用保险杠冲击试验台进行低速碰撞试验（图4），简化GB 17354—2024中的低速碰撞试验方法，使其适用于保险杠蒙皮，撞击高度（标准要求）为445 mm，碰撞器质量为2 084.9 kg，摆锤摆动角度为11.1°，撞击速度（标准要求）为4.25 km/h。

本文通过调控负载质量探究不同冲击强度下2种材料保险杠的性能表现,保险杠蒙皮与工装(配重)总质量分别为450 kg、550 kg,650 kg、750 kg。

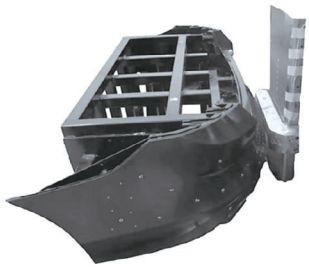


图4　低速碰撞过程示意

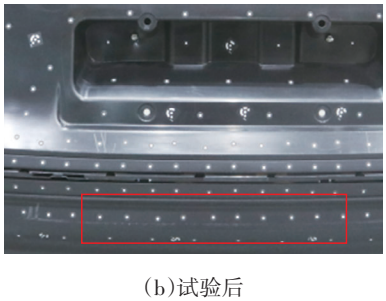
3　结果与讨论

3.1　表观分析

表观分析是汽车零部件低速碰撞试验分析的重要手段,试验后保险杠蒙皮未出现脱落、断裂或影响产品性能的缺陷则视为合格。低速碰撞后样品表面会出现擦伤印记,如图5所示,这是碰撞过程中重锤与蒙皮发生剧烈摩擦导致的,擦伤宽度越大,表明冲击时蒙皮的凹陷深度越大。碰撞后2种材料保险杠蒙皮下的本体均出现不同程度擦伤,随着总质量的增加,擦伤宽度逐渐增加,相比于VPP保险杠蒙皮,RPP保险杠蒙皮擦伤宽度增加更为明显,如图6所示,表明在相同冲击强度下,RPP保险杠蒙皮的凹陷更深,这与其力学性能相关,为此,本文对再生、原生材料力学性能进行分析。



(a)试验前



(b)试验后

图5　擦伤印记示意

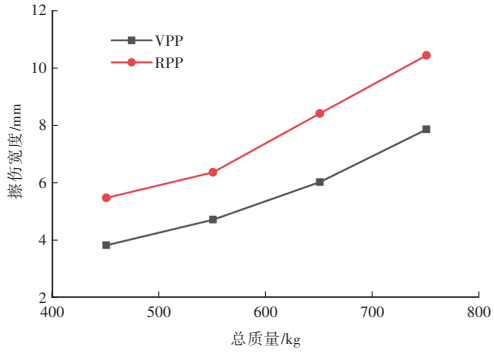


图6　RPP与VPP保险杠低速碰撞擦伤宽度随总质量变化曲线

图7为原生与再生材料弯曲性能,再生塑料的弯曲模量和标准挠度下的弯曲应力与原生材料差别较小(≤3%),这是因为2种材料蒙皮中添加的助剂有效提升了抗弯曲性能,使其在低速碰撞过程中能够承受较大的冲击力而不发生破裂或断裂。图8为原生与再生材料拉伸性能,原生塑料的屈服强度仅比再生塑料高3.4%,但屈服伸长率却比再生塑料低35%,表明在拉伸力相同的情况下,再生塑料更易产生弹性形变。保险杠蒙皮的低速碰撞试验表明,在相同的冲击力下,RPP蒙皮更易发生弹性变形,因此碰撞器陷入更深,表现为对蒙皮下本体擦伤宽度的增加。由此可见,再生塑料在助剂作用下能够获得良好的弯曲性能,使其能够承受较大的冲击能量而不断裂,但拉伸性能的不足导致其外观性能表现略差。

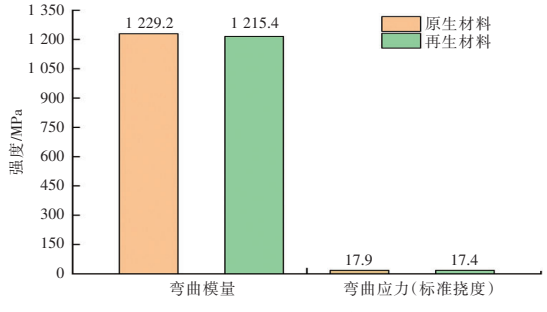


图7　原生与再生材料弯曲性能

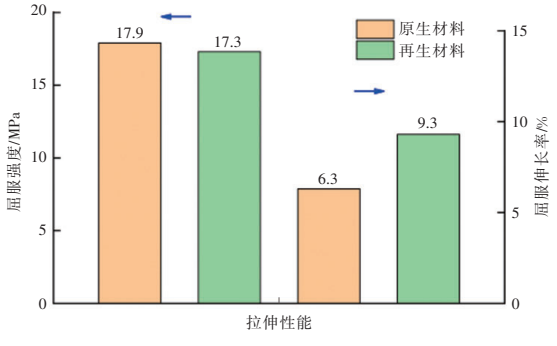


图8　原生与再生材料拉伸性能

3.2 形变分析

本文使用摄影测量系统对保险杠蒙皮低速碰撞试验前、后的形变量进行分析，在蒙皮与重锤碰撞部位粘贴测量点，通过分析试验前、后测量点的位移获得蒙皮的形变数据，图 9 所示为 VPP 保险杠蒙皮在工装总质量为 450 kg 的条件下进行低速碰撞试验后的摄影测量图像，由图 9 可知，保险杠在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向均有变化，其中，垂直纸面向外为 X 正方向。

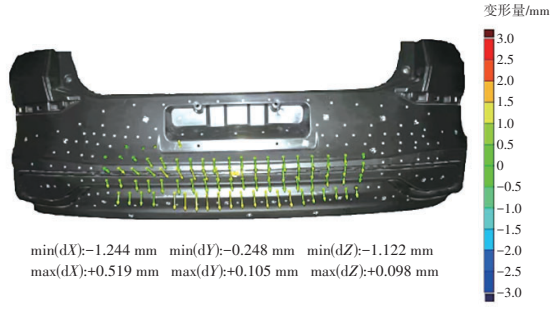


图 9 VPP 保险杠低速碰撞试验结果

低速碰撞试验后，2 种材料保险杠蒙皮的上本体和下本体在 X 轴方向变形方向不同，图 10 为负载为 650 kg 时，RPP 保险杠低速碰撞试验后 X 轴方向摄影测量图像，保险杠上本体向内变形（dX^-），而下本体向外变形（dX^+），这与碰撞的实际工况有关，X 轴方向变化量可反映低速冲击时保险杠蒙皮的变形情况，重锤与蒙皮碰撞时会在中心形成大面积凹陷区域，区域内保险杠蒙皮向中心方向拉伸，待凹陷区域恢复后，其周围区域出现不同程度的向外扩张趋势，因此，上本体向内变形，下本体向外变形，而中心区域仅发生微小形变。2 种材料变形方向一致，表明其承受外力冲击时的破坏形式相同，但 3 个方向的形变量差异明显。

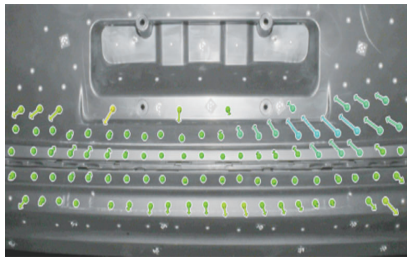
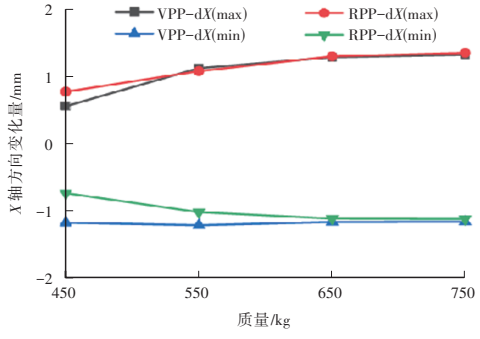
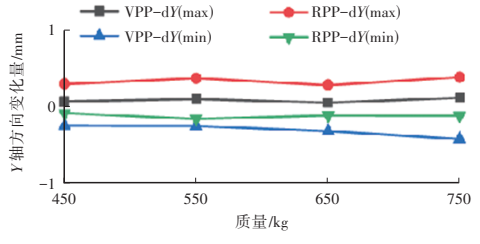


图 10 低速碰撞试验后 X 轴方向摄影测量图像

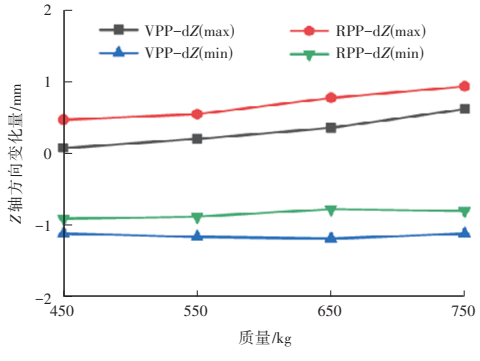
RPP 与 VPP 保险杠蒙皮试验 X 轴方向（dX）形变量随负载总质量变化，如图 11a 所示，2 种材料保险杠蒙皮 dX 方向形变量的绝对值随总质量的增加均呈增大趋势，且质量越大，RPP 和 VPP 保险杠 dX 形变量越接近，表明在发生低速碰撞时，碰撞冲击力越大，再生塑料与原生塑料保险杠蒙皮的凹陷深度越接近，且当冲击力足够大时，凹陷深度不会发生明显增大。在 dY 方向上，RPP 和 VPP 保险杠蒙皮形变量均小于 0.5 mm，如图 11b 所示，表明低速碰撞试验不会使保险杠蒙皮发生较大的横向形变，这与保险杠前凸设计有关，符合实际工况。低速碰撞后，蒙皮在 dZ^- 方向上形变量明显增大，而在 dZ^+ 方向增量较小，如图 11c 所示，这是由于低速碰撞时，测量点在重力作用下产生了 dZ^- 的位移，而 VPP 保险杠蒙皮的强度略高于 RPP，重锤产生的冲击力较大，因此 VPP 保险杠蒙皮位移更大。



(a) X 方向



(b) Y 方向



(c) Z 方向

图 11 RPP 与 VPP 保险杠低速碰撞试验后摄影测量三轴变化量

综上所述,RPP和VPP保险杠在低速碰撞试验后,d*X*、d*Y*、d*Z*方向均有不同程度的形变,其中,d*X*方向变化最为明显,随着总质量的增加,原生与再生保险杠的形变量趋于一致;d*Y*方向有微小变化,其变化量均小于0.5 mm;d*Z*方向上原生与再生保险杠蒙皮产生差异,VPP材料在d*Z*⁻的位移大于RPP材料,这是由于两者碰撞时的冲击力不同。而在实际工况中,保险杠承受轻微撞击时,再生塑料产品能够保持原有状态,在承受较大能量撞击时,2种材料产品均能够向内凹陷足够深度,将能量传递至防撞梁。

3.3　碰撞过程分析

本文对低速碰撞过程中的冲击力及碰撞时间进行分析,冲击力数值由碰撞器直接获得,图12所示为RPP和VPP保险杠蒙皮冲击力随总质量变化曲线,从图12中可以看出,随总质量的增加,2种材料蒙皮承受的冲击力均呈现增大的趋势,但在同一质量下VPP保险杠蒙皮承受的冲击力高于RPP,由动量定理可知,在质量相同的条件下,单位时间内的冲击力与加速度成正比,这表明相同负载下,RPP保险杠蒙皮的冲击加速度更小。

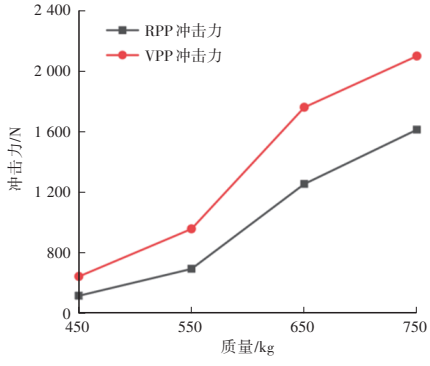


图12　低速碰撞冲击力随总质量变化曲线

图13所示为不同材料保险杠蒙皮低速碰撞时间随总质量的变化曲线,从图13中可以看出,RPP和VPP蒙皮低速碰撞发生在0.16 s内,从重锤与蒙皮接触至分离,RPP所用时间多于VPP蒙皮,且随着总质量的增加,碰撞时间的差值逐渐减小。对比图12和图13可知,低速碰撞冲击力和碰撞时间随总质量的增加,RPP与VPP之间差值的变化趋势不同,这是由于撞击时保险杠蒙皮的凹陷面积不同,当重锤质量远高于保险杠系统总质量时,相同总质量下,由于RPP保险杠蒙皮强度较差,重锤撞击蒙皮的深度更大,因此撞击时间会高于VPP,但受蒙皮本身及搭载工装的影响,撞击深度不会线性增加,这导致2种材料保险杠碰撞时间的差值减小。而影响冲击力数值的主要因素是蒙皮自身的力学性能,因此随着总质量的增加,冲击力差值增大。

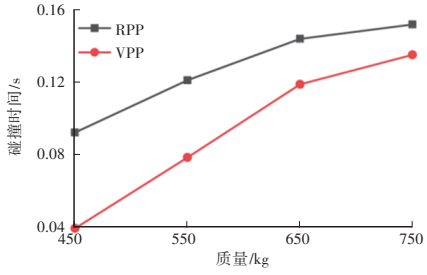


图13　低速碰撞时间随总质量变化曲线

为深入探究部件碰撞过程中冲击力和冲击时间差异的原因,测试了2种材料的冲击性能。图14所示为原生材料与再生材料抗冲击性能,再生材料的冲击强度和冲击吸能相比于原生材料,分别下降4.8%和17.2%,表明再生塑料抵抗冲击破坏的能力相对较差。因此,RPP保险杠蒙皮低速碰撞过程中产生的冲击力小于VPP,但由于助剂的作用,拉伸性能和弯曲性能的提升使RPP蒙皮在承受撞击时未产生严重损坏,同时屈服伸长率的增加提高了碰撞时间。在低速碰撞的实际工况中,保险杠蒙皮非主要吸能部件,其主要作用是将碰撞能量传递至吸能块,并保证自身及周围部件不被损坏,RPP材料与VPP材料相近的拉伸和弯曲性能可保障保险杠蒙皮目标达成。其次,RPP塑料保险杠蒙皮在受到撞击时冲击力更低且撞击时间较长,在实际碰撞中可实现大形变吸能,在行人保护方面更具有优势。

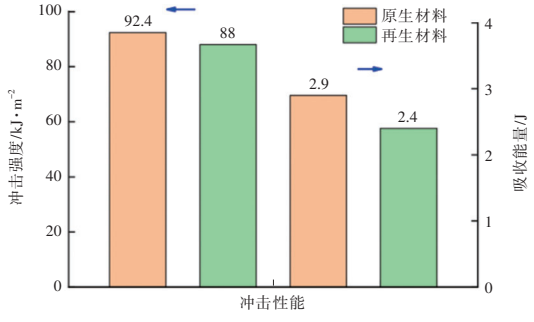
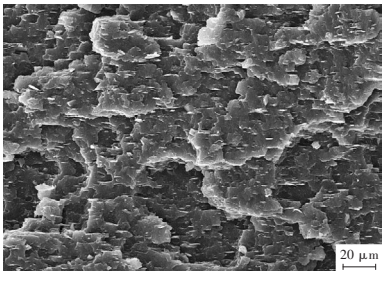


图14　原生材料与再生材料抗冲击性能

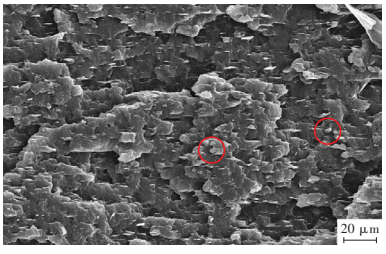
3.4　断面形貌分析

RPP和VPP保险杠蒙皮除再生塑料比例外其

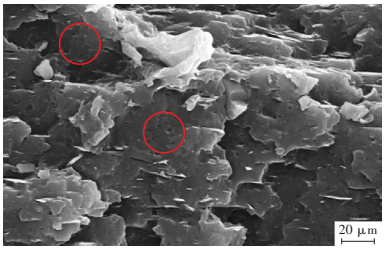
他助剂含量均相同，为探究助剂作用形式，本文对2种材料蒙皮的断面形貌进行分析。据前文所述，再生塑料降解过程中会使聚合物链断裂导致分子质量降低，而分子键的断裂使其物理化学性质发生改变，如熔融流动性增加[15-17]。图15为2种材料保险杠的SEM断面形貌，对比图15a、图15b可知，RPP材料中的助剂或杂质更多，在外力作用下，这些助剂或杂质可能会对分子链的滑移和运动产生约束，起到“物理交联点”的作用，而弹性体等助剂受到冲击时会引发周围基体产生微小裂纹，这一过程需吸收能量，增加了材料韧性，其次，微小裂纹的扩展会终止于弹性体粒子，一定程度上提升了再生塑料的力学性能，如图5、图7、图11所示。对比图15c和图15d可知，VPP和RPP材料断面存在微孔，但VPP材料的微孔数量和空隙尺寸略大于RPP材料，这是由于RPP材料分子链更短，其熔融状态下的流动性更好，从而填补了注塑粒子间的空隙，孔隙率的降低能够提升各项力学性能，综合2种因素，RPP保险杠可达到VPP保险杠性能水平。



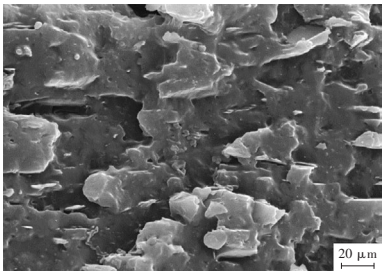
(a)VPP保险杠蒙皮(50×)



(b)RPP保险杠蒙皮(50×)



(c)VPP保险杠蒙皮(200×)



(d)RPP保险杠蒙皮(200×)

图15 保险杠SEM断面形貌

4 结束语

本文制备了RPP和VPP保险杠蒙皮，并使用保险杠冲击试验台探究了2种保险杠蒙皮的低速碰撞性能，通过比较蒙皮材料的力学性能及断面形貌，分析了低速碰撞性能差异的原因，结果如下：

a. RPP和VPP保险杠蒙皮低速碰撞后均未产生破裂或裂纹，满足产品性能要求；两者均出现不同的擦伤印迹，且随着蒙皮及配重总质量的增加，印迹宽度逐渐增加，VPP保险杠蒙皮印迹宽度小于RPP，外观性能表现不佳；主要原因为再生塑料同载荷下屈服伸长率高于原生塑料，但弯曲模量、标准挠度下的弯曲应力及屈服强度与原生塑料差别较小。

b. 摄影测量结果显示，RPP和VPP保险杠蒙皮在X轴方向变化量最大，且随总质量的增加，原生与再生保险杠蒙皮的形变量趋于一致；在Z轴方向，2种材料保险杠蒙皮均表现出负方向的迁移，但由于VPP碰撞时产生的冲击力更高，迁移量高于RPP；原生与再生塑料保险杠蒙皮低速碰撞试验后无明显的形变差异，这仍与再生塑料的力学性能相关。

c. 低速碰撞过程中，相同质量下RPP保险杠蒙皮产生的冲击力低于VPP蒙皮，碰撞时间多于VPP蒙皮，重锤凹陷的深度也大于VPP蒙皮，大变形吸能使RPP塑料保险杠在行人保护方面更具有优势；在RPP保险杠成型过程中，助剂等物质及其本身熔融流动性较好，其材料力学性能与VPP保险杠蒙皮差距较小。

参考文献：

[1] GALL M, STEINBICHLER G, LANG R W. Learnings

about Design from Recycling by Using Post-Consumer Polypropylene as a Core Layer in a Co-Injection Molded Sandwich Structure Product[J]. Materials & Design, 2021, 202: 12.

[2] IGNACIO M C C D, TUMU K N, MUNSHI M, et al. Suitability of MRF Recovered Post-Consumer Polypropylene Applications in Extrusion Blow Molded Bottle Food Packaging[J]. Polymers, 2023, 15(16).

[3] 李书晗. 报废汽车回收企业运营模式研究[D]. 北京: 商务部国际贸易经济合作研究院, 2022.

[4] SCHYNS Z O G, BENNETT T M, SHAVER M P, et al. Recycled Plastic Content Quantified through Aggregation-Induced Emission[J]. Acs Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(38): 12659-12669.

[5] TERUEL R, ALCALá N, CRESPO C, et al. Machine Learning Model and Input Batch Management Tool for the Composition of New Recycled Polypropylene Plastic Material with Reduced Variability in Target Properties[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 435.

[6] WANG K, ZHANG Z J, CAI R J, et al. Improving the Mechanical Properties of 3D Printed Recycled Polypropylene-Based Composites through Adjusting Printing Temperature[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(13): 15.

[7] 赵礼弢, 蒋宇轩, 赵敏, 等. 汽车保险杠塑料密封胶条混合碎料温热法分选[J]. 上海第二工业大学学报, 2022, 39(1): 17-23.

[8] SÜSS M, FISCHER J. Microplastic Occurrence during the Pre-Treatment of Polypropylene in a Simulated Washing Process for Mechanical Recycling[J]. Monatshefte Für Chemie, 2023, 12.

[9] 陈燕飞, 李书鹏, 魏婉楚, 等. 汽车用再生聚丙烯材料性能研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(5): 54-58.

[10] ZHANG H S, ZHENG H F. Artificial and Natural Aging of Polypropylene Used in Passenger Vehicle Bumpers[J]. Materiale Plastice, 2021, 58(2): 201-210.

[11] GIJSMAN P, FIORIO R. Long Term Thermo-Oxidative Degradation and Stabilization of Polypropylene(PP) and the Implications for Its Recyclability[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 208.

[12] HOCHEGGER A, PANTÒ S, JONES N, et al. One-Dimensional and Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatographic Approaches for the Characterization of Post-Consumer Recycled Plastic Materials[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2023, 415(13): 2447-2457.

[13] LARSEN G, OLAFSEN K, ALCOCK B. Determining the PE Fraction in Recycled PP[J]. Polymer Testing, 2021, 96: 11.

[14] GÓRA M, TRANCHIDA D, ALBRECHT A, et al. Fast Successive Self-Nucleation and Annealing (SSA) Thermal Fractionation Protocol for the Characterization of Polyolefin Blends from Mechanical Recycling[J]. Journal of Polymer Science, 2022, 60(24): 3366-3378.

[15] 赵一权, 董婧晗, 张铜柱, 等. 汽车外饰用再生聚丙烯材料性能研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(1): 112-118.

[16] 董婧晗, 赵一权, 张铜柱, 等. 汽车保险杠用再生聚丙烯材料的性能研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(12): 121-126.

[17] PRIOR L, OLIVEIRA M S A, ZHILTSOVA T. Assessment of the Impact of Superficial Contamination and Thermo-Oxidative Degradation on the Properties of Post-Consumer Recycled Polypropylene[J]. Materials, 2023, 16(3): 1198-1198.

[18] 许欢. 汽车废旧聚丙烯高效同级再生方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

[19] 张洪申, 黎土煜, 陈铭. 退役乘用车保险杠塑料同等性能再利用探索[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(8): 182-190.

[20] 魏伟. 汽车保险杠系统低速碰撞性能分析及试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[21] GARCIA-VAZQUEZ H D, MARTINEZ-HERNANDEZ H D, TRUJILLO-BARRAGAN M, et al. Impact of Thermomechanical Reprocessing Conditions on Polypropylene Composites Made from Automotive Waste Parts: A Path to a Circular Economy[J]. Polymer Engineering and Science, 2023, 63(7): 2031-2042.

[22] BUNJES A, ARNDT J H, GEERTZ G, et al. Characterization and Chemometric Modelling of Mechanically Recycled Polypropylene for Automotive Manufacturing[J]. Polymer, 2022, 249.

[23] AL M B, EKINCI A, OKSUZ M, et al. Effect of Processing Parameters on the Properties of Two-Component Injection Molded Recycled Polypropylene/ethylene Propylene Diene Monomer Automotive Parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(1/2): 845-860.

[24] MIHELČIČ M, OSELI A, HUSKIĆ M, et al. Influence of Stabilization Additive on Rheological, Thermal and Mechanical Properties of Recycled Polypropylene[J]. Polymers, 2022, 14(24).

[25] KOZICKI M, GUZIK K, DEPTUŁA H et al. Leaching and VOC Emission Tests of Polymer Composites Produced from Post-Consumer Waste in Terms of Application in the Construction Sector[J]. Materials, 2021, 14(13).

AT&M