

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.03.026

汽车内饰用软触感材料及触感表征的研究进展

李书鹏¹, 李波¹, 胡斌², 项林忆², 何光建²

(1. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434 ;

2. 华南理工大学聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 广东省高分子先进制造技术及装备重点实验室, 广州 510640)

摘要: 研究开发软触感材料对提升汽车内饰材料的触感性能具有重要意义, 对目前汽车仪表板区和座椅表皮区内用软触感聚丙烯和软触感超纤皮革材料的研究进展进行了综述, 并对其发展方向进行了展望, 指出软触感 PP 正向着兼具优异的力学性能、高触感性、环保性、抗菌性等多功能性方向发展, 超纤皮革未来的研究方向也是向着环保安全、抗菌、阻燃等多功能性。同时, 对目前材料的触感表征方法进行了简单总结。

关键词: 汽车内饰; 软触感材料; 触感表征; 进展

中图分类号: U465.4 ; U463.83 ; TS565 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)03-0145-05

Research Progress of Soft Tactile Materials and Tactile Characterization for Automotive Interiors

Li Shupeng¹, Li Bo¹, Hu Bin², Xiang Linyi², He Guangjian²

(1. Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China ; 2. Key Laboratory of Polymer Processing Engineering, Ministry of Education, Guangdong Provincial Key Laboratory of Technique and Equipment for Macromolecular Advanced Manufacturing, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract : The research and development of soft tactile materials is of great significance to improve the tactile properties of automotive interior materials. The research progress of soft touch polypropylene and soft touch ultrafine leather used in automobile dashboard and seat skin was reviewed, and its development direction was prospected. It was pointed out that the soft touch PP was developing towards the multi-functional direction with excellent mechanical properties, high touch, environmental protection and antibacterial properties, the future research direction of ultrafine leather was toward environmental protection, safety, anti-bacterial, flame retardant and other versatility. At the same time, the present methods of tactile characterization of materials were briefly summarized.

Keywords : automotive interior ; soft tactile material ; tactile characterization ; progress

随着国民经济的发展,汽车在人们的日常生活中越来越大众化。同时,随着生活品质的提高,消费者对汽车内饰材料的高触感性要求也越来越高。汽车内饰材料主要是指用在汽车驾驶舱内部零件上的、涉及到汽车内饰表面感知的零件,比如仪表板、副仪表板、座椅表皮、顶棚、门饰板等。此类型的内饰材料是与人们接触较多的区域,其触感直接影响车内的感知品质和消费者的驾乘体验。因此,研究软触感的汽车用内饰材料、改进对软触感汽车内饰材料的评价方法,对于促进汽车内饰材料的发展和汽车品质的提升都具有重要意义。笔者主要对汽车仪表板区和座椅表皮区的软触感

材料及触感表征方法进行评述,并对软触感未来的发展进行展望。

1 软触感内饰材料进展

仪表板区和座椅表皮材料是汽车中直接与消费者接触最多的内饰材料,为了营造良好的内饰氛围和使用体验,目前,应用于仪表板区和座椅表皮的高触感内饰材料得到了广泛研究。

1.1 软触感聚丙烯

聚丙烯 (PP) 由于具有密度低、来源广、价格低、耐高温、耐腐蚀、无毒无味、易加工改性等优点被广泛用作汽车内饰

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51973068), 广东省自然科学基金项目 (2018A030313275)

通讯作者: 何光建, 研究员, 主要研究方向为从事高分子材料改性及加工 E-mail: hegj@scut.edu.cn

收稿日期: 2019-12-12

引用格式: 李书鹏, 李波, 胡斌, 等. 汽车内饰用软触感材料及触感表征的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):145-149.

Li Shupeng, Li Bo, Hu Bin, et al. Research progress of soft tactile materials and tactile characterization for automotive interiors[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):145-149.

材料。随着PP改性技术的发展,迄今PP已成为汽车用塑料中比例最大的通用塑料品种^[1],在部分发达国家车用塑料占比已高达50%左右。汽车仪表板是汽车中表面积较大,与人体接触较多的内饰件之一。目前,中低档车大多采用传统的硬质仪表板,即传统PP直接注塑成型,这类仪表板其表面光泽度高,塑料质感强,不能给人以柔软的触感。而在高端豪华车型中,大多使用的是柔软触感较好的具有三层结构的软质发泡仪表板(软质表皮+发泡芯层+骨架构成),但这种仪表板成型工艺复杂且价格昂贵。因此,直接通过配方设计改性,赋予PP软触感,再一次注射成型制备具有软触感的仪表板等内饰件是目前制备汽车用软触感内饰材料一种新的解决方案,备受PP改性行业和汽车行业的关注。

傅轶等^[2]以无规共聚PP和丙烯酸聚烯烃弹性体为原料,通过双螺杆共混挤出制备了一系列玻璃纤维增强的柔软触感PP材料,实现了PP力学性能提高的同时兼具耐刮擦和软触感的性能。K. Kondo等^[3]向特殊的茂金属催化剂制备的PP中加入小分子酰胺类化合物也制备了一种耐刮擦、软触感玻璃纤维增强PP。周云国等^[4]通过向PP基体中加入适当比例的弹性体和短切玻璃纤维,利用双螺杆挤出机制备得到一种增强的汽车仪表板专用PP材料,其具有外观上的柔软触感,兼具高刚性以及优异的常温和低温冲击强度。

由于塑料制件的柔软触感可分为视觉触感和手触感两方面。具体可描述为视线接触时制品的低光泽度赋予材料的柔软感觉,以及用手触摸时制品表面具有一定的柔软度。因此,研究者在提升汽车内饰用PP材料手触感柔软性的同时也更加关注其视觉触感的提升,从而达到更高层次的软触感性。石阳阳等^[5]采用加成型液体硅橡胶对短切玻璃纤维表面润湿,再与PP共混挤出,在熔融挤出过程中,裸露在短切玻璃纤维表面的加成型液体硅橡胶的乙烯基在引发剂的作用下,与PP链段发生接枝反应,相互缠结,两相达到互溶状态,从而降低复合材料的表面硬度和表面光泽度,赋予PP复合材料极好的软触感。同时,加成型液体硅橡胶一端连接短切纤维,另一端连接PP链段,改善玻璃纤维与PP界面附着力,显著提高复合材料的力学性能,其拉伸强度可达23 MPa以上,弯曲弹性模量可达1600 MPa以上,悬臂梁缺口冲击强度可达25 kJ/m²以上,具有极高的刚韧平衡。石阳阳等^[6]还采用另一种方案同样制备出了一种适用于汽车内饰的刚韧平衡、具有良好耐刮性、低光泽、低翘曲的软触感PP复合材料。他们采用的是一种由柔软的聚氨酯(PUR)弹性体微球构成的绒毛粉作为软触感改性剂,这种绒毛粉具有橡胶弹性,且耐热、耐溶剂、抗酸碱并具有优异的耐刮擦性,与橡胶相比具有更好的相容性,并赋予表面产生丝柔般绒毛手感,利用绒毛粉的绒毛手感及弹性体的特质能有效降低

PP的塑料感,从而在视觉和触觉上实现“柔软触感”。王滨等^[7]也制备了一种高质感的汽车内饰材料,他们通过强剪切、超高速拉伸方法实现PP取向成纤,大幅提高了原有PP材料的强度、刚性、韧性和耐热性,同时利用高剪切分散实现了高弹体在体系中的良好分散,获得了表面柔软触感、低光泽度,消除制品硬塑感的特性。

随着汽车工业的发展,车内的挥发性有害物质、潮湿天气塑料内饰易发霉等问题也引起了人们的关注。因此,制备兼具优异的力学性能、环保性、抗菌性等多功能性的软触感材料成为目前汽车内饰行业的热点研究方向。陈萌等^[8]通过选用低密度聚乙烯(PE-LD)和聚烯烃弹性体(POE)增韧剂共同对PP改性,在控制PP、增韧剂和玻璃纤维三者的适当比例后,实现了改性PP在视觉和触觉上的软触感性。同时,在复合材料挤出过程中通过加入麦羟硅钠石和沸石混合制备的VOC吸附剂,有效吸附原材料加工过程中产生的小分子物质,达到低VOC的性能指标,从而得到了一种应用于汽车内饰的低VOC、软触感玻璃纤维增强PP复合材料。刘荣亮等^[9]在无碱短切扁平玻璃纤维和乙丙共聚物改性PP的过程中加入乙烯与丙烯酸甲酯的超支化共聚物与含有纳米级氧化铝和锐钛型纳米二氧化钛的复合抗菌剂,在挤出过程中利用超支化共聚物和扁平短切纤维的相互促进作用使复合抗菌剂均匀分布在PP基体中,从而制备得到一种力学性能优异且具有抗菌性的用于汽车内饰的柔软触感PP复合材料。其大肠杆菌抑菌率和金黄色葡萄球菌抑菌率最高可分别达到93.3%和96.5%。黄观等^[10]也通过在软触感PP的制备过程中加入相应比例的抗菌剂得到了一种力学性能提高的同时具有良好耐刮擦和抗菌性的软触感PP复合材料。

1.2 软触感皮革材料

作为汽车内饰的主要材料——座椅皮革材料,在汽车内饰中占有很大比例。并且座椅皮革材料和人体长期接触,因此对其触感舒适性和环保性要求更高。以前中、高档车型的座椅为达到触感舒适性普遍采用天然皮革包覆,但由于天然皮革价格昂贵、资源有限,并且加工过程不利环保。因此,行业研究者一直在积极寻找一种新型环保舒适的人造复合材料来代替天然皮革应用于汽车座椅表皮材料。随着以聚氯乙烯(PVC)涂覆的人造革的出现,PVC人造革开始替代天然皮革应用于汽车座椅皮革材料领域。PVC人造革虽然具有天然皮革般的外观鲜艳、耐磨、耐折、耐酸碱等特点,但柔软触感性差是其明显的缺陷,需要加入增塑剂来提升软触感,但大多增塑剂有毒,加入后气味较大,且使用后的PVC人造革垃圾处理和回收困难,因此PVC革在汽车内饰的应用受到限制^[11]。

随着 PUR 合成革的出现,由于 PUR 合成革具有环保、无气味、手感柔软、透气防水、易清洗、耐老化性好、外观和性能均接近天然皮革等优点, PUR 合成革已经逐步取代 PVC 人造革在汽车内饰中的应用,且趋向于高性能的 PUR 合成革发展。目前,随着纺织行业超细纤维技术的迅速发展,并结合高性能 PUR 革技术,一种被称为超纤皮革的新型环保材料已成为迄今最理想的汽车内饰用高触感皮革材料。这种皮革不仅物理性能完全超过天然皮革,而且透气、透湿和舒适性上也完全超越天然皮革。在国外,尤其是日本和欧洲已经在逐步使用这种新型人工皮革材料来替代天然皮革。目前宝马汽车、奔驰汽车、丰田汽车、本田汽车等多种车型都配置了汽车专用超纤皮革。

超纤皮革是超细纤维 PUR 合成皮革的简称,它是采用与天然皮革中束状胶原纤维结构及性能相似的超细纤维制成具有三维网络结构的高密度非织造布,再填充性能优异、具有开式微孔结构的 PUR 树脂加工处理而成。这种超纤皮革在外观、力学强度、弹性、耐化学物质稳定性方面都与天然皮革十分相似,手感非常好。目前,针对汽车专用超纤革研究者们也做了相应研究。黄小平^[12]以水替代有机溶剂作为涂层溶剂,制备了一种质感与真皮相似、柔软平滑、弹性好,同时具有使用性能优异、强度好、防水性和耐水解性强的汽车内饰用水性 PUR 超纤革。钱晓明等^[13]采用针刺、水刺复合开纤工艺和表面刮涂技术,生产了一种桔瓣型超细纤维仿真皮革基布,其具备纤维细度和水性 PUR 含浸量在非织造布内部的梯度变化,与真皮基板的结构极其相近,具有良好的手感、垂感和质感。随着人们生活质量的提高,以及健康、安全意识的增强,人们在追求汽车内饰皮革材料舒适触感性的同时也更加关注内饰材料的安全、环保、健康危害等问题,因此功能化、绿色环保也成为超纤皮革的研发重点。王美瑞等^[14]公开了一种水性无溶剂 PUR 超细纤维仿真皮革的制备方法,其采用水性 PUR 树脂面料和中料,与无溶剂 PUR 树脂料粘结,再与不同厚度的超纤贝斯贴合,制备得到的超纤革手感柔软有弹性,具有极强的真皮质感。陈峻等^[15]也公开了一种用于汽车内饰的手感良好的超纤 PUR 高仿真皮革材料的制备方法,他们两次浸渍均使用的是环保的水性 PUR,并且在第一次合成革基布浸渍中通过添加纳米氢氧化镁和金红石钛白色浆等耐碱成分配合水性 PUR 进行浸渍,使纳米粒子均匀地覆盖在基布的表面以及缝隙中,赋予皮革良好的阻燃、防晒性能。并且在成型过程中还通过添加适量的松木成分赋予了制备的超纤革一定的抗菌性能。他们最终制备得到的这种汽车内饰用超纤 PUR 皮革不仅具有良好的真皮手感,而且还具有环保、阻燃和抗菌等功能性。丁惠阳等^[16]通过在湿法含浸 PUR 浆料中加入防污助剂,在上油

柔软液中加入抗菌助剂,当热定型后的无纺布依次通过湿法含浸、甲苯减量、扩幅上油、鞣皮工序后所制得的不定岛超细纤维基布具有特殊的防污抗菌性能。然后经干法贴面后再进行表面防污印刷,所制得的超纤皮革在具有良好的真皮手感的同时,还具有特殊的全方位防污抗菌功能性。

2 材料触感表征进展

随着软触感内饰材料的研究,如何评价材料的软触感性能也成为目前内饰行业面临的重大问题。在材料的触感评价方面,一直沿用的传统感观评价方法是通过有经验的专家对材料进行触摸形成综合感觉从而评价材料的触感性能。但是这种传统的评价方法具有诸多不足,其评价结果容易受到个人的专业技能、个人喜好等主观因素的影响,以及评价环境气候条件等客观因素的影响。其次是该评定方法缺乏客观的定量评价指标,不能区分各材料之间触感性能的细微差别,因此需要建立更客观的方法和系统去表征材料的触感性能^[17]。

最初应用客观方法定量评价材料的触感性能是在纺织行业中, F. T. Peirce 提出织物表面的物理力学特性数据是影响其触感性能的重要因素,1968 年日本的川端季雄提出利用织物的基本力学性能数据表征织物的触感性能,并发明了 KES-F 织物评价系统。随后,美国潘宁教授基于前人利用纺织物力学特性数据评价织物触感研究的方法,利用抽出法开发出 Phabr Ometer 织物触感评价系统,使织物触感的客观表征达到了一个新的高度^[18]。由于利用织物物理力学特性对纺织物触感进行客观表征的方法逐渐在纺织行业中标准化,研究者们对汽车内饰材料的触感表征研究也开始借鉴这种思想,力求完善发展汽车内饰材料的触感表征方法。早在 1993 年,苏真伟等^[19]就对汽车内饰材料中皮革材料的触感进行了客观研究,指出皮革力学性能参数是影响皮革柔软度评价的重要因素。2003 年,张晓镭等^[20]研究了在顶伸和压缩等力学状态下皮革的触感特性,提出可以通过测定皮革的力学性能来表征其丰满度和弹性度等触感特性参数。2006 年,李志强等^[21]通过研究皮革柔软度与其抗弯强度和压缩性能的关系,提出可以利用皮革的弯曲和压缩性能表征其柔软触感的方法,并研发出相关测试仪器。陈敏等^[22]也通过在标定压力下测定皮革在伸长状态和压缩状态下的厚度来计算评价其柔软性,并证实其测试结果与实际样品相符合。因此,他们也提出了基于弯曲应力和可压缩性原理的皮革柔软度量化表征方法。由于上述表征方法中,大多都是基于单一力学特性参数对皮革的柔软触感进行评价,对某些细微的触感差别可能存在较大误差。因此,2008 年董继先等^[23]研究了一种新型的皮革触感特性参数测试仪器,该仪器可以通过同时测定皮革在拉伸、压缩、弯曲、顶伸这 4 种状态下的

力学性能,再经多元回归分析等数据处理,实现皮革触感特性参数的综合检测,可以较全面地间接表征皮革的触感。在2010年,张三等^[24-25]基于该仪器进行了相关改进,建立了基于PLC和LABVIEW的皮革触感特性参数的检测系统,进一步实现了皮革材料触感表征的智能化和直观化。2012年,王震等^[26]也基于前人对皮革触感的研究结果,选择皮革的弯曲常数、压缩指数、顶伸系数、弯曲应力衰减常数以及弯曲应力衰减速率常数为力学特征参数建立了基于BP神经网络模型的皮革触感表征系统。

同样,在汽车内饰的其它高分子材料方面,目前也有诸多研究者采用其特定的力学特性参数来表征其触感。由于在手指接触材料的实际触感感知过程中手指与材料的表面会产生摩擦现象,所以,摩擦特性也是影响触感表征的重要因素^[27]。因此,在后续的触感研究中研究者们也相应将摩擦特性纳入测试的力学特性范围。Covestro公司针对带PUR涂层的塑料基材的触觉感觉与涂层性能进行了研究,他们发现塑料零部件表面涂层的某些特定高分子物理分析数据(特别是摩擦特性)与其触感特性有着紧密的联系,因此他们进一步研究总结出一种评价塑料零件表面有PUR涂层的触觉特性的客观评价方法,即通过测定其表面摩擦系数、变形参数、表面微观硬度和模量来对带涂层的材料的触感进行数值量化。奥迪公司也在就如何将汽车内饰材料触感特性主观的、通常是比较的评估转化为可测量的数据问题上做了相关研究,并开发出了一套基于材料各种物理特性参数而建立的触感评价方法。他们的评价方法中包括材料的柔软感、表面弹性、触摸/触碰感和温度感知四大特性,其中柔软感是通过测定材料的刚度来表征;表面弹性是通过力作用后的表面恢复特性来表征;触摸/触碰感是通过粗糙度和摩擦特性来表征;温度感知是通过测定材料的表面散热特性来表征。Liu X等^[28]也通过利用塑料件的相关物理特性参数对其触感特性进行了表征,他们的方法是利用一种新型的摩擦学探针显微镜(TPM)对材料进行多功能测量。指出TPM能够在一次扫描中测量四种功能,提供材料表面形貌、摩擦特性、拉伸弹性模量和硬度的区域映射。由于TPM映射是基于逐点扫描的,所以四个被测函数的值在空间和时间上是相互联系的,因此可以建立函数之间的相互关系,从而达到表征其触感的目的。Chen X等^[29]的研究也表明触觉感知受材料表面物理性质的影响。由于在触感客观表征中摩擦特性相对于其它触感物理特性参数复杂,并且受到的影响因素较多,因此也有研究者单独研究摩擦特性与触觉感知之间的联系。L. Skedung等^[30]研究了感知粗糙度和试样间摩擦特性的差异,发现摩擦系数越大材料表面粗糙感越强。G. P. Chimata等^[31]在鉴别纹理时讨论了摩擦和表面参数的影响,发现材

料的纹理感知是随着表面摩擦系数的改变而存在差异的。J. D. Ndengue等^[32]在研究中指出手指滑动时摩擦引起的振动参数也是触觉评价中的客观指标。K. Anne等^[33]根据摩擦线索研究了触觉愉悦感和样本间感知的差异,结果表明手指划过材料表面时的摩擦系数越高,触觉愉悦感越差。

3 结语

软触感PP的制备目前主要是通过通过在玻璃纤维增强PP的过程中加入弹性体组分和降低表面光泽度的组分来实现其视觉和触觉上的软触感。随着汽车内饰要求的提高,软触感PP正向着兼具优异的力学性能、高触感性、环保性、抗菌性等多功能性方向发展。汽车座椅软触感皮革方面,目前主要的研究方向是利用超纤PUR皮革来替代真皮的应用,未来的研究方向也是向着环保安全、抗菌、阻燃等多功能性的软触感超纤皮革发展。

在软触感表征方面,所涉及影响触感表征的因素主要包括与材料的粗糙感和光滑感密切相关的材料表面摩擦特性;与材料蓬松感、丰满感和柔软感相关的压缩特性;与材料温和感相关的材料表面散热特性;以及与材料软硬感相关的模量、硬度等力学特性参数。目前应用于触感表征的方法主要是通过测定这些影响触感评价的材料表面物理特性参数来间接表征其触感。

参考文献

- [1] 田永,等. 汽车零部件,2012(6):66-70.
Tian Yong, et al. Automobile Parts, 2012(6):66-70.
- [2] 傅轶,等. 合成材料老化与应用,2015,44(4):22-25,38.
Fu Yi, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2015, 44(4):22-25,38.
- [3] Kondo K, et al. Fiber-reinforced polypropylene resin composition and molded article thereof.US20140242335A1[P].2014-08-28.
- [4] 周云国,等. CN109762256A[P].2019-05-17.
Zhou Yunguo, et al. CN109762256A[P].2019-05-17.
- [5] 石阳阳,等. CN109721929A[P].2019-05-07.
Shi Yangyang, et al. CN109721929A[P].2019-05-07.
- [6] 石阳阳,等. CN107141687A[P].2017-09-08.
Shi Yangyang, et al. CN107141687A[P].2017-09-08.
- [7] 王滨,等. CN108102218A[P].2018-06-01.
Wang Bin, et al. CN108102218A[P].2018-06-01.
- [8] 陈萌,等. CN106751002A[P].2017-05-31.
Chen Meng, et al. CN106751002A[P].2017-05-31.
- [9] 刘荣亮,等. CN109627591A[P].2019-04-16.
Liu Rongliang, et al. CN109627591A[P].2019-04-16.
- [10] 黄观,等. CN109734995A[P]. 2019-05-10.

- Huang Guan, et al. CN109734995A[P].2019-05-10.
- [11] 姚和平,等. 汽车与配件,2006(32):40-41.
Yao Heping, et al. Automobile & Parts,2006(32):40-41.
- [12] 黄小平. CN106758273A[P].2017-05-31.
Huang Xiaoping. CN106758273A[P].2017-05-31.
- [13] 钱晓明,等. CN106521956A[P].2017-08-15.
Qian Xiaoming, et al. CN106521956A[P].2017-08-15.
- [14] 王美瑞,等. CN107700229A[P].2018-02-16.
Wang Meirui, et al. CN107700229A[P].2018-02-16.
- [15] 陈峻,等. CN105986490A[P].2016-10-05.
Chen Jun, et al. CN105986490A[P]. 2016-10-05.
- [16] 丁惠阳,等. CN103556489B[P].2016-10-05.
Ding Huiyang, et al. CN103556489B[P].2016-10-05.
- [17] 宇文欢,等. 西部皮革,2016,38(21):55-59.
Yu Wenhuan, et al. West Leather, 2016, 38(21):55-59.
- [18] 孙晶晶,等. 现代纺织技术,2010,18(2):55-60.
Sun Jingjing, et al. Advanced Textile Technology, 2010, 18(2):55-60.
- [19] 苏真伟,等. 皮革科学与工程,1993,3(4):15-20.
Su Zhenwei, et al. Leather Science and Engineering, 1993, 3(4):15-20.
- [20] 张晓镭,等. 中国皮革,2003,32(9):30-35.
Zhang Xiaolei, et al. China Leather, 2003, 32(9):30-35.
- [21] 李志强,等. CN1261747C[P].2006-06-28.
Li Zhiqiang, et al. CN1261747C[P].2006-06-28.
- [22] 陈敏,等. 中国皮革,2006(21):33-36.
Chen Min, et al. China Leather, 2006(21):33-36.
- [23] 董继先,等. 中国皮革,2008,37(11):43-45.
Dong Jixian, et al. China Leather, 2008, 37(11):43-45.
- [24] 张三,等. 皮革科学与工程,2010,20(3):67-69.
Zhang San, et al. Leather Science and Engineering, 2010, 20(3):67-69.
- [25] 张三,等. 皮革科学与工程,2010,39(9):38-42.
Zhang San, et al. Leather Science and Engineering, 2010, 39(9):38-42.
- [26] 王震,等. 中国皮革,2012,41(21):21-23.
Wang Zhen, et al. China Leather, 2012, 41(21):21-23.
- [27] Zhou X, et al. Biosurface and Biotribology, 2018, 4(4):99-111.
- [28] Liu X, et al. Journal of Physics:Conference Series, 2005, 13:357-361.
- [29] Chen X, et al. International Journal of Design, 2009, 3(2):67-77.
- [30] Skedung L, et al. Tribology International, 2011, 44(5):505-512.
- [31] Chimata G P, et al. Biotribology, 2017, 11:102-109.
- [32] Ndengue J D, et al. IEEE Trans Haptics, 2016, 99:409-417.
- [33] Anne K, et al. Plos One, 2013, 8(11):e79085-1-8.

(上接第 144 页)

- [21] 郭曦,等. LCP 在挠性电路板和 FRID 上的应用研究 [C]. 第十届中国覆铜板市场技术研讨会论文集,2009:125-130.
Guo Xi, et al. Progress in application of liquid crystal polymer for FCC and RFID[C]. Proceedings of the 10th China CCL Market Technology Symposium, 2009:125-130.
- [22] 孙兆懿,等. 工程塑料应用,2016,44(9):113-116.
Sun Zhaoyi, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9):113-116.
- [23] 曾祥斌,等. 塑料工业,2016,44(2):34-38.
Zeng Xiangbin, et al. China Plastics Industry, 2016, 44(2):34-38.
- [24] H·B·克尼斯,等. CN105230133B[P].2019-01-15.
Kness H B, et al. CN105230133B[P].2019-01-15.
- [25] 余非,等. 中国电子商情,2003(5):52-53.
Yu Fei, et al. China Electronic Market, 2003(5):52-53.
- [26] 封驰,等. 中国塑料,2011(9):11-15.
Feng Chi, et al. China Plastics, 2011(9):11-15.
- [27] 徐亮,等. 企业科技与发展,2016(10):36-38.
Xu Liang, et al. Sci-Tech Development of Enterprise, 2016(10):36-38.
- [28] 冯域淞. 通信世界,2015(8):35-36.
Feng Yusong. Communications World, 2015(8):35-36.
- [29] 赖华林,等. 塑料科技,2018(9):137-142.
Lai Hualin, et al. Plastics Science and Technology, 2018(9):137-142.
- [30] Artner G, et al. Material induced changes of antenna performance in vehicular applications[C]. IEEE International Conference, 2015:1-4.
- [31] Friedrich A, et al. An active three-dimensional GPS patch antenna using MID-technology[C]. European IEEE, 2015:373-376.
- [32] 程静,等. 印制电路信息,2012(9):42-48.
Cheng Jing, et al. Printed Circuit Information, 2012(9):42-48.
- [33] 曹艳霞,等. CN105623206B[P].2017-12-15.
Cao Yanxia, et al. CN105623206B[P].2017-12-15.
- [34] 曹艳霞,等. CN105694447B[P].2018-01-26.
Cao Yanxia, et al. CN105694447B[P].2018-01-26.