

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.025

汽车车内VOC控制技术和评价方法

魏丽霞¹, 蔡扬扬¹, 刘晓²

(1. 比亚迪汽车工业有限公司, 广东深圳 518118; 2. 北京工业大学材料与科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 对汽车车内挥发性有机物(VOC)的排放源和标准法规进行了总结, 并对车内VOC控制技术进行了系统性分析, 包括内饰件的原材料制备、改性技术和生命周期评价(LCA)的研究进展。分析结果表明, 内饰件是车内VOC排放的主要来源, 其排放量与材料用量、展开面积呈正相关; VOC标准法规中, 国外标准注重内饰材料自身有害物质含量的检测。此外, 开发安全环保的低VOC材料, 可从源头降低VOC的排放、协同控制汽车零部件各个生产阶段VOC的排放, 是提高车内空气质量的重要途径。

关键词: 汽车内饰; 挥发性有机物; 排放特征; 评价标准

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0173-06

Automotive VOC control technology and evaluation methods

WEI Lixia¹, CAI Yangyang¹, LIU Xiao²

(1. BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract : The sources of volatile organic compounds (VOC) emission, international standards and regulations were summarized, the control technology of VOC was analyzed systematically, including the research and application progress of raw materials preparation, modification technology and life cycle assessment (LCA) of interior trim. The results indicate that interior parts are the main source of VOC emissions, and its emissions are positively correlated with the amount of materials and the unfolded area. The development of safe and environmentally-friendly low-VOC materials will control VOC emissions from the source, and coordinate-ly track VOC emissions in various production stages of auto parts and establish full life cycle management of product, which is an play role in improve the air quality in vehicle.

Keywords : car interior ; volatile organic compound ; emission characteristics ; evaluation standard

随着汽车行业的迅速发展, 汽车内饰非金属材料散发的挥发性有机物(VOC)对乘员舱环境造成的不利影响已成为重要的关注点。据报道, 人们一生之中平均有 5.5% 的时间是在汽车内度过的^[1]。车厢是一个体积相对较小的封闭空间, 汽车内饰非金属材料(如塑料面板、座椅和地毯等)在光照、氧气和潮湿等环境下会导致降解小分子的加速释放和老化, 并易产生联合作用, 使车内 VOC 的含量升高, 在新车中尤为严重^[2-3]。因此, 实施汽车车内 VOC 的管控举措, 保障消费者身体健康安全, 研究汽车内 VOC 的种类及释放来源具有重要意义。笔者从汽车车内 VOC 的排放特性、控制方法和评价体系三个方面进行阐述, 为改善车内空气质量的研究提供借鉴。

1 车内VOC来源

静止状态下, 新、旧车内的 VOC 浓度及种类主要由汽车品牌、车内温度和车龄等因素决定。而车内产生 VOC 的原因有多方面, 主要来源是汽车内饰材料及其工艺、车辆废气和空气环境^[4]。

汽车内饰材料及其工艺是产生 VOC 的最大来源, 内饰零部件常用的加工工艺有注射成型、热压成型、发泡成型和喷漆、真空吸附、水转印和胶黏剂黏接等, 加工过程中辅料的使用是产生 VOC 的主要原因之一。张坚等^[5]分析了汽车内饰零部件的污染物来源, 并根据其制造工艺和零部件种类总结出四类车内的主要污染源, 认为车内 VOC 的来源主要受工艺和材料种类影响, 见表 1。

基金项目: 国家自然科学基金项目(NO.52372020)

通信作者: 刘晓, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高性能有机-无机复合材料、纳米复合材料的制备与性能研究

收稿日期: 2024-05-11

引用格式: 魏丽霞, 蔡扬扬, 刘晓. 汽车车内 VOC 控制技术和评价方法[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 173-178.

WEI Lixia, CAI Yangyang, LIU Xiao. Automotive VOC control technology and evaluation methods[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 173-178.

表1 车内VOC的主要来源
Tab.1 Sources of VOC in vehicles

Type	Parts	Manufacture	Pollutant
I	Dashboard, door trim panel	Injection, spray	Plastics, release agent, paint
II	Carpet, ceiling, side panel	Hot-press	Phenolic resin
III	Steering wheel, seat, sun shield	Foam, injection	Leather, foam-material
IV	Adhesives	Accelerator	Adhesive material

在内饰材料种类对整车VOC含量贡献的研究中,Liang等^[6]利用化学物质平衡模型(CMB)研究了新车中不同内饰零部件对车内VOC的贡献值,并评估了健康风险的主要来源。结果表明,地毯是车内VOC和癌症风险的最重要来源,座椅则是造成车载非癌症风险的主要原因。梁波等^[7]则认为汽车内饰零部件(顶棚、主仪表板、地毯、座椅和门护板)材质VOC的组成成分差异明显,VOC排放量与内饰所用的材质有关。Wang等^[8]利用初始排放浓度 C_0 、扩散系数 D_m 和分配系数 K 来表征内饰件(顶棚、地毯和座椅)六种典型VOC的排放行为。结果表明,乙醛在被测内饰件VOC种类中的排放浓度最高;还研究了温度对VOC关键参数的影响,当温度由25℃上升至65℃时, C_0 和 D_m 增加,而 K 值降低,由此认为汽车座椅是内饰件中VOC的最大排放源。Yang等^[9]研究了两种温度(25℃和60℃)下汽车内饰零部件(真皮座椅、仪表板、立柱和天窗)VOC的动态排放特性,发现VOC的浓度随温度升高增加3~36倍,但各组VOC之间并不呈线性相关,主要原因是各种VOC的排放机理不相同。

2 车内VOC的排放特性

汽车车内VOC的排放特征受环境温度、车龄等多种因素影响,且VOC的浓度会随着时间、温度和通风情况的变化而发生变化。Huang等^[10]对电动汽车中VOC的排放进行了21个月的现场测试,结果表明电动汽车的VOC排放速率和车厢温度呈正相关,并随着车龄的增大而降低,且不同种类VOC排放速率的衰减程度不同(烷烯烃排放速率随时间的衰减相对较大,酮、醛、酯和醇类排放速率不一定与车辆使用年限呈负相关)。

在封闭的状态下,新车车内VOC浓度会升高,而在行驶过程中,通风会显著降低车内的VOC含量。在对新车车内VOC种类的研究中,Lv等^[11]认为脂肪族、羰基和芳香族化合物是新车内VOC的主要来源,占比约71%;此外,在确定了41种VOC可能会存在820种组合,这些组合中,大约有50%的VOC在被测车辆中的组成成分相同,存在关联性。Xu等^[12]研究了7种二手车(约5年使用量)和8种新车(小于1年使用量)中8种VOC的浓度水平,结果显示新车的VOC浓度梯度普遍大于二手车。

对车内VOC污染源种类、衰减规律和排放特性等方面的研究,表明汽车车内VOC的排放量与内饰零部件的材料用量、展开面积、颜色和成分有明显的关联性,且排放规律各

不相同,准确控制汽车内饰常用材料的VOC含量,对降低汽车车内VOC含量具有重要意义。

3 控制内饰材料释放VOC的方法

汽车内饰非金属材料中包括塑料、发泡材料、涂料和胶黏剂等。在所有汽车内饰材料中,聚丙烯(PP)和合金材料是汽车内饰用量较大的材料。因此,从内饰材料的制备源头上减少VOC产生,能降低汽车车内整体的VOC含量。

3.1 PP材料

PP被广泛应用于汽车内饰零部件上。然而,PP材料在聚合、加工、运输和储藏等阶段都会释放VOC,且VOC产生的原因十分复杂。因此,在改善车内VOC的专利申请方向上主要以PP材料为主^[13]。此外,主要从PP材料的制备和改性方法上进行VOC含量的控制。

3.1.1 PP材料改性

PP材料中VOC的释放是因高温氧化而发生降解反应产生的^[14-15]。郑云磊等^[16]利用熔融浸渍法制备长玻纤增强PP复合材料,并研究了不同类型的PP材料和聚合工艺对复合材料VOC散发性的影响。结果表明,PP原材料自身VOC的散发性会影响最终复合材料的散发性,选择合适的浸渍温度与时间、热处理工艺参数能够显著降低复合材料VOC的散发性。Meethal等^[17]利用除味剂与挥发性小分子结合,将挥发性小分子转化为分子量较大、可以固定在聚合物中不易挥发出来的大分子从而降低材料VOC的释放。Belaissaoui等^[18]利用化学除味剂分解挥发性小分子有机物,并配合真空或汽提工艺使其脱离PP基体,从而达到降低聚合物中VOC含量的目的。董莉^[19]以PP为基料,采用成核剂和除味剂复配,制备了高光泽、低气味的PP复合材料;自制改性nano-ZnO除味剂使PP材料的气味等级降低了1.5,既提高了材料的力学性能,又进一步降低了材料的气味等级;此外,还将HPN-20E和nano-ZnO进行复配,制备了EPZ30R材料,并进行了气味性测试。结果表明,当两种改性剂的添加比例为2:3,总用量为0.1%时,所制备材料的VOC和雾度(FOG)值较小。因此,通过添加VOC抑制剂的方法,也能达到降低PP材料VOC含量的目的^[20]。

3.1.2 PP材料制备

氢调法能够在PP原料聚合反应中控制其相对分子量及其分布,通过在聚合反应过程中添加氢气来终止链增长,产物不存在叔烃等小分子有机物,能大幅降低PP材料中的VOC含量。陈桂吉等^[21]研究了PP材料的不同制备方法对PP材料中VOC含量的影响,认为氢调法生产的PP材料的VOC含量要明显低于过氧化物法。闫溥等^[22]利用氢调法制备PP材料,通过添加除味母粒LDV1040,使复合材料的VOC含量显著降低,同时辅助真空脱挥系统进一步降低小分子材料的VOC含量。杨进华^[23]利用氢调法制备抗菌无纺布用PP树脂,制备的PP材料的VOC含量远低于市售降解法生产的PP树脂。

吸附法具有低成本、低能耗和吸附剂可再生重复利用等

优点,是控制PP材料VOC释放的理想方法。吸附法可分为物理吸附(范德华力)和化学吸附(吸附剂吸附质之间的化学反应)两类^[24]。物理吸附法理论上可以对任何挥发性小分子进行吸附,在VOC吸附体系中,活性炭、硅胶、金属氧化物和分子筛等多孔材料是目前使用最多的吸附剂^[25]。化学反应吸附极其复杂,但吸附的选择性较强,使用时需要明确VOC种类。国内外学者对吸附反应也进行了相关的研究,如Kim等^[26]研究了火山灰对生物淀粉填充的PP复合材料VOC含量的影响,结果表明,PP复合材料中甲苯类小分子的含量与火山灰的掺加量呈负相关;此外,进一步研究了沸石分子筛对PP材料VOC的影响,当沸石分子筛含量在3%时,PP材料VOC的含量明显降低^[27]。范开鑫等^[28]研究了两种吸附剂(JH-200A和PHVOCC01)对PP复合材料气味等级和VOC含量的影响,两种吸附剂均能明显降低PP复合材料的VOC含量,且具有吸附协同作用。张迪^[29]利用多孔轻质页岩蛋白石作为PP复合材料的填充物,在保证材料总体性能的情况下,大幅度降低了PP复合材料的VOC释放。此外,吸附剂控制PP材料的VOC含量及吸附机理也有相关研究^[30]。

3.2 ABS及合金材料

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)塑料是汽车车内常用的塑料,通常与聚碳酸酯(PC)以合金塑料的形式出现。ABS相可以在PC相中形成“海岛结构”,从而提升合金的冲击性能;并且ABS具有良好的尺寸稳定性和表面装饰性,被广泛应用于汽车内外饰零部件^[31]。在ABS材料的VOC来源上,根据Potter等^[32]的研究结果,认为ABS产生VOC的主要原因是在聚合过程时未反应单体的残留和后续加工过程中高分子链段的热氧化降解。

3.2.1 ABS材料

对于ABS材料的VOC控制方法上,Wojtyla等^[33]研究了ABS材料在3D打印过程中VOC的挥发情况,结果表明,在挥发性有机化合物的释放种类中,苯乙烯是主要的释放源。夏琪琪等^[34]以稻草纤维和ABS为原料制备稻草纤维/ABS复合材料,并对复合材料的VOC进行分析,结果表明,苯类及烷烃物质的释放源是ABS,通过添加活性炭能够显著降低复合材料VOC释放。李永华等^[35]针对ABS产品残留单体含量高等问题,采用超临界萃取工艺对本体ABS树脂制备工艺进行了优化,结果表明, α -甲基苯乙烯线性二聚体制备得到的产品中总VOC含量最低。李炜^[36]利用本体法加入链转移剂,并控制挤出模温、脱挥系统真空度和平板换热器温度,降低了ABS树脂中VOC的含量。李晶^[37]采用本体法聚合制备ABS原料并通过双真空脱挥(真空度为 -0.08 MPa),材料的挥发性有机化合物含量下降了80%~90%。通过添加助剂也能降低ABS的TVOC含量^[38]。上述研究主要从添加吸附剂、制备工艺方向,对ABS材料的VOC含量进行控制。

3.2.2 合金材料

PC和ABS可共混而成PC/ABS合金塑料,其在豪华车用量可达5~10 kg/车,而材料中的芳香烃、脂肪烃等挥发性

物质,在高温下的挥发性更加明显,控制VOC含量的释放较为复杂^[39]。陈晓东等^[40]通过添加气味吸附剂和萃取剂来降低PC/ABS的VOC含量。结果表明,当吸附剂和萃取剂添加质量分数分别在0.5%和1.5%时,其VOC的含量比纯PC/ABS的降低了57.9%。申娟等^[41]认为ABS材料中胶的含量较高时,加工过程中易导致分解而产生小分子气体,增加VOC含量。也有相关专利对制备低VOC的PC/ABS材料的控制技术进行了研究^[42-43]。此外,PC/ASA合金由于引入了不含双键的丙烯酸酯橡胶,耐候性比ABS提高了10倍,而对VOC含量的控制仍然以工艺优化为主^[44]。刘杨^[45]研究了PC/ASA合金的VOC来源,认为VOC的来源是原料以及合金生产过程中热降解产生的,通过降低螺杆转速以及进行真空、热处理(最佳条件为90℃/4h)是降低材料VOC的有效途径。目前主要降低塑料的VOC含量的控制手段是优化原材料制备工艺、添加助剂(吸附剂和萃取剂含量)等方面。此外,其他汽车用非金属材料用量占比较大的聚氨酯(PU)^[46-47]、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)^[48-49]的VOC控制技术的研究,控制手段多以添加吸附剂、抑制剂为主。

4 内饰VOC生命周期评价

研究发现,大约80%的能耗和环境问题来自于产品设计阶段,所以在产品前期选材、设计等阶段需充分考虑现有技术,从汽车内饰材料的整个生命周期进行评价,降低甚至避免对汽车车内环境产生负面影响。

生命周期评价(LCA)是一种全面分析产品或生产加工过程对环境影响的客观评价方法^[50]。而汽车LCA的本质是检查、识别和评估某种材料过程、产品或系统在其整个生命周期中对环境的影响。尽管LCA在工业生产制造过程中得到了广泛应用,但在汽车行业中,LCA研究主要集中在量化清洁燃料取代传统燃料对环境影响的方向^[51-52]。

在汽车车内VOC气体排放控制过程中,LCA也可以发挥出重要作用。在汽车材料及零部件级别的评价上,陈轶嵩^[53]以汽车电动座椅为例,从资源消耗和环境影响两方面构建了涉及面小的非金属材料能耗和排放的模型,对气体排放物进行了量化计算。戴文硕^[54]利用Gabi软件对黄麻/PP材料车门内饰板和ABS材料车门内饰板在全球变暖、酸化、富营养化、臭氧层的破坏和能源耗费效应五个方面进行了量化的LCA,研究结果显示,与ABS车门内饰板相比,黄麻/PP在五种量化中较低,更加符合节能减排、环境友好的评价。张雷等^[55]选择本体材料为PP+EPDM-TD20和PP+GF的两款车型的副仪表板进行了LCA,采用Gabi软件对生产制造过程中的物料、能源和排放进行统计,结果显示,本体材料为PP+EPDM-T20的副仪表板总成产生了更多的污染物。在整车级别的VOC量化上,李书华^[56]利用LCA软件(GREET)计算出混合动力汽车(HEV)、插电式混合动力车(PHEV)和纯电动汽车(BEV)全生命周期的VOC气体排放情况并进行了量化分析,全生命周期VOC的排放随着车动力系统电气化程度的提高而降低,其中BEV全生命周期的VOC排放量最低。

LCA 能确定零部件各个阶段对环境影响的原因,并且提出不同阶段对环境影响的解决方法,评价结果能够为企业设计绿色产品提供技术支持。然而汽车 VOC 排放的 LCA 并没有建立零部件级别的评价体系,制定汽车内饰零部件从生产到回收的全 LCA 体系,才能确定不同阶段 VOC 的排放量。

5 VOC 测试标准与方法

国内外标准都制定了新制造汽车的 VOC 限值和内饰材料 VOC 的测试方法,如 ISO 12219-1:2011 规定新生产的汽车上市前必须在 23 ℃ 的恒温环境中测试,国内外主要汽车生产国也都制定了详细的车内空气质量法规。受地区等条件的限制,车内空气管控的类型和限值也有所不同。

5.1 VOC 测试标准

车内 VOC 的测试级别主要分为整车测试、零部件测试和材料测试三个方面,见表 2。不同国家及地区对车内空气质量控制的项目及限值也不尽相同。因此,国际上还没有统一的汽车空气质量的标准和法规。除美国外,主要的汽车大国都制定了整车的 VOC 检测方法,ISO、欧盟、日本等国也都分别制定了各个级别的 VOC 检测方法。对比发现,国外测试法规更加倾向于对汽车内饰件和原材料的检测,通过对零部件和原材料的控制来限制整车 VOC 含量。此外,中国 HJ/T 400-2007 虽然规定了整车级别的 VOC 检测的方法,但没有从源头控制 VOC 排放限值,且不适用动态平衡下的 VOC 浓度测试。

表 2 汽车 VOC 的测试法规

Tab. 2 Testing regulations for vehicle VOC

Nation	Standard	Introduction	Level
EU, ISO	ISO 12219-1: 2011 Interior air of road vehicles-(part1/part2/part3), REACH regulation-2005	1400 harmful substances are regulated	Car, Part, Material
Germany	VDA(270:1992/275:1994/276:2005/277:1995/278:2011) DIN 13130-4:2004, DIN 75201:2011	Odor and organic emissions test Fogging test	Car, Part, Material
Japan	JASO M902-2007	Define test method	Part, Material
America	SAE J1756-2006 ASTM D6670-2013	TVOC≤10 μg/m ³	Car, Material
China	HJ/T 400-2007 GB/T 27630-2011	Specify VOC concentration value	Car
Russia	GOST R51206-2004	Dynamic testing	Car

5.2 VOC 检测方法

主机厂对 VOC 释放的测试类型一般分为材料样品释放测试、零部件(总成)释放测试和整车车内空气分析^[57]。整车级别的测试标准以欧、美、日系为主,对应方法分别为袋子法、顶空法和热解析法,零部件(总成)的测试方法按 VDA 276-2005 规定的平衡浓度排放气体的方式进行测试,而材

料级别以气味、甲醛、总碳、雾化等测试项目为主。中国的汽车企业执行 HJ/T 400-2007 和 GB/T 27630-2011 两种整车级别的 VOC 测试标准,并委托第三方进行测试,而零部件和原材料供应商则没有明确的测试标准,只是根据各个整车厂规定的标准进行测试,使检测方法也存在差异,汽车内饰零部件和原材料 VOC 的测试方法见表 3^[58]。

表 3 汽车内饰零部件和原材料 VOC 的测试方法

Tab. 3 Test methods for VOC in interior parts and raw materials

Method	Standard	Automobile brand	Level
Sampling bag	JASOM902-2007	Toyota, nissan, honda	Part, material
Head space	GW 8081-2005	Volkswagen, GM	Material
Testing chamber	VDA 276-2005	Volkswagen, BMW	Part
Thermal analysis	D10 5495-2008	Citroen, peugeot, volkswagen	Material
Formaldehyde volatilizing	D40 5535-2009	Citroen, peugeot, volkswagen	Material

不同测试方法都有其优缺点及适用范围。在静态条件下,内饰材料的 VOC 可以用顶空法测试,在动态条件下,热解析法则适用于动态条件下的测试。车内 VOC 含量是所有不同内饰零部件释放的总和,不能将排放水平单独归因于某一种材料。检测舱法是将内饰件所用的材料逐一检测,评估每种材料对车内 VOC 的贡献值。在上述测试方法比较中,综合取样程序、检测设备、测试成本和测试结果稳定性等因素,采样袋法是一种较为简便的测试零部件和总成 VOC 挥发量的方法,对于不同面积材料的测试也能够做到灵活运用,检测成本较低,适合各个主机厂及零部件供应商对总成

和零部件的分析和测试,是目前较为主流的测试方法。此外,在应对不同国家和地区的检测法规时,主机厂都应从材料、零部件和整车三个层级对 VOC 排放进行检测与控制。

6 结论

车内 VOC 是多种因素共同作用的结果,内饰件是车内 VOC 释放的主要原因,其排放量与材料用量和展开面积呈正相关。在车用内饰原材料的制备方法中,树脂、助剂的选择以及工艺优化是目前控制 PP 材料 VOC 含量的主要方法,但存在工艺复杂、成本较高等问题。此外,LCA 能够有效预测汽车内饰零部件的生产、加工、储运等阶段 VOC 的含量和

排放分布,但无相对应的评价体系。在VOC标准评价方面,主要对内饰原材料申报要求和VOC含量限值两种方式进行限制,使汽车内饰材料的VOC测试结果满足标准和法规要求,VOC种类之间的协同作用也会对车内空气环境造成不良影响,多种VOC和其他污染物之间的联合作用尚无相关性研究。

针对上述研究进展,对控制车内VOC进行几点展望:(1)开发出低成本且性能好的低VOC车用内饰原材料,从原材料阶段控制VOC含量;(2)建立汽车内饰材料与温度相关的VOC动态排放特性,监测车内不同阶段的环境空气质量;(3)将内饰件VOC标准评价体系中VOC的种类、测试方法进行定期的更新;(4)完善整车、总成、零部件、材料的全流程管控,建立车用内饰零部件从原材料生产到废物回收过程的全LCA体系。

参考文献

- [1] KLEPEIS N E, NELSON W C, OTT W R, et al. Expo Anal Environ Epidemiol, 2000, 11(3):231-252.
- [2] CHEN Yechung. Science of the total environment, 2007(382): 228-239.
- [3] KRZYSZTOF, et al. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5):1 052-1 061.
- [4] KHAMUTIAN R, et al. Medical Journal of the Islamic Republic of Iran, 2015(29):229-236.
- [5] 张坚,等.海峡科学,2010(12):152-156.
ZHANG Jian, et al. Straits Science, 2010(12):152-156.
- [6] LIANG Bo, et al. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10(5): 1 677-1 684.
- [7] 梁波.山东化工,2019,48(20):248-251.
LIANG Bo, et al. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(20): 248-251.
- [8] WANG Haimei, et al. Environment International, 2020, 142. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105817.
- [9] YANG Shen, et al. Building and Environment, 2019, 170. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106599.
- [10] HUANG Wenjie, et al. Building and Environment, 2019, 168. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106465.
- [11] LV Mengqiang, et al. Building and Environment, 2020, 175. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106796.
- [12] XU Bin, et al. Indoor and built environment:Journal of the International Society of the Built Environment, 2018, 27(4):452-465.
- [13] 蒋宝林,等.汽车零部件. 2017(1):80-82.
JIANG Baolin, et al. Automobile Parts, 2017(1):80-82.
- [14] BERNSTEIN R, et al. Polymer Degradation and Stability, 2007, 29(7):2 076-2 094.
- [15] ROBERT B, et al. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93: 854-870.
- [16] 郑云磊,等.工程塑料应用,2020(12):58-61.
ZHENG Yunlei, et al. Engineering Plastics Application, 2020(12): 58-61.
- [17] MEETHAL B N, et al. Materials & Design, 2017(130):426-432.
- [18] BELAISSAOUI, et al. Energy, 2016(95):291-302.
- [19] 董莉.高光泽低气味聚丙烯的结构与性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.
DONG Li. Study on the structure and properties of high gloss and low odor polypropylene[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2019.
- [20] 中国石油化工股份有限公司. CN109694516B, 2022-03-29.
Chinese Petroleum & Chemical(Sinopec). CN109694516B, 2022-03-29.
- [21] 陈桂吉,等.合成材料老化与应用,2019,48(3):33-36,106.
CHEN Guiji, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(3):33-36,106.
- [22] 闫溥,等.合成树脂及塑料,2017,34(4):17-20.
YAN Bo, et al. Chinese Synthetic Resin and Plastics, 2017, 34(4): 17-20.
- [23] 杨进华,等.化工新型材料,2022,50(6):250-257.
YANG Jinhua, et al. New Chemical Materials, 2022, 50(6): 250-257.
- [24] 税永红.纺织科学与工程学报,2020(3):125-132.
SHUI Yonghong. Journal of Textile Science and Engineering, 2020(3):125-132.
- [25] ZHANG Zhelin, et al. Chinese Journal of Catalysis, 2013, 34(10): 1 797-1 810.
- [26] KIM H S, et al. Macromol Mater Eng, 2006, 291(10):1 255-1 264.
- [27] KIM H S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2008(101):3 247-3 255.
- [28] 范开鑫,等.工程塑料应用,2019(8):23-28.
FAN Kaixin, et al. Engineering Plastics Application, 2019(8): 23-28.
- [29] 张迪.聚丙烯复合材料中挥发性有机物(VOCs)的研究及微-介孔硅材料对VOC的吸附效果[D].长春:吉林大学,2019.
ZHANG Di. Study on volatile organic compounds(VOCs) in polypropylene composites and adsorption of VOCs by micro-mesoporous silicon materials[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [30] ZHU Lingli, et al. Journal of Hazardous Materials, 2020(389). DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.122102.
- [31] TJONG S C, et al. European Polymer Journal, 2000, 36(1): 123-129.
- [32] POTTER P M, et al. Environmental Science and Technology, 2019, 53(8):4 364-4 370.
- [33] WOJTYLA S, et al. Journal of Occupational & Environmental Hygiene, 2017, 14(6):D80-D85.
- [34] 夏琪琪,等.复合材料学报,2019,36(1):96-103.
XIA Qiqi, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(1): 96-103.
- [35] 李勇华,等.中国塑料,2019,33(6):24-30.
LI Yonghua, et al. China Plastics, 2019, 33(6):24-30.

- [36] 李炜. 化工生产与技术, 2019, 25(3):26-30.
LI Wei. Chemical Production and Technology, 2019, 25(3):26-30.
- [37] 李晶. 上海塑料, 2022, 50(2):51-55.
LI Jing. Shanghai Plastics, 2022, 50(2):51-55.
- [38] 李官霖. 塑料, 2018, 47(2):24-27.
LI Guanlin. Plastics, 2018, 47(2):24-27.
- [39] 李强, 等. 汽车工艺与材料, 2016(3):50-52.
LI Qiang, et al. Automobile Technology Material, 2016(3):50-52.
- [40] 陈晓东, 等. 中国塑料, 2018, 32(8):72-78.
CHEN Xiaodong, et al. China Plastics, 2018, 32(8):72-78.
- [41] 申娟, 等. 工程塑料应用, 2016, 44(4):39-43.
SHEN Juan, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4):39-43.
- [42] 杨燕, 等. CN103554867A, 2014-02-05.
YANG Yan, et al. CN103554867A, 2014-02-05.
- [43] 刘春艳, 等. CN106751658A, 2017-05-31.
LIU Chunyan, et al. CN106751658A, 2017-05-31.
- [44] KANG M S, et al. Korea-Australia rheology journal, 2006, 18(1):1-8.
- [45] 刘杨. 车用PC/ASA合金的制备与性能[D]. 华南理工大学, 2018.
LIU Yang. Study on the preparation and properties of PC/ASA alloy for vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [46] 武金娜, 等. 研究与应用, 2021(2):53-57.
WU Jinna, et al. Research and Application, 2021(2):53-57.
- [47] 赵福, 等. 工程塑料应用, 2021, 49(3):156-160.
ZHAO Fu, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3):156-160.
- [48] 于翔, 等. 中国塑料, 2020, 34(6):80-86.
YU Xiang, et al. China Plastics, 2020, 34(6):80-86.
- [49] 田桂桂, 等. 工程塑料应用, 2021, 49(6):42-47.
TIAN Guigui, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6):42-47.
- [50] VOGON B W, et al. Life-Cycle assessment: Inventory guidelines and principles[R]. Washington DC: US. Environmental Protection Agency, 1993.
- [51] 吴珊珊. 电动汽车生命周期评价方法及系统开发[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
WU Shanshan. Life cycle assessment method and system development of electric vehicle[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.
- [52] 任悦. 中国电动汽车替代燃油汽车的温室气体排放回收期[D]. 北京: 中国石油大学, 2023.
REN Yue. Hidden delays of climate mitigation benefits in the race for electric vehicle deployment[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2023.
- [53] 陈轶嵩. 汽车零部件全生命周期生态效益评价研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
CHEN Yisong. A Study on life cycle ecological benefits assessment of automotive parts[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [54] 戴文硕. 汽车内饰天然纤维复合材料性能研究及生命周期评价[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
DAI Wenshuo. Research on performance and life cycle assessment of natural fiber reinforced polypropylene composites for automobile interior[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [55] 张雷, 等. 汽车工程学报, 2015(5):264-269.
ZHANG Lei, et al. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2015(5):264-269.
- [56] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LI Shuhua. Life cycle assessment and environmental benefits analysis of electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [57] 郭瑞华, 等. 汽车零部件, 2018, 125(11):99-104.
GUO Ruihua, et al. Automobile Parts, 2018, 125(11):99-104.
- [58] 庞会霞. 广州化工, 2020, 17(9):68-70.
PANG Huixia. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 17(9):68-70.